# 제지공정공학
# 기초와 응용

**PAPERMAKING PROCESS ENGINEERING**
PRINCIPLES AND APPLICATIONS

한국펄프종이공학회

# 제지공정공학
# 기초와 응용

**PAPERMAKING PROCESS ENGINEERING**

PRINCIPLES AND APPLICATIONS

(사)한국펄프종이공학회

# PAPERMAKING PROCESS ENGINEERING

## PRINCIPLES AND APPLICATIONS

# 제지공정공학

## 기초와 응용

한국펄프종이공학회

한국펄프종이공학회는
대한민국 제지인의 성장과 제지산업의 발전을 위해
본 도서의 발간을 적극 지원해 주신
무림그룹에 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

MOORIM

# 머리말

우리나라 제지산업이 세계 10대 지류 생산국으로서 국제적 위상을 확고히 한 지도 수십 년이 되었다. 우리 제지산업이 이처럼 성장할 수 있었던 배경에는 설비와 기술이 부족했던 시절, 남다른 열정과 헌신으로 현장에서 어려움을 극복해 온 수많은 제지기술인의 노고가 있었다.

산업의 지속적인 발전을 위해서는 개인의 노력과 헌신이 의미 있는 결실로 이어질 수 있도록 이끌어 주는 방향타가 필요하다. 그 방향타는 바로 문제를 정확히 이해하고 과학적으로 분석하는 지식과 기술이라 할 수 있다. 오늘날 인터넷에는 방대한 정보가 넘쳐나지만, 우리나라 제지기술인들이 실제 현장에서 필요로 하는 핵심 기술을 체계적으로 이해할 수 있도록 도와주는 제지기술 전문 교재는 많지 않아 아쉬움이 컸다.

이러한 아쉬움을 해결하고자 한국펄프종이공학회에서는 제지기술의 핵심 내용을 체계적으로 담은 기술서적을 기획하였다. 그 첫 번째 결실이 바로 『제지공정공학: 원리와 응용』이다. 본서는 산업 현장에서 땀 흘리고 있는 제지기술인들의 궁금증을 해소하고 실무 역량을 높이는 데 도움을 주는 것은 물론 앞으로 우리나라 제지산업을 이끌어 갈 미래의 제지기술인들이 대학에서 체계적으로 학습할 수 있도록 하자는 바람도 함께 담고 있다.

이러한 목표를 실현하기 위해 전국 8개 대학에서 제지를 교육하고 있는 교수진이 공동 저자로 참여하였다. 각 저자는 학문적 전문성과 교육적 활용성을 함께 갖춘 교재를 만들기 위해 기초 이론부터 산업 현장의 실무, 최신 기술 동향에 이르기까지 폭넓은 내용을 충실히 담아내고자 노력하였다. 그 결과 본서는 대학 교재는 물론, 현장 기술인들의 실무 지침서로도 폭넓게 활용될 수 있도록 구성되었다.

한국펄프종이공학회 창립 60주년을 맞아 본서의 집필에 참여한 모든 저자는 우리 제지산

업의 미래를 위한 마음으로 귀중한 원고를 무상으로 제공해 주셨다. 덕분에 한국펄프종이공학회는 대한민국 제지산업의 현재와 미래 발전에 작지만 의미 있는 기여를 할 수 있게 되었다.

한국펄프종이공학회의 이러한 노력에 공감하신 무림그룹 이도균 사장께서 본서의 발간과 인터넷을 통한 무료 배포가 가능하도록 아낌없는 지원을 해 주셨다. 그 덕분에 본서는 오늘과 내일의 모든 제지기술인이 언제 어디서나 자유롭게 활용할 수 있는 온라인 기술정보로 자리매김하게 되었다.

이외에도 여러 기관과 업체에서 도움을 주셨다. 본서에 수록된 각종 그림과 사진의 사용을 허락해 주신 한국펄프종이공학회, The Pulp and Paper Fundamental Research Society, Technical Association of the Pulp and Paper Industry, BioResources, Valmet, Voith 등 여러 기관과 업체에 깊은 감사의 말씀을 드린다. 이외에도 송강산업 송재필 사장, 무림 김노영 팀장, 디자인 페이지 이지윤 작가 등 여러분이 본서의 발간에 큰 도움을 주었음을 밝힌다.

이 책이 오늘의 대한민국 제지기술인에게는 실무에 도움이 되는 든든한 길잡이가 되고, 미래의 제지기술인에게는 제지공학을 배우고 발전시키는 소중한 이정표가 되기를 진심으로 바란다.

저자를 대표하여

한국펄프종이공학회 22대, 25대 회장

서울대학교 명예교수 **이학래** 씀

# CONTENTS


## 1 종이의 역사와 제지산업 개요

1 종이의 활약 010
2 종이의 분류 011
3 종이 이전의 기록재료 012
4 종이의 기원과 전래 014
5 한지의 역사와 역할 015
6 한지의 제조와 특성 019
7 국내 제지산업의 현황 020
8 제지산업과 환경 보전 023
9 제지산업과 기술 024
10 탈플라스틱 소재로서의 종이 025
11 제지산업의 당면과제 026
12 제지산업의 미래 027

## 2 종이의 원료

1 펄프와 종이, 목재의 지속가능성 030
2 펄프 및 종이 생산을 위한 원료 035

## 3 펄핑공정

1 펄프원료의 종류 056
2 펄프의 해리 057
3 펄퍼의 형태 057

## 4 리파이닝 공정

1 리파이닝 공정 개요 064
2 리파이닝 기작 및 효과 068
3 리파이너의 종류와 구조 077
4 리파이너 플레이트 086
5 리파이닝 이론 093
6 저강도 리파이닝과 고강도 리파이닝 104
7 리파이너의 운전 111
8 리파이닝 공정의 디지털화와 스마트 제어 129
9 지속가능한 리파이닝 전략 131
10 품질평가와 데이터 분석 132
11 현장 트러블슈팅 133
12 지종별 리파이닝 조건 매뉴얼 135

## 5 제지공정 내 이물질 제거

1 서론 142
2 클리닝 시스템(Cleaning system) 144
3 탈기 시스템 151
4 스크린(Screen) 시스템 154

## 6 공장조절제의 활용

1 보류 향상제 166
2 스케일 제어 기술 184
3 피치(pitch) 및 스티키(stickies) 제어 기술 190
4 소포제 기술 194
5 슬라임제 197

## 7 헤드박스와 초지부


| | | |
|---|---|---|
| 1 | 서론 | 204 |
| 2 | 지층 구조 형성 관련 주요 개념 | 205 |
| 3 | 어프로치부 | 209 |
| 4 | 헤드박스 | 213 |
| 5 | 초지부의 기능과 운전 | 232 |


## 8 백수시스템


| | | |
|---|---|---|
| 1 | 백수시스템의 개요 | 256 |
| 2 | 물과 백수의 특성과 수질 | 260 |
| 3 | 백수 관리 시스템 | 270 |
| 4 | 백수 처리 및 회수 시스템 | 279 |


## 9 압착부


| | | |
|---|---|---|
| 1 | 압착부 개요 | 290 |
| 2 | 압착부 공정 원리 | 292 |
| 3 | 압착부 구성요소 및 공정영향인자 | 295 |
| 4 | 압착탈수부 설비 종류 | 305 |
| 5 | 압착부의 영향 | 309 |
| 6 | 압착부 효율증대 방안 | 317 |


## 10 건조부


| | | |
|---|---|---|
| 1 | 건조공정 개요 | 324 |
| 2 | 실린더 건조부 | 325 |
| 3 | 건조와 종이품질 | 333 |
| 4 | 열전달과 포켓 환기 | 336 |
| 5 | 증기 공급방식 | 340 |
| 6 | 건조부 환기장치 및 열회수 | 342 |
| 7 | 결론 | 345 |


## 11 표면사이징


| | | |
|---|---|---|
| 1 | 서론 | 348 |
| 2 | 표면사이징 소재 | 349 |
| 3 | 표면사이징 공정 | 364 |
| 4 | 최신 동향 및 적용 사례 | 380 |


## 12 캘린더링, 권취 및 포장


| | | |
|---|---|---|
| 1 | 캘린더링의 정의 | 388 |
| 2 | 캘린더링의 역사와 기술 발전 | 389 |
| 3 | 캘린더링의 기본 원리 | 390 |
| 4 | 캘린더링 유형 | 394 |
| 5 | 권취 | 402 |
| 6 | 포장 공정 | 410 |


## 13 탈묵펄프 제조


| | | |
|---|---|---|
| 1 | 탈묵용 종이자원의 선별 | 416 |
| 2 | 탈묵용 종이자원의 해리 | 420 |
| 3 | 탈묵용 종이자원의 정선 공정 | 431 |
| 4 | 탈묵 공정 | 441 |
| 5 | 탈묵펄프의 표백 | 446 |
| 6 | 결론 | 454 |


## 14 종이의 친환경성


| | | |
|---|---|---|
| 1 | 서론: 종이는 왜 친환경 소재인가? | 458 |
| 2 | 원료의 지속가능성 | 460 |
| 3 | 종이 생산 과정의 환경 영향 | 466 |
| 4 | 종이의 재활용성과 생분해성 | 479 |
| 5 | 친환경 인증 | 482 |
| 6 | 친환경 종이 제품 | 485 |
| 7 | 요약 및 결론 | 488 |


이 책은 **표지**_ 네오스타 스노우화이트 250g/㎡ **내지**_ 네오스타 S플러스 80g/㎡ 백색으로 만들었습니다.



**이 학 래** 서울대학교 교수

**2021 – 현재** BioResources(USA) Associate Editor
펄프종이기술 편집위원장
**2019 – 2023** 대통령직속 농어업 농어촌특별위원회 위원
**2016** 제25대 한국펄프종이공학회 회장
**2011 – 2015** 서울대학교 농업생명과학대학 학장
**2011** 한국펄프종이공학회 가산상
**2010** 제22대 한국펄프종이공학회 회장
**2010** 서울대학교 학생처장

lhakl@snu.ac.kr

# 1

# 종이의 역사와 제지산업 개요

# 1. 종이의 활약

종이는 우리 생활 곳곳에 있다. 작은 영수증에서부터 큰 택배상자에 이르기까지 그 크기와 쓰임새도 다양하다. 후한 시대 중국의 채륜(蔡倫)에 의해 종이가 발명된 A.D. 105년경, 종이의 가장 중요한 쓰임새는 기록재료였다. 이후 종이는 세계의 역사를 기록하고 전달하는 핵심 매체로서 기능해 왔다. 역사 기록뿐 아니라 과학적 발견, 문학적 상상력과 철학적 사유 등 인류 문명의 모든 노력과 성과가 종이 위에 기록되어 인류의 기억으로 전승되어 왔다.

종이는 또 편지와 전보, 신문 등의 형태로 사람들 간의 소통과 소식의 전파를 도왔고, 지폐나 유가증권의 형태로 경제의 근간을 유지하는 데에도 큰 역할을 해왔다. 산업사회에 들어서면서 종이는 각종 물자를 보호하기 위한 포장재료로 널리 사용되었고, 오늘날에는 개인이 인터넷을 통해 주문한 물건을 배송하기 위한 포장재와 스티커로 쓰이고 있다. 이뿐만 아니라 종이는 거실과 식탁에서 우리의 일상생활을 돕는 조력자로, 화장실에서는 위생을 책임지는 용도로 우리의 삶 전반에 깊숙이 스며들어 있다.

최근 들어 인터넷과 스마트폰의 일상화로 인해 종이가 맡아왔던 정보 전달 매체로서의 역할은 크게 축소되고 있다. 하지만 포장 재료로서의 종이의 역할과 기능은 정보화 사회에서 더욱 부각되고 있다. 특히 난분해성 물질인 플라스틱 사용의 급속한 증가로 발생하는 환경오염 문제를 근원적으로 완화할 수 있는 대체 소재로 종이가 크게 주목받고 있다. 특히 우리나라의 종이 재활용률은 90%에 육박하며, 이는 플라스틱의 재활용률에 비해 3배 이상 높은 수치이다. 이러한 점에서 종이는 지구 환경 보전 측면에서 우수한 특성을 지니고 있다. 뿐만 아니라 탄소중립적 특성으로 인해 소각 시 대기 환경 부하가 적고, 천연소재로 만들어져 자연에서 잘 분해되는 장점도 가지고 있다. 나아가 새로운 나노소재의 원료로, 2차 전지와 각종 화학 산업의 핵심요소로 쓰임새를 넓혀가고 있는 펄프와 종이의 미래는 새로운 기술적, 산업적 도전을 기다리고 있다.

우리나라
종이
재활용률
**90%**



## 2. 종이의 분류

종이제품은 평량이 150g/㎡ 이상이며 두께가 0.3㎜ 이상인 판지와 그 외의 종이로 대별하며, 용도에 따라 도표 01-01과 같이 분류된다.

종이는 용도와 특성에 따라 신문용지, 인쇄용지, 크라프트지 그리고 위생용지 등 기타지로 구분된다. 판지는 주로 포장에 사용되는 두껍고 평량이 높은 종이로 표면에 백색의 천연펄프를 사용하거나 안료 코팅을 한 백판지와 재활용 종이자원을 주원료로 제조한 골판지원지로 구분된다.

이와 같은 일반적인 종이와 판지 외에도, 향후에는 새로운 기능을 가진 특수지와 기능지가 지속적으로 개발되어 다양한 산업분야와 일상 생활 전반에 걸쳐 활용될 것이다.



**도표 01-01.** 종이제품의 분류

| | | |
|---|---|---|
| 종이 | 신문용지 | 신문인쇄용지 |
| | 인쇄용지 | 도공지: 카렌다, 카탈로그 등 고급 인쇄물 |
| | | 백상지: 고급서적, 고급 인쇄물 등 |
| | | 중질지: 일반서적, 교과서, 잡지 등 |
| | 크라프트지 | 충포대: 서류봉투 등 |
| | 기타 | 위생용지: 화장지, 티슈지, 미용지 등 |
| | | 박엽지: 사전, 성경책 등 |
| | | 기타: 도화용지, 레자크, 정보용지 등 |
| 판지 | 백판지 | 도공 백판지: 약품, 의류, 신발상자 등 |
| | | 비도공 백판지 |
| | 골판지원지 | 라이너: 골판지 상자의 표면지 |
| | | 골심지: 골판지 상자의 중간부분 |
| | | 황판지 등 특수 용도의 판지 류 |

## 3. 종이 이전의 기록재료

### (1) 문명발상지의 기록재료

인류는 오래전부터 석판, 짐승의 뼈, 거북의 등껍질, 나뭇잎과 나무껍질, 점토판, 양피지, 직물 등 다양한 재료를 기록 매체로 활용해 왔다.

인도의 인더스강 유역에서는 기원전 약 3,000년경부터 문명이 형성되기 시작하였으며, 종교적·의례적 내용을 기록하기 위한 재료로 나무껍질, 나뭇잎, 목질부 등이 사용되었다. 특히 다라나무의 껍질과 잎을 가공한 패다라(pattra)를 이용하여 불교경전을 기록한 패엽경(貝葉經)이 전해지고 있다. 패다라는 다라나무 껍질을 길쭉한 사각형 형태로 절단한 뒤, 송곳이나 칼 등을 사용하여 문자의 획을 새기고, 그 홈에 먹을 채우거나 붓과 먹을 사용하여 경전 내용을 기록한 것이다.

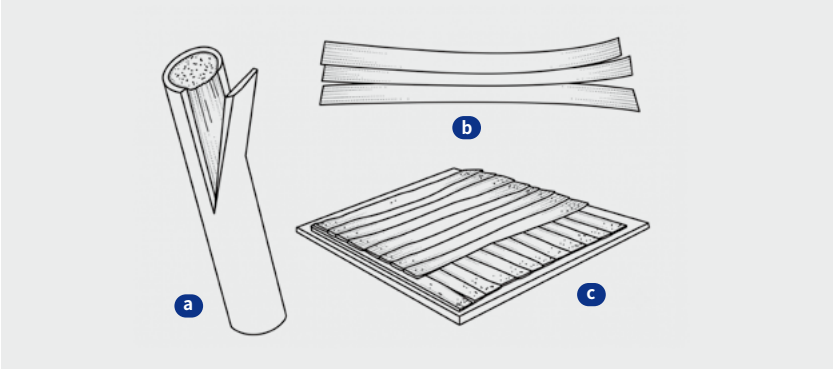
메소포타미아 지역에서는 점토인장이 사용되었다. 주로 조그만 점토판에 그림문자나 음표문자, 후대에는 설형문자를 기록하여 행정이나 경제적 목적으로 사용하였다. 이러한 점토판은 내구성과 보존성이 우수하다는 장점이 있었으나, 무겁고 취급이 번거롭다는 한계를 가진 재료였다.

한편 중국에서는 기원전 3,700년 이전 시기의 것으로 추정되는 동물의 뼈에 기록한 복골(卜骨)이 출토된 바 있다. 이 외에도 대나무로 제작된 죽간(竹簡)이 주로 중국 남부 지역에서 사용되었으며, 대나무가 자라지 않는 중국 북부 지역에서는 나무로 만든 목간(木簡)이 기록재료로 사용되었다. 기원전 5세기부터 기원후 6세기까지 견백(絹帛), 면포, 마(麻) 등의 직물재료가 기록 매체로 사용되었다. 특히 비단이나 흰 천을 뜻하는 견백은 전국시대 이후 죽간과 함께 약 천여 년간 기록 재료로 사용되었는데, 운반과 보관이 용이하다는 장점을 지녔으나 값이 비싸 일반 민중이 널리 사용하기에는 제약이 있었다.

### (2) 파피루스와 양피지

오래전부터 다양한 재료가 기록재료로 사용되어 왔으나, 이집트 나일강 유역에서 사용된 파피루스(papyrus)는 가장 혁신적인 기록 재료의 하나로 평가된다. 기원전 약 3,100년경부터 사용된 파피루스는 당시 이집트와 북아프리카 지역이 주된 자생지였던 다년생 식물로 크기가 최고 4 m에 이르며, 단면은 삼각형 형태를 띤

그림 01-01. 파피루스 제작 과정




출처: Smook, G.A., (2002) Handbook for Pulp & Paper Technologists, Angus Wilde Pub. Inc.)

다. 파피루스에서 기록재료로 쓰인 부분은 바로 이 삼각형의 단면을 지닌 줄기의 내부 조직이었다. 파피루스는 그림 01-01과 같이 제작되었다. 우선 파피루스는 줄기의 흰색 속대를 칼로 길게 잘라내어(a), 이를 나란히 배열하고(b), 그 위에 다시 줄기의 속대를 직각 방향으로 겹쳐 놓은 다음(c), 돌 등으로 눌러 압착하거나 두드린 후 건조하여 만들었다.

파피루스는 오늘날 종이를 의미하는 여러 언어의 어원이 되었다. 영어의 페이퍼(paper), 독일어로 파피에르(papier), 스페인어로 파펠(papel) 등은 모두 희랍어 파푸로스(papuros)와 라틴어 파피루스(papyrus)에서 유래한 것이다. 또한 영어에서 성경을 의미하는 바이블(Bible) 역시 희랍어 비블로스(biblos) 또는 비블리아(biblia)에서 비롯된 말로, 이는 고대 희랍인들이 파피루스 줄기의 속대를 부블로이(bubloi)라고 부른 데에서 유래한다.

파피루스는 외형과 기능 면에서 종이와 유사하나, 식물 세포를 섬유상으로 분리하지 않은 상태에서 제작되었기 때문에 식물의 조직 결이 그대로 남아있다. 또한 속대를 수직으로 교차 배열하여 제조한 구조적 특성으로 인해 접을 경우 쉽게 부러지는 단점이 있어, 항상 펼쳐진 상태나 두루마리 상태로 보관할 수밖에 없는 것이 단점이다.

한편 파피루스는 기록재료로뿐만 아니라, 고대 이집트에서 미라 제작에도 활용되었다. 미라 제작의 최종 단계에서는 시신 표면에 파피루스를 여러 겹 덧붙인 후 그 위에 채색하였다.

파피루스는 지중해 연안을 중심으로 한 유럽 지역에 대량으로 수출되었으나, 기원전 3세기경 그 수출이 금지되었다. 이러한 조치는 소아시아의 그리스 도시 국

가인 페르가몬이 알렉산드리아 도서관에 필적하는 대규모 도서관을 건립하며 급속히 성장하자, 이를 견제하기 위한 정치, 문화적 대응으로 이루어진 것으로 알려져 있다. 파피루스를 수입하여 기록 재료로 사용하던 지중해 연안 및 유럽 지역에서는 파피루스의 수출 금지 이후 대체 기록 재료를 모색하게 되었으며, 이 과정에서 양피지가 본격적으로 기록 매체로 활용되는 계기가 마련되었다.

양피지(parchment)는 기원전 약 150년경 소아시아의 페르가몬(Pergamun)이란 도시 이름에서 유래하였다. 양피지는 주로 소나 양의 가죽을 석회수에 약 열흘간 담가 표면의 털과 불순물을 제거하고, 다시 석회수 처리와 건조, 연마 과정을 반복하는 무두질 공정을 통해 제작되었다.

양피지는 파피루스와는 달리 접어서 사용할 수 있다는 장점이 있었으나, 두께와 무게 면에서 상대적으로 불편하다는 단점을 지니고 있었다. 일반적으로 100쪽 분량의 양피지 책 한 권을 만들기 위해서는 대략 10마리의 양이 필요했던 것으로 알려져 있다. 그럼에도 불구하고 양피지는 종이 이전의 기록 재료 가운데 가장 종이와 유사한 물성을 지닌 매체로 평가된다. 유럽지역에서는 종이가 전파된 이후에도 신분 증서나 외교 문서와 같은 중요 문서를 양피지에 기록하는 전통이 오랫동안 유지되었다.

## 4. 종이의 기원과 전래

예전의 기록 재료가 지닌 무겁고, 취급상의 불편함을 극복한 가볍고, 부드러우면서도 질기고 자유롭게 접었다 펼 수 있는 편리한 기록 재료인 종이는 중국에서 처음 등장하였다. 종이의 기원에 대한 명확한 자료는 전하지 않으나 후한서(後漢書) 채륜전(蔡倫傳)에 의하면 화제 원년(서기 105년)에 채륜이 인피섬유, 어망, 넝마 등의 식물성 섬유를 원료로 하여 종이를 만들었다고 기록되어 있다.

한자로 종이는 [紙]라 쓰는데 이는 '실'을 의미하는 '絲'와 이를 엮는 행위를 나타내는 '氏'가 결합된 형태이다. 이러한 문자 구성은 초기 종이가 어망의 폐물이나 실과 같은 섬유 재료를 엮어 제작되었음을 상징적으로 반영하는 것으로 해석된다.

그러나 채륜 이전 시기의 종이가 발굴됨에 따라, 종이의 발명과 역사는 채륜 이전 시기라는 점이 알려지게 되었다. 현재까지 발견된 종이 가운데 가장 오래된 것은 간쑤(甘肅)성 방마탄(放馬灘)에 있는 전한시대 묘의 부장품에서 발굴된 방마탄

지로, 이 종이는 기원전 180년에서 142년 사이에 제조된 것이라 추정된다. 이는 채륜 이전 시기에도 이미 종이가 있었음을 보여주는 중요한 고고학적 자료로 평가된다. 이러한 점에서 채륜은 종이의 최초 발명자라기보다는, 기존의 제지 기술을 체계화하고 제작 공정과 품질을 개선하여 종이를 실용적 기록 매체로 정착시키는 데 기여한 인물로 이해할 수 있다. 실제로 농경대신이었던 채륜은 종이제조 과정을 황제에게 보고하여 포상을 받았으며, 종이가 문서표기를 위한 보편적 소재로 사용되도록 하는 데 중요한 역할을 하였다.

중국에서 발명된 제지 기술은 300년경 우리나라를 거쳐 일본으로 전파되었으며, 동시에 중앙아시아를 경유하여 이슬람권과 유럽, 나아가 신대륙으로 전래되었다. 특히 우리 조상들은 종이의 전파 과정에서 중개적 역할을 수행함과 동시에, 독자적으로 발달한 매우 우수한 제지술을 지니고 있었다.

## 5. 한지의 역사와 역할

우리나라에서 전통적으로 제조되어온 종이는 한지(韓紙)라 하며, 중국의 선지(宣紙)나 일본의 화지(和紙)와는 달리 닥나무 껍질을 주된 원료로 사용하는 데 그 특징이 있다. '종이'라는 말의 어원이 닥나무 껍질을 의미하는 저피(楮皮)에 그 기원을 두고, '저피'가 '조회'를 거쳐 '종이'로 변화했다는 지적은 닥나무 껍질을 주재료로 하는 한지의 특성을 언어적 측면에서 설명하는 근거로 이해될 수 있다.

### (1) 삼국시대

우리나라에 종이를 만드는 기술이 언제 유입되었는지에 대해서는 정확한 시기를

그림 01-02. 무구정광대다라니경



단정하기 어렵다. 그러나 백제 근초고왕 대에 논어 10권과 천자문 1권을 가지고 일본으로 건너가 일본 왕의 태자 토도치랑자의 스승이 되었으며, 왕의 요청에 따라 군신들에게 경서를 가르쳤다는 왕인 박사(박사는 학문을 맡은 사람에게 붙이는 관직명)에 관한 '일본서기'와 '고사기'의 기록은 종이로 만들어진 책의 전래에 관한 기록으로서 주목된다. 또한 근초고왕 30년에 고흥 박사가 '서기'를 편찬했다는 기록은 4세기경 우리나라에서 종이가 제작, 사용되고 있었다는 사실을 뒷받침하는 근거이다. 이보다 시기적으로는 늦지만, '일본서기'에 고구려의 승려 담징이 610년에 백제를 거쳐 일본으로 건너가 채색과 종이, 먹, 연자방아 등의 제작 방법을 전하였다는 기록은 한반도에는 삼국시대에 이미 종이 제조기술이 활용되고 있었으며, 나아가 일본에 제지술이 전파되는데에도 중요한 역할을 하였음을 보여 준다.

이 외에 우리나라 삼국시대 한지에 관한 문헌 기록은 매우 제한적이며, 현존하는 실물 자료 역시 극히 드문 실정이다. 현재까지 밝혀진 자료 가운데 가장 오래된 실물 자료는 불국사 석가탑에서 발견된 '무구정광대다라니경(無垢淨光大陀羅尼經)'이다(그림 01-02). 이 경문의 조성 연대에 관해서는 몇 가지 견해가 제시되고 있으나, 불국사 중창 연대와 관련하여 751년설을 따르더라도 지구상에 현존하는 가장 오래된 목판 인쇄물이며, 우리나라에서는 가장 오래된 지류 문화재로 국보 126호로 지정되어 있다. '무구정광대다라니경'이 목판 인쇄물이라는 것은 글자체가 일정하게 정형화되어 있으며, 인쇄면에 나무의 결이 보이기 때문이다. 한편 '무구정광대다라니경'과 함께 종이의 역사에 중요한 의미를 지니는 또 다른 자료로는 신라 경덕왕 13년(서기 755년)에 제작된 '백지묵서화엄경' 이 있다. 이 사경은 백지 30매를 이어 제작한 길이는 약 14 m, 폭은 약 29 cm에 이르는 두루마리이다. 특히 '백지묵서화엄경'은 종이를 만든 사람과 지역이 명시되어 있다는 점에서 매우 이례적인 사료로서 제지사 연구에 더없이 중요한 자료가 되고 있다.

또한 1995년에는 지리산 화엄사 오층석탑에서 통일신라 시대의 종이에 불경을 필사한 사경으로 보이는 종이뭉치가 발견되었다. 이 유물은 화엄사가 통일신라 정강왕대에 축조되고, 이 시기가 사경의 제작 연대와 부합한다는 점에서, 9세기 후반인 정강왕 재위기(886년)에 제작된 종이가 아닌가 추측된다.

이와 같은 역사적 유물이 천 년이 넘는 지금까지 큰 손상없이 보존되어 있다는 사실은, 한지가 지닌 뛰어난 내구성과 보존성을 십분 보여주는 사례로 평가된다.

### (2) 고려시대

수공업의 전문화와 상품 생산의 진전이 이루어진 고려시대에는 지방 관청에 지전(紙田)이라는 공해전을 설치하고, 거기에서 들어오는 수입으로 종이, 먹, 붓 등을 구입하여 쓰도록 하였다. 이러한 제도는 수공업의 세분화와 확산이라는 사회·경제적 변화를 배경으로 성립한 것으로 이해된다. 특히 문종 대에는 양반 관료층을 대상으로 도서의 출판과 판매를 담당하는 관영 서점이 설치되었는데, 이는 당시 인쇄술과 제지술이 상당히 발전하였음을 보여준다. 인쇄술과 제지술의 발달은 필연적으로 대량의 종이 수요를 발생시켰으며, 이에 따라 전국적으로 닥나무 재배를 권장하고 제지업을 민간에 적극 권장하였다.

고려시대에 한지 수요가 양적으로 증가하게 된 다른 주요 요인으로는 국가에서 주도한 대대적인 불경 간행 사업을 들 수 있다. 고려 초기부터 거란, 여진, 몽고 등 북방 민족의 침입에 대비하는 것은 국가의 중요한 과제였으며, 이에 대한 대응 방안으로 현종 대부터 선종 대까지(1011-1087) 76년간 대장경 약 6,000권을 목판에 새긴 초조대장경을 조성하여 현화사에 봉안하는 불경 간행 사업이 이루어진 것은 대표적인 예이다. 이러한 불경 간행 사업은 인쇄 기술의 발전을 촉진함과 동시에, 막대한 양의 한지를 지속적으로 필요로 하는 구조적 요인으로 작용하였다.

몽골의 침입이라는 국가적 위기 속에서 조성된 재조대장경(再造大藏經)은 고려의 인쇄술과 제지술이 최고 수준에 도달했음을 보여주는 대표적 문화유산이다. 재조대장경은 초조대장경이 몽골의 침입으로 소실된 이후, 고종 대인 1236년부터 1251년까지 약 16년에 걸쳐 다시 조성되었으며, 총 8만여 장의 목판으로 이루어져 있다. 이 대장경은 문자 배열의 정밀성, 판각의 균일성, 인쇄의 정확성 등에서 동아시아 불교 인쇄문화의 정점으로 평가된다.

재조대장경의 완성도를 가능하게 한 핵심 요소 가운데 하나는 종이의 질적 우수성이었다. 대장경 인쇄에 사용된 고려지는 주로 닥나무 섬유를 원료로 한 한지로, 섬유 조직이 치밀하고 균질하며 인장 강도가 높아 인쇄 과정에도 쉽게 손상되지 않는 특성을 지니고 있었다. 또한 순수 천연재료로 만들어 장기간 보존에도 인쇄 상태가 안정적으로 유지될 수 있었다.

고려지는 국내에서뿐만 아니라 국외에서도 그 우수성이 널리 인식되었다. 중국에서는 고려에서 제작된 종이를 '고려지'라 칭하며 고급 종이로 평가하였고, 송·원대 문헌에서도 고려지가 서화 및 불경 인쇄에 적합한 재료로 언급되고 있다. 일본

역시 고려지를 귀중한 수입품으로 취급하였으며, 사경이나 중요한 문서 제작에 활용하였다. 이처럼 고려지는 단순한 기록 재료를 넘어, 고려의 기술력과 문화적 위상을 상징하는 교역품이자 문화 자산으로 기능하였다.

결과적으로 재조대장경은 고려의 국가적 신앙과 정치적 의지를 집약한 산물일 뿐만 아니라, 고려지의 국제적 명성을 실증적으로 보여주는 사례라 할 수 있다. 이는 고려의 제지술과 인쇄술이 동아시아 문화권 내에서 독자적이고도 선도적인 위치를 차지하고 있었음을 보여주는 중요한 역사적 증거로 평가된다.

### (3) 조선시대

조선시대에 들어와 한지 제조업은 가장 발달된 수공업 분야 중 하나로 성장하였다. 조선시대에는 국가 차원에서 한지 생산을 체계적으로 관리하기 위해 관영 제지 기관으로 조지소(造紙所)를 설치하였다. 나라에서 설치한 관영조지서는 서울 장의사동(현재의 세검정)에 위치하고 있었으며, 이를 통해 국가에서 필요로 하는 종이를 안정적으로 공급하고자 하였다.

고려시대에 이미 그 품질의 우수성을 인정받았던 한지는 조선시대에 이르러 더욱 양적인 팽창을 가져오게 되었다. 한지의 수요가 조선시대에 크게 늘게 된 데에는 세종의 적극적인 문화정책에 따른 서적 간행 사업의 확대를 들 수 있다. 다양한 관찬 서적 간행 사업으로 다량의 제지 원료가 필요해지면서 닥나무의 공급 부족 현상이 나타나기도 하였다. 부족한 닥나무를 보충하기 위해서 종자를 개량하는 한편, 짚, 보리짚, 죽피 등 대체 원료를 활용한 제지 방법을 모색하는 등 기술적 노력도 게을리하지 않았다.

이와 같이 조선시대의 한지 제조업은 국가 운영에 필수적인 기간 산업으로서 수공업 부문 가운데서도 매우 높은 비중을 차지하였다. 그러나 개화기 이후 서양의 양지 제지술이 도입되고부터 한지의 수요는 점차 감소하였고, 이와 함께 기술 발전의 정체와 자본의 영세성으로 현재는 겨우 명맥만을 유지하고 있는 실정이다. 그럼에도 불구하고 한지는 우리 전통 문화와 기록 유산을 지탱해 온 핵심 매체라는 점에서, 그 역사적·문화적 가치를 바탕으로 체계적인 보존과 계승, 그리고 현대적 활용을 통한 발전 방안이 지속적으로 모색될 필요가 있다.

## 6. 한지의 제조와 특성

### (1) 한지의 제조

한지를 만드는 과정은 매우 복잡하고 많은 손질이 필요하다. 특히 고품질의 종이를 생산하기 위해서는 무엇보다도 시간과 정성, 그리고 숙련된 기술이 필요하다. 이러한 특성으로 인해 과거에는 주로 농한기를 활용하여 정성을 들여 한지를 제작하였다. 한지의 제조 과정은 다음과 같이 정리할 수 있다.

먼저 닥나무는 11월부터 다음 해 2월 사이에 채취한다. 이 시기는 닥껍질의 섬유질이 잘 생성되어 있고 수분 함량이 적당하여 껍질을 벗기기에 유리한 시기이다. 채취한 닥나무는 커다란 솥에 넣어 삶은 뒤 차가운 시냇물에 담가 불린 다음, 겉껍질을 벗겨내고 안쪽의 흰 내피만을 남긴다. 이렇게 얻은 내피는 다시 솥에 넣고 잿물을 넣어 충분히 삶아 섬유조직을 연화시킨다. 삶은 내피는 참나무 방망이로 두들겨 섬유를 분리시키고, 이를 지통에 넣고 잘 풀어서 섬유질을 고르게 분산시킨다. 여기에 닥풀즙을 첨가하여 한지를 뜨기 위한 지료를 완성한다. 이후 장방형의 대나무 발이나 쇠머리풀 발을 발틀에 올려놓고, 발틀을 지통 속의 지료에 담가 전후좌우로 흔들면서 섬유질을 고르게 건져낸다. 지통 속에서 물질하는 횟수에 따라 종이의 두께가 달라진다. 이렇게 건져 올린 섬유질의 젖은 종이는 한 장씩 차례로 포개어 판자를 위에 놓고, 무거운 돌로 눌러 물기를 빼고 말리면 한지가 된다. 경우에 따라서는 완성된 한지의 품질을 더욱 향상시키기 위해 도침(搗砧)가공을 실시하기도 한다. 도침법이란 다듬이질 등 다양한 방법으로 종이를 반복적으로 두드리는 가공방법으로, 이를 통해 한지의 표면평활성과 광택을 한층 더 개선할 수 있다.

### (2) 한지의 특성

한지는 양지와 비교할 때 다음과 같은 물리화학적 특성을 가지고 있다[1].

첫째, 한지의 주원료인 닥나무 인피섬유는 섬유장이 목재 펄프에 비해 길어 인장강도, 인열강도, 내절도, 습윤인장강도 등이 월등히 강한 종이를 만든다.

둘째, 양지는 물의 침투를 방지하기 위해 산성조건에서 사이징 처리를 할 경우 종이의 보존성이 저하되는 문제가 있다. 근래에는 중성 초지를 함으로써 보존성을 개선하고 있으나, 여전히 다양한 화학물질이 사용되어 장기적인 보존성에는 한계

가 있다. 반면 한지는 천연 자숙제를 사용할 경우 종이의 강도를 향상시킬 수 있으며, 내구성과 보존성이 월등한 종이를 제조할 수 있다.

셋째, 한지는 통기성이 우수하고 감촉이 부드러우며, 접힘이 유연하고 강인한 특성이 있다. 또한 먹물에 대한 발묵 현상이 우수하고 흡수성이 빠르며, 방음성과 함께 계절에 따른 방한성 및 보온성도 양지에 비해 뛰어난 특징을 지닌다.

넷째, 전통적으로 닥풀을 사용함으로써 긴 닥나무 인피섬유를 단섬유화하지 않고서도 표면이 치밀하고, 평활도가 높으며, 광택효과와 촉감이 좋은 종이를 만들 수 있다.

중국의 전통지는 발묵성은 우수하나 보존성이 상대적으로 낮으며, 일본의 화지는 삼지닥나무 인피섬유를 주원료로 사용하여 한지에 비해 강도가 다소 떨어진다. 다만 쌍발뜨기 초지법으로 지합이 고른 장점이 있으나 지질은 한지에 비해 낮은 편이다.

한지의 제조 방식은 크게 수록한지와 기계한지로 구분된다. 수록한지는 다시 전통 수록한지와 개량식 수록한지로 나뉜다. 기계한지는 수록한지에 비해 대량 생산이 가능하며, 장망 혹은 장, 환망 복합 방식을 이용한 초지공정을 통해 제조되고 있다. 초지공정의 특성상 수록한지는 주로 서화용으로 사용되고 있는 반면, 기계한지는 장판지, 포장지 등 기타 용도로 사용되고 있다.

## 7. 국내 제지산업의 현황

전통적으로 한지는 수초지 방식으로 제작되어 왔으나, 근대 산업화의 영향으로 종이의 대량 생산 필요성이 커지면서 기계지(양지)가 도입되었다[2].

우리나라 최초의 기계지의 생산은 1902년 6월 16일 용산에 위치한 전환국 조지소에서 2대의 환망식 초지기를 이용해 지폐용지를 생산하면서 시작되었다. 이후 여러 지역에 제지설비가 도입되었으나, 비교적 제대로된 시설을 갖춘 곳은 전북 군산에 위치한 북선제지가 유일하였다. 하지만 이나마도 하루 생산량이 15 톤에 불과한 소규모 수준이었다[2].

1950년에는 제지공장 22곳에 초지기 32대가 설치되는 등 제지산업이 시설확장으로 안정되어 가던 중 한국전쟁으로 인해 다수의 시설이 파괴되었다. 전쟁 이후인 1956년에는 종이류 수입액이 우리나라 연간 총수입액의 22%인 1,300만 불

**도표 01-02.** 국내 연도별 지류 생산현황

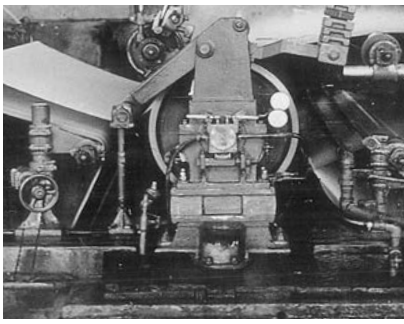
| 연도 | 신문용지 | 인쇄용지 | 포장용지 | 위생용지 | 백판지 | 골판지 원지 | 기타 | 합계 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2024 | 380 | 2,263 | 201 | 527 | 1,455 | 5,573 | 416 | 10,816 |
| 2022 | 504 | 2,420 | 229 | 547 | 1,477 | 5,646 | 429 | 11,254 |
| 2018 | 985 | 2,680 | 198 | 556 | 1,663 | 5,039 | 406 | 11,529 |
| 2014 | 1,422 | 3,042 | 195 | 449 | 1,508 | 4,543 | 460 | 11,622 |
| 2010 | 1,556 | 3,029 | 220 | 446 | 1,293 | 4,083 | 475 | 11,105 |

출처: 한국제지연합회, 국내제지 산업연도별 수급현황 http://www.paper.or.kr/sub_5/5_1_1.php

에 이르렀다. 이에 따라 정부는 해외 원조 자금을 제지공장의 개보수 및 신증설에 집중투자하였다.

1960년대에 들어서 우리나라의 급격한 경제성장에 힘입어 장망식 초지설비와 코터를 갖춘 신식설비가 지속적으로 설치되었다. 1963년에는 백상지 25 톤을 홍콩으로 처음으로 수출함으로써, 제지산업이 내수산업을 넘어 수출을 통해 지속성장이 가능한 산업으로 비전을 제시하기도 하였다.

이 시기의 대외무역 확대는 섬유, 가발 등 경공업제품의 포장에 적합한 저비용, 고품질 포장지에 대한 수요를 증가시켰으며, 국내 제지업계에서는 이에 부합하는 제품 개발에 성공하여 국가 수출력 강화에 크게 기여하였다. 1977년에는 종이생산량이 처음으로 100만 톤을 돌파하였고, 종이자급률도 92%에 이르게 되었다. 또한 이 시기에는 임산공학, 화학 등을 전공한 전문인력이 배출되어 아트지, 백판지, 크라프트지, 위생용지 등 다양한 제지 분야의 기술향상과 산업발전에 크게 기여하였다. 한편 전량 수입에 의존하던 화학펄프의 국내 공급을 위해 정부는 1980년 화학 펄프 공장을 건립하였으며, 이 공장은 현재 무림P&P로 명칭이 변경되었다. 1984년에는 중성지 개발에 성공하여 보존성, 백색도 및 강도가 우수한 인쇄용지를 보다 저렴한 가격에 생산, 공급할 수 있게 되었다[2].



장망식 초지 설비를 통한 백상지 대량 생산 체계 구축 (청구제지, 현 무림SP)

1990년대에는 중국으로의 백판지 수출이 크게 증가하였으며, 글로벌 시장에서 질적 경쟁력 강화를 위해 연구소 설립 등 연구·개발 활동이 확대되었다. 이 시기 제지산업은 사업의 대형화와 선진 경영 시스템 구축 등을 통해 획기적인 성장을 구가하였다. 그러나 1997년 IMF 외환위기로 인해 성장세가 둔화되면서 산업의 구조조정이 진행되었다.

1999년에는 각고의 노력으로 IMF 위기를 극복하고 종이생산량과 소비량에서 세

계 9위, 1인당 종이 소비량 세계 22위를 기록하는 등 제지강국의 기반을 마련하였다. 또한 지류 수출도 264만 톤으로 크게 증가하였다.

2003년에는 국내 지류 생산량 1,000만 톤에 이르는 시대가 도래하였다. 하지만 2000년대 들어 정보통신기술의 발달과 스마트폰의 보급은 제지 산업 구조에 큰 변화를 가져왔다. 전자매체의 확산으로 신문용지와 인쇄용지의 생산과 소비는 점차 감소하였으며, 그 경향은 현재까지도 지속되고 있다. 반면, 택배 산업의 급속한 성장과 함께 포장용지 특히 골판지 분야는 급속한 성장세를 나타내었다. 이에 따라 신문용지와 인쇄용지 생산 공정이 산업용지 라인으로 개조되는 등 제지산업의 구조적 변화를 불러일으켰다. 2018년에는 제지 산업의 생산액이 약 11조 원, 수출액은 약 31억 불에 이르러, 우리나라는 세계적인 제지 강국의 대열에 합류하였다.



우리나라 종이 생산량
**11.5** 백만톤

연도별 생산량을 살펴보면, 도표 01-02에서 보는 바와 같이 신문용지와 인쇄용지 생산량은 지속적으로 감소하고 있는 반면, 골판지원지의 생산은 꾸준히 증가하고 있다. 그 결과 전체 지류 생산량이 1천1백만 톤 수준에서 유지되고 있음을 알 수 있다. 이는 인터넷과 스마트폰의 확산으로 종이가 지닌 정보전달 매체로서의 역할이 축소되는 가운데 택배 산업 등의 급속한 성장으로 상품 포장에 필요한 산업용지의 수요가 크게 증가하고 있기 때문이다[3].

우리나라는 중국, 미국, 일본, 독일 등과 함께 세계 5대 지류 생산국으로 위상을 자랑하고 있다(도표 01-03). 일인당 연간 지류 소비량 측면에서도 2023년 현재 182 kg으로 세계 6위권에 위치해 있다(도표 01-04). 이는 단순히 지류 소비가 많

**도표 01-03.** 세계 10대 지류 생산국과 생산량

| 국명 | 생산량(백만 톤) | |
|---|---|---|
| | 2016년 | 2023년 |
| 중국 | 108.5 | 134.0 |
| 미국 | 71.8 | 72.4 |
| 일본 | 26.1 | 26.2 |
| 독일 | 22.6 | 23.1 |
| 대한민국 | 11.5 | 11.5 |
| 브라질 | 10.3 | 10.0 |
| 캐나다 | 10.2 | 9.4 |
| 핀란드 | 10.2 | 11.3 |
| 스웨덴 | 10.1 | 11.3 |
| 인도네시아 | 9.8 | |

출처: Top 10 paper producing countries; https://statranker.org/economy/

**도표 01-04.** 국가별 1인당 연간 지류 소비량 (2023년)

| 순위 | 국가명 | 1인당 연간 지류소비량 (kg) | 순위 | 국가명 | 1인당 연간 지류소비량 (kg) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 핀란드 | 230 | 11 | 영국 | 125 |
| 2 | 스웨덴 | 225 | 12 | 덴마크 | 120 |
| 3 | 독일 | 198 | 13 | 호주 | 105 |
| 4 | 미국 | 189 | 14 | 스위스 | 100 |
| 5 | 일본 | 182 | 15 | 이탈리아 | 95 |
| 6 | 대한민국 | 182 | 16 | 중국 | 74 |
| 7 | 네덜란드 | 170 | 17 | 브라질 | 70 |
| 8 | 캐나다 | 160 | | 인도 | 9.3 |
| 9 | 오스트리아 | 145 | | 멕시코 | 35 |
| 10 | 프랑스 | 135 | | 인도네시아 | 18 |

출처: World - Paper and Paperboard - Market Analysis, Forecast, Size, Trends and Insights. https://www.indexbox.io/blog/paper-and-paperboard-world-market-overview-2024/?utm_source=chatgpt.com

다는 것이 아니라 산업의 발달과 함께 제품의 포장과 이송에 사용되는 지류제품의 수요가 늘고 있기 때문이다.

## 8. 제지산업과 환경 보전

제지산업은 생산활동과 문화생활에 필요한 소재산업이며, 자원 재활용을 통해 환경을 보호하는 환경산업이다. 또한 지속가능한 산림자원을 원료로 하는 목재펄프를 기반으로 한 지속 가능 산업이기도 하다. 한편, 제지산업은 대규모 설비 투자가 요구되는 자본 집약적 장치산업이며, 용수와 에너지 다소비산업, 다양한 분야의 지식과 기술을 필요로 하는 기술집약적 산업의 성격을 지닌다.

그러나, 제지산업은 '나무를 베어 종이를 만든다'는 일반적인 인식으로 인해 환경산업으로의 특성이 충분히 인식되지 못해왔다. 이러한 인식은 종이 사용이 곧 환경 파괴로 이어진다는 오해를 낳기도 하였다. 최근에는 일부 인터넷 서비스 기업들이 디지털 전환을 강조하는 과정에서 이러한 오해를 더욱 확대시키는 경향을 보이고 있으나, 이는 제지산업의 실제 특성을 잘 반영한 것이라고 보기는 어렵다.

제지산업은 계획적으로 조성된 조림지에서 자란 나무를 원료로 펄프를 생산하고 이를 종이로 제조함으로써, 지속가능한 순환경제를 실현하는 산업이다.

우리나라의 연간 펄프사용량 가운데 약 80% 이상은 해외에서 수입되고 있다. 주요 수입국을 살펴보면, 활엽수 펄프는 캐나다, 미국, 브라질, 칠레, 인도네시아 등에서, 침엽수 펄프는 캐나다, 미국, 칠레, 뉴질랜드 등에서 수입되고 있다.

우리나라에 수입되는 펄프의 대부분은 계획적으로 관리된 인공 조림지에서 생산된 원료만을 사용하는 산림관리협의회(FSC: Forest Steward Council) 인증 펄프로 그 비율은 80% 이상에 이른다. 또한 PEFC(Programme for the Endorsement of Forest Certification) 국제인증을 받은 펄프도 약 26%에 달한다. 즉, 우리나라에 수입되는 거의 모든 수입펄프가 국제적으로 인공조림된 원료의 사용을 인증받은 제품이다[4]. 수입 펄프의 국제인증 비율의 합이 100%를 초과하는 것은 동일한 제품이 두 가지의 인증을 동시에 받은 중복 인증 사례가 포함되어 있기 때문이다. 한편, 국내에서 생산되는 화학펄프 역시 모두 FSC 인증을 받은 원료를 사용하여 제조되고 있다.

우리나라 제지산업은 종이자원의 재활용을 통해 자원을 절약하고 환경 보전에 기

여하는 데 선도적인 역할을 수행하고 있다. 2024년 현재 우리나라 제지산업은 연간 917만 톤의 종이자원을 재활용하고 있으며, 이는 전체 제지원료의 약 80%를 재활용 종이자원으로 충당하고 있음을 의미한다. 또한 재활용되는 종이자원의 약 90%를 국내에서 조달하고 있어, 자원 순환을 통한 국내 환경보호에도 크게 기여하고 있다. 오늘날 도시 생활 폐기물의 약 50%는 종이자원이 차지하고 있다. 따라서 제지산업에서 종이자원을 재활용하지 않는다면 도시 생활환경은 급격히 악화될 수밖에 없다. 이러한 점에서 종이자원 재활용은 도시 환경 유지에 필수적인 역할을 한다고 할 수 있다.

한편, 우리나라의 종이자원 회수율은 85% 이상으로 세계 최고 수준에 해당하며, 2025년에는 89%에 이르렀다. 그러나 높은 회수율은 동시에 회수된 종이자원의 반복 사용으로 인한 품질저하문제를 동반한다. 이에 따라 재활용 종이의 품질을 유지·개선하기 위한 지속적인 기술개발의 필요성이 제기되고 있다.

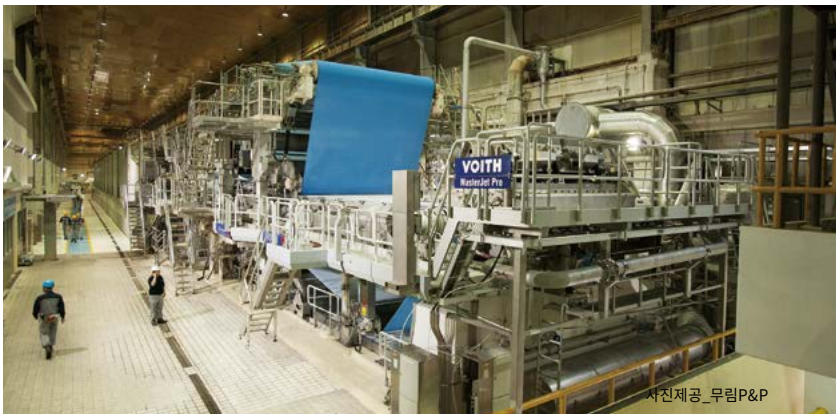
## 9. 제지산업과 기술

종이는 식물 세포를 분리하여 얻어진 펄프를 물에 분산시킨 뒤, 얇은 시트 형태로 재구성한 물질이다. 이러한 과정은 단순해 보일 수 있으나, 실제로는 원료의 준비와 처리, 탈수, 압착, 건조, 가공, 완정 등 여러 단위공정이 유기적으로 결합되어 이루어진다.

또한 제지공정의 효율적인 운영을 위해서는 원료처리, 혼합 및 교반, 공정제어, 열전달, 물질전달, 표면처리 등에 대한 이해가 필요하다. 이와 함께 공정제어기술을 비롯하여 기계, 전기, 수질 및 대기관리, 품질관리, 인쇄, 물성 평가 등 다양한 분야의 전문지식이 요구된다.

제지산업은 어느 다른 산업보다도 장치요구도가 큰 산업이다. 실제 제지공장의 내부 사진을 보면 작업 인력이 매우 적다는 것을 확인할 수 있는데, 이는 제지산업이 고도의 자동화 설비를 기반으로 운영되는 장치산업이기 때문이다.

제지산업은 원가 구조에서 에너지 비용이 약 10~15%를 차지하는 산업이며, 제품 1 톤을 생산하는 데 약 10 톤의 용수가 사용되는 대표적인 에너지 및 용수 다소비산업이다. 이는 종이 원료를 물로 희석한 후 지필형성, 탈수, 압착, 건조의 공정을 거쳐 종이를 생산하는 과정에서 많은 에너지와 용수가 필요하기 때문이다.



사진제공_무림P&P

전력 에너지 소비를 살펴보면, 초지기 구동에 사용되는 전력이 전체 전력 소비의 약 30%를 차지하며, 고해기 작동 등 조성공정에 약 17%, 진공시스템 구동에 약 16%의 전기에너지가 소요된다. 한편, 열에너지 측면에서는 종이건조공정에 사용되는 에너지가 전체 열에너지 소비의 약 70%를 차지하고 있으며, 이밖에 스팀 박스가 약 15%, 공조시스템이 약 8%의 에너지를 소비한다.

이와 같은 특성으로 인해 제지산업은 환경 관련 요소가 매우 많은 산업에 해당한다. 주요 환경관련 분야로는 용수 사용량 및 폐기물 처리 기술분야, 종이자원 재활용을 통한 환경 보전분야 등을 들 수 있다.

## 10. 탈플라스틱 소재로서의 종이

플라스틱은 여러 가지 장점으로 인해 다양한 용도로 널리 사용되고 있다. 세계 플라스틱 생산량은 2022년 기준 4억 톤에 이르며, 최근 15년간 연평균 3.6%의 증가율을 보였다. 이에 따라 플라스틱 폐기물 발생량도 2000년 1억 6천만 톤에서 2022년 3억 8천만 톤으로 두 배 이상 증가하였다.

플라스틱 폐기물은 자연분해가 어려운 특성을 지니고 있어 환경 문제를 심화시키고 있다. 특히 태평양을 비롯한 전 세계 대양에는 대규모 해양 쓰레기 지대가 형성되어 있으며, 현재 태평양의 이른바 '쓰레기 섬'은 한반도 면적의 약 7배에 달하는 규모로, 약 8만 톤의 플라스틱 폐기물로 이루어져 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 플라스틱 폐기물은 시간이 지남에 따라 미세플라스틱으로 분해되어 해양생물에 축적되고, 먹이사슬을 통해 우리의 식탁으로 올라와 건강에 위협요소가 되고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위한 가장 효과적인 방법은 플라스틱 사용량을 줄이는 것이다. 이를 위해 플라스틱 포장재를 대체할 수 있는 종이 포장재 기술개발이 중

요한 과제로 대두되고 있다. 현재 포장재 가운데 플라스틱은 가장 큰 비중인 약 44.2%를 차지하고 있으며, 이를 종이 포장재로 전환하기 위해 종이 포장재의 차단성 강화와 재활용성 제고 등 기능성 향상을 위한 연구개발이 진행되고 있다.

## 11. 제지산업의 당면과제

제지산업의 지속가능한 성장을 위해서는 원료, 용수, 에너지의 지속가능성을 높이는 한편, 우수한 인력을 양성하고 신기술 개발을 통해 산업경쟁력을 강화할 필요가 있다. 현재 우리나라는 종이자원 재활용에 대한 우수한 제도와 높은 국민 인식을 바탕으로, 세계적으로도 매우 높은 수준의 종이자원 재활용률을 보이고 있다. 하지만 아직도 지종별 분리수거가 충분히 이루어지지 않아 서로 다른 지종의 종이자원이 혼합 수거되는 문제와 비닐테이프 등 각종 이물질이 종이자원에 혼입되는 문제 등 해결해야 할 과제도 여전히 남아 있다.

한편, 용수 다소비 산업인 제지산업은 그동안 지속적인 환경관련 투자를 통해 수질 및 대기오염과 고형폐기물 발생을 최소화하기 위해 노력해 왔다. 그럼에도 불구하고 제지슬러지의 재자원화기술과 공정 폐쇄화율을 높이기 위한 효율화 기술 등과 같은 분야에서는 앞으로도 지속적인 연구·개발과 노력이 요청된다.

에너지 다소비 산업인 제지산업은 전기 및 열에너지 사용량을 줄이기 위해 지속적인 노력을 경주하고 있다. 그러나 최근 전기요금과 유가의 급속한 상승은 제지산업에 큰 원가부담으로 작용하고 있다. 이러한 환경 변화에 대응하기 위해서는 제지 공정 전반에 대한 열에너지 관리의 체계화와 함께, 새로운 프레싱 기술과 히트펌프 등 첨단 건조 기술의 도입을 통한 에너지 절감 노력이 지속적으로 요구된다.

한편, 디지털 기술의 발달에 따라 제지산업에서도 예측 유지보수와 실시간 공정 모니터링, 물류 및 품질 관리의 자동화, 생산 계획 및 자원 할당의 최적화를 위한 플랫폼 도입이 중요한 과제로 부각되고 있다. 앞으로는 인공지능 기술을 활용한 제지공정의 최적화와 자동화가 더욱 확대될 것으로 예상되며, 이는 원가절감과 품질향상에 기여할 것으로 기대된다.

이와 함께 국내 제지산업의 생산능력조정과 산업 클러스터화를 통해 수요와 공급의 균형을 맞추어 가는 것 또한 매우 중요한 과제로 제시되고 있다.

## 12. 제지산업의 미래

종이와 판지는 산업과 일상생활 전반에 걸쳐 필수적인 산업소재이자 생활필수품으로서 오랜 역사를 지니고 있다. 최근 정보화·디지털화의 진전으로 인쇄용지와 신문용지의 수요는 크게 감소하였으나, 골판지와 백판지 등 포장용 산업용지와 위생용지의 수요 증가에 힘입어 제지산업 전체로는 완만한 성장세를 유지하고 있다. 향후에도 산업용지, 위생용지 분야 및 특수기능지 분야를 중심으로 지속적인 수요증가와 성장이 전망된다.

특히 분해되지 않는 폐플라스틱으로 인한 환경오염 문제가 심각해짐에 따라, 재활용율이 플라스틱에 비해 월등히 높고 퇴비화가 가능한 바이오기반 솔루션인 지류제품이 전세계적으로 플라스틱 대체 소재로 주목을 받고 있다. 즉, 지류제품은 재생가능성과 생분해성이라는 환경적 이점을 갖춘 핵심 소재로서 지속가능한 순환경제를 실현할 수 있는 유력한 대안으로 평가되고 있다. 이러한 흐름은 제지산업의 포트폴리오를 미래지향적이고 환경친화적인 방향으로 전환하는 중요한 계기가 되고 있다.

다만, 플라스틱을 완전히 대체하기 위해서는 수분차단성, 내수성, 공기차단성 등의 물성 측면에서 여전히 개선이 요구된다. 이를 해결하기 위해 생분해성과 수분차단성이 우수한 박막필름을 이용한 식품포장지, 내유성과 분리용이성을 갖춘 포장 소재 등의 개발이 요청된다.

아울러 펄프섬유로부터 제조되는 나노셀룰로오스를 활용한 다양한 기술개발 성과는 펄프제지산업을 기존의 펄프·종이 생산 중심 산업에서 고부가가치 나노소재 공급 산업으로 재정립하고 있다. 나노셀룰로오스는 건설, 화학, 전기, 전자, 화장품, 코팅, 필름, 3D 프린팅 등 다양한 산업 분야에서 활용 가능성이 인정되어 있어 활발한 연구개발이 진행되고 있다.



지속가능한 가치를 담은 펄프·종이 제품들
(사진제공_무림페이퍼)




천연펄프 소재를 적용해 개발한
친환경 필터 샤워기 (사진제공_무림P&P)


**참고문헌**

[1] 이승철, 『우리 한지』(현암사, 2002)
[2] 대한민국 제지·펄프 산업 120년 史;한국제지연합회
[3] 한국제지연합회 연례보고서, 2025년
[4] 이학래, 오규덕. 합법목재 교역촉진 대상품목 조사 보고서, (펄프종이판지류) 2021년, 한국임업진흥원.



**이 태 주** 국민대학교 교수

**2026 – 현재** 국립환경과학원 통합환경관리 TWG 위원
**2024 – 현재** 사단법인 한국펄프종이공학회 운영위원
**2018 – 현재** 펄프제지분야 한국산업표준 전문위원
**2024** 사단법인 한국목재공학회 기술상 수상
**2022** 산림청 국립산림과학원 연구 우수성과(버금상) 수상
**2018 – 2024** 산림청 국립산림과학원 임업연구사

leetj@kookmin.ac.kr

# 2
# 종이의 원료

# 1. 펄프와 종이, 목재의 지속가능성

## (1) 지속가능한 바이오매스, 목재

목재는 선사시대부터 현대에 이르기까지 인류문명의 발전과정에서 핵심적인 역할을 수행해 온 자원으로, 그 중요성은 아무리 강조해도 지나치지 않다. 인류는 목재를 난방을 위한 연료로 사용하였으며, 주거공간을 조성하기 위한 건축재료와 각종 생활 도구의 제작에 활용하였다. 이후 사회와 기술이 발전함에 따라 목재는 철광석 환원에 필요한 숯의 제조, 선박건조에 사용되는 타르(tar)와 피치(pitch) 등의 화학물질을 생산을 위한 원료로까지 그 이용 범위가 확대되었다. 이와 같이 목재의 활용 방식은 인류 사회의 발전 단계와 밀접한 관련을 맺으며 지속적으로 진화해 왔다.

목재 이용의 역사에서 특히 중요한 기술적 성과 중 하나는 종이의 발명이다. 종이는 인류가 가장 오랜 기간 사용해 온 기록 매체로서, 지식의 축적과 전달에 결정적인 기여를 하였다. 비록 현대 사회가 디지털화의 진전에 따라 정보 전달 방식에 변화를 겪고 있으나, 종이는 여전히 필수적인 소재로서 그 가치를 유지하고 있다. 더 나아가 종이는 정보 기록의 기능을 넘어 포장재, 위생용지, 기능성 소재 등 다양한 산업 분야로 활용 영역을 확대하며 현대 산업 사회에서 중요한 위치를 차지하고 있다. 이러한 종이 제품의 특성과 품질은 원료의 종류와 특성, 그리고 이를 섬유로 전환하고 가공하는 제지공정에 의해 크게 좌우된다.

### 1) 세계 산림 자원 및 목재의 이용

전 세계 모든 대륙에는 광범위한 산림 지역이 분포하고 있으나, 산림자원이 체계적으로 관리·활용되어 온 지역은 제한적이다. 전통적으로 산림자원을 기반으로 한 펄프생산은 북유럽 국가들과 캐나다를 중심으로 발전해 왔으며, 이들 지역에서 생산된 펄프는 유럽 각국을 비롯하여 미국, 일본 등 주요 제지산업 국가로 수출되어 제지용 원료로 사용되어 왔다. 우리나라의 경우에도 펄프 생산 기반이 취약하여 대부분을 해외 수입에 의존하고 있는 실정이다.

한편, 지난 수십 년간 브라질, 칠레, 인도네시아, 뉴질랜드 등 수목 생장이 빠른 국가들이 대규모 자본 투자를 통해 현대적인 펄프 생산 시설을 구축하면서 목재펄

**도표 02-01.** 2024년 기준 세계 용도별 원목 생산량

| 구분 | 생산량(백만㎥) |
|---|---|
| 원목(roundwood) | 3,905 |
| 목재 연료(wood fuel) | 1,949 |
| 산업용 원목(industrial roundwood) | 1,956 |
| 제재용 및 단판용 원목(sawlogs and veneer logs) | 1,099 |
| 펄프용 원목(pulpwood) | 701 |
| 기타 산업용 원목(other industrial roundwood) | 156 |

출처: https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO (접속일:2025. 7. 9.)

**도표 02-02.** 2024년 기준 세계 용도별 원목 생산량

| 지역 | 생산량(백만㎥) | |
|---|---|---|
| | 목재 연료 | 산업용 원목 |
| 아프리카 | 742 | 79 |
| 아시아 | 683 | 481 |
| 아메리카 | 342 | 741 |
| 유럽 | 173 | 591 |
| 오세아니아 | 10 | 64 |

출처: https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO (접속일:2025. 7. 9.)

프 생산의 새로운 중심국가로 부상하였다. 이러한 변화가 가능했던 주요 요인으로는 이들 국가에서는 대규모 조림지 인근에 펄프 공장을 조성함으로써 원료 목재의 안정적이고 지속 가능한 공급체계를 구축할 수 있었다는 점을 들 수 있다. 또한, 이들 지역의 기후 조건은 수목의 생장 속도가 매우 빠르다는 특징을 지니고 있어 조림에서 수확에 이르기까지의 기간을 크게 단축시킬 수 있다. 예를 들어, 스웨덴과 같은 북유럽 국가에서는 조림 이후 펄프용 원료 목재를 수확하기까지 약 50~80년이 소요되는 반면, 앞서 언급된 국가들에서는 약 10~15년이면 펄프용 원료목재의 수확이 가능하다. 더 나아가 일부 지역에서는 10년 미만의 생육기간으로도 펄프 생산에 적합한 원료 목재를 확보할 수 있어, 생산성 및 경제성 측면에서 뚜렷한 경쟁 우위를 확보하고 있다.

오늘날 전 세계에서 이용되는 목재의 용도는 도표 02-01에 제시한 바와 같이 목재 연료(wood fuel)와 산업용 원목(industrial roundwood)으로 구분할 수 있

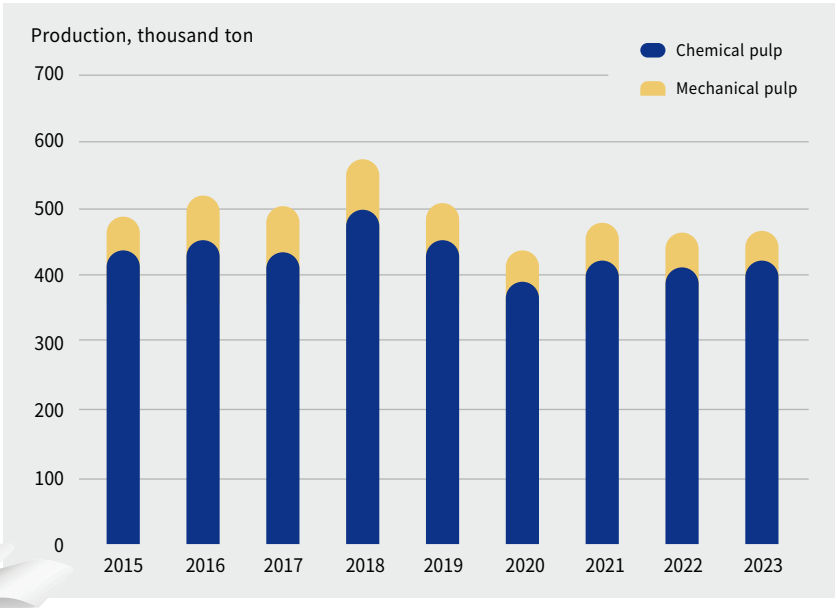
다. 산업용 원목은 다시 펄프용 원목, 제재 및 단판용 원목, 그리고 기타 용도로 세분되며, 이 가운데 제재 및 단판용 원목이 가장 큰 비중을 차지하고, 펄프용이 그 다음으로 많은 비율을 차지한다.

전 세계적으로 볼 때, 목재는 연료용과 산업용의 비율이 대체로 유사한 수준을 보이나, 지역별로는 확연한 차이를 보인다. 산업이 고도화되고 석유, 가스 등 대체 에너지 자원이 풍부한 북아메리카와 유럽 지역에서는 산업용 원목의 사용량이 높은 반면, 아프리카 및 아시아 일부 지역에서는 여전히 목재 연료로의 이용 비중이 상대적으로 높은 것으로 나타난다(도표 02-02).

### 2) 우리나라 산림자원과 펄프용 생산 목재

우리나라는 1970~1980년대에 걸쳐 추진된 대규모 조림사업을 통해 일제강점기와 한국전쟁을 거치며 황폐화되었던 국토의 산림을 복구하기 위하여 정부와 국민이 함께 산림녹화에 참여하였다. 그 결과, 1953년 약 3,600만 ㎥에 불과하던 우리나라의 임목 축적은 2019년 10.4억 ㎥로 28배가 증가하는 성과를 달성하였다[1]. 이러한 산림 자원의 양적 성장은 체계적인 조림 정책과 지속적인 산림 관리의 결과로 평가되고 있다.

**도표 02-03.** 국내 펄프 생산량(2015~2023)




출처: 산림청, 임업통계연보 (https://kfss.forest.go.kr/stat/eBook/ecatalog5.jsp?Dir=2&catimage=, 접속일자: 2025. 7. 10.)

우리나라는 2차대전 이후 산업화와 민주화 그리고 산림녹화를 모두 성공적으로 달성한 세계적으로 유례없는 국가로 평가받고 있다. 특히 우리나라의 산림녹화 과정을 체계적으로 기록한 자료들은 산림 복구의 모범사례로서 국제적인 주목을 받아, 2025년 프랑스 파리에서 개최된 제221차 유네스코 집행이사회에서 유네스코 세계문화유산으로 등재되었다. 이는 우리나라 산림정책과 산림관리 경험이 지니는 역사적·학술적 가치를 국제적으로 인정받은 결과라 할 수 있다.

오늘날 우리나라의 산림은 체계적인 보전과 관리에 의해 국토 환경을 보호하는 데 중요한 역할을 수행하고 있으며, 이 가운데 일부 산림자원은 계획적으로 수확되어 건축자재, 에너지원, 펄프 생산 등의 용도로 활용되고 있다. 수목은 생물체이기 때문에 일정한 성장 단계를 지나면 생육 속도가 현저히 저하되거나 고사 및 부패가 진행될 수 있으므로, 적정 임령에 도달한 수목을 수확하고 그 자리에 새로운 묘목을 식재하는 순환적 산림 경영이 산림의 지속가능한 보전과 관리에 있어서 필수적이다.

우리나라 연간 펄프용 목재 이용량은 총 72만 5천 ㎥로, 이는 전체 국내재 공급량의 약 16%를 차지하고 있다. 그러나 표백화학펄프용 원료 목재의 국내 공급이 충분하지 못한 실정으로 인해, 전체 필요량의 약 절반은 해외로부터 수입하여 사용하고 있다. 이렇게 공급된 펄프용 원목은 활엽수 표백화학펄프 및 표백열기계펄프 생산에 사용되고 있다(도표 02-03). 실제로 2024년 기준 우리나라에서는 활엽수 표백화학펄프가 약 45만7천 톤, 표백열기계펄프가 약 3만2천 톤 생산되었다.



국내 펄프공장 내 칩 야적장 (사진제공_무림P&P)

### (2) 순환경제 모델로서의 목재, 펄프와 종이

순환경제란 탄소중립 달성을 위한 중요한 이행 수단 중의 하나로, 제품의 공유, 재사용, 재제조, 재활용 등을 통해 자원의 순환을 촉진하는 생산·소비 중심의 경제모델을 말한다. 순환경제는 자원의 사용과 폐기를 최소화하고, 가능한 모든 자원을 순환고리에 포함하여 활용함으로써 인류 사회의 지속가능성을 확보하기 위한 경제모델로 주목받고 있다.

순환경제의 목적은 기존의 일회용 제품 중심의 소비 방식이나 폐기 위주의 처리 방식, 즉 선형 경제에서 탈피하여 제품과 자원의 생애주기(life cycle)를 연장하고 재사용 및 재활용을 극대화함으로써 경제적, 사회적, 환경적 가치를 종합적으로 높이는 데 있다[2].

고대부터 오늘날에 이르기까지 세계 여러 지역에서는 산업활동과 도시건설을 목적으로 광범위한 산림 벌채가 이루어져 왔다. 과거에는 산림에서 벌채된 목재가 연소되거나 미생물에 의해 분해되는 과정에서 발생한 이산화탄소가 새로 조성된 경작지에서 재배된 농작물의 광합성을 통해 일정 부분 흡수되었다. 즉, 농업활동을 통해 생성된 생물량(biomass)이 이산화탄소를 흡수함으로써 대기 중 이산화탄소가 다시 포집되는 순환 구조가 유지되었다. 그 결과 대기 중 이산화탄소 농도의 변화는 비교적 제한적인 수준에 머물렀다.

그러나 지난 100여 년 동안 에너지 생산을 위한 석유를 비롯한 화석연료의 사용량이 급격히 증가한 반면 이에 상응하는 새로운 이산화탄소 흡수원(carbon sink)은 충분히 확충되지 못하였다. 이로 인해 대기 중 이산화탄소 농도가 급속히 증가하고 있으며, 이는 이산화탄소에 의한 온실 효과를 심화시켜 기후 위기를 초래할 가능성이 크다.

이와 같은 화석자원 사용이 온실효과를 증대시킨다는 인식이 확산됨에 따라 에너지·화학물질·소재 등을 목재를 비롯한 바이오매스를 출발 물질로 생산하려는 연구와 산업적 기술개발이 활발히 진행되고 있다. 이러한 관점에서 목재를 포함한 바이오매스의 순환이용 체계를 구축하는 한편, 다양한 산업 분야에서 바이오매스 활용을 적극적으로 확대할 필요가 있다.

펄프와 종이는 재활용이 가능한 자원이다. 순환경제 측면에서 재활용이란 사용한 제품을 회수하여 다시 새로운 제품의 원료로 재사용하는 것을 의미한다. 종이는 우리의 일상생활에서 가장 널리 사용되는 소재 중 하나로 인쇄용뿐 아니라 플라스틱을 대체하는 포장재와 위생용품 등으로 활용도가 급속히 증가하고 있다. 특히 환경규제 강화와 소비자들의 친환경 소비 의식 확산에 따라 종이는 '지속가능한 소재'로서 그 가치가 재조명되고 있다.

그러나 종이의 생산과 소비는 용수와 에너지 사용, 폐기물 발생 등의 문제를 수반하기 때문에 이러한 문제를 전 생애주기적 관점에서 관리하고 개선함으로써 지속가능성을 제고하려는 노력은 제지산업의 지속적인 성장을 위한 필수 전략으로 인식되고 있다. 종이의 재활용은 폐기물 발생량을 감소시키는 동시에 자원의 선순환 구조를 구축함으로써 탄소중립적인 생산 체계에 근접할 수 있는 중요한 수단이다. 특히 종이포장재는 사용 주기가 짧고 소비량이 많아, 재활용 체계를 강화할 경우 도시 폐기물 감축과 일상생활에서의 탄소배출 저감에 실질적인 효과를 기대할 수 있다.

## 2. 펄프 및 종이 생산을 위한 원료

펄프제지산업에서 사용되는 원료는 원료의 가용성(availability)과 공정 조건 및 제품 특성에 대한 적합성(suitability)을 종합적으로 고려하여 결정된다. 펄프 제조에 있어서 가장 중요한 원료인 목재는 다음과 같은 특성을 갖는다.

가. **밀도(density)**: 원목의 이송 및 적재 효율에 영향을 미치며, 단위 부피당 생산성에도 관련된다.
나. **목재 색(color)**: 목재의 색이 밝을수록 제조된 펄프의 백색도가 높아지며, 표백 공정에서 화학약품 사용량 감소 등 경제성을 확보할 수 있다.
다. **세포 균일성(homogeneity of wood cells)**: 세포 구조가 균일할수록 펄프의 품질이 높아진다.
라. **추출물 함량(content of extractives)**: 추출물 함량이 높을 경우 펄프화 과정, 특히 기계펄프화 공정에서 피치 트러블 등 다양한 문제가 발생할 수 있다.
마. **세포 길이(length of wood cells)**: 섬유 길이 혹은 섬유장은 종이의 인장강도, 인열강도 등 기계적 강도에 직접적인 영향을 미치는 중요한 인자이다(도표 02-04).

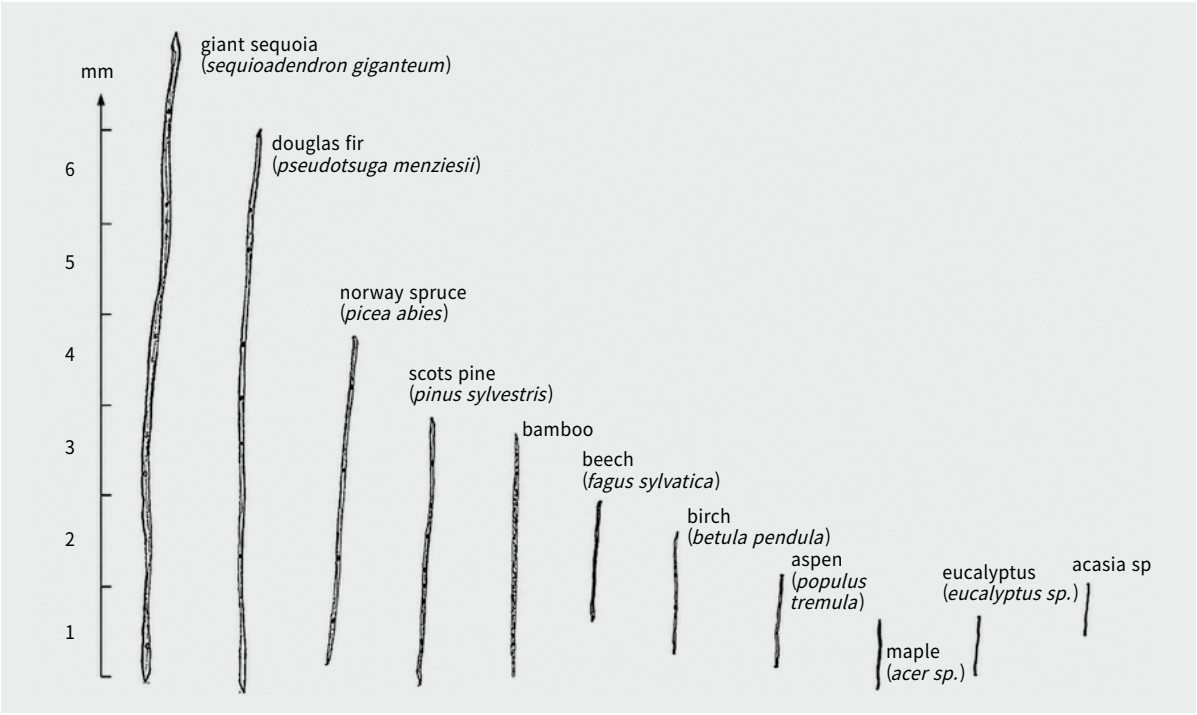
펄프용 원료로는 활엽수(hardwood)와 침엽수(softwood)가 모두 사용된다. 짚(straw)이나 각종 농업 부산물과 같은 식물성 원료는 목재에 비해 펄프화가 용이한 경우도 있으나, 목재는 자연계에 풍부하게 존재하고, 연중 안정적인 수확이 가능하며, 펄프공장까지의 운송이 비교적 용이하다는 장점이 있다.

목재를 구성하는 세포의 길이, 즉 섬유장은 수종에 따라 차이가 있으며, 생장환경, 토양 조건, 기후 등의 영향을 받아 크게 달라질 수 있다. 침엽수의 주된 목재조

**도표 02-04.** 펄프 섬유장과 종이의 특성

| 특성 | 섬유장 증가 | 섬유장 감소 |
|---|---|---|
| **인장강도**(tensile strength) | 증가 | 감소 |
| **파열강도**(bursting strength) | 증가 | 감소 |
| **인열강도**(tearing resistance) | 증가 | 감소 |
| **내절도**(folding endurance) | 증가 | 감소 |
| **지합**(formation) | 불균일 | 균일 |
| **평활도**(surface smoothness) | 감소 | 증가 |
| **인쇄품질**(print quality) | 낮음 | 높음 |

그림 02-01. 수종에 따른 섬유의 길이




출처: Daniel, G., Pulp and paper chemistry and technology, Ek, M., Gellerstedt, G., and Henriksson, G. (ed.), Vol. 1, p. 32-33, Royal Institute of Technology, Sweden (2009)

직은 가도관(tracheid)으로, 가도관의 평균섬유장은 약 3 ㎜ 내외이다. 한편 너도밤나무, 자작나무와 같은 활엽수의 평균섬유장은 1.3 ㎜, 유칼립투스나 단풍나무와 같은 수종의 평균섬유장은 0.7~0.8 ㎜로 침엽수에 비해 짧다(그림 02-01).

섬유장은 펄프 및 종이의 물성을 결정하는 주요 인자이다. 일반적으로 침엽수는 활엽수보다 목재 세포의 길이가 길어, 침엽수로 제조한 화학펄프는 장섬유 펄프(long fiber pulp)라고도 불리며 높은 강도가 요구되는 종이의 원료로 사용된다. 반면, 활엽수로 제조한 화학펄프는 우수한 평활성과 지합(formation) 특성을 지니고 있어 고급 백상지(fine paper) 등의 원료로 사용된다.

침엽수 섬유와 비교한 활엽수 섬유의 특성은 다음과 같다.

- 섬유장이 짧아 인장강도는 낮으나, 종이의 불투명도를 향상시킨다.
- 세포의 종류가 다양하며, 셀룰로오스와 헤미셀룰로오스의 함량이 높다.
- 활엽수에 포함된 유세포는 종이의 강도를 저하시키지만 불투명도, 평활도 및 지합을 개선시킨다.

### (1) 목재의 구조

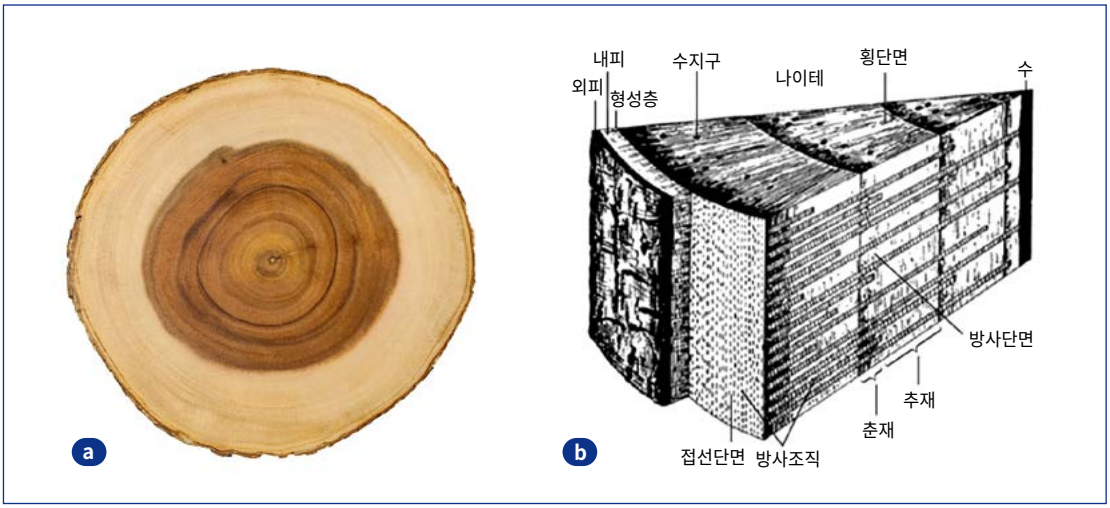
목재는 크기와 형태가 서로 다른 다양한 세포로 구성되어 있다. 나무는 일반적으로 수관(crown), 줄기(trunk 또는 stem), 그리고 뿌리(root system)의 세 부위로 구분되며, 각 부위는 여러 종류의 목재 세포(wood cells)로 이루어져 있다. 이 가운데 펄프 생산에 주로 이용되는 부분은 줄기이다.

줄기는 수피(bark), 체관부(phloem), 형성층(vascular cambium), 그리고 목부(xylem)로 세분된다(그림 02-02(b) 참조). 수피는 줄기의 가장 바깥층으로 주로 죽은 세포로 구성되어 있으며, 물리적·기계적·생물학적 손상으로부터 나무를 보호하는 역할을 한다. 형성층은 매우 얇은 세포층으로, 지속적인 세포 분열을 통해 바깥쪽으로는 체관부를, 안쪽으로는 목부를 형성한다.

줄기에서 형성되는 목부는 줄기 끝부분에서 생성되어 길이 생장에 관여하는 일차 목부(primary xylem)와 구별하여 이차 목부(secondary xylem)라고 하며, 목질 물질의 대부분을 차지한다. 일반적으로 우리가 '목재'라고 부르는 부분은 이차 목부를 의미한다(그림 02-02(a) 참조).

줄기의 중심부에는 일반적으로 수(pith)가 존재하며, 이는 나무의 생장 초기, 즉 유년기에 형성된 조직이다. 목부는 대체로 나이테(연륜, annual ring) 형태의 동심원 구조를 이루며 세포가 배열되어 있고, 각 연륜은 나무가 1년 동안 생장한 결과를 나타낸다.

**그림 02-02.** (a) 소나무 줄기의 횡단면, (b) 소나무 줄기의 내부 절단면




출처: Daniel, G., Pulp and paper chemistry and technology, Ek, M., Gellerstedt, G., and Henriksson, G. (ed.), Vol. 1, p. 45-70, Royal Institute of Technology, Sweden (2009)

각 목재 조직은 서로 다른 세포 유형으로 구성되어 있으며, 이들은 지지(support), 수송(transport), 저장(storage) 등 각기 다른 기능을 수행한다. 이러한 세포들은 형태와 크기, 미세구조, 그리고 주요 화학 성분 함량에서 차이를 보이므로, 펄프화 과정 및 최종 종이 제품에서 서로 다른 물리적·기계적 거동을 나타낼 수 있다.

목재 내의 세포들은 고도로 정렬되어 있다. 목재 조직을 관찰하기 위해서는 횡단면, 방사단면, 접선단면의 세 단면을 관찰하는 것이 일반적이다. 횡단면(transverse 또는 cross section)은 줄기의 길이 축에 수직인 절단면이며, 방사단면(radial section)은 수(pith)를 통과하여 줄기의 축과 평행한 절단면을 의미한다. 접선단면(tangential section)은 연륜에 접하면서 줄기 축과 평행한 면을 일컫는다.

목재의 구성세포는 축방향(axial) 및 방사방향(radial)으로 배열되어 있다. 축방향 조직은 나무줄기의 길이 방향으로 배열된 세포들로 구성되어 있으며, 세포벽 두께나 길이가 다양하다. 세포벽이 두꺼운 세포는 나무에 기계적 지지력과 강도를 제공하며, 세포벽이 얇은 세포는 주로 수분 및 용질의 수송과 영양분 저장 기능을 담당한다. 방사방향 조직(radial system), 즉 방사조직(rays)은 나무의 중심부에서 수피 방향으로 배열되어 있으며, 전분과 같은 저장 물질의 저장 및 분배에 중요한 역할을 한다(도표 02-05).

목재의 횡단면을 관찰하면 색이 진한 부분과 연한 부분이 구분되는데, 이를 각각 심재(heartwood)와 변재(sapwood)라 한다. 심재는 줄기 중심부에 위치한 오래된 이차 목부로, 수분과 양분의 수송 기능을 상실한 영역이다. 심재는 대부분의 세포가 죽어 있으며, 탄닌이나 수지와 같은 추출물(extractives)이 세포 내에 침착되어 색이 짙게 나타난다. 이러한 특성으로 인해 심재는 주로 지지조직(support tissue)으로 기능한다.

**도표 02-05.** 침엽수 세포 형태 및 기능

| 세포 형태 | 주요기능 |
|---|---|
| **1. 축방향 가도관(longditual tracheids)** | |
| 춘재(earlywood) | 전달 |
| 추재(latewood) | 지지 |
| 스트랜드 가도관(strand) | 전달 |
| **2. 유세포(parenchyma)** | |
| 방사 유세포(ray parenchyma) | 저장 |
| 축방향 유세포(longditual parenchyma) | 저장 |
| 수지관 상피 유세포(epithelial parenchyma) | 수지의 분비 |
| **3. 방사방향 가도관(ray tracheids)** | 전달 |

출처: Daniel, G., Pulp and paper chemistry and technology, Ek, M., Gellerstedt, G., and Henriksson, G. (ed.), Vol. 1, p. 45-70, Royal Institute of Technology, Sweden (2009)

심재 형성이 시작되는 시점은 수종과 생장 환경 조건에 따라 달라진다. 심재가 형성되는 과정에서 추출물이 축적되면서 부후균, 세균, 곤충 등에 대한 내구성(durability)이 증가한다. 소나무(pine)나 참나무(oak)와 같은 일부 침엽수 및 활엽수에서는 심재가 변재에 비해 현저히 어두운 색을 띠어 육안으로 쉽게 구별할 수 있다. 반면, 가문비나무(spruce)나 자작나무(birch)와 같은 수종에서는 심재와 변재의 색 차이가 뚜렷하지 않아 육안 구분이 어려운 경우가 많다.

변재는 줄기 바깥쪽에 위치한 이차 목부로, 수분과 양분의 수송 및 저장 기능을 담당한다. 변재와 심재의 가장 큰 차이점은 변재 내 유세포(parenchyma cells)는 살아 있으며, 활발한 생리 기능을 수행한다는 점이다.

### (2) 침엽수와 활엽수 펄프의 주요 구성 성분

침엽수는 활엽수에 비해 구조가 단순하고 세포의 종류가 적어 상대적으로 균일한 특성을 지닌다(도표 02-05). 반면, 활엽수는 침엽수보다 다양한 축방향 세포와 방사방향 세포로 구성되어 있으며, 형태학적 다양성 또한 크다. 침엽수 목재의 경우 전체 세포의 약 90~95%가 수직 방향, 즉 축방향으로 배열된 가도관(tracheid)으로 이루어져 있다.

가도관은 양 끝이 둥글고 폐쇄된 형태를 갖는 길고 가는 관 모양의 세포로, 횡단면은 일반적으로 사각형에 가깝다(그림 02-03). 가도관은 수분 수송과 기계적 지지라는 두 가지 기능을 동시에 수행하는 특징을 지닌다. 가도관은 활엽수의 목재 세포에 비해 길이가 길어, 침엽수로 제조한 펄프는 장섬유 펄프(long fiber pulp)라 한다(도표 02-06). 침엽수 펄프는 대부분이 장섬유인 가도관으로 구성되기 때문에, 이로부터 제조된 종이는 우수한 기계적 강도를 나타낸다.

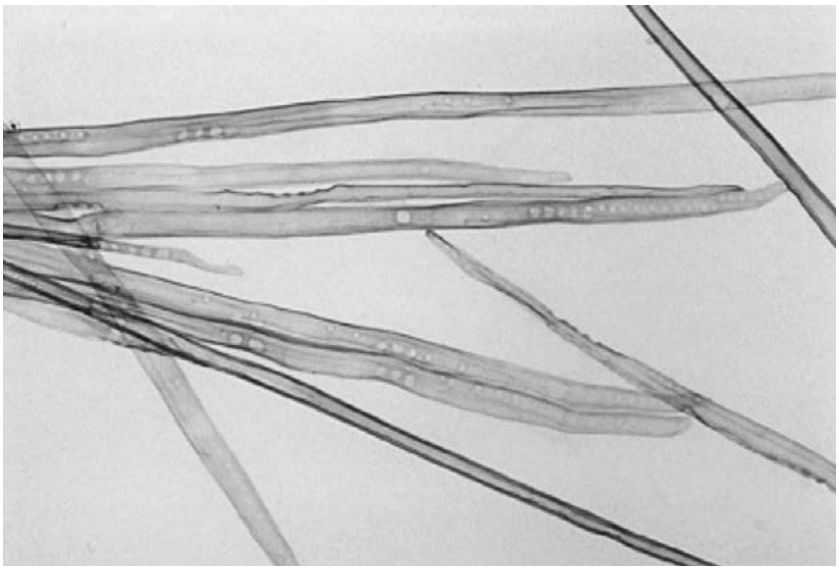
침엽수 가도관의 길이, 직경 및 세포벽 두께는 수종에 따라 다르며, 생육 조건과

**도표 02-06.** 일반적인 침엽수 가도관의 길이 및 폭

| 수종 | 가도관 길이 (mm) | | 가도관 폭(μm) | |
|---|---|---|---|---|
| | 평균 | 범위 | 평균 | 범위 |
| 전나무(Abies alba) | 3.7 | 1.6~5.7 | 38 | 18~58 |
| 파나라소나무(Araucaria angustifolia) | 7.2 | 5.6~9.0 | 47 | 19~60 |
| 유럽입갈나무(Larix decidua) | 3.5 | 1.4~6.2 | 38 | 24~52 |
| 독일가문비나무(Picea abies) | 3.4 | 1.1~6.0 | 31 | 21~40 |
| 구주소나무(Piuns sylvestris) | 3.1 | 1.8~4.5 | 35 | 14~46 |
| 라디에타 파인(Pinus radiata) | 3.0 | - | 44 | - |

수령에 의해서도 영향을 받는다. 일반적으로 어린 나무나 나무 상부에서 형성된 조직의 가도관은 비교적 짧은 반면, 성숙한 나무나 제재소 부산물에서 얻어지는 줄기 외측부 조직의 가도관은 상대적으로 길다. 대표적인 펄프용 침엽수의 성숙한 가도관의 평균 길이는 약 3~4 ㎜이나 수종에 따라 차이를 보인다(도표 02-06).

**그림 02-03.** 광학현미경으로 관찰한 침엽수 가도관 (구주소나무, Pinus sylvestris)



출처: Papermaking Science and Technology, Book 2, (ed.) Diesen, M., P. 78, TAPPI PRESS, Unites States (2002)

**도표 02-07.** 활엽수 세포 형태 및 기능

| 세포 형태 | 기능 |
|---|---|
| 1. 도관요소(vessel) | 전달 |
| 2. 섬유(fibers)<br>진정 목섬유(libriform fibers)<br>섬유상 가도관(fiber trachieds) | 지지 |
| 3. 가도관(tracheids) | 전달 |
| 4. 유세포(parenchyma)<br>방사유세포(ray parenchyma)<br>축방향 유세포(longditual parenchyma) | 저장 |

출처: Daniel, G., Pulp and paper chemistry and technology, Ek, M., Gellerstedt, G., and Henriksson, G. (ed.), Vol. 1, p. 45-70, Royal Institute of Technology, Sweden (2009)

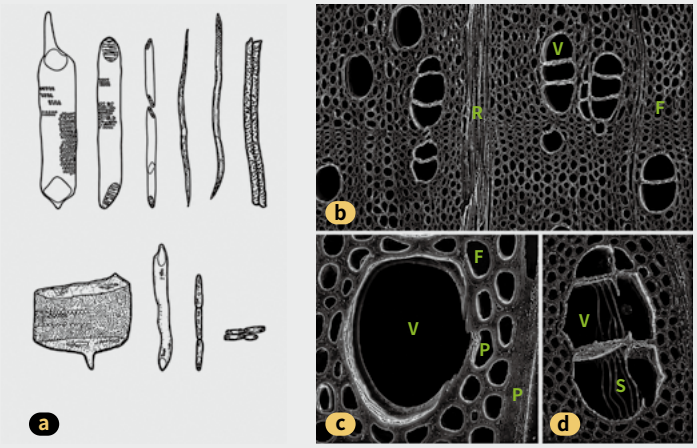
활엽수는 다양한 기능을 수행하는 여러 종류의 특수 세포로 구성되어 있어, 침엽수에 비해 구조적으로 복잡한 특성을 지닌다(도표 02-07). 침엽수에서 유세포가 방사 방향으로 비교적 규칙적으로 배열되는 것과 달리, 활엽수에서는 유세포의 배열이 상대적으로 불규칙하게 나타난다.

활엽수의 또 다른 중요한 특징은 수분과 양분의 저장 및 이동에 중요한 역할을 하는 방사조직(ray parenchyma)이 풍부하게 발달해 있다는 점이다. 또한 활엽수에는 수분을 효율적으로 수송하는 도관요소(vessel elements)가 존재하며, 이들 도관요소가 연결되어 형성된 도관(vessel)은 횡단면에서 뚜렷한 기공 형태로 관찰된다(그림 02-04).

활엽수를 구성하는 주요 세포 유형은 크게 섬유, 도관요소, 가도관, 유세포의 네 가지로 나눌 수 있다. 첫째, 섬유(fibers)는 주로 목재의 기계적 강도를 담당하는 조직으로 길고 두꺼운 세포벽을 가진 조직이다. 둘째, 도관요소는 수분을 운반하는 통로로 길이가 짧지만 세포의 단면적은 크다. 셋째, 주로 침엽수를 구성하는 세포인 가도관은 활엽수에서도 일부 존재하며 수분 전달과 지지 기능을 함께 수행한다. 마지막으로 유세포(parenchyma cells)는 양분 저장과 물질 교환에 관여하는 살아있는 세포로, 목재의 생리적 기능 유지에 중요한 역할을 한다.

활엽수를 구성하는 네 가지 세포 유형 가운데 펄프화에 있어 가장 중요한 요소는 목재부피의 약 40~75%를 차지하는 목섬유이다. 하지만 다른 구성요소도 펄프에

**그림 02-04.** 일반적인 활엽수 세포 조직




**a)** 상단(왼쪽에서 오른쪽 순서로) 사시나무 춘재 도관; 자작나무 춘재 도관; 서로 연결된 자작나무 도관, 자작나무 진정목섬유; 자작나무 가도관; 참나무 가도관. 하단(왼쪽에서 오른쪽 순서로) 참나무 춘재 및 추재 도관, 참나무 종방향 유세포), 자작나무 방사 유세포.

**b)** 도관(V), 섬유(F), 방사조직(R)을 포함한 해부학적 조직 배열을 보여주는 자작나무의 횡단면.

**c)** 유세포와 섬유 세포로 둘러싸인 얇은 세포벽의 자작나무 도관.

**d)** 도관 말단부에서 관찰되는 특징적인 사다리형(scalariform, S) 벽공을 가진 자작나무.

출처: Daniel, G., Pulp and paper chemistry and technology, Ek, M., Gellerstedt, G., and Henriksson, G. (ed.), Vol. 1, p. 54, Royal Institute of Technology, Sweden (2009)

도표 02-08. 일반적인 활엽수 섬유의 섬유장 및 폭

| 수종 | 길이 (mm) | | 폭 (μm) | |
|---|---|---|---|---|
| | 평균 | 범위 | 평균 | 범위 |
| 귀아카시아 (Acacia auriculiformis) | 0.8 | - | 14 | - |
| 사탕단풍 (Acer saccharum) | 0.8 | 0.3~1.3 | 16~30 | - |
| 백자작나무 (Betula papyrifera) | 1.3 | - | 25 | - |
| 유칼립투스 (Eucalyptus globulus) | 1.1 | 0.3~1.5 | 20 | 10~28 |
| 사시나무 (Popululs tremula) | 0.9 | 0.2~1.6 | 19 | 13~30 |
| 로브 참나무 (Quercus robur) | 1.1 | 0.5~1.6 | 23 | 14~30 |



활엽수 원료의 특성이 잘 살아있는
국내산 화학펄프 (사진제공_무림P&P)

포함된 것은 모두 목섬유라고 통칭한다. 즉, 펄프제지 산업에서 사용하는 '목섬유(wood fibers)'라는 용어는 단순히 특정 세포만을 가리키는 것은 아니며, 펄프에 존재하는 모든 목질 세포를 포함하는 포괄적인 개념으로 사용된다.

활엽수 목재의 구조적 다양성은 펄프와 종이의 생산 및 이용, 그리고 가공 공정에도 중요한 영향을 미친다. 진정 목섬유와 섬유상 가도관으로 구성되는 활엽수의 섬유는 활엽수 펄프의 가장 중요한 구성성분으로 길이는 약 0.7~1.2 ㎜, 너비는 10~30 μm 범위를 나타낸다. 길이와 직경의 비율은 약 50:1 정도이다(도표 02-08). 이와 같이 활엽수 섬유는 침엽수에 비해 가늘고 짧기 때문에 종이 표면이 매끄럽고 균일한 질감을 갖도록 한다. 비록 섬유 길이가 짧아 침엽수 펄프에 비해 기계적 강도가 다소 낮지만, 적절한 비율로 침엽수 펄프와 혼합하여 사용할 경우 종이의 평활성, 지합 및 인쇄적성을 향상시키는 등 전반적인 품질 개선 효과를 기대할 수 있다.

### (3) 목재 세포벽의 구조

세포 분열이 완료되면 세포는 팽창(enlargement)과 분화(differentiation) 단계를 거치게 되며, 이 과정에서 세포의 원형질(protoplasm)은 매우 얇고 유연한 1차 세포벽(primary wall)에 의해 둘러싸인다. 이후 세포벽 비후(cell wall thickening)가 진행되면서 2차 세포벽(secondary wall)이 형성된다. 세포벽의 비후 정도는 생성되는 계절, 즉 춘재(earlywood)와 추재(latewood)의 차이, 그리고 세포의 기능에 따라 달라진다.

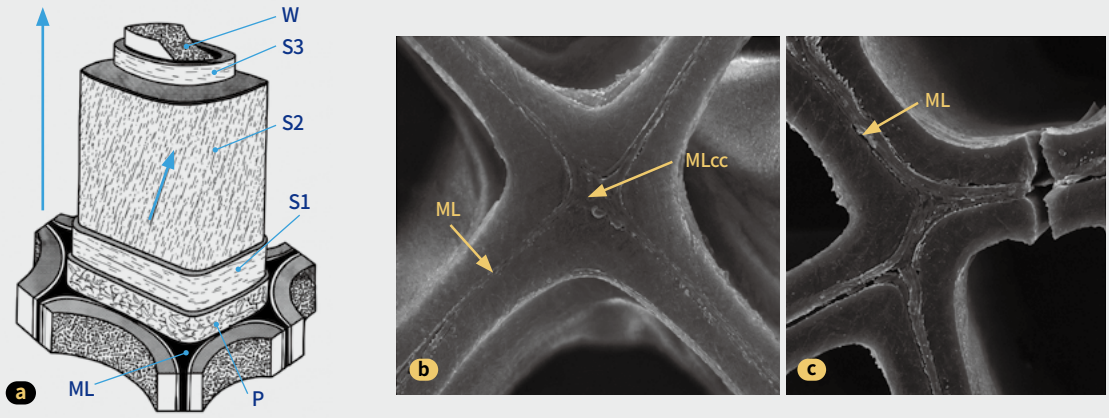
세포 발달의 마지막 단계인 리그닌화(lignification)는 주로 2차 세포벽이 형성되는 과정에서 일어난다. 이때 세포 간 조직인 중간층(middle lamella)과 1차 세포벽에서는 리그닌화가 비교적 빠르게 진행되는 반면, 2차 세포벽의 리그닌화는 상대적으로 점진적으로 진행된다. 대부분의 목재 세포는 이러한 발달 과정을 거치는 데 수 주 정도가 소요된다.

광학현미경과 전자현미경(electron microscope)을 이용하면 이와 같은 세포벽의 층상 구조와 미세구조를 명확하게 관찰할 수 있다(그림 02-05).

식물 세포벽의 주성분인 셀룰로오스는 매우 정교한 계층적 구조를 가진다. 셀룰로오스의 가장 작은 구조 단위는 엘레멘터리 피브릴(elementary fibril)로, 성숙한 세포벽 내에서 평균 약 3.5 nm의 폭을 갖는다. 이러한 엘레멘터리 피브릴들이 다수 집합하여 지름 약 10~20 nm의 마이크로피브릴(microfibril)을 형성한다. 마이크로피브릴은 전자현미경을 통해 관찰할 수 있으며, 관찰 조건에 따라 폭은 대략 5~30 nm 범위로 보고된다.

마이크로피브릴의 직경은 셀룰로오스의 기원과 세포벽 내에서의 위치에 따라 달라지며, 특히 세포벽 내 위치에 따라 배열 방향과 배열 정도에 차이를 보인다. 세

**그림 02-05.** 가도관의 서로 다른 층상 구조




(a) 전형적인 가도관 세포벽의 구조를 나타낸 도식으로, 중간층(middle lamella, ML), 1차 세포벽(primary wall, P), 2차 세포벽 층(secondary cell wall layers, S1, S2, S3), 그리고 세포내강(cell lumen)을 둘러싸는 우상층(warty layer, W)을 보여준다. 화살표는 각 2차 세포벽 층에서 셀룰로오스 미세섬유(cellulose microfibrils)의 배향을 나타낸다. 오른쪽의 전자현미경 사진은 소나무 가도관(b)과 자작나무(c)의 리그닌이 많은 세포간층의 중간영역(intercellular lignin-rich middle lamella, ML)과 세포간층의 세포 코너(middle lamella cell corner, MLcc)의 위치를 보여준다. S1층과 S3층은 이 미세 현미경 사진에서는 뚜렷하게 관찰되지 않는다.

출처: Daniel, G., Pulp and paper chemistry and technology, Ek, M., Gellerstedt, G., and Henriksson, G. (ed.), Vol. 1, p. 61, Royal Institute of Technology, Sweden (2009)

포벽은 기본적으로 비교적 얇은 1차 세포벽(primary wall, P)과 두꺼운 2차 세포벽(secondary wall, S)으로 구성된다.

2차 세포벽은 마이크로피브릴의 배열 방향에 따라 외층(S1), 중간층(S2), 그리고 내층(S3)의 세 층으로 구분된다. 이 중 S3는 경우에 따라 3차 세포벽(tertiary wall, T)이라고 한다. S1층에는 셀룰로오스 마이크로피브릴이 세포축과 거의 직각을 이루며 수평 방향으로 배열되어 있고, 두께는 약 0.1~0.2 ㎜ 이다. S2 층은 마이크로피브릴이 세포축과 거의 평행으로 배열되어 있으며, 2차 세포벽 가운데 가장 두꺼운 층이다. S3층은 마이크로피브릴이 다시 거의 수평 방향으로 배열되어 있으며, 세포의 가장 안쪽에 위치한다.

특히 침엽수의 가도관이나 일부 활엽수의 세포에서는 S3층의 내부가 얇은 막으로 덮여 있는 부위가 관찰되는데, 이를 혹층(warty layer, W)이라 한다. 2차 세포벽 중에서 S2층은 가장 두껍고 마이크로피브릴이 세포축 방향에 가깝게 배열되어 있어, 목재 세포의 강도와 특성에 가장 큰 영향을 미친다. 마이크로피브릴은 세포의 축을 중심으로 나선형으로 감기는데, 이때 감기는 방향에 따라 Z-나선(Z-helix) 또는 S-나선(S-helix)으로 나뉜다. 이러한 마이크로피브릴은 더 큰 섬유소 다발(macrofibril)과 층상구조(lamella)로 결합되어 세포벽의 복합적인 구조를 형성한다.

목재 세포는 가운데가 빈 중공 구조를 가지며, 중심의 빈 공간은 세포내강(lumen, L)이라 한다. 인접한 세포들 사이에는 P층이 서로 맞닿는 구조가 형성되며, 이 사이에는 세포들을 결합시키는 기능을 가진 세포간층(middle lamella, ML)이 존재한다. 세포간층은 인접한 두 P층과 구분하기 어려워 일반적으로 이 전체 구조를 통틀어 복합세포간층(compound middle lamella, CML)이라 칭한다. 이러한 다층적이고 정교한 구조는 목재의 기계적 강도, 수분 이동성, 화학적 반응성 등 다양한 성질에 큰 영향을 미친다. 목재 세포의 각 층은 미세섬유소의 배열 방향뿐만 아니라 화학 조성에서도 차이를 나타낸다.

### (4) 목재의 화학적 조성

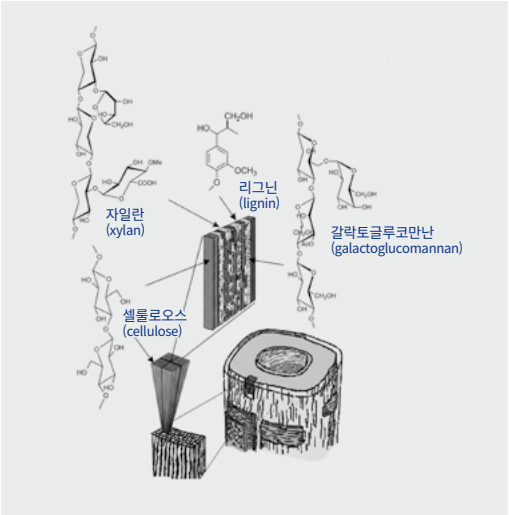
목재의 세포벽은 공통적으로 셀룰로오스(cellulose), 헤미셀룰로오스(hemicellulose), 그리고 리그닌(lignin)의 세 가지 주요 성분으로 구성되어 있다(그림 02-06). 이들 성분은 세포벽의 구조적 골격을 형성하며, 목재의 물리적·화학적 특

성을 좌우한다. 이 외에도 펙틴(pectin), 전분(starch), 단백질(proteins)과 같은 기타 고분자 물질이 소량 존재하며, 그 함량은 수종에 따라 다소 차이를 보인다 (도표 02-09).

이러한 고분자 성분 외에도, 분자량이 낮은 각종 추출물(extractives), 수용성 유기화합물, 그리고 무기물 성분이 침엽수와 활엽수 모두에서 소량 발견된다. 이들 부성분은 목재의 색상, 냄새, 내구성 및 펄프화 반응성 등에 영향을 미칠 수 있다.

일반적으로 나무는 정단부(top), 줄기(stem), 가지(branches), 잎(leaves 또는 needles), 그리고 뿌리(root)로 구분되며, 각 부위는 서로 다른 화학 조성을 나

**그림 02-06.** 목재의 화학적 조성



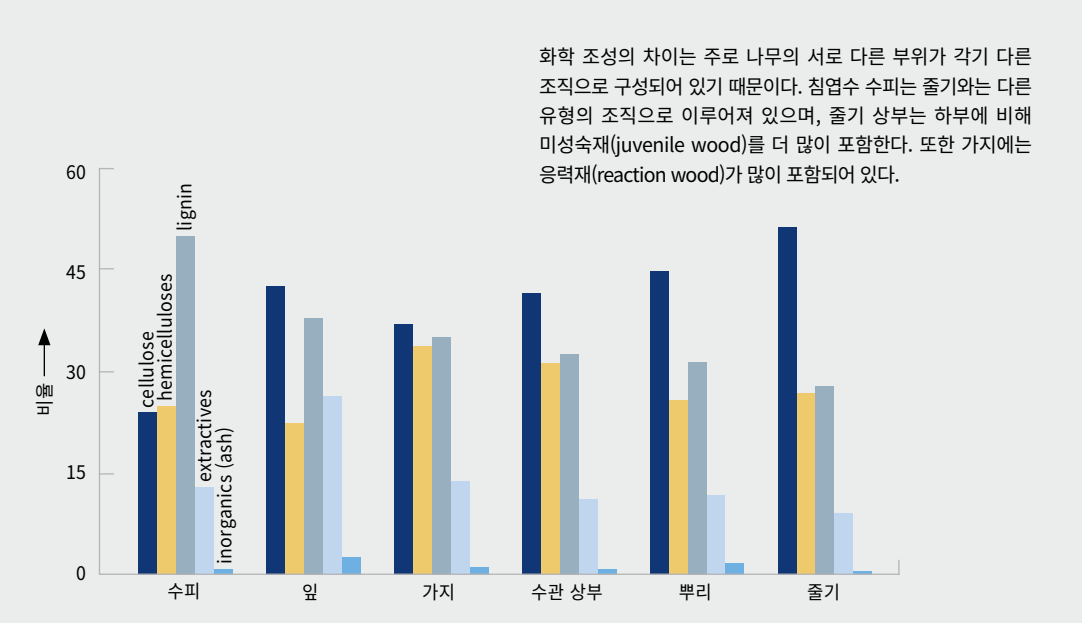

출처: Daniel, G., Pulp and paper chemistry and technology, Ek, M., Gellerstedt, G., and Henriksson, G. (ed.), Vol. 3, p. 22, Royal Institute of Technology, Sweden (2009)

**도표 02-09.** 수종별 화학 조성분 함량

(단위 : 질량%)

| 수종 | | 추출물 | 리그닌 | 셀룰로오스 | 글루코만난 | 자일란 | 기타 다당류 | 기타 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 침엽수 | 노르웨이 가문비나무 (Picea abies) | 1.7 | 27.4 | 41.7 | 16.3 | 8.6 | 3.4 | 0.9 |
| | 구주소나무 (Pinus sylvestris) | 3.5 | 27.7 | 40.0 | 16.0 | 8.9 | 3.6 | 0.3 |
| 활엽수 | 너도밤나무 (Betula verrucosa) | 3.2 | 22.0 | 41.0 | 2.3 | 27.5 | 2.6 | 1.4 |
| | 너도밤나무 (Fagus sylvatica) | 1.2 | 24.8 | 39.4 | 1.3 | 27.8 | 4.2 | 1.3 |
| | 유칼립투스 (Eucalyptus calmaldulensis) | 2.8 | 31.3 | 45.0 | 3.1 | 14.1 | 2.0 | 1.7 |
| | 홍단풍나무 (Acer rubrum) | 3.2 | 25.4 | 42.0 | 3.1 | 22.1 | 3.7 | 0.5 |

**도표 02-10.** 미송(slash pine)의 부위별 화학조성




타낸다(도표 02-10). 이 가운데 줄기 부위는 잎, 가지, 뿌리 등에 비해 셀룰로오스 함량이 높고 추출물 및 회분 함량이 상대적으로 낮아, 화학펄프 제조에 가장 유리하다.

살아 있는 나무의 수분 함량은 계절별 변화뿐만 아니라 하루 중에도 기후 조건에 따라 달라지며, 평균적으로는 전체 목재 질량의 약 40~50% 수준이다. 목재는 전건질량 기준으로 약 2/3가 셀룰로오스와 헤미셀룰로오스로로 구성되어 있다(도표 02-11).

침엽수와 활엽수 모두 셀룰로오스 함량은 큰 차이가 없어, 일반적으로 목재 전건 기준 40~45%를 차지한다. 그러나 헤미셀룰로오스와 리그닌 함량에서는 수종 간 차이가 나타난다. 침엽수의 헤미셀룰로오스 함량은 보통 25~30%로, 활엽수의 30~35%에 비해 낮은 편이다. 반면 침엽수의 리그닌 함량은 일반적으로 25~30%로, 온대 지역 활엽수의 20~25%보다 높은 경향을 보인다.

추출물 등 기타 성분의 함량은 온대 지역 수종의 경우 대체로 약 5% 수준이지만, 열대 지역 수종에서는 이보다 높은 값을 나타내는 경우가 많다.

목재의 주요 3성분은 목재 세포 내에 균일하게 분포되어 있지 않으며, 이들의 상대적인 질량 비율은 목재의 형태적 부위나 수령(age)에 따라 달라질 수 있다. 도표 02-11에는 침엽수 가도관 세포벽의 층별 화학 조성을 나타내었다. 일반적으로

**도표 02-11.** 침엽수 가도관 세포벽을 구성하는 주요 구성 성분의 상대적 질량 분율

(단위 : 전건질량%)

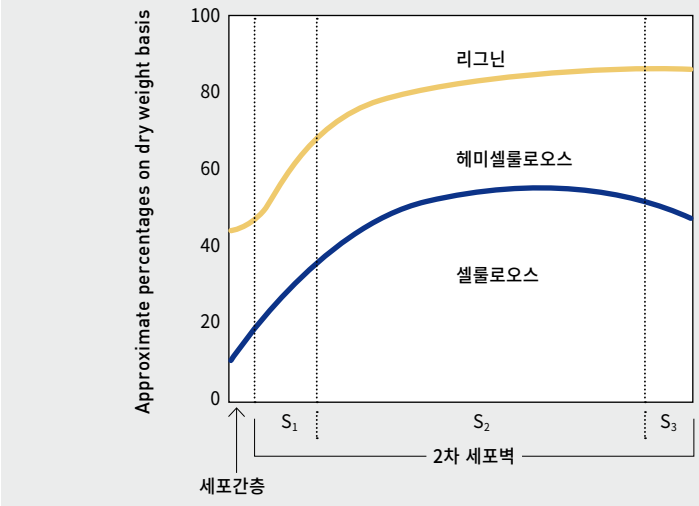
| 성분 | 형태학적 위치 | |
|---|---|---|
| | ML+P(복합세포간층) | 2차 세포벽($S_1$+$S_2$+$S_3$) |
| 리그닌 | 65 | 25 |
| 다당류 | 35 | 75 |
| 셀룰로오스 | 12 | 45 |
| 글루코만난 | 3 | 20 |
| 자일란 | 5 | 10 |
| 기타 | 15 | <1 |

**도표 02-12.** 침엽수 가도관 세포벽을 구성하는 주요 구성 성분의 분포 비율

(단위 : 각 성분의 총 함량에 대한 분포 비율, %)

| 성분 | 형태학적 위치 | |
|---|---|---|
| | ML+P(복합세포간층) | 2차 세포벽($S_1$+$S_2$+$S_3$) |
| 리그닌 | 21 | 79 |
| 다당류 | 5 | 95 |
| 셀룰로오스 | 3 | 97 |
| 글루코만난 | 2 | 98 |
| 자일란 | 5 | 95 |
| 기타 | 75 | 25 |

**도표 02-13.** 침엽수 세포 부위별 화학 조성분 함량



침엽수의 경우 세포간층에는 리그닌이 비율이 약 65%로 높다. 특히 세포간층의 모서리(cell corner) 부위에는 리그닌의 함량이 일반적인 세포간층(ML)보다 약 10~30% 더 높은 것으로 보고되고 있다.

한편 2차 세포벽(S1+S2+S3)에는 다당류(polysaccharide) 함량이 전건 질량 대비 약 75%를 차지한다. 이차 세포벽은 전체 세포벽 두께의 대부분을 차지하므로, 목재 내 전체 다당류 총함량의 약 95%가 이차 세포벽에 포함되어 있다. 리그닌의 경우 복합세포간층(compound middle lamella)에서의 비율은 약 65%로 매우 높지만, 부피가 상대적으로 작기 때문에 전체 리그닌 총함량 중 약 21%만이 이 영역에 분포한다. 나머지 약 79%의 리그닌은 두께가 큰 이차 세포벽에 분포한다 (도표 02-12 및 도표 02-13).

### 1) 셀룰로오스(cellulose)

셀룰로오스는 자연에 존재하는 유기화합물 중 가장 풍부한 천연 고분자이다. 셀룰로오스는 선형 구조를 가진 고분산 단일다당류(polydispersed linear homopolysaccharide)로, β-D-글루코피라노스(β-D-glucopyranose) 단량체가 (1→4)-글리코시드 결합으로 반복 연결되어 형성된다(그림 02-07).

글루코피라노스 고리는 $4C_1$자리 입체배치(conformation)를 가지며, C1-OR, C2-OH, C3-OH, C4-OR, C5-$CH_2OH$에 존재하는 모든 치환기가 거의 동일 평면상에 위치한다. 이러한 구조적 특징으로 인해 분자 내 및 분자 간 입체장애가 최소화되며, 셀룰로오스 사슬은 높은 구조적 안정성을 나타낸다.

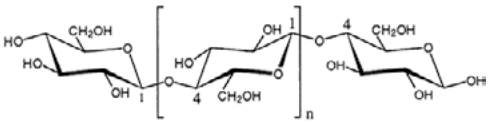
셀룰로오스 사슬의 C1 위치에 존재하는 헤미아세탈(hemiacetal) 수산기는 환원성(reducing end) 말단으로 작용하며, 반대편 C4 위치의 수산기는 비환원성 말단(non-reducing end)으로 작용한다. 따라서 셀룰로오스 분자는 환원성 말단과 비환원성 말단을 동시에 지닌다.

목재 셀룰로오스의 중합도(DP: degree of polymerization)는 일반적으로 약 10,000 수준이며, 이는 면(cotton) 셀룰로오스의 중합도(약 15,000)보다 낮다. 글루코스 단량체의 분자량이 162 g/mol임을 고려하면, 이들 셀룰로오스의 분자량은 각각 약 $1.6\times10^6$ Da(1.6 MDa)와 $2.4\times10^6$ Da(2.4 MDa)에 해당한다. 이를 분자 길이로 환산하면 각각 약 5.2 μm와 7.7 μm 정도이다.

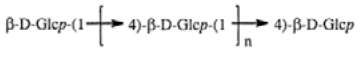
그러나 화학펄프 공정을 거치면서 셀룰로오스 사슬은 절단되어 중합도가 대체로

그림 02-07. 셀룰로오스의 화학구조

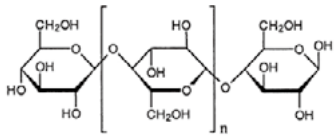
**a.** 입체화학



**b.** 약식




**c.** Harworth식



**d.** Mill식

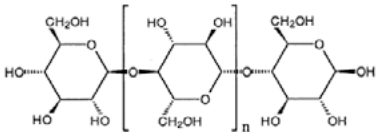
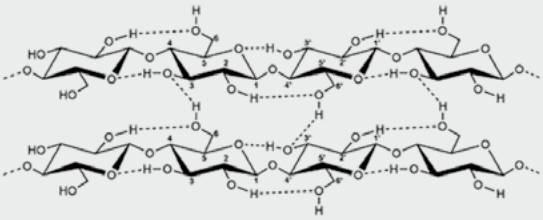
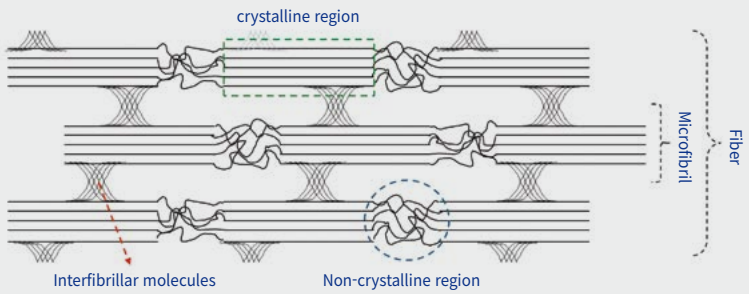


그림 02-08. 셀룰로오스의 1차 구조와 셀룰로오스 사슬 사이의 수소결합



평행하게 배열된 셀룰로오스 사슬 사이에서는 각 포도당 잔기마다 C6 하이드록실기와 C3 하이드록실기 사이에 하나의 수소결합이 형성된다[11].

그림 02-09. 셀룰로오스의 결정 및 비결정 구조




셀룰로오스는 결정영역과(crystalline region)과 비결정영역(non-crystalline region 혹은 amorphous region)이 혼재하는 반결정영역(semi-crystalline) 고분자 사슬의 형태를 나타낸다.

500~2,000 범위까지 감소한다. 이때 중량평균분자량(Mw)과 수평균분자량(Mn) 간의 차이는 크지 않아, 일반적으로 Mw ≈ Mn의 관계를 보인다.

셀룰로오스는 글루코스 단위에 존재하는 자유 수산기들 간의 강한 수소결합에 의해 분자 간 결합이 형성되며, 이로 인해 마이크로피브릴(microfibril) 구조를 이룬다(그림 02-08). 이러한 마이크로피브릴 내부에는 셀룰로오스 사슬이 규칙적으로 배열된 결정(crystalline) 영역과 상대적으로 무질서한 비결정(amorphous) 영역이 공존한다. 즉, 셀룰로오스는 결정 영역과 비결정 영역이 교호로 배열된 반결정(semi-crystalline) 고분자이다.

셀룰로오스의 결정 영역은 일반적으로 약 60~100 nm의 길이를 가지며, 결정화도(crystallinity)는 보통 60~75% 수준으로 비교적 높은 편이다(그림 02-09).

### 2) 헤미셀룰로오스(hemicellulose)

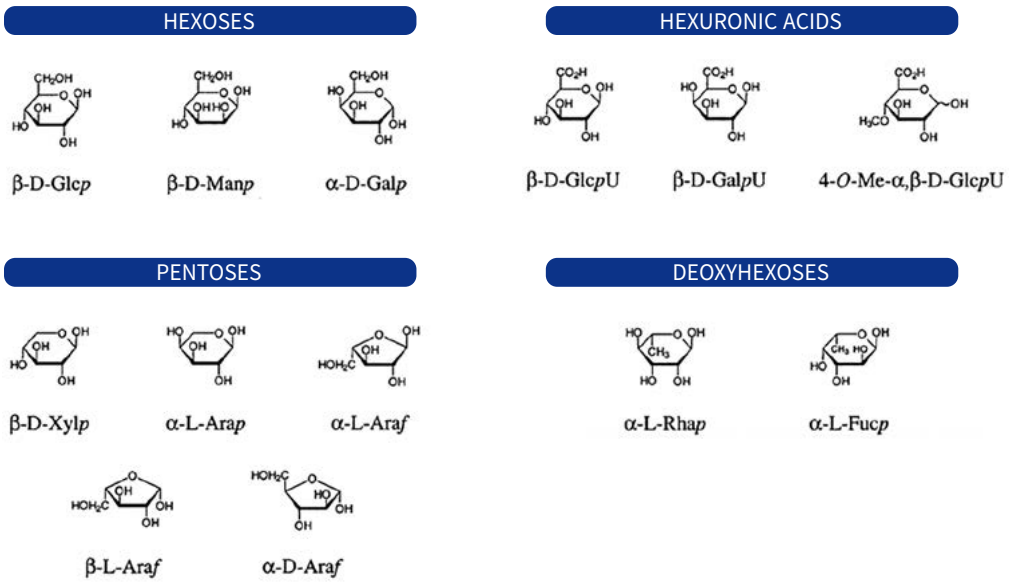
헤미셀룰로오스는 목재를 구성하는 주요 성분 중 하나로 일반적으로 목재 전건 질량의 20~35%를 차지한다. 셀룰로오스 및 리그닌과 함께 식물 세포벽의 구조적 지지체를 형성하며, 주로 셀룰로오스 미세섬유 사이에 분포한다.

목재의 주요 구성 성분들은 서로 강하게 결합되어 있어 헤미셀룰로오스를 리그닌이나 셀룰로오스로부터 분리하는 것이 쉽지 않으며, 분리 시 종종 화학적 변화를 수반한다. 헤미셀룰로오스는 목재 외에도 초본류, 곡물류, 일부 원시 식물 등 다양한 식물체에 존재하며, 그 종류와 함량은 식물의 종(species), 조직의 유형, 생장 단계, 생육 환경, 저장 조건, 그리고 성분 분리 방법 등에 따라 크게 달라진다.

헤미셀룰로오스는 일반적으로 이질 다당류(heteropolysaccharide) 형태로 존재하나, 일부는 하나의 당으로 구성된 단일다당류(homopolysaccharide)의 특징을 갖기도 한다. 목재 내의 헤미셀룰로오스 중합도는 약 200 이하로 셀룰로오스에 비해 낮다.

헤미셀룰로오스를 구성하는 단량체로는 6개의 탄소로 이루어진 6탄당(hexose)인 D-글루코스(D-glucose), D-만노스(D-mannose), D-갈락토스(D-galactose)가 있으며, 5개의 탄소로 이루어진 5탄당(pentose)인 D-자일로스(D-xylose), L-아라비노스(L-arabinose)가 있다. 이외에도 소량의 L-람노스(L-rhamnose), L-퓨코스(L-fucose), 그리고 우론산류인 4-O-메틸-D-글루쿠론산, D-갈락투론산, D-글루쿠론산이 존재한다(그림 02-10). 이러한 단량체는 주로 고리 구조 형태로

그림 02-10. 헤미셀룰로오스를 구성하는 당의 종류




존재하며, 각각 α- 또는 β-입체이성질체로 나타난다.

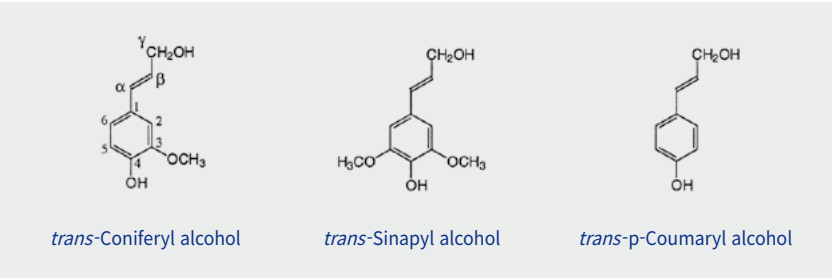
일반적으로 침엽수의 헤미셀룰로오스는 만노스와 갈락토스의 비율이 높고 자일란의 구성비가 낮다. 반면 활엽수는 자일란 비율이 상대적으로 높다. 아세틸기(acetyl group)는 헤미셀룰로오스에 공통적으로 존재하는 치환기로서, 용해성, 반응성 및 열적 안정성과 같은 화학적 성질에 영향을 미친다.

헤미셀룰로오스는 셀룰로오스에 비해 화학적 및 열적 안정성이 낮다. 이는 증해 혹은 표백 공정에서 헤미셀룰로오스가 더 쉽게 열분해되거나 가수분해될 수 있음을 의미한다.

### 3) 리그닌(lignin)

리그닌은 목재를 구성하는 주요 고분자 물질 중 하나로, 셀룰로오스나 헤미셀룰로오스와 달리 비결정성(amorphous) 고분자이다. 리그닌은 페닐프로판(phenylpropane)을 기본 구조 단위로 하여 구성되며(그림 02-11), 이들 페닐프로판 단위가 다양한 결합 방식으로 불규칙하게 연결되어 있는 것이 특징이다. 이러한 구조적 특성으로 인해 리그닌은 규칙적인 반복 구조를 갖는 목재 탄수화물과 뚜렷이 구분된다.

그림 02-11. 리그닌을 구성하는 3종의 페닐프로판 유닛




*trans*-Coniferyl alcohol　　*trans*-Sinapyl alcohol　　*trans*-p-Coumaryl alcohol

펄프 생산 공정에서 리그닌은 주로 부산물 형태로 회수되며, 산업적으로도 다양하게 활용되고 있다. 대표적인 산업용 리그닌으로는 크라프트 공정에서 얻어지는 크라프트 리그닌(kraft lignin 또는 sulfate lignin), 소다 공정에서 생성되는 알칼리 리그닌(alkali lignin 또는 soda lignin), 그리고 황산염 펄프화 공정에서 생성되는 리그노설포네이트(lignosulfonate)가 있다. 이들 리그닌은 각각 크라프트, 소다-안트라퀴논(Anthraquinone, AQ), 황산염 펄핑 공정에서 유래하며, 제조 공정의 차이에 따라 화학 구조와 물리적 성질, 그리고 활용 용도에서도 차이를 보인다.

이외에도 유기용매(organosolv) 리그닌은 주로 알코올계 유기용매를 이용한 펄핑 공정에서 얻어지며, 산 가수분해 리그닌(acid hydrolysis lignin)은 산을 이용한 목재 가수분해 과정에서 생성된다. 이러한 리그닌들은 학술적으로는 잘 연구되어 있으나, 현재까지 상업적 생산 규모는 제한적인 수준에 머물러 있다.

### 4) 추출물(extractives)

추출물은 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 리그닌과 달리 목재의 구조를 형성하지 않는 비구조적 성분(nonstructural constituents)으로 분류된다. 넓은 의미에서 추출물은 유기용매 또는 물에 용해되는 모든 성분을 포함한다. 추출물은 수천 종에 달하는 매우 다양한 화합물들로 구성되어 있으며, 일반적으로 분자량이 낮은 특성을 가진다. 이들 추출물질은 목재에 고유한 색과 냄새를 부여하는 주요 요인이며, 일부 성분은 지방과 왁스와 같이 목재 세포 내에서 생물학적 기능을 수행하는 에너지원으로 작용하기도 한다. 레진이라는 용어는 일반적으로 페놀성 화합물을 제외한 친유성(lipophilic) 물질을 통칭하는 데 사용된다. 이러한 레

진 성분들은 비극성 유기용매에는 잘 용해되지만 물에는 거의 용해되지 않는 특성을 가진다. 대부분의 레진(resin) 성분은 미생물에 의한 부패나 곤충의 공격으로부터 목재를 보호하는 기능을 수행하여 목재의 내구성 향상에 기여한다. 이러한 이유로 추출물질의 종류와 함량은 수종별 내후성 및 내구성과 밀접한 관련을 가진다. 대표적인 추출물의 하나인 송진은 소나무류에 풍부하게 존재하며 오래전부터 종이에 내수성을 부여하기 위한 사이즈제(sizing agent) 제조에 널리 활용되어 왔다.

**참고문헌**


[1] 정병헌, 배재수, 유리화, 김기동, 곽두안, 김동현, 김영환, 장주연, 설아라, 임종수, 이정희, 최형태, 김은숙, 신중훈, 박소희, 김주미, 한희 (2024). 산림자원, 임산물, 산림서비스의 장기전망, 국립산림과학원 연구보고서 p.25-26.

[2] 김기현, 박창협, 이동성, 천영호 (2024), 2050 순환경제, p. 3-19

[3] Chen, Y-L., Zhang, X., You, T-T., and Xu, F., Cellulose 26:205-213 (2019) DOI: 10.1007/s10570-018-2130-7

[4] Sabara, Z, Mutmainnah, A., Kalsum, U., Afiah, I. N., Husna, I., Saregar, A., Husein, I., and Umam, R., Sugarcane Bagasse as the Source of Nanocrystalline Cellulose for Gelatin-Free Capsule Shell, International Journal of Biomaterials, 14(1) (2022) DOI: 10.1155/2022/9889127



**김 진 두** ㈜아진피앤피 대표이사

**2022.05 – 현재** 제 28, 29, 30대 사)한국펄프종이공학회 회장
**2016.06 – 현재** ㈜아진피앤피 대표이사
**2012.06 – 2015.05** 태림그룹 월산/의령 총괄 부사장
**1989.06 – 2012.05** 테림페이퍼 부사장
**1984 – 1989** ㈜한진해운
**2025** 핀란드 경제고용부 공로훈장 수상
(Medal for Extraordinary Achievement)
**2021** 중소기업인대회 대통령 표창 수상
**2020** 제지산업발전 유공자 산업부장관상 수상

✉ jdkim@ajinpaper.com

# 3
# 펄핑공정



우수한 품질의 국산 건조펄프 (사진제공_무림P&P)

## 1. 펄프원료의 종류



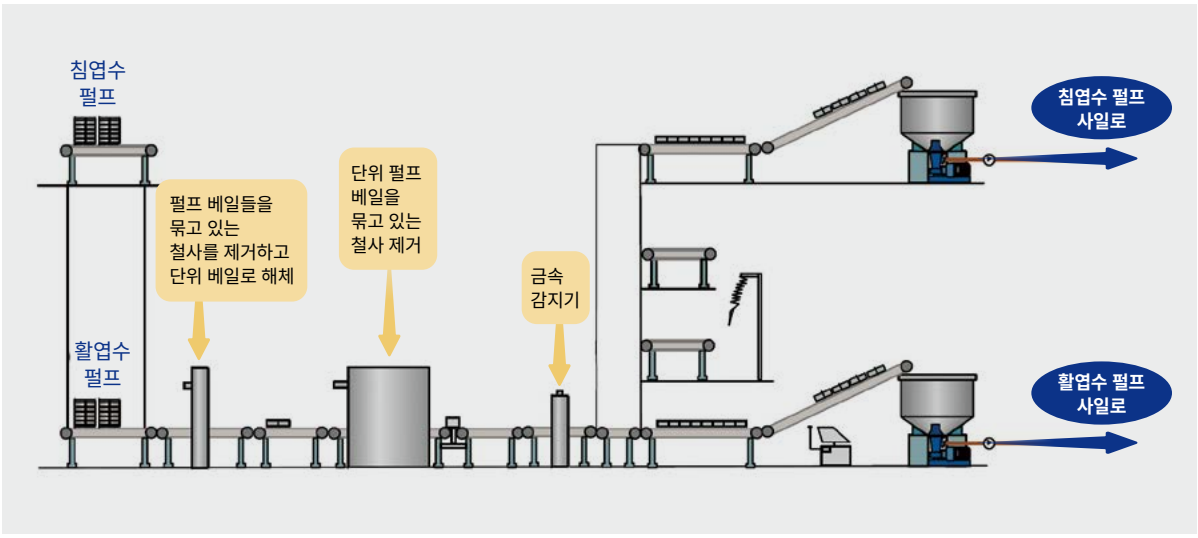
국내 유일 펄프·제지 일관화 공장
(사진제공_무림P&P)

종이의 주원료는 펄프와 종이자원이다. 목재, 비목재 식물 등의 섬유를 화학적·기계적으로 분리하여 얻은 섬유상 원료로, 종이와 판지의 주원료인 펄프는 일반적으로 베일(bale)이라고 불리는 압축포장형태로 공급된다. 펄프 제조 공정과 제지 공정을 하나의 공장에서 연속적으로 운영하는 생산 체계인 펄프·제지일관화 공장에서는 베일 형태가 아닌 슬러리 상태의 원료를 펄프 공정에서 제지 공정으로 직접 공급하여 사용함으로써, 건조 및 해리에 소요되는 에너지를 절감하고 있다.

한편, 우리나라는 원료 펄프를 주로 해외에서 수입하여 사용하므로, 운송의 편의성과 비용 절감을 위해 대부분 건조된 압축 포장 형태, 즉 베일 상태로 공급되는 펄프를 사용하는 경우가 대부분이다. 펄프 베일은 일반적으로 250 kg이며, 섬유의 해리를 용이하게 하기 위해 수분함량은 약 10% 수준으로 공급된다. 베일은 철끈으로 묶인 상태로 공급되며, 제지공정에 투입되기 전에 이를 묶고 있는 철끈을 제거한다(그림 03-01).

산업용지와 신문용지의 주요한 원료가 되는 종이자원 역시 압축포장형태로 가공되어 제지공장에 공급된다. 종이자원은 가정과 기업체 등에서 사용된 종이나 판지를 분리, 배출하면, 수집업체가 이를 집하한 후 압축 포장 형태로 가공하여 제지공장에 공급한다. 종이자원의 압축포장은 일반적으로 톤 단위로 가공되어 유통된다.

그림 03-01. 압축포장형태의 철끈제거 및 펄퍼 투입 과정



종이자원을 효율적으로 활용하기 위해서는 종류별로 분리하여 배출하는 것이 중요하다. 이는 신문지는 신문용지 생산에, 골판지는 골판지 생산에 사용하는 등 용도에 적합한 원료로 재활용하는 것이 가장 효과적이기 때문이다. 분리배출 시에는 송장, 테이프, 스티커 등을 제거하고, 스테이플러 심이나 스프링과 같은 금속류도 함께 제거해야 한다. 또한 우유팩과 같은 종이는 일반 종이류와 구별하여 별도로 분리배출하는 것이 바람직하다. 한편 음식물 등으로 오염된 종이, 비닐로 코팅된 종이, 감열지 영수증 등은 재활용이 어려우므로 일반 쓰레기로 배출한다.

## 2. 펄프의 해리

해리 공정은 공급된 베일 상의 원료 펄프나 종이자원을 섬유상태로 분리하는 공정이다. 압축포장 형태로 공급된 펄프나 종이자원을 낱개의 섬유로 분리하기 위해서는 먼저 압축포장에 사용된 철끈을 제거하고, 고속으로 회전하는 해리기에 물과 펄프를 투입하여 기계적 충격과 섬유 간 마찰을 통해 섬유를 분리한다. 섬유상으로 분리된 펄프는 슬러리 상태가 된다. 신문용지 공장 등에서는 펄프의 해리 공정이 재활용 신문지로부터 잉크를 분리하는 데에도 중요한 역할도 한다. 해리기는 펄퍼(pulper)라고도 하며, 처리 시의 농도에 따라 저농도 해리기(low consistency pulper)와 고농도 해리기(high consistency pulper)로 구분된다. 또한 작업의 연속성에 따라 단속식 펄퍼(batch pulper)와 연속식 펄퍼(continuous pulper)로 나뉜다.

단속식 펄퍼는 일정한 양의 공정수와 원료를 넣은 후 일정 시간 동안 해리를 진행하고, 이를 저장조로 이송하는 작업을 반복하는 방식이다. 반면, 연속식 펄퍼는 펄프원료와 공정수가 연속적으로 투입되며, 해리된 슬러리 상태의 종이 원료가 지속적으로 배출되는 형태이다.

## 3. 펄퍼의 형태

저농도 펄퍼의 대표적인 형태는 그림 03-02와 같이 하부에 고속으로 회전하는 로터(rotor)가 설치되어 있으며, 로터 하부에는 천공판이 있어 해리된 펄프 슬러리

가 이를 통하여 배출된다. 종이자원을 원료로 사용하는 경우에는 체스트가 원형이 아닌 D자 형태로 변형된 펄퍼가 사용되는 경우가 많다. D자형 펄퍼는 지료 내에 보다 강한 와류를 발생시켜 해리 효율을 향상시키고, 펄핑시간을 단축시키는 장점이 있다. 저농도 펄퍼는 일반적으로 펄프를 농도 3~5% 이하에서 처리하는 해리기로, 저농도 조건에서 운전되므로 처리용량에 비해 에너지 소비가 큰 편이다. 또한 섬유가 고속으로 회전하는 로터에 의해 기계적으로 처리되기 때문에 섬유장 저하가 비교적 크게 발생하며, 처리시간이 길다는 단점이 있다. 이러한 특성으로 인해 저농도 펄퍼는 화학펄프와 재활용 섬유자원의 처리에 널리 사용되고 있다. 처리시간은 펄프의 종류나 펄퍼의 형태에 따라 달라질 수 있으나, 통상적으로 5~35분 범위이다.

드럼타입의 펄퍼는 주로 종이자원의 해리에 사용되는 연속식 펄퍼로, 해리와 스크리닝의 두 기능을 수행한다. 드럼 펄퍼(drum pulper)는 농도 14~22%의 비교적 고농도 원료를 회전하는 경사형의 대형 드럼 내부에서 낙하시켜 해리하는 방식으로 운전된다(그림 03-03). 이러한 방식은 기계적 충격으로 해섬되는 저농도 펄퍼와 달리 섬유에 강한 기계적 충격을 가하지 않으므로 섬유의 강도 저하가 적고, 섬유장이 유지되어 단섬유의 생성이 적다는 장점이 있다. 또한 신문용지 재활용 공정에서 분리된 잉크가 미분화되지 않는 장점도 있다.

**그림 03-02.** 저농도 펄퍼



**그림 03-03.** 저농도 펄퍼와 드럼 펄퍼의 해섬원리 비교

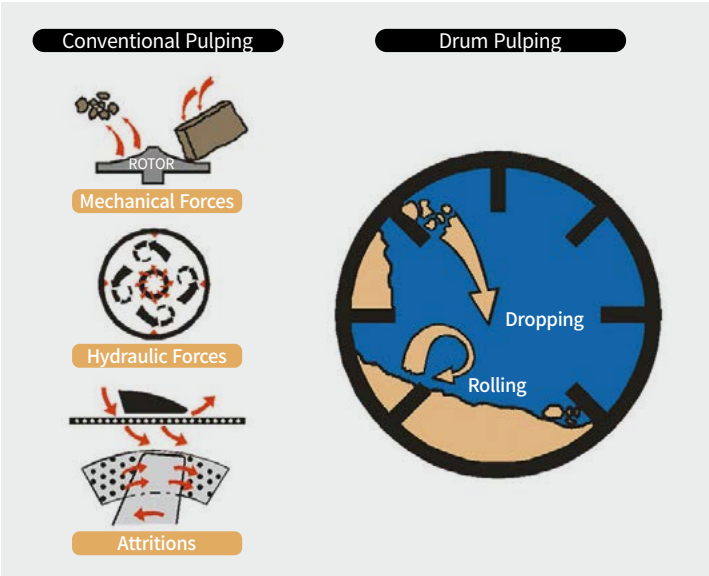
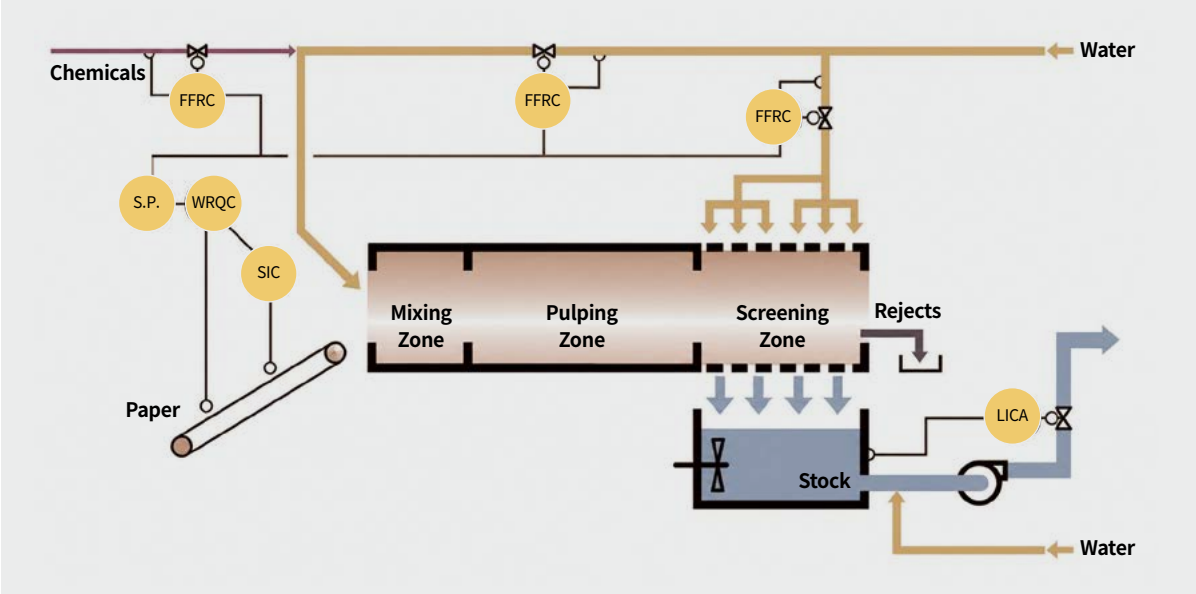


그림 03-04. 드럼 펄퍼




섬유자원은 펄퍼의 공급 호퍼(hopper)에 투입되면 출구 쪽이 약 1° 정도 낮게 설치된 회전드럼 내부에서 서서히 출구로 이동하면서 드럼의 회전작용과 중력에 의한 낙하작용에 의해 섬유가 해섬된다(그림 03-04). 이후 스크린 존으로 이동한 해리된 섬유는 샤워수에 의해 희석되며, 스크린 존에서 이물질이 분리·배출된다. 드럼 펄퍼는 초기 투자비가 높지만 에너지 소비가 적고, 유지·보수 비용도 적다는 장점이 있다. 이러한 특성으로 인해 신문지 재활용 공정에 주로 사용된다.

로터 타입의 고농도 펄퍼는 약 10~20% 고농도 지료를 펄퍼 내부에 장착된 나선형 로터로 강하게 순환시켜 섬유 간 마찰을 발생시킴으로써 섬유를 분리시키고 잉크 입자도 박리시키는 원리를 이용한다(그림 03-05). 기계적 충격에 의해 해리가 이루어지는 저농도 펄퍼와 달리, 섬유 간 마찰에 의해 해리가 발생하므로 불순물이 미세하게 파쇄되지 않고 비교적 큰 상태로 유지되므로 후속 공정에서 더 쉽게 제거할 수 있다. 이러한 고농도 펄퍼는 잉크 분리가 중요한 신문용지와 인쇄용지의 재활용공정과 알루미늄이나 플라스틱이 코팅된 액체포장지의 재활용 공정에 주로 사용된다. 또한 고농도 조건에서 운전되므로 물과 에너지 절약에 유리한 장점이 있다. 펄핑이 종료된 후에는 이차 펄퍼로 이송하여 이물질을 분리·제거한다. 이물질 함량이 높은 원료인 경우에는 고농도 펄퍼 하부에 스크린 플레이트를 설치하여 조대 이물질과 플라스틱을 제거하기도 한다.

종이자원을 재활용하는 공정에서 1차 펄퍼에 의한 해리 공정이 완료된 후, 추가적인 섬유 분리 및 정제를 수행하는 설비를 2차 펄퍼라고 한다. 2차 펄퍼는 주로 1차 펄퍼에서 충분히 해리되지 않은 섬유 뭉치를 재차 해리하고, 이물질을 분리, 제거하여 펄프섬유의 품질을 향상시키는 기능을 한다. 이물질 분리는 스크린 플레이트와 회전하는 로터의 작용에 의해 이루어지며, 분리된 불순물은 세척 드럼 등의 후속 설비로 이송되어 최종적으로 제거된다(그림 03-06).

펄핑처리가 완료된 지료는 체스트로 이송되어 저장된 후 다음 처리 공정으로 보내진다. 체스트는 단속식으로 처리된 지료를 후속 공정으로 연속적으로 이송하기 위한 완충장치의 역할을 한다. 펄퍼를 거친 지료에 금속이나 모래 등의 이물질이 포함될 경우 후속 설비에 손상을 일으킬 수 있으므로, 가능한 한 조속한 제거가 필수적이다. 이를 위해 고농도 크리너를 이용한다.

고농도 크리너를 통과한 지료는 크리닝과 스크리닝 공정을 거쳐 중량 이물질과 조대 이물질을 제거한 후 머신 체스트에 저장된다. 머신 체스트는 초지기로 공급되기 전의 완성지료를 저장하는 저장조이다. 머신 체스트에 저장된 지료는 초지기의 백수와 혼합하여 초지에 적당한 농도로 희석된 다음, 헤드박스로 이송된다.

**그림 03-05.** 나선형 로터를 이용한 고농도 펄퍼

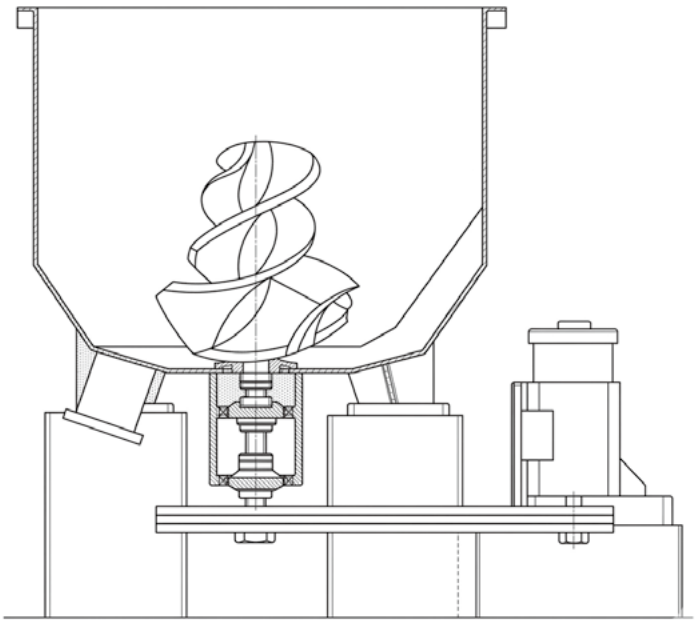
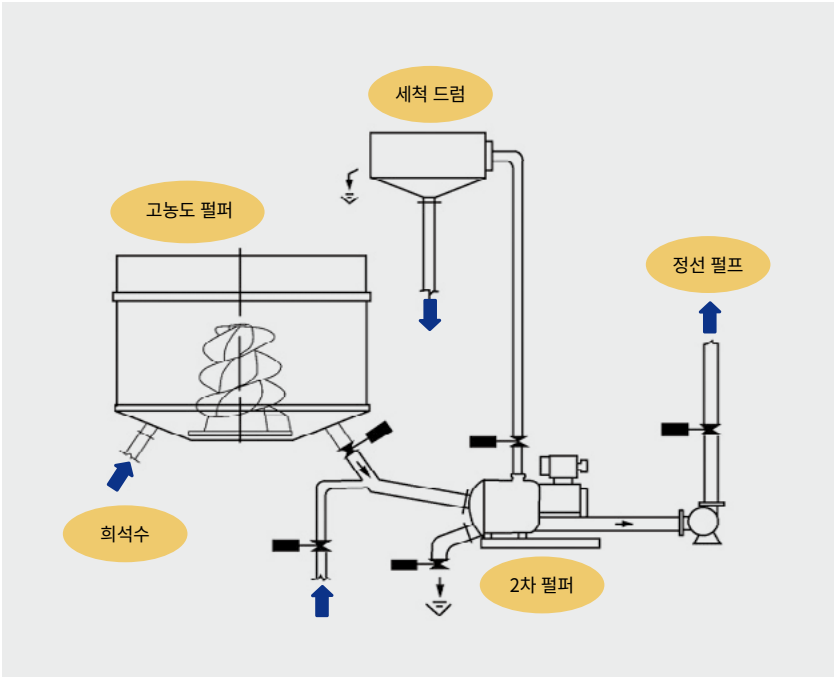


그림 03-06. 고농도 펄퍼, 2차 펄퍼 및 스크린으로 구성된 해리공정 예








**김 철 환** 경상국립대학교 교수

2000 – 현재 경상국립대학교 교수
2025 종이의 날 산업통상자원부 장관상 수상
2025 – 현재 케이엔에스케미칼(주) 사외이사
2018 – 2020 경상국립대학교 학술림장
2015 – 2015 경상국립대학교 농생명과학원 원장
1993 서울대학교 대학원 석사 졸업
1991 서울대학교 농과대학 학사 졸업

jameskim@gnu.ac.kr

# 4
# 리파이닝 공정

국내 유일 펄프 공장에서 생산된 표백화학펄프 슬러리 (사진제공_무림P&P)

# 1. 리파이닝 공정 개요

### (1) 리파이닝의 정의와 목적

이론적으로는 종이는 모든 식물성 원료로부터 제조할 수 있으나, 경제성과 최종 제품의 물리적 특성을 종합적으로 고려할 때 목재를 대체할 만한 실용적인 원료는 아직까지 발견되지 않았다. 따라서 침엽수와 활엽수를 주원료로 하는 목재 펄프가 제지 산업의 중요한 핵심 소재로 활용되고 있다.

펄프화 공정을 거쳐 제조된 초기 상태의 펄프 섬유는 독특한 구조적 특징을 보인다(그림 04-01). 펄프 섬유의 세포벽은 비교적 두꺼워 강직한 형태를 유지하고 있다. 특히, 화학펄프의 경우 일차벽(primary wall)과 이차벽(secondary wall)에는 셀룰로오스가 다량으로 함유되어 있다. 이러한 구조적 특성으로 인해 버진 펄프 섬유는 유연성이 부족한 상태를 보인다. 이는 목재가 자연 상태에서 구조적 지지체 역할을 하도록 진화한 결과이지만, 제지공정의 관점에서는 극복해야 할 중요한 과제로 작용한다. 왜냐하면 강직한 섬유로는 충분한 섬유 간 접촉 면적을 확보하기 어려우며, 결과적으로 섬유 간 결합력이 약하여 강도가 낮고, 평활성과 지합이 불량한 종이가 생산되기 때문이다. 따라서 고품질 종이 제조를 위해서는 펄프섬유를 보다 유연하게 하고, 섬유 간 결합이 잘 형성될 수 있도록 하는 인위적 처리가 필수적이다[1-5].

**그림 04-01.** 리파이닝 되지 않은 펄프 섬유의 공초점 현미경 이미지 (scale bar unit: μm)

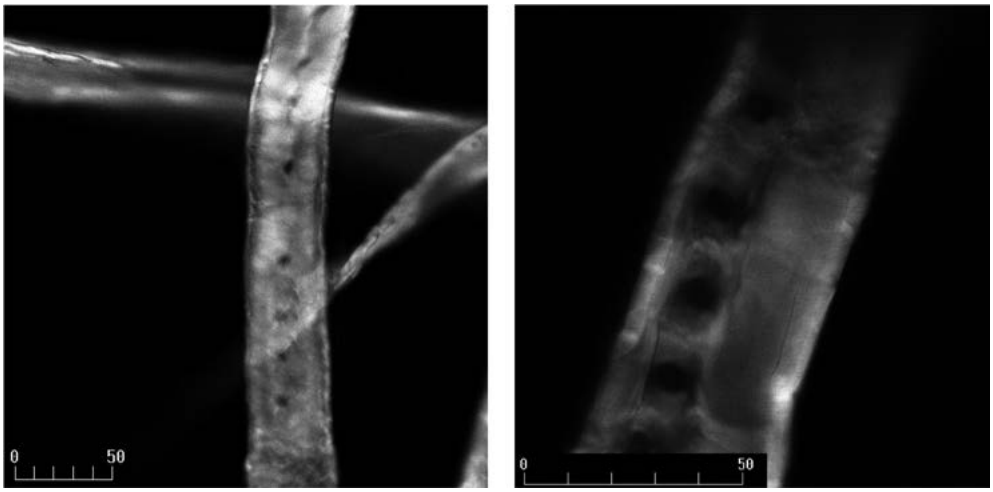
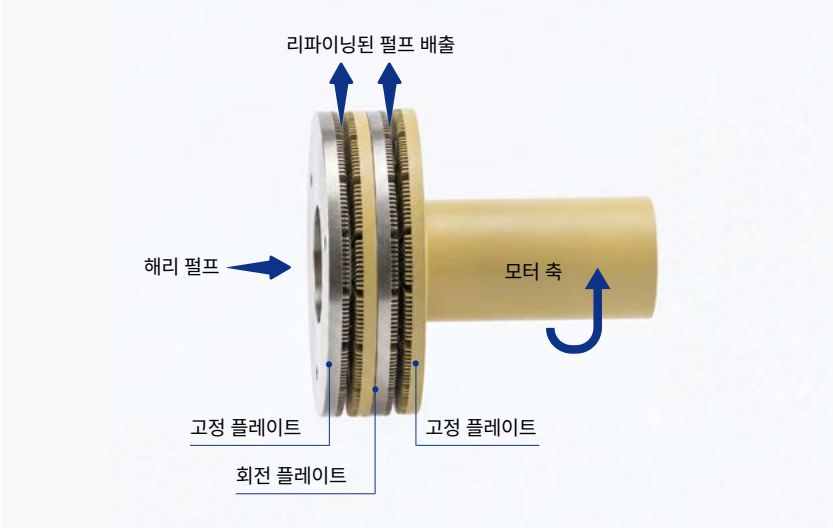


그림 04-02. 리파이닝 개념도




리파이닝(refining)은 펄프 섬유를 기계적으로 개질하여 제지적성을 향상시키는 핵심 공정이다. 이 공정에는 디스크 리파이너(disk refiner)와 코니칼 리파이너(conical refiner)와 같은 전문 장비가 사용된다. 이러한 리파이너의 기본 작동 원리는 고정 플레이트(stator)와 회전 플레이트(rotor) 사이의 매우 좁은 간극으로 펄프 섬유 현탁액을 통과시키면서, 섬유에 강한 기계적 충격과 마찰력을 반복적으로 가하는 데 있다(그림 04-02)[6].

리파이너의 플레이트 간 간격은 일반적으로 50~300 μm 범위에서 정밀하게 조절된다. 이 간격은 처리 대상 섬유의 종류와 특성, 목표로 하는 리파이닝 정도, 운전 조건, 그리고 플레이트 표면의 패턴 설계에 따라 세밀하게 설정된다. 플레이트 간격이 너무 좁으면 과도한 섬유 절단이 발생할 수 있고, 반대로 간격이 너무 넓으면 섬유에 충분한 기계적 작용이 전달되지 않아 효과적인 리파이닝을 달성하기 어렵다[7].

리파이닝 공정의 목적은 섬유의 물리적 구조에 체계적인 변화를 유도하여 제지적성을 크게 향상시키고, 이를 통해 최종 종이 제품의 품질을 개선하는 데 있다. 리파이닝이 적절하게 수행되지 않을 경우, 이후의 전 제지공정에서 공정운용과 제품의 품질 문제가 연쇄적으로 발생할 수 있다. 이러한 이유로 리파이닝은 제지공정에서 가장 중요한 핵심 기술의 하나로 인식되고 있다[1, 6].

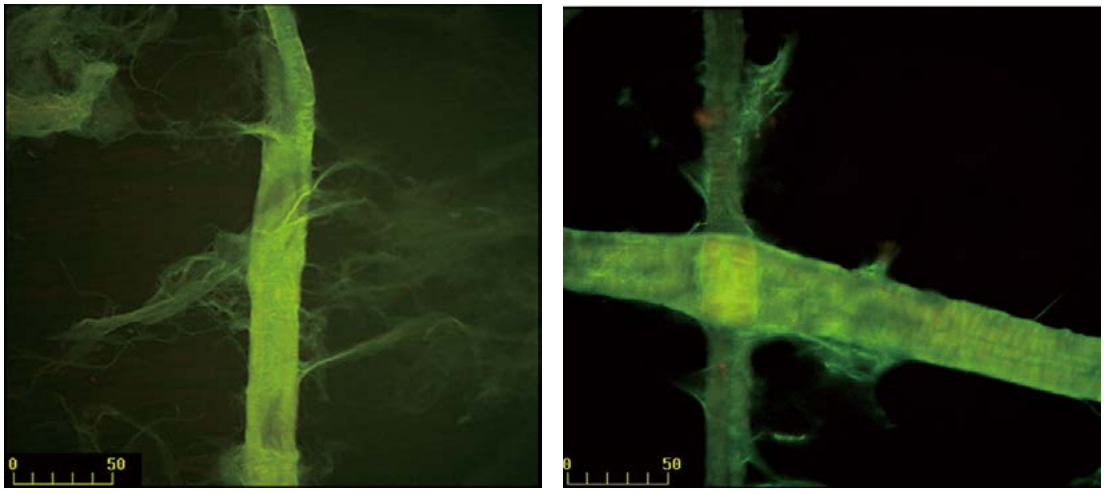
리파이닝 공정의 가장 근본적인 목적은 펄프 섬유 간 결합력을 극대화하기 위해

내부피브릴화(internal fibrillation)와 외부피브릴화(external fibrillation)를 유도하는 것이다(그림 04-03(a), (b)). 내부피브릴화는 기계적 충격에 의해 섬유벽 내부의 미세구조가 부분적으로 분리되면서 섬유의 유연성이 증가하는 현상을 의미한다[4]. 내부피브릴화를 통해 섬유는 더욱 부드러워지고 유연성이 높아져 다른 섬유와의 접촉면적이 크게 증가된다(그림 04-03(b)). 한편, 외부피브릴화는 섬유 표면에서 미세한 섬유 가닥들이 분리되어 돌출되는 현상으로, 이는 섬유 표면을 현저히 거칠게 만들어 기계적 얽힘과 수소결합 형성을 촉진함으로써 섬유 간 결합을 크게 향상시킨다[8].

리파이닝 시에 발생하는 섬유의 구조적 변화는 섬유 간 결합면적을 크게 증가시켜 섬유들이 서로 더욱 강하게 결합할 수 있도록 한다. 이러한 효과는 최종 종이 제품의 인장강도, 파열강도, 내절강도 등의 기계적 물성을 크게 향상시킬 뿐만 아니라, 인쇄공정에서의 잉크 수리성, 표면 평활성 등의 가공 적성도 현저히 개선시킨다[3, 4].

결론적으로, 리파이닝은 단순한 기계적 처리 공정이 아니라, 펄프 섬유의 미세구조를 과학적으로 제어·설계하는 정교한 공정이라 할 수 있다. 이 공정을 통해 펄프 섬유는 강직하여 섬유 간 결합력이 제한된 상태에서 벗어나, 유연하고 섬유 간 결합력이 크게 향상된 상태로 전환된다. 그 결과, 최종 종이 제품의 물성과 가공 적성이 전반적으로 개선되어 종이의 품질이 현저히 향상된다.

**그림 04-03.** (a) 리파이닝된 펄프 섬유, (b) 섬유 간 결합을 보여주는 공초점 현미경 이미지 (scale bar unit: μm).




a 내·외부 소섬유화된 섬유

b 리파이닝 섬유들의 섬유 간 결합

### (2) 리파이닝 공정의 중요성

리파이닝 공정은 제지공정에서 종이의 품질을 결정하는 핵심 단계로 종이의 물리적·기능적 특성에 결정적인 영향을 미칠 뿐 아니라 전체 공정의 효율성과도 직결되는 매우 중요한 역할을 한다. 리파이닝의 중요성은 다음과 같다.

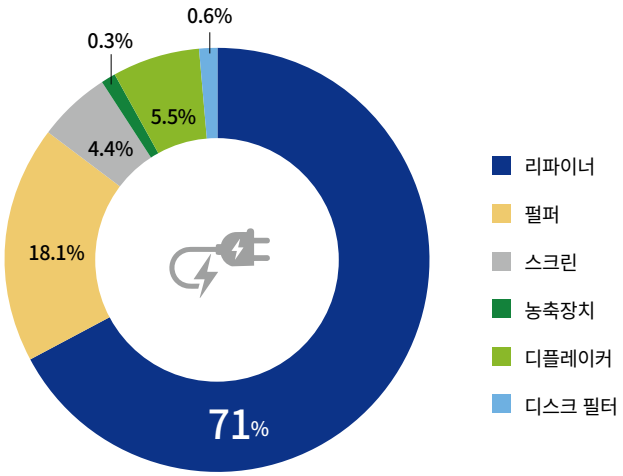
첫째, 리파이닝은 종이의 물리적 특성을 최적화한다. 리파이닝은 펄프 섬유의 내부 및 외부 구조를 변형시켜 섬유 간 결합력을 강화한다. 이 과정에서 섬유 표면에 미세한 소섬유화 혹은 피브릴화(fibrillation)가 유도되어 섬유 간 결합 면적이 넓어지고, 결과적으로 종이의 강도가 향상되며 물성이 개선된다. 이러한 변화는 인쇄나 후가공과정에서 발생할 수 있는 다양한 문제를 최소화하는 데 필수적이다. 특히, 리파이닝 조건을 적절히 조절하면 섬유 길이와 유연성을 효과적으로 제어할 수 있어, 최종 제품의 밀도, 지합 등 다양한 물리적 특성을 목표 품질 기준에 맞게 조정할 수 있다[12, 13].

둘째, 리파이닝은 종이의 기능적 특성을 향상시킨다. 리파이닝을 통해 섬유의 유연성이 증가하면 종이는 더 매끈하고 균일한 표면을 갖게 되며, 이는 인쇄적성을 크게 개선하여 문자나 이미지가 선명하게 구현되도록 한다. 또한, 이러한 표면 특성의 개선은 코팅, 라미네이팅 등 다양한 후가공 공정에서의 적성을 향상시킨다[1, 6]. 예를 들어, 고급 인쇄용지나 포장용지와 같이 표면 평활성과 기계적 강도가 동시에 요구되는 제품의 경우, 리파이닝은 이러한 요구 조건을 충족시키기 위한 핵심 공정으로 활용된다.

셋째, 리파이닝은 전체 제지공정의 안정성과 효율성에 핵심적 영향을 미친다. 리파이닝 단계에서의 오류는 이후 공정에서 다양한 문제를 초래할 수 있다. 예를 들어, 섬유가 과도하게 절단될 경우 지절(紙切) 발생 가능성이 높아지고, 탈수성이 저하되어 건조 공정에서 에너지 소비가 증가한다. 이러한 현상은 생산 효율 저하와 비용 상승으로 이어진다[14]. 따라서 리파이닝은 단순한 섬유 개질 공정을 넘어, 제지공정 전반의 안정적인 운전과 경제성을 좌우하는 핵심 공정이다.

넷째, 리파이닝은 제지공정에서의 에너지 소비와 비용 효율성 측면에서 중요한 영향을 미치는 공정이다. 리파이닝은 제지공정 중에서도 가장 많은 전력 에너지를 소비하는 단계 중 하나로 알려져 있다. 예를 들어, 그림 04-04에서 나타낸 백상지 제조공정을 기준으로 볼 때, 종이 1 톤을 생산할 때 지료 조성 단계에서 소요되는 전체 전력량의 약 70%가 리파이닝 공정에서 사용된다[15]. 이러한 높은 에너

그림 04-04. 지료조성 공정별 전기에너지 소비량 비교




출처: Valmet (2013). Pulping Developments: Improving refining energy efficiency and process sustainability. Technical White Paper. Published July 12, 2013.

지 비중은 리파이닝 조건 최적화가 생산 비용 절감과 에너지 효율 향상에 직접적으로 연관되어 있음을 의미한다. 따라서 리파이닝 조건과 장비를 최적화하면 에너지 사용량을 효과적으로 저감할 수 있으며, 이는 궁극적으로 생산 비용 절감과 더불어 제지 산업의 지속 가능성을 제고하는 데 매우 중요한 역할을 한다.

결론적으로, 리파이닝 공정은 종이의 물리적·기능적 품질을 결정짓는 핵심 요소일 뿐 아니라 에너지 절감, 비용 효율성 및 공정 안정성 측면에서도 제지공정 전반에 중대한 영향을 미치는 중요성이 매우 큰 공정이다.

## 2. 리파이닝 기작 및 효과

국내 펄프 자급률은 약 20% 수준에 불과하며, 사용되는 펄프의 대부분은 베일(bale) 형태로 수입된다. 이러한 수입 펄프를 제지용 지료로 활용하기 위해서는 지료조성 공정을 거쳐야 하며, 그 첫 단계가 그림 04-05에 나타낸 펄퍼를 이용한 해리 공정이다. 해리 공정은 베일 형태로 압축된 펄프를 로터의 전단력과 유동 작용을 통해 개별 섬유 단위로 분리하는 작업이다. 이 과정에서 모든 섬유가 완전히 분리되지 않을 경우, 일부는 결속된 플레이크(flake) 형태로 잔존하게 된다.

플레이크는 이후 디플레이커(deflaker)를 통과하면서 추가적인 전단력과 충격을

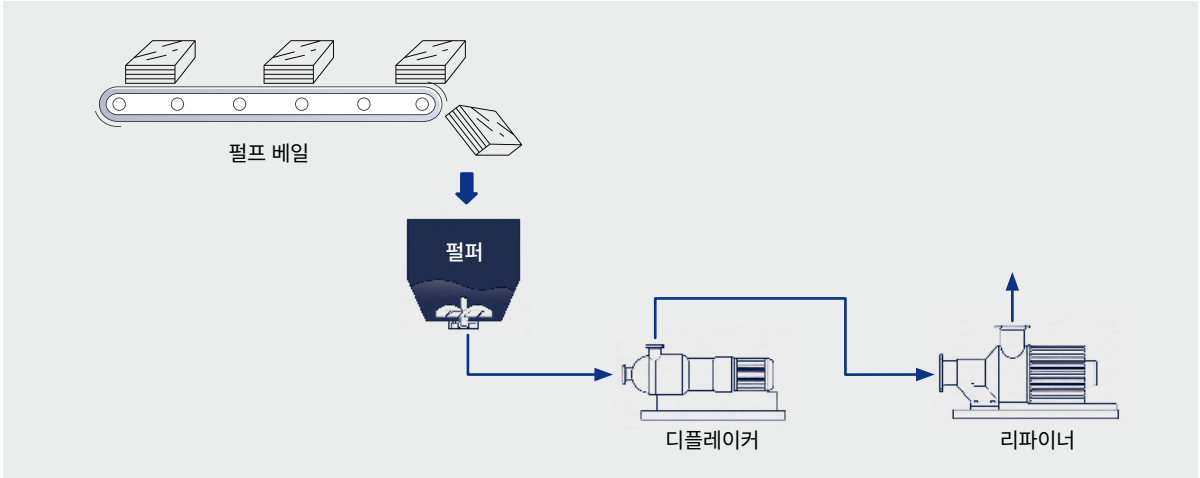
받아 완전히 해리된다. 디플레이커는 단순히 플레이크를 제거하는 장치에 그치지 않고, 섬유의 분산 균일성을 향상시켜 초지기에서의 탈수 거동을 안정화하고 지절(break) 발생 위험을 저감하는 데 기여한다. 해리 및 디플레이킹 단계가 충분히 이루어져야만 이후 리파이닝 공정에서 섬유가 균일하게 기계적 처리를 받을 수 있으며, 이를 통해 종이의 강도, 표면 특성 및 인쇄적성과 같은 목표 제지 적성이 효과적으로 발현될 수 있다.

특히 해리 단계에서 플레이크의 발생을 최소화하는 품질 관리는 이후 리파이닝의 균일성과 에너지 효율에 직접적인 영향을 미친다. 플레이크가 잔존할 경우 리파이너에서 섬유가 불균일하게 처리된다. 즉, 일부는 과도한 에너지를 받고 일부는 충분히 개질되지 않는 문제가 발생한다. 이러한 불균일한 처리 결과는 에너지 소비의 증가, 제품 품질 저하 및 공정 안정성 악화로 이어질 수 있다.

따라서, 해리 및 디플레이킹 공정은 단순한 준비 단계가 아니라, 리파이닝 공정의 효율성과 최종 제품 품질을 좌우하는 핵심적인 전처리 과정이라 할 수 있다. 실제 공정에서는 펄퍼의 운전 조건(로터 속도, 농도, 체류 시간)과 디플레이커의 운전 조건을 최적화함으로써 플레이크 발생을 최소화하고, 이를 통해 리파이닝 단계에서의 에너지 절감과 섬유 개질의 균일성을 동시에 달성하는 것이 중요하다.

디플레이커를 통과한 펄프 섬유는 일반적으로 지료 농도 3~5% 범위로 조정된 후 리파이너로 이송된다. 리파이너 내부에서 섬유는 그림 04-06에 제시한 바와 같이 네 단계로 구분되는 반복적인 기계적 작용을 순차적으로 경험하게 된다[8, 16].

**그림 04-05.** 고농도 지료조성 공정



첫 번째 단계(그림 04-06(a))는 섬유가 플레이트의 바(bar)와 바 사이의 홈을 따라 유입된 후, 회전 플레이트의 바 모서리에 의해 포집되는 과정이다. 이 단계에서 섬유의 배향 및 분포 상태는 이후 작용하는 응력의 형태와 강도를 결정하는 중요한 요소로 작용한다. 섬유의 유입이 균일하게 이루어지지 않을 경우 리파이닝 결과가 불균일해질 수 있다.

두 번째 단계(그림 04-06(b))에서는 회전 플레이트와 고정 플레이트의 바 선단이 서로 맞물리는 순간, 섬유는 국부적으로 강한 충격을 받게 된다. 이러한 충격은 리파이닝 강도를 결정하는 핵심 작용으로, 바의 형상과 간격, 회전속도, 지료 농도 등 운전 조건에 따라 달라진다. 충격이 과도하면 섬유 절단이 유발될 수 있으며, 적정 강도에서는 섬유 표면의 개질이 효과적으로 이루어져 제지적성이 향상된다.

세 번째 단계(그림 04-06(c))는 섬유가 회전 플레이트와 고정 플레이트의 바(bar) 표면 사이를 통과하면서 압축, 전단, 인장, 휨 등의 다양한 기계적 응력을 반복적으로 받는 과정이다. 이러한 반복적인 응력 작용은 외부 소섬유화(external fibrillation)와 내부 소섬유화(internal fibrillation)를 동시에 유도하며, 섬유벽 내부에서는 층 분리(delamination)와 수화(hydration)가 진행된다. 그 결과 섬유는 점차 유연해지고, 건조 과정에서 섬유 간 강한 결합을 형성할 수 있는 잠재력이 증가한다. 그러나 응력이 과도할 경우 섬유의 절단이나 미세섬유(fines) 생성이 증가하여 탈수성 저하 및 인열강도 감소와 같은 부정적인 영향을 초래할 수 있다.

네 번째 단계(그림 04-06(d))에서는 회전 플레이트의 바가 고정 플레이트 바를 지나면서 가해졌던 응력이 이완되고, 섬유벽 내부로 물이 재흡수되어 섬유가 일시적으로 팽윤한다. 이후 섬유는 다시 바에 포집되어 다음 사이클을 반복한다. 이러한 응력–이완–재수화 과정이 반복적으로 누적되어 섬유의 구조적 개질이 완성된다.

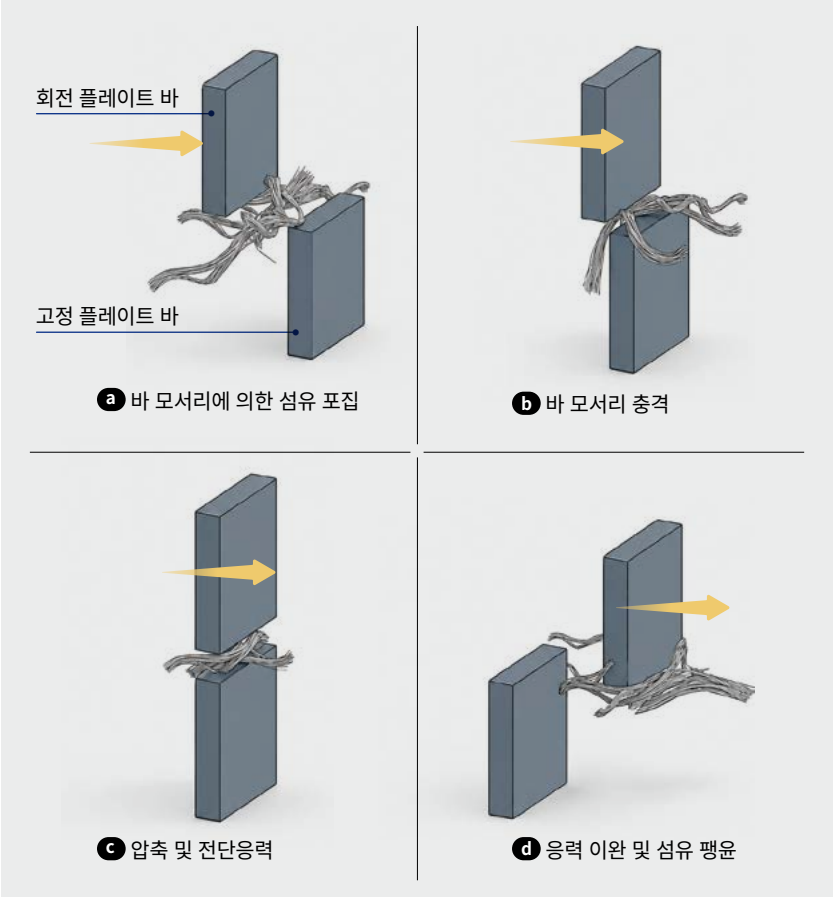
리파이너 내부에서는 이러한 현상은 매우 높은 빈도로 반복되며, 그 강도와 빈도는 플레이트 패턴(바 폭, 홈 깊이, 모서리 형상), 플레이트 간격(50~300 μm), 회전수, 지료의 농도와 유량, 그리고 플레이트의 차폐영역과 개방영역의 비율 등에 의해 결정된다. 산업 현장에서는 톤당 리파이닝 에너지(specific refining energy, kWh/t)와 강도 지표(예: 바 교차 빈도, 바 엣지 길이)를 함께 관리하여 목표 물성을 제어한다. SRE는 단위무게의 섬유에 가해진 총에너지를 나타내는 지표이며, 강도(intensity)는 한번의 바 간의 작용에서 가해지는 에너지의 크기를 의미한다. 두 지표를 조합하여 관리함으로써 인장강도와 평활도를 향상시키는 동시에 탈수성 저하과 벌크 손실을 최소화하는 공정 최적화가 가능하다.

결국 리파이닝은 단순한 에너지 투입 과정이 아니라, 섬유의 미세구조와 수화 거동을 제어하는 정밀한 기계적·수화적 개질 과정이라 할 수 있다. 따라서 리파이닝의 이전 단계인 디플레이킹 단계에서 품질을 선행 관리하고, 리파이너 플레이트의 조건과 운전 변수를 최적화하는 것이 에너지 효율 향상과 목표 제품 품질을 동시에 달성하기 위한 핵심 전략이다.

### (1) 리파이닝 과정에서의 섬유 변화

리파이닝은 펄프 섬유를 제지적성에 적합하도록 개질하는 가장 중요한 공정으로 그림 04-07에 나타낸 바와 같이 내부 소섬유화(internal fibrillation), 외부 소섬유화(external fibrillation), 섬유 절단(fiber shortening/cutting), 그리고 미세분 생성(fines generation)의 네 가지 주요 변화를 일으킨다. 이러한 변화는 플레

그림 04-06. 리파이닝의 단계적 기작



이트의 바와 바 사이에서 섬유가 반복적으로 받는 압축, 전단, 인장 및 휨 응력에 의해 발생하며(그림 04-08), 이들 응력의 크기와 작용 빈도에 따라 섬유의 구조적 개질 정도가 결정된다[8, 16, 17].

내부 소섬유화(internal fibrillation 또는 delamination)는 섬유벽의 내층에서 층 분리가 진행되는 현상으로, 그림 04-07 및 그림 04-09(c)에 나타나 있다. 이는 리파이닝 과정에서 바 사이를 통과하는 섬유가 반복적으로 받는 휨과 압축 응력에 의해 촉진된다. 그 결과, 섬유벽 내부의 미세공극이 확장되고, 섬유의 수화 정도와 팽윤성이 증가한다. 내부 소섬유화가 증가하면 섬유 유연성(flexibility)과 평활 붕괴(collapsibility)가 향상되어, 건조 과정에서 섬유 간 결합면적이 크게 증가한다. 이에 따라 인장강도, 내절도, 내부결합강도 등 섬유 간 결합에 의존하는 종이의 기계적 강도가 개선된다.

외부 소섬유화(external fibrillation)는 리파이닝 과정에서 주로 전단 응력에 의해 섬유 외벽으로부터 미세한 소섬유가 벗겨져 표면에 돌출되는 현상으로, 그림 04-07에 나타나 있다. 이러한 표면 소섬유는 섬유 간 기계적 엉킴과 수소결합을 증대시켜 섬유 간 결합강도를 향상시킨다. 그러나 전단 응력이 과도할 경우, 표면 소섬유가 섬유로부터 완전히 분리되어 미세분(fines)으로 전환될 수 있다. 과잉 미세분은 초지기에서의 탈수성을 저해하고 건조 에너지를 증가시키며, 종이의 벌크 감소와 불투명도 저하를 동반할 수 있다. 따라서 외부 소섬유화는 적정 수준으로 관리하는 것이 필요하다.

섬유 절단(fiber shortening 또는 cutting)은 섬유가 회전 플레이트와 고정 플레이트 사이에서 양방향 인장력을 받거나, 바 모서리의 선단에서 예리한 충격을 받을 때 발생한다(그림 04-07, 그림 04-08). 충격 시 발생하는 인장력이 섬유의 파단점(breaking point)을 초과하면 섬유가 절단되어 평균 섬유장이 감소한다. 이로 인해 인장강도는 일정 범위 내에서 개선될 수 있으나, 인열강도는 섬유장 감소와 미세분 생성의 영향으로 일반적으로 저하된다. 한편, 개별 섬유에 적정 수준의 인장력이 작용할 경우에는 섬유에 존재하던 컬(curl)과 킹크(kink)가 완화되면서 섬유가 길이 방향으로 펴지게 된다. 이러한 섬유 형태의 교정은 섬유 간 유효 결합 면적을 증가시켜 종이 강도 향상에 유리하게 작용한다. 따라서 리파이닝 공정에서 섬유 절단은 불가피하게 발생할 수 있으나, 과도한 절단을 피하고 최소 수준으로 제어하는 것이 바람직하다.

미세분(fines)은 외부 소섬유의 분리 또는 플레이트 바에 의한 충격과 전단 응력으

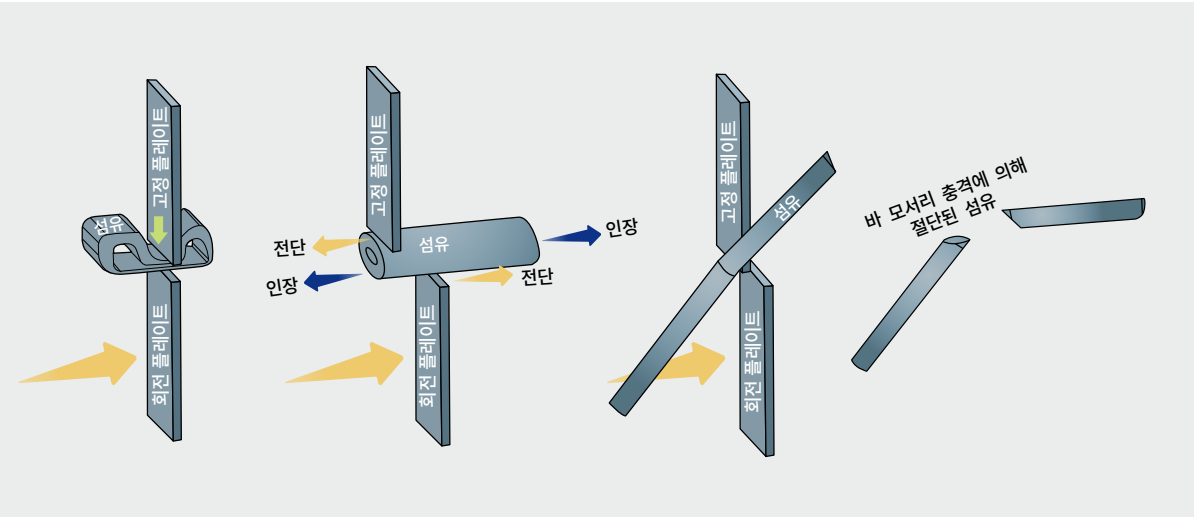
로 섬유가 절단되면서 발생하는 미세한 섬유 파편을 의미한다. 미세분은 종이의 평활성, 지합, 표면강도 향상에 기여할 수 있으나, 과도하게 생성될 경우 초지기의 탈수성을 저하시켜 건조 에너지 소모를 증가시키고, 벌크 감소를 초래한다. 따라서 미세분의 생성 수준은 최종 제품의 용도(인쇄용지, 포장용지, 위생용지 등)와 초지 설비의 조건(와이어 특성, 프레스 효율, 건조 능력 등)을 종합적으로 고려하여 최적화하는 것이 중요하다.

리파이닝 동안 펄프 섬유에 발생하는 구조적 변화는 다양한 현미경 기법을 통해 직접 관찰할 수 있다. 특히 공초점 레이저 주사현미경(confocal laser scanning

그림 04-07. 펄프 섬유에 대한 리파이닝의 주요 효과




그림 04-08. 리파이닝 동안 섬유에 가해지는 힘의 종류

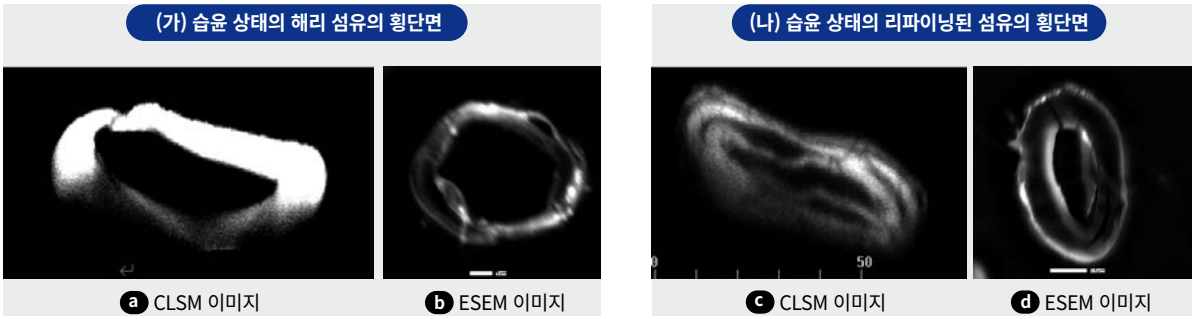


microscope, CLSM), 환경 주사전자현미경(environmental scanning electron microscope, ESEM), 그리고 극저온 주사전자현미경(cryo scanning electron microscope, Cryo-SEM)은 시료를 습윤 상태로 관찰할 수 있어, 리파이닝 전후의 섬유 수화, 팽윤, 층 분리 현상을 시료 왜곡 없이 분석하는 데 매우 유용하다. 그림 04-09는 물에 팽윤된 단일 섬유의 횡단면을 CLSM과 ESEM으로 관찰한 대표적인 예시이다. 리파이닝 이전 상태(그림 04-09(가))에서는 해리된 섬유의 섬유벽이 상대적으로 얇고, 섬유 내강(lumen)이 넓고 크게 관찰된다. 이 단계에서는 내부 소섬유화가 충분히 진행되지 않아 섬유의 유연성과 팽윤성이 낮은 상태를 나타낸다. 리파이닝 이후(그림 04-09(나))에는 섬유벽에서 층 분리 또는 미세 파열(crack)이 뚜렷하게 관찰되며, 이러한 틈을 따라 물이 섬유벽 내부로 깊숙이 침투하여 섬유의 팽윤이 현저히 증가한다. 이 과정에서 섬유벽 내부에 존재하던 섬유–섬유 간 수소결합은 일시적으로 물–섬유 간 수소결합으로 치환되어, 섬유의 수화 상태가 강화된다. 이후 지필 형성과 건조 단계에서 수분이 제거되면서 섬유들이 밀착되고, 섬유–섬유 간 강한 수소결합이 재형성된다. 이러한 결합 구조의 재배열은 최종 종이의 인장강도와 내부결합강도 등 기계적 물성을 증가시킨다.

### (2) 리파이닝에 따른 종이 물성의 변화

리파이닝 공정은 종이의 물리적 특성에 매우 큰 영향을 미친다. 그림 04-10에서와 같이 리파이닝이 진행될수록 여수도(freeness, mL CSF)는 지속적으로 감소하는 경향을 보인다. 이는 리파이닝 과정에서 섬유의 내부 및 외부 소섬유화가 진전되고 단섬유와 미세분의 생성이 증가하기 때문이다. 이때 섬유의 유효 표면적이 증가하

그림 04-09. 리파이닝 전후 펄프 섬유의 횡단면 현미경 이미지



지만 미세분 생성에 의한 지층 내 공극 감소가 여수도 감소에 더 중요한 요인으로 작용한다. 이러한 변화로 인해 물과 결합할 수 있는 수산기 부위가 많아져 섬유-물 간 수소결합이 강화되고, 이에 따라 초지 공정에서의 탈수 속도와 탈수량이 감소한다. 즉, 리파이닝은 섬유 간 결합력을 증가시켜 종이의 강도를 향상시키는 반면, 동시에 탈수성(drainage)을 저하시킨다는 상충 관계(trade-off)를 내포하고 있다.

### 1) 강도 특성 변화

리파이닝은 섬유의 유연성을 증가시키고 섬유 간 결합력을 강화함으로써 종이의 인장강도(tensile strength)를 현저히 향상시킨다. 이는 내부 및 외부 소섬유화로 인해 섬유 표면이 거칠어지고 수화·팽윤이 증대되면서 섬유의 유연성이 향상됨으로 섬유 간 수소결합이 형성될 수 있는 유효 결합 면적이 증가하기 때문이다. 이러한 섬유 간 결합 면적 증가는 인장강도뿐만 아니라 종이의 파열강도(burst strength)에도 긍정적인 영향을 미친다. 또한 섬유가 보다 유연해지면 종이가 반복적인 굽힘과 접힘에도 잘 견디게 되어 내절도(folding endurance)가 향상된다. 따라서, 리파이닝은 섬유 간 결합에 의해 지배되는 강도 특성, 즉 인장강도, 파열강도 및 내절도를 개선하는 데 매우 효과적인 공정이다(그림 04-10).

### 2) 인열강도의 변화와 섬유 절단

인열강도(tear strength)는 리파이닝 조건과 섬유 특성에 따라 서로 다른 거동을 보인다. 침엽수 펄프는 섬유장이 길고 섬유벽이 두꺼워, 리파이닝 시 비교적 성긴 바 패턴(coarse bar pattern)의 플레이트가 주로 사용된다. 이러한 패턴은 긴 섬유를 효과적으로 절단하여 초기에는 섬유 간 결합력이 증가하고, 이에 따라 인열강도가 향상된다. 그러나 리파이닝이 과도하게 진행되어 섬유 절단과 소섬유화가 지나치게 발생하면 평균 섬유장이 감소하고 섬유 간 결합이 지나치게 강해져, 찢김 시 응력이 국부적으로 집중되면서 인열강도가 오히려 감소한다.
반면 활엽수 펄프는 섬유장이 짧고 섬유벽이 얇아, 상대적으로 촘촘한 바 패턴(fine bar pattern)의 플레이트가 사용된다. 이 경우 섬유 절단은 최소화되고 외부 소섬유화가 주로 유도되어 섬유의 유효 표면적이 증가한다. 그 결과 리파이닝이 진행될수록 섬유 간 결합력이 강화되며, 인열강도는 침엽수 펄프에 비해 상대

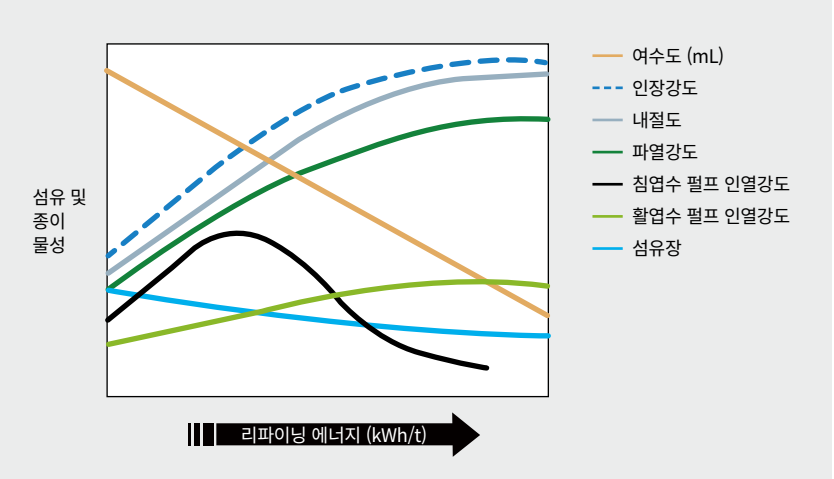
적으로 증가하는 경향을 나타낸다.

인열강도는 종이가 찢어질 때 섬유가 절단되는 경우보다, 절단되지 않고 섬유가 종이 구조로부터 끌려나오며 파괴되는 경우에 더 큰 저항이 발생하기 때문에 리파이닝 과정에서 섬유의 절단이 덜 발생할수록 증가한다. 일반적으로 섬유장이 길수록 섬유인발(pull-out)에 필요한 저항력이 커져 인열강도가 높아진다. 반면, 과도한 리파이닝으로 섬유 절단과 미세분 생성이 증가하면 평균 섬유장이 감소하여 인발저항력이 약화되고, 그 결과 인열강도는 저하된다. 또한 섬유 간 결합이 지나치게 강해질 경우에는 인열 과정에서 섬유가 뽑혀 나오기보다 섬유 자체가 절단되는 파괴 양상이 우세해져, 이 역시 인열강도 감소의 원인이 된다.

### 3) 평균 섬유장 감소

리파이닝 과정에서 섬유는 플레이트 바 모서리에서의 충격과 바 사이를 통과하며 받는 인장 및 전단 하중에 의해 절단된다. 이로 인해 평균 섬유장이 감소하면 섬유 분산성이 향상되어 지합(formation)은 개선되는 경향을 보인다. 그러나 섬유장이 지나치게 짧아지면 탈수성 악화, 강도 저하, 벌크 감소 등의 부정적 영향이 나타난다. 따라서 리파이닝은 섬유 절단을 최소화하면서도 목표 지종에 필요한 소섬유화 수준을 확보하도록, 펄프 종류(침엽수·활엽수, 화학·기계펄프)와 요구 물성에 맞추어 운전 조건을 정밀하게 설정하는 것이 중요하다.

**그림 04-10.** 리파이닝이 종이의 물리적 특성에 미치는 영향



## 3. 리파이너의 종류와 구조

제지공정에서 리파이닝은 펄프 섬유의 물리적 특성을 조정하여 최종 종이의 품질을 결정하는 핵심 단계이다. 이 과정에서 섬유 표면은 개질되고, 유연성이 증가하며, 섬유 간 결합력이 강화되어 종이의 강도, 인쇄적성 등 다양한 물성이 향상된다. 리파이닝은 단순히 섬유를 절단하는 공정이 아니라 섬유 구조를 정밀하게 제어하는 공정으로, 제지 산업의 생산성과 품질을 좌우하는 중요한 역할을 한다.

초기의 리파이닝 장치는 그림 04-11에 나타난 홀랜드 고해기(Hollander beater)와 같은 단속식(batch type) 고해기였다. 17세기 네덜란드에서 개발된 이 장치는 펄프 현탁액을 고해기 수조 내에서 순환시키면서, 회전하는 롤러의 바(bar)와 고정 플레이트 사이에서 반복적인 기계적 충격을 가하는 방식으로 작동한다[1]. 홀랜드 고해기는 당시 수작업 고해를 대체하며 제지 생산의 효율을 크게 향상시켰으나, 단속식 공정이라는 구조적 한계로 인해 대량 생산에는 적합하지 않았다. 현재는 실험실 표준 고해기, 소규모 제지공장, 또는 면섬유 절단용으로 제한적으로 사용되고 있다.

이후 산업 규모가 확대되고 종이에 대한 품질 요구 수준이 높아지면서 연속식 리파이너(continuous refiner)가 도입되었다. 연속식 리파이너는 펄프를 일정한 농도로 유지한 상태에서 지속적으로 처리할 수 있어 생산 효율과 품질의 안정성을 크게 향상시켰다. 특히 디스크 리파이너와 콘 리파이너는 섬유에 반복적이고 균일한 응력을 가함으로써 섬유 개질을 정밀하게 제어할 수 있으며, 순 리파이닝 에너지 (specific refining energy)와 리파이닝 강도(refning intensity)를 조합하여 목표 물성을 달성할 수 있다[1, 18, 19]. 이러한 기술 발전은 현대 제지산업에서 리파이닝을 단순한 에너지 소비 단계가 아닌, 섬유 구조 제어를 통한 고부가가치 공정으로 자리매김하게 하였다.

연속식 리파이너는 플레이트 형상에 따라 콘형 리파이너(conical refiner)와 디스크 리파이너(disc refiner)로 구분된다. 이들 장치는 펄프 슬러리를 고정 플레이트와 회전 플레이트 사이로 통과시키며 섬유에 기계적 충격과 마찰을 가하여 소섬유화(fibrillation)와 절단을 유도한다. 플레이트의 형상과 운전 조건에 따라 섬유의 절단과 소섬유화 비율이 달라지며, 이러한 차이는 종이의 강도 특성 및 표면 물성에 직접적인 영향을 미친다.

주요 리파이너 제조사로는 Andritz, Valmet, Voith, Aikawa 등이 있으며, 이들

그림 04-11. Holland 고해기의 구조




기업은 고성능 리파이너와 관련 부품을 제지산업에 공급하고 있다. 최근에는 에너지 소비 절감과 유지보수 효율 향상을 목표로한 기술 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 기술적 진보는 제지공정의 생산성, 품질 및 경제성을 지속적으로 개선하는데 기여하고 있다.

### (1) 콘형 리파이너(conical refiner)

Holland 고해기 이후 처음으로 도입된 연속식 리파이너는 1858년에 미국의 Joseph Jordan이 개발한 Jordan 콘형 리파이너이다. 이 장치는 고정 플레이트와 회전 플레이트가 약 10°의 경사각을 갖는 구조로 되어 있다(그림 04-12(a)). Jordan 리파이너는 섬유 길이가 긴 비목질계 섬유의 절단에 우수한 효과를 보였으나, 콘형 플레이트의 바 패턴 변경이나 플레이트 교체가 어렵고 활엽수 섬유와 같은 단섬유 펄프 처리에는 적합하지 않았다. 또한 지료 처리량이 제한적이라는 단점으로 인해 현재는 사용 빈도가 크게 감소하였다[1, 18, 19].

Jordan 리파이너의 후속 기종으로 개발된 장치는 그림 04-11(b)에 나타낸 Claflin 리파이너이다. Claflin 리파이너는 콘형 플레이트의 길이를 단축하고 경사각을 약 30°로 크게 한 구조적 특징을 갖는다. 이로 인해 리파이닝 효율(순 리파이닝 에너지/총 리파이닝 에너지)은 약 80%로, Jordan 리파이너의 약 50%에 비해 현저히 향상되었다[1, 18, 19].

1980년대에 Jyhlavara에 의해 콘형 리파이너가 재도입된 이후, Sunds가 이를

인수하여 Conflo 개념으로 발전시켰다. Conflo 리파이너는 콘의 경사각을 줄임으로써 섬유 손상을 줄일 수 있는 저강도 리파이닝을 가능하게 하였다. 그림 04-12(c)에 나와 있는 Conflo 리파이너는 콘형 플레이트의 경사각이 약 20°로, Jordan 리파이너와 Claflin 리파이너의 중간 수준에 해당하는 최신 디자인의 콘형 리파이너이다[20]. Conflo 리파이너는 무부하 동력(no-load power)을 줄이고 리파이닝 영역을 길게 확대한 플레이트를 사용하며, 다양한 종류의 바 패턴을 갖는 플레이트를 적용할 수 있다. 또한 리파이너의 외부 덮개를 개폐할 수 있도록 설계되어 플레이트 교체 및 유지보수가 용이하다는 장점을 가지고 있다.

최근 에너지 비용의 급격한 상승은 제지 산업에서 에너지 절감형 리파이닝 기술의 필요성을 크게 증대시켰다. 이에 대응하여 핀란드의 Valmet은 새로운 개념의 콘형 리파이너인 OptiFiner Pro를 개발하여 상용화하였으며, 현재 글로벌 시장에서 빠르게 확산되고 있다. OptiFiner Pro는 기존의 콘형 리파이너(Jordan, Claflin, Conflo)와 달리, 펄프 지료가 플레이트의 전체 리파이닝 영역을 경유하지 않고 플레이트 세그먼트(segment)에 설계된 홈(groove)을 통해 직접 유입되는 독창적 구조를 갖고 있다[21].

그림 04-13(a)에 나타난 OptiFiner Pro는 플로우-스루(flow-through) 방식을 구현한 콘형 리파이너이다. 펄프 지료는 하부 입구를 통하여 유입된 후 세그먼트

**그림 04-12.** 콘형 리파이너의 종류

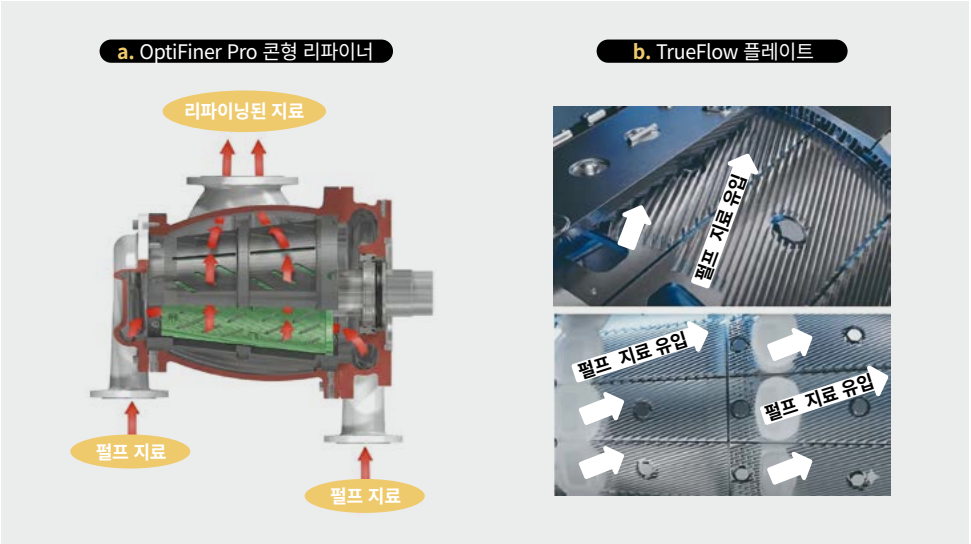


의 홈을 따라 균일하게 분배되며, 각 섬유는 플레이트 바(bar)에서 압축, 전단, 인장 및 휨 응력을 비교적 균일하게 받게 된다. 이러한 구조적 설계는 섬유에 가해지는 충격을 플레이트 전체에 걸쳐 고르게 분산시켜 미세분(fines)의 과다 생성을 억제하고 섬유 절단을 최소화하며, 내부, 외부 소섬유화, 강도 및 평활성 같은 목표 물성을 신속하게 발현시키도록 한다. Valmet의 기술 자료에 따르면, OptiFiner Pro는 기존 리파이너 대비 약 30%의 에너지 절감을 달성하였으며, 소형화된 설계를 통해 동일한 지료 조성 공정에서 요구되는 리파이너 수를 감소시켜 설비 투자비와 유지보수 비용 절감에도 효과적인 것으로 보고되고 있다.

한편 Andritz는 OptiFiner Pro와 호환되는 TrueFlow® Refiner Plate를 개발하여 그림 04-13(b)와 같이 적용하고 있다[22]. TrueFlow 플레이트는 세그먼트 끝단에 설계된 홈을 통해 펄프 지료가 유입되도록 함으로써, 모든 섬유가 리파이닝 존을 반드시 통과하도록 유도하는 구조를 갖는다. 이 설계는 기존 세그먼트에서 발생할 수 있는 지료 우회(bypass) 현상을 제거하고, 균일한 에너지 분포와 일관된 섬유 처리를 가능하게 하여 최종 펄프 품질을 현저히 향상시킨다. Andritz는 이러한 구조를 통해 섬유 손상을 최소화하고 균일한 내부·외부 소섬유화를 유도하며, 지절(sheet break) 발생 위험을 감소시킬 수 있다고 보고하고 있다.

이 두 기술은 단순한 기계적 개선을 넘어 에너지 효율성, 품질 안정성, 그리고 유

**그림 04-13.** (a) Valmet의 OptiFiner Pro 콘형 리파이너, (b) Andritz의 TrueFlow 콘형 플레이트



지보수 편의성을 동시에 향상시키는 특징을 가진다. OptiFiner Pro와 TrueFlow 플레이트는 기존의 Jordan, Claflin, ConFlo 리파이너를 대체할 수 있는 효과적인 솔루션으로 평가되고 있으며, 특히 고급 인쇄용지 생산과 재활용 섬유 처리 공정에서 그 적용 효과가 입증되고 있다. 산업 현장에서는 이러한 기술을 통해 단위 리파이닝 에너지 절감, 리파이닝 강도의 정밀한 최적화, 나아가 지속가능한 제지 생산 체계의 구축이 가능해지고 있다.

### (2) 디스크 리파이너 (disc refiner)

디스크 리파이너(disc refiner)는 제지공정에서 펄프 섬유의 미세구조를 기계적으로 개질하여 최종 종이의 강도, 평활성, 인쇄적성 및 탈수성과 같은 제지적성을 목표한 방향으로 제어하기 위한 핵심 설비이다. 장치 내부에는 원판형 회전 플레이트(rotor plate)와 이에 대응하는 고정 플레이트(stator plate)가 일정한 간극(gap)을 유지한 채 대면 배치되어 있다.

펄프 지료는 중앙 또는 지정된 유입부를 통해 장치 내부로 유입되어 두 플레이트 사이의 리파이닝 존(refining zone)을 통과하는 동안, 플레이트 바(bar)의 교차부에서 발생하는 압축, 전단, 인장 및 휨 응력을 주기적으로 받게 된다. 이 과정에서 섬유 세포벽 내부의 층분리, 수화 및 팽윤에 따른 내부 소섬유화(internal fibrillation)와, 섬유 표면에 피브릴이 생성되는 외부 소섬유화(external fibrillation)가 동시에 진행된다.

이러한 반복적인 응력 작용과 이완·재수화 사이클은 섬유의 유연화를 촉진하고 내·외부 표면적을 확대하여, 시트 건조 과정에서 섬유 간 수소결합 형성 잠재력을 크게 증가시킨다[7, 17]. 디스크 리파이너의 구조적 요소와 운전 변수(플레이트 간극, 회전수, 지료 농도 및 유량, 바 패턴과 모서리 형상)는 섬유에 작용하는 응력의 강도와 빈도(frequency)를 결정함으로써 섬유 절단 및 미세분 생성 수준, 그리고 목표 물성 도달 속도에 실질적인 영향을 미친다.

디스크 리파이너는 1960년대 초반, 기존 콘형 리파이너의 구조적 한계를 보완하고 연속 공정에서 높은 처리량과 균일한 섬유 개질을 달성하기 위해 개발되었다. 초기 콘형 리파이너(Jordan, Claflin)는 길고 거친 바 패턴을 사용함으로써 섬유 절단 경향이 크고, 플레이트 교체 및 바 패턴 변경이 어려운 단점을 지니고 있었다. 또한 긴 콘 길이에 따른 유압적 제약과 처리량 한계, 그리고 로딩 및 플레이트 간극 제어 정

밀도의 한계로 인해 운전 유연성이 제한되는 구조적 문제를 가지고 있었다[1, 19]. 이에 비해 디스크 리파이너는 원판형 플레이트의 넓은 유효 면적을 활용하여 유입된 지료를 광범위한 리파이닝 영역에 분산시키고, 장치 중심부에서 외곽으로 형성되는 원심 유동과 플레이트 외측의 면적 확대 효과를 통해 충분한 체류 시간을 확보함으로써 보다 균일한 리파이닝을 구현할 수 있다. 또한 세그먼트(segment) 기반의 바 패턴을 적용함으로써 소프트·하드 리파이닝, 미세분 생성 또는 억제 등 작업 목적에 따른 패턴 교체가 상대적으로 용이하며, 대용량 지료 처리에도 적합하다.

이와 같은 연속식 대용량 처리 능력과 유지보수의 용이성으로 인해 디스크 리파이너는 제지 산업 전반에 널리 보급되었다[1, 6]. 역사적으로는 1960~1970년대에 더블 디스크(double-disc) 및 대형 연속식 리파이너로의 전환이 빠르게 진행되었는데, 이는 당시 제지 산업에서 요구되던 생산성 향상과 에너지 절감 요구와 궤를 같이한 기술적 변화였다.

싱글 디스크 리파이너(single-disc refiner)는 그림 04-14(a)에 나타난 바와 같이 모터 축에 연결된 회전 플레이트와 리파이너 덮개에 고정된 고정 플레이트가 일대일로 대면하는 구조를 갖는다. 펄프 지료는 중앙 유입부를 통해 유입되어 단일 리파이닝 존(refining zone)을 통과하며, 플레이트 바(bar) 교차부에서 발생하는 충격 및 전단 응력에 노출된다. 이 장치는 구조가 비교적 단순하여 설치, 운전 및 점검이 용이하며, 중소 규모 제지 라인이나 TMP(thermomechanical pulp) 공정 및 특수 원료 전처리 등 제한된 처리량을 요구하는 공정에 적합하다. 그러나 단일 작용 면 구조라는 특성으로 인해, 강도 향상과 총 작업량 증가를 동시에 요구하는 경우 운전 변수(플레이트 간극, 회전수)와 세그먼트 패턴의 조합 최적화가 중요하다. 또한 과도한 리파이닝으로 인한 섬유 절단 및 미세분의 과다 생성을 억제하기 위해 리파이닝 강도(refining intensity)의 정밀한 관리가 필요하다[5, 6, 8, 12].

더블 디스크 리파이너(double-disc refiner)는 그림 04-14(b)에 나타난 바와 같이 중앙의 회전 플레이트 양측에 고정 플레이트가 배치된 구조로, 펄프 지료가 두 개의 리파이닝 존(refining zone)을 통과하며 플레이트 바(bar) 교차부에 노출된다. 이와 같은 구조로 인해 더블 디스크 리파이너는 넓은 총 접촉 면적을 확보할 수 있어 대규모 지료 처리와 처리 용량 확대에 효과적이다. 또한 리파이닝 에너지를 두 개의 작용 면에 분산시킬 수 있으므로, 리파이닝 강도(refining intensity)와 총 처리량을 비교적 독립적으로 제어하기에 용이하다. 이를 통해 섬유의 내부·

외부 소섬유화 균형을 유지하면서도 섬유 절단 및 미세분의 과다 생성을 억제하는 운전이 가능하다[1, 5, 6, 24]. 유지보수 측면에서는 싱글 디스크 리파이너에 비해 구조가 다소 복잡하지만, 다양한 세그먼트 패턴을 적용함으로써 목표 물성에 맞춘 정밀한 운전이 가능하며, 라인 처리량 증가와 품질 안정성이라는 대형 제지 설비의 핵심 요구를 충족시킬 수 있는 설비이다.

디스크 리파이너에서 플레이트 간 간격수의 변화는 플레이트 바의 교차 빈도를 조절함으로써 리파이닝 강도와 리파이닝 빈도를 동시에 변화시킬 수 있게 한다[23]. 지료 농도와 유량은 리파이너 내부에서의 체류 시간뿐만 아니라 지료의 점도 및 윤활 특성에 영향을 미치기 때문에, 리파이닝 작업의 균일성 확보를 위해서는 일정하게 유지되어야만 한다. 세그먼트 패턴(바 폭, 홈 깊이, 모서리 예리도, 엣지 길이/면적)은 리파이닝 강도를 절단과 미세분 생성이 우세한 '하드(hard)' 리파이닝에서 피브릴화와 유연화가 우세한 '소프트(soft)' 리파이닝으로 조절하는 핵심 요소이다. 산업 현장에서는 단위 리파이닝 에너지(specific refining energy)와 SEL(specific edge load), 그리고 C-factor(리파이닝 강도 지표)를 이원적으로 관리하여 목표 물성에 부합하는 최적 운전 조건을 설정한다[17, 24]. 특히 인쇄용 백상지처럼 인장강도와 평활도 향상이 요구되면서도 탈수성 저하와 종이 벌크 손실을 최소화해야 하는 경우에는, 소프트 리파이닝 위주에 적합한 세그먼트 패턴의 선택과 운전 조건의 적용이 권장된다.

**그림 04-14.** 싱글 디스크 리파이너와 더블 디스크 리파이너



### (3) 디스크 리파이너와 콘형 리파이너의 장단점

저농도(low consistency, LC) 리파이닝 공정은 섬유 표면과 내부 구조를 정밀하게 조절하여 각 지종의 품질 요구에 부합하는 결합강도, 탈수성 및 벌크와 같은 물성을 구현하는 데 필수적인 공정이다. 저농도 리파이닝에 사용되는 리파이너의 형상은 크게 디스크형과 콘형으로 구분된다. 두 형상은 각각의 유체 유동장(가압, 원심 및 소용돌이 유동), 바 교차 빈도와 비모서리부하(SEL), 그리고 마모 특성에서 뚜렷한 차이를 보이며, 이에 따라 운전특성과 적용분야에서 서로 다른 장단점을 가진다.

콘형 리파이너인 Jordan 및 Claflin 계열은 상대적으로 동력 소요가 커 에너지 효율이 낮고, 플레이트 교체에 약 8~24시간이 소요되어 예비 설비 용량의 확보가 필요하다는 단점을 가진다. 또한 설치 및 교체 비용이 높고, 장치 길이가 길어 설치 공간을 많이 차지하며, 바(bar) 패턴의 변경이 제한적이어서 품질 최적화에 한계가 있었다. 그러나 1980년대 이후에는 저각 다중 콘 구조와 유압 밸런싱(hydraulic balancing) 기술이 적용된 개선형 콘형 리파이너(예: ConFlo, Pro 계열)가 등장하였다. 이러한 기술 발전을 통해 처리량이 약 20~40% 증가하였으며, 동일한 품질 기준에서 회전수 및 펌프 속도를 낮춤으로써 에너지 절감이 가능해졌다. 또한 섬유에 작용하는 원심력과 소용돌이 유동을 제어하여 섬유 분산을 보다 균질하게 만들 수 있었고, 내마모성 소재의 적용과 플레이트 패턴 최적화를 통해 플레이트 수명도 약 25% 연장되었다. 그럼에도 불구하고 콘형 구조의 특성상 자체 마모 보정(self-correcting wear pattern) 효과는 제한적이며, 플레이트 패턴의 다양성과 교체 용이성 측면에서는 디스크형 리파이너에 비해 여전히 불리한 것으로 평가된다.

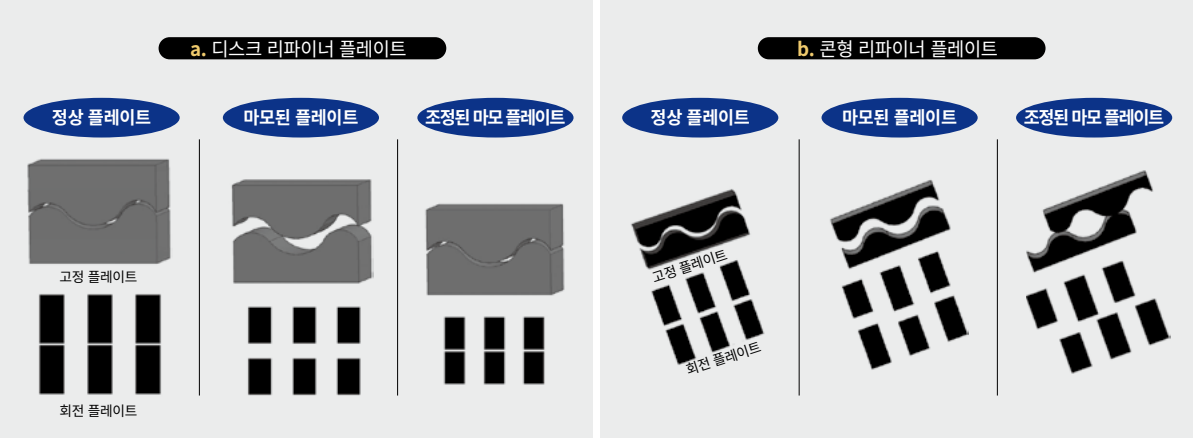
디스크형 리파이너는 회전 속도가 빠르고 단위 면적당 절단 모서리(cutting edge) 길이가 콘형 리파이너에 비해 큰 덕분에 섬유에 낮은 강도의 리파이닝 처리를 높은 빈도로 가할 수 있는 설비이다. 동일한 처리량 기준에서 요구되는 설치 공간이 작고, 운전 비용도 상대적으로 낮다는 점도 장점이다. 또한 플레이트 교체와 패턴 설계가 용이하여 지종 및 펄프 종류별 맞춤 운전에 유리하며, 플로팅 로터와 갭 평행 조정기술에 힘입어 운전 중에도 자체 마모 보정이 일어나 리파이닝 효율과 플레이트 수명 측면에 유리하다. 반면, 고속 초지기에 필요한 큰 직경의 디스크 플레이트를 사용할 경우 플레이트 외곽부에서 원주 속도가 과도하게 증가하여 섬유가 바의 홈을 빠르게 통과하여 리파이닝이 충분히 이루어지지 않는 현상이 발생할 수 있다. 특히 활엽수 펄프와 같이 섬유 길이가 짧은 경우 이러한 영

향이 더욱 크게 나타난다. 일부 공정에서는 첫번째 리파이너 통과 시 약 30% 정도의 섬유만이 효과적으로 리파이닝되는 사례도 보고된 바 있다. 이러한 문제를 방지하기 위해서는 지료 유량, 플레이트 간격, 그리고 SEL을 종합적으로 조정하여 최적화하여야 한다.

디스크 리파이너는 그림 04-15(a)에 나타낸 바와 같이, 운전 중에도 두 플레이트가 평행상태를 유지하면서 회전하기 때문에 한쪽의 플레이트가 닳은 경우 반대편 플레이트도 이에 상응하여 마모되므로 플레이트 사이의 간격은 일정하게 유지된다. 두 플레이트 사이의 간격이 마모 정도와 관계없이 일정한 간극을 유지하게 되면 플레이트의 특정 부분에 힘이 몰리거나 섬유가 과도하게 절단되는 문제를 방지할 수 있고, 플레이트가 불균일하게 마모되는 것도 방지할 수 있다. 반면, 콘형 리파이너는 그림 04-15(b)에 나타낸 바와 같이 리파이너 구조상 리파이너 콘과 하우징의 간격은 콘의 위치를 전후로 움직임으로써 조정된다. 이런 조정 방식 때문에 콘의 일부분에 불균일한 마모가 발생한 경우 간극을 좁히게 되면 전체 바 사이의 간격이 불균일하게 되는 결과가 초래된다. 최근에는 트리플 콘 구조, 저각(low-angle) 바 패턴, 유압 밸런싱 기술 등을 적용하여 이러한 단점을 완화하려는 개선형 설계가 도입되고 있으나, 기본적인 형상 차이로 인해 디스크 리파이너와 동일한 수준의 균일 마모 특성을 구현하는 데에는 한계가 있다.

디스크 리파이너와 콘형 리파이너는 각각 고유한 장점과 한계를 지니고 있으며, 그 주요 특성은 도표 04-01에 비교하였다. 최근에는 콘형 리파이너에서도 과거에

**그림 04-15.** 디스크 리파이너와 콘형 리파이너에서 플레이트 마모에 따른 바 패턴 자체 교정 방법 비교



단점으로 지적되던 에너지 소비가 많고 플레이트 교체 시간이 길며, 불균일한 플레이트 마모 문제가 기술적 개선을 통해 상당 부분 완화되었으며 운전 효율과 내구성도 크게 향상되었다. 따라서 특정 리파이너 형식의 우열을 일률적으로 판단하기보다는, 공장의 설비 구성, 요구 처리량, 운전 조건, 그리고 유지·정비 관리 수준을 종합적으로 고려하여 현장 여건에 적합한 설비를 선정하고 이에 맞는 운전 전략을 수립하는 것이 중요하다.

**도표 04-01.** 디스크 리파이너와 콘형 리파이너의 특성 비교

| 구분 | 디스크 리파이너 | 최신 콘형 리파이너 | 구형 콘형 리파이너 |
|---|---|---|---|
| 주요 적용 | 저농도(LC) 리파이닝,<br>다양한 섬유 및 지종 | 저농도 리파이닝,<br>고처리량·특수 섬유·재활용 적용,<br>빠른 업그레이드 | 장섬유, 재활용, 기존 표준 공정 |
| 에너지 효율 | 최신형은 무부하 절감 포함,<br>효율성 매우 우수 | 최신 설계로 기존 대비 30% 이상<br>동력 절감, 모터 효율/처리량 개선 | 동력 소모 높음 |
| 섬유 품질 | 내부 소섬유화,<br>섬유장 손실 줄일 수 있음,<br>플레이트 패턴 교체 용이 | 균일한 처리,<br>내마모 신소재·정밀 플레이트 적용 | 섬유 품질/<br>섬유장 균일성 제어 한계 |
| 처리 용량 | 대형 모델로 단위 설비 처리량 증가,<br>단점: 첫 패스 처리 효율 저하<br>가능성 있음 | 용량·효율 약 30% 향상,<br>기존 장비 업그레이드 가능/<br>표준화된 부품 적용으로 용이한<br>교체 가능 | 용량 한계로 예비 설비 많이 필요 |
| 플레이트 교체 | 쉽고 빠름, 다운타임 최소화 | 교체시간 단축, 예비·운전 효율 향상 | 교체 8~24h, 예비설비 필요 |
| 설치 공간 | 콤팩트, 증설·조정 유리 | 대형화/모듈화로 공간 크나,<br>설비 수 감소로 보완 | 대형, 공간 활용 효율 낮음 |
| 유지보수 | 플레이트 마모 패턴 자체 교정<br>(self-correction wear pattern)으로<br>고수명/안정성 | 내마모 신소재, 플레이트 간격 정밀 제어,<br>최신형은 일부 자체 보정 기능 도입 | 자체 보정 한계, 마모 편중 |
| 최신 개선 | Fine bar 플레이트 적용 용이,<br>수명·소음·에너지 절감 | 한 대로 더 많은 지료 처리 가능,<br>부품 교체로 성능 업, 유지비 절감 | 교체·업그레이드 어려움 |

## 4. 리파이너 플레이트

리파이너 플레이트는 펄프 섬유를 가공하는 리파이너의 핵심 부품으로 섬유 절단, 외부 및 내부 소섬유화 및 섬유 간 결합력 발현에 큰 영향을 준다. 플레이트의 바

(bar) 형상과 배열 패턴은 리파이닝 효율을 좌우하는 중요한 요소이며, 이는 원료 특성, 지종, 요구 물성에 따라 다르게 설계된다. 아울러 리파이너 플레이트는 고속 회전과 강한 기계적 하중을 견뎌야 하므로 높은 정밀성과 내구성이 요구된다.

### (1) 리파이너 플레이트의 제조 과정

리파이너 플레이트는 주로 주조(sand casting) 방식으로 제작된다[25, 26]. 첫 번째 단계는 금형(모형, 패턴)의 설계 및 제작이다. CAD 및 CAM을 이용하여 바(bar) 패턴의 높이, 폭, 간격, 그리고 유동 방향 등을 고려해 금형을 설계·제작한다(그림 04-16(a)). 바의 형상과 배열은 펄프의 분산 상태, 마모 저항성, 에너지 전달 효율 등 실제 운전 조건을 충분히 반영하여 설계해야 한다.

두 번째 단계는 사형(砂型, sand mold) 제조이다(그림 04-16(b)). 금형 위에 수지로 코팅된 규사(resin-coated sand)를 여러 차례 압축하여 충진함으로써 사형을 성형한다. 복잡한 형상을 구현하기 위해 상형과 하형, 그리고 중자(core)를 조립하여 사용하며, 이후 토치(버너) 또는 가열로에서 약 500 °C 이상의 온도로 경화시켜 충분한 강도를 확보한다. 사형 제작이 완료되면 고탄소 주철이나 Cr–Ni–Mo 합금철과 같은 합금 원재료를 규정된 비율로 혼합하여 고온로에서 완전히 용해한다.

다음 단계는 압탕(pouring) 공정이다(그림 04-16(c)). 이 과정에서는 용해된 금속(용탕)을 사형의 주입구와 주입 깔때기를 통해 천천히 부어 넣는다. 안정적인 압탕을 위해서는 사형 내부의 공기 배출로, 런너, 라이저(압탕구) 등의 설계에 주의해야 한다. 또한, 용탕을 급속하게 혹은 과도하게 주입할 경우 기공, 기포, 균열 등 결함이 발생할 수 있어 주의를 요한다.

그림 04-16(d)와 그림 04-16(e)에 나타난 냉각(solidification) 및 탈형(shakeout) 단계는 주조 공정의 품질을 좌우하는 중요한 과정이다. 용탕이 사형 내부에서 서서히 응고되도록 냉각 속도를 적절히 관리하여 열충격이나 변형이 발생하지 않도록 해야 한다. 응고가 완료된 후에는 사형을 분해·탈거하여 주물을 꺼내고, 사형 내부에 남아 있는 모래와 주물 찌꺼기를 제거한다. 또한 필요에 따라 금속 표면에 형성된 산화물이나 흡착물을 브러싱이나 세척을 통해 제거한다.

탈형된 제품은 일반적으로 표면이 거칠고 바의 높이가 균일하지 않은 상태이므로, 그림 04-16(f)와 같이 연마 공정을 통해 바의 상단을 평탄하게 가공하고 표면 거칠기를 감소시킨다. 이후 열처리 공정을 실시하여 재료의 기계적 특성을 향상

그림 04-16. 리파이너 플레이트 제조 과정




시킨다. 보통 약 1,100 °C 내외의 고온 조건에서 담금질(quenching), 풀림(annealing), 템퍼링(tempering) 등의 열처리를 수행하여 내마모성과 강도를 향상시키고 내부 응력을 완화한다.

마지막으로 그림 04-16(g)와 같이 품질 검사를 통해 균열, 기포, 핀홀, 표면 결함 등의 존재 여부를 확인하여 제품의 불량 여부를 판정한다.

이러한 일련의 공정은 모두 고품질·고내구성·정밀 가공이 요구되는 리파이너 플레이트의 성능을 확보하기 위해 필수적인 과정이다.

### (2) 전통적 주조 방식으로 제조된 리파이너 플레이트의 문제점

전통적인 주조 방식으로 제작된 리파이너 플레이트는 구조적인 한계를 가지고 있다. 이는 사형에서 금형을 원활하게 제거하기 위해 플레이트의 바에 일반적으로 약 4~6° 정도의 빼기 경사각이 부여되기 때문이다(그림 04-17). 이러한 경사각은 주조 공정에서 필수적인 요소이지만, 운전 중 마모가 진행되면서 바 모서리의 예리도가 점차 감소하는 원인이 된다. 바의 모서리가 둔화되면 섬유가 바에 효과적으로 포집되지 못하고 미끄러져 지나가게 되어 리파이닝 효율이 저하되고 지료

처리량도 감소하게 된다. 그 결과 플레이트의 교체 주기가 단축될 뿐 아니라, 최종 종이의 품질에도 부정적인 영향을 미칠 수 있다[25, 26].

그림 04-18은 리파이너 플레이트 바(bar)의 마모 전후 형상 변화를 나타낸 것이다. 그림 04-18(a)와 같이 마모가 발생하지 않은 경우에는 바의 모서리가 뚜렷하고 예리하여 섬유가 바에 효과적으로 포집되며, 이로 인해 섬유 절단과 표면 가공이 효율적으로 이루어진다. 그러나 그림 04-18(b)와 같이 마모가 진행되면 바의 모서리가 둔화되고 경사각이 더욱 완만해지면서 섬유가 바에 충분히 걸리지 못하고 미끄러지듯 통과하게 된다. 이러한 형상 변화는 결국 리파이너의 에너지 전달 효율을 저하시킬 뿐 아니라 섬유처리 품질 저하로 이어지게 된다.

**그림 04-17.** 주조 플레이트의 빼기 경사각

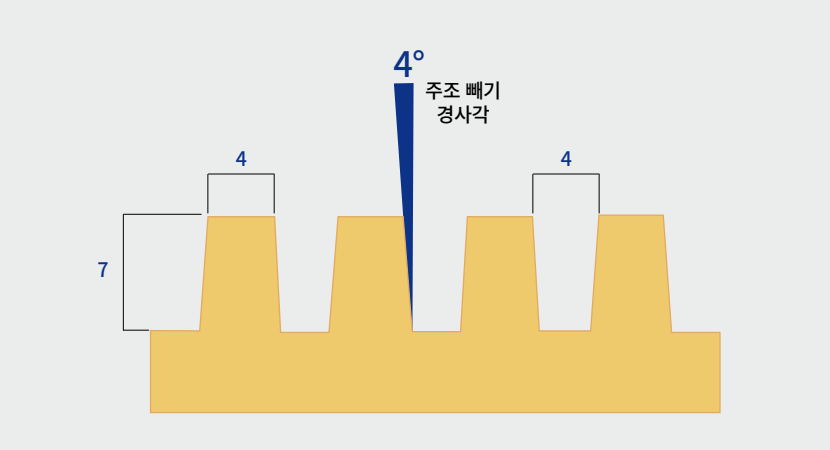
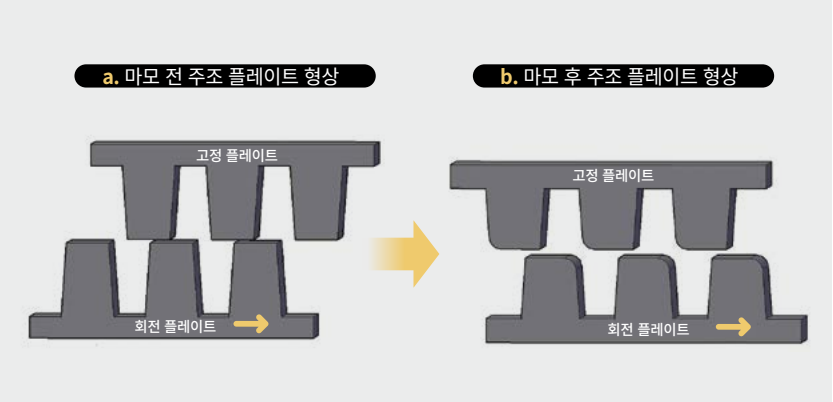



**그림 04-18.** 주조 플레이트의 바 모서리 마모에 따른 예리도 변화를 보여주는 모식도



### (3) 최신 기술: 수직 바 형상 플레이트의 제조와 특징

기존의 리파이너 플레이트는 주조 공정의 특성상 바 상부에 약 4~6°의 경사각을 부여해야 한다(그림 04-19(a)). 이러한 사다리꼴(테이퍼) 구조는 사용 중 마모가 진행될수록 바 모서리가 점차 둔화되어 섬유 절단과 피브릴화 성능이 빠르게 저하되는 문제를 초래한다. 이러한 한계를 개선하기 위해 최근에는 수직 바 구조의 리파이너 플레이트가 개발되어 적용되고 있다. 이 방식에서는 경사각을 두지 않고 바를 수직 형상으로 정밀 가공함으로써(그림 04-19(b)), 바 모서리의 예리함을 보다 오래 유지할 수 있으며 바의 기하학적 정밀도를 향상시키는 효과가 있다.

수직 바 플레이트를 제조하기 위해서는 전통적인 주조 공정에 더해 정밀 가공 및 접합 공정이 추가로 필요하다. 대표적인 방법으로는 내마모성이 우수한 초경합금(cemented carbide) 바 인서트를 별도로 제작한 후 이를 금속 베이스 플레이트에 고정하는 방식이 있다. 이때 플레이트의 베이스는 바가 삽입될 수 있도록 설계된 상태에서 주조 방식으로 제조된다. 수직 바를 플레이트 베이스에 접합하는 방법에는 여러 가지가 있다. 예를 들어 바를 금형에 미리 삽입한 상태에서 주조하는 방식이 있으며, 이외에도 바와 베이스를 확산접합(diffusion bonding), 고정밀 레이저 또는 로봇 용접, 브레이징(brazing), 확산접합 등의 공정을 이용하여 접합하기도 한다. 이러한 공정을 통해 서로 다른 재질의 바와 베이스가 강하게 결합된 구조를 형성하게 되며, 그 결과 탈형을 위한 경사각이 전혀 필요 없는 완전 수직 바 구조의 리파이너 플레이트를 구현할 수 있다[25, 26, 29–32].

AFT Finebar® 플레이트는 레이저 절단, CNC 가공, 그리고 금속 확산접합 기술을 적용하여, 바와 그루브의 폭·깊이·간격을 정밀하게 설계, 제작된다. Finebar®는 바 폭 1.0~3.2 mm, 그루브 1.3~4.8 mm, 깊이 최대 9.6 mm 등 다양한 패턴을 구현하며, 바와 그루브의 직각 구조로 마모 후에도 예리한 모서리가 유지되는 장점이 있다[32].

그림 04-20은 수직 바 형상이 마모 전후에도 모서리 예각이 유지되므로, 마모가 진행되더라도 섬유 절단·분산, 소섬유화 등 기계적 개질 효과가 지속되는 원리를 나타낸다[25-28]. 기존의 경사각을 가진 플레이트는 바 상부가 마모되면 절단 각이 둔해지는 반면, 수직 바는 마모에 따른 성능 저하가 적고, 섬유가 바 모서리에서 에너지를 고효율로 전달받으며 처리되는 장점이 있다.

또한 수직 바는 ultra-fine bar(초미세 바) 구현에 유리하다. 정밀 가공과 이종 금

속 접합 기술을 활용해, 바 폭과 간격을 수 mm 수준까지 정밀하게 설계할 수 있다. 초미세 바 플레이트는 섬유 절단을 최소화하면서 소섬유화를 균일하게 유도한다. 특히 활엽수 펄프 또는 재생펄프에 적용하면, 내구성, 강도, 표면 특성이 대폭 향상된 고품질 종이의 생산이 가능하다. 이러한 수직 바 플레이트는 지료 처리량 증가, 에너지 절감, 교체 주기 연장(30~50% 이상) 등 공정 경제성까지 크게 높여준다[25-27, 29-32].

### (4) 리파이너 플레이트의 제조 성분

리파이너 플레이트는 펄프 섬유를 효과적으로 가공하기 위해 높은 내마모성과 적절한 파괴 저항성을 가져야 한다. 그러나 두 특성은 상충 관계에 있어, 한쪽을 강화하면 다른 쪽이 약화되는 경향이 있다. 일반적으로 내마모성이 높으면 충격에 약해 파손되기 쉽고, 파괴인성이 높으면 마모가 빠르게 진행된다. 따라서 합금 설계는 두 특성의 균형을 맞추는 것이 핵심이다.

**그림 04-19.** (a) 사다리꼴 바 형상의 주조 플레이트, (b) 수직 바 형상의 플레이트

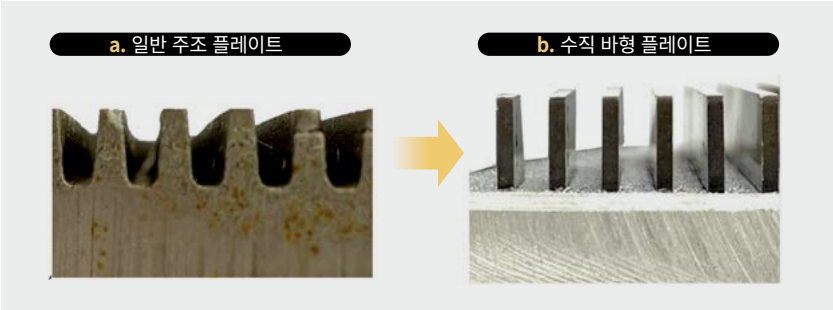
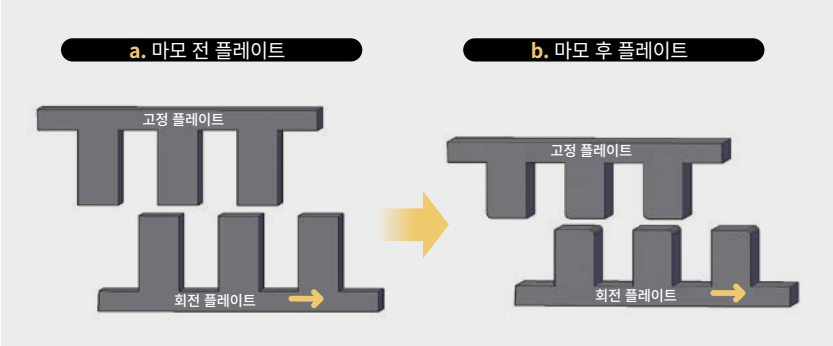



**그림 04-20.** 수직 바 형상의 플레이트가 마모되면서 변화되는 바 형상 모식도



정상적인 리파이닝 과정에서 플레이트의 마모는 자연스러운 현상이지만, 지료에 이물질이 혼입되면 마모 속도가 급격히 증가한다. 바 모서리의 예리도가 감소하거나 바가 파손되면 섬유 절단 효율이 떨어지고, 펄프 품질이 불균일해지며, 교체 주기가 짧아져 유지보수 비용과 가동 중지에 따른 손실이 커진다. 그림 04-21은 동일한 운전 시간을 거친 후 합금 특성에 따른 마모 상태를 비교한 것으로, 내마모성이 우수한 합금은 균일한 마모 속도를 보여 플레이트 수명이 길지만, 내마모성이 약한 합금은 바가 급속히 마모되어 베이스까지 손상되며 불균일한 마모가 발생한다. 이러한 상태는 플레이트 파손 뿐 아니라 작업성에도 심각한 문제를 초래한다.

일반적으로 사용되는 합금으로는 니켈과 크롬을 포함하는 Ni-hard 백주철(white cast iron)과 주조 440등급 스테인리스강이 있다. Ni-hard는 내마모성이 뛰어나지만 충격 저항성이 낮아 파손되기 쉽고, 산성 조건에서는 부식 문제가 발생한다. 반면 440 스테인리스강은 내식성이 우수하지만 내마모성은 상대적으로 낮다. 이러한 한계를 극복하기 위해 최근에는 고강도의 내마모성과 내식성을 동시에 만족시키는 첨단 합금이 개발되고 있다[1].

J&L Fiber Services (현재 Valmet)는 30년 이상 다양한 합금을 개발해 왔으며, 31종의 스테인리스강, 16종의 백주철, 3종의 Ni-hard 합금을 제공한다. 특히 저탄소 스테인리스강은 저농도 리파이닝에 적합하며, 열처리와 표면 경화 처리를 통해 성능을 최적화한다. 대표적인 합금으로는 C90, C91, C96이 있다. C90은 표면 경화 처리로 자체 연마(self-sharpening) 기능을 제공하여 바 모서리의 예리도를 유지한다. C91은 고마모 환경에서 내마모성을 유지하는 소재로 균일한 경화 입자의 분포로 내구수명도 높다. C96은 업계 최고 수준의 강도를 가지며, 높은 바 높이/폭(D/W) 설계가 가능하고 파손 없이 긴 수명을 보장한다. 또한 항공우주 기술을 기반으로 개발된 MX91, MX92, MX94는 고강도, 내마모성, 내식성을 강화하여 극한 조건에서도 안정적인 성능을 발휘한다[33].

합금 선택은 단순히 내마모성만 강화하는 것이 아니라 파괴인성과의 균형을 맞추는 방향으로 이루어져야 한다. 지나친 내마모성은 충격 취약성을 높이고, 지나친 파괴인성은 마모를 가속시켜 플레이트 수명을 단축시킨다. 따라서 크롬, 탄소, 니켈, 몰리브덴, 바나듐 등의 성분을 적절히 조합해 두 특성을 균형 있게 확보하는 것이 중요하다. 내식성을 향상시키기 위해서는 구리와 니켈 함량을 높이는 것이 효과적이며, C96과 같은 고급 합금은 내식성, 내마모성, 높은 파괴인성을 동시에 제공하는 것으로 알려져 있다[33].

그림 04-21. 플레이트의 내마모성 정도를 비교한 사진




## 5. 리파이닝 이론

리파이닝(refining)은 펄프 섬유의 물리적 특성을 조절하여 최종 종이의 품질을 향상시키는 핵심 공정이다. 리파이닝 결과에 영향을 미치는 인자는 매우 다양하며, 대표적으로 다음과 같은 요소들이 있다:

- 원료의 수종(침엽수/활엽수)
- 표백 여부(표백/미표백)
- 지료의 농도 및 유량
- 리파이너 플레이트의 패턴, 간격
- 회전 속도(rpm) 등[2]

이러한 요소들은 서로 복합적으로 작용하므로, 사용되는 원료의 특성에 따라 리파이닝 시스템, 제어 전략, 운전 조건을 사전에 합리적으로 설정하는 것이 중요하다.
리파이닝을 수학적으로 접근하려는 시도는 1887년 Jagenberg에 의해 시작되었다. 그는 '초당 모서리 길이(cutting edge length per second)'와 '고해 면적(refining area)' 개념을 도입하여 리파이닝의 물리적 작용을 정량화하려 했다[34]. 이후 발전된 이론들은 리파이너의 크기나 형식(디스크형/콘형)과 관계없이 적용할 수 있으며, 특히 저농도 리파이닝 조건에서 널리 활용되고 있다.
저농도 리파이닝에서는 리파이너에 투입되는 동력을 다음과 같이 구분한다:

- **총 리파이닝 동력(total refining power)**: 리파이닝에 공급되는 전체 동력
- **무부하 동력(no-load or idle power)**: 지료가 공급된 상태에서 플레이트 간 접촉 없이 회전만 하는 데 필요한 동력
- **순 리파이닝 동력(net refining power, Pnet)**: 총 동력에서 무부하 동력을 제외한 값으로, 실제 섬유 처리에 기여하는 에너지[5, 6, 34]

무부하 동력은 전체 리파이닝 동력의 약 15~20%를 차지하며, 회전 속도와 플레이트 직경에 따라 기하급수적으로 증가한다[5, 32]. 이를 정량화한 경험식은 다음과 같다:

$$\text{무부하 동력 (kW)} = k \times D^{4.249} \times \text{rpm}^{2.8} \quad \text{식 1}$$

식 1은 디스크형 리파이너에서 무부하 조건에서의 동력 소모를 추정하는 데 사용된다. 각 변수의 의미는 다음과 같다:

- $k$ = 무부하 동력 계수. 인치 단위일 경우 $2.299 \times 10^{-13}$, mm 단위일 경우 $2.468 \times 10^{-19}$.
- $D$ = 회전 플레이트의 직경 (inch). 직경이 클수록 원심력과 마찰력이 증가하여 무부하 동력이 증가한다.
- rpm = 회전 속도. 속도가 높아질수록 마찰과 유체 저항이 증가하며, 무부하 동력은 비선형적으로 증가한다.
- **지수 값 4.249 및 2.8**: 각각 플레이트 직경과 회전 속도가 무부하 동력에 미치는 영향을 나타내는 실측 기반 지수로, 실험적 데이터에 기반하여 도출된 값이다.

예를 들어, 플레이트 직경을 20인치에서 22인치로 증가시키면 무부하 동력이 약 50%까지 증가할 수 있다. 이는 단순한 치수 변화가 에너지 소비에 큰 영향을 미친다는 것을 보여준다. 또한 마모된 플레이트를 계속 사용할 경우, 새 플레이트 대비 약 30% 더 많은 무부하 동력이 소모되는 경향이 있어 에너지 효율 관리 측면에서 적기 교체가 중요하다[32].

제지 현장의 관점에서 보면 무부하 동력의 비중이 크므로, 이를 줄이는 것이 전체 리파이닝 공정의 에너지 효율을 높이는 데 중요하다. 또한 플레이트 직경과 회전 속도는 리파이닝 강도 뿐 아니라 에너지 소비에도 직접적인 영향을 미치므로, 운전 조건의 최적화가 필요하다. 그리고 플레이트 마모에 따른 무부하 동력 증가를 고려하여, 정기적인 점검 및 교체 주기 설정이 요구된다.

### (1) Specific Edge Load (SEL) 이론

1958년 Wultsch와 Flucher는 리파이닝 강도(refining intensity)라는 개념을 도입했다. 이는 리파이너의 전체 바 모서리 길이에 회전 속도를 곱하여 단위 시간당 절단 모서리 길이(CEL, cutting edge length per second)를 구하고, 순 리파이닝 동력을 절단 모서리 길이로 나누어 계산하는 방식이다[6, 12]. 1966년 Brecht와 Siewert는 이를 비모서리 하중(SEL, specific edge load)으로 명명했다[12, 16]. SEL 이론은 리파이닝을 좌우하는 두 요소 — 얼마나 많이 처리되는가(빈도)와 얼마나 강하게 충격을 받는가(강도) — 를 구분한다.

이 이론은 펄프 리파이닝 과정을 두 가지 주요 요소, 즉, 섬유에 어느 정도의 리파이닝 에너지가 가해지는지, 또 얼마나 강한 충격으로 리파이닝 처리되는지의 두 요소로 설명한다. 리파이닝 시 가해지는 에너지는 비리파이닝 에너지(SRE, specific refining energy)로 나타내며, 연속 운전 기준으로 식 2에 근거하여 kWh/t 단위로 나타낸다. 즉, SRE는 일정량의 섬유에 가해지는 리파이닝 에너지를 의미한다.

$$SRE = \frac{P_t - P_i}{F \times C} = \frac{P_{net}}{F \times C} \quad \text{식 2}$$

반면, 리파이닝 강도는 SEL로 결정되며, 이는 식 3에 근거하여 순 리파이닝 동력을 초당 절단 모서리 길이(CEL)로 나눈 값으로 정의되고, 단위는 J/m 또는 Ws/m이다.

$$SEL = \frac{P_{net}}{\Sigma (N_r \times N_{st} \times L) \times n} = \frac{P_{net}}{CLF \times n} = \frac{P_{net}}{CEL} \quad \text{식 3}$$

여기서 $P_t$ = 총 리파이닝 동력 (kW)
$P_i$ = 무부하 동력 (kW)
$P_{net}$ = 순 리파이닝 동력 (kW)
F = 지료 유량 (L/min)
C = 지료 농도 (%)
$N_r$, $N_{st}$ = 회전 플레이트와 고정 플레이트의 바 수
L = 회전 플레이트의 바와 고정 플레이트 바 사이의 공통 접촉 길이 (km)
Cutting Length Factor (CLF) = 회전당 절단 모서리 길이 (km/rev.)
n = 회전 속도 (1/s)
Cutting Edge Length (CEL) = 절단 모서리 길이 (km/s)

SEL은 바 모서리 선단에 놓인 섬유들에 가해지는 충격의 강도를 결정하는데 그림 04-22의 예시에 따라 식 3에 주어진 CLF(회전당 절단 모서리 길이, cutting length factor)를 통하여 쉽게 계산할 수 있다. CEL은 CLF에 회전 속도(n)를 곱하여 산출되며, CLF는 회전 플레이트와 고정 플레이트의 바 수, 각 바의 길이, 그리고 플레이트의 세그먼트 구성에 따라 결정된다. 예를 들어, L1 영역에는 세그먼트당 7개의 바가 있으며, 전체 세그먼트가 6개이므로 총 42개의 바가 존재한다. 이 영역의 바 길이는 50 mm이며, 바가 30° 각도로 배치되어 있으므로 실제 바 길이는 50/cos30°=57.75 mm이다. 같은 방식으로 L2부터 L6까지의 영역에 대해 바 개수와 길이를 계산할 수 있다. 결국, 동일한 $P_{net}$에서도 CEL이 크면 SEL(충격 강도)은 작아져 섬유장이 짧은 활엽수 펄프/종이자원에 적합한 저강도 리파이닝이 된다. 반대로 바 개수가 적거나 회전수가 낮아 CEL이 작아지면 섬유벽이 두껍고 장섬유가 많은 침엽수 펄프에 적당한 고강도 리파이닝이 된다.

SEL(specific edge load) 이론은 리파이닝 강도를 정량적으로 표현하는 간단하고 직관적인 방법으로, 제지공정에서 특정 리파이너 장치를 통해 리파이닝 결과를 예측하는 데 널리 사용된다. 그러나 이 이론은 본질적으로 플레이트 바 모서리의 총 길이와 회전 속도만을 기반으로 계산되기 때문에, 실제 리파이닝 결과에 영향을 미치는 다양한 요소를 충분히 반영하지 못한다는 한계가 있다[1, 5, 6].

예를 들어, SEL은 다음과 같은 중요한 변수들을 고려하지 않는다.

여기서 $P_t$ = 총 리파이닝 동력 (kW)
$P_i$ = 무부하 동력 (kW)
$P_{net}$ = 순 리파이닝 동력 (kW)
$F$ = 지료 유량 (L/min)
$C$ = 지료 농도 (%)
$N_r$, $N_{st}$ = 회전 플레이트와 고정 플레이트의 바 수
$L$ = 회전 플레이트의 바와 고정 플레이트 바 사이의 공통 접촉 길이 (km)
**Cutting Length Factor (CLF)** = 회전당 절단 모서리 길이 (km/rev.)
$n$ = 회전 속도 (1/s)
**Cutting Edge Length (CEL)** = 절단 모서리 길이 (km/s)

SEL 이론은 이러한 요소들을 무시하고, '리파이닝 결과는 바 모서리 길이와 회전 속도에 의해 결정된다'는 가정을 전제로 한다. 따라서 SEL 값이 같더라도, 실제 리파이닝 효과는 플레이트 패턴, 지료 특성, 운전 조건에 따라 크게 달라질 수 있다.

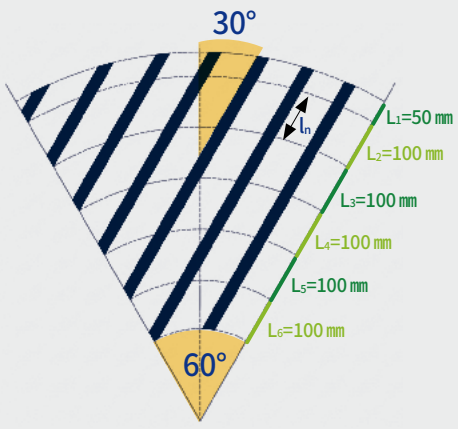
그럼에도 불구하고 SEL 이론은 제지 현장에서 널리 활용되고 있다. 이는 계산이 간단하고, 필요한 데이터(플레이트 바 개수, 회전 속도, 순 동력 등)를 쉽게 확보할 수 있으며, 경험 많은 기술자들이 특정 펄프와 지료 조건에서 적절한 SEL 범위를 경험적으로 알고 있어 운전 조건 설정에 유용하기 때문이다. 또한 SEL은 동일한 조건에서 플레이트 패턴이나 운전 조건을 변경할 때 상대적인 리파이닝 강도를 비교하는 기준으로도 활용될 수 있다.

결론적으로, SEL은 리파이닝 강도의 1차적 지표로는 매우 유용하지만, 리파이닝 결과를 정확히 예측하는 절대적 기준은 아니다. 따라서 SEL은 SSL(Specific Surface Load), SRE(Specific Refining Energy) 등 다른 지표와 함께 사용하여야 하고, 지료 특성·플레이트 패턴·운전 조건을 종합적으로 고려해야 한다.

### (2) Specific Surface Load (SSL) 이론

리파이닝 과정에서 섬유는 회전 플레이트와 고정 플레이트의 바(bar) 교차 영역에서 반복적인 충격과 전단을 받으며, 이러한 기계적 작용은 섬유의 구조적 특성과 최종 종이의 물성을 결정하는 핵심 요소이다. 전통적으로 리파이닝 강도를 설명하는 지표로 SEL이 사용되어 왔으나, SEL은 바의 모서리 길이에만 기반하기

그림 04-22. 리파이너 플레이트의 CLF 계산 방법




- 각 영역별 ($L_n$) 실제 바 길이 ($l_n$) = $L_n/\cos 30°$
- 각 영역별 플레이트의 총 바 개수
  (플레이트별 세그먼트 개수 = 6개)
  ① $L_1$ 영역의 바 개수 = 7×6 = 42
  ② $L_2$ 영역의 바 개수 = 6×6 = 36
  ③ $L_3$ 영역의 바 개수 = 5×6 = 30
  ④ $L_4$ 영역의 바 개수 = 4×6 = 24
  ⑤ $L_5$ 영역의 바 개수 = 3×6 = 18
  ⑥ $L_6$ 영역의 바 개수 = 2×6 = 12
- 각 영역별 바 길이 (mm)
  ① $l_1$ = 50/cos30° = 57.75 mm
  ② $l_2 = l_3 = l_4 = l_5 = l_6$ = 100/cos30° = 115.5 mm

- 각 영역별 CLF (m/rev.) = $N_r \times N_{st} \times l_n$
  $L_1$ 영역 42×42×0.057 = 100.55
  $L_2$ 영역 36×36×0.1155 = 146.69
  $L_3$ 영역 30×30×0.1155 = 103.95
  $L_4$ 영역 24×24×0.1155 = 66.53
  $L_5$ 영역 18×18×0.1155 = 37.42
  $L_6$ 영역 12×12×0.1155 = 16.63
  합계 : 471.77 m/rev
- 싱글 디스크 리파이너의 CFL
  = 0.472 km/rev
- 더블 디스크 리파이너의 CFL
  = 0.944 km/rev

출처: Lumiainen, J., 2000. Refining of chemical pulp. In: Paulapuro, H. (Ed.), Papermaking Part 1: Stock Preparation and Wet End. Papermaking Science and Technology Series, Book 8. Fapet Oy, Helsinki, pp. 86-122. Min, B.-G., Kim, C.-H., Lee, J.-Y., Park, S.-H., Lee, M.-S., Gu, H.-G., Lee, C.-Y., 2020. New technology for developing a lightweight refiner plate for hardwood kraft pulp fibers. Bioresources 15(4), 9218-9142. Gu, H.-G., Min, B.-G., Lee, J.-Y., Park, S.-H., Lee, M.-S., Lee, C.-Y., Kim, C.-H., 2021. Mechanical modification of softwood pulp fibers using a novel lightweight vertical bar plate. Tappi Journal 20(4), 241-251.

때문에 바 폭의 영향을 반영하지 못하는 한계가 있다. 동일한 SEL 값을 가지더라도 바 폭이 넓으면 에너지가 분산되고, 좁으면 집중되므로 실제 섬유가 받는 충격 강도는 크게 달라진다[36].

이러한 한계를 보완하기 위해 Lumiainen(1990)은 Specific Surface Load (SSL) 개념을 제안하였다[37]. SSL은 바 표면에서 섬유에 전달되는 에너지 밀도를 나타내며, 단위는 $J/m^2$이다. SSL 값이 클수록 바 표면에 집중되는 에너지가 크다는 의미이고, 값이 작을수록 에너지가 넓게 분산된다. 따라서 SSL은 섬유가 받는 실제 충격 강도를 보다 정확하게 설명할 수 있는 지표로 평가된다[38].

SSL 이론에 따르면, 단위 리파이닝 에너지(SRE)는 리파이닝 충격 수(N, km/kg), SSL($J/m^2$), 그리고 바 폭 인자(W, m)의 곱으로 표현된다. 여기서 N은 섬유가 리파이닝 시스템을 통과하는 동안 받는 총 충격 횟수를 의미하며, SSL은 바 표면에서의 에너지 밀도, W는 충격이 작용하는 유효 폭을 나타낸다. 이 관계는 다음과 같은 식으로 표현된다:

$$SRE = N \times SSL \times W \quad \text{식 4}$$

이 식은 리파이닝 에너지가 충격의 강도와 범위, 그리고 충격 횟수에 의해 결정된다는 사실을 보여준다. 즉, 강하고 긴 충격이 많이 발생할수록 리파이닝 에너지가 커지고, 이는 섬유의 물리적 특성에 큰 영향을 미친다.

W는 리파이닝 충격이 바 표면을 따라 전이될 때 바 폭의 크기를 의미한다. 이는 충격이 바 폭을 걸쳐 섬유에 작용하는 시간이나 범위를 나타내는 요소로, 리파이닝 효과에 중요한 역할을 한다.

결국, 리파이닝 에너지는 SSL, W, 그리고 N의 조합에 의해 결정된다. 즉, 강하고 긴 충격이 많이 발생할수록, 리파이닝 과정에서 더 많은 에너지가 사용되고, 이는 섬유의 물리적 특성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 이러한 요소들의 조합은 리파이닝 효과의 강도와 효율성을 결정짓는 주요 요인이다. 리파이닝의 본질은 리파이닝 충격의 실제 강도인 SSL과 W를 통해 설명될 수 있다. 주어진 리파이닝 강도와 길이를 가진 리파이닝 충격 수 (N)이 리파이닝 에너지를 결정한다.

리파이닝 충격 수(N)는 주어진 리파이닝 강도와 바 폭에서 리파이닝 시스템을 통과하는 동안 섬유가 받는 총 충격 횟수를 의미한다. 리파이닝 충격 수, N은 식 5와 같이 절단 속도(Ls, 즉, 단위 시간 동안 생성된 충격의 길이, km/s 수)를 단위 시간에 통과하는 섬유량(M, kg/s)으로 나누어 계산한다.

$$N = \frac{L_s}{M}$$ 식 5

이 값은 주어진 섬유 질량 흐름이 리파이닝 시스템을 통과할 때 생성된 리파이닝 충격의 총 길이를 나타내지만, 실제로 얼마나 많은 섬유가 이러한 충격을 받았는지는 알 수 없다.

SSL은 SEL을 W로 나누어 식 6과 같이 계산한다:

$$SSL\,(J/m^2) = \frac{SEL\,(J/m)}{W(m)}$$ 식 6

따라서 동일한 SEL 값이라도 바 폭이 좁으면 SSL 값은 커지고, 바 폭이 넓으면 SSL 값은 작아진다. 이는 SEL만으로는 리파이닝 강도를 정확히 설명할 수 없음을 의미하며, SSL을 함께 고려해야 한다.

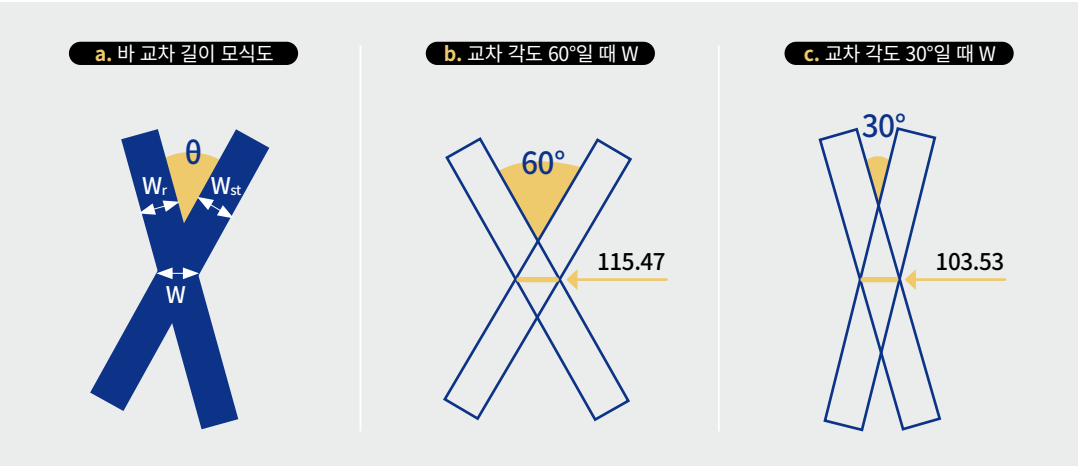
리파이닝 충격의 길이(W)는 그림 04-23(a)에서 보는 것과 같이 회전 플레이트와 고정 플레이트 바의 폭과 바의 교차 각도에 따라 달라지며, 다음의 식 7과 같이 계산된다:

$$W = \frac{W_r + W_{st}}{2} \times \frac{1}{\cos(\theta/2)}$$ 식 7

여기서 $W_r$은 회전 플레이트의 바 폭, $W_{st}$는 고정 플레이트의 바 폭, 그리고 θ는 평균 바 교차 각도이다. 그림 04-23(b)와 그림 04-23(c)에서 보는 것처럼 교차 각도가 작아질수록 충격이 작용하는 길이가 줄어들어, 섬유에 가해지는 압력이 더 집중된다. 예를 들어, 회전 플레이트와 고정 플레이트의 바 폭이 각각 100 mm일 때, 교차 각도가 60°에서 30°로 줄어들면 W는 115.5 mm에서 103.5 mm로 감소한다. 이는 교차각이 작아질수록 바가 교차하는 길이가 줄어들기 때문에 실제로 섬유에 가해지는 충격 길이도 짧아진다는 것을 의미한다. 이러한 관계는 그림 04-23에서 확인할 수 있다.

그림 04-24는 동일한 바 개수를 갖지만 바와 홈의 치수가 상이한 플레이트들에서 SEL과 SSL 값을 비교한 것이다. 세 패턴 모두 동일한 3.7 W·s/m의 SEL을 갖지만 SSL에 있어서는 큰 차이를 나타낸다. 그림 04-24(a)는 바 폭이 넓고 조밀한 구조로 SSL 값이 440 J/m$^2$로 가장 낮다. 그림 04-23(b)는 바 폭이 중간 정도로 SSL 값이 704 J/m$^2$이고, 그리고 그림 04-24(c)는 바 폭이 가장 좁아 SSL 값이

그림 04-23. 리파이닝 동안 가해진 충격의 길이, W




1,210 J/m$^2$로 가장 높다. 즉, 바의 개수는 동일하고 바와 홈의 치수에서만 차이가 나기 때문에 SEL은 3.7 W·s/m (=J/m)로 모두 동일하다. 그러나 바와 홈의 치수 차이로 인해, 바와 바 사이에서 섬유에 가해지는 힘은 바 폭에 따라 크게 달라진다. 따라서, SSL 값은 그림 04-24(a)에서 440 J/m$^2$로 가장 작고, 그림 04-24(b)에서 704 J/m$^2$, 그림 04-24(c)에서는 1,210 J/m$^2$로 가장 크다. SSL 값이 작다는 것은 바 폭이 크다는 뜻이며, 이는 리파이닝 에너지가 바 전체 폭에 걸쳐 분산되어 저강도 리파이닝이 가능해진다는 것을 의미한다[6]. 따라서, SEL 값만으로 리파이닝 효과를 예측하는 것은 오류를 초래할 수 있으며, 정확한 결과를 위해서는 SSL 값을 함께 고려해야 한다.

그림 04-25는 그림 04-24의 바 패턴을 갖는 플레이트들을 사용하여 리파이닝할 때 인장강도 발현이 크게 달라짐을 보여준다. SEL 이론에 따르면 동일한 SEL 값을 갖는 플레이트는 동일한 리파이닝 효과를 나타내야 하지만, 그림 04-25는 다른 결과를 보여준다. 즉, 동일한 SEL을 갖는 플레이트라도 SSL 값에 따라 종이의 인장강도가 다르게 나타난다. SSL이 가장 작은 440 J/m$^2$인 플레이트는 동일한 리파이닝 에너지에서 가장 빠르게 인장강도가 발현된다. 이는 바 폭이 넓어서 리파이닝 에너지가 더욱 균일하게 분산되고 섬유에 가해지는 충격이 작아, 섬유의 손상 없이 강도가 빠르게 증가할 수 있기 때문이다. 반면에, SSL이 1,210 J/m$^2$인 플레이트는 인장강도가 가장 느리게 발현된다. 이는 바 폭이 좁아 리파이닝 에너지가 집중되면서 섬유에 가해지는 충격이 커져 섬유의 손상 가능성이 증가하기

때문이다. 이러한 결과는 SEL이 바 모서리에서의 충격 강도만을 고려하는 한계가 있으나 SSL은 바 폭까지 포함하여 계산되기 때문에 리파이닝 효과를 보다 정확하게 예측할 수 있는 지표임을 의미한다.

SSL(Specific Surface Load) 이론은 기존 SEL 이론의 한계를 보완하기 위해 활용된다. SSL은 특히 바 폭이 좁고 섬유 플록이 바 표면을 충분히 덮을 수 있는 조건에서 그 유효성이 두드러진다. 이 경우 에너지가 바의 모서리뿐만 아니라 표면 전체에 고르게 분산 전달되므로, 리파이닝 공정의 정밀한 정량화와 성능 최적화가 가능하다.

이처럼 SSL 이론은 바의 기하학적 형상을 계산에 반영하기 때문에, 리파이닝 결과는 바의 폭에 따라 크게 달라질 수 있다. 예를 들어, 바의 폭이 섬유 뭉치의 크기보다 훨씬 좁게 설계된 플레이트라면, 동일한 에너지가 극히 협소한 면적에 집중되면서 섬유가 과도하게 절단될 위험이 있다. 이는 바의 폭이 좁아질수록 섬유가 받는 실질적인 압착 강도가 급격히 상승하기 때문이다.

반면에, 바 폭이 섬유 플록의 유효 길이보다 충분히 넓거나 성긴 바 패턴을 갖는 플레이트의 경우에는, 섬유-바 상호작용이 바 모서리(bar edge) 주도 메커니즘으로 지배되므로 SSL보다 SEL 이론이 더 적합한 분석 틀이다. 이 조건에서는 플록이 바의 넓은 표면에 걸쳐 분포하여 접촉 부분의 순간 압력이 완화되고, 실제로 섬유의 변화는 바 모서리를 지날 때 가장 크게 일어난다. 따라서 바 표면 전체에 걸친 평균 하중(SSL) 보다, 섬유가 모서리를 몇 번 지나갔는지(모서리 통과수)와

**그림 04-24.** 리파이너의 바 패턴에 따른 SEL과 SSL의 비교

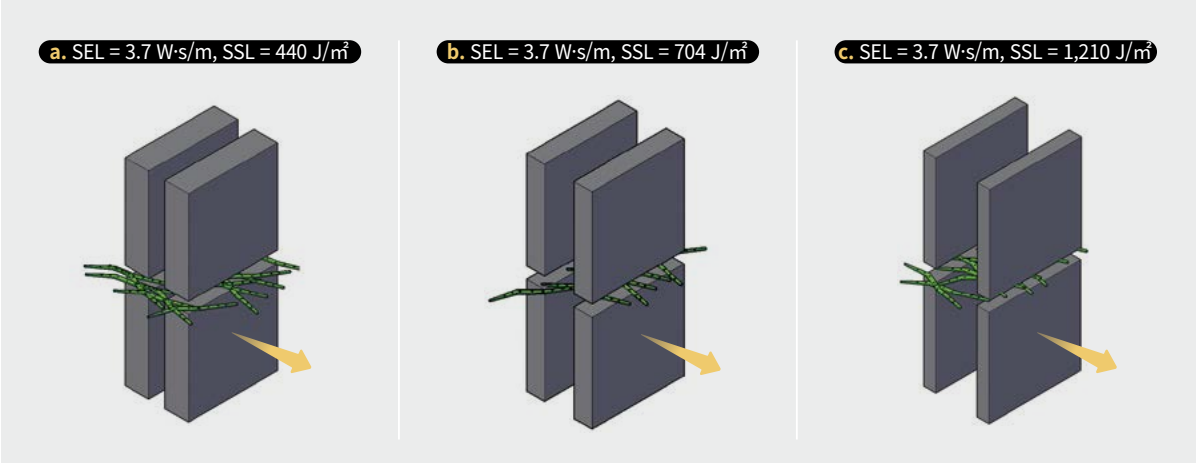
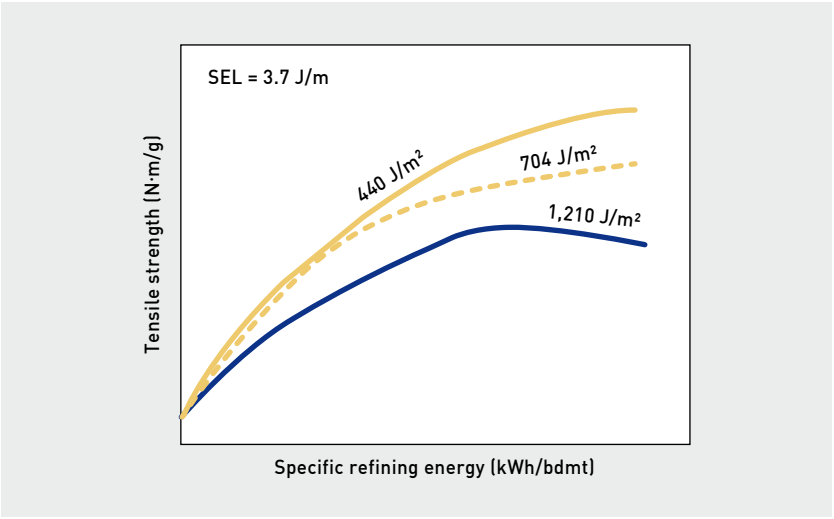


그림 04-25. 동일 SEL 하에서 SSL 차이에 따른 인장강도 변화




출처: Lumiainen, J., 2000. Refining of chemical pulp. In: Paulapuro, H. (Ed.), Papermaking Part 1: Stock Preparation and Wet End. Papermaking Science and Technology Series, Book 8. Fapet Oy, Helsinki, pp. 86-122.

그때의 힘의 크기(모서리당 하중, SEL)를 중심으로 보면 과도한 절단을 줄이고, 유연화를 늘리며, 종이 강도를 더 잘 유지하는 이유를 정확하게 설명하고 예측할 수 있다[6, 38].

SSL 이론은 몇 가지 한계를 갖지만, SSL과 SEL은 서로 보완적인 해석 틀로서 플레이트 바 패턴과 리파이닝 매개변수의 선택 및 최적화에 대한 이론적 근거를 제공한다[6, 39]. 구체적으로, 바 폭이 좁거나 촘촘한 패턴에서는 바 표면에 걸친 하중 분포를 반영하는 SSL이 유효하며, 바 폭이 넓거나 성긴 패턴에서는 섬유-바 상호작용이 모서리 중심으로 지배되므로 SEL이 더 적합하다. 따라서 플레이트 설계와 운전 조건(플레이트간 간격, 동력, 유량, 체류시간 등) 을 고려해 SSL과 SEL을 병행 적용함으로써, 과도한 절단을 억제하고 유연화를 촉진하며 강도-벌크 균형을 달성하는 최적의 리파이닝 조건을 도출할 수 있다[6, 39].

### (3) 기타 리파이닝 이론들

리파이닝 이론은 SEL과 SSL이 가장 널리 알려져 있지만, 이 외에도 리파이닝 현상을 설명하기 위해 다양한 접근법이 제안되었다. 그중 대표적인 것이 Danforth 이론과 Kerekes의 C 인자(C factor) 분석이다.

### 1) Danforth의 충격 기반 이론

1960년대 말, Danforth는 리파이닝을 설명하기 위해 두 가지 핵심 요소를 중심으로 한 모델을 제안했다[40]. 그의 이론에 따르면, 리파이닝은 섬유가 리파이너를 통과하는 동안 받는 충격의 횟수(N)와 바와 섬유의 상호작용에서 발생하는 충격의 강도(S)라는 두 가지 독립적인 변수의 함수로 표현된다. 즉, 섬유가 리파이너를 통과하는 동안 몇 번의 충격을 받는지, 그리고 각 충격이 얼마나 강한지를 통해 리파이닝 효과를 설명하려는 것이다.

이 접근법은 리파이닝 결과에 영향을 미치는 대부분의 요소를 포함할 수 있는 장점이 있다. 예를 들어, 충격 수는 회전 속도, 바 개수, 지료 유량과 관련되고, 충격 강도는 플레이트 간격, 바 패턴, 순 리파이닝 에너지와 밀접하게 연결된다. 따라서 이 이론은 리파이닝 현상을 물리적으로 잘 설명할 수 있는 잠재력을 가지고 있다.

그러나 Danforth 모델은 실제 현장에서 널리 사용되지 않는다. 그 이유는 모델에 포함된 일부 상수가 실험적으로 구하기 어렵고, 계산 과정이 복잡하기 때문이다. 특히, 충격 강도를 정량화하기 위해서는 섬유와 바의 상호작용을 매우 정밀하게 측정해야 하는데, 이는 제지공정과 같이 연속 운전 환경에서는 쉽지 않다. 그럼에도 불구하고 이 이론은 리파이닝을 단순한 에너지 투입이 아닌 충격의 빈도와 강도의 조합으로 이해하는 데 중요한 기초를 제공했다.

### 2) Kerekes의 C 인자(C factor) 분석

1990년, Kerekes는 기존의 SEL과 SSL 개념을 확장하여 C 인자(C factor)라는 새로운 분석 방법을 제안했다[41]. 이 이론은 리파이닝 강도를 설명할 때 단순히 바 패턴과 회전속도 뿐만 아니라, 섬유의 길이와 거칠기(roughness)까지 고려한다는 점에서 기존 이론보다 훨씬 포괄적이다.

C 인자 분석은 다음과 같은 논리를 따른다. 리파이닝 효과는 바와 섬유가 접촉하는 동안 발생하는 충격의 강도와 빈도 뿐 아니라, 섬유 자체의 물리적 특성에도 크게 의존한다. 예를 들어, 섬유가 길고 표면이 거칠면 바와의 접촉 면적이 커져 충격 전달 방식이 달라진다. 따라서 동일한 SEL이나 SSL 조건에서도 섬유 특성에 따라 리파이닝 결과가 달라질 수 있다. C 인자 모델은 이러한 차이를 정량적으로 반영하려는 시도다.

이 이론은 매우 정교하고 과학적이지만, 실제 현장에서 널리 사용되지는 않는다. 그 이유는 두 가지다. 첫째, 섬유 길이와 거칠기 같은 변수를 정확히 측정하기 어렵다. 둘째, 계산 과정이 복잡하고, 플레이트 마모나 운전 조건 변화가 C 인자에 큰 영향을 미치기 때문에 실시간 제어에 적용하기 어렵다. 따라서 C 인자 분석은 주로 연구 목적이나 리파이너 설계 비교에 활용되며, 일상적인 공정 제어에는 잘 사용되지 않는다.

이 두 이론은 SEL이나 SSL처럼 간단하지는 않지만, 리파이닝을 보다 깊이 이해하는 데 중요한 의미가 있다. Danforth 모델은 리파이닝을 충격의 수와 강도의 함수로 보는 관점을 제공하며, C 인자 분석은 섬유 특성까지 고려한 종합적 접근을 가능하게 한다. 그러나 계산의 복잡성과 측정의 어려움 때문에, 현장에서는 여전히 SEL과 SSL이 주로 사용된다. 그런데도, 이러한 이론들은 플레이트 설계, 신규 리파이너 개발, 고급 공정 최적화와 같은 분야에서 중요한 참고 자료로 활용될 수 있다[36].

## 6. 저강도 리파이닝과 고강도 리파이닝

### (1) 리파이닝 강도의 이해

제지공정에서 리파이닝에 소요되는 총에너지는 두 가지 핵심 요소에 의해 결정된다. 첫 번째는 충격의 횟수(N)로, 이는 섬유가 리파이닝 과정에서 몇 번의 충격을 받는지를 나타낸다[41, 42]. 예를 들어, 섬유 1 kg이 리파이너를 통과하는 동안 몇 번의 충격을 받는지를 의미한다. 두 번째는 각 충격의 강도(I)로, 이는 각 충격이 섬유에 얼마나 강한 힘을 가하는지를 나타낸다. 즉, 충격 강도는 섬유에 전달되는 에너지의 크기와 직결된다.

이 두 요소를 곱하면 섬유 단위 질량당 소요되는 총 리파이닝 에너지(E)가 되며, 이는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E = I \times N$$ 식 8

이 식을 통해, 섬유가 리파이닝 과정에서 얼마나 많은 충격을 받고, 각 충격이 얼

마나 강한지를 알면, 섬유 1 kg당 소모된 총 리파이닝 에너지를 계산할 수 있다. 그러나 중요한 점은, 총에너지가 같더라도 N과 I의 조합에 따라 리파이닝 결과는 크게 달라진다는 것이다[16]. 즉, 하나의 매개변수만으로는 리파이닝 효과를 충분히 설명할 수 없다[41].

예를 들어, 그림 04-26에서 보는 것처럼, 두 경우 모두 총 리파이닝 에너지가 동일($E_a = E_b$)하더라도, 충격 강도가 낮고 충격 횟수가 많은 경우($N_b$, $I_b$)는 섬유 표면과 내부에서 소섬유화가 활발히 일어나 종이의 강도 발현에 긍정적인 영향을 준다. 반면, 충격 강도가 높고 충격 횟수가 적은 경우($N_a$, $I_a$)는 섬유가 절단되어 섬유장이 짧아지고 미세분이 과도하게 발생해 종이 강도가 오히려 저하될 수 있다[43]. 이 차이는 리파이닝의 본질을 잘 보여준다. 리파이닝은 단순히 에너지를 투입하는 과정이 아니라, 에너지를 어떤 방식으로 전달하느냐가 중요하다. 동일한 에너지를 사용하더라도, 낮은 강도의 충격을 여러 번 주는 방식은 섬유의 구조를 유지하면서 표면을 부드럽게 풀어내는 데 유리하다. 반대로, 높은 강도의 충격을 적게 주는 방식은 섬유를 절단해 길이를 줄이고, 미세분을 증가시켜 종이의 강도 발현을 방해할 수 있다.

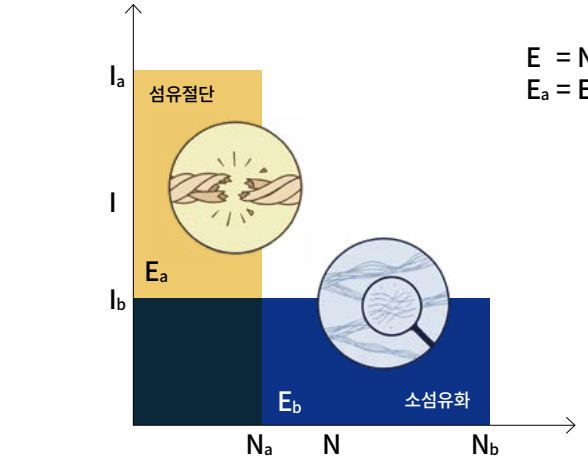
따라서, 저강도 리파이닝(low-intensity refining)은 작은 충격 강도로 많은 충격을 가하는 방식으로, 섬유 절단보다는 섬유 표면과 내부의 소섬유화를 촉진한다. 이는 주로 인장강도, 결합력, 표면 특성을 개선하는 데 유리하다. 반면, 고강도 리파이닝(high-intensity refining)은 큰 충격 강도로 적은 수의 충격을 가하는 방식으로, 섬유 절단이 많이 발생해 섬유장이 짧아지고 미세분이 증가한다. 이는 벌크 감소, 강도 저하, 탈수성 악화 등 부정적인 영향을 줄 수 있다.

결론적으로, 총 리파이닝 에너지가 같더라도 결과는 N과 I의 조합에 따라 완전히 달라질 수 있다. 따라서 제지공정에서는 단순히 에너지 투입량만을 관리하는 것이 아니라, 리파이닝 강도와 충격 횟수의 균형을 조절하는 전략이 필요하다. 이는 플레이트 패턴, 회전 속도, 간격 조정, 지료 유량 등 운전 조건을 통해 제어할 수 있다[39, 44].

### (2) 리파이너 플레이트와 리파이닝 강도와의 관계

리파이닝 강도는 플레이트 패턴과 밀접하게 연결되어 있다. 따라서 펄프의 종류와 목표로 하는 종이의 물성에 따라 적절한 패턴을 선택하는 것이 매우 중요하다.

그림 04-26. 리파이닝 에너지에 대한 충격의 세기와 충격 빈도와의 관계




출처: Kerekes, R.J., 1990. Characterization of pulp refiners by a C-factor. Nordic Pulp & Paper Research Journal, 5(1), 3–8.

만약 펄프가 부드럽게 리파이닝되는 경우에는 섬유 변형이 충분히 일어나지 않기 때문에 플레이트 패턴의 차이가 크게 드러나지 않는다. 그러나 포장지용 미표백 크라프트 펄프처럼 높은 강도가 요구되는 제품을 제조할 때는 상황이 달라진다. 이 경우 초기 인열강도를 충분히 확보하기 위해서는 그림 04-27(a)에서 볼 수 있는 침엽수 펄프용 고강도 패턴 대신, SEL이 약 1.5~2.0 W·s/m 수준으로 낮은 패턴을 선택하는 것이 바람직하다. 이는 섬유 절단을 줄이고 소섬유화를 촉진하여 섬유 간 결합력을 강화하기 위함이다[35].

활엽수 펄프나 기계펄프의 후처리 리파이닝에서는 저강도 리파이닝이 특히 중요하다. 과거에는 플레이트 제조 기술의 한계로 인해 SEL의 하한이 0.6~0.8 W·s/m 수준이었으나, 최근 기술 발전으로 0.2~0.6 W·s/m의 초저강도 리파이닝도 가능해졌다[39]. 이러한 저강도 리파이닝을 구현하기 위해서는 SEL 계산식(식 3)에 따라 바의 개수를 늘려야 하며, 이를 위해 그림 04-27(b)에서 보듯 바와 홈의 폭을 줄이는 방식이 사용된다. 바 폭이 좁아지고 바 개수가 많아지면 동일한 회전속도에서도 절단 모서리 길이가 증가하여 충격 강도가 낮아지고, 결과적으로 저강도 리파이닝이 가능해진다[45].

침엽수 펄프는 과거에는 낮은 리파이닝 강도가 필요 없고 오히려 에너지 소모가

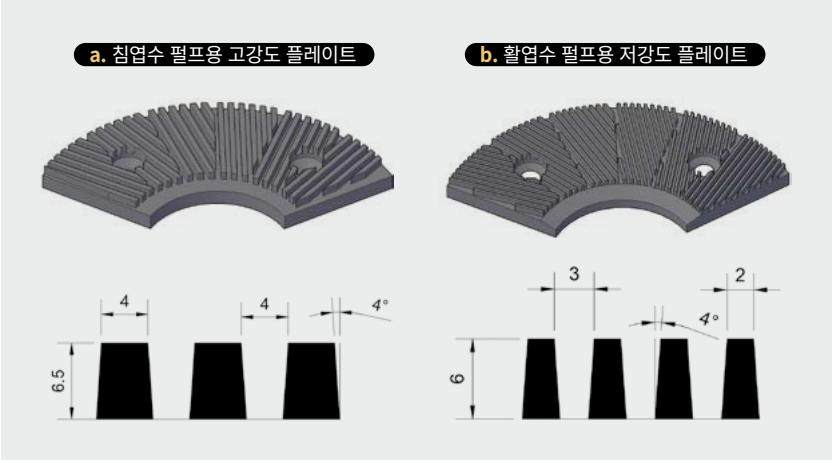
크다고 여겨졌으나, 최근에는 종이의 인열강도와 내구성을 높이기 위해 저강도 리파이닝을 선호하는 공장이 늘고 있다. 현재 많은 공장에서는 SEL을 2.0~4.0 W·s/m 범위에서 유지하지만, 리파이닝 강도를 낮추면 펄프 품질이 대부분 개선되는 경향을 보인다.

활엽수 펄프의 경우 낮은 리파이닝 강도는 동일한 강도 수준에서 벌크와 불투명도를 높이는 데 유리하다. 특히 활엽수 펄프에서는 리파이닝 강도가 너무 낮아 품질에 부정적 영향을 준다는 명확한 증거가 없으며, SEL을 0.6~1.0 W·s/m로 유지하는 것이 일반적이다. 최근에는 바 개수를 더 늘려 SEL을 0.2 W·s/m 이하로 낮춘 초저강도 리파이닝도 가능해졌으며, 이러한 방식은 동일한 품질을 달성하는 데 필요한 에너지를 줄이는 효과도 있다[46].

그림 04-27은 고강도 리파이닝용 플레이트와 저강도 리파이닝용 플레이트의 구조 차이를 보여준다. 그림 04-27(a)의 침엽수 펄프용 고강도 패턴은 바 폭이 약 4 mm로 넓고 바 개수가 적어 SEL 값이 높다. 반면 그림 04-27(b) 활엽수 펄프용 저강도 패턴은 바 폭이 2~3 mm로 좁고 바 개수가 많아 동일한 회전 속도에서 더 많은 절단 모서리를 제공한다. 이러한 구조적 차이는 리파이닝 강도와 섬유 처리 방식에 직접적인 영향을 미친다.

리파이닝 강도는 화학펄프 뿐 아니라 모든 펄프의 리파이닝에서 매우 중요한 요소이며, 원료 특성에 맞는 강도를 선택하지 않으면 종이 품질에 심각한 문제가 발생할 수 있다. 예를 들어, 긴 침엽수 섬유를 지나치게 낮은 강도로 리파이닝하면

**그림 04-27.** 고강도 리파이닝용 플레이트와 저강도 리파이닝용 플레이트의 구조와 치수 비교



섬유 절단이 충분히 이루어지지 않아 섬유 표면의 소섬유화가 부족해지고, 결과적으로 섬유 간 결합력이 약해져 종이의 인장강도가 낮아질 수 있다[42]. 반대로, 너무 높은 강도를 적용하면 섬유 절단이 과도하게 발생해 섬유장이 짧아지고, 미세분(fines)이 많이 생성되어 탈수성이 나빠지며, 종이의 강도 발현에도 부정적인 영향을 준다[47].

그림 04-28은 동일한 펄프에 대해 고강도 리파이닝과 저강도 리파이닝을 적용했을 때 나타나는 물성 변화를 보여준다. 저강도 리파이닝은 충격 강도가 낮고 충격 횟수가 많기 때문에 섬유 절단보다는 섬유 표면과 내부에서 소섬유화를 촉진한다. 소섬유화는 섬유 표면적을 증가시켜 섬유 간 수소결합을 강화하므로, 종이의 인장강도, 평활도, 투기 저항성을 개선하는 데 기여한다[38]. 그러나 섬유 간 결합이 강화되면 종이의 벌크는 감소하는 경향이 있다. 즉, 저강도 리파이닝은 강도 발현에는 유리하지만, 벌크 유지에는 불리할 수 있다.

반면, 고강도 리파이닝은 충격 강도가 높고 충격 횟수가 적기 때문에 섬유 절단이 많이 발생한다. 이로 인해 섬유장이 짧아지고, 미세분이 과도하게 생성되며, 결과적으로 인장강도와 인열강도가 낮아진다. 특히 그림 04-28에서 볼 수 있듯이, 리파이닝 에너지가 증가할수록 고강도 리파이닝에서는 인열강도가 더 빠르게 감소하는 경향을 보인다. 이는 고강도 리파이닝이 섬유의 구조를 손상시키고, 섬유 간 결합을 약화시키기 때문이다[43].

결론적으로, 동일한 총 리파이닝 에너지를 투입하더라도, 에너지를 전달하는 방식($N \times I$)에 따라 결과는 크게 달라진다. 저강도 리파이닝은 동일한 에너지 범위에서 더 높은 인장강도와 인열강도를 제공하며, 섬유 절단을 최소화하면서 소섬유화를 촉진한다. 반대로, 고강도 리파이닝은 강도 발현이 낮고, 에너지 효율도 떨어진다. 따라서 제지공정에서는 단순히 에너지 투입량만 관리하는 것이 아니라, 리파이닝 강도와 충격 횟수의 균형을 조절하는 전략이 필요하다. 이를 위해 플레이트 패턴, 회전 속도, 간격, 지료 유량 등 운전 조건을 종합적으로 제어해야 한다[44].

최근 제지공정에서는 섬유장이 짧은 활엽수 펄프나 재활용 섬유(OCC)를 리파이닝할 때 섬유 절단을 최소화하는 것이 매우 중요한 과제로 떠올랐다. 섬유장이 이미 짧은 원료에서 추가적인 절단이 발생하면, 종이의 인장강도와 인열강도가 급격히 저하되고, 미세분(fines)이 과도하게 생성되어 탈수성 악화, 에너지 소비 증가, 품질 불균일 등의 문제가 발생하기 때문이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 개발된 것이 바로 초저강도 리파이너 플레이트(ultra-low intensity refiner plate)이다.

그림 04-28. 저강도 리파이닝과 고강도 리파이닝에 따른 종이 물성 비교

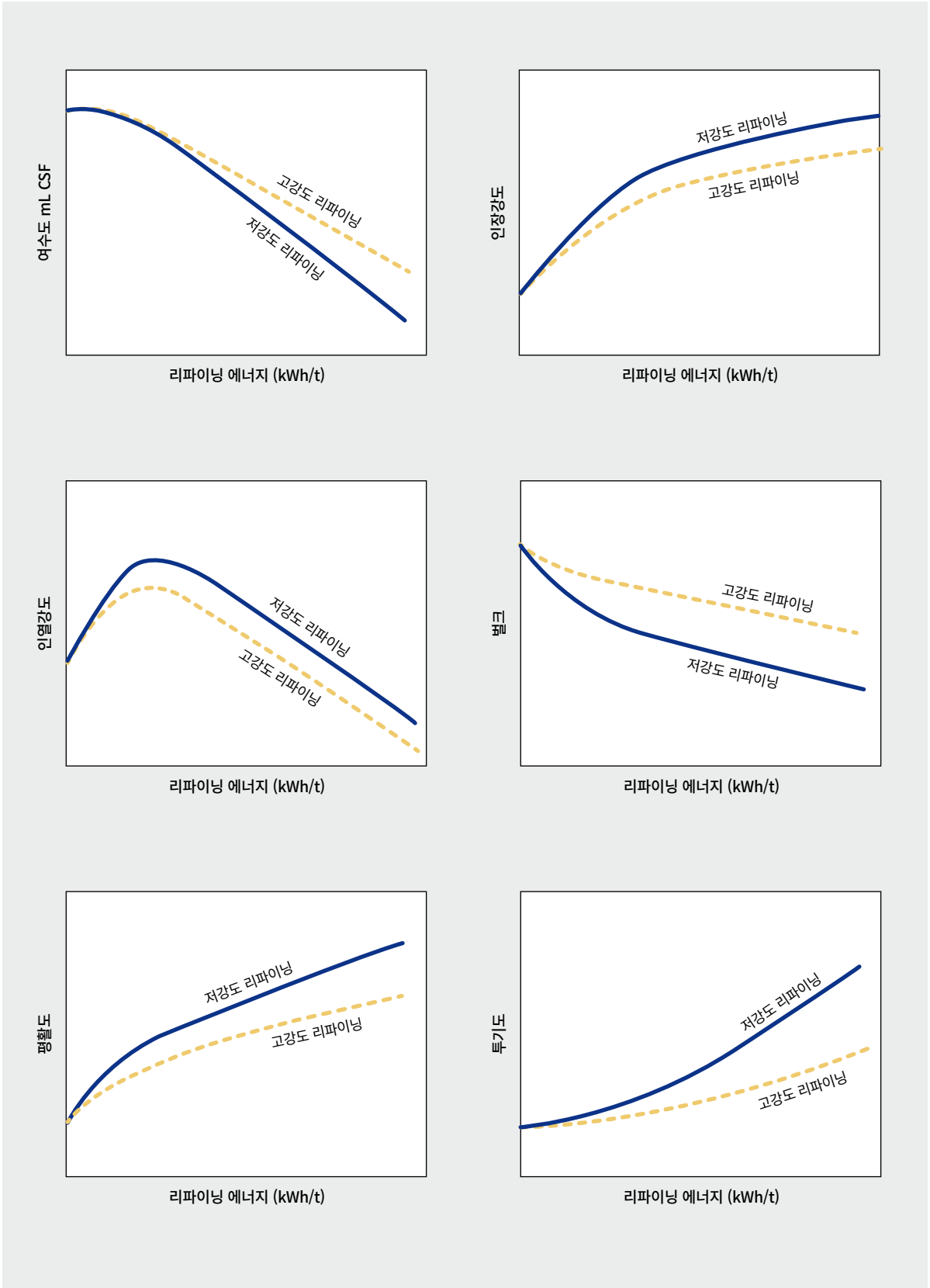


그림 04-29는 이러한 초저강도 플레이트의 구조적 특징을 보여준다. 기존 플레이트가 바 폭 2~3 mm 수준인 반면, 초저강도 플레이트는 바 폭을 0.8~1 mm로 줄이고 바 개수를 크게 늘린다. 이 설계는 파인 바(fine bar) 또는 울트라 파인 바(ultra-fine bar)라고 불리며, 바가 매우 촘촘하게 배열되어 있다. 바 폭이 좁아지고 개수가 많아지면 동일한 회전 속도에서도 절단 모서리 길이가 크게 증가한다. 그 결과, 각 바에 분산되는 에너지가 매우 작아져 충격 강도가 낮아지고, SEL 값은 0.1~0.5 W·s/m 수준으로 떨어진다[25, 26, 32, 45]. 이는 기존 저강도 플레이트보다 훨씬 낮은 값으로, 섬유 절단을 최소화하면서 소섬유화를 촉진하는 데 이상적이다.

초저강도 리파이너 플레이트는 다음과 같은 중요한 장점을 제공한다. 첫째, 섬유 절단을 최소화하고 소섬유화를 극대화한다. 바 폭이 좁고 바 개수가 많기 때문에 섬유는 강한 충격을 받지 않고 부드럽게 처리되며, 이로 인해 섬유 절단은 최소화되고 대신 섬유 표면과 내부에서 소섬유화가 활발히 일어난다. 소섬유화는 섬유 표면적을 증가시켜 섬유 간 수소결합을 강화하므로, 종이의 인장강도와 결합력이

**그림 04-29.** 초저강도 리파이닝용 파인 바 플레이트와 치수

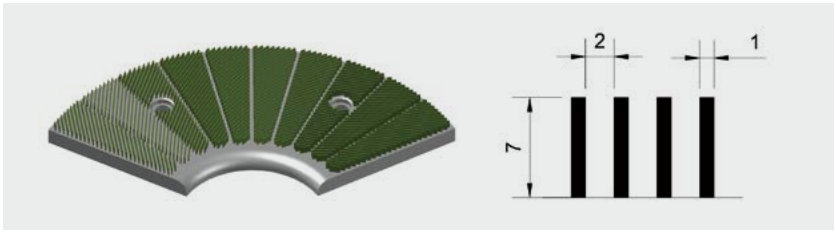
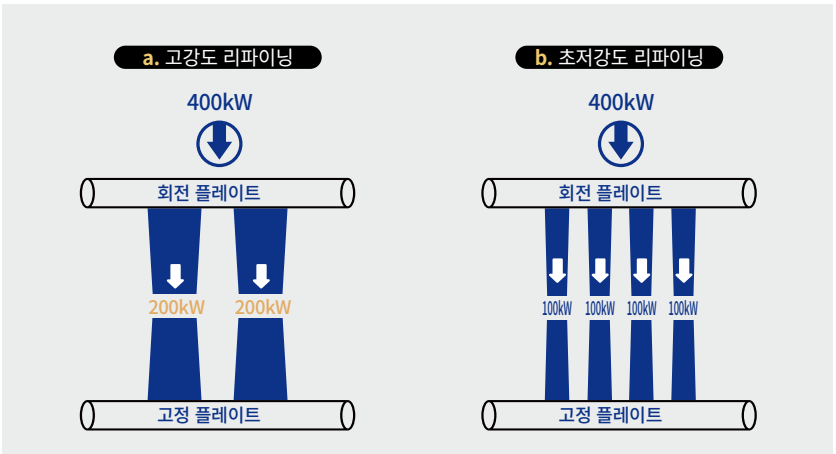



**그림 04-30.** 저강도 리파이닝과 초저강도 리파이닝의 에너지 분산 개념도



5~10% 향상된다[25, 32, 46]. 둘째, 섬유벽 붕괴가 억제되기 때문에 동일한 여수도에서 더 높은 벌크를 유지할 수 있으며, 이는 인쇄용지나 고급 특수지에서 매우 중요한 특성이다. 셋째, 동일한 품질을 달성하는 데 필요한 에너지를 10~15% 절감할 수 있다. 이는 바 개수가 많아 충격이 분산되고, 섬유 절단으로 인한 불필요한 에너지 소모가 줄어들기 때문이다[2, 25]. 넷째, 그림 04-30에서 보듯 동일한 크기의 플레이트 상에 형성된 바 개수가 많아 각 바에 가해지는 에너지가 균등하게 분산되어 플레이트의 마모 속도가 느려져 교체 주기가 길어지고, 유지보수 비용이 절감된다. 마지막으로, 섬유 특성이 균일해져 초지기의 안정성이 향상되고, 지료 흐름이 균일해져 생산성이 높아진다[26, 32].

활엽수 펄프나 재활용 섬유는 섬유장이 짧고 섬유벽이 얇아 충격에 취약하다. 기존의 고강도 또는 일반 저강도 리파이닝에서는 섬유 절단이 쉽게 발생해 품질 저하로 이어진다. 초저강도 리파이너 플레이트는 이러한 문제를 해결하고, 고품질 인쇄용지, 특수지, 고급 포장지 등에서 요구되는 높은 강도와 벌크를 동시에 만족시킬 수 있는 핵심 기술로 자리 잡고 있다.

## 7. 리파이너의 운전

### (1) 리파이닝 시스템의 개요

리파이닝 시스템을 설계할 때는 최종 종이 제품의 종류, 사용되는 주원료(침엽수, 활엽수, 재활용 섬유 등), 처리 용량을 종합적으로 고려해야 한다. 이러한 요소에 따라 리파이닝 조건이 결정되는데, 여기에는 리파이닝 농도, 플레이트 바 패턴, 순 에너지 요구량, 리파이닝 단계 수, 그리고 각 단계에 필요한 리파이너의 대수가 포함된다. 이후 리파이너의 크기, 회전 속도, 동력 용량을 선택하는데, 이는 목표로 하는 생산량과 리파이닝 강도, 에너지 효율을 충족해야 한다.

펄프의 리파이닝 거동은 원료 특성에 따라 크게 달라지므로, 시스템 설계 시 기존에 사용 중인 펄프를 기준으로 설정하는 것이 일반적이다. 그러나 새로운 펄프를 도입할 경우 반드시 실험실 고해 시험이나 파일럿 리파이닝 테스트를 통해 적정 조건을 확인해야 한다. 이때 참고할 수 있는 주요 지표는 섬유장, 섬유 조도, 표백 여부, 백색도, 펄프 점도, 실험실 고해 결과 등이다[32].

**리파이닝 시스템은 세 가지 방식으로 구분된다**

1. 독립 리파이닝
2. 혼합 리파이닝
3. 절충식 리파이닝

리파이닝 시스템은 크게 독립 리파이닝, 혼합 리파이닝, 절충식 리파이닝의 세 가지 방식으로 구분된다. 각 방식은 원료 특성, 제품 요구 물성, 설비 규모에 따라 선택되며, 에너지 효율과 품질에 큰 영향을 미친다.

첫 번째는 원료별 독립 리파이닝 시스템이다(그림 04-31). 이 방식은 침엽수 펄프, 활엽수 펄프, 재활용 섬유 등 원료 종류별로 별도의 리파이너 라인을 운영한다. 이러한 시스템의 가장 큰 장점은 각 원료의 특성에 맞춰 리파이닝 조건을 개별적으로 설정할 수 있다는 점이다. 예를 들어, 침엽수 펄프는 섬유장이 길고 강도가 높기 때문에 상대적으로 강한 리파이닝이 필요하다. 반면, 활엽수 펄프나 재생펄프는 강도 보존과 벌크와 불투명도를 유지하는 것이 중요하므로 저강도 리파이닝이 적합하다[27, 28]. 이처럼 원료별로 최적 조건을 적용할 수 있기 때문에, 최소한의 에너지로 최대의 강도 발현을 달성할 수 있다. 그러나 이 방식은 설비 투자 비용이 크고, 라인별 운전 관리가 복잡하다는 단점이 있다.

두 번째는 혼합 리파이닝 시스템이다(그림 04-32). 이 방식은 리파이닝 전에 서로 다른 펄프를 일정 비율로 혼합한 후, 하나의 리파이너 라인에서 처리한다. 혼합 리파이닝의 가장 큰 장점은 섬유 보호 효과다. 예를 들어, 짧은 섬유를 긴 섬유와 함께 리파이닝하면, 긴 섬유가 짧은 섬유를 보호해 섬유장이 과도하게 짧아지는 것을 방지할 수 있다[48]. 이는 재활용 섬유나 활엽수 펄프를 사용할 때 특히 유리하다. 그러나 혼합 리파이닝은 개별 원료 특성에 맞춘 최적 조건을 적용하기 어렵다는 한계가 있다. 침엽수는 강한 리파이닝이 필요하지만 활엽수는 약한 리파이닝이 필요하기 때문에, 두 원료를 혼합하면 어느 한쪽에 맞춘 조건이 다른 쪽에는 불리하게 작용할 수 있다.

세 번째는 절충식 리파이닝 시스템이다(그림 04-33). 현대 제지공장에서는 두 방식의 장점을 결합한 절충식 시스템을 많이 사용한다. 이 방식은 원료별로 1차 리파이닝을 가볍게 실시한 후, 블렌딩 체스트에서 혼합하고, 필요 시 혼합 지료를 대상으로 추가 리파이닝을 수행한다. 이렇게 하면 원료별 특성에 맞는 초기 리파이닝을 적용하면서도, 혼합 후 균질화를 통해 최종 품질을 안정적으로 확보할 수 있다. 절충식 시스템은 특히 최신 대형 초지기를 사용하는 공장에서 선호되며, 소형 설비를 갖춘 공장에서는 주로 혼합 리파이닝 방식이 사용된다.

리파이닝 단계의 수는 목표 여수도와 지료 처리량에 따라 달라진다. 예를 들어, 화장지와 같은 위생용지는 가볍게 리파이닝하면 되므로 한 단계로 충분하다. 반면, 글라신지(glassine)처럼 매우 치밀하고 투명한 종이를 만들기 위해서는 5~6

그림 04-31. 원료 종류별 독립 리파이닝 시스템

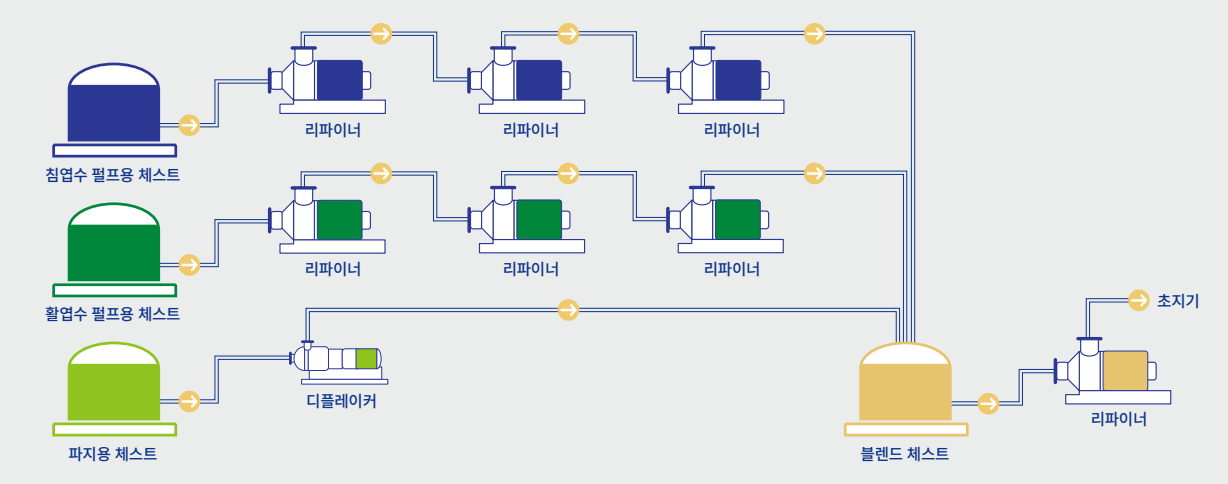



그림 04-32. 혼합 리파이닝 시스템

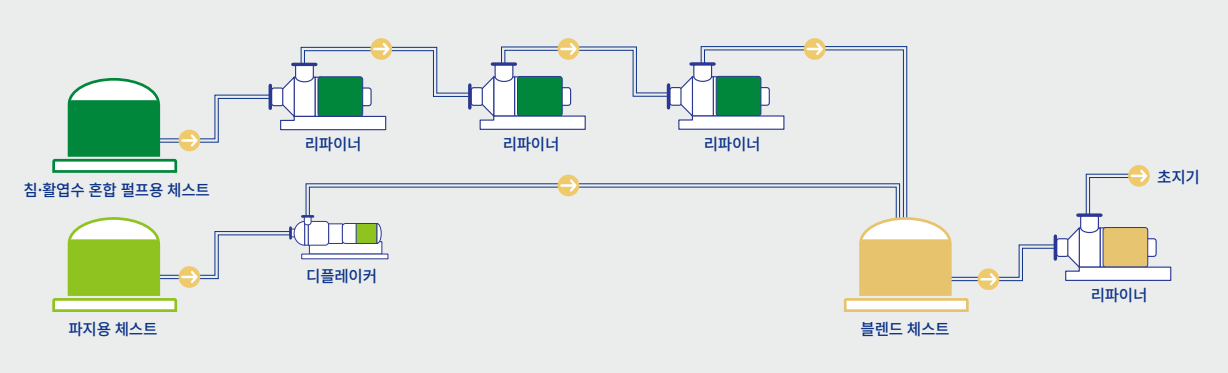
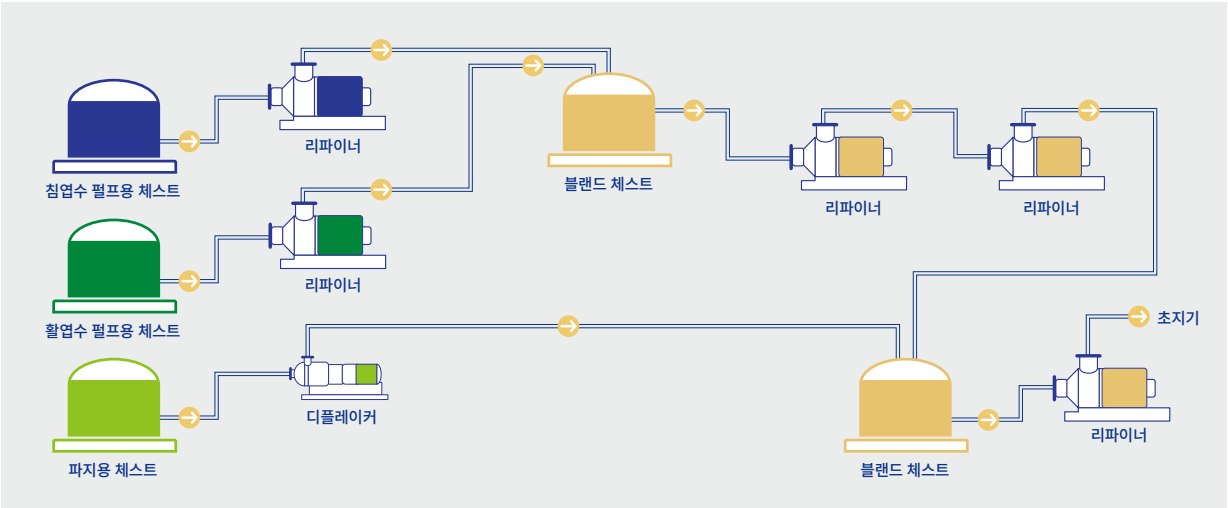



그림 04-33. 절충식 리파이닝 시스템



단계의 리파이닝이 필요하다. 단계가 많아질수록 에너지 소비는 증가하지만, 섬유 표면 처리와 소섬유화가 정밀하게 이루어져 고품질 종이를 생산할 수 있다.

최신 대형 설비를 갖춘 제지공장에서는 일반적으로 원료별로 리파이닝을 별도로 실시한 후 블렌딩 체스트로 이송하는 방식을 사용한다. 반면, 오래된 소형 설비를 갖춘 공장에서는 펄프를 종류별로 미리 혼합한 후 리파이닝하는 시스템을 주로 사용한다. 주요 리파이닝 시스템과 관계없이, 블렌딩 체스트 후에 혼합 지료를 지료 도입부로 이송하기 전 가볍게 리파이닝 처리를 하는 경우가 많다. 이는 혼합 지료의 균질화를 통해 최종 여수도를 조절하기 위해서 이다.

다층판지 제조는 단일 지종을 사용하는 일반 종이의 제조보다 훨씬 복잡한 공정이다. 그 이유는 상층(top ply), 중간층(filler ply), 하층(bottom ply) 등 각 층이 서로 다른 기능을 수행하기 때문이다. 각 층은 요구되는 물성이 다르므로 동일한 리파이닝 조건을 적용할 수 없으며, 그림 04-34에서 볼 수 있듯이 층별로 별도의 리파이너 라인을 갖춘 시스템이 필요하다[49].

예를 들어, 상부 플라이는 인쇄 품질을 좌우하는 핵심 층이다. 인쇄적성을 높이려면 표면이 매끄럽고 강도가 충분해야 하므로, 주로 표백 화학펄프를 사용한다. 이 층에서는 섬유 절단을 최소화하면서 소섬유화를 촉진하는 저강도 리파이닝이 적합하다. 이러한 조건은 표면 평활도와 인쇄 품질을 확보하는 데 필수적이다[50].

반면, 중간층은 판지의 두께와 강도를 조절하는 역할을 한다. 주로 미표백 화학펄프나 재활용 섬유가 사용되며, 지나친 리파이닝은 벌크를 크게 감소시킬 수 있다. 따라서 중간층은 최소한의 리파이닝만 적용해 섬유 절단을 억제하고 벌크를 유지하는 것이 핵심이다[51]. 최근 연구에서는 중간층에 기계펄프(BCTMP)와 소량의 정제된 화학펄프를 혼합해 내부 결합을 강화하면서 벌크를 유지하는 전략이 제안되고 있다[52].

하부 플라이는 판지의 내구성과 압축 강도를 담당한다. 상대적으로 높은 강도의 리파이닝이 필요하지만, 지나친 고강도 리파이닝은 섬유 절단과 미세분 증가로 인해 탈수성을 악화시킬 수 있다. 따라서 적절한 강도 범위 내에서 운전해야 하며, 경우에 따라 재활용 섬유를 혼합해 비용 절감과 강도 균형을 동시에 달성한다[46].

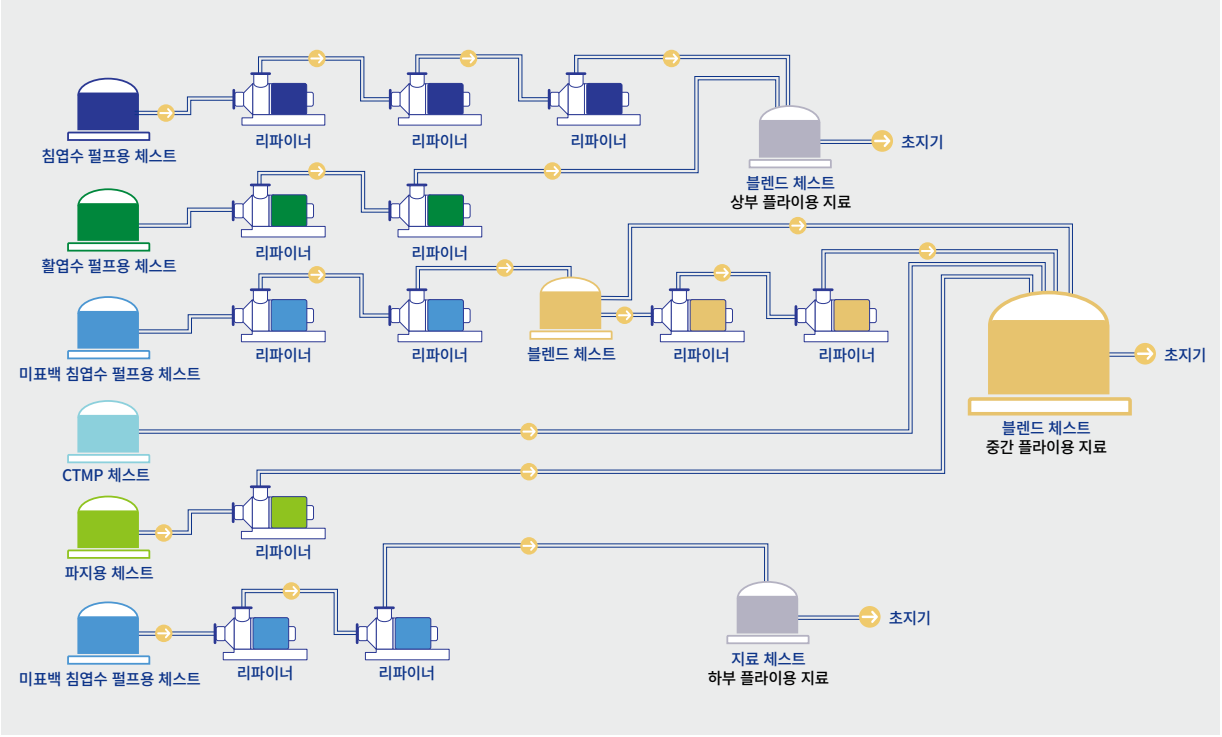
다층판지용 리파이닝 시스템은 각 층별로 별도의 리파이너 라인을 갖추고, 원료 특성에 맞는 조건을 적용한다. 예를 들어, 상부 플라이 라인은 표백 펄프용 저강도 리파이너, 중간층 라인은 벌크 유지용 최소 리파이너, 하부 플라이 라인은 강도 확보용 고강도 리파이너로 구성된다. 또한, 종이자원(재활용 섬유) 라인을 별

도로 운영해 중간층이나 하부층에 혼합하는 경우도 많다[49].

리파이너 배치는 일반적으로 직렬식으로 구성되며, 필요 시 병렬식으로 처리량을 조절한다. 블렌딩 체스트를 통해 각 층의 지료를 균질화한 후, 초지기에 공급하기 전에 추가 리파이닝을 실시해 최종 여수도와 섬유 특성을 조정한다. 이러한 설계는 각 층의 기능을 최적화하면서 전체 판지의 품질을 균형 있게 유지하는 것을 목표로 한다[6].

결론적으로, 그림 04-34는 다층판지 제조에서 각 층별 리파이너 라인이 어떻게 배치되는지를 보여준다. 상부 플라이 라인은 표백 펄프를 위한 저강도 리파이너로 구성되어 표면 평활도를 확보한다. 중간층 라인은 벌크 유지용 최소 리파이너를 사용하며, 하부 플라이 라인은 강도 확보를 위해 고강도 리파이너를 적용한다. 각 라인은 블렌딩 체스트와 연결되어 최종 혼합과 균질화를 거친 후 초지기에 공급된다. 이러한 구조는 각 층의 특성을 유지하면서 전체 판지의 강도, 벌크, 인쇄적성을 동시에 만족시키기 위한 것이다. 이 시스템의 설계 목적은 각 층의 기능을 최적화하면서 전체 판지의 품질을 균형 있게 유지하는 것이다. 이를 위해 리파이

**그림 04-34.** 다층판지용 리파이닝 시스템



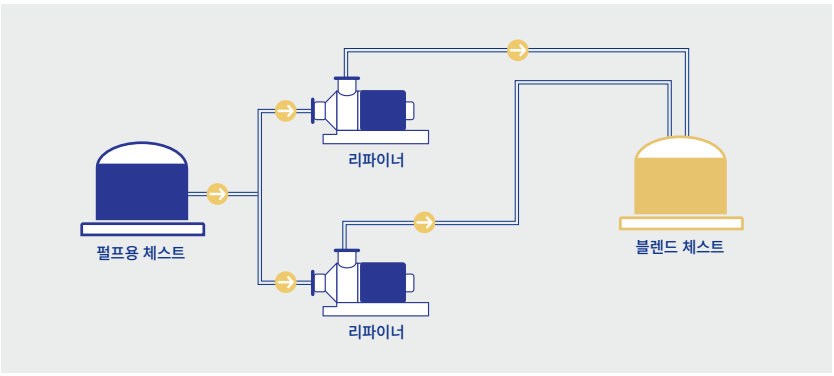
너의 배치는 일반적으로 직렬식으로 구성되며, 필요 시 병렬식으로 처리량을 조절한다. 또한, 블렌딩 체스트를 통해 각 층의 지료를 균질화한 후, 초지기에 공급하기 전에 추가 리파이닝을 실시해 최종 여수도와 섬유 특성을 조정한다.

앞서 그림 04-31~34에서 살펴본 리파이닝 시스템은 대부분 직렬식 배치 방식이다. 직렬식 시스템에서는 펄프 지료가 첫 번째 리파이너를 통과한 후, 두 번째, 세 번째 리파이너를 순차적으로 거치면서 점진적으로 리파이닝이 진행된다. 이 방식은 섬유에 점진적이고 균일한 처리를 가할 수 있어 고품질 종이 제조에 적합하다. 특히 인쇄용지나 특수지처럼 표면 품질과 강도가 중요한 제품에서는 직렬식 리파이닝이 안정적인 결과를 제공한다[6]. 그러나 직렬식은 각 리파이너가 동일한 지료를 순차적으로 처리하기 때문에 처리량이 제한적이고, 한 대의 리파이너에 문제가 생기면 전체 라인이 중단되는 단점이 있다.

이와 달리, 그림 04-35에서 보는 병렬식 리파이닝 시스템은 동일한 펄프 지료를 여러 대의 리파이너로 분산 처리한 후 다시 혼합하는 방식이다. 즉, 하나의 지료 흐름을 두 개 이상으로 나누어 각각의 리파이너에서 동시에 리파이닝을 수행하고, 이후 블렌딩 체스트에서 균질하게 혼합한다. 이 방식은 처리량을 유연하게 조절할 수 있다는 점에서 큰 장점을 가진다. 예를 들어, 생산량이 증가하면 리파이너를 추가로 가동해 처리량을 늘릴 수 있고, 생산량이 줄면 일부 리파이너를 정지시켜 에너지를 절감할 수 있다.

병렬식 시스템의 또 다른 장점은 리파이너 부하 분산이다. 동일한 처리량을 직렬식에서 한 대의 리파이너가 담당할 경우, 높은 부하가 걸려 장비 마모가 빠르고 유지보수 비용이 증가한다. 반면 병렬식에서는 부하가 여러 대에 분산되므로 각

**그림 04-35.** 병렬식 리파이닝 시스템



리파이너의 마모 속도가 느려지고, 플레이트 교체 주기가 길어진다. 또한, 한 대의 리파이너에 문제가 발생하더라도 나머지 리파이너가 계속 가동될 수 있어 시스템 안정성이 높아진다.

그러나 병렬식 시스템은 리파이닝 강도를 균일하게 유지하기 위해 정밀한 유량 제어가 필요하다. 각 리파이너에 공급되는 지료의 유량과 농도가 동일하지 않으면, 리파이닝 강도에 차이가 발생해 품질 불균일 문제가 생길 수 있다. 따라서 병렬식 시스템에는 일반적으로 자동 유량 제어 장치와 압력 균형 시스템이 함께 설치된다.

병렬식 리파이닝은 특히 대형 초지기를 사용하는 공장에서 많이 채택된다. 대량의 펄프를 빠르게 처리해야 하는 경우, 직렬식만으로는 충분한 처리량을 확보하기 어렵기 때문이다. 또한, 병렬식은 에너지 효율 측면에서도 유리하다. 동일한 처리량을 직렬식으로 달성하려면 리파이너를 고속으로 운전해야 하지만, 병렬식에서는 각 리파이너를 상대적으로 낮은 속도로 운전할 수 있어 에너지 소비를 줄일 수 있다.

### (2) 리파이닝 변수

#### 1) 지료 농도와 리파이닝 효과

리파이닝 과정에서 지료 농도는 리파이닝 품질과 에너지 효율에 직접적인 영향을 미치는 핵심 변수이다. 농도는 플레이트의 바 패턴과 밀접하게 연관되어 있으며, 두 요소를 함께 고려해야 최적의 리파이닝 결과를 얻을 수 있다[6, 42].

일반적으로, 침엽수 펄프용 플레이트는 홈이 넓고 바 간격이 큰 성긴 패턴을 갖는다. 이러한 패턴은 섬유장이 길고 강도가 높은 침엽수 펄프를 효과적으로 처리하기 위해 설계되었으며, 상대적으로 높은 지료 농도에서 안정적으로 운전된다. 반면, 활엽수 펄프용 플레이트는 홈이 좁고 바 간격이 작은 조밀한 패턴을 갖는데, 이는 섬유장이 짧고 표면적이 넓은 활엽수 펄프의 특성에 맞춰 설계된 것이다. 따라서 활엽수 펄프는 침엽수 펄프보다 낮은 농도에서 운전할 경우, 섬유 뭉치가 풀리면서 홈 내에서의 흐름이 불안정해질 수 있다[6, 25, 32].

저농도 리파이닝에서 일반적으로 적용되는 지료 농도는 3.0~5.0% 범위다. 구체적으로는, 침엽수 펄프는 3.5~4.5%, 활엽수 펄프는 4.5~5.0%, 그리고 리파이닝

된 펄프 지료의 균질화를 위해 적용되는 마지막 단계에서는 3.0~3.5% 정도가 적합하다[53]. 이러한 범위를 벗어나면 리파이닝 품질이 저하되고, 플레이트 마모가 가속화될 수 있다.

예를 들어, 침엽수 펄프를 리파이닝할 때 지료 농도가 3.0% 미만으로 낮아지면, 섬유가 홈 내에서 충분히 분산되지 못하고 바 모서리에 강하게 부딪혀 섬유 절단이 과도하게 발생한다. 반대로, 활엽수 펄프를 낮은 농도에서 리파이닝하면, 섬유 뭉치가 풀리면서 홈 내에서 소용돌이 흐름이 약해지고, 섬유가 바 모서리와 접촉하는 빈도가 줄어들어 리파이닝 효과가 떨어진다. 이 경우, 섬유가 홈을 따라 미끄러지듯 이동하면서 바의 마모가 빨라지고, 플레이트 수명이 단축된다[44].

#### 가. 플레이트 패턴과 농도의 상호작용

플레이트의 바 패턴은 펄프 섬유의 종류에 맞게 설계되어야 하지만, 최근에는 원료의 다양화로 인해 항상 정해진 패턴을 사용할 수 있는 것은 아니다. 이 경우, 예비 실험을 통해 해당 플레이트 패턴에 적합한 지료 농도를 확인하는 것이 중요하다. 예를 들어, 원래 활엽수용으로 설계된 조밀한 패턴을 침엽수 펄프에 사용할 경우, 농도를 낮추면 섬유 절단이 심해지고, 농도를 높이면 홈 막힘 현상이 발생할 수 있다. 따라서, 패턴과 농도의 조합을 최적화하는 것이 리파이닝 품질을 좌우한다[44].

지료 농도가 높아지면 홈 내에서의 소용돌이 흐름이 느려지고, 섬유 뭉치가 응집되는 경향이 강해진다. 이때는 섬유가 바 모서리와 접촉하는 빈도가 줄어들어 리파이닝 효율이 떨어지므로, 홈이 넓은 성긴 패턴이 필요하다. 반대로, 농도가 낮으면 섬유가 홈 내에서 자유롭게 움직이지만, 지나치게 낮으면 섬유 절단이 심해지고, 바 마모가 가속화된다.

#### 나. 현장 적용 시 주의사항

리파이닝 공정에서 지료 농도와 플레이트 패턴의 조합은 매우 중요한 요소이며, 이 균형이 맞지 않으면 다양한 문제가 발생할 수 있다. 예를 들어, 특정 바 패턴에서 적정 농도를 초과하면 플레이트 홈에 섬유가 쌓여 막힘 현상이 발생하고, 이로 인해 섬유가 충분히 처리되지 않아 리파이닝 효과가 떨어진다. 반대로, 지료 농도가 지나치게 낮으면 섬유가 바 모서리와 강하게 충돌해 섬유 절단이 과도하게 일어나고, 그 결과 미세분이 많이 발생하며 플레이트의 마모 속도도 빨라진다. 이로

인해 플레이트의 수명이 단축되고 유지보수 비용이 증가한다.
또한, 지료 농도가 너무 높으면 섬유가 홈 안에서 뭉치기 쉬워지고, 리파이닝 작용이 균일하게 이루어지지 않는다. 이 경우, 섬유 간 충격이 불규칙해져 품질이 불안정해지고, 에너지 효율도 크게 저하된다. 따라서, 플레이트 패턴과 지료 농도의 조합을 최적화하는 것은 리파이닝 품질을 확보하고 에너지 효율을 높이는 데 있어 핵심적인 전략이다.

### 2) 리파이닝 순 에너지의 효과

리파이닝 과정에서 섬유에 전달되는 단위 리파이닝 에너지(SRE)는 리파이닝의 양을 설명하는 가장 실용적인 지표 중 하나다. 순 에너지는 리파이너가 소비하는 총 동력에서 무부하 동력(idling power)을 제외한 값으로, 실제로 섬유에 전달된 에너지를 의미한다. 이 값은 리파이너 내부의 운전 조건을 평가하고, 리파이닝 강도를 조절하는 데 중요한 기준이 된다[6, 42].
그러나 단위 에너지만으로는 전체 공정의 효율을 완전히 설명할 수 없다. 총에너지 소비량 역시 고려해야 하는데, 이는 에너지 비용과 직결되기 때문이다. 리파이너를 한 번 통과할 때 섬유에 전달할 수 있는 순 에너지에는 한계가 있으며, 섬유의 리파이닝 저항성과 목표로 하는 리파이닝 수준에 따라 이 값은 크게 달라진다. 일반적으로 단위 리파이닝 에너지는 25~200 kWh/bdmt (bone-dry metric ton) 범위에서 운전되며, 더 많은 에너지가 필요할 경우 여러 대의 리파이너를 직렬로 배치해 단계별로 처리한다.
리파이닝 이론에서는 보통 총순에너지를 기준으로 리파이닝 결과를 예측하지만, 실제로는 에너지를 한 번에 많이 주는지, 여러 번 나눠 주는지에 따라 결과가 크게 달라진다. 동일한 총에너지를 투입하더라도, 한 번에 높은 에너지를 가하면 섬유 절단이 심해져 강도 발현이 낮아지고, 여러 단계로 나누어 낮은 에너지를 가하면 섬유 손상이 줄어 강도 발현이 좋아진다.
예를 들어, 크라프트 펄프는 종이의 강도를 결정하는 핵심 원료로, 섬유장이 길고 강도가 높다. 따라서 리파이닝 시 섬유 절단을 최소화하면서 소섬유화를 촉진해 인장강도를 높이는 것이 중요하다. 침엽수 크라프트 펄프는 활엽수보다 강도가 크기 때문에, 일반적으로 60~200 kWh/bdmt의 순 에너지가 필요하며, 활엽수 크라프트 펄프는 40~80 kWh/bdmt 수준에서 운전된다.

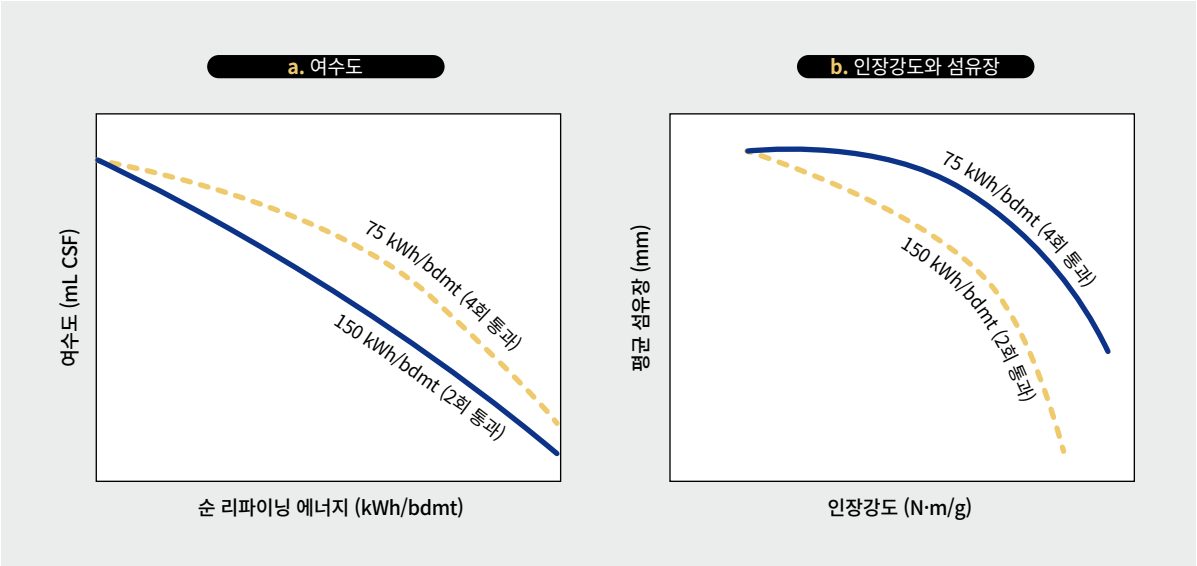
그림 04-36은 침엽수 크라프트 펄프를 리파이너로 처리할 때, 동일한 총에너지를 두 가지 방식으로 투입했을 때의 차이를 보여준다. 첫 번째 방식은 한 번에 150 kWh/bdmt를 투입해 2회 리파이닝하는 경우이고, 두 번째 방식은 75 kWh/bdmt를 투입해 4회 리파이닝하는 경우다.

- 여수도 변화(그림 04-36(a)): 높은 에너지를 한 번에 투입하면 여수도가 빠르게 감소한다. 이는 섬유 절단이 심해져 섬유 표면적이 급격히 증가하기 때문이다.
- 인장강도와 섬유장 변화(그림 04-36(b)): 낮은 에너지를 여러 번 나눠 투입한 경우, 섬유장이 더 잘 보존되고 인장강도가 더 높게 발현된다. 이는 섬유 손상이 줄어들고, 소섬유화가 균일하게 진행되기 때문이다[6, 54].

이 결과는 리파이닝 효율을 높이려면, 가능한 한 낮은 에너지를 여러 단계로 나눠 적용하는 것이 바람직하다는 점을 보여준다.

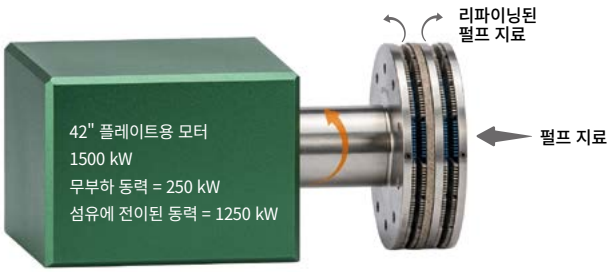
리파이너의 효율은 총리파이닝 동력에서 무부하 동력을 제외한 값으로 계산한다. 예를 들어, 42인치 플레이트가 장착된 더블 디스크 리파이너의 총 동력이 1,500 kW이고, 무부하 동력이 250 kW라면, 실제 섬유에 전달된 유효 동력은 1,250 kW다. 따라서 효율은 식 9와 같이 계산된다. 이는 투입된 에너지의 대부분이 섬유 리파이닝에 효과적으로 사용되고 있음을 의미한다[32].

**그림 04-36.** 리파이닝 순 에너지의 효과




출처: Lumiainen, J., 2000. Refining of chemical pulp. In: Paulapuro, H. (Ed.), Papermaking Part 1: Stock Preparation and Wet End. Papermaking Science and Technology Series, Book 8. Fapet Oy, Helsinki, pp. 86-122.

그림 04-37. 펄프 섬유에 전이된 리파이닝 동력의 효과




$$\text{리파이닝 효율}(\%) = \frac{1{,}250\ kW}{1{,}500\ kW} \times 100 = 83.3\% \quad \text{식 9}$$

리파이닝 품질을 평가하는 또 다른 지표는 여수도 강하이다[32]. 이는 리파이닝 전후의 여수도 차이를 소모된 에너지로 나눈 값으로, 다음 식 10으로 계산한다.

$$\text{여수도강하}(mL/(kW{\cdot}day/t)) = \frac{Freeness_{in} - Freeness_{out}}{Specific\ refining\ energy} \quad \text{식 10}$$

여기서 $Freeness_{in}$은 리파이닝 되기 전 펄프 지료의 여수도를, $Freeness_{out}$은 리파이닝 후 펄프 지료의 여수도를 의미한다. 예를 들어, 활엽수 펄프의 초기 여수도가 650 mL CSF이고, 리파이닝 후 500 mL CSF로 감소했으며, 소모된 순 에너지가 2 kW·day/t라면, 여수도 강하는 다음과 같다.

$$\text{여수도강하}(mL/(kW{\cdot}day/t)) = \frac{650 - 500}{2} = 75 mL/(kW{\cdot}day/t) \quad \text{식 11}$$

활엽수 펄프의 적정 여수도 강하 범위는 45~75 mL/(kW·day/t)이며, 침엽수 크라프트 펄프는 15~30 mL/(kW·day/t) 수준이다. 이 차이는 섬유 특성에서 기인한다. 침엽수 펄프는 섬유장이 길고 강도가 높아 동일한 에너지에서 여수도 변화가 적다. 반면 활엽수 펄프는 섬유장이 짧고 표면적이 넓어 리파이닝 효과가 빠르게 나타난다[53].

여수도 강하는 리파이닝 효율을 직관적으로 보여준다. 동일한 에너지를 투입했을 때 여수도 강하가 크면, 섬유 표면 처리와 소섬유화가 효과적으로 이루어졌음을 의미한다. 그러나 값이 지나치게 크면 섬유 절단이 과도하게 발생했을 가능성이 있으므로, 강도 발현과 함께 종합적으로 평가해야 한다.

### 3) 지료의 pH와 온도

펄프 지료의 pH는 섬유의 수분 흡수와 팽윤에 직접적인 영향을 미치며, 이는 리파이닝 과정의 효율성과 최종 종이의 물성에 결정적인 역할을 한다. 일반적으로 제지공정에서는 중성에 가까운 pH 범위가 가장 이상적이며, 산성 또는 알칼리성이 지나치게 강할 경우 여러 가지 문제가 발생할 수 있다[6].

산성 조건, 특히 pH가 5 이하로 떨어지면 섬유 내부로의 수분 침투가 제한되어 섬유의 팽윤이 충분히 이루어지지 않는다. 이로 인해 리파이닝 과정에서 섬유가 쉽게 절단되거나 미세 입자가 과도하게 생성되어 여수도 도달에 더 많은 에너지가 필요하게 된다. 또한, 섬유 간 결합력이 약해져 종이의 인장강도도 낮아지는 경향이 있다.

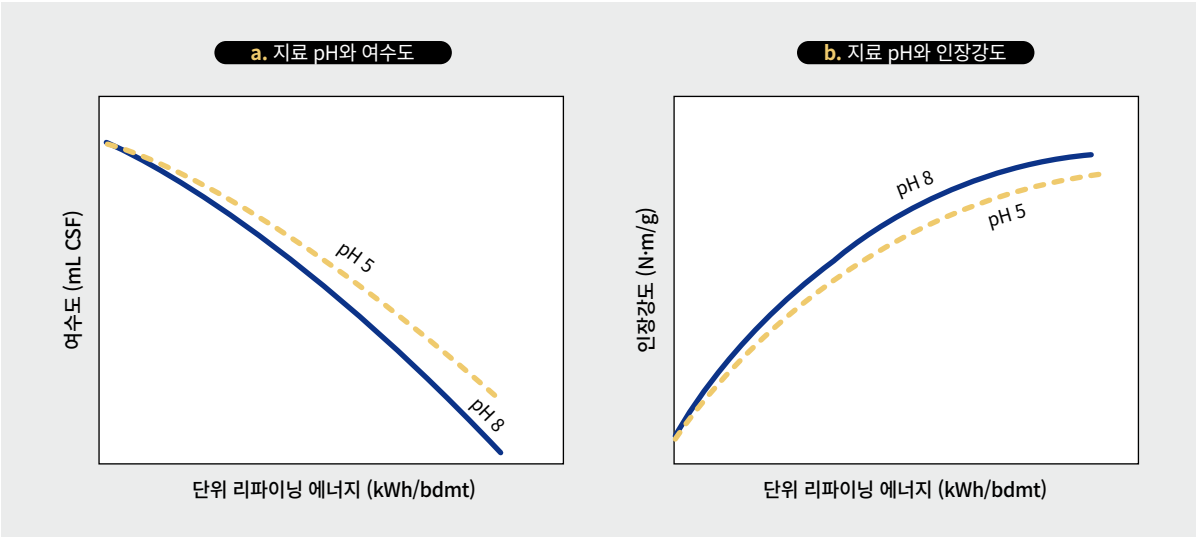
반면, 알칼리성이 강한 조건, 즉 pH가 10을 초과할 경우에는 섬유 표면이 지나치게 미끄러워져 리파이너의 바 모서리에 섬유가 잘 머물지 않게 된다. 이로 인해 리파이닝 효과가 저하되고 작업성이 떨어지며, 원하는 물성을 얻기 어려워진다.

가장 바람직한 조건은 중성에서 약알칼리성(pH 7~8) 사이로, 이 범위에서는 섬유가 효과적으로 수분을 흡수하고 팽윤되어 리파이닝 반응이 빠르게 진행된다. 섬유의 내·외부에서 소섬유화가 활발히 일어나며, 섬유 간 결합력이 향상되어 인장강도가 높아진다. 실제 실험에서도 pH 8 조건에서는 pH 5보다 여수도가 더 빠르게 감소하고, 동일한 리파이닝 에너지 투입 시 인장강도가 더 크게 발현되는 것으로 나타났다.

이러한 경향은 그림 04-38을 통해 명확히 확인할 수 있다. 그림 04-38은 리파이닝 효과와 지료 pH의 관계를 시각적으로 보여주는 자료로, 그림 04-38(a)에서는 지료 pH에 따른 여수도 변화, 그림 04-38(b)에서는 지료 pH에 따른 인장강도 변화를 나타낸다[6]. 두 그래프 모두 pH 8 조건이 pH 5 조건보다 리파이닝 효율과 종이 물성에서 우수한 결과를 보이며, 적절한 pH 조절이 제지공정의 품질 향상에 필수적임을 시사한다.

한편, 펄프 지료의 온도 역시 리파이닝 과정에서 중요한 변수로 작용한다. 일반적으로 40~50°C 범위를 유지하는 것이 가장 적절하며, 이 범위를 초과할 경우 여러 가지 부정적인 영향이 발생할 수 있다. 예를 들어, 온도가 50 °C를 넘어서면 헤미셀룰로오스의 용출이 촉진되어 섬유 표면의 구조가 변화하고, 이로 인해 섬유 표면이 폐쇄되어 리파이닝에 대한 저항성이 증가하게 된다. 또한, 높은 온도는 섬유의 팽윤을 촉진하여 유연성과 결합력을 높일 수 있지만, 지나치게 높을 경우 섬유

그림 04-38. 리파이닝 효과와 지료 pH의 관계




출처: Lumiainen, J., 2000. Refining of chemical pulp. In: Paulapuro, H. (Ed.), Papermaking Part 1: Stock Preparation and Wet End. Papermaking Science and Technology Series, Book 8. Fapet Oy, Helsinki, pp. 86-122.

가 손상되어 최종 제품의 품질이 저하될 수 있다.

에너지 투입량이 증가하더라도 온도가 50 ℃ 이하로 유지되는 경우가 많으며, 이는 적절한 온도 관리가 리파이닝 과정의 효율성과 제품 품질을 동시에 확보하는 데 중요하다는 점을 시사한다. 따라서 리파이닝 과정에서는 pH와 온도를 모두 적절히 조절하여 섬유의 물리적 특성을 최적화하고, 고품질의 종이를 안정적으로 생산하는 것이 핵심이라 할 수 있다.

### 4) 지료 처리량 (throughput)

리파이닝 과정에서 지료의 처리량을 일정하게 유지하는 것은 공정의 안정성과 제품 품질을 확보하는 데 매우 중요한 요소이다. 지료 처리량은 회전 플레이트의 로터 축 안정성, 섬유 뭉치의 형성, 섬유 강도 발현, 플레이트 수명, 그리고 공정 중 발생할 수 있는 변이를 최소화하는 데 직접적인 영향을 미친다[6, 53]. 따라서 지료 처리량의 적절한 관리와 이해는 리파이닝 공정의 효율성을 높이는 핵심이다.

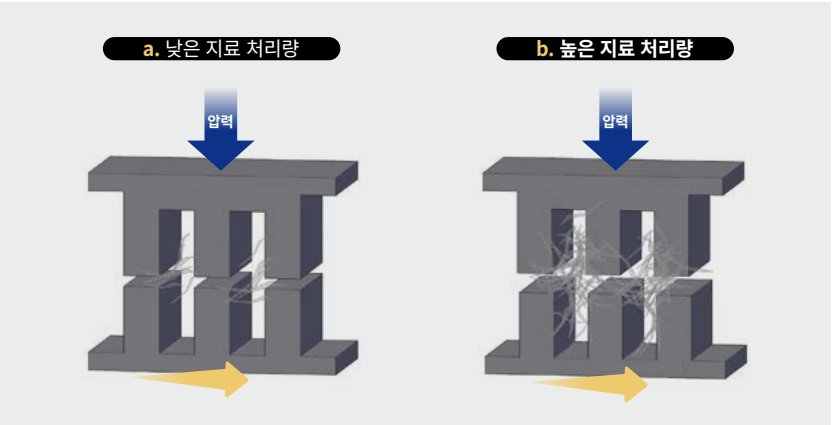
처리량이 지나치게 낮으면, 플레이트 사이에서 섬유 뭉치가 충분히 형성되지 못하고 채널링(channeling) 현상이 발생한다. 이 현상은 섬유가 균일하게 처리되지 않아 리파이닝 효과가 불균일해지고, 결과적으로 종이의 강도와 표면 품질이 저하된

다[53]. 또한, 처리량이 낮아지면 플레이트 간 간격이 좁아지면서 압력이 상승하게 되는데, 이 압력은 약 25~50 psi에 이를 수 있다. 높은 압력은 플레이트 간 충돌 위험을 증가시키며, 플레이트의 마모와 손상을 초래하여 수명을 단축시킨다. 이에 따라 섬유에 과도한 충격이 가해져 미세 섬유가 과도하게 생성되고, 동력 소모와 비교하면 섬유의 물성 발현은 제대로 이루어지지 않아 리파이닝 효율이 저하된다. 반대로, 처리량을 지나치게 높이면 여러 문제가 생긴다.

유량이 너무 커지면 펄프가 리파이너 안에서 충분히 머물 시간이 부족해져 섬유 처리가 제대로 이루어지지 않는다. 또한 많은 지료가 한꺼번에 들어오면 바 모서리에서 일어나는 전단·굽힘 작용의 횟수가 늘어나 플레이트가 더 빨리 닳고, 그만큼 교체 주기도 짧아져 유지보수 비용이 증가한다[25, 26]. 유량이 많아질수록 배관과 플레이트 사이에서 압력 손실이 커지므로, 간극을 일정하게 유지하려면 더 큰 닫힘 하중(또는 유효 차압, ΔP) 이 필요하다. 하지만 공급 압력이나 장비 성능의 한계로 차압을 충분히 확보하지 못하면, 플레이트 간극이 벌어져 리파이닝 강도가 약해진다. 마지막으로, 처리량이 지나치게 높으면 모터가 정격 부하에 가까워지거나 초과해서 돌아가 과부하와 고장 위험이 커지고, 에너지 소비도 증가한다.

그림 04-39는 지료 처리량(유량)에 따라 리파이너 내부의 압력 거동이 어떻게 달라지는지를 보여준다. 낮은 처리량(그림 04-39(a))의 경우, 유량이 작으면 배관·밸브·리파이너 내부에서 발생하는 압력 손실이 작다. 그 결과, 리파이너 전단–후단의 압력 차(ΔP)를 확보하기가 쉽고, 플레이트 간극이 안정적으로 유지된다. 간극이 안정되면 리파이닝 세기가 일정하게 유지되어 섬유 발달이 원활하다. 반면

**그림 04-39.** 지료 처리량에 따른 플레이트의 압력 차



에 높은 처리량(그림 04-39(b))의 경우, 유량이 커지면 흐름 저항이 증가하여 압력 손실(pressure drop)이 크게 늘어난다. 이때 리파이닝에 필요한 압력 차(ΔP)가 부족해지기 쉬워, 플레이트 간극 제어가 어려워지고 리파이닝 세기가 약화될 수 있다. 따라서 처리량이 지나치게 높아지는 것은 공정 안정성과 효율을 떨어뜨릴 수 있다. 결론적으로, 처리량이 너무 낮아도(과도한 간섭·마찰 위험), 너무 높아도(압력 손실 증가로 ΔP 부족) 문제가 생긴다. 적정 처리량을 유지하여 ΔP를 충분히 확보하고 간극을 안정적으로 관리하는 것이 중요하다.

리파이닝 공정에서 지료 처리량은 단순한 유량 조절을 넘어, 섬유의 물성 발현, 장비의 수명, 에너지 효율, 그리고 제품 품질에 직결되는 핵심 변수이다. 따라서 처리량을 공정 조건에 맞게 정밀하게 제어하고, 안정적으로 유지하는 것이 고품질 제지 생산을 위한 필수 조건이라 할 수 있다.

### 5) 펄프의 종류

종이 제조에 사용되는 펄프는 크게 침엽수 펄프, 활엽수 펄프, 그리고 재활용 종이자원으로 나눌 수 있으며, 이들 각각은 섬유의 구조적 특성과 리파이닝 반응성에서 뚜렷한 차이를 보인다.

침엽수 펄프는 섬유장이 길고 섬유벽이 두꺼운 특징을 가지고 있어, 활엽수 펄프에 비해 리파이닝 시 더 많은 에너지가 필요하다. 일반적으로 침엽수 펄프는 활엽수 펄프보다 3~3.5배 강한 리파이닝이 요구된다. 반면, 활엽수 펄프는 섬유장이 짧고 섬유벽이 얇아 상대적으로 유연하며, 저강도 리파이닝으로도 충분한 물성 발현이 가능하다[6].

같은 종류의 펄프라 하더라도 수종과 연륜에 따라 리파이닝 거동은 달라질 수 있다. 이러한 차이를 이해하기 위해서는 섬유 조도(fiber coarseness, mg/m)를 비교하는 것이 중요하다. 섬유 조도는 일정 길이의 섬유가 갖는 무게를 의미하며, 섬유의 유연성과 리파이닝 반응성을 평가하는 지표로 활용된다.

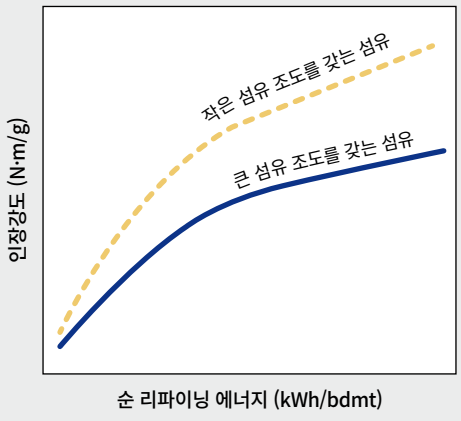
섬유 조도가 큰 펄프는 섬유벽이 두껍고 단단하여 리파이닝 에너지를 효과적으로 전달받기 어렵다. 이로 인해 리파이닝에 대한 저항성이 높고, 인장강도 발현이 느리게 진행된다. 반면, 섬유 조도가 작은 펄프는 섬유가 유연하고 물과의 상호작용이 활발하여 리파이닝 에너지가 효율적으로 전달되며, 빠른 강도 발현이 가능하다.

그림 04-40. 섬유 조도의 차이에 따른 종이 구조 비교 모식도




그림 04-40은 섬유 조도의 차이에 따라 제조된 종이 시트의 구조적 특성을 보여준다. 그림 04-40(a)에서는 섬유 조도가 큰 섬유로 제조된 시트가 벌크가 크고 조직이 느슨한 형태를 띠며, 그림 04-40(b)에서는 섬유 조도가 작은 섬유로 제조된 시트가 치밀하고 균일한 조직을 형성한다. 이러한 구조적 차이는 종이의 물성, 특히 인장강도에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 섬유 조도가 큰 펄프 섬유에 대해서는 고강도 리파이닝이 필요하고, 섬유 조도가 작은 펄프 섬유는 저강도 리파이닝이 필요하다[6].

그림 04-41. 섬유 조도의 차이에 따른 리파이닝 거동 변화




출처: Lumiainen, J., 2000. Refining of chemical pulp. In: Paulapuro, H. (Ed.), Papermaking Part 1: Stock Preparation and Wet End. Papermaking Science and Technology Series, Book 8. Fapet Oy, Helsinki, pp. 86-122.

그림 04-41은 섬유조도(섬유 표면의 거칠기 및 구조적 불균일성)에 따른 리파이닝 거동 변화를 시각적으로 나타낸다. 섬유 조도는 펄프 섬유의 표면 특성과 내부 구조를 반영하는 중요한 물성으로, 리파이닝 과정에서 에너지 전달 효율과 섬유 변형 방식에 직접적인 영향을 준다. 동일한 리파이닝 에너지를 투입했을 때, 섬유 조도가 큰 펄프는 표면이 거칠고 내부 구조가 불균일하여 에너지가 섬유 표면에서 소모되는 비율이 높다. 이로 인해 섬유의 유연화(fibrillation)와 결합력 향상이 늦게 나타나며, 결과적으로 인장강도 증가 속도가 완만하다. 이러한 펄프는 초기 단계에서 주로 표면 손상과 미세 파편 생성이 일어나고, 충분한 에너지가 누적되어야 섬유 간 결합력이 개선된다.

반면, 섬유 조도가 낮은 펄프는 표면이 매끄럽고 구조가 균일하여 리파이닝 에너지가 섬유 내부로 효율적으로 전달된다. 따라서 섬유가 빠르게 유연화되고 미세섬유화가 촉진되어, 인장강도가 급격히 향상된다. 이 경우 초기 리파이닝 단계에서부터 섬유 간 결합력이 빠르게 증가하며, 상대적으로 낮은 에너지에서도 높은 강도 개선 효과를 기대할 수 있다.

이러한 차이는 리파이닝 공정 최적화에서 매우 중요하다. 섬유 조도가 큰 펄프는 더 많은 에너지와 시간이 필요하므로, 에너지 효율을 고려한 공정 설계가 요구된다. 반대로 조도가 작은 펄프는 과도한 리파이닝을 피해야 불필요한 에너지 소모와 섬유 손상을 방지할 수 있다.

또한, 펄프의 표백 여부도 리파이닝 거동에 영향을 준다. 미표백 크라프트 펄프는 증해 공정을 통해 대부분의 리그닌이 제거되지만, 약 10% 이하의 리그닌이 잔류한다. 리그닌은 방향족 고리와 다양한 소수성 작용기를 포함한 복잡한 고분자 구조를 가지고 있어 물과의 친화력이 낮다. 이로 인해 리파이닝 과정에서 물과의 상호작용이 제한되며, 더 많은 에너지가 필요하게 된다. 반면, 표백 크라프트 펄프는 리그닌이 거의 제거되어 셀룰로오스와 헤미셀룰로오스로 구성되어 있으며, 이들은 다수의 수산기(-OH)를 포함하고 있어 친수성이 높다. 이러한 친수성은 리파이닝 과정에서 물과의 상호작용을 촉진하여 에너지가 보다 효율적으로 전달되고, 리파이닝 효과가 더 잘 나타나게 한다.

결론적으로, 펄프의 종류, 섬유 조도, 그리고 표백 여부는 리파이닝 공정의 효율성과 종이의 물성에 중대한 영향을 미친다. 따라서 제지공정에서는 사용되는 펄프의 특성을 정확히 이해하고, 이에 맞는 리파이닝 조건을 설정하는 것이 고품질 종이 생산을 위한 핵심 전략이라 할 수 있다.

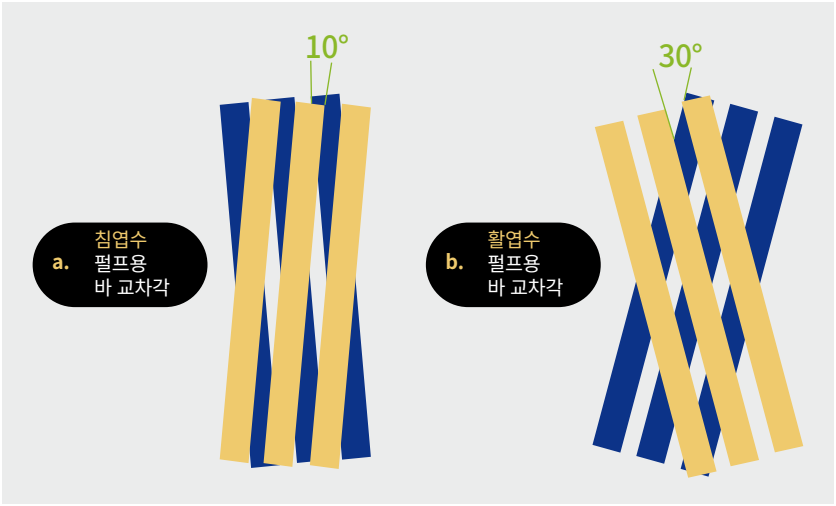
### 6) 플레이트의 바 교차 각도

리파이너 플레이트의 바 교차각도는 리파이닝 과정에서 섬유의 소섬유화와 섬유 절단 정도를 결정하는 핵심 설계 변수이다. 교차각도는 회전 플레이트와 고정 플레이트의 바가 서로 만나는 각도를 의미하며, 이 각도에 따라 섬유에 전달되는 물리적 힘의 방향, 마찰 강도, 그리고 에너지 분포가 달라진다[6, 42].

교차각도가 작아질수록, 즉 바가 서로 평행에 가까워질수록 섬유는 더 강한 전단력과 충격을 받게 된다. 이로 인해 섬유 절단이 증가하고, 섬유 길이가 짧아지며, 결과적으로 강도보다는 벌크나 표면 특성 개선에 유리한 효과를 나타낸다. 반대로, 교차각도가 커질수록 섬유는 상대적으로 부드러운 마찰을 받으며, 섬유 표면에서 소섬유화가 촉진된다. 이 경우 섬유 길이가 유지되고, 섬유 간 결합력이 강화되어 인장강도 향상에 기여한다.

일반적으로 바 교차각도는 섬유 종류와 리파이닝 목표에 따라 10°에서 40° 범위에서 설계된다. 침엽수 펄프는 섬유가 길고 벽이 두꺼워, 적절한 절단을 통해 섬유 간 결합을 최적화해야 한다. 이 경우 그림 04-42의 (a)와 같이 10° 수준의 작은 교차각을 사용하여 섬유 절단을 유도한다. 활엽수 펄프나 재생펄프는 섬유 길이가 짧고 벽이 얇아, 강도 확보를 위해 소섬유화가 중요하다. 따라서 그림 04-42의 (b)와 같이 30°~40°의 큰 교차각을 적용하여 섬유 표면을 효과적으로 처리한다[6, 55]. 그러나 교차각도의 극단적 변화는 부정적인 영향을 초래할 수 있다[56].

**그림 04-42.** 펄프 종류별 리파이너 플레이트의 바 교차각



- 각도가 지나치게 작으면, 플레이트 바의 접촉 길이가 길어져 마찰로 인한 소음과 진동이 증가하고, 섬유 손상이 심해질 수 있다.
- 각도가 너무 크면, 섬유 처리량이 감소하고 에너지 소비가 크게 늘어나 공정 효율이 떨어진다.

따라서 바 교차각도는 섬유 특성, 제품 요구 품질, 그리고 에너지 효율성을 종합적으로 고려해 최적화해야 한다. 이는 리파이닝 공정에서 품질과 비용의 균형을 유지하는 핵심 설계 요소이다.

## 8. 리파이닝 공정의 디지털화와 스마트 제어

제지 산업에서 리파이닝 공정은 펄프의 물성을 조절하여 최종 제품의 품질을 결정짓는 핵심 단계이다. 전통적으로 이 공정은 운전자의 경험에 의존해 플레이트 간격(gap)을 조정하고 동력 부하를 수동으로 관리하는 방식으로 운영되어 왔다[57]. 그러나 이러한 방식은 품질의 일관성을 확보하기 어렵고, 에너지 낭비로 이어질 가능성이 높다. 이에 따라 최근에는 리파이닝 공정의 디지털화와 스마트 제어 기술이 주목받고 있다[6, 58, 59].

디지털화된 리파이닝 시스템은 공정 데이터를 실시간으로 수집하고 분석하여, 자동으로 최적의 운전 조건을 유지할 수 있도록 한다. 이를 위해 리파이너의 입구와 출구에는 다양한 센서가 설치된다. 입구에서는 펄프의 농도, 온도, pH, 유량 등을 측정하여 원료 상태를 파악하고, 출구에서는 여수도, 섬유장, 미세분 함량 등을 측정하여 리파이닝의 효과를 평가한다. 또한, 설비 상태를 모니터링하기 위해 모터 동력, 플레이트 간격, 진동, 소음 등의 데이터를 수집한다[58-61]. 예를 들어, 간격 센서에서 ±20 μm 이상의 변동이 감지되면 플레이트 마모나 유량 불균형이 발생했을 가능성이 있으므로 즉각적인 점검이 필요하다.

스마트 제어 시스템은 단순한 자동화 수준을 넘어, 품질, 에너지, 설비 보호의 세 가지 제어 루프를 통합적으로 운영하는 고도화된 구조를 갖는다. 품질 루프는 여수도와 인장강도를 목표 범위 내로 유지하는 역할을 하며, 에너지 루프는 단위 에너지 소비량(SRE)을 최소화하는 방향으로 제어된다. 설비 보호 루프는 진동이나 온도와 같은 이상 징후가 감지되면 간격을 자동으로 확대하여 장비 손상을 예방

한다[61, 62].

이러한 스마트 제어는 디지털 트윈 기술을 통해 더욱 정교하게 구현된다. 디지털 트윈은 실제 리파이너의 가상 모델을 기반으로 시뮬레이션을 수행하고, 간격 조정이나 회전 속도 변경이 품질과 에너지 효율에 미치는 영향을 예측한다[57, 60-62]. 예를 들어, SEL을 1.0 W·s/m으로 조정하면 인장강도가 약 8% 증가하고, 벌크는 3% 감소할 것으로 예측할 수 있다. 이러한 예측 결과는 실제 운전에 반영되어 최적의 제어가 가능해진다.

현장에서는 스마트 제어 시스템이 문제 해결에도 큰 도움을 준다. 예를 들어, 인열강도가 급격히 저하되는 현상이 발생했을 때, 이는 간격이 지나치게 좁아져 고강도 리파이닝이 이루어진 결과일 수 있다. 이 경우 간격을 50 μm 확대하고, 에너지를 단계적으로 분산시키면 인열강도가 회복되고 에너지 소비도 약 12% 절감되는 효과를 얻을 수 있다.

스마트 제어 시스템은 경고 기준도 명확히 설정되어 있다. 예를 들어, 모터 부하가 90% 이상으로 지속되면 유량 과다나 간격 과소를 의심해야 하며, 진동이 3 mm/s를 초과하면 플레이트 마모가 심각한 상태일 수 있다. 또한, 여수도(CSF)가 ±15 mL 이상 변동하면 품질이 불안정하다는 신호로 간주된다. 이러한 기준에 따라 시스템은 자동으로 알람을 발생시키고, 필요 시 간격 조정이나 회전 속도 변경 등의 제어를 수행한다[61, 62].

이 모든 정보는 SCADA(supervisory control and data acquisition) 시스템을 통해 운전자에게 실시간으로 제공된다[63]. SCADA는 공정의 상태를 직관적으로 시각화하여 보여주는 대시보드 역할을 하며, 간격, 모터 동력, 여수도, 유량 등의 값이 그래프와 숫자로 표시된다. 이상이 발생하면 경고 알람이 즉시 표시되며, 운전자는 이를 통해 공정 상태를 신속하게 파악하고 시스템이 제안하는 제어 권고를 따라 조치를 취할 수 있다[64].

결론적으로, 리파이닝 공정의 디지털화는 단순한 자동화 수준을 넘어, 데이터 기반의 예측과 제어를 통해 품질과 에너지 비용을 동시에 최적화하는 혁신적인 접근 방식이다. 현장 작업자는 SCADA 화면을 통해 실시간으로 공정을 모니터링하고, 시스템과 협업하여 안정적이고 효율적인 운전을 구현할 수 있다. 이러한 변화는 제지 산업의 경쟁력을 높이는 핵심 요소로 자리 잡고 있으며, 향후 스마트 팩토리 구현의 중요한 기반이 될 것이다[1, 8].

## 9. 지속가능한 리파이닝 전략

지속가능한 리파이닝의 핵심 목표는 종이의 강도 발현을 유지하면서 에너지 소비, 탄소 배출, 그리고 소모품 비용을 줄이는 것이다. 이를 위해 가장 중요한 접근법은 저강도 또는 초저강도 운전이다. 충격 강도를 낮추고 충격 횟수를 늘리면 섬유 절단을 최소화하고, 섬유 표면과 내부에서 소섬유화를 촉진할 수 있다. 이러한 방식은 인장강도와 결합력 발현에 유리하며, 동일한 총에너지를 여러 단계로 분산할수록 섬유장이 잘 보존되고 강도 발현이 안정적이다. 예를 들어, 한 번에 150 kWh/t를 투입하는 대신 75 kWh/t씩 두 단계로 나누면 섬유 손상이 줄고 인장강도가 더 높게 나타난다.

에너지 절감의 또 다른 핵심은 무부하 동력 저감이다[65]. 리파이너는 지료가 없는 상태에서도 플레이트를 회전시키기 위해 상당한 동력을 소모한다. 이를 줄이기 위해 회전수를 최적화하고, 수직 바 형상의 경량 플레이트를 적용하며, 마모가 심해지기 전에 적기에 교체하는 것이 중요하다. 이러한 관리로 무부하 동력을 10~30%까지 절감할 수 있다. 특히, 플레이트 마모가 진행되면 무부하 동력이 최대 30% 증가하므로 교체 시점을 놓치지 않는 것이 중요하다[66].

수자원과 열 에너지 관리도 지속가능성에 큰 영향을 준다. 리파이너 출구의 지료 온도를 40~50℃로 유지하고, pH를 7~8 범위로 맞추면 섬유 팽윤과 소섬유화가 활발히 일어나 강도 발현에 유리하다[6]. 또한 프레스와 건조 공정에서 발생하는 저온 폐열을 회수해 지료를 예열하면 에너지 효율을 높일 수 있다. 다만, 과도한 예열은 섬유 손상을 유발할 수 있으므로 적정 온도를 유지하는 것이 중요하다[67].

재활용 섬유를 사용할 때는 추가적인 주의가 필요하다. 재활용 섬유에는 스티키와 무기 충전제가 포함되어 있어 플레이트 바 막힘과 마모를 가속시킨다[68]. 또한 전단 충격이 과도하면 미세분이 급증해 탈수성이 악화되고 건조 에너지가 증가한다[69]. 이를 방지하기 위해 혼합 리파이닝을 활용하는 것이 효과적이다. 긴 섬유가 짧은 섬유를 기계적으로 보호하도록 하고, 저강도 조건에서 절단을 최소화하면 품질과 에너지 효율을 동시에 확보할 수 있다.

마지막으로, 지속가능성을 평가하는 LCA(전과정 평가) 관점에서는 다음과 같은 우선순위를 고려해야 한다[70, 71]. 첫째, 무부하 동력 저감. 둘째, 에너지를 여러 단계로 분산하는 전략. 셋째, 플레이트의 교차각과 바 폭을 재설계해 저강도 리파이닝을 구현하는 것. 넷째, pH와 온도를 안정화해 섬유 팽윤과 소섬유화를 촉진

하는 것이다. 이러한 단계적 접근은 에너지 절감과 품질 유지, 그리고 탄소 배출 저감이라는 세 가지 목표를 동시에 달성하는 데 기여한다.

## 10. 품질평가와 데이터 분석

리파이닝 공정에서 품질 평가는 단일 지표로는 충분하지 않다. 종이의 성능은 다양한 요소가 복합적으로 작용하기 때문에, CSF(여수도), 강도군(인장·파열·인열), 벌크, 표면강도, 탈수성을 함께 고려해야 한다[1, 6]. 예를 들어, 인장강도가 높더라도 인열강도가 급격히 낮아지면 실제 가공성과 인쇄 적성이 떨어질 수 있다. 따라서 품질 평가는 다차원적 접근이 필수적이다.

품질 평가의 일관성을 위해 ISO나 TAPPI, 혹은 KS 표준과 같이 표준화된 시험 방법을 사용해야 한다. 샘플링은 공정 변동을 정확히 반영할 수 있도록 계획해야 한다. 일반적으로 리파이너 출구에서는 15분 간격으로 샘플을 채취하고, 변동이 심할 경우 5분 간격으로 조정한다. 블렌딩 체스트에서는 30~60분 간격이 적절하다. 블렌딩 체스트의 경우 체류시간의 3~5배에 해당하는 기간 동안 이동평균으로 추세를 파악한 후 조건 변경을 권장한다. CSF 측정은 측정자·장비 간 변동이 크므로 MSA(측정시스템분석)로 정기 검증이 필요하다.

실험실 고해 시험은 현장 조건을 재현하고 최적화를 위한 기준 데이터를 제공한다. 시험 시에는 농도를 표준화하고, 단계별로 에너지를 투입하며, 각 단계에서 CSF, 강도, 섬유장을 측정한다. 이를 통해 강도-에너지 곡선을 작성하면, 동일한 인장강도를 얻기 위해 필요한 에너지를 비교할 수 있다. 예를 들어, A 플레이트는 60 kWh/t에서 목표 인장을 달성하지만, B 플레이트는 80 kWh/t가 필요하다면 A가 더 효율적이다.

데이터 해석에서는 몇 가지 핵심 포인트를 기억해야 한다.

- 동일 인장강도에 필요한 SRE가 낮을수록 좋은 조건과 플레이트로 평가한다.
- CSF가 너무 빠르게 떨어지면 섬유 절단과 미세분 과다 발생 가능성이 크다.
- 강도는 초기에는 향상되지만, 과도한 절단이 발생하면 오히려 저하할 수 있다.
- 평균 섬유장이 급격히 하락하면 인열강도와 탈수성이 악화되는 경우가 많다.

최적 조건을 찾기 위해서는 DOE(실험계획법)을 활용한다. DOE에서는 플레이트

간격, 회전수(rpm), 농도, 단계 수, 바 패턴을 요인으로 설정하고, 인장강도, CSF, 벌크, 인열강도, SRE, 무부하 동력비를 응답 변수로 설정한다. 이를 통해 최적 영역을 도출하면, 품질과 에너지 효율을 동시에 만족시키는 조건을 찾을 수 있다.
현장에서는 간단한 지표를 활용해 운영 판단을 내릴 수 있다. 대표적으로 여수도 강하 효율(단위 에너지당 CSF 감소량)과 무부하 동력비(총동력 대비 무부하 동력 비율)가 있다. 이 두 지표는 리파이닝 효율과 설비 상태를 직관적으로 보여주므로, 실시간 모니터링과 개선 활동에 매우 유용하다.

## 11. 현장 트러블슈팅

리파이닝 공정에서 발생하는 문제는 품질 저하, 에너지 낭비, 설비 손상으로 이어질 수 있으므로, 신속하고 체계적인 대응이 필요하다. 트러블슈팅은 증상 → 원인 → 조치의 흐름을 명확히 하여, 현장에서 즉각적인 판단과 실행이 가능하도록 구성해야 한다.

### (1) 인열강도 급락

인열강도가 급격히 낮아지는 경우는 섬유 절단이 과도하게 발생했을 가능성이 크다. 이는 좁은 바 폭, 작은 교차각, 단일 단계에서의 고강도 운전이 주요 원인이다. 이러한 상황에서는 플레이트 간격을 소폭 확대하고 회전수를 낮추며, 에너지를 여러 단계로 분산하는 것이 즉각적인 대응책이다. 근본적으로는 바 폭을 넓히고 교차각을 상향 조정하여 초저강도 플레이트를 적용하는 방안을 검토해야 한다. 이러한 조치는 섬유 절단을 줄이고 소섬유화를 촉진하여 강도 발현을 안정화한다.

### (2) 탈수성 악화

CSF가 급격히 하락하고 프레스나 와이어 부하가 증가하는 경우는 탈수성 악화의 전형적인 증상이다. 이는 미세분 과다, 과도한 외부 소섬유화, pH 변화, 온도 과열 등이 복합적으로 작용한 결과일 수 있다. 대응 방법으로는 플레이트 간격을 완화하고 에너지 투입을 줄이며, pH를 7~8 범위로 회복하고 출구 온도를 40~50℃

로 재설정하는 것이 효과적이다. 근본 개선을 위해서는 바 폭 확대, 교차각 상향, 재활용 섬유 비율 조정, 클리닝 공정 강화가 필요하다. 특히 CSF 변화 속도를 실시간으로 모니터링하면 미세분 과다 발생을 조기에 감지할 수 있다.

### (3) 소음·진동 증가

리파이너에서 비정상적인 소음과 진동이 발생하면 간격이 지나치게 좁거나 교차각이 과소한 경우, 또는 베어링 이상과 플레이트 접촉 위험을 의심해야 한다. 즉시 간격을 확대하고 회전수를 완화하며, 설비 보호 루프를 가동해 장비 손상을 방지한다. 이후 플레이트 패턴을 교체하고 베어링 정비 및 정렬을 실시해야 한다. 무부하 동력의 급격한 상승은 플레이트 접촉 가능성을 나타내는 중요한 지표이므로 반드시 확인해야 한다.

### (4) 에너지소비 급증과 무부하 비율 상승

설비 운전 중 동력 소모가 갑자기 증가하고, 무부하 상태에서의 동력 비율이 높아지는 현상이 발생할 수 있다. 이러한 경우는 회전수가 과도하게 높거나, 플레이트의 직경이 변경되었거나 마모가 심한 경우, 또는 장비의 정렬이 틀어진 경우에 주로 나타난다.

플레이트를 교체한 이후에는 무부하 상태에서의 기준 동력 곡선($P_0$ vs rpm)을 다시 측정해 기록해 둔다. 이후 운전 중에 이 기준과 실제 측정값을 비교함으로써, 장비 상태나 운전 조건이 바뀌었는지를 확인할 수 있다. 기준값에서 벗어나는 경향이 나타나면, 장비에 이상이 생겼거나 마모가 진행되고 있다는 신호일 수 있으므로 주기적으로 확인하는 것이 중요하다.

무부하 동력($P_0$)은 회전수(rpm)의 세제곱($N^3$)과 플레이트 직경(D)의 다섯제곱($D^5$)에 비례한다. 따라서 회전수가 조금만 증가해도 동력 소모는 매우 급격하게 증가할 수 있다. 이 점은 에너지 관리와 설비 운전 최적화에 있어 반드시 고려해야 할 핵심 사항이다[1,32].

### (5) CSF와 강도 불안정

여수도와 강도 값이 불규칙하게 변동하는 경우는 유량과 농도의 변이, 단계 간 에너

지 분배 불균형, 혼합 불량이 흔한 원인이다. 대응책으로는 유량 PID(proportional-integral-derivative)를 재튜닝하고 병렬 라인의 유량을 균형화하며, 블렌딩 체스트의 체류 시간을 확보하는 것이 중요하다. DOE 기반으로 간격, rpm, 농도 등의 영향도를 분석해 최적 조건을 유지하는 것도 효과적이다. 리파이닝 공정에서는 PID 제어를 통해 유량과 압력을 안정화하여 CSF와 강도의 변동을 최소화한다. PID 튜닝이 잘못되면 유량이 흔들려 품질 불안정이 발생하므로, 정기적인 점검과 재튜닝이 필요하다[72].

## 12. 지종별 리파이닝 조건 매뉴얼

리파이닝 조건은 지종, 원료 특성, 설비 능력에 따라 달라지므로, 본 매뉴얼은 각 지종별로 초기 설정 범위와 조정 방향을 제시한다. 제시된 값은 절대적인 기준이 아니라, DOE(실험계획법)와 현장 데이터를 통해 공장별로 최적화해야 한다는 점을 전제로 한다.

인쇄용지(도공지 및 비도공지)는 활엽수 표백 크라프트를 주원료로 하고, 침엽수를 소량 블렌딩하여 인장강도, 표면강도, 지합을 균형 있게 확보한다. 이 지종에서는 농도를 4.5~5.0%로 유지하고, 2~3단의 저강도 분산 리파이닝을 적용하는 것이 일반적이다. 총 SRE는 60~120 kWh/t, 교차각은 20~30°, 온도는 45 °C, pH는 7~8을 유지하는 것이 바람직하다. 인열강도가 약하면 바 폭을 넓히고 교차각을 상향 조정한다. 반대로 벌크가 과도하게 낮아졌다면, 리파이닝 강도를 낮추기 위해 총 투입 에너지를 줄이거나, 리파이닝 횟수를 3단에서 2단을 줄여 중간 단계의 리파이닝을 건너뛰는 방식으로 처리 단계를 줄여준다[73].

포장지(크라프트 라이너와 백판지 하부층)는 침엽수 미표백 크라프트와 재활용 섬유 비율이 높아, 압축강도와 링크러시, 인열강도 확보가 핵심 목표다. 농도는 3.5~4.5%로 설정하고, 1~2단의 저·중강도 혼합 운전이 일반적이다. 총 SRE는 80~160 kWh/t 범위에서 운전하며, 교차각은 10~20°로 두어 일부 섬유 절단을 허용한다. 탈수성이 악화될 경우 교차각을 상향하고 에너지를 분산하며, 인열강도가 저하되면 간격을 완화하고 단계를 분산하는 방식으로 대응한다[73].

위생지(티슈와 타월)는 활엽수를 중심으로 일부 침엽수를 혼합하며, 부드러움과 흡수성, 벌크 유지가 최우선이다. 따라서 초저강도 리파이닝을 1~2단으로 운전하는 것이 적합하다. 총 SRE는 40~90 kWh/t 범위에서 설정하고, 교차각은 30~40°

로 두며, 온도는 40~45 ℃, pH는 7~8을 유지한다. 부드러움이 저하되면 에너지를 줄이고 교차각을 상향하며, 탈수성이 악화되면 미세분 관리와 에너지 분산을 통해 개선한다[74].

특수지(글라신, 라벨 베이스, 전지용 분리막 기초지 등)는 매우 치밀한 구조와 표면 균일성이 요구되므로, 농도를 3.0~3.5%로 낮추고 균질화를 목표로 한다. 4~6단의 다단 분산 방식으로 총 SRE를 120~220 kWh/t 범위에서 운전하며, 교차각은 25~35°를 적용한다. 표면 결함이나 핀홀이 발생하면 에너지 분산을 강화하고 교차각을 상향 조정해야 한다[75, 76].

다층 판지는 top층, filler층, bottom층을 개별 라인으로 운전한다. Top ply는 인쇄적성을 위해 활엽수를 사용하고 저강도 리파이닝을 적용하며, 교차각은 25~35°, SRE는 40~80 kWh/t가 적절하다. Filler ply는 벌크와 경제성을 중시하므로 최소한의 리파이닝만 적용하며, SRE는 20~40 Wh/t 범위에서 운전한다. Bottom ply는 강도 확보를 위해 침엽수를 사용하고 중강도 리파이닝을 적용하며, 교차각은 10~20°, SRE는 80~140 kWh/t가 일반적이다[77, 78]. 각 층은 독립적으로 운전한다. 필요 시 혼합 지료에 가벼운 최종 리파이닝을 추가해 CSF를 미세 조정한다.

신규 플레이트나 원료를 도입할 때는 초기 설정 절차를 반드시 준수해야 한다. 첫 단계에서는 기존 조건을 기준으로 24~72시간 동안 CSF, 강도, 동력, 섬유장 트렌드를 확보한다. 안전 설정으로는 pH 7~8, 온도 40~45℃, 무부하 비율 15~20%를 유지하는 것이 바람직하다. 총 SRE는 2~3단으로 분산하고, 단계당 25~45 kWh/t에서 시작하며, 간격과 rpm은 CSF 변동 ±10~15 mL 이내에서 소폭 조정한다. 인열강도가 저하되면 바 폭을 확대하고 교차각을 상향하며, 탈수성이 악화되면 에너지 분산과 미세분 관리를 시행한다. 간단한 DOE를 통해 최적 영역을 좁힌 뒤 태그와 레시피를 표준화하고 알람과 서보 루프 한계를 설정한다[5, 32].

현장 점검에서는 간격을 목표값 ±20 μm 범위로 유지하고, 회전 속도는 목표값 ±50 rpm 이내에서 관리한다. 지료의 pH는 7~8, 온도는 40~50°C를 유지해 섬유의 팽윤과 소섬유화 환경을 안정화한다. 무부하 동력은 총 동력의 15~20% 수준으로 관리하며, 이 비율이 상승하면 회전수, 플레이트 마모, 정렬 상태를 점검해야 한다. 출구 CSF 변동은 ±15 mL 이내로 유지하고, 에너지는 한 번에 많이 주지 말고 단계로 나눠 섬유 손상을 줄이는 것이 바람직하다[5, 32, 79, 80].

## 참고문헌


[1] Smook, G.A., 2016. Handbook for Pulp & Paper Technologists, 4th ed. TAPPI Press, Peachtree Corners, GA.

[2] Bajpai, P., 2018. Biermann's Handbook of Pulping and Papermaking, 3rd ed. Elsevier, Amsterdam.

[3] Sixta, H., 2006. Handbook of Pulp, vol. 1. Wiley-VCH, Weinheim.

[4] Niskanen, K. (Ed.), 1998. Paper Physics. Papermaking Science and Technology Series, Book 16. Fapet Oy, Helsinki.

[5] Aikawa Fiber Technologies (AFT), 2016. Introduction to Stock Preparation Refining: FineBar® Training Manual. EB-050-ENA4, 2016 Edition.

[6] Lumiainen, J., 2000. Refining of chemical pulp. In: Paulapuro, H. (Ed.), Papermaking Part 1: Stock Preparation and Wet End. Papermaking Science and Technology Series, Book 8. Fapet Oy, Helsinki, pp. 86-122.

[7] Kerekes, R.J., 2011. Force-based characterization of refining intensity. Nordic Pulp and Paper Research Journal 26(1), 14-20.

[8] Page, D.H., 1989. The beating of chemical pulps—the action and the effects. TAPPI Journal 72(9), 92-97.

[9] ISO 5267-2:2001, 2001. Pulps—Determination of drainability—Part 2: Canadian Standard Freeness method. International Organization for Standardization, Geneva.

[10] ISO 5267-1:1999, 1999. Pulps—Determination of drainability—Part 1: Schopper-Riegler method. International Organization for Standardization, Geneva.

[11] Karlsson, H., Sundberg, A., Westermark, U., Gatenholm, P., 1996. Morphology and chemical composition of kraft pulp fibers. Nordic Pulp and Paper Research Journal 11(4), 220-226.

[12] Ebeling, K., and Hietanen, S., Fundamental aspects of the refining process, Paperi ja Puu – Paper and Timber 72(2): 158-170 (1990).

[13] Gharehkhani, S., Sadeghinezhad, E., Kazi, S.N., Yarmand, H., Badarudin, A., Safaei, M.R., & Zubir, M.N.M. (2015). Basic effects of pulp refining on fiber properties—A review. Carbohydrate Polymers, 115, 785–803.

[14] Elahimehr, A., Olson, J. A., & Martinez, D. M. (2015). Low consistency refining of mechanical pulp: How plate pattern and refiner operating conditions change the final properties of pulp. Nordic Pulp & Paper Research Journal, 30(4), 609-616..

[15] Valmet (2013). Pulping Developments: Improving refining energy efficiency and process sustainability. Technical White Paper. Published July 12, 2013.

[16] Brecht, W., & Siewert, W. (1966). The mechanism of fiber development in refining. Das Papier, 20(1), 4–15.

[17] Kerekes, R.J., 2010. Energy and forces in refining. Journal of Pulp and Paper Science, 36(1–2), 10–15.

[18] Baker, C.F., 1995. Good practice for refining the types of fibre found in modern paper furnishes. Tappi Journal, 78(2), pp.147–153.

[19] Hanish Anand, S., Manigandan, P., Satish Kumar, J., & Evan Cephas Jeffrey, J., 2016. Design and manufacturing of disc refiner. International Journal of Emerging Technology in Computer Science & Electronics (IJETCSE), 21(3), pp.79–82.

[20] Sunds Defibrator, 1997. Conflo® Refiners for Stock Preparation and Recycled Fiber. Technical Bulletin, Sunds Defibrator AB, Sundsvall, Sweden.

[21] Valmet Corporation, 2014. OptiFiner Pro: Award winning high capacity refiner. Technical Brochure, Valmet Corporation, Finland. Available at: www.valmet.com/optifinerpro.

[22] ANDRITZ AG, 2024. TrueFlow® Refiner Plates for OptiFiner Pro: Realize your full potential. Technical Brochure, ANDRITZ AG, Graz, Austria. Available at: www.andritz.com.

[23] Baker C., 2004. Refining and improved paper machine runnability. Proceedings of APPW 2004 Conference. TAPPSA; 2004.

[24] Kerekes, R.J., Senger, J.J., 2006. Characterizing refining action in low-consistency refiners by forces on fibres. J Pulp Paper Sci. 32(1):1-8.

[25] Min, B.-G., Kim, C.-H., Lee, J.-Y., Park, S.-H., Lee, M.-S., Gu, H.-G., Lee, C.-Y., 2020. New technology for developing a lightweight refiner plate for hardwood kraft pulp fibers. Bioresources 15(4), 9218–9142.

[26] Gu, H.-G., Min, B.-G., Lee, J.-Y., Park, S.-H., Lee, M.-S., Lee, C.-Y., Kim, C.-H., 2021. Mechanical modification of softwood pulp fibers using a novel lightweight vertical bar plate. Tappi Journal 20(4), 241–251.

[27] Park, M.-S., Kim, C.-H., Park, H.-H., Park, J.-H., Lee, J.-S., 2025. Optimizing fiber quality in recycled old corrugated containers (OCC) using ultra-fine bar plate technology. Applied Sciences 15, 9036.

[28] Park, H.-H., Kim, C.-H., Park, J.-H., Park, M.-S., Lee, J.-

< ⌂ ☰ >

S., 2025. Comparative analysis of ultra-fine bar refining and Valley beating on softwood and hardwood kraft pulps: Implications for fiber integrity and paper strength enhancement. Applied Sciences 15, 9160. https://doi.org/10.3390/app15169160.

[29] Andritz AG, 2021. Durabond and Durabond Light: Refiner Plate Technology Overview. Technical Datasheet, Graz, Austria.

[30] Parason Machinery, 2023. Refiner Plates for Pulp & Paper Mills. Company Brochure. Parason Machinery India Pvt. Ltd., Aurangabad, India.

[31] J&L Fiber Services, Inc., 2006. Ultra-Bar™ Patterns & PowerCast™ Technology for Refiner Plates. Technical Bulletin. J&L Fiber Services, Waukesha, USA.

[32] AFT, 2015. AFT Finebar® Refining Application. TECNICELPA Seminar Presentation, Sherbrooke, Quebec, Canada.

[33] J&L Fiber Services, Inc., Alloy Technology for Refiner Plates: C90, C91, C96 and AeroMax Series. Technical Brochure. Waukesha, WI, USA.

[34] Sundholm, J. (1999). Mechanical Pulping. In J. Gullichsen & C. J. Fogelholm (Eds.), Papermaking Science and Technology (Vol. 5). Fapet Oy.

[35] Kerekes, R.J., & Meltzer, F. (2018). The influence of bar width on bar forces and fibre shortening in low consistency pulp refining. Nordic Pulp & Paper Research Journal, 33(2), 220–225.

[36] Olejnik, K. (2013). Impact of pulp consistency on refining process conducted under constant intensity determined by SEL and SEC factors. BioResources, 8(3), 3212–3230.

[37] Lumiainen, J.J., 1990. A new approach to the critical factors effecting on refining intensity and refining result in low consistency refining. In: TAPPI Papermakers Conference Proceedings. TAPPI PRESS, Atlanta, USA.

[38] Gharehkhani, S., Sadeghinezhad, E., & Kazi, S.N. (2014). Basic effects of pulp refining on fiber properties—A review. Carbohydrate Polymers, 108, 14–26. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.08.047.

[39] Liu, H., Roux, J.-C., Qiao, L., et al. (2025). Characterization of the low consistency pulp refining conducted by the plates with different bar-groove width ratios. Nordic Pulp & Paper Research Journal. https://doi.org/10.1515/npprj-2025-0009.

[40] Danforth, D.W., 1969. The theory and practice of refining. Southern Pulp and Paper Manufacturer, 32(7), 50–57.

[41] Kerekes, R.J., 1990. Characterization of pulp refiners by a C-factor. Nordic Pulp & Paper Research Journal, 5(1), 3–8.

[42] Kerekes, R.J., McDonald, J.D., 2022. Fiber-based characterization of pulp refining. TAPPI Journal, 21(9), 497-502.

[43] Ferritsius, R., Sandberg, C., Rundlöf, M., et al., 2024. Development of fibre properties in mill scale: high- and low consistency refining of thermomechanical pulp (part 2) – Importance of fibre curl. Nordic Pulp & Paper Research Journal, 39(4), 575–585.

[44] Alami, R., Boileau, I., Harris, G., May, W.D., 1997. Impact of refining intensity on energy reduction in commercial refiners: Effect of primary-stage consistency. TAPPI Journal, 80(1), 185–192.

[45] Joy, E., Rintamaki, J., Weckroth, R., Tuomelai, P., 2004. Ultra-low intensity refining of short fibered pulps. In: Proceedings of APPW 2004 Conference, São Paulo, Brazil.

[46] Musselman, R., Gingras, L., 2007. Application of refiner plate technology to improve pulp quality and reduce energy. In: Proceedings of the International Mechanical Pulping Conference (IMPC 2007), May 6–9, Minneapolis, Minnesota, USA.

[47] Przybysz, P., Dubowik, M., Małachowska, E., et al., 2020. The effect of the refining intensity on the progress of internal fibrillation and shortening of cellulose fibers. BioResources, 15(1), 1482–1499.

[48] Ryu, J.-H., Kim, C.-H., Lee, J.-Y., Lee, J.-S., Lee, C.-H., Park, J.-H., 2022. Study of refining effect of mixed pulps using refiner plates with different bar patterns. Applied Sciences, 12(22), 11445. https://doi.org/10.3390/app122211445.

[49] Nygårds, M., 2022. Relating papermaking process parameters to properties of paperboard with special attention to through-thickness design. MRS Advances, 7(5), 282–297. https://doi.org/10.1557/s43580-022-00282-7.

[50] Lindberg, G., Kulachenko, A., 2022. The effect of ply properties in paperboard converting operations: a way to increase formability. Cellulose, 29, 4673–4690. https://doi.org/10.1007/s10570-022-04673-9

[51] Radomska, K., Olejnik, K., Pospiech, P., 2024. The influence of the composition of pulp and the number of layers on the strength properties of multi-layer papers intended for corrugated paperboard. BioResources, 19(3), 6025–6045.

[52] Koponen, A.I., Cecchini, J., Selenius, M., Jäsberg, A., 2025. Reinforcing folding boxboard ply stock with refined pulp and its effect on dewatering potential. TAPPI Journal, 24(2), 111–123. https://doi.org/10.32964/TJ24.2.111.

[53] Behfarshad, G., 2012. Low Consistency Refining of

Softwood Chemical Pulp. Project Report, Pulp and Paper Centre, Department of Mechanical Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada, November 26, 2012.

[54] Backström, M., Mohlin, U.-B., 2019. The influence of refining heterogeneity on paper properties. BioResources, 14(3), 6577–6590.

[55] Ushakov, A., Alashkevich, Y., Kozhukhov, V., Marchenko, R., 2023. Role of external fibrillation in high-consistency pulp refining. BioResources, 18(3), 5494–5511.

[56] Koskenhely, K., Nieminen, K., Hiltunen, E., Paulapuro, H., 2005. Comparison of plate and conical fillings in refining of bleached softwood and hardwood pulps. Paperi ja Puu, 87(7), 458–463.

[57] Kramer, K.J., Masanet, E., Worrell, E., 2010. Energy efficiency opportunities in the US pulp and paper industry. Energy Engineering, 107(4), pp. 21–56.

[58] Åström, K.J., 2006. Advanced control of paper machines: An overview. Annual Reviews in Control 30(2), 193-207.

[59] Zhang, Y., Li, H., Wang, J., & Chen, X., 2023. An intelligent digital twin system for paper manufacturing in the paper industry. Expert Systems with Applications, 230, 120614.

[60] Shen, J., Song, Z., Qian, X., Liu, W., 2021. Digital twin technology for intelligent control of paper pulp refining processes. Bioresource Technology 325, 124658.

[61] Kramer, K.J., Masanet, E., Worrell, E., 2010. Energy efficiency opportunities in the US pulp and paper industry. Energy Engineering, 107(4), pp. 21-56.

[62] Muhic, D., Karlsson, H., Sandberg, C., Ullmar, M., 2016. Online measurement systems for refining process optimization: Sensor integration and data analysis. Nordic Pulp & Paper Research Journal 31(2), 234-245.

[63] Boyer, S.A., 2010. SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition, fourth ed. International Society of Automation, Research Triangle Park, NC.

[64] Johansson, L.S., Annergren, M., Rouchier, J., 2019. SCADA systems implementation in modern paper mills: Real-time monitoring and control strategies. Control Engineering Practice 87, 112-124.

[65] Karlsson, H., Salminen, K., 2016. Energy efficiency in mechanical pulping: Strategies for no-load power reduction. Nordic Pulp & Paper Research Journal 31(2), 245-252.

[66] Sabourin, M., Xu, E., Cort, B., Boileau, I., Waller, A., 2018. Optimizing refiner operation through specific edge load control and gap management. TAPPI Journal 17(8), 423-435.

[67] Scallan, A.M., Tigerström, A.C., 1992. Swelling and elasticity of the cell walls of pulp fibers: Influence of pH and ionic strength. Journal of Pulp and Paper Science 18(5), J188-J193.

[68] Nazhad, M.M., Paszner, L., 1994. Fundamentals of strength loss in recycled old corrugated containers (OCC) fibers. Journal of Pulp and Paper Science 20(6), J268-J273.

[69] Hubbe, M.A., 2006. Bonding in papermaking fibers and fines. BioResources 1(2), 281-318.

[70] Retulainen, E., Niskanen, K., 2008. Fibres and bonds. In: Niskanen, K. (Ed.), Paper Physics, second ed. Papermaking Science and Technology Series, vol. 16. Finnish Paper Engineers' Association/TAPPI Press, Helsinki/Atlanta, pp. 55-87.

[71] ISO, 2006. ISO 14040:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. International Organization for Standardization, Geneva.

[72] Seborg, D.E., Edgar, T.F., Mellichamp, D.A., Doyle III, F.J., 2016. Process Dynamics and Control, fourth ed. John Wiley & Sons, Hoboken.

[73] Fairbank, M. (2023). The future of low-consistency refining. Pulp and Paper Canada.

[74] Gigac, J., & Fišerová, M. (2008). Influence of pulp refining on tissue paper properties. TAPPI Journal, August 2008.

[75] Bertrand, J.-F., & Ruffino, M. (2017). Method of manufacturing glassine paper. US Patent No. US9587355B2.

[76] Vallier, K. R. (1993). The Recyclability of Glassine Paper. Paper Engineering Senior Theses, Western Michigan University.

[77] Ghosh, A. K. (2023). Modelling Strength Properties of Kraft Linerboard made on Multi-ply Paper Machine from Component Properties and Machine Factors. In TAPPICon 2023 Proceedings, Paper ID: 23TAP76. TAPPI Press.

[78] Lindberg, G., & Kulachenko, A. (2022). The effect of ply properties in paperboard converting operations: a way to increase formability. Cellulose, 29(12), 6865–6887.

[79] Huhtanen, J.-P., Karvinen, R., Vikman, K., & Vuorio, P. (2015). Determination of Freeness Reduction by Refining Intensity Definition Based on Fluid Dynamical Model. Tampere University of Technology, Finland.

[80] Wätzig, D. (2011). Reducing Energy Costs through Closed Loop Refiner Control. In PaperCon 2011 Conference Proceedings, TAPPI Press, Covington, Kentucky, USA, May 1–4, 2011.






**임 완 희** 충북대학교 교수

**2025 – 현재** 펄프종이공학회 편집 부위원장
**2024 – 현재** 충북대학교 조교수
**2020 – 2024** 무림P&P 연구소 수석연구원
**2019 – 2020** The University of British Columbia 박사후 연구원
**2019 – 2020** FPInnoations 방문연구원
**2019** 서울대학교 농업생명과학연구원 박사 후 연구원

iwh1009@cbnu.ac.kr

# 5

# 제지공정 내 이물질 제거

지료의 불순물을 제거하는 클리너 설비 (사진제공_무림P&P)

# 1. 서론

## (1) 제지공정에서 클리너와 스크린의 역할

제지공정에서 클리너(cleaner)와 스크린(screen)은 최종 종이 제품의 품질을 결정짓는 핵심 설비이다. 이들은 원료 처리 과정인 조성공정(stock preparation)의 중심 장치로서, 펄프나 재활용 원료에 포함된 불순물을 제거하여 고품질의 지료를 생산하는 데 필수적인 역할을 담당한다.

불순물이 충분히 제거되지 않을 경우 종이의 강도 저하, 표면 결함 발생, 인쇄적성 악화 등 다양한 품질 문제가 초래된다. 반면, 적절한 정선 과정을 거친 지료는 우수한 지합과 높은 강도를 확보할 수 있으며, 이는 균일한 품질을 갖춘 경쟁력 있는 종이 제품의 생산으로 이어진다.

특히 재활용 종이자원을 활용하는 공정에서는 클리너와 스크린의 역할이 더욱 중요하다. 재활용 원료에는 플라스틱, 금속 조각, 스티키(stickies)와 같은 점착성 물질, 미세 충전물이나 잉크 잔류물 등 다양한 불순물이 포함되어 있으므로(그림 05-01), 이들을 효과적으로 제거해야만 재활용 섬유의 품질을 안정적으로 확보할

그림 05-01. 이물질 및 잔해물 종류



수 있다. 따라서 클리너와 스크린은 단순한 정선 설비를 넘어, 지속 가능한 제지공정을 구현하기 위한 핵심 기술 요소라 할 수 있다.

클리너와 스크린은 서로 상호 보완적인 기능을 수행한다. 클리너는 주로 밀도 차이에 기반하여 중량 이물질이나 경량 이물질을 분리하는 역할을 하며, 스크린은 입자 크기 차이를 이용하여 이물질을 제거한다[1]. 이러한 정선 시스템을 다단계로 적용할 경우 섬유 손실을 최소화하는 동시에, 밀도가 높거나 크기가 큰 불순물의 제거 효율을 극대화할 수 있다.

오늘날 제지산업은 에너지 효율 향상, 섬유 손실 최소화, 정밀한 불순물 제거 기술의 개발을 통해 경쟁력을 지속적으로 강화하고 있다. 클리너와 스크린 기술 역시 이러한 산업적 요구에 부응하여 꾸준히 발전해왔다. 향후에도 클리너와 스크린은 친환경적이고 지속 가능한 제지공정을 구축하는 데 있어 중심적인 역할을 수행할 것으로 기대된다.

### (2) 원료 펄프와 이물질 발생 요인

제지공정에서 사용되는 원료 펄프는 크게 화학펄프, 기계펄프, 그리고 재활용 펄프로 구분된다. 화학펄프는 리그닌과 대부분의 불순물이 제거되어 상대적으로 청정한 원료로 평가되지만, 공정 과정에서 설비 마모로 인해 발생한 금속 입자나 무기물 잔류물이 포함될 수 있으며, 소량의 섬유 다발이 남아 있기도 하다. 기계펄프는 미해리된 결속섬유가 잔류하므로 추가적인 처리가 필요하며, 수지분이나 추출성분을 다량 함유하고 있어 스티키(stickies)나 피치(pitch) 형성의 원인이 되기도 한다. 한편, 재활용 종이자원의 경우 인쇄 잉크, 접착제, 플라스틱, 금속 조각 등 다양한 오염원이 혼재되어 있어, 가장 복잡하고 정밀한 불순물 제거 공정을 요구한다.

펄프 내 이물질은 발생 기원에 따라 여러 범주로 구분할 수 있다. 목재 자체에서 유래하는 천연 성분으로는 피치, 각종 추출물, 리그닌 잔류물 등이 있으며, 섬유화 과정에서 충분히 분리되지 않고 생성되는 결속섬유 또한 불순물의 중요한 구성 요소에 해당한다. 이와 더불어 공정 과정에서 기인하는 이물질도 존재한다. 예를 들어, 설비 마모로 인해 발생하는 금속 입자나 약품 처리 과정에서 생성되는 불용성 반응 부산물 등이 이에 속한다.

재활용 종이자원에는 더욱 다양한 불순물이 포함된다. 인쇄 잉크 잔류물뿐만 아니라 접착제, 핫멜트(hot-melt), 라벨 및 테이프에서 기인하는 점착성 이물질이

다량 존재한다. 또한 플라스틱 필름, 포일, 코팅층과 같은 비섬유성 물질과 클립이나 철심 등 금속류가 원료에 혼입되는 경우도 빈번하다. 더 나아가 원료의 수거, 보관 및 운송 과정에서 흙, 먼지 등 각종 환경적 오염원이 함께 유입될 수 있다.

원료 펄프에 포함된 이물질은 기원과 물리적 특성에 따라 크게 고밀도 이물질, 저밀도 이물질, 그리고 미세 이물질로 분류할 수 있다. 이 가운데 고밀도 이물질은 섬유보다 비중이 큰 물질로, 모래, 금속 조각, 유리 파편, 돌 등이 대표적이다. 이러한 이물질은 주로 펄프화 공정이나 원료의 수거·운송 과정에서 혼입되며, 설비의 마모나 손상을 유발할 뿐만 아니라 종이 내에 잔류할 경우 표면 결함이나 품질 저하의 원인이 된다.

저밀도 이물질은 섬유보다 비중이 낮은 성분으로, 플라스틱, 스티로폼, 왁스 조각, 그리고 점착성 물질인 스티키(stickies) 등이 이에 해당한다. 특히 재활용 펄프에는 접착제나 각종 코팅 물질에서 기인한 스티키가 빈번하게 발생하는데, 이들은 공정 중 설비 표면에 부착되거나 서로 응집하여 운전상의 어려움을 초래하거나 품질 결함을 유발한다.

미세 이물질은 크기가 수십 마이크로미터 이하인 입자로, 인쇄 잉크 잔류물, 미세 플라스틱, 각종 충전물 등이 대표적이다. 이러한 이물질은 육안으로 식별하기는 어렵지만, 종이 표면에 점이나 반점 형태로 나타나 인쇄적성을 저해하며, 섬유 간 결합력을 약화시켜 종이의 강도 저하를 초래한다.

이처럼 펄프 슬러리 내 이물질은 밀도와 크기에 따라 물리적 특성이 크게 상이하며, 이에 따라 각 이물질의 특성에 부합하는 제거 기술의 적용이 요구된다.

## 2. 클리닝 시스템 (Cleaning system)

### (1) 클리너의 기본 원리

클리너(cleaner)는 제지공정에서 펄프 현탁액 속의 이물질을 밀도 차이를 이용해 제거하는 정선 장치이다(그림 05-02). 클리너의 사용 목적은 크게 세 가지이다. 첫째, 펄프에 포함된 불순물을 제거하여 최종 제품의 품질을 향상시킨다. 불순물이 잔류하면 종이의 강도 저하, 표면 결함, 인쇄적성 불량과 같은 품질 문제가 발생한다. 둘째, 모래, 금속 조각, 유리와 같은 중질 불순물을 제거하여 스크린, 리파이너,

그림 05-02. 클리너 설치 모습

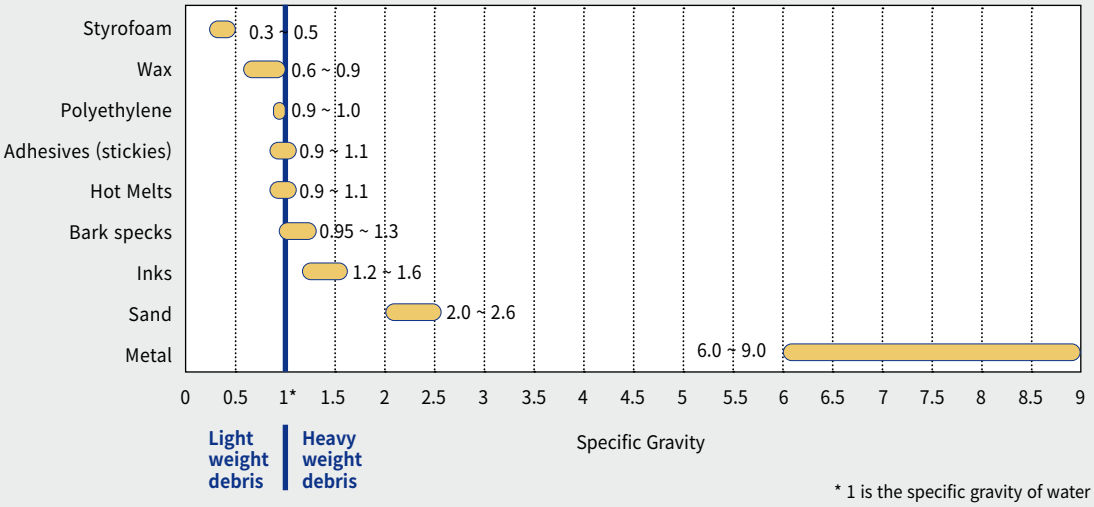


헤드박스 등 하류 장비의 손상과 막힘을 방지한다. 셋째, 플라스틱이나 스티키(점착성 이물질)와 같은 저밀도 불순물을 제거하여 지합(formation)을 개선하고, 특히 재활용 섬유의 품질을 높인다.

클리너의 작동 원리는 원심력과 이물질 간의 밀도 차이를 이용하는 것이다. 이물질은 물의 비중인 1.0을 기준으로 경량 이물질과 중량 이물질로 구분된다(그림 05-03). 스티로폼(0.3~0.5), 왁스(0.6~0.9), 폴리에틸렌(0.9~1.0)과 같은 경량 이물질은 비중이 1.0보다 낮아 물보다 가볍기 때문에 슬러리 내에서 부유하려는 성향이 강하다. 반면, 모래(2.0~2.6)나 금속(6.0~9.0)과 같이 비중이 큰 물질은 물보다 훨씬 무거워 슬러리 내에서 아래쪽으로 침강하는 특성을 보인다.

일반적으로 원추형 구조를 가진 클리너에서는 슬러리가 상부 측면의 유입구를 통해 접선 방향으로 공급된다. 이로 인해 클리너 내부에는 강한 회전 유동이 형성되

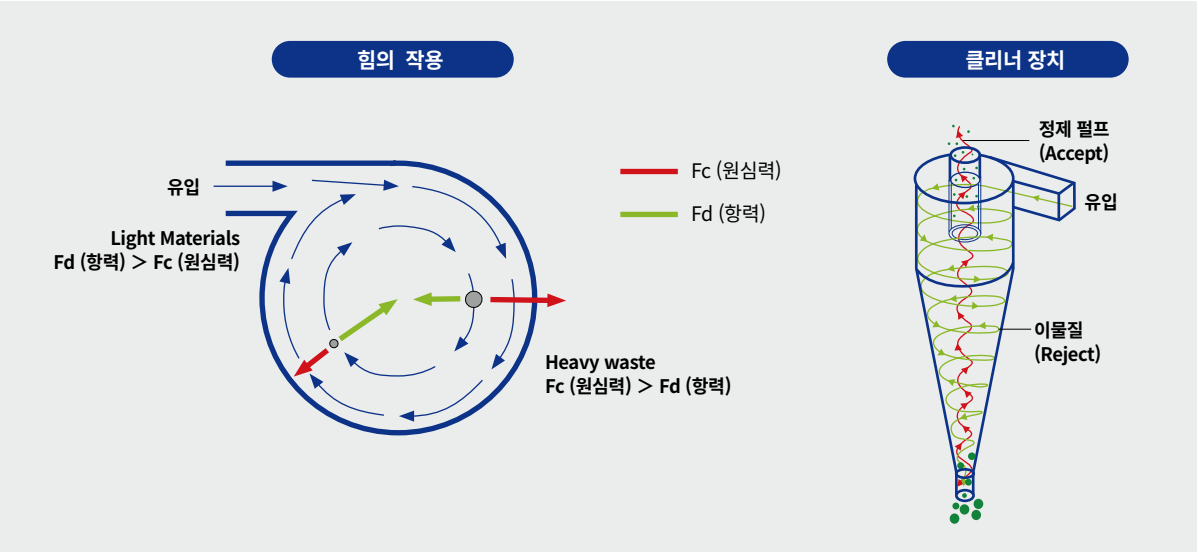
그림 05-03. 지료 내 이물질의 비중



며, 이에 따른 원심력이 발생한다(그림 05-04). 원심력의 작용으로 비중이 큰 이물질은 외벽 방향으로 밀려나면서 하부로 이동하는 반면, 상대적으로 가벼운 섬유는 중심부를 따라 상부로 이동하는 이중 유동 구조가 형성된다. 그 결과 모래, 금속, 콘크리트 조각과 같은 중량 이물질은 리젝트(reject) 흐름으로 분리되고, 섬유와 같은 경량 구성물은 억셉트(accept) 흐름으로 배출된다. 이와 같이 클리너는 이물질의 비중 차이와 원심력을 이용하여 중량 이물질은 하부 리젝트 출구로, 섬유는 상부 억셉트 출구로 분리함으로써 펄프의 청정도를 향상시킨다[1–3].

클리너의 이물질 제거 메커니즘은 스토크스의 법칙(Stokes' law)으로 설명할 수 있다. 스토크스의 법칙에 따르면 원심력장이 형성된 유동 환경에서 입자의 분리(침강) 속도는 입자의 직경과 입자–유체 간 밀도 차이에 비례하며, 유체의 점도에는 반비례한다. 따라서 입자의 크기가 크고 밀도 차이가 클수록 분리 속도는 증가한다. 이러한 원리에 의해 클리너는 모래나 금속 조각과 같은 고밀도 이물질뿐만 아니라 플라스틱과 스티키(stickies)와 같은 저밀도 이물질도 효과적으로 제거할 수 있다. 결국 클리너의 작동 원리는 원심력장 내에서 비중이 큰 입자는 외곽으로, 비중이 작은 입자는 중심부로 이동하려는 자연적인 물리 현상에 기반한다. 이러한 단순하면서도 효과적인 원리로 인해 클리너는 불순물 제거뿐만 아니라 설비 보호, 제품 품질 향상, 유지관리 비용 절감 등 제지 공정 전반의 안정성과 경제성 확보에 크게 기여한다[4].

그림 05-04. 클리너의 이물질 분리 메커니즘



**Stokes's Law**

$$V = \frac{d^2(\rho_s - \rho_l)r\omega^2}{18\eta}$$

**V** = 침강속도 (m/s)
**ω** = 각속도 (rad/s)
**R** = 원심반경 (m)
**d** = 입자 직경 (m)

$\rho_s$ = 고체 밀도 (kg/m$^3$)
$\rho_l$ = 액체 밀도 (kg/m$^3$)
**η** = 점도 (Pa·s)

### (2) 클리너의 운전원리에 따른 분류

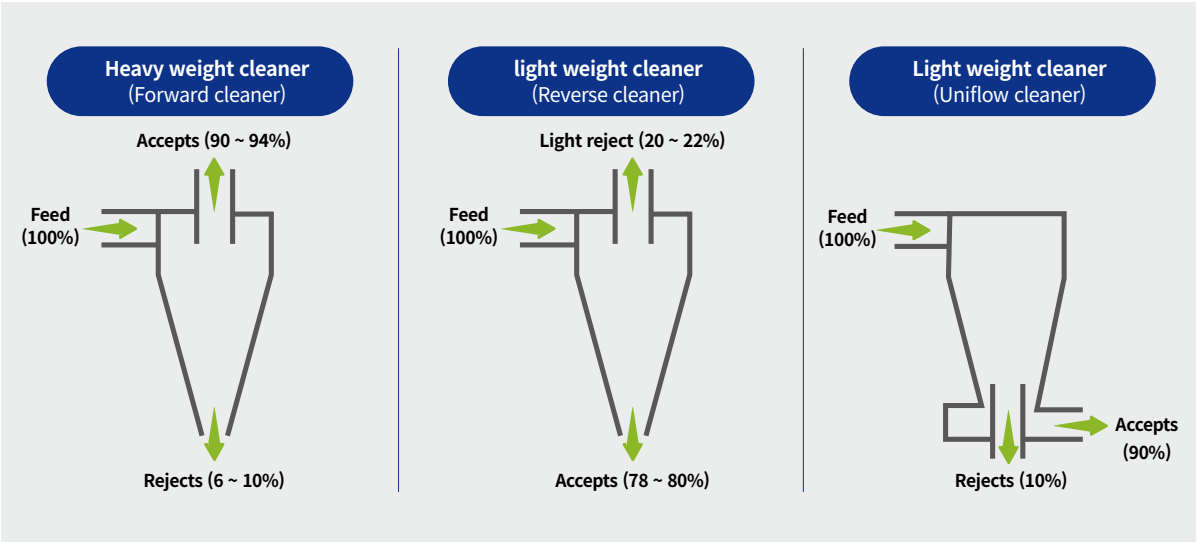
클리너는 운전원리에 따라 그림 05-05와 같이 크게 정방향(forward) 방식과 역방향(reverse) 방식으로 나뉜다. 이들 이용은 제거 대상 오염물의 밀도 특성에 따라 정해진다[2].

먼저, 중량 클리너(heavy weight cleaner), 즉 정방향 클리너(forward cleaner)는 밀도가 큰 이물질을 제거하는 데 사용된다. 펄프 현탁액이 상부에서 접선 방향으로 유입되면 내부에 강한 회전 유동이 형성되고, 이로 인해 모래, 금속, 유리 파편과 같은 고밀도 입자는 외벽 방향으로 몰려 하부 리젝트 출구로 배출된다. 반면 섬유와 물은 하부 배출구의 단면적이 상대적으로 작아 하부 리젝트 출구로 배출되지 못하고, 중심부에서 수직 방향으로 나타나는 상승유동을 따라 상부로 이동하여 억셉트로 배출된다. 일반적으로 중량 클리너는 억셉트가 전체 유입량의 90% 이상이고, 리젝트는 10% 이하이다. 이 방식은 고밀도 불순물 제거에 매우 효과적이다. 대부분의 제지공정에서 기본적으로 사용된다.

경량 클리너(light weight cleaner), 즉 역방향 클리너(reverse cleaner)는 밀도가 낮은 불순물을 제거하는 데 적합하다. 클리너 내부에 회전 유동이 형성되면 플라스틱 조각, 발포 스티로폼, 접착제 잔류물, 기포와 같은 경량 오염물은 중심부로 모여 상부 리젝트 포트를 통해 배출된다. 반면 섬유와 물은 외곽을 따라 하부로 이동하여 억셉트 출구로 배출된다. 일반적으로 경량 클리너에서 억셉트 포트로 배출되는 유량은 전체 유입량의 약 78~80% 수준이며, 리젝트 포트로 배출되는 유량은 20~22% 수준이다. 이물질 함량이 높은 재활용 종이자원의 경우에는 경량 불순물 제거효율을 높이기 위해 리버스 클리너의 리젝트율을 40~50%까지 증가시키기도 한다. 역방향 클리너는 재활용 펄프 공정에서 경량 불순물을 효과적으로 제거하는 데 널리 활용된다.

또 다른 형태의 경량 클리너는 기존과는 다른 구조적 변형 설계를 적용한 장치이다. 이 방식에서는 유입된 슬러리 중 약 90%가 측면의 억셉트 출구를 통해 배출

그림 05-05. 운전원리에 따른 클리너의 분류



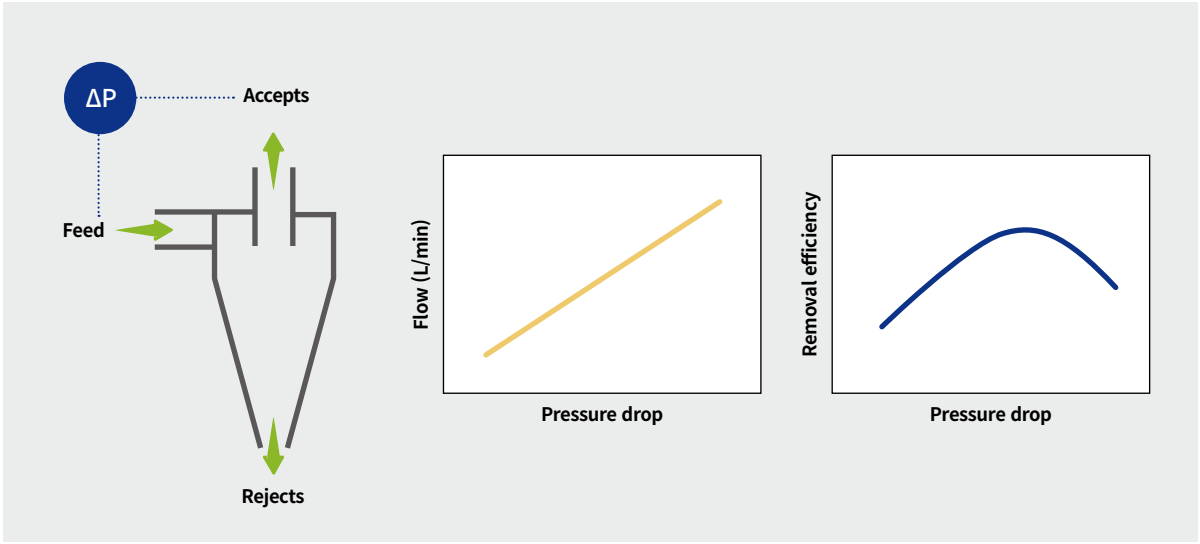

되고, 나머지 약 10%는 하부에 설치된 리젝트 포트를 통해 분리된다. 이러한 변형 구조는 저밀도 오염물의 분리 효율을 향상시키기 위해 개발된 것으로, 기존의 역방향 클리너의 한계를 보완하는 역할을 한다.

### (3) 클리너의 효율에 영향을 미치는 인자

클리너의 성능은 단순히 장치의 구조에 의해서만 결정되는 것이 아니라, 운전 조건과 원료 특성에 따라 크게 달라진다. 특히 압력 강하, 펄프 농도, 리젝트율, 그리고 제거 대상 입자의 크기와 밀도 같은 입자 특성은 클리너의 분리 효율에 직접적인 영향을 미치는 핵심 요인이다.

첫째, 압력 강하(pressure drop)란 클리너의 분리 성능을 좌우하는 가장 중요한 운전 변수 중 하나이다. 그림 05-06에 나타낸 바와 같이, 압력 강하는 유입구(feed)와 배출구(accepts) 사이의 압력 차이를 의미한다. 유입구와 배출구 간 압력 차이가 증가하면 클리너 내부의 유동 속도가 빨라지고, 이에 따라 원심력이 강화되어 고밀도 이물질의 분리 효율이 향상된다. 그러나 압력 강하가 지나치게 높을 경우 섬유 손실이 증가하고, 내부 체류 시간이 짧아져 불순물이 충분히 분리되지 못하는 문제가 발생할 수 있다. 반대로 압력 강하가 너무 낮으면 원심력이 충분히 형성되지 않아 불순물 제거율이 감소한다. 따라서 안정적인 조업과 효율적인 이물

그림 05-06. 압력강하와 내부 유동 속도 및 이물질 제거 효율




질 제거를 위해서는 적정한 압력 강하 범위를 유지하는 것이 매우 중요하다[5, 6].

둘째, 펄프 농도(consistency)는 입자 간 충돌과 유동 특성에 영향을 미친다. 펄프 농도가 높을수록 입자 간 간섭이 증가하며, 그 결과 원심분리에 의한 이물질 분리 효율이 저하된다[7]. 특히 농도가 지나치게 높을 경우 클리너 내부 막힘이 발생하기 쉽고, 섬유 손실 또한 증가할 수 있다. 반면 농도가 지나치게 낮으면 유효 처리량이 감소하고 에너지 소비가 증가하여 공정 경제성이 저하된다. 일반적으로 0.5~1.0% 수준의 저농도 조건에서 가장 안정적이고 효율적인 운전 성능을 나타낸다.

셋째, 리젝트율(reject rate)은 전체 유입량 중 리젝트로 배출되는 비율을 의미한다. 리젝트율이 너무 높으면 섬유 손실이 증가하여 수율이 낮아지고, 반대로 너무 낮으면 불순물이 충분히 제거되지 않는다. 따라서 리젝트율은 품질 확보와 섬유 손실 최소화라는 두 가지 목표 사이에서 균형을 맞추어야 한다. 일반적으로 클리너는 약 10% 내외의 리젝트율 조건에서 운전되는 경우가 많다.

마지막으로, 입자 특성은 클리너의 효율에 결정적인 영향을 미친다. 입자의 크기가 클수록, 그리고 섬유나 물과의 밀도 차이가 클수록 분리 효율이 높다. 반대로 섬유 및 물과의 밀도 차이가 작거나 수 마이크로미터 이하의 미세입자는 클리너에서 효과적으로 분리하기 어렵다. 이러한 이유로 산업 현장에서는 고농도 단계에서 큰 불순물을 먼저 제거하고, 저농도 단계에서 더욱 정밀하게 미세 이물질을 제거하는 다단계 클리너 시스템을 운용한다[6, 7].

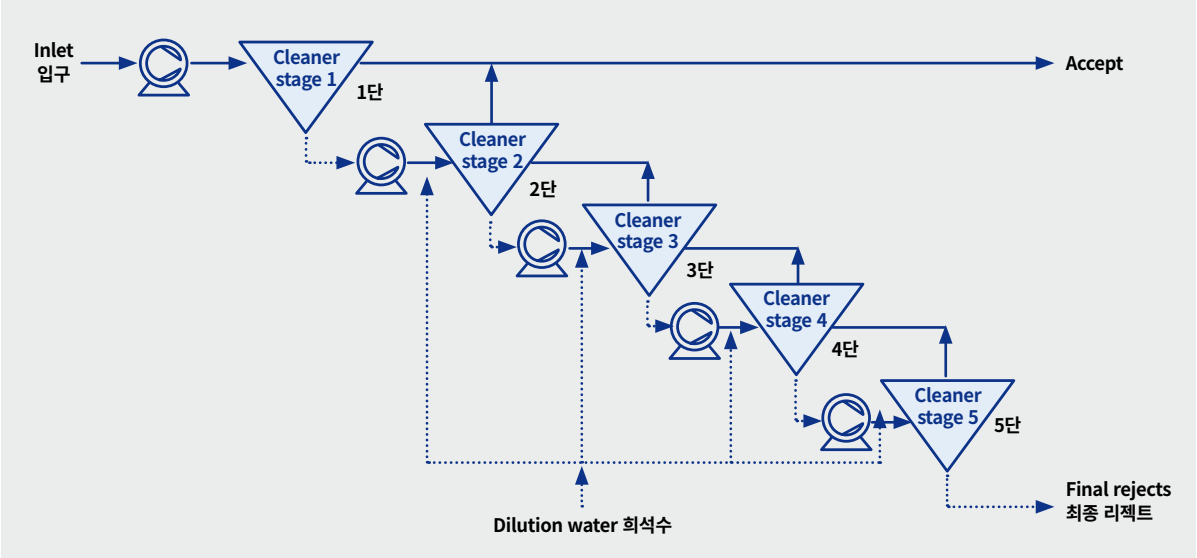
결국 클리너의 효율은 단일 요인에 의해 결정되는 것이 아니라, 압력, 농도, 리젝트율, 입자 특성 간의 상호작용에 의해 달라진다. 따라서 클리너 조업의 핵심은 운전조건을 최적화하여 섬유 손실을 최소화하면서 목표로 하는 불순물을 효과적으로 제거하는 데 있다.

### (4) 공정 내 클리너의 배치와 역할

클리너는 일반적으로 어프로치 플로우(approach flow) 라인에 배치되어, 스크린, 탈기장치와 함께 헤드박스 유입 전 지료의 상태를 안정화시키기 위해 사용된다. 그림 05-07에서 나타낸 바와 같이, 클리너 시스템은 보통 펄퍼 직후에 고농도 클리너를 설치하여 가장 크고 무거운 고밀도 불순물을 우선 제거한 뒤, 이어지는 중농도와 저농도 클리너를 통해 점차 작은 입자를 제거하는 다단계 정선(cascade system) 구조로 구성된다[8].

이러한 다단계 시스템에서는 첫 단계에서 대형 불순물을 제거하여 하류 설비를 보호하고, 후속 단계에서는 점차 작은 불순물을 제거함으로써 최종적으로 청정한 슬러리가 헤드박스에 공급되도록 한다. 리젝트는 단계가 진행될수록 점차 농축되어 배출된다. 이와 같이하면 전체 리젝트율은 감소하며, 리젝트 내 불순물 함량은 증가한다.

그림 05-07. 클리너 Cascade system의 예



클리너는 스크린과 상호 보완적 역할을 한다. 스크린이 주로 입자의 크기를 기준으로 불순물을 제거하는 반면, 클리너는 입자 간 밀도 차이를 기준으로 불순물을 제거하기 때문이다. 따라서 두 장치를 적절히 조합하여 운용할 경우 불순물 제거 효율이 향상되고, 종이의 품질은 극대화되는 동시에 섬유 손실은 최소화된다.
최근 제지산업에서는 에너지 절감과 공정 단순화를 목표로 고효율·저에너지 클리너, 자동 제어 시스템, 그리고 컴팩트형 클리너 배열이 개발되어 현장에 적용되고 있다. 이러한 기술적 발전은 클리너가 단순한 정선 장치를 넘어, 품질 안정화와 설비 보호는 물론 에너지 효율 향상과 지속가능성 확보를 동시에 달성하는 핵심 공정 장치임을 보여준다.

## 3. 탈기 시스템

### (1) 지료 속 공기와 탈기의 필요성

제지 공정에서 사용되는 지료에는 다양한 형태의 공기가 존재한다. 일반적으로 공기는 자유 공기(free air), 결합 공기(bound air), 그리고 용존 공기(dissolved air)로 구분된다. 자유 공기는 육안으로 관찰 가능한 비교적 큰 기포 형태로 존재하며, 슬러리의 상부로 쉽게 부상하거나 거품 형태로 나타난다. 결합 공기는 미세한 기포가 섬유 사이 또는 표면에 부착된 상태로 존재하여 제거가 상대적으로 어렵다. 용존 공기는 수중에 분자 상태로 용해되어 있는 공기로, 압력 및 온도의 변화에 따라 기포 형태로 재형성될 수 있다[9].
공기는 다양한 경로를 통해 지료에 유입된다. 지료나 희석수가 시스템으로 유입되는 과정에서 외부 공기가 혼입될 수 있으며, 펌프와 같은 고압 장치에서 발생하는 압력 변화로 인해 용존 공기가 기포 형태로 방출되기도 한다. 또한 화학반응(예: 산성 조건에서 탄산칼슘이 분해되면서 발생하는 이산화탄소)이나 미생물 활동에 의해서도 공기가 생성될 수 있다. 이 밖에도 설비의 누설이나 리젝트 배출 과정에서 발생하는 튐 현상 역시 공기 유입의 원인이 된다.
따라서 지료 내 공기를 효과적으로 제거하는 탈기 과정은 제지공정에서 필수적인 단계이다. 탈기를 통해 공기가 제거되면 지료의 유동이 안정화되고 펌프 및 스크린의 운전 효율이 향상되며, 지절 발생 가능성이 감소한다. 또한 종이의 지합이

보다 균일해지고 표면 결함이 줄어들어 최종 제품의 품질이 개선된다. 이와 함께 소포제나 살균제와 같은 화학 약품의 사용량이 감소되고 에너지 손실도 줄어들어, 생산성과 경제성 측면에서도 중요한 이점을 제공한다.

### (2) 탈기장치

탈기장치(deaerator)는 펄프 현탁액에 포함된 공기를 제거하는 장치로, 헨리의 법칙(Henry's law)에 기초하여 작동한다[10]. 헨리의 법칙에 따르면 액체에 용해된 기체의 양은 그 액체와 접하는 기체의 분압에 비례하며, 온도가 상승할수록 기체의 용해도는 감소한다. 따라서 탈기장치는 펄프 현탁액을 진공 상태에 두어 압력을 낮추거나 온도를 조절함으로써 기체의 용해도를 감소시키고, 그 결과 지료 내의 공기를 효과적으로 제거한다.

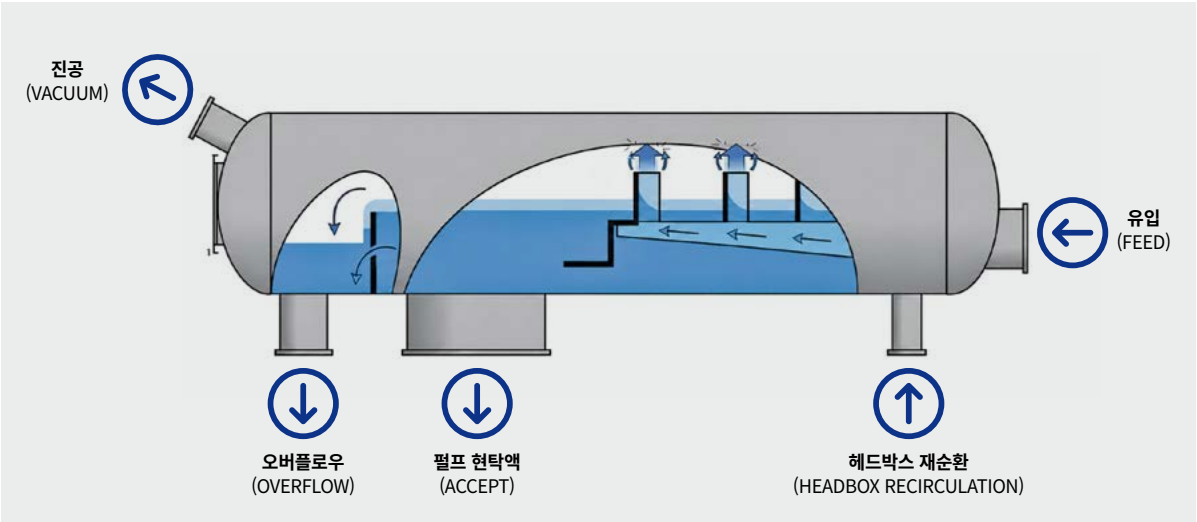
**Henry's Law**

$$c = kp$$

**c** = 액체 속 기체의 용해도 (mol/L)
**k** = 헨리 상수
**p** = 기체의 압력 (atm)

탈기 시스템은 펄프 현탁액에 포함된 자유 공기, 결합 공기, 그리고 용존 공기를 제거하여 지료의 안정성을 확보하고 헤드박스로 균일하게 공급하기 위해 설계된

그림 05-08. 탈기시스템의 기본 구조



장치이다. 일반적으로 탈기 시스템은 그림 05-08과 같이 탈기조(deaeration tank), 분무 노즐(spray nozzle), 충돌면(impingement surface), 진공 펌프(vacuum pump), 그리고 응축기(condenser) 등으로 구성된다[9, 11]. 탈기 과정은 주로 분무(spraying), 충돌(impinging), 비등(boiling)의 세 가지의 물리적·기계적 작용에 의해 이루어진다.

펄프 현탁액은 클리너를 통과한 후 탈기조로 유입된다. 유입된 지료는 먼저 분무 노즐을 통해 미세하게 분산되어 표면적이 극대화되며, 이 과정에서 슬러리 내 용존 공기와 결합 공기가 방출된다. 이후 분무된 지료는 충돌면에 부딪히면서 표면적이 더욱 증가하고, 탈기조 내부의 강한 진공에 노출되어 액체 내부에 용존되어 있던 공기가 비등 현상과 함께 기포로 방출된다. 탈기조 내부의 낮은 압력은 진공 펌프에 의해 유지된다. 공기가 제거된 지료는 탈기장치 하부 배출구를 통해 다음 공정인 스크린으로 이송된다. 탈기장치의 수위를 일정하게 유지하는 것은 아래쪽에 위치한 스크린 펌프에 일정한 수두를 제공하기 위해 매우 중요하다. 이를 위해 일정량 이상의 지료가 항상 넘쳐 흐르도록 하여, 수위를 조절하고, 결과적으로 안정적인 공정을 유지한다.

### (3) 탈기장치의 운전조건과 성능 기준

탈기장치의 성능은 운전조건에 크게 의존한다. 일반적으로 탈기장치는 클리너와 저맥동 스크린 사이에 설치되며, 펄프 현탁액이 충분한 체류 시간을 확보할 수 있도록 설계된다. 통상적인 체류 시간은 약 7~12초이며, 이 범위 내에서 효과적인 기포 제거가 이루어진다. 지료의 농도는 0.5~1.5% 수준으로 유지한다. 이는 헤드박스에서 요구되는 농도 조건과 일치한다. 유입 압력은 약 0.15~0.25 MPa 범위에서 운전된다. 과도한 압력은 불필요한 기포 재형성을 유발할 수 있으므로 안정적인 압력 관리가 중요하다.

탈기장치의 핵심 제어 변수는 진공도이다. 진공도의 설정은 지료 온도와 밀접하게 연관되며, 이상적인 진공도는 해당 온도에서의 수증기압에 소량의 부분 공기압(약 0.8 cm Hg)을 더한 값으로 결정된다. 이러한 조건을 유지하면 지료 내 용존 공기가 효과적으로 방출되며, 추가적인 가열 없이도 높은 탈기 효율을 확보할 수 있다.

초지기의 운전 속도에 따라 요구되는 탈기 성능 기준도 달라진다. 와이어 속도가 1500 m/min 이상인 고속 초지기에서는 협잡 공기(자유 공기와 결합 공기)의 함

량을 0.7% 이하로 관리해야 하며, 특히 미세 기포 형태로 존재하는 공기는 0.2% 이하의 엄격한 관리 기준이 적용된다. 반면, 와이어 속도가 1000~1500 m/min 범위인 경우에는 협잡 공기 함량을 1.4% 이하로 제한하는 것이 일반적인 관리 기준이다. 지료 내 공기 함량이 이 기준을 초과하면 지합 불량, 핀홀 발생, 표면 결함 등이 급격히 증가한다.

운전 조건이 적절히 유지될 경우, 탈기기는 헤드박스로 공급되는 지료의 유동을 안정화시키고, 종이의 지합과 표면 품질을 향상시킨다. 또한 펌프와 스크린의 효율이 확보되어 에너지 소비가 줄어들고, 지절 발생 가능성이 감소하여 생산성이 크게 개선된다.

## 4. 스크린(Screen) 시스템

### (1) 스크린

제지원료에는 다양한 불순물이나 결속섬유가 혼입되어 있으므로, 정선 과정을 통해 이들을 분리·제거하게 된다. 지료 정선에 사용되는 대표적인 장치로는 클리너(cleaner)와 스크린(screen)이 있다. 두 장치는 모두 종이 원료에 포함된 불필요한 이물질을 제거한다는 공통점이 있지만, 작동 원리와 제거 대상에는 차이가 있다.

클리너는 원심력을 이용하는 장치로, 밀도가 높은 이물질을 제거하는 데 효과적이다. 예를 들어 펄프 속에 들어 있는 모래, 금속 조각, 돌 부스러기와 같은 고밀도 이물질은 회전 흐름에 의해 바깥쪽으로 이동하여 원료로부터 분리된다. 따라서 클리너는 주로 무거운 이물질을 제거하는 데 특화된 장치이다. 반면, 스크린은 입자의 크기와 형상을 기준으로 이물질을 걸러낸다. 즉, 원료 속의 섬유 다발

**도표 05-01.** 스크린 타입의 비교

| 스크린 타입 | 조대스크린 | 미세스크린 | Approach |
|---|---|---|---|
| 스크린 형태 | 홀타입 | 슬롯타입 | Precise slots |
| 홀 및 슬롯 사이즈 | 1.5~3.0 mm | 0.15~0.35 mm | 0.10~0.25 mm |
| 지료 농도 | 1~3% | 0.8~1.2% | 0.3~0.8% |
| 제거 대상 | Knots, shives, debris | Stickies, dirt, fraction | Final, protection |
| 효율 | 95~98% | 90~95% | 85~92% |

(shive), 점착성 물질(stickies), 플라스틱 조각과 같이 크기가 크거나 형태가 불규칙한 이물질을 걸러내는 장치이다. 이와 같이 클리너와 스크린은 서로 다른 원리에 기반하여 작동하며 상호 보완적인 관계를 형성한다. 따라서 실제 제지 공정에서는 두 장치를 병행하여 사용함으로써 효과적인 정선이 이루어진다.

제지 공정에서 스크린은 여러 단계에 걸쳐 순차적으로 배치되며, 각 단계는 서로 다른 역할을 수행한다. 슬러리 상태의 지료는 먼저 조대 스크린으로 큰 오염물과 섬유 다발을 제거한다. 이후 미세 스크린 단계에서 상대적으로 작은 불순물과 미세한 이물질이 추가적으로 걸러진다(도표 05-01). 필요에 따라 이어지는 분획(fractionation) 또는 추가 스크리닝 단계에서는 장섬유와 단섬유가 구분되어 제품의 용도와 특성에 맞게 활용될 수 있도록 조정된다.

### (2) 스크린의 종류 및 운전 영향인자

스크린은 구조와 적용 위치에 따라 여러 가지 형태로 나뉜다. 일반적인 설계는 그림 05-09와 같이 스크린 하우징 내부에 원통형 바스켓을 설치하는 방식이다. 사용되는 스크린 바스켓(screen basket)의 구조에 따라 홀 타입(hole type)과 슬롯 타입(slot type)으로 구분할 수 있다(그림 05-10). 홀 타입은 원형의 개구부를 가지고 있으며, 비교적 큰 이물질을 제거하는 데 적합하여 조대 스크린에 주로 사용된다. 반면 슬롯 타입은 가늘고 긴 틈 형태의 개구부를 가져 작은 이물질을 효과적으로 제거할 수 있어, 미세 스크린과 같이 고품질이 요구되는 공정에 주로 적용된다[14, 15]. 각 개구 형태는 장단점이 있으므로 목적에 따라 적합한 타입을 선택해야 한다. 섬유 분급에 사용할 경우에는 홀 스크린 플레이트는 길고 유연한(long, flexible) 섬유의 분획에 더 적합한 반면, 슬롯 스크린 플레이트는 더 두껍고, 강성이 높은 짧은(thicker, stiffer, shorter) 섬유의 분리에 더 우수한 성능을 보인다[16, 17].

스크린의 흐름 방식은 그림 05-11과 같이 내부에서 외부로 흐르는 아웃플로우형(outflow) 혹은 원심력형, 외부에서 내부로 흐르는 인플로우형(inflow) 혹은 구심력형, 그리고 이들 두 가지를 혼합한 복합형으로 구분된다. 원심력형은 가장 일반적으로 사용되는 방식이다. 구심력형은 헤드박스 스크린에 적용하면 원심력에 의해 무거운 오염물이 스크린 바깥쪽으로 멀어져 스크린 손상을 줄이는 효과가 있다. 혼합형은 내부와 외부 흐름을 동시에 활용하여 단위 공간당 처리 효율을 향상시킬 수 있는 구조이다[18].

그림 05-09. 스크린의 구조 및 내부 모식도

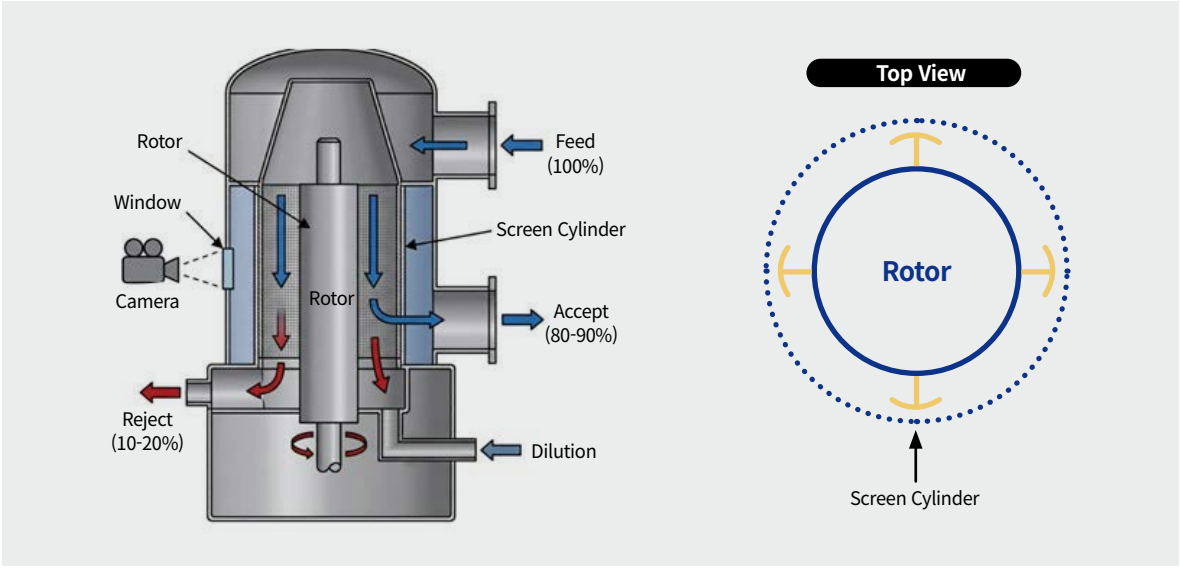
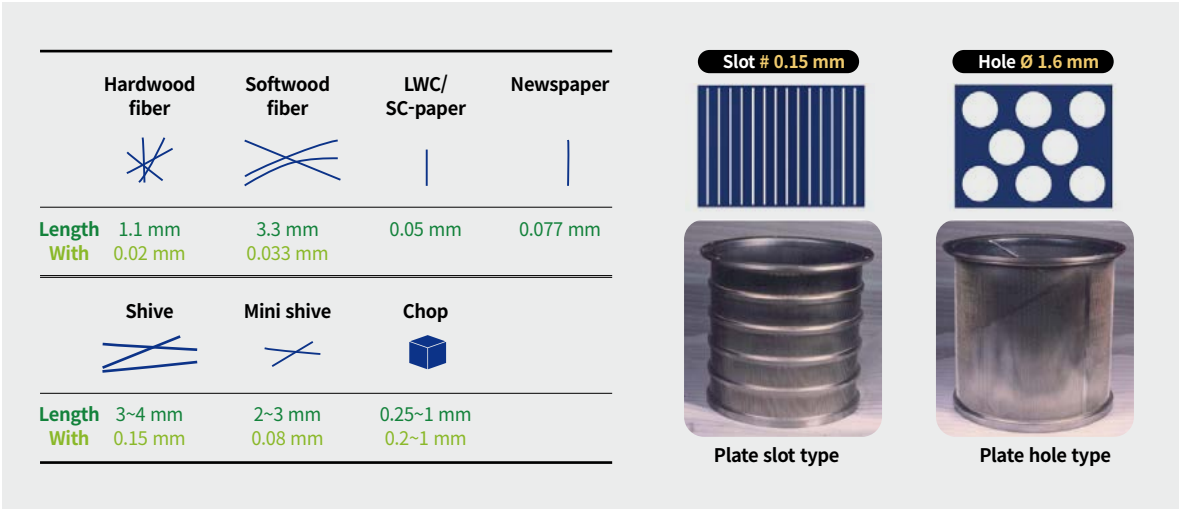



그림 05-10. 슬롯 및 홀 플레이트 이미지




스크린의 성능을 결정짓는 중요한 또 다른 요소는 로터의 형태이다(그림 05-12). 로터는 회전하면서 난류와 맥동을 발생시켜 바스켓 구멍에 부착된 이물질을 제거하고 섬유가 원활하게 통과하도록 돕는다. 포일형(foil) 로터는 압력 펄스를 효과적으로 발생시켜 저농도 공정에 적합하며, 범프형(bump) 로터는 둥근 돌기에 의해 비교적 부드러운 맥동을 주기 때문에 주로 미세스크린에 사용된다. 또한 로브형(lobes)이나 S형(step)로터는 큰 진폭의 맥동을 발생시켜 중농도 펄프 처리에 적합하다.

그림 05-11. 스크린의 흐림 방식에 따른 분류

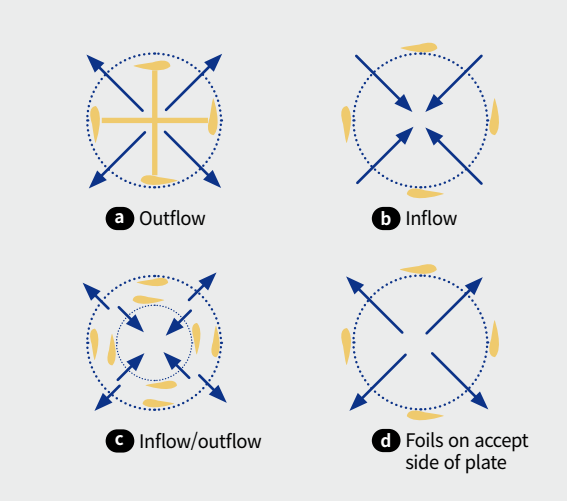
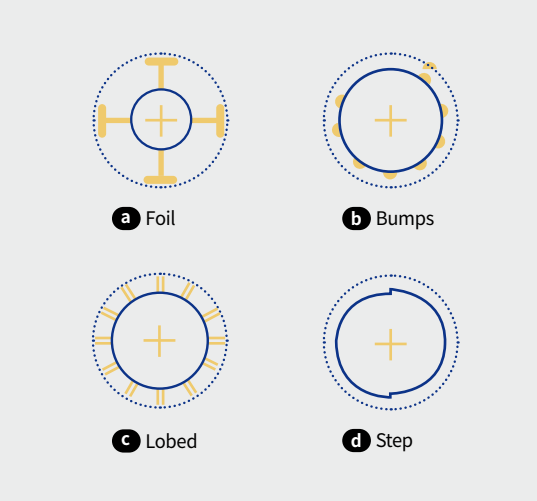



그림 05-12. 스크린 로터에 따른 분류




이러한 스크린은 단일 장치로만 운전되는 것이 아니라, 여러 단계로 구성된 시스템으로 운영되기도 한다. 일반적으로 1차 스크린에서 큰 불순물을 제거한 후, 그 리젝트를 2차 스크린으로 보내 잔존하는 유효 섬유를 회수한다. 필요에 따라 3차 스크린까지 연계하여 품질을 향상시키고 섬유 손실을 최소화하기도 한다[14].

스크린 효율에 영향을 미치는 주요 요인으로는 원료의 농도, 점도, 여수도 등이 있다. 점착성 이물질의 함량이 높으면 바스켓 막힘이 쉽게 발생하며, 섬유 다발의 비율이 높으면 리젝트 발생량이 증가할 수 있다. 또한 바스켓의 슬롯 폭이나 와이어 두께와 같은 설계 요소 역시 스크린 성능에 중요한 영향을 미친다. 슬롯 폭이 좁을수록 미세한 불순물까지 효과적으로 제거할 수 있지만, 막힘이 발생하기 쉽고 압력 손실이 증가한다. 반대로 슬롯 폭이 넓으면 막힘은 감소하지만 작은 이물질이 통과하여 분리 효율이 저하될 수 있다. 슬롯 스크린에서 지지대를 감싸는 프로파일 와이어(profile wire) 두께 또한 중요한 설계 변수이다. 와이어가 두꺼우면 내구성은 향상되지만 개방 면적이 감소하여 처리량이 줄어들고, 반대로 얇으면 처리량은 증가하지만 구조적 강도가 낮아져 마모가 빠르게 진행될 수 있다.

결론적으로 스크린의 종류는 바스켓 구조, 흐름 방식, 로터 형태, 시스템 구성에 따라 다양하게 구분되며, 운전 영향 인자는 차압, 로터 회전 속도, 리젝트율, 원료 특성, 바스켓 설계 요소 등으로 정리할 수 있다. 따라서 실제 운전에서는 이러한 요소들을 종합적으로 고려하여 섬유 손실을 최소화하는 동시에 불순물 제거 효율을 극대화하는 것이 중요하다.

### (3) 스크린 원리

스크리닝에서 불순물이 제거되는 과정은 크게 두 가지 기본 메커니즘으로 설명할 수 있다. 첫 번째는 장벽 스크리닝(barrier screening)이고, 두 번째는 확률 스크리닝(probability screening)이다(그림 05-13)[19-21].

장벽 스크리닝은 가장 단순하면서도 직관적인 분리 원리이다. 스크린 바스켓의 슬롯이나 홀은 일정한 크기를 가지므로, 그보다 큰 입자는 물리적으로 통과할 수 없어 자동으로 걸러져 리젝트로 배출된다. 예를 들어, 목재 해리 과정에서 남은 큰 조각이나 샤이브(shive)와 같은 미해리 입자는 구멍의 크기를 초과하기 때문에 절대로 억셉트로 넘어갈 수 없다. 이 메커니즘은 입자의 배열이나 접근 각도와 관계없이 작동하기 때문에 이론적으로 100%의 차단 효과를 가진다.

확률적 스크리닝은 입자의 크기가 슬롯이나 홀보다 절대적으로 크지 않지만, 배열 방향이나 형태에 따라 통과 여부가 달라지는 분리 원리이다. 예를 들어, 납작한 플라스틱 조각이나 얇은 점착성 이물질(stickies)은 구멍보다 한쪽 치수가 작을 경우 특정한 각도로 접근하면 통과할 가능성이 있다. 그러나 입자의 방향이 맞지 않거나 다발 형태로 뭉쳐 있을 경우에는 통과하지 못하고 리젝트로 배출된다. 따라서 확률적 스크리닝은 입자의 배열, 접근 각도, 모양, 유동 조건 등에 따라 결과가 달라진다. 이 때문에 '확률적'이라는 명칭이 사용된다.

실제 스크리닝 공정에서는 이 두 가지 메커니즘이 동시에 작용한다. 바스켓 구멍보다 큰 이물질은 장벽 효과에 의해 확실히 제거되며, 크기가 임계범위에 있는 입자는 유동 조건과 배열 상태에 따라 통과 여부가 결정된다. 또한 로터에 의해 발생하는 난류와 압력 맥동은 이러한 확률적 요인에 영향을 미쳐, 섬유의 통과를 촉진하고 이물질은 리젝트로 배출되도록 유도한다.

그림 05-14는 스크린 로터가 회전할 때 스크린 바스켓 표면에 발생하는 압력 변화를 나타낸다. 로터 포일이 스크린 플레이트 위를 지나갈 때 유체의 흐름과 압력이 주기적으로 변동한다. 포일이 접근하여 스크린을 덮는 순간 양압(positive pressure)이 발생하며, 이에 따라 펄프 현탁액은 스크린 바스켓 방향으로 밀려들어가 섬유의 개구부 통과가 촉진된다. 반대로 포일이 스크린을 지나 이동하면 순간적으로 음압(negative pressure)이 형성된다. 이 음압은 스크린 개구부 근처에 축적된 섬유다발이나 이물질을 뒤쪽으로 빨아들이는 효과, 즉 백플러싱(backflushing)을 일으킨다. 그 결과, 개구부의 막힘이 방지되고, 지속적으로 개

그림 05-13. 장벽 스크린과 확률적 스크린의 비교

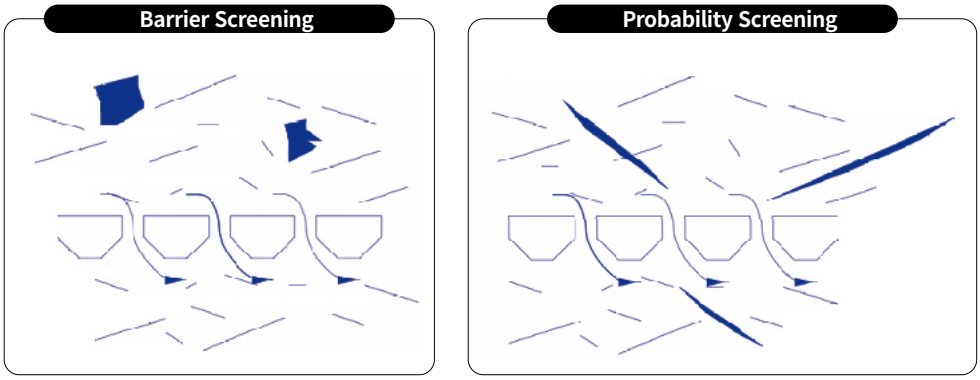
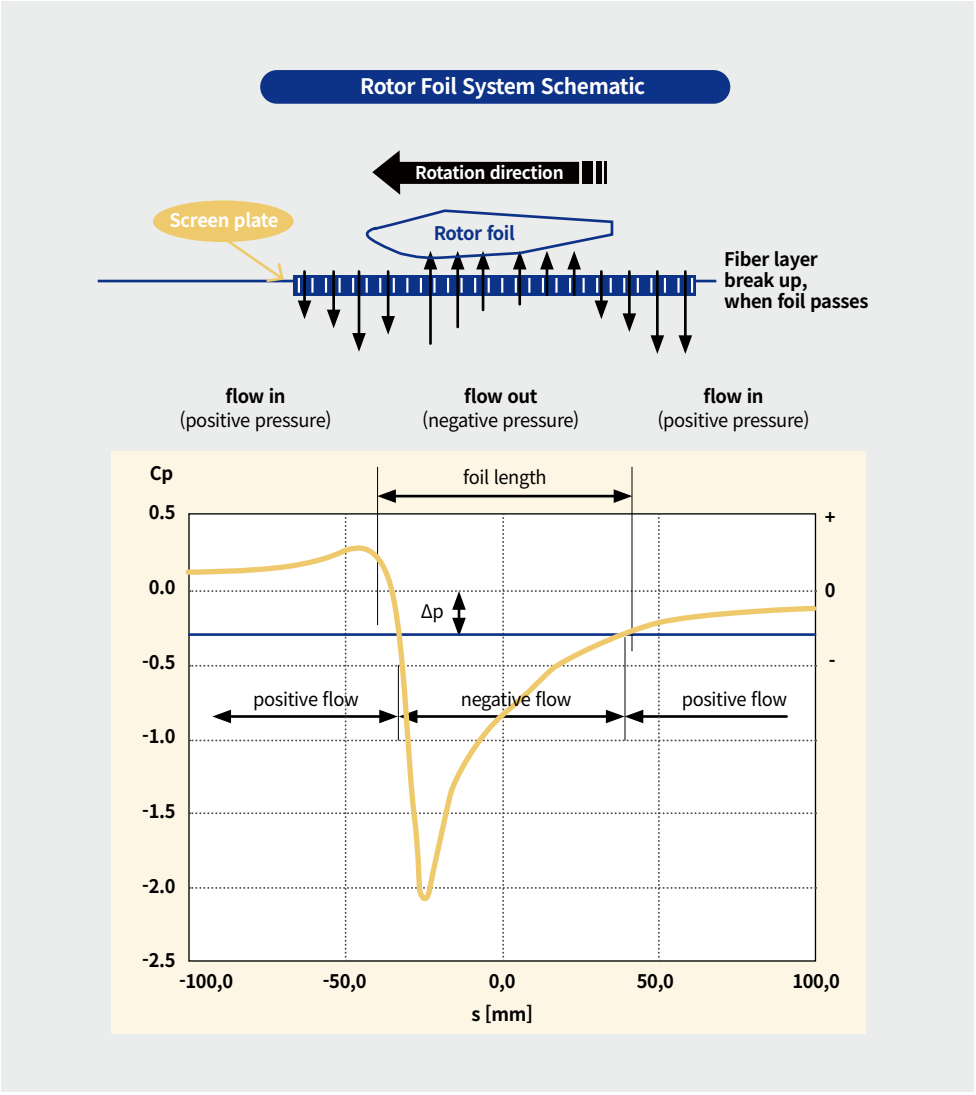



그림 05-14. Foiled rotor 주변부의 압력 분포



방된 상태가 유지된다. 따라서 로터의 설계와 회전 속도는 스크린의 처리 용량과 이물질 제거 효율을 동시에 결정하는 핵심 인자가 된다[17, 22].

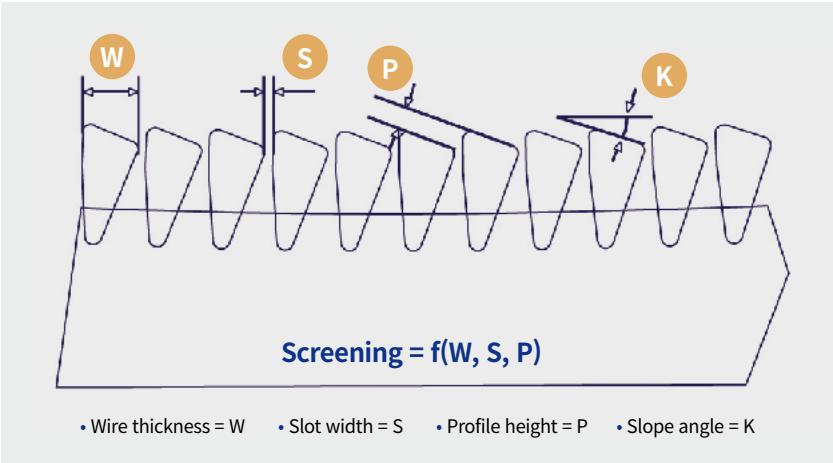
그림 05-14의 아래 그래프는 포일의 길이방향 위치(s)에 따른 압력 계수(Cp)의 변화를 나타낸 것이다. 포일 전방에서는 압력이 상승하여 양압 영역이 형성되고, 포일 중앙 부근에서는 압력이 급격히 감소하여 강한 음압이 발생한다. 이후 포일이 통과하면 다시 압력이 회복되면서 양압 상태로 전환된다. 즉, 로터의 회전에 의해 스크린 표면에서는 양압–음압–양압이 주기적으로 반복되는 압력 맥동(pulsation)이 형성된다.

그림 05-15는 슬롯형 스크린 바스켓의 성능을 결정짓는 네 가지 주요 설계 인자를 보여주고 있다.

첫 번째 요소는 와이어 두께(wire thickness, W)로, 이는 슬롯을 형성하는 금속 와이어의 두께를 의미한다. 와이어가 두꺼울수록 구조적 강도와 내구성이 향상되어 수명이 길어지지만, 개방 면적이 감소하여 처리용량이 줄어드는 단점이 있다. 반대로 와이어가 얇으면 개방 면적이 넓어져 처리량은 증가하지만, 마모나 손상에 취약하여 내구성이 저하될 수 있다. 두 번째 요소는 슬롯 폭(slot width, S)이다. 슬롯 폭은 실제로 이물질과 섬유를 분리하는 기준 크기로 작용한다. 슬롯 폭이 좁을수록 더 작은 이물질까지 효과적으로 걸러낼 수 있어 정선 효율은 향상되지만, 막힘 발생 가능성이 커지고 압력 손실이 증가할 수 있다. 반대로 슬롯 폭이 넓으면 막힘은 감소하지만 작은 불순물이 그대로 통과하여 분리 효율이 저하된다. 세 번째 요소는 프로파일 높이(Profile height, P)이다. 프로파일 높이는 스크린 와이어의 상부에서 슬롯 입구까지 형성된 경사면의 높이를 의미한다. 프로파일 높이가 적절하게 형성되면 펄프 현탁액은 슬롯 입구에서 급격한 방향 전환 없이 자연스럽게 슬롯 내부로 유도된다. 이 과정에서 유체의 흐름이 안정적으로 유지되고, 슬롯 입구에서 발생하는 와류나 국부적인 압력 손실이 감소한다. 또한 섬유가 슬롯 입구에 집중되거나 뭉치는 현상이 줄어들어 슬롯 막힘(clogging)이 감소하고, 결과적으로 처리용량과 스크리닝 효율이 향상될 수 있다.

반대로 프로파일 높이가 너무 낮으면 슬롯 입구가 급격한 형상을 이루게 된다. 이 경우 펄프 현탁액은 짧은 거리에서 갑자기 방향을 바꾸어 슬롯으로 유입되므로 유동이 불안정해지고, 슬롯 입구에서 난류와 압력 손실이 증가하게 된다. 또한 섬유 다발이나 이물질이 슬롯 입구에 걸릴 가능성이 높아져 막힘이 쉽게 발생하며, 처리용량과 스크리닝 효율이 저하될 수 있다. 따라서 프로파일 높이는 단순히 슬

그림 05-15. Screening=f(W,S,P)




롯의 형상을 결정하는 요소가 아니라, 슬롯 입구에서의 유동 특성과 압력 손실을 조절하여 스크린의 처리 성능을 좌우하는 중요한 설계 변수라고 할 수 있다.
종합하면, 스크리닝의 성능은 와이어 두께, 슬롯 폭, 프로파일 높이, 경사각이라는 네 가지 설계 인자의 조합에 의해 결정된다. 따라서 스크린을 설계하거나 운전 조건을 조정할 때는 이 네 요소의 균형을 종합적으로 고려해야 섬유 손실을 최소화하면서도 이물질 제거 효율을 극대화할 수 있다[23, 24].

### (4) 스크리닝 시스템

스크리닝은 단일 장치만으로 운전되기도 하지만, 실제 제지 공정에서는 여러 개의 스크린을 다단계로 배치하여 스크리닝 시스템을 구성하는 것이 일반적이다. 이는 원료에 섞여 있는 불순물의 종류와 크기가 다양할 뿐 아니라, 동시에 유효 섬유의 손실을 최소화하기 위해서이다.
가장 기본적인 구성은 1차 스크린(primary screen, P)과 2차 스크린(secondary screen, S)으로 이루어진다. 1차 스크린에서는 원료 내에 포함된 큰 이물질이나 섬유 다발과 같은 주요 불순물이 우선적으로 제거된다. 그러나 이 과정에서 일부 유효 섬유가 리젝트로 함께 배출될 수 있으므로, 이를 회수하기 위해 2차 스크린이 설치된다. 2차 스크린은 1차 스크린의 리젝트를 재처리하여 남아 있는 섬유를 다시 억셉트로 회수함으로써 전체 섬유 수율을 향상시키는 역할을 한다. 경우에 따라서는 그림 05-16과 같이 3차 스크린 (tertiary screen, T)까지

설치하여 품질을 더욱 안정화하기도 한다. 이러한 다단계 구성 방식은 멀티스테이지 스크리닝(multi-stage screening)이라 한다[23, 25].

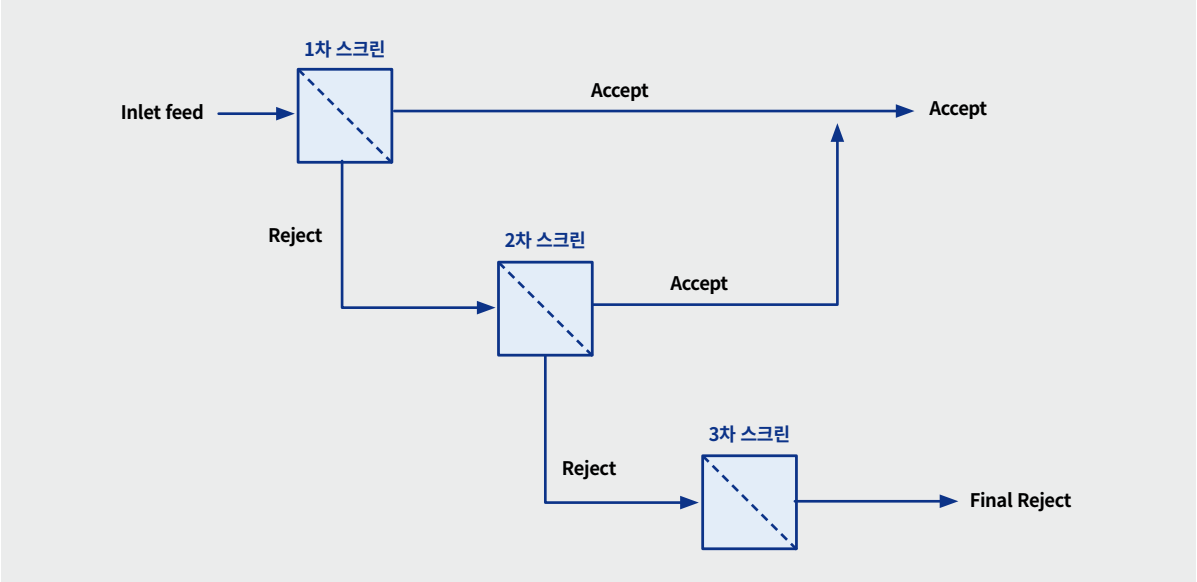
스크리닝 시스템은 공정 내 설치 위치에 따라 수행하는 역할이 달라진다. 펄핑 직후에는 조대 스크린이 설치되어 큰 불순물을 우선적으로 제거하고, 이어지는 단계에서는 정선 스크린을 통해 보다 작은 불순물을 분리한다. 경우에 따라 분획 스크리닝(fractionation)이 추가되어 장섬유와 단섬유를 분리함으로써 종이의 물성을 목적에 맞게 설계하는 데 활용되기도 한다.

마지막으로, 헤드박스로 지료가 공급되기 직전에는 어프로치 플로우 스크린(approach flow screen)이 설치되어 잔존 이물질을 최종적으로 제거한다. 이를 통해 초지기의 안정적인 주행성을 확보하고 최종 제품의 품질을 보장할 수 있다.

시스템을 구성할 때는 리젝트 처리 방식 또한 중요한 고려 요소이다. 일반적으로 리젝트는 희석수(dilution water)를 혼합하여 농도를 낮춘 후, 다른 단계의 스크린으로 이송하여 잔존 섬유를 회수한다. 이러한 과정을 통해 섬유 손실을 최소화하는 동시에, 리젝트 내 오염물 농도는 점차 증가하여 최종적으로는 불순물만이 농축되도록 한다.

결론적으로, 스크리닝 시스템은 단일 장치의 성능에 의존하기보다 여러 단계의 장치를 적절히 조합하여 불순물을 효과적으로 제거하고 섬유 손실을 최소화하는

그림 05-16. 멀티스테이지 스크리닝 시스템 모식도



데 그 목적이 있다. 따라서 원료의 특성과 목표 제품 품질에 따라 스크리닝 시스템의 구성 단계, 리젝트 처리 방식, 그리고 전후 공정과의 연계를 종합적으로 고려하여 설계하는 것이 중요하다.

## 참고문헌


[1] Burt, M. P., & Thomas, P. R. (2002). Analysis of the hydrocyclone stock cleaning process for wasted fibre in a paper mill. Journal of Cleaner Production, 10(6), 573–579.

[2] Zhang, Y., Cai, P., Jiang, F., Dong, K., Jiang, Y., & Wang, B. (2017). Understanding the separation of particles in a hydrocyclone by force analysis. Powder Technology, 322, 471–489.

[3] Liu, P., et al. (2024). Study on the separation performance of a two cylindrical section hydrocyclone. Industrial & Engineering Chemistry Research, 63, 700–714.

[4] Liu, L., Sun, Y., Zhao, L., Wang, Y., Kleinmeyer, Z., Yang, Q., & Rosso, D. (2026). Mini-hydrocyclones in water: State-of-the-art. Green Chemical Engineering, 7(1), 17–37.

[5] Chen, S., Li, D., Li, J., & Zhong, L. (2024). Optimization design of hydrocyclone with overflow slit structure based on experimental investigation and numerical simulation analysis. Scientific Reports, 14, 18410.

[6] Fu, S., Qian, Y., Yuan, H., We, M., Hua, W., & Jian, M. (2020). Study on the performance of a hydrocyclone used for recycling the waste SCR catalyst. Journal of Environmental Chemical Engineering, 8(5), 104349.

[7] Andersson, R. (2010). Evaluation of two hydrocyclone designs for pulp fractionation (Licentiate thesis, KTH Royal Institute of Technology).

[8] Jokinen, H. (2007). Screening and cleaning of pulp: A study to the parameters affecting separation (Doctoral dissertation, University of Oulu).

[9] Helle, T. M. K., Meinander, P. O., Nykänen, R. J., Molander, K. S., & Paulapuro, H. V. (1999). Air removal mill trials using pump deaerator. Tappi Journal, 82(6), 146–149.

[10] Roger, V. J. (2019). "Principles of gas solubility in water: Henry's law," in Encyclopedia of Water: Science, Technology, and Society. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2019, pp. 1–7.

[11] Stoor, T. (2006). Air in pulp and papermaking processes (Doctoral dissertation, University of Oulu, Finland).

[12] McDonald, S (1993). Improving screening and cleaning efficiencies: Short Course, Tappi press, Atlanta, GA.

[13] A. W. Krotscheck, in Handbook of Pulp (Ed: H. Sixta), Wiley VCH, Weinheim, Germany 2006, Ch.6.

[14] Germgård, U., Sjöstrand, B., & Fiskari, J. (2022). Screening of chemical pulp: Revisiting technology options and state-of-the-art equipment. Canadian Journal of Chemical Engineering, 101(10), 5643–5655.

[15] Ljokkoi, R., Pikka, O., Larsson, P.-E., & Gullichsen, J. (2000). Screening and fractionation. In J. Gullichsen & C.-J. Fogelholm (Eds.), Chemical pulping (Ch. 8). Fapet Oy.

[16] Olson, J. A. (2001). Fibre length fractionation caused by pulp screening: Slotted screen plate. Journal of Pulp and Paper Science, 27(8), 255–262.

[17] Borschke, D., Bergfeld, D., & Friedrich, H. (1998). Screening operation in kraft pulping. In Proceedings of the 52nd Appita Annual Conference (p. 279). Brisbane, Australia.

[18] Olson, J., Allison, B., et al. (2001). Fibre fractionation for high porosity sack kraft paper. Tappi Journal, 84(6), 1–10.

[19] Gallagher, B. J. (1999). Improving screening and cleaning efficiencies: Short course. Tappi Press.

[20] Höke, U., & Schabel, S. (2009). Recycled fibre and deinking. Paper Engineers Association / Paperi ja Puu.

[21] Olson, J. (2020). Some key aspects on screening of chemical pulp to fractionate fines. RISE Bioeconomy Report.

[22] Hooper, A. W. (1983). Screening of chemical pulp. In T. M. Grace, E. W. Malcolm, & M. J. Kocurek (Eds.), Pulp and paper manufacture (Vol. 5, p. 318). TAPPI Press.

[23] Jokinen, H. (2007). Screening and cleaning of pulp — A study of the parameters (Doctoral dissertation, University of Oulu).

[24] Halonen, A. (2005). Modelling the maximum capacity of a pulp pressure screen (Master's thesis, University of British Columbia).

[25] Olson, J. (2000). Optimization of multi-stage screening for fibre fractionation. Journal of Pulp and Paper Science, 26(3), 113–119.



**이 지 영** 경상국립대학교 교수

**2006 – 현재** 경상국립대학교 환경재료과학과 교수
**2022 – 2024** 경상국립대학교 인재개발원 원장
**2009 – 현재** 한국펄프·종이공학회 이사
**2022 – 2022** 한국공업화학회 분과회장
**2024** 한국펄프·종이공학회 학술상 본상 수상
**2014** 한국과학기술단체총연합회
제24회 과학기술 우수논문상 수상

paperyjy@gnu.ac.kr

# 6

# 공정조절제의 활용

공정조절제 평가 실험 (사진제공_무림P&P)

# 1. 보류 향상제

## (1) 서론

제지공정은 셀룰로오스 섬유와 기타 첨가제들로 구성된 지료가 탈수되어 종이로 전환되는 물리화학적 과정으로 정의된다. 이 과정에서 보류(retention)는 생산성과 제품 품질을 결정하는 핵심 요소로 작용한다. 특히 현대 제지산업에서 초지속도 향상과 원가 절감에 대한 요구가 지속적으로 증가함에 따라 보류를 증가시킬 수 있는 기술의 중요성이 더해지고 있다. 보류향상제(retention aid)는 펄프 슬러리 내의 미세섬유, 충전물 및 첨가제를 와이어 상에 효과적으로 잔류시키는 역할을 하여 원료 손실을 줄이고 원지의 균일성을 높이는 데 이바지한다. 본 장에서는 보류도의 정의와 중요성, 보류 메커니즘 등을 고찰하고자 한다.

## (2) 보류도의 정의

보류도란 제지공정에서 지료 속에 포함된 섬유, 미세분, 충전물 및 각종 첨가제가 와이어 위에 남아 최종적으로 종이에 포함되는 비율을 의미한다. 이는 단순히 원료의 잔존량을 나타내는 지표에 그치지 않고, 제지공정의 경제성, 제품 품질, 생산성, 환경적 영향을 종합적으로 반영하는 핵심 관리 지표이다.
제지공정의 보류도는 분석 기준에 따라 크게 총괄보류도, 일과보류도, 일과회분보류도의 세 가지로 구분된다. 첫째, 총괄보류도(overall retention, OR)는 전체 투입원료 중에서 최종 종이에 잔류한 원료의 비율을 의미한다. 이는 공정 전체의 물질 이용 효율을 평가하는 지표로 사용된다. 둘째, 일과보류도(one pass retention, OPR)는 헤드박스에서 사출된 지료 중 와이어 상에 잔류하는 원료의 비율을 의미한다. 이는 주로 지료 조성분의 보류특성을 평가하는데 활용된다. 세째, 일과회분보류도(one pass ash retention, OPAR)는 습부 공정에서 충전물의 일과보류도를 의미한다. 이들 보류도의 일반적인 보류도 식은 다음과 같다.

### 1) 총괄보류도

총괄보류도는 전체 투입된 원료의 총량 대비 최종적으로 종이제품으로 생산된 양

을 의미하며, 아래 식 1과 같이 구할 수 있다.

$$\text{Overall retention(OP)} = \frac{W_{OUT}}{W_{IN}} \times 100 \quad \text{식 1}$$

여기에서, $W_{OUT}$는 최종 종이에 잔류한 고형분(섬유, 충전물 등) 질량이며, $W_{IN}$은 공정에 투입된 전체 고형분 질량이다. 총괄보류도는 공정에 투입된 원료 중 제품으로 전환된 비율을 의미하므로 원료의 경제적 활용수준이나 폐기물로 버려지는 원료의 비율을 평가하는 수치이다.

### 2) 일과보류도

일과보류도는 헤드박스와 백수의 농도로부터 계산하는 것이 일반적이다. 즉,

$$\textit{One pass retention (OPR)} = \left(\frac{C_{HB} - C_{WW}}{C_{HB}}\right) \times 100 \quad \text{식 2}$$

여기에서 $C_{HB}$는 헤드박스에서 와이어로 공급되는 지료의 농도, $C_{WW}$는 백수(white water)의 농도이다. 엄밀한 의미에서 일과보류도는 헤드박스에서 사출되는 원료의 질량에 대한 쿠치에서 프레스로 이전되는 원료 질량의 백분율로 산출되어야 하지만, 측정의 편의를 위해 헤드박스와 백수의 농도를 사용하게 된다. 이는 원료의 질량 데이터를 이용하여 계산된 값보다는 약 0.95배 정도로 조금 작지만, 경향을 파악하는 데는 매우 편리하여 널리 활용되고 있다.

### 3) 일과회분보류도

$$\textit{One pass ash retention (OPAR)} = \left(\frac{A_{HB} - A_{WW}}{A_{HB}}\right) \times 100 \quad \text{식 3}$$

일과보류도는 일반적으로 전체 지료 조성분을 대상으로 계산하는 것이 일반적이지만 경우에 따라서 각 조성분의 일과보류도가 필요할 수도 있다. 예를 들어 회분의 종류가 변경되었을 경우 기존에 사용하던 회분에 비해 새로이 도입된 회분의 보류도가 어떤지 궁금하다면 회분의 일과보류도가 측정되어야만 한다. 일과회분

보류도는 위 식과 같이 헤드박스 지료와 백수의 회분농도를 측정하고 이로부터 계산할 수 있다. 위 식에서 $A_{HB}$는 헤드박스 지료 내 충전물(회분)의 농도, $A_{WW}$는 백수 내 충전물의 농도이다. 이는 충전물의 보류 정도를 별도로 평가할 때 사용된다.

### (3) 보류도의 중요성

보류도는 단순히 원료의 잔존 비율을 나타내는 지표에 그치지 않고, 제지산업의 경제성, 품질, 생산성, 환경성을 종합적으로 평가할 수 있는 핵심 관리 요소이다.
첫째, 경제적 측면에서 보류도가 높을수록 투입된 원료가 종이에 잘 남아 있다는 의미이므로 원료의 손실을 줄일 수 있다. 이는 곧 원가 절감으로 이어지며, 자원 활용 효율성을 극대화한다. 반대로 보류도가 낮으면 원료가 폐기물로 유실되거나 재순환 과정에서 추가적인 에너지와 비용이 발생한다.
둘째, 품질적 측면에서 보류도는 종이의 균일성과 직결된다. 충전물이나 미세분이 고르게 보류되지 않으면 종이의 두께 방향으로 불균일성이 발생하고, 이는 인쇄적성이나 강도, 불투명도 등에 문제를 야기할 수 있다. 따라서 보류도를 적절히 관리하는 것은 종이의 품질을 안정적으로 확보하는 데 필수적이다.
셋째, 공정 안정성 측면에서 보류도가 높으면 탈수 효율이 향상되어 초지기 속도를 높일 수 있고, 에너지 사용량을 줄일 수 있다. 반면 보류도가 낮으면 백수 내 고형분 농도가 높아져 순환수 처리 비용이 증가하고, 초지기 운전의 안정성이 저하될 수 있다.
넷째, 환경적 측면에서 보류도가 낮으면 원료가 폐수로 유출되어 수질 오염을 유발하고, 슬러지 발생량이 증가한다. 이는 환경 규제 강화와 맞물려 기업의 부담으로 작용할 수 있다. 따라서 보류도를 높이는 것은 환경 부담을 줄이고 지속가능한 제지 공정을 실현하는 데 중요한 역할을 한다.

### (4) 보류제 종류

보류제는 그 화학적 특성과 작용 방식에 따라 여러 종류로 구분된다. 주요 보류제는 다음과 같다.

### 1) 양이온성 폴리아크릴아마이드(cationic polyacrylamide, C-PAM)

이는 보류뿐만 아니라 탈수 촉진제 역할을 겸하는 경우가 많고, 가장 널리 사용되는 고분자 보류제이다. C-PAM은 아크릴아마이드(acrylamide) 단량체에 양이온성 단량체를 공중합하여 제조된다. 이 고분자는 길고 유연한 사슬 구조를 가지며, 양전하를 띠는 작용기를 통해 음전하를 띠는 섬유, 충전물, 미세분과 강하게 결합할 수 있다. 분자량은 수십만에서 수천만 g/mol까지 다양하며, 용도에 따라 조절된다. 전하밀도는 낮음, 중간, 높음으로 구분되며, 지료의 특성에 따라 선택된다. C-PAM은 일반적으로 액상 또는 분말 형태로 공급되지만, 수용성이기 때문에 물에 쉽게 용해되어 지료에 균일하게 분산된다. 분자량이 높을수록 점도가 증가하며, 혼합 및 투입 조건에 영향을 준다.

### 2) 음이온성 폴리아크릴아마이드(anionic polyacrylamide, A-PAM)

A-PAM는 아크릴아마이드(acrylamide) 단량체에 음전하를 띠는 작용기(예: 아크릴산, 메타크릴산 등)를 공중합하여 제조한 고분자 응집제이다. 제지공정에서는 주로 보조 보류제, 탈수 촉진제, 또는 백수 처리제로 사용되며, 단독 보류제로는 사용 빈도가 낮다. 분자량은 수십만에서 수천만 g/mol까지 다양하며, 용도에 따라 조절된다. 전하밀도는 낮음, 중간, 높음으로 구분되며, 용도에 따라 선택된다. A-PAM은 일반적으로 액상 또는 분말 형태로 공급되지만, 수용성이므로 물에 쉽게 용해되어 지료나 폐수에 쉽게 분산된다. 음전하를 띠므로 양전하 입자와 응집이 가능하고 분자량이 높을수록 점도가 증가하며, 혼합 조건에 영향을 준다.

### 3) 폴리대드맥(poly-diallyldimethylammonium chloride, poly-DADMAC)

Poly-DADMAC은 4급 암모늄기를 포함한 양이온성 고분자로, 강한 양전하를 띠며 수용성이다. 일반적으로 저분자량에서 중분자량으로 공급되며, 전하밀도가 매우 높다. 전하 조절제 및 초기 응집제로 사용되어 지료의 전하 균형을 맞추고, 보류제의 작용을 보조한다. 백수처리 및 슬러지 응집에도 활용되고 폐수 내 고형분 제거에 효과적이다.

### 4) 폴리에틸렌이민(polyethyleneimine, PEI)

PEI는 다량의 1차, 2차, 3차 아민기(-$NH_2$, -NH-, -N<)를 포함하고 있는 고분자로, 매우 강한 양전하 특성을 가진다. 제지공정에서는 주로 전하조절제(charge control agent) 및 보류보조제(retention aid cofactor)로 사용된다. 또한 백수 내 음이온성 저해물질(anionic trash)을 중화하여, 백수의 수질을 개선하고, 첨가제의 손실을 줄인다.

### 5) 폴리에틸렌 옥사이드(polyethylene oxide, PEO)

PEO는 비이온성 고분자로, 에틸렌 옥사이드를 중합하여 제조된다. 전하를 띠지 않아 지료 내 이온성 물질의 농도가 높은 조건에서도 안정적으로 작용하고, 초고분자량 제품이 많아 긴 사슬 구조로 인해 강력한 가교 효과를 발휘한다. 물에 잘 녹아 지료 내에 균일하게 분산된다. PEO는 긴 고분자 사슬을 이용해 섬유, 미세분, 충전물을 서로 연결하는 가교 응집을 유도하고 특히 재생섬유를 많이 사용하는 지료의 경우 용수의 전기전도도가 높을 뿐 아니라 미세분과 충전물이 많아 보류가 어려울 때 PEO가 효과적이다. PEO는 단독으로 사용되기보다는 cofactor(공조제)와 함께 사용될 때 효과가 극대화된다. Cofactor로는 페놀포름알데히드 수지(phenolic resin), 레진계 고분자 등이 사용된다. 이 시스템에서는 cofactor가 먼저 섬유 표면에 흡착한 뒤, PEO가 긴 사슬로 여러 입자를 연결하여 강력한 응집을 형성한다. 이를 PEO/cofactor 보류 시스템이라 하며, 특히 재생섬유 기반 제지공정에서 널리 활용된다.

### 6) 마이크로파티클 보류제(microparticle retention system)

마이크로파티클 보류제는 제지공정에서 섬유, 미세분, 충전물, 첨가제 등이 와이어 위에 효과적으로 보류되도록 돕는 고분자-미세입자 복합 시스템이다. 기존의 단일 고분자 보류제(C-PAM 등)는 일정한 보류 효과를 제공하지만, 고속 초지기에서는 보류율이 급격히 저하되는 문제가 있었다. 이를 해결하기 위해 개발된 것이 바로 마이크로파티클 보류시스템이다.

이 시스템은 양이온성 고분자 보류제(C-PAM)와 마이크로파티클(벤토나이트, 실

리카, 콜로이드성 알루미늄 등)을 조합하여, 종이의 지합에 악영향을 주지 않는 범위 내에서 적절한 크기의 응집체를 형성함과 동시에 고속 운전 조건에서도 안정적인 보류 효과를 유지할 수 있도록 설계되었다. 이 시스템에는 고분자 보류제와 마이크로 파티클이 사용되는데, 고분자 보류제로 C-PAM을 사용하여 섬유 및 미세분의 초기 응집체를 형성한 다음 마이크로 파티클을 투입한다. 고분자의 분자량과 전하밀도는 지료 조건에 따라 조절할 필요가 있으며, 마이크로 파티클로는 벤토나이트(bentonite), 실리카(silica), 알루미늄 하이드로졸(colloidal alum) 등을 사용한다.

### 7) 천연 고분자 보류제(natural polymer retention aid)

천연 고분자 보류제는 식물, 동물, 미생물 등 자연 유래 원료에서 추출한 고분자 물질로, 제지공정에서 섬유, 미세분, 충전물, 첨가제 등이 와이어 위에 잘 남아 종이에 포함되도록 돕는 친환경 보류제이다. 기존의 합성 고분자 보류제(C-PAM, A-PAM)는 보류 효과가 뛰어나지만 생분해성이 낮고, 환경적 부담이 존재한다는 불리한 점이 있지만 천연 고분자 보류제는 지속 가능한 제지공정을 위한 대안이 된다는 점에서 주목받고 있다. 천연 고분자 보류제는 일반적으로 생분해성이 뛰어나고 독성이 낮으며, 식품 포장지, 위생용지, 친환경 인증 제품 등에서 사용이 확대되고 있다.

전분(starch)은 옥수수, 감자, 타피오카 등에서 추출한 다당류로, 아밀로오스(선형 고분자)와 아밀로펙틴(분지상 고분자)으로 구성되어 있다. 수용성으로 점성이 높고, 섬유와 수소결합이 가능하며, 보류제, 표면강도제, 사이즈제 등으로 활용된다.

키토산(chitosan)은 갑각류(게, 새우 등)의 키틴을 탈아세틸화하여 얻은 양이온성 다당류로 β-(1→4) 결합으로 글루코사민 단량체가 고분자를 형성하고 있다. 양전하를 띠며, 음전하 입자와 강하게 결합하는 특징이 있어, 보류제, 항균제, 생분해성 포장지 첨가제로 사용된다.

셀룰로오스 유도체(cellulose derivatives)는 목질계 바이오매스에서 추출한 셀룰로오스를 화학적으로 변형한 고분자로, 카르복시메틸셀룰로오스(CMC), 하이드록시에틸셀룰로오스(HEC) 등이 있다. 수용성으로 섬유와 친화성 높아 보류제, 점도 조절제, 안정화제 등으로 사용된다.

알긴산염(alginate)은 갈조류에서 추출한 다당류로 만노산과 굴루론산의 블록

공중합체이다. 젤 형성 능력이 있으며, 수용성으로 생분해성이다. 특수지, 의료용지, 위생용지 등에서 제한적으로 사용된다.

### (5) 보류시스템

미세섬유나 충전물과 같은 미세입자가 와이어부에 잔류하기 위해서는 그림 06-01과 같이 응집체를 형성하거나 장섬유 표면에 흡착되어야 한다. 이를 위해서는 제지공정에서 보류제를 효과적으로 활용해야만 한다.
보류제가 작용하는 방식은 단순한 물리적 응집이 아니라, 전기화학적 상호작용과 고분자에 기반한 응집의 복합적 메커니즘이기 때문에 각 보류 시스템에 대한 명확한 이해가 요구된다. 주요 보류 시스템의 응집 기작은 다음과 같다.

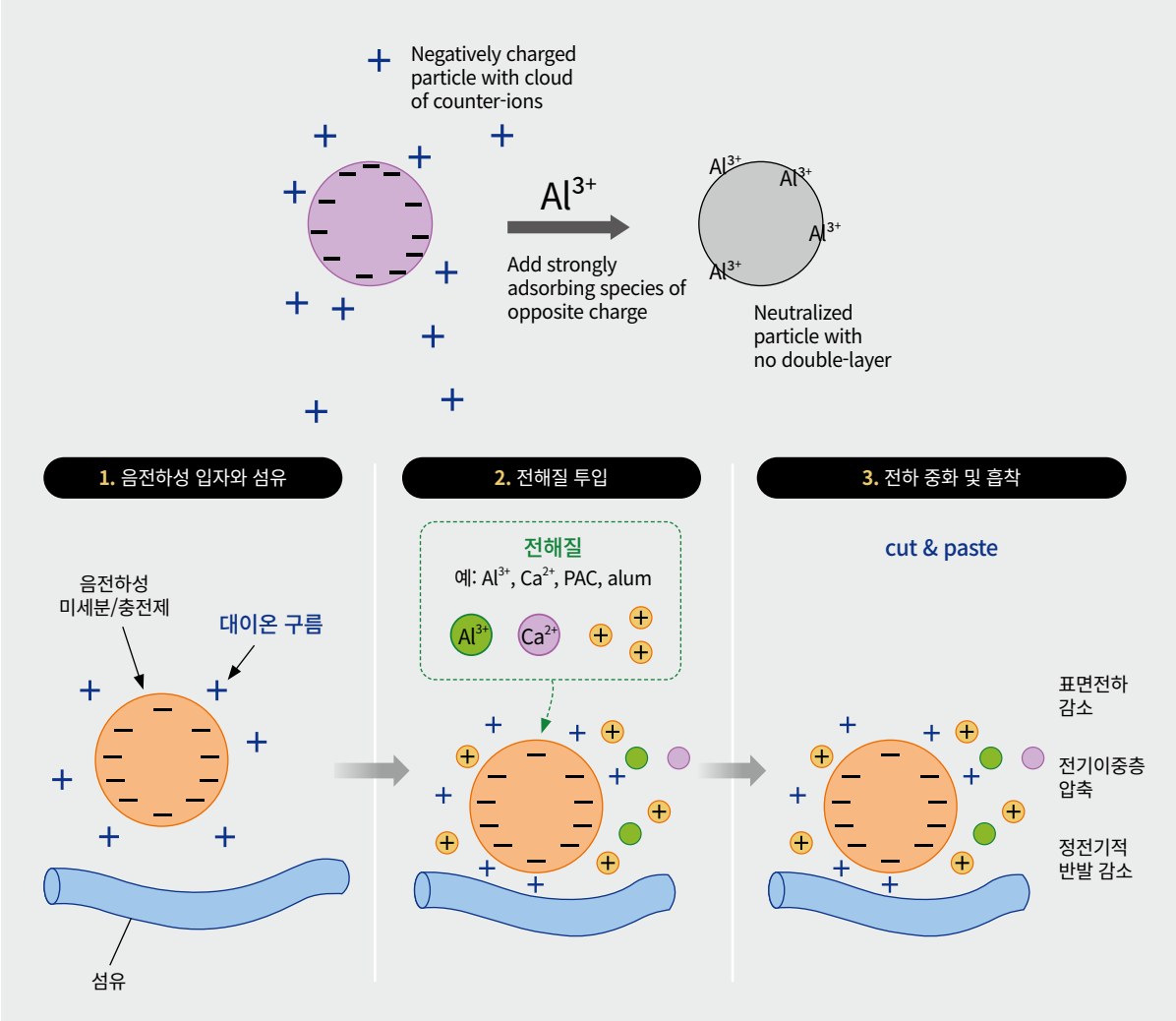
#### 1) 전하 중화(charge neutralization) 보류 시스템

전하 중화 보류 시스템은 제지공정에서 가장 기본적이면서도 널리 사용되었던 보류 메커니즘 중 하나이다. 이 시스템은 섬유 현탁액 내에 존재하는 미세입자, 충전물, 콜로이드성 물질 등을 정전기적으로 중화시켜 응집을 유도하고, 이를 지필 구조에 정착시키는 역할을 한다.
일반적으로 펄프 섬유와 충전물은 음전하를 띠고 있어 서로 간에 정전기적 반발력이 존재하며, 이로 인해 미세입자 상호간의 응집이나 보류가 어렵다. 전하 중화 보류 시스템에서는 알람이나 양이온성 고분자 보류제를 첨가하여 이러한 음

그림 06-01. 미세입자의 보류도 향상 전략



그림 06-02. 전하 중화 보류 시스템




전하를 중화시킴으로써 입자 간 반발력을 감소시키고, 미세입자 사이의 결합을 촉진한다.

보류제는 주로 알람을 포함한 무기염류가 사용되며, 이들이 섬유 및 미세입자 표면에 전기이중층을 압축하거나 표면에 흡착하여 전하를 중화한다. 전하가 중화되면 입자 간 정전기적 반발력에 의한 안정성이 상실되어 브라운 운동으로 서로 충돌할 때 쉽게 응집 현상이 일어나게 된다. 결과적으로 미세한 충전물나 미세섬유가 큰 응집 구조를 형성하며, 이는 와이어부에서의 여과 과정 중 습지필에 물리적으로 보류되어 손실 없이 보류될 수 있다.

따라서 전하중화 보류 시스템은 비교적 단순하고 경제적인 방법으로 미세입자의

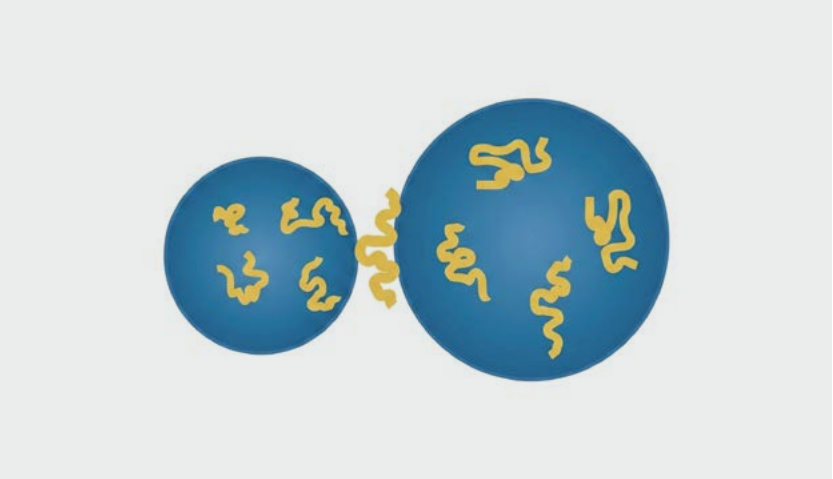
보류를 가능하게 하며, 제지공정에서 백수의 오염을 줄이고, 원료의 활용도를 높이는 데 기여한다. 하지만 응집체 자체 결합력은 약해서 교반속도가 강할 경우 응집체가 파괴되면서 보류도가 저하되기 때문에 고속 초지기에서 단독 사용이 제한적이다.

### 2) 패치(patch) 보류 시스템

패치 보류 시스템은 입자 표면에 이온성 패치(국부 전하 영역)를 형성하여 섬유, 미세분, 충전물의 응집을 유도하는 보류 메커니즘이다. 전하 중화 방식이 전체 표면 전위를 균등하게 낮추는 것과 달리, 패치 메커니즘은 다른 입자의 음전하 부분과 양전하 패치 부분 사이에 강한 정전기적 인력이 작용하도록 유도하여 입자들이 서로 정전기적 인력으로 결합하도록 하기에 미세입자가 빠르게 응집된다(그림 06-03). 결과적으로 과도하게 큰 응집 형성을 피하면서 와이어상 잔류에 유리한 중간 크기의 응집체를 형성해 탈수와 보류를 함께 개선한다.

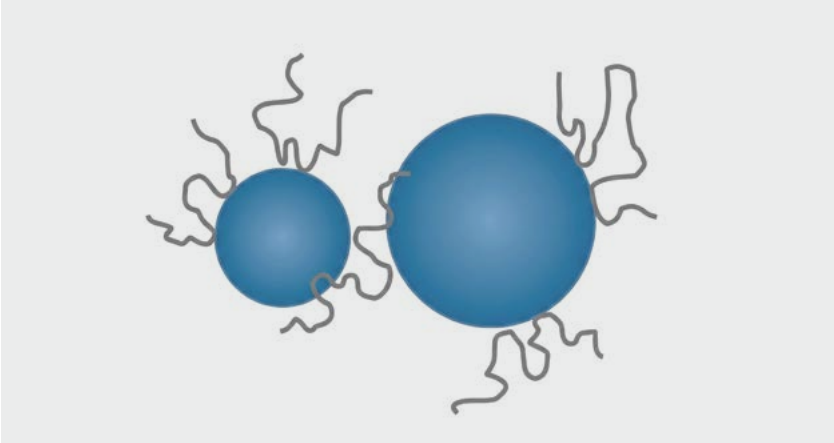
패치 보류 시스템의 장점은 적은 양의 보류제(PEI, poly-DADMAC, 고전하밀도 저분자량 C-PAM 등) 투입으로도 효과적인 응집이 가능하고, 전하 중화 방식보다 형성되는 응집체가 상대적으로 작고 치밀하여 와이어부에서의 지합(formation)을 크게 저해하지 않는다는 점이다. 또한 전하 불균형 상태를 활용하기 때문에 원료 조건 변화나 이온강도 변화에도 비교적 안정적인 성능을 발휘한다.

**그림 06-03.** 패치 보류 시스템에 의해 형성되는 응집체 이미지



출처: Shin, 2002

그림 06-04. 가교 보류 시스템에 의해 형성되는 응집체 이미지



출처: Shin, 2002

패치 보류 시스템에 의해 형성되는 응집체는 가교 보류 시스템에 의해 형성된 응집체보다 전단력에 대한 저항성이 낮지만, 고전단영역에서 파괴 이후 저전단영역에서는 재응집이 형성되는 특징을 가지고 있어 '소프트 응집체(soft floc)'로 불리기도 한다. 따라서 패치 보류 시스템은 가교 보류 시스템보다 속도가 낮은 초지기에 널리 사용된다.

그러나 지나치게 많은 양의 고분자를 첨가할 경우, 입자 표면이 전부 양전하로 덮여 재분산이 일어나는 '과량 투입(overdosing) 현상'이 발생할 수 있다. 따라서 패치 보류 시스템은 보류제의 종류, 전하밀도, 투입량, 교반 조건 등을 정밀하게 제어하는 것이 중요하다.

### 3) 가교(bridging) 보류 시스템

가교 보류 시스템은 고분자 사슬이 섬유와 미세입자 사이를 '연결(bridge)'하도록 유도하여 이들 입자를 응집시키고, 이를 통하여 보류율과 탈수성을 동시에 개선하는 기술이다. 음전하를 띠는 섬유, 충전물 및 미세입자가 분산된 지료에 분자량이 크고 사슬 길이가 긴 양이온성 고분자(고분자량 cationic PAM)를 첨가하면, 고분자 사슬의 일부는 섬유나 미세입자 표면에 흡착하고 고분자의 다른 부분은 용액 중에 돌출된다. 이 돌출된 사슬은 인접한 입자 표면과 다시 결합할 수 있으며, 이러한 과정이 반복되면서 고분자 사슬이 여러 입자를 연결하는 가교 구조가

형성된다. 이러한 가교 메커니즘을 통해 개별적으로 분산되어 있던 미세입자들은 서로 응집하여 크기가 큰 응집체를 형성하고, 이는 와이어상에서 습지필에 효과적으로 보류된다(그림 06-04).

가교 보류 시스템의 장점은 다음과 같다. 첫째, 높은 분자량의 고분자를 사용하기 때문에 소량의 첨가만으로도 높은 보류 효과를 기대할 수 있다. 둘째, 형성된 응집체는 물리적으로 강인하여 와이어부의 여과 과정에서 쉽게 파괴되지 않는다. 셋째, 미세입자의 손실을 감소시켜 백수의 오염을 억제하고, 원료 이용 효율을 개선한다.

가교에 의해 형성된 응집체는 패치에 의해 형성된 응집체보다 전단 저항성이 크지만, 고전단영역에서 일단 파괴되면 재응집이 잘 일어나지 않는 특징을 가지고 있어 '하드 응집체(hard floc)'로 불리기도 한다. 이러한 높은 전단저항성 때문에 가교 보류 시스템은 패치 보류 시스템보다 속도가 높은 초지기에 널리 사용된다.

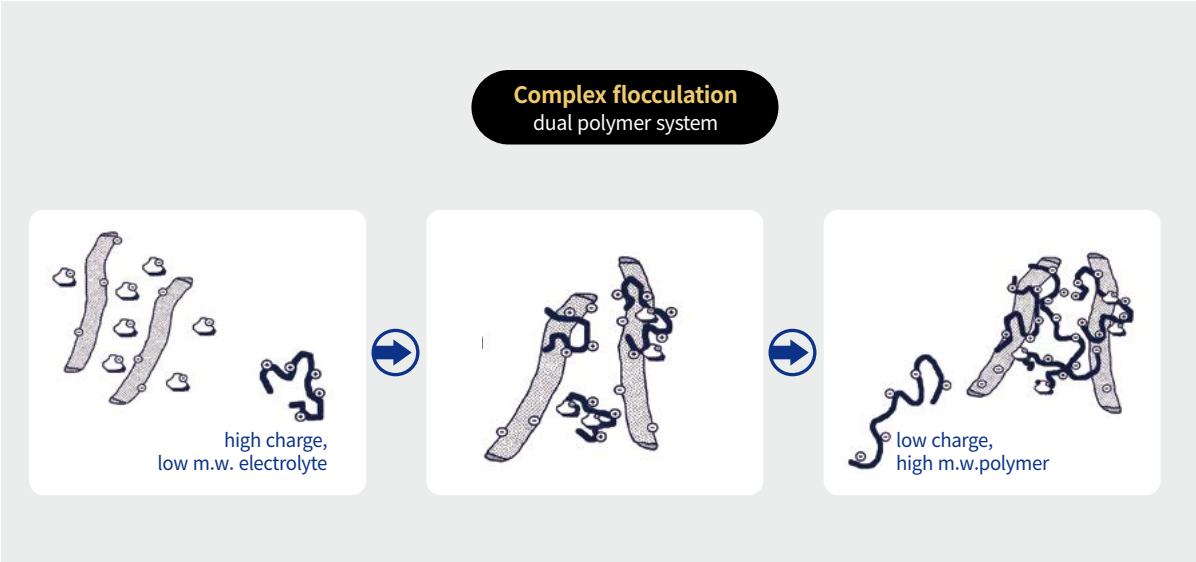
그러나 고분자의 투입량이 과도할 경우 모든 입자 표면이 고분자 사슬로 포화되어 더 이상의 가교 형성이 어려워지고, 오히려 분산이 증가하는 과량 투입 현상이 발생할 수 있다. 또한 형성된 응집체가 지나치게 커지면 종이의 지합을 저해할 수 있다.

### 4) 이중 고분자(dual polymer) 보류 시스템

이중 고분자 보류 시스템은 제지공정 습부에서 서로 다른 두 종류의 고분자 전해질을 순차적으로 투입하는 방식으로 패치 보류와 가교 보류 시스템이 결합된 메커니즘이다. 먼저 1차 고분자(PEI, 저분자량 C-PAM 등)를 투입하여 미세분과 충전물 표면에 전하 패치를 형성하거나 초기 응집을 유도한 뒤, 2차 고분자(A-PAM)가 가교 작용을 통해 입자 사이를 연결함으로써 응집체의 크기와 구조를 최적화한다. 이러한 이중 고분자 보류방식은 단일 고분자 투입만으로는 얻기 어려운 높은 보류도를 획득할 수 있다.

이중 고분자 시스템의 특징은 단일 보류제 사용에 비해 보류도와 탈수성 개선 효과가 우수하다는 점이다. 또한, 고분자의 첨가 순서와 첨가량을 조절함으로써 다양한 원료 조건과 공정 환경에 적용이 가능하다. 그러나 두 가지 고분자의 상호작용은 투입 순서, 교반 조건, 농도 등에 매우 민감하기 때문에, 공정 제어가 적절히 이루어지지 않으면 원하는 성능을 얻기 어렵다는 한계도 존재한다. 특히 고분자

그림 06-05. 이중 고분자 보류 시스템의 메커니즘




출처: Norell et al., 1997

투입량이 적절하지 않으면 과도하게 큰 응집체가 형성되어 종이의 지합을 파괴하는 단점이 있다.

따라서, 이중 고분자 보류시스템은 단일 보류제 시스템과 마이크로파티클 시스템의 중간 단계로서, 원료의 다양성이 커지고 충전물 사용량이 증가하는 현대 제지 공정에서 중요한 역할을 수행한다.

### 5) 마이크로파티클(microparticle) 보류 시스템

마이크로파티클 보류 시스템은 현대 제지공정에서 미세분과 충전물의 보류, 탈수, 지합을 동시에 개선하기 위해 널리 사용되는 첨가제 시스템이다. 이 시스템은 일반적으로 고분자 보류제와 미세입자 첨가제를 조합하여 사용한다. 가장 대표적인 형태는 C-PAM과 실리카 졸(silica sol) 또는 벤토나이트(bentonite) 등의 무기 미세입자의 병용이다.

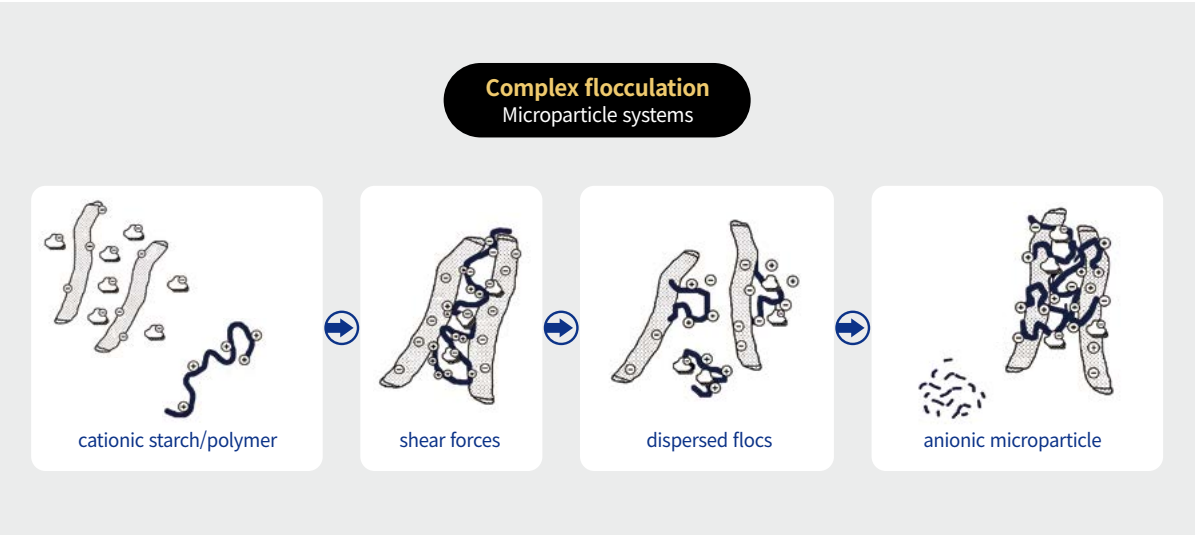
작용 원리는 크게 두 단계로 설명할 수 있다. 첫째, C-PAM이 섬유, 미세분, 충전물 입자에 부분적으로 흡착하여 초기의 느슨한 응집체를 형성한다. 이때 C-PAM은 높은 분자량과 선형 구조를 통해 가교 작용을 유도하지만, 형성된 응집체는 전단력에 의해 파괴될 수 있다. 예를 들면 C-PAM을 스크린 전단에 투입한다면 스크

린을 통과하면서 가교를 형성한 고분자가 스크린의 전단력에 의해 절단되어 응집체의 분산이 발생한다. 이후 실리카 졸이나 벤토나이트와 같은 미세입자가 투입되면 C-PAM의 남은 사슬 부분과 상호작용을 하거나 응집체 표면에 재배치되면서 미세 응집체(micro-floc)를 형성한다. 이렇게 형성된 응집체는 전단력에 노출되어 분산되더라도 신속하게 재형성하는 특징을 보이기 때문에 미세분과 충전물의 보류율이 증가한다.

마이크로파티클 보류 시스템의 가장 큰 특징은 전단 안정성(shear resistance)이다. 기존의 단일 고분자 보류제 시스템에서는 고속 초지기의 강한 전단력에 의해 응집체가 쉽게 파괴되는 반면, 마이크로파티클 시스템에서는 응집체가 전단 이후에도 재구성되는 능력을 지니므로 고속 운전 조건에 적합하다. 또한, 보류도 개선뿐 아니라 습지필 내의 탈수 구조를 최적화하여 탈수 속도 향상과 지합(formation) 개선 효과를 동시에 달성할 수 있다.

따라서 마이크로파티클 시스템은 현대 제지공정에서 가장 대표적이고 범용적으로 활용되는 보류 시스템으로, 고속기계, 재생펄프 사용, 충전물 함량 증가 등 다양한 공정 조건에서 안정적인 운전을 가능하게 한다.

**그림 06-06.** 마이크로파티클 보류 시스템의 메커니즘




출처: Norell et al., 1997

### 6) 비이온성 보류 시스템

PEO(polyethylene oxide)를 이용한 보류 시스템은 고분자 가교 메커니즘에 기반한 비이온성 보류 기술로, 음이온성 저해물질(anionic trash)에 의한 보류 성능 저하를 극복하기 위해 개발되었다. PEO는 분자량이 매우 높고 비이온성이기 때문에 지료 내 섬유와 충전물, 미세입자 표면에 흡착된 뒤 사슬 간 가교를 형성하여 다공성·연성 응집체를 구축한다. 이로 인해 와이어 상에서 응집체가 안정적으로 보류되면서도 탈수 경로가 확보되어 탈수성이 향상됨과 동시에 백수 탁도가 낮아진다.

PEO 단독 운용 시에도 어느 정도의 보류 향상이 가능하지만, 일반적으로는 PEO와 함께 '코팩터(cofactor)'라 불리는 저이온성 양이온성 보류제를 조합하여 투입함으로써 보류 효율을 극대화한다. 실험적으로 PEO와 코팩터 비율을 1:10으로 설정했을 때, 마이크로파티클 시스템과 유사한 보류 성능을 구현하면서도 투입량을 낮출 수 있음이 확인되었다. 특히 TMP 함량이 높은 지료에서는 PEO/코팩터 이중 고분자 시스템이 마이크로파티클 방식보다 더 안정적인 보류와 빠른 탈수를 나타낸다.

또한 PEO/코팩터 시스템은 일반적인 보류제와 달리 응집 형성 과정에서 과응집으로 인한 지합 저하 현상이 적다는 장점이 있다. 고분자 사슬이 물리적·기계적 가교만 수행하므로, 응집체는 충분한 응집력을 유지하면서도 외부 전단력에 견딜 수 있는 기계적 강도를 확보하고, 전단력 해소 시 가역적으로 재응집이 가능하다. 이러한 특성 덕분에 생산 운전 조건이 변동하더라도 품질 안정성이 높으며, 결과적으로 보류제 사용량 절감과 슬러지 발생 저감이라는 부가적인 이점도 얻을 수 있다.

PEO 보류 시스템은 용수사용량이 적은 재활용 섬유 자원 공정처럼 이온성 오염물질이 많은 설비에 특히 효과적이며, 종이 내 섬유 및 충전제 손실과 백수 고형분 농도를 낮추면서도 인쇄적성 향상과 표면 결함 없는 균일한 지합을 유지하는 데 좋은 효과를 나타내는 기술로 자리매김하고 있다. 앞으로는 PEO 분자량과 농도, 코팩터 종류와 비율, 투입 위치 및 혼합 조건 등을 최적화하여 다양한 지료와 생산 설비에 맞춘 맞춤형 운전 전략의 수립이 요청된다.

### 7) 제지용 보류 시스템 정리

제지용 보류 시스템의 원리, 특징 등을 도표 06-01에 나타냈다.

**도표 06-01.** 보류 시스템의 주요 특성 비교

| 시스템 | 작용 원리 | 보류제 | 장점 | 단점/고려사항 |
|---|---|---|---|---|
| 전하 중화 | 음전하를 가진 섬유·충전물 표면을 알람 혹은 양이온성 고분자로 중화시켜 응집 유도 | 알람, PAC | • 간단하고 빠른 응집<br>• 보편적 적용 가능 | • 과량 사용 시 재분산<br>• pH, 이온강도 영향 큼 |
| 패치 | 고전하 밀도 양이온성 고분자가 부분적으로 섬유 표면에 흡착 → 양전하 패치 형성 → 인접 음전하 입자와 결합 | 고전하 저분자량 C-PAM, poly-DADMAC, PEI | • 강한 국소 결합<br>• 낮은 약품 사용량에도 효과 | • 균일 흡착 어려움<br>• 전단력에 취약 하나 재응집 가능 (소프트 응집체)<br>• 과량 투입 시 재분산 위험 |
| 가교 | 고분자 사슬이 여러 입자에 흡착하여 사슬 가교(bridge)에 의한 큰 플록 생성 | 고분자량 양이온/비이온성 C-PAM | • 큰 플록 형성 → 보류 효과 우수<br>• 충전물, 미세분 보류에 효과적 | • 전단 저항성이 있지만 파괴 후 재응집 불가능 (하드 응집체)<br>• 과량 사용 시 안정성 저하 |
| 이중고분자 | 1차: 저분자량 고전하밀도 양이온성 고분자 투입 → 패치<br>2차: 고분자량 음이온성 고분자 투입 → 전하 중화· 고정화 (가교) | PEI or poly-DADMAC + A-PAM | • 보류도/탈수성 개선 효과 높음<br>• 다양한 원료에 적용 가능 | • 투입 순서·조건 민감<br>• 약품비용 상대적 으로 높음 |
| 마이크로 파티클 | 고분자 (C-PAM 혹은 양성전분)로 1차 응집 후 분산 → 무기/유기 미세 입자 (실리카, 벤토나이트 등)를 첨가 → 미세플록 재구성 | C-PAM 혹은 양성전분 + 실리카 졸, 벤토나이트, 미세 클레이 | • 미세분 보류 및 탈수성 탁월<br>• 전단 안정성 우수<br>• 고속기계 적합 | • 시스템 관리 복잡<br>• 추가 설비(투입 지점) 필요 |
| 비이온성 | PEO(폴리에틸렌옥사이드)가 펄프 내 추출성분/페놀성 화합물과 상호작용 | PEO + 페놀성 공조제 (페놀포름알데히드 수지 등) | • 높은 분자량 으로 강력한 bridging<br>• 비이온성 → 전해질 조건에 덜 민감 | • 특수 공조제 필요<br>• 적용 원료 제한적 (리그닌 잔존 펄프 유리) |

### (6) 보류제 준비 과정

#### 1) 보류제의 형태 및 특성

제지공정에서 사용되는 보류제는 주로 고분자 전해질(polyelectrolyte) 형태로 공급되며, 분말(powder), 에멀전(emulsion), 또는 수용액(liquid) 상태로 제공된다. 이들 보류제는 일반적으로 높은 분자량과 전하밀도를 가지므로, 원액 상태 그대로 투입하면 응집 불균일, 국부적 과응집(over-flocculation) 등의 문제가 발생할 수 있다.

#### 2) 희석 및 용해 과정

보류제는 공정 적용 전에 반드시 희석(dilution) 과정을 거쳐야 하며, 이는 보류제의 활성 발현과 균일한 분산을 위해 필수적이다. 분말형 보류제의 경우, 교반이 가능한 용해조에서 일정 농도가 되도록 물에 천천히 투입하여 응집 없이 완전히 용해되도록 한다. 에멀전형 보류제는 활성화를 위해 전단(shear)을 가하는 희석 시스템이 필요하며, 적정 희석수 및 혼합 시간이 요구된다.
일반적으로 보류제는 0.05~0.5% (w/w) 수준으로 희석하여 사용되며, 이 범위는 보류제 종류와 공정 조건에 따라 달라질 수 있다. 희석수의 수질(경도, pH, 전도도) 또한 보류제 성능에 영향을 미치므로, 공정 백수 또는 연수(soft water)를 사용하는 것이 일반적이다.

#### 3) 저장 및 관리

희석된 보류제는 장시간 저장할 때 점도 변화나 미생물 증식에 의해 성능 저하가 발생할 수 있으므로, 일정 시간 이내에 사용하는 것이 바람직하다. 또한, 과도한 교반이나 펌핑 전단은 고분자 사슬을 절단하여 보류 성능을 저하시킬 수 있으므로, 저전단 조건에서 이송 및 저장해야 한다.

### (7) 보류제 투입 방법

#### 1) 투입 위치의 중요성

보류제의 투입 위치는 그 성능 발현에 결정적인 요소이다. 일반적으로 보류제는 헤드박스 전단 또는 팬 펌프 이후의 원료 라인에 투입된다. 이는 보류제가 섬유 및 충전제와 충분히 접촉하면서도, 과도한 전단으로 응집 구조가 파괴되지 않도록 하기 위함이다.

#### 2) 보류시스템에 따른 투입 위치

단일 고분자 보류 시스템에서는 양이온성 고분자를 헤드박스 전단에 투입한다. 이때 고분자가 섬유와 미세분에 흡착하여 응집체를 형성하고, 와이어부에서 탈수와 함께 보류가 이루어진다. 단일 고분자만 사용하기 때문에 투입 위치는 비교적 단순하며, 주로 헤드박스 전단에서 안정적인 응집체를 형성하는 것이 목적이다.
이중 고분자 보류 시스템은 양이온성 고분자를 먼저 스크린 전단에 투입하여 섬유와 미세분을 응집시킨 뒤, 음이온성 고분자를 후단에서 주입하여 재응집을 유도한다. 따라서 첫 번째 고분자는 스크린 직전, 두 번째 고분자는 스크린 후단에 투입하는 것이 일반적이다. 이렇게 함으로써 전단력에 의해 분산된 응집체가 다시 안정적으로 형성한다.
마이크로파티클 보류 시스템은 양이온성 고분자를 스크린 직전의 전단력 발생 구간 이전에 투입하여 초기 응집을 형성한다. 이후 스크린에서 전단력에 의해 응집체가 분산되면, 음이온성 마이크로파티클을 스크린 후단에 주입하여 재응집을 유도한다. 이 방식은 전단 안정성이 높고 탈수성이 개선되며, 미세분과 충전재의 보류율을 크게 향상한다.

#### 3) 조절 및 공정 영향

보류제의 투입량은 원료 조성, 충전제 함량, pH, 전도도, 전단 조건 등에 따라 최적화되어야 한다. 과도한 투입은 지필 형성 불량, 표면 결함, 종이 물성 저하를 유발할 수 있으므로, 실험실 평가와 온라인 측정을 통한 지속적인 제어가 필요하다.

### (8) 온라인 보류도 측정(On-line Retention Measurement)

#### 1) 온라인 보류도의 개념 및 측정 원리

온라인 보류도는 초지기 운전 중 실시간으로 투입된 원료 고형분 대비 지필에 잔류하는 고형분의 비율을 측정한 값이다. 이는 공정 안정성 및 보류제 성능을 평가하는 핵심 지표로 활용된다. 온라인 보류도 측정 설비는 주로 백수 및 원료 슬러리의 고형분 농도 차이를 이용하여 보류도를 산출한다. 레이저 산란, 광학 센서, 또는 방사선 기반 센서를 통해 고형분 농도를 연속적으로 측정하며, 팬펌프 전단과 백수 라인에서 동시에 데이터를 수집한다.

#### 2) 설비 구성 및 설치 위치

일반적인 온라인 보류도 측정 시스템은 센서, 신호 처리 장치, 그리고 공정 제어 시스템(DCS)으로 구성된다. 센서는 고형분 농도의 대표성이 확보되는 위치에 설치되며, 침전이나 기포의 영향을 최소화할 수 있도록 유속과 배관 조건이 고려된다.

#### 3) 공정 제어와의 연계

온라인 보류도 데이터는 보류제 투입량을 자동 제어하는 피드백 제어 시스템에 활용될 수 있다. 이를 통해 원료 변동이나 운전 조건 변화에도 안정적인 보류 성능을 유지할 수 있으며, 약품 사용량 절감과 품질 균일성 향상이라는 이점을 제공한다.

### (9) 결론

제지용 보류 시스템은 앞으로 더욱 친환경적이고 효율적인 방향으로 발전할 것으로 전망된다. 미세플라스틱 및 화학약품 사용에 대한 규제가 강화됨에 따라, 합성 고분자 중심의 고분자에서 천연 고분자 및 바이오 기반 보류제로의 전환이 가속화될 것이며, 나노셀룰로오스나 기능성 나노입자와 같은 신소재가 보류 메커니즘을 보완할 것으로 예상된다.
또한 공정 최적화를 위한 디지털 제어 기술과 인공지능 기반의 실시간 모니터링

기술이 도입되어, 원료 특성이나 공정 조건 변화에도 안정적인 보류 효과를 구현할 수 있을 것이다. 이와 같은 변화는 원가 절감과 생산성 향상뿐만 아니라 지속 가능한 제지산업으로의 전환에도 핵심적인 역할을 할 것으로 보인다.

## 2. 스케일 제어 기술

### (1) 서론

제지공정은 목재 펄프, 재활용 섬유, 충전물, 각종 첨가제를 이용하여 종이를 생산하는 복합적인 연속 공정이다. 이 과정에서 원료나 공정수에 포함된 무기 및 유기 성분이 설비 표면에 침착하여 단단한 고형물로 나타나는 현상을 스케일(scale)이라 한다. 스케일은 공정 효율 저하, 품질 결함, 설비 손상 등을 유발하므로, 발생 원인과 종류를 이해하고 적절한 제어 기술을 적용하는 것이 필수적이다. 따라서 본 장에서는 스케일 발생 원인을 학습하고 스케일을 제어하기 위한 스케일 방지제의 종류 및 특성을 학습한다. 마지막으로 친환경 스케일 방지제에 대한 내용도 고찰하고자 한다.

### (2) 스케일의 정의와 발생 원인

스케일은 제지공정 중 펄프 슬러리, 순환수, 화학약품 용액 등에 용해되어 있던 무기염류나 유기물질이 온도, pH, 농도 등의 변화에 의해 불용성 물질로 전환되어 침전, 부착된 것이다. 이러한 침착물은 설비 표면에 점차 축적되어 공정 운전을 방해하는 고형층을 형성한다. 도표 06-02에는 제지공정에서 발생하는 스케일을 원인별로 구분하고, 각 스케일의 주요 성분과 공정에 미치는 영향을 정리하였다.

주요 스케일의 발생 원인은 다음과 같다.

- **원료 기인** : 목재나 재활용 섬유에 함유된 무기물(칼슘, 마그네슘 등)
- **공정수 기인** : 경도가 높은 원수, 순환수의 농축
- **화학약품 기인** : 충전물(탄산칼슘 등), 사이즈제, 코팅제의 잔류물
- **공정 조건 변화** : 온도 상승, pH 변화, 농도 증가, 전해질 농도 변화

### (3) 스케일의 종류와 특성

유기계 스케일은 점착성 유기물질이 무기물과 결합하거나 단독으로 형성된 것으로, 종이자원을 주로 사용하는 제지공정에서 빈번히 발생한다. 무기계 스케일은 주로 금속 이온과 음이온이 결합하여 형성된 불용성 염류로, 물리적으로 단단하고 화학적으로 안정한 경우가 많다(그림 06-07).

#### 1) 피치·스티키성 스케일

이는 목재 수지나 재활용지에 포함된 접착제 혹은 잉크 잔류물에 기인하는 것으로, 점착성을 띠며, 무기물과 결합 시 경화되어 설비 오염이나 종이 표면에 결점을 유발한다.

#### 2) 탄산칼슘($CaCO_3$) 스케일

탄산칼슘 스케일은 경도가 높은 원수나 탄산염 충전물을 사용할 경우 알칼리성(pH 8 이상) 환경에서 발생한다. 백색의 다공성 침전물이 발생하여, 표면 거칠음을 유발하고, 열전달을 저하시킨다. 형성 메커니즘은 칼슘이온이 탄산이온과 결합하여($Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3$ (s)) 침전으로 발생한다.

#### 3) 황산칼슘($CaSO_4$) 스케일

황산염 함유 약품을 사용할 때, 고온 구간(드라이어, 증기 계통)에서 발생한다. 스케일은 단단하고 부착력이 강해 제거가 어렵다. 칼슘이온이 황산이온과 반응하여 황산칼슘($CaSO_4$ (s)) 침전을 형성하여 발생한다.

**도표 06-02.** 제지공정에서 발생하는 스케일의 주요 성분 및 영향

| 원인 유형 | 주요 성분 | 영향 |
|---|---|---|
| 유기물 | 피치, 접착제 | 점착성 스케일, 품질 결함 |
| 무기물 | $CaCO_3$, $SiO_2$ | 딱딱한 스케일, 열전달 저하 |
| 미생물 | 슬라임 | 필터 막힘, 악취, 위생 문제 |
| 공정 조건 | pH / 온도 변화 | 스케일 촉진 |

### 4) 규산염(Silicate) 스케일

이는 규소 함량이 높은 원수가 pH 8 이상이며 고온인 조건에서 생성된다. 매우 단단하고 유리질의 표면을 형성하는데 기계적 제거의 난이도가 높다. 일반적으로 $SiO_2 \cdot nH_2O$ 형태로 침전한 스케일이다.

### 5) 산화철·산화 망간 스케일

이는 부식된 배관과 설비에서 금속이 용출되어, 산화 환경에 노출될 때 생성된다. 특징은 착색된 무기물 덩어리로 거칠고 부식을 촉진한다.

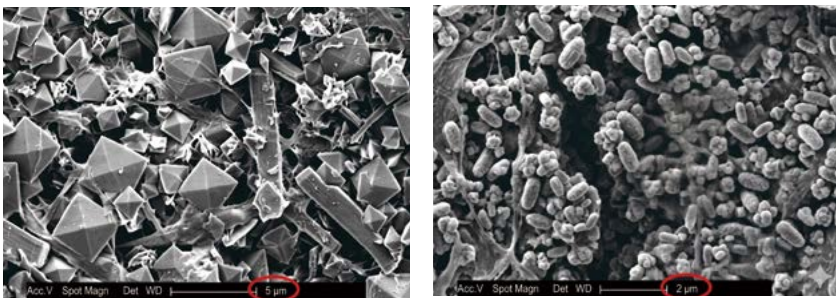
### 6) 바이오 필름성 스케일

미생물 및 바이오 필름은 제지공정에서 사용되는 공정수에 미생물이 증식하면서 발생하게 된다. 미생물의 번식으로 과량의 점액질 다당류가 생성되고 이것이 무기물과 결합하여 형성된다. 점착성과 경도가 혼합된 형태로, 슬라임과 유사하나 제거 난이도가 높은 특징이 있다.

### 7) 복합 스케일

복합스케일은 무기물과 유기물이 동시에 침착하여 형성된 형태로 피치 입자에 탄산칼슘이 부착된 복합체이다. 제거를 위해서는 물리화학적 방법이 병행되어야 한다.

**그림 06-07.** 무기 스케일의 예



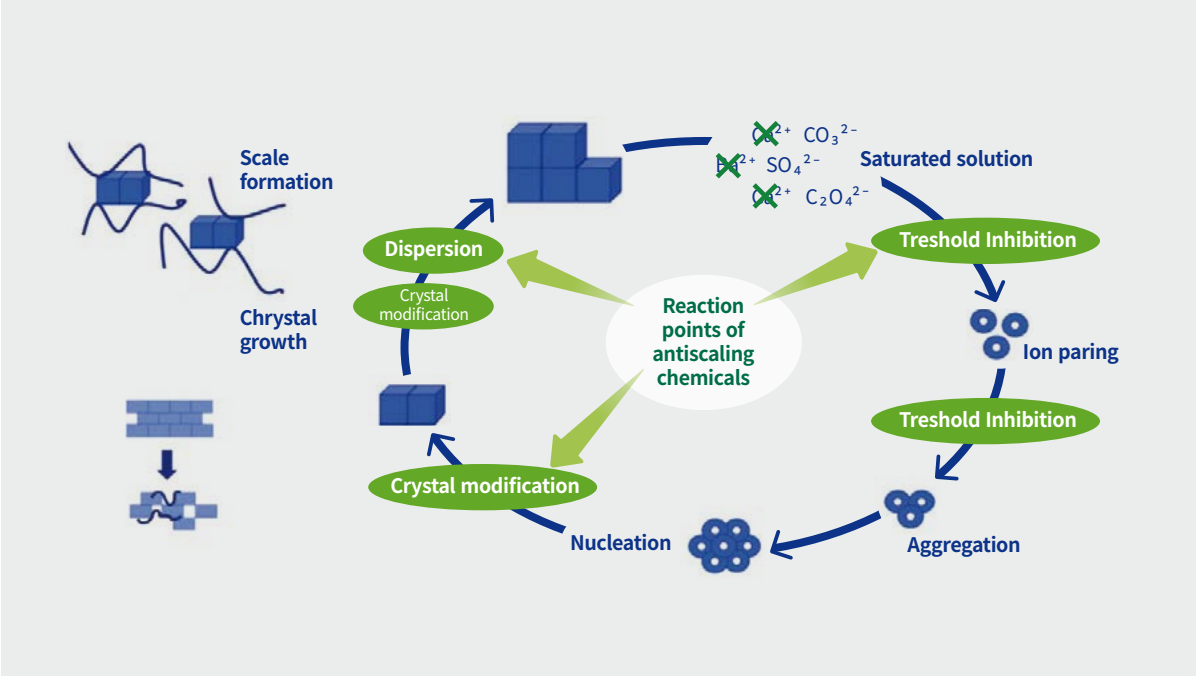

출처: HANACHEM, 2022

### (4) 스케일에 따른 공정상 문제점 및 스케일 제어의 기본 원리

제지공정에서 발생하는 스케일은 성분과 형성 위치에 따라 공정에 미치는 영향이 다르지만, 공통적으로 설비 효율 저하, 품질 결함, 생산성 감소라는 결과를 초래한다. 스케일은 펄프 슬러리나 순환수 속에 녹아 있던 무기·유기 성분이 온도, pH, 농도 변화로 불용성 침전물로 변해 설비 표면에 부착함으로써 형성된다. 이에 따라 유체 흐름이 방해받고, 열전달이 저하되며, 표면 오염이 발생한다.

제지공정에서 스케일 제어의 핵심은 형성을 사전에 억제하고, 이미 형성된 경우에는 효율적으로 제거하는 데 있다. 예방 단계에서는 원수와 공정수 속의 무기·유기 성분이 불용성 침전물로 전환되지 않도록 용해 상태를 안정적으로 유지하고, 결정이 성장하거나 설비 표면에 부착하는 과정을 차단하는 것이 중요하다(그림 06-08). 이를 위해 원수 전처리, 공정수 농도 관리, pH 조절, 약품 주입 최적화와 같은 운영 전략이 병행된다. 제거 단계에서는 형성된 스케일을 화학적 세정(산·알칼리, 산화제, 효소제)이나 물리적 세정(고압수, 브러싱)으로 분해, 탈락시킨다.

그림 06-08. 무기 스케일 제어 기작




출처: HANACHEM, 2022

### (5) 스케일 제어제의 종류와 특성

스케일 제어제는 작용 메커니즘과 적용 대상에 따라 다음과 같이 분류된다.

| | |
|---|---|
| **1. 킬레이트제 (chelating agent)** | • **역할** : 금속 이온과 안정한 착화합물 형성 → 침전 방지<br>• **성분** : EDTA, DTPA, NTA<br>• **적용 대상** : $Ca_{2+}$, $Mg_{2+}$, $Fe_{3+}$, $Mn_{2+}$ 등 금속 이온 기인 스케일 |
| **2. 억제제 (inhibitor)** | • **역할** : 결정 성장 억제, 결정 구조 변형으로 부착력 약화<br>• **성분** : 포스폰산계, 아미노포스폰산염<br>• **적용 대상** : 황산칼슘, 규산염, 복합 스케일 |
| **3. 분산제 (dispersant)** | • **역할** : 스케일 전구체 입자 표면에 흡착하여 전하를 부여, 응집 방지<br>• **성분** : 폴리아크릴산염, 폴리카복실산염<br>• **적용 대상** : 탄산칼슘, 황산칼슘, 규산염 등 무기계 스케일 |
| **4. pH 조절제** | • **역할** : 용해도 곡선에 맞춰 pH를 조절하여 침전 가능성 최소화<br>• **성분** : NaOH, $H_2SO_4$, $CO_2$ 주입<br>• **적용 대상** : 탄산칼슘, 규산염 |
| **5. 산화제·효소제** | • **역할** : 유기물 분해, 미생물 억제<br>• **성분** : 차아염소산나트륨, 과산화수소, 리파아제<br>• **적용 대상** : 유기계·바이오 필름성 스케일 |
| **6. 복합형 제어제** | • **역할** : 분산+억제+킬레이트 기능을 하나의 제형에 통합<br>• **장점** : 다양한 스케일에 동시 대응, 약품 관리 단순화 |

### (6) 친환경 스케일 제어제

친환경 스케일 제어제는 제지공정에서 설비 표면에 형성되는 무기·유기 침착물(스케일)의 발생을 억제하거나 제거하기 위해 사용되지만, 기존 화학제와 달리 환경 위해성을 최소화하도록 설계된 첨가제를 말한다. 전통적인 스케일제는 인산염, 포스폰산계, 합성 고분자, 강산·강알칼리 등 환경에 부담을 주는 성분을 포함하는 경우가 많아, 사용 후 폐수 방류 시 수계 부영양화, 독성 잔류, 폐수 처리 부담 등의 문제가 발생할 수 있었다. 이에 따라 환경 규제 강화와 지속 가능 경영 요구에 부응하기 위해, 생분해성·저독성·무인산·저인산 제형의 친환경 스케일제가 개발·도입되고 있다.

친환경 스케일제는 천연 유래 성분(예: 식물성 유기산, 다당류 유도체), 생분해성 고분자, 무기 나노소재 등을 활용하여 제조되며, 스케일 억제 성능은 유지하면서도 폐수 처리 과정에서 신속하게 분해되어 환경에 미치는 영향을 최소화하도록 설계된 것이 특징이다. 또한 금속 이온과의 킬레이트 작용, 결정 성장 억제, 입자 분산 안정화 등 기존 스케일 제어제의 주요 작용 메커니즘을 동일하게 구현하거나 더욱 개선한 것이 특징이다. 기존 스케일 제어제와 친환경 스케일제를 도표 06-03에서 비교하였다.

이러한 제형은 제지공정의 원수 전처리, 순환수 관리, 고온·고압 구간, 재활용수 사용 환경 등 다양한 조건에서 안정적으로 작용하며, 특히 종이자원 사용 비율이 높은 공정이나 폐수 재이용률이 높은 친환경 생산라인에서 효과가 크다. 사용 시 작업자 안전성이 높고, 약품 취급과 보관, 운송 과정에서 위험성도 낮아진다.

결과적으로 친환경 스케일 제어제는 환경 규제를 준수(무인산·저인산, 저독성, 생분해성)하고, 스케일 억제 성능을 확보한 약품으로, 폐수 처리 부담을 완화하고, 설비 수명을 연장하여 경제성을 제고하며, 생산 지종 친환경 인증이나 ESG 경영 실현의 루트를 통하여 상품 가치를 높이는 기능을 한다. 따라서 향후 제지공정에서는 친환경 스케일 제어제가 기존 화학 스케일 제어제를 대체하는 핵심 솔루션으로 자리 잡을 것으로 전망된다.

도표 06-03. 기존 스케일 제어제와 친환경 스케일 제어제 비교

| 구분 | 기존 스케일제 | 친환경 스케일제 |
|---|---|---|
| 주요 성분 | 인산염, 포스폰산계,<br>합성 고분자, 강산·강알칼리 등 | 무인산·저인산, 생분해성 고분자,<br>천연 유래 유기산·다당류, 무기 나노소재 |
| 환경 영향 | 폐수 방류 시 부영양화, 독성 잔류,<br>난분해성으로 환경 부담 큼 | 사용 후 빠른 생분해, 저독성,<br>수계 오염 최소화 |
| 규제 대응 | 환경 규제 강화 시<br>사용 제한 가능성 높음 | REACH, RoHS 등<br>국제 환경 규제 충족 용이 |
| 작업자 안정성 | 강산·강알칼리 취급 위험,<br>피부·호흡기 자극 가능 | 저자극성,<br>취급·보관 안전성 높음 |
| 성능 | 다양한 스케일 억제에<br>검증된 효과 | 최신 제형으로 기존 수준 이상의<br>억제·분산 성능 확보 가능 |
| 폐수 처리 부담 | 고농도 처리 필요,<br>처리 비용 증가 | 처리 부담 경감,<br>비용 절감 효과 |
| 적용 분야 | 주로 환경 규제가 덜한 공정 | 친환경 인증·ESG 경영,<br>재활용수 사용 공정, 수출용 제품 생산 라인 |

## 3. 피치(pitch) 및 스티키(stickies) 제어 기술

### (1) 서론

제지산업은 목재 펄프, 재활용 섬유, 충전물, 각종 화학약품을 원료로 하여 종이를 생산하는 복합적인 공정이다. 이 과정에서 원료에 포함된 비섬유성 점착성 물질은 공정 안정성과 제품 품질에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 대표적인 것이 피치(pitch)와 스티키(stickies)이며, 이들은 발생 원인과 성분, 물리화학적 특성에서 차이가 있지만, 모두 제지설비 오염과 제품 결점의 주요 원인으로 작용한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 피치 및 스티키 제어제가 적용되고 있다.

### (2) 피치(pitch)의 정의와 특성

피치는 주로 천연 목재 성분에서 기인하는 점착성 물질로, 목재수지(resin), 지방(fat), 왁스(wax), 불포화 지방산, 스테롤 등이 포함된다. 특히 침엽수는 활엽수에 비해 수지 함량이 높아 피치 발생 가능성이 크다.

피치는 크게 자유 피치(free pitch)와 결합 피치(bound pitch)의 두 가지 형태로 구분된다. 자유 피치(free pitch)란 펄프 슬러리 내에 미세입자로 분산되어 있는 피치로 공정 중 다른 입자와 쉽게 응집하거나 설비 표면에 부착할 수 있다. 결합 피치(bound pitch)란 섬유 표면에 흡착·결합된 형태의 피치로, 탈수 및 건조 과정에서 종이 표면 결점의 원인이 된다. 물리·화학적으로 피치는 상온에서 점착성을 띠고, 온도가 상승하면 유동성이 증가한다. 물에는 잘 용해되지 않지만 비극성 용매에는 비교적 잘 용해되며, pH나 전해질 농도 변화에 따라 분산 안정성이 달라진다.

### (3) 스티키(stickies)의 정의와 특성

스티키는 주로 재활용 섬유자원에서 유래하는 인공 점착성 오염물질로 인쇄 잉크, 접착제, 코팅제, 합성수지 등이 주요 성분이다. 종이자원의 사용 비율이 높아질수록 스티키 발생 가능성도 커진다.

스티키는 크기에 따라 마크로 스티키(macro stickies)와 마이크로 스티키(micro stickies)로 분류된다. 마크로 스티키(macro stickies)는 육안으로 관찰 가능한 큰 입자로, 설비에 부착되거나 종이에 결점을 형성한다. 반면에 마이크로 스티키(micro stickies)는 미세입자로, 공정 중 서로 응집하여 마크로 스티키로 성장할 수 있는 것을 말한다.

스티키는 온도 변화에 따라 점착성이 달라지고, 일부는 pH 변화나 화학약품에 민감하게 반응한다. 특히 감열지, 라벨지, 코팅지에서 유래한 스티키는 제거가 어렵고, 공정 전반에 걸쳐 문제를 일으킨다.

### (4) 발생 원인과 문제점

피치와 스티키의 발생은 원료 특성, 공정 조건, 화학약품 사용 등 다양한 요인에 의해 좌우된다. 펄프 원료인 목재칩에서 유래하는 피치는 수종에 따라 함유 성분과 발생량의 차이가 있다. 재활용 원료의 잔류 화학물질에 포함되어 공정으로 유입되는 경우에는 그 성분이 다양하고 불균질하다. 이들은 고온, 고전단 조건에서의 입자 간의 응집이 발생하는 특성이 있으며, pH나 전해질 농도 변화에 따라서도 응집된다.

피치와 스티키는 롤, 와이어, 펠트 등에 부착되어 설비를 오염시킬 뿐 아니라 지

절의 원인이 되거나 세척 비용을 증가시킨다. 또한 종이 표면에 반점을 발생시키고 인쇄적성을 저하시키는 등 품질 문제를 야기하며, 탈수·건조 효율 저하, 약품 소비 증가, 생산성 감소 등 공정 전반의 불안정화를 야기한다.

### (5) 피치(스티키) 제어의 원리

피치와 스티키 제어의 핵심은 입자의 점착성을 억제하고 안정적으로 분산·제거하는 것이다. 이를 위해 물리적 제어, 화학적 제어, 응집·보류 제어의 원리가 적용된다.
물리적 제어는 무기 미립자(활석, 벤토나이트 등)를 이용해 입자 표면을 코팅하여 점착성을 감소시키는 방법이다. 화학적 제어란 고분자 전해질이나 계면활성제를 사용해 입자 표면 전하를 변화시켜 응집 혹은 분산을 유도하여 제거한다. 응집·보류 제어는 미세입자 보류 시스템과 병용하여 입자를 습지필에 포획해 제거하는 방법이다.

### (6) 피치(스티키) 제어제의 종류와 특성

피치(스티키) 제어제의 종류와 특성은 크게 무기계, 고분자계, 계면활성제계 및 복합형계로 나눌 수 있다.

#### 1) 무기계 제어제

무기계 제어제에는 활석(clay), 벤토나이트(bentonite), 규조토 등이 포함되며, 표면 흡착 혹은 코팅에 의한 점착성 감소를 유발한다. 가격이 저렴하며, 고온 안정성이 우수한 장점이 있다.

#### 2) 고분자계 제어제

고분자계 제어제에는 양이온성 폴리아크릴아마이드, 폴리DADMAC 등이 있다. 이는  전화 중화나 응집에 의한 보류를 통해 제어기능을 발휘한다. 소량으로도 효과가 우수하며, 다양한 원료에 적용 가능한 장점이 있다.

3) 계면활성제계 제어제

계면활성제계 제어제에는 비이온성과 음이온성 계면활성제가 있다. 이들은 피치 입자를 분산 및 유화시켜 제어기능을 나타낸다. 하지만 과량 적용 시 거품발생과 탈수 문제 발생 가능성이 있다.

4) 복합형 제어제

복합형 제어제는 무기계 제어제와 고분자계 제어제를 병용하는 제어제이다. 광범위한 조건에서 안정적으로 효과를 나타내는 장점이 있다.

**(7) 적용 사례와 전략**

종이자원을 많이 사용하는 제지공정에서는 스티키 함량이 높아 무기물과 고분자 복합형 제어제를 병용하는 경우가 많다. 고속 초지기에서는 연속 주입 시스템을 통해 제어제를 투입하여 탈수 효율을 유지하고, 표면 결점을 최소화한다. 특수지 생산에서는 계면활성제계 제어제를 병용하여 표면 품질을 향상하기도 한다.
효과적인 제어를 위해서는 원료 분석과 공정 모니터링이 필수적이며, 제어제 투입 위치와 투입량을 실험적으로 최적화해야 한다.

**(8) 최신 동향과 미래 전망**

최근에는 환경 규제 강화와 비용 절감 요구에 따라 친환경 제어제 개발이 활발하다. 생분해성 고분자, 천연 점토 기반 소재가 주목받고 있으며, 나노기술을 적용한 나노실리카 또는 나노클레이는 표면적 확대와 흡착력 향상에 기여한다. 또한 온라인 센서를 통한 피치와 스티키 농도의 실시간 모니터링과 자동 약품 주입이 가능한 스마트 제어 시스템이 도입되고 있다.
향후에는 공정 데이터 분석과 AI 기반 예측 제어 기술이 결합되어, 피치와 스티키 문제를 사전에 방지하는 방향으로 발전할 것으로 전망된다.

### (9) 결론

피치와 스티키는 제지공정에서 불가피하게 발생하지만, 적절한 제어제를 선택하고 공정 조건을 최적화하면 그 영향을 최소화할 수 있다. 원료 특성에 대한 이해, 공정 모니터링, 제어제 기술의 발전이 결합될 때, 생산성과 품질 안정성을 동시에 달성할 수 있다. 이는 제지산업의 지속가능성과 경쟁력 확보를 위한 핵심 과제이기도 하다.

## 4. 소포제 기술

### (1) 서론

제지산업은 목재 펄프나 재활용 섬유를 원료로 하여 종이를 제조하는 복합적인 화학·기계 공정이다. 이 과정에서 펄프 슬러리의 세척, 표백, 첨가제 혼합, 초지기 운전 등 다양한 단계에서 거품(foam)이 발생한다. 거품은 펄프 슬러리의 흐름을 방해하고, 계측 장비의 정확도를 저하시킬 뿐 아니라, 종이 표면의 결점, 생산 속도 저하, 화학약품 소모 증가 등 품질과 생산성에 부정적인 영향을 미친다. 이러한 문제를 해결하기 위해 사용되는 화학 첨가제가 바로 소포제이다. 본 장에서는 거품 발생에서부터 소포제의 작동 원리 및 종류에 대해 학습하고자 한다.

### (2) 소포제의 정의와 역할

소포제는 액체 표면이나 벌크 내부에 형성된 거품을 제거하거나, 거품의 생성을 억제하는 화학 첨가제이다. 제지공정에서 소포제의 주요 역할은 다음과 같다.
우선 기존 거품을 제거하는 역할을 한다. 이를 위해서는 형성된 거품막을 불안정하게 만들어 붕괴시킨다. 또한 추가로 거품이 발생하는 것을 억제한다. 이는 표면장력을 변화시켜 기포 형성을 방지한다. 지료에 기포가 있으면 지료의 흐름이 원

활하지 않거나, 탈수·건조 공정의 효율이 떨어지게 된다. 따라서 소포제는 공정효율 향상을 위해 중요하며, 종이의 표면에 핀홀이나 블리스터(blister) 등 결점이 발생하는 것을 방지하는 데 필요하다.

### (3) 거품 발생 원인

제지공정에서 거품은 주로 다음과 같은 요인으로 발생한다. 첫째, 계면활성제가 존재하는 경우 거품이 안정화된다. 펄프 표백제, 사이즈제, 분산제 등의 화학약품에 포함된 계면활성제가 거품의 안정성을 높이는 경향이 있다. 기계적 교반 역시 거품의 발생을 유발한다. 특히 펄프 슬러리의 펌핑, 혼합, 초지기 와이어부의 진동 등은 기계적 교반효과를 초래하여 거품을 일으킨다. 이밖에 고온 및 저점도 조건에서 기포가 쉽게 형성되며, 재활용 펄프 사용 시 잉크, 접착제, 코팅층 잔류물 등의 미세입자와 수용성 유기물이 거품 안정성을 강화한다.

### (4) 소포제의 작동 원리

제지소포제는 일반적으로 거품막 파괴, 배수 촉진, 기포 합체 유도 및 소수성 입자에 의한 거품구조 붕괴의 메커니즘으로 작용한다.
소포제가 거품 표면에 흡착하여 표면 장력을 국소적으로 낮춤으로써 얇은 액막을 붕괴시키는 현상을 거품막 파괴라 한다. 또 거품막 내부의 액체를 빠르게 배출시킴으로써 기포를 불안정하게 하여 파포시키기도 한다. 작은 기포를 합쳐 더 큰 기포로 만들어 부력에 의해 부상하여 쉽게 터지도록 유도하거나, 소포제 내의 소수성 입자가 거품막을 뚫고 들어가 구조를 붕괴시키는 방식이 쓰이기도 한다.

### (5) 제지용 소포제의 종류

제지공정에 사용되는 소포제의 종류와 주요 특성을 정리하면 도표 06-04와 같다.

도표 06-04. 제지용 소포제의 종류 및 특성

| 구분 | 특징 | 장점 | 한계점 | 주요 적용 |
|---|---|---|---|---|
| 실리콘계 | 폴리디메틸실록산 (PDMS) 기반 | 강력한 거품 억제력, 고온·고농도 조건에서도 안정 | 친수성 낮음, 일부 표면 결점 유발 가능 | 고온 표백, 농축 공정 |
| 알코올계 | 지방알코올·에톡실화 알코올 | 빠른 거품 제거, 생분해성 우수 | 지속성 낮음, 휘발성 높음 | 초기 기포 제거, 환경중시 공정 |
| 폴리에테르계 | EO/PO 공중합체 | 다양한 환경 적용 가능, 내구성 우수 | 가격 높음, 고온에서 성능 저하 | 다목적 제지공정 |
| 유성계 (미네랄 오일) | 공유·식물유 기반 | 저비용, 넓은 적용성 | 고온 안정성 낮음 | 저온·저속 공정 |
| 유기규소계 | 친환경 규소 화합물 | 생분해성 높음, 환경부담 적음 | 가격 높음, 사용화 초기 | 친환경 제지공정 |

### (6) 소포제 선정 시 고려 사항

제지공정에서 소포제를 선택할 때는 다음 요소를 종합적으로 검토해야 한다.

- **공정 조건** : 온도, pH, 슬러리 농도, 계면활성제 종류
- **환경 규제** : 생분해성, 독성, 수질오염 가능성
- **경제성** : 단가, 사용량, 유지보수 비용
- **품질 영향** : 종이 표면 결점, 인쇄적성, 접착성
- **호환성** : 다른 첨가제와의 상호작용

### (7) 친환경 소포제 동향

최근 제지산업은 환경 규제 강화와 지속가능성 요구에 따라 친환경 소포제 개발이 활발하다. 유기규소계, 식물성 오일 기반, 고생분해성 폴리에테르계 소포제가 주목받고 있으며, 미세플라스틱·잔류성 유기 오염물질(Persistent Organic Pollutants) 저감 기술이 병행되고 있다. 또한, 공정 최적화와 소포제 사용량 최소화를 위한 실시간 거품 모니터링 시스템이 도입되고 있다. 도표 06-05에서는 제지공정에서 활용 가능한 친환경 소포제를 정리하였다. 환경 규제 대응, 생분해성, 저독성, 재생 가능 원료 사용 여부 등을 기준으로 정리하였다.

**도표 06-05.** 친환경 소포제의 종류 및 특성

| 구분 | 주요 성분 | 특징 | 장점 | 한계 |
|---|---|---|---|---|
| 유기규소계 (친환경형) | 변성 폴리실록산 + 생분해성 보조제 | 실리콘의 강력한 소포력과 친환경 첨가제 결합 | 고온·고농도 조건에서도 안정, 사용량 적음 | 가격 높음 |
| 식물성 오일 기반 | 대두유, 유채유, 피마자유 등 | 천연 식물유를 정제·변성하여 사용 | 재생 가능 원료, 생분해성 우수, 저독성 | 고온 안정성 낮을 수 있음 |
| 폴리에테르 변성 식물유계 | EO/PO 공중합체 + 식물유 | 다양한 조건 적용 가능, 거품 억제 지속성 우수 | 생분해성, 낮은 환경 잔류성 | 일부 조건에서 성능 저하 |
| 지방알코올계 | C12-C18 지방알코올, 에톡실화 알코올 | 빠른 거품 제거, 휘발성 낮음 | 생분해성, 저독성 | 지속성 부족, 고온에서 성능 저하 |
| 미네랄오일 대체형 | 식물성 왁스·에스터 | 광유 대신 식물성 원료 사용 | 탄소발자국 저감, 생분해성 | 원료 가격 변동성 |

### (8) 결론

소포제는 제지공정의 안정성과 생산성을 유지하는 핵심 화학 첨가제이다. 적절한 소포제의 선택과 사용은 품질 향상, 비용 절감, 환경 보호를 동시에 달성할 수 있는 중요한 전략이다. 앞으로 제지산업은 친환경·고효율 소포제 기술을 중심으로 발전할 것이며, 이는 지속가능한 종이 생산의 필수 요소로 자리매김할 것이다.

## 5. 슬라임제

### (1) 서론

제지산업은 펄프를 원료로 하여 종이를 제조하는 복합적인 화학·기계 공정이다. 이 과정에서 슬라임(slime)이라 불리는 점액성 미생물 집락이 발생할 수 있다. 슬라임은 주로 초지기와 백수 시스템, 배관, 저장조 내부에 부착, 증식하며, 종이 표면 결점, 지절, 생산성 저하, 악취 발생 등 심각한 문제를 유발한다(그림 06-09). 이러한 슬라임의 발생과 확산을 억제하기 위해 사용되는 화학약품이 슬라임제(slime control agent)이다.

그림 06-09. 제지공정에서 발생하는 슬라임의 예



출처: Google 이미지

### (2) 슬라임제의 정의와 발생 원인

슬라임은 제지공정 내에서 미생물(세균, 곰팡이, 조류 등)이 유기물이나 무기물과 결합하여 형성하는 점액성 덩어리이다. 발생 원인은 다음과 같다.

- **수분** : 미생물 생존의 필수 조건
- **영양분** : 백수에 포함된 전분, 섬유 미세분, 코팅 잔류물
- **온도** : 30-40 °C에서 미생물 증식이 가장 활발
- **pH** : 대부분의 제지공정은 중성(pH 6-8) 조건으로, 미생물 성장에 적합
- **산소** : 교반·순환 과정에서 용존산소가 공급되어 호기성 미생물 번식 촉진

### (3) 슬라임제의 작용 원리

슬라임제는 제지공정 내 미생물의 성장과 슬라임 형성을 억제하거나 제거하는 화학약품이다. 작용 원리는 크게 두 가지로 나눌 수 있다.

- **살균 작용** : 미생물의 세포벽·세포막을 파괴하거나 대사 기능을 억제하여 사멸
- **성장 억제** : 미생물의 증식 환경을 변화시켜 슬라임 형성을 방지

슬라임제는 크게 산화성과 비산화성으로 나뉜다.

- **산화성 슬라임제** : 염소($Cl_2$), 이산화염소($ClO_2$), 차아염소산나트륨(NaOCl) 등 → 세포막 단백질과 효소를 산화·변성시켜 사멸
- **비산화성 슬라임제** : 이소티아졸리논, 글루타르알데하이드, 카바메이트 등 → 세포 대사 경로 차단, 세포벽 합성 억제
- **복합형** : 산화제와 비산화제를 병용하여 내성균 억제 및 살균 범위 확대

**도표 06-06.** 제지용 슬라임제의 종류와 특징

| 구분 | 주요 성분 | 특징 | 장점 | 한계 |
|---|---|---|---|---|
| 브롬계 | Ammonium Bromide 등 | 강력한 살균력, 빠른 작용 | 즉각적 효과, 다양한 미생물에 적용 | 산성 조건에서 효과 저하, 고가 |
| 설페이트계 | Ammonium Sulfate | 고농도 사용 가능 | 경제성 우수 | 안정성 낮음 |
| 가바메이트계 | Ammonium Carbamate | 산성 조건에서도 효과 유지 | 브롬계 대비 저렴, 범용성 | 일부 내성균 발생 가능 |
| 염화물계 | Ammonium Chloride | NaOCl과 병용 시 효과 증대 | 저비용 | 단독 사용 시 효과 제한 |
| 산화제 병용형 | NaOCl, $ClO_2$ | 비선택적 살균, 부착물 산화 제거 | 광범위 적용 | 부식성, 환경 규제 고려 필요 |

### (4) 제지용 슬라임제의 종류 및 특성

제지공정에서 사용되는 주요 슬라임제의 종류와 특성은 도표 06-06과 같다.

### (5) 슬라임제 투입 위치와 방법

슬라임제는 공정 전반에 걸쳐 다양한 위치에 투입된다.

- **샤워수 탱크** : 설비 외부 오염 방지
- **백수탱크·파지 저장조** : 공정수 오염 억제
- **펄퍼·펄프 저장조** : 원료 부패 방지
- **순환 배관** : 슬라임 부착 방지

투입 방식은 정량 연속 투입과 충격 투입(shock dosing)으로 구분되며, 상황에 따라 병행 사용한다.

### (6) 친환경 슬라임제 동향

최근 제지산업은 환경 규제 강화에 따라 저독성·고분해성 슬라임제 개발이 활발하다. 브롬·염소계 산화제의 사용량을 줄이고, 비산화성 친환경 살균제나 효소 기반 제제가 연구되고 있다. 또한, 실시간 미생물 모니터링 시스템과 정밀 투약 제어를 통해 약품 사용량을 최소화하는 방향으로 발전하고 있다.

도표 06-07. 친환경 슬라임제의 종류 및 특성

| 구분 | 주요 성분 | 특징 | 장점 | 한계 |
|---|---|---|---|---|
| 천연물 유래 살균제 | 키토산(갑각류 껍질), 식물 추출물(녹차, 계피, 유칼립투스 등) | 천연 항균 성분으로 미생물 성장 억제 | 저독성, 생분해성 우수, 인체·환경 안전성 높음 | 원료 가격 변동, 고온·고부하 조건에서 효과 저하 가능 |
| 효소 | 셀룰라아제, 프로테아제, 리파아제 등 | 슬라임의 EPS(세포외다당) 분해 → 구조 붕괴 | 화학약품 사용량 절감, 내성균 억제 | 단독 살균력은 약함, 보조제로 사용 권장 |
| 저독성 비산화성 살균제 | 이소티아졸리논, 글루타르알데하이드(저농도) | 선택적 살균, 환경 잔류성 낮음 | 광범위 미생물 제어, 내성균 억제 | 고농도 사용 시 피부 자극 가능 |
| 생분해성 고분자 살균제 | 양이온성 폴리머 (폴리헥사메틸렌구아니딘 등) | 미생물 세포막 파괴, 환경 중 빠른 분해 | 장기 잔류성 낮음, 수질오염 최소화 | 일부 조건에서 응집·침전 가능 |
| 친환경 산화제 | 과산화수소($H_2O_2$), 오존($O_3$) | 산화력으로 미생물·유기물 분해 | 부산물 무해(물·산소), 빠른 분해 | 부식성, 현장 안전관리 필요 |

### (7) 결론

슬라임제는 제지공정의 안정성과 품질 확보를 위해 필수적인 공정조절제이다. 제지 학습자나 연구자는 슬라임의 발생 메커니즘과 제제별 특성을 이해함으로써, 현장에서의 문제 해결 능력을 높일 수 있다. 앞으로는 환경친화적이고 효율적인 슬라임제 기술이 제지산업의 지속가능성을 뒷받침할 것이다.

## 참고문헌


[1] Horn, D., Linhart, F. (1991). Retention aids. In: Roberts, J.C. (Ed.), Paper Chemistry, pp. 44-61.

[2] Roberts, J. C. (1996). Control of papermaking processes: A chemical perspective. TAPPI Press.

[3] Norell, M., Johansson, K., & Persson, M. (1997). Retention and drainage in Papermaking Science and Technology. TAPPI Press.

[4] Lindström, T. (1989). Some fundamental chemical aspects on paper forming. Fundamental Research Symposium, Vol 1, pp. 311-412

[5] Lindström, T., & Ekman, A. (1998). The Mechanisms of Retention in Papermaking.

[6] Wågberg, L. (2000). Polyelectrolyte complexes in papermaking. Nordic Pulp & Paper Research Journal, 15(5), 586–594.

[7] Smook, G. A. (2002). Handbook for Pulp & Paper Technologists. Angus Wilde Publications.

[8] Hubbe, M. A. (2007). Retention aid systems: A review of recent developments. BioResources, 2(2), 106–145.

[9] Hubbe, M. A. Opportunities in Papermaking Wet-end Chemistry. https://hubbepaperchem.cnr.ncsu.edu/additives-and-ingredients

[10] Syverud, K., & Stenius, P. (2011). Polymer adsorption and fibre flocculation in papermaking. Progress in Polymer Science, 36(8), 1098-1119.

[11] Bajpai, P. (2015). Biotechnology for Pulp and Paper Processing. Springer.

[12] Hubbe, M. A., & Bowyer, J. L. (2017). Handbook of Pulp. Wiley.

[13] Rintoul, M. S. (2010). Scale control in paper mills. TAPPI Journal, 9(3), 23–29.

[14] Bajpai, P. (2015). Management of Pulp and Paper Mill Waste. Springer.

[15] Rosen, M. J., & Kunjappu, J. T. (2012). Surfactants and Interfacial Phenomena. Wiley.

[16] Chakrabarti, S. K., Verma, P., Tripathi, S., Barnie, S., & Varadhan, P. (2011) Stickies: Management And Control. IPPTA Journal, 23(2), 101-107.

[17] Nguyen, D. T. (1998). Prevention of pitch and stickies deposition on paper -forming wires via adsorption of a cationic polymer associated with anionic species. TAPPI Journal, 81(6), 143-151.

[18] William, S. C., & Xu, Z. F. (2008). Pitch and stickies control in pulp and papermaking processes(International Patent No. WO2008057492A2). World Intellectual Property Organization.

[19] Chemical Research Insight (2025). - Top 10 Companies in the Anti-foaming Agents for Paper Market.

[20] Balaji Chem Solutions (2024). Defoamers in the Paper Industry: Uses and Raw Materials.

[21] GS Chemical (2024). Performance Characteristics and R&D Trends of Paper making Defoamers.

[22] Pathak, P., Kumar V., Bhardwaj, K. N., & Sharma, C. (2021). Slime Control in Paper Mill Using Biological Agents. Physical Sciences Reviews.

[23] LANXESS (2025). Biocides for Pulp & Paper.

[24] NINGBO INNO PHARMCHEM (2025). DBNPA in Paper Manufacturing: Combating Slime.






**윤 혜 정** 서울대학교 교수

**2002 – 현재** 서울대학교 농업생명과학대학 농림생물자원학부 교수
**2026 – 현재** 한국펄프종이공학회 부회장
**2023 – 현재** 국립문화유산연구원 연구과제기획위원회 위원
**2023 – 2025** 서울대학교 농림생물자원학부 학부장
**2021 – 현재** 산림청 KS 목재·제지분야 기술심의회 위원
**2015 – 2017** 서울대학교 농업생명과학대학 학생부학장
**2011** 한국펄프종이공학회 학술상본상 수상
**2000 – 2002** 한솔제지(주) 중앙연구소 선임연구원

page94@snu.ac.kr

# 7

# 헤드박스와 초지부

초지기 설비 전경 (사진제공_무림P&P)

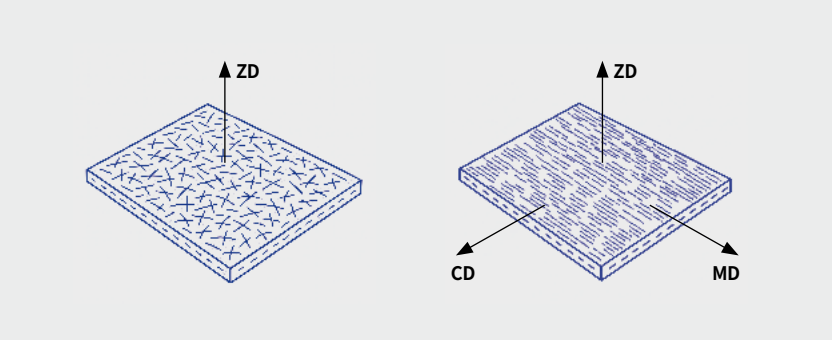
# 1. 서론

현대 종이는 초지기(paper machine)를 이용하여 대량으로 제조되고 있다. 현대의 연속식 초지기는 1798년 프랑스 Nicholas-Louis Robert의 첫 발명 이후 1803년 영국의 Fourdrinier 형제가 이를 개량하여 상업적으로 실용화함으로써 그 기틀이 마련되었다. Fourdrinier 타입이라 불리는 장망식 초지기의 보급과 함께, 1809년에는 환망식 초지기(cylinder paper machine)가 발명되었고, 1953년에는 쌍망식 초지기(twin-wire former)가 개발되었다. 이러한 기술 발전은 초지 속도의 고속화와 설비의 장폭화를 가능하게 하였으며, 이를 통해 급증하는 종이 수요에 효과적으로 대응하여 왔다.

포머 타입에 따라 구성 요소가 다를 수 있으나, 기본적으로 초지 공정은 물에 풀린 약 1% 농도의 지료에서 시작하여 최종적으로 약 95%의 건조도에 이를 때까지 물을 단계적으로 제거함으로써 종이를 제조하는 공정이다. 이 과정은 크게 탈수, 압착 및 건조의 세 단계로 구분된다. 지료의 물은 자연적으로 발생하는 중력, 관성력, 수력학적 힘을 비롯하여 진공에 의해 탈수된 후 압착, 건조라는 일련의 과정을 통해 제거된다. 초지기는 이러한 일련의 힘과 에너지가 효과적으로 작용하도록 여러 공정 단위로 구성되어 있다.

고형분 농도를 높이는 것 외에도 연속된 관류의 흐름으로부터 얇은 판상의 지층을 형성하는 과정을 통하여 종이의 구조가 형성된다. 판상의 지층 내 섬유 분포는 종이의 물성을 결정하는 가장 핵심적인 요소이다. 이러한 섬유의 분포는 초지기의 첫 부분인 헤드박스(headbox)와 초지부(forming section)에서 사실상 결정

**그림 07-01.** (좌) 수초지와 (우) 기계초지된 종이의 3차원적 구조




출처 : ChatGPT 생성 이미지

된다. 그러므로, 지층 구조에 결정적 영향을 미치는 헤드박스와 초지부에 대한 이해는 고품질 종이를 안정적으로 제조하기 위한 기본 전제가 된다. 본 장에서는 섬유 간 네트워크 형성을 통해 만들어지는 지층 구조와 관련한 주요 용어를 먼저 설명하고, 초지기로 완성된 지료를 공급하는 역할을 하는 어프로치부, 그리고 초지부의 기능과 운전을 기술한다.

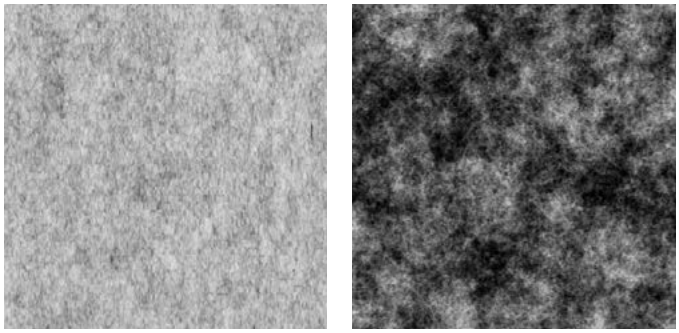
## 2. 지층 구조 형성 관련 주요 개념

### (1) 종이의 방향성

종이는 두께가 매우 얇긴 하지만 3차원적인 물질이다. 종이는 세로 방향, 가로 방향, 그리고 두께 방향의 세 가지 방향을 가지며, 각 방향에 따라 서로 다른 성질을 나타낸다(그림 07-01). 세로 방향은 헤드박스에서 지료가 사출되는 방향 즉, 기계가 운전되어 진행하는 방향을 의미하며, 기계 방향(machine direction, MD)이라고도 한다. 가로 방향은 초지기 진행 방향에 수직인 초지기의 너비 방향을 말한다. 기계폭 방향(cross-machine direction, CD)이라고도 한다. 두께 방향(thickness direction)은 섬유를 비롯한 원료물질이 탈수되며 쌓인 방향을 말한다. Z 방향(Z-direction, ZD)이라고도 부른다. 두께 방향은 가로와 세로 방향 치수에 비해 치수가 매우 작아, 종이는 필름과 같은 2차원적인 물질로 다뤄지기도 한다.

펄프섬유는 길이와 폭의 비율이 약 100:1 정도로 종횡비(aspect ratio)가 매우 큰 물질이기 때문에 물이 사출되는 방향으로 주로 배향된다. 따라서 섬유로 구성된 종이도 방향성을 갖게 된다. 이를 섬유배향성(fiber orientation)이라고 한다. 섬유배향성은 보통 두 가지 지표 즉, 섬유가 주되게 배향된 각도를 나타내는 섬유배향각(fiber orientation angle)과 MD 방향과 CD 방향 물성의 비로 나타내는 섬유배향지수(fiber orientation index)로 평가한다. 실험실에서 제조한 수초지는 배향성이 없지만, 초지기를 통해 제조된 종이의 주된 섬유 배향은 기계 운전 방향인 MD 방향이다. 따라서 인장강도, 휨강성 등 대부분의 강도가 MD 방향에서 높고 컬의 대칭축도 주로 MD 방향이다. 그러나 헤드박스 내에 존재하는 횡류와 벽면 효과 및 사출되는 지료와 초지부 패브릭 간의 속도 차이 등으로 인해 섬유의 배향성은 영향받을 수 있다. 복사지 등의 인쇄용지는 섬유배향각이 0도에 가까울

그림 07-02. 종이의 (좌) 좋은 지합과 (우) 불량한 지합의 예시



출처: 저자 자료

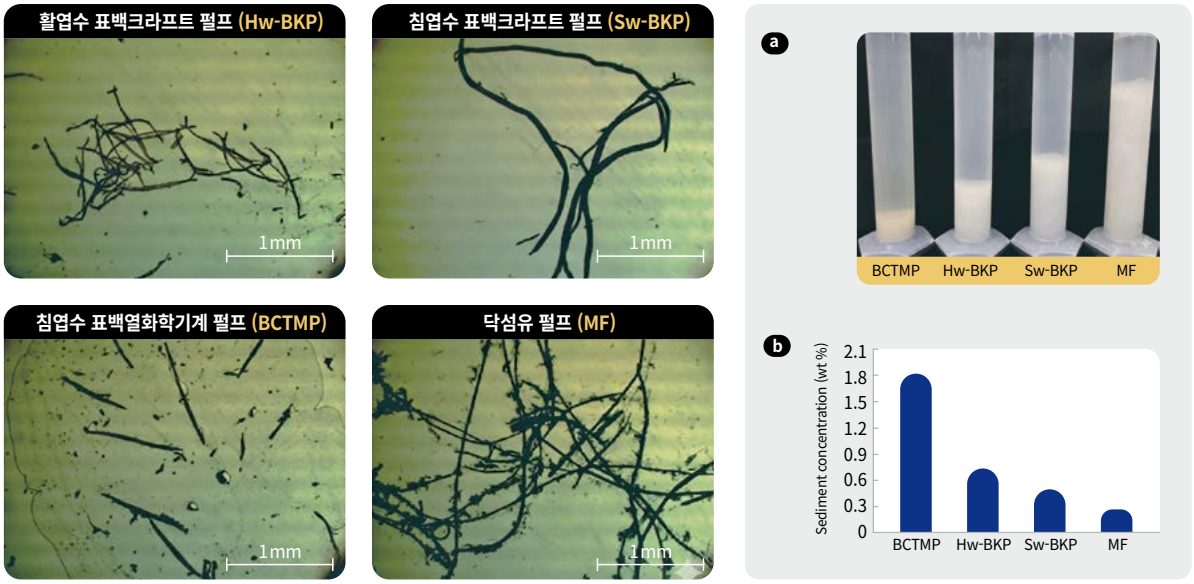
때 사용 시 더 유리하다. 하지만 골판지를 구성하는 라이너지와 골심지의 경우 MD 배향성이 낮을수록 유리하다. 이러한 섬유배향은 헤드박스와 초지부에 의해 주로 결정된다.

### (2) 섬유 응집

종이 물성의 균일성은 제품의 사용 성능 뿐 아니라 제품의 신뢰도 측면에서 매우 중요하다. 물성의 균일성을 확보하기 위해서는 종이 전체 무게의 70% 이상을 차지하는 펄프 섬유가 종이 내에 고르게 분포되는 것이 필수적이다. 제지업계에서는 종이 내 섬유 분포의 균일성을 지합(formation)이라는 개념으로 평가, 관리하고 있다. 그림 07-02에 제시된 바와 같이 좋은 지합을 가진 종이는 섬유 분포가 균일하지만, 불량한 지합을 가진 종이에는 섬유 분포가 균일하지 못하고 장섬유가 뭉쳐진 플록(floc)의 형태가 많이 나타난다.

장섬유 외에도 미세섬유나 충전물 등 종이 구성 원료가 뭉친 것을 응집이라고 한다. 응집은 주로 물리적·화학적 인자에 의해 발생한다. 물리적 응집은 섬유 간 엉킴을 의미한다. 섬유 간 엉킴이 발생하려면 섬유 간 접촉이 이루어져야 한다. 섬유 간 물리적 응집에 영향을 미치는 인자를 구명하고자 다양한 연구가 이루어졌는데, 대표적으로 침전농도(sediment concentration)를 측정하는 방법이 있다. 일정 무게의 섬유를 담고 있는 낮은 농도의 섬유 현탁액을 메스실린더에 넣어 방치하면 섬유는 중력에 의해 아래로 가라앉게 되는데, 그 침전 부피를 측정하면 침전농도를 쉽게 구할 수 있다. 침전된 섬유 플록은 상호 연결된 상태로

그림 07-03. 펄프의 종류에 따른 침전 높이와 침전농도

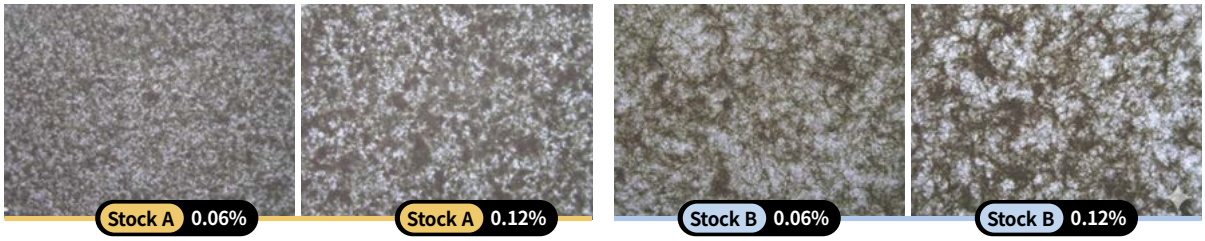



출처: 박신영, 박희태, 신종현, 현진호, 윤혜정, 펄프 섬유의 형태학적 특성이 국부적 폐쇄공간 내 종이 지합에 미치는 영향, 펄프종이기술 50(2):36-43 (2018)

존재하기 때문에 침전농도는 기계적으로 연결된 섬유의 최소 농도를 의미한다. 다만 이 침전된 섬유 간에는 강한 응집력이 없기 때문에 교반과 같이 외부에서 힘이 가해지면 쉽게 파괴되어 섬유는 다시 자유롭게 움직일 수 있다. 침전농도는 섬유의 종횡비에 의해 크게 영향을 받는다. 섬유 길이가 길수록, 종횡비가 클수록 침전농도는 낮아진다. 침엽수 표백크라프트펄프(softwood bleached kraft pulp, Sw-BKP), 활엽수 표백크라프트 펄프(hardwood bleached kraft pulp, Hw-BKP), 닥섬유(Mulberry fiber) 및 침엽수 표백열화학기계펄프(softwood bleached chemithermomechanical pulp, BCTMP)의 침전농도를 평가한 연구 결과[1]에 따르면(그림 07-03), 섬유장이 가장 긴 닥섬유는 0.25%의 침전농도를 나타내지만 섬유장이 가장 짧은 침엽수 표백열화학기계펄프는 약 1.8%로 가장 높은 침전농도를 나타낸다. Sw-BKP는 약 0.5%, Hw-BKP는 약 0.7%로 나타났다. 즉, 섬유장이 길수록 침전농도가 낮다. 이는 섬유 간 연결이 되지 않도록 하기 위해서는 긴 섬유일수록 더 낮은 농도로 지료를 조성해야 함을 의미한다.

섬유 간 기계적 엉킴을 표현한 개념에는 Kerekes와 Schell이 제시한 crowding

그림 07-04. 섬유장(Stock A < Stock B)과 보류제 투입량(0.06%, 0.12%)에 따른 섬유 응집 양상




출처 : 저자 자료

factor가 있다[2]. 이들은 평균섬유의 길이와 동일한 직경의 구체 내에 존재하는 섬유의 수인 crowding factor (N)를 아래 식 1과 같이 제시하였다[2]. 농도($C_m$)가 높을수록, 섬유의 길이(L)가 길수록, 조도(ω)가 작을수록 일정 부피 안에 존재하는 섬유의 개수, 즉 N은 증가한다. 즉 섬유 간 충돌 확률이 증가한다. 실험적으로 Kerekes와 Schell은 crowding factor가 60 이상일 경우 연속적인 섬유 간 접촉이 발생하여 강한 응집이 발생한다고 하였다. 여기서 $C_m$은 단위 %로, L은 m, ω는 kg/m로 표시된다.

$$N \approx 5 C_m \frac{L^2}{\omega}$$ 식 1

출처 : Kerekes, R. J. and Schell, C. J., Characterization of fibre flocculation regimes by a crowding factor, Journal of Pulp and Paper Science 18(1):J32-38 (1992)

섬유 간 충돌이 발생하기 어려울 정도로 매우 낮은 농도로 지료가 조성된 경우에는 종횡비가 큰 섬유라도 응집이 발생하지 않는다. 현탁액의 농도가 높아질수록 그리고 섬유의 길이가 증가할수록 섬유 간 충돌 빈도는 높아진다. 특히, 지료 농도가 침전농도 이상일 경우 섬유 간 연결이 발생하기 때문에 응집을 피하기는 어렵다. 보통 헤드박스 내 지료의 농도는 1% 내외이므로 섬유 간 연속된 접촉이나 응집을 깨뜨려 균일한 분산을 유도하기 위해서는 외력이 가해져야 한다.

전술한 기계적 응집 외에 pH, 전기전도도, 고분자전해질의 분자량과 전하밀도, 투입량과 같은 화학적 요인에 의해서도 섬유 응집은 발생한다. 화학적 인자를 적절히 제어하면 섬유 간 반발력을 야기하여 오히려 지합을 향상시킬 수도 있다. 하지만 보통 보류제와 같은 고분자전해질의 투입이 많아질수록 섬유 간 응집이 과도해지고, 지합에 악영향을 미치게 된다. 그림 07-04는 섬유장과 보류제의 투입량에 따른 섬유의 응집 양상을 보여준다. 섬유장이 짧을수록 더 작은 크기의

응집이 발생하고, 보류제 투입량이 섬유 전건 무게 대비 0.06%에서 0.12%로 증가하면 더욱 큰 응집이 발생하는 것을 볼 수 있다. 따라서 균일한 섬유 분포를 얻기 위해서는 화학적 인자의 적절한 조절이 필요하다.

## 3. 어프로치부

### (1) 어프로치부의 기능

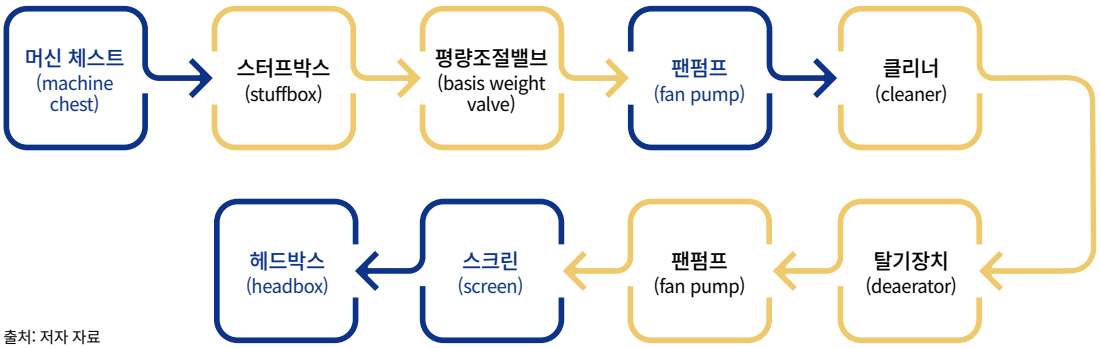
펄프의 해리, 리파이닝, 정선 처리로 구성된 지료조성(stock preparation) 공정을 통해 종이를 제조할 수 있는 원료의 조성이 완료된다. 즉, 생산 지종별 요구되는 특성에 맞추어 적절한 종류의 펄프를 혼합하고, 여기에 염료, 사이즈제 또는 지력증강제 등의 부원료를 첨가하여 원하는 조성으로 지료를 만든다. 이렇게 만들어진 지료는 보통 4% 내외의 농도로 머신 체스트(machine chest)에 저장된 후 어프로치 공정을 통해 초지기로 이송한다.

어프로치부(approach part)는 머신 체스트에서 초지기의 헤드박스 입구까지의 구간을 말하며, 헤드박스 운전에 적합한 농도로 지료를 희석하고, 일정량의 지료를 균일하게 초지기에 공급하는 역할을 한다. 또한 정해진 목표 평량을 갖는 종이가 생산되도록 지료량을 정량하여 보낸다. 머신 체스트에 담긴 4% 내외 농도의 지료를 고농도 지료(thick stock)라고 부른다. 이 농도는 초지기에서 균일한 종이를 생산하기에는 매우 높은 농도이다. 따라서 어프로치부에서는 이 농도를 초지기 헤드박스에 적합한 농도인 1% 내외의 농도로 낮춘다. 또한 불순물에 의한 종이 품질 저하를 막기 위해 초지기로 이송되기 전 이물질을 제거하며, 초지속도에 맞는 유량으로 지료를 초지기의 헤드박스로 이송한다. 어프로치부에서 투입할 때 효과가 우수한 화학약품, 예를 들어 보류제 등은 이곳에서 투입되기도 한다.

이상에서 열거한 어프로치부의 기능을 간단히 정리하면 다음과 같다.

- 생산 평량에 해당하는 일정량의 고농도 지료 공급
- 헤드박스 운전 농도(1% 내외)로 고농도 지료를 희석
- 공기 및 고형 이물질의 최종 제거
- 헤드박스 유량으로 지료 공급
- 약품 등 부원료의 투입

그림 07-05. 어프로치부의 구성도 (공장에 따라 노란색 선으로 나타낸 설비가 없는 경우도 있음)




출처: 저자 자료

### (2) 어프로치부의 구성 요소

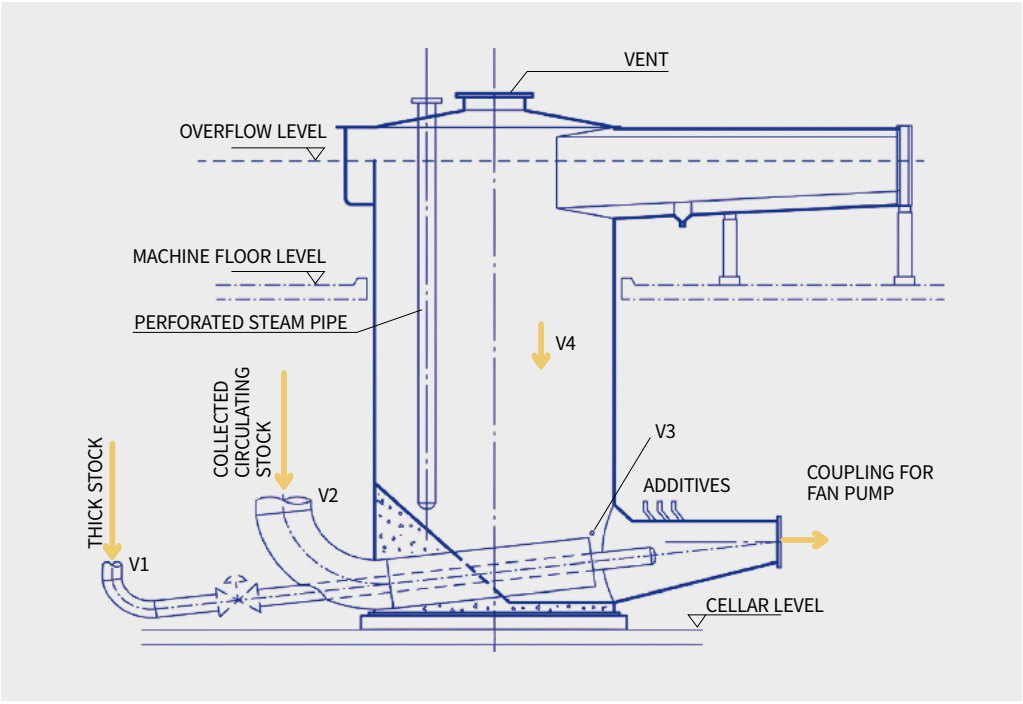
어프로치부의 기본적인 역할은 동일하지만, 생산하는 지종의 특성, 설비 규모, 공장 건설 시기 및 제조사 설계 철학 등에 따라 세부 구성은 달라질 수 있다. 예를 들어, 고속·대형 초지기의 경우 자동 제어 장치와 정밀 스크리닝 설비가 강화되는 반면, 비교적 단순한 지종을 생산하는 설비에서는 일부 공정이 생략되거나 통합되기도 한다. 일반적으로 어프로치부는 그림 07-05와 같은 공정 배열로 구성된다. 여기에서 노란색 선으로 나타낸 설비는 생략되는 경우도 있다.

4% 내외의 지료는 머신 체스트에서 평량에 맞게 일정량 정량되어 팬펌프(fan pump)로 이송된다. 오래된 공장의 경우 그림 07-05의 노란색 선으로 표시된 스터프박스(stuff box)와 평량조절밸브(basis weight valve)를 이용하지만, 1990년대 중반 이후 설치된 공장에서는 머신 체스트 출구 펌프가 가변속도 펌프이기 때문에 펌프의 회전속도를 변화시킴으로써 고농도 지료의 공급량을 조절하여 평량을 맞추고 있다. 스터프박스는 공장의 높은 곳에 위치한 개방형 작은 박스로서 오버플로우를 채택하며 항상 일정한 수위(압력)를 유지할 수 있도록 설치, 운전되고 있으나, 개방 구조로 인해 지료의 오염 문제나 평량밸브 상부의 공동(cavity) 발생 문제 등으로 인해 최근 초지공정에서는 잘 사용하지 않고 있다.

농도 4%인 고농도 지료는 섬유 간 응집이 매우 크게 발생하기 때문에 초지기의 수력학적 힘만으로는 균일한 섬유 분산을 얻을 수 없다. 따라서 균일한 품질의 종이를 생산하기 위해서는 낮은 농도로 지료를 희석할 필요가 있다. 종이 제품의 목

표 평량에 따라 희석 농도는 다소 다르지만 보통 1% 내외의 농도로 지료를 희석하여 초지기에 이송해야 한다. 이를 위해 정량된 고농도 지료는 백수(white water)를 담아두고 있는 사일로(silo) 또는 와이어 피트(wire pit)를 거치며 팬펌프에 의해 희석된다. 팬펌프는 매우 큰 원심펌프로서, 회전수에 따라 흡입되는 백수의 양이 달라지며, 결과적으로 희석 지료의 농도가 결정된다. 사일로 하부에서 고농도 지료와 백수가 혼합되는 모습은 그림 07-06에 나타나 있다. 포밍부에서 탈수된 백수는 사일로에 저장된 후 지료를 희석하는 데 사용되는데, 이는 백수의 가장 짧은 순환 경로라 할 수 있다. 팬펌프에는 머신 체스트나 스터프박스에서 이송된 고농도 지료와 백수 외에도 헤드박스에서 재순환되는 지료도 포함될 수 있다. 이렇게 1% 내외로 희석된 지료는 헤드박스로 공급되기 전 최종 이물질 제거 과정을 거친다. 이물질 제거 공정의 구성은 지종에 따라 상이한데, 보통 균일하고 우수한 품질의 상질지를 생산하는 공장에서는 고형 이물질과 공기의 제거가 중요하지만, 상대적으로 저급한 고평량 지종의 경우에는 클리너(cleaner)나 탈기장치

**그림 07-06.** 사일로의 백수와 팬펌프를 이용한 지료의 희석

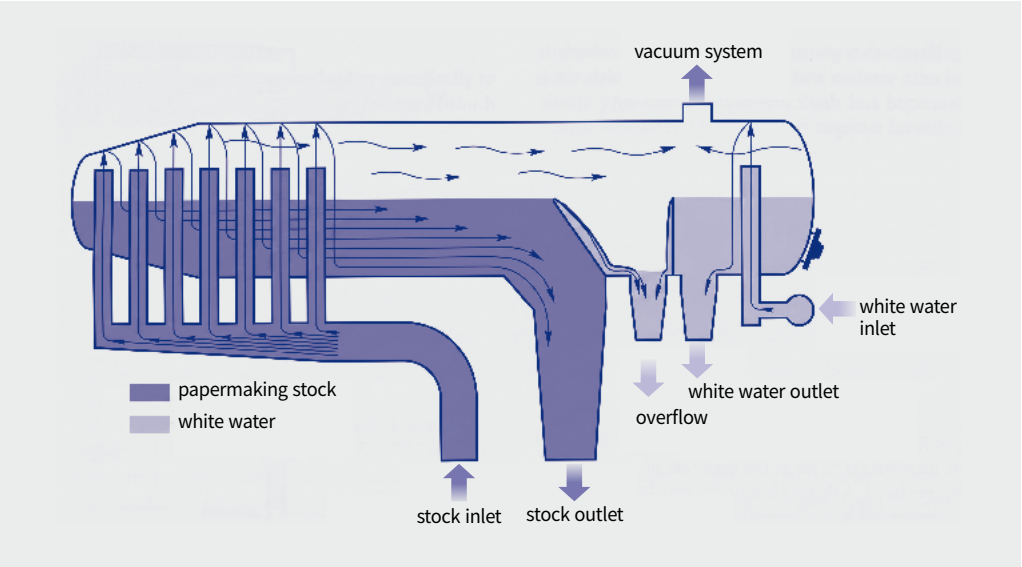



출처: Paulapuro, Hannu (ed.), Papermaking Science and Technolgoy Book No. 8, Papermaking Part 1. Stock Preparation and Wet end, Ch. 5, p.162, Fapet Oy. 2007

(deaerator 또는 deculator)를 포함하지 않기도 한다. 상질지 생산을 위해서는 일반적으로 클리너를 통해 비중이 상이한 이물질을 제거한 후 탈기장치를 통해 기포를 제거한다. 압축성 유체인 공기는 지료 내에 존재할 때 펌프의 작동이나 진공 효과를 떨어뜨릴뿐 아니라, 포밍부에서 얇은 지필이 성형될 때 파포되어 종이의 품질을 악화시킨다. 따라서 상질지 제조 시 기포의 제거는 매우 중요하다. 기포의 제거를 위해서는 탈기장치 내부에 진공을 가해 상대적으로 낮은 온도에서 공기가 끓어오르도록 할 뿐 아니라 유입 시 상부 천장에 부딪히도록 하여 기포의 배출과 제거가 용이하도록 한다(그림 07-07). 헤드박스로 유입되는 전체 지료에 대해 탈기를 할 수도 있지만 주로 기포가 포밍부에서 탈수되는 과정에서 백수에 유입되기 때문에 백수의 탈기를 실시하는 경우도 있다.

탈기장치를 거친 지료를 헤드박스 사출속도에 맞추어 헤드박스에 이송하기 위해 2차 팬펌프를 거친다. 탈기장치가 없는 경우에는 희석에 사용하는 팬펌프가 헤드박스로 이송하는 역할도 담당하지만, 클리너와 탈기장치를 거친 경우에는 2차 팬펌프가 필요하다. 헤드박스로 공급되기 전 마지막으로 스크린을 거쳐 최종 이물질을 제거한다. 스크린은 이물질 제거 기능 이외에도 섬유를 균일하게 분산시키는 역할도 한다. 스크린의 작은 홈을 통과하며 섬유의 응집이 깨져 헤드박스로 더욱 균일한 지료가 공급될 수 있다. 스크린은 회전하는 포일을 이용하여 플레이트

**그림 07-07.** 탈기장치 예시




출처: Smook, Gary, Handbook for Pulp and Paper Technologists (4th Ed.), p. 237, TAPPI Press, 2016 (Valmet product)

의 막힘을 억제하고 있지만, 회전 포일의 움직임에 따라 맥동이 발생할 수 있다. 최신 스크린의 경우 맥동이 작아 문제가 되지 않지만, 보통의 경우 스크린에서 헤드박스로 공급된 지료에 맥동이 존재하여 MD 방향 균일성에 문제를 야기하는 경우도 있다. 특히 하이드롤릭 헤드박스를 사용하는 경우 맥동의 문제가 더욱 두드러지는데, 이를 감쇄하기 위해 하이드롤릭 헤드박스를 채택한 공장에서는 헤드박스 직전 맥동감쇄장치(pulse attenuator 또는 surge tank)를 두기도 한다.
마이크로파티클 시스템과 같은 보류제의 경우 헤드박스로 이송되기 직전에 투입하는 것이 효과가 크기 때문에 어프로치부 스크린 전후로 약품을 투입하여 효과를 극대화시킨다.

## 4. 헤드박스

### (1) 헤드박스의 기능

지료조성부에서 초지기까지 지료는 약 1 m 이내의 직경을 가진 파이프를 통해 관류(pipe flow)로 공급된다. 관류로 공급된 지료는 초지기를 거치며 초지기 폭의 너비를 가진 판상 흐름으로 바뀌어, 두께가 얇은 종이 제품으로 제조된다. 이렇듯 파이프를 통해 공급된 관류를 초지기의 전폭으로 균일하게 전개하고, 적당한 난류를 형성시켜 섬유 분산이 확보된 지료를 균일하게 포밍 패브릭 위로 사출하는 설비를 헤드박스(headbox)라고 한다. 이 외에도 헤드박스는 CD 방향 평량 프로파일을 제어하는 역할을 맡고 있다. 헤드박스의 주요 기능은 다음과 같다.

- 지료를 초지기 전폭으로 전개
- 적절한 난류 부여를 통한 섬유의 균일한 분산
- 포밍 패브릭 위 정확한 위치로 지료 사출
- 평량 CD 프로파일 제어

균일하게 분산된 지료가 포밍부의 적절한 위치에 착지하도록 하는 것이 헤드박스의 중요한 기능이기 때문에 헤드박스 내부는 섬유의 걸림이나 오염이 발생하지 않도록 매끈하게 연마되어 있어야 하며, 운전과 보수가 용이해야 한다. 또한, 헤드박스는 평량 프로파일, 사출각도, 사출 속도 등을 정확하게 제어할 수 있어야

한다. 헤드박스는 또 지료의 온도와 사출 압력에 변형되지 않는 기계적 견고성을 가져야 한다. 특히 초지속도가 증가함에 따라 고속 운전이 가능한 헤드박스의 개발과 함께 더욱 균일한 섬유 분산, 평량 프로파일 제어, 기계적 안정성 등을 확보할 수 있는 방향으로 헤드박스의 기술적 진보가 이루어지고 있다.

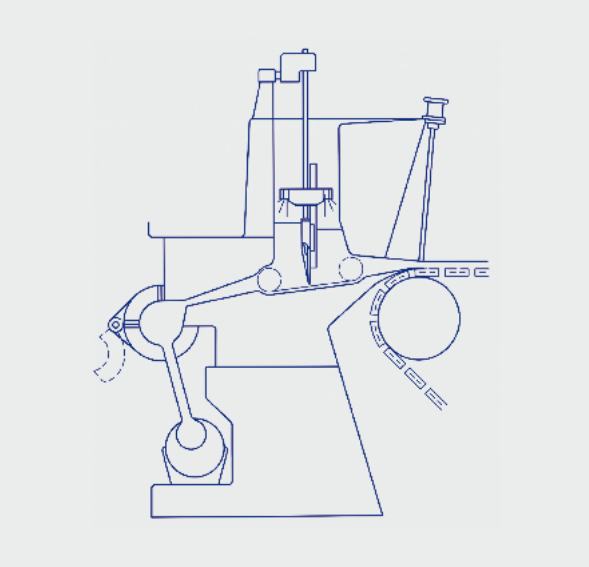
### (2) 헤드박스의 종류

연속식 초지기의 발명으로 헤드박스는 초지를 위해 꼭 필요한 요소가 되었다. 연속식 초지기 이전 시대에는 한지를 제조하는 것과 같이 커다란 통에 지료를 담고 발 또는 스크린 틀을 이용하여 낱장 형태의 종이를 제조하였다. 그러나 연속식 초지방식으로 바뀌자 지료를 와이어 전 폭에 걸쳐 연속적으로 흘려보낼 수 있는 장치가 필요하게 되어, 헤드박스라고 불리는 지료통이 도입되었다. 초기의 연속식 초지기에서 지료가 사출되는 속도는 이 통에 담긴 지료의 높이(수두, head)로 결정되었기 때문에 이 통이 헤드박스라는 이름을 가지게 되었다.
초창기 연속식 초지기의 헤드박스는 지료를 담아 흘려보내는 역할만 수행하였으나, 이후 고품질 종이에 대한 요구와 초지속도 및 초지폭이 증가함에 따라 섬유의 분산을 확보하고 전폭으로 균일하게 확장할 수 있는 헤드박스 개발이 이루어졌다. 특히, 급격하게 증가하는 종이 수요를 감당하기 위해 생산성 향상은 무엇보다 필요하였다. 이러한 요구는 초지속도의 급속한 증가로 이어지며 초지 기술 발전을 견인하였는데, 헤드박스는 이 변화의 중심에 있었다.
초창기의 헤드박스는 개방형이었으나, 단순한 중력에 의해 개방형 헤드박스에서 얻을 수 있는 지료의 사출속도가 증가하는 초지속도에 부응하지 못하게 되자 펌프에 의해 속도가 제어되는 밀폐형 헤드박스가 개발되었다. 밀폐형 헤드박스는 에어쿠션 헤드박스(air-cushion headbox 또는 air-padded headbox)와 하이드롤릭 헤드박스(hydraulic headbox)로 나뉜다. 두 밀폐형 헤드박스 가운데 온전히 펌프의 힘으로 사출속도가 결정되는 하이드롤릭 헤드박스가 더 높은 초지속도에 적합하여 현재 가장 널리 사용되고 있다.

#### 1) 개방형 헤드박스

개방형 헤드박스(open headbox)는 초기 연속식 초지기에 사용된 헤드박스이

그림 07-08. 개방형 헤드박스 예시



출처: Smook, Gary, Handbook for Pulp and Paper Technologists (4th Ed.), p. 239, TAPPI Press, 2016 (Voith product)

다(그림 07-08). 식 2와 같이 지료 수두에 의한 압력이 사출 속도를 결정한다. 따라서 초지 속도를 증가시키기 위해서는 지료 수두를 높여야 한다. 예를 들어, 초지속도 120 m/min인 경우 필요한 지료의 높이는 0.2 m이지만, 360 m/min으로 초지속도가 증가한다면 지료의 높이는 1.8 m로 증가되어야 한다. 초지속도를 증가시키기 위해서는 지료 수두를 속도의 제곱만큼 높여야하는 문제가 있어, 개방형 헤드박스는 현재 매우 낮은 속도의 초지 환경 또는 파일럿 초지기에서 사용된다.

$$u = \sqrt{2gH}$$

식 2

(여기서, u는 초지속도 (m/s), g는 중력가속도 (9.81 m/s$^2$), H는 지료 수두(m))

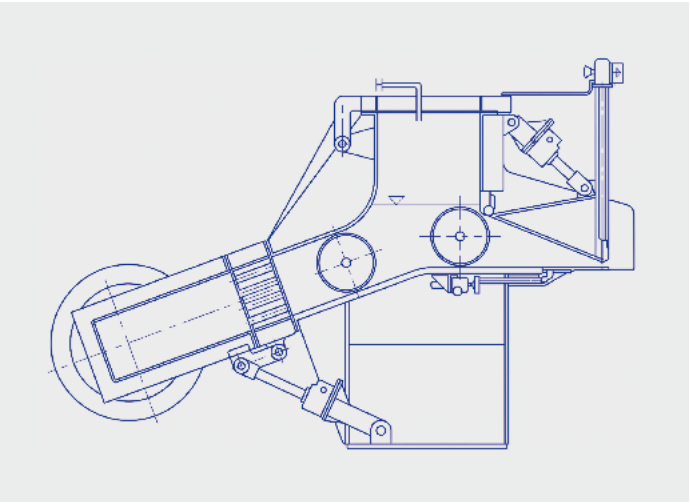
## 2) 밀폐형 헤드박스

### 가. 에어쿠션 헤드박스

연속식 초지기가 개발, 운전된 이래 늘어난 종이 수요를 맞추기 위해 2000년대 초까지 초지속도는 지속적으로 증가하여 왔다. 기록에 의하면 1900년에 150 m/min을 기록했던 초지속도가 1911년에는 210 m/min, 1920년에는 300 m/min

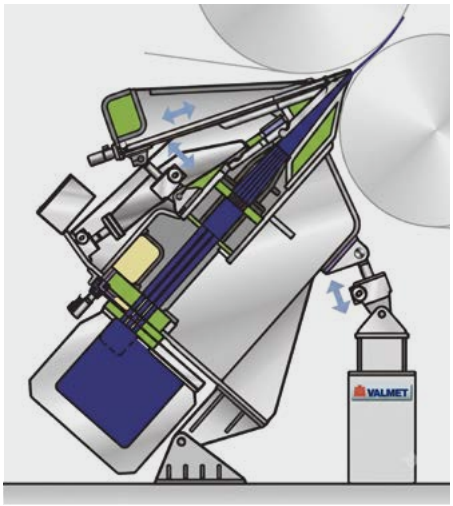
으로 증가하였다. 2000년대 초 신문용지의 초지속도는 2300 m/min으로 증가하였다. 그러나 개방형 헤드박스로 300 m/min 이상으로 운전하기 위해서는 지료 수두가 약 1.3 m 이상이 되어야 하기 때문에 실제적으로 사용이 불가능하였다. 이런 문제를 해결하기 위해 펌프 압력으로 사출속도를 결정할 수 있는 밀폐형 헤드박스가 개발되었다. 에어쿠션 헤드박스는 밀폐형 헤드박스의 대표적인 종류로, 펌프 압력에 의해 사출량이 정해진다. 이 헤드박스에는 그림 07-09와 같이 지료의 수위를 일정하게 유지할 수 있도록 눌러 주는 가압 공기층이 내부에 존재한다. 이 가압 에어쿠션은 헤드박스로 유입되는 지료에 존재하는 맥동을 감쇄하는 역할도 한다. 유입 지료의 맥동은 평량의 MD 방향 불균일을 발생시키기 때문에 적절히 제어되어야 한다. 최신 초지기 어프로치 파트의 팬펌프나 스크린은 맥동을 최소화하도록 디자인되어 있으나, 그렇지 않은 경우 가압 공기 챔버는 맥동을 제어하는 데에 매우 유용한 역할을 한다. 또한 에어쿠션 헤드박스 내부에는 일정한 직경의 구멍이 뚫려 있는 롤이 한 개 혹은 두 개 위치하고 있다. 이를 천공롤(rectifier roll, perforated roll 또는 holey roll)이라고 한다. 회전하는 이 롤의 구멍으로 지료가 통과할 때 섬유의 플록이 깨지며 균일한 분산을 확보할 수 있다. 지료를 눌러주고 있는 가압 공기층 부분에는 샤워가 설치되어 있어 벽면에 섬유가 달라붙는 것을 막아준다.

**그림 07-09.** 에어쿠션 헤드박스 예시



출처: Paulapuro, Hannu (ed.), Papermaking Science and Technolgoy Book No. 8, Papermaking Part 1. Stock Preparation and Wet end, Ch. 6, p.236, Fapet Oy. 2007

**그림 07-10.** 하이드롤릭 헤드박스 예시




출처: Valmet Brochure

### 나. 하이드롤릭 헤드박스

하이드롤릭 헤드박스(hydraulic headbox)는 현대의 고속 초지기에 주로 사용되고 있는 헤드박스이다(그림 07-10). 에어쿠션 헤드박스와 달리 가압 공기 챔버가 존재하지 않거나, 존재하더라도 매우 작은 부피로 존재하기 때문에 펌프의 압력에 의해 지료의 사출속도가 결정된다. 공기 챔버가 없기 때문에 유입 지료에 맥동이 있을 경우 이를 감쇄하기 어렵다. 따라서 보통 하이드롤릭 헤드박스는 헤드박스 직전에 맥동감쇄장치를 설치하여, 지료가 이를 통과하며 맥동이 감쇄되도록 한다. 또한 천공롤을 설치할 공간이 내부에 없어 섬유의 분산은 튜브 뱅크 또는 관의 직경이나 모양의 변화로 발생하는 수력학적 방법을 통해 이루어진다. 튜브의 배치 또는 관의 유입/유출부 모양을 변화시킴으로써 횡류를 제어할 수 있다는 점이 에어쿠션 헤드박스에 비해 장점이다. 또 지료를 가속 사출하는 슬라이스 부에 베인(vane)을 장착하여 미세난류가 발생하도록 디자인할 수 있다. 튜브 뱅크에 희석수를 넣어줌으로써 평량의 CD 방향 프로파일을 섬유배향성과 별개로 제어할 수도 있다. 또한 두세 종류의 지료를 한꺼번에 사출하는 다층형 헤드박스도 구현이 가능하다.

### 다. 에어쿠션 헤드박스와 하이드롤릭 헤드박스의 비교

높은 초지속도로 운전되는 최신 초지기의 경우 하이드롤릭 헤드박스를 주로 채택하고 있지만, 지종에 따라 에어쿠션 헤드박스가 운전에 더 유리할 수 있다. 에어쿠션 헤드박스는 가압 공기 챔버가 있어 운전할 수 있는 유량 범위가 상대적으로 크기 때문에 넓은 평량 범위의 지종 생산이 가능한 장점이 있다. 즉, 저평량 지종부터 고평량 지종까지 다양한 평량 대의 지종을 생산하는 공장이라면 에어쿠션 헤드박스가 유리할 수 있다. 반면, 하이드롤릭 헤드박스는 펌프 압력이 주된 사출 에너지이기 때문에 설계 유량 범위에서 운전할 때는 매우 균일한 섬유 분산을 가진 종이를 생산할 수 있다. 하지만 그 범위를 벗어날 경우 너무 적거나 과도한 난류가 발생하여 오히려 지합이 악화될 수 있다. 맥동 제어 측면에서는 에어쿠션 헤드박스가 유리하다. 그러나 하이드롤릭 헤드박스의 경우, 설계 범위의 유량 대에서는 내부 튜브의 크기와 모양, 배치를 다양하게 함으로써 작은 스케일이지만 강도가 센 난류를 발생시켜 섬유의 균일한 분산을 유도할 수 있으며, 횡류를 제어하여 섬유배향성이 우수한 종이를 제조할 수 있다. 또한 하이드롤릭 헤드박스는 농도 희석 방식으로 평량의 CD 프로파일을 제어하기 용이하며 유지, 보

**도표 07-01.** 에어쿠션 헤드박스와 하이드롤릭 헤드박스의 특징

| 항목 | 에어쿠션 헤드박스 | 하이드롤릭 헤드박스 |
|---|---|---|
| 초지속도 | 보통 1000 m/min 이하 | 보통 1000 m/min 이상 |
| 운전 유량 범위 | 최소/최대 유량 범위 넓음 (1:2.5~3.0) | 유량 범위 좁음 (<1:2) |
| 생산 평량 범위 | 넓음 | 좁음 |
| 지료 농도에 대한 민감도 | 난류 강도의 한계로 농도에 대체로 민감 | 높은 난류 강도로 비교적 고농도 운전 가능 |
| 지합 (formation) | 비교적 큰 플록 (Cloudy formation) | 지합 우수. 난류 강도가 매우 클 경우 좁쌀 모양의 플록 (Grainy formation) |
| 맥동 감쇄 | 가압 공기층으로 자체 감쇄 | 별도의 맥동 감쇄장치 필요 |
| 농도 희석 장치 | 대체로 불가 | 가능 |
| 유지보수의 용이 | 상대적으로 어려움 | 상대적으로 용이 |

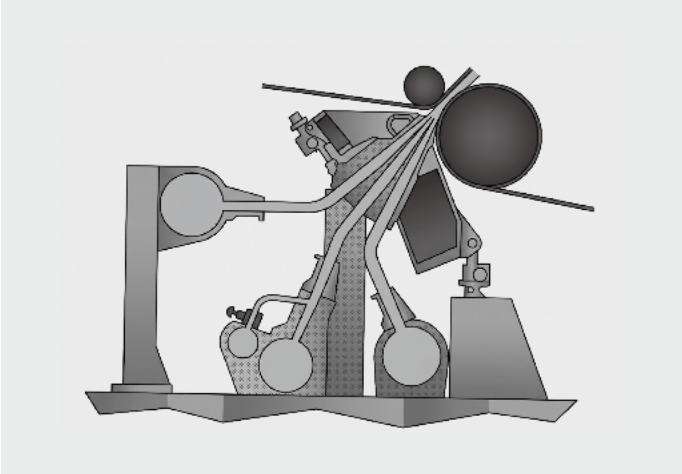
수가 쉬울 뿐 아니라 무엇보다 초지속도를 높여 생산성을 증가시킬 수 있다는 장점이 있다. 최근 에어쿠션 헤드박스의 경우도 농도 희석 방식으로 평량의 CD 프로파일 제어가 가능하게 되도록 발전되었기 때문에 공장에서 생산하는 지종에 따라 적절한 헤드박스를 선택하는 것이 바람직하다. 각각의 특징을 정리하여 도표 07-01에 제시하였다.

### 3) 다층형 헤드박스

다층형 헤드박스(stratified headbox 또는 multilayer headbox)는 2개 내지 3개의 상이한 지료를 하나의 슬라이스를 이용하여 동시에 사출하는 헤드박스를 말한다(그림 07-11). 라이너지와 골심지 같은 산업용지나 티슈 등은 종이의 품질과 원료의 경제적 사용을 위해 바깥층과 내층의 원료를 상이하게 조성하는 것이 유리할 수 있다. 평량이 낮은 경우 탈수 부담이 적기 때문에 굳이 투자비용이 높은 다층 초지부(multiply forming)를 설치하기보다 헤드박스에서 다층으로 지료를 사출하는 것이 더 유리하다. 예를 들어 티슈의 경우 표면층에는 활엽수 표백 크라프트 펄프를 사용하여 표면의 매끄러움을 얻고 내층에는 기계펄프로 지료를

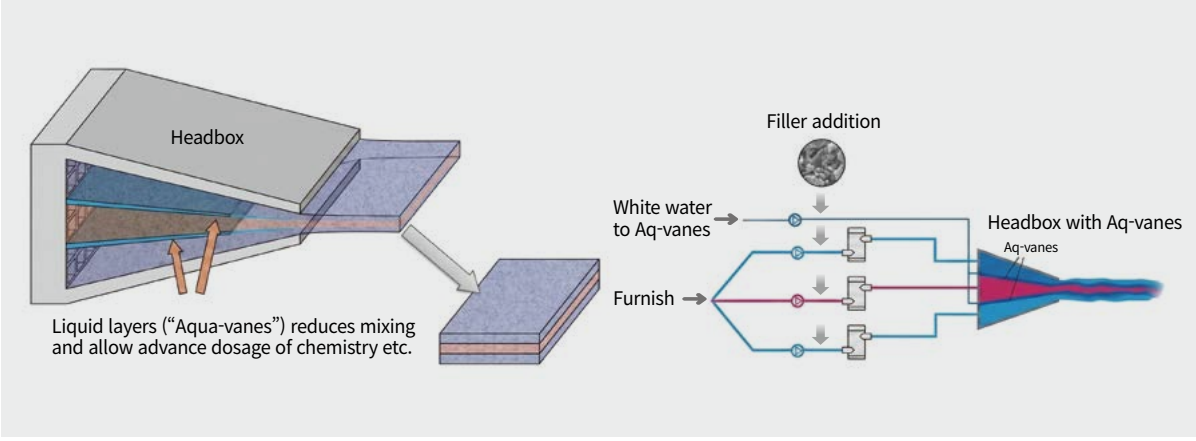
조성하여 두께감을 확보할 수 있다. 다층형 헤드박스에는 2개 또는 3개의 별도 지료 공급관을 통해 지료가 공급되지만 슬라이스 입구에서 하나로 합쳐져 사출된다. 슬라이스에서는 플라스틱 베인(vane)을 둠으로써 층 별 원료의 혼합을 억제할 수 있다. 최근에는 Aqua-vane 헤드박스(그림 07-12)가 개발되었는데, 이는 플라스틱 베인 대신 워터 젯(물 층)이 층 간을 구별한다. 워터 젯이 기존 베인보다 오히려 층 간 혼합을 더 억제할 뿐 아니라 물 층에 지력증강제와 같은 약품을 넣어줌으로써 층간 결합력을 더 높일 수 있다. 충전물 함량이 높거나 품질이 열악한

**그림 07-11.** 다층형 헤드박스 예시 (3-layer W-type headbox)



출처: Voith Product / Pantaleo, Scott, Modern headboxes – Their role and capabilities in the sheet forming process, 1999 TAPPI Wet End Operations Short Course, TAPPI Press, 1999

**그림 07-12.** 다층형 헤드박스 예시 (Aq-vane, Valmet)



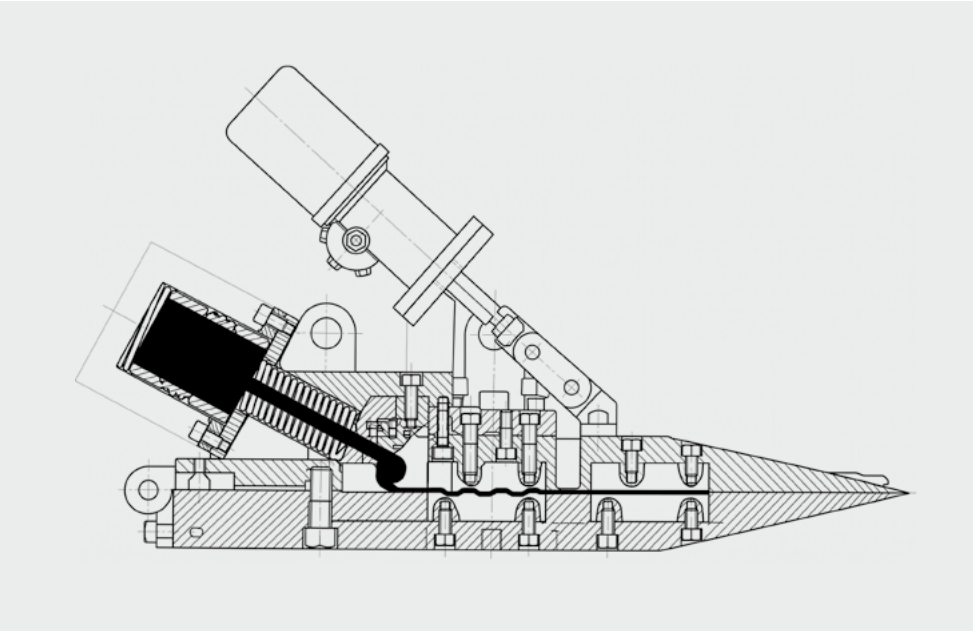

출처: Valmet Product / Wiberg, Anna, Söderberg, Danniel, Bjärestrand, Annika, and Grussenmeyer, Heiner, Development of a future manufacturing concept for papermaking, 2015 PaperCon Conference, TAPPI Press, 2015

재활용 지료를 이용하는 공정에서 Aqua-vane에 지력증강제를 투입하여 더 우수한 강도를 갖는 종이를 개발한 결과가 보고된 바 있다.

### 4) 고농도 헤드박스

제지산업은 에너지 다소비 업종으로 분류되는데, 이는 1% 내외의 농도로 헤드박스에서 사출되는 지료의 수분을 제거하는 데에 많은 에너지가 소비되기 때문이다. 지료 농도가 낮다는 것은 섬유 간 충돌을 줄여 섬유 분포의 균일성을 확보하는 데는 도움이 되지만, 농도가 낮은 경우 더 큰 파이프, 저장조, 펌프 등이 필요하기 때문에 설비비가 높은 단점이 있다. 그러나 기존 헤드박스의 농도를 높일 경우, 충분한 섬유 분산이 불가능해지는 한계가 있다. 에너지 및 설비 비용을 낮추기 위한 하나의 방안으로 스웨덴의 STFI에서 1970년대 초에 고농도 헤드박스(high-consistency headbox)를 개발하였다(그림 07-13). 이는 기존 헤드박스와 달리 3% 정도의 농도로 운전할 수 있는데, 그 비결은 지료를 1-3 mm의 작은 채널 속으로 통과시키며 분산을 유도하는 것이다. 하지만 농도가 높기에 섬유 간 엉

**그림 07-13.** 고농도 헤드박스 예시



출처: Paulapuro, Hannu (ed.), Papermaking Science and Technolgoy Book No. 8, Papermaking Part 1. Stock Preparation and Wet end, Ch. 6, p.247, Fapet Oy. 2007

도표 07-02. 헤드박스의 기능별 구성 요소

| 단위 요소 | 기능 | 에어쿠션 헤드박스 명칭 | 하이드롤릭 헤드박스 명칭 | 그림 07-14의 해당 장치번호 |
|---|---|---|---|---|
| 지료분배기 (Distributor) | 관류를 초지기 전 폭으로 전개 | 테이퍼드 헤더 또는 테이퍼드 매니폴드 (Tapered header or tapered manifold) | 테이퍼드 헤더 또는 테이퍼드 매니폴드 (Tapered header or tapered manifold) | ① |
| 난류발생장치 (Turbulence generator) | 섬유의 응집을 깨뜨리기 위한 난류 부여 | 천공롤 (Rectifier roll, perforated roll, holey roll) | 스텝 디퓨저 (Step diffuser) | ④ |
| 지료 가속 노즐 (Accelerating nozzle) | 지료를 가속화하여 포밍 패브릭 위로 사출 | 슬라이스 (Slice) | 슬라이스 (Slice) | ⑤ |

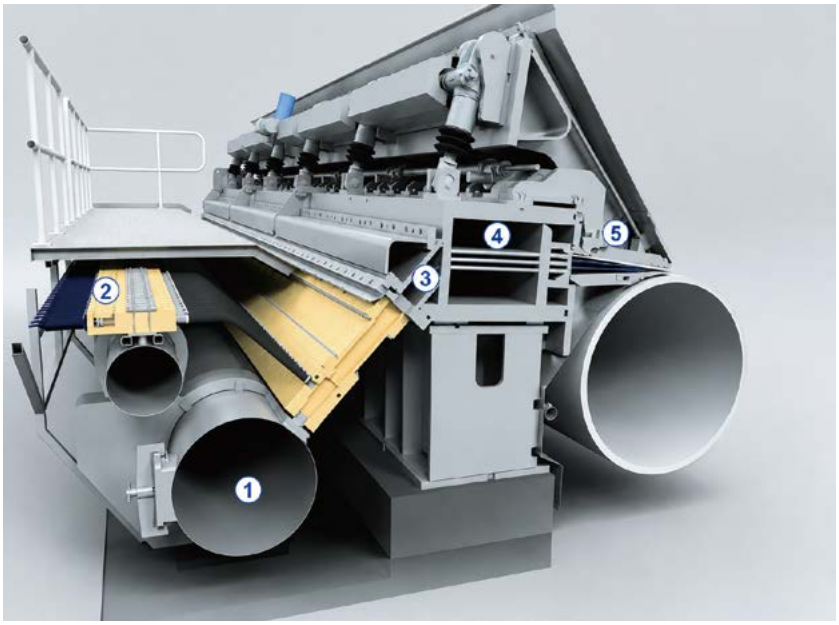
킴을 완벽하게 억제하기 어렵고, 사출 후 초지부에서 추가의 지료 분산을 유도하기 어렵다는 문제를 안고 있다.

### (3) 헤드박스의 구성 요소

헤드박스는 관류를 초지기 전 폭으로 균일하게 전개하고 섬유의 분산을 고르게 하여 포밍 패브릭 위의 적절한 위치에 사출함으로써 CD 방향 평량 프로파일을 제어한다. 이러한 기능은 헤드박스의 종류와 관계없이 모든 헤드박스에서 원활하게 이루어져야 한다. 이러한 기능을 원활히 수행하기 위해 헤드박스 내부에는 각 기능에 해당하는 단위 요소가 순차적으로 위치되어 있다. 일부 동일한 기능을 부여하더라도 에어쿠션 헤드박스와 하이드롤릭 헤드박스 간에는 각 기능을 수행하는 장치의 형태가 달라 다른 명칭으로 불릴 수 있다. 주요 기능별 구성단위의 명칭이 도표 07-02에 제시되어 있다.

그림 07-14는 하이드롤릭 헤드박스의 대표적인 내부 구성요소를 보여준다. ①은 지료분배기, ②는 평량 CD 프로파일 조정용 농도 희석 장치(moduleJet), ③은 지료분배기에서 나온 지료 유동을 안정화시키는 장치(stilling chamber), ④는 난류발생장치, 그리고 ⑤는 균일하게 분산된 지료를 가속화하여 사출하는 슬라이스 장치이다. 일부 헤드박스의 경우 평량 CD 프로파일 제어는 ②의 농도 희석 장치 대신 슬라이스 액추에이터를 통해 수행하기도 한다.

그림 07-14. 하이드롤릭 헤드박스 내부 구조



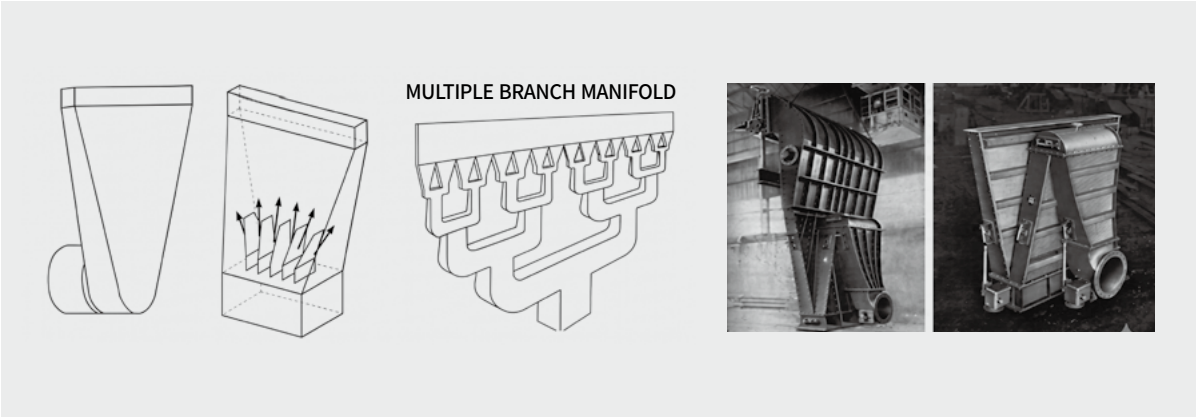

출처: Voith Brochure

지료분배기는 초지기 전 폭으로 균일한 유량과 압력으로 지료가 분배되도록 하는 매우 중요한 장치이다. 근대식 초지기의 경우 초지 속도가 느리고, 폭도 넓지 않았기 때문에 지료를 초지기의 전 폭으로 전개하는 데에 큰 어려움은 없었다. 저속 초지기에서 지료의 균일한 분배를 위해서는 그림 07-15와 같은 다양한 장치가 고안되어 사용되었다. 그러나 초지속도와 더불어 초지기의 폭이 증가되자 기존의 지료분배기는 한계가 있었다. 하나의 중앙 파이프에서 다관 형태 또는 디퓨저 형태로 펼쳐지던 기존 지료분배기를 넓어진 초지기 폭에 이용하려면 지료분배기의 길이가 너무 길어져야 했다. 그뿐만 아니라 횡류 등 불균일한 유동이 발생되어 지료의 균일한 분배에 어려움이 있었다. 다행히 이 문제는 1950년대 중반 테이퍼드 매니폴드(tapered manifold) 또는 테이퍼드 헤더(tapered header)라 불리는 장치가 개발됨으로써 해결되었다. 현재 대부분의 헤드박스는 이 형태의 지료분배기를 갖추고 있다. 그림 07-16과 같이 지료는 초지기의 한 쪽으로 공급되어 반대쪽으로 흘러나가는 동안 90도 방향으로 꽂혀있는 튜브를 통해 헤드박스 내부로 유입된다. 테이퍼드 헤더를 통해 흘러가는 동안 헤드박스 내부로 일정량 지료가 유입되기 때문에 지료분배기를 따라 흐르는 지료의 압력은 감소한다. 이러한 문제를 해결하고 지료의 압력이 초지기 전 폭에 걸쳐 동일하게 유지될 수 있도록 지

료분배기의 입구(inlet)에서 흘러나가는 출구(outlet) 방향으로 단면적을 점진적으로 감소시켰다. 이에 따라 지료분배기의 관이 경사를 이루는 형태를 보이기 때문에 테이퍼드 매니폴드라 불린다.

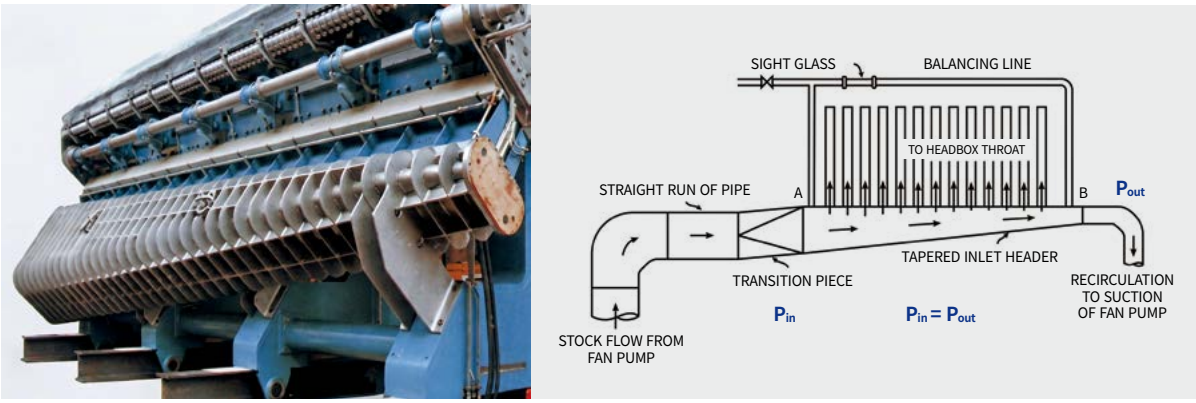
생산하는 제품의 평량에 따라 헤드박스로 공급되는 지료의 유량이 달라지게 된다. 즉 평량이 높은 지종을 생산하기 위해서는 저평량 지종의 경우보다는 많은 유량의 지료가 공급되어야만 한다. 다양한 평량의 지종을 하나의 초지기로 생산하기 위해서는 헤드박스로 공급되는 지료의 유량이 변화되더라도 헤드박스 전 폭에 걸쳐 지료의 압력을 동일하게 유지시킬 수 있어야만 한다. 이를 위해서 헤드박스

**그림 07-15.** 초기 지료 분배기의 모습



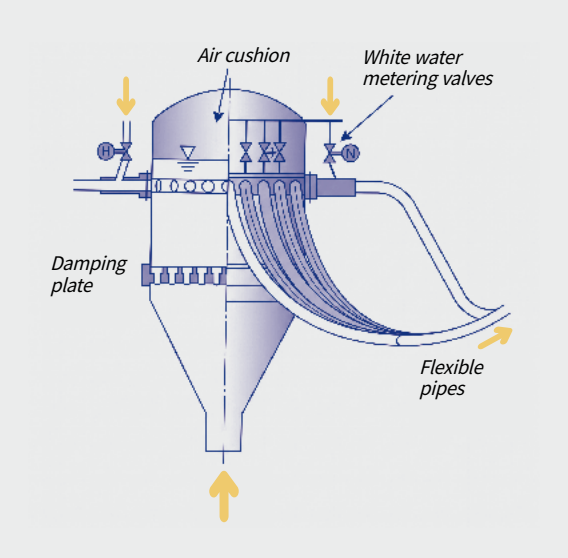

출처: Pantaleo, Scott, Modern headboxes – Their role and capabilities in the sheet forming process, 1999 TAPPI Wet End Operations Short Course, TAPPI Press, 1999, Design and operation of headboxes, 2004 Paper Machine Operations Short Course, TAPPI Press, 2004

**그림 07-16.** 테이퍼드 매니폴드 모습과 지료분배기 내 지료 유채 압력 분포




출처: Smook, Gary, Handbook for Pulp and Paper Technologists (4th Ed.), p. 238, TAPPI Press, 2016

그림 07-17. 방사형 지료분배기(radial-type distributor)




출처: Paulapuro, Hannu (ed.), Papermaking Science and Technolgoy Book No. 8, Papermaking Part 1. Stock Preparation and Wet end, Ch. 6, p.244, Fapet Oy. 2007

공급 지료 중 일부를 재순환시킨다. 이를 재순환지료(recirculation stock)라 한다. 재순환지료의 유량 비율은 보통 10% 내외이다. 지료분배기의 입구와 출구 압력 차이에 따라 재순환되는 양을 더 증가시키거나 줄이게 된다. 보통 양 끝단에 압력계를 설치하고 두 압력계 간의 차이를 통해 유압이 동일한지 확인하거나, 양 끝단을 연결시킨 파이프 중간에 투명한 관을 설치하여 지료의 움직임이 있는지를 육안으로 확인한다. 재순환된 지료는 다시 팬펌프를 통해 지료에 혼합되어 원료로 이용된다.

테이퍼드 매니폴드의 단면적이 지료 진행 방향으로 점진적 감소된다 하더라도, 설계 유량이 아닌 경우 이상적으로 동일한 압력을 갖기가 어렵다. 이를 극복하기 위해 일부 헤드박스의 경우 그림 07-17과 같이 방사형 지료분배기(radial-type distributor)를 설치하여 어떤 방향에서나 동일한 유압이 형성되도록 하고 있다. 분배기의 아래쪽으로부터 유입된 지료는 상부 가압 공기층이 있는 챔버를 통과하며 맥동이 감쇄되고 이 지료분배기의 원주에 연결된 유연한 호스를 통해 헤드박스로 유입된다. 헤드박스로 유입되는 호스에 희석 장치를 연결하여 CD 방향 평량 프로파일도 제어할 수 있다. 하지만 이러한 방법은 초지기 폭이 매우 넓은 경우에는 적용하기 어렵다는 한계가 있다.

테이퍼드 매니폴드를 통해 지료는 90도 꺾여 유입되었기 때문에 유동이 안정되지 못하고 횡류가 발생할 수 있다. 유동의 불균일성을 완화시키기 위해 많은 헤드박스는 스틸링 챔버를 두고 있다.

좋은 지합의 종이를 만들기 위해서는 헤드박스 전 폭 방향에서 균일한 흐름을 형성시킨 후 난류(turbulence)를 발생시켜 섬유의 응집을 깨뜨리고 균일한 분산이 이루어지게 한다. 난류는 무질서하고 비정상성을 가진 유동으로, 보통 레이놀즈수 4,000 이상인 유체를 일컫는다. 난류에 의해 열전달이나 물질 혼합이 증대되나, 난류 에너지는 쉽게 소멸되기 때문에 분산을 유지하기 위해서는 반복적인 난류의 발생이 필요하다.

헤드박스는 초지기에서 지료에 난류를 부여하는 첫 번째 장치이다. 난류발생장치(turbulence generator)는 에어쿠션 헤드박스와 하이드롤릭 헤드박스 간에 가장 큰 차이가 나는 구성요소이다. 에어쿠션 헤드박스는 가압 공기층이 존재하는 챔버 내에서 난류가 발생하여야 한다. 이를 위해 그림 07-18에서 보듯이 천공롤이 사용된다. 하나 또는 두 개의 천공롤은 천천히 회전한다. 지료는 천공롤의 구멍을 통과하면서 가속과 감속이 발생하므로 섬유가 분산된다. 천공롤의 직경 및 속도, 천공 구멍의 직경, 천공 개공율(open area) 등에 의해 지료에 가해지는 난류의 크기가 영향을 받는다. 보통 직경 2~4 cm의 구멍이 35~50%의 개공율로 뚫려 있다. 천공롤의 회전속도는 6~15 rpm 범위에 있다. 적절히 분산된 지료가 사출될 수 있도록 천공롤의 위치 또한 앞뒤로 조절가능하다. Mardon은 천공롤의 디자인 요소를 바탕으로 식 3과 같이 no wake distance (d)를 제시하였다. 이를 통해 적절한 롤의 위치를 그림 07-18과 같이 결정할 수 있다. 또한 지료가 천공롤의 구멍을 통과하지 않고 천공롤 아래 또는 양 끝단으로 지나가지 않도록 적절히 설치, 운전되어야 한다.

$$d = K \times \frac{V^{4/3}\pi^{1/2}}{b^{1/3}}$$

식 3

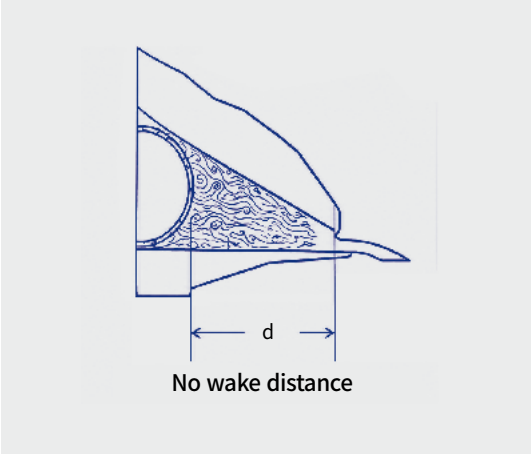
(여기서 d는 no wake distance (in), K는 wake constant,
V는 천공롤 홀을 통과하는 지료 속도 (f/s), π는 홀의 직경(in), b는 롤의 직경(in))

출처: Pantaleo, Scott, Modern headboxes – Their role and capabilities in the sheet forming process, 1999 TAPPI Wet End Operations Short Course, TAPPI Press, 1999

반면, 하이드롤릭 헤드박스는 천공롤이 위치할 수 있는 공간이 없다. 따라서 하이드롤릭 헤드박스의 경우 튜브의 단면이 점진적으로 확대되는 디퓨저(diffuser)

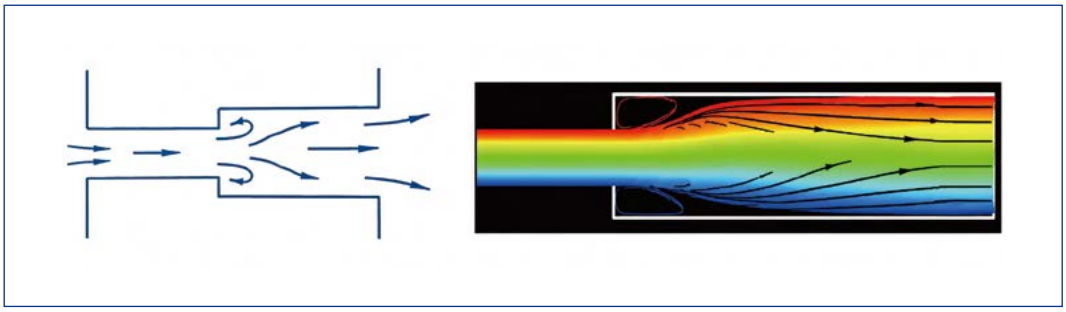
또는 계단식으로 확대되는 스텝 디퓨저(step diffuser)를 채택하여 난류를 부여한다(그림 07-19). 스텝 디퓨저에서는 단면 직경의 확대에 의해 유속이 감소하고 압력이 증가하며 유동 박리 현상이 발생한다. 즉, 직경 확대 직후 유체가 벽면에서 박리되며 재순환하는 영역이 나타나고, 이에 따라 유동의 전단층이 발생하여 불균일한 흐름인 와류(vortex)가 발생한다. 이러한 불안정한 유동인 난류에 의해 섬유의 응집이 깨지며 섬유 분산을 유도할 수 있다. 초지속도가 높은 하이드롤릭 헤드박스의 경우 유속이 높아 발생하는 난류의 세기가 크다. 또 작은 단면 확대에 의해 난류를 유발하기 때문에 난류의 크기가 작아 섬유 크기 수준으로 분산을 확보하기 용이하다(그림 07-20). 따라서 천공롤이 장착된 에어쿠션 헤드박스에 비해 하이드롤릭 헤드박스가 더 균일한 지합의 종이 생산에 유리하다.

**그림 07-18.** 에어쿠션 헤드박스 내 천공롤의 설치 위치



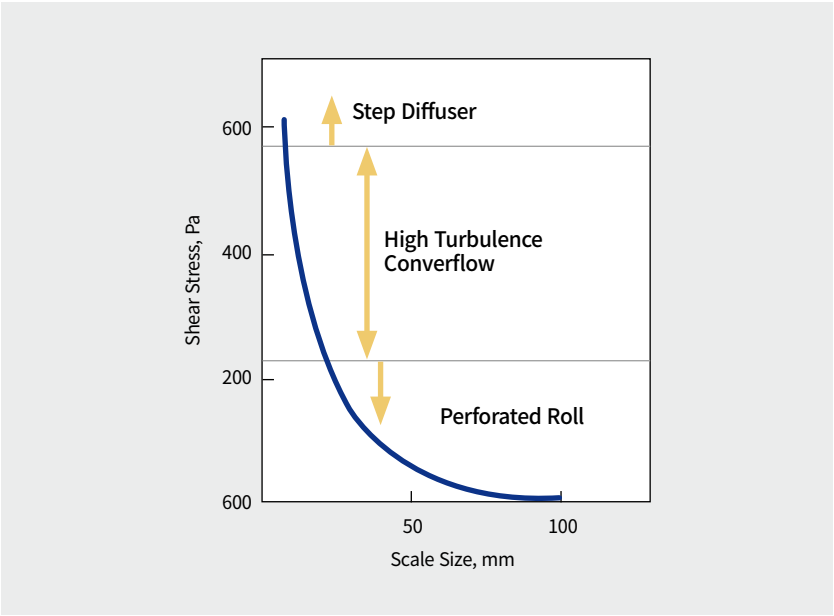

출처: Pantaleo, Scott, Modern headboxes – Their role and capabilities in the sheet forming process, 1999 TAPPI Wet End Operations Short Course, TAPPI Press, 1999

**그림 07-19.** 하이드롤릭 헤드박스의 난류발생장치인 (좌) 스텝 디퓨저 모습과 (우) 내부 유동



출처: 저자 자료

그림 07-20. 난류에 의한 전단응력 및 크기

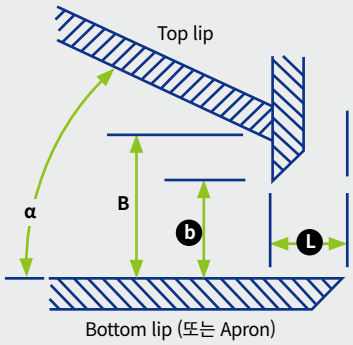



출처: Waller, M.H., Design and development of headbox – 1991, 1991 Wet End Operations Seminar Notes, TAPPI Press, 1991

난류발생장치에 의해 분산이 확보된 섬유가 다시 응집하지 않고 분산이 잘 유지된 상태로 패브릭 위에 사출되어야 지합이 우수한 종이를 생산할 수 있다. 분산성을 잘 유지하기 위해 지료는 가속되어 사출되는데, 이러한 가속화 장치를 슬라이스(slice)라고 한다(그림 07-21). 슬라이스는 위, 아래 두 장의 판이 수렴하는 형태로 구성되어 있는데, 윗 판을 탑립(top lip), 아래 판을 바텀립(bottom lip 또는 apron)이라 부른다. 슬라이스 출구의 높이 즉, 출구 쪽 탑립과 바텀립 사이의 간격을 'b'라고 부르고, 탑립 위치 대비 바텀립의 수평 위치 간격을 'L'이라고 부른다. 이 L/b 비율에 따라 지료가 슬라이스로부터 사출되는 각도와 사출길이가 달라진다(그림 07-22). 보통 L/b 비율이 높을수록 지료의 사출각도는 0도에 가깝고 사출길이가 커지게 된다. 작은 L/b 비율에서는 큰 각도로 포밍 패브릭 위에 사출되므로 초기 탈수가 많이 발생할 수 있다. 이런 경우를 압력포밍(pressure forming)이라고 한다. 이 방법은 초기 탈수에 유리하지만 과도한 포밍압력으로 인해 패브릭을 지료 구성분이 막는 시트실링(sheet sealing) 문제가 발생하여 이후 탈수에는 제약이 발생할 수 있다. 이를 피하기 위해 일반적으로 지료의 착지각도가 낮은 속도포밍(velocity forming)이 이루어지도록 높은 L/b 비율 조건으로 운전하고 있다.

슬라이스의 입구와 출구의 높이 비율인 수축율(contraction ratio)에 따라 가속화되는 정도가 달라진다. 높이가 줄어든다는 것은 폭까지 고려할 때 단면적이 줄어드는 것을 의미하며, 이로 인해 유체의 속도는 빨라지게 된다. 이러한 가속화는 난류발생장치에 의해 미처 분산되지 않은 섬유 플록을 유체 진행 방향으로 늘려 분산시키는 데에도 도움이 된다. 하이드롤릭 헤드박스의 경우 슬라이스로 이어지는 난류발생장치 출구 부분에 그림 07-14에서 보듯이 얇은 필름의 플라스틱 베인(vane)을 장착함으로써 난류를 추가로 발생시켜 더욱 우수한 지합의 종이를 생산

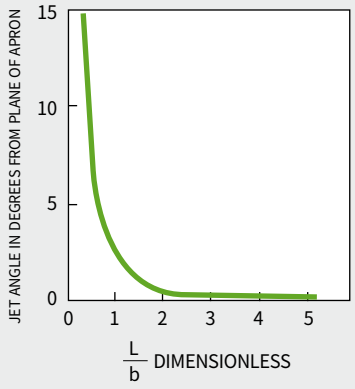
**그림 07-21.** 슬라이스 구조

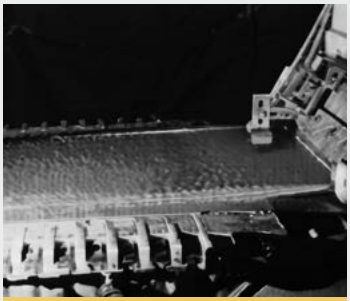



α = Top lip과 bottom lip이 이루는 각도
B = 슬라이스 바 이전 간격
b = 슬라이스 바 아래 간격 (슬라이스 갭)
L = Lip 간의 수평 거리

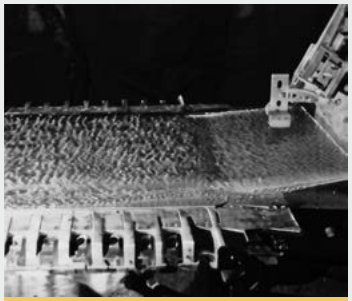
출처: Gavelin, Gunnar, Paper Machine Design and Operation – Descriptions and explanations, p.19, Angus Wilde Publications Inc., 1998

**그림 07-22.** L/b 비율에 따른 사출각도 및 사출각도에 따른 지료 모습



Impingement angle 3°



Impingement angle 5°

출처: • Smook, Gary, Handbook for Pulp and Paper Technologists (4th Ed.), p. 244, TAPPI Press, 2016
• Pantaleo, Scott, Modern headboxes – Their role and capabilities in the sheet forming process, 1999 TAPPI Wet End Operations Short Course, TAPPI Press, 1999

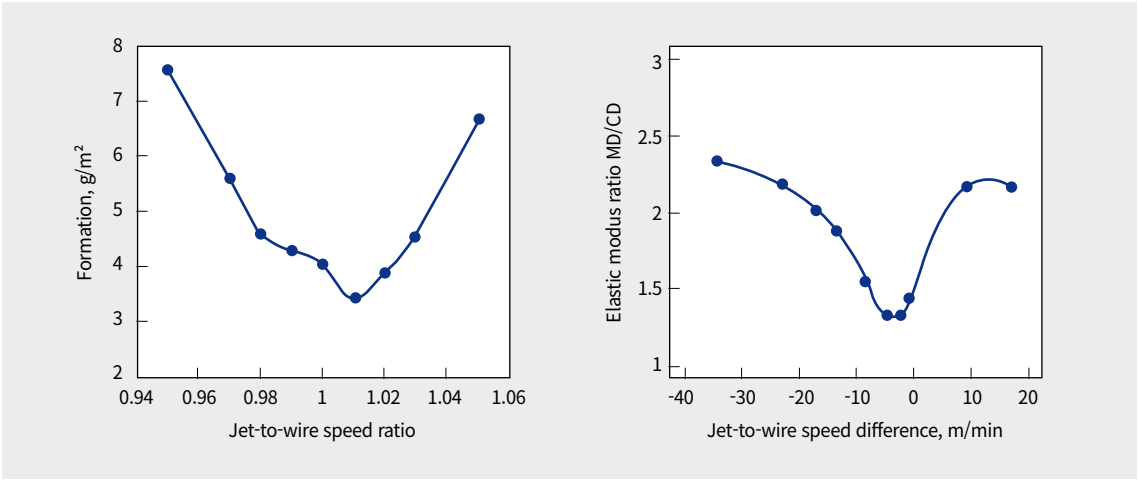
하고 있다. 초지속도가 매우 빠른 현대식 초지기 특히, 쌍망식 초지기의 경우 초지부에서 탈수가 급격하게 이루어지기 때문에 헤드박스에서의 섬유 분산이 더욱 중요한데, 이때 슬라이스의 수축률과 베인의 길이 등은 섬유 분산에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

### (4) 헤드박스의 운전

헤드박스의 구조는 섬유의 분산과 지료 사출 위치 등에 매우 큰 영향을 미친다. 일반적으로 초지기 운전 중에 헤드박스를 조절하여 섬유 분산과 사출 위치를 변경시키는 경우는 거의 없다. 다만 에어쿠션 헤드박스는 운전 중 천공롤의 회전 속도와 위치를 조절하여 섬유의 분산을 변화시킬 수 있지만, 하이드롤릭 헤드박스의 경우 헤드박스 내부 디자인이 고정되어 있기 때문에 유량 외에는 조절할 수 있는 인자가 없다.

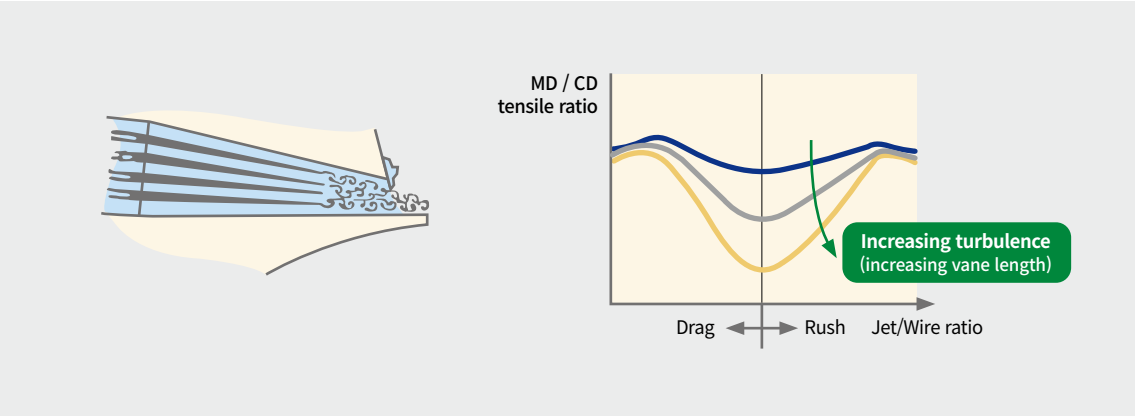
헤드박스로 공급되는 지료의 농도를 조절하여 섬유 간 응집을 변화시킬 수 있지만, 헤드박스의 농도는 이후 탈수 및 건조 에너지에 직접적인 영향을 미치기 때문에 이 또한 조절하는 데는 한계가 있다. 하지만 헤드박스 출구 지료의 사출속도를 변경시켜 섬유 배향성과 지합에 변화를 줄 수 있다. 평량 CD 프로파일 또한 헤드박스 운전을 통해 조절할 수 있다.

**그림 07-23.** 사출속도와 와이어속도 비에 따른 지합과 섬유배향지수




출처: • Kaarlo, Niskanen (ed.), Papermaking Science and Technolgoy Book No. 16, Paper Physics, Ch. 1, p.34, Fapet Oy. 2008
• Kaarlo, Niskanen (ed.), Papermaking Science and Technolgoy Book No. 16, Paper Physics, Ch. 1, p.40, Fapet Oy. 2008

그림 07-24. 슬라이스 베인과 젯-와이어 속도비에 따른 섬유배향지수




출처: Valmet Brochure

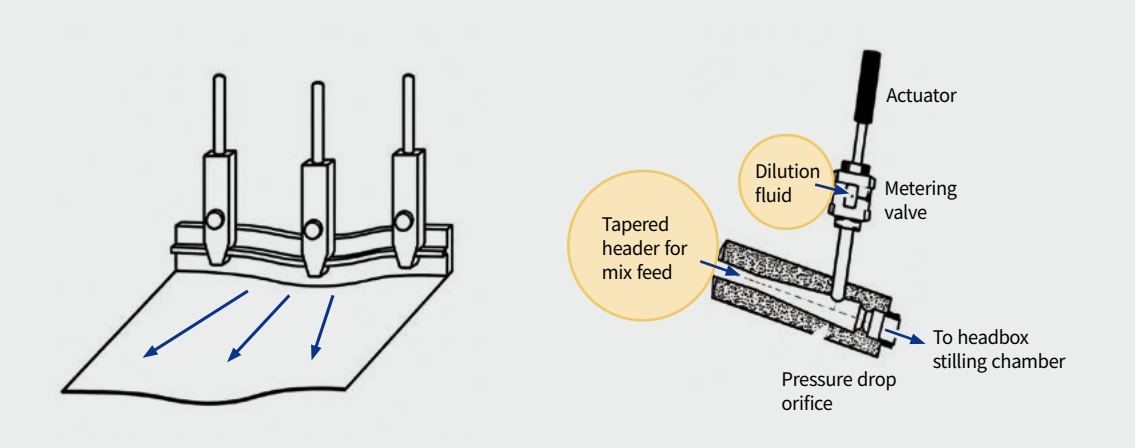
헤드박스로부터 사출되는 지료는 초지부 포밍 패브릭 위로 떨어진다. 이때 지료의 사출속도(jet speed)와 포밍 패브릭의 속도(wire speed) 간의 차이에 따라 섬유배향성과 지합이 영향받는다(그림 07-23). 지료의 사출속도가 와이어 속도보다 빠른 경우를 '러쉬(rush)'라고 하고, 반대인 경우를 '드래그(drag)'라고 한다. 두 속도의 차이가 있다는 것은 지료가 포밍 패브릭 위에 안착될 때 패브릭에 닿는 면과 사출 지료 상부면 간에 속도 구배가 발생한다는 것이므로 지료에 전단(shear)을 유발한다. 초지부 종류에 따라 최적의 지합을 나타내는 조건이 달라지지만, 보통 이 두 속도비가 1보다 조금 작거나 클 때 즉, 약간의 전단이 발생할 때 지합이 우수한 종이가 생산되는 것으로 알려져 있다. 섬유배향성의 경우 속도비가 1에 가까우면 상대 속도차가 없기 때문에 MD 배향성이 작게 된다. 슬라이스에 존재하는 베인도 섬유배향성에 영향을 미친다. 베인이 존재하는 경우 미세난류가 발생하기 때문에 섬유의 배향성은 상대적으로 감소한다(그림 07-24).

CD 방향 평량 프로파일 제어는 헤드박스의 중요한 기능 중 하나이다. 초지기의 폭이 넓어질수록 CD 방향 품질 균일성을 확보하는 것이 중요하다. 종이의 품질 중 CD 방향 평량, 수분, 두께의 변화, 즉 이들의 프로파일은 모든 공장에서 관리하는 주요한 항목이다. 이 중 평량 프로파일은 헤드박스에서만 제어가 가능하다. 평량 조절을 위한 대표적 방법에는 슬라이스 액추에이터 방식과 농도 희석 방식의 두 가지가 있다(그림 07-25). 농도 희석 장치가 소개되기 전에는 슬라이스 탑립에 액추에이터를 일정 간격으로 설치하고, 이를 이용하여 탑립의 수직 위치를 미세하게 조정하여 출구 유량을 변경시킴으로써 평량을 제어하였다. 예를 들어,

평량이 높게 측정된 부위에서는 슬라이스를 위치를 낮추어 주변보다 상대적으로 더 적은 유량의 지료가 사출되도록 하였다. 그러나 슬라이스의 높이가 낮아지면 유체의 흐름에 횡류가 유발되므로 섬유배향성에도 영향을 미친다. 또한 기계적인 방식으로 조절하다 보니 액추에이터 간의 간격을 좁히는 데에 한계가 있어 정밀한 제어가 어렵고, 탑립 재질의 탄성이 떨어지는 경우 제어가 잘 되지 않는 경우도 발생한다. 이를 극복하고자 슬라이스 출구 간격을 조절하지 않고 즉, 동일한 유량이 사출되도록 슬라이스의 위치를 고정시키되 사출되는 지료의 농도를 부위별로 조절하는 농도 희석 장치가 개발되었다. 대표적인 예로는 모듈젯을 들 수 있다. 이 방식은 테이퍼드 매니폴드에서 스틸링 챔버로 가는 튜브에 희석수 관을 연결하여 특정 위치의 지료 농도를 조절하는 방식이다. 이는 섬유배향성을 변화시키지 않으며 평량의 CD 프로파일을 조절할 수 있을 뿐 아니라, 조절할 수 있는 간격도 액추에이터보다 훨씬 작게 할 수 있어 섬세한 평량 제어가 가능하게 한다.

헤드박스는 내부 오염없이 온도와 압력에 견디며 안전하게 운전할 수 있도록 설계되어야 한다. 에어쿠션 헤드박스의 경우 가압 공기 챔버 내 지료가 채워지지 않는 상부 벽면에 섬유가 부착되지 않도록 잘 관리해야 한다. 또한 슬라이스 액추에이터로 평량 프로파일을 조절하는 헤드박스의 경우, 과한 작동이나 오랜 운전에 의해 액추에이터가 장착된 탑립이 변형되거나 오염될 가능성이 매우 크다. 따라서 정기적으로 슬라이스의 출구 간격과 립의 편평도 및 오염, 액추에이터 조절 성능을 관리해야 한다.

**그림 07-25.** 평량 CD 프로파일 제어장치: (좌) 슬라이스 액추에이터, (우) 농도 희석 장치




출처: Smook, Gary, Handbook for Pulp and Paper Technologists (4th Ed.), p. 242, 244, TAPPI Press, 2016

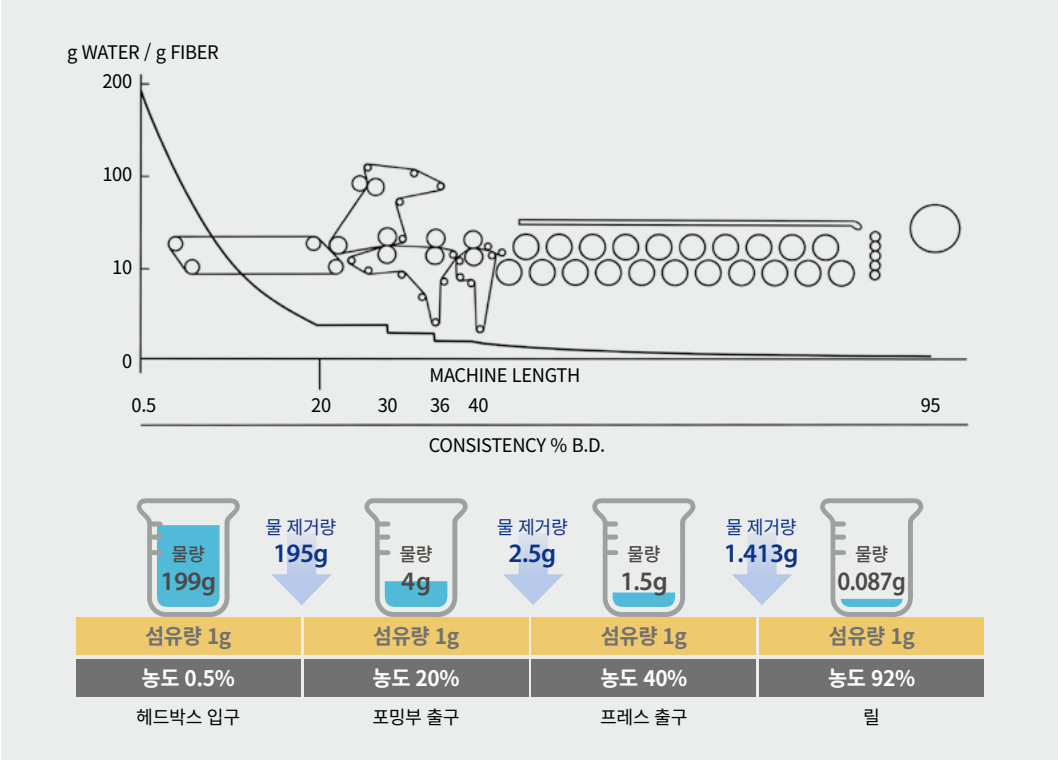
## 5. 초지부의 기능과 운전

### (1) 초지부의 기능과 주요 개념

#### 1) 초지부의 기능

헤드박스에서 사출된 지료가 초지부(forming section) 포밍 패브릭 위로 떨어지면 탈수와 함께 본격적으로 지층 형성이 시작된다. 헤드박스 내에서 섬유는 물과 함께 자유로운 유동이 가능했지만, 초지부에서 탈수가 이루어짐에 따라 움직임을 가능하게 하던 매체인 물이 감소되어 섬유의 이동은 제한이 되고, 결국 섬유 네트워크를 형성하게 된다. 따라서 초지부는 섬유의 네트워크 형성과 섬유를 비롯한 구성분의 지층 내 분포를 결정하는 중요한 공정이라 할 수 있다. 초지기는 약 1% 내외의 농도를 갖는 헤드박스 지료로부터 약 95% 수준의 고형분을 갖는 종이 제품을 생산하는 장치이기 때문에, 공정 전반에서 탈수는 가장 중요한 기능 중의 하

그림 07-26. 초지기 구성 단위별 탈수량 예시

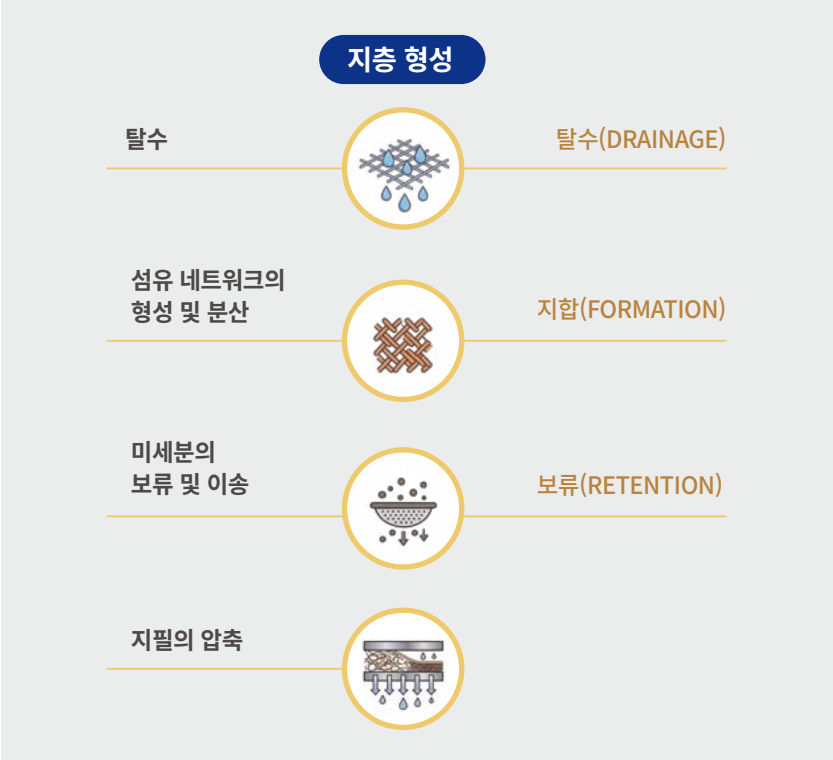



출처: Smook, Gary, Handbook for Pulp and Paper Technologists (4th Ed.), p. 249, TAPPI Press, 2016

나이다. 보통 1%의 농도로 초지부에 도달한 지료는 초지부에서 약 20~25% 정도의 농도로 탈수되어 지필(web)의 형태를 이루며, 이후 다음 공정인 프레스 파트로 이송된다. 농도의 숫자상 변화만으로는 탈수량이 적은 것으로 보이나, 실제 초지부, 프레스부, 건조부의 탈수량을 비교해 보면 대부분의 물이 초지부에서 제거된다는 것을 알 수 있다. 그림 07-26은 0.5%의 지료가 사출되어 포밍부 출구에서 20%의 농도로 탈수된 후, 프레스를 거치며 40%로 농축되고 건조부를 거쳐 92%로 건조되는 예를 보여주고 있다. 각 파트에서 제거된 물 양을 비교해보면 초지기에서 제거되는 물의 약 98%가 초지부에서 탈수된다. 초지부는 가장 저렴한 비용으로 가장 많은 양의 물을 제거하는 공정이기 때문에, 초지부의 탈수를 높이는 것은 공정의 경제성과 생산성을 위해 필수적이다.

탈수가 발생하기 위해서는 지료 구성분으로부터 물을 분리할 수 있도록 공극을 가진 와이어 또는 포밍 패브릭이 필요하다. 포밍 패브릭은 공극이 있어 물 뿐만 아니라 미세한 지료 성분도 물과 함께 빠져나갈 수 있다. 즉, 지료에 포함된 섬유, 미세분, 충전물 등의 일부 구성 성분이 종이로 제품화되지 못하고 물(백수)과 함

그림 07-27. 초지부의 기능

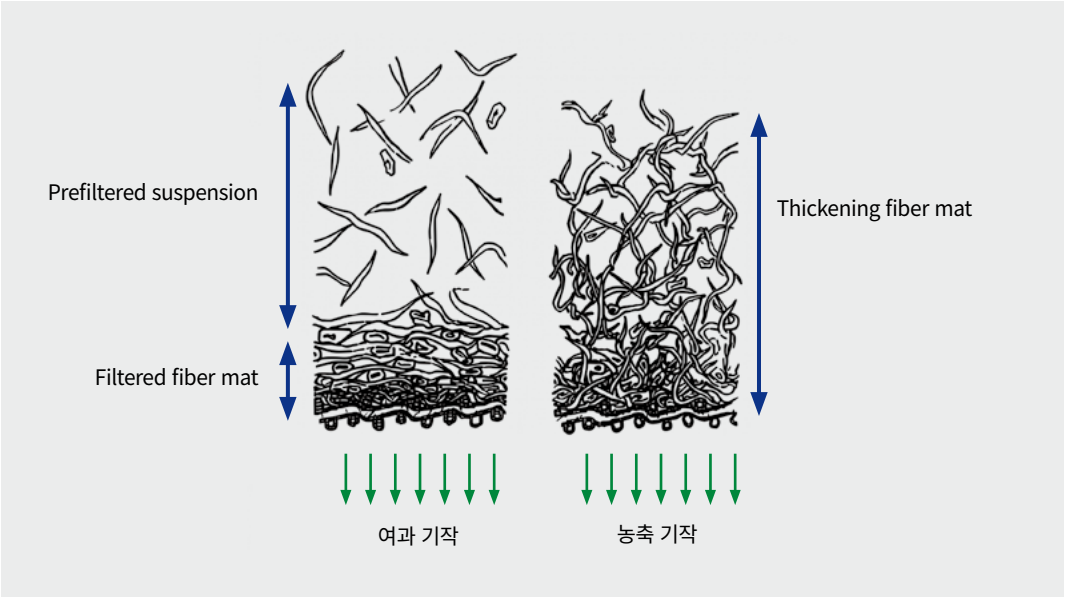


께 제거되어 백수로 배출될 수 있다. 이는 지료 조성분의 보류(retention)와 관련된 것으로, 보류는 제지원료의 경제적 활용과 백수 재이용 측면에서 중요하다. 초지부에서 탈수가 진행될수록 지료의 움직임은 제한되지만, 초지부 초반 구간에서는 아직 유동성이 유지되기 때문에 섬유의 분산, 분포를 조절할 수 있다. 즉, 미세난류 등을 부여하여 종이의 지합을 변화시킬 수 있다. 결론적으로 초지부는 그림 07-27과 같이 탈수, 보류, 지합 측면에서 매우 중요한 기능을 하며, 두께 방향 지료 조성분의 분포와 지필의 압축에도 영향한다.

### 2) 초지부의 주요 개념

물이 탈수되며 지층이 형성되는 과정은 크게 두 가지 기작으로 나눌 수 있다(그림 07-28). 첫째는 여과(filtration) 기작이다. 농도가 낮은 경우 각 섬유가 독립적으로 움직이며 포밍 패브릭 위로 쌓이며 지층 구조를 형성하는 개념이다. 둘째는 농축(thickening) 기작으로, 이는 농도가 높은 경우 섬유가 서로 연결이 되어 있어 독립적으로 움직이지 못하고, 탈수가 진행되면 섬유가 서로 연결된 상태로 농축되며 지층을 형성하는 기작이다. 실험실적 수초 또는 티슈 공장의 경우에는 낮은

**그림 07-28.** 지층형성 기작



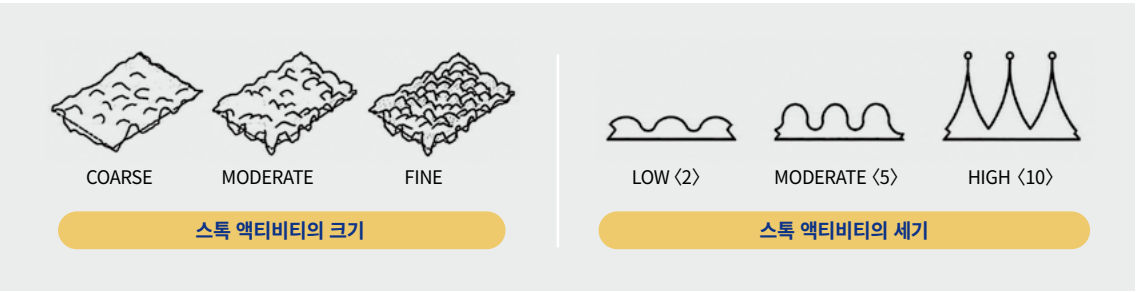

출처: Smook, Gary, Handbook for Pulp and Paper Technologists (4th Ed.), p. 245, TAPPI Press, 2016

그림 07-29. 초지부에 존재하는 수력학적 힘




출처: Smook, Gary, Handbook for Pulp and Paper Technologists (4th Ed.), p. 245, TAPPI Press, 2016

그림 07-30. 스톡 액티비티의 크기 및 세기




출처: Miller, Dean C., Practical aspects of water management, 1999 TAPPI Wet End Operations Short Course, TAPPI Press, 1999

농도의 지료를 이용하기 때문에 여과 기작이 우선한다. 하지만 많은 경우에는 여과 기작과 농축 기작이 같이 발생하거나, 농축 기작이 더 우선적으로 발생한다. 여과 기작으로 만들어진 종이는 상대적으로 두께가 더 얇고 내부결합강도가 낮지만, 농축 기작으로 형성된 종이는 내부결합강도가 높다.

초지부에서의 지층 형성은 탈수과정을 통해 주로 이루어진다. Parker는 초지부에 존재하는 주요 수력학적 힘으로 탈수(drainage), 배향전단(oriented shear), 난류(turbulence)를 제시하였다(그림 07-29). 이 세 가지 과정에 의해 지층의 구조는 영향을 받는다. 탈수는 물의 제거를 의미한다. 물이 제거되는 힘에 의해 지료 조성분의 수직적, 수평적 이동이 유발된다. 특히 셀프힐링 효과(self-healing effect)라고 하여, 와이어 상에 섬유 플록이 걸린 부분에서는 탈수속도가 저하되므로 인접한 평량이 낮은 부분으로 물이 자연스럽게 이동하여 탈수된다. 이 과정에서 물의 흐름과 함께 섬유도 함께 이동하므로, 섬유 분포의 균일성이 개선되어

지합의 셀프 힐링 효과가 얻어진다. 배향전단은 젯-와이어 속도비에서 설명한 바와 같이 지료 두께 방향으로 발생하는 속도 구배를 의미한다. 지료 사출 속도와 와이어 속도 차이에 따라 속도구배가 달라지는데, 이때 섬유 플록은 수직 방향 위치별로 다른 유속에 노출되어 분산된다. 난류는 무질서한 유체 유동으로서, 헤드박스 난류발생장치에서 설명한 바와 같이 난류의 크기와 세기에 따라 플록의 분산 정도가 달라진다. 초지부에서는 탈수력, 배향전단력, 난류를 반복적으로 발생시킬 수 있는 다양한 장치가 개발되어 활용되고 있으며, 이를 통해 우수한 지합의 종이를 효율적으로 생산하고 있다.

장망식 초지기의 경우 초지부에서 발생하는 난류는 포밍 패브릭 위에 있는 지료의 거동을 통해 확인할 수 있다. 난류가 거의 없는 경우, 초지부 위의 지료 층은 거울면과 같이 매우 잔잔한 형태를 보인다. 난류가 존재하면 지료에 무질서한 움직임이 나타난다. 이를 스톡 액티비티(stock activity)라고 한다(그림 07-30). 지료의 움직임의 크기와 세기는 난류의 크기와 세기에 의해 결정된다. 일반적으로 스트로브스코프 조명 하에서 지료 표면의 움직임을 육안적으로 평가하여 스톡 액티비티를 평가할 수 있다.

난류는 초지부 앞단 농도가 낮을수록 효과적으로 부여되어 스톡 액티비티를 발생시킨다. 그림 07-31은 실제 초지부 내 포일 종류가 변경됨에 따라 발생하는 스톡 액티비티의 차이를 보여주고 있다. 그림에서 보는 것과 같이 스톡 액티비티의 크기와 세기 모두 달라지고 있다. 스톡 액티비티의 세기가 크다고 지합에 유리한 것

**그림 07-31.** 스톡 액티비티가 (좌) 적은 경우와 (우) 큰 경우



출처: 저자 자료

만은 아니다. 사용하는 펄프 섬유의 크기, 초지 농도 등을 고려하여 적절한 스톡 액티비티를 부여하는 것이 바람직하다.

### (2) 초지부의 구성 요소와 운전

탈수, 보류, 그리고 지합 형성에 영향을 미치는 초지부는 무엇보다도 생산성을 확보하기 위해 많은 양의 물을 효과적으로 제거할 수 있도록 운전되어야 한다. 초지부에서 탈수를 유도하는 힘으로는 헤드박스에서 포밍 패브릭 위로 지료가 사출될 때 형성되는 포밍 압력을 비롯하여 중력, 관성력, 자연적으로 발생하는 수력학적 힘, 그리고 진공력이 있다.

이러한 다양한 힘을 효과적으로 활용하기 위해 초지부에는 여러 종류의 탈수 소자(drainage element)가 배치되어 있다.

그림 07-32는 장망식 초지기의 대표적인 초지부 구성 요소를 보여준다.

우선 초지부는 포밍 패브릭(forming fabric)이 많은 롤에 의해 지지되며 탈수와 아울러 지료 구성분을 보류시키는 역할을 한다. 초지부는 브레스트롤(breast roll)로 시작된다. 이 롤은 헤드박스에서 사출되는 지료와 직접적으로 접촉하지는 않지만, 포밍 패브릭을 따라 돌며 초지부 포밍 패브릭의 상부를 지탱하는 한 축으로 작용한다. 이 외에도 지층이 형성되는 초지부 포밍 패브릭의 바로 아래에는 포밍 패브릭을 지지하며 탈수를 촉진하는 다양한 탈수소자(drainage element)가 존재한다. 포밍보드(forming board), 테이블롤(table roll), 포일(foil), 저진공박스(low-vacuum box 또는 wet suction box), 고진공박스(high-vacuum box, dry suction box 또는 flat box), 쿠치롤(couch roll)이 포밍부에 존재하는 대표적 탈수소자이다.

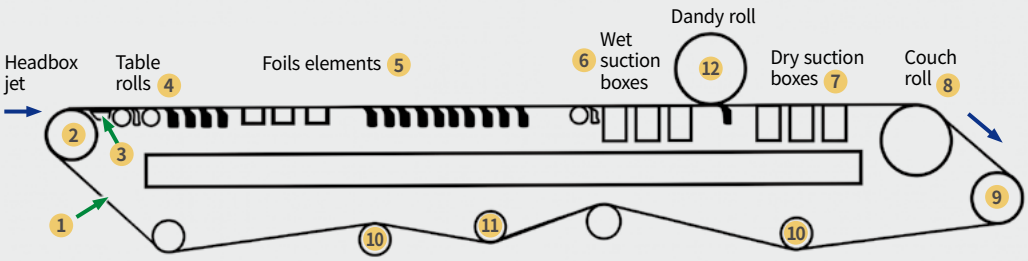
테이블롤은 1950년대까지 사용되었던 탈수 장치이다. 그러나 초지속도가 증가함에 따라 롤 회전에 의해 발생하는 과도한 압력 펄스가 지층 구조에 불량한 영향을 미쳐 더 이상 사용하지 않게 되었다. 이를 대신하여 다양한 디자인의 포일이 사용되고 있다.

탈수 영역은 작용하는 힘에 따라 중력탈수영역과 진공탈수영역으로 나눌 수 있다. 브레스트 롤에서 포일까지는 중력탈수영역에 속한다. 그러나 탈수가 진행됨에 따라 중력이나 자연적으로 발생하는 수력학적 펄스로는 더 이상 탈수를 유발하기 어렵다. 따라서 진공을 이용한 탈수를 실시하게 되는데, 상대적으로 앞단에

서는 저진공을, 후단에서는 고진공을 사용하여 탈수되도록 한다.

초지부에서 가장 높은 진공이 사용되는 탈수소자는 쿠치롤이다. 쿠치롤을 지나며 지필은 약 20~25% 정도의 농도로 탈수되어 석션 픽업롤에 의해 프레스 파트로 이송된다. 지필이 프레스로 전이된 후 포밍 패브릭은 와이어터닝롤(wire turning roll)을 거쳐 다시 브레스트롤 쪽으로 이동한다. 초지부 하부에는 포밍 패브릭의 좌우 위치를 제어하는 가이드롤(guide roll)과 장력을 조절하는 스트레치롤(stretch roll)이 있으며, 패브릭의 세척을 위한 샤워도 설치되어 있다. 상부 탈수소자 아래에는 탈수된 백수를 받아 사일로로 보내는 트레이가 위치한다. 그림 07-32에는 포밍 패브릭 위 지필 상부에 댄디롤(dandy roll)이 위치하고 있는데, 댄디롤을 갖추지 않은 초지기도 많다. 댄디롤은 속도를 조절하여 배향전단을 야기할 수 있기 때문에 예전 초지기의 경우 고평량지의 지합 개선을 위해 사용된 바 있다. 또한 은화(water mark)를 넣기 위해 댄디롤을 사용하기도 한다. 초지부에 많은 롤이 존재하지만 이들 가운데 쿠치롤과 와이어터닝롤만 구동되고 나머지 롤은 포밍 패브릭의 움직임에 따라 같이 회전한다.

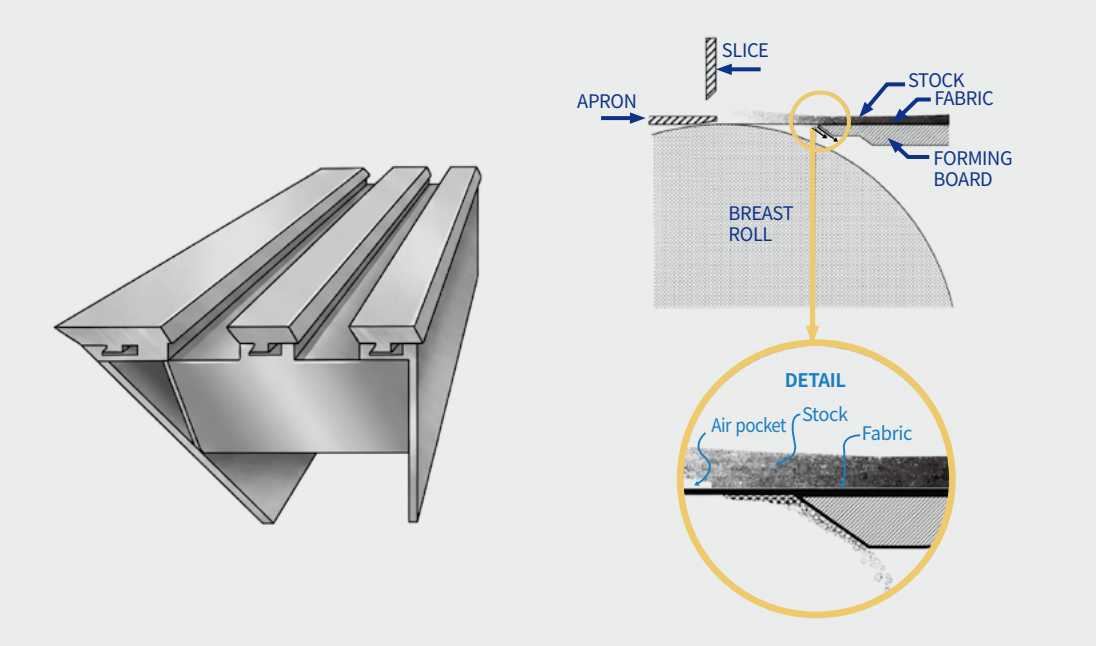
**그림 07-32.** 장망식 초지기의 초지부 구성 요소




- 포밍패브릭 (Forming fabric, ①)
- 브레스트 롤 (Breast roll, ②)
- 지료도입부 : 포밍 보드(Forming board, ③)
- 중력탈수영역 : 테이블 롤(Table roll, ④), 포일(Hydro foil, ⑤)
- 진공탈수영역 : 저진공탈수장치(Low-vac, wet suction box, ⑥), 고진공탈수장치(High vac, flat box, dry suction box, ⑦)
- 쿠치 롤(Couch roll, ⑧)
- 와이어 터닝롤 (wire turning roll, ⑨)
- 가이드롤 (guide roll, ⑩)
- 스트레치 롤 (stretch roll, ⑪)
- 댄디롤 (dandy roll, ⑫)
- 샤워 (shower)

출처: Smook, Gary, Handbook for Pulp and Paper Technologists (4th Ed.), p. 246, TAPPI Press, 2016

그림 07-33. 포밍보드의 형태 및 적절한 위치



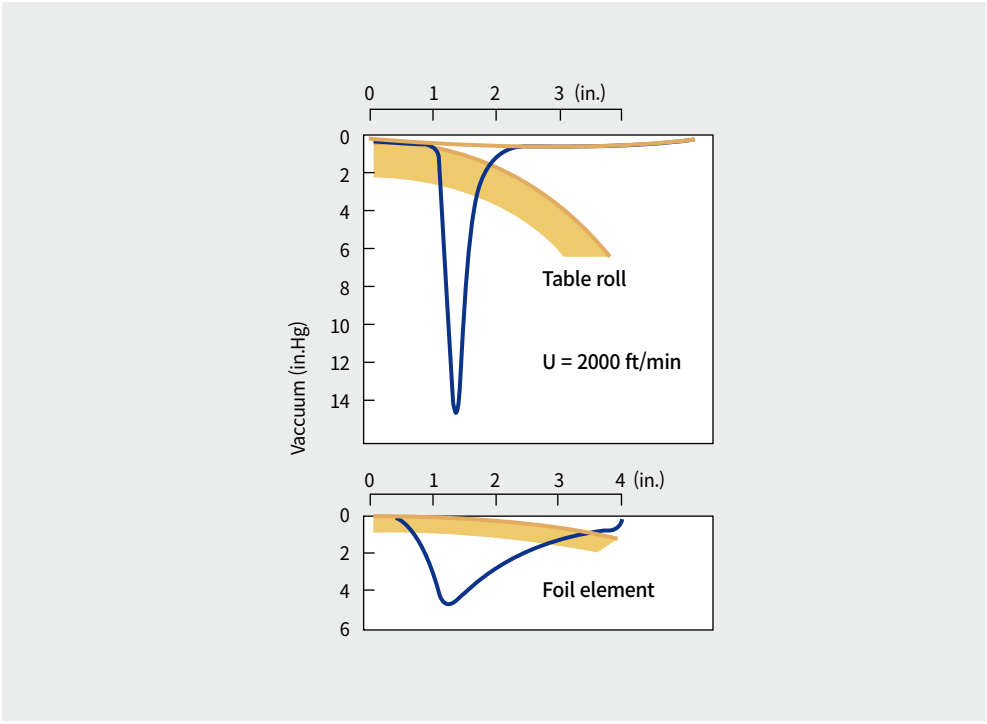

출처: • Smook, Gary, Handbook for Pulp and Paper Technologists (4th Ed.), p. 246, TAPPI Press, 2016
• Atkins, J., Fourdrinier Forming, 2004 Paper Machine Operation Short Course, TAPPI Press, 2004

사출된 지료가 가장 먼저 접촉하는 탈수소자는 포밍보드(forming board)이다. 그림 07-33에 나타난 바와 같이 포밍보드는 일반적으로 세 개 또는 그 이상의 블레이드로 구성되어 있으며, 사출된 지료를 안정적으로 받아들이는 동시에 포밍 압력에 의해 포밍 패브릭이 처지는 것을 방지하는 역할을 한다. 포밍보드의 위치는 운전 조건에 따라 조절할 수 있으며, 일반적으로 사출된 지료가 포밍보드의 선단에 떨어지도록 설정하는 것이 가장 적절한 것으로 알려져 있다. 이러한 배치는 지료와 함께 이동하는 공기층을 효과적으로 제거하고, 초기 단계에서의 과도한 탈수를 억제하는 데 도움을 준다. 그 결과 초지부 전반에서 보다 안정적이고 효율적인 탈수가 이루어질 수 있다.

포일(foil 또는 hydrofoil)은 초지부 중력탈수영역에서 사용되는 대표적 탈수소자이다. 포일이 널리 사용되기 이전에는 테이블롤이 주로 사용되었다. 그러나 초지속도가 증가함에 따라 회전하는 롤과 이동하는 포밍 패브릭에 의해 발생하는 진공 펄스가 크게 증가하였다(그림 07-34). 이러한 변화는 지층에 높은 음압과 압력을 가하여, 패브릭이 롤에서 분리될 때 지층에 불필요한 점핑을 유발하거나 구동력 소모가 큰 단점이 있어 포일로 대체되었다. 테이블 롤과 달리 포일은 움직임이 없

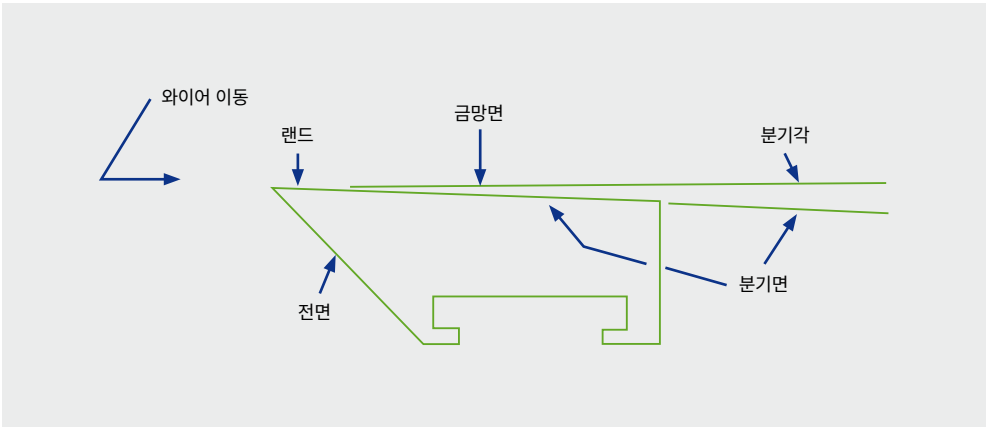
는 정지형 탈수소자이다. 포일은 패브릭과 접촉하는 착지면이 있고 뒤로 갈수록 일정 각도로 높이가 낮아지는 발산형의 구조를 가진 블레이드이다(그림 07-35).

**그림 07-34.** 테이블롤과 포일의 압력 펄스




출처: Paulapuro, Hannu (ed.), Papermaking Science and Technolgoy Book No. 8, Papermaking Part 1. Stock Preparation and Wet end, Ch. 6, p.253, Fapet Oy. 2007

**그림 07-35.** 포일의 구조




출처: Smook, Gary, Handbook for Pulp and Paper Technologists (4th Ed.), p. 247, TAPPI Press, 2016

포일은 테이블롤보다 완만하고 넓은 진공 펄스를 발생시키며, 발산각을 달리하여 펄스의 크기를 조절할 수 있다. 그림 07-36에 제시된 바와 같이 포일 각도가 커질수록 탈수효과가 증가하며 난류 세기도 커지는 결과를 보인다. 특히, 탈수가 진행되어 지층의 농도가 높아질 때는 낮은 각도의 포일을 사용하기보다 높은 각도의 포일을 사용하는 것이 탈수와 지합 개선에 더 유리하다. 따라서 포밍보드 이후 쿠치롤 방향으로 포일을 배치할 때에는 전방에서는 낮은 각도의 포일을 사용하고, 후방으로 갈수록 점차 각도를 증가시키는 배열 방식을 적용하는 것이 일반적이다.

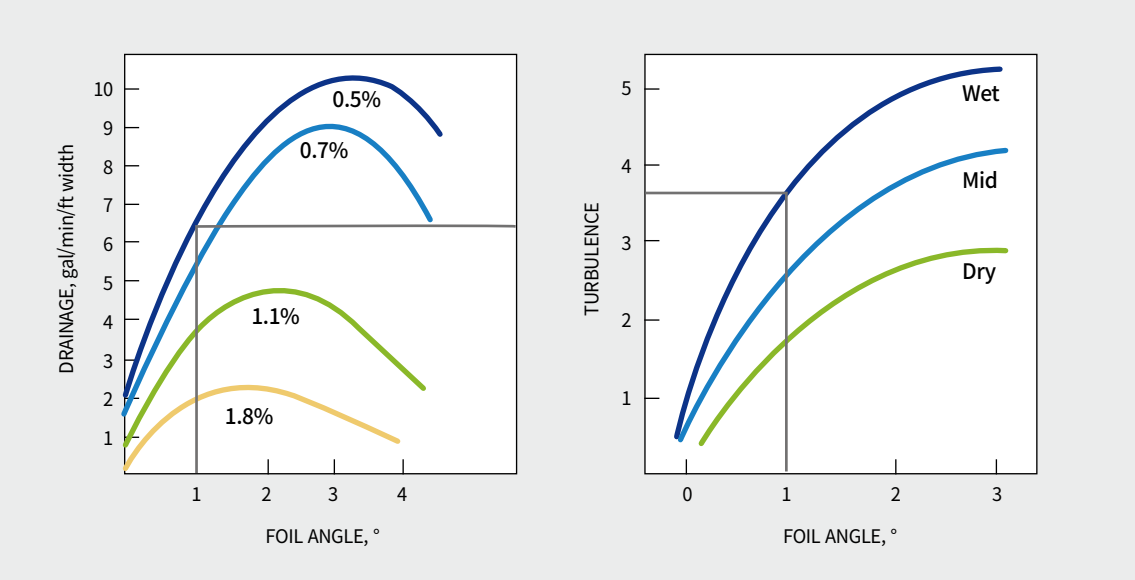
실제 초지기에서 사용되는 포일은 단일 블레이드 형태로 설치되기보다는, 여러 개의 블레이드가 하나의 세트로 조립된 형태로 설치되는 것이 일반적이다. 높은 스톡 액티비티를 얻기 위해서는 포일에 의해 자연적으로 발생하는 수력학적 펄스를 보강 간섭(constructive interference)에 의해 증폭시키는 것이 필요하다. 이를 위해 초지속도에 맞추어 각 블레이드 사이의 간격을 적절히 조절하여 압력 펄스가 효과적으로 중첩되도록 설계한다.

포일이 널리 사용되는 이유는 적절한 펄스 크기와 각도 조절을 통한 스톡 액티비티 조절이 가능하다는 데 있지만, 모양을 다양하게 디자인할 수 있다는 점도 하나의 이유가 되고 있다. 예를 들면, 완만한 발산이 아니라 계단식으로 높이 단차를 둔 모양의 포일과 빨래판 모양으로 만들어 연속된 펄스를 커다란 진폭으로 부여하는 포일도 개발되었다. 최근에는 하나의 포일 세트 내에 포함된 각 블레이드의 수직 위치와 전·후방 각도를 조절하여 압력 펄스의 형태를 지종 특성에 맞게 조절할 수 있는 가변형 포일도 개발되었다(그림 07-37). 또한 포밍 패브릭과 직접 접촉하는 표면은 마모가 발생하기 쉬우므로, 해당 부분에 세라믹과 같은 내마모성 재질을 적용하여 내구성을 향상시킨 구조의 포일도 널리 사용되고 있다.

중력에 의한 탈수만으로 더 이상 충분한 탈수가 이루어지기 어려운 경우에는 진공의 힘을 이용한 탈수가 적용된다. 초지부에서 사용되는 진공 탈수 장치는 진공도의 크기에 따라 저진공박스, 고진공박스, 그리고 쿠치롤로 구분할 수 있다.

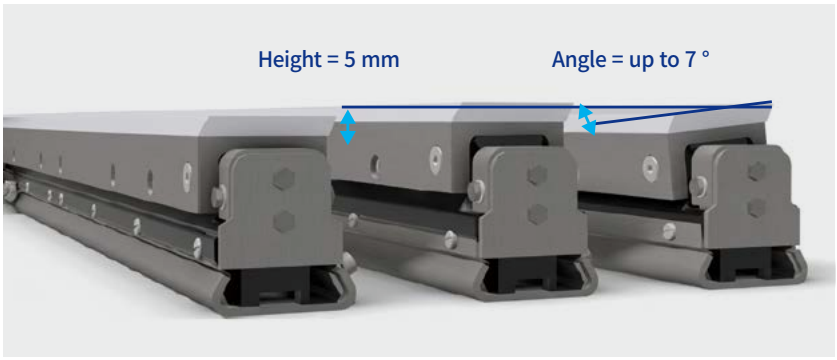
저진공박스는 포일 다음에 위치하는 탈수소자로, 포밍 패브릭 아래에 박스 형태로 설치되어 있다. 이 장치에서는 보통 박스 하부의 백수 배출 위치와 박스 내부 백수면 사이의 높이 차이에 의해 자연적인 진공이 형성된다(그림 07-38). 저진공박스에서 얻을 수 있는 최대 진공은 하부 백수 배출 위치(그림 07-38의 integral trap)와 포밍 패브릭 또는 포밍 패브릭 아래의 석션 입구(그림 07-38의 vacuum connection) 사이의 높이 차이에 해당한다. 그러나 저진공박스는 포밍 패브릭과

그림 07-36. 포일의 각도에 따른 탈수성과 난류 세기




출처: Bambrick, T. J., Practical aspects of drainage & formation studies, 1989 Wet End Operations Seminar, TAPPI Press, 1989

그림 07-37. 가변형 포일 예시 (Vform hydrofoil, Voith)




출처: Voith Brochure

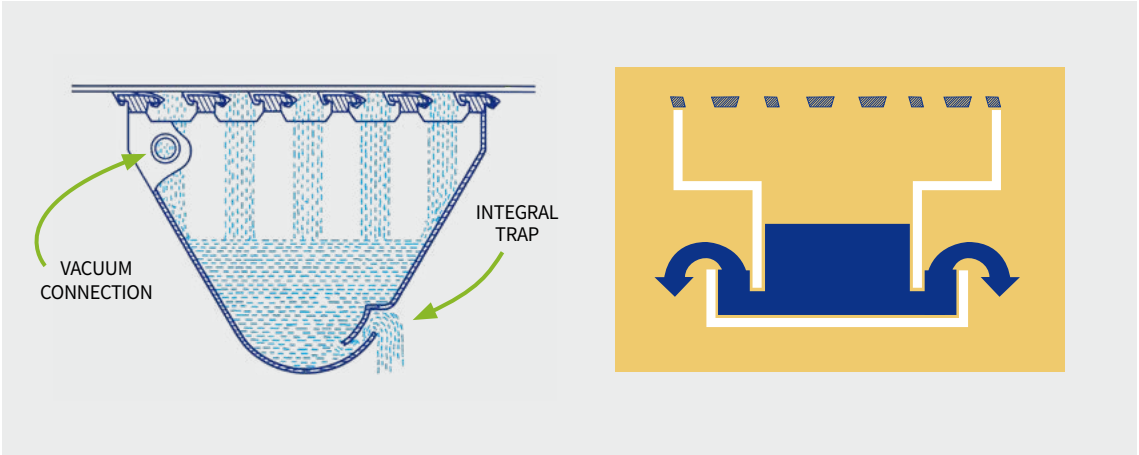
트레이 사이의 제한된 공간에 설치되어야 하므로 진공도를 크게 높이기에는 구조적인 한계가 있다. 따라서 실제 운전에서 부여되는 진공도는 수두 약 50 cm 이하의 낮은 수준에 머무른다.

저진공박스로 더 이상의 탈수가 어려워지면 더 높은 진공을 걸어줌으로써 탈수를 촉진할 수 있다. 이러한 목적을 위해 사용되는 장치가 플랫박스(flat box) 또는 드라이석션 박스(dry suction box)로도 불리는 고진공박스(high-vacuum box)이다. 이는 여러 개의 블레이드 포일이 하나의 세트로 조립된 형태로서 진공

펌프에 연결되어 큰 진공이 걸릴 수 있다(그림 07-39). 보통 5-40 kPa 정도의 진공도가 이용된다. 탈수된 물은 하부의 실핏(seal pit)에 모여 샤워수나 펌프 실링수(sealing water)로 재이용된다.

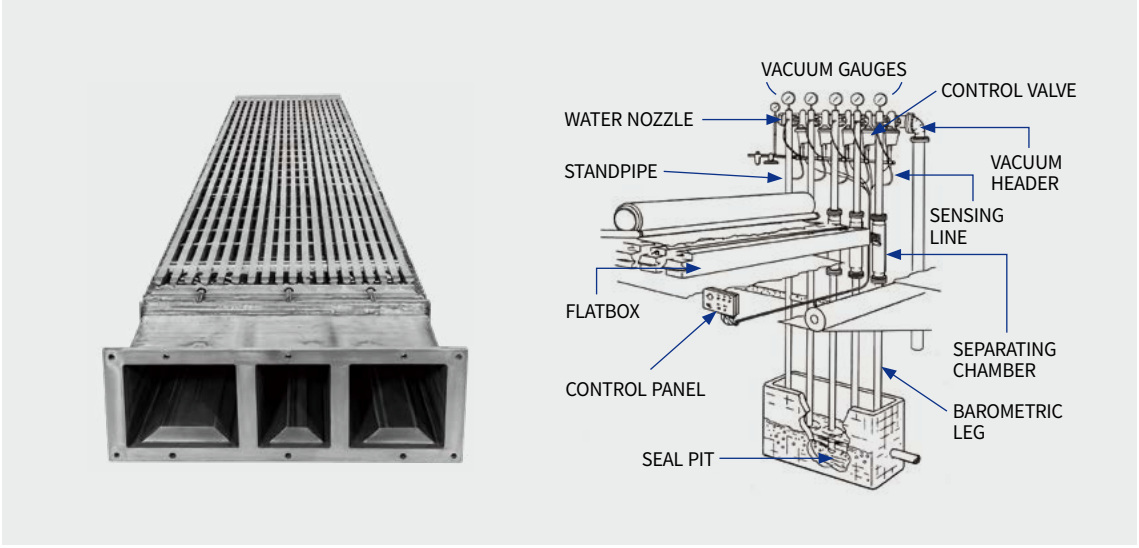
쿠치롤(couch roll)은 초지부에서 사용되는 탈수소자 가운데 가장 높은 진공도를 적용하는 장치이다. 일반적으로 약 40–80 kPa 정도의 진공도로 운전된다. 쿠치

그림 07-38. 저진공박스의 예시




출처: • Smook, Gary, Handbook for Pulp and Paper Technologists (4th Ed.), p. 248, TAPPI Press, 2016
• Hansen, V. E., Water management for the wet end, 1989 Wet End Operations Seminar, TAPPI Press, 1989

그림 07-39. 고진공박스의 예시



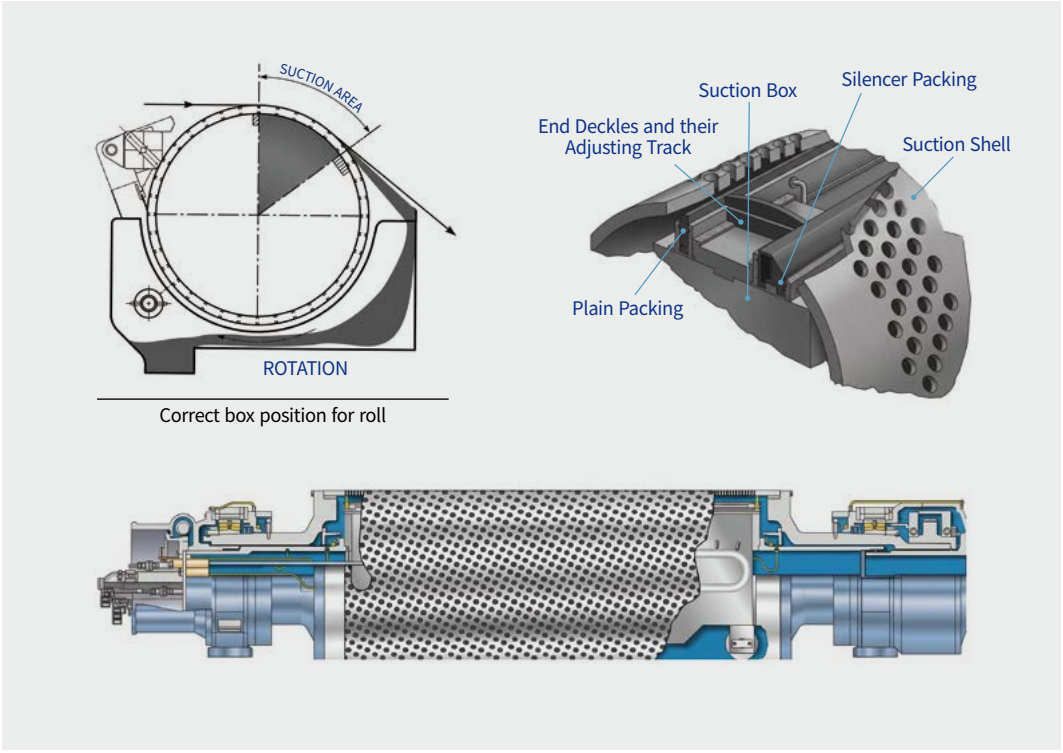

출처: Smook, Gary, Handbook for Pulp and Paper Technologists (4th Ed.), p. 248, TAPPI Press, 2016

롤의 내부에는 보통 두 개의 진공 챔버(vacuum chamber)가 설치되어 있으며, 그 외부에는 다수의 구멍이 뚫린 롤 커버가 회전하는 구조로 되어 있다(그림 07-40). 포밍 패브릭과 함께 이동하는 지필이 쿠치롤을 통과할 때, 구멍 아래에서 작용하는 진공에 의해 지층 내부의 물이 강하게 흡인되어 제거된다. 이 과정에서 지필의 농도는 약 20~25% 수준까지 증가하게 된다.

초지부는 포밍보드에서 쿠치롤에 이르는 구간으로, 이 과정 동안 지료로부터 지층이 형성된다. 이 과정은 기능적으로 다음과 같은 단계로 구분할 수 있다.

첫째, 헤드박스에서 균일하게 분산된 지료를 안정적으로 받아들이는 단계이다. 이 단계에서는 사출된 지료가 포밍 패브릭 위에 균일하게 안착하도록 하는 것이 중요하다. 둘째, 완만한 탈수와 미세한 난류 작용을 통해 섬유가 고르게 분산되면서 지합이 우수한 지층을 형성하는 단계이다. 이 과정에서는 과도한 탈수를 피하면서 섬유가 균일하게 배열되도록 하는 것이 중요하다. 셋째, 이미 형성된 지층의 구조를 손상시키지 않으면서 가능한 한 많은 탈수를 수행하는 단계이다. 이 구간에서는 지층의 안정성을 유지하면서 점진적으로 탈수량을 증가시킨다. 마지막으

**그림 07-40.** 쿠치롤의 내부 구조 및 외부 모습




출처: Atkins, J., Fourdrinier Forming, 2004 Paper Machine Operation Short Course, TAPPI Press, 2004

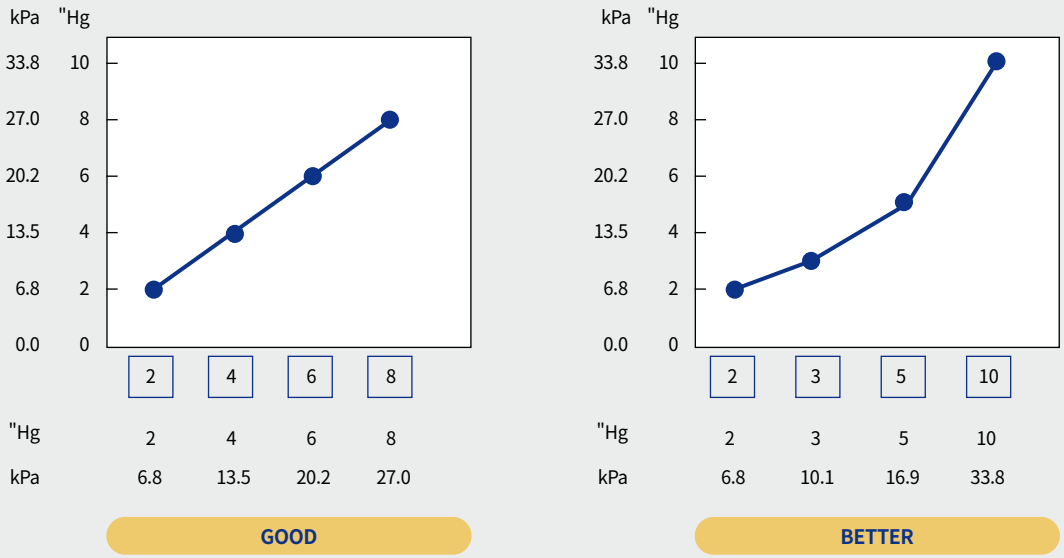
로, 고형분 농도를 최대한 높이기 위해 강한 탈수를 수행하는 단계이다. 이 단계에서는 진공 탈수 장치를 이용하여 지층의 수분을 최대한 제거한다. 이와 같이 초지부 전반부에서는 완만한 탈수와 균일한 섬유 분포 및 지층 형성이 중요하며, 후반부로 갈수록 탈수 효율을 높이는 것이 중요한 운전 목표가 된다.

높은 탈수 효율을 얻기 위해서는 각 탈수소자별 탈수 능력을 정량적으로 평가하는 것이 중요하다. 그러나 초지부에서는 포밍 패브릭이 고속으로 이동하고 있기 때문에, 각 탈수소자를 통과한 직후의 지필을 채취하여 고형분 농도를 직접 측정하는 것은 현실적으로 많은 어려움이 따른다. 이러한 이유로 실제 공정에서는 방사선을 이용한 무게 측정과 같은 비접촉식 측정 방법을 활용하여 초지부에서의 탈수 거동을 평가한다. 이를 통해 각 위치에서의 지필 중량 변화를 연속적으로 파악할 수 있으며, 초지부 전체의 탈수 특성을 분석할 수 있다.

탈수성을 저해하는 대표적인 요인 중 하나는 시트 실링(sheet sealing)이다. 시트 실링은 초기 단계에서 과도하게 빠른 탈수가 발생하여 지료 구성분이 포밍 패브릭의 공극을 막음으로써 이후 탈수를 방해하는 현상을 의미한다. 시트 실링이 발생하면 이후 탈수 효율이 크게 저하되어 쿠치롤 출구에서의 건조도가 목표 수준에 도달하지 못하는 경우가 많다. 이를 보완하기 위해 진공도를 높여 운전하게 되면, 프레스 파트로 지필을 이송하는 과정에서 지필의 박리가 어려워지거나 구동력 소모가 증가하는 문제가 발생할 수 있다.

이러한 시트 실링 문제를 줄이기 위해서는 압력 포밍보다는 속도 포밍 방식으로 운전하는 것이 바람직하다. 또한 탈수 성능을 향상시키기 위해 포일의 각도를 후반부로 갈수록 점차 크게 설정하는 것과 마찬가지로, 진공도 역시 쿠치롤 방향으로 갈수록 점진적으로 증가시키는 것이 유리하다. 따라서 고진공박스를 여러 개 설치하더라도 동일한 진공도를 적용하기보다는, 초지부 후반으로 갈수록 점차 높은 진공도를 부여하는 방식이 보다 우수한 탈수 결과를 얻는 데에 효과적이다(그림 07-41).

그림 07-41. 우수한 초지부 탈수성능을 위한 진공도 적용




출처: Miller, Dean C., Practical aspects of water management, 1999 TAPPI Wet End Operations Short Course, TAPPI Press, 1999

포밍 패브릭(forming fabric)은 지료에서 고형분과 물을 분리하는 데 중요한 역할을 하는 매체이다. 초창기 초지기에서는 구리로 만든 와이어가 주로 사용되었기 때문에, 오늘날에도 포밍 패브릭을 지칭할 때 와이어라는 용어가 관용적으로 사용되고 있다. 그러나 초지속도가 점차 증가함에 따라 구리 와이어는 내구성이 낮고 무게가 무거워 구동 에너지 소비가 증가하는 문제가 나타났다. 이러한 문제를 해결하기 위해 가볍고 내구성이 우수한 폴리에스터 섬유를 이용하여 직조한 포밍 패브릭이 개발되어 현재 널리 사용되고 있다. 포밍 패브릭의 가장 단순한 구조는 씨실(weft)과 날실(warp)이 서로 교차하여 직조된 1중직(single-layer fabric)이다(그림 07-42). 그러나 1중직 구조는 보류, 내구성, 그리고 종이 품질 측면에서 한계가 있기 때문에, 현재는 2중직(double-layer)이나 3중직(triple-layer)과 같이 기능을 개선한 다층 구조의 패브릭이 사용되고 있다.

포밍 패브릭은 한쪽 면은 종이와 접촉하고 있으며, 반대쪽 면은 포일이나 진공박스와 같은 탈수소자와 접촉한다. 종이와 접촉하는 면은 와이어마크(wire mark)와 같은 표면 결함이 발생하지 않도록 매우 촘촘한 구조를 가지는 것이 유리하다. 반면 탈수소자와 접촉하는 면은 운전 중 지속적인 마찰을 받기 때문에 우수한 기

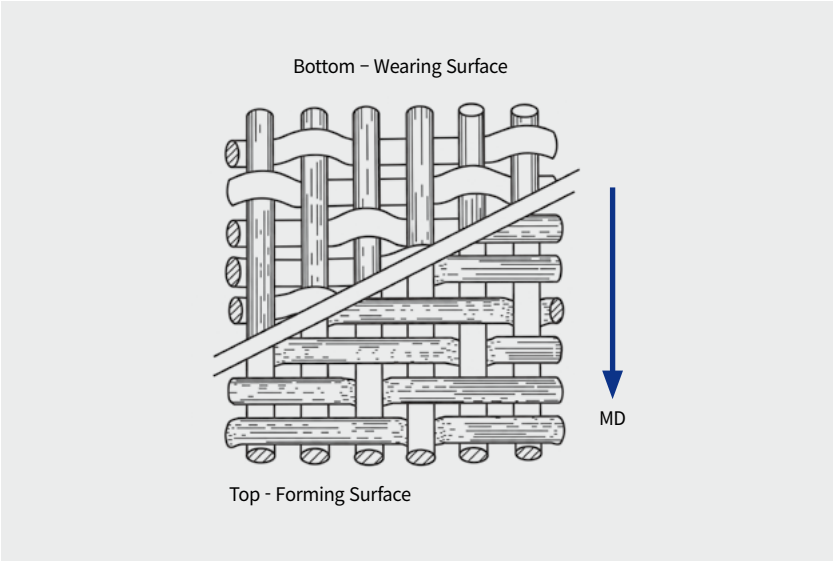
계적 내구성과 내마모성을 가져야 한다. 또한 포밍 패브릭은 탈수성과 보류성 측면에서도 우수한 성능을 동시에 만족해야 한다. 이러한 요구 조건을 충족하기에는 단순한 1중직 구조보다는 2중직이나 3중직과 같은 다층 구조의 포밍 패브릭이 유리하다.

포밍 패브릭은 개공률, 공극 부피 및 공극 분포, 투기도, 단위 면적당 지지점 수 등의 지표를 통해 탈수성과 보류 등의 성능을 예측할 수 있다. 사용한 섬유의 굵기, 직조 패턴, 메쉬 등에 따라 다양한 구조를 갖는 포밍 패브릭의 제조가 가능하다. 따라서 생산 지종과 공정에 적합한 포밍 패브릭을 선택하여 사용하는 것이 필요하다.

### (3) 포머의 종류

연속식 초지기의 가장 첫 형태는 Fourdrinier 형제가 발명한 장망식 초지기이다. 장망식 포머 또는 포드리니어 포머라고도 불리는데, 그림 07-32와 같이 한 장의 긴 와이어 위에 지필이 형성되는 형태이다. 물은 포밍 패브릭 아래 쪽으로만 빠져나가기 때문에 종이의 성질이 두께 방향 내에서 다르게 되며, 이를 종이의 양면성(two-sidedness)라고 한다. 포밍 패브릭과 닿고 있는 면은 아무래도 아래 쪽에

**그림 07-42.** 포밍 패브릭의 구조




출처: Smook, Gary, Handbook for Pulp and Paper Technologists (4th Ed.), p. 256, TAPPI Press, 2016

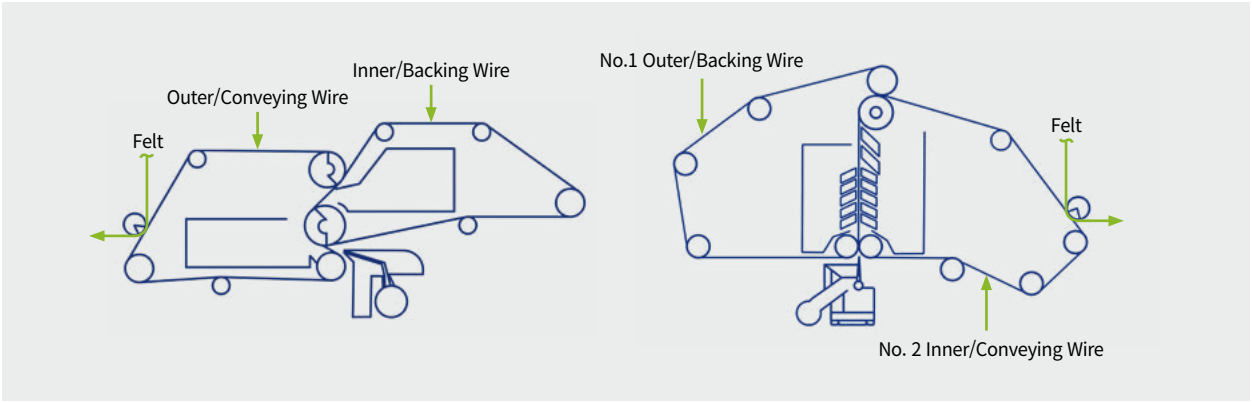
위치한 탈수소자에 의해 과격한 힘을 지속적으로 받고 있기 때문에 미세분 등이 씻겨 나갈 확률이 크다. 따라서 장망식 초지기로 제조한 종이의 경우 와이어 면이 표면보다 상대적으로 미세분의 함량이 적고 더 거칠게 느껴지는 양면성 문제가 존재한다. 양면성은 이후 사이즈프레스에서 전분의 침투 거동에도 영향을 미치며, 코팅 및 인쇄에도 영향을 미친다.

종이 생산성에 대한 요구는 초지속도의 증가로 이어졌는데, 하이드롤릭 헤드박스의 개발과 함께 포머 측면에서도 새로운 기술이 개발되었다. 장망식 포머에서는 물이 포밍 패브릭 아래 방향으로만 배출되는 일방향 탈수 방식이 적용되기 때문에, 초지속도를 높이는 데 구조적인 한계가 존재하여 더 빠른 초지속도를 위해서 장망식 초지기는 더 긴 와이어가 필요했고, 와이어와 닿지 않는 지료의 자유 표면에서는 불안정한 유체 거동이 발생하는 문제가 있었다. 이를 해결하기 위해 일방향 탈수가 아닌 양방향 탈수가 가능한 포머가 1953년 Webster에 의해 개발되었다.

쌍망식 초지기(twin-wire former 또는 gap former)는 두 장의 포밍 패브릭 사이에 지료를 사출하여 지층을 형성하는 포머이다. 이 포머는 동시에 양방향으로 탈수가 이루어지기 때문에 초지속도를 급격하게 증가시킬 수 있을 뿐 아니라, 사출 지료에 자유 표면이 존재하지 않아 장망식 초지기에서 나타나는 불안정한 유체 문제 또한 해결할 수 있었다. 또한 양쪽으로 유사한 양의 백수가 탈수되기 때문에 장망식 초지기에서 발생하는 양면성 품질문제도 크게 완화되었다. 쌍망식 초지방식은 신문용지와 인쇄용지 생산에 도입되어 사용하기 시작하였으나, 점차 전 지종으로 확대되어 사용되었다. 그러나 여전히 고평량지보다는 저평량과 중평량의 신문용지, 인쇄용지 등의 제조에 널리 사용되고 있다.

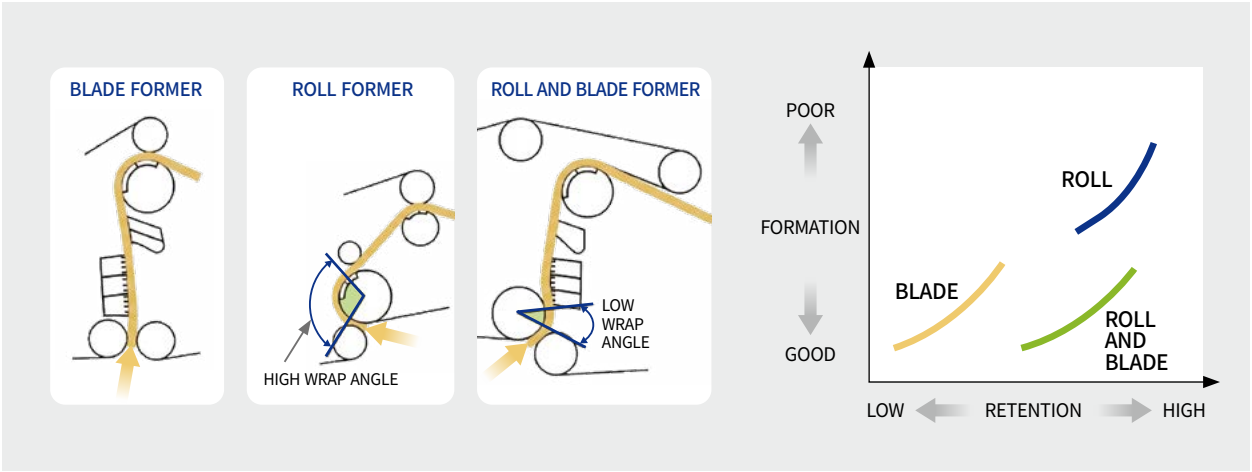
쌍망식 초지기는 탈수를 유발하는 기작에 따라 쌍망식 롤포머와 쌍망식 블레이드포머로 나눌 수 있다(그림 07-43). 쌍망식 롤포머는 두 장의 와이어가 합쳐진 후 커다란 포머 롤을 감싸돌며 탈수가 이뤄진다. 따라서 포머 롤을 감싸 도는 곡률반경과 바깥쪽 와이어의 장력에 의해 포밍 압력이 결정된다. 반면, 쌍망식 블레이드포머는 와이어 장력과 블레이드가 가하는 힘에 의해 야기된 와이어의 휘어진 각도에 의해 포밍 압력이 결정된다. 두 방식은 탈수 과정에서 발생하는 압력 펄스의 특성이 서로 다르기 때문에 생산되는 종이의 특성에도 차이가 나타난다. 일반적으로 롤포머는 보류(retention)는 우수하지만 지합(formation)이 상대적으로 불량한 종이를 생산하는 경향이 있으며, 블레이드포머는 지합이 우수한 종이를 생산하지만 보류가 상대적으로 낮은 특징이 있다. 이 두 방식의 장점을 살리기 위

그림 07-43. 쌍망식 포머의 예시: (좌, Voith 사) 쌍망식 롤포머, (우, Black Clawson 사) 쌍망식 블레이드포머



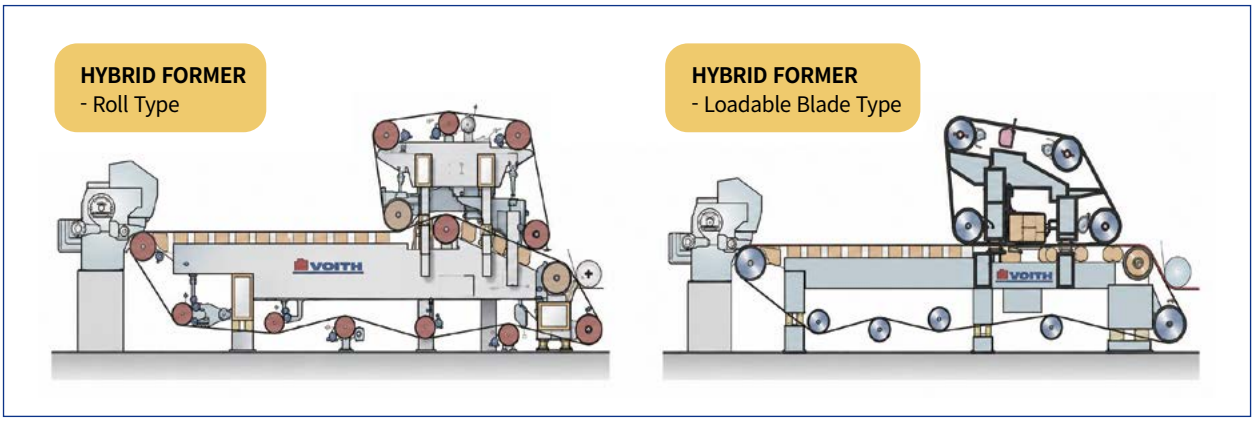

출처: Smook, Gary, Handbook for Pulp and Paper Technologists (4th Ed.), p. 252, TAPPI Press, 2016

그림 07-44. 쌍망식 포머 종류에 따른 지합과 보류도




출처: Valmet Brochure

그림 07-45. 하이브리드 포머 종류



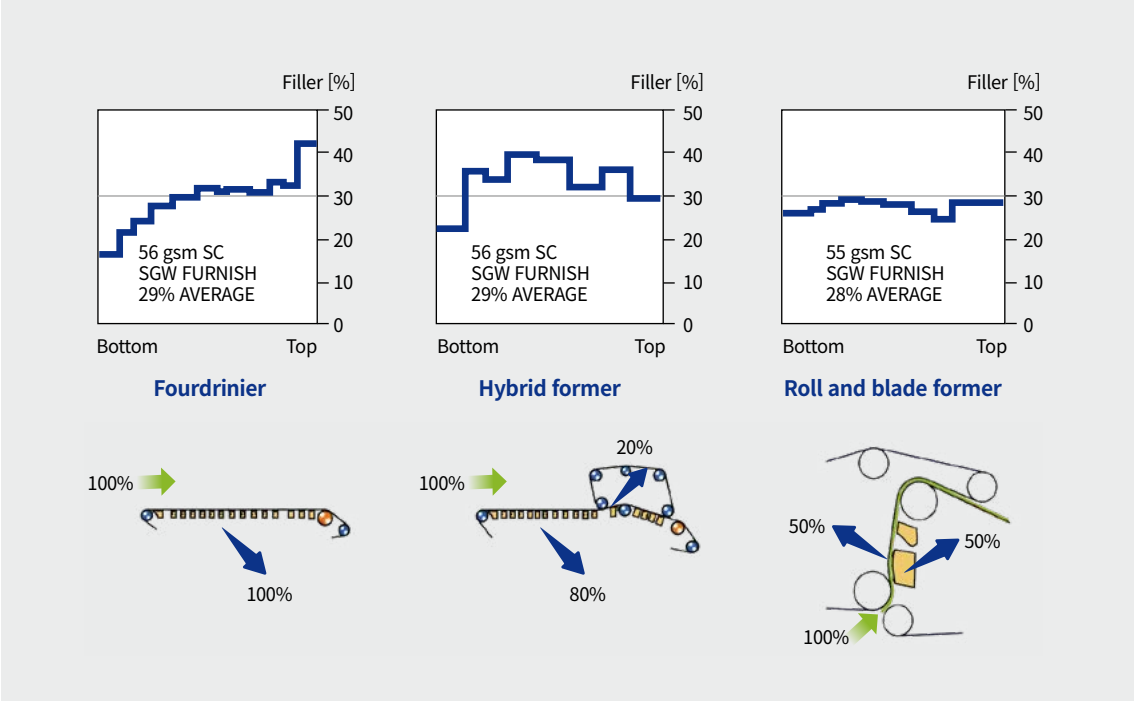

출처: Valmet Brochure

해 그림 07-44와 같이 롤과 블레이드를 같이 사용하는 롤-블레이드 쌍망식 포머가 개발되어 사용되고 있다. 쌍망식 초지기는 양면성 문제를 줄일 수 있지만, 장망식 포머로 제조된 종이에 비해 보류도가 낮고 내부결합강도가 약하다는 단점을 안고 있다.

하이브리드 포머(hybrid former)는 기존 장망식 초지기의 생산성을 개선하기 위해 개조한 형태로, 장망식 포머 위에 탑 포머를 설치하여 양방향 탈수를 도모한 것이다. 하이브리드 포머는 탑 포머에서 사용한 탈수 소자에 따라 쌍망식 초지기와 동일하게 하이브리드 롤포머와 하이브리드 블레이드포머로 나눌 수 있다(그림 07-45).

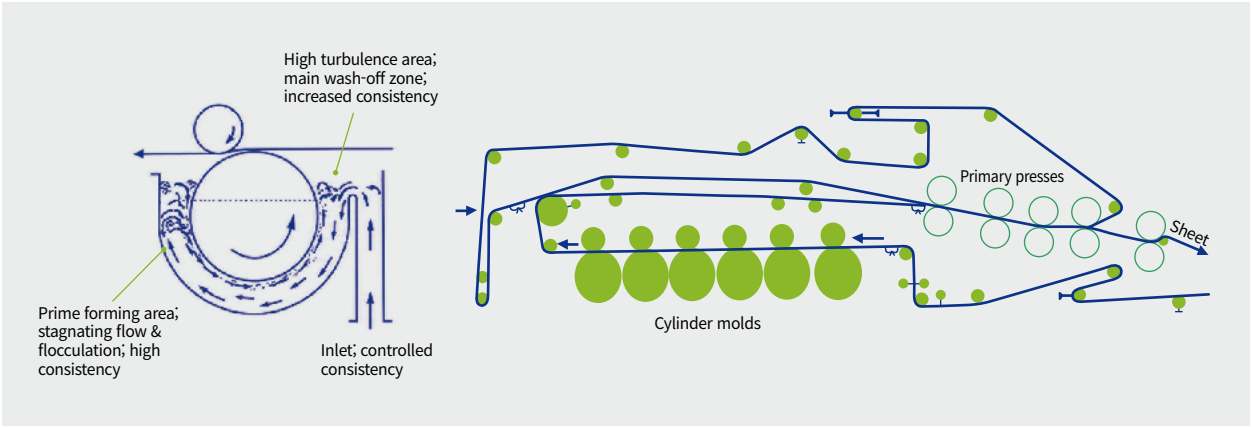
장망식 포머, 쌍망식 포머 및 하이브리드 포머로 생산된 종이의 두께 방향 충전물 함량의 분포를 보면(그림 07-46), 포머 구조에 따라 뚜렷한 차이가 나타난다. 장망식 포머는 표면의 충전물 함량이 높고 와이어 면으로 갈수록 낮아지는 전형적인 양면성 양상을 보이나, 하이브리드 포머로 제조한 경우 이 양면성은 다소 완화되는 경향이 있다. 특히 쌍망식 포머로 제조된 경우 종이의 두께 방향 충전물 분

**그림 07-46.** 포머 종류별 종이 두께 방향 충전물 함량 분포



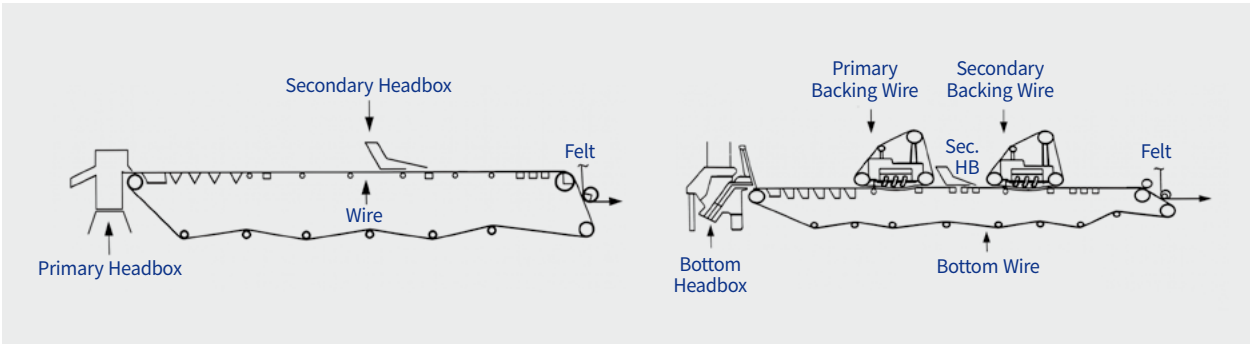

출처: Valmet Brochure

그림 07-47. 환망식 초지기 예시 및 환망 포머를 이용한 다층 초지



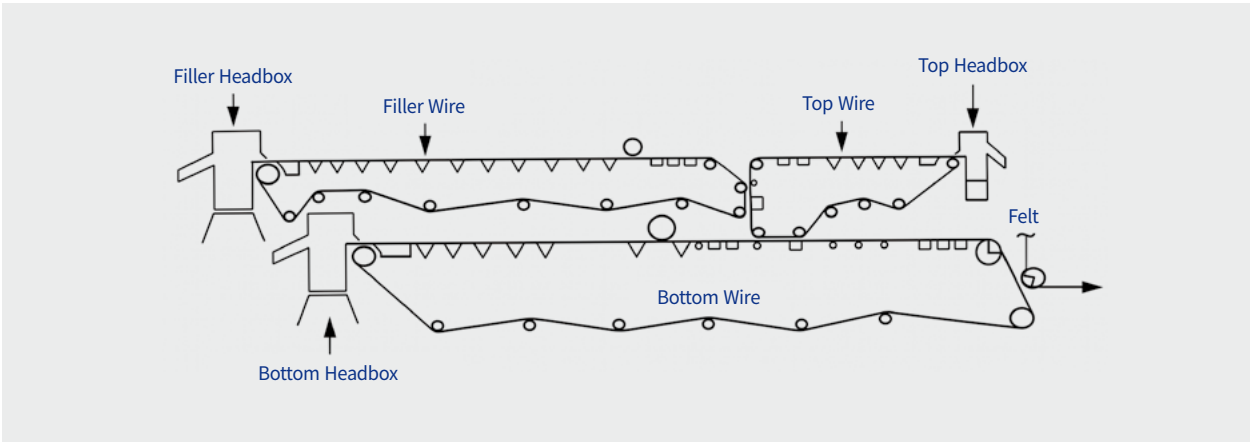

출처: Smook, Gary, Handbook for Pulp and Paper Technologists (4th Ed.), p. 311, 316, TAPPI Press, 2016

그림 07-48. (좌) 2차 헤드박스 및 (우) 2차 헤드박스와 탑 포머를 이용한 다층초지 기술




출처: Thorp, B.A. and Condon, E.M., Operating principles of multiple wire board formers, 1999 TAPPI Wet End Operations Short Course, TAPPI Press, 1999

그림 07-49. 멀티포드리니어 다층초지 모습




출처: Thorp, B.A. and Condon, E.M., Operating principles of multiple wire board formers, 1999 TAPPI Wet End Operations Short Course, TAPPI Press, 1999

포가 거의 균일하게 분포된다. 이러한 결과는 쌍망식 초지기가 생산성 뿐 아니라 품질 측면에서도 우수한 특성이 있음을 보여준다.

이 외에도 1809년 발명된 환망 초지기(cylinder former)가 있다. 지금은 많이 사용하지 않지만, 예전에는 지폐용지와 같은 특수지를 제조하거나 고평량 판지의 다층 초지를 위해 널리 사용되었다. 그림 07-47과 같이 와이어가 감긴 실린더를 지료가 담긴 통(vat) 안에 넣고 회전시키면서 실린더 표면 위로 지층이 형성되도록 하는 것이다. 구조가 매우 간단하기 때문에 공간이 제한된 곳에서도 설치할 수 있으며, 여러 개의 실린더를 놓고 각 층 위에 새로운 지층을 적층하게 되면 고평량의 다층 초지가 가능하다. 다만 통 안에서 섬유 분산을 야기할 수 있는 장치를 적용하기 어렵기 때문에 장망식 포머에 비해 지합이 불량하고 속도가 느리며, 패브릭 아래쪽에 지층이 형성되어 이후 방향 전환을 위한 과정이 필요하다는 단점이 있다.

고평량의 판지는 앞서 설명한 바와 같이 여러 개의 환망 포머를 설치하여 제조할 수 있지만, 최근 판지 공장은 환망 초지기보다는 장망식 포머를 이용한 다층 초지 기술을 더 많이 이용하고 있다. 한 장의 긴 장망식 포머의 와이어 위에 2차 헤드박스를 설치하는 방식을 비롯하여, 2차 헤드박스와 탑 포머를 같이 설치하여 탈수 능력도 향상시키고 층별 원료의 순도를 더 높일 뿐 아니라 층별 백수를 별도로 수집 관리할 수 있도록 기술이 발전되었다(그림 07-48).

또한 여러 대의 장망식 포머를 복합화하여 다층초지하는 멀티 포드리니어 다층초지(multifourdrinier multiply-forming) 기술도 널리 이용되고 있다(그림 07-49). 각 층이 장망식 초지기로 제조되니 층별 지합이 우수하고 백수의 관리와 활용이 용이하며 층별 순도가 매우 높다는 장점이 있다. 모든 층이 합지된 후 쿠치에서 초지부 마지막 탈수를 수행하고 프레스 파트로 넘어가지만, 층별 합지 시 미세분 함량이나 수분 함량에 따라 층간결합력이 영향받을 수 있다. 대체로 기존 환망 초지방식이나 2차 헤드박스를 사용하는 다층초지 방식보다 층간결합력이 낮을 수 있기 때문에 전분을 이용하여 층간결합력을 높이기도 한다.

## 참고문헌


[1] 박신영, 박희태, 신종현, 현진호, 윤혜정, 펄프 섬유의 형태학적 특성이 국부적 폐쇄공간 내 종이 지합에 미치는 영향, 펄프종이기술 50(2):36-43 (2018)

[2] Kerekes, R. J. and Schell, C. J., Characterization of fibre flocculation regimes by a crowding factor, Journal of Pulp and Paper Science 18(1):J32-38 (1992)

[3] Paulapuro, H. (ed.), Papermaking Science and Technolgoy Book No. 8, Papermaking Part 1. Stock Preparation and Wet end, Fapet Oy. (2007)

[4] Smook, G., Handbook for Pulp and Paper Technologists (4th Ed.), TAPPI Press (2016)

[5] Pantaleo, S., Modern headboxes – Their role and capabilities in the sheet forming process, 1999 TAPPI Wet End Operations Short Course, TAPPI Press (1999)

[6] Wiberg, A., Söderberg, D., Bjärestrand, A. and Grussenmeyer, H., Development of a future manufacturing concept for papermaking, 2015 PaperCon Conference, TAPPI Press (2015)

[7] Design and operation of headboxes, 2004 Paper Machine Operations Short Course, TAPPI Press (2004)

[8] Waller, M.H., Design and development of headbox, 1991 Wet End Operations Seminar Notes, TAPPI Press (1991)

[9] Gavelin, G., Paper Machine Design and Operation – Descriptions and explanations, Angus Wilde Publications Inc. (1998)

[10] Kaarlo, N. (ed.), Papermaking Science and Technolgoy Book No. 16, Paper Physics, Fapet Oy (2008)

[11] Miller, D.C., Practical aspects of water management, 1999 TAPPI Wet End Operations Short Course, TAPPI Press (1999)

[12] Atkins, J., Fourdrinier Forming, 2004 Paper Machine Operation Short Course, TAPPI Press (2004)

[13] Bambrick, T.J., Practical aspects of drainage & formation studies, 1989 Wet End Operations Seminar, TAPPI Press (1989)

[14] Hansen, V.E., Water management for the wet end, 1989 Wet End Operations Seminar, TAPPI Press (1989)

[15] Thorp, B.A. and Condon, E.M., Operating principles of multiple wire board formers, 1999 TAPPI Wet End Operations Short Course, TAPPI Press (1999)





**정 명 준** 전북대학교 교수

2018 – **현재** 한국펄프종이기술 편집위원회 부위원장
2023 – 2024 한국공업화학회 펄프제지분과회장
2011 – 2014 비엔나 생명과학대학 화학과 Post-doc Fellow
2008 동국대학교 환경생태공학과 공학박사

mjeong@jbnu.ac.kr

# 8
# 백수시스템



환경을 지키는 수처리 설비 (사진제공_무림P&P)

# 1. 백수시스템의 개요

## (1) 제지공정의 물 사용과 수계관리

제지공정은 대표적인 습식 공정으로, 펄프 현탁액의 이송과 섬유 분산, 지필 형성, 탈수 및 설비 세정 등 여러 단계에서 많은 양의 물이 사용된다[1, 2]. 물은 단순히 섬유를 운반하는 매체일 뿐만 아니라, 첨가제의 용해와 분산, 열 전달, 공정 안정화에도 중요한 역할을 한다. 따라서 제지공정에서 물의 사용과 관리는 생산 효율과 제품 품질에 직접적인 영향을 미치는 중요한 요소이다.

과거의 제지공정은 개방형 수계를 기반으로 운영되는 경우가 많아 물 사용량이 매우 컸다[3]. 그러나 환경 규제의 강화와 수자원 절약의 필요성이 커지면서, 최근에는 공정수 회수와 재이용 기술의 발전에 따라 용수 사용량을 줄이려는 방향으로 수계 관리가 이루어지고 있으며, 특히 산업 전반에서 수자원 절약과 재이용을 위한 고도 정화 기술의 도입이 가속화되고 있다(도표 08-01)[3, 4]. 이와 같은 변화는 단순히 물 사용량을 줄이는 차원을 넘어, 공정 내에서 발생한 물을 회수하고 재이용하는 수계 관리의 중요성을 더욱 부각시킨다. 특히 초지부에서 발생하는 백수(white water)는 제지공정에서 가장 큰 비중을 차지하는 공정수 중 하나로, 이를 효율적으로 회수하고 재사용하는 것은 공정 안정성과 수자원 절약을 함께 달성하는 핵심 요소가 된다.

**도표 08-01.** 제지공정의 용수 사용량 변화

| 구분/기술수준 | 시기 | 용수 사용량 ($m^3$/t paper) | 백수 재이용률 (%) | 주요특징 |
|---|---|---|---|---|
| 전통제지공장 | 1970년대 이전 | 80~100 | 30~40 | 개방형 수계, 폐수 직배출 중심 |
| 일반 현대공장 | 2000년대 이후 | 20~50 | 60~70 | 세이브올(save-all) 및<br>1차 회수 시스템 |
| 고효율<br>공장 사례 | 2010년대 | 5~10 | 90~95 | 백수 분리 및 막여과(UF/NF) 적용,<br>에너지 절감 중심 |
| 고폐쇄<br>수계 공장 | 2020년대 | 5 미만 | ~100 | 고도 정화기술(RO, MVR, 생물학적 처리) 적용.<br>※ 재생판지 등 특정 공정에 주로 적용되며<br>지종에 따라 제한됨 |

출처: Herrera-Melián, J. A., & Ortega Méndez, J. A. (Eds.). (2018). Recent Advances in Water Management: Saving, Treatment and Reuse. MDPI.,
Hubbe, M. A. (2007c). Water and papermaking. 3. Measures to clean up process water. Paper Technology, 48(3), 23-30.

### (2) 백수의 정의와 개념

좁은 의미의 백수(white water)는 초지부(forming section)에서 지료가 탈수될 때 와이어를 통과하여 회수되는 물을 말한다[5]. 넓은 의미로는 세척수와 백수계로 유입되어 함께 순환하는 압착부 탈수수까지 포함하여 사용되기도 한다. 이 물에는 미세섬유(fines), 충전물(fillers), 잔류 화학첨가제, 용존 유기물 및 무기이온 등이 포함되어 있다[1, 2]. 이러한 백수의 고형분 농도는 일반적으로 공정 내 위치에 따라 약 0.01~0.3% 수준으로 나타난다.

백수라는 명칭은 물속에 포함된 미세섬유와 충전물에 의해 물이 희뿌옇게 보이는 데에서 유래하였다. 색상지나 특수지를 생산하는 경우에는 염료의 영향으로 백수의 색상이 흰색이 아닐 수도 있으나, 제지공정에서는 이러한 공정 순환수를 일반적으로 모두 백수라 부른다.

제지공정에서 사용되는 물은 공급원과 순환 방식에 따라 청수(fresh water), 백수(white water), 공정수(process water)로 구분한다[6]. 청수는 외부에서 공급되는 물로서 약품 희석, 설비 세정, 냉각수 및 보일러수 등 수질 관리가 필요한 공정에 사용된다. 백수는 초지부와 압착부에서 탈수되어 회수되는 공정수로, 공정 내에서 원지료 희석수나 설비 세척수 등으로 재사용된다. 공정수는 이러한 백수와 청수, 세이브올(save-all) 회수수, 응축수 등을 포함하는 공정 전체의 순환수를 의미한다.

**도표 08-02.** 제지공장 내 청수, 백수, 공정수

| 구분 | 정의 | 주요 발생 또는 공급 위치 | 대표 용도 |
|---|---|---|---|
| 청수<br>(fresh water) | 외부에서 공급되는 물로, 지하수,<br>상수도, 공업용수 등을 포함한다. | 외부 공급원 | 약품 희석, 설비 세정,<br>냉각수, 보일러수 등 |
| 백수<br>(white water) | 초지기의 초지부와 압착부에서<br>탈수되어 회수되는 공정수로,<br>미세섬유, 충전물, 화학첨가제<br>잔류물 등이 포함된다 | 초지부, 압착부 | 원지료 희석수,<br>설비 세척수 등으로 재사용 |
| 공정수<br>(process water) | 공정 전체에서 순환되는<br>물의 총칭으로 백수, 청수, 세이브올<br>회수수 및 응축수 등을 포함한다. | 공장 전체 수계 | 공정 전체의 물 순환 및<br>수질 관리 대상 |

이 가운데 백수는 공정수에서 큰 비중을 차지하며, 제지공장의 물 순환 시스템에서 중심적인 역할을 한다. 백수를 효율적으로 회수하고 재사용하면 청수 사용량을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 공정의 조업 안정성과 설비 청결도 유지에도 도움이 된다.

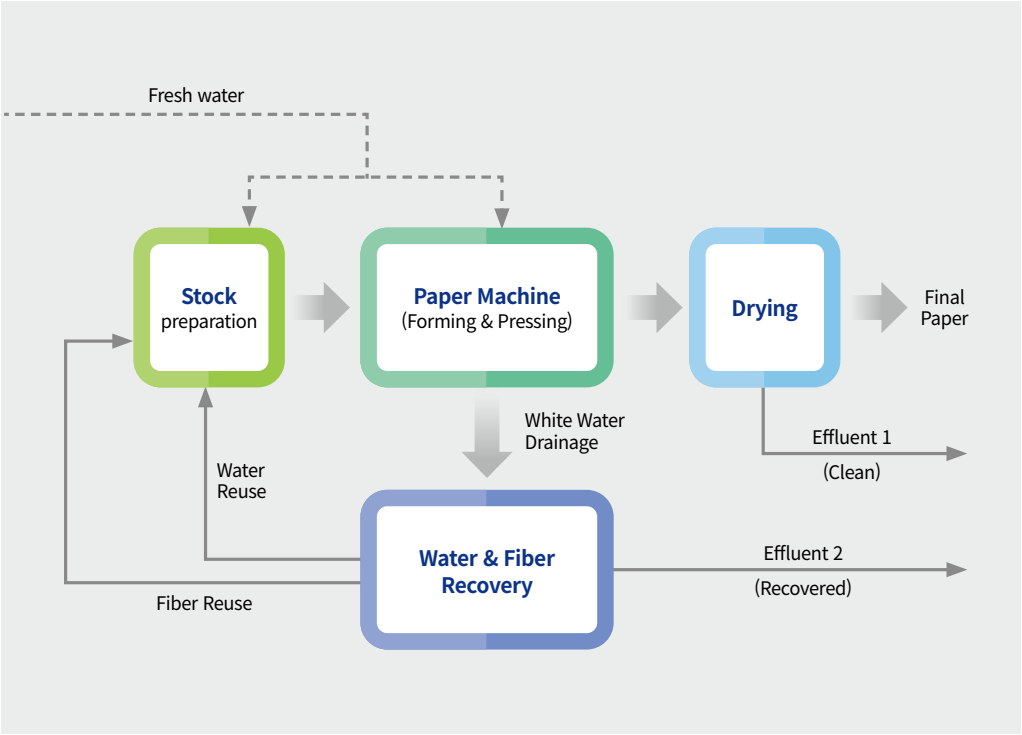
### (3) 백수의 발생 위치 및 순환구조

#### 1) 발생 위치

가장 많은 양의 백수는 초지부에서 발생한다[7]. 펄프 현탁액이 와이어 위로 사출되어 지층이 형성되는 과정에서 지료조성분의 희석수가 와이어를 통해 탈수된다. 이러한 탈수수는 와이어 아래의 트레이에 모여 회수되며, 이후 공정 내에서 다시 사용된다(그림 08-01).

또한 압착부에서도 백수가 발생한다. 초지부에서 형성된 습지필이 프레스를 지나

**그림 08-01.** 제지공정 내 백수의 단순 흐름도




출처: Smook, G. A. (2002). Handbook for Pulp & Paper Technologists (3rd ed.). Angus Wilde Publications, Vancouver.

며 압착 탈수가 일어난다. 이때 탈수된 물 역시 백수 계통으로 회수된다. 압착부에서 탈수된 물은 초지부 백수에 비해 상대적으로 고형분 농도가 낮은 경우가 많으며, 펠트 세척수와 함께 회수되는 경우도 있다. 이 밖에도 제지공정에서는 설비 세척수, 희석수, 냉각수 및 증기 응축수 등 일부 공정수가 백수 계통으로 유입될 수 있다. 이러한 물 역시 공정 내 수계 시스템에서 함께 순환하며 공정수의 일부를 구성한다.

2) 순환 구조

초지부에서 발생한 백수는 와이어 아래의 트레이에 모여 와이어 피트(wire pit)로 이송된다. 이 물의 대부분은 팬 펌프를 통해 지료 희석수로 다시 사용된다. 한편 진공박스나 압착부에서 탈수된 물은 실 피트(seal pit)에 모인 후, 백수 탱크로 보내져 저장된다. 저장된 백수는 초지공정에서 지료 희석수나 설비 세척수 등으로 다시 사용된다. 또한 와이어 세척수와 실 피트의 방류수는 스크린이나 디스크 필터 회수 장치를 거쳐 미세섬유와 충전물을 분리한다. 이렇게 정화된 물은 클리어 워터(clear water) 탱크로 이송되어, 공정 내 희석수나 세척수 등으로 재사용된다. 이와 같이 제지공정에서는 초지부와 압착부에서 발생한 백수가 회수 장치를 통해 정화된 후 다시 공정에 공급되는 순환 구조를 형성한다.

### (4) 백수시스템의 역할과 중요성

백수시스템은 제지공정에서 발생한 백수를 회수·정화하여 다시 공정에 사용하는 수계 관리의 핵심 시스템이다. 이를 통해 청수 사용량을 줄이고 공정 내 물의 순환 효율을 높일 수 있으므로, 백수시스템은 수자원 절약과 공정 운영의 효율 향상에 중요한 역할을 한다. 또한 백수시스템은 단순한 회수 설비에 그치지 않고, 공정수의 수질을 일정하게 유지시키는 역할도 한다. 백수의 상태가 안정적으로 유지되면 초지부에서의 탈수, 보류, 지필 형성 등 주요 공정 조건도 보다 안정적으로 유지될 수 있다. 반대로 백수의 회수와 관리가 적절하지 않으면 공정수의 변동이 커져 조업 안정성과 제품 품질에 영향을 줄 수 있다. 따라서 백수시스템은 용수 절감과 공정수 재이용을 위한 설비임과 동시에 제지공정의 안정적인 운전을 뒷받침하는 수계 관리 시스템이다.

## 2. 물과 백수의 특성과 수질

### (1) 물의 특성

제지공정에서 물은 단순히 펄프를 희석하여 이송하는 매체 이상의 역할을 한다. 물은 섬유를 분산시키고, 각종 화학첨가제를 용해시키며, 공정 내에서 열과 에너지를 전달하는 중요한 매개체로 작용한다.

즉 종이 한 장이 만들어지는 과정에서 물은 섬유 분산, 첨가제 용해, 열 전달, 탈수 및 건조 조절 등 공정 전반에 걸쳐 핵심적인 역할을 수행한다.

이 장에서는 물이 가지는 기초적인 물리·화학적 특성이 제지공정의 여러 현상과 어떻게 연결되는지를 살펴본다.

#### 1) 물의 분자 구조와 수소결합

물 분자는 하나의 산소 원자와 두 개의 수소 원자로 이루어져 있다. 산소의 전기음성도는 수소보다 크기 때문에 전자를 더 강하게 끌어당기며, 그 결과 물 분자는 극성을 띠게 된다. 이러한 극성 때문에 물 분자 사이에는 수소결합이 형성된다. 이와 같은 수소결합 네트워크는 물이 다른 액체보다 높은 끓는점과 비열을 갖게 하는 원인이 되며, 다양한 극성 물질을 용해시킬 수 있는 강한 용매로 작용하게 한다.

제지공정에서 이러한 물의 특성은 섬유의 팽윤과 종이의 강도 형성에 직접적인 영향을 준다. 섬유 표면에는 수산기(-OH)가 존재하는데, 이 수산기는 물 분자와 수소결합을 형성하여 섬유가 물을 흡수하고 팽윤하도록 한다. 물 속에서 팽윤된 섬유는 보다 유연해지며 서로 잘 얽힐 수 있는 상태가 된다.

이후 건조 과정에서 물이 제거되면 섬유 표면의 수산기 사이에 새로운 수소결합이 형성되며, 이러한 결합이 종이의 강도를 결정하는 중요한 요인이 된다. 따라서 제지공정에서 물은 단순한 희석제가 아니라, 섬유 간 결합 형성을 매개하는 중요한 역할을 하는 물질이다.

### 2) 열적 특성과 온도 안정성

물은 매우 높은 비열(4.18 kJ/kg·K)을 가지고 있다. 비열이 크다는 것은 물이 열을 흡수하거나 방출할 때 온도가 쉽게 변하지 않는다는 의미이다. 이러한 특성 때문에 물은 제지공정에서 온도 변화를 완충하는 역할을 한다.
초지부, 압착부, 건조부와 같은 제지공정 각 구간의 온도 조건은 크게 달라질 수 있다. 이때 공정수에 포함된 물은 열을 흡수하거나 방출하면서 공정 전체의 온도 변화를 완화하여 열적 안정성(thermal stability)을 유지하는 데 도움을 준다.
공정수의 온도가 일정하게 유지되지 않으면 탈수 효율, 보류제의 반응 효율, 그리고 미생물 활성 등에 변화가 발생할 수 있다. 이러한 변화는 결국 초지공정의 운전 안정성을 떨어뜨리고 제품 품질의 불균일로 이어진다. 따라서 제지공정에서는 공정수의 온도를 일정 범위로 유지하는 것이 중요하다.

### 3) 점도와 유동성

점도(viscosity)는 유체의 흐름에 대한 저항을 나타내는 물리적 성질로, 제지공정에서 공정수의 유동과 탈수 거동에 영향을 미친다. 순수한 물의 점도는 온도가 상승할수록 감소하며, 일반적인 제지공정의 운전 범위인 약 40~60 ℃에서도 이러한 변화는 무시하기 어렵다. 실제 공정수의 점도는 온도뿐 아니라 고형분 함량, 전분 등 용존 또는 분산된 고분자 성분의 종류와 농도, 혼합 및 전단 조건에 따라 달라진다. 공정수의 온도가 낮아지거나 고분자 성분이 과도하게 축적되면 점도가 증가하여 유동성, 탈수 및 섬유 분산에 영향을 미치게 된다. 따라서 점도는 제품 품질을 단독으로 결정하는 변수라기보다, 온도와 공정수 조성의 변화와 함께 해석해야 하는 물리적 특성으로 이해하는 것이 적절하다.

### 4) 표면장력과 모세관 현상

물은 비교적 큰 표면장력을 가지는 액체이다. 표면장력이란 액체 표면의 분자들이 서로 강하게 끌어당겨 표면적을 최소화하려는 성질을 말한다. 이러한 특성 때문에 물은 가는 관이나 미세한 공극과 같은 작은 공간에서도 쉽게 상승하거나 이동하는데, 이를 모세관 현상이라고 한다. 제지공정에서 이러한 특성은 시트 내부

의 수분 이동, 펠트와 와이어의 세정, 그리고 코팅이나 사이징 공정에서의 액체 침투와 밀접한 관련이 있다. 종이 시트는 섬유 사이에 미세한 공극을 많이 가지고 있기 때문에, 액체는 이러한 공극을 따라 모세관 작용에 의해 이동하게 된다.

### 5) 전기적 특성과 섬유 표면전하

물은 극성을 가지는 분자로, 소량이 $H^+$와 $OH^-$ 이온으로 해리되는 특성을 가지며, 동시에 다양한 무기이온($Na^+$, $Ca^{2+}$, $SO_4^{2-}$ 등)을 안정적으로 용해시킬 수 있다. 물에 용해된 이러한 이온들은 자유롭게 이동하면서 공정수의 전기전도도(conductivity)를 결정한다.

제지공정에서 사용되는 섬유와 충전물의 표면은 일반적으로 음전하를 띠고 있다. 물속에서는 양이온들이 이러한 음전하 표면 주변에 모여들어 전기이중층(electrical double layer)이라고 불리는 구조를 형성한다. 이 전기이중층은 섬유나 입자 사이의 전기적 상호작용을 조절하는 중요한 요소이다.

공정수의 이온강도가 증가하면 전기이중층이 압축되어 섬유나 입자 사이의 정전기적 반발력이 감소한다. 그 결과 섬유와 충전물이 서로 가까이 접근하기 쉬워져 콜로이드의 불안정화와 응집이 촉진된다. 반대로 이온강도가 낮으면 전기이중층이 상대적으로 두껍게 형성되어 입자 사이의 반발력이 커지고, 분산 상태가 유지되기 쉽다. 다만 이온강도가 지나치게 높거나 특정 이온이 축적되면 고분자 보류제와 응집제의 전하 작용 및 흡착·가교 거동이 약화된다. 따라서 실제 입자 거동은 이온강도뿐 아니라 pH, 이온 조성 및 첨가제 시스템에 따라 달라지며, 이러한 변화는 초지공정의 보류율(retention), 지합(formation) 및 백수의 탁도 등에 영향을 미친다. 공정수의 전도도와 이온 조성을 적절히 관리하는 것은 제지공정의 화학적 안정성과 제품 품질의 일관성을 유지하는 데 중요하다.

### 6) 용해성과 화학반응 매개로서 역할

물은 다양한 물질을 용해시킬 수 있기 때문에 흔히 보편용매(universal solvent)라고 불린다. 제지공정에서 사용되는 전분, 보류제, 염료, 사이징제 등 대부분의 화학첨가제는 물에 용해되거나 미세하게 분산된 상태로 공정에 투입된다. 이때 물은 단순한 용매의 역할을 하는 것에 그치지 않고, 첨가제가 반응하는 화학적 매

개체로 작용한다. 공정수의 pH, 이온강도, 온도와 같은 조건은 첨가제의 반응성과 안정성을 결정하는 중요한 요인이 된다. 예를 들어, 공정수의 pH와 이온강도가 변하면 보류제와 사이즈제 등 화학첨가제의 이온화 및 흡착 거동이 달라질 수 있으며, 특히 이온강도가 증가하면 전하 차폐 효과로 인해 고분자 첨가제의 작용 효율이 저하된다.

### (2) 백수의 구성 성분

백수는 다양한 용존 성분과 부유성 입자가 함께 존재하는 복합적인 공정수이다. 백수의 조성은 사용되는 원료의 종류(펄프, 충전물), 첨가제의 종류, 공정수 재이용률, 그리고 공정의 폐쇄화 정도에 따라 달라진다.
일반적으로 백수에는 미세섬유, 충전물, 화학첨가제 잔류물, 용존 유기물 및 무기이온 등이 포함되어 있으며(도표 08-03), 이러한 성분들은 제지공정의 수질과 공정 안정성에 중요한 영향을 미친다[8].

#### 1) 미세섬유와 충전물

백수에 포함된 미세섬유는 공정조건에 따라 전체 고형분의 약 10~30% 수준으로 나타날 수 있다. 이러한 미세입자는 초지 과정에서 섬유 사이로 빠져나가기 쉽기 때문에 보류율 저하의 원인이 될 수 있으며, 시트 내 분포가 불균일해질 경우 종이의 양면성(two-sidedness)을 유발하기도 한다.

**도표 08-03.** 백수의 주요 구성 성분

| 구분 | 주요 구성 성분 |
|---|---|
| 섬유 잔류물 | 미세섬유, 단섬유 |
| 충전물 | $CaCO_3$, talc, clay, $TiO_2$ |
| 화학첨가제 잔류물 | 보류제, 지력증강제, 사이즈제, 염료 |
| 용존 유기물 | 전분, 수지산(resin acid), DCS |
| 무기 이온 | Na+, $Ca^{2+}$, $SO_4^{2-}$, $Cl^-$ |

충전물로는 주로 탄산칼슘($CaCO_3$), 백토(kaolin), 이산화티탄($TiO_2$) 등이 사용되며, 종이의 백색도와 불투명도를 향상시키는 역할을 한다. 그러나 과량의 충전물이 백수 내에 남게 되면 침전, 배관 막힘, 스크린 부하 증가 등과 같은 운전상의 문제를 유발한다.

### 2) 용존 및 콜로이드성 물질

백수에는 전분, 수지산, 리그닌 분해물, 유기산 등과 같은 용존 유기물과 함께 라텍스, 사이즈제 등 미세한 콜로이드성 물질이 존재한다. 이러한 물질들은 일반적으로 용존 및 콜로이드성 물질(DCS, dissolved and colloidal substances)로 불린다. DCS는 수계의 전하 균형과 응집 반응에 큰 영향을 미치며, 초지공정의 화학적 안정성을 좌우하는 중요한 요소이다[8, 9]. DCS가 과다하게 축적되면 보류율이 저하되고, 점착물(stickies)이나 슬라임(slime) 발생이 증가하여 공정 운전을 불안정하게 한다. 또한 이러한 유기물은 미생물의 영양원이 되어 생물학적 오염을 유발하기 쉽다.

### 3) 무기이온과 염류

백수에는 나트륨($Na^+$), 칼슘($Ca^{2+}$), 황산이온($SO_4^{2-}$), 염화이온($Cl^-$) 등 다양한 무기이온이 존재한다. 이러한 이온들은 수계의 전도도와 전하 균형을 결정하며, 응집제와 보류제의 작용에도 직접적인 영향을 미친다. 특히 칼슘($Ca^{2+}$)은 황산이온($SO_4^{2-}$) 또는 탄산계 이온과 결합하여 조건에 따라 침전물이나 스케일(scale)을 형성할 수 있으며, 나트륨($Na^+$)이나 염화이온($Cl^-$)은 전도도 상승의 원인이 된다[3, 10].

### 4) 화학첨가제의 잔류물

제지공정에서 사용되는 응집제, 보류제, 충전물 보조제, 사이즈제 등은 반응 후 일부가 용존 상태 또는 미세입자 형태로 백수에 남게 된다. 이러한 첨가제 잔류물은 다른 첨가제의 작용에 간섭하거나 콜로이드 전하 균형을 교란하여 공정 효율을 저하시킬 수 있다. 따라서 초지공정에서는 첨가제의 주입량을 적절히 조절

**도표 08-04.** 중성 인쇄용지 공정 백수의 구성 성분 및 수질 특성 예시

| 구분 | 예시 범위* | 주요 영향 |
|---|---|---|
| 미세섬유 | 100~300 mg/L | 지합 불균일, 보류율 저하 |
| 충전물 ($CaCO_3$ 등) | 200~800 mg/L | 백색도 향상, 침전 유발 |
| 용존 유기물 부하 (COD 기준) | 200~1,000 mg $O_2$/L | 슬라임 발생, 미생물 활성 증가 |
| 무기이온 ($Na^+$, $Ca^{2+}$, $SO_4^{2-}$ 등) | 100~500 mg/L | 전도도 상승, 스케일 형성 |
| 전도도 | 500~1500 µS/cm | 전해질 효과, 보류제 반응성 변화 |

* 제시된 값은 중성 인쇄용지 공정의 특정 백수 채취 지점에서 관찰될 수 있는 예시 범위이며, 지종, 원료, 채수 위치, 첨가제 조건 및 수계 폐쇄도에 따라 크게 달라질 수 있다.

하고, 설비의 세정 주기를 유지하여 백수 내 잔류물이 과도하게 축적되지 않도록 관리한다.

### (3) 백수의 주요 수질 지표

백수의 수질은 공정의 안정성과 제품 품질에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 제지공정에서는 전도도, COD, pH, 탁도, 용존산소(DO)와 같은 주요 수질 지표를 지속적으로 측정하고 관리한다. 이러한 지표들은 공정수의 화학적 상태와 오염 정도를 파악하는 데 중요한 기준이 된다.

#### 1) 전도도(conductivity)

전도도는 공정수에 용해된 이온 농도를 나타내는 지표로, 공정의 폐쇄화 정도와 용존 이온 농도에 따라 달라진다. 인쇄용지 등 일부 중성초지 공정에서는 약 500~1500 µS/cm 범위에서 관리되는 경우가 있으나, 실제 범위는 지종, 원료, 공정 폐쇄도 및 청수 보충 조건에 따라 크게 달라진다[10]. 전도도가 지나치게 높아질 경우 고분자 보류제의 응집 효율이 저하되며, 공정의 화학적 안정성에도 영향을 미친다. 전도도 상승의 주요 원인으로는 용존염의 축적, 공정수 경도 증가 그리고 고농도 회수수의 유입 등이 있다.

### 2) COD (chemical oxygen demand)

COD는 시료 중 화학적으로 산화 가능한 물질에 해당하는 산소요구량을 나타내며, 수중 유기물 부하를 간접적으로 평가하는 지표이다. COD는 공정의 폐쇄화 정도와 유기물 축적 정도에 따라 달라진다. 보고된 사례에 따르면 개방형 수계에서는 약 200–400 mg/L 수준을 보이는 경우가 있으며, 공정수 재이용률이 높은 폐쇄형 수계에서는 1000 mg/L 이상까지 증가하기도 한다. 대부분의 제지공장에서는 공정 안정성을 유지하기 위해 COD, 전도도 및 공정수 재이용률을 함께 고려하여 수계를 관리한다[10, 11].

### 3) pH

pH는 공정수의 산성 또는 알칼리성을 나타내는 지표로, 첨가제의 반응성과 탈수 효율에 중요한 영향을 미친다. 특히 보류제나 사이즈제와 같은 화학첨가제는 pH 조건에 따라 반응성이 크게 달라질 수 있다. 중성초지 공정은 일반적으로 pH 6.5~8.0 범위에서 운전된다. pH가 크게 변동할 경우 첨가제 반응이 불안정해져 보류율이나 탈수 효율에 영향을 줄 수 있다.

### 4) 탁도

탁도는 백수 내 미세섬유, 충전물 및 기타 미세입자에 의해 발생하는 빛의 산란 정도를 나타내는 광학적 지표로, 입자의 양과 분산·응집 상태를 간접적으로 반영한다. 탁도는 입자의 크기와 종류, 색도 및 측정조건의 영향을 받으므로 부유고형물 농도와 일대일로 대응하지 않는다. 따라서 탁도의 관리 범위는 지종, 측정 위치, 측정방법 및 공장별 운전조건에 따라 설정해야 한다. 탁도가 상승한 경우에는 보류율 저하, 미세입자 순환량 증가 또는 백수 회수설비의 운전 변화를 의심할 수 있으나, SS, 보류율 및 지합 변화와 함께 해석해야 한다.

### 5) 용존산소(DO)

용존산소(DO, dissolved oxygen)는 물에 용해되어 있는 산소의 농도를 나타내

는 지표이다. DO는 미생물 성장과 슬라임(slime) 발생에 영향을 미치는 요소이다. 백수계의 DO는 공정 위치와 수계 조건에 따라 달라지며, DO가 지나치게 낮아지면 국부적 혐기 조건이 형성되어 악취나 슬라임 문제가 커질 수 있다. 다만 슬라임 발생은 DO뿐 아니라 유기물 부하, 온도, 체류시간, 영양염 및 살균제 운전 조건과 함께 종합적으로 관리해야 한다.

### (4) 백수 순환에 따른 수질 변화

#### 1) 청수와 백수의 수질 차이

청수는 외부에서 공급되는 깨끗한 물로, 제지공정에서는 주로 산업단지에서 공급되는 공업용수가 사용된다. 공업용수는 하천수를 정수 및 여과한 뒤 공급되는 물로, 수질이 비교적 일정하고 대량 사용에 적합하다. 일부 공장에서는 지하수를 병행 사용하거나, 품질이 매우 중요한 공정의 경우 제한적으로 상수도를 사용하는 경우도 있다.

이에 비해 백수는 제지공정의 초지부와 압착부에서 탈수되어 발생한 물로, 공정 내에서 여러 용도로 반복 순환된다. 두 물은 공급원과 순환 경로가 다르기 때문에 수질에서도 뚜렷한 차이를 보인다(도표 08-05). 청수는 불순물 함량이 낮고 이온 농도가 안정되어 있어 첨가제 희석, 설비 세정, 냉각수 등 품질에 민감한 공정에

**도표 08-05.** 청수와 백수의 수질 특성 비교

| 항목 | 청수 | 백수 |
|---|---|---|
| pH | 원수 및 수처리 조건에 따라 비교적 일정 | 지종과 첨가제 조건에 따라 변동 |
| 전도도 | 상대적으로 낮음 | 용존 이온 축적으로 상대적으로 높음 |
| COD | 낮음 | 용존·콜로이드성 유기물 축적으로 높음 |
| 탁도 | 낮음 | 미세섬유와 충전물로 인해 높음 |
| $Ca^{2+}$ | 원수 경도에 따라 결정 | 충전물과 수계 순환의 영향을 받음 |
| DO | 수온과 공급조건에 따라 달라짐 | 수온·체류시간·미생물 활성에 따라 변동 |

사용된다. 반면 백수는 탈수 과정에서 미세섬유, 충전물, 화학첨가제 잔류물, 용존 유기물, 무기이온 등이 혼합되어 있으며, 전도도, COD 및 탁도가 상대적으로 높으며, 공정조건에 따라 미생물 활성이 증가할 수 있다.
이로 인해 백수는 일반적으로 청수보다 전도도, COD 및 탁도 수준이 높게 나타나는 경향이 있다. 특히 공정의 폐쇄도가 높아지고 백수 재이용률이 증가하면 용존 이온, 유기물, 미세입자 및 용존·콜로이드성 물질의 축적이 뚜렷해지며, 이러한 변화는 보류, 탈수, 지합 및 설비 오염에 영향을 미친다. 따라서 청수와 백수의 차이는 단순히 오염 정도의 차이가 아니라, 공정 내에서 반복 순환하는 동안 축적되는 물질의 종류와 농도 차이로 이해하는 것이 적절하다.

### 2) 백수 순환에 따른 수질 변화

백수는 초지부와 압착부에서 회수된 뒤 공정 내에서 반복적으로 순환·재사용된다. 이 과정에서 백수는 농축과 희석을 반복하며, 순환이 지속될수록 용존 이온, 유기물, 미세입자 및 DCS가 점차 축적된다. 이러한 축적은 공정 폐쇄도가 높고 청수 보충량이 적을수록 더 뚜렷하게 나타난다.
백수 순환에 따른 수질 변화는 전도도, pH, COD, 탁도, SS, DO와 같은 지표의 변화로 나타나며, 각 지표는 서로 독립적으로 변하기보다 공정 조건과 수계 균형에 따라 함께 변화한다. 따라서 이 절에서는 백수 순환에 따라 나타나는 주요 수질 변화의 원인을 중심으로 설명한다.

#### 가. 전도도의 상승

백수가 공정 내에서 반복적으로 순환하면 용존 이온이 점차 축적되어 전도도가 상승하는 경향을 보인다. 백수에는 나트륨($Na^+$), 칼슘($Ca^{2+}$), 염화이온($Cl^-$), 황산이온($SO_4^{2-}$) 등 다양한 무기이온이 포함되어 있으며, 순환이 반복될수록 이러한 이온들이 농축된다. 전도도는 공정수에 용해된 이온 농도를 나타내는 지표로, 공정의 폐쇄도와 백수 재이용률이 높아질수록 그 값이 증가하는 경향이 있다. 전도도가 상승하면 수계의 이온강도가 커지고 섬유와 미세입자 주변의 전기이중층이 압축되어 전하 차폐 효과가 나타난다[10]. 이러한 변화는 보류제와 응집제의 작용 조건, 섬유와 입자의 전하 균형, 그리고 지합 형성에 영향을 미친다.

### 나. pH의 변화

백수가 공정 내에서 반복적으로 순환하면 첨가제의 반응, 이산화탄소($CO_2$)의 용해와 방출, 유기물의 분해, 그리고 미생물의 대사 활동 등에 의해 pH가 변화할 수 있다. 이러한 변화는 공정의 위치, 약품 주입 조건, 체류시간 및 운전 조건에 따라 국부적으로 나타나기도 한다. pH는 화학첨가제의 이온화 상태와 반응성을 좌우하는 중요한 인자이므로, 보류제나 사이즈제와 같은 첨가제의 작용 효율도 pH 조건에 따라 달라질 수 있다. 또한 pH 변화는 금속 이온의 용해도와 응집 거동에도 영향을 줄 수 있으므로, 제지공정에서는 pH를 알칼리도와 함께 관리하여 수계의 화학적 균형을 유지하는 것이 중요하다. 제지공정의 운전 pH는 공정 종류에 따라 다르지만, 중성초지 공정에서는 일반적으로 pH 6.5~8.0 범위에서 안정적으로 유지되도록 관리한다.

### 다. COD의 상승

백수가 공정 내에서 반복적으로 순환하면 용존 유기물이 점차 축적되어 COD가 증가하는 경향을 보인다. COD는 백수 내 산화 가능한 유기물 부하를 나타내는 대표적인 지표로, 공정의 폐쇄도와 백수 재이용률이 높아질수록 그 값이 증가한다. COD가 상승한다는 것은 일반적으로 용존 유기물의 축적이 높아지고 있음을 의미하며, 이러한 유기물은 미생물의 기질로 작용하여 슬라임 발생 가능성을 높인다. 또한 유기물의 축적이 심해지면 장치 표면 오염, 생물학적 오염, 그리고 경우에 따라 악취와 같은 공정 문제로 이어질 수 있다. 따라서 COD는 백수계의 유기물 축적 정도와 생물학적 안정성을 평가하는 관리 지표로 활용된다.

### 라. 용존 및 콜로이드성 물질(DCS)의 축적

백수가 공정 내에서 반복적으로 순환하면 전분, 수지산, 라텍스, 고분자 첨가제 분해산물과 같은 용존 및 콜로이드성 물질(DCS)이 점차 축적된다. 이러한 물질은 물속에서 완전히 침전되지 않고 용해 상태 또는 미세한 콜로이드 상태로 존재하며, 수계의 전하 균형과 응집 반응에 영향을 준다. 따라서 DCS가 증가하면 양이온성 보류제나 응집제의 작용 조건이 변화하고, 보류 효율이나 첨가제 반응 안정성이 저하된다. 또한 일부 DCS 성분은 점착물(stickies) 또는 생물학적 오염과 관련될 수 있으므로, 백수 순환에 따른 수질 변화에서 중요한 관리 대상이 된다.

< ⌂ ☰ >

#### 마. 점착성 물질의 축적·불안정화 및 미생물 활성

백수 순환 과정에서는 수지, 라텍스, 접착성 고분자 성분 등 일부 유기성 물질이 축적되거나 불안정화될 수 있다. 이들 성분은 조건에 따라 설비 오염이나 제품 결점의 원인이 될 수 있다.

또한 백수에는 용존 유기물과 영양 성분이 포함되어 있으므로, 온도, DO, 체류시간 및 영양원 농도에 따라 미생물 활성이 달라질 수 있다. 따라서 백수 순환에 따른 수질 변화는 화학적 변화뿐 아니라 생물학적 변화까지 포함하는 복합적인 현상으로 이해해야 한다.

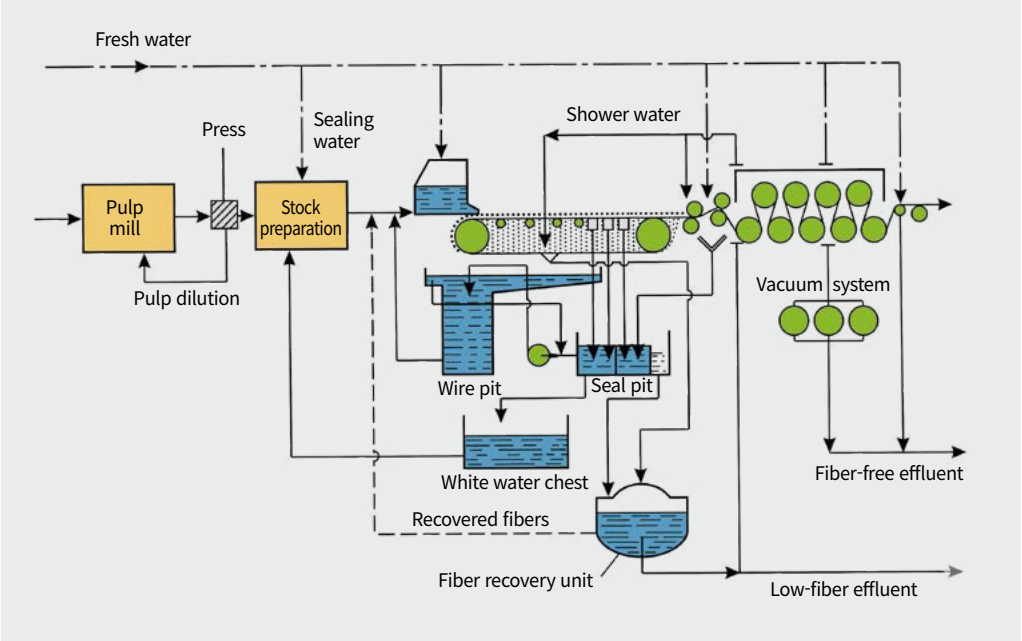
## 3. 백수 관리 시스템

### (1) 백수 회수 시스템 개요

백수 회수 시스템은 초지부에서 발생한 백수를 회수하여 공정 내에서 재사용하기 위한 설비와 배관 계통을 의미한다(그림 08-02). 백수에는 미세섬유, 충전물 및 화학첨가제 잔류물이 포함되어 있으며, 이를 효율적으로 회수하지 않으면 원료 손실과 수질 악화가 발생한다.

먼저 초지기 와이어 하단에 설치된 트레이에서 백수를 수집하여 와이어 피트로 이송하고, 이 중 일부는 원지료 희석수로 다시 사용한다. 진공박스에서 탈수된 물과 와이어 세척수는 실 피트(seal pit)를 거쳐 백수 탱크로 이송된다. 와이어 세척수와 실 피트의 방류수는 디스크 필터형 세이브올과 같은 회수 장치를 거쳐 미세섬유와 충전물 등의 고형분이 분리된다. 회수된 고형분은 다시 공정에 재이용되고, 여과수는 클리어 워터 탱크 등에 저장된 후 수질 조건에 따라 공정용수로 재사용된다. 이와 같이 회수된 물은 초지부의 원지료 희석과 설비 세척 등 다양한 용도로 재사용된다. 특히 클리어 워터 탱크의 수질은 세척수와 첨가제 희석수의 품질에 영향을 줄 수 있으므로, 탁도와 SS 등 기본 수질 지표를 확인하면서 운전한다.

그림 08-02. 제지공정 내 백수 상세 계통도




출처: Smook, G. A. (2002). Handbook for Pulp & Paper Technologists (3rd ed.). Angus Wilde Publications, Vancouver.

### (2) 백수 재사용의 목적과 이점

백수 재사용의 주된 목적은 청수 사용량을 줄이고 공정 효율을 높이며, 수계의 안정성을 유지하는 데 있다. 제지공정은 탈수, 세정, 희석 등의 여러 단계에서 많은 양의 물이 필요한 대표적인 습식 공정이며, 실제 용수 사용량은 지종과 공정 조건에 따라 크게 달라진다. 따라서 공정에서 발생하는 백수를 효과적으로 회수하여 재사용하면 청수 사용량을 절감할 수 있을 뿐만 아니라, 급수 및 폐수 처리 비용 절감, 열에너지의 재이용, 그리고 환경 부담 저감에도 도움이 된다. 이러한 이유로 백수의 회수와 재사용은 현대 제지공정에서 공정 효율, 공정 안정성, 그리고 환경적 지속가능성을 함께 확보하기 위한 중요한 수계 관리 수단이다[12].

#### 1) 청수 사용 절감

백수 재사용의 가장 직접적인 효과는 청수 사용량의 감소이다. 제지공정에서는 초지부와 압착부 등에서 발생한 백수를 회수하고, 필요에 따라 처리하여 공정용수로 재사용함으로써 외부에서 공급되는 청수의 사용량을 줄이고 있다. 청수 사

용량이 감소하면 급수 비용과 폐수 처리 비용도 함께 절감된다. 따라서 백수 재사용은 제지공정에서 수자원을 절약하고 공정의 경제성을 높이는 기본적인 방법이라 할 수 있다.

2) 에너지 절약

초지부와 압착부에서 회수되는 백수는 일반적으로 비교적 높은 온도를 가지며, 공정 조건에 따라 약 40~60 °C 범위에서 유지되는 경우가 많다. 이러한 백수를 공정 내 희석수나 세척수로 다시 사용하면 외부에서 공급되는 청수를 추가로 가열할 필요가 줄어들어 스팀 사용량과 에너지 소비를 줄이는 데 도움이 된다. 따라서 백수의 재사용은 단순한 물 절약에 그치지 않고 공정 내 열에너지를 재이용하는 효과를 가진다. 이러한 열에너지의 재이용은 공정의 열수지를 개선하고, 공정 운전의 에너지 효율을 높이는 효과가 있다.

3) 첨가제 투입 조건의 안정화

백수에는 초지 과정에서 사용된 보류제, 응집제, 사이즈제, 전분류 등의 첨가제 잔류분이 일부 포함될 수 있다. 이러한 성분은 공정 내에서 다시 순환하면서 첨가제 반응 조건에 영향을 미친다. 백수의 수질이 안정적으로 유지되면 첨가제의 주입 조건을 보다 일정하게 관리할 수 있어 약품 사용 효율을 높이는 데 도움이 된다. 그러나 첨가제 잔류물과 용존 및 콜로이드성 물질(DCS)이 과도하게 축적되면 전하 균형이 교란되고 첨가제 반응이 불안정해져 보류 효율이 저하될 수 있다. 따라서 안정적인 공정 운전을 위해서는 백수 수질을 지속적으로 모니터링하고, 첨가제 주입량을 적절히 조절하며, 필요에 따라 부분 배출(bleed) 등을 통해 수계를 관리하는 것이 필요하다.

### (3) 백수 재이용 공정의 운전 관리

앞 절에서 설명한 바와 같이 백수 재이용률이 높아지면 수계 내 용존 이온, 유기물, DCS 및 미세입자가 축적된다. 백수 재이용 공정의 운전 관리는 이러한 축적을 허용 가능한 범위 안에서 조절하여 탈수, 보류, 지합 및 설비 청결도를 안정적

으로 유지하는 데 목적이 있다.
이를 위해 부분 배출, 청수 보충, 수질 모니터링, 첨가제 주입 조건 조정, 세정 및 슬라임 관리가 함께 이루어진다. 대표적인 관리 항목은 다음과 같다.

### 1) 부분 배출(bleed)에 의한 백수 수계 농도 조절

부분 배출(bleed)은 백수 재이용 공정에서 수계 내 용존 성분의 농축을 제어하기 위한 대표적인 운전 방법이다[3]. 순환계 내 공정수의 일부를 외부로 배출하고 그에 해당하는 양의 청수를 보충함으로써, 용존 이온, 유기물 및 DCS의 과도한 축적을 완화하고 수계의 물질수지를 조절한다. 부분 배출 비율은 지종, 원료 조성, 회수 설비, 목표 수질 및 폐수 처리 여건에 따라 달라진다. 따라서 특정 비율을 고정적으로 적용하기보다 전도도, COD, 탁도, pH, DO 등의 변화 경향을 확인하면서 조정하는 것이 적절하다.
부분 배출 운전은 단순한 배출량 조절에 그치지 않고, 재이용 수준의 관리와 함께 이해되어야 한다. 백수의 재이용률이 지나치게 높으면 청수 사용량은 감소하지만 수계 폐쇄도가 높아져 용존물질의 축적이 빨라질 수 있다. 반대로 부분 배출이나 청수 보충이 과도하면 수질은 안정될 수 있으나 물 절감 효과와 에너지 회수 효과가 감소한다. 따라서 실제 운전에서는 청수 절감, 수질 안정성, 제품 품질, 설비 청결도 및 경제성을 함께 고려하여 적정한 재이용 수준과 부분 배출 비율을 결정해야 한다.

### 2) 수질 모니터링 및 제어

수질 모니터링은 백수 재이용 공정의 운전 상태를 판단하고 제어하기 위한 기본 수단이다. 공정에서는 pH, 전도도, COD, 탁도, 온도, DO, SS 등을 지속적으로 측정하여 수계의 변화 경향을 확인한다. 측정값이 관리 범위를 벗어나거나 단기간에 급격히 변할 경우에는 부분 배출 비율, 청수 보충량, 첨가제 투입량, 세정 주기 및 순환 유량 등을 조정한다. 특히 백수계의 안정성은 단일 수질 지표만으로 판단하기 어렵기 때문에, 여러 지표의 변화 방향을 함께 해석하는 것이 중요하다. 예를 들어 전도도 상승은 이온 축적을, COD 상승은 유기물 부하 증가를, 탁도 및 SS 증가는 미세입자 순환량 증가를 나타내는 지표이다.

### 3) 점착물 및 슬라임 관리

점착물과 슬라임 관리는 백수 재이용 공정에서 설비 오염과 제품 결점을 줄이기 위한 중요한 운전 관리 항목이다. 점착물 문제는 수지, 라텍스, 접착성 고분자 및 일부 DCS 성분의 불안정화와 관련되며, 슬라임 문제는 유기물 부하, 온도, DO, 체류시간 및 미생물 제어 조건과 관련된다.

이를 억제하기 위해서는 백수 수질 관리와 함께 슬라임 방지제의 적절한 사용, 배관·탱크·펠트의 세정, 체류시간 관리, 오염 발생 구간의 점검이 필요하다. 또한 점착물과 슬라임은 발생 원인이 서로 다를 수 있으므로, COD나 탁도와 같은 일반 지표만으로 판단하기보다 DCS 축적, 설비 오염 위치, 미생물 활성, 세정 상태를 함께 검토하는 것이 바람직하다.

## (4) 공정 운전과 백수 수질 지표

앞 절에서 설명한 수질 지표의 정의를 바탕으로, 여기서는 각 지표를 공정 조건, 원료 조성, 첨가제 투입 상태 및 회수 설비의 운전 상태와 연계하여 해석하는 방법을 살펴본다. 같은 전도도나 COD 값이라도 지종, 충전물 사용량, 수계 폐쇄도, 청수 보충량에 따라 의미가 달라질 수 있기 때문이다. 따라서 공정 운전에서는 각 지표의 절대값뿐 아니라 변화 방향, 변화 속도, 다른 지표와의 관계를 함께 검토하는 것이 중요하다.

대표적인 백수 수질 지표는 물리적 수질 지표와 화학적 수질 지표로 나누어 살펴볼 수 있다. 물리적 수질 지표에는 탁도, 온도, 점도, 부유고형물(SS)이 포함되며, 화학적 수질 지표에는 pH와 알칼리도, 전도도, COD, 무기이온, 유기물 및 DCS가 포함된다.

### 1) 물리적 수질 지표

백수의 물리적 수질 지표는 미세입자의 분산 상태, 고형분 순환 정도, 열적 조건 및 유동 특성을 나타내며, 탈수, 보류, 지합 및 회수 설비의 운전 상태와 함께 해석할 필요가 있다.

### 가. 탁도 (Turbidity)

탁도가 높아지면 보류되지 못한 고형분의 순환량이 증가했거나, 미세입자와 미세섬유가 수계 내에 과도하게 분산되어 있음을 의미한다. 이러한 경우 와이어 구간의 탈수 조건이 불안정해지고, 미세입자의 거동 변화가 지합 불균일이나 고형분 손실 증가로 이어진다. 반대로 동일한 운전조건에서 탁도가 급격히 낮아질 경우에는 입자의 과도한 응집 가능성도 함께 검토할 필요가 있다. 따라서 탁도는 단순히 백수의 맑고 흐림을 나타내는 지표라기보다, 현재의 초지 조건에서 입자 분산과 응집의 균형이 적절한지를 판단하는 운전 지표이다.

또한 탁도 변화는 원료 배합의 변동, 보류제·응집제의 투입 상태, 세이브올 등 백수 회수·여과 계통의 운전 변화와도 연결되어 나타날 수 있다. 특히 탁도가 단시간에 크게 변하면 백수계의 균형이 흔들리고 있다는 신호일 수 있으므로, 공정에서는 탁도의 절대값뿐 아니라 변화 방향과 지속성, SS, 보류율, 세이브올 운전 상태 및 지합 변화를 함께 해석해야 한다.

### 나. 온도

백수의 온도는 초지공정의 유동성, 탈수 조건, 그리고 첨가제의 반응 상태와 관련되는 운전 변수로 볼 수 있다. 온도가 상승하면 공정수의 점도가 낮아져 유동성과 탈수 조건이 달라질 수 있으며, 반대로 온도가 낮아지면 응집 및 보류 반응이나 탈수 거동이 다소 둔화될 수 있다. 또한, 온도 변화는 백수계의 오염 경향과도 어느 정도 연결되어 있다. 온도가 지나치게 높아지면 점착물(stickies)이나 수지(resin) 성분의 거동이 달라져 펠트나 롤 표면의 오염 가능성이 커질 수 있고, 반대로 온도가 낮아지면 시트 형성이나 탈수 조건이 불안정해질 가능성도 있다. 다만 이러한 변화 현상은 온도만으로 결정되기보다 수질 상태, 첨가제 조건, 체류시간, 설비 상태와 함께 나타나는 경우가 많으므로, 실제 운전에서는 다른 인자와 함께 해석할 필요가 있다.

백수의 온도는 지종과 공정 조건에 따라 달라질 수 있으나, 일반적으로는 약 40~60 ℃ 범위에서 관리되는 경우가 많다. 다만 중요한 것은 특정 수치를 일률적으로 유지하는 것보다, 온도 변화가 점도, 탈수, 보류 반응 및 오염 경향에 어떤 영향을 줄 수 있는지를 함께 살피는 일이다.

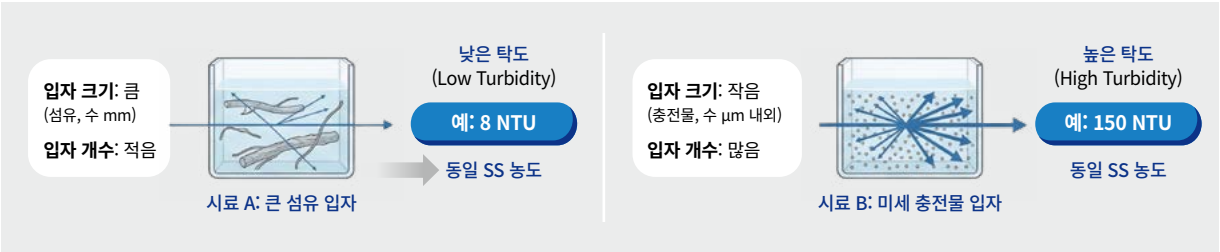
### 다. 점도 (Viscosity)

백수의 점도는 공정수의 유동성과 관련되는 물리적 특성이지만, 일반적인 제지공정 조건에서는 이를 독립적인 관리 항목으로 보기보다 온도와 고분자 첨가제 상태에 따라 함께 변하는 특성으로 이해하는 것이 적절하다. 온도가 낮아지거나 전분, 라텍스, 보류제와 같은 고분자 성분의 농도가 높아지면 점도가 증가하여 유동성이 저하될 수 있으며, 이러한 변화는 초지부의 탈수나 섬유 분산 상태에 영향을 준다. 반대로 점도 변화가 크지 않은 조건에서는 점도 자체보다 온도, 첨가제 투입 상태, 혼합 및 희석 조건이 공정 거동에 더 직접적으로 작용하는 경우가 많다. 따라서 점도는 공정의 품질을 직접 결정하는 지표라기보다, 온도와 첨가제 조건의 변화를 간접적으로 보여주는 보조적 운전 지표이다.

### 라. 부유고형물 (Suspended Solids, SS)

백수 내 부유고형물(SS)은 초지공정에서 회수되지 않고 백수 중에 존재하는 섬유 미세분, 미세 충전물, 그 밖의 부유성 고형분의 총량을 나타내는 항목이다. 따라서 SS는 백수계에 존재하는 고형분의 질량 농도를 파악하는 기본적인 지표로 이해할 수 있다. 공정 운전 측면에서 SS가 증가하면 보류되지 못한 고형분의 순환량이 많아지고 있음을 의미하며, 이에 따라 회수 계통의 부담이 커지고 초지부의 탈수 조건에도 영향을 주게 된다. 또한 이러한 변화는 고형분 손실 증가와 연결될 수 있으므로, SS는 백수계의 회수 상태와 고형분 관리 수준을 파악하는 데 참고가 되는 항목이다. 따라서 SS는 수치의 높고 낮음만으로 단순히 판단하기보다, 탁도 변화, 보류 조건, 회수 계통의 운전 상태와 함께 해석할 필요가 있다. 일반적으로 SS와 탁도를 함께 비교하면 백수 내 부유고형물의 양뿐 아니라 그 성격도 어느 정도 추정할 수 있다. 예를 들어 SS 증가와 함께 탁도도 크게 상승하면 미세 충전물이나 콜로이드성 입자의 영향이 상대적으로 클 수 있고, SS는 증가하였으나 탁도 변화가 상대적으로 크지 않다면 섬유성 물질이나 미세섬유의 비중이 큰 상태로 해석할 수 있다(그림 08-03). 다만 이러한 판단은 입자의 크기와 분산 상태, 보류 조건, 회수 계통의 운전 상태 등에 따라 달라질 수 있으므로, 실제 공정에서는 개별 수치 자체보다 변화 경향과 다른 수질 지표와의 관계를 함께 살펴보는 것이 바람직하다.

그림 08-03. 동일한 부유고형물(SS) 농도에서 입자 크기에 따른 탁도 차이




## 2) 화학적 수질 지표

백수의 화학적 수질 지표는 공정수의 이온 상태와 화학적 균형을 나타내며, 첨가제 반응, 보류제 작용, 미생물 활성, 설비 오염 및 부식 경향과 함께 해석할 필요가 있다.

### 가. pH와 알칼리도(alkalinity)

백수의 pH는 습부에서 형성되는 화학적 조건과 연동되어 나타난다. 실제 공정에서는 지료 조성, 첨가제 주입 조건, 회수수의 축적 정도, 그리고 청수 유입에 따른 희석 상태 등에 따라 pH가 달라질 수 있으며, 이러한 변화는 보류제나 사이즈제와 같은 첨가제의 작용에도 영향을 미친다. pH 변화에는 백수 내 $CO_2$의 용해도와 이에 따른 탄산/중탄산 평형 변화도 영향을 미친다.

반면 알칼리도는 이러한 pH 변동을 완충하는 능력과 관련된 항목이다. 따라서 공정에서는 pH의 절대값만 따로 보기보다, 알칼리도와 함께 변화 경향을 살피면서 수계의 화학적 균형이 안정적으로 유지되고 있는지를 판단하는 것이 바람직하다.

### 나. 전도도 (Conductivity)

전도도는 백수 내 용존 이온의 축적 정도와 수계 폐쇄도 변화를 빠르게 보여주는 지표이다. 전도도가 상승하면 청수 보충량 감소, 회수수 유입 증가, 약품 유래 염류 축적, $Ca^{2+}$·$Na^{+}$·$Cl^{-}$ 등 무기이온 증가를 검토해야 한다.

전도도 상승은 수계의 이온강도와 전하 환경을 변화시켜 보류제와 응집제의 작용 조건에 영향을 줄 수 있다. 따라서 전도도는 pH, 경도, $Ca^{2+}$, $Cl^{-}$, 보류율 변화와 함께 해석하는 것이 바람직하다.

### 다. 화학적 산소요구량 (COD)

백수가 공정 내에서 반복적으로 순환하면 용존 유기물이 점차 축적되므로, COD의 변화는 수계 내 유기물 축적 정도를 간접적으로 보여주는 지표로 활용된다. 공정 운전 측면에서 COD가 높아진다는 것은 일반적으로 유기물 부하가 커지고 있음을 뜻하며, 이러한 조건은 미생물 활성과 슬라임 발생 가능성과도 관련된다. 또한 유기물 축적이 심해지면 설비 표면 오염이나 생물학적 오염과 같은 문제로 이어질 가능성도 증가한다.

다만 COD가 높다고 해서 곧바로 점착물(stickies) 문제가 발생한다고 판단해서는 안 된다. 점착물 문제는 COD 자체보다 용존 및 콜로이드성 물질(DCS), 수지, 라텍스와 같은 점착성 유기 성분의 축적 및 불안정화와 더 직접적으로 관련되는 경우가 많다. 따라서 COD는 DO, 온도, 체류시간, 슬라임 발생 여부 및 DCS 관련 지표와 함께 해석하는 것이 바람직하다.

### 라. 무기이온 (Inorganic Ions)

백수 내 무기이온은 수계의 화학적 균형과 첨가제의 작용 조건에 영향을 준다. 공정 운전에서는 개별 이온을 모두 같은 비중으로 보기보다, 어떤 이온이 축적되고 있으며 그것이 수계 안정성에 어떤 변화를 가져오는지를 함께 해석하는 것이 중요하다.

이 가운데 칼슘($Ca^{2+}$)은 운전상 주의가 필요한 이온이다. 칼슘은 충전물이나 공정수에 유래하는 경우가 많으며, 조건에 따라 황산이온($SO_4^{2-}$) 또는 탄산계 이온과 결합하여 침전물이나 스케일을 형성한다. 반면 마그네슘($Mg^{2+}$)은 유사한 성격을 가지지만, 일반적으로는 칼슘에 비해 침전 문제의 비중이 상대적으로 크지 않은 편이다. 나트륨($Na^{+}$), 칼륨($K^{+}$), 염화이온($Cl^{-}$)과 같은 염류 성분은 주로 용해된 상태로 순환하면서 점차 축적될 수 있으며, 이러한 변화는 전도도 상승과 함께 수계의 이온 환경 변화를 나타낼 수 있다. 또한 염화이온은 농도가 높아질 경우 금속 설비의 국부 부식이 증가할 수 있으므로 주의가 필요하다.

### 마. 유기물 및 DCS (Dissolved and Colloidal Substances)

DCS가 증가하면 양이온성 보류제나 응집제의 요구량이 증가하거나, 보류 효율과 첨가제 반응 안정성이 저하될 수 있다.

운전 중 DCS 문제를 의심할 때에는 보류율 저하, 탁도 변화, 양이온 요구량, 점

착물 발생 위치, 슬라임 발생 여부를 함께 확인하는 것이 바람직하다.

이와 같이 백수 수질 지표는 단독으로 해석하기보다 서로 연결하여 판단해야 한다. 예를 들어 탁도와 SS가 함께 증가하면 미세입자 순환량 증가나 회수 설비의 부하 증가를 의심할 수 있고, 전도도와 COD가 동시에 상승하면 수계 폐쇄도 증가와 용존 성분 축적을 검토해야 한다. 또한 COD가 높다고 해서 곧바로 점착물 문제가 발생한다고 판단하기보다는 DCS, 수지 성분, 라텍스, 설비 오염 위치 등을 함께 확인해야 한다. 따라서 백수 수질 관리는 개별 수치의 관리가 아니라, 여러 지표의 변화 방향을 종합하여 공정 상태를 판단하는 과정으로 이해하는 것이 적절하다.

## 4. 백수 처리 및 회수 시스템

### (1) 세이브올(save-all)과 백수 회수 시스템

세이브올은 제지공정에서 발생한 백수로부터 미세섬유와 충전물 등의 고형분을 회수하고, 회수된 물을 다시 공정에 사용할 수 있도록 하는 대표적인 백수 처리·회수 설비이다[7, 13]. 초지공정에서 발생한 백수에는 미세섬유와 충전물 등의 고형분이 포함되어 있으며, 이러한 성분이 적절히 회수되지 않으면 회수수의 수질이 불안정해지고 후속 운전에도 부담이 커질 수 있다. 세이브올은 이러한 고형분을 분리하여 회수하고, 여과수(filtered water)를 생산함으로써 백수 회수 시스템의 효율을 높이는 역할을 한다. 세이브올에서 생산된 여과수는 수질 조건에 따라 공정용수로 재사용될 수 있으므로, 세이브올의 운전 상태는 청수 사용량과 공정수 수질에 함께 영향을 준다.

현재 제지공정에서는 디스크 필터형 세이브올이 널리 사용되고 있으나, 세이브올의 의미는 특정 장치 형식 자체보다 백수 중 고형분을 회수하고 회수수를 공정 내에서 재이용 가능하게 하는 기능에 있다. 또한 공정 조건에 따라 세이브올은 다른 보조 장치와 함께 운전되기도 하며, 이러한 조합은 백수 회수 효율과 공정수 재이용성을 높이는 데 도움이 된다.

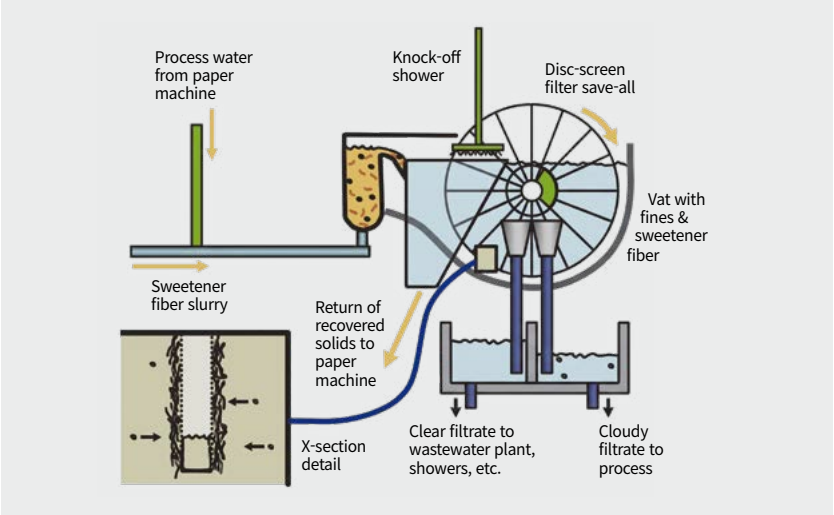
### (2) 세이브올의 구조와 작동 원리

디스크 필터는 일반적으로 여러 개의 원판형 필터 섹터가 중앙 축을 중심으로 배열된 구조로 이루어져 있으며, 필터의 일부가 백수 속에 잠긴 상태에서 회전한다(도표 08-06). 그림 08-04와 같은 디스크 필터형 세이브올에서는 스위트너 섬유(sweetener fiber)를 공급하여 필터 표면에 섬유 여과층을 형성하고, 이 여과층을 이용하여 백수 중의 미세섬유와 충전물을 포집한다. 여과수는 디스크 내부 유로를 통해 배출되며, 여과수는 장치의 구조와 운전조건에 따라 잔류 고형분 농도와 탁도를 기준으로 구분하여 회수할 수 있다.

**도표 08-06.** 디스크 필터형 세이브올의 주요 구성요소와 기능

| 구성요소 | 기능 | 비고 |
|---|---|---|
| 필터 섹터<br>(Filter sector) | 백수 여과 및<br>고형분 포집 | 폴리프로필렌·<br>스테인리스 재질 |
| 중앙 축<br>(Central shaft) | 여과수 흡입 및<br>배출 경로 | 내부에 진공 흡입라인 구성 |
| 고형분 박리장치<br>(Solids removal system) | 필터 표면의<br>섬유 케이크 박리 및 회수 | 박리 샤워<br>(knock-off shower) 등,<br>장치별로 상이 |
| 필터 세정장치<br>(Filter cleaning system) | 필터 세정 및<br>통수성 회복 | 세정 샤워 등,<br>장치 설계에 따라 상이 |
| 구동장치<br>(Drive unit) | 디스크 회전 제어 | 저속 회전 |

**그림 08-04.** 디스크 필터형 세이브올의 원리도 및 내부 구조




출처: Hubbe, M. A., Metts, J. R., Hermosilla, D., Blanco, M. A., Yerushalmi, L., Haghighat, F., Lindholm-Lehto, P., Khodaparast, Z., Kamali, M., & Elliott, A. (2016). Wastewater treatment and reclamation: A review of pulp and paper industry practices and opportunities. BioResources, 11(3), 7953–8091.

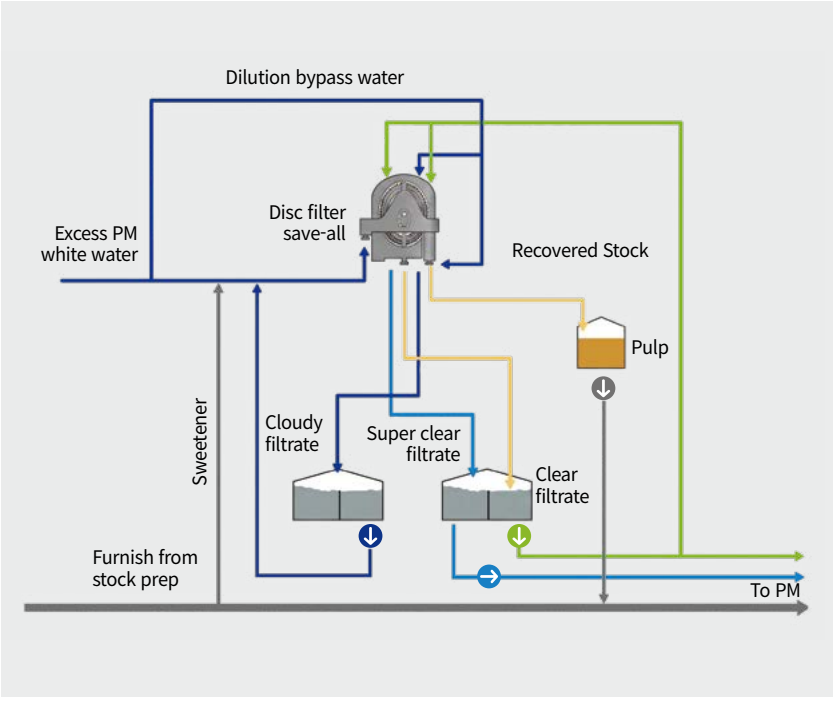
### 1) 여과층 형성 및 여과 단계

디스크의 필터 표면이 백수에 잠기면 내부에 형성된 진공에 의해 물이 필터를 통과한다. 이때 스위트너 섬유가 필터 표면에 먼저 섬유 매트를 형성하며, 이 여과층이 백수 중의 미세섬유와 충전물을 포집한다. 여과 효율은 스위트너 섬유의 공급량, 유입 백수의 고형분 농도, 진공도, 디스크의 회전속도 및 형성된 여과층의 상태 등에 영향을 받는다.

### 2) 고형분층 박리 및 회수 단계

디스크가 회전하여 백수면 밖으로 나오면 필터 표면에 형성된 고형분층이 추가로 탈수된다. 이후 형성된 섬유 케이크는 박리 샤워(knock-off shower) 등의 장치에 의해 필터 표면에서 제거되며, 회수된 고형분은 지료조성 공정으로 되돌려 재사용된다. 고형분층의 제거 방식은 장치의 설계에 따라 달라질 수 있다.

**그림 08-05.** 디스크 필터형 세이브올 시스템의 백수 회수 및 여과수 순환 공정도




출처: Valmet. (2021, May 4). White water opportunities for energy, fiber & water savings (webinar). Figure: Typical paper machine saveall arrangement.

### 3) 여과수 분리 및 재사용 단계

디스크를 통과한 여과수는 여과층의 형성 정도와 장치의 배출 구획에 따라 혼탁 여과수(cloudy filtrate), 청정 여과수(clear filtrate), 초청정 여과수(super-clear filtrate) 등으로 나누어 회수할 수 있다. 탁도가 높고 고형분이 비교적 많이 남아 있는 혼탁 여과수는 백수 계통으로 되돌리거나 공정 희석수로 다시 사용한다. 반면, 탁도와 부유물질 농도가 낮은 청정 여과수와 초청정 여과수는 수질이 적합한 경우 세척수, 샤워수 또는 기타 공정용수로 재사용할 수 있다(그림 08-05).

필터 표면에 쌓인 섬유와 고형분은 배출장치로 제거하며, 필터 매체는 세정 샤워나 별도의 세정장치를 이용하여 씻어 준다. 이러한 여과, 고형분 회수, 여과수 분리 및 필터 세정 과정은 디스크가 회전하는 동안 연속적으로 이루어진다. 실제 운전에서는 스위트너 섬유의 공급량, 압력차 또는 진공도, 디스크 회전속도, 회수 지료의 농도, 여과수의 탁도와 부유물질 농도(SS) 등을 함께 관리한다.

## (3) 기타 백수 회수 및 정화 시스템

세이브올은 제지공정에서 발생하는 백수로부터 고형분을 회수하고 여과수를 확보하는 데 중요한 역할을 한다. 그러나 실제 공정에서는 백수의 성상과 수계 조건에 따라 세이브올만으로 필요한 처리 효율을 충분히 확보하기 어려운 경우도 있으므로, 필요에 따라 추가적인 기계적 보조 장치가 함께 적용될 수 있다.

이러한 보조 시스템에는 부상분리 장치(DAF, dissolved air flotation)나 스크린(screen, 예: bow screen) 등이 있다. 이들 장치는 공정 조건에 따라 선택적으로 적용되며, 세이브올로 유입되는 부하를 줄이거나 회수수의 수질을 보다 안정적으로 유지하는 데 도움을 준다.

### 1) 스크린(Screen)

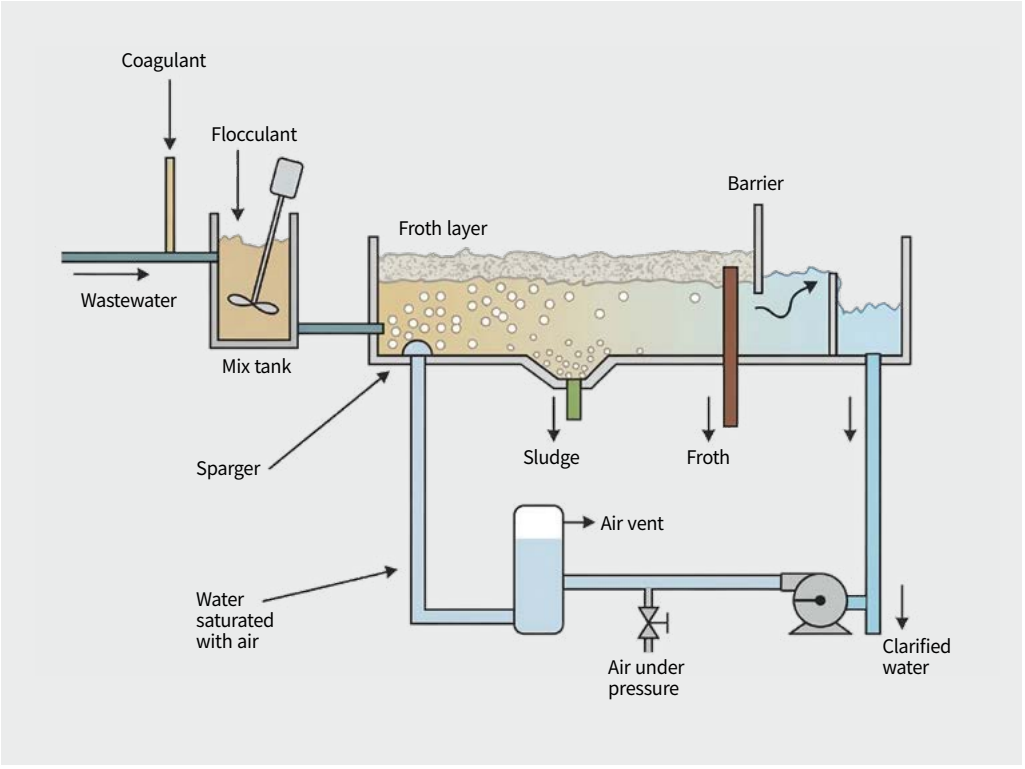
스크린은 백수 회수 계통에서 비교적 큰 입자, 섬유 다발, 이물질 등을 분리하거나 섬유를 회수하기 위해 사용될 수 있는 보조 장치이다. 원료 조성용 스크린과 달리, 백수 처리 계통의 스크린은 세이브올이나 후속 회수 장치의 운전에 부담을

줄 수 있는 성분을 줄이고, 경우에 따라 여과수의 수질을 보완하는 역할로 이해하는 것이 적절하다. 일부 공정에서는 백수 회수 계통의 특정 구간에 스크린이 설치되며, 스크린의 공극 크기에 따라 비교적 큰 입자는 포집되고 작은 입자는 통과한다. 이러한 장치는 섬유 다발이나 비교적 큰 이물질을 제거하거나, 백수 중의 섬유를 일부 회수하여 세이브올로 유입되는 부하를 줄이는 데 도움을 줄 수 있다. 또한 적용 조건에 따라서는 여과수의 수질을 보다 안정적으로 유지하는 데에도 활용될 수 있다.

### 2) 부상분리 장치 (DAF, Dissolved Air Flotation)

부상분리 장치는 미세기포를 이용하여 백수에 포함된 미세입자와 콜로이드성 물질을 분리하는 장치이다[14, 15]. 이 장치는 미세섬유, 충전물 미립자, 그리고 일부 유기성 성분을 제거하는 데 활용되며, 공정 조건에 따라 백수 처리의 보조 장

**그림 08-06.** 부상분리 장치(dissolved air flotation, DAF)의 모식도




출처: Hubbe, M. A., Metts, J. R., Hermosilla, D., Blanco, M. A., Yerushalmi, L., Haghighat, F., ... & Elliott, A. (2016).
Wastewater treatment and reclamation: A review of pulp and paper industry practices and opportunities. BioResources, 11(3), 7953-8091.

치로 적용되기도 한다. 부상분리 장치에서는 미세기포를 발생시켜 백수 중의 입자가 부착하도록 하고, 이를 부상시켜 제거한다(그림 08-06). 부상된 입자는 수면에 부유층을 형성하며, 이 부유층은 스크레이퍼에 의해 제거된다. 이러한 과정은 백수의 부유고형물(SS)과 탁도를 낮추는 데 도움을 줄 수 있다. 실제 운전에서는 공정 조건과 처리 목적에 따라 응집제나 플록 형성제를 함께 사용하는 경우가 있으며, 이를 통해 미세입자의 응집과 기포 부착이 쉬워져 분리 효율을 높일 수 있다. DAF는 제지공장의 폐수 처리 공정에서 널리 사용되지만, 일부 공정에서는 백수계의 수질 보완이나 회수수의 재이용성 향상을 위해 적용되기도 한다.

### (4) 제지공정 폐수 처리

제지공정에서는 백수의 상당 부분이 회수되어 재이용되지만, 모든 공정수가 내부 순환만으로 처리되는 것은 아니므로 별도의 폐수 처리 공정이 필요하다. 제지공정에서 발생하는 폐수에는 부유물질, 충전물, 용존 유기물, 그리고 일부 콜로이드성 성분이 포함될 수 있어, 방류 또는 재이용에 앞서 적절한 처리 과정을 거쳐야 한다.

제지공장의 폐수 처리에서는 일반적으로 1차 물리·화학적 처리와 2차 생물학적 처리가 조합되어 적용된다. 1차 처리에서는 응집제와 응집보조제를 이용하여 미세입자와 콜로이드성 물질을 응집시키고, 이어서 침전이나 부상분리 공정을 통해 고형분을 분리한다. 이 과정은 부유물질과 일부 유기물 부하를 줄여 후속 생물학적 처리의 부담을 낮추는 역할을 한다. 이후 생물학적 처리 공정에서는 미생물의 대사 작용을 이용하여 폐수 중의 용존 유기물을 분해한다. 제지공장의 폐수 처리에서 대표적으로 적용되는 방법은 활성슬러지법(activated sludge process, ASP)이며, 일반적으로 폭기조, 침전조, 슬러지 순환계로 구성된다. 이러한 처리 과정을 통해 유기물과 부유물질의 농도를 낮추어 방류 기준을 만족시키거나, 필요에 따라 추가 처리 후 재이용 가능한 수준으로 수질을 개선할 수 있다.

#### 1) 화학적 처리

화학적 처리는 폐수에 분산된 미세입자와 콜로이드성 물질을 응집·분리하기 위해 적용되는 공정이다. 제지공정 폐수 처리에서는 일반적으로 알루미늄계 또는 철계

무기 응집제가 사용되며, 대표적으로 황산알루미늄($Al_2(SO_4)_3$), 폴리염화알루미늄(PAC), 염화제이철($FeCl_3$) 등이 활용된다.
응집 단계 이후에는 고분자 플록 형성제(flocculant)를 함께 투입하여 더 큰 플록이 형성되도록 할 수 있다. 이때 폴리아크릴아미드(PAM) 계열 물질이 주로 사용된다. 형성된 플록은 이후 침전이나 부상분리 공정에서 보다 쉽게 제거될 수 있다. 이러한 화학적 처리는 폐수에 포함된 부유물질과 일부 콜로이드성 물질의 제거에 도움을 주며, 경우에 따라 일부 유기물 부하를 낮추는 데에도 기여할 수 있다.

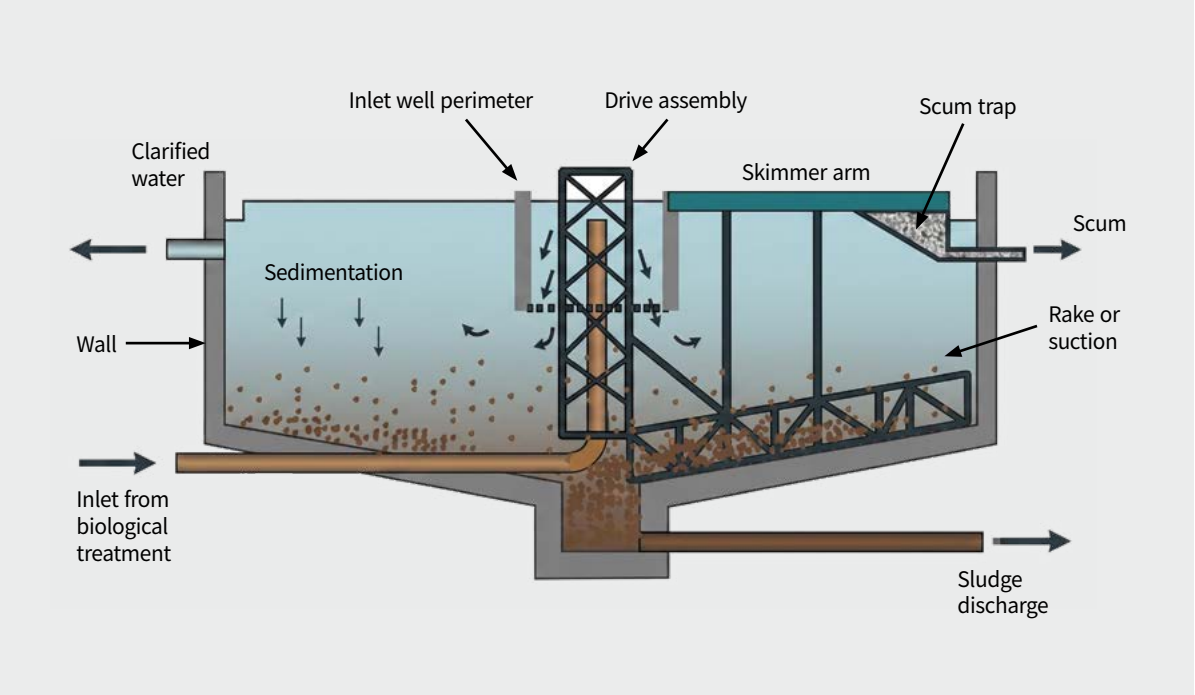
### 2) 생물학적 처리

화학적 처리를 거친 폐수에는 여전히 용존 유기물이 남아 있을 수 있으며, 이러한 성분은 생물학적 처리 공정에서 미생물의 대사 작용에 의해 저감된다. 제지공장의 폐수 처리에서 대표적으로 적용되는 방법은 활성슬러지법(Activated Sludge Process, ASP)이다[14, 16]. 이 공정은 일반적으로 폭기조, 침전조, 그리고 슬러지 순환계로 구성된다(그림 08-07).
폭기조에서는 공기를 공급하여 미생물이 유기물을 분해할 수 있는 호기성 조건을 유지한다. 이 과정에서 폐수 중의 용존 유기물은 미생물의 대사 작용에 의해 점차 저감된다. 이후 혼합액은 침전조로 이동하며, 여기서 미생물이 포함된 슬러지가 침전되어 처리수와 분리된다. 상등수는 다음 처리 단계로 보내지고, 침전된 슬러지의 일부는 다시 폭기조로 순환되어 미생물 농도를 유지한다. 나머지 과잉 슬러지는 별도로 처리된다. 활성슬러지 공정은 적절한 미생물 농도와 체류시간을 유지하도록 운전되며, 이를 통해 폐수 중의 용존 유기물을 저감한다.

### 3) 고도 처리

생물학적 처리를 거친 폐수에도 여전히 미세입자, 용존 유기물, 무기이온 등이 일부 남아 있을 수 있다. 이러한 잔류 성분을 추가로 제거하여 더 높은 수준의 처리수 수질을 확보하기 위해 막여과와 같은 고도 처리 기술이 적용되기도 한다[4, 14]. 다만 이러한 공정은 일반적인 제지공정보다는 재이용수의 수질 요구가 높거나 폐수 배출을 더욱 줄일 필요가 있는 경우에 선택적으로 적용된다.

그림 08-07. 폭기식 생물학적 처리 시스템의 침전조




출처: Hubbe, M. A., Metts, J. R., Hermosilla, D., Blanco, M. A., Yerushalmi, L., Haghighat, F., ... & Elliott, A. (2016). Wastewater treatment and reclamation: A review of pulp and paper industry practices and opportunities. BioResources, 11(3), 7953-8091.

막여과는 막의 분리 특성에 따라 미세여과(MF), 한외여과(UF), 나노여과(NF), 역삼투(RO) 등으로 구분된다. 일반적으로 미세여과(MF)는 부유물질과 비교적 큰 입자의 제거에, 한외여과(UF)는 콜로이드성 물질과 고분자 성분의 제거에 이용되며, NF와 RO는 용존 유기물과 무기이온을 더 높은 수준으로 저감하는 데 적용된다. 특히 RO는 처리수의 전도도를 낮출 수 있어, 고품질 공정용수의 확보가 필요한 경우에 적용되기도 한다. 그러나 막여과 공정은 막 오염 관리와 설비·운전 비용을 함께 고려할 필요가 있으므로, 공정 조건과 요구 수질에 따라 적용 여부가 결정된다.

## 참고문헌


[1] 이학래 외. (1996). 제지과학. 광일문화사.

[2] 조헌정 외. (1995). 펄프·제지공학. 선진문화사.

[3] Hubbe, M. A. (2007c). Water and papermaking. 3. Measures to Clean Up Process Water. Paper Technology, 48(3), 23-30.

[4] Herrera-Melián, J. A., & Ortega Méndez, J. A. (Eds.). (2018). Recent Advances in Water Management: Saving, Treatment and Reuse. MDPI.

[5] Paulapuro, H. (Ed.). (2000). Papermaking Science and Technology, Book 8: Papermaking Part 1: Stock Preparation and Wet End. Finnish Paper Engineers' Association. TAPPI Press.

[6] Hubbe, M. A. (2007a). Water and papermaking. 1. Fresh Water Components. Paper Technology, 48(1), 18-24.

[7] Smook, G. A. (2002). Handbook for Pulp & Paper Technologists (3rd ed.). Angus Wilde Publications, Vancouver.

[8] Hubbe, M. A. (2007b). Water and papermaking. 2. White water components. Paper Technology, 48(2), 31-40.

[9] Hubbe, M. A., Venditti, R. A., & Rojas, O. J. (2007). What happens to cellulosic fibers during papermaking and recycling? A review. BioResources, 2(4), 739-788.

[10] Pruszynski, P., Xu, L., & Hart, P. W. (2023). Water chemistry challenges in pulping and papermaking – fundamentals and practical insights: Part 2: Conductivity, charge, and hardness. TAPPI Journal, 22(6), 423-437.

[11] Thompson, G., Swain, J., Kay, M., & Forster, C. F. (2001). The treatment of pulp and paper mill effluent: a review. Bioresource Technology, 77(3), 275-286.

[12] Envirowise (ETBPP). (1998). Practical water management in paper and board mills (Good Practice Guide GG111). P2 InfoHouse.

[13] Biermann, C. J. (1996). Handbook of Pulping and Papermaking (2nd ed.). Academic Press, San Diego.

[14] Hubbe, M. A., Metts, J. R., Hermosilla, D., Blanco, M. A., Yerushalmi, L., Haghighat, F., Lindholm-Lehto, P., Khodaparast, Z., Kamali, M., and Elliott, A. (2016). Wastewater treatment and reclamation: A review of pulp and paper industry practices and opportunities. BioResources, 11(3), 7953-8091.

[15] Pokhrel, D., & Viraraghavan, T. (2004). Treatment of pulp and paper mill wastewater—a review. Science of the Total Environment, 333(1-3), 37-58.

[16] Metcalf & Eddy, Inc. (2014). Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery (5th ed.). McGraw-Hill Education, New York.



**성 용 주** 충남대학교 교수

**2024 – 2026** 한국펄프종이공학회 부회장
**2016 – 2024** 한국펄프종이공학회 학술지 편집위원장
**2014 – 2016** 충남대학교 연구부처장
**2009 – 현재** 충남대학교 환경소재공학과 교수

yosung17@cnu.ac.kr

# 9
# 압착부

현대적 압착탈수 설비 (사진제공_무림P&P)

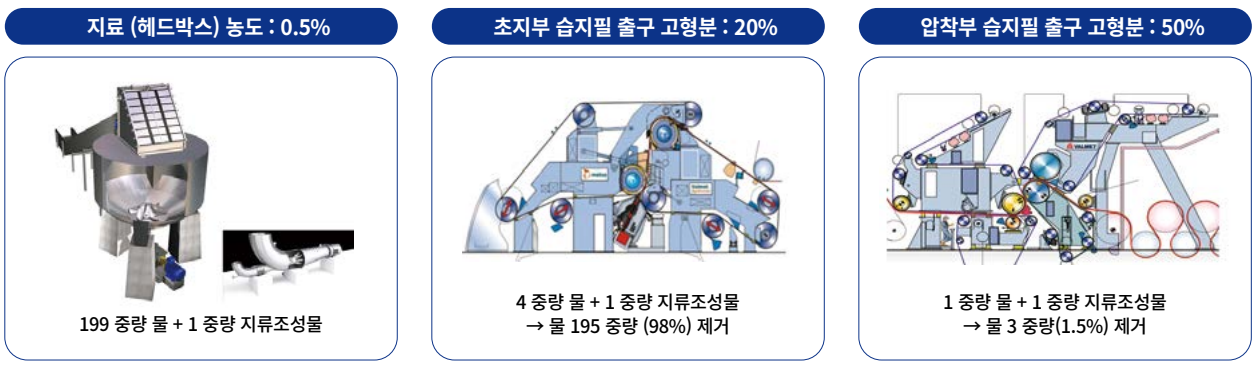
# 1. 압착부 개요

## (1) 압착부의 역할

종이는 펄프섬유를 물속에서 해리하여 지료를 형성하고, 이를 초지기의 헤드박스에서 균일한 시트상의 형태로 와이어 위에 사출, 탈수시켜 습지필을 형성시키고, 형성된 고수분의 습지필을 압착탈수부에서 기계적 압력을 가해 압착탈수하여 구조를 단단하게 형성하고, 이후 고온에서 건조함으로써 만들어진다.

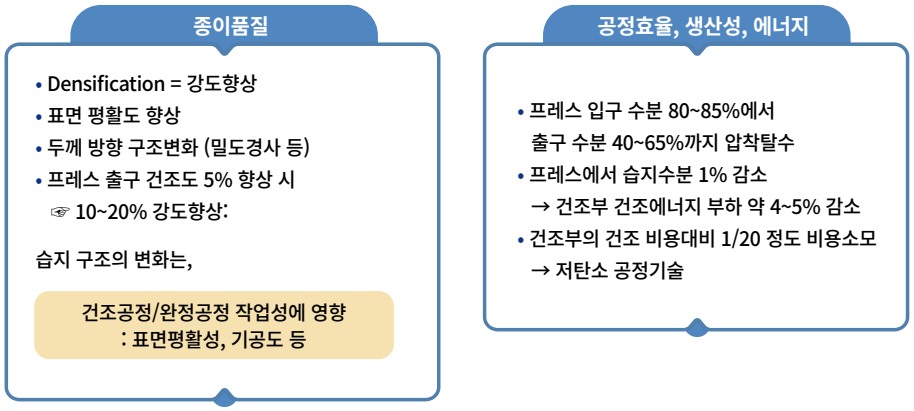
좀 더 자세하게 설명하면 제지공정에서는 우선 펄프 섬유를 물속에서 균일하게 풀어 종이 형태로 지층을 형성한다. 이 과정에서 매개체로 사용된 물을 다양한 방법으로 연속적으로 제거하게 된다. 초지공정에서 탈수된 물은 새로운 펄프 섬유를 해리하고 이송하는 매개체로 공정 내에서 계속 순환 사용된다. 일반적으로 제지공정 내에서 종이의 생산을 위해 사용되는 물의 98%는 초지부의 지층형성과정 중 탈수분리되어 초지부 내에서 순환 사용된다. 나머지 2%의 물은 압착부로 이송된 습지필에 포함되어 있으며, 이는 압착부와 건조부에서 제거된다. 압착부에서는 이송된 습지필 수분의 약 75%, 즉 전체 수분량의 약 1.5%가 기계적 압착에 의해 분리·제거된다. 압착부에서는 더 이상의 물을 제거하기 어려운데 이는 종이를 구성하는 펄프 섬유가 친수성의 셀룰로오스가 주성분이므로 기계적 압착으로는 수분으로 팽윤된 펄프 섬유로 구성된 습지필의 고형분을 50% 이상으로 올리기 어렵기 때문이다. 압착부 이후 남아있는 지필 내 수분은 건조공정에서 제거되어 종이가 제조된다.

**그림 09-01.** 현대식 제지공정에서 각 초지부, 압착부, 건조부에서 초지기로 투입된 지료의 물이 제거되는 정도와 그에 따른 지료의 고형분 변화



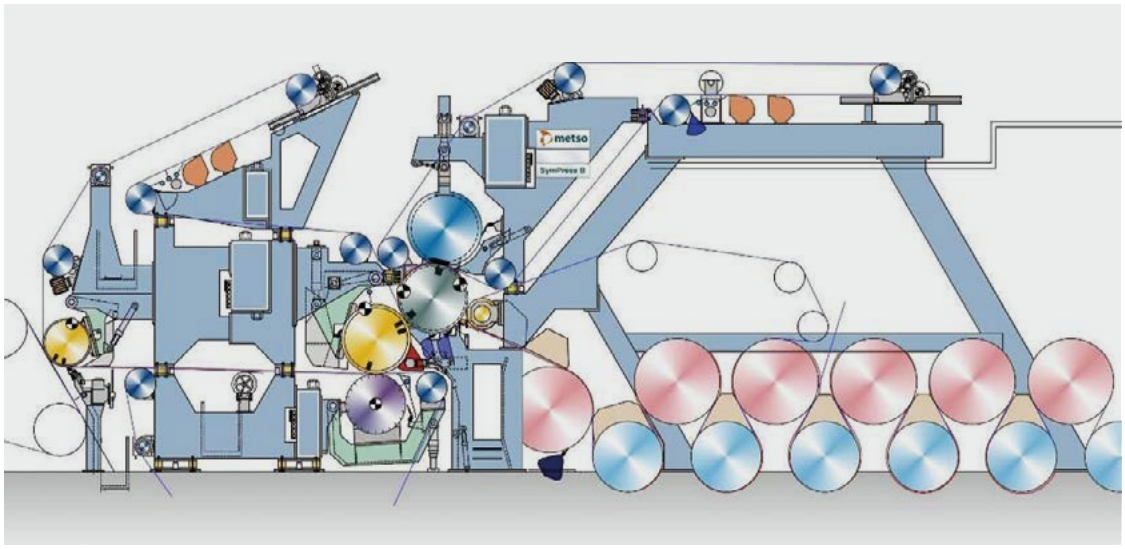

출처: Valmet 기술자료

그림 09-02. 제지공정에서 압착부의 역할




제지공정에서 물이 제거되는 양을 수치적으로 이해하면 다음과 같다. 그림 09-01에서 보는 바와 같이 현대식 제지공장에서 초지기 헤드박스로 투입되는 지료 농도가 0.5%라고 가정하면, 여기에는 199 중량비의 물과 1 중량비의 지료 조성분(펄프 섬유 등)이 혼합되어 있는 상태이다. 초지기의 지층형성부에서 탈수, 성형되는 과정에서 지료 조성분의 보류가 100%이고, 압착부로 이송되는 습지필의 고형분이 20% (함수율 80%)라고 가정하면, 습지필은 지료 조성분 1 중량비와 물이 4 중량비로 구성되어 있다. 이는 초지부에서 지층 형성 중 헤드박스에서 사출된 195 중량비의 물이 초지부에서 탈수된 결과이다. 즉 헤드박스에서 지층의 형성을 위해 투입되는 지료의 98%가 초지부 탈수과정에서 제거되고, 나머지 1.5%가 압착부에서 제거된다. 즉, 전체 200 중량비의 지료에서 3 중량비의 물이 압착부에서 제거된다. 압착부는 초지부의 지층형성 과정을 통해 성형된 습지필을 강한 기계적 압착력으로 누름으로써 습지필의 수분을 제거함과 동시에, 개별 섬유들을 밀착시켜 습지필의 밀도를 크게 증가시키고, 표면평활도를 개선하며, 종이의 3차원적 구조를 형성시키는 역할을 한다. 특히, 습지필의 수분을 기계적인 압착력으로 제거하는 것은 열에너지를 활용하는 건조공정보다 상대적으로 에너지 비용이 크게 낮다. 따라서 압착부에서의 효과적인 탈수는 이후 건조부에서 요구되는 열에너지 부담을 크게 낮추는 역할을 한다. 또한, 종이의 강도와 구조적 특성도 압착부의 압력, 압착 속도 등의 공정조건에 의해 큰 영향을 받는다. 따라서 압착부는 단순한 수분 제거 단계를 넘어, 제지공정 전반의 효율뿐 아니라 최종 지류 제품의 구조와 품질에도 매우 큰 영향을 미치는 중요한 공정이다(그림 09-02)[1].

그림 09-03. 압착부 설비 모식도 (Three-nip press section with a shoe press)




출처: Valmet 기술자료

### (2) 압착부 공정개요

압착부는 초지부에서 성형되어 이송되는 습지필을 픽업하여 프레스 펠트와 함께 연속적으로 프레스 롤을 통과시키며 습지필을 기계적으로 압착하여 습지필의 수분을 탈수시키고, 동시에 구조적 변화를 가져오는 공정이다. 이러한 압착부는 기본적으로 크게 프레스 펠트와 프레스 롤로 구성된다(그림 09-03).

## 2. 압착부 공정 원리

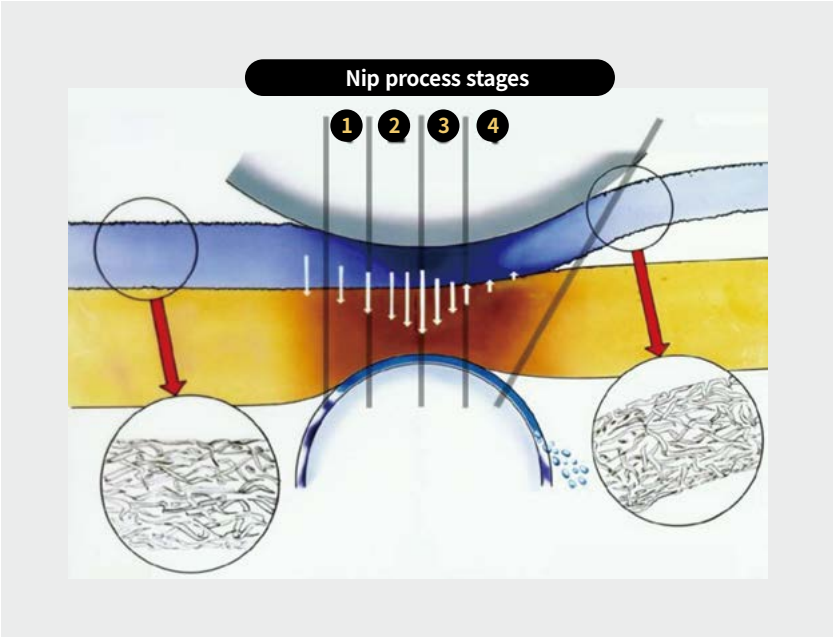
### (1) 프레스 닙

압착부에서 연속적인 습지필의 압착탈수를 위하여 초지 속도와 같은 속도로 회전하는 프레스 롤 사이로 습지필을 통과시킨다. 이때 롤과 롤의 사이에서 실제로 습지필에 대한 압착이 발생되는 부분을 프레스 닙(press nip)이라 한다. 프레스 닙에서는 매우 높은 압력이 발생하게 되는데, 이 압력에 의해 습지필이 손상 또는 파괴되는 것을 방지하고, 동시에 탈수 효율을 높이기 위해 다공성의 완충특성이 있는 프레스 펠트로 습지필을 지지하면서 압착하는 방식이 일반적으로 적용되고

있다. 프레스 닙에서의 압착에 의해 습지필에서 압착탈수된 물은 두 가지 경로로 제거된다. 즉 프레스 닙 외부로 직접 배출되는 방식이나, 프레스 펠트가 흡수하여 제거하는 방식으로 탈수가 이루어진다.

통상적인 프레스 닙의 구조와 프레스 닙에서 이루어지는 압착현상은 그림 09-04에 나타내었다. 프레스 닙에 습지필이 진입하면 두 롤 사이에서 압력을 받게 되며, 이로 인해 습지필 구조가 압축되면서 탈수가 시작된다. 습지필이 닙 중앙에 도달할수록 두 롤이 가까워지므로 압력이 증가된다. 닙 중앙 이후에는 롤 사이의 거리가 증가함에 따라 압력이 해소되고, 습지필 두께는 부분적으로 다시 증가된다. 이때 습지필에서 빠져나갔던 일부 수분이 재흡수되는 리웨팅(rewetting) 현상이 발생된다. 프레스 닙 이후 재팽창된 습지필의 두께는 압착 전에 비해 여전히 작기 때문에, 압착 후 습지필의 밀도가 증가된다. 압착 탈수된 물이 모두 리웨팅에 의해 재흡수되지는 않지만, 리웨팅에 의한 물의 재흡수를 최소화하는 것은 압착효율을 높이기 위해 꼭 필요하다. 이를 위해서는 습지필이 프레스 롤을 벗어난 직후, 습지필을 수분을 저장하고 있는 프레스 펠트로부터 가능한 신속하게 분리하는 것이 중요하다.

**그림 09-04.** 압착부 프레스 닙의 구조와 탈수




출처: Leiviskä, K. (2011).
Enhancement of Water Removal in the Press Section.Master's Thesis, Lap peenranta University of Technology, Finland.

### (2) 압착탈수기작

압착탈수부의 프레스 닙에서 습지필에 가해지는 기계적 압력은 이에 대응하는 두 가지 반발력과 평형을 이루며 작용한다. 이 두 가지 힘은 다음과 같다. 첫째, 물을 제외한 지필 조성분, 즉 섬유 네트워크가 가지는 탄성에 의해 발생하는 구조적 반발력, 둘째, 습지필 내에 존재하는 물에 의해 발생하는 수력학적 반발력이다. 습지필에 가해지는 기계적 압력은 이들 두 힘의 합과 평형을 이룬다. 기계적 압력과 반발력의 평형이 이루어지지 않으면, 두 롤은 평형이 이루어질 때까지 더 가깝게 접근하거나 더 멀어지는 변화가 발생하여 평형을 이룬다. Wahlstrom은 이러한 압력-반발력 상호작용을 기반으로 프레스 닙 탈수 과정을 4단계로 구분하여 설명한 바 있다(그림 09-05).

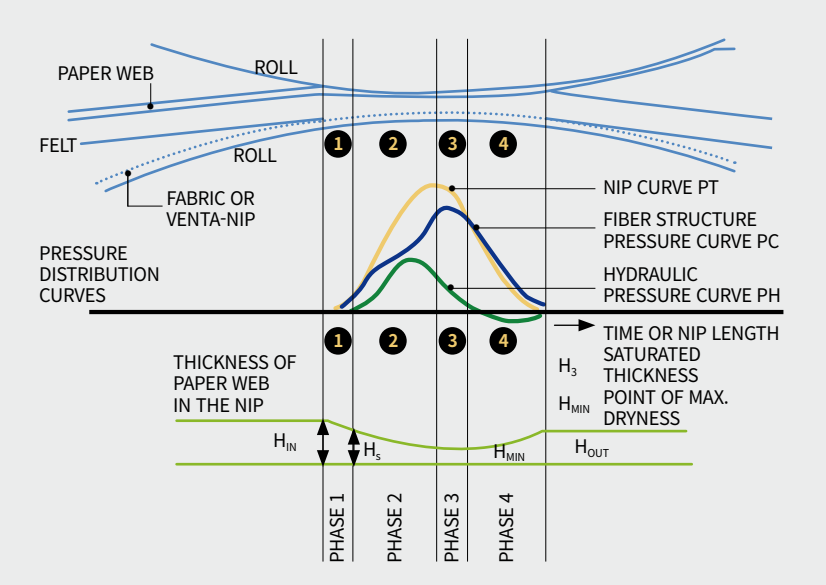
전반적으로 프레스 닙 내 전체 압력 곡선(pressure profile)은 닙 중앙에서 최고치를 보이며, 닙의 양쪽 끝으로 갈수록 점차 감소하는 종 모양(bell shape)을 나타낸다. 이 압력 곡선은 습지필 내부에서 발생하는 구조적 반발력과 수력학적 반발력의 합과 같은 평형 상태에서 압착 탈수가 이루어진다.

먼저 1단계는 프레스 닙으로 유입된 습지필이 압축되기 시작하면서, 지필이 압축되어 습지필 내의 공극이 물로 포수될 때까지를 말한다. 이 단계에서는 지필 내에 잔존하던 공기가 습지필의 압축과 함께 모두 제거될 때까지이므로 수력학적 반발력은 발생하지 않는다. 따라서 프레스 닙에서 가해지는 전체 압력은 구조적 반발력과 평형을 이루고 있다.

2단계에서는 지필의 압착이 지속되면서 지필 내에 잔류하던 물이 압력에 의해 탈수되기 시작한다. 이와 함께 수력학적 압력(반발력)이 증가하여 닙 중앙부 이전에 최고점에 달한 후 다시 감소된다. 수력학적 압력이 닙의 중앙부보다 앞단에서 발생하는 현상, 그리고 닙의 출구에서 음압이 발생하는 현상은 유체역학적으로 증명할 수 있으나 여기에서는 생략한다. 유체역학적 분석에 의하면 롤 닙에서 발생하는 수력학적 압력 변화는 그림 09-05의 형태로 나타난다. 습지필에 의한 구조적 반발력은 이론적으로 구할 수 없으므로, 닙에서 발생하는 전체 압력곡선에서 수력학적 압력을 제하여 구조적 반발력을 구한다. 그림 09-05의 구조적 반발력은 이와 같은 방식으로 구하여 도시한 것이다.

3단계는 닙 중앙에서부터 수력학적 압력이 음압으로 변하기 직전까지의 구간, 즉 수력학적 반발력이 0에 도달하는 지점까지를 말한다. 즉 이 단계는 전체 압력이

그림 09-05. 압착부 프레스 닙에서 습지구조 변화와 탈수 기작




출처: TAPPI Journal, Wahlstrom's Theory

최고치를 보인 지점부터 지속적으로 감소하여 결과적으로 구조적 반발력과 같아지는 지점까지를 말한다. 3단계가 종료되는 지점에서는 전체 압력과 구조적 반발력이 같기 때문에, 지필 내의 물은 더 이상 반발력을 나타내지 않는 상태이다. 이 3단계의 종점에서 습지필의 밀도가 가장 높고, 함수율은 가장 낮은 상태가 된다. 4단계는 구조적 반발력이 전체 압력보다 큰 상태가 유지되는 구간, 혹은 지필 내 수압이 닙의 확장으로 인해 음압을 나타내는 구간이다. 이 단계에서는 닙의 간격이 벌어짐에 따라 기계적 압력은 감소하지만, 습지필의 구조압이 전체 압력보다 크기 때문에 수력학적 반발력은 음의 값을 가지게 된다. 즉 지필의 팽창이 발생하면서 탈수되었던 물이 다시 지필로 흡수되는 리웨팅 현상이 발생하게 된다.

## 3. 압착부 구성요소 및 공정영향인자

### (1) 압착부 구성요소

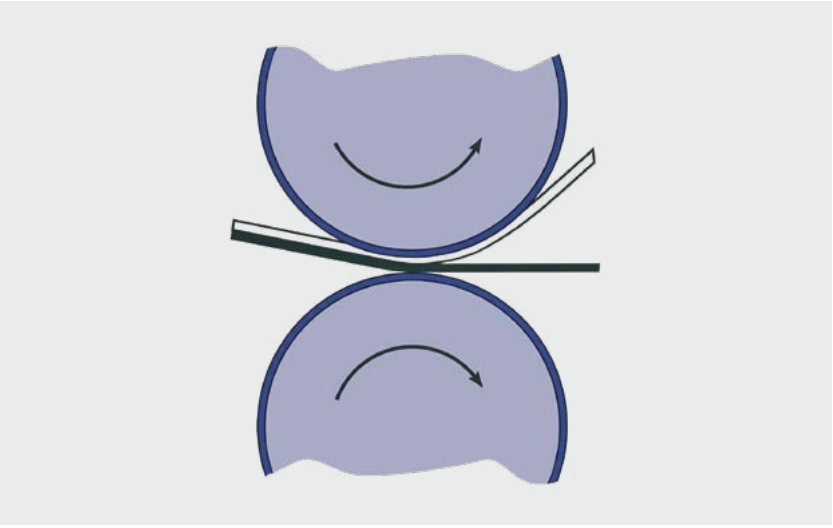
압착부는 습지필의 기계적 압착탈수가 이루어지는 구간으로, 상·하부에 배치된 두 개의 프레스 롤과 펠트로 구성된다(그림 09-06). 프레스 롤은 습지필에 선압

(linear pressure)을 가하여 수분을 제거하는 역할을 하며, 펠트는 습지필을 지지·보호하는 동시에 압착 과정에서 배출된 수분을 흡수하여 외부로 이송한다. 압착부의 공정 특성은 프레스 롤의 종류 및 특성, 펠트의 구조적·물리적 특성, 그리고 프레스 닙의 배열과 구조에 의해 크게 영향을 받는다. 프레스 롤의 재질, 경도, 직경 및 표면 특성은 닙 압력과 탈수 효율을 결정하는 주요 인자이다. 또한 펠트의 두께, 공극률, 투수성 및 압축 탄성은 수분의 흡수와 배수 성능에 중요한 영향을 미친다.

### 1) 프레스 롤

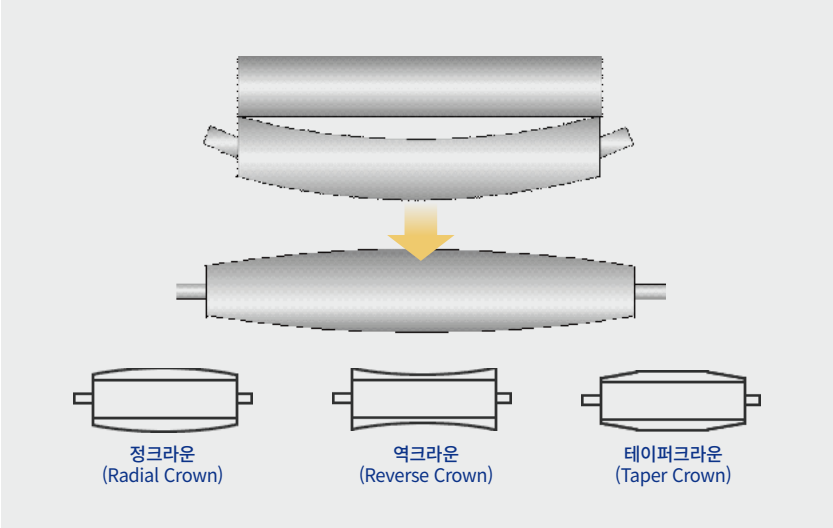
프레스 롤(압착 롤)은 재질에 따라 다양한 종류로 구분된다. 롤 표면 재질의 강성(stiffness)에 따라 프레스 닙의 폭은 현저한 차이를 보인다. 일반적으로 고무와 같이 탄성이 큰 연질 재질의 롤을 사용할 경우, 석재 등으로 제조된 경질 롤에 비해 더 넓은 닙이 형성된다. 프레스 롤에 작용하는 총압력은 압착 롤 자체의 자중(自重)과 양측 축에 가해지는 외부 가압력의 합으로 결정된다. 프레스 롤은 초지기 폭에 해당하는 길이를 가지며 중량이 크기 때문에, 운전 시 중력의 영향으로 중앙부가 하방으로 처지는 현상(deflection)이 발생한다. 이러한 처짐이 발생하면 롤 중앙부의 간극이 상대적으로 증가하여 습지필의 압착 정도가 중앙부에서 낮아질 수 있다. 그 결과, 압착된 지필에는 구조적 불균일과 두께 편차가 발생할

**그림 09-06.** 압착부 기본 구조



출처 : Page, D. H. (1989). Water removal in pressing. In Handbook of Pulp and Paper Terminology (pp. 222–236). TAPPI Press.

그림 09-07. 프레스 롤 크라운 가공 종류

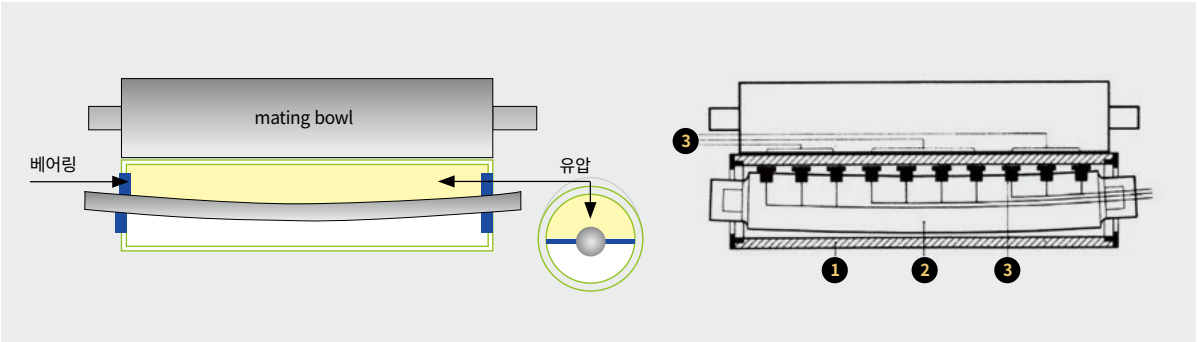



출처: Valmet 기술자료

수 있다. 이와 같은 중앙부 처짐을 보완하기 위하여, 프레스 롤은 중앙부의 직경을 상대적으로 크게 한 배흘림 형상으로 제작된다(그림 09-07). 이러한 가공 방식을 크라운 가공(crowning)이라 한다. 가장 일반적인 형태는 중앙부 직경을 증가시킨 정크라운 가공이다. 한편, 크라운의 형상과 크기는 프레스 롤의 폭, 운전 속도, 롤 재질, 적용 압력 등 다양한 공정 변수에 따라 달라진다. 따라서 실제 운전 조건을 고려하여 적절한 형태와 수치로 크라운 가공을 한다.

프레스의 운전 속도와 적용 압력은 생산 지종 및 초지 속도 등에 따라 가변적이다. 따라서 일정한 크라운 가공만으로는 프레스 닙 전폭에 걸쳐 균일한 압착을 확보하기 어렵다. 또한 조업 조건의 변화에 따라 크라운 형상이 서로 다른 롤로 교체하는 것은 현실적으로 곤란하다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 공정 조건에 따라 적절한 크라운을 제공할 수 있는 가변 크라운 롤(variable crown roll)이 개발되어 활용되고 있다. 가변 크라운 롤은 롤 내부에 설치된 유압 장치를 이용하여 위치별로 지지력을 조절함으로써 롤 표면의 형상을 제어할 수 있는 구조를 가진다(그림 09-08). 이와 같은 구조를 통하여 닙 간격의 미세한 변화를 실시간으로 보정할 수 있으며, 그 결과 프레스 닙 전폭에 걸쳐 보다 균일한 압착을 유지할 수 있다. 따라서 가변 크라운 롤은 조업 조건 변화에 신속하게 대응할 수 있고, 제품의 두께 및 구조적 균일성을 향상시키는 데 유리한 장점을 가진다.

그림 09-08. 프레스 롤 가변 크라운 모식도




출처: Valmet 기술자료

## 2) 프레스 펠트

프레스 펠트는 압착탈수 공정에서 기계적 강도가 낮아 쉽게 손상될 수 있는 습지필을 지지·보호하며, 프레스 닙에서 압착에 의해 배출된 수분을 흡수하는 기능을 수행한다. 따라서 펠트는 고속 운전 조건에서도 일정한 장력을 유지하면서 습지필을 안정적으로 지탱할 수 있도록 구조적으로 충분한 강도와 치수 안정성을 가져야 한다. 또한, 습지필 표면은 압력에 의해 쉽게 변형되므로, 표면 자국의 형성을 방지하기 위해 펠트는 부드러운 표면 특성을 갖추어야 한다. 아울러 습지필로부터 배출되는 수분을 효과적으로 흡수하기 위하여 충분한 공극 구조가 요구되며, 펠트로 전이된 수분이 신속하게 제거될 수 있도록 우수한 투과성 또한 필요하다.

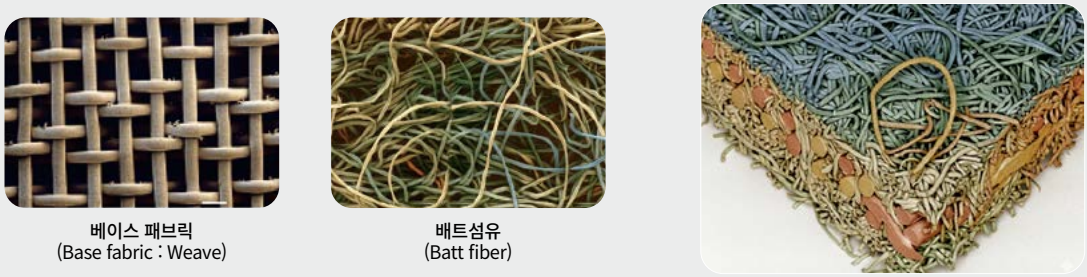
이와 같은 다양한 기능을 만족시키기 위하여, 프레스 펠트는 일반적으로 기계적 강도와 구조적 안정성을 제공하는 견고한 베이스 패브릭(base fabric) 위에, 표면 품질과 수분 흡수 특성을 향상시키는 배트 섬유(batt fiber)를 결합한 복합 구조로 제조된다. 그림 09-09는 일반적인 프레스 펠트의 단면 구조를 나타낸 것으로, 내부의 강직하고 두꺼운 베이스 패브릭과 그 위에 결합된 얇고 부드러운 배트 섬유층을 확인할 수 있다. 최근에는 기능성과 구조적 특성을 더욱 향상시키기 위하여 다층 구조, 복합 조직 구조 등 다양한 형태의 프레스 펠트가 개발·제조되고 있으며(그림 09-10), 운전 조건과 생산 지종에 따라 적합한 구조가 선택·적용되고 있다.

프레스 펠트는 내부의 견고한 구조를 갖는 베이스 패브릭에 부드러운 배트 섬유를 결합하여 제조된다. 일반적으로 배트 섬유는 니들펀칭(needle punching)과 같은 기계적 결합 공정을 통해 베이스 패브릭에 엉키거나 고착되는 방식으로 일체화된다(그림 09-11). 이때 사용되는 배트 섬유의 재질, 섬유 굵기와 길이, 섬유

의 단면 형상, 배열 구조 및 니들펀칭 조건 등은 펠트의 구조적·기능적 특성에 직접적인 영향을 미친다. 특히 이러한 제조 조건의 조절을 통하여 공극특성, 배수성, 투기도 등 다양한 품질 특성을 요구 조건에 맞게 제어할 수 있다. 따라서 프레스 펠트의 성능은 단순한 재료 특성에 의해서만 결정되는 것이 아니라, 섬유 설계와 제조 공정 조건의 최적화에 의해 종합적으로 결정된다.

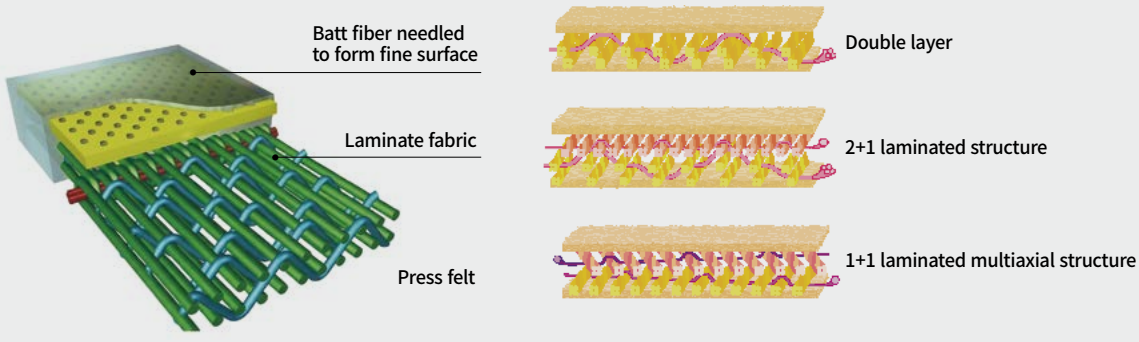
대부분의 제지 공정은 24시간 연속으로, 수일에서 수십 일에 걸쳐 지속적으로 운전된다. 이러한 조업 조건은 프레스 펠트가 장기간 고속·고압 환경에 노출되더라도 균일한 압착탈수 기능을 안정적으로 유지할 수 있도록 설계·제작되어야 함을 의미한다. 프레스 닙에서 펠트로 전이된 수분은 연속적으로 제거되어야 하며, 수

그림 09-09. 프레스 펠트 구조



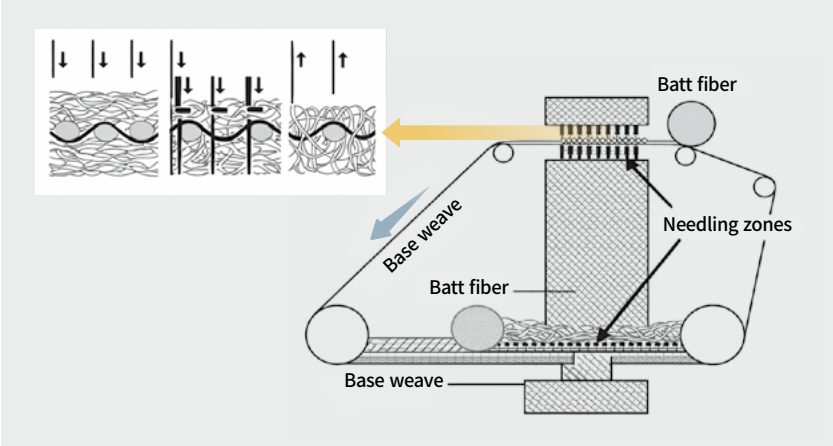

출처: Pressing. In Papermaking Science and Technology, Book 8. Fapet Oy / TAPPI.

그림 09-10. 프레스 펠트의 다양한 구조



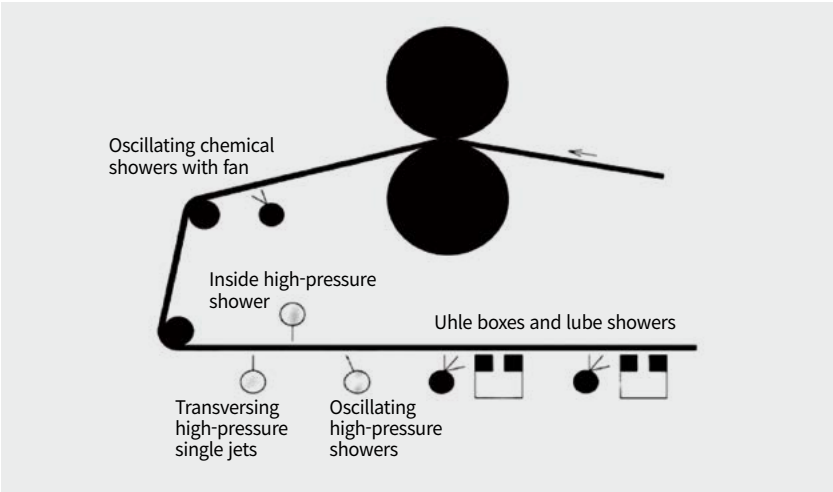

출처: Pressing. In Papermaking Science and Technology, Book 8. Fapet Oy / TAPPI.

그림 09-11. 프레스 펠트 제조방법



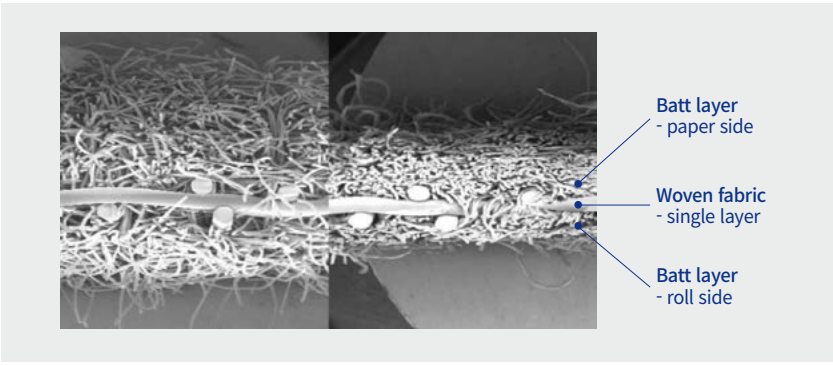

출처: AstenJohnson, Paper Machine Clothing, 2nd Edition, Chapter 3 Press Fabrics, 2017.

그림 09-12. 프레스 펠트 세척과 관리




출처: Pressing. In Papermaking Science and Technology, Book 8. Fapet Oy / TAPPI.

그림 09-13. 프레스 펠트의 노화에 따른 구조변화




출처: AUTEX Research Journal, Vol. 8, No3, September 2008, AUTEX

분 흡수성, 공극 구조 및 투과성 또한 운전 기간 동안 일정하게 유지되어야 한다. 특히, 강한 압력 하에서 습지필로부터 배출되는 수분과 함께 일부 미세분이나 단섬유가 펠트 내부로 유입되거나 표면에 부착될 수 있다. 이 경우 펠트의 특정 부위에 오염이 발생하거나, 공극이 막히는 펠트 막힘(clogging) 현상이 나타날 수 있다.

국부적인 오염은 해당 부위의 공극성과 흡수성을 저하시켜 탈수 불균일을 초래한다. 이러한 습지필의 불균일 탈수는 습지 구조의 국부적 밀도 편차 및 건조 불균일로 이어지며, 최종 제품에서는 국부적인 품질 변화나 카클(cockle)과 같은 결함으로 나타날 수 있다.

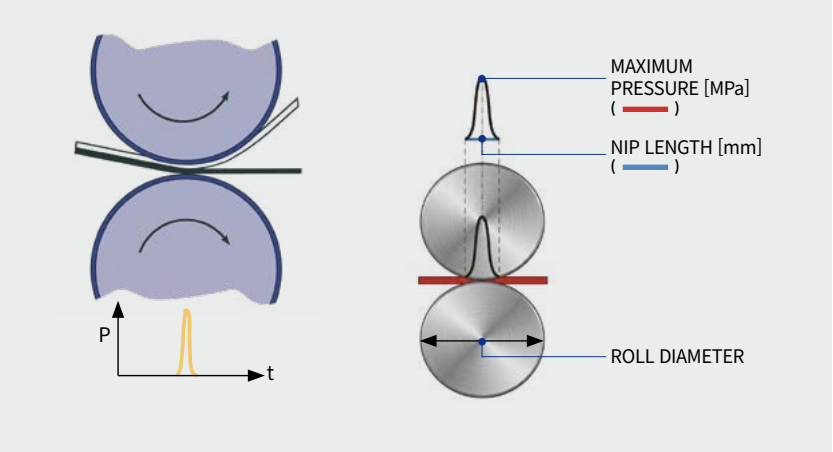
이와 같은 문제를 방지하기 위하여, 프레스 닙을 통과한 후의 프레스 펠트는 세척 및 진공 탈수를 포함하는 유지관리 공정을 거치게 된다. 일반적으로 고압 샤워수를 이용하여 펠트에 남아있는 미세분과 오염 물질을 제거하고, 이어서 진공박스를 통해 수분을 강제로 흡인·배출한다. 이러한 연속적인 세척 및 진공 탈수 과정(그림 09-12)은 압착탈수 공정의 균일성과 안정성을 유지하는 데 필수적인 요소이다.

프레스 펠트는 사용 기간의 경과에 따라 반복적인 압축과 인장, 오염 물질의 축적 등으로 인해 점진적인 노화가 진행된다. 그 결과, 내부 구조가 점차 고밀화되며 공극 용적, 투기도, 장력 유지 특성 등이 지속적으로 감소하게 된다(그림 09-13). 이와 같은 구조적 변화는 압착탈수 과정에서의 수분 제거 효율을 저하시킬 뿐만 아니라, 탈수의 균일성을 악화시켜 제품 품질의 변동을 초래할 수 있다. 특히 공극 구조의 감소와 투수성 저하는 펠트의 배수 능력을 약화시켜 닙 내에서의 탈수 효율을 떨어뜨리며, 이는 결과적으로 공정 전체의 생산성 및 에너지 효율 감소로 이어진다. 따라서 프레스 펠트의 노화에 따른 성능 저하를 방지하기 위하여, 제지 공정의 관리 규정 및 운전 기준에 따라 적절한 시점에 펠트를 교체한다. 이러한 계획적 교체는 안정적인 압착탈수 성능을 유지하고, 최종 제품의 품질 균일성과 공정 효율을 확보하기 위한 필수적인 관리 요소이다.

### (2) 압착부 공정영향인자

압착부에서의 탈수 효율은 설비의 구조적 특성과 운전 조건에 의해 결정된다. 설비 특성은 프레스 닙의 종류 및 형태, 프레스 롤과 펠트의 종류 및 물리적 특성, 그

그림 09-14. 프레스 롤 사이 프레스 닙에서 발생되는 압력과 닙폭




출처: Valmet 기술자료

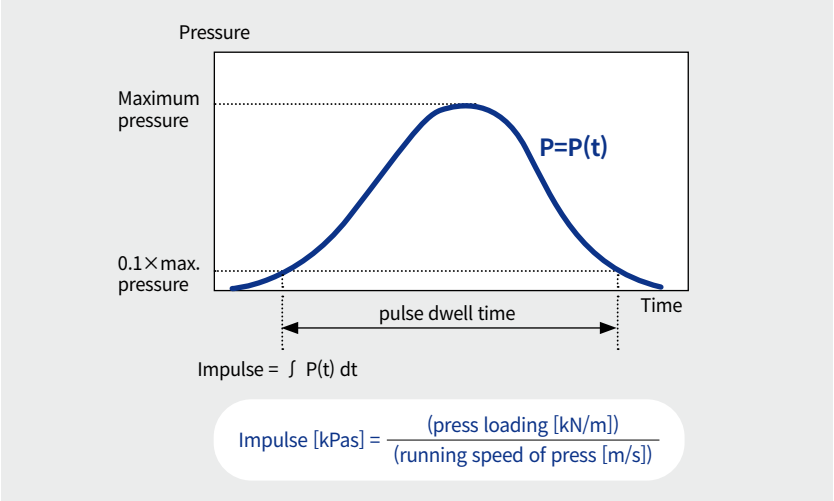
리고 프레스 닙의 배열 및 구조 등에 따라 달라진다. 통상적인 롤 프레스(roll press)에서의 압착력 분포는 그림 09-14와 같이 프레스 닙을 중심으로 대칭적인 형태를 나타낸다. 즉, 닙 입구에서 점차 압력이 증가하여 중앙부에서 최대값에 도달한 후, 출구 방향으로 갈수록 다시 감소하는 분포를 보인다. 프레스 닙의 특성은 일반적으로 최대 압력(maximum pressure)과 압력이 작용하는 구간의 길이, 즉 닙 폭(nip length)으로 표현된다. 최대 압력은 닙 중앙부에서 습지필에 가해지는 최고 압력을 의미하며, 닙 폭은 압력이 유효하게 작용하는 접촉 구간의 길이를 의미한다.

압착탈수 효율은 습지필에 가해지는 압력의 크기와 그 압력이 작용하는 시간이라는 두 요소에 의해 결정된다. 즉, 동일한 최대 압력이라 하더라도 작용 시간이 짧으면 탈수 효과는 제한적이며, 반대로 비교적 낮은 압력이라도 충분한 시간 동안 작용하면 탈수 효과가 증대될 수 있다. 이와 같이 압착 압력과 압착 시간을 동시에 고려한 개념이 그림 09-15에 나타난 압착임펄스(press impulse)이다. 압착임펄스는 닙 통과 동안 습지필에 가해지는 압력의 시간 적분값으로 정의되며, 습지필에 전달되는 에너지 개념을 정량화한 지표라 할 수 있다. 압착임펄스 개념을 활용하면, 구조와 운전 조건이 서로 다른 다양한 압착 공정을 동일한 기준에서 비교·평가할 수 있다. 예를 들어, 닙 폭이 넓고 최대 압력이 낮은 경우와, 닙 폭이 좁고 최대 압력이 높은 경우라도 압착임펄스 값이 유사하다면 이론적으로 유사한 탈수 효과를 기대할 수 있다.

도표 09-01에는 4단 압착탈수가 이루어지는 공정에서 각 단계별 압착임펄스를 제시하였다. 일반적으로 습지필은 초기 단계에서 구조적으로 매우 연약하므로 비교적 낮은 압착임펄스를 적용하며, 압착이 진행되어 습지필의 강도와 치밀도가 증가함에 따라 점차 높은 압착임펄스를 적용한다. 압착탈수부 전체에서 가해지는 총 압착 에너지는 각 단계의 압착임펄스를 합산한 값으로 평가할 수 있으며, 이는 압착부 설계와 운전 조건 최적화의 중요한 기준이 된다.

압착탈수부의 효율을 증대시키기 위해서는 압착임펄스를 증가시키는 것이 중요하다. 압착임펄스는 압착압력과 압착시간의 곱으로 정의되므로, 효율 증대를 위해서는 압착압력을 높이거나 압착시간을 늘리는 방법을 적용할 수 있다. 그러나 압착압력을 과도하게 높일 경우, 습지필의 섬유 구조가 손상되거나 파괴될 수 있으므로 주의가 필요하다. 일반적인 롤 프레스에서는 생산 지종과 습지필의 상태

그림 09-15. 압착임펄스 개념도




출처: Valmet 기술자료

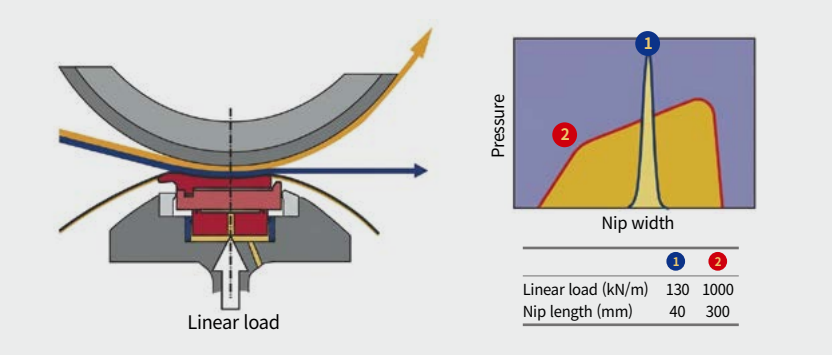
도표 09-01. 압착탈수부 다단 압착공정에서의 압착력 및 압착임펄스
(*초지 속도 25 m/s, 닙길이 0.04 m, 4단 압착탈수공정)

| 닙 | 하중, kN/m | 프레스 임펄스, kPa · s |
|---|---|---|
| 1 | 70 | 2.8 |
| 2 | 90 | 3.6 |
| 3 | 120 | 4.8 |
| 4 | 140 | 5.6 |
| 합 계 | | 16.8 |

(함수율, 구조, 원료 조성 및 특성 등)에 따라 적용할 수 있는 최대 압력이 제한된다. 따라서 압착 효율을 높이기 위해서는 대체로 허용 가능한 최대 압력 수준에서 압착을 수행한다. 압착임펄스의 추가적인 증대를 위해서는 압착시간을 늘리는 방법이 효과적이다. 이를 위해 적용할 수 있는 방법으로는 첫째, 경도가 낮고 탄성이 큰 부드러운 재질의 롤을 사용하면 닙에서 습지필이 롤과 접촉하는 시간이 늘어나 압착시간을 증가시킬 수 있으며, 둘째, 완충성이 뛰어나고 압축 탄성이 높은 펠트를 사용하면 습지필과의 접촉 시간이 증가하고, 압착 과정에서 섬유 손상을 최소화하면서 압착효율을 높일 수 있다.

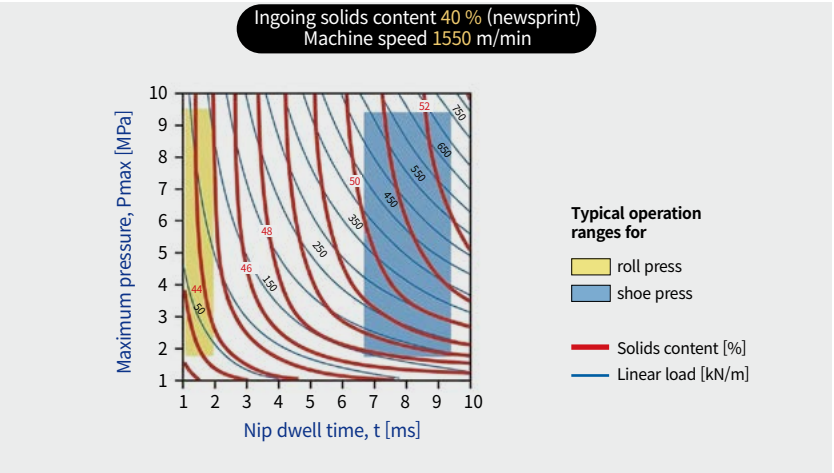
지속적인 공정효율 및 생산성 증대를 위한 초지 속도 향상은 제지산업의 중요한

그림 09-16. 슈 프레스의 구조 및 닙폭과 압착임펄스의 변화




출처: Valmet 기술자료

그림 09-17. 슈 프레스와 롤프레스의 닙압과 닙 잔류시간 비교




출처: Valmet 기술자료

과제이다. 그러나 초지 속도 증가는 필연적으로 압착시간, 즉 지필이 프레스 닙을 통과하는 시간을 단축시켜 압착시간 감소를 유발하므로 실질적인 초지 속도 증가에 큰 걸림돌이 된다. 이러한 문제의 해결을 위해 개발된 방법이 프레스 닙폭을 최대한 넓게 하여 결과적으로 압착시간을 크게 증가시킬 수 있는 익스텐디드 닙 프레스(extended nip press : ENP)개념의 슈 프레스(shoe press)이다. 슈 프레스는 그림 09-16에서 보는 것과 같이 하부에 상부 롤을 감싸는 구조의 롤을 사용함으로써 실제 압력이 작용하는 닙폭을 획기적으로 증가시킨다. 이로써 압착시간을 길게 하고, 이를 통해 상대적으로 낮은 압력을 가해도 총 압착에너지, 즉 압착임펄스를 크게 향상시킬 수 있다. 이와 같은 ENP는 초지 속도의 증가 시에도 충분한 압착효율을 얻을 수 있게 하여, 제지공정의 생산속도 증대에 크게 기여하고 있다.

## 4. 압착탈수부 설비 종류

제지공정의 생산성 증대 및 품질 고급화를 위한 다양한 압착탈수설비의 개발이 계속되어 왔다. 특히 탈수가 이루어지는 프레스 닙에서의 탈수효율 증대는 초지속도 및 공정효율 증대에 중요한 역할을 미치는 핵심요소가 됨에 따라, 이를 개선하기 위한 다양한 형태의 설비 개발과 개선이 이루어졌다.

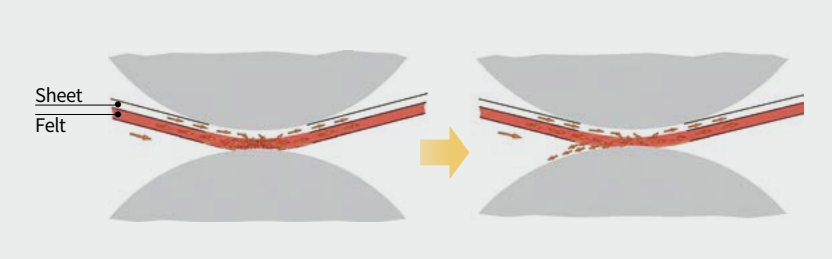
### (1) 평롤 프레스 설비

평롤 프레스 설비는 가장 기본적인 프레스 형태로 롤과 롤 사이로 펠트와 습지필을 통과시켜서 압착탈수하는 설비이다(그림 09-18). 닙 중앙의 최대 압력구간에서 탈수되는 물이 압력 구배에 의해 롤의 입구 쪽으로 역류하게 되는데, 롤의 회전에 의해 탈수된 물이 다시 롤 입구로 유입되면 탈수 효율이 저하된다. 평롤 프레스는 고속운전 시 탈수효율이 크게 떨어지므로 저속초지기에서 주로 사용된다.

### (2) 그루브 롤 프레스

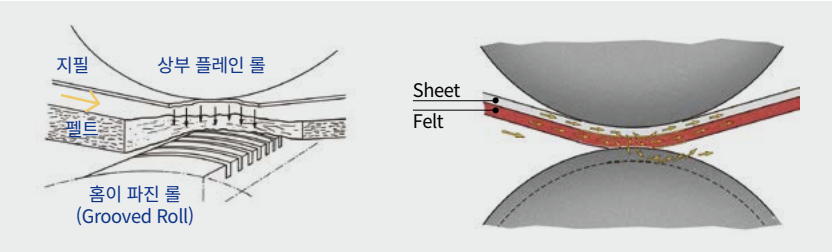
평롤 프레스에서 탈수되는 물의 원활한 배출이 이루어지지 않는 문제를 해결하기 위하여 고무재질의 바닥롤 표면에 일정한 간격의 홈(groove)을 가공한 그루브

그림 09-18. 평롤 프레스의 구조 및 탈수



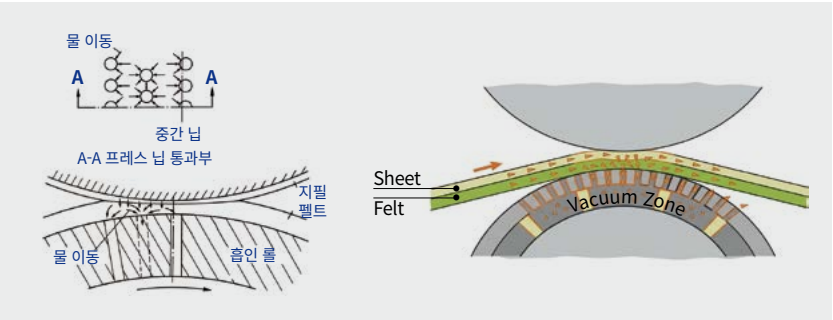

출처: 펄프제지기술, 도서출판 서일.

그림 09-19. 그루브 롤 프레스의 구조 및 탈수



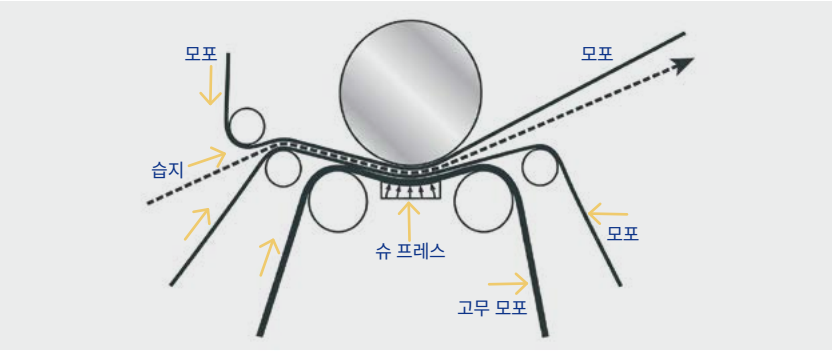

출처: 펄프제지기술, 도서출판 서일.

그림 09-20. 석션 롤 프레스의 구조 및 탈수




출처: 펄프제지기술, 도서출판서일.

그림 09-21. 익스텐디드 닙 프레스의 구조 및 탈수




출처: 펄프제지기술, 도서출판 서일.

롤 프레스가 개발되었다. 그루브 롤 프레스는 바닥 롤 표면에 나선형으로 홈을 형성한 구조를 가진다. 닙에서 탈수되는 물은 롤 표면의 그루브로 유입되어, 롤의 회전에 따라 외부로 배출된다(그림 09-19). 그루브 롤 프레스는 물이 배출되는 홈 부분과 물이 배출되지 않는 그루브의 랜드 부분에서 압착탈수효율이 다르게 나타나고, 결국 습지필의 압착 정도에도 차이가 날 수 있다. 압착탈수 정도의 차이는 습지필 밀도에 영향을 미치므로 최종 종이제품에 그루브 마크가 남게 되는 문제가 발생하기도 한다.

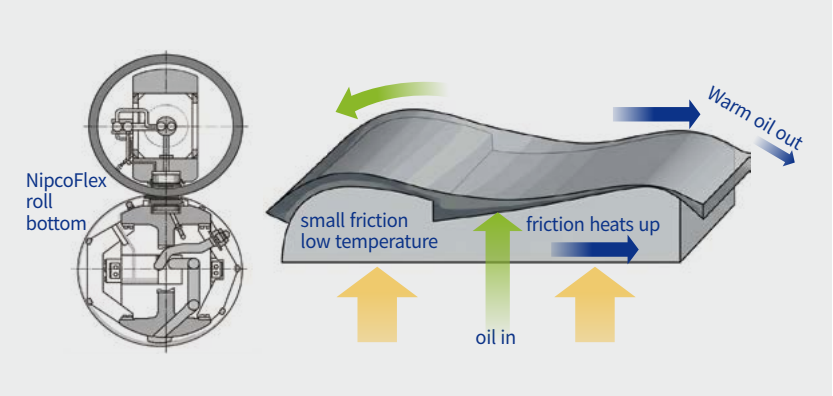
### (3) 석션 롤 프레스

프레스 닙 부위에서 압착에 의해 발생한 물을 얼마나 신속하게 제거하느냐는 탈수 효율과 직접적으로 관련된다. 석션 롤 프레스(suction roll press)는 롤 표면에 다수의 구멍을 가공하고, 롤 내부에 진공 장치를 설치하여 펠트로 이동하는 물을 흡입·제거함으로써 압착탈수 효율을 향상시키도록 개발된 프레스이다(그림 09-20). 초기 적용 이후에는 롤 표면에 다양한 크기와 형상, 그리고 배열 패턴의 구멍을 적용하는 방식으로 발전하여 압착탈수 효과를 더욱 증대시키는 한편, 습지필의 국부적인 밀도 변이를 최소화할 수 있도록 개선되어 왔다.

### (4) 익스텐디드 닙 프레스 (ENP, extended nip press)

초지 속도의 증가로 인해 프레스 구간에서의 압착탈수 시간이 더욱 감소됨에 따라, 이를 보완할 수 있는 고효율 압착탈수장치의 필요성이 더욱 크게 대두되었다. 고속 초지기에서 압착탈수 효율을 좌우하는 핵심인자는 압착탈수 시간이므로, 이와 직결된 닙폭을 최대한 확대하기 위하여 압착 롤을 넓은 면적으로 감싸는 익스텐디드 닙 프레스가 개발되었다. 이는 그림 09-21에서 보는 바와 같이 프레스 롤 하부에 신발 모양의 프레스 장치인 슈 프레스 모듈(shoe press module)을 설치하여 넓은 영역에 걸쳐 압력이 작용하도록 함으로써 압착탈수 시간을 크게 향상시킨 프레스이다. 익스텐디드 닙 프레스에서는 정지 상태의 슈 위로 지필과 펠트가 연속적으로 미끄러지듯이 이송되어야 하므로, 슈 프레스를 감싸고 회전하는 고무블랭킷 내부에 윤활유를 지속적으로 공급하여 마찰력을 최소화한다. 하지만 초기 모델의 경우 고무 블랭킷의 양단이 밀폐되지 않은 구조였기 때문에 윤활유

그림 09-22. 슈 프레스의 구조




출처: Valmet 기술자료

의 미세증기가 외부로 유출되어 오염을 발생시키는 문제가 발생하였다.

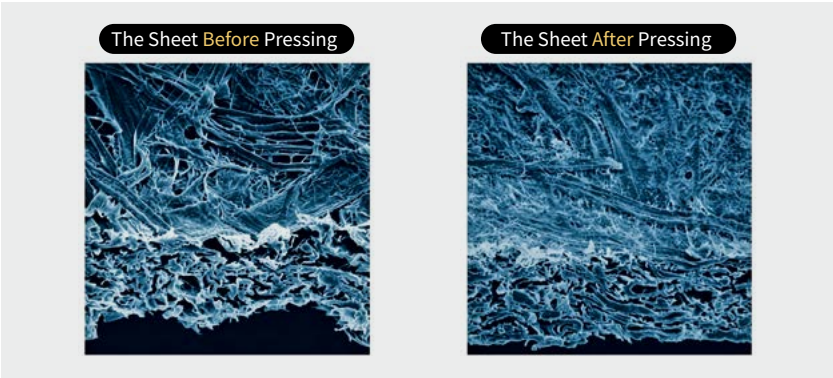
### (5) 슈 프레스(shoe press)

압착효율을 크게 향상시키기 위해 개발된 익스텐디드 닙 프레스에서는 슈 프레스 모듈과 고무 블랭킷 사이의 마찰을 줄이기 위하여 슈 프레스 모듈 상부에 윤활유를 지속적으로 공급하는 방식이 적용되었다. 그러나 운전 과정에서 마찰열과 윤활유의 온도 상승으로 인해 미세 오일 미스트와 유분이 발생하였고, 이로 인해 공정 오염과 제품 품질 저하 문제가 심각하게 나타났다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 슈 프레스 모듈을 슈 프레스 벨트(shoe press belt)로 완전히 밀폐한 구조의 슈 프레스 장치가 개발되었다. 이 장치는 윤활 영역을 외부와 차단함으로써 유증기의 유출을 근원적으로 방지할 수 있었으며, 동시에 넓은 닙폭을 안정적으로 형성하여 압착탈수 시간을 더욱 증가시킬 수 있었다(그림 09-22).

그 결과, 슈 프레스는 프레스 닙폭의 획기적인 확대를 통해 탈수량을 크게 증가시킬 뿐 아니라 작업환경 개선과 공정 청정성 확보에도 기여하게 되었다. 일반적으로 슈 프레스는 기존 롤 프레스에 비해 압착탈수 후 습지필의 건조도를 약 3~5% 향상시킬 수 있으며, 건조 용량이 제한적인 제지공장에서는 약 10~20%의 초지속도 증가 효과를 얻을 수 있다[12]. 특히 평량이 높아 탈수 및 건조 부하가 큰 판지 제조 공정에서는 약 30% 이상의 생산성 향상을 기대할 수 있다.

그림 09-23. 압착탈수 공정에 의한 습지필의 구조변화




출처: MacGregor, M.A., "Wet Pressing Research in 1989, a Historical Perspective, Analysis and Commentary", Fundamentals of Papermaking, Transactions of the Ninth Fundamental Research Symposium, Cambridge, 511–586 (1989).

## 5. 압착부의 영향

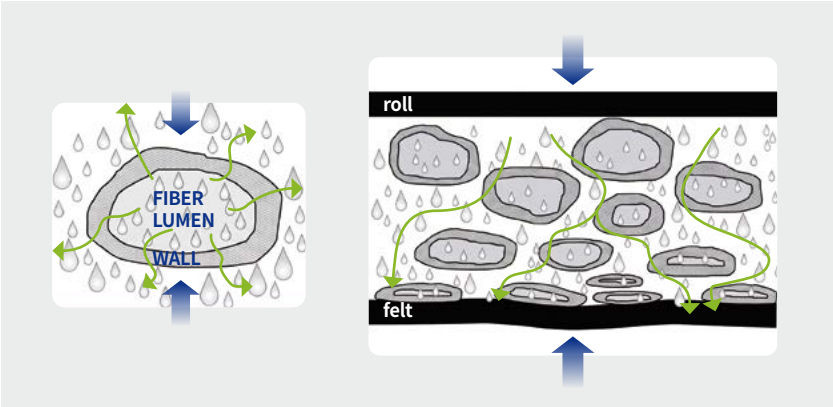
### (1) 압착탈수공정에 의한 종이구조변화

압착탈수 공정에서 습지필이 압착력을 받으면 펄프섬유가 눌리면서 점차 편평해지고, 섬유 간 거리가 감소하게 된다. 이와 같이 습윤 상태에서 섬유 간격이 좁아지면 섬유 사이에 존재하는 물의 표면장력이 작용하여 펄프섬유 간 결합이 강화된다. 또한 압착이 진행됨에 따라 섬유 내강에 존재하던 물도 점차 배출되며, 팽윤되어 있던 펄프섬유 자체가 압축된다. 이 과정에서 섬유 간 실제 접촉면적이 더욱 증가하여 섬유 결합이 치밀해지고, 압착 및 탈수에 따른 섬유의 압축변형으로 지필의 밀도는 전반적으로 증가하게 된다(그림 09-23).

한편, 압착 시 습지필 표면과 직접 접촉하는 펠트 또는 롤의 표면 형상에 따라 지필의 표면 구조가 달라진다. 매끄러운 롤 표면과 접촉한 경우에는 지필의 표면 평활도가 크게 향상되지만, 펠트와 접촉한 면에는 펠트 조직의 형상이 전이되어 나타나는 펠트마크가 형성되기도 한다. 이러한 표면 전이는 종이의 외관, 인쇄적성 및 후가공 특성에 영향을 미치는 중요한 요소가 된다.

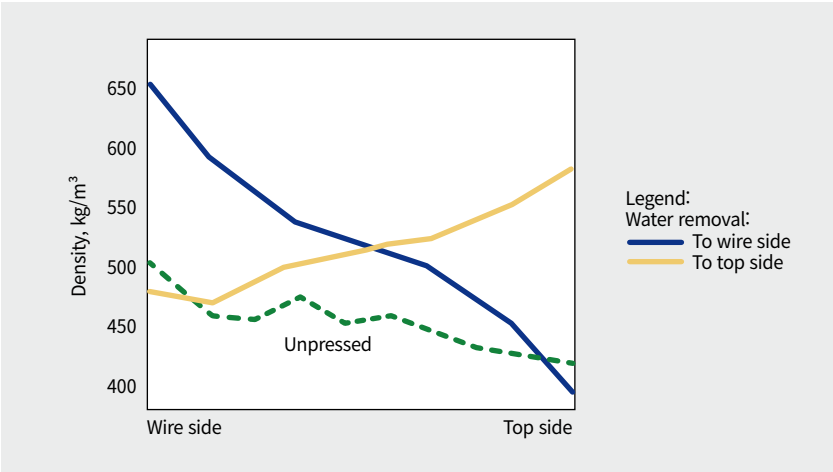
일반적으로 압착탈수된 습지필의 두께 방향으로 밀도경사(density gradient)가 나타난다. 압착탈수된 습지필의 두께 방향 위치별 밀도는 압착탈수 방식에 따라 다르게 나타난다. 이는 압착탈수공정에서 물이 제거되는 방향이 습지필의 밀도변화에 큰 영향을 미치기 때문이다. 습지필의 밀도는 탈수가 일어난 방향 쪽에서 더

그림 09-24. 압착탈수공정에서 펄프섬유 내강에서의 탈수와 이에 따른 섬유압착현상




출처: Pressing. In Papermaking Science and Technology, Book 8. Fapet Oy / TAPPI.

그림 09-25. 압착탈수 공정에서 펠트면으로의 탈수에 의한 종이두께 방향에서의 고밀화



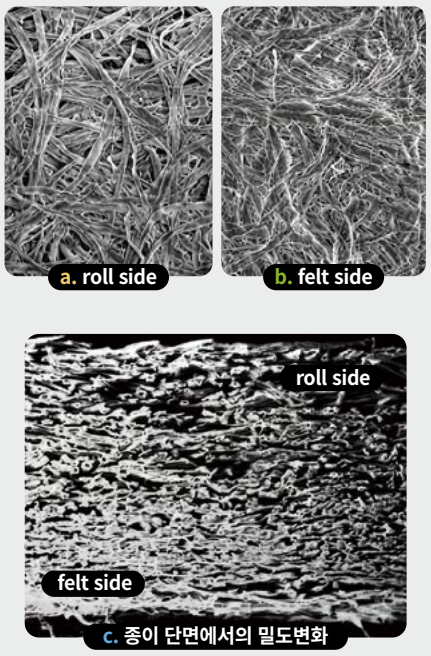

출처: MacGregor, M.A., "Wet Pressing Research in 1989, a Historical Perspective, Analysis and Commentary", Fundamentals of Papermaking, Transactions of the Ninth Fundamental Research Symposium, Cambridge, 511–586 (1989).

낮아지고, 탈수가 일어나지 못한 방향쪽에서 높아진다. 예를 들어 한쪽 면이 프레스 롤과 접하고 다른 쪽 면이 펠트와 접하여 탈수가 진행되는 경우, 프레스 롤과 접촉한 면으로는 탈수가 발생할 수 없다. 이러한 이유로 지필 내부에 있던 물의 탈수 방향은 펠트 쪽으로 일어나게 된다. 이를 다시 말하면 롤과 인접한 지필의 수압이 펠트 쪽 지필의 수압보다 높다는 뜻이다. 프레스 닙 아래에서 기계 방향 위치가 일정하다면 그 지점에서 습지필에 가해지는 총 압력은 일정하므로, 롤과 접한 습지필의 수압이 높다는 뜻은 이 지점의 구조적 반발력이 낮다는 의미이다. 즉 수압이 높은, 다시 말하면 구조적 반발력이 낮은, 롤 쪽의 습지필을 구성하는 섬유는

그림 09-24에서 나타난 바와 같이 압착탈수 과정 중에도 눌림과 구조 변화가 제한적으로 발생하게 된다. 따라서 롤과 접한 부분의 펄프 섬유는 압착탈수 이후에도 상대적으로 밀도가 낮은 지층구조를 형성하게 된다. 이와는 반대로 물 빠짐이 발생한 펠트 쪽 지필의 섬유는 밀도가 높은 상태로 변화되어, 결국 종이의 두께 방향으로 밀도경사가 발생한다.

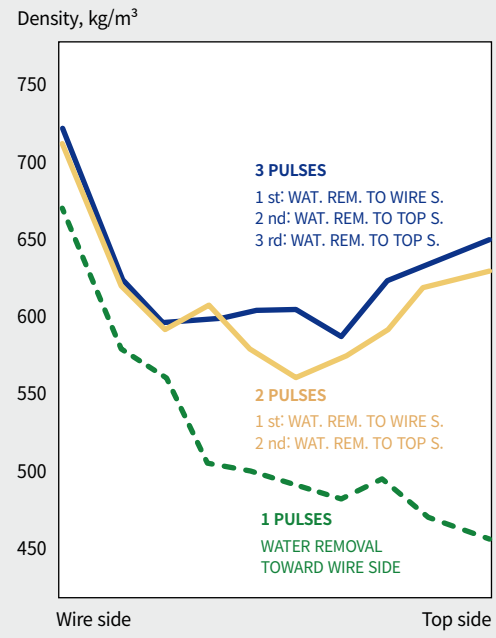
압착탈수공정에서 탈수 방향에 따른 습지필의 밀도경사는 그림 09-25에 잘 나타나 있다. 여기서 보는 것과 같이 종이의 두께 방향 밀도는 압착탈수공정을 거치지 않은 경우 약 450 kg/m$^3$ 정도이지만, 와이어 쪽으로 압착탈수가 발생하도록 압착한 경우에는 탈수가 일어난 와이어 측 지층의 밀도가 약 650 kg/m$^3$ 까지 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이와 다르게 탑층 쪽으로 탈수를 유도하여 압착탈수를 하는 경우에는, 물이 빠져나간 탑층 방향 지층의 밀도가 크게 증가한다. 이 결과로부터 만약 양쪽에 모두 펠트를 배치하면 중앙부의 밀도가 낮고 양쪽 표면

**그림 09-26.** 압착탈수공정에서 탈수 방향에 따른 종이구조의 양면성




출처: MacGregor, M.A., "Wet Pressing Research in 1989, a Historical Perspective, Analysis and Commentary", Fundamentals of Papermaking, Transactions of the Ninth Fundamental Research Symposium, Cambridge, 511–586 (1989).

**그림 09-27.** 압착탈수 공정에서 압착탈수 방향 조정을 통한 두께 방향 종이밀도경사 및 양면성 조절



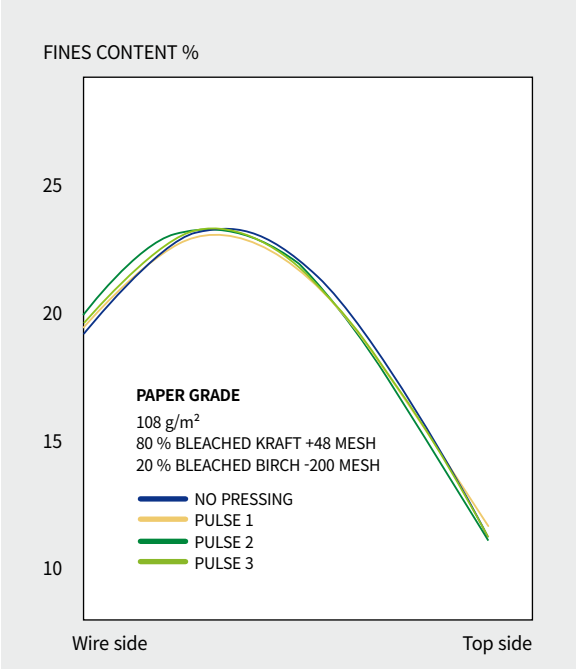

출처: Paulapuro. H., Wet Pressing – Present Understanding and Future Challenges. In The science of papermaking, Trans. of the XIIth Fund. Res. Symp. Oxford, 2001, (C.F. Baker, ed.), pp 639–678, FRC, Manchester, 2018.

쪽으로 밀도가 높아지는 대칭적인 형태를 보일 것이라 예상할 수 있다.

압착탈수공정에서 발생하는 지필의 구조변화는 그림 09-26에 나타내었다. 일반적으로 탈수가 이루어지는 펠트 쪽 면은 탈수가 이루어지지 않는 압착 롤 쪽 면에 비해 표면밀도가 높고, 보다 평활한 특징을 보인다. 두께 방향의 사진에서도 이러한 종이의 밀도경사를 확인할 수 있다. 이와 같이 물이 한쪽 방향으로만 제거되는 편면 탈수는 두께 방향의 구조적 비대칭을 형성하게 되며, 그 결과 종이의 양면성이 발생한다.

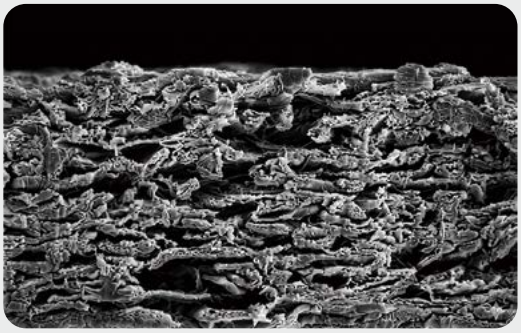
한쪽 면으로만 이루어지는 압착탈수에 의한 종이구조의 양면 차를 해소하기 위하여, 1차 압착탈수부에서 한쪽 면으로 탈수가 이루어지는 경우에는 다음 압착탈수 단계에서는 반대쪽 면으로 탈수가 발생하도록 프레스 배열을 하여 종이의 두께 방향 밀도경사를 조절한다. 특히, 초기 압착탈수의 영향이 큰 경우에는 그림 09-27에서와 같이 2, 3번 압착탈수를 동일한 방향으로 진행하여 와이어 면(wire side)과 펠트 면(top side)의 밀도차이가 최소화되도록 한다. 또한, 압착탈수에서

**그림 09-28.** 압착탈수 공정에 의한 종이 두께 방향에서 미세분 함량의 변화




출처: Paulapuro. H., Wet Pressing – Present Understanding and Future Challenges. In The science of papermaking, Trans. of the XIIth Fund. Res. Symp. Oxford, 2001, (C.F. Baker, ed.), pp 639–678, FRC, Manchester, 2018.

**그림 09-29.** 불균일한 압착탈수 및 과도한 탈수에 의한 습지필의 파괴현상



출처: MacGregor, M.A., "Wet Pressing Research in 1989, a Historical Perspective, Analysis and Commentary", Fundamentals of Papermaking, Transactions of the Ninth Fundamental Research Symposium, Cambridge, 511–586 (1989).

발생하는 두께 방향의 밀도경사 및 이에 따른 종이제품의 양면 차를 방지하는 방법으로 이중펠트를 적용하여 양방향으로 탈수가 이루어지게 하는 방법도 널리 활용되고 있다. 이 방식은 탈수를 보다 대칭적으로 유도하여 두께 방향 구조 균일성과 표면 특성의 균형을 확보하는 데 효과적이다.

압착탈수 시 습지필의 물이 외부로 빠져나갈 때 섬유와 미세분 등이 함께 이동하거나 빠져나가는 문제는 발생되지 않는다. 이는 습지필이 형성되는 과정에서 섬유들이 서로 얽혀 구조적 결합을 충분히 이루고 있기 때문에 탈수에 따라 발생하는 밀도 상승에도 불구하고 섬유구조의 파괴나 변화는 발생하지 않기 때문이다. 따라서 통상적인 압착탈수공정에서 습지필 내의 펄프섬유와 미세분의 이동이 발생되지 않게 된다. 이러한 결과로 그림 09-28에서도 볼 수 있는 것과 같이 종이의 두께 방향 미세분 함량은 압착탈수공정 진행에 따라 거의 변화되지 않는다.

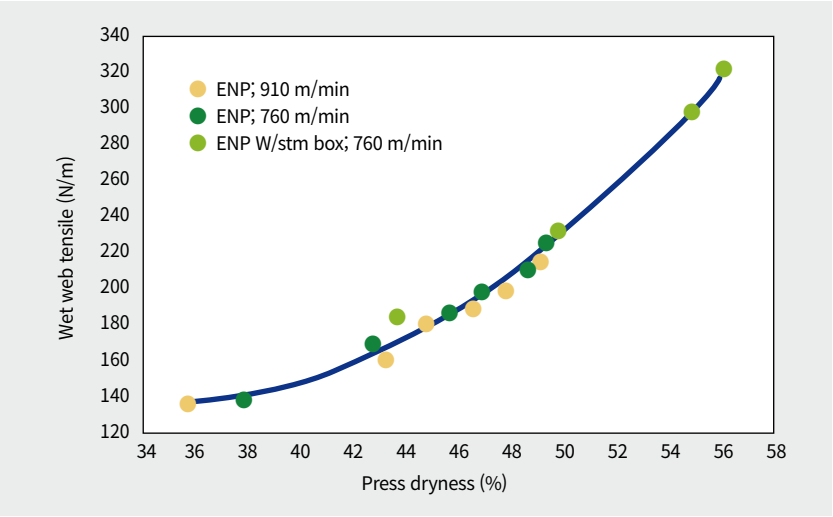
그러나 습지필 구조가 불균일하여 약한 부분이 존재하거나, 과도하고 급격한 압착탈수가 행해질 경우에는 습지필의 특정 부위로 탈수 유량이 집중되면서 습지필의 섬유구조가 국부적으로 해체되는 현상이 발생하기도 한다(그림 09-29). 이와 같이 압착 과정에서 지필의 섬유 네트워크가 해체되는 현상을 크러싱(crushing)이라 한다. 크러싱 현상은 습지필의 구조적 특성, 예를 들어 지합이 불균일하여 불균일한 탈수가 일어나거나, 펠트가 부분적으로 오염되어 압착탈수가 부분적으로 지연되어 과도한 물이 지필 내부에 국부적으로 존재하는 경우에 발생할 수 있다. 또한 초지속도가 과도하게 높아 압착탈수 시 물이 빠져나갈 수 있는 충분한 시간이 주어지지 않은 상태에서 과도한 압착력을 가하게 되는 경우에도 발생될 수 있다. 크러싱에 의한 펄프섬유의 이동은 실제 육안으로 확인할 수 있을 정도로 지필구조가 파괴되는 경우도 있지만, 대부분의 경우 습지필 내부에서 미세한 섬유 재배열과 국부적인 물길 형성 등 국부적 지필구조 변화 형태로 발생된다. 이렇게 발생되는 국부적 지필구조 변화는 이후 종이의 균일성을 저하시켜 강도 감소를 초래하고, 나아가 지절 문제를 야기할 수 있다.

### (2) 압착탈수에 의한 종이품질 변화

압착탈수공정을 거친 습지필은 밀도가 향상되고, 종이의 강도도 크게 증가된다. 이는 섬유내강의 물이 탈수되어 섬유가 압축변형되고, 그 결과 섬유 간 접촉 면적이 크게 증가하고, 섬유 간 간격이 감소하기 때문이다. 이처럼 가깝게 접근한 섬유

는 이후 진행되는 건조과정에서 섬유 간 수소결합이 크게 증가하여 강도 향상으로 이어진다. 즉, 압착탈수 공정에서의 탈수는 단순한 수분 제거에 그치지 않고, 습지필 내 섬유 자체의 형태 변화와 지필의 고밀화를 동시에 유도하여 강도의 상승효과를 가져온다. 그림 09-30에서 나타난 바와 같이 압착탈수에 의한 습지필의 건조도(dryness)가 증가할수록 습지필의 강도 역시 증가하는 비례적 관계를 나타낸다.

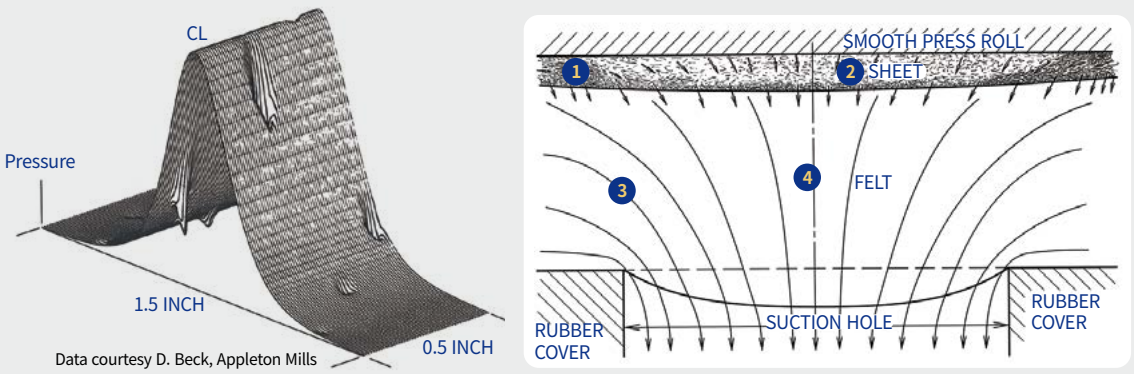
**그림 09-30.** 압착탈수공정에서 탈수도에 따른 습지의 강도변화




출처: Pressing. In Papermaking Science and Technology, Book 8. Fapet Oy / TAPPI.

섬유의 압착과 고밀화에 큰 영향을 미치는 압착탈수 과정에서 국부적으로 불균일한 압착탈수가 발생하면 습지필의 구조도 국부적으로 불균일해지게 된다. 예를 들어 프레스 펠트로 전이된 물을 신속히 제거하기 위해 석션 롤이나 그루브 롤을 채용하면 물의 통로가 되는 석션홀이나 그루브 부위의 지층구조가 주변과 차이를 보인다. 실제로 석션 롤의 홀 부분에서는 인접한 영역에 비해 국부적인 압력 저하가 발생한다(그림 09-31). 이는 홀 부위에서는 전체 압력과 평형을 이루고 있는 수압과 구조압 모두 홀 주변보다는 낮은 상태가 된다는 뜻이다. 석션홀 방향으로 물의 탈수가 발생한다는 뜻은 홀 부위의 수압이 낮다는 의미이다. 석션홀 부위의 구조압 역시 이 부분의 펠트가 가라앉아 있으므로 낮다. 이처럼 구조압이 낮은 영역에서는 섬유가 충분히 압착되지 못하므로 지필의 압착 정도가 작아지고, 결과적으로 해당 부위는 주변보다 벌키한 구조를 형성하게 된다. 이러한 국부적 밀도 차이는 종이의 미세한 구조 불균일을 초래하여 물성 편차나 표면 특성의 변화를 유발할 수 있다.

그림 09-31. 석션 롤의 적용 시 석션구멍 부분에서의 불균일한 탈수와 이에 따른 불균일한 구조변화 모식도




출처: MacGregor, M.A., "Wet Pressing Research in 1989, a Historical Perspective, Analysis and Commentary", Fundamentals of Papermaking, Transactions of the Ninth Fundamental Research Symposium, Cambridge, 511–586 (1989).

그림 09-32. 압착탈수공정의 펠트수분 탈수 불균일에 의한 지필의 밀도 불균일




출처: MacGregor, M.A., "Wet Pressing Research in 1989, a Historical Perspective, Analysis and Commentary", Fundamentals of Papermaking, Transactions of the Ninth Fundamental Research Symposium, Cambridge, 511–586 (1989).

그림 09-33. 압착탈수공정에서 프레스 펠트의 배트 섬유와 습지필의 구조적 특징에 의한 습지필의 국부적 압착불균일



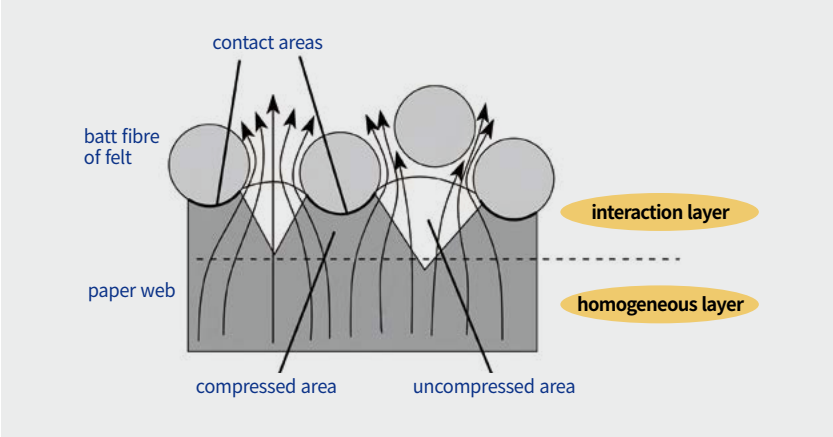

출처: Paulapuro. H., Wet Pressing – Present Understanding and Future Challenges. In The science of papermaking, Trans. of the XIIth Fund. Res. Symp. Oxford, 2001, (C.F. Baker, ed.), pp 639–678, FRC, Manchester, 2018.

동일한 현상은 그루브 롤을 사용하는 경우에도 발생한다. 그림 09-32에서 보는 바와 같이 그루브 롤의 경우 탈수 방향은 그루브 쪽으로 발생한다. 이는 랜드 부위의 수압이 그루브 부위보다 높다는 의미이다. 석션 롤의 경우와 달리 그루브 롤에서는 진공이 가해지지 않고 그루브의 폭이 석션홀보다는 훨씬 작기 때문에 그루브 부위의 총 압력은 랜드 부위와 거의 동일하게 유지된다. 즉 탈수가 발생하는 그루브 쪽의 구조압이 높은 결과가 된다. 따라서 습지필의 고밀화는 그루브 부위에서 발생하며, 랜드 부위는 상대적으로 압착이 덜 이루어져 밀도가 낮은 지층 구조를 갖는다(그림 09-32). 이러한 습지필의 불균일한 압착은 최종 종이제품의 국부적 구조 변이를 초래한다. 이런 종이의 공극구조 차이는 수분 또는 잉크흡수성의 불균일성을 증가시켜 인쇄모틀(print mottle) 등 품질의 저하를 유발할 수 있다.

압착탈수 공정에서 프레스 펠트의 구조와 형태 또한 종이의 품질 변화에 큰 영향을 미칠 수 있다. 이는 프레스 펠트에서 습지필과 직접 접촉하는 배트 섬유가 습지필을 구성하는 펄프섬유에 비해 상대적으로 매우 큰 섬유이기 때문이다. 그림 09-33에서 볼 수 있듯이, 부드러운 펠트 표면을 형성하기 위하여 섬유 직경이 비교적 가는 배트 섬유를 적용하는 경우에도, 그 크기는 여전히 펄프 섬유에 비해 크기 때문에, 습지필에 미세한 탈수 불균일이 발생할 수 있다. 이러한 영향으로 배트 섬유와 직접 접촉하는 습지필에서는 상대적으로 높은 압착과 고밀화 현상이 발생될 수 있으며, 그 사이 영역에서는 압착이 덜 이루어져 미세한 국부적 밀도 불균일성도 나타나게 된다.

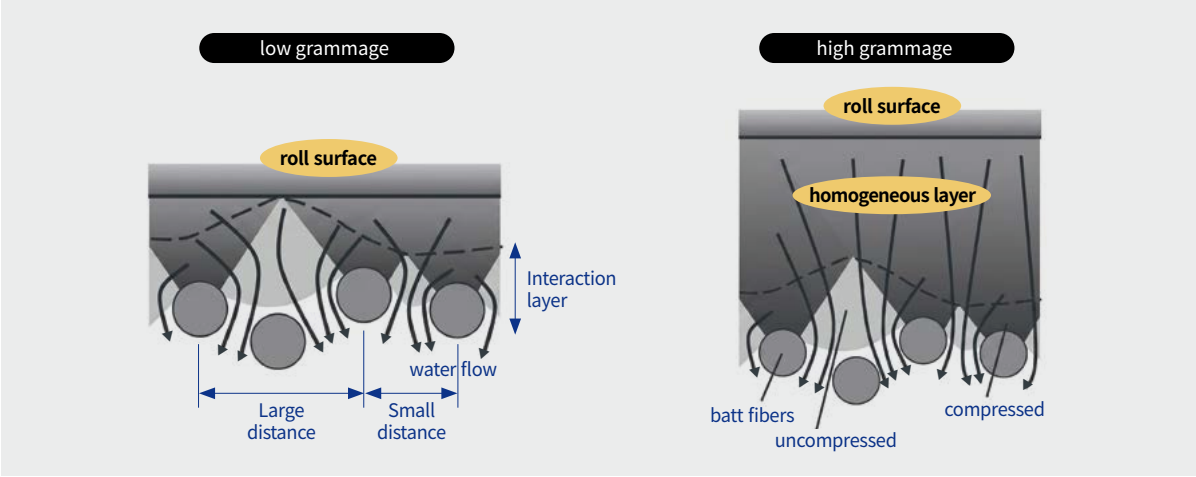
압착탈수공정에서 프레스 펠트의 배트 섬유와 직접 접촉하는 부분과 접촉하지 않는 부분 사이에서 습지필의 탈수효율이 서로 다르게 나타날 수 있다(그림 09-34). 펄프 섬유보다 큰 배트 섬유에 의한 압착현상 또한 부분 별로 달라질 수 있기에, 습지필의 탈수와 고밀화의 국부적 불균일성이 발생된다. 이러한 문제의 해결을 위해 보다 부드럽고 직경이 가는 배트 섬유를 적용한 펠트를 사용할 수 있다. 그러나 배트 섬유의 특성을 변화시키면 펠트의 공극성, 공극용량 등의 변화를 유발할 뿐 아니라, 이에 따른 탈수효율이 저하되거나 펠트의 기계적 내구성이 저하되는 문제가 발생할 수 있다. 이러한 배트 섬유에 의한 습지필 표면의 미세한 밀도 불균일화 문제는 특히 평량이 낮은 지종에서 더욱 두드러지게 나타난다(그림 09-35). 따라서 저평량 종이제품의 품질균일성 유지를 위한 압착탈수공정에서의 펠트적용에는 더욱 세심한 관리가 요구된다.

그림 09-34. 펠트 배트 섬유와의 접촉에 의한 습지필의 미세 고밀화 현상




출처: Paulapuro. H., Wet Pressing – Present Understanding and Future Challenges. In The science of papermaking, Trans. of the XIIth Fund. Res. Symp. Oxford, 2001, (C.F. Baker, ed.), pp 639–678, FRC, Manchester, 2018.

그림 09-35. 종이제품 평량에 따른 펠트 배트 섬유와의 접촉에 의한 습지필의 미세 고밀화 현상 영향비교




출처: Paulapuro. H., Wet Pressing – Present Understanding and Future Challenges. In The science of papermaking, Trans. of the XIIth Fund. Res. Symp. Oxford, 2001, (C.F. Baker, ed.), pp 639–678, FRC, Manchester, 2018.

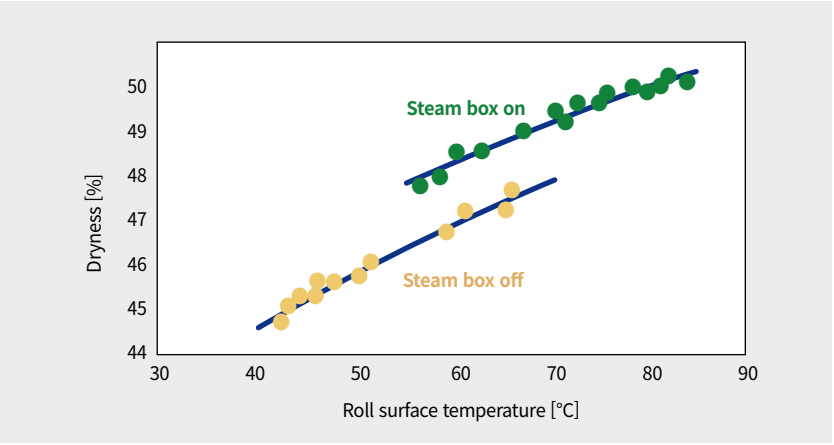
## 6. 압착부 효율증대 방안

### (1) 스팀박스 적용을 통한 탈수효율 증대

습지필의 온도는 압착탈수 효율에 큰 영향을 미친다. 습지필의 온도가 증가하면 물의 점도와 표면장력이 감소하며, 모세관력 역시 저하되므로 탈수가 촉진된다.

또한 온도가 높아질수록 펄프 섬유가 유연해지고, 세포내강에 존재하는 수분의 배출 효율이 증가하여, 습지필의 압착성이 향상된다. 이로 인해 지필은 보다 쉽게 압착되고, 결과적으로 압착탈수 효율이 증가된다. 이러한 습지필의 물성 변화는 압착탈수 후 프레스 닙을 통과한 습지필의 복원특성을 저하시키는 효과도 있다. 그 결과 압착 후 지필 구조의 팽창으로 인한 재흡수(rewetting) 현상을 감소시켜, 최종적으로 압착탈수 후의 지필건조도 상승에 기여한다. 이러한 효과를 얻기 위해 프레스 전단에 스팀박스를 설치하여 습지필의 온도를 상승시키는 방법이 사용되기도 한다(그림 09-36).

**그림 09-36.** 압착탈수공정에서 스팀박스의 적용에 따른 압착 롤 표면온도 변화와 그에 따른 탈수 후 습지필 건조도 변화

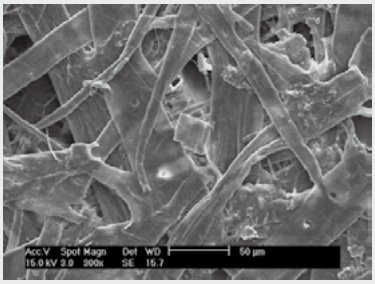



출처: Pressing. In Papermaking Science and Technology, Book 8. Fapet Oy / TAPPI.

### (2) 스페이서 적용을 통한 탈수효율 증대

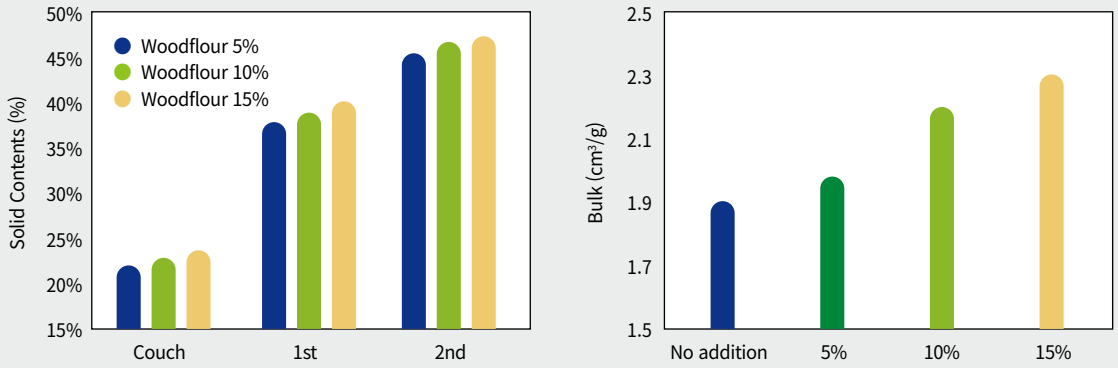
압착탈수 공정에서 습지필이 압착되어 고밀화되면 섬유 사이의 공극이 크게 감소한다. 특히 섬유장이 짧고 미세분이 많은 원료로 제조되는 지종에서 평량이 높은 경우, 습지필의 공극감소가 더욱 심하게 발생하여 탈수저항이 증가하고, 그 결과 압착탈수 효율이 크게 저하될 수 있다. 이러한 습지필 내 구조변화에 따른 탈수저항 증가를 해소하기 위한 방안으로, 습지필 내의 공극 형성을 촉진할 수 있는 스페이서 첨가제를 적용하는 기술이 활용되고 있다. 현재 종이제조에 적용되는 스페이서로는 흡수성이 낮은 목분을 들 수 있다. 그림 09-37에서 볼 수 있듯이 목재

그림 09-37. 목분 스페이서가 적용된 종이 내부구조



출처: Yoon, D. H. and Sung, Y. J., Methods for Improving the Applicability of Wood Powder Spacers to Liner Board Manufacturing, Journal of Korea TAPPI 47(4):160-167 (2015).

그림 09-38. 목분 스페이서 적용에 따른 압착탈수 시 탈수효율(탈수 후 건조도) 변화 및 벌크변화



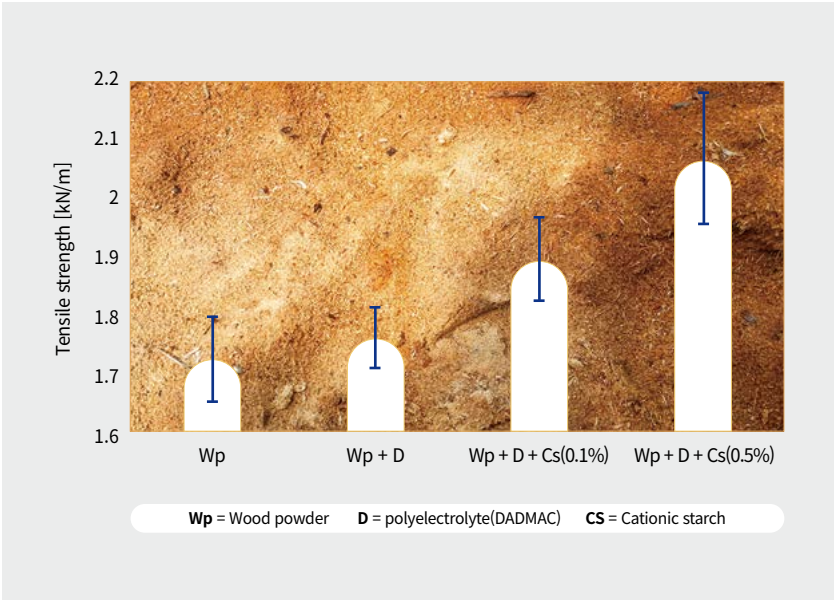

출처: Yoon, D. H. and Sung, Y. J., Methods for Improving the Applicability of Wood Powder Spacers to Liner Board Manufacturing, Journal of Korea TAPPI 47(4):160-167 (2015).

그림 09-39. 목분 스페이서 투입량 증가에 따른 제품 강도감소




출처: Yoon, D. H. and Sung, Y. J., Methods for Improving the Applicability of Wood Powder Spacers to Liner Board Manufacturing, Journal of Korea TAPPI 47(4):160-167 (2015).

그림 09-40. 목분 스페이서의 고분자전해질 및 양성전분 전처리를 통한 강도개선효과




출처: Yoon, D. H. and Sung, Y. J., Methods for Improving the Applicability of Wood Powder Spacers to Liner Board Manufacturing, Journal of Korea TAPPI 47(4):160-167 (2015).

펄프 섬유에 비해 상대적으로 크고 입상 형태를 가지는 목분 스페이서는 지필 내부에서 섬유 간 밀착을 방지하여 공극 구조를 형성시킴으로써 탈수와 건조효율을 증대시키는 효과와 제품의 벌크 향상 효과를 나타낸다[13].

골판지 원지의 생산 시 목분 스페이서의 적용에 따른 건조도 변화 및 종이벌크 변화를 측정해 보면 그림 09-39에서와 같이 목분 스페이서의 투입량에 따라 압착탈수 후 건조도와 벌크가 비례적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다.

이러한 입상의 목분 스페이서 적용은 목재 펄프 섬유 간 밀착을 방지하고 지필 공극을 향상시킴으로써 탈수효율 증대 및 벌크 증가를 가져오지만, 섬유 간 결합을 방해하여 강도 감소를 초래하는 단점이 있다(그림 09-39).

목분 스페이서 적용에 따른 제품 강도저하를 상쇄하기 위한 방안으로 목분 스페이서의 표면특성을 개선하는 방법을 적용할 수 있다. 이 방법에서는 목분 스페이서를 투입하기 전에 표면개질을 위한 고분자 전해질 처리를 실시하여, 본래 소수성 특성으로 인해 펄프 섬유와의 결합특성이 낮은 목분 스페이서의 표면특성을 개선한다. 특히 목분 스페이서와 결합이 용이한 고분자전해질을 먼저 처리한 후, 추가적으로 펄프섬유와의 결합효율이 좋은 양이온성 전분이 목분 표면에 부착되도록 처리한다. 이렇게 전처리된 목분 스페이서는 그림 09-40에서 나타난 바와 같

이 펄프섬유와 결합특성이 개선됨으로써 제품 강도의 향상을 가져오게 된다[14]. 압착부에서 압착탈수 효율 향상은 이후 건조공정의 부하를 감소시켜 건조효율을 높이고 건조에너지를 절감하는 효과를 가져올 수 있다. 이에 따라 전체 제지공정의 생산성 증대와 생산비용 절감에도 큰 영향을 미치게 된다. 특히 제지공정은 에너지 소비가 많은 산업적 특성을 가지며, 그중에서도 가장 많은 에너지가 사용되는 단계가 건조공정이다. 따라서 건조공정에서의 에너지 사용을 줄이는 것은 제지산업의 탄소배출 저감과 직결되는 매우 중요한 과제로 인식되고 있다. 이러한 관점에서 압착부에서 가능한 한 많은 수분을 기계적으로 제거하여 열에너지 의존도를 낮추는 것은 저탄소 공정 구현의 핵심 전략이라 할 수 있다. 현재는 스팀박스 적용, 스페이서 활용 등 다양한 기술을 통해 압착부의 탈수 효율을 지속적으로 향상시키고 있으나, 향후에는 더욱 혁신적인 장치 기술과 공정 최적화를 통해 저탄소·고효율 제지공정을 확립하는 것이 요구되고 있다.

## 참고문헌


[1] Wahlstrom, P. B., The mechanism of water removal in pressing. TAPPI Journal, 52(5), 831–837 (1969).

[2] Valmet 기술자료

[3] Page, D. H. . Water removal in pressing. In Handbook of Pulp and Paper Terminology, TAPPI Press (1989)

[4] Busker, L. H. (Ed.)., Pressing. In Papermaking Science and Technology, Book 8, Fapet Oy / TAPPI (2005)

[5] 박종문, 조병묵, 원종명, 김철환, 제 3판 펄프제지기술, 도서출판 서일 (2004)

[6] Tomi Hakala and Ali Harlin, Simmulation of a Rapid Nip Pressure Strike and Its Effect on Press Felt Samples, AUTEX Research Journal, Vol. 8, No3, (2008)

[7] MacGregor, M.A., “Wet Pressing Research in 1989, a Historical Perspective, Analysis and Commentary”, Fundamentals of Papermaking, Transactions of the Ninth Fundamental Research Symposium, Cambridge, 511–586 (1989).

[8] Paulapuro. H., Wet Pressing – Present Understanding and Future Challenges. In The science of papermaking, Trans. of the XIIth Fund. Res. Symp. Oxford, 2001, (C.F. Baker, ed.), pp 639–678, FRC, Manchester, (2018).

[9] Patterson, T.F., An investigation of factors affecting steam box heating effectiveness, TAPPI 2001 Engineering/Finishing & Converting Conference, TAPPI Press (2001)

[10] Mcdonald, D. J., Wet pressing and product quality: Review of previous pilot machine trials, TAPPI J. 19(7): 369 (2020)

[11] Mcdonald, ,J. D., Mcdonald, E. M. ,Kerekes, R. J., The impact of press felt design on paper machines press dewatering, ,Journal of Science & Technology for Forest Products and Processes: VOL.3, NO.2,52~57 (2013)

[12] Leiviskä, K. , Enhancement of Water Removal in the Press Section. Master’s Thesis, Lappeenranta University of Technology, Finland (2011).

[13] Kim, D. S., Yoon, D. H. and Sung, Y. J., The changes in drying efficiency and paper properties of linerboard by the application of the fractions of wood powder as a bulking agent, Journal of Korea TAPPI 46(5):61-68 (2014).

[14] Yoon, D. H. and Sung, Y. J., Methods for Improving the Applicability of Wood Powder Spacers to Liner Board Manufacturing, Journal of Korea TAPPI 47(4):160-167 (2015).



**이 중 명** 경북대학교 교수

**2022 – 현재** 경북대학교 산림소재공학 부교수
**2018 – 현재** KTAPPI 편집부위원장
**2021 – 2023** 경북대학교 농업생명과학대학 교무 부학장
**2017 – 2022** 경북대학교 임산공학 조교수
**2014 – 2017** 미국 FiberLean Technology Ltd. Technology Manager
**2012 – 2014** 영국 Imerys, Research and Application Manager
**2007 – 2012** 미국 노스캐롤라이나 주립대, Research Associate
**2002 – 2006** 미국 노스캐롤라이나 주립대, Ph.D.

jmylee@knu.ac.kr

# 10
# 건조부



품질과 에너지를 지키기 위한 건조부 설비 점검 (사진제공_무림P&P)

## 1. 건조공정 개요

건조공정은 초지공정과 압착공정을 거친 후 약 40~50%의 고형분을 갖는 습윤지필로부터 수분을 증발시켜 약 95% 고형분의 종이제품으로 만드는 공정이다[1]. 습윤지필의 고형분이 40~50%라는 것은 1 kg의 종이를 생산하기 위해 약 1.1~1.3 kg의 수분을 증발시켜야 함을 의미한다[1].

건조부로 도입되는 습윤지필의 수분 함량이 증가하면 증발되어야 할 수분의 양도 함께 증가한다. 이로 인해 건조부의 열부하가 커지고 생산성이 저하된다. 일반적으로 건조부 입구에서 지필의 건조도가 1% 증가하면 건조구간의 증기 소비량을 4~5% 감소시킬 수 있다[2]. 따라서 압착공정에서 가능한 한 많은 수분을 기계적으로 제거하여 습윤지필의 건조도를 높이는 것은 건조공정의 에너지 효율과 생산성을 향상시키는 데 매우 중요하다.

건조부로 이송된 습윤지필의 수분은 통상적으로 4~10개 그룹으로 나뉜 다중 실린더 건조부에서 증발, 건조된다. 증발된 수증기는 건조후드에 유입된 주변 공기와 함께 후드 팬을 통해 대기 중으로 배출된다. 실린더 건조기는 건조 실린더와 구동 장치, 스트레치 롤 및 건조 패브릭으로 구성된다. 각 건조 그룹 사이에는 속도 차이, 즉 드로우가 설정되어 지필에 장력을 발생시킨다. 이러한 장력 제어는 종이의 주름 발생을 방지하고 건조공정의 조업성(runnability)을 향상시킨다[1].

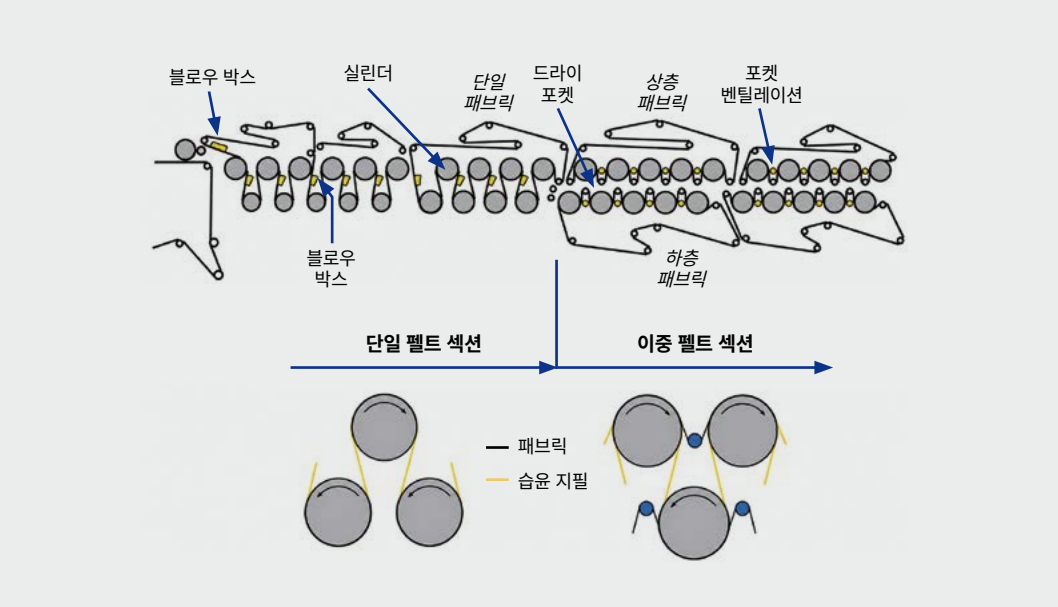
이외에도 다양한 지종을 효율적으로 건조하기 위해 임핀지먼트 건조(impingement drying), 적외선 건조(IR drying), 양키(Yankee) 실린더 건조 등 다양한 건조방법도 개발되어 활용되고 있다[3].

습윤지필의 건조방식은 최종 제품인 종이 및 판지의 종/횡방향 수분 프로파일, 표면 특성, 강도 특성, 신장률, 광택도 등 다양한 물성에 영향을 미친다.

건조공정은 제지 공정 중에서 사용되는 총에너지의 60% 이상을 사용하는 가장 에너지 소비량이 높은 공정이다. 또한 제지공정 설비 면적의 약 60%, 설비투자비의 40%를 차지하는 중요한 공정이다[4]. 그러나 건조공정에 대한 연구는 초지 및 압착공정에 비해 다소 미비한 실정이다. 그럼에도 불구하고, 열회수 시스템 효율화, 첨단 건조방법 개발, 환기방법의 최적화, 건조 실린더의 증기 및 응축수 제거 최적화를 통하여 에너지 효율을 높이고, 강도, 신축성 등의 제품 특성에 영향을 미치지 않는 범위에서 생산속도를 증가시키는 것이 중요하다.

통상적으로 종이와 판지의 건조를 위해서는 접촉식 실린더 건조가 사용된다. 가

그림 10-01. 단일 패브릭 방식과 이중 패브릭 방식으로 구성된 건조부




출처: Meadows, D.G., Stora inaugurates PM2 at Port Hawkesbury, Tappi J., 81(7), 1998

장 일반적인 실린더 건조방식은 단층 혹은 복층으로 배열된 건조 실린더를 이용하는 방법이다(그림 10-01)[1]. 건조 실린더에는 고압증기를 공급하여 가열한다. 압착부에서 건조부로 습윤지필을 보내기 위해서는 지필 이송장치를 이용하여 드로우를 낮게 유지함으로써 지절을 방지한다. 지필은 건조부 초입부터 완벽하게 지지된다. 진공롤과 지필을 패브릭 표면에 유지시키는 블로우 박스를 활용하여 지필의 폭방향 수축도 감소시킨다. 지필은 단일 펠트 섹션 전구간에서 지속적으로 패브릭에 의해 지지되어 오픈 드로우가 없기 때문에 건조부에서의 지절 발생은 매우 적다.

## 2. 실린더 건조부

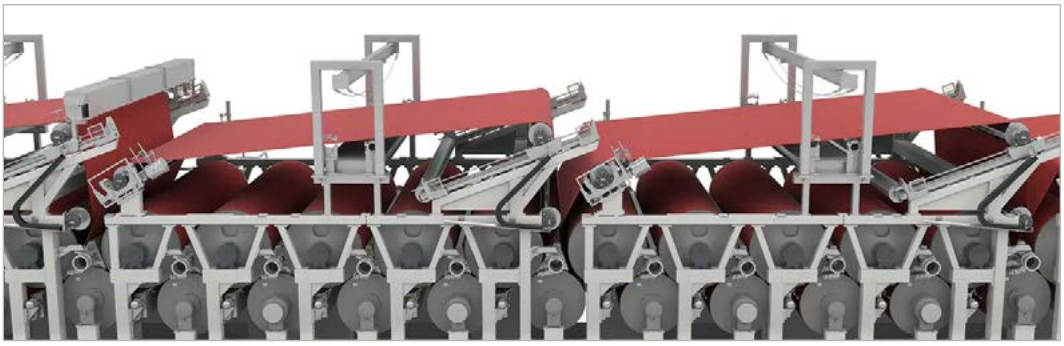
### (1) 개요

일반적으로 습윤지필은 다중 실린더 건조기로 건조된다[1]. 그림 10-02는 실린더 건조부의 한 예를 보여준다. 그림 10-02에서 보는 바와 같이 가열증기가 공급되

는 가열 실린더와 지필의 이송을 돕는 진공 롤이 교호로 배치되어 있다. 그림 10-02의 상부 실린더는 가열 실린더를 나타내고, 하부 롤은 지필 이송을 위한 진공 롤을 나타낸다. 지필은 건조 패브릭과 함께 상부 실린더와 하부 롤을 감싸면서 이송된다. 상부의 가열 실린더에는 습윤지필이 직접 접촉한다. 반면 하부 진공 롤의 표면에는 건조 패브릭의 외부에서 지필이 이송된다.

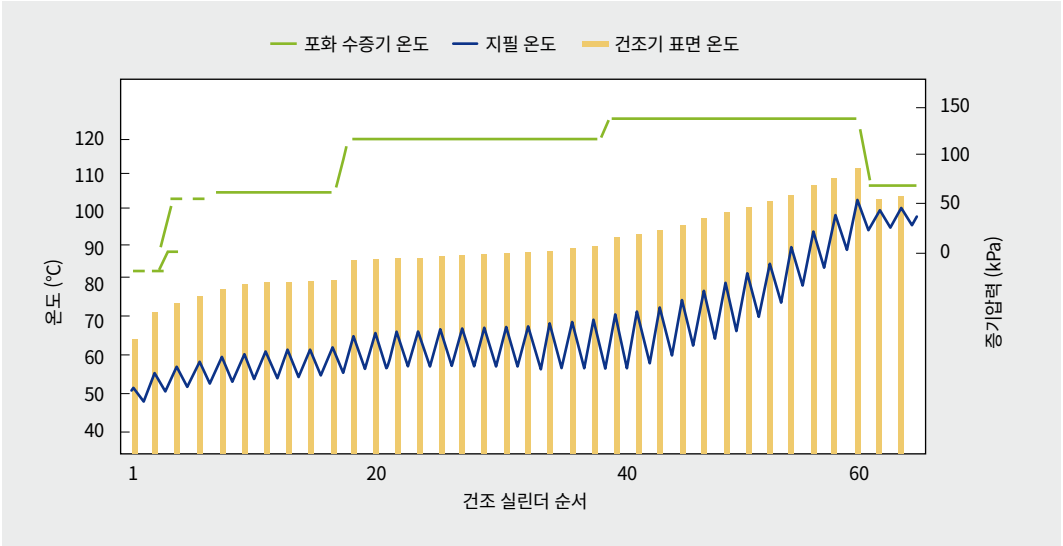
지필에서 수분을 증발시키는데 필요한 열은 실린더 내에서 응축되는 고압과열 증기로부터 공급된다. 실린더 내부로 공급된 증기는 응축 과정에서 잠열을 방출하며, 이 열은 실린더 벽을 통해 지필로 전달된다. 실린더로 공급되는 증기의 압력

**그림 10-02.** 다중 실린더 건조부 모식도



출처: https://www.valmet.com/insights/articles/packaging-and-paper/closer-is-better—the-valmet-compact-dryer-concept/

**도표 10-01.** 실린더 건조부의 수증기압, 실린더 표면 및 지필 온도 변화




출처: https://www.valmet.com/globalassets/media/downloads/white-papers/drying-and-air-systems/wpd_process.pdf

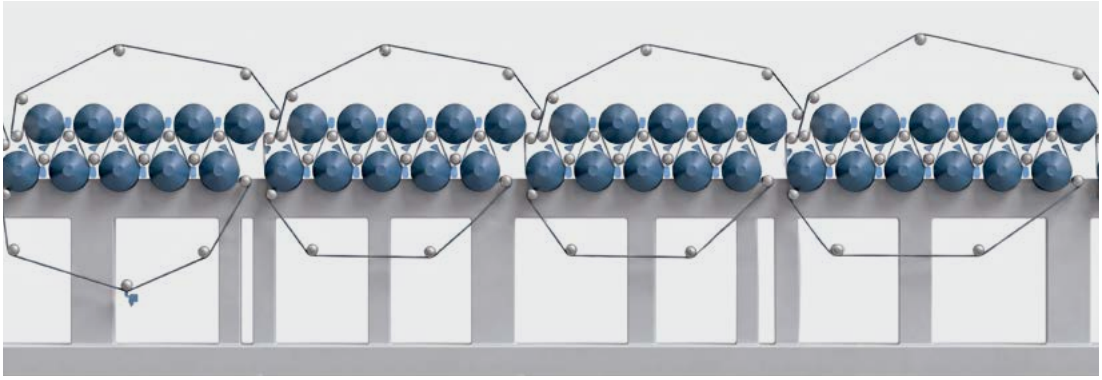
은 도표 10-01과 같이 각 그룹마다 다르다. 일반적으로 건조부의 후반으로 갈수록 증기압을 높여 실린더 온도를 상승시키고, 건조부의 마지막 부분에서는 다시 낮은 온도가 되도록 한다. 건조부 초반의 실린더 온도가 너무 높으면 지필이 실린더 표면에 달라붙는 현상이 발생하여 종이에 보푸라기가 생기기 쉽다. 건조 실린더 내의 증기압 변화에 따라 실린더 표면온도도 달라진다. 건조부 후반에서는 지필의 수분 함량이 낮으므로 증발잠열에 의한 냉각효과가 사라져 실린더 표면 온도가 높아진다. 반면 건조부 전반에서는 습윤 지필이 예열됨에 따라 실린더의 표면 온도가 상승한다. 지필의 온도는 상부 실린더와 접촉하면서 상승하기 시작하고, 상부 실린더에서 분리되면 낮아지는 변화를 반복한다.

일반적으로 실린더 건조부에서의 비증발률은 지필이 건조부에 도입되면 증가하기 시작하여 최대 증발률에 도달한 다음 다시 감소한다[4]. 그 과정에서 지필의 건조도는 지속적으로 상승하여 최종 건조도는 95%에 도달한다.

### (2) 건조부의 구성

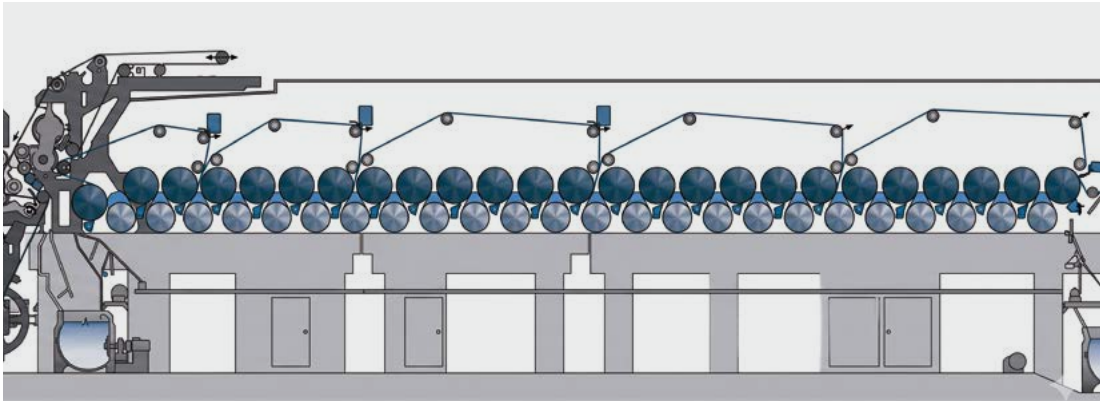
실린더 건조부는 독립구동장치와 건조 패브릭을 갖춘 4~10개의 실린더 그룹으로 구성된다[1]. 실린더 건조부는 상부와 하부의 두 개의 패브릭을 갖춘 이중 패브릭 방식(그림 10-03), 상하부를 하나의 패브릭으로 운전하는 단일 패브릭 방식(그림 10-04), 이중 패브릭과 단일 패브릭 방식을 모두 채용한 방식(그림 10-05)의 세 방식이 있다. 건조 패브릭은 지필과 함께 움직이면서 지필을 가열된 건조

**그림 10-03.** 이중 패브릭 방식의 건조부



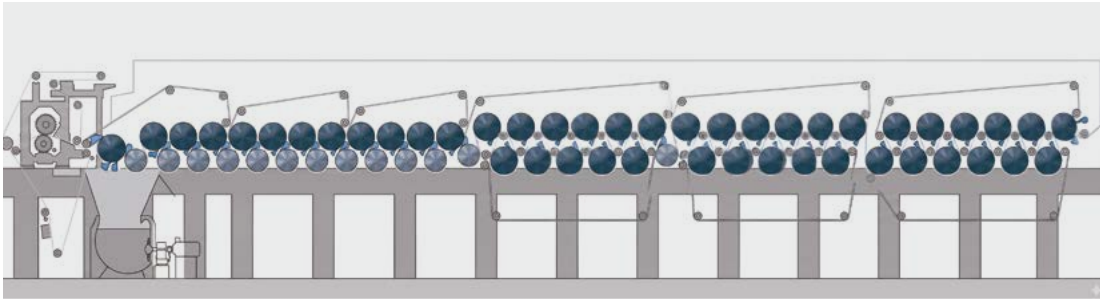
출처: https://www.valmet.com/packaging-and-paper/board-and-paper-machines/cylinder-drying/optirun-cylinder-drying/

그림 10-04. 단일 패브릭 방식의 건조부



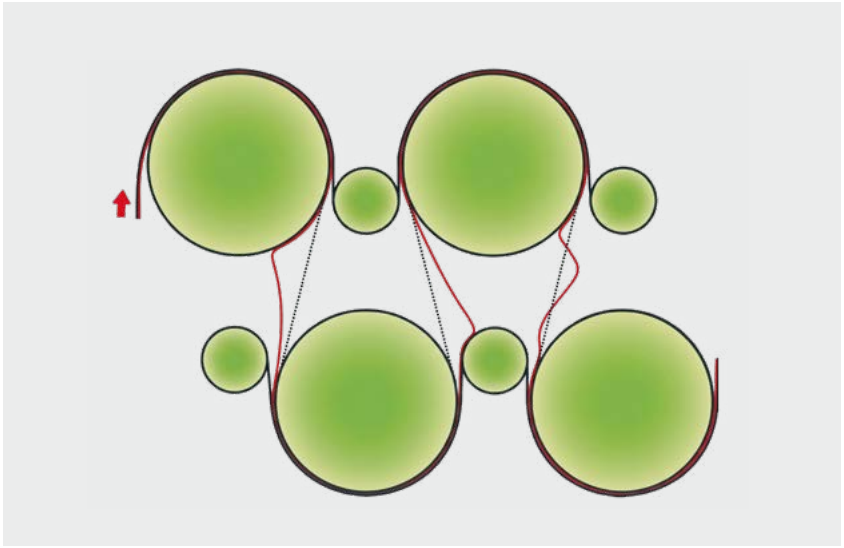
출처: https://www.valmet.com/packaging-and-paper/board-and-paper-machines/cylinder-drying/optirun-cylinder-drying/

그림 10-05. 단일 패브릭과 이중 패브릭 방식을 활용한 건조부



출처: https://www.valmet.com/packaging-and-paper/board-and-paper-machines/cylinder-drying/optirun-cylinder-drying/

그림 10-06. 이중 패브릭 건조부의 지필 거동



출처: Modified from Watanabe et al, An experimental study of paper flutter, Journal of fluids and structures, 16(4), 2002

실린더에 잘 접촉하도록 한다. 단일 패브릭 방식의 경우 하나의 건조 패브릭이 지필을 항상 지지하기 때문에 고속 운전이 가능하며, 건조 실린더 사이에서 지필의 떨림도 방지된다. 반면 이중 패브릭 건조 방식에서는 상부와 하부에 각각 설치된 두 장의 패브릭이 사용되며, 상·하부의 모든 건조 실린더가 고압 증기에 의해 가열된다. 각 실린더 그룹에는 상부와 하부 실린더에 지필을 밀착시켜 이송하기 위한 두 장의 패브릭이 사용되므로 이 방식을 이중 패브릭 방식이라 한다. 이 경우 지필의 양면이 교대로 가열 실린더와 접촉하게 되어 건조 효율이 높고 종이의 양면성을 줄일 수 있는 장점이 있다. 그러나 상부 실린더에서 하부 실린더로 지필이 이송되는 구간에서는 지필이 패브릭에 의해 지지되지 않는 오픈 드로우 상태가 발생한다. 이러한 구간에서는 지필이 가열 실린더나 펠트 롤에서 원활하게 분리되지 않거나, 주변 순환 공기에 의해 지필이 흔들리는 현상이 발생할 수 있어 주행 안정성이 저하될 수 있다(그림 10-06). 이와 같은 이유로 이중 패브릭 건조 방식에서는 운전 속도가 제한되며, 일반적으로 최대 약 1,200 m/min 정도의 운전 속도가 가능하다[1, 6, 7].

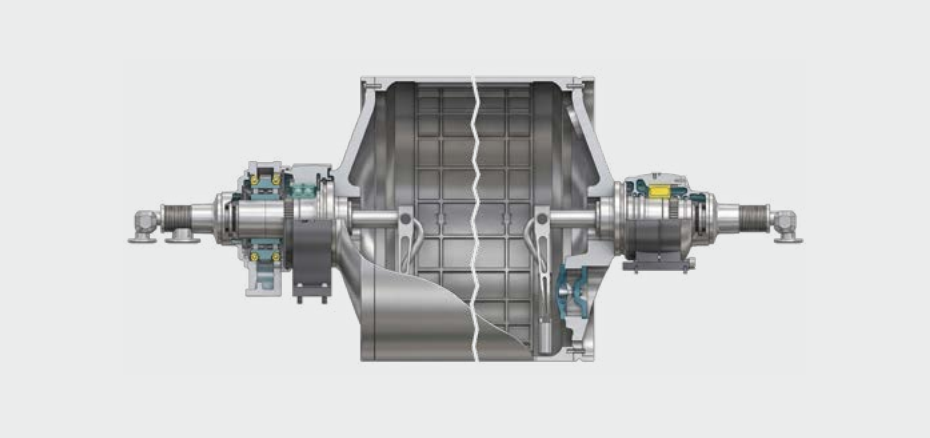
단일 패브릭 방식의 건조부에서는 가열 실린더가 상부 또는 하부 중 한쪽에만 배치되고, 반대쪽에는 비가열 진공 롤이 설치된다(그림 10-04). 진공 롤은 가열 기능을 갖지 않으며, 주로  지필의 이송과 지지를 담당한다. 이 방식에서는 지필이 건조 패브릭에 의해 항상 지지된 상태로 이동하기 때문에 지필의 주행 안정성이 크게 향상된다. 그 결과 초지 속도 1,000~1,600 m/min 수준의 고속 운전이 가능하다. 또한 지절이 발생할 경우 지필이 아래쪽으로 떨어지기 때문에, 이중 패브릭 방식에 비해 파지 처리와 재가동이 훨씬 용이하다는 장점이 있다. 단일 패브릭 건조부는 구조가 비교적 컴팩트하게 설계될 수 있으며, 실린더 표면에서 지필의 감김각(wrap angle)이 증가하여 열전달 면적이 확대되고 건조 용량이 향상된다. 특히 건조부 초입에서는 지필의 강도가 낮아 주행 안정성이 매우 중요하다. 이러한 이유로 이중 패브릭 건조부를 사용하는 경우에도 건조부의 초입 구간에는 단일 패브릭 구조를 적용하는 경우가 많다(그림 10-05)[1, 6, 7].

### (3) 건조 실린더

건조 실린더는 원통형 구조로 되어 있으며, 일반적으로 주철로 제작된다. 실린더 내부에는 고압 증기가 공급되어 실린더를 가열하며, 증기는 실린더 한쪽 중심부

에 설치된 관을 통해 내부로 유입된다(그림 10-07). 공급된 증기는 실린더 내부에서 응축되며, 이 과정에서 방출되는 잠열이 실린더 벽을 통해 표면으로 전달되어 지필의 수분을 증발시킨다. 증기의 응축 과정에서 지속적으로 응축수가 발생하므로, 이를 제거하기 위해 실린더 내부에는 사이펀(siphon)이 설치되어 있다. 응축수는 실린더 중심부에 설치된 배출관을 통해 외부로 배출되며, 일반적으로 응축수 배출구는 증기 도입부의 반대쪽에 위치한다[1, 6, 7].

**그림 10-07.** 건조 실린더의 구조



출처: https://www.valmet.com/globalassets/media/downloads/white-papers/drying-and-air-systems/wpd_savingsintheair.pdf

**그림 10-08.** 건조 실린더 내의 응축수의 유동 모드 및 실린더 회전속도에 따른 응축수의 성상변화




출처: https://www.valmet.com/insights/articles/up-and-running/performance/RTSC2/

초지 속도가 낮은 경우에는 그림 10-08과 같이 응축수가 실린더 내부 바닥에 고인 상태로 운전된다. 그러나 초지 속도가 증가하면 원심력에 의해 응축수가 실린더 내벽에 얇은 층을 이루며 회전하게 되는데, 이를 응축수 환(condensate ring) 또는 리밍(rimming)이라 한다. 이때 형성되는 응축수 층의 두께는 일반적으로 약 2.2~5.5 mm 정도이다. 현대의 고속 초지기는 대부분 이러한 리밍이 발생하는 속도 영역에서 운전된다[1, 6, 7].

응축수 환이 제거되지 않으면 실린더 내부에서 지필로 전달되는 열전달이 크게 저하될 뿐 아니라, 응축수의 질량 증가로 인해 실린더의 회전 부하가 커져 구동 효율이 저하될 수 있다. 특히 고속 초지기에서는 원심력에 의해 응축수가 실린더 내벽에 거의 고정된 상태로 실린더와 함께 회전하기 때문에 응축수 제거가 더욱 어려워진다. 이를 해결하기 위해 사이펀에 작은 구멍을 설치하여 일부 고압 증기가 유출되도록 하는 방법이 사용된다. 이렇게 유출되는 증기는 응축수를 작은 물방울 형태로 분산시키며, 사이펀을 통해 함께 배출되도록 한다[1, 6, 7].

또한 리밍 현상이 발생하면 응축수 층이 실린더 내벽에 거의 고정된 상태로 회전하여 열전달이 저하될 수 있다. 이러한 문제를 개선하기 위해 실린더 내부에 드라이어 바(dryer bar)(그림 10-11)를 설치하여 응축수 층에 흐름을 유도함으로써 열전달 효율을 향상시키기도 한다.

### (4) 지필 주행성

건조부에서는 수분 증발과 함께 공기의 유동이 활발하게 발생하므로 지필의 주행 안정성을 확보하는 것이 매우 중요하다. 단일 패브릭 방식에서는 지필이 항상 건조 패브릭과 함께 이동하면서 지지되기 때문에, 이중 패브릭 방식에 비해 주행 안정성이 우수하다[6].

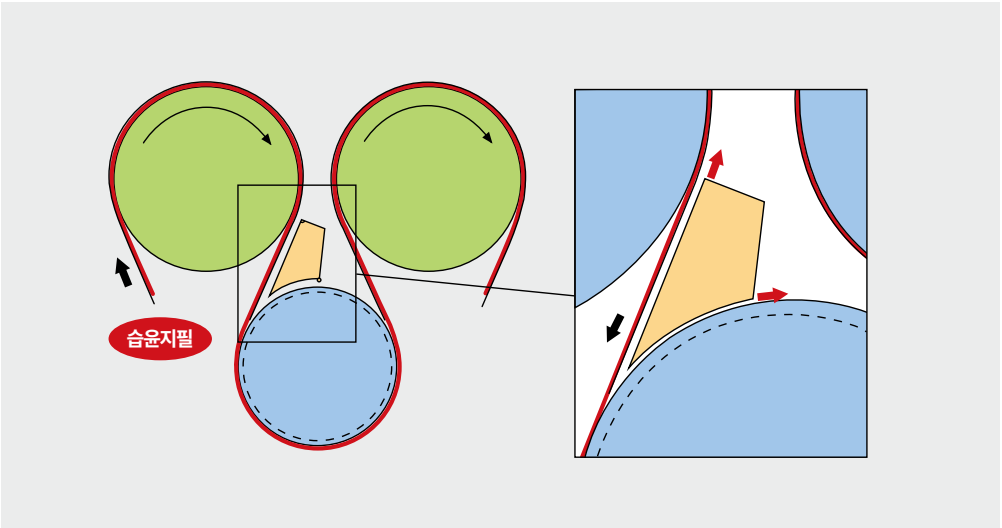
일반적으로 초지 속도가 증가하면 주름, 지필 떨림, 지절 등의 문제가 발생하기 쉽다. 따라서 고속 초지 공정의 건조부에서는 실린더와 지필 표면 부근에서 운동 방향으로 형성되는 공기 흐름을 적절히 제어하는 것이 중요하다. 실린더 건조부에서는 실린더, 롤, 패브릭, 지필 등 모든 회전 및 이동 요소가 주변 공기의 흐름을 유발한다. 이러한 기류는 압력 차이를 형성하여 지필에 추가적인 응력을 가할 수 있으며, 기류가 구조물에 부딪히면 횡방향 기류가 발생한다. 건조부 내부에서 형성되는 이러한 공기 흐름과 압력 변동은 지필 떨림(fluttering)을 유발하는 주요

원인이 된다(그림 10-06)[1, 6, 7].

지필의 떨림을 억제하고 주행 안정성을 향상시키기 위해서는 적절한 건조 패브릭의 선택과 함께 블로우 박스(blow box)와 같은 보조 장치를 활용할 수 있다(그림 10-09). 블로우 박스는 송풍을 통해 지필을 지지하는 음압을 생성시킴으로써 지필의 주행성을 향상시키는 장치이다[1, 6, 7].

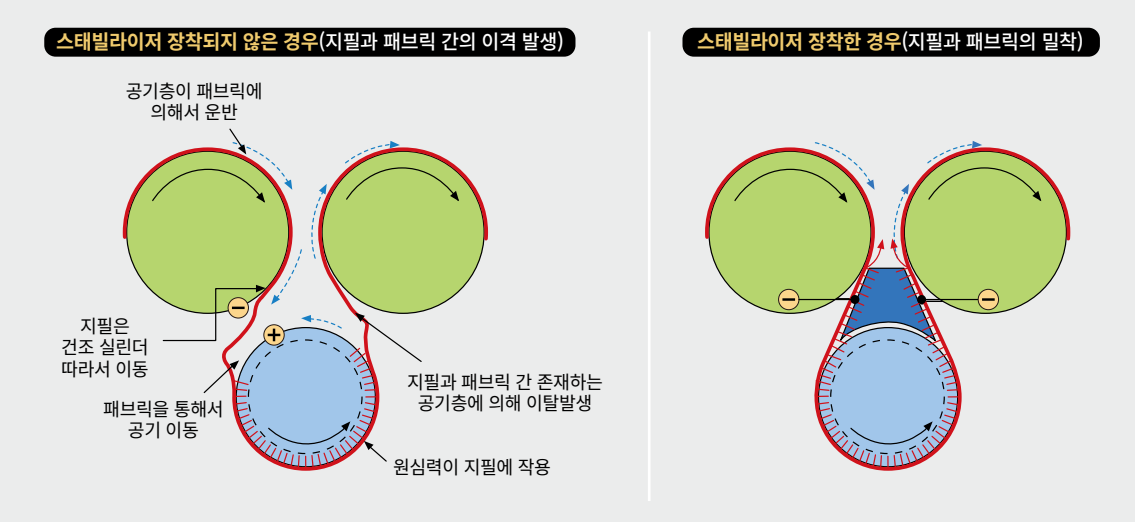
단일 패브릭 건조 시스템이 개발되어 지필의 주행 안정성이 현격히 개선됨에 따라 초지속도를 증가시킬 수 있었지만 이 경우에도 지필과 패브릭이 하부 롤을 감싸고 돌 때 지필이 패브릭의 외부에 위치한 상태에서 원심력을 받게 되므로 늘어지는 처짐 현상이 발생한다(그림10-10). 또한, 하부 롤과 패브릭이 만나는 지점에서는 공간이 협소해지는 관계로 패브릭 쪽의 기압이 높아진다. 이로 인해 지필이 패브릭에서 분리되는 페이퍼 백(paper bag) 현상이 발생할 수 있다. 이 페이퍼 백 현상이 나타나면 지필이 다음 상부 닙으로 전이될 때 주름이 발생한다. 이러한 지필주행성 문제를 해결하기 위해 패브릭과 하부 롤이 만나기 직전 강한 공기를 패브릭 진행방향의 반대쪽으로 불어 음압을 생성시키는 블로우 박스(blow box) 혹은 스태빌라이저(stabilizer)를 설치하여 지필과 패브릭의 분리 현상을 방지한다(그림 10-10). 하부 롤 표면에는 기계방향으로 홈을 파서 전체 하단 롤 표면에 음압이 확장되도록 한다. 이렇게 지필을 패브릭 표면에 고정되도록 하면 고속 주행에서도 지필주행성을 높일 수 있다[1, 6, 7].

그림 10-09. 블로우 박스 원리




출처: Modified from Ghosh, A.K., Fundamentals of paper drying – theory and application from industrial perspective, www.Intechopen.com, 2011

그림 10-10. 지필안정화 장치에 의한 지필 주행성 개선

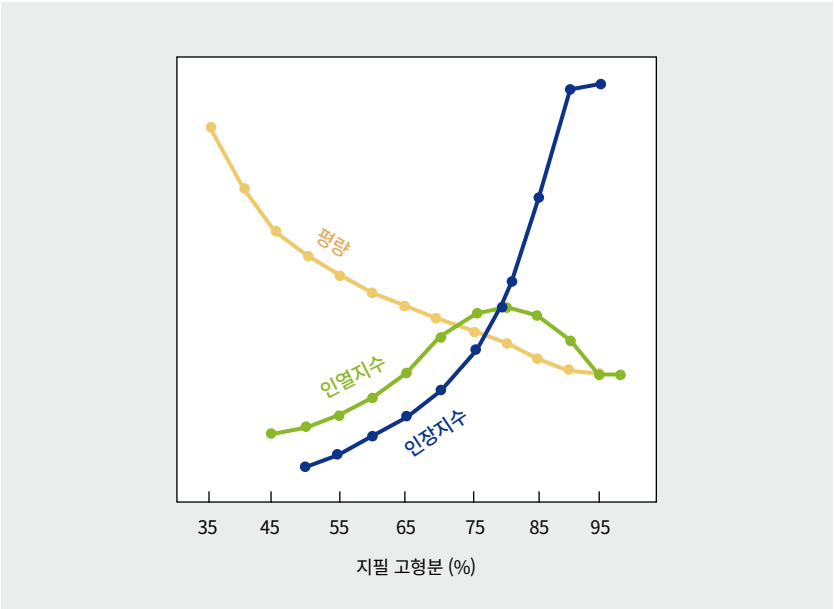



출처: Modified from Ghosh, A.K., Fundamentals of paper drying – theory and application from industrial perspective, www.Intechopen.com, 2011
Modified from https://www.linkedin.com/pulse/increased-paper-machine-efficiency-through-good-adj-prof-dr-nenad

## 3. 건조와 종이품질

건조부의 운전 조건은 생산되는 종이의 품질에 중요한 영향을 미친다[3, 4]. 예를 들어 건조 초기 단계에서 습윤지필이 과도하게 높은 온도에 노출되면 섬유가 연화되어 섬유 간 결합이 강화되며, 그 결과 종이의 인장강도와 밀도는 증가하는 경향을 보인다. 반면 투기성과 광산란계수는 감소하는 경향이 나타난다. 그러나 건조 초기에 실린더 온도가 지나치게 높을 경우 섬유가 실린더 표면에 달라붙는 현상이 발생할 수 있으며, 이로 인해 종이 표면의 거칠음도가 증가하는 문제가 나타날 수 있다. 이러한 현상을 방지하기 위해 건조부 초입에 위치한 실린더의 온도는 비교적 낮게 설정하여 운전한다. 특히 첫 번째 건조 실린더는 별도의 제어 장치에 연결하여 증기 압력과 실린더 온도를 정밀하게 조절할 수 있도록 하는 경우가 많다[7]. 지필의 건조도가 50~60%보다 낮으면 섬유 간 수소결합이 발생하지 않기 때문에 습윤지필의 강도는 주로 섬유 간 마찰력과 물의 표면장력에 의한 결합력에 의존한다. 건조도가 60% 이상으로 증가하면 섬유 간 수소결합이 형성되기 시작하여 제반 강도가 현저히 증가되어 특정 수분 함량에서 최대값에 도달한다(도표 10-02)[6]. 일반적으로 인열강도와 파열강도는 약 80~85%의 건조도에서 최대값을 나타낸다[3]. 이는 완전히 건조된 종이보다는 수분을 다소 함유하고 있는 종이가 더 우수한 조업성을 나타낸다는 의미이다.

도표 10-02. 고형분에 따른 평량 및 종이강도 변화




출처: 저자 자료

습윤지필은 자유건조(free drying)되면 수축한다(도표 10-03). 하지만 초지기 상에서 지필은 기계방향으로 인장된 상태로 지필이 주행하고, 건조 패브릭에 의해 또 지필과 실린더 표면 간의 마찰에 의해 폭방향 수축이 억제된 상태로 건조되기 때문에 자유건조 시와는 다른 양상을 보인다. 예를 들면 초지기 상에서 기계방향으로 인장된 상태에서 건조된 지필의 기계방향 인장강도는 증가하지만 기계방향 신장률은 감소한다. 또 초지기 상에서 생산되는 종이는 기계방향으로 섬유가 배향되기 때문에 방향성이 없는 수초지와는 달리 이방성을 갖는다. 펄프섬유는 섬유방향으로 1~2%, 폭방향으로 20~30%의 수축률을 보인다[5, 8].

기계방향으로 섬유가 주로 배향된 종이는 폭방향이 기계방향에 비해 3배 정도 많이 수축하고, 수축율은 건조도가 60~85% 때 가장 크게 나타난다. 고광택지, 경량도공지, 신문용지 등 인쇄용지는 인쇄적성 향상을 위해 건조 수축 최소화가 필요하다. 크라프지 및 판지의 경우에도 적정한 강도특성을 위해 건조수축 제어가 필요하다.

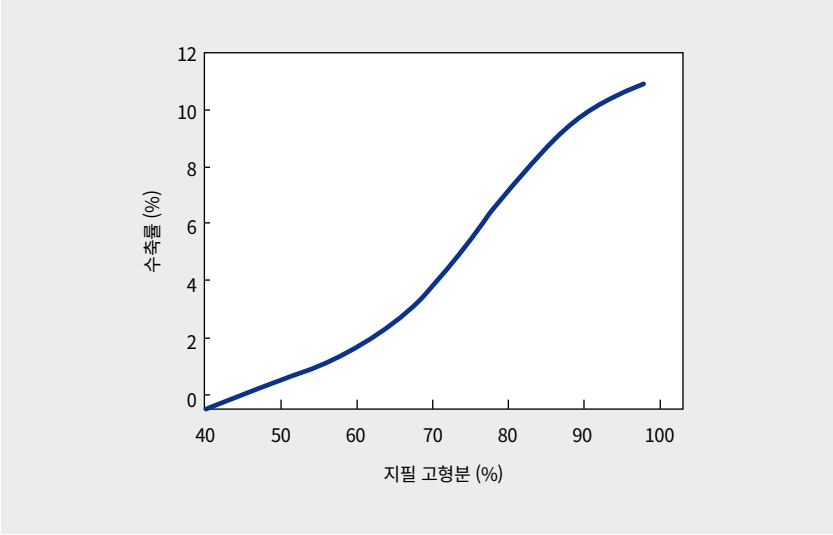
지필이 건조되는 과정에서 발생하는 수축은 섬유 간 거리의 감소와 섬유 자체의 수축에 의해 발생한다. 따라서 습윤지필의 수축은 크게 섬유 간 수축과 섬유 내 수축으로 구분할 수 있다[8].

지필의 함수율이 섬유포화점 이상인 경우에는 섬유 간 수축이 주로 발생한다. 이

영역에서는 섬유 사이에 자유수가 존재하므로 섬유 자체의 수축이나 섬유 간 수소 결합 형성은 거의 일어나지 않는다. 그러나 섬유 사이의 물에서 발생하는 표면장력은 인접한 섬유를 서로 끌어당기는 힘으로 작용하여 섬유 간 거리를 감소시킨다. 또한 지필을 구성하는 섬유는 압착공정을 거치면서 평편화된 형태로 변형되어 있기 때문에 섬유 사이에서 작용하는 표면장력은 두께 방향으로 가장 크게 작용한다. 그 결과 지필의 건조 과정에서는 두께 방향에서 가장 큰 수축이 발생하는 경향을 보인다.

지필의 함수율이 섬유포화점 이하로 감소하면 섬유 내 수축이 시작된다. 제지공정에서 섬유는 폭방향보다 기계방향으로 더 많이 배향되므로 종이는 기계방향보다 폭방향으로 더 많이 수축한다. 섬유와 지필의 건조 수축률은 상호 연관성을 갖는다. 섬유가 교차한 부위에서 섬유 간 결합이 형성된 이후 건조가 지속되면 결합된 섬유는 폭방향으로 더 많이 수축한다. 섬유 폭방향 수축은 맞닿아 결합된 다른 섬유의 섬유 축방향 수축을 증가시킨다. 즉 상부 섬유의 폭방향 수축이 하부 섬유의 축방향 변형을 유발한다. 이 과정에서 상부섬유의 수축은 억제되지만 하부 섬유의 축방향 수축은 증대된다. 그 결과 인접한 두 섬유의 결합부위에 작은 주름형태의 변형 즉, 마이크로 컴프레션(microcompression)이 발생된다. 고해 공정은 섬유 간 결합면적을 증가시키기 때문에 건조 시 발생하는 마이크로 컴프레션도

**도표 10-03** 자유 건조(freely dried) 지필의 수축율




출처: 저자 자료

증가시킨다. 건조과정 중에 지필의 수축을 억제시키게 되면 건조수축을 감소시킬 수 있으며, 결과적으로 마이크로 컴프레션도 감소된다[8, 9].

건조 중 지필의 수축방지는 종이의 치수안정성 향상, 강성증가, 인장강도 증가, 신장률감소 등의 변화를 일으킨다. 건조 수축을 제한하는 억제건조를 실시하면 인장강도가 일정 수준까지 증가하지만 과도한 억제건조가 시행될 경우 섬유 간 결합이 파괴되어 인장강도가 오히려 감소한다. 지필의 건조가 기계방향과 폭방향으로 혹은 국부적으로 불균일하게 진행되면 지필 내에 불균일한 응력을 발생시킬 뿐 아니라 불균일한 치수변화로 인해 지필에 웨이브, 주름, 코클(cockle) 등이 발생된다[3, 8].

종이는 건조과정을 거치면서 표면 거칠음도 증가와 컬 발생과 같은 품질 문제가 야기될 수 있으므로 세심한 주의가 필요하다. 표면 거칠음도 변화는 기계펄프를 함유한 인쇄용지의 경우 주로 발생한다. 이는 높은 건조온도로 인해 발생하는 섬유의 유연화 현상에 기인하는 경우가 많다. 건조부 초입에 위치한 건조 실린더의 온도가 지나치게 높으면 지필이 실린더 표면에 달라붙는 현상이 발생되는데, 이러한 지필이 실린더에서 분리될 때 지필을 구성하는 섬유가 수직으로 일어서는 보풀현상이 발생하여 종이 표면을 거칠게 변화시킨다. 사용된 사이즈제와 약품에 따라서 이러한 지필의 점착현상은 더욱 심해지기도 한다[8, 9].

종이가 일정한 방향으로 둥글게 말리는 현상을 컬링(curling)이라 한다. 컬의 축은 주로 섬유배향성에 의해 결정되지만 컬링되는 방향은 종이 양면의 함수율 차이에 기인하는 경우가 많다. 특히 마지막 건조 실린더의 온도가 제품의 컬링 현상에 큰 영향을 미친다. 따라서, 권취기 직전 건조 실린더의 온도를 제어하거나 추가적인 습윤장치를 설치하여 컬을 경감시키기도 한다[8, 9].

## 4. 열전달과 포켓 환기

### (1) 건조 실린더와 열전달

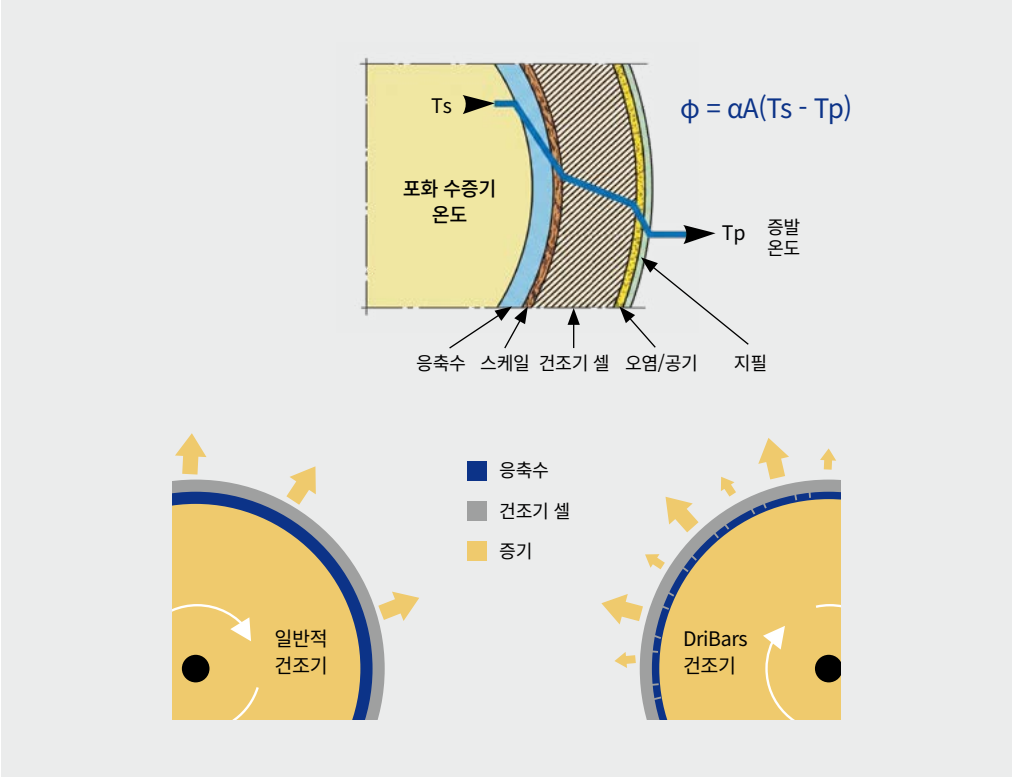
건조효율은 다양한 공정 인자의 영향을 받는다. 여기에는 건조 실린더의 온도와 속도, 실린더와 지필의 접촉에 의한 가열시간, 지필의 건조도, 펄프 종류, 등급 및 평량, 열 전달계수, 포켓의 공기습도 및 온도 등이 있다[3, 4].

증기가 응축되면 잠열(latent heat)이 방출된다. 건조 실린더 내부의 증기에서 지필로 전달되는 열류(heat flow)는 열전달계수, 실린더와 지필 사이의 접촉 면적, 그리고 두 매질 간의 온도 차이에 의해 결정된다(그림 10-11)[1, 5, 6].

실제로 열전달이 이루어지는 면적 A는 실린더 표면과 지필이 접촉하는 면적에 의해 결정된다. 또한 Ts(포화증기 온도)와 Tp(지필 온도)는 공정 조건에 따라 달라지는 변수이다. 포화증기 온도 Ts는 실린더 내부로 공급되는 증기의 압력에 의해 결정되며, 증기 압력이 증가할수록 실린더 내부 온도가 상승하여 열류 역시 증가하게 된다[1, 5, 6].

열전달 효율은 총괄 열전달계수(overall heat transfer coefficient) α로 표현되며, 이는 전체 열저항의 역수로 정의된다. 실린더 내부의 증기로부터 지필까지 전달되는 열류는 여러 층에서 발생하는 열저항(thermal resistance)의 영향을 받는다. 이러한 열저항에는 실린더 내부의 응축수층, 녹 및 스케일, 실린더 본체 금속층, 그리고 실린더 표면과 지필 사이에 존재하는 먼지나 공기층 등이 포함된다.

**그림 10-11.** 건조 실린더 내부에서 지필로의 열전달 및 드라이어 바에 의한 응축수 층의 열전달 증진 효과




출처: https://www.dryercylinder.com/technology/
https://www.valmet.com/globalassets/media/downloads/white-papers/drying-and-air-

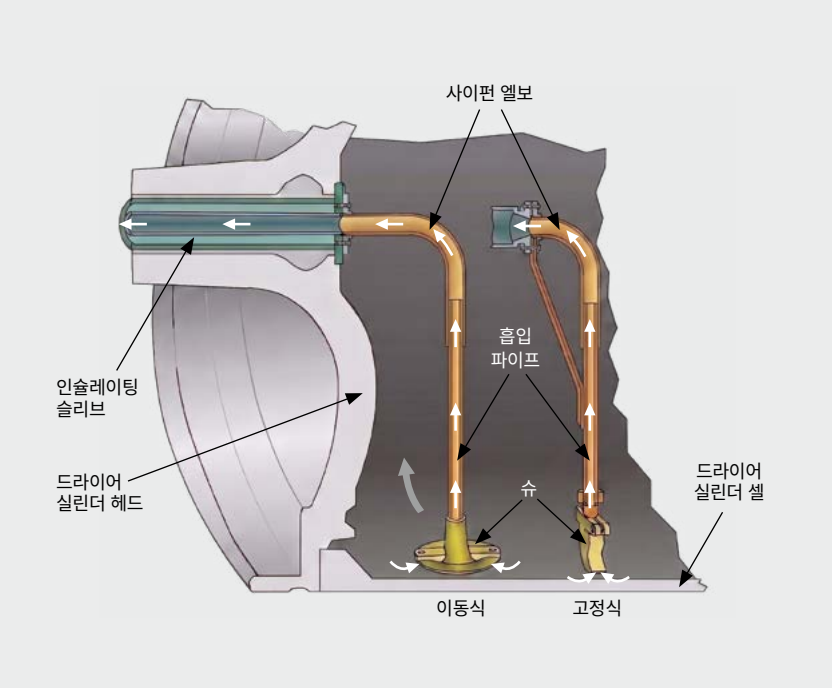
각 층은 서로 다른 열저항 특성을 가지며, 이들이 합쳐져 전체 열전달 효율을 결정하게 된다[1, 5, 6, 7].

주철로 제작된 건조 실린더 자체의 열저항은 비교적 낮은 편이지만, 응축수층은 매우 높은 열저항을 나타낸다. 예를 들어 두께가 1 cm인 응축수층은 동일한 두께의 주철에 비해 약 70배 정도 높은 열저항을 나타낸다. 따라서 지필로 전달되는 열류를 최대화하기 위해서는 열저항이 큰 층의 두께를 최소화하는 것이 중요하다[1, 5, 6, 7].

실린더와 지필 사이의 총괄 열전달계수 α는 실린더 외부 표면을 청결하게 유지하고 지필과 실린더의 접촉 상태를 양호하게 함으로써 향상시킬 수 있다. 예를 들어 건조 패브릭의 장력을 약 4 kN/m까지 증가시키면 지필과 실린더 사이의 접촉이 개선되어 열전달이 향상된다. 또한 실린더 내부에서 발생하는 응축수에 흐름을 유도하면 대류에 의한 열전달이 증가하게 된다. 이를 위해 건조 실린더 내부에는 드라이어 바(dryer bar)를 설치하여 응축수층에 흐름을 형성하도록 한다[1, 5, 6, 7] (그림 10-11).

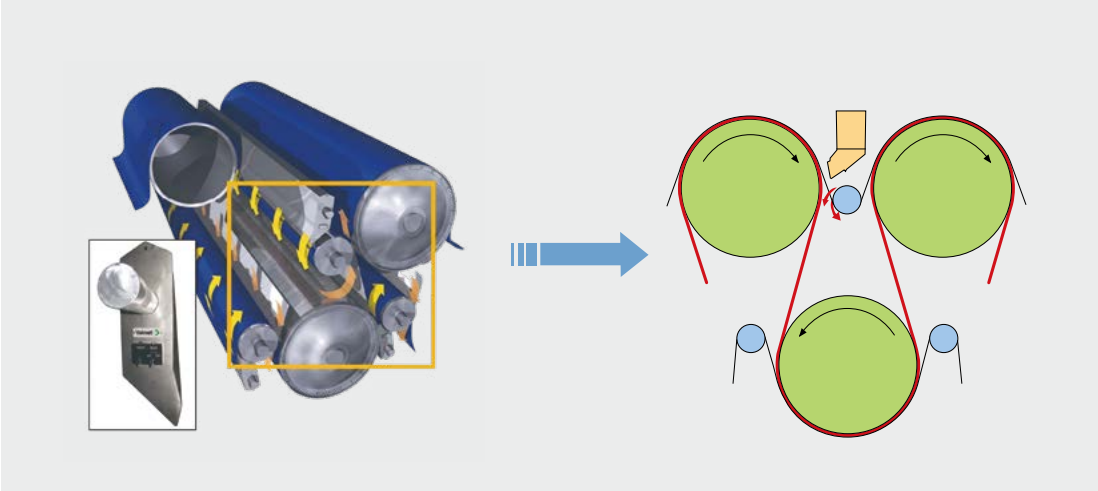
건조 실린더 내부로 공급된 과열 증기는 응축 과정에서 잠열을 방출하며, 이 열이

**그림 10-12.** 건조기 실린더 구조, 스팀 공급 및 응축수 제거 방법




출처: https://www.valmet.com/insights/articles/up-and-running/performance/TroubleshootDryerSC2/

그림 10-13. 포켓 환기장치



출처: https://www.valmet.com/globalassets/media/downloads/white-papers/drying-and-air-systems/wpd_upgradingrunnability.pdf 저자 자료

지필을 건조시키는 주요 열원으로 작용한다. 이 과정에서 실린더 내부에는 지속적으로 응축수가 생성되므로 이를 효과적으로 제거해야 한다. 응축수는 일반적으로 실린더의 한쪽 또는 양쪽 저널을 통해 외부로 배출된다[1, 5, 6, 7].

초지 속도가 낮은 경우에는 실린더 내벽에 설치된 나선형 스쿠프를 이용하여 응축수를 제거할 수 있다. 이 방식에서는 실린더 하부에 모인 응축수를 나선형 스쿠프가 퍼 올려 실린더 상부로 이동시키고, 이후 중력에 의해 실린더 중심축에 설치된 배출구를 통해 외부로 배출된다. 이러한 방식은 일반적으로 초지 속도 약 200 m/min 정도까지 효과적으로 응축수를 제거할 수 있다. 그러나 초지 속도가 증가하면 원심력의 영향으로 응축수가 실린더 내벽에 부착되어 회전하게 되므로 중력에 의한 배출이 어려워진다. 이 경우에는 실린더 내부와 외부의 압력 차이를 이용하여 응축수를 제거하는 방식이 사용된다. 일반적으로 이를 위해 사이펀이 설치된다. 사이펀 방식에서는 실린더 내부에 설치된 슈(shoe)에서 소량의 분출 증기(blow-through steam)가 방출되어 응축수를 미세한 방울 형태로 분산시켜 배출시킨다. 기본적으로 사이펀은 구조에 따라 고정식 사이펀(stationary siphon)과 회전식 사이펀(rotating siphon)으로 구분된다(그림 10-12)[1, 5, 6, 7].

이중 패브릭 건조부의 경우 실린더와 지필 그리고 패브릭으로 둘러싸인 포켓이 형성되므로 증발되는 수분을 이 포켓에서 제거하기 위해서는 지필의 양단으로 공기를 배출시켜야만 한다. 증발된 수분을 신속히 제거하지 않으면 중앙부 지필의

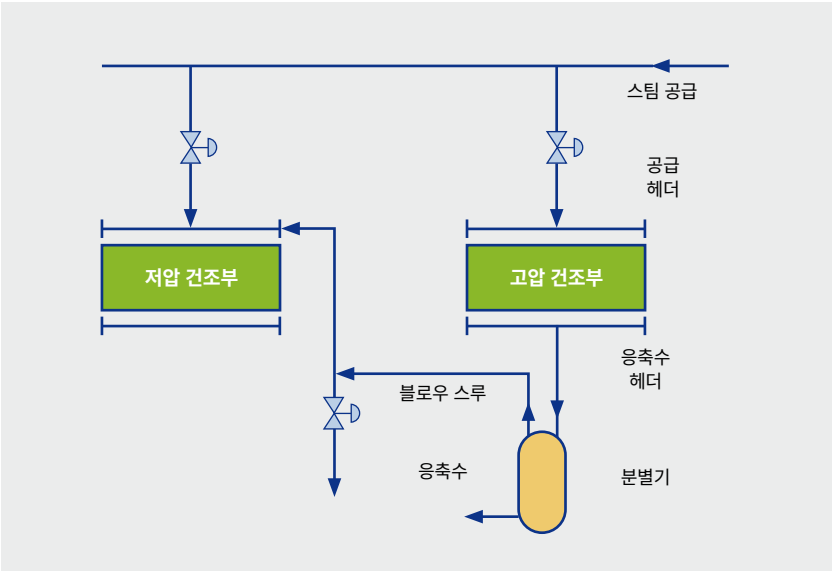
함수율이 높고 양단의 함수율이 낮은 불균일한 폭방향 수분프로파일이 발생한다. 이를 해결하기 위해 포켓 환기장치(pocket ventilator)를 사용한다(그림 10-13). 포켓 환기장치는 약 95℃ 정도의 고온 건조 공기를 포켓 내부로 공급하여 증발된 수분을 제거하고, 동시에 지필의 기계폭방향(CD) 수분 프로파일을 균일하게 유지하도록 돕는다[1, 6, 7].

## 5. 증기 공급방식

건조부의 온도는 앞의 도표 10-01에서 나타난 바와 같이 건조부의 전단에서 후단으로 갈수록 점차 상승하도록 설정되며, 마지막 구간에서는 다시 낮아지도록 조절된다. 이러한 구간별 온도 변화는 각 건조 그룹에 공급되는 과열 증기의 압력에 의해 제어된다[1, 6, 7].

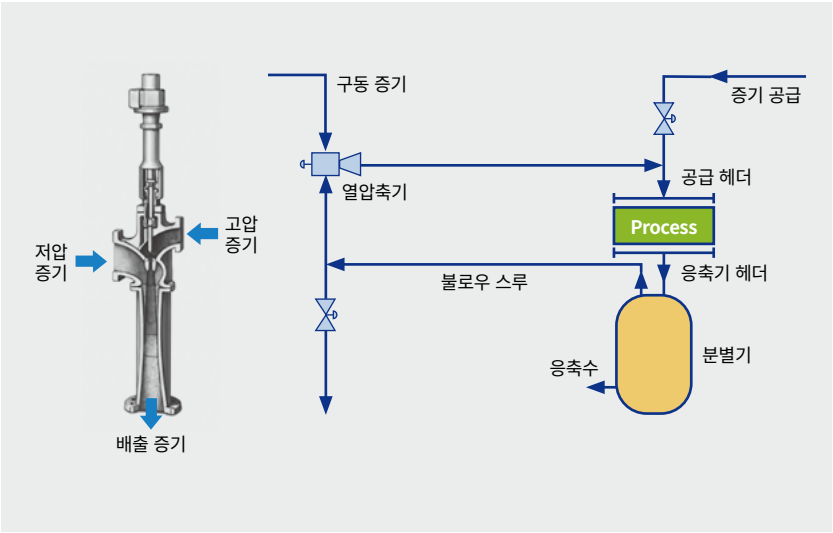
가장 단순한 증기 제어 방식은 캐스케이드 시스템(cascade system)이다. 이 방식에서는 건조부 후단에서 발생하는 배출증기로부터 응축수를 제거한 후, 이를 전단의 건조부로 공급하여 열원을 재활용한다(그림 10-14). 필요에 따라 부족한 열량은 추가적인 과열 증기를 공급하여 보충한다[1, 6, 7].

**그림 10-14.** 케스케이드 시스템




출처: https://www.pulpandpaper-technology.com/products/kadant-inc/cascade-systems

그림 10-15. 열압축기 구성 및 열압축 시스템




출처: https://kadant.com/en/blog/auxiliary-steam-equipment/understanding-thermocompressors

캐스케이드 방식에서는 건조부 후단에서 발생한 배출증기를 전단으로 공급하여 재활용하기 때문에, 실린더 온도는 일반적으로 후반부에서 전반부로 갈수록 점차 낮아지는 경향을 보인다. 따라서 전반부 건조부의 온도는 후반부 건조부의 온도 변화에 영향을 받는다는 제약이 있다[1, 6, 7].

이러한 특성 때문에 캐스케이드 시스템은 건조부 구조가 비교적 단순한 초지기, 즉 건조부 중간에 사이즈 프레스나 양키 실린더(Yankee cylinder)와 같은 추가 공정 장치가 없는 경우에 적합하다[1, 6, 7].

반면 사이즈 프레스가 설치되어 있거나 중간에 도공 공정이 포함된 경우에는 건조 공정을 여러 구간으로 분리하여 운전할 필요가 있다. 이 경우 건조부는 일반적으로 프리 드라이어(pre-dryer), 포스트 드라이어(post-dryer), 그리고 필요에 따라 양키 실린더 건조 구간으로 나누어 각각 독립적으로 운전되도록 설계된다[1, 6, 7].

건조부의 온도를 분리하여 제어하기 위해서는 열압축기 시스템을 사용한다(그림 10-15). 열압축기는 각 그룹의 배출 증기를 그 그룹에서 재순환시키는 방식이다. 추가로 필요한 양의 고압증기는 다시 공급하여 목표압력의 증기가 공급되도록 한다. 열압축기 시스템의 가장 큰 장점은 다양한 그룹의 온도를 독립적으로 조절할 수 있다는 점이다[1, 6, 7].

## 6. 건조부 환기장치 및 열회수

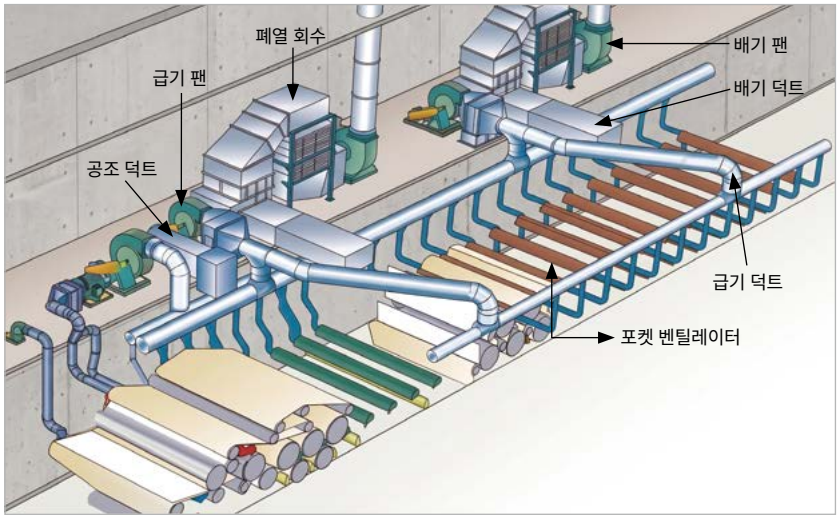
초기의 건조기는 후드(hood)가 설치되지 않아 건조 과정에서 발생한 수증기가 작업장 내부로 그대로 확산되었기 때문에 작업 환경이 매우 열악하였다. 이후 개방형 후드(open hood)가 도입되었으며, 현재의 건조부에는 건조부와 기계실을 완전히 분리하는 밀폐형 후드(enclosed hood)가 널리 사용되고 있다.

건조부 환기의 기본 목적은 건조 과정에서 증발된 수분을 효과적으로 포집하여 외부로 배출하는 데 있다. 이를 통해 건조 공정의 에너지 효율을 향상시키고 지필의 주행 안정성을 개선할 수 있으며, 동시에 작업 환경을 쾌적하게 유지할 수 있다.

건조부 환기 설비는 밀폐형 후드(enclosed hood)와 지하실 인클로저(basement enclosure), 급기 및 배기 시스템, 포켓 환기 파이프(pocket ventilation pipe), 블로우 박스(blow box) 등과 같은 환기 장치와 열회수 시스템으로 구성된다(그림 10-16)[1, 6, 7].

후드 내부로 공급된 공기는 지필에서 증발된 수증기와 함께 배기 시스템을 통해 외부로 배출되며, 이 과정에서 배기 장치에 설치된 열교환기를 통해 열이 회수된다. 원활한 배기를 위해 일반적으로 원심 팬(centrifugal fan)이 사용된다. 배출되는 공기 중 일부는 다시 급기 시스템으로 순환되어 건조 공정에 재사용된다[1, 6, 7].

그림 10-16. 건조 환기 시스템




출처: https://www.valmet.com/globalassets/media/downloads/white-papers/drying-and-air-systems/wpd_process.pdf

밀폐형 후드 내부에서는 하부 공기층에 양압이 형성되고 상부 공기층에는 음압이 형성된다. 이는 배기량이 순환되는 급기량보다 많기 때문에 후드 하부에서 일부 공기가 흡인되기 때문이다(그림 10-17). 밀폐형 후드는 후드 내부의 공기나 수증기가 기계실로 누출되지 않도록 설계되어야 하며, 외부 공기의 유입이 최소화되어야 한다. 또한 후드 내부 표면에서 응결이 발생하지 않아야 하며, 배기 공기의 습도가 가능한 한 높게 유지되도록 운전하는 것이 바람직하다[1, 6, 7].

건조 효율을 높이고 최종 제품의 균일한 수분 프로파일을 확보하기 위해서는 지필 주변으로 공급되는 공기의 습도가 낮아야 한다. 또한 충분한 환기를 통해 포켓과 지필 주변에서 발생한 수분을 신속하게 제거하는 것이 중요하다. 이러한 공기 유동과 수분 제거는 포켓 환기 장치(pocket ventilator)와 블로우 박스 등의 장치를 통해 제어된다[1, 6, 7].

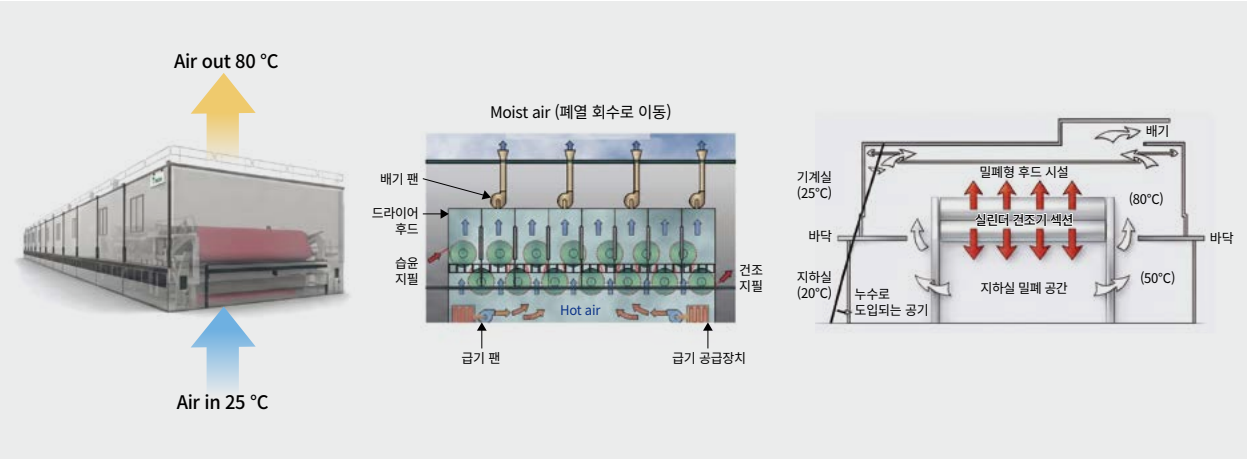
제지공정에서는 1 톤의 종이를 생산하는 데 약 2,500~5,500 MJ의 열에너지와 약 1,800~2,200 MJ의 전기에너지가 필요하다. 이 중 열에너지의 대부분은 종이 건조에 사용되므로, 건조부는 제지공정에서 가장 많은 에너지를 소비하는 공정이다[1, 6, 7].

건조 과정에서 지필로부터 증발된 수분은 배기 공기와 함께 건조부 외부로 배출되며, 이와 동시에 상당한 양의 열에너지도 함께 손실된다. 따라서 건조부에서는 배기 공기에 포함된 열에너지를 회수하여 공정의 에너지 효율을 향상시키는 것이 중요하다. 회수된 열에너지는 주로 급기 공기의 가열에 이용되며, 이외에도 기계실 공기 가열이나 공정수 가열 등에 활용된다(그림 10-18)[1, 6, 7].

건조 에너지 소비를 줄이기 위해서는 배기 공기의 습도를 가능한 한 높게 유지하는 것이 중요하다. 배기 공기의 습도가 높을수록 동일한 수분을 제거하는 데 필요한 배기량이 감소하고, 이에 따라 가열해야 하는 급기량도 줄어들기 때문에 열회수 효율이 향상된다.

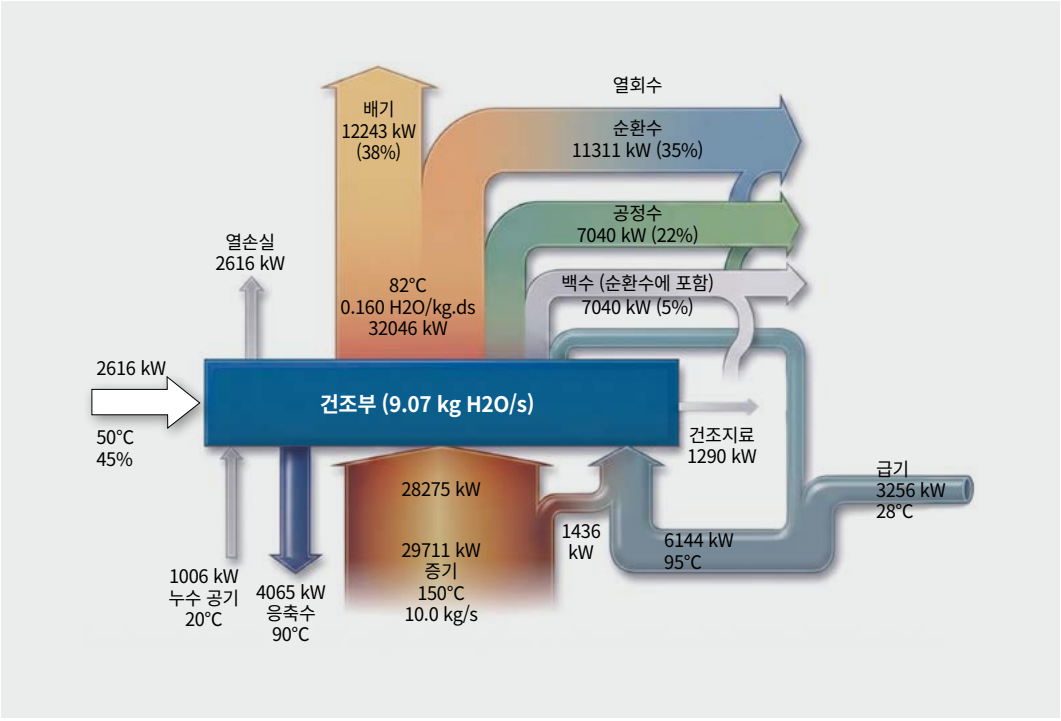
건조부의 배기 에너지는 일반적으로 열교환기를 통해 회수된다. 공기-공기 열교환기는 배기 공기의 열을 이용하여 후드로 공급되는 공기를 가열하는 데 사용된다. 또한 공기-물 열교환기는 배기 공기의 열을 이용하여 공정수나 기타 공정용 물을 가열하는 데 사용되며, 일반적으로 파이프형 열교환기 구조를 가진다[1, 6, 7].

그림 10-17. 폐쇄형 후드에서의 흐름




출처: HYPERLINK "https//www.valmet.com/insights/articles/up-and-running/performance/XTControl/"https://www.valmet.com/insights/articles/up-and-running/performance/XTControl/
HYPERLINK "https//www.slideshare.net/slideshow/3b-paper-machine-steam-systems-part2/2707695#2"https://www.slideshare.net/slideshow/3b-paper-machine-steam-systems-part2/2707695#2
GA (Gary A.) Smook. (1998).Paper machine design and operation: descriptions and explanations. Angus Wilde Publications.

그림 10-18. 건조공정의 Sankey 다이어그램




출처: Kari Edelmann, Sakari Kaijaluoto, Oleg Timofeev, The impact of new paper drying technologies on Energy consumption, Progess '96, International papermaking conference, Poland, Lodz, 17-19, 1996

## 7. 결론

건조공정은 제지 생산 라인에서 가장 많은 에너지를 소비하는 핵심 공정이다. 따라서 건조부로 유입되는 지필의 고형분을 높이고, 효율적인 열회수 시스템을 적용하며, 새로운 건조 기술의 도입과 환기 조건의 최적화, 그리고 증기 공급 및 응축수 제거 시스템을 적절히 운영하는 것이 중요하다.

이러한 기술적 요소를 효과적으로 활용하면 건조 공정의 에너지 효율과 생산성을 동시에 향상시킬 수 있을 뿐 아니라, 최종 제품의 품질 안정성도 확보할 수 있다. 따라서 건조공정의 효율 개선은 에너지 비용 절감과 함께 제지 산업의 지속 가능한 경쟁력 확보를 위한 중요한 투자라 할 수 있다.

**참고문헌**


[1] Smook, G.A., Handbook for Pulp and Paper Technologists, 4th ed., TAPPI Press, Atlanta, USA, 2016.

[2] Szwarcsztajn, E. (1983). Konsolidacja i wykończenie wstęgi papieru.WNT, Warszawa.

[3] Stenström, S. (2020). Drying of paper: A review 2000–2018.Drying Technology,38(7), 825–845.

[4] Ghosh K, A. (2011). Fundamentals of Paper Drying – Theory and Application from Industrial Perspective. In Evaporation, Condensation and Heat transfer. InTech.

[5] Wahlstrom T., Influence of shrinkage and stretch during drying on paper properties, Journal of Korea TAPPI, 31(5), 1999

[6] Gullichsen, J., & Paulapuro, H. (Eds.). (2000). Papermaking science and technology: Book 9. Papermaking part 2, Drying. Fapet Oy

[7] GA (Gary A.) Smook. (1998).Paper machine design and operation: descriptions and explanations. Angus Wilde Publications

[8] Gullichsen, J., & Paulapuro, H. (Eds.). (2000). Papermaking science and technology: Book 16. Paper physics. Fapet Oy

[9] 펄프제지공학, 조현정 외, 선진문화사



**오 규 덕** 서울대학교 교수

**2023 – 현재** 서울대학교 농림생물자원학부 조교수

**2022 – 2023** 충남대학교 환경소재공학과 조교수

**2018 – 2021** Åbo Akademi University (Finland), Faculty of Science and Engineering 박사후연구원

**2017 – 2022** 서울대학교 농업생명과학연구원 선임연구원

**2017** 서울대학교 산림과학부(환경재료과학전공) 박사

**2012** 서울대학교 산림과학부(환경재료과학전공) 석사

**2010** 서울대학교 산림과학부(환경재료과학전공) 학사

kyudeok.oh@snu.ac.kr

# 11
# 표면사이징

필름 트랜스퍼 형식의 현대적 표면 사이징 공정 (사진제공_무림P&P)

## 1. 서론

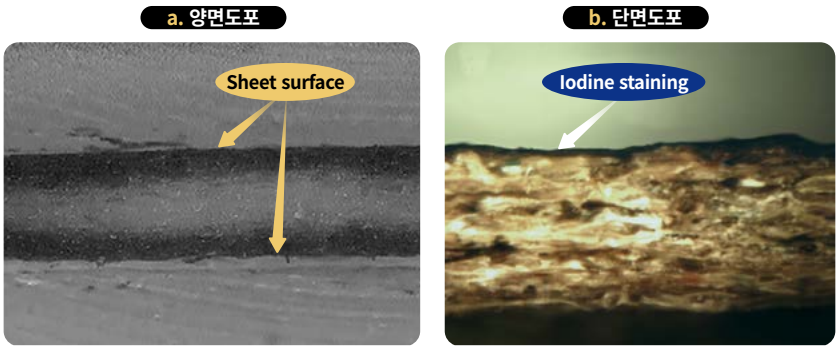
제지공정에서는 종이의 품질을 향상시키기 위하여 다양한 표면처리 기술이 활용되고 있다. 표면사이징(surface sizing)은 종이 표면 특성을 제어하는 핵심 공정으로 종이 표면에 사이즈 프레스 설비를 이용하여 전분이나 기타 수용성 고분자 용액을 도포하는 공정이다. 표면사이징 공정을 거쳐 종이 표면에 사이즈제가 잔류하게 되면(그림 11-01), 종이의 강도, 인쇄적성, 내수성 등 다양한 품질이 개선된다.

표면사이징의 목적은 크게 네 가지로 구분된다. 첫째, 종이의 표면강도를 향상시켜 잉크나 토너 사용 시 섬유의 분리 및 피킹(picking) 현상을 억제하고, 둘째, 잉크의 흡수성을 제어하여 인쇄적성을 개선하며, 셋째, 내수성을 부여하거나 조절함으로써 요구되는 내습성을 강화하고, 넷째, 기계적 강도를 향상시켜 종이의 전반적인 품질을 높이는 데 있다[1].

표면사이징은 기존의 웻엔드(wet-end)에서의 내수성 향상을 위한 내첨사이징과 달리 사이즈 프레스에서 종이 표면에 도포된 약품의 100%가 종이에 잔류하므로 원료의 효율적인 사용 및 환경 측면에서 내첨사이징보다 유리하다.

표면사이징은 경제성 측면에서 유리한 전분(starch)이 전통적으로 사용되어 왔다. 그러나 최근에는 고분자, 무기입자, 나노셀룰로오스 등 다양한 소재가 사이징 제형에 응용되면서 종이의 기능성과 품질을 향상시키기 위한 새로운 시도가 지속적으로 이루어지고 있다. 특히, 지류 제품의 포장재로서의 활용이 확대됨에 따라 차단성 약품을 도포하는 기술이 증가하고 있어, 표면사이징 공정에 대한 이해가 그 어느 때보다 중요하다. 따라서 본 장에서는 표면사이징에 사용되는 약품 및 설

그림 11-01. 표면사이징 공정을 통해 종이 표면에 도포된 전분의 두께 방향 분포




출처: Shirazi, M., Esmail, N., Garnier, G., & van de Ven, T. G. M. (2005). Starch Penetration into Paper in a Size Press. Journal of Dispersion Science and Technology, 25(4), 457–468.

비에 대해 소개하고, 표면사이징 공정에 영향을 미치는 인자들에 대해 이해하는 것을 목적으로 한다.

## 2. 표면사이징 소재

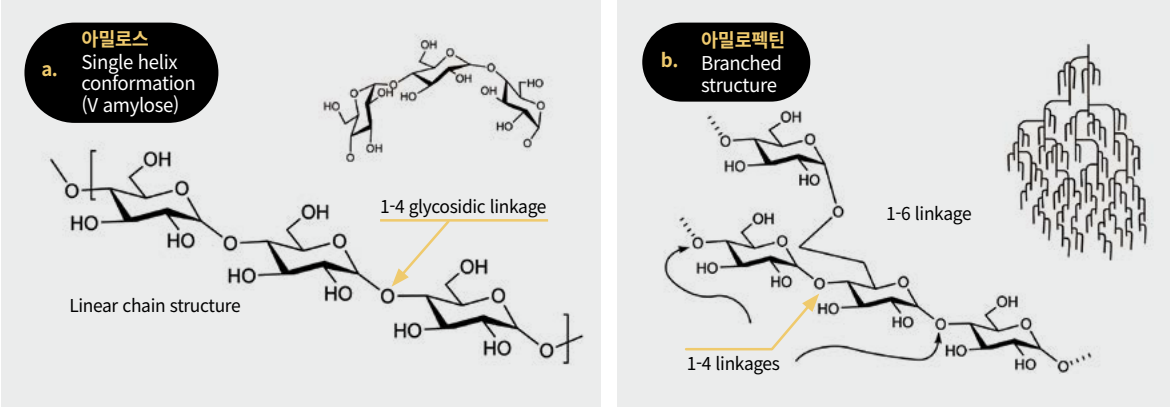
표면사이징에는 전분(starch)이 가장 널리 사용되며, 단독으로 또는 다양한 첨가제와 병용하여 적용된다. 전분은 식물성 다당류로서 아밀로스(amylose)와 아밀로펙틴(amylopectin)으로 구성되어 있으며, 옥수수, 감자, 타피오카 등 여러 식물로부터 얻을 수 있다. 전분 외에도 합성 수용성 고분자인 폴리비닐알코올(polyvinyl alcohol, PVA)과 카르복시메틸셀룰로오스(carboxymethyl cellulose, CMC) 등이 보조 결합제나 피막 형성제로 사용되며, 키토산이나 구아검과 같은 천연 고분자도 특수 기능 부여를 목적으로 적용되기도 한다. 또한 차단성(barrier)이나 내수성 향상을 위해 알킬케텐다이머(AKD), 로진, 소수성 변성 전분, 스티렌계 공중합체(SMA, SA), 우레탄계 공중합체, 라텍스 등이 병용된다. 이러한 소재의 선택은 지종, 요구되는 물성, 그리고 생산설비 조건에 따라 달라진다. 최근에는 포장재 용도의 확대와 친환경성에 대한 요구가 증가함에 따라, 차단성과 기능성을 부여할 수 있는 친환경·고성능 소재의 개발과 적용이 활발히 이루어지고 있다.

### (1) 전분

전분은 자연계에 풍부하게 존재하는 대표적인 천연고분자(polysaccharide)로, 식물에서 탄수화물을 저장하는 형태로 존재한다. 전분은 옥수수, 감자, 밀, 쌀, 타피오카 등의 곡물과 뿌리식물로부터 비교적 쉽게 얻을 수 있다. 전분은 생분해성, 무독성, 풍부한 공급량, 그리고 낮은 비용 등의 장점을 지니고 있어 식품, 섬유, 제약, 제지 등 다양한 산업 분야에서 널리 활용된다. 제지 분야에서는 강도 향상, 표면 특성 개선, 내수성 조절 등 다양한 목적으로 폭넓게 사용된다.

전분은 α-글루코스 단위(glucose unit)가 α-1,4 및 α-1,6 글리코사이드 결합으로 중합된 고분자로, 중합도 약 500 수준의 아밀로스(amylose)와 수천 이상의 중합도를 갖는 아밀로펙틴(amylopectin)으로 구성되어 있다(그림 11-02). 아밀로스

그림 11-02. 전분의 화학적 구조




는 선형(linear) 구조를 가지며 전체 전분의 약 20~30%를 차지하고, 아밀로펙틴은 분지형(branched) 구조로 약 70~80%를 구성한다[2]. 이러한 구조적 차이는 전분의 용해성, 점도, 겔 형성 능력 및 필름 형성력 등에 영향을 미치며, 이는 제지 공정에서의 도포 거동과 최종 제품의 물성에 직접적인 영향을 준다.

전분은 상온의 물에는 불용성이지만, 가열된 현탁액 상태에서 겔화(gelatinization) 과정을 거치면 점성을 지닌 호상(糊狀)으로 전환된다. 전분의 겔화 온도와 점도 특성은 원료의 종류와 정제 및 변성 방식에 따라 달라진다. 일반적으로 전분 용액은 고형분 6~18 wt% 범위로 조제되며, 용액의 점도는 농도, pH, 온도, 그리고 화학적 변성 여부에 따라 조절될 수 있다.

### 1) 전분 용액 제조

전분 용액(starch solution)의 제조는 제지 공정에서 표면사이징의 효율과 품질을 좌우하는 핵심 단계 중 하나이다. 종이에 대한 도포 적합성과 운전의 안정성을 확보하기 위해서는 적절한 조건에서 균일한 점도와 안정성을 갖는 수용액을 제조하는 것이 필수적이다.

전분을 용해시키기 위한 핵심 과정은 겔화(gelatinization)이다. 전분 슬러리가 용액화되는 과정은 그림 11-03과 같이 설명할 수 있다. 전분은 낮은 온도(약 30 °C)에서는 물에 용해되지 않고 입자상으로 분산된 슬러리 상태를 유지하며 점도가 낮다. 온도가 상승하면 전분 입자가 물을 흡수하여 팽윤하고, 이에 따라 점

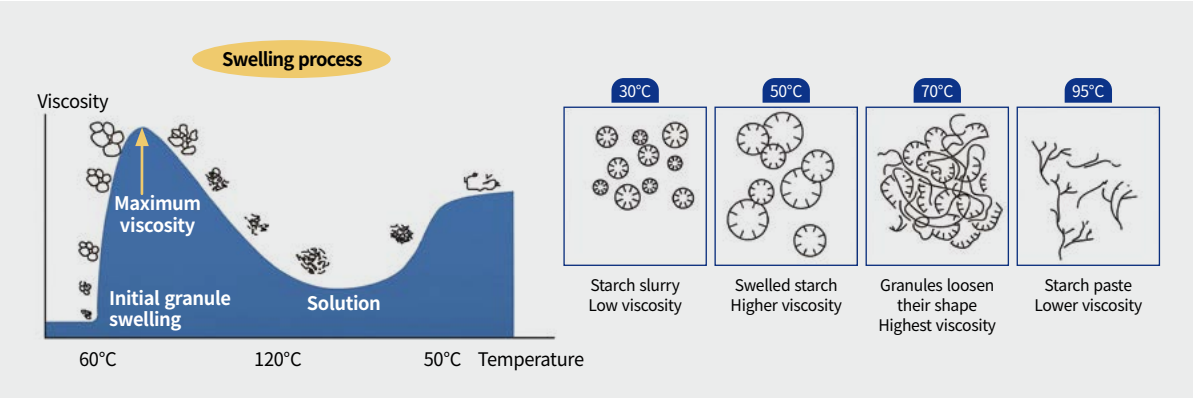
도가 점차 증가한다. 약 70 ℃ 부근에서는 전분의 결정 구조가 붕괴되면서 아밀로스와 아밀로펙틴이 용출되고, 입자의 형태와 내부 구조가 풀어져 점도가 최고치에 도달한다. 이후 고온에서 교반이 지속되면 고분자 사슬 간 구조가 더욱 이완되어 점도가 다시 감소하고 비교적 점성이 낮은 용액 상태가 된다.

이러한 고온의 전분 용액을 냉각시키면 아밀로스와 아밀로펙틴이 재배열되면서 부분적인 결정화가 일어나는 노화(retrogradation)가 발생하여 점도가 다시 증가한다. 노화가 진행되면 점도가 급격히 상승하고 종이 표면에 균일한 필름 형성이 어려워지므로, 이를 방지하기 위해 변성전분을 사용한다. 변성전분은 전분 호액의 최고점도를 낮추어 호화를 용이하게 하고, 저장 안정성과 작업성을 개선하는 역할을 한다.

전분의 호화 방법은 크게 배치식(batch)과 연속식(continuous, jet)의 두 가지가 사용된다. 배치식 호화는 전통적으로 가장 많이 활용된 방식으로, 주로 증기 가열식 탱크에서 이루어진다. 먼저 전분과 물을 전분의 호화 개시 온도 이하에서 혼합한 뒤, 약 90 ℃까지 가열하여 20분 정도 유지한다. 이 과정에서 전분 입자는 점차 팽윤하여 반투명해지고, 이어 전분 고분자가 용출되어 점도가 상승한다. 최종 점도는 전분의 분자량과 고형분 농도에 의해 결정되며, 산처리나 효소처리를 통해 전분의 분자량이 낮아지면 본래 전분 대비 1/10~1/20 수준으로 크게 낮아진다.

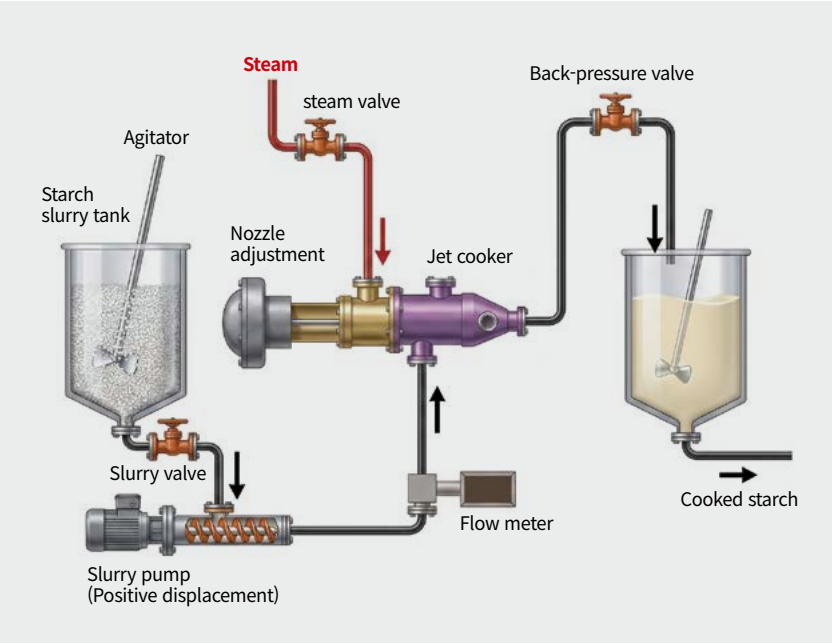
연속식 호화는 현대 제지산업에 널리 도입된 방식으로, 배치식에 비해 장치 규모가 작고, 전분이 표면에서 응집·건조되는 문제를 줄이며, 공정 제어가 용이한 장점이 있다. 그림 11-04는 제트 쿠커를 이용한 연속식 전분 호화 공정 모식도이다.

**그림 11-03.** 전분 용액 제조과정에서 온도 변화에 따른 점도 변화




출처: Stig_Erik Bruun. Papermaking Science and Technology Book 11 (Totally updated version). Finnish Paper Engineers' Association

그림 11-04. 제트 쿠킹 공정 모식도




출처: Hubbe, M. A., Tayeb, P., Joyce, M., Tyagi, P., Kehoe, M., Dimic-Misic, K., & Pal, L. (2020). Size press practices and formulations affecting paper properties and process efficiency – A review. BioResources, 15(3), 5736–5866.

제트 쿠커(jet cooker)를 이용한 연속식 호화에서는 밸브를 통해 고온고압의 증기를 직접 주입하여 전분 현탁액을 가압 상태에서 순간적으로 가열한다[3]. 이때 전분 현탁액의 고형분 농도는 보통 10~18% 범위이며, 운전 온도(65~70 °C)를 맞추기 위해 물의 양이 조정된다. 제트 쿠커의 가열 온도는 일반적으로 100~140 °C 범위가 사용되며, 가압 구간을 벗어난 이후에도 호화가 일부 지속되기 때문에 처리 시간을 명확히 정의하기는 어렵다. 따라서 일관된 호화 품질을 확보하기 위해서는 온도와 압력을 최적 범위에서 안정적으로 유지하는 것이 중요하다.

### (2) 전분 변성 방법(starch modification techniques)

전분은 다양한 산업 분야에서 유용하게 활용되는 천연 고분자 물질이지만, 그 자체의 물리화학적 특성만으로는 특정 응용 분야의 요구를 만족시키기 어렵다. 특히 제지 산업에서 전분은 표면사이징제, 코팅 바인더, 건조지력증강제 등으로 사용되며, 각각의 용도에 적합한 기능을 갖추기 위해 변성(modification) 과정을 거치는 것이 일반적이다. 이러한 변성은 전분의 분자 구조, 분자량분포, 반응성,

용해성 등을 변화시켜 목적에 맞는 성능을 발현하도록 하는 것을 목적으로 한다. 대표적인 전분의 변성 방법으로는 효소처리, 과황산암모늄처리, 차아염소산 산화, 초음파 처리 등이 있다[4].

### 1) 효소 변성(enzymatic conversion)

효소 처리는 전분의 분자 사슬을 절단하여 분자량을 낮추고, 용해성과 점도를 조절하는 변성 방법 중 하나이다. 효소 처리에는 주로 α-아밀레이스(α-amylase)나 글루코아밀레이스(glucoamylase)와 같은 전분 분해 효소가 사용된다[5]. 이들 효소는 α-1,4 글리코시드 결합을 선택적으로 절단하며, 일부는 가지 구조의 α-1,6 결합까지 절단할 수 있다. 그 결과 전분 분자는 분자량이 낮은 상태로 점차 분해되며, 이는 도포 공정에서 요구되는 적절한 점도(viscosity)의 호액 제조를 용이하게 한다. 효소 반응은 일반적으로 50~70 °C의 온도와 pH 5.5~7.0의 약산성 혹은 중성 조건에서 이루어지며, 반응 시간은 수십 분에서 수 시간까지 공정 조건에 따라 조절될 수 있다. 효소 변성전분은 분자량 분포가 상대적으로 균일한 특징을 가지고 있다. 하지만 고가인 효소 가격, 느린 반응 속도, 효소 활성 저하와 같은 단점도 존재한다. 따라서 실제 공정에서는 전분 용액 제조 후 효소를 소량 투입하여 점도를 공정에 적합한 수준으로 떨어뜨리는 방식으로 운용된다.

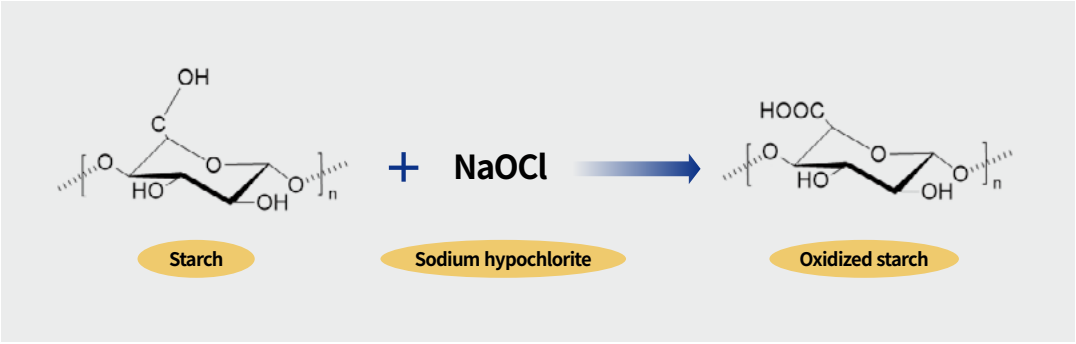
### 2) 과황산암모늄 변성(ammonium persulfate conversion)

과황산암모늄(ammonium persulfate, APS)은 강력한 산화제로서 전분의 분자 구조에 산화 반응을 유도하여 분자량을 감소시키고 점도를 조절한다. 이 방법은 전분 내 글루코스 단위 사이의 글리코시드 결합을 라디칼 메커니즘을 통해 절단하여 분자량을 감소시키고, 그 결과 전분 용액의 점도가 낮아지게 한다[6]. 생성된 라디칼($SO_4^{-}\bullet$)은 전분의 산화를 촉진하고, 전분 사슬의 분해를 유도한다. 반응은 일반적으로 pH 3~5의 산성 조건에서 60~90 °C의 온도에서 1~3시간 진행되며, 과황산암모늄 농도와 전분의 고형분 비율에 따라 반응 속도가 달라진다[7]. 과황산암모늄을 이용한 변성법은 전분 용액의 점도 제어가 용이한 장점이 있지만 산성 조건에서 반응이 진행되고 산화제가 잔류할 수 있어 후처리 공정 도입이 필요하다.

### 3) 차아염소산 산화 변성(hypochlorite oxidation conversion)

차아염소산 나트륨(NaOCl)을 활용한 산화는 상업적으로 가장 널리 적용되는 전분 변성 방법 중 하나이다. 이 반응은 전분 사슬의 수산기(-OH)를 부분적으로 카르복실기(-COOH) 또는 케톤기(=O)로 산화시켜, 전분의 수용성, 점도 및 접착성을 조절한다(그림 11-05). 반응은 보통 20~40 ℃, pH 9~11의 약알칼리성 조건에서 진행되며, 전분 양의 1~3% 수준의 NaOCl이 사용된다. 차아염소산은 비교적 반응성이 강하고, 반응 속도 또한 빠르기 때문에 산화도 조절이 용이하고, 단시간 내 목적 점도에 도달할 수 있다는 장점이 있다. 산화로 인한 전분 분자량 저하로 저점도 용액을 제조할 수 있다. 하지만 고농도 산화 조건에서는 전분이 과도하게 분해 및 변색되는 문제가 있을 수 있으며, 잔류 염소 성분에 대한 관리가 필요하다.

**그림 11-05.** 차아염소산을 이용한 산화전분




### 4) 초음파 변성(ultrasonic conversion)

초음파 처리는 비교적 최근에 도입된 비화학적, 친환경적인 전분 변성 방법으로, 고주파 음파(보통 20~40 kHz)를 전분 수용액에 가하여 물리적 에너지로 분자 구조를 변화시키는 기술이다[8]. 이 과정에서 발생하는 공동현상(cavitation)은 액체 내 미세 기포의 생성과 붕괴를 수반하며, 순간적으로 고온·고압의 환경을 형성하여 전분 입자의 파쇄, 탈분지(debranching), 재배열 등의 효과를 유도한다. 이러한 물리적 변화는 전분의 겔화 온도를 낮추고, 용해도를 증가시키며, 도포 시

요구되는 점도, 분산 안정성 등을 향상시킨다. 또한, 입자 크기 감소로 인해 나노 전분(nano-starch)이나 기능성 필름 전분 개발에도 활용이 가능하다. 초음파 처리는 보통 고형분 1~10%의 전분 용액에서 20~100 W/cm²의 에너지를 5~30분간 조사하는 방식으로 수행된다. 처리 시간과 출력에 따라 구조 변화 정도가 조절되며, 화학약품을 전혀 사용하지 않음에도 불구하고 전분의 기능성을 크게 변화시킬 수 있다는 점에서 환경적으로 매우 우수하다. 하지만 산업적으로 상용화하기 위해서는 초음파 장치의 비용, 처리 시간 대비 생산 효율, 그리고 고형분 조건에서의 기술 안정성 확보 등이 과제로 남아있다.

### (3) 변성전분 종류

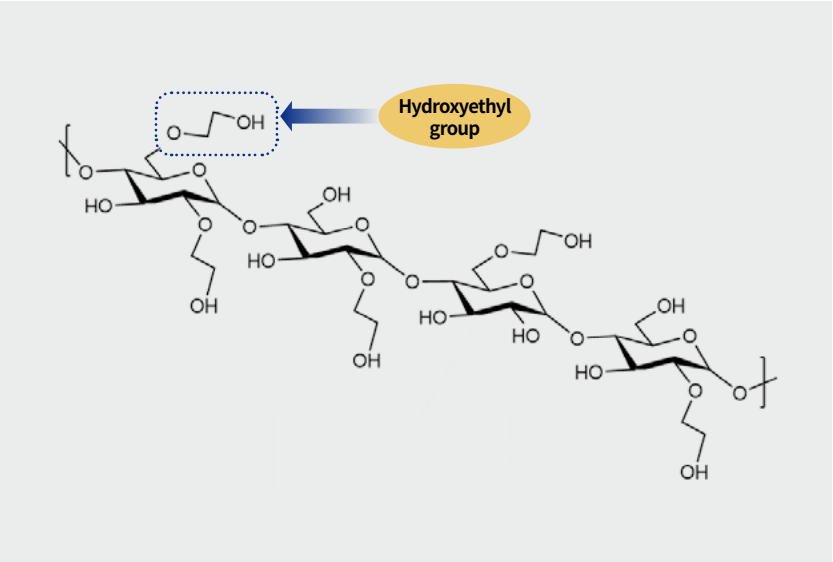
#### 1) 산화전분(oxidized starch)

산화전분은 전분의 수산기를 화학적으로 산화시켜 일부를 카복실기로 변환한 형태의 변성전분이다(그림 11-05). 일반적으로 차아염소산 나트륨과 같은 산화제를 사용하며, 반응 과정에서 전분 사슬이 부분적으로 절단되어 평균 분자량이 감소한다. 이러한 구조 변화는 점도를 낮추는 동시에 분자에 음전하를 부여하여 전분용액의 안정성을 높인다[9]. 산화전분의 가장 큰 장점은 높은 고형분 농도에서도 점도가 낮아 사이즈 프레스 운전성을 크게 향상시킬 수 있다는 점이다. 예를 들어 필름 프레스나 미터링 사이즈 프레스에서 고속 운전 시, 저점도의 산화전분 용액은 종이의 지절을 줄이고 균일한 필름 형성을 가능하게 한다. 그러나 산화 정도가 과도하면 전분 사슬이 지나치게 짧아져 필름 강도가 저하될 수 있으므로, 산화 조건은 목표하는 종이의 물성에 맞추어 정밀한 제어가 필요하다. 산화전분은 인쇄적성 개선과 표면강도 향상에 폭넓게 사용되며, 특히 양면 인쇄지나 고속 인쇄용지에서 그 효과가 뚜렷하다.

#### 2) 하이드록시에틸 전분(hydroxyethylated starch)

하이드록시에틸 전분은 전분 분자의 수산기에 하이드록시에틸기를 치환하여 제조한 변성전분이다. 이 과정은 일반적으로 알칼리 조건에서 에틸렌옥사이드와 수산기를 반응시켜 진행되며, 비이온성이면서도 수소결합 능력이 높은 전분 분자가

그림 11-06. 하이드록시에틸기로 변성된 전분 구조

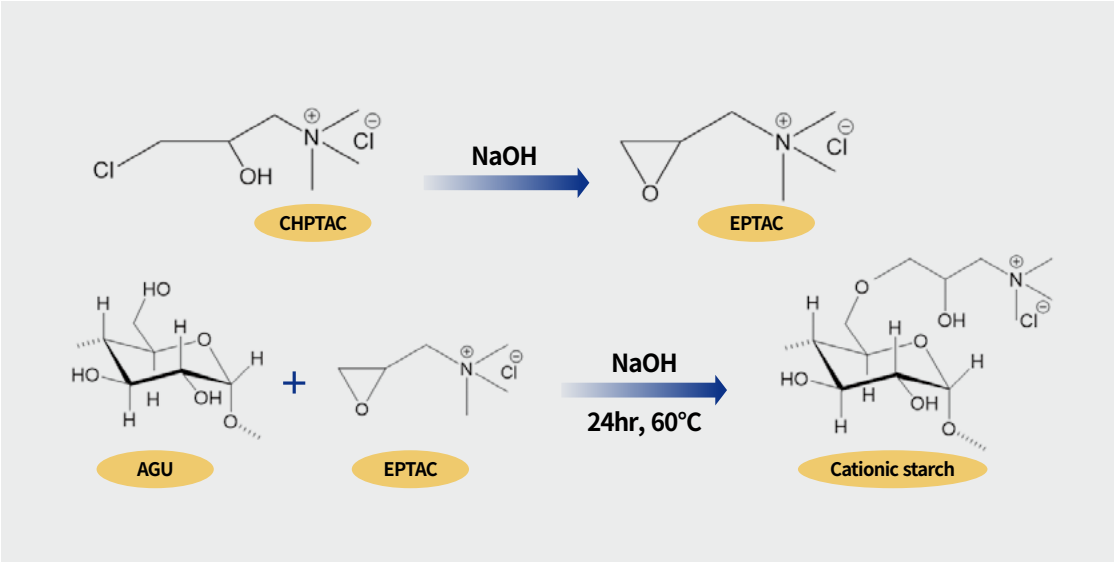



형성된다. 그림 11-06은 하이드록시에틸기로 변성된 전분의 분자 구조이다. 이 변성 방법의 주요 장점은 전분의 노화를 효과적으로 억제할 수 있다는 점이다. 전분은 호화 후 노화가 진행되면서 전분 분자의 재배열로 인해 점도 증가 및 침전이 발생하게 되는데, 하이드록시에틸기가 전분에 도입되면 전분 분자의 규칙적인 배열을 방해하여 노화로 인한 문제가 크게 감소한다[10]. 또한, 건조 후 형성되는 전분 필름의 유연성 및 기계적 물성이 우수하여 종이의 표면강도를 향상시키는 효과가 있다. 따라서 도공지 원지나 패키징 용지와 같이 표면 물성이 중요한 지종에서 선호된다.

### 3) 양이온성 전분(cationic starch)

양이온 전분은 전분 분자에 양전하를 부여한 형태의 변성전분으로, 가장 널리 사용되는 양이온화 약품으로는 에피클로로하이드린(epichlorohydrin)과 트리메틸암모늄 클로라이드(trimethyl ammonium chloride) 유도체가 있다(그림 11-07). 이 변성전분은 4차 암모늄기의 양전하를 통해 음전하를 띠는 셀룰로오스 섬유 표면과 강하게 결합한다. 양이온성 전분은 종이 표면 부착성이 우수하여 도포한 전분이 건조 후에도 안정적으로 유지되며, 인장강도와 내마모성을 향상시키

그림 11-07. 양이온성 전분의 제조 방법




는 효과가 있다[11, 12]. 그러나 양이온성 전분 용액의 도포 조건에 따라 종이 표면에 불균일한 필름이 형성될 수도 있으므로 고형분과 점도의 적절한 조절이 요구된다. 양이온성 전분은 인쇄용지뿐 아니라 패키징 보드와 같이 표면강도와 내수성이 동시에 요구되는 지종에서 사용된다.

### 4) 사이클로덱스트린(cyclodextrin)

사이클로덱스트린은 6~8개의 α-1,4 결합된 글루코스 단위가 고리 구조를 이루는 사이클릭 올리고사카라이드(cyclic oligosaccharide)로, 내부는 소수성이고 외부는 친수성인 독특한 구조를 가진다. 이러한 분자 구조는 소수성 물질을 내부에 포획할 수 있는 '분자 캡슐(molecular capsule)' 역할을 한다[13]. 전분을 변성하여 사이클로덱스트린 구조를 도입하면 표면사이징 공정을 통해 종이에 기능성을 부여할 수 있다. 예를 들어 방부제, 항균제 등을 포획해 서서히 방출시키는 기능성 포장지 제조가 가능하다. 또한, 지방산과 같은 발수제를 포함시켜 내수성을 강화하거나, 악취를 흡착하는 포장재 개발에도 응용할 수 있다. 다만 사이클로덱스트린은 분자량과 구조적 특성으로 인해 용액의 점도를 증가시킬 수 있으므로, 사이즈 프레스 운전 시 고형분과 유변학적 특성의 최적화가 필요하다.

### (4) 기타 표면사이즈제 및 첨가제

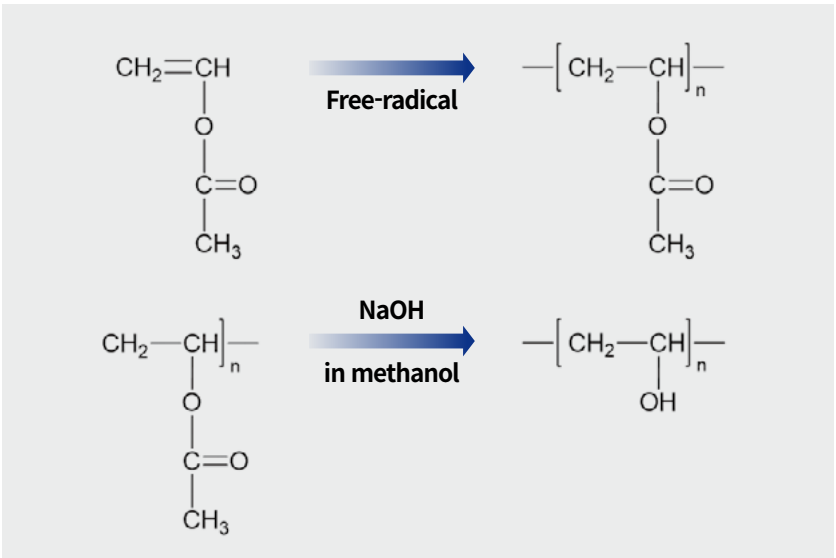
표면사이징 공정에서는 전분이 가장 널리 사용되지만, 단독으로는 모든 물성을 만족시키기 어려운 경우가 많기 때문에 다양한 수용성 고분자, 소수성 발수제, 그리고 기타 기능성 첨가제가 함께 사용되어 종이의 품질을 향상시키고 공정 효율을 높인다. 여기에서는 전분 이외의 주요 표면사이즈제, 발수제, 그리고 기타 첨가제의 특성과 역할을 소개하고자 한다.

#### 1) 표면사이즈제

##### 가. 폴리비닐알코올(PVA)

PVA는 비이온성 수용성 합성고분자로, 비닐아세테이트를 가수분해하여 제조되며 가수분해 정도에 따라 수산기의 비율이 88%(아세테이트기 12%)에서 99%까지 다양하다(그림 11-08). 제지산업에서는 주로 가수분해가 높은 PVA를 사용한다. PVA는 필름 형성 능력이 우수하여 치밀한 막을 형성하고 필름의 강도가 강하다. 이러한 특성으로 종이의 표면강도, 내마모성, 내유성 및 인쇄적성을 향상시킨다 [14, 15]. 전분과 혼합하여 고급 인쇄용지나 특수지 제조에 사용될 수 있다. 다만

그림 11-08. 폴리비닐알코올 제조 및 화학구조



원가가 전분보다 높아 대량으로 사용이 어려우며, 주로 고부가가치 제품에 선택적으로 적용된다.

#### 나. 카르복시메틸셀룰로오스(CMC)

CMC는 셀룰로오스의 수산기를 카르복시메틸기로 치환한 음이온성 고분자로 점도 조절, 보수성 향상, 표면 친수성 부여 및 내유성 향상에 유리하다. CMC는 알칼리 셀룰로오스와 모노클로로아세트(monochloroacetic)산을 반응시켜 제조되며, 일반적으로 가용성 나트륨염 형태로 사용된다. 전분과 혼합하면 전분 필름의 균열을 억제하고 인쇄 시 잉크 번짐을 감소시키는 효과가 있다. 또한, 전하 성질을 조절해 형광증백제(FWA)나 염료의 표면 고착성을 향상시키는 데도 유용하다.

#### 다. 키토산(chitosan)

키토산은 갑각류의 키틴을 탈아세틸화해 얻은 천연 양이온성 고분자로 우수한 필름 강도와 항균성을 가진다. 표면사이징에 적용하면 종이 표면의 물리적 강도 향상뿐 아니라 항균 기능을 부여할 수 있어, 식품 포장지, 위생용지 등에 활용될 수 있다. 다만 용액 제조 시 산성 조건이 필요하다.

#### 라. 기타 합성고분자

폴리아크릴아마이드(PAM), 폴리비닐피롤리돈(PVP) 등도 특정 기능성이 요구되는 경우 표면사이징에 적용될 수 있다. 이들 고분자는 주로 전분과 병용하여 내수성, 인쇄적성, 화학적 결합력 향상에 기여한다.

### 2) 소수성 첨가제

#### 가. 알킬케텐다이머(AKD)

AKD는 제지공정에서 내첨사이즈제로 널리 사용되는 약품으로, 표면사이징에 적용할 경우 종이 표면의 소수성을 향상시킬 수 있다[16]. 건조 과정에서 전분 또는 섬유 표면의 수산기와 반응하여 에스터 결합을 형성하여 내수성을 부여한다. 그러나 반응이 즉시 일어나지 않고 점진적으로 진행되는 지연 효과로 최종 내수성은 일정 기간 후에 극대화된다. AKD의 장점은 발수 효과가 안정적으로 유지된다

는 점이지만, 과량 사용 시 AKD가 종이 표면에 미반응 상태로 잔존하여 점착(pickup) 문제, 오염 및 인쇄성 저하를 유발할 수 있으므로 주의가 필요하다.

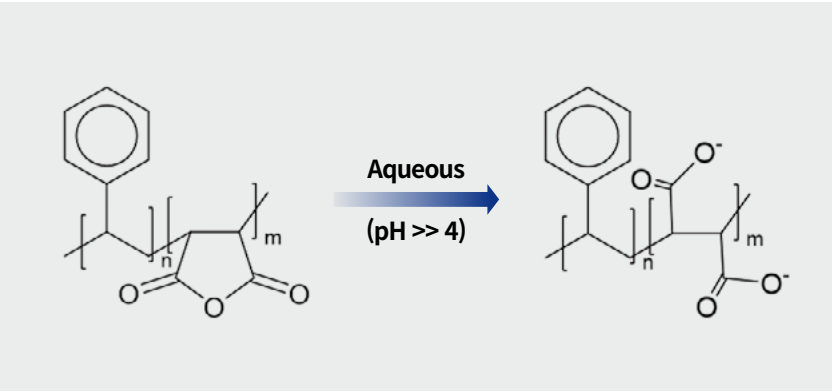
### 나. 소수성 공중합체(hydrophobic copolymer)

소수성 공중합체는 종이 표면에 발수성과 내수성을 부여하기 위해 사용되는 첨가제로, 아크릴레이트, 스티렌, 비닐계 단량체 등 다양한 소수성 단량체를 친수성 단량체와 공중합하여 얻어진다. 이 공중합체는 종이 표면에 도포되어 물과의 접촉각을 증가시킴으로써 흡수성을 억제한다. 사이즈 프레스에서 적용할 경우 단순 전분을 사용한 표면사이징 처리에 비해 내수성과 인쇄적성을 향상시킬 수 있다. 소수성 공중합체는 보통 전분, 카르복시메틸셀룰로오스(CMC), 라텍스 등과 함께 사용되어 상호 보완적인 효과를 발휘하며, 이를 통해 종이의 내수성과 표면강도, 인쇄적성을 동시에 향상시키는 것이 가능하다.

### 다. 스티렌-말레산무수물(SMA)

SMA 공중합체는 스티렌의 소수성 단위와 말레산 무수물의 친수성·반응성 단위를 동시에 가지는 양친매성 구조로(그림 11-09), 종이 표면사이징에 적용 시 내수성과 인쇄적성을 동시에 개선할 수 있는 첨가제로 사용된다. 사이즈 프레스 공정에서 SMA는 종이 표면에 균일한 피막을 형성하여 발수성, 표면강도, 치수 안정성을 높이는 동시에, 인쇄 과정에서 중요한 잉크 흡수 조절과 표면 결합력을 개선하는 장점이 있다. 특히 전분이나 CMC와 병용할 경우 상호 보완 효과를 통하여 내

그림 11-09. 스티렌-말레산무수물(SMA) 화학구조



수성뿐만 아니라 종이의 기계적 강도 및 인쇄적성을 함께 개선할 수 있다. SMA의 성능은 분자량, 그리고 스티렌과 말레산무수물의 비율에 크게 좌우되며, 일반적으로 스티렌 대 말레산무수물의 비율은 1:1 내지 3:1 범위에 있다. 스티렌 비율이 지나치게 높으면 발수성은 강해지지만 잉크 밀착성이 저하될 수 있고, 반대로 말레산무수물이 많으면 친수성은 증가하지만 발수성이 감소하는 경향을 보인다. 따라서 실제 적용에서는 소수성과 친수성의 균형을 고려한 최적화가 필요하며, SMA는 단독 첨가보다는 전분, 라텍스, CMC 등과 함께 사용할 때 종이의 내수성, 인쇄적성, 표면강도를 동시에 확보할 수 있다.

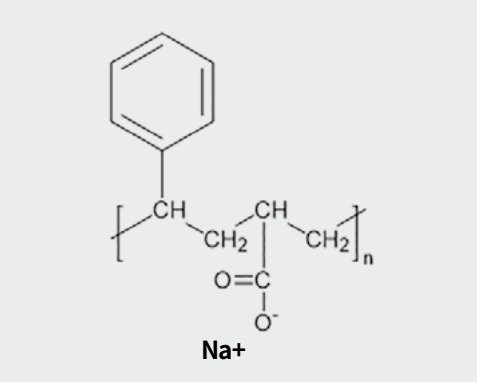
### 라. 스티렌-아크릴레이트(SA)

스티렌과 아크릴레이트 공중합체인 SA는 유연성이 큰 아크릴레이트와 강성이 높은 스티렌을 결합한 구조(그림 11-10)로 표면사이징 적용 시 종이의 표면강도, 내구성 및 인쇄적성을 향상시킨다. 또한 소수성이 강한 스티렌은 종이 표면 방향으로 배향되는 경향이 있어 종이에 소수성을 부여하여 내수성을 향상시킨다.

### 마. 우레탄계(urethanes)

우레탄계 수지는 높은 신장성과 내마모성을 가지는 고분자로 포장용지, 산업용 특수지에서 표면 보호 코팅 역할을 수행한다. 종이 표면사이징에 사용되는 우레탄계 수지는 지방족 단분자 사슬확장기가 산기(acid functional group)를 가지고 있어 수용성 유화액 형태로 제조되어 물속에서 안정적으로 분산된 상태로

그림 11-10. 스티렌-아크릴레이트(SA) 화학구조



존재한다. 표면사이징 적용 시 전분과 혼합하여 사용하면 전분이 형성하는 연속적인 피막 구조에 우레탄이 보강 효과를 제공하여 종이 표면의 내수성과 기계적 강도를 동시에 확보할 수 있다.

#### 바. 라텍스(latexes)

라텍스는 사이즈 프레스에서 종이의 표면강도와 내수성을 개선하기 위해 사용되는 대표적인 첨가제로, 주로 스티렌-부타디엔(SB) 라텍스와 아크릴계 라텍스가 적용된다. 라텍스를 적용하면 건조 과정에서 입자들이 서로 융합(coalescence)하여 종이 표면에 연속적인 필름을 형성하고, 이 피막이 섬유 간 결합을 보강하며 표면 구조를 치밀하게 만든다. 그 결과 기계적 강도, 발수성, 그리고 인쇄적성이 동시에 향상된다[17]. 전분이나 CMC와 병용할 경우, 전분은 섬유 내부로 침투하여 내부결합강도를 증가시키고 라텍스는 표면에서 보호 피막을 형성함으로써 서로 보완적인 작용을 한다. 다만 과량 사용 시 종이의 통기성이 저하되고 건조 부담이 증가하여 에너지 소비가 커질 수 있으므로 적정 사용량의 제어가 중요하다. 한편, 합성 라텍스는 석유화학 기반 원료에 의존하기 때문에 친환경성 측면의 문제가 제기되고 있으며, 최근에는 바이오 기반 라텍스나 천연 라텍스를 활용한 지속가능 대체 소재에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

### 3) 기타 첨가제

#### 가. 가교제(crosslinker)

가교제는 사이즈 프레스에서 전분, CMC, 라텍스와 같은 고분자의 성능을 보완하기 위해 사용되는 첨가제로, 고분자 사슬 간에 공유결합을 형성하여 치밀하고 내구성 있는 피막을 형성함으로써 종이의 내수성, 표면강도, 내화학성을 향상시킨다.

대표적인 가교제로는 글리옥살(glyoxal), 멜라민–포름알데히드 수지, 우레아–포름알데히드 수지, 그리고 다가 이소시아네이트(polyisocyanates)가 있다. 글리옥살은 전분의 수산기와 반응하여 공유결합을 형성하는 가교제로, 가격이 비교적 저렴하고 적용이 용이한 장점이 있다. 그러나 과량 사용 시 종이의 취성이 증가하고 황변(yellowing)이 발생할 수 있다.

멜라민–포름알데히드 및 우레아–포름알데히드 수지는 강한 3차원 네트워크 구

조를 형성하여 내수성과 기계적 강도를 크게 향상시키지만, 포름알데히드 방출에 따른 환경 및 안전 문제가 제기되고 있다. 한편, 이소시아네이트계 가교제는 매우 우수한 내수성 향상 효과를 나타내는 반면, 원가가 높고 독성 관리가 필요하다는 단점이 있다.

### 나. 소포제(defoamer)

소포제는 사이즈 프레스 공정에서 발생하는 기포를 제어하기 위해 사용되는 첨가제이다. 전분이나 각종 고분자 용액은 교반 및 순환 과정에서 공기가 쉽게 포획되어 거품이 형성되며, 이러한 기포가 제거되지 않으면 종이 표면 도포 시 코팅 불균일, 핀홀(pin hole), 도막 결함 등의 품질 문제를 유발한다.

일반적으로 사용되는 소포제로는 실리콘계, 미네랄 오일계, 지방산 에스테르계 등이 있으며, 공정 조건과 요구 물성에 따라 선택적으로 적용된다. 실리콘계 소포제는 표면장력을 크게 낮추어 기포를 신속히 파괴하는 매우 강력한 소포 효과를 가지지만, 과량 사용 시 종이 표면 오염이나 인쇄적성 저하를 초래할 수 있다. 반면 미네랄 오일계 및 지방산 에스테르계 소포제는 소포력은 상대적으로 약하지만 분산 안정성이 우수하여 사이즈 프레스 공정에서 보다 안정적인 운전이 가능하다.

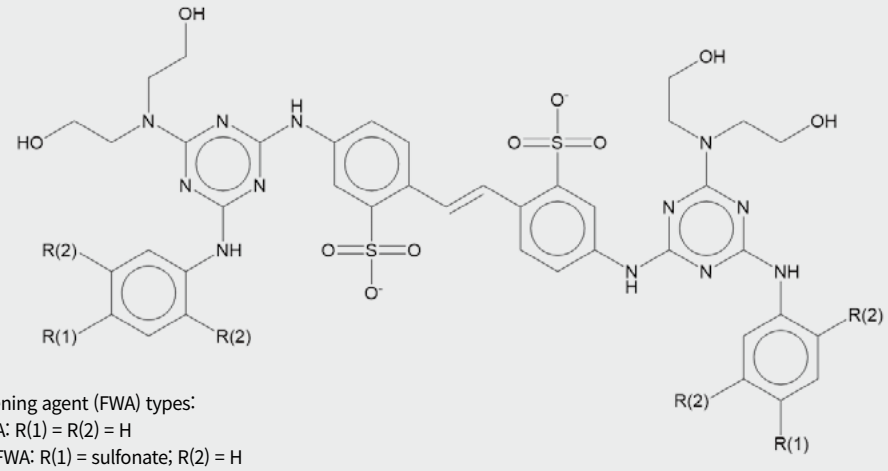
### 다. 형광증백제(FWA)

형광증백제(Fluorescent Whitening Agent)는 사이즈 프레스에서 종이의 백색도와 광학적 특성을 개선하기 위해 사용되는 첨가제이다. FWA는 자외선을 흡수한 뒤 청색광 영역의 가시광선을 재방출하는 형광 작용을 통해, 인간의 눈에 종이가 더 밝고 희게 보이도록 만든다.

일반적으로 사용되는 FWA는 스틸벤(stilbene) 유도체 계열 화합물로, 음이온성을 띠기 때문에 전분이나 기타 친수성 고분자와의 상용성이 우수하며 수계 시스템에서 안정적으로 적용될 수 있다. 이러한 특성 덕분에 사이즈 프레스 용액 내에서 균일하게 분산되어 종이 표면에 효과적으로 정착한다.

FWA의 발현 효율은 pH, 첨가 농도, 전분과의 상호작용, 그리고 건조 조건에 크게 영향을 받는다. 특히 사이즈 프레스에서 적용할 경우 FWA가 종이 표면층에 집중적으로 잔류하므로, 내첨 방식보다 광학적 효율이 높게 나타나는 장점이 있다. 그러나 과량 사용 시 형광 과다에 따른 색조 불균형이나 청색기 과잉 현상이 발생할 수 있으므로, 지종과 공정 조건에 맞춘 최적 첨가량 설정이 중요하다.

그림 11-11. 형광증백제의 화학적 구조




Fluorescent whitening agent (FWA) types:
Di-sulfonated FWA: R(1) = R(2) = H
Tetra-sulfonated FWA: R(1) = sulfonate; R(2) = H
Hexa-sulfonated FWA: R(1) = H; R(2) = sulfonate

## 3. 표면사이징 공정

표면사이징은 앞서 언급한 바와 같이 종이의 표면강도, 내수성, 인쇄적성을 개선하기 위해 수행되는 공정으로, 종이가 사이즈 프레스를 통과하면서 전분, 라텍스, CMC, 합성 공중합체 등으로 이루어진 수용성 고분자 용액 혹은 에멀션이 표면에 도포된다. 이렇게 형성된 피막은 섬유 간 결합을 강화하고 표면을 치밀하게 하여 기계적 성질을 향상시킨다. 사이즈액의 도포는 사이즈 프레스를 통해 이루어지며, 도포 방식에 따라 피막의 균일성, 두께, 침투 깊이가 달라진다. 또한, 용액의 점도, 고형분, pH 등 사이즈액 특성뿐 아니라, 롤의 압력 및 속도와 같은 공정 조건이 피막 특성에 영향을 미치므로 사이즈 프레스 종류와 특성을 이해하는 것이 중요하다.

### (1) 사이즈 프레스(size press)

사이즈 프레스는 종이 표면에 사이즈액을 도포하는 방식에 따라 여러 형태로 나누어진다. 가장 전통적인 형태는 폰드 프레스(pond press)로 두 개의 대형 롤 사이에 사이즈액의 폰드를 유지하면서 종이가 통과하는 방식이다. 게이트 롤 프레스(gate roll press)는 두 롤 사이의 좁은 틈을 통해 사이즈액을 대형 롤로 전이시킨 후 종이에 도포하는 방식으로, 폰드 프레스에 비해 도포량 조절이 용이한 특징이 있다. 현

대 제지공정에서 가장 널리 사용되는 방식은 필름 프레스(film press)로, 계량 장치(블레이드 또는 로드)를 이용해 롤 표면에 얇은 액막(film)을 형성한 뒤 이를 종이에 전이시키는 방식이다. 이 방법은 도포량 제어가 정밀하고 고속 운전에 적합하며, 표면 위주의 처리로 건조부하를 줄일 수 있다는 장점이 있다. 본 장에서는 플러디드 닙 사이즈 프레스, 프리미터드 필름 프레스(블레이드 및 로드 방식), 게이트 롤 사이즈 프레스, 그리고 제트 어플리케이터의 구조와 특징을 소개하고자 한다.

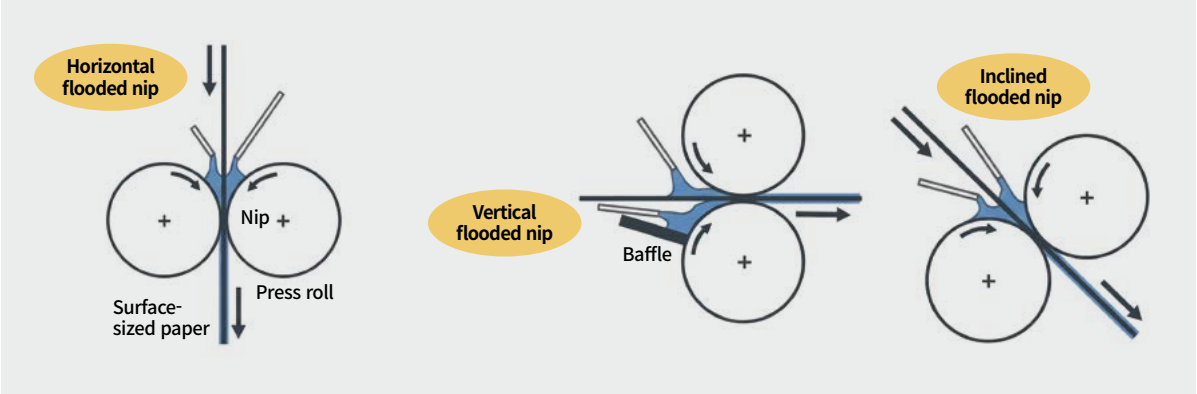
### 1) 플러디드 닙 사이즈 프레스(flooded nip size press)

플러디드 닙 사이즈 프레스는 가장 전통적인 형태로 폰드 사이즈 프레스(pond size press)라고도 한다. 구조와 작동 원리가 단순하다. 서로 맞물려 회전하는 두 개의 대형 롤 사이의 닙(nip) 구간에 사이즈액이 풀(pool) 형태로 채워져 있고, 건조된 종이가 이 닙을 통과하면 양면에 동시에 사이즈액이 도포된다. 종이가 닙을 지나갈 때 롤의 압력과 액체의 점도, 그리고 종이의 속도에 따라 침투 깊이와 도포량이 결정된다. 플러디드 닙 사이즈 프레스는 구조가 단순해서 유지보수가 쉬우며, 한 번에 양면 도포가 가능하다는 장점이 있지만, 닙 공간에 사이즈 용액을 과량으로 채운 상태에서 종이가 통과하기 때문에 종이에 도포되는 사이즈액의 양을 정확하게 제어하는 것이 어렵다. 이 방식은 사이즈액의 종이 내부로의 침투가 상대적으로 높아 도포량 또한 높으므로 내수성과 강도를 크게 향상시킬 수 있으나, 사이즈액이 과량 침투하면 강도가 낮은 종이의 경우 지절이 발생할 위험이 있다. 또한, 사이즈액의 양면 도포량을 정밀하게 제어하기 어려운 단점도 존재한다. 뿐만 아니라 고속으로 운전하면 사이즈액의 튐 현상이 극심해지므로 고속 초지기에는 사용할 수 없다. 이러한 한계로 인해 현재에는 균일한 사이즈액 도포가 가능하며, 고속 초지기에 활용이 가능한 필름 프레스가 주로 사용되고 있다. 그림 11-12는 플러디드 닙 사이즈 프레스의 형태로 크게 수직형, 수평형 및 경사형으로 구분된다.

### 2) 프리미터드 필름 프레스(pre-metered film press)

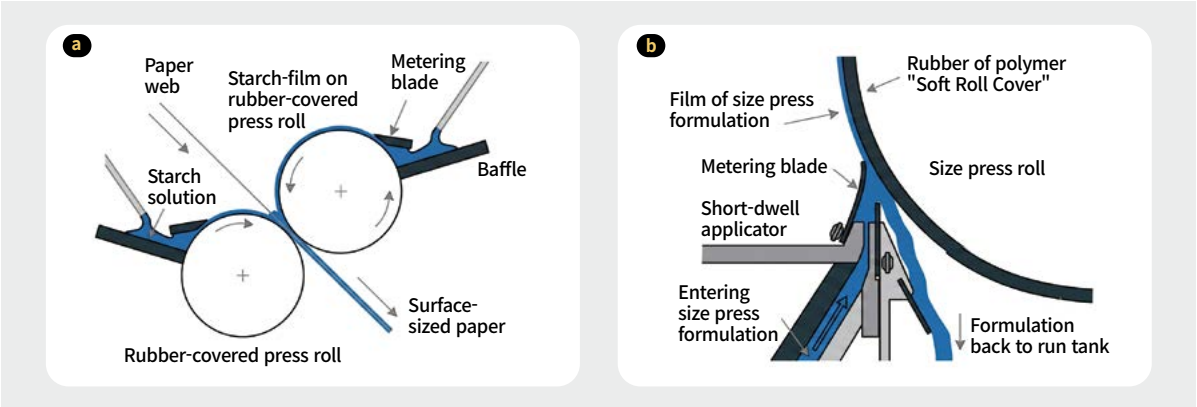
프리미터드 필름 프레스는 전통적인 닙 사이즈 프레스 방식의 한계를 극복하기 위해 개발된 장치로, 롤 표면에 먼저 일정 두께의 사이즈액 필름을 형성한 뒤 이를 종이에 전달하는 방식이다. 필름의 두께는 미터링 장치에 의해 정밀하게 제어

그림 11-12. 플러디드 닙 사이즈 프레스 장치




출처: Hubbe, M. A., Tayeb, P., Joyce, M., Tyagi, P., Kehoe, M., Dimic-Misic, K., & Pal, L. (2020). Size press practices and formulations affecting paper properties and process efficiency – A review. BioResources, 15(3), 5736–5866.

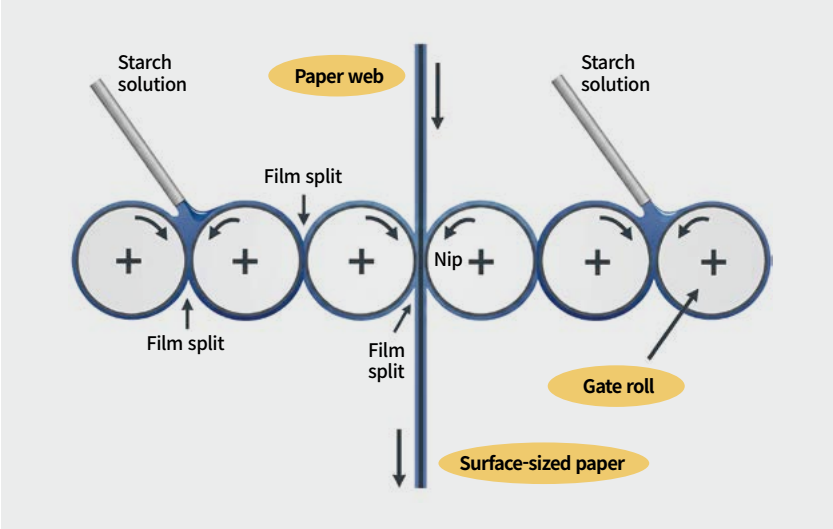
그림 11-13. 미터링 블레이드 필름 프레스




출처: Hubbe, M. A., Tayeb, P., Joyce, M., Tyagi, P., Kehoe, M., Dimic-Misic, K., & Pal, L. (2020). Size press practices and formulations affecting paper properties and process efficiency – A review. BioResources, 15(3), 5736–5866.

할 수 있다[18]. 대표적인 방식으로 미터링 블레이드(metering blade)와 미터링 로드(metering rod)가 있다. 그림 11-13은 미터링 블레이드 필름 프레스 장치를 보여주고 있다. 미터링 블레이드 방식은 롤 표면에 공급된 사이즈액을 블레이드로 긁어내어 정확한 두께만 남긴 뒤, 이 필름을 종이에 전사한다. 이 방식은 정밀도가 높아 필름 두께의 균일성이 뛰어나며, 고점도 및 고고형분 사이즈액을 사용할 수 있어 사이즈액이 종이 내부로 침투하는 것을 최소화하고 표면 중심의 처리가 가능하다. 미터링 로드 방식은 표면에 나선형 와이어가 감긴 로드를 회전시키면서 액체를 일정 두께로 남기는 방식이다. 구조가 단순하고 유지보수가 용이하나, 블레이드 방식에 비해 두께 제어의 정밀성이 다소 떨어진다. 프리미터드 필름

그림 11-14. 게이트 롤 사이즈 프레스 장치




출처: Hubbe, M. A., Tayeb, P., Joyce, M., Tyagi, P., Kehoe, M., Dimic-Misic, K., & Pal, L. (2020). Size press practices and formulations affecting paper properties and process efficiency – A review. BioResources, 15(3), 5736–5866.

프레스는 고속 운전에서도 안정성이 높고, 종이 표면에 균일한 막을 형성해 인쇄적성, 내수성, 표면강도를 고르게 향상시킬 수 있다. 그러나 장치의 구조가 복잡하고 초기 투자 비용이 높다는 점을 고려해야 한다.

### 3) 게이트 롤 사이즈 프레스(gate-roll size press)

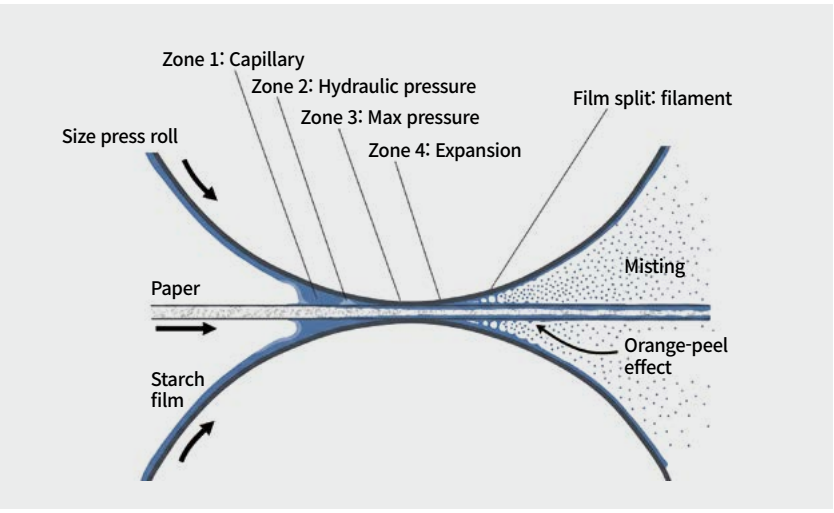
게이트 롤 사이즈 프레스는 플러디드 닙과 비슷한 구조를 가지지만, 외부에 추가로 설치된 두 롤 사이에 사이즈액을 공급하고 이들 두 롤 간격(게이트)을 정밀하게 조절하여 공급량을 제어한다는 점에서 구분된다. 지필이 통과하는 닙에 사이즈액 폰드가 형성되지 않기 때문에 고속에서도 사이즈액의 튐 현상이 적어 비교적 투롤 사이즈 프레스에 비해서는 높은 속도에서도 활용 가능하다. 사이즈액은 게이트 롤 간의 좁은 간극을 통과하면서 사이즈 프레스 롤을 거쳐 종이 표면에 균일하게 전사된다. 사용되는 게이트 롤의 속도는 지필 속도에 비해 많이 느리게 운전된다. 롤 속도의 차이나 간격 변화로 도포량을 세밀하게 조절할 수 있다(그림 11-14). 게이트 롤 사이즈 프레스 방식은 사이즈액 소량 도포에 적합하고, 표면 품질에 민감한 특수 용지나 기능성 코팅 전처리에 효과적이다. 그러나 고점도 사이즈액에서는 필름 형성에 한계가 있으며, 균일성을 유지하기 위해 롤 표면 상태

를 엄격히 관리해야 한다. 따라서 주로 중속 이하의 특수지나, 표면 처리량이 적은 경우에 사용된다.

### (2) 표면사이징 공정인자

표면사이징 공정에서 종이가 사이즈 프레스를 통과할 때, 사이즈액의 부착은 일련의 물리적·유체역학적 메커니즘에 의해 이루어진다. 그림 11-15는 사이즈 프레스에서 롤을 지나는 종이가 받는 힘과 필름의 분할을 보여주는 모식도이다. 종이가 사이즈액 폰드(pond 또는 puddle)에 진입하면 표면이 젖기까지 짧은 지연시간이 존재하며, 이후 사이즈액의 흡수가 시작된다. 흡수량은 폰드 깊이, 초지속도에 영향받는 접촉시간, 사이즈액의 점도, 종이의 구조적 특성(투기도, 내부사이즈도 등)에 따라 좌우된다. 종이가 닙(nip) 구간에 접근하면 회전 롤에 의한 수력학적 압력이 증가하면서 일부 사이즈액이 기공 내부로 침투하고, 동시에 압착에 의해 내부 공기가 배출된다. 닙을 벗어나 종이가 팽창할 때에는 스폰지처럼 사이즈액을 흡수한다. 이어서 롤과 종이 사이의 필름이 분리되면 일부 사이즈액은 종이 위에 잔류하지만 일부 사이즈액은 롤의 표면에 잔류한다. 즉 필름 분할 현상(film splitting)이 발생한다. 이 과정을 거치면서 종이 표면에 최종적으로 부착되는 사이즈액 양이 결정되는데, 이는 롤과 종이의 상대적인 표면 거칠기와 전분액의 유

**그림 11-15.** 사이즈 프레스에서 롤을 지나는 종이에 작용하는 힘과 필름의 분할




출처: Hubbe, M. A., Tayeb, P., Joyce, M., Tyagi, P., Kehoe, M., Dimic-Misic, K., & Pal, L. (2020). Size press practices and formulations affecting paper properties and process efficiency – A review. BioResources, 15(3), 5736-5866.

변학적 특성에 크게 영향을 받는다. 즉, 표면 거칠기가 클수록 더 두꺼운 사이즈액 필름이 부착된다. 이러한 사이즈액의 부착 과정 전체는 불과 수분의 1초 이내에 완료된다.

표면사이징 공정의 조업성(runnability)은 장치의 종류뿐만 아니라 다양한 운전 조건, 즉 공정 인자에 의해 크게 좌우된다. 종이 표면에 균일한 전분층을 형성하는 과정에서는 사이즈액의 유변학적 거동(rheological behavior)이 핵심적인 역할을 하며, 이는 공정 중 발생하는 전분의 물성 변화에 크게 영향을 받는다. 이러한 변화는 도포 균일성과 공정 효율성에 직접적인 영향을 미친다. 또한 장비의 특성, 사이즈액의 화학적 조성, 그리고 구성성분 간 상호작용 역시 도포효율과 공정 안정성을 결정하는 중요한 요소로 작용한다.

운전 과정에서 발생하는 가장 큰 문제는 지절(web break)이다. 이는 종이 내부의 구멍이나 구조적 결함으로 인해 발생할 수 있으며, 과도한 재습윤으로 시트의 전반적 강도가 약화될 경우에도 나타난다. 이러한 문제는 생산성을 저하시킬 뿐만 아니라 제품 품질의 안정성까지 위협한다. 따라서 안정적인 표면사이징 공정을 유지하기 위해서는 온도, 고형분 농도, 도포량, 닙 압력, 공정 속도 등 주요 운전 조건이 조업성에 미치는 영향을 종합적으로 이해하고 적절하게 제어하는 것이 중요하다.

### 1) 온도

사이즈액의 온도는 점도에 직접적인 영향을 미친다. 일반적으로 온도가 높아지면 사이즈액의 점도가 낮아지며, 이에 따라 다공성 구조를 가진 종이에 대한 침투성이 증가한다. 예를 들어, 물의 경우 20 °C에서 60 °C로 온도가 상승하면 점도가 절반 이하로 감소하며, 전분 용액에서도 이와 유사한 경향이 나타난다[19]. 따라서 사이즈액의 온도가 상승하면 전분 용액의 점도 감소로 인하여 전분 도포량이 증가하고, 플러디드 닙(flooded nip) 방식에서는 고온의 사이즈액에 노출되면, 종이가 팽윤하면서 전분 용액의 종이 내부로의 침투가 더욱 촉진된다. 산업현장에서 사용되는 전분 용액의 온도는 51~65 °C 범위이다.

온도 영향은 전분의 종류에 따라 다르게 나타난다. Mesic 등(2004)[20]의 연구에 따르면, 소수성 변성전분(알킬화 전분)은 높은 온도에서 도포했을 때 종이의 소수성이 현저히 향상된 반면, 산화전분(oxidized starch)은 온도 변화에 거의 영향을

받지 않았다. 이러한 결과는 고분자 용액의 거동이 단순히 점도 저하만으로 설명되지 않음을 보여주며, 온도가 전분의 구조적 특성과 상호작용 방식에 따라 서로 다르게 작용할 수 있음을 보여준다.

### 2) 고형분

일반적으로 고형분이 낮으면 점도가 낮아 종이 내부로의 침투가 용이하지만, 도포량이 제한되고 건조 시 제거해야 할 수분량이 증가하여 건조 에너지 요구량이 커진다. 반대로 고형분이 높으면 건조 효율이 개선되고 지절이 감소하는 장점이 있으나, 점도 상승으로 균일한 도포가 어려워지고 미스트(misting)나 오렌지필(orange-peel)과 같은 결함이 나타날 수 있다. 전분 용액의 적정 고형분 범위는 사이즈 프레스 장비 특성에 따라 달라지는데, 플러디드 닙(flooded nip)은 일반적으로 10% 이하의 낮은 고형분 조건에서 운전되므로 전분 용액의 침투가 용이한 특징이 있다. 반면 필름 프레스(film press)는 상대적으로 높은 고형분에서도 운전이 가능하여, 종이 표면에 보다 균일한 피막을 형성하는 데 유리하다.

### 3) 닙 압력

닙 압력 또한 전분 용액의 침투에 중요한 인자로, 특히 생산 속도가 빠를수록 닙에서 종이에 가해지는 압력이 큰 영향을 미친다. 필름 프레스에서는 보통 닙폭 1 m당 25~30 kN 정도의 압력이 적용되며, 이는 전분 용액이 종이 내부로 침투하는 정도를 좌우한다[21]. 따라서 압력, 속도, 그리고 용액의 성질은 모두 전분 침투 거동을 결정하는 핵심 요인이라 할 수 있다.

### 4) 지필 속도(web speed)

사이즈 프레스 공정에서 지필 속도는 생산성과 직결되는 중요한 운전 변수이지만, 일정 수준을 넘어서면 도포 안정성에 문제가 발생할 수 있다. 지필이 지나치게 빠르게 이동하면 전분 용액이 균일한 막을 형성하지 못하고, 이 과정에서 도포량, 점도, 고형분 농도, 닙 압력 등이 최대 운전속도를 좌우하는 핵심 변수로 작용한다. 예를 들어 도포량이 증가할수록 고속 운전 시 용액 분포의 불균일성이 커지

고, 점도가 높을수록 도포 안정성이 저하될 가능성이 증가한다. 따라서 지필 속도의 최대 허용 범위는 고정된 값이 아니라 도포 조건과 장치 특성에 따라 달라지는 상대적 개념으로 이해해야 한다.

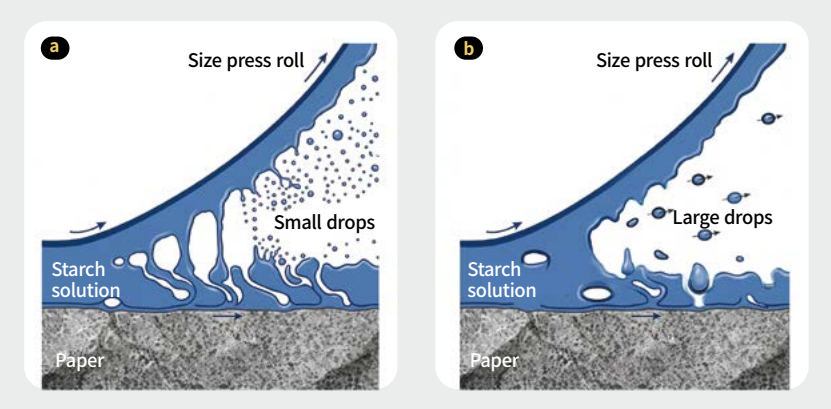
### (3) 필름 분리 문제(film splitting problem)

사이즈 프레스에서는 지필의 속도가 증가하거나 전분 용액의 도포량이 많아지면 사이즈 프레스 닙 출구에서 전분 용액이 종이 표면과 롤 사이에서 불규칙하게 분리되는 필름 분리 현상이 발생하게 된다. 이 필름 분리 현상으로 인하여 작은 액적이 공기 중으로 비산하는 미스팅(misting) 현상과, 종이 표면에 울퉁불퉁한 무늬가 생기는 오렌지필(orange-peel) 현상이 발생하게 된다.
필름 분리 현상은 전분 용액의 물성과 공정 조건에 따라 달라진다. 전분 용액의 점성이 높아지면 필라멘트가 쉽게 단절되지 않아 미스트 발생이 감소하는 경향이 있으나, 점성이 지나치게 낮을 경우 필라멘트가 쉽게 끊어져 미스팅이 심해질 수 있다. 이러한 용액의 점성은 카르복시메틸셀룰로오스(CMC)와 같은 수용성 고분자의 첨가를 통해서 조절할 수 있다[22]. 또한, 사이즈액의 고형분 함량이나 전분 용액의 보수성에 따라서도 필름의 안정성이 달라진다. 고형분이 높을수록 필름이 빠르게 고착되어 미스트를 줄이는 데 유리하지만, 지나치게 빠른 고착은 장치 표면에 전분 찌꺼기가 쌓이는 부작용을 일으킬 수 있다. 이러한 필름 분리 문제는 하나의 방법만으로는 해결하기 어렵고, 공정 속도, 전분 용액의 점도, 고형분, 보수성 같은 여러 조건이 복합적으로 작용한다. 따라서 사이즈 프레스 운전 조건에 맞추어 이들 변수를 균형 있게 조정하는 것이 중요하다. 예를 들어, 저속에서는 보수성이, 고속 운전에서는 빠른 고착 특성이 상대적으로 더 중요한 인자로 작용할 수 있다.

#### 1) 미스팅(Misting)

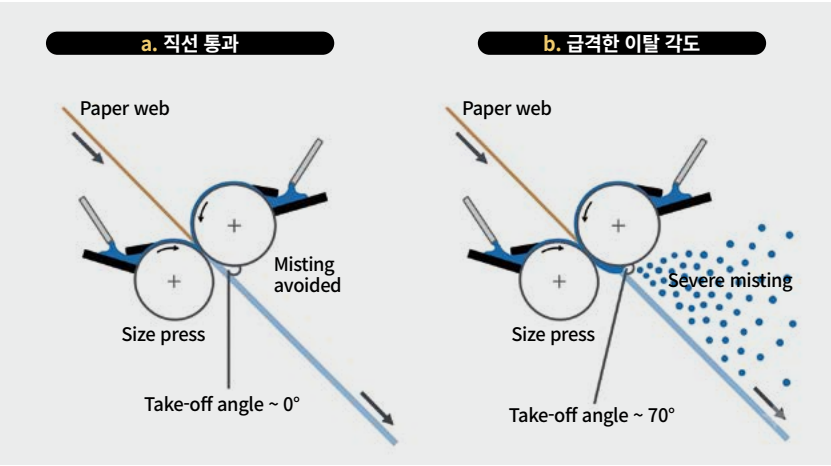
미스팅이란 사이즈 프레스 닙 출구에서 전분 용액이 인장변형 후 끊어지며 공기 중으로 미세한 액적(droplet)이 비산하는 현상을 의미한다. 장비 표면에 떨어진 액적은 단순히 외관을 더럽히는 정도에 그치지만, 종이 표면에 떨어진 경우에는 건조 과정에서 수분이 증발하면서 먼지(dust)와 같은 표면 결함을 남길 수 있다. 특히 액적이 공기 중을 이동하는 동안 수분이 부분적으로 또는 대부분 증발하면

그림 11-16. 사이즈 프레스 닙 출구에서의 미스트(a)와 큰 액적(b) 형성




출처: Hubbe, M. A., Tayeb, P., Joyce, M., Tyagi, P., Kehoe, M., Dimic-Misic, K., & Pal, L. (2020). Size press practices and formulations affecting paper properties and process efficiency – A review. BioResources, 15(3), 5736–5866.

그림 11-17. 사이즈 프레스에서 지필의 이탈 각도가 미스트 발생에 미치는 영향




출처: Hubbe, M. A., Tayeb, P., Joyce, M., Tyagi, P., Kehoe, M., Dimic-Misic, K., & Pal, L. (2020). Size press practices and formulations affecting paper properties and process efficiency – A review. BioResources, 15(3), 5736–5866.

이러한 문제가 더욱 두드러진다. 미스트의 발생은 전분 용액의 도포량과 지필 속도에 따라 달라진다. 속도와 도포량이 낮은 조건에서는 전분 용액이 가늘고 길게 신장되다가 표면장력 때문에 잘게 끊어져 작은 미세 미스트가 형성된다(그림 11-16(a)). 반대로 속도와 도포량이 높으면, 닙을 빠져나가는 순간 원심력과 관성력이 크게 작용하여 상대적으로 큰 물방울이 종이에서 튀어 오른다(그림 11-16(b))[23]. 즉, 운전 조건이 달라지면 미스트의 크기와 양도 달라진다.

종이는 닙을 지난 후 이상적으로는 곧바로 직선 경로를 따라 롤로부터 이탈해야

한다. 그러나 실제 운전 조건에서는 종이가 한쪽 롤 표면에 일시적으로 부착된 상태로 일정 시간 동안 이동하다가 떨어지는 현상이 발생할 수 있다(그림 11-17) [24]. 이와 같은 거동은 종이와 롤 간의 접촉 시간을 증가시키고, 이탈 시 형성되는 분리 각도를 크게 하여 전분 용액이 균일하게 분리되지 못하도록 만든다. 그 결과 용액은 불안정하게 연신되다가 불규칙적으로 파단되며, 다량의 미세 액적이 공기 중으로 방출된다. 특히 웹 속도가 증가할수록 이러한 현상은 더욱 두드러지며, 미스트 발생을 심화시키는 요인으로 작용한다.

2) 오렌지필(orange peel) 및 리빙(ribbing) 현상

사이즈 프레스 닙 출구에서 연신된 전분 용액이 불규칙하게 분리된 뒤 종이 표면으로 다시 수축하면서 건조되어, 표면에 귤껍질과 같은 불규칙한 무늬가 형성될 수 있다. 이것을 오렌지필(orange peel) 현상이라고 한다[24, 25]. 또한, 전분 용액의 유동이 불안정할 경우에는 표면에 일정한 간격의 줄무늬 모양이 나타나기도 하는데, 이를 리빙(ribbing) 현상이라 부른다. 오렌지필과 리빙은 지필 속도가 빠르거나 도포층이 두꺼울 때, 사이즈액에 공기가 많이 섞여 있을 때, 혹은 고형분이 낮을 때 발생하기 쉽다. 이러한 표면 결함을 완화하는 방법의 하나는 전분 용액에 틱소트로피(thixotropy) 성질을 부여하는 것이다[26]. 틱소트로피란 액체가 정지 상태에 있을 때는 내부 구조가 형성되어 점도가 높게 유지되지만, 전단력이 가해지면 그 구조가 일시적으로 붕괴되어 점도가 다시 낮아지는 가역적 유변학적 거동을 말한다. 이와 같은 유변학적 특성을 가지면 도포 시 유동성이 확보되고, 도포 후에도 유동성이 유지되므로 표면 무늬의 발생을 줄일 수 있다. 한편 오렌지필 현상은 용액 유동의 문제뿐 아니라 원지의 형성 불균일과 같은 원지 특성에 의해서도 발생할 수 있다. 경우에 따라서는 전분이 완전히 건조되기 전에 표면장력에 의해 자가 평활화(self-leveling)가 일어나 결함이 완화되기도 하므로, 오렌지필이 항상 명확하게 나타나는 것은 아니다.

### (4) 전분 용액의 변화

사이즈 프레스 공정에서 사용되는 전분은 단순히 종이 표면에 도포되는 데 그치지 않고, 공정 조건과 후속 처리 과정에서 다양한 물리·화학적 변화를 겪는다. 이

러한 변화는 전분의 분자 구조와 물성을 변화시켜 종이의 강도, 표면 특성, 그리고 인쇄적성과 같은 최종 품질에 직접적인 영향을 미친다. 예를 들어, 전분은 저장 및 냉각 과정에서 분자 사슬이 재배열되는 노화(retrogradation) 현상이 발생할 수 있으며, 건조 과정에서는 수분 증발과 함께 구조적 변화가 일어난다. 또한 열, 전단력, 그리고 화학적 조건에 의해 분자 사슬의 절단이나 부분적 분해가 일어나기도 하는데, 이러한 분자적 변화는 사이즈액의 점도와 유변학적 거동을 크게 좌우하여 도포 안정성과 침투 거동에 중요한 영향을 미친다.

### 1) 아밀로스(amylose) 성분의 노화

노화(retrogradation)는 전분에 포함된 아밀로스 성분이 시간의 경과에 따라 다시 규칙적으로 배열되면서 서로 응집하여 용액 상태에서 분리되는 현상을 말한다[27]. 제지 현장에서는 전분이 노화되면 형성되는 전분막의 연속성과 결합력이 저하되는 경우가 많으므로, 사이즈 프레스 공정에서는 침전물이나 혼탁이 없는 맑고 안정한 전분 용액을 사용하는 것이 바람직하다.

일반적으로 노화는 낮은 pH, 낮은 온도, 서서히 냉각되는 조건에서 촉진되며, 칼슘($Ca^{2+}$)이나 알루미늄($Al^{3+}$)과 같은 다가 양이온이 존재할 때 더욱 쉽게 발생한다. 전분이 노화되면서 생성된 침전물이 저장 탱크 내부에 축적되면 슬러지(sludge)를 형성하게 되고, 이 슬러지가 사이즈 프레스로 유입되면 종이 표면에 얼룩이나 결점으로 나타난다. 심한 경우에는 권취 과정에서 결함 부위를 절단하고 재접합해야 하므로 생산성이 크게 저하될 수 있다.

이러한 문제는 전분 용액을 공정 투입 전에 여과(filtering)함으로써 상당 부분 예방할 수 있다. 여과 공정을 적용하면 노화에 의해 생성된 미세 응집물과 침전물을 제거하여 도포 안정성을 유지할 수 있으며, 탱크 내 슬러지의 과도한 축적을 방지하여 전분 용액을 폐기해야 하는 상황도 줄일 수 있다.

### 2) 증발의 영향

전분을 호화(gelatinization)하기 위해서는 비교적 높은 온도가 요구되므로, 전분 용액을 배관으로 이송하거나 운전 탱크(run tank)에 저장하는 과정, 그리고 사이즈 프레스에서 종이에 적용하는 과정에서 수분 증발에 따른 문제가 불가피하게

발생한다. 특히 대기압 조건에서 증기 재킷(steam-jacketed) 용기를 이용하여 전분을 호화할 경우, 액면 위에서 수분이 먼저 증발하면서 표면에 건조된 전분층이 형성될 수 있다. 이 건조막이 운전 중 떨어져 나오면 용해되지 않은 입자상의 이물로 작용하여 도포 결점이나 표면 결함의 원인이 된다.

또한 증기 재킷 탱크의 액면 부근이나 교반이 충분히 이루어지지 않는 사각지대(dead zone)에서는 전분이 국부적으로 건조·고화되었다가, 운전 중 일부가 다시 전분 용액 속으로 탈락·혼입되면서 겔 입자나 덩어리 형태로 존재하게 된다. 이러한 비균질 입자는 사이즈액의 유동 안정성을 저하시킬 뿐 아니라, 사이즈 프레스에서 품질 문제를 유발할 수 있다.

따라서 전분 호화 및 저장 공정에서는 액면 증발을 최소화하고, 탱크 내 전 영역에서 균일한 온도와 유동이 유지되도록 설계·운전하는 것이 중요하며, 필요에 따라 적절한 교반, 순환, 덮개 설치, 그리고 여과 공정 등을 병행하여 건조 전분 입자의 유입을 방지해야 한다.

### 3) 공중합체 침전(copolymer deposition)

사이즈 프레스에서 종이에 소수성을 부여하기 위해 첨가되는 공중합체(copolymer)는 분자 내에 친수성기와 소수성기를 동시에 가지는 구조적 특성 때문에, 용액의 화학적 조건에 매우 민감하게 반응한다. 이러한 물질은 pH, 염농도, 수질 경도(hardness)와 같은 공정수의 조성에 따라 용해 상태, 분산 안정성, 그리고 계면거동이 크게 달라진다. 따라서 균일하고 안정적인 도포를 위해서는 공급업체가 제시하는 권장 조건 범위(window)를 유지하는 것이 필수적이다.

예를 들어, 공정 조건이 산성 쪽으로 이동하거나 칼슘·마그네슘과 같은 경도 성분이 증가하면 공중합체의 용해성과 분산성이 저하되어 응집이나 상분리가 일어날 수 있다. 이로 인해 거품 발생, 미세 침전물 생성, 도포 불균일과 같은 문제가 나타나며, 심한 경우 롤 오염이나 표면 결점으로 이어질 수 있다.

따라서 현장에서는 공정수의 pH와 경도를 지속적으로 관리하여 화학적 안정 영역을 유지하는 것이 중요하며, 원수 변화나 약품 변경 시에는 사전 평가를 통해 최적의 운전 범위를 재설정해야 한다. 필요할 경우 실험실 및 파일럿 테스트를 통해 실제 공정 조건에 적합한 적용 농도와 운전 조건을 확인함으로써 공정 리스크를 최소화하고 품질 변동을 방지할 수 있다.

#### 4) 생분해(biodegradation)

전분은 알파-아밀라아제(α-amylase) 효소에 의해 쉽게 분해되는데, 이 효소는 토양이나 물과 같은 자연환경에 널리 존재하는 미생물에 의해서도 생성된다. 제지 공정수에 전분이 있으면 이를 영양원으로 하는 박테리아가 증식하면서 α-아밀라아제를 지속적으로 방출한다[28]. 전분을 호화할 때는 고온 조건이기 때문에 이 효소가 열변성되어 활성이 크게 감소하지만, 이후 저장, 이송, 희석 등 상대적으로 온도가 낮은 공정에서는 외부에서 유입된 미생물에 의해 효소가 다시 생성되어 효소 분해 가능성이 완전히 사라지지는 않는다. 일반적인 사이즈 프레스 운전 중에는 체류시간이 짧고 온도도 비교적 높은 편이어서 미생물 증식이 공정에 즉각적인 문제를 일으키는 경우는 많지 않다. 하지만 도포된 전분이 파지(broke)나 종이자원 재활용 공정을 통해 다시 공정수로 환류될 경우, 저장 시간 증가와 온도 저하로 인해 미생물 활성화가 일어나고, 이들이 생성한 α-아밀라아제에 의해 전분의 점도 저하와 분자량 감소가 발생할 가능성이 있다.

### (5) 원지 영향

사이즈 프레스 공정은 전분 용액 자체의 특성뿐만 아니라 원지(base sheet)의 구조적·물리적 특성에도 크게 영향을 받는다. 원지의 구조는 전분이 종이 내부로 얼마나 침투하는지, 그리고 표면에 어느 정도 잔류하는지를 결정하는 핵심 인자이다. 특히 공극률(porosity), 함수율(moisture content), 그리고 표면의 소수성(hydrophobicity)과 같은 요소들은 사이즈액의 흡수 거동과 표면 피막 형성에 직접적인 영향을 미친다.

전분이 지나치게 내부로 침투하면 표면에 형성되어야 할 전분막이 부족해져 표면 강도가 저하될 수 있으며, 반대로 침투가 과도하게 억제되면 섬유 간 결합 보강 효과가 충분히 발현되지 않아 기대하는 물성을 얻기 어렵다. 따라서 사이즈 프레스에서는 전분의 내부 침투와 표면 잔류 사이의 균형을 적절히 제어하는 것이 중요하며, 이 균형이 종이의 강성(stiffness), 표면강도, 그리고 인쇄적성과 같은 최종 품질을 좌우한다. 결국 안정적인 사이즈 프레스 운전을 위해서는 사이즈액 조건의 관리와 더불어, 원지의 밀도, 공극 구조, 건조 상태 등 기초 물성을 정확히 이해하고 이에 맞는 공정 조건을 설정하는 것이 매우 중요하다.

### 1) 원지의 투과성(permeability)

원지의 공극률은 사이즈 프레스에서 도포된 용액이 종이 표층에 잔류하는 정도(holdout)를 결정하는 가장 중요한 요인 중 하나로 알려져 있다[29, 30]. 일반적으로 공극률이 높을수록 사이즈액은 원지 내부로 더 깊게 침투하는 경향을 보인다. 반대로 밀도가 높은 원지를 사용하는 경우 안료가 포함된 사이즈액의 표면 잔류성(base sheet holdout)이 높아져 원지의 표면 균일성을 향상시킬 수 있다.

종이 내부로의 액체 침투 거동은 모세관 유동으로 설명되며, 이를 정량적으로 나타내는 대표적인 이론이 루카스–워시번(Lucas–Washburn) 방정식이다. 이 모델에 따르면 액체가 다공성 구조 속으로 침투하는 속도와 깊이는 공극 반경, 액체의 점도와 표면장력, 그리고 고체–액체 간 접촉각에 의해 좌우된다. 특히 공극 반경이 클수록 모세관 저항이 감소하므로 액체가 구조 내부로 더 빠르게 이동할 수 있으며, 이는 공극이 큰 원지에서 사이즈액 침투가 증가하는 현상을 잘 설명해 준다.

$$L^2 = \frac{\gamma r \cos\theta}{2\mu} t \qquad \text{식 1}$$

여기서 L은 침투 깊이, $r$은 모세관 반경, γ는 액체의 표면장력, θ는 접촉각, μ는 액체의 점도, 그리고 t는 시간을 의미한다.

다음 식 2는 종이 내부 공극을 균일한 원통형 모세관(capillary)으로 가정했을 때, 용액이 침투하는 과정에서 발생하는 점성 저항이 공극 크기와 어떤 관련이 있는지를 보여준다.

$$\Delta P_{viscous} = \frac{8\mu v L}{r^2} \qquad \text{식 2}$$

여기서 $\Delta P_{viscous}$는 사이즈 프레스 닙에서 전분 용액을 종이 속으로 밀어 넣는 압력이고, μ는 용액의 점도, $v$는 침투 속도, $L$은 액체 침투 깊이, $r$은 공극의 반경이다. 이 식에 따르면 액체가 모세관 내부를 흐를 때 발생하는 유동 저항이 공극 반경에 크게 의존하며, 공극이 작아질수록 액체와 벽면 사이의 마찰 효과가 상대적으로 증가하여 점성 저항이 급격히 커지게 된다. 즉, 동일한 점도를 가진 사이즈액이라도 공극이 미세한 고밀도 원지에서는 침투 속도가 현저히 감소하고 표면 잔류성이 증가하는 반면, 공극이 큰 저밀도 원지에서는 점성 저항이 작아 상대적으로 빠

른 침투가 일어나게 된다. 따라서 원지의 공극 구조에 따라 사이즈액의 점도와 도포 조건을 달리 설정해야 한다.

Lucas-Washburn 방정식(식 1)은 종이 내부에서 전분 용액이 모세관 작용에 의해 침투하는 현상을 설명하는 데 널리 사용되는 모델이다. 그러나 이 식은 종이의 공극을 균일한 원통형 모세관으로 단순화하여 가정하기 때문에, 실제와 같이 섬유가 불규칙하게 얽혀 있고 무기충전물 입자가 분산된 복잡한 다공성 구조를 충분히 반영하기에는 한계가 있다. 특히 충전물의 존재는 공극의 형상, 연결성, 그리고 내부 표면적을 크게 변화시켜 액체 유동 저항에 추가적인 영향을 미친다.

이러한 한계를 보완하기 위해 제안된 것이 Kozeny-Carman 방정식(식 3)이다. 이 방정식은 다공성 매체를 단순한 모세관 집합으로 간주하는 대신, 비표면적과 부피를 기반으로 유동 저항을 해석한다. 특히 비표면적 개념을 도입함으로써, 충전물이 포함된 종이처럼 내부 표면이 크게 증가한 구조에서 나타나는 침투 저항의 증가를 보다 현실적으로 설명할 수 있다[31].

$$k = \frac{\epsilon^3}{k_c S^2 (1-\epsilon)^2}$$ 식 3

이 식에서 $k$는 Darcy 투과계수(Darcy permeability coefficient), $\varepsilon$는 공극률(porosity), $k_c$는 공극의 굴곡도(tortuosity)와 같은 구조적 요인 보정 계수, 그리고 $S$는 고체의 비표면적(specific surface area)을 의미한다. 따라서 Lucas-Washburn 모델이 모세관 반경과 액체 물성에 따른 초기 침투 거동을 이해하는 데 유용한 반면, Kozeny-Carman 접근은 섬유-충전물 복합 구조가 형성하는 실제 다공성 네트워크의 투과성(permeability)을 평가하는 데 적합하다.

### 2) 원지의 소수성

원지의 소수성은 사이즈액의 침투 거동에 중요한 영향을 미치는 인자이다. 특히 플러디드 닙(flooded nip) 방식에서는 내첨사이징을 통해 원지의 소수성을 증가시키면 전분 용액의 모세관 침투가 감소하여 사이즈액의 흡수량이 줄어들고, 그 결과 과도한 습윤에 따른 지절 발생 위험을 낮출 수 있다(그림 11-18). 반면 필름 프레스(film press) 방식에서는 전분 용액의 고형분과 점도가 높고 닙에서의 접촉 시간이 매우 짧기 때문에, 용액의 이동이 모세관 작용보다는 닙 압력에 의해 지배

되는 경향이 크다. 따라서 이 경우 원지의 소수성이 침투에 미치는 영향은 상대적으로 작다. 그러나 이러한 조건에서도 내첨사이징은 전분의 표면 잔류 거동에 일정한 영향을 주어, 표면 피막 형성과 최종 물성에 간접적으로 기여할 수 있다.

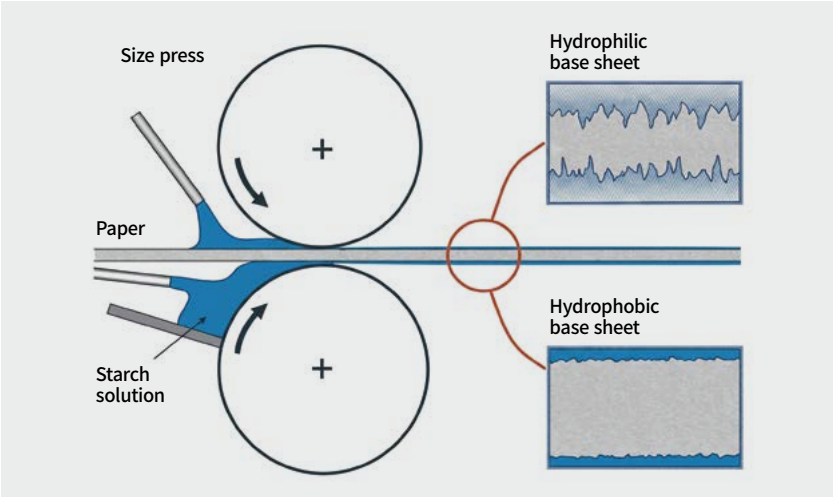
### 3) 원지의 함수율

사이즈 프레스에서 원지의 함수율은 전분 용액의 흡수 거동에 영향을 미치는 중요한 인자이다. 일반적으로 매우 건조한 원지는 비교적 습윤한 원지에 비해 전분 용액을 적게 흡수하는 경향을 보인다. 이는 셀룰로오스 스펀지가 완전히 건조된 상태에서는 초기 흡수성이 낮지만, 일단 습윤되면 액체 흡수가 용이해지는 현상과 유사하다.

실제로 원지의 함수율이 약 4~8% 범위에서 증가함에 따라 전분 용액의 흡수량이 증가한다고 보고된 바 있다[32]. 이러한 거동은 셀룰로오스의 결정면(crystal plane)에 따라 젖음성이 달라지는 특성과 관련이 있는 것으로 해석된다. 즉, 건조 과정에서 공기와 접촉한 셀룰로오스 표면에서는 분자 재배열에 의한 자기조립(self-assembly)이 일어나 상대적으로 물과의 친화성이 낮은 결정면이 외부에 노출될 수 있으며, 이로 인해 초기 젖음성과 흡수성이 저하될 가능성이 있다.

그러나 모든 연구에서 동일한 결과가 나타나는 것은 아니다. 함수율이 약 8%인

**그림 11-18.** 원지의 친수성과 소수성에 따른 전분 용액의 침투 특성




출처: Hubbe, M. A., Tayeb, P., Joyce, M., Tyagi, P., Kehoe, M., Dimic-Misic, K., & Pal, L. (2020). Size press practices and formulations affecting paper properties and process efficiency – A review. BioResources, 15(3), 5736–5866.

원지는 전분의 표면 잔류성(holdout)이 양호한 것으로 보고된 반면, 함수율이 약 2% 수준으로 매우 건조한 원지는 사이즈 프레스 용액으로부터 수분을 빠르게 흡수하는 것으로 보고되기도 하였다. 따라서 원지 함수율이 전분 용액의 침투 및 표면 잔류에 미치는 영향은 원지의 미세구조, 건조 이력, 원지의 소수성 등과 상호작용하는 복합적인 현상으로 이해할 필요가 있으며, 이를 명확히 규명하기 위해서는 추가적인 실험적 연구와 공정 조건에 대한 체계적인 분석이 요구된다.

#### 4) 원지의 지합

종이 제조 과정에서 플록(floc) 형성에 의해 원지의 지합(formation)이 불균일해질 경우, 국부적인 밀도와 공극 구조의 차이로 인해 전분 용액의 흡수량이 위치에 따라 달라질 수 있다. 이와 같은 종이 표면 공극의 불균일성은 사이징 이후 안료 코팅을 실시할 때 도공액의 침투 및 도포량 차이를 유발하여, 인쇄 얼룩(print mottle)과 같은 품질 결함으로 이어질 수 있다.

## 4. 최신 동향 및 적용 사례

표면사이징은 오랫동안 제지산업에서 종이의 표면강도와 인쇄적성을 향상시키는 핵심 공정으로 활용되어 왔다. 이러한 기술은 단순한 장치 구조나 운전 조건의 개선에 그치지 않고, 제지산업 전반의 품질 향상과 새로운 지종 개발에 중요한 변화를 가져왔다. 특히 전통적인 플러디드 닙(flooded nip) 사이즈 프레스에서 필름 프레스(film press)로의 전환은 사이즈액 도포량을 정밀하게 제어할 수 있게 하여 균일한 피막 형성을 가능하게 하였으며, 안료를 포함한 다양한 조성의 사이즈액을 적용할 수 있게 함으로써 기존 공정의 한계를 넘어서는 응용을 가능하게 하였다. 이러한 변화는 사이즈 프레스가 단순히 전분을 도포하는 공정을 넘어, 기능성 표면 처리와 특수 지종 개발의 기반 기술로 발전할 수 있음을 보여준다.

필름 프레스를 활용한 지종 확장은 초소수성(superhydrophobic) 표면 구현, 인쇄 품질 향상, 친환경 포장재 개발 등 다양한 분야에서 새로운 가능성을 제시하고 있다. 또한 안료가 포함된 사이즈액의 적용은 기존의 다층 코팅 공정 일부를 대체할 수 있어 공정 단순화와 비용 절감 측면에서도 유리하다. 따라서 본 절에서는

필름 프레스 기술이 적용된 최신 연구 동향과 다양한 응용 사례를 살펴봄으로써, 사이즈 프레스 기술이 종이의 기능과 용도를 어떻게 확장시키고 있는지 고찰하고자 한다.

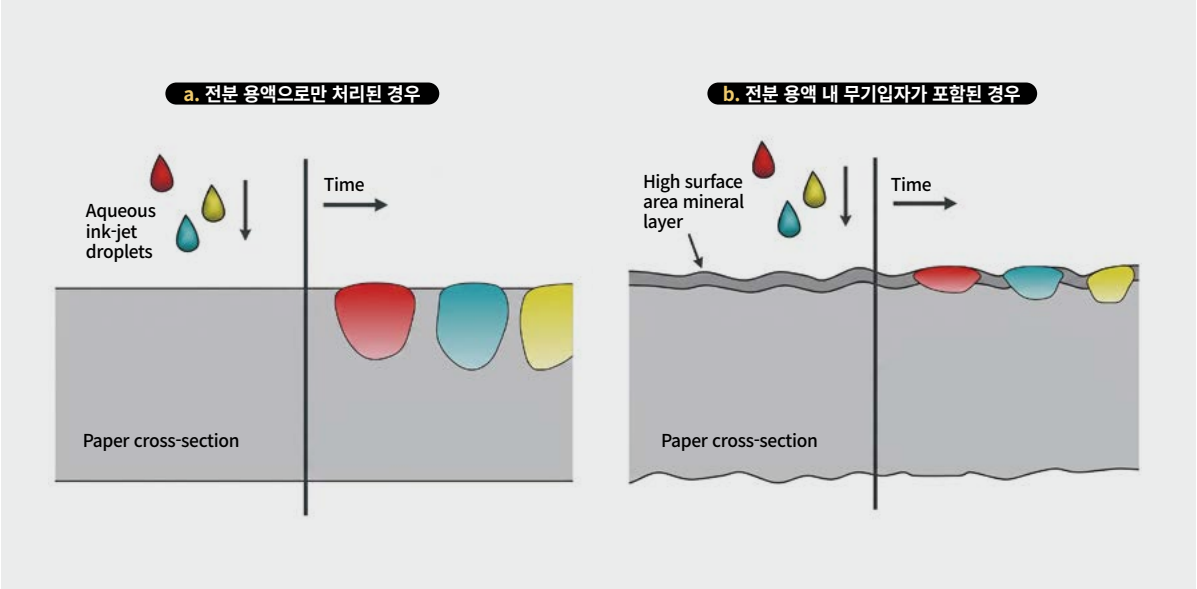
### (1) 안료 사이즈 프레스(pigmented size press)

고급 인쇄용 아트지나 판지(paperboard)와 같은 제품은 보통 두 차례의 안료코팅 공정을 거쳐 생산된다. 이 가운데 첫 번째 코팅층은 상대적으로 입자가 굵은 무기 안료를 사용하며, 종이에 직접적인 광택이나 매끄러움을 주기보다는 원지의 거친 표면을 메우고 종이 내부로 액체가 지나치게 스며드는 것을 막는 역할을 한다. 이러한 전처리 효과를 통해 두 번째 코팅층이 보다 균일하고 매끄럽게 형성될 수 있으며, 결과적으로 인쇄 품질도 향상된다. 이와 같은 첫 번째 코팅을 대체할 수 있는 방법으로 사이즈액에 안료를 첨가하는 기술이 제안되었다. 사이즈 프레스 공정에서 안료가 포함된 사이즈액을 적용하면 전통적인 프리코팅(pre-coating)과 유사하게 원지 표면의 요철을 보완하고 종이의 투과성을 감소시키는 효과를 얻을 수 있다[33, 34]. 즉, 별도의 코팅 공정을 일부 생략하면서도 요구되는 품질을 유지할 수 있는 가능성을 제공한다.
또한, 사이즈액에 무기물을 직접 첨가하면 종이의 기능을 더욱 확장할 수 있다. 예를 들어, 비표면적이 큰 무기물을 도입하면 잉크젯 인쇄 시 색소(colorant)가 종이 내부로 스며들지 않고 표면에 잔류되어 인쇄된 이미지의 해상도와 색 밀도가 크게 향상된다(그림 11-19). 그러므로 안료 사이즈 프레스는 단순히 코팅 대체 기술을 넘어, 인쇄 품질 개선과 특수 용도의 지종 개발에도 활용할 수 있는 잠재력을 지니고 있다.

### (2) 나노셀룰로오스 활용

나노셀룰로오스(NFC, nanofibrillated cellulose)는 제지 분야에서 많은 관심을 받아왔지만, 아직 상업적 활용은 제한적이다. 그러나 사이즈 프레스 공정에서 NFC를 적용하면 여러 가지 장점을 기대할 수 있다. NFC는 친수성 특성을 지니고 있어 전분과 상용성이 높으며, 두 물질을 함께 사용할 경우 섬유 간 결합이 강화되어 종이의 기계적 물성을 크게 개선할 수 있다. 실제 연구에 따르면, NFC를 첨

그림 11-19. 무기입자(예: 퓸드 실리카)에 의한 잉크젯 잉크의 흡착 사례




출처: Hubbe, M. A., Tayeb, P., Joyce, M., Tyagi, P., Kehoe, M., Dimic-Misic, K., & Pal, L. (2020). Size press practices and formulations affecting paper properties and process efficiency – A review. BioResources, 15(3), 5736–5866.

가했을 때 종이의 휨강성(bending stiffness)이 약 50% 향상되었고, 인장강도와 파열강도는 각각 52%와 194% 증가하였다[35]. 또한, 양이온 전분과 NFC를 병용한 경우 골판지 원지의 인장강도와 내부결합강도가 모두 개선되고 투기도가 크게 감소하는 사례가 보고되었다(그림 11-20)[36].

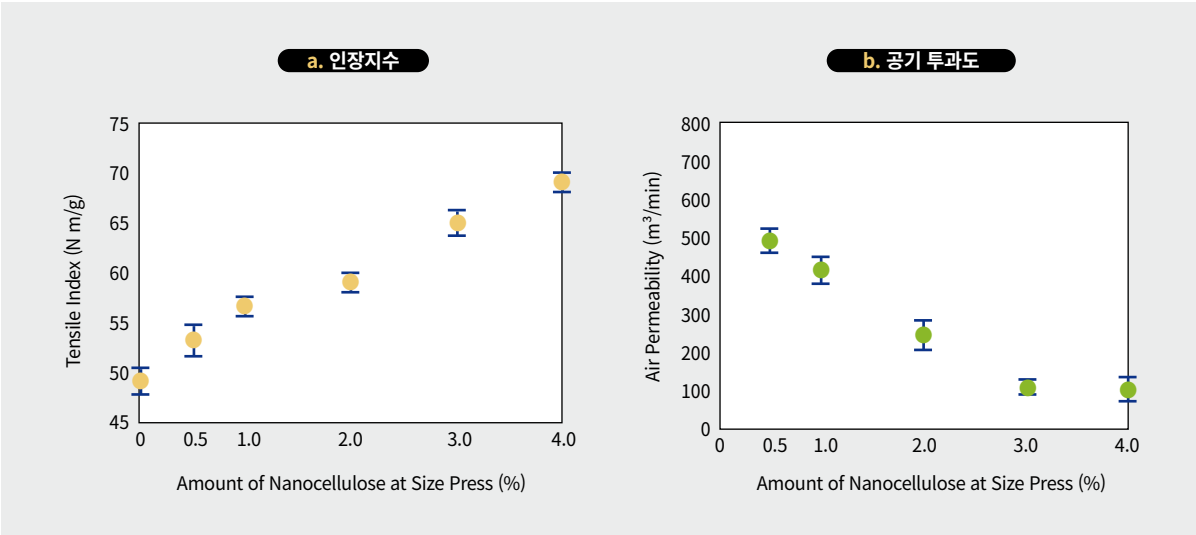
사이즈 프레스에 NFC 적용 시 가장 큰 문제는 사이즈액의 점도가 크게 증가한다는 점이다. NFC 현탁액은 일반적으로 전단박화(shear thinning) 거동을 보여 도포 시 점도가 크게 감소하지만, 전분 용액만 도포하는 경우에 비해 점도가 크게 상승하여 사이즈 프레스에서 적용할 수 있는 사이즈액의 고형분 농도를 제한하기에 한 번의 공정으로 충분한 도포량을 확보하기 어렵다. 반면 셀룰로오스 나노결정(CNC, cellulose nanocrystal)은 주로 황산이나 염산을 이용한 산가수분해 방식으로 제조되며 현탁액의 점도에 미치는 영향이 NFC에 비해 작아 사이즈 프레스 적용에 유리하다. CNC가 전분과 함께 사이즈 프레스에서 적용될 경우 전분이 연속적인 매트릭스를 이루고 CNC가 보강 입자로 작용하는 나노복합체(nanocomposite)로 볼 수 있으며, 이는 종이 강도를 향상시키는 것으로 보고된 바 있다[37].

NFC와 CNC의 고형분 변화에 따른 점도 차이는 두 물질의 형태적 특성에서 기인한다. CNC는 입자에 가까운 형태를 가지며, 입자 간 연속적인 네트워크 형성 여부에 따라 점도가 서로 다른 두 영역으로 구분되는 경향을 나타낸다. 반면, 섬유상 구조를 갖는 NFC 현탁액은 동일한 조건에서도 피브릴화 정도와 표면 화학적 특성에 따라 점도 변동성이 크게 나타나며, 비교적 불안정한 거동을 보인다. 그럼에도 불구하고 NFC와 전분의 조합은 인쇄용지의 성능 향상뿐 아니라 의약 소재, 친환경 포장재 등 고부가가치 분야로의 활용 가능성이 높아, 이에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

### (3) 배리어 성능 향상

식품 포장재 분야에서는 종이 표면에 배리어층(barrier layer)을 형성하는 것이 매우 중요하다. 이는 우유팩 등에 사용되는 폴리에틸렌 적층 필름과 같은 플라스틱을 대체할 수 있는 친환경적 대안으로 주목받고 있다. 그러나 일반적인 사이즈액은 고형분 함량이 약 18% 이하로 제한되어 있고 건조 후 전분 필름은 종이를 구성하는 섬유 사이의 결합부로 수축되기 때문에 종이의 공극을 완전히 차단하기에는 한계가 있다. 이러한 한계를 보완하기 위해 판상형(platy) 무기 입자를 사이

**그림 11-20.** 사이즈 프레스에서 4% 전분 용액과 함께 나노셀룰로오스를 첨가했을 때 나타난 판지의 물성 변화




출처: Tozluoglu, A., & Fidan, H. (2023). Effect of size press coating of cationic starch/nanofibrillated cellulose on physical and mechanical properties of recycled papersheets. BioResources, 18(3), 5993–6012.

즈액에 첨가하는 방법이 제안되었는데 이들 입자는 공극으로의 침투를 억제하고, 동시에 전분 기반 필름 내에서 산소나 기타 기체 분자의 투과를 차단하는 역할을 한다[38]. 이와 같은 공극 차단 방식 외에도, 발수성(water repellency)과 기체 차단 성능을 개선하기 위한 다양한 접근법이 제시되었다. 소수성 공중합체, 알킬 케텐 다이머(AKD), 트라이알콕시실란(trialkoxysilane)[39] 등을 사이즈액에 적용한 사례가 있으며, NFC를 조밀하게 적층하면 건조 조건에서 산소와 기름에 대해 매우 우수한 배리어 성능을 나타내는 것으로 보고되었다.

## 참고문헌


[1] Bristow, J. A. (1986). The surface application of starch and related substances in papermaking. Tappi Journal, 69(8), 102–106.

[2] Jane, J. (2006). Current understanding on starch granule structures. Journal of Applied Glycoscience, 53(3), 205–213.

[3] Craig, J. S., Burch, J. A., & Stone, J. E. (1968). Gelatinization of starch in the jet cooker. Tappi Journal, 51(3), 105–111.

[4] Lepoutre, P. (1989). Surface treatment of paper and board with starch. Tappi Journal, 72(6), 147–152.

[5] Wang, T., Wang, F., Ma, R. R., and Tian, Y. Q. (2022). Enzymatically modified starch for paper surface sizing: Enzymes with different action modes and sites. Carbohydrate Polymers 291, article no. 119636

[6] Radosta, S., Vorwerg, W., & Habben, A. (2001). Ammonium persulfate oxidation of starch. Starch/Stärke, 53(7), 356–361.

[7] Dobbs, J. C. (1993). In-mill starch conversion with ammonium persulfate. Tappi Journal, 76(6), 85–90.

[8] Radosta, S., Kiessler, B., Vorwerg, W., and Brenner, T. (2016). Molecular composition of surface sizing starch prepared using oxidation, enzymatic hydrolysis and ultrasonic treatment methods. Starch-Starke 68(5-6), 541-548.

[9] Middleton, S. R., & Scallan, A. M. (1989). Surface chemical aspects of starch sizing. Tappi Journal, 72(3), 77–81.

[10] Ellis, R. P., Cochrane, M. P., Dale, M. F. B., Duffus, C. M., Lynn, A., Morrison, I. M., Prentice, R. D. M., Swanston, J. S., and Tiller, S. A. (1998). Starch production and industrial use. Journal of the Science of Food and Agriculture 77(3), 289-311.

[11] Howard, R. C., & Jowsey, C. J. (1989). The effect of cationic starch on the surface strength of paper. Appita Journal 42(5), 356–362.

[12] Moutinho, I., Ferreira, P. J., & Figueiredo, M. M. (2004). Effect of cationic starch on paper properties. Industrial Crops and Products, 20(2), 209–219.

[13] Aguado, R., Ferreira, A. C. S., Gramacho, S., Murtinho, D., and Valente, A. J. M. (2022). Crosslinking of surface-sizing starch with cyclodextrin units enhances the performance of paper as essential oil carrier. Nordic Pulp & Paper Research Journal 37(3), 413-421.

[14] Bhardwaj, S., and Bhardwaj, N. K. (2018). Comparison of polyvinyl alcohol and oxidised starch as surface sizing agents. Appita Journal 71(4), 321-329.

[15] Bhardwaj, S., and Bhardwaj, N. K. (2019). Mixing of oxidized starch and polyvinyl alcohol for surface sizing of paper. Nordic Pulp & Paper Research Journal 34(3), 343-353.

[16] Ehrhardt, S., and Leckey, J. (2020). Fluid resistance: The sizing of paper. in: Make Paper Products Stand Out. Strategic Use of Wet End Chemical Additives, M. A. Hubbe

and S. Rosencrance (eds.), TAPPI Press, Ch. 3, pp. 53-75.

[17] Lindström, T., & Carlsson, G. (1982). The effect of starch and latex on paper strength. Nordic Pulp & Paper Research Journal, 1(2), 25–30.

[18] Kettle, J. (2010). Film press and metering size press technology. Paper Technology International, 52(3), 35–42.

[19] Korson, L., Drosthan, W., and Millero, F. J. (1969). Viscosity of water at various temperatures. The Journal of Physical Chemistry 73(1), 34-39.

[20] Mesic, B., Jarnstrom, L., Hjarthag, C., and Lestelius, M. (2004). Effects of application temperature in paper surface sizing with temperature-responsive starch on water repellency and flexographic printability. Appita Journal 57(4), 281-285 & 298.

[21] Gray, R. T., and Rende, D. S. (2005). Surface sizing. in: The Sizing of Paper, 3rd Ed., J. M. Gess and J. M. Rodriguez (eds.), Papermaking Additives Committee, TAPPI Press, Atlanta, Ch. 14, pp. 257-287.

[22] Salminen, P., Urscheler, R., Roper, J., and Chase, D. (1996). Optimizing the coating formulation to reduce misting in high-speed film coating. TAPPI 1996 Metered Size Press Forum Proceedings, pp. 51-55.

[23] Roper, J. A., Bousfield, D. W., Urscheler, R., and Salminen, P. (1997). Observations and proposed mechanisms of misting on high-speed metered size press coaters. TAPPI 1997 Coating Conf. Proceedings, TAPPI Press; pp. 1-14.

[24] Hiorns, A. G., Coggon, L., Oak, G. A. R., and Engley, M. S. (1996). The runnability of high speed metered size presses when coating mechanical paper with high solids colours. TAPPI 1996 Metered Size Press Forum Proceedings, pp. 161-170.

[25] Ascanio, G., Carreau, P. J., and Tanguy, P. A. (2006). High-speed roll coating with complex rheology fluids. Experiments in Fluids 40(1), 1-14.

[26] Huang, X. B., Shen, H. K., Sun, J. S., Lv, K. H., Liu, J. P., Dong, X. D., and Luo, S. J. (2018). Nanoscale laponite as a potential shale inhibitor in water-based drilling fluid for stabilization of wellbore stability and mechanism study. ACS Applied Materials & Interfaces 10(39), 33252-33259.

[27] Fang, F., Luo, X., Fei, X., Mathews, M. A. A., Lim, J., Hamaker, B. R., and Campanella, O. H. (2020). Stored gelatinized waxy potato starch forms a strong retrograded gel at low pH with the formation of intermolecular double helices. Journal of Agricultural and Food Chemistry 68(3), 4036-4041.

[28] Yang, Q. L., Luo, L. J., Jiang, Y. H., Zhang, J. J., Tang, X. Q., Jiang, M., Wu, Z. L., and Li, Y. H. (2020). A high amylase-producing bacterial strain exhibiting the phosphorus-dissolving ability, isolated from freshwater aquaculture pond. Aquaculture Research 51(10), 44315-4326.

[29] Hoyland, R. W., Howarth, P., Whitaker, C. J., and Pycraft, C. J. H. (1977). Mechanism of size-press treatment of paper. Paper Technology and Industry 18(8), 246-250.

[30] Cho, B.-U., and Garnier, G. (2000). Effect of the paper structure and composition on the surface size pick-up. TAPPI Journal 83(12), 60

[31] Engström, G. (2005). Review: Interactions between coating colour and base sheet in pigment coating. in: Advances in Paper Science and Technology: Transactions of the 13th Fundamental Research Symposium, S. J. IAnson (ed.), Vols. 2, pp. 1011–1073

[32] Cushing, M. L. (1979). Surface sizing. in: Pulp and Paper Chemistry and Chemical Technology, 3rd Ed., J. P. Casey (ed.), Wiley-Interscience Publ., New York, Ch. 20, pp. 1667-1714.

[33] Dickson, R., Forsström, U., and Grön, J. (2002). Coating coverage of metered size press pre-coated paper. Nordic Pulp Paper Research Journal 17(4), 434-439.

[34] Jeong, Y.-B., and Lee, H. L. (2021). "Characteristics of pigment distribution in the pigmentized surface-sizing films," J. Korea Tech. Assoc. Pulp Paper Ind. 53(4), 114-123.

[35] Fidan, H., Tozluoglu, A., Tutus, A., Poyraz, B., Arslan, R., Sertkaya, S., Sozbir, T., and Killi, U. (2021). Application of modified cellulose nanofibrils as coating suspension on recycled paper using size press. Nordic Pulp Paper Res. J. 36(3), 523-535.

[36] Tozluoglu, A., & Fidan, H. (2023). Effect of size press coating of cationic starch/nanofibrillated cellulose on physical and mechanical properties of recycled papersheets. BioResources, 18(3), 5993–6012.

[37] Yang, L. M., Lu, S., Li, J. J., Zhang, F. S., and Cha, R. T. (2016). Nanocrystalline cellulose-dispersed AKD emulsion for enhancing the mechanical and multiple barrier properties of surface-sized paper. Carbohydrate Polymers 136, 1035-1040.

[38] Thompson, T. D., and Hutto, J. S. (1997). The use of smectites as a size press starch additive. TAPPI 1997 Coating Conference, pp. 215-239.

[39] Szlek, D. B., Reynolds, A. M., and Hubbe, M. A. (2022). "Hydrophobic molecular treatments of cellulose-based or other polysaccharide barrier layers for sustainable food packaging: A Review," BioResources 17(2), 3551-3673.



**한 정 수** 충남대학교 조교수

**2024 – 현재** 한국펄프종이공학회 총무위원
**2024 – 현재** 산림청 지속가능한 목재이용위원회 목재이용활성화 분과 위촉위원
**2023 – 2024** 한국펄프종이공학회 편집위원회 위원

han1606@cnu.ac.kr

# 12

# 캘린더링, 권취 및 포장

아름다운 롤 형태로 완성된 종이 제품 (사진제공_무림P&P)

## 1. 캘린더링의 정의

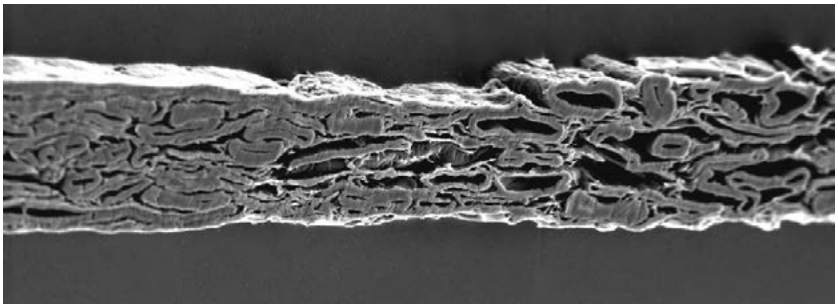
대부분의 지종은 건조 공정 이후 캘린더링(calendering) 공정을 통해 최종적인 표면 처리를 수행한다. 캘린더링이란 건조된 종이 시트를 하나 또는 그 이상의 롤 닙(nip) 사이에 통과시키면서 압축하여 종이의 표면 특성을 개선하는 일련의 공정을 포괄하는 용어이다.

캘린더링의 주요 목적은 종이의 두께와 표면 구조를 후속 공정이나 최종 용도에서 요구되는 수준으로 조정하는 데 있다. 예를 들어, 신문용지의 경우 종이의 표면을 평활하게 하여 인쇄 품질을 향상시키기 위해 캘린더링을 실시한다(그림 12-01). 그러나 캘린더링은 이러한 표면 특성의 개선과 함께 원치 않는 물성 변화도 동반할 수 있다. 대표적인 부정적 영향으로는 종이의 벌크 감소와 휨강성(stiffness) 및 강도의 저하가 있다.

캘린더링은 건조 공정 이후 연속적으로 수행되는 온라인(on-line) 방식과, 권취 후 별도의 설비에서 수행되는 오프라인(off-line) 방식으로 이루어질 수 있다. 온라인과 오프라인 공정에 따라 캘린더링에 투입되는 종이의 구조와 상태가 크게 달라지므로, 캘린더링 효과 또한 서로 다르게 나타날 수 있다. 예를 들어, 온라인 공정에서는 건조부 하단에서 지필이 보유한 잔류 열과 약 6~9% 수준의 함수율을 유지한 상태로 즉시 처리되는 반면, 오프라인 캘린더링에서는 보관과 이동 과정을 거치면서 함수율이 약 5% 수준 또는 그 이하로 낮아진 상태에서 처리된다.

캘린더링은 캘린더의 설치 위치와 지종에 따라 서로 다른 기능을 수행한다. 예를 들어 도공지의 경우, 도공 작업 이전에 원지에 실시하는 프리 캘린더링(pre-calendering)과 도공 후에 실시하는 캘린더링은 그 방법과 목적이 서로 다르다.

**그림 12-01.** 신문용지의 캘린더링 후의 단면 사진(100% 침엽수 열기계펄프)



출처: T.C. Browne and R. H. Crotogino. Future Directions in Calendering Research. In The science of papermaking, Trans. of the XIIth Fund. Res. Symp. Oxford, 2001, (C.F. Baker, ed.), pp 1001–1036, FRC, Manchester, 2018. DOI: 10.15376/frc.2001.2.1001

프리 캘린더링은 주로 종이 두께의 폭방향(CD) 프로파일을 조절하기 위해 적용되며, 도공 후 캘린더링은 종이의 표면의 평활성과 광택을 향상시키는 것을 주요 목적으로 한다.

## 2. 캘린더링의 역사와 기술 발전

종이의 표면 특성을 개선하기 위한 후처리 공정은 제지술이 발명된 초기부터 사용되어 왔다. 중국에서는 건조된 종이 표면을 매끄러운 돌로 문질러 표면을 치밀하게 하는 방법이 활용되었다. 이 방식은 종이의 평활도와 광택을 향상시키는 데에는 효과적이었으나, 작업이 수작업에 의존하였기 때문에 균일한 마감 품질을 얻는 데에는 한계가 있었던 것으로 보인다. 한지의 경우에도 여러 장의 종이를 겹친 뒤 방망이로 두드리는 도침(搗砧) 공정을 통해 표면 평활성과 광택을 높이기도 하였다.

제지 및 인쇄술의 발전에 따라 종이 표면 특성을 보다 효과적이고 균일하게 개선할 수 있는 공정의 필요성이 커지게 되었다. 이러한 요구에 대응하여 등장한 것이 판형 캘린더(sheet calender)이다. 당시 종이는 시트(sheet) 형태로 생산되었기 때문에 캘린더링 역시 시트 단위로 수행되었으며, 여러 장의 종이를 적층한 뒤 매끄러운 강철판 사이에 넣고 롤이나 프레스를 이용해 압력을 가하는 방식으로 처리되었다.

1800년대 초 연속식 초지기가 개발되면서 연속 공정에 적용 가능한 캘린더링 기술에 대한 연구·개발이 본격적으로 시작되었다. 초기에는 시트 캘린더에 사용되던 매끄러운 강철판을 롤 형태로 제작하여 웹(web)을 연속적으로 처리하는 방법이 도입되었다. 그러나 이러한 방식은 웹을 직접 압착해야 했기 때문에 롤의 제조 정밀도를 크게 향상시킬 필요가 있었지만 당시의 금속가공 기술 수준으로는 종이 표면을 균일하게 처리할 수 있는 고정밀 롤 제작에 많은 어려움이 있었다.

20세기 초 인쇄용지에 대한 품질 요구가 크게 높아지면서 새로운 캘린더 기술이 개발되었다. 보다 균일한 표면 처리를 위해 압착된 종이 시트로 구성된 소프트 롤(soft roll)을 사용하는 캘린더링 방식이 도입되었는데, 이것이 바로 슈퍼캘린더(supercalender)의 시작이다. 이후 금속 재질의 하드 롤(hard roll)을 높은 정밀도로 제조할 수 있게 되면서 하드 닙 캘린더(hard-nip calender)가 등장하였다.

또한 고평량 판지의 캘린더링을 위해 고무 기반 커버를 적용한 소프트 캘린더링(soft calendering) 방식이 활용되기 시작하였다. 최근 약 10여 년간의 기술 발전을 통해서는, 기존 슈퍼캘린더보다 더 높은 공정 온도에서 운전이 가능하고 생산성이 우수한 멀티닙(multinip) 캘린더링 공정으로 발전하고 있다.

## 3. 캘린더링의 기본 원리

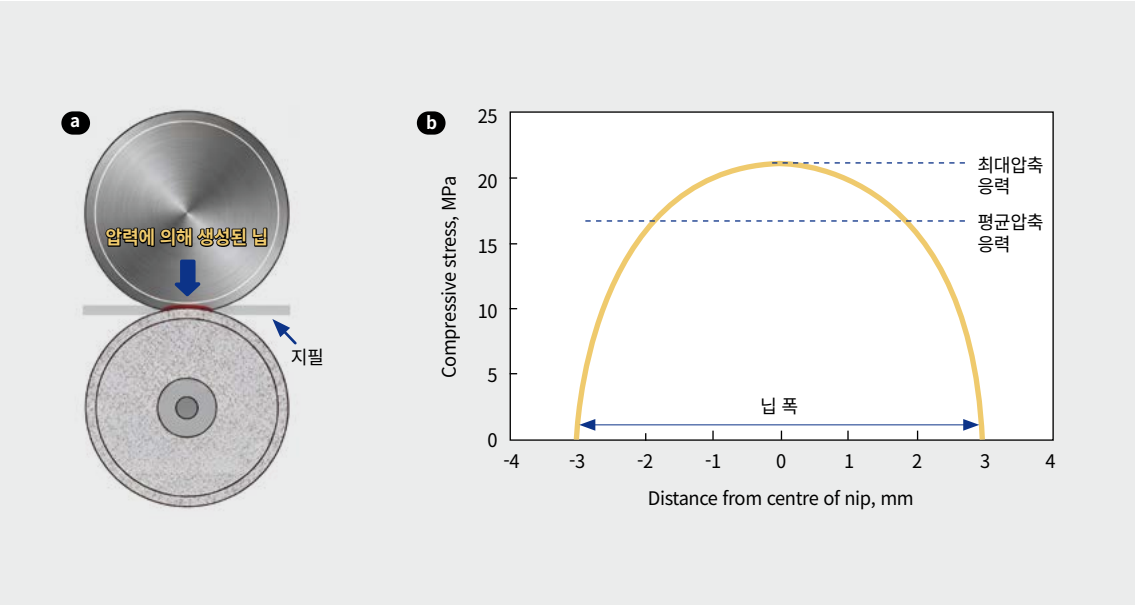
캘린더링은 지필이 두 개 이상의 회전 롤 사이에 형성된 닙(nip)을 통과하면서 압력, 열, 수분, 그리고 운전 속도의 영향을 받아 미세구조가 재편성되는 과정이라 할 수 있다. 겉으로 보기에는 단순히 종이를 압착하는 기계적 공정처럼 보이지만, 실제로는 섬유 결합 구조의 재배열을 비롯하여 공극률(porosity), 표면 특성, 광학적 특성, 두께, 그리고 강도 등 다양한 물성이 동시에 변화하는 복합적인 공정이다.

### (1) 닙(nip) 형성과 압력 전달

캘린더링을 이해하는 데 가장 기본적이고 중요한 개념은 닙(nip)이다. 닙은 두 개의 회전 롤이 서로 접촉하면서 형성되는 선 형태의 압착 영역을 의미한다(그림 12-02(a)). 일반적으로 두 개의 원형 롤이 실제로 접촉하는 길이는 매우 짧으며, 초지 속도가 빠르기 때문에 종이는 이 닙을 순간적으로 통과하게 된다. 그러나 이와 같은 짧은 체류시간 동안에도 종이 내부에서는 다양한 물리적 변화가 동시에 발생한다.

닙의 특성을 정의하는 주요 요소로는 선압(linear pressure) 또는 선하중(linear load), 닙 폭(nip width), 그리고 닙 압력 분포가 있다. 선하중(linear load, kN/m)은 롤 길이 1 m당 수직 방향으로 가해지는 힘을 의미하며, 선하중이 증가할수록 종이 표면의 밀도가 높아지고 평활도가 향상되는 경향을 보인다. 닙 폭은 접촉하는 두 롤의 직경, 롤 재질(강철과 같은 하드 재질 또는 고분자 기반의 소프트 재질), 롤의 탄성계수, 그리고 가해지는 하중 조건에 의해 결정된다. 일반적으로 닙 폭이 넓을수록 종이가 닙 내부에 머무르는 시간이 증가하여 압축 및 구조 재배열 효과가 더욱 크게 나타난다. 닙 압력 분포는 종이의 기계방향(MD)에서 닙을 통과

그림 12-02. 캘린더링 닙(a)과 닙에서의 지필에 가해지는 압력(b)




출처: Pulp and Paper Chemistry and Technology. Volume 3, Paper Chemist p.324

하는 동안 나타나는 압력의 공간적 분포를 의미한다. 통상적으로 압력은 닙의 중앙부에서 최대값을 보이고, 전후로 점차 감소하는 포물선 형태의 분포를 나타낸다(그림 12-02(b)).

### (2) 지필변형 메커니즘

종이는 섬유, 충전물 그리고 공기층이 서로 얽혀 형성된 다공성의 3차원 네트워크 구조를 가지므로 닙을 통과할 때 여러 형태의 변형을 동시에 겪게 된다. 이러한 변형은 다음과 같이 구분할 수 있다.

**탄성 변형**: 외부 압력이 제거되면 원래 두께로 되돌아가는 가역적 변형으로 주로 섬유 네트워크 내부의 공기층이 압축되는 과정에서 나타나며, 단일 닙 캘린더 또는 저하중 조건에서 우세하게 나타난다.

**소성 변형**: 외부 압력이 종이의 항복 응력을 초과해서 가해질 경우 나타나는 비가역적인 변형이다. 이 과정에서 섬유 세포벽의 압축되고, 종이 내 섬유 간 접촉면이 재배열되고, 미세 공극이 붕괴되는 현상이 나타난다. 소성 변형은 고하중, 고온의 캘린더링 조건이나 멀티닙 캘린더링 공정에서 나타난다.

**점탄성 변형**: 압력, 시간, 함수율, 온도의 복합적인 영향으로 나타나는 시간 의존적인 변형을 의미하며 종이가 서서히 눌리고 재조직되는 현상을 말한다. 함수율 6~12% 범위에서 크게 발현되며 종이의 캘린더링 내 체류시간이 중요한 변수로 작용한다.

이들 변형은 서로 독립적이지 않으며 항상 혼합된 형태로 나타난다. 따라서 캘린더링 조건을 조절함으로써 이 변형의 비율을 조정하게 된다.

### (3) 캘린더링 영향 인자

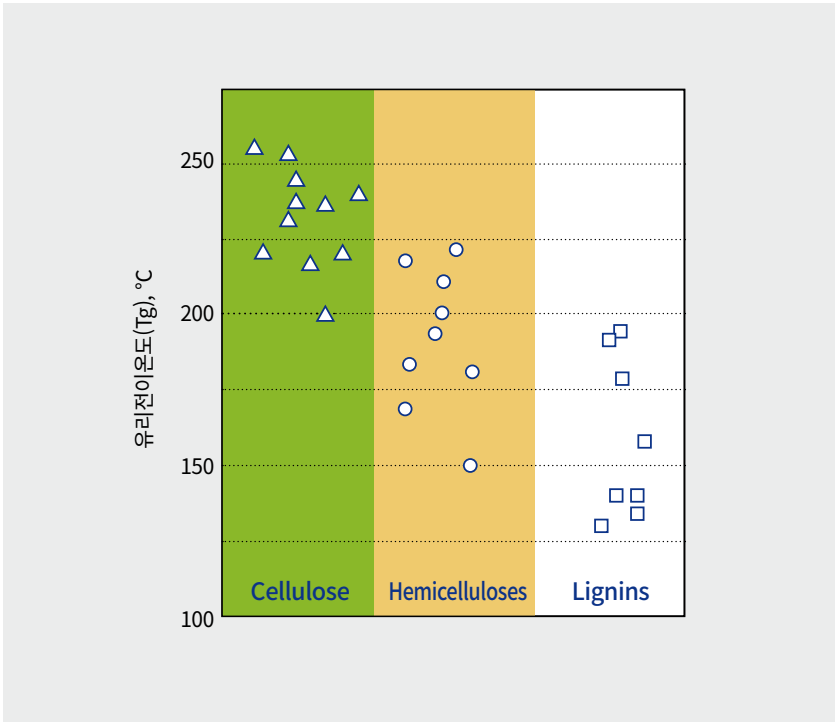
캘린더링에서 종이의 최종 품질은 단일 공정 변수에 의해 결정되지 않으며, 압력, 온도, 속도, 수분 등 여러 조건이 동시에 작용한 결과로 나타난다. 이 가운데 닙에 작용하는 선하중은 표면 구조를 가장 직접적으로 변화시키는 요소이다. 압력이 증가하면 섬유와 충전물로 이루어진 네트워크가 더욱 강하게 압축되어 표면 요철이 감소하고 평활도가 향상된다. 그러나 일정 수준을 초과하면 섬유벽의 과도한 압밀화, 기공 붕괴, 섬유 간 결합 파괴가 발생하여 벌크 감소와 강도 저하로 이어질 수 있다. 즉, 압력은 품질 향상의 핵심 인자인 동시에 가장 큰 위험 요인이기도 하다.

종이에 포함된 점탄성 고분자 성분들은 모두 유리전이(glass transition) 거동을 나타내며, 주요 성분의 유리전이온도는 그림 12-03과 같이 서로 다른 범위를 가진다. 캘린더 롤을 약 80~200 °C 범위로 가열하면 리그닌과 헤미셀룰로오스가 연화되어 섬유가 보다 쉽게 변형되므로, 더 낮은 압력에서도 평활도와 광택도의 향상을 얻을 수 있고 지필 손상 위험도 줄일 수 있다.

캘린더링 과정에서 닙 내부 지필의 온도는 가열 롤(thermo roll)에 의해 상승한다. 캘린더에 유입되는 지필의 온도는 오프라인 캘린더의 경우 약 30~40 °C 수준인 반면, 온라인 캘린더에서는 건조부의 잔열로 인해 약 100 °C까지 도달할 수 있다. 지필 온도가 증가하면 동일한 품질 개선 효과를 더 낮은 선하중에서 얻을 수 있어 공정 효율이 향상된다.

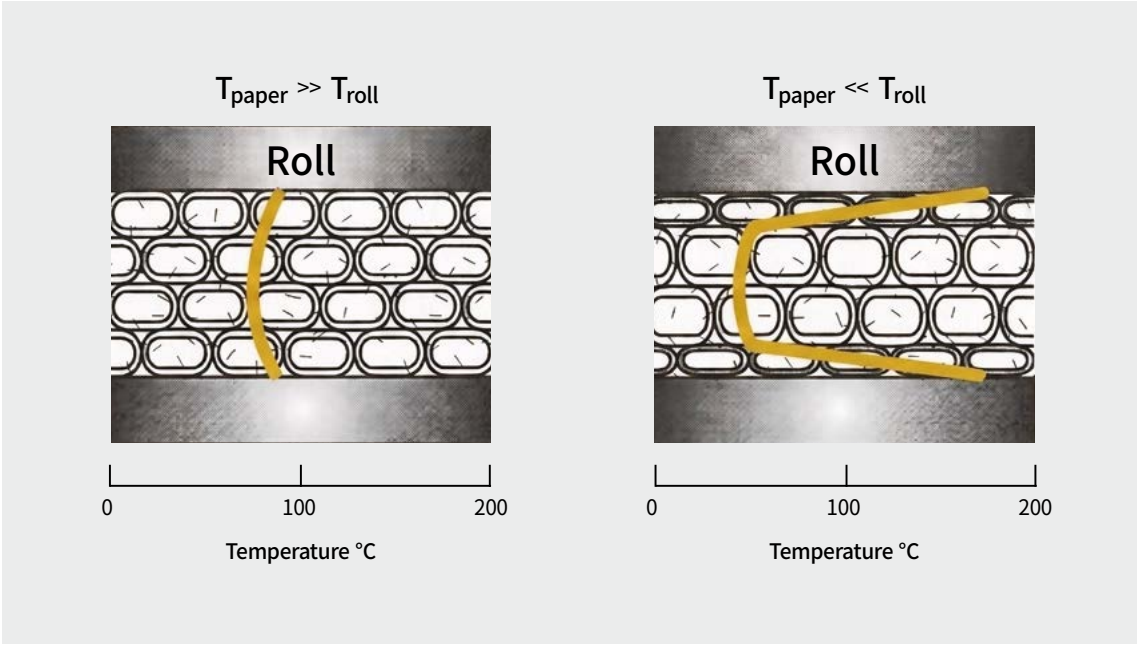
특히 지필 온도가 가열 롤 온도보다 낮은 경우, 지필 표면의 섬유층이 선택적으로 가열되어 먼저 가소화되고 압축되는 반면, 내부층(그림 12-04의 $T_{paper} << T_{roll}$)은 상대적으로 낮은 온도를 유지하여 탄성을 보존한다. 그 결과 표면은 치밀화되면서도 내부 벌크는 유지되는 특징적인 구조가 형성된다. 이러한 현상을 온도 구배 캘린더

그림 12-03. 각 구성 성분 별 유리전이 온도




출처: Mikko Jokio, Papermaking Part 3 Finishing, Papermaking Science and Technology, TAPPI pp. 47

그림 12-04. 캘린더링 닙을 통과할 때의 지필의 두께 방향에서의 온도 프로파일




출처: Mikko Jokio, Papermaking Part 3 Finishing, Papermaking Science and Technology, TAPPI pp. 47

링(temperature-gradient calendering)이라 하며, 그림 12-04는 그 개념을 개략적으로 나타낸 것이다.

함수율은 펄프섬유의 유리전이온도에 큰 영향을 미치는 중요한 변수이다. 함수율이 증가할수록 수분이 가소제(plasticizer) 역할을 하여 섬유의 유리전이 온도를 낮추게 되며, 그 결과 캘린더 닙에서 종이는 훨씬 더 쉽게 변형된다. 체류시간(dwell time) 역시 캘린더링 효과를 좌우하는 핵심 인자이다. 닙 체류시간은 일반적으로 닙 폭을 지필 속도로 나눈 값으로 정의되므로, 캘린더링 속도가 빨라질수록 닙 체류시간은 짧아진다. 이러한 경우 종이의 변형은 주로 표층에서만 발생하고 내부 구조까지 충분히 전달되지 못한다. 따라서 고속 캘린더링은 평활도는 크게 향상시키지만 벌크와 강도는 비교적 제한적으로 변화시키는 특성을 보인다. 반대로 닙 폭이 넓은 캘린더에서 저속으로 캘린더링을 수행하면 지필이 더 오랜 시간 압력과 열의 영향을 받게 되어, 표면뿐 아니라 내부 구조까지 재조직될 수 있다. 이 경우 밀도 증가와 구조적 변화가 두께 방향 전체에 걸쳐 나타나며, 벌크 감소나 강도 변화와 같은 효과도 상대적으로 크게 나타난다.

## 4. 캘린더링 유형

### (1) 하드닙(hard-nip) 캘린더

대부분의 지종은 건조공정 이후 2~6개의 강철 롤로 구성된 하드 닙 머신 캘린더(hard-nip machine calender)에 의해 표면 처리가 이루어진다. 캘린더링의 강도는 주로 통과하는 닙 수에 의해 결정된다. 도공 전 프리 캘린더링이나 미도공지와 같이 높은 수준의 캘린더링을 요구하지 않는 지종의 경우에는 두 개의 롤만을 사용하여 캘린더링을 수행한다.

하드닙 캘린더링 효과는 크게 두 가지 원리로 설명된다. 하나는 높은 압력으로 지필을 압착하여 밀도를 증가시키는 압축 효과이며, 다른 하나는 롤의 매끄러운 표면 형상을 종이 표면에 그대로 전달하는 전사 효과이다.

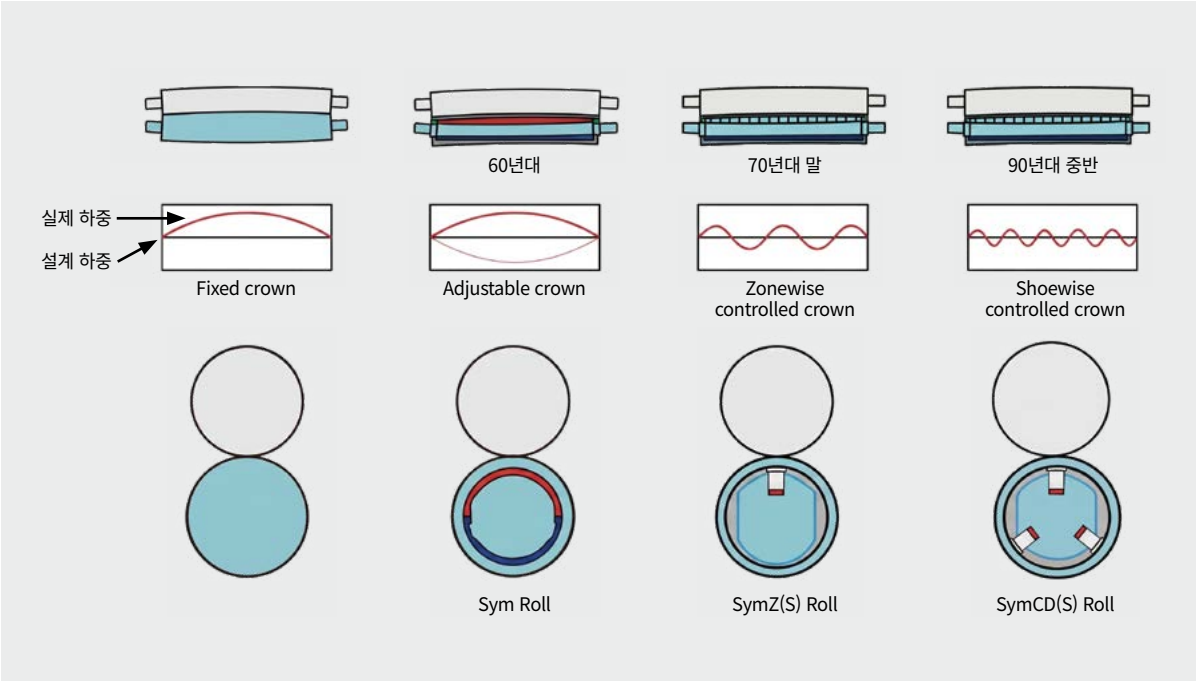
하드닙 캘린더는 설비 구조와 작동 원리가 비교적 단순하므로 운영 비용이 낮고, 두께 편차(caliper profile)를 조절하기가 용이하다는 장점을 가진다. 그러나 과도한 압축으로 인해 종이의 벌크가 감소하고 스티프니스가 저하되는 단점이 존재

한다. 경우에 따라서는 종이의 특정 부분이 짙게 보이는 블랙크닝(blackening) 현상이 발생할 수 있다. 직경이 비교적 작은 두 개의 하드 롤이 만나 형성하는 닙은 폭이 매우 좁기 때문에 닙에 가해지는 선압이 낮더라도 실제로 종이에 전달되는 압력은 매우 높아진다. 종이의 지합이 불량할 경우 큰 플록이 위치한 두꺼운 부분이 과도한 선압으로 압축되는 경우 블랙크닝 현상이 발생된다. 뿐만 아니라, 이러한 표면의 국부적 불균일성은 인쇄 과정에서 잉크 또는 오일 흡수의 차이를 유발하여, 결과적으로 모틀링(mottling)을 발생시킬 수 있다.

멀티롤 캘린더에서는 바링(barring) 현상이 발생할 수 있다. 바링은 적층된 캘린더 롤에 진동이 발생하는 현상으로, 캘린더에 유입되는 종이의 불균일성, 캘린더 및 구동 장치나 주변 기계 설비에서 유도되는 기계적 진동 또는 롤의 원형도 불량 등에 의해 시작된다. 캘린더 내부의 모든 롤은 상호 연동되어 작동하므로 이러한 진동 패턴이 한 롤에서 다른 롤로 전달·증폭되며, 그 결과 롤 표면에 주기적인 물결무늬 형태의 마킹이 형성된다. 이러한 롤 표면의 이상 형상은 과도한 진동과 공명성 소음을 유발할 뿐만 아니라, 캘린더 처리된 종이의 기계방향(MD) 두께 변동을 초래하여 제품 균일성을 저하시킨다. 이 현상은 특히 두께 프로파일 제어가 중요하지만 고광택이 요구되지 않는 지종, 예를 들어 신문용지나 중질 비도공 인쇄지, 또는 코팅 이전에 프리캘린더가 필요한 종이에서 주로 문제로 나타난다.

회전하는 롤은 자체 하중과 외부에서 가해지는 압력에 의해 중앙부가 미세하게 휘어지는(deflection) 현상이 발생한다. 이러한 휨을 보정하지 않으면 지필의 폭방향(CD)으로 닙 압력이 불균일하게 분포하게 된다. 이를 방지하여 균일한 닙 압력을 전달하기 위해 롤의 중앙부를 양 끝단보다 두껍게 가공하거나(fixed crown), 롤 내부의 유압을 조절하여 휨을 실시간으로 제어하는 크라운 제어(crown control) 기술이 사용된다(그림 12-05). Fixed crown 방식은 롤 중앙부 직경을 미리 크게 가공하여 특정 설계 하중에서 균일한 닙 압력이 형성되도록 한 것이다. 그러나 실제 운전에서 설계 하중과 다른 조건이 적용될 경우 중앙부에 하중이 집중되어 CD 방향 압력 분포가 다시 불균일해지는 한계가 있다. 이러한 문제를 개선하기 위해 개발된 것이 심롤(Sym Roll)과 같은 가변 크라운(variable crown) 기술이다. 이 방식은 롤 내부에 설치된 유압 요소를 통해 운전 중에도 롤 형상을 능동적으로 조절함으로써, 운전 하중 변화나 지종 변경에도 CD 방향으로 균일한 닙 압력을 유지할 수 있도록 한다.

그림 12-05. 캘린더링 롤 크라운 처리를 통한 처짐 보상 기술의 발전 과정



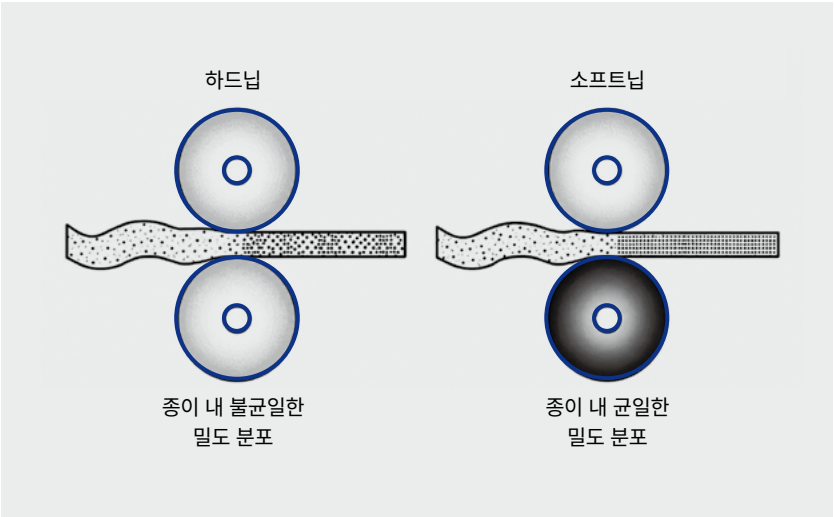

출처: Valmet's Recent Calender Technology - High bulk calendering, OptiCalender Compact and effective machinecalender rebuilds-, Hidehiko Yamazaki, Jari Ilomaki, Ville Tiistola

### (2) 소프트닙(soft-nip) 캘린더

소프트 닙 캘린더는 두 닙 롤 가운데 최소 하나가 소프트 롤 커버(soft cover)를 가진 장치를 의미한다. 일반적으로 한쪽은 고무나 폴리우레탄 등 고분자 계열의 탄성 재질로 덮인 소프트 롤이며, 다른 한쪽은 가열된 하드 롤로 구성되는데, 이 하드 롤은 하드 닙 캘린더의 가열 롤과 유사한 역할을 한다. 무광지 생산과 같이 표면 광택을 크게 요구하지 않는 경우에는 두 롤 모두 소프트 롤을 사용하는 변형 장치가 적용되기도 한다.

소프트 캘린더 닙의 가장 큰 특징은 종이와 롤 커버가 함께 압축된다는 점이다. 이로 인해 실제 닙 압력은 하드 닙 캘린더에 비해 상당히 낮아지며, 대신 닙 폭이 약 10~20 mm 정도로 넓어져 열전달과 캘린더링 효과가 보다 안정적으로 이루어진다. 또 다른 중요한 특징은 지필의 압축이 두께 방향으로 비교적 균일하게 발생한다는 점이다. 소프트 롤 캘린더링은 유입되는 지필의 두께 편차와 관계없이 비교적 일정한 압력 조건에서 전체 지필이 압축 변형되도록 하므로, 전폭에 걸쳐

그림 12-06. 하드닙과 소프트닙에서의 종이 내 밀도 분포




밀도가 균일한 캘린더링이 이루어진다. 이는 두께를 균일화하는 경향이 강한 하드 닙 캘린더링과 본질적으로 다른 거동이다. 즉, 하드 닙은 밀도 편차가 존재하더라도 두께가 일정한 종이를 만드는 반면, 소프트 닙은 두께 편차는 일부 남지만 밀도가 보다 균일한 종이를 형성한다(그림 12-06). 종이의 밀도가 균일해지면 잉크 흡수성과 인쇄 품질의 균일성이 향상되며, 블랙크닝(blackening)과 모틀링(mottling)과 같은 인쇄 결함도 하드 닙 캘린더링에 비해 현저히 감소한다. 또한 소프트 닙 캘린더링은 종이의 벌크와 강도를 유지하는 데에도 유리하다. 이러한 장점으로 인해 소프트 닙 캘린더의 적용은 지속적으로 증가하고 있으며, 기존 설비에 추가 설치되는 경우도 많다. 최근에는 온라인 적용이 가능해지면서 2~4닙 소프트 캘린더가 기존 슈퍼캘린더를 대체하는 사례도 나타나고 있다.

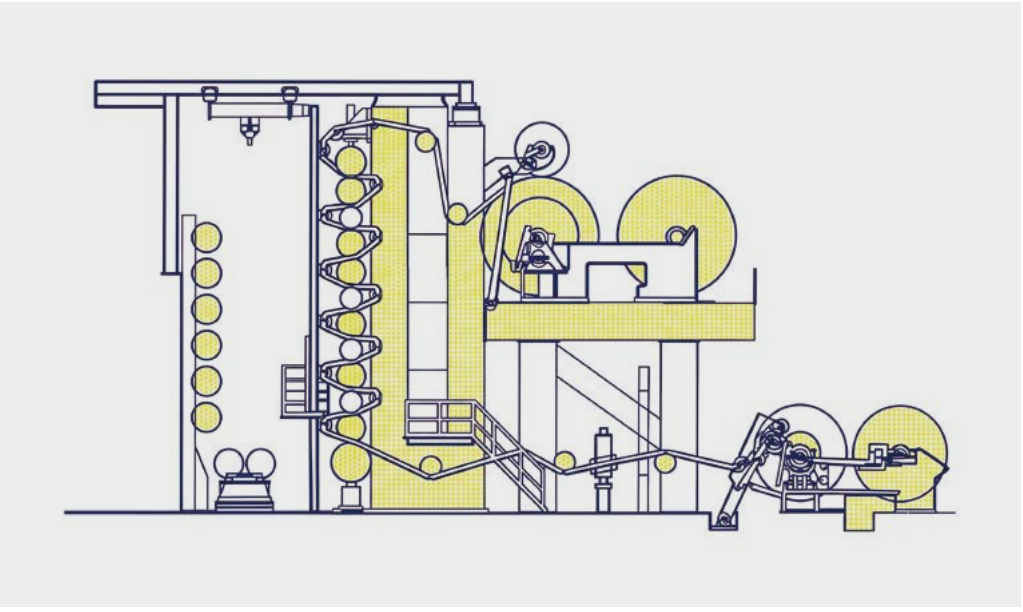
### (3) 슈퍼캘린더(supercalender)

슈퍼캘린더(supercalender)는 하드 롤과 소프트 롤이 교대로 배열된 다단(multiroll) 캘린더이다(그림 12-07). 소프트 롤을 사용함으로써 긴 닙 체류시간을 적용할 수 있으며, 지필의 블랙크닝 또는 광택 얼룩 없이 우수한 평활도를 얻을 수 있다. 슈퍼캘린더에서 지필은 여러 개의 닙(nip)을 순차적으로 통과하며, 각 닙에서 변형이 누적적으로 발생한다. 보통 9~12개의 롤이 하나의 슈퍼캘린

더를 구성하며 고급 고광택지의 경우 최대 20개의 롤이 있는 슈퍼캘린더가 사용되기도 한다. 롤의 개수가 증가할수록 닙의 통과 횟수가 많아지므로 개별 닙에서의 압력을 상대적으로 낮게 유지하면서도 충분한 캘린더링 효과를 얻을 수 있다. 이에 따라 제품의 품질 균일성이 향상되며, 표면 결함이 줄어들고 광택이 극대화된다. 구성 롤 중 하드 롤은 고온·고압 조건에서도 변형이 적은 표면 경도가 높은 금속 재질로 제작되며, 열 전달과 평활한 표면 형성을 위한 기준면 역할을 수행한다. 반면 소프트 롤은 금속 샤프트를 중심으로 종이 시트나 면(綿)과 같은 부드러운 섬유층을 압축하여 둘러싼 구조를 가지며, 높은 탄성 복원력을 특징으로 한다. 최근에는 폴리우레탄이나 복합 고분자 커버 롤이 적용되어 고온 내구성과 내마모성이 향상되었으며, 이에 따라 유지보수 주기가 연장되고 운전 안정성이 개선되고 있다.

슈퍼캘린더에서 소프트 롤은 지필에 전단력을 부여하여 도공층 또는 바인더 층의 재배열을 유도한다. 이 과정에서 표면의 미세 요철이 감소하고 높은 광택이 형성된다. 슈퍼캘린더링은 압축 작용에 의한 평활화뿐 아니라, 표면 미세구조의 재배열을 통한 광택 향상 공정이다.

그림 12-07. 슈퍼캘린더



출처: Mikko Jokio, Papermaking Part 3 Finishing, Papermaking Science and Technology, TAPPI pp. 30

슈퍼캘린더에서는 전체 롤의 수가 홀수인지 짝수인지에 따라 하드 롤과 소프트 롤의 배열 방식이 달라진다. 이러한 배열 차이는 최종 닙의 특성과 지필의 양면 물성에 직접적인 영향을 미친다. 롤 수가 10단, 12단, 14단, 16단과 같이 짝수인 경우에는 중앙부에 두 개의 소프트 롤이 서로 맞물리는 더블 피니셔 닙(double finisher nip)이 형성되도록 설계한다. 소프트 롤끼리 접촉하는 이 닙은 가장 완만한 압착 조건을 제공하며, 지필 양면에 균일한 변형을 부여한다. 그 결과 양면의 광택이 균일해지고 코팅층의 레벨링이 극대화된다. 따라서 고급 도공지와 같이 양면의 평활도와 광택 균일성이 중요한 제품에는 짝수 롤 배열이 주로 적용된다. 반면, 롤 수가 홀수인 경우에는 지필의 한쪽 면이 상대적으로 더 많은 캘린더링 효과를 받게 된다. 이는 한쪽 면이 하드 롤과 접촉하기 때문이며, 그 결과 해당 면의 치밀화와 광택이 더욱 증가한다. 이러한 배열은 한쪽 면의 광택을 선택적으로 높이고자 할 때 활용될 수 있다.

### 1) 슈퍼캘린더링의 장점

슈퍼캘린더링(supercalendering)은 하드 롤과 소프트 롤이 교대로 배열된 다단 구조에서, 압축·전단 및 열적 연화 작용을 반복·누적하여 지필의 표면 구조를 정밀하게 조정하는 공정이다. 이러한 누적 효과는 단일 닙 방식의 하드닙 또는 소프트닙 캘린더로는 구현하기 어려운 수준의 표면 품질을 구현하게 한다. 슈퍼캘린더링의 장점은 다음과 같다.

첫째, 표면 품질이 모든 캘린더 공정 중 가장 우수하다. 지필이 다수의 닙(nip)을 연속적으로 통과하는 과정에서 표면의 미세 요철이 단계적으로 완화·제거되고, 코팅층 내 피그먼트와 바인더가 재배열된다. 그 결과 매우 높은 광택(gloss)과 평활도(smoothness)를 확보할 수 있다. 또한 인쇄 시 잉크 도포량의 균일성과 잉크 광택의 재현성이 크게 향상된다. 따라서 최고급 아트지 등에서 요구되는 고급 인쇄 적성을 안정적으로 확보할 수 있다.

둘째, 코팅층의 레벨링(leveling) 효과가 뛰어나다. 소프트 롤이 제공하는 전단 변형은 코팅층 내부와 표면의 피그먼트 배열을 정렬시켜 블레이드 스트리크나 리밍(rimming) 등의 도공 결함을 완화한다. 그 결과 인쇄모틀이 감소하며, 인쇄 품질의 균일성이 향상된다. 특히 저평량 코팅지(LWC)와 SC지(super calendered paper)에서 슈퍼캘린더 공정이 필수적으로 적용되는 이유가 여기에 있다.

셋째, 저평량 지종에서 품질 개선 효과가 극대화된다. 저평량지는 기본적인 구조 강도가 상대적으로 낮아 단일 고하중 닙에서는 충분한 표면성 개선이 어렵고, 과도한 압력 적용 시 벌크 감소나 강도 저하가 발생하기 쉽다. 반면 슈퍼캘린더는 비교적 완만한 조건에서 변형을 반복·누적하는 방식이므로, 구조 손상을 최소화하면서 효과적인 표면성 향상을 달성할 수 있다.

마지막으로, 양면성(two-sidedness) 조절이 용이하다. 롤의 구성(홀수/짝수 배열), top roll의 온도 조건 등을 조절함으로써 인쇄면과 비인쇄면의 광택 및 평활도를 의도적으로 차별화할 수 있다.

### (4) 멀티닙 및 탠덤 캘린더

1990년대 중반까지 대부분의 캘린더링 공정은 앞서 설명한 세 가지 기본 개념, 즉 하드닙 캘린더, 소프트 캘린더, 슈퍼캘린더에 의해 수행되었다. 이들 장치는 각각 고유한 장점과 한계를 지니고 있었으며, 적용 지종과 품질 목표에 따라 선택적으로 사용되었다. 이후 소프트 캘린더링 기술이 급속히 발전하면서 표면 품질을 비롯한 제품 특성 전반에 긍정적인 개선 효과가 나타났다. 그러나 기존 방식만으로는 더 이상의 품질 향상을 달성하기 어려운 기술적 한계가 점차 분명해졌다. 또한 초지기의 고속화가 진행됨에 따라 슈퍼캘린더링 설비의 처리 용량이 병목 요인으로 작용하게 되었고, 고속 운전과 고품질화를 동시에 달성할 수 있는 새로운 캘린더 개념의 개발이 요구되었다.

이러한 배경에서 고속 운전과 반복 하중에 견딜 수 있는 내구성 높은 고분자 커버를 적용한 소프트 롤 기술이 개발되었으며, 이를 기반으로 멀티닙(multi-nip) 캘린더와 탠덤(tandem) 캘린더 개념이 도입되었다. 멀티닙 캘린더는 여러 개의 닙을 하나의 프레임 내부에 적층 배치한 구조를 가진다. 이를 통해 지필이 한 번 통과하는 과정에서도 하드닙 또는 슈퍼캘린더에 준하는 높은 평활도를 확보할 수 있으며, 동시에 소프트 닙의 장점인 벌크 유지와 두께 균일성을 함께 달성할 수 있다. 각 닙은 일반적으로 소프트 닙으로 구성되며, 닙별로 온도, 압력, 수분 조건을 부분적으로 달리 설정할 수 있어 공정 제어의 유연성이 높다. 한편, 탠덤 캘린더는 소프트 캘린더 여러 대를 직렬로 배치한 시스템이다. 공정 단계를 물리적으로 분리·세분화함으로써 단일 소프트 닙 캘린더보다 훨씬 높은 수준의 품질 제어가 가능하다. 각 스테이지는 독립적으로 온도, 압력, 수분 조건을 설정할 수 있어,

종이 표면의 프로파일 제어, 광택, 평활도 및 인쇄적성을 단계적으로 정밀하게 조정하는 데 최적화되어 있다. 다만 초기 투자비와 제어 시스템이 복잡하며, 설비 배치 길이가 증가하는 단점이 있다.

### (5) 온·오프머신 캘린더링(On-line vs Off-line calendering)

제지 공정에서 캘린더링은 제품의 최종 표면 품질과 인쇄적성을 결정하는 핵심 공정이다. 캘린더가 초지기 후단에 배치되어 연속적으로 수행되는 온-라인(on-line) 방식인지, 또는 별도의 독립 설비에서 처리되는 오프-라인(off-line) 방식인지에 따라 공정 특성, 운전 유연성 및 품질 구현 범위는 크게 달라진다. 아래에서는 두 방식의 구조적 차이와 운전 특성을 구체적으로 비교·정리하였다.

#### 1) 온머신 캘린더

온머신(on-machine) 캘린더는 캘린더 장치가 초지기 건조부 직후에 연속적으로 연결된 구조로, 지필이 건조 직후의 높은 온도(약 70~90 ℃) 상태에서 즉시 캘린더 처리를 받는 방식이다. 이때 지필의 함수율은 일반적으로 5~8% 범위에 있다. 건조 직후의 종이는 섬유가 부분적으로 가소화된 상태이므로, 비교적 낮은 닙 압력에서도 충분한 평활 효과를 얻을 수 있다. 따라서 벌크 손실을 최소화하면서 표면 품질을 개선하는 데 유리하다. 또한 권취·이송·재권취와 같은 별도의 중간 공정이 필요하지 않아 공정 흐름이 단순하고, 설비 투자 및 운영 비용을 절감할 수 있다는 장점이 있다.

그러나 초지기와 일체화되어 연속 운전되므로, 캘린더 설비에 문제가 발생할 경우 초지 라인 전체가 정지하게 되어 생산 손실이 크게 발생한다는 위험이 있다. 또한 고광택·고평활도를 요구하는 고급 인쇄용지의 경우에는 품질 구현 범위에 한계가 존재할 수 있다. 더불어 초지 속도와 함수율이 기본적으로 초지기 조건에 의해 결정되므로, 캘린더링에 최적화된 독립적인 운전 조건을 설정하기 어렵다는 제약이 있다.

### 2) 오프머신 캘린더

오프머신(off-machine) 캘린더는 초지기에서 권취된 릴(reel)을 별도의 독립 라인으로 이송하여 수행하는 마감 공정이다. 이 방식에서는 종이가 이미 권취 및 보관 과정을 거친 상태에서 처리되며, 일반적으로 함수율 3~6%의 비교적 건조한 조건과 낮은 온도 상태에서 캘린더링이 이루어진다.

지필이 건조·안정화된 상태이므로, 원하는 표면 특성을 얻기 위해서는 온라인 방식보다 상대적으로 높은 닙 압력과 롤 온도가 요구된다. 그러나 초지기와 분리되어 독립적으로 운전되기 때문에 속도, 압력, 온도, 수분 조절 등 주요 공정 변수를 폭넓게 설정할 수 있어 운전 자유도가 매우 크다. 또한 종이가 이미 충분히 건조된 상태이기 때문에, 적절한 조건 설정 하에서는 과도한 구조 변형을 억제하면서도 고온·고압·고전단 조건을 적용할 수 있다.

## 5. 권취

종이는 대부분 롤(roll) 형태로 저장 및 이송된다. 이러한 '감기'공정은 크게 릴링(reeling)과 와인딩(winding)의 두 단계로 구분된다.

릴링(reeling)은 초지기 말단에서 연속적으로 생산되는 종이를 '파렌트 릴(parent reel)'이라 불리는 대형 점보 롤 형태로 감아내는 1차 권취 공정이다. 이 공정은 초지기의 생산 속도를 그대로 수용하여 중단 없이 수행되어야 하므로, 초지 라인 전체의 가동률을 결정짓는 병목 지점이 되기도 한다. 와인딩은 파렌트 릴을 다시 풀어 고객이 요구하는 규격에 맞게 폭을 분할(slitting)하고, 실제 사용에 적합한 직경과 구조를 갖춘 '고객용 롤(customer rolls)'로 재권취하는 마무리 공정이다.

제지 산업에서 생산성 향상에 대한 요구가 증대됨에 따라 와인딩 공정의 품질 중요성 또한 크게 부각되고 있다. 높은 생산 효율을 안정적으로 유지하기 위해서는 구조적으로 완성도가 높고 결함이 없는 우수한 품질의 롤을 생산하는 것이 필수적이다. 여기서 '우수한 품질의 롤'이란 적절한 밀도 분포와 정확한 치수를 갖추고, 주름, 텔레스코핑(telescoping), 스타링(starring), 코어 변형 등과 같은 권취 결함이 발생하지 않은 상태를 의미한다.

현대 제지 산업에서는 초지기의 고속화와 광폭화가 지속적으로 추진되고 있으며, 이에 따라 릴링 및 와인딩 공정에 대한 기술적 요구도 지속적으로 증가하고 있다. 초지 속도는 점차 빨라지고, 릴과 최종 롤의 직경은 대형화되고 있으며, 정밀 장력 제어와 자동화 시스템의 고도화가 요구되고 있다. 이와 같은 환경에서 생산 효율을 높은 수준으로 유지하기 위해서는 지절(breaks), 파지(broke) 발생, 그리고 계획되지 않은 가동 중단 시간을 최소화하는 체계적인 공정 관리가 필수적이다.

### (1) 릴링 공정

#### 1) 릴러의 기본 원리

성공적인 릴링을 위해 릴러(reeler)는 초지기 속도에 맞추어 연속적으로 공급되는 지필을 스풀(spool)이라 불리는 금속 심에 감아 대구경 점보 릴, 즉 파렌트 릴(parent reel)을 형성한다. 이 과정에서 릴의 구동 방식은 크게 두 가지로 구분된다(그림 12-08의 와인딩 구동 원리 참조).

첫째, 표면 구동 릴(surface reel) 방식이다. 이는 가장 전통적이고 널리 사용되어 온 형태로, 구동되는 릴 드럼과 권취 중인 롤 사이의 마찰력, 즉 닙 압(nip load)을 이용하여 종이를 감는 구조이다. 릴 드럼이 회전하면서 권취 롤을 접촉 구동하며, 감김 장력은 드럼 속도와 닙 압에 의해 조절된다. 구조가 비교적 단순하고 안정성이 높다는 장점이 있으나, 롤 직경이 증가함에 따라 내부 장력 분포 제어에 한계가 있을 수 있다.

둘째, 센터-표면 구동 릴(center-surface reel) 방식이다(그림 12-08). 이는 현대의 고속·광폭 초지기에 주로 적용되는 구조로, 릴 드럼의 표면 구동과 더불어 롤 중심부의 스풀에도 별도의 구동 모터를 연결하여 토크를 직접 전달한다. 즉, 표면 구동과 중심 구동을 병행하는 방식이다. 이를 통해 롤 직경이 커지는 과정에서도 내부 장력과 밀도 분포를 보다 정밀하게 제어할 수 있으며, 고속 운전 조건에서 안정적인 권취 품질을 확보할 수 있다.

파렌트 릴이 설정된 직경에 도달하면, 지필을 새로운 스풀로 신속히 이송하여 다음 파렌트 릴을 형성하게 된다. 이때 생산성을 유지하기 위해 초지기의 운전을 정지하지 않은 상태에서 작업이 이루어져야 하며, 이러한 일련의 과정을 턴업(turn-

up)이라 한다. 턴업 공정은 고속으로 주행하는 지필을 정확한 타이밍에 절단·이송하여 새로운 스풀에 안정적으로 부착시켜야 하는 고난도의 작업이다. 따라서 장력 불안정, 절단 불량, 접착 실패 등으로 인한 오작동이나 지필 결함이 발생하기 쉬운 구간으로 평가된다. 턴업 실패 시 지절과 파지 발생이 증가하며, 이는 곧 생산성 저하와 직결된다. 이러한 문제를 최소화하고 생산 효율을 높이기 위해 최근에는 파렌트 릴의 직경을 더욱 크게 하는 대구경화 기술이 발전하고 있다. 릴 직경이 커질수록 턴업 횟수가 감소하여 공정 안정성이 향상되고, 계획되지 않은 정지 및 손실을 줄일 수 있다.

### 2) 제어 파라미터

성공적인 릴링을 위해서는 주요 제어 변수가 상호 조화를 이루어야 한다. 특히 웹 장력(web tension), 닙 압(nip pressure), 토크(torque)의 세 가지 핵심 인자가 중요하며, 이를 간략히 TNT라 칭한다. 이들 변수는 권취 롤의 밀도 분포, 내부 응력 상태, 구조적 안정성을 결정하는 핵심 제어 요소이다.

웹 장력은 초지기에서 릴로 유입되는 지필의 인장 상태를 의미하며, 일반적으로 100~1000 N/m 범위에서 조절된다. 장력이 과도하게 높으면 지필 파단이나 과도한 내부 응력이 발생할 수 있으며, 반대로 너무 낮으면 권취가 느슨해져 주름이나 구조 불안정이 발생할 수 있다. 닙 압은 릴 드럼과 권취 롤 사이에서 가해지는 접촉 압력을 의미한다. 이는 권취 과정에서 롤 내부의 공기를 배출하고, 층간 밀착을 촉진하여 권취 밀도를 형성하는 핵심 변수이다. 닙 압이 적절히 설정되지 않으면 롤 내부에 공기가 잔존하거나 밀도 분포가 불균일해질 수 있다. 센터 구동 방식이 결합된 경우에는 코어(core)에 전달되는 회전력, 즉 토크를 독립적으로 제어할 수 있다. 이를 통해 롤 직경 증가에 따라 변화하는 내부 응력을 정밀하게 관리할 수 있으며, 과도한 내부 압축이나 느슨한 중심부 형성을 방지할 수 있다.

센터 와인드 지원이 없는 일반적인 포프(pope) 타입 릴에서 사용 가능한 릴링 파라미터는 닙 하중(nip load)과 웹 장력(web tension)이다. 닙 하중은 두 롤이 서로 압착될 때 접촉면에서 발생한다. 릴에서 롤을 서로 압착하는 데 필요한 힘은 보통 유압 또는 공압 실린더로 발생시킨다. 웹 장력이란 초지기에서 릴로 들어오는 종이의 팽팽한 정도로, 지필의 주행성 (runnability)에 의해 제한된다. 장력은

지절을 최소화할 수 있을 정도로 충분히 낮아야 하며 보통 100~1000 N/m 사이에서 조절된다.

### (2) 와인딩 공정

와인딩(winding)은 릴링 공정에서 생산된 대형 파렌트 릴을 다시 풀어 고객이 요구하는 규격에 맞게 폭을 분할하고, 실제 사용에 적합한 직경과 구조를 갖춘 '고객용 롤(customer roll)'로 재권취하는 최종 마감 공정이다. 이 단계에서는 규격 정밀도, 권취 밀도 분포, 가장자리 품질, 장력 안정성 등이 중요한 관리 요소로 작용한다. 제지 산업에서 생산성 향상에 대한 요구가 증가함에 따라 와인딩 공정의 품질 중요성 또한 크게 부각되고 있다. 고속·대형화된 초지 설비에서 생산된 원지를 안정적으로 처리하기 위해서는, 권취 결함이 없고 구조적으로 안정된 고품질 롤을 제조하는 것이 필수적이다.

#### 1) 와인더의 구동 방식

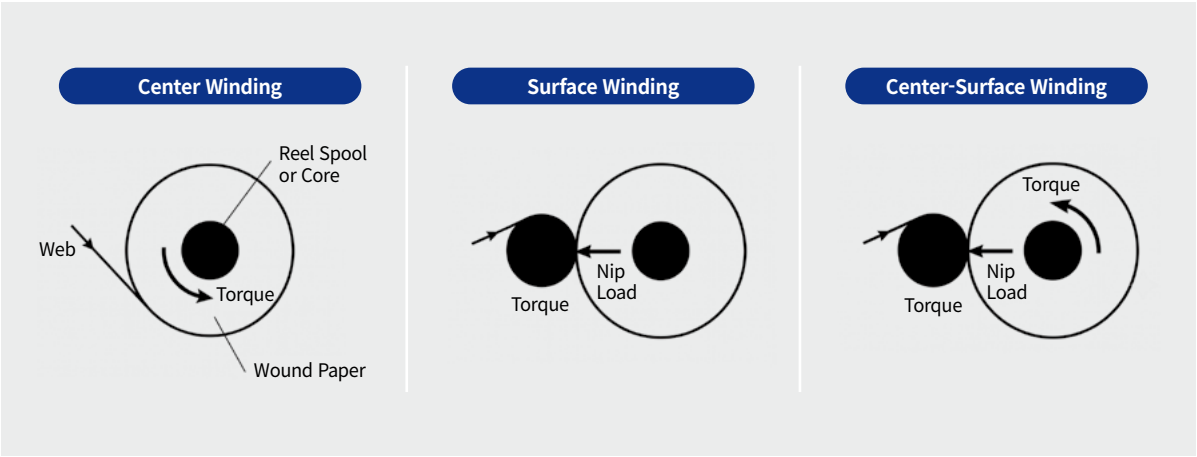
와인더(winder)는 지종의 특성과 요구되는 롤 품질 수준에 따라 구동력 전달 방식이 크게 세 가지로 구분된다. 각 방식은 권취 밀도 형성, 내부 응력 분포, 표면 보호 특성에서 서로 다른 장단점을 가진다.

첫째, 센터 와인딩(center winding) 방식이다. 이는 롤의 중심축(core)을 통해 롤을 완전히 지지하고 구동하는 가장 기본적인 구조이다. 구동 토크가 코어에 직접 전달되며, 웹 표면에 별도의 강한 닙 압을 가하지 않는 것이 특징이다. 따라서 압력에 민감하거나 표면 손상에 취약한 지종의 권취에 유리하다. 다만 롤 직경이 커질수록 내부 밀도 분포 제어에 한계가 나타날 수 있다.

둘째, 표면 와인딩(surface winding) 방식이다. 이 구조에서는 권취 롤이 구동되는 금속 드럼 또는 롤러에 압착되며, 표면 마찰력에 의해 회전한다. 비교적 강한 닙 압을 적용할 수 있어 권취 과정에서 롤 내부의 공기를 효과적으로 제거하고, 치밀하고 단단한 롤 구조를 형성하는 데 유리하다. 그러나 과도한 압착은 외층 과압축이나 표면 손상을 유발할 수 있으므로 정밀한 제어가 필요하다.

셋째, 센터-표면 와인딩(center-surface winding) 방식이다. 이는 권취 롤의 중심축과 닙 롤러 모두에 구동 장치를 결합한 형태로, 두 방식의 장점을 통합한 구

그림 12-08. 기본적인 3가지 와인딩 공정




출처: Mikko Jokio, Papermaking Part 3 Finishing, Papermaking Science and Technology, TAPPI pp. 143

조이다. 중심 토크와 표면 마찰 구동을 동시에 활용함으로써 롤 하중을 분산시키고, 직경 증가에 따라 변화하는 내부 응력을 보다 정밀하게 제어할 수 있다. 특히 고속·대구경 권취 조건에서 균일한 밀도 분포와 안정적인 롤 품질을 확보하는 데 가장 유리한 방식으로 평가된다.

### 2) 와인더의 유형과 특징

기계적 구조에 따라 와인더는 크게 투 드럼 와인더(two-drum winder)와 싱글 드럼 와인더(single-drum winder)의 두 가지 유형으로 분류된다. 각 유형은 생산 지종의 특성과 요구되는 롤 품질 목표에 따라 선택된다.

첫째, 투 드럼 와인더는 두 개의 지지 드럼 위에 권취 롤을 올려놓고 감는 구조이다. 권취 롤은 두 드럼 사이에서 지지·구동되며, 구조가 비교적 단순하고 고속 운전에 유리하다는 장점이 있다. 또한 안정적인 권취와 높은 생산성을 확보하기 용이하다. 그러나 롤 직경과 무게가 증가함에 따라 드럼에 가해지는 닙 압이 자동적으로 증가하는 특성이 있다. 이로 인해 고밀도지나 두꺼운 지종을 권취할 경우, 내부 과압축으로 인한 밀도 불균일, 주름, 코어 손상 등의 결함이 발생할 수 있으므로 세심한 제어가 요구된다.

둘째, 싱글 드럼 와인더는 흔히 센터-표면 와인더(center-surface winder)라고

도 불리며, 하나의 구동 드럼과 개별 권취 스테이션을 통해 롤을 지지·구동하는 방식이다. 이 구조에서는 롤이 개별적으로 지지되므로 자중에 의한 과도한 닙 압 증가를 효과적으로 억제할 수 있다. 따라서 롤 직경이 커져도 내부 밀도 분포를 정밀하게 제어할 수 있으며, 대형 롤 생산에 적합하다. 특히 압력에 민감하거나 벌크 유지가 중요한 지종, 예를 들어 LWC나 신문용지와 같은 저평량지 권취에 유리하다.

### 3) 와인딩 품질 및 물성 영향

와인딩 단계에서 형성된 롤 구조는 슬리팅, 코팅, 인쇄 등 후속 가공 공정의 효율과 품질에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 모든 롤은 정확한 치수와 우수한 원형도를 유지해야 하며, 내부 밀도 분포 또한 이상적인 경도 프로파일을 가져야 한다. 일반적으로 코어 부근은 상대적으로 단단하고, 외곽으로 갈수록 점진적으로 완화되는 경도 분포가 바람직하다. 이를 위해 장력(tension), 닙(nip), 토크(torque)의 세 가지 핵심 요소, 즉 TNT 변수를 정밀하게 제어한다.
권취 과정에서 발생하는 내부 장력과 압력은 종이의 기계 방향 소성 신장이나 Z-방향(두께 방향)의 소성 압축 변형을 유발할 수 있다. 이러한 변형이 과도할 경우, 후속 공정에서 지절, 주름, 벌크 감소 및 압축성 저하 등의 결함으로 이어질 수 있다. 또한 지필의 평탄도(flatness)가 낮을수록 평탄한 웹 상태를 유지하기 위해 더 높은 권취 장력이 요구된다. 그러나 장력이 과도하면 내부 응력 축적과 구조 불균일을 초래할 수 있으므로 균형 잡힌 설정이 필요하다. 아울러 종이의 층간 마찰계수(COF, coefficient of friction)가 지나치게 낮을 경우, 권취 층 사이에서 미끄러짐이 발생하여 구조 불안정이나 가장자리 결함이 유발될 수 있으므로 종이 특성에 맞춘 파라미터 최적화가 필수적이다.

### 4) 롤 구조와 권취 이론

우수한 품질의 롤을 생산하기 위해서는 롤의 구조를 과학적으로 설계하고 제어해야 한다. 롤 구조란 롤의 중심(core)부터 외곽(periphery)까지의 응력 및 경도 분포를 의미하며, 이는 후속 공정에서의 작업성(runnability)을 결정짓는 핵심 요소이다.

### 가. TNT 요소

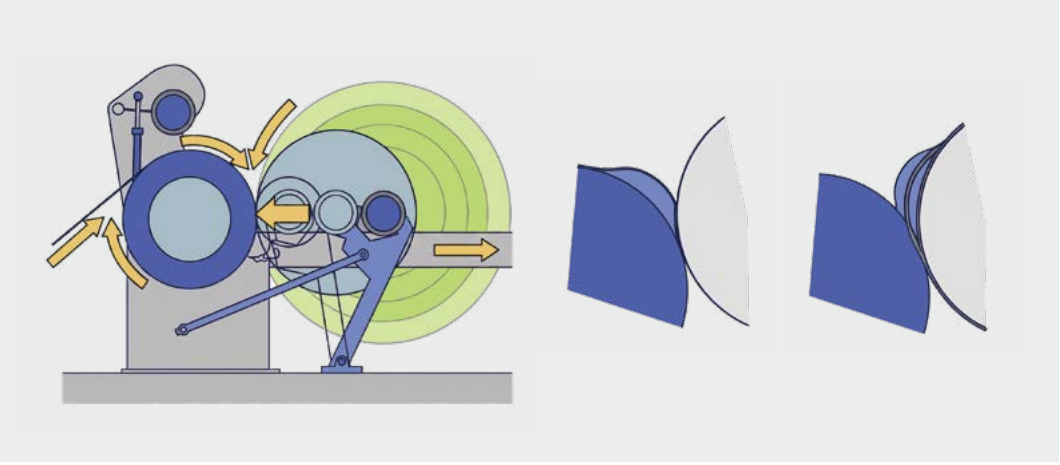
릴링의 경우와 마찬가지로 와인딩에서의 롤의 경도와 구조를 결정하는 세 가지 핵심 제어 변수로 각각의 앞자를 딴 TNT가 있다. TNT 변수의 정밀한 제어는 균일한 밀도 분포와 안정적인 경도 프로파일 형성의 기본 조건이다.

첫째, 장력은 지필을 당기는 인장력으로, 권취되는 각 층에 직접적인 인장 응력을 부여한다. 장력이 높을수록 권취 밀도는 증가하여 롤이 단단해지는 경향을 보인다. 반대로 장력이 부족하면 층간 밀착이 불충분해져 내부 미끄러짐이나 주름이 발생할 수 있다.

둘째, 닙 압은 권취 롤과 지지 드럼(또는 닙 롤러) 사이에 작용하는 접촉 압력을 의미한다. 적절한 닙 압은 층간 공기를 효과적으로 배출하고 마찰력을 증가시켜 권취 밀도를 안정적으로 형성한다. 특히 고속 권취 조건에서는 공기유입(air entrainment)을 방지하는 데 결정적인 역할을 한다. 공기 유입은 권취 과정에서 지필과 롤 사이에 공기층이나 공기 주머니를 형성하는 현상으로(그림 12-09), 이는 최종 제품에서 주름, 텔레스코핑, 지절 등의 결함을 유발할 수 있다(그림 12-10).

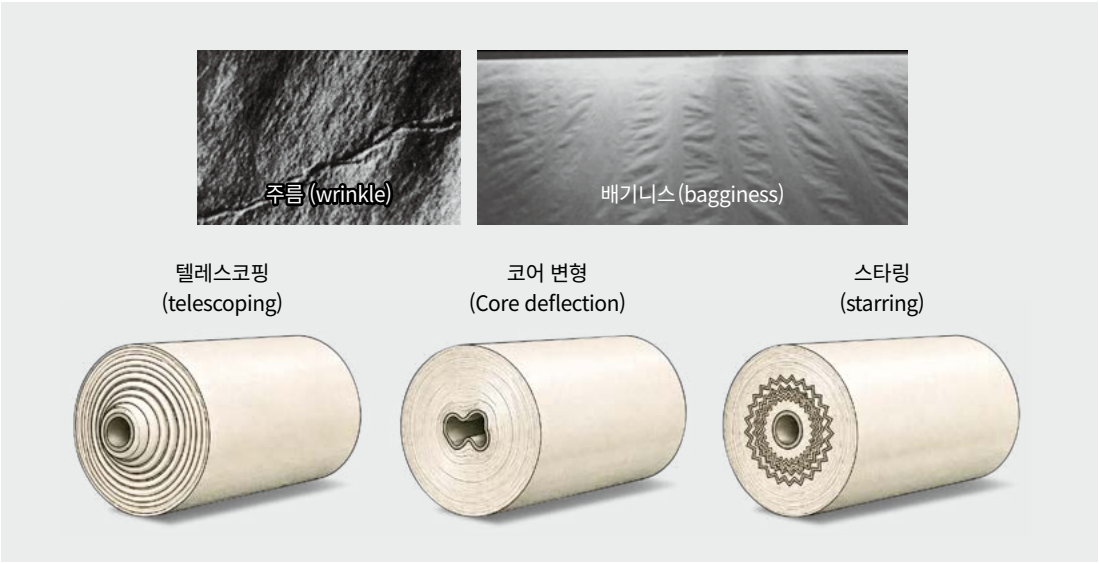
셋째, 토크는 센터 구동 방식에서 코어에 직접 가해지는 회전력이다. 토크 제어를 통해 롤 내부층과 외부층 사이의 상대적 팽팽함을 조절할 수 있으며, 이를 통해 롤 전체의 경도 프로파일을 최적화하고 내부 응력을 균형 있게 관리할 수 있다.

**그림 12-09.** 릴링 과정에서 릴과 지필 사이에서의 공기 유입



출처: Mikko Jokio, Papermaking Part 3 Finishing, Papermaking Science and Technology, TAPPI pp. 157

그림 12-10. 릴링 과정에서 결함




출처: Cecilia Land, doctoral thesis, Karlstad University, Sweden "Baggy paper webs: Effect of uneven moisture and grammage profiles in different process steps" ISBN 978-91-7063-320-1
Mikko Jokio, Papermaking Part 3 Finishing, Papermaking Science and Technology, TAPPI pp. 159

특히 대구경 롤이나 고속 권취 조건에서 토크 제어는 내부 과압축이나 중심부 느슨함을 방지하는 핵심 수단이 된다.

#### 나. 롤 경도 프로파일 (Hardness Profile)

이상적인 롤 구조를 형성하기 위해서는 반경 방향 경도 프로파일을 정밀하게 설계하고 관리해야 한다. 우수한 품질의 롤은 코어 부근이 가장 단단하고, 외곽으로 갈수록 점진적으로 경도가 완화되는 감소형 프로파일을 갖는 것이 바람직하다. 코어 근처의 높은 경도는 롤 전체의 하중을 안정적으로 지지하는 역할을 하며, 코어와 종이층 사이의 미끄러짐을 방지한다. 또한 초기 권취층의 구조적 안정성을 확보하여 롤 중심부의 붕괴나 변형을 예방하는 기능을 한다. 반면, 외곽부의 상대적으로 낮은 경도는 외부 충격이나 취급 과정에서 발생하는 기계적 하중을 흡수하는 완충 역할을 한다. 동시에 내부 과압축에 의한 결함 발생을 억제하는 데 기여한다.

### 5) 권취 결함

권취 공정 중 발생하는 결함은 단순한 외관상의 문제를 넘어, 종이의 소성 변형을 유발하고 후속 공정에서 지절, 주름, 인쇄 불량 등으로 이어지는 주요 원인이 된

다. 이러한 결함은 대개 장력·닙 압·토크의 불균형 또는 지필 물성의 불균일성과 밀접하게 관련된다. 대표적인 결함은 다음과 같다.

첫째, 스타링(starring)은 롤 단면이 별 모양으로 변형되는 현상이다. 일반적으로 외곽부가 과도하게 단단하게 감겼을 때 발생하며, 외층의 높은 압축 응력이 내부층을 비균일하게 압박함으로써 중심부에 방사형 변형이 나타난다. 이는 과도한 닙 압이나 장력 설정, 또는 부적절한 토크 제어로 인해 유발될 수 있다.

둘째, 텔레스코핑(telescoping)은 롤의 층이 축 방향으로 밀려나 단면이 원뿔 모양으로 변형되는 현상이다. 종이의 마찰 계수(COF)가 낮아 층간 미끄러짐이 발생하거나, 권취 장력이 부족하여 내부 결속력이 약할 때 주로 나타난다. 또한 장력 프로파일이 불균일할 경우에도 발생 가능성이 높다.

셋째, 배기니스(bagginess)는 롤의 특정 부위가 느슨해지면서 국부적인 주름이나 처짐이 나타나는 현상이다. 이는 폭 방향의 두께 또는 수분 프로파일이 불균일하여 특정 구간의 장력이 상대적으로 낮아질 때 발생한다. 결과적으로 권취 밀도 분포가 균일하지 못해 후속 공정에서 주행 불안정이나 품질 저하를 초래한다.

이 결함들의 발생 정도는 권취되는 종이의 물성에 영향을 받게 된다. 예를 들어 종이가 너무 미끄러우면, 즉 마찰계수가 작으면 층간 미끄러짐으로 인한 텔레스코핑이나 크레이프 주름이 발생하기 쉽고, 반대로 마찰계수가 너무 높으면 층간 이동이 방해받아 내부 응력이 집중되면서 터짐이 발생할 수 있다. 그리고 권취 중 가해진 과도한 장력과 압력은 종이의 기계 방향 소성 신장을 유발한다. 이는 종이가 다시 풀릴 때 원래 상태로 돌아오지 않아 인쇄기 등에서 장력 제어를 어렵게 만든다. 또한 수분 및 온도 등 주변 환경과의 평형 과정에서 발생하는 치수 변화는 롤 내부 응력 상태에 영향을 미친다. 시간이 경과함에 따라 내부 응력이 재분포되면서, 권취 직후에는 나타나지 않았던 결함이 뒤늦게 발생하는 현상이 나타날 수 있다. 이러한 현상을 흔히 '롤 메모리(roll memory)'라 하며, 이는 롤 내부에 축적된 잔류 응력이 외부 조건 변화에 의해 재현되는 결과로 이해할 수 있다.

## 6. 포장 공정

포장은 종이 제조 및 가공 공정의 진정한 마무리 단계이다. 릴링과 와인딩을 통해 내부 구조가 완성된 종이 롤이 최종 고객에게 도달하기 전까지, 외부 환경으로부

터 품질을 보호하여 상업적 가치를 유지하기 위한 물리적 방어막을 형성하는 과정이다.

포장 공정은 단순한 외관 형성을 넘어, 제품의 신뢰성과 품질 안정성을 보장하기 위한 중요한 기능적 목적을 가진다. 그 주요 목적은 다음과 같다.

첫째, 기계적 보호 기능이다. 포장은 운송 및 보관 과정에서 클램프 트럭(clamp truck) 이동, 적재 및 하역 작업 중 발생할 수 있는 충격, 긁힘, 국부 압착, 찌그러짐 등으로부터 롤을 보호한다. 특히 롤 단면과 외곽부가 손상될 경우 원형도(roundness)가 저하되어 후속 공정에서 주행 불안정이나 진동 문제가 발생할 수 있다. 따라서 포장은 롤의 형상 안정성을 유지하는 물리적 완충 구조의 역할을 수행한다.

둘째, 수분 평형 유지 기능이다. 종이 롤은 주변 공기와 지속적으로 수분 평형을 이루려는 특성을 가진다. 만약 외부 환경의 상대습도 변화가 직접적으로 롤에 전달될 경우, 롤 내부의 수분 분포가 재조정되면서 치수 변화와 내부 응력 변동이 발생한다. 이러한 변화는 특히 축 방향(axial direction)으로 더 빠르게 진행될 수 있으며, 이는 텔레스코핑이나 가장자리 변형과 같은 구조적 결함으로 이어질 수 있다. 적절한 포장은 외부 수분 변화의 영향을 완화하여 롤 내부의 안정적인 평형 상태를 유지하도록 돕는다.

셋째, 청정도 유지 기능이다. 포장은 외부 먼지, 이물질, 오염 물질의 유입을 차단하여 제품의 청정도를 보장한다. 특히 오프셋 인쇄용 웹의 경우, 미세한 먼지 입자조차 인쇄 품질 저하, 핀홀, 잉크 부착 불량 등의 문제를 유발할 수 있다. 따라서 결함 없는 깨끗한 상태를 유지하는 것은 고급 인쇄용지에서 필수적인 요구 조건이다.

이와 같이 포장은 기계적 보호, 수분 안정화, 청정도 확보라는 세 가지 핵심 기능을 통해 종이 롤의 품질을 최종 고객에게 전달될 때까지 안정적으로 유지하는 역할을 수행한다.

### (1) 롤 포장의 구성 요소 및 구조

효과적인 보호를 위해 종이 롤은 일반적으로 다층 구조로 정밀하게 포장된다. 각 층은 서로 다른 기능을 수행하며, 물리적·환경적 요인으로부터 제품을 종합적으로 보호한다.

첫째, 종이와 직접 접촉하는 가장 내부층(inner wrap)에는 수분 차단 기능이 강화된 필름 또는 라미네이팅 코팅지가 주로 사용된다. 이 층은 외부 환경과의 수분 교환을 최소화하여 롤 내부의 수분 평형을 안정적으로 유지하는 역할을 한다. 특히 고급 인쇄용지나 습도 변화에 민감한 지종의 경우, 내부 랩의 차습 성능은 매우 중요한 요소이다.

둘째, 롤의 양쪽 단면을 보호하기 위한 포장이 이루어진다. 이를 위해 사이드 디스크(side disk) 또는 엔드 캡(end cap)이라 불리는 원형 판이 삽입된다. 이 부품은 롤 단면이 접시 모양으로 휘어지는 디싱(dishing) 현상이나 코어가 돌출되는 문제를 방지하며, 롤을 축 방향으로 적재할 수 있도록 구조적 지지 역할을 한다. 동시에 클램프 트럭 취급 시 단면 손상을 완화하는 기능도 수행한다.

셋째, 가장 외곽에는 롤 전체를 감싸는 외부 포장지(outer wrapper)가 적용된다. 이 외부 랩은 하역 및 운송 과정에서 발생하는 강한 마찰, 충격, 국부 압착에 견딜 수 있는 충분한 기계적 강도를 제공한다. 일반적으로 고강도 크라프트지 또는 강화 포장지가 사용된다.

마지막으로 롤 양단에는 캡(header)을 씌워 기밀성을 높이고 포장 구조를 완성한다. 동시에 롤의 규격, 무게, 제조 일자, 권취 방향, 고유 식별 번호 등을 포함한 라벨을 부착하여 디지털 이력 관리(roll tracking)를 가능하게 한다. 이는 물류 추적, 품질 관리, 고객 대응의 효율성을 크게 향상시키는 중요한 관리 수단이다.

### (2) 포장 방식 및 물류 관리의 유의점

종이의 종류, 최종 용도, 운송 거리 및 물류 조건에 따라 포장 방식과 관리 전략은 달라진다. 예를 들어, 신축성 있는 플라스틱 필름을 강하게 감아 고정하는 스트레치 래핑(stretch wrapping) 방식과, 전통적인 고강도 크라프트지 포장 방식이 대표적이다. 최근에는 방수 성능이 우수하고 자동화 설비와의 적합성이 높은 필름 기반 포장 방식이 널리 사용되고 있다. 이는 포장 속도 향상과 작업 효율 개선 측면에서도 유리하다.

고객용 롤은 출하 후 물류 과정에서 클램프 트럭에 의해 여러 차례 조작되므로, 외부 압착과 마찰을 견딜 수 있을 만큼 충분한 경도와 구조적 안정성을 가져야 한다. 반면, 공장 내부에서 크레인으로만 취급되는 파렌트 릴은 상대적으로 외부 충격 위험이 낮아 보다 완화된 조건에서 관리될 수 있다.

또한 포장 및 보관 환경의 온도와 습도는 롤 내부 응력 상태에 직접적인 영향을 미친다. 외부 환경과 롤 내부가 수분 평형을 이루지 못하면 보관 중 치수 변화와 내부 응력 재분포가 발생하여 롤 변형이나 지연 결함으로 이어질 수 있다. 따라서 포장 작업과 보관은 제어된 온·습도 환경에서 수행되어야 하며, 특히 장거리 운송이나 수출 제품의 경우 환경 관리의 중요성이 더욱 커진다.

결론적으로, 포장은 단순한 외관 마감 단계가 아니라 제품 특성, 물류 조건, 환경 요인을 종합적으로 고려한 전략적 관리 공정이라 할 수 있다.

**참고문헌**


[1] Browne, T. C., & Crotogino, R. H. (2001). Future Directions in Calendering Research. In C. F. Baker (Ed.), The Science of Papermaking, Transactions of the XIIth Fundamental Research Symposium Oxford (pp. 1001–1036). FRC, Manchester.

[2] Jokio, M. (1999). Papermaking Part 3, Finishing (Vol. 10). Finnish Paper Engineers' Association and TAPPI Press.

[3] Ek, M., Gellerstedt, G., & Henriksson, G. (Eds.). (2009). Pulp and Paper Chemistry and Technology: Volume 3, Paper Chemistry and Technology. Walter de Gruyter.



**류 정 용** 강원대학교 교수

**2026 – 현재** 환경부 통합환경관리 TWG /
펄프·종이 및 판지 제조업 기술 작업반 선임위원

**2024 – 현재** 그래픽 기술(ISO/TC130) 전문위원회 / 위원

**2024 – 현재** 한국자원순환사업인증원 /
우수재활용제품(GR) 인증 선정위원회 위원

**2020 – 현재** 한국펄프종이공학회 부회장

**1997 – 2013** 한국화학연구원 책임연구원

✉ jyryu@kangwon.ac.kr

# 13

# 탈묵펄프 제조

# 1. 탈묵용 종이자원의 선별

## (1) 종이자원의 등급

### 1) 종이자원의 종류

재단법인 한국제지자원진흥원의 단체표준에 따르면 종이 및 판지에 사용하는 재활용제지 원료의 종류는 골판지자원(Old Corrugated Container, OCC)과 신문지자원(Old Newspaper, ONP), 백상지자원(White Ledger, WL) 3종으로 구분된다.  골판지자원(OCC)은 백화점, 슈퍼마켓, 가정, 그 밖의 시중에서 발생되는, 라이너와 골심지로 만들어진 골판지를 주로 하여 수거된 골판지원지의 원료로 사용되는 종이자원을 말한다. 신문지자원(ONP)은 발행되어 독자에게 배포된 후 회수된 신문을 주로 하여 수거된 신문지의 원료로 사용되는 종이자원을 말한다. 백상지자원(WL)은 백상지에 검정 잉크 및 레이저 프린터 등으로 인쇄된 상태의 종이자원을 주로 하여 수거된 재생화장지나 재생인쇄용지의 원료로 사용되는 종이자원을 말한다[1]. 전술한 세 가지 종이자원 이외에 주요 종이자원으로서 폐종이 음료용기가 있는데, 이는 다시 상온 유통용과 냉장 유통용으로 구분된다. 상온 유통용 폐종이 음료용기는 물에 쉽게 풀리지만 냉장 유통용 폐종이 음료용기는 해리촉진을 위해 알칼리와 하이포염소산 나트륨 등이 요구된다는 차이점이 있다.

### 2) 이물질의 종류

이물질은 종이자원에 포함되어 재생지의 원료로 혼입된 후 종이 및 판지의 제조공정에 장해를 일으키거나 제품 품질을 저하시키는 원료로서 부적합한 물질을 말한다. 이물질은 그 특성과 위해 정도에 따라 협잡물과 금기물로 구분된다.
협잡물이란 종이 및 판지의 제조설비에 직접적인 손상을 주지는 않지만, 원료로 사용될 수 없어 제거가 필요한 물질을 의미한다. 대표적인 협잡물로는 합성수지류, 폐스티커, 섬유제품(옷가지), 부패한 종이, 우유팩, 감압지, 습강지, 라미네이트 코팅지 등이 있다. 금기물은 제조설비에 손상을 줄 위험이 있거나 제품 품질에 치명적인 영향을 미칠 수 있으며, 공정 효율을 현저히 저해하는 물질을 말한다.

대표적인 금기물로는 쇠붙이, 나무조각, 돌, 유리, 고무, 기름, 불에 탄 종이, 감열지, 날염지, 먹지, 색지, 염료 및 잉크류, 핫멜트, 파라핀류 등이 있다[1].

### 3) 유통 가능한 종이자원의 품질 규정

재활용제지 원료로서 유통되기 위해서는 골판지자원, 신문지자원, 백상지자원 3종 모두 수분 함량이 25% 이하여야 한다. 국제적으로 통용되는 일반 대기상태에서 종이자원의 수분 함량은 12%로 간주한다. 이와 달리 국내에서는 재활용 제지원료의 수분 함량 기준을 25%로 설정하고 있다. 이는 국내 재활용 제지원료의 운반 및 유통 구조의 특성을 고려한 결과이다. 해외의 경우 수집 및 보관 과정에서 비가림 시설이 비교적 잘 갖추어져 있는 반면, 국내에서는 수집·운반 과정에서 이러한 시설이 충분히 확보되지 않은 경우가 많다. 그 결과, 인위적인 가수(加水) 행위가 없더라도 강우나 외기 조건의 영향으로 함수율이 통상적으로 25% 수준까지 상승할 수 있기 때문이다. 종이자원에 포함된 수분 이외에 합성수지와 금속을 포함한 금기물과 전체 협잡물의 총량은 2%를 초과하지 말아야 한다[1]. 재활용 제지 원료 3종의 품질규정은 도표 13-01과 같다.

골판지자원과 달리 신문지자원의 품질 규정에 색지 및 골판지자원이 금기물로 포

**도표 13-01.** 재활용 제지 원료의 품질 규정

| | | |
|---|---|---|
| **골판지자원(OCC)의 품질 규정** | **수분 (%)** | 25.0 이하 |
| | **합성수지 (%)** | 0.5 이하 |
| | **금속 (%)** | 0.5 이하 |
| **신문지자원(ONP)의 품질규정** | **수분 (%)** | 25.0 이하 |
| | **합성수지 (%)** | 0.5 이하 |
| | **금속 (%)** | |
| | **색지 및 폐골판지 (%)** | |
| **백상지자원(WL)의 품질규정** | **수분 (%)** | 25.0 이하 |
| | **금기물 (%)** | 0.1 이하 |
| | **협잡물 (%)** | 2.0 이하 |

출처 : SPS-KPRA 1501-6237 재활용제지 원료

함된 이유는 신문지자원을 재활용한 재생신문지의 백색도가 색지 및 골판지에 의해 심각하게 저해되기 때문이다.

4) 종이자원의 품질 분석을 위한 시험방법

가. 시험 압축베일의 선택

시험 압축베일은 전체의 품질 특성이 반영될 수 있도록 무작위로 2개 이상을 선택한다.

나. 시료채취

압축베일에서 시료를 채취할 수 있도록 속이 비어있는 원통형 드릴이 장착된 천공기를 이용하여 시험 베일의 각 압축 면으로부터 지름 35 mm 내외, 길이 50 cm 내외로 시험 베일 당 4회 천공하여 시료를 채취한다.

다. 함량분석

채취한 시료를 KS M ISO 287에 따라 항량에 이를 때까지 건조하여 수분 함량을 측정하고, 8개 시료의 평균값을 결과값으로 한다. 일반 대기상태에서의 수분 함량은 12%로 간주된다. 채취한 시료로부터 핀셋을 사용하여 합성수지, 금속 등 이물질을 분리하고 분리된 각 이물질의 무게를 칭량한 후 다음 식에 따라 산출한다[6].

$$M = \frac{S}{W} \times 100$$

여기에서 **M** : 이물질 함량(%) / **W** : 시료의 무게(kg) / **S** : 이물질의 무게(kg)

**(2) 종이자원 베일의 해체 투입**

1) 종이자원의 포장

종이 및 판지에 사용하는 재활용제지 원료의 포장 형태는 직육면체 모양으로 압착하여 평철사 또는 합성수지 끈으로 묶음을 하며, 수송 조건을 고려하여 인수·인도 당사자 사이의 협정에 따르되, 가급적 두께 1.5 mm 이상의 녹방지 처리를

한 연철제의 평철사 또는 합성수지 끈을 사용한다[1].

### 2) 종이자원 베일의 표시

종이 및 판지에 사용하는 재활용제지 원료에는 그림 13-02에 따라 알아보기 쉽도록 꼬리표를 부착하여 품질표시 하여야 한다. 꼬리표 크기는 10 cm×15 cm, 평량은 80 g/m$^2$ 이상의 습강지를 사용한다.

### 3) 종이자원 베일 해체 투입

종이자원 베일에 부착된 품질표시 꼬리표를 읽어 수분함량이 25% 미만인지 확인한다. 아울러 종이자원에 포함된 수분 이외에 합성수지와 금속을 포함한 금기물과 전체 협잡물의 총량이 2%를 초과하는지 여부를 확인한다. 품질 표시를 확인한 종이자원 베일은 와이어 컷팅 후 펄퍼에 투입한다.

**도표 13-02.** 품질표시 꼬리표

**품 질 표 시**

**1. 치수 :** 가로 mm × 세로 mm × 높이 mm
**2. 무게 :** kg
**3. 종류 :**
**4. 품질**
OCC : 수분 (%) 합성수지 (%) 금속 (%) 총 이물질 (%)
ONP : 수분 (%) 색지 및 폐골판지 (%) 합성수지 (%) 금속 (%)
WL : 수분 (%) 금기물 (%) 협잡물(%)
**5. 취급상 주의사항**
① 직사광선 또는 열을 피할 것.
② 보관 장소는 습기가 많은 곳을 피하고, 수평을 유지할 것.
**6. 포장 연월 :**
**7. 업체명 :**
**8. 주소 및 전화 번호 :**

출처 : SPS-KPRA 1501-6237 재활용제지 원료

## 2. 탈묵용 종이자원의 해리

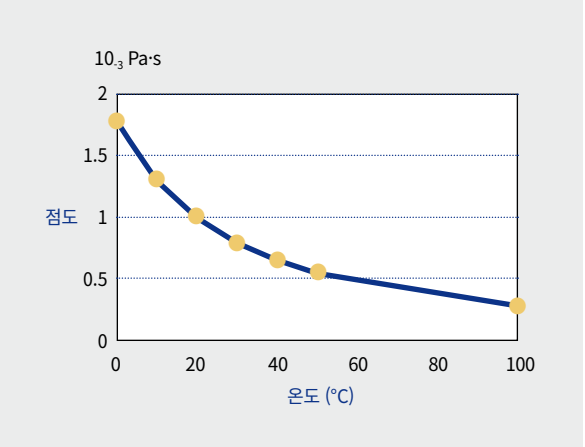
### (1) 펄퍼의 운전

1) 해리의 영향인자

해리는 재생종이의 원료인 종이자원이 재활용 과정에서 거치는 첫 번째 단계로, 이후 전개되는 정선 공정의 효율을 좌우하는 핵심 공정이다. 해리의 기본 목적은 종이자원을 물속에서 섬유 단위로 분산시켜, 펌프로 이송이 가능한 슬러리 상태로 만드는 데 있다. 이때 형성된 슬러리는 이후 다양한 정선 처리 과정을 거쳐 오염물질이 제거된다. 따라서 해리 과정에서는 오염물이 지나치게 작은 크기로 미분화되지 않도록 제어하는 것이 중요하다. 오염물이 과도하게 미분화될 경우, 후속 공정에서의 제거 효율이 크게 저하될 수 있기 때문이다. 특히 재생 인쇄용지로 재활용되는 종이자원의 경우에는 해리 과정에서 잉크 입자의 효과적인 탈착과 잉크 반점의 제어가 중요한데, 이는 탈묵공정의 효율과 최종 제품의 백색도 및 인쇄적성에 직접적인 영향을 미치기 때문이다.

해리 처리에 영향을 미치는 인자는 크게 해리 시간, 온도, 첨가제, 그리고 운전 조건으로 구분할 수 있다. 이 가운데 운전 조건의 주요 항목으로는 해리 농도, 로터 속도, 펄퍼의 종류 및 구조 등이 있다. 해리는 펄퍼 내부에서 발생하는 기계적 작용력이 물과 접촉한 종이자원의 결합 강도보다 클 때 효과적으로 이루어진다. 즉,

그림 13-01. 온도에 따른 물의 점도 변화



종이자원을 구성하는 섬유 간 결합을 분리할 수 있을 만큼 충분한 전단력과 충격력이 가해져야 한다. 강사이징 처리나 파라핀 왁스 처리 등으로 종이의 발수성이 높은 경우에는 물에 젖는 속도가 느려 해리가 지연될 수 있다. 또한 물에는 비교적 쉽게 젖더라도, 습윤지력증강제가 처리된 종이의 경우에는 습윤 시에도 강도가 높게 유지되므로 해리가 어렵다. 이 경우 해리를 촉진시키기 위해  해리처리 영향인자를 다음과 같이 조절할 수 있다.

먼저 미해리분이 충분히 해리될 때까지 해리 시간을 연장하는 방법이 있다. 그러나 해리 시간이 길어질수록 펄퍼 내에서 종이자원뿐만 아니라 이물질까지 함께 미분화될 가능성이 높아지는 문제가 있다. 이물질이 과도하게 잘게 분산되면 후속 정선 공정에서의 제거 효율이 저하될 수 있다. 한편, 펄퍼의 해리 온도는 일정 범위 내에서 높을수록 유리하다. 물의 온도가 상승하면 점도가 낮아지며, 이에 따라 종이자원으로의 수분 흡수가 촉진되어 해리 속도가 향상된다. 즉, 온도 상승은 섬유 간 결합의 이완과 분산을 돕는 요인으로 작용한다. 그러나 약 45 ℃ 이상에서는 물의 점도 저하 효과가 점차 미미해지는 반면, 해리 온도가 과도하게 높아질 경우 이물질의 용해 및 미분화를 촉진하는 단점이 있다. 특히 점착성 물질이나 코팅 성분이 연화·분산되어 제거가 어려워질 수 있다. 이러한 이유로, 통상적으로 기준 해리 온도는 약 45 ℃로 설정하여 운전하는 것이 일반적이다.

해리 시 첨가제로 알칼리를 투입하면 섬유의 팽윤으로 종이자원의 해리와 잉크박리 효율이 개선된다. 알칼리에 의한 섬유의 팽윤은 화학 펄프보다 고수율 펄프의 경우에 현저히 일어나는데 이것은 고온, 강알칼리 증해처리를 거친 화학펄프의 경우 이미 팽윤이 충분히 일어난 상태이지만 고수율 펄프는 상대적으로 알칼리에 의해 용해, 추출, 팽윤될 수 있는 여지가 많기 때문이다. 따라서 고수율 펄프가 포함된 신문용지의 탈묵에는 알칼리 투입이 효과적이나 재생 화장지를 생산하기 위해 화이트레저를 해리하는 경우에는 알칼리 투입 효과가 미약하다. 펄퍼의 운전 조건에 대해서는 펄퍼의 종류에서 다루고자 한다.

### 2) 펄퍼의 종류

종이자원을 해리하는 펄퍼(pulper)는 처리 농도에 따라 저농도 펄퍼와 고농도 펄퍼로 구분된다(도표 13-03). 두 장치는 운전 방식과 해리 메커니즘에서 차이를 보이며, 적용 목적 또한 서로 다르다. 고농도 펄퍼는 저농도 펄퍼에 비해 해리 농도

가 높다(도표 13-03). 이에 따라 첨가 약품의 농도가 높게 유지되어 약품 효능이 우수하며, 로터 속도가 상대적으로 낮아 에너지 소모가 적고 오염물의 미분화가 억제되는 장점이 있다. 또한 고농도 조건에서는 섬유 간 마찰 작용이 활발하게 일어나 잉크의 탈착이 촉진된다. 이러한 특성으로 인해 고농도 펄퍼는 탈묵 공정에서의 해리기로 적합하다. 반면 저농도 펄퍼는 일반적으로 연속식으로 운전되며, 섬유에 작용하는 전단력이 비교적 약하다. 따라서 지료의 여수도 변화가 적다는 장점이 있다. 이러한 특성으로 인해 저농도 펄퍼는 탈묵 처리를 필요로 하지 않는 재생 산업용지 생산공정의 해리에 주로 활용된다.

**도표 13-03.** 저농도 펄퍼와 고농도 펄퍼의 비교

| 특성 | 저농도 펄퍼 | 고농도 펄퍼 |
|---|---|---|
| 해리농도 (%) | 3~8 | 13~18 |
| 로터의 속도 (m/s) | 16~20 | 13~18 |
| 소요 에너지 (kWh/Ton) | 20~50 | 15~30 |
| 운전방식 | 연속 혹은 단속식 | 단속식 |
| 주요 작용기작 | 로터와 베드플레이트에 의한 마찰력 | 섬유 간 마찰력 |

**그림 13-02.** 저농도 펄퍼와 주변 장치

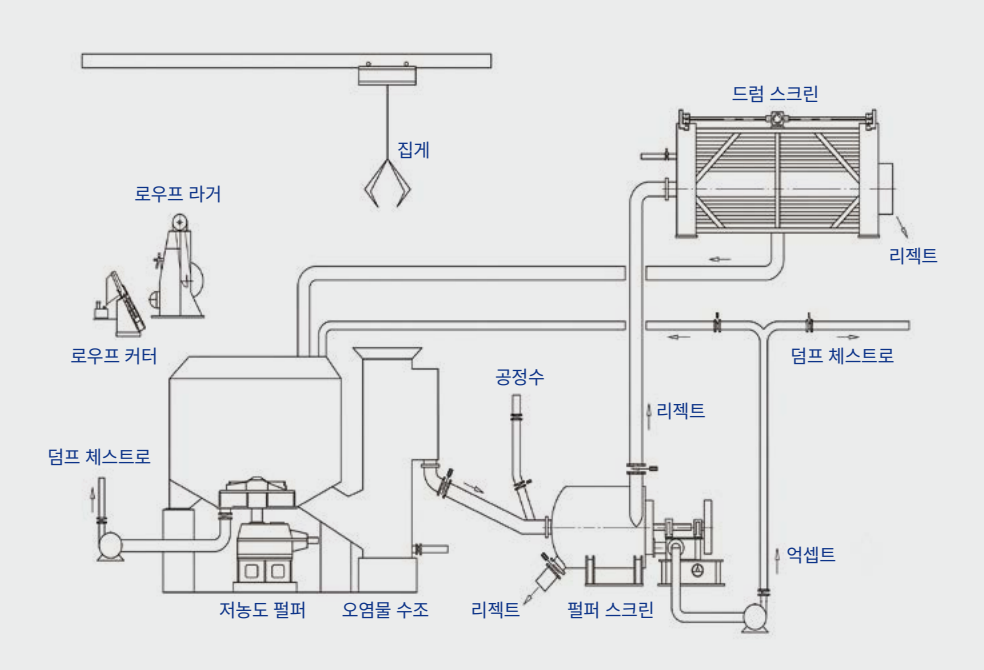
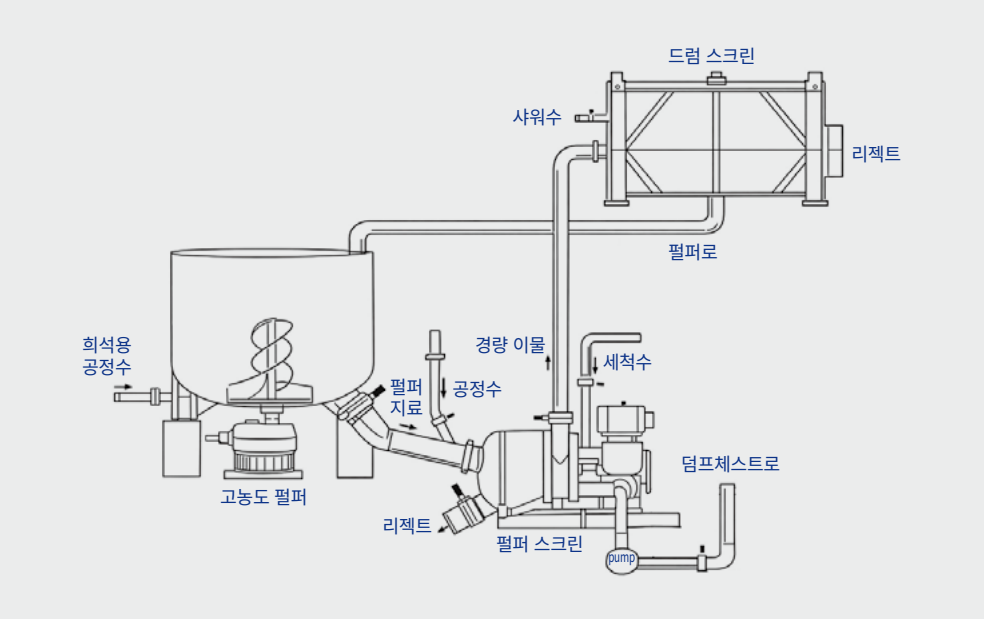


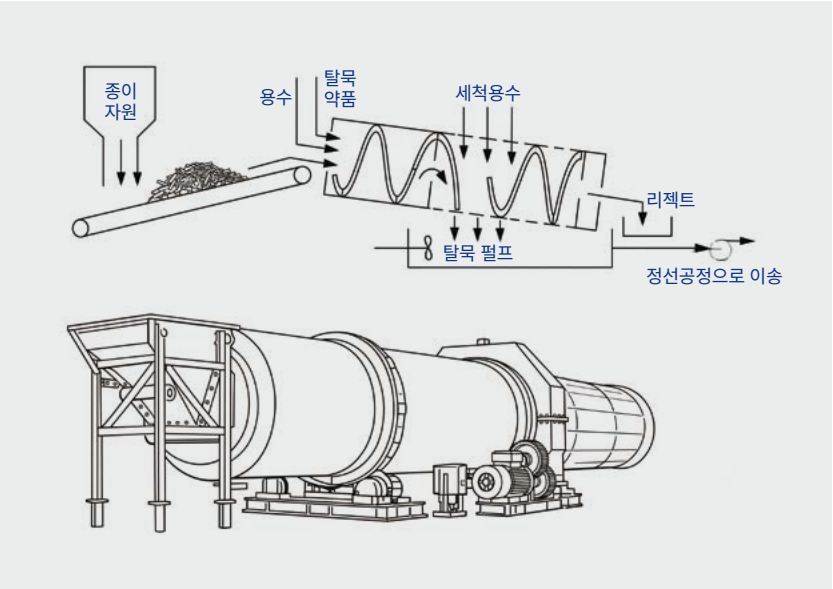
그림 13-03. 고농도 펄퍼와 주변 장치




종이자원을 해리하는 펄퍼는 해리 방식에 따라 로터식 펄퍼와 드럼식 펄퍼로 구분된다. 그림 13-02와 그림 13-03에 나타낸 로터식 펄퍼는 로터의 기계적 교반 작용에 의해 종이자원을 분산·해리하는 방식이다. 로터의 회전에 따라 전단력과 난류가 발생하여 섬유 간 결합이 분리된다. 이에 비해 그림 13-04에 나타낸 드럼 펄퍼는 회전하는 원통형 드럼 내부에서 지료가 반복적인 낙차 충격과 마찰 작용을 받아 해섬이 이루어진다는 점에서 차이가 있다. 즉, 로터식이 국부적인 기계적 전단력에 의존하는 반면, 드럼식은 비교적 완만한 기계적 작용과 중력에 의한 충격을 활용하는 방식이다. 일반적으로 드럼 펄퍼는 해리 구간과 스크리닝 구간으로 구성되어 있다. 해리 구간에서 섬유가 분산된 후, 스크리닝 구간에서 해리된 지료와 미해리물을 분리함으로써 1차적인 선별 기능도 동시에 수행한다는 특징이 있다. 드럼 펄퍼의 처리 효율에 영향을 미치는 주요 인자는 낙차 강도를 결정하는 드럼의 직경과, 드럼 내 체류시간으로 환산되는 해리 에너지이다. 드럼 직경이 클수록, 그리고 체류시간이 길수록 해리 에너지가 증가한다. 그러나 해리 에너지가 과도할 경우 잉크 입자 및 점착성 이물질의 미분화를 촉진하여 후속 공정에서의 제거를 어렵게 만들 수 있으므로, 적정 조건의 설정이 중요하다.

드럼 펄퍼는 고농도의 지료를 연속적으로 해리할 수 있으며 에너지 소모 및 이물

그림 13-04. 드럼 펄퍼




질의 미분화가 적다는 장점이 있으나 로터 방식의 고농도 펄퍼에 비하여 해리시간이 길고 그 조절이 불가능한 이유로 잉크의 재흡착 위험이 있으며, 설비가 고가이고 설치에 넓은 공간이 필요하다는 단점이 있다.

### 3) 해리 시 잉크와 점착성 이물질의 성상변화

탈묵을 목적으로 한 고농도 해리에서는 종이의 해섬보다 잉크의 탈착이 상대적으로 더디게 진행되는 경우가 많다. 따라서 해리 처리 강도는 단순한 섬유 분산이 아니라, 잉크의 성상 변화와 입자 크기 조절을 고려하여 설정하여야 한다. 일반적으로 도표 13-04에 제시된 약품들이 탈묵 공정에 첨가되며, 이러한 탈묵용 첨가약품은 그림 13-05에 나타낸 바와 같이 잉크의 탈착을 촉진하고 입자 특성을 변화시킨다. 알칼리, 계면활성제, 과산화수소 등은 섬유 표면으로부터 잉크를 분리시키고, 잉크 입자의 응집 또는 분산상태에 영향을 미친다.

해리 과정에서 섬유 표면이나 무기 안료 코팅층으로부터 떨어져 나온 잉크 입자는 이후 부상부유 탈묵 공정을 통해 제거된다. 이때 잉크 입자의 크기는 약 10~100 ㎛ 범위가 적절하다. 잉크 입자가 이보다 클 경우에는 공기방울에 부착되기 어려워 제거 효율이 낮아지고, 최종 제품에 반점으로 남을 가능성이 있다.

반대로 입자가 지나치게 작으면 과도하게 미분화되어 섬유에 재흡착되기 쉬우므로 역시 제거가 어렵다.

따라서 탈묵을 목적으로 한 해리 처리의 목표는, 섬유로부터 탈착된 잉크가 반점으로 남지 않도록 충분히 작으면서도, 지나치게 미세화되어 재흡착되지 않을 정도의 적정 입자 크기로 조정하는 데 있다. 이는 해리 강도, 약품 조성, 처리 시간 등의 종합적 제어를 통해 달성된다.

**도표 13-04.** 탈묵약품과 그 기능

| 탈묵약품 | 첨가수준(전건펄프대비 %) | 작용 |
|---|---|---|
| 수산화나트륨 | 1.0~2.0 | 잉크의 검화 및 분산, 섬유의 팽윤 및 황변 |
| 규산소다 | 1.5~2.5 | 알칼리도 및 pH 조절, 펄퍼에 투입된 과산화수소수의 안정화 |
| 과산화수소수 | 0.5~2.0 | 표백, 황변예방, 잉크제거 |
| 킬레이트제 | 0.2~0.3 | 금속착이온에 의한 과산화수소수의 분해 방지 |
| 계면활성제 | 0.2~1.5 | 잉크의 탈착을 돕기 위한 유화작용 혹은 미셀의 형성 |
| 지방산 포집제 | 0.2~1.0 | • 잉크입자의 표면에 흡착하거나 공기와 물의 계면에 위치하여 잉크의 소수성을 증가시키고 공기방울에 부착되도록 유도함<br>• 잉크입자를 분산시키고 섬유로부터 탈착되도록 유도하여 탈묵을 촉진함 |
| $Ca^{2+}$ 이온 | 용수의 경도에 따라 조절 | • 부상부유 탈묵 시 잉크포집을 촉진하기 위해서는 200 ppm 이상의 칼슘경도가 요구됨<br>• 지방산과 반응하여 불용성 칼슘염을 형성하고 잉크입자에 흡착하며 소수화된 잉크입자들의 응집을 유도함<br>• 칼슘이 섬유표면에 흡착될 때에는 잉크입자의 섬유표면 재흡착을 조장하고 부상부유 시 섬유손실을 유발함<br>• 칼슘이온은 계 내에 존재하는 어떤 금속표면에도 흡착함 |

**그림 13-05.** 펄핑 시 잉크의 탈착기구

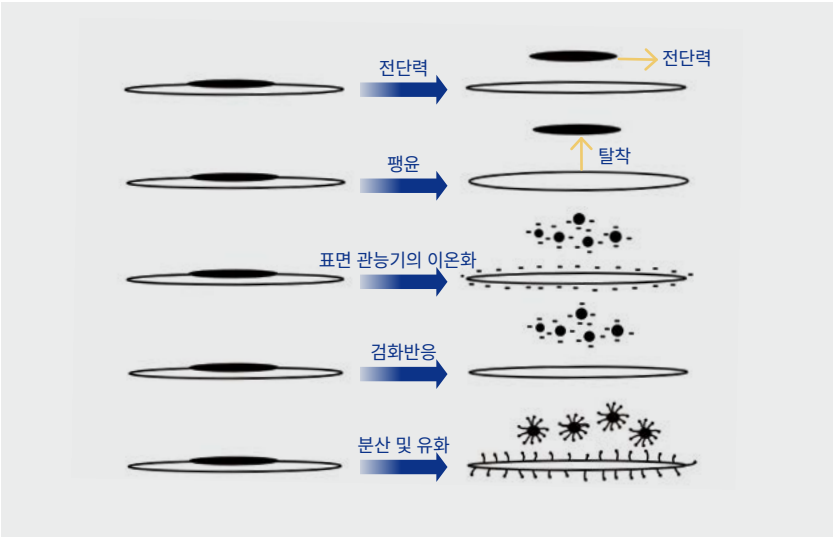
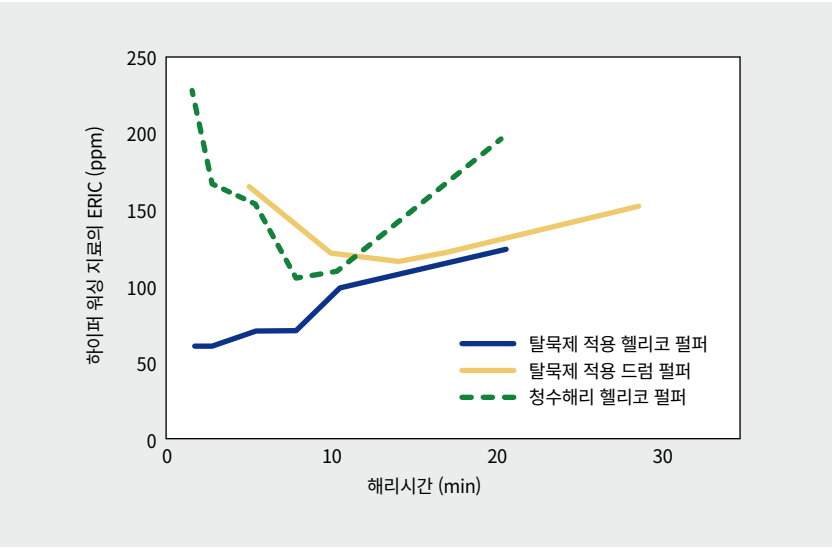


그림 13-06. 펄핑 시 ERIC값 변화




잉크가 섬유로부터 얼마나 효과적으로 탈착되었는지를 평가하기 위하여 하이퍼 워싱(hyper washing)이라 불리는 강력 세척 처리를 실시한다. 세척이 완료된 섬유분으로 패드를 성형한 후, ERIC(effective residual ink concentration, 유효 잉크 농도) 값을 측정한다. 일반적으로 200mesh 체를 이용하여 지료를 과량의 청수로 반복 세척하며, 섬유로부터 탈착된 잉크가 충분히 제거될 때까지 이 과정을 수행한다. 이때 측정되는 섬유분의 ERIC 값은 섬유에 탈착되지 못하고 잔존한 잉크의 양과, 해리 과정에서 탈착되었다가 다시 섬유에 재흡착된 잉크의 양을 함께 반영하는 지표이다. 즉, ERIC은 탈묵공정에서의 해리 효율과 잉크 재흡착 거동을 동시에 평가하는 정량적 지표라 할 수 있다. 헬리코 펄퍼와 드럼 펄퍼를 각각 사용하여 해리 시간을 달리한 지료에 대해 하이퍼 워싱을 실시하고 ERIC을 측정한 결과는 그림 13-06에 제시되어 있다. 이를 통해 펄퍼의 종류와 해리 강도가 잉크 탈착 및 재흡착에 미치는 영향을 비교·분석할 수 있다.

그림 13-06에 나타난 바와 같이, 탈묵용 약품을 첨가한 헬리코 펄핑의 경우 약품을 첨가하지 않은 청수해리의 경우 보다 펄핑 초기 단계에서 더 낮은 ERIC 값을 보였다. 이는 탈묵용 약품의 작용으로 잉크의 탈착이 촉진되었음을 의미한다. 그러나 해리 시간이 경과함에 따라 탈묵용 약품을 첨가한 헬리코 펄핑에서는 ERIC 값이 점차 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 섬유로부터 탈착된 잉크가 지속적인 기계적 작용에 의해 미분화되면서 섬유 표면에 재흡착되었기 때문으로 해석된다.

즉, 과도한 해리 처리는 오히려 탈묵 효율을 저하시킬 수 있음을 보여준다. 한편, 탈묵용 약품을 첨가하지 않은 헬리코 펄핑의 경우에는 초기 약 20분까지 잉크 탈착 효과가 우세하여 ERIC 값이 감소하였다. 이후 해리 강도의 누적으로 잉크의 미분화가 진행되면서 재흡착이 촉진되어 ERIC 값이 다시 증가하는 양상을 보였다. 드럼 펄퍼의 경우에는 헬리코 펄퍼보다 해리 동력이 상대적으로 낮기 때문에, 탈묵용 약품을 첨가한 조건에서도 일정 시간 동안은 잉크 탈착이 우세하여 ERIC 값이 감소한다. 그러나 해리 시간이 더 경과하면 잉크 미분화와 재흡착이 발생하여 ERIC 값이 다시 증가하는 경향을 보인다. 따라서 탈묵을 목적으로 한 펄핑에서는 하이퍼 워싱 후 ERIC 값이 증가하기 이전, 즉 약 20~30분 범위에서 해리 처리를 종료하는 것이 바람직하다. 이는 잉크 탈착 효과를 극대화하면서 재흡착을 최소화하기 위한 최적 운전 조건이라 할 수 있다.

잉크의 탈착 및 미분화 방지와 더불어, 해리 단계에서 추구해야 할 또 하나의 중요한 목표는 잉크 반점의 적절한 미분화 제어이다. 앞서 언급한 바와 같이, 부상부유 공정에서 제거되지 못하는 크기가 큰 잉크 반점은 최종 제품에 결점으로 남을 수 있다. 따라서 이러한 대형 반점을 제어하기 위해서는 일정 수준의 미분화 처리가 필요하다. 그러나 그림 13-07에 나타난 바와 같이, 반점의 미분화는 펄핑 초기 단계에서 잉크의 탈착보다 비교적 쉽게 진행되는 경향이 있다. 즉, 기계적 작용에 의해 반점은 비교적 빠르게 분산되지만, 섬유에 부착된 잉크의 완전한 탈착은 상대적으로 더 많은 시간과 에너지를 요구한다. 따라서 펄핑 처리는 반점의 과도한 미분화를 유도하기보다는, 잉크의 탈착을 최적화하는 데 주안점을 두고 운전하는 것이 바람직하다. 과도한 미분화는 잉크 입자를 지나치게 미세하게 만들어 재흡착을 조장하거나 제거 효율을 저하시킬 수 있기 때문이다. 또한 탈묵용 약품이 첨가되고 펄핑 온도가 상승할수록 반점의 미분화는 더욱 빠르게 진행된다. 따라서 약품 농도와 해리 온도는 잉크 탈착과 반점 미분화의 균형을 고려하여 적절히 조정하여야 한다.

점착성 이물질(stickies)의 제거는 주로 스크린 공정에서 이루어진다. 따라서 해리 단계에서 과도한 펄핑 처리가 이루어져 점착성 이물질이 지나치게 미분화되지 않도록 주의하여야 한다. 점착성 이물질이 미세화되면 스크린을 통과하여 후속 공정으로 이행할 가능성이 높아지기 때문이다.

그림 13-08에서 볼 수 있듯이, 고농도 펄핑 시간이 길어질수록 점착성 이물질의 평균 입경은 감소하며, 스크린에서 비교적 쉽게 제거될 수 있는 큰 입자의 수 또

그림 13-07. 펄핑 시간에 따른 반점의 변화

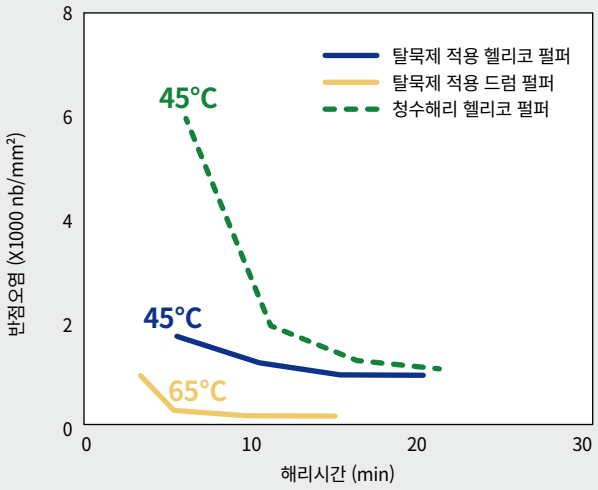



그림 13-08. 펄핑 시간에 따른 점착성 이물질의 변화

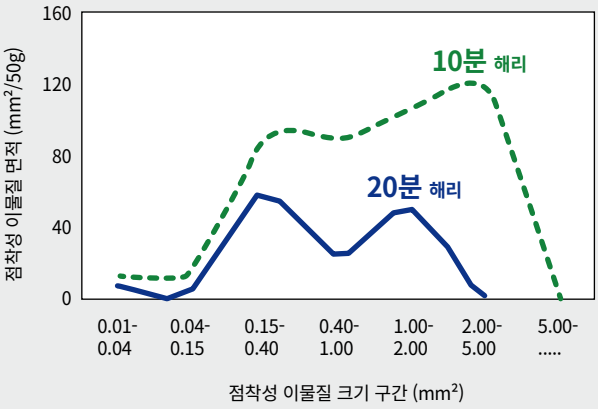
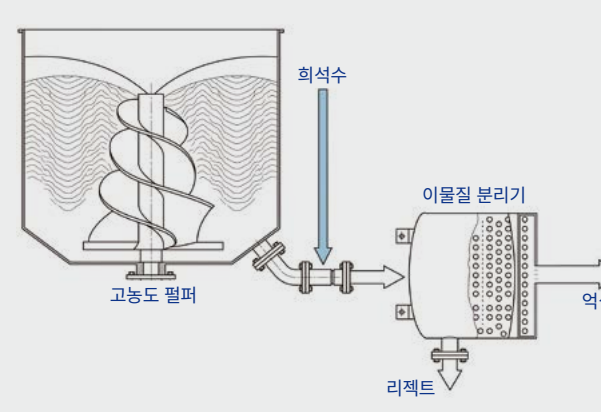



그림 13-09. 고농도 펄퍼에 연결된 펄퍼 스크린에 의한 이물질 분리



한 줄어드는 경향을 보인다. 이는 지속적인 기계적 작용에 의해 점착성 물질이 잘게 분산되기 때문이다. 또한 펄핑 온도가 상승할수록 이러한 입경 감소 현상은 더욱 현저하게 나타난다. 고온 조건에서는 점착성 물질이 연화되어 기계적 작용에 더욱 쉽게 분산되므로, 제거가 어려운 미세 입자로 전환될 가능성이 커진다. 이러한 이유로 점착성 이물질의 효과적인 제거를 위해서는 펄핑 온도를 60 ℃ 이상으로 상승시키지 않는 것이 바람직하다. 이는 해리 효율과 점착성 이물질 제어 사이의 균형을 유지하기 위한 운전 기준이라 할 수 있다.

### (2) 해리된 원료의 추출, 이송

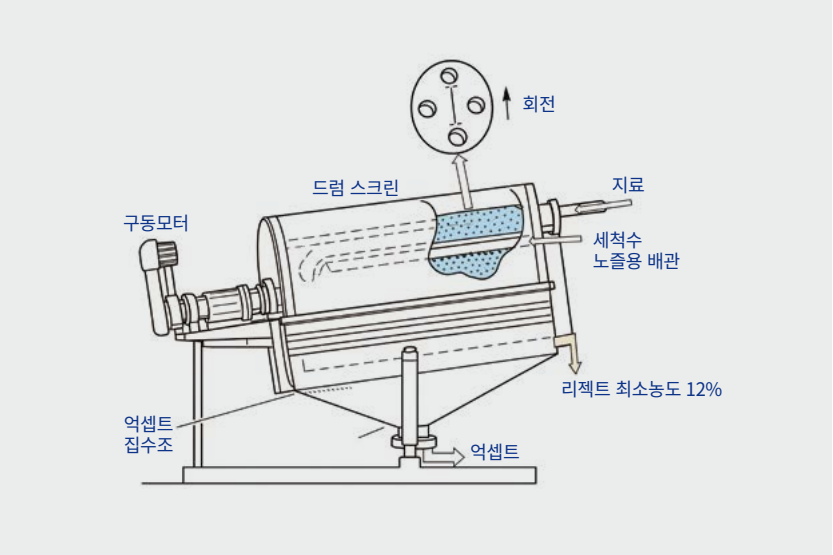
#### 1) 펄퍼 이물질 분리를 위한 펄퍼 스크린

펄퍼의 전단력만으로 충분히 해리되지 않는 종이를 완전히 분산시키기 위해 펄핑 시간을 과도하게 증가시키는 경우 종이 이외의 이물질까지 미분화되는 문제가 발생할 수 있다. 특히 펄핑 시간이 길어질수록 지료의 점도가 감소하게 되며, 이로 인해 로터 회전에 의해 발생하는 전단력이 점차 약화되는 한계가 있다. 따라서 단순한 펄핑 시간의 연장보다는, 로터보다 더 높은 회전 속도로 작동하는 이물질 분리용 펄퍼 스크린이나 이차 펄퍼로서 디스크 스크린을 활용하는 것이 효과적이다. 그림 13-09은 그림 13-03에 제시된 펄퍼 스크린의 구조를 상세히 나타낸 것이다. 이 장치는 고농도로 해리된 지료를 희석하면서 도입한 후, 고속 교반을 통해 미해리분의 추가 해섬을 유도함과 동시에 이물질을 분리하는 역할을 수행한다. 그림 13-02에 나타난 저농도 펄퍼의 경우, 다공판의 구경은 일반적으로 9~20 mm 수준인 반면, 펄퍼 스크린 플레이트의 구경은 4~5 mm로 더 작다. 이와 같은 차이에 의해 미해리분은 추가로 해섬되고, 이물질은 크기를 기준으로 효과적으로 분리될 수 있다.

#### 2) 펄퍼 리젝트의 처리를 위한 드럼 스크린

펄퍼 스크린에서 분리된 리젝트에는 여전히 사용 가능한 섬유가 상당량 잔존하므로, 이를 즉시 폐기하지 않고 그림 13-02 및 그림 13-03에 나타난 바와 같이 드럼 스크린을 이용하여 세척 공정을 거친다. 그림 13-10은 리젝트 분의 세척에 사용되는

그림 13-10. 펄퍼 스크린에 연결된 드럼 스크린에 의한 리젝트 배출




드럼 스크린의 구조를 상세히 나타낸 것이다. 이 장치는 세척수를 천공드럼 내부로 노즐을 통해 분무함으로써, 리젝트에 포함된 유용 섬유를 세척수와 함께 통과시켜 회수하는 원리로 작동한다. 즉, 드럼 스크린은 이물질과 섬유를 물리적으로 분리하는 동시에, 리젝트 내 잔존 섬유의 회수율을 높여 원료 손실을 최소화하는 기능을 수행한다.

### 3) 펄퍼의 세척

그림 13-02에 나타낸 바와 같이, 연속식으로 운전되는 저농도 펄퍼에는 오염물 수조(junk trap)가 설치되어 있다. 이 장치는 펄퍼의 다공판을 통과하지 못한 이물질과 미해리분을 지속적으로 배출하여, 장치 내부의 축적을 방지하고 안정적인 운전을 유지하는 역할을 한다. 또한 철사, 넝마, 밧줄, 플라스틱 끈 등과 같이 로터에 감기기 쉬운 이물질은 라거(ragger)에 의해 제거된다. 라거는 로프(rope)에 이러한 장섬유성 이물질을 감아 올려 외부로 배출함으로써, 설비 손상과 운전 장애를 예방한다.

## 3. 탈묵용 종이자원의 정선 공정

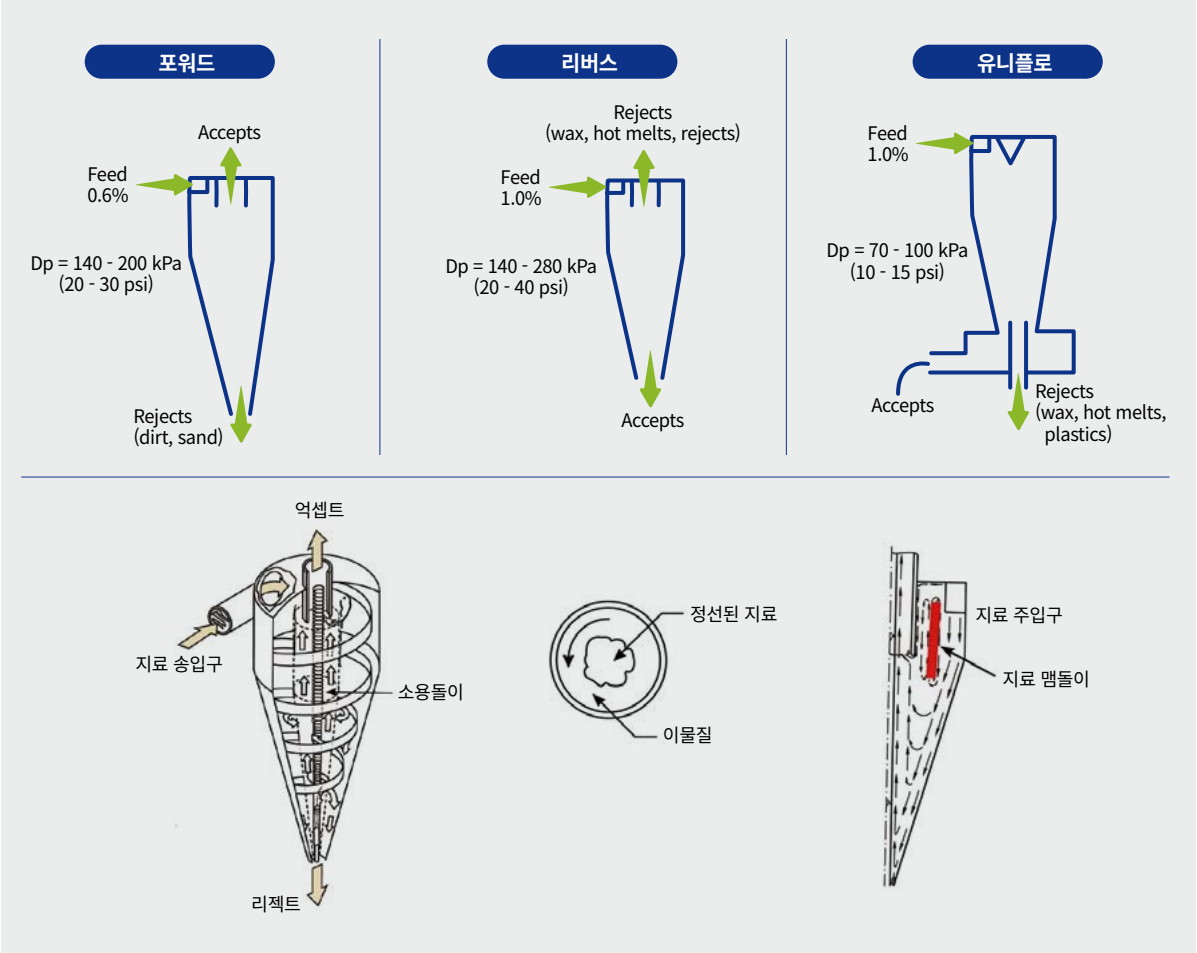
### (1) 클리너, 스크린 처리

1) 클리너의 종류 및 운전 영향인자

하이드로사이클론(hydrocyclone)이라고도 불리는 클리너(cleaner)는 그림 13-11에 나타낸 바와 같이 별도의 구동부 없이, 지료가 형성하는 소용돌이 흐름에 의해 발생하는 원심력을 이용하여 고체 입자를 비중 차이에 따라 분리하는 정선 설비이다. 원심력의 크기는 유체의 각속도와 클리너의 직경에 의해 결정된다. 유입 속도가 빠를수록, 그리고 클리너의 직경이 작을수록 더 큰 원심력이 발생하므로 분리 효율이 향상된다. 클리너는 비중이 큰 모래, 금속 클립, 스테이플러와 같은 중이물뿐만 아니라, 조건에 따라 비중이 작은 발포 폴리스티렌, 플라스틱, 잉크 입자, 왁스 및 기타 점착성 이물질의 분리에도 활용될 수 있다. 만약 전술한 중이물을 클리너 단계에서 충분히 제거하지 못하면, 후속 정선 설비인 스크린의 바스켓이 파손되는 등 설비 손상이 발생할 수 있다. 한편, 클리너는 단순한 이물질 제거 기능 외에도 섬유의 분급(fractionation)이나 지료 내 공기의 제거(탈기) 작업에 응용될 수 있어, 공정 안정화와 품질 향상에 중요한 역할을 한다.

클리너의 운전 효율에 영향을 미치는 주요 인자로는 지료의 유속, 리젝트율, 지료 농도 등을 들 수 있다. 먼저, 클리너에 유입되는 지료의 유속이 증가할수록 내부 소용돌이 흐름이 강화되어 원심력이 커지므로 이물질의 분리 효율은 향상된다. 그러나 유속 증가에 따라 펌핑 동력과 에너지 소비가 커지므로 운전 비용이 상승하는 단점이 있다. 리젝트율의 경우, 클리너의 형상과 설계 조건에 따라 최적 운전 효율을 보장하는 적정 리젝트 비율이 존재한다. 리젝트율이 지나치게 낮으면 분리 효율이 떨어질 수 있으며, 반대로 과도하게 높으면 유용 섬유의 손실이 증가하게 된다. 따라서 각 장치의 특성에 맞는 적정 리젝트율의 설정이 중요하다. 한편, 지료 농도가 높을수록 단위 시간당 처리량은 증가하나, 일정 수준 이상의 고농도에서는 섬유 간 간섭이 커지고 유동 특성이 저하되어 클리닝 효율이 감소할 수 있다. 따라서 설계 한계를 초과하지 않도록 적정 농도를 유지하는 것이 필요하다.

그림 13-11. 클리너 3종(포워드, 리버스, 유니플로)의 운전원리 및 지료와 이물질 유동




클리너는 운전 원리에 따라 그림 13-11에 나타낸 바와 같이 포워드(forward)형, 리버스(reverse)형, 그리고 유니플로(uniflow)형의 세 가지로 구분할 수 있다. 비중이 1.0 이상인 중이물을 제거하는 데에는 포워드 클리너가 주로 사용된다. 이 가운데 2~4%의 비교적 고농도 조건에서 운전되는 고농도(high-density) 클리너는 하부에 리젝트를 간헐적으로 배출하는 이물 박스(junk box)가 장착되어 있는 것이 특징이다. 이 장치는 순환 제지자원(폐지)을 재활용하는 공정에서 펄퍼 다음 단계에 주로 설치되며, 모래, 금속편 등과 같은 중이물을 효과적으로 제거함으로써 후속 정선 설비인 스크린 바스켓의 마모 및 파손을 방지하는 중요한 역할을 수행한다.

포워드 클리너 가운데 중농도(medium-density) 클리너는 고농도 클리너에 비해 직경이 작고, 운전 농도 또한 1.0~2.0% 미만으로 낮다. 이 장치는 펄프 제조

공정에서 원료인 목재 칩으로부터 유래되는 모래나 작은 자갈과 같은 중이물을 제거하는 데 활용된다. 한편, 포워드형 저농도(low-density) 클리너는 0.5~1.5%의 낮은 농도에서 운전되며, 상대적으로 높은 리젝트율을 설정하여 지료 내 잔존 이물질을 최대한 제거하는 기능을 수행한다. 주로 초지공정의 지료 조성부에 설치되어 미해섬분(shive), 섬유 다발(chop), 경세포(sclereids) 및 석세포(stone cell) 등을 제거하는 데 사용된다. 또한 재활용 공정에서는 잉크 응집체와 고밀도 점착성 이물질을 제어하는 용도로도 활용된다.

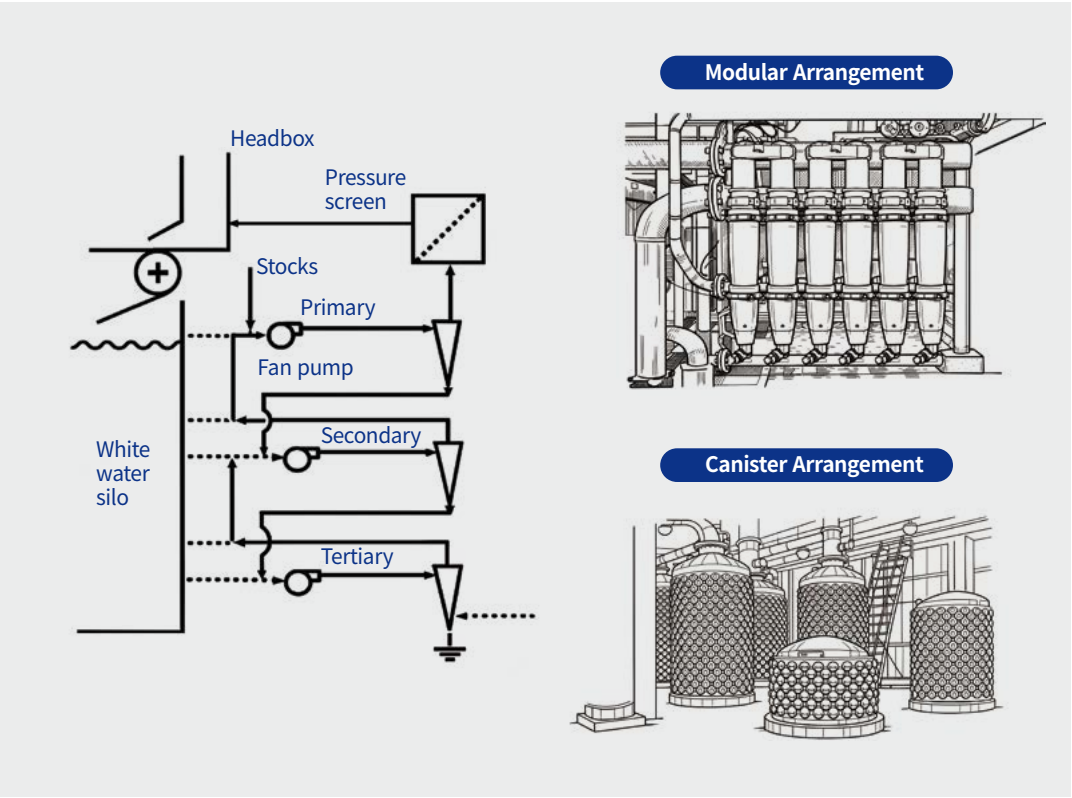
물보다 비중이 낮은 이물질을 제거하기 위해 설계된 리버스 클리너는 내부의 상향류에 포함되는 발포 폴리스티렌, 플라스틱, 접착제, 왁스 등을 리젝트로 분리·배출한다. 일반적으로 포워드 클리너의 리젝트율이 약 5% 수준인 데 비해, 리버스 클리너의 리젝트율은 40~50%로 상대적으로 높다. 이는 경이물을 효과적으로 제거하기 위해 더 많은 유량을 리젝트로 배출하는 운전 특성에 기인한다.

접선 방향으로 유입된 지료로부터 비중이 낮은 리젝트가 중앙의 상승류에 포함되어 상부로 배출되는 리버스 클리너와는 달리, 유니플로 클리너는 억셉트와 저비중 리젝트가 모두 하부로 배출되는 구조적 특징을 가진다. 유니플로 클리너는 내부에서 지료가 역방향으로 흐르지 않으므로 유동 저항이 상대적으로 작다. 이에 따라 장치 전후의 차압이 낮게 유지되는 장점이 있다. 일반적으로 포워드 및 리버스 클리너의 차압이 약 150~280 kPa 수준인 데 비해, 유니플로 클리너의 차압은 70~100 kPa 정도로 낮은 것이 특징이다.

전술한 클리너는 대부분 그림 13-12에 나타낸 바와 같이 다단계로 현장에 설치되어 운전된다. 개별 클리너는 비교적 높은 리젝트율로 운전되므로, 단일 단계에서 처리할 경우 유용 섬유의 손실이 증가하는 문제가 있다. 이를 해결하기 위하여 여러 단계를 연속적으로 배치하고, 각 단계에서 배출된 리젝트를 다음 단계 클리너의 입구로 다시 송입하는 리버스-캐스케이드(reverse-cascade)형 시스템이 활용된다. 이러한 방식에서는 단계가 진행될수록 리젝트 내 이물질 농도가 점차 증가하며, 동시에 유용 섬유의 회수율은 증가한다. 그 결과, 최종적으로 외부로 배출되는 총 리젝트 비율을 1% 미만으로 낮출 수 있다. 즉 이물질 제거 효율을 유지하면서도 원료 손실을 최소화할 수 있다.

클리너의 현장 설치 방식은 주로 모듈형(modular type)과 캐니스터형(canister type)의 두 가지로 구분된다. 모듈형은 개별 클리너를 다수 배열하여 단계별로 연결하는 방식으로, 유지보수와 교체가 비교적 용이하고 다양한 직경의 클리너를

그림 13-12. 클리너의 다단설치 예와 두 종류의 설치 형태




유연하게 적용할 수 있는 장점이 있다. 반면 캐니스터형은 다수의 소구경 클리너를 하나의 용기 내부에 집적하여 설치하는 구조로, 공간 활용도가 높고 배관이 간결하여 설비 배치 측면에서 유리하다. 그러나 일반적으로 직경이 13 cm 이상인 대구경 클리너는 장착할 수 없다는 한계가 있어, 고농도 또는 특수 용도의 클리너 적용에는 제약이 따른다.

### 2) 스크린의 종류 및 운전 영향인자

종이에 잔류하는 이물질은 제품의 외관과 강도를 저하시킬 뿐만 아니라, 표면 평활도와 인쇄적성에도 부정적인 영향을 미친다. 천연펄프 제조공정의 경우, 미증해분이 스크린에 의해 효과적으로 제거되지 않으면 후속 표백공정에서 약품 소비가 증가하는 문제가 발생한다. 이는 미증해분이 표백 약품의 침투를 방해하거나 불균일한 반응을 유발하기 때문이다. 재생 펄프 제조 공정에서 스크린의 주된 역할은 이물질을 제거하여 종이의 외관을 개선하고 기계적 강도를 향상시키는 데

있다. 그러나 최근에는 단순한 정선 기능을 넘어, 섬유 길이와 특성에 따른 분급(fractionation)을 목적으로 스크린을 활용하는 사례도 증가하고 있다. 한편, 초지기의 헤드박스 전에 설치되는 스크린은 잔존 이물질을 최종적으로 제거하는 동시에, 지료의 분산을 촉진하고 각종 첨가제가 균일하게 혼합되도록 함으로써 지합과 품질의 안정화를 도모하는 중요한 역할을 수행한다.

그림 13-13에 나타난 바와 같이 스크린 입구로 송입된 지료 중 섬유분은 스크린 바스켓을 통과하여 스크린 억셉트를 구성한다. 반면, 개구를 통과하지 못하는 이물질과 조대 입자는 바스켓 외부에 잔류하게 되며, 최종적으로 스크린 리젝트로 배출된다.

스크린 바스켓은 크게 천공형(hole type)과 슬롯형(slot type)으로 구분된다. 천공형 바스켓은 직경 1~2.5 mm의 원형 구멍이 형성된 구조로, 개공률은 약 15~25%에 이른다. 구조적으로 비교적 두껍고 견고하여 기계적 강도가 높다는 특징이 있다. 이러한 특성으로 인해 천공형 바스켓은 주로 조대 스크린(coarse screen)에 적용되며, 후속 단계에서 운전되는 파인 스크린(fine screen)의 바스켓 파손을 방지하는 일종의 보호 장치 역할도 수행한다. 최근에는 기존 천공 직경의 약 1/10 수준인 0.1~0.25 mm의 미세 구멍을 형성한 천공 스크린도 개발·활용되고 있다. 이와 같은 미세 천공 바스켓은 미세분이나 잉크 입자를 분급하는 용도로 사용된다.

슬롯형 바스켓은 폭 0.1~0.5 mm의 길고 좁은 홈을 갖는 구조로, 개공률은 약 3~5% 수준이다. 슬롯 형성 방식에 따라 절삭 홈(milled slot)과 웻지와이어(wedge wire) 홈으로 구분되는데, 최근에는 높은 개공률과 우수한 처리 용량을 갖는 웻지와이어 방식의 바스켓이 주로 활용되고 있다.

스크린이 이물질을 선택적으로 제거하기 위해서는 섬유는 슬롯을 원활히 통과하고, 이물질은 통과하지 못하는 운전 조건이 유지되어야 한다. 그러나 스크린 내부에서 충분한 분산력이 작용하지 못하면 섬유가 좁은 슬롯을 통과하지 못하고 바스켓 표면에 축적되는 현상이 발생하기 쉽다. 이로 인해 처리 용량 감소와 분리 효율 저하가 초래될 수 있다. 이를 방지하기 위해 바스켓 내부에는 압력파(pressure pulse)를 발생시키는 로터가 설치되어 회전한다. 로터가 회전하면 바스켓 표면의 접선 방향 유속이 증가하여 이물질이 슬롯을 통과할 가능성이 낮아지고, 동시에 바스켓 표면에 형성된 섬유 층을 박리시키는 압력파가 발생한다. 이러한 작용은 슬롯의 막힘을 방지하고 스크린의 처리 효율을 향상시키는 효과를 가져온다. 그림

그림 13-13. 스크린의 구조와 운전 원리를 나타내는 모식도

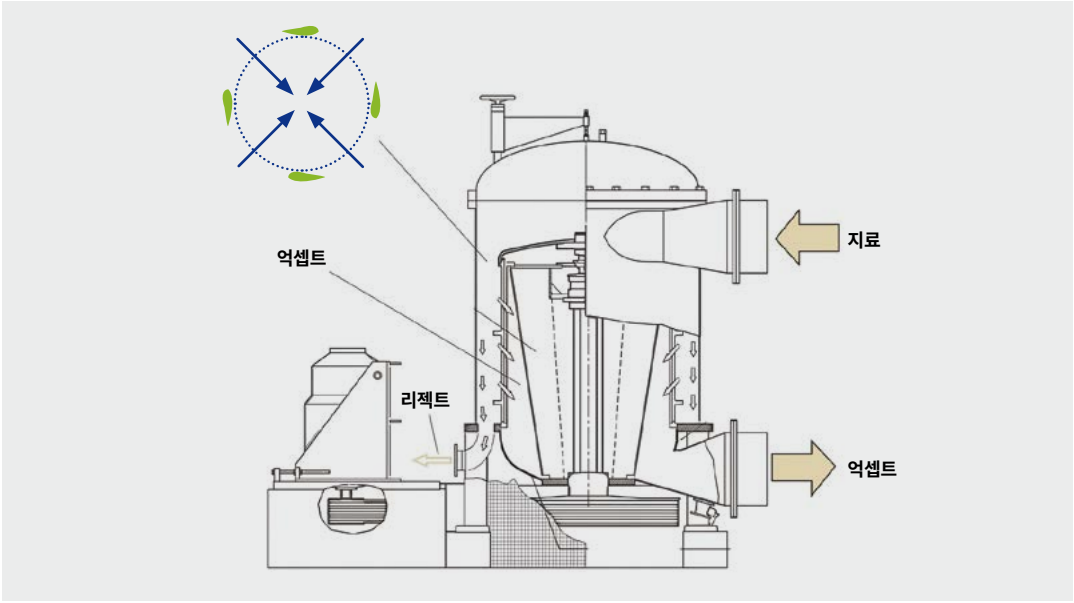
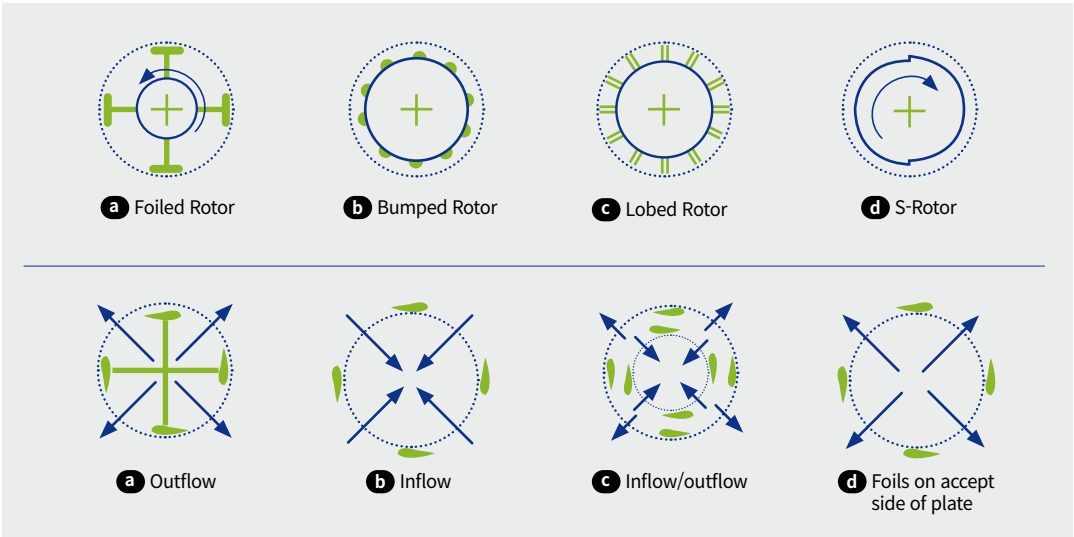


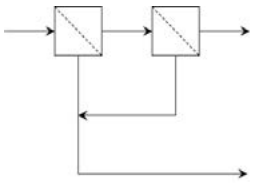
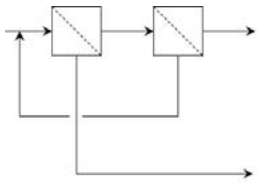
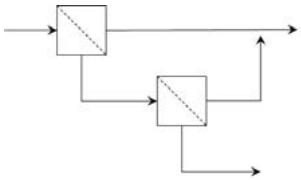
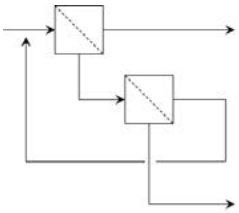

그림 13-14. 로터 및 포일의 종류와 운전방식에 따른 가압 스크린의 분류




13-14에는 다양한 로터의 종류를 제시하였으며, 그중 포일 로터의 운전 방식에 따른 스크린의 분류를 함께 나타내었다.

비행기 날개의 단면 형상을 닮은 포일 로터는 스크린 바스켓 표면을 따라 회전하면서 가압과 감압의 교번 파동을 발생시킨다. 이러한 압력파는 바스켓 표면에 축적된 섬유층을 박리시키고 슬롯의 막힘을 방지하는 역할을 한다. 파동의 강도는

도표 13-05. 스크린 배열의 기본 예 4종

| | Feed Forward | Feed back |
|---|---|---|
| Series |  |  |
| Cascade |  |  |

출처: http://www.fibrelab.ubc.ca/files/2013/01/Topic-5-Mechanical-Pulping-Screening-text.pdf

포일과 바스켓 사이의 간격에 의해 결정되며, 포일을 바스켓에 가까이 배치할수록 더 강한 압력파가 형성된다. 돌출형(bumped) 로터는 구조가 비교적 단순하며, 포일형 로터에 비해 에너지 소비가 적다는 장점이 있다. 한편, 방사형(lobed) 로터와 S형 로터는 보다 강한 압력파를 발생시킬 수 있어, 섬유 농도가 높은 조건에서 운전되는 중농도 스크린에 적합하다.

포일 로터의 운전 방식에 따른 스크린의 특성 차이는 다음과 같다. 원심력형(outflow) 방식에 비해 구심력형(inflow) 방식은 스크린 억셉트의 맥동이 상대적으로 작다. 따라서 지료의 안정적인 유동이 요구되는 헤드박스 전 스크린에 적합하다. 또한 바스켓 평행식(inflow/outflow) 배열은 동일한 설비 공간 내에서 유효 여과 면적을 증가시킬 수 있어 처리 용량 증대에 유리한 장점이 있다.

스크린의 설치 방식은 도표 13-05에 나타낸 바와 같이 네 가지 배열이 가능하다. 일반적으로 직렬(series) 배열은 이물질 제거율이 높지만 수율이 낮다. 반면에 캐스케이드(cascade) 배열은 제거율은 다소 낮은 대신 수율을 향상시킬 수 있다는 장점이 있다. 한편, 피드백(feed back) 배열은 피드포워드(feed forward) 배열에 비해 전체적인 이물질 제거율이 높으나, 리젝트가 다시 1차 스크린으로 환류되므로 1차 스크린의 처리 부담이 증가하는 단점이 있다. 스크린 리젝트가 주로 미해리된 섬유분으로 구성되어 있는 경우에는 피드백 배열을 통해 섬유 회수율을

높이는 것이 효과적일 수 있다. 그러나 리젝트가 섬유 이외의 이물질로 구성된 경우에는, 피드백 배열로 인해 이물질이 반복적으로 순환하면서 점차 미분화되는 문제가 발생할 수 있으므로 주의가 필요하다.

### (2) 디스퍼저 처리

#### 1) 지료의 농축처리

지료를 농축하는 목적은 펄프 슬러리로부터 물을 회수하고 섬유 농도를 높여, 후속 연속 공정이 보다 효율적으로 이루어지도록 하기 위함이다. 농축 공정을 통해 다량의 공정수와 함께 상당한 열량을 회수할 수 있으며, 일부 미반응 약품도 함께 회수할 수 있다. 또한 표백 공정에서 약품과 증기를 투입하기 전에 지료 농도를 높이면 동일한 처리 효과를 얻기 위해 필요한 약품과 증기의 사용량을 절감할 수 있는 장점이 있다. 아울러 도표 13-06에 나타낸 바와 같이, 농축 과정에서 지료를 탈수하는 동안 지료 내에 잔존하는 잉크 입자, 회분 등 미세 이물질이 일부 세척·제거되는 효과도 기대할 수 있다. 다만, 디스퍼저(disperser)를 이용한 분산처리를 목적으로 지료를 농축하는 경우에는 주로 벨트 프레스(belt press)나 스크루 프레스(screw press)가 사용된다. 이 경우 섬유 매트 층이 두껍게 형성되면서 여과 작용에 의해 미세 입자들이 섬유 사이에 포집되어 충분히 세척되지 못하는 한계가 있다. 따라서 농축 목적과 공정 조건에 따라 적절한 장치 선택과 운전 조건 설정이 중요하다.

**도표 13-06.** 농축기별 세척효율

| 종 류 | 투입 농도(%) | 농축 후 농도(%) | 이론상 회분 제거율(%) | 실제 회분 제거율(%) | 섬유 매트 형성 정도 |
|---|---|---|---|---|---|
| 사이드힐 와셔 | 0.8 | 3 | 74 | 60 | 하 |
| 그래비티 데커 | 0.8 | 5 | 85 | 55 | 중 |
| 경사형 시크너 | 3.0 | 10 | 72 | 45 | 상 |
| 스크루프레스 | 4.0 | 28 | 89 | 35 | 상 |
| 벨트 와셔 | 1.0 | 10 | 90 | 75 | 하 |
| 배리오 스프리트 | 0.8 | 10 | 85 | 80 | 하 |

분산 처리를 목적으로 지료를 농축할 경우에는 주로 스크루 프레스(screw press)나 벨트 프레스(belt press)와 같은 고농도 농축기를 사용한다. 저농도 또는 중농도 농축기의 경우에는 중력 탈수 또는 드롭 레그(drop leg)를 이용한 감압 탈수 방식이 주로 적용된다. 고농도 농축기는 스크린을 이용하여 기계적으로 압력을 가함으로써 섬유 매트를 형성하고, 이를 압착하여 물을 물리적으로 짜내는 방식으로 운전된다. 고농도 농축기는 40% 이상의 농도까지 농축이 가능하며, 처리 용량 대비 설치 면적이 작다는 장점이 있다. 또한 지료의 탈수성 변화에 비교적 안정적인 농축 성능을 나타낸다. 그러나 운전 시 전력 소비가 크고, 입구 농도가 일정 수준 이하로 낮아지면 스크린 상에 섬유 매트가 충분히 형성되지 않아 압착 탈수가 원활하게 이루어지지 않으므로 농축 효율이 크게 저하되는 단점이 있다. 이러한 이유로 고농도 농축기의 입구에는 저농도 또는 중농도 농축기를 통해 사전 처리된, 일정 농도(예: 약 4%) 이상의 지료가 공급되도록 공정이 설계된다.

### 2) 디스퍼저를 활용한 분산처리

재생 펄프 내에 잔존하는 이물질의 크기를 미세하게 분산시키고, 섬유 표면에 부착되어 충분히 탈리되지 않은 이물질을 제거하기 위하여 그림 13-15와 같이 분산

**그림 13-15.** 디스퍼저의 운전 모식도

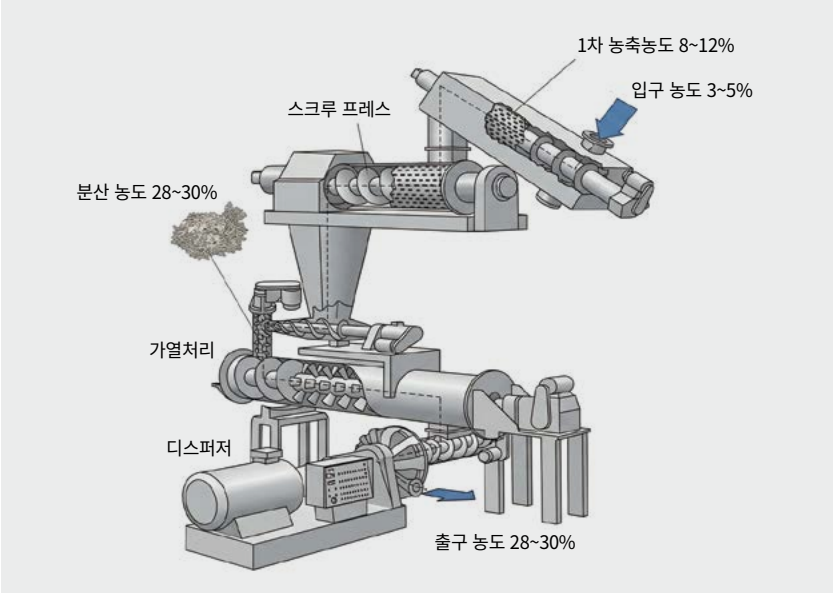


도표 13-07. 재활용 종이 종류별 디스퍼저 처리 목적

| 효과 \ 지종 | 신문지 | SC지 | LWC | 화장지 | 테스트 라이너 | 골심지 | 표면지 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 반점, 점착성이물질 분산 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 왁스 분산 | | | | | ○ | ○ | |
| 코팅 미해리분 분산 | | ○ | ○ | ○ | | | ○ |
| 잉크, 토너 분산 | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ |
| 표백약품의 혼합 | ○ | ○ | ○ | ○ | | | ○ |
| 강도 개선 | | ○ | ○ | ○ | ○ | | |
| 벌크 향상 | | | | ○ | | ○ | |
| 미생물 제어 | | | | ○ | ○ | ○ | ○ |

도표 13-08. 디스퍼저와 니더의 비교

| 특성 | 디스퍼저 | 니더 |
|---|---|---|
| 처리농도 (%) | 30 | 30 |
| 처리온도 (°C) | 95 | 50 |
| 회전속도 (rpm) | 1200~1800 | 100~900 |
| 체류시간 (sec) | 2 | 10~60 |
| 로터 간격 (mm) | 0.5~1.5 | 10~40 |
| TAPPI 반점제거효율 (%) | 75 | 85 |
| 토너 제거율 (%) | 보통 | 양호 |
| 점착성이물질제거율 (%) | 양호 | 보통 |
| 섬유절단 | 발생 | 없음 |
| 미세분 생성 | 발생 | 없음 |

(dispersion) 처리를 실시한다. 여기서 이물질이란 일반적으로 육안으로 식별 가능한 크기, 즉 약 40 μm 이상의 잉크 및 토너 입자, 미해리된 코팅층, 왁스, 역청, 바니시, 핫멜트, 각종 접착제 등을 의미한다. 이러한 물질은 종이 표면에 반점이나 얼룩을 형성하여 외관을 저하시킬 뿐 아니라, 인쇄 적성과 제품 품질에도 부정적인 영향을 미친다. 상기 이물질들은 대체로 온도가 상승할수록 연화되는 특성

을 가지므로, 분산 처리에 앞서 열을 가하는 전처리 공정을 적용하면 이물질의 변형과 분산이 용이해져 처리 효과를 향상시킬 수 있다. 도표 13-07에 나타낸 바와 같이, 재활용 종이의 종류와 최종 제품의 용도에 따라 분산 처리의 목적과 운전 조건은 다양하게 설정된다.

분산 처리 설비로는 주로 디스퍼저(disperser)와 니더(kneader)가 활용되며, 두 장치의 주요 특징은 도표 13-08에 비교하였다. 디스퍼저는 고속으로 회전하는 디스크에 의해 지료에 강한 전단력을 부여함으로써 이물질을 미세하게 분산시키는 방식으로 작동한다. 짧은 체류 시간 동안 집중적인 전단 작용이 이루어지며, 비교적 높은 처리량을 확보할 수 있는 장점이 있다. 반면, 니더는 저속으로 회전하는 로터에 의해 섬유 간 마찰을 유도하여 이물질을 점진적으로 미분화하는 장치이다. 주로 압축과 마찰 작용이 지배적으로 작용하며, 고농도 조건에서 운전되는 경우가 많다. 니더는 디스퍼저에 비해 에너지 소모가 크고 단위 시간당 처리량이 적어 설비 규모와 투자비가 증가하는 단점이 있다. 따라서 탈묵 펄프를 생산하는 재활용 공정에서는 경제성과 처리 용량 측면에서 유리한 디스퍼저가 보다 선호되는 경향이 있다.

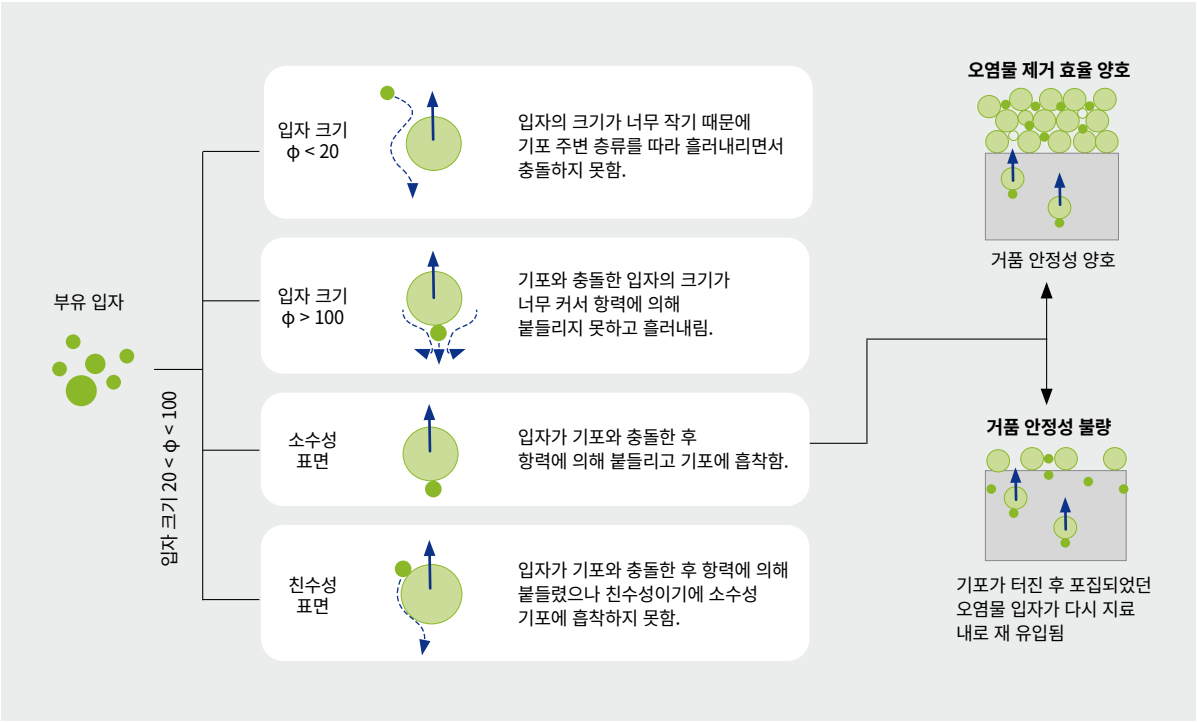
## 4. 탈묵 공정

### (1) 부상부유 탈묵처리

#### 1) 부상부유 탈묵의 원리

부상부유 탈묵(flotation deinking)이란 지료에 공기를 주입하여 형성된 기포에 잉크 및 소수성 이물질을 선택적으로 흡착시켜 제거하는 방법을 말한다. 일반적으로 약 1% 내외로 희석된 지료에 공기를 혼입하면 미세기포가 분산되어 형성된다. 이 기포는 잉크 입자, 소수성 회분 및 기타 미세입자를 표면에 흡착한 후 상승하여 지료 상부에 거품층(froth)을 형성한다. 형성된 거품을 제거함으로써 잉크가 함께 배출되어 지료의 백색도가 향상된다. 또한 초지 공정에서 침적물을 유발할 수 있는 소수성 미세입자도 동시에 제거되는 효과를 얻을 수 있다. 부상부유 탈묵의 효율은 기포가 미세 오염입자를 얼마나 효과적으로 포집하여 표면으로 부

그림 13-16. 부상부유처리 시 지료 내 기포와 부유물의 유동 모델




상시키는가에 의해 결정된다. 따라서 기포의 크기, 체류 시간, 교반 강도 및 약품 조건이 중요한 운전 인자로 작용한다. 부상부유 처리 시 지료 내 기포와 부유물의 거동은 그림 13-16과 같이 유동 모델로 설명할 수 있다.

부상부유 처리에서 기포와 충돌하는 부유물은 입경에 따라 크게 세 가지 범주로 구분할 수 있다. 즉, 20 μm 미만, 20~10 μm, 그리고 100 μm 이상으로 나눌 수 있다. 먼저, 입경이 20 μm보다 작은 미세 입자는 일반적으로 부상부유 처리에 의해 효과적으로 분급되기 어렵다. 입자가 기포에 흡착되기 위해서는 기포와 충돌이 선행되어야 하나, 20 μm 이하의 미세 입자는 기포 표면을 따라 흐르는 유체의 수력학적 영향에 의해 기포와 직접 충돌하지 못하고, 표면을 따라 휘어 흐르면서 지나가게 된다. 반대로, 입경이 100 μm를 초과하는 조대 입자 역시 부상부유 처리에 의해 안정적으로 제거되기 어렵다. 이러한 입자는 기포와의 충돌 자체에는 문제가 없으나, 기포가 상승하는 과정에서 기포 하부에 형성되는 와류(vortex)에 의해 부착된 입자가 탈락·분리될 가능성이 크기 때문이다. 따라서 기포에 의해 효과적으로 분급될 수 있는 입자 크기는 20~100 μm 범위에 해당하는 입자이다. 그러나

이 범위의 입자라 하더라도, 기포에 안정적으로 흡착되기 위해서는 입자의 표면 에너지가 낮아야 한다. 즉, 기포와 같이 소수성 특성을 가져야 한다. 친수성 입자는 표면 에너지가 높아 기포와의 부착력이 약하므로 부상부유 처리로 제거되기 어렵다. 결과적으로, 입경이 20~100 ㎛ 범위에 있으면서 소수성을 띠는 잉크 입자나 일부 소수성 회분 등이 부상부유 처리에 의해 효과적으로 제거될 수 있다. 또한, 소수성 입자가 지료 표면으로 부상하더라도, 기포가 집합하여 형성된 거품(froth)이 충분한 안정성을 갖지 못하면 거품이 붕괴될 때 입자가 다시 지료로 재유입되는 현상이 발생할 수 있다. 따라서 부상부유 처리에서 리젝트로 안정적으로 분급되기 위해서는 거품의 적절한 안정성이 유지되어야 한다.

### 2) 탈묵설비의 구조와 잉크 종류별 탈묵 특성

탈묵 설비는 지료에 공기를 주입하는 방식과 거품을 제거하는 구조에 따라 다양한 형태로 개발되어 왔다. 국내 탈묵 재활용 업계에 가장 널리 보급된 설비는 그림 13-17에 나타낸 Voith-Sulzer사의 EcoCell이다. EcoCell은 일반적으로 1차 부상부유 처리에 5~6개의 세그먼트(segment)를 배치하고, 1차 리젝트를 재처리

그림 13-17. 부상부유기 내 지료와 기포의 부유 거동

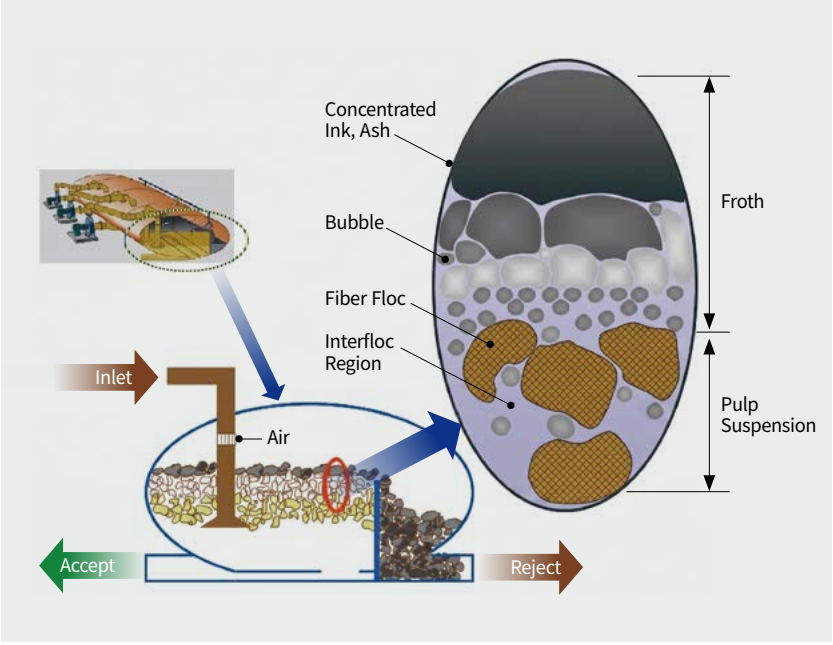


도표 13-09. 인쇄 및 잉크 종류별 탈묵 특성

| 인쇄방식 | 건조 기구 | 탈묵성 |
|---|---|---|
| 오프셋 인쇄<br>신문지 활판인쇄<br>매엽오프셋 인쇄<br>오프셋 가열건조 | 흡수 (및 산화)<br><br>흡수 및 산화<br>흡수, 증발 및 산화 | 경화되지 않은 인쇄물의<br>탈묵성은 우수하나 경화 후<br>잉크의 탈착불량,<br>smeared pulp, 반점 등이 나타남 |
| 로토그라비어 인쇄 | 증발 | 양호, 염료로 인한<br>색상변화가 나타날 수 있음 |
| 플렉소 인쇄 | 증발 | 수용성 잉크로서<br>특히 알칼리 조건일 때 오염 |
| 레이저 프린터 및 복사<br>UV 및 IR 인쇄 | 열, 자외선 등의<br>Radiation에 의한 경화 | 토너의 탈착불량,<br>심각한 반점 오염 |

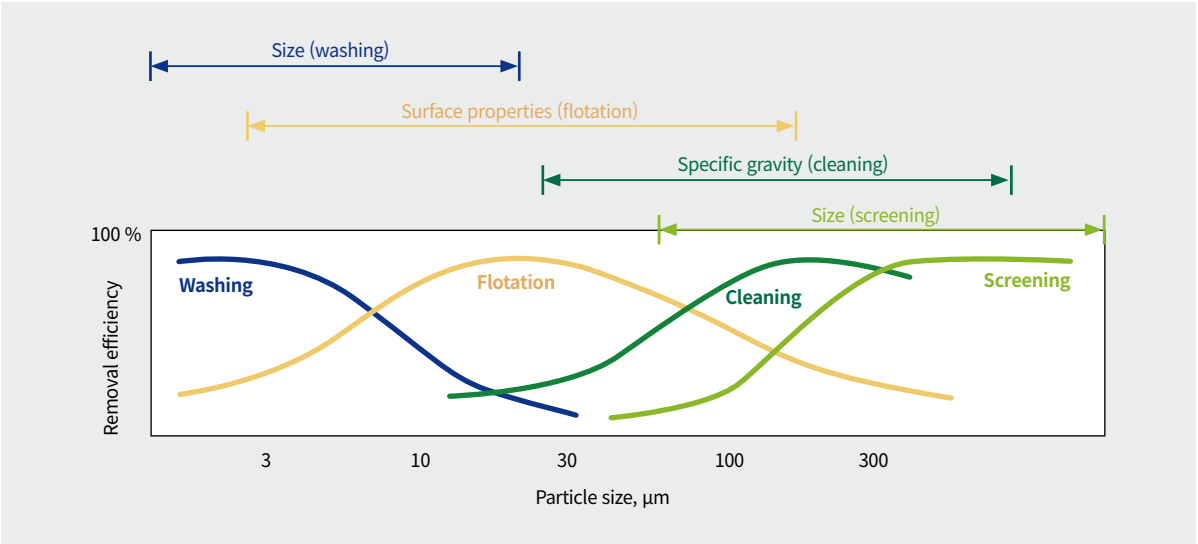
출처: http://www.thedpda.org/sites/thedpda.org/files/Deinking_Difficulties.pdf

하는 2차 부상부유 처리에 2개의 세그먼트를 할당하는 배열을 주로 활용한다. 이러한 다단 구성은 잉크 제거 효율을 높이면서도 섬유 손실을 최소화하기 위한 설계이다.

도표 13-09에는 인쇄 방법과 잉크 종류에 따른 탈묵 특성을 정리하였다. 일반적으로 가장 탈묵이 용이한 인쇄 방식은 음각 인쇄법인 그라비어 인쇄법이다. 만약, 붉은색 염료인 Rhodamine이 용해되어 섬유에 염착되는 문제만 없다면, 비교적 양질의 탈묵 펄프를 회수할 수 있다. 이에 비해 평판 인쇄 방식인 오프셋인쇄물은 하절기에 잉크가 경화(hardening)되어 섬유 표면으로부터의 탈착이 어려워지는 경향이 있다. 이로 인해 여름철 탈묵 공정의 효율이 저하되는 주요 원인으로 작용한다. 또한, 장시간 운송이 필요한 수입 폐지의 경우에도 이송 과정에서 잉크가 경화되어 탈묵 불량 문제가 발생할 수 있다.

유럽의 영국과 이탈리아 일부 신문사, 그리고 북미 서부 지역의 일부 신문사에서는 신문 인쇄에 오프셋 방식 대신 플렉소 인쇄를 적용하고 있다. 플렉소 인쇄에 사용되는 잉크는 알칼리 조건에서 분자 수준으로 미세 분산되는 특성을 가지므로, 일반적인 부상부유 탈묵 공정으로는 효과적으로 제거되기 어렵다. 따라서 기존의 알칼리 탈묵 공정을 적용하는 오프셋 인쇄 폐지와 혼합될 경우, 미세 분산된 잉크가 잔존하여 지료의 백색도를 현저히 저하시킬 수 있다. 또한 UV 경화잉크의 경우에도 경화된 잉크막이 섬유 표면에 강하게 부착되어 탈착이 어렵다. 그 결과 탈묵 펄프의 백색도 저하와 함께 반점 오염을 유발하는 문제가 발생한다.

그림 13-18. 잉크 입자의 크기에 따른 제어법 및 그 효율




## (2) 농축, 세척 처리

### 1) 세척 탈묵의 원리

그림 13-18에 나타난 바와 같이, 잉크 입자의 크기가 10 ㎛ 이하인 경우에는 부상부유 처리로 제거하기 어렵다. 이는 미세한 잉크 입자가 기포 표면을 따라 흐르는 유체의 수력학적 영향에 의해 기포와 충돌하지 못하고, 기포 표면을 따라 휘어 흐르면서 지나가기 때문이다. 그 결과 기포에 입자가 흡착되지 못하므로, 부상부유 방식으로는 효과적인 제거가 이루어지지 않는다. 이와 같은 미세입자의 제거에는 부상부유 대신 세척법(washing process)이 활용된다. 세척법은 희석된 지료로부터 물을 제거하는 과정에서 섬유 매트가 두껍게 형성되지 않도록 제어하면서, 물과 함께 미세입자를 씻어내는 방식이다.

### 2) 세척 탈묵의 특성

세척법은 기존의 부상부유법과 비교할 때 도표 13-10에 나타낸 바와 같은 장·단점을 가진다. 세척법으로 효과적인 탈묵을 달성하기 위해서는 잉크가 물과의 친

도표 13-10. 부상부유법과 세척법의 처리 효율 비교

| | 부상부유법 | 세척법 |
|---|---|---|
| 탈묵제의 영향 | 상 | 하 |
| 용수 사용량 | 하 | 상 |
| 수율 | 상 | 하 |
| 회분 제거율 | 하 | 상 |
| 인장강도 | 하 | 상 |
| 불투명도 | 상 | 하 |

화력이 높아, 물과 함께 이동할 수 있어야 한다. 즉, 잉크 입자가 친수성 특성을 띠어야 물과 함께 세척수로 배출될 수 있다. 반대로 잉크가 물과의 친화력이 낮고 소수성 특성을 가질 경우에는 부상부유법이 유리하다. 이는 기포 내부의 공기가 물에 대한 용해도가 낮은 산소와 질소로 구성되어 있으며, 상대적으로 소수성을 띠기 때문이다. 물을 기피하는 잉크는 공기와의 친화력이 높아 기포에 흡착되기 쉬우므로, 부상부유 공정에 의해 효과적으로 제거될 수 있다. 따라서 세척법에 사용되는 탈묵제는 잉크 표면을 친수화하여 물과의 상호작용을 증가시키는 약품이어야 한다. 세척법은 다량의 용수를 필요로 하며, 공정 중 섬유 및 회분의 손실이 발생하여 수율이 낮아지는 단점이 있다. 또한 회분이 제거됨에 따라 종이의 불투명도가 낮아질 수 있다. 그러나 회분이 적은 만큼 섬유 간 결합이 상대적으로 강화되어 종이 강도가 우수하며, 미세 오염물이 효과적으로 제거되어 청결도가 높다는 장점도 있다.

## 5. 탈묵펄프의 표백

### (1) 탈묵 펄프의 표백 원리와 산화표백

표백(bleaching)이란 펄프 내에 존재하는 유색 물질을 화학적으로 분해하거나 변형하여 백색도를 향상시키는 공정을 말한다. 재생 펄프에는 다양한 종류의 섬유가 일정하지 않은 비율로 혼합되어 있으며, 특히 기계펄프 등 고수율 펄프가 상당량 포함되어 있는 경우가 많다. 이러한 고수율 펄프에는 리그닌이 다량 잔존하

**도표 13-11.** 표백제의 표백처리 가능 관능기의 비교

| | C=C | C=O | N=N | C=N |
|---|---|---|---|---|
| $H_2O_2$(P) | X | ○ | X | X |
| $Na_2S_2O_4$(Y) | X | ○ (part) | ○ (part) | X |
| FAS | X | ○ (part) | ○ | ○ |
| $O_2$(O) | X (Possible via ϕ-OH) | X | X | X |
| $O_3$(Z) | ○ | X | ○ | ○ |
| $ClO_2$(D) | ○ (part) | X | X | X |

므로, 이를 천연 화학펄프와 같이 완전히 제거하려 할 경우 심각한 수율 저하가 발생하게 된다. 따라서 탈묵 펄프의 표백은 대부분의 잉크가 이미 제거되었다는 전제하에 수행되며, 천연 화학펄프의 표백과 달리 리그닌의 완전한 제거가 목적이 아니다. 대신, 리그닌 구조 내 발색단(chromophore)을 선택적으로 파괴하거나 변형시켜 색을 옅게 하는 데 초점을 둔다.

유기물이 색을 띠는 이유는 해당 물질에 가시광선 영역의 빛을 흡수하는 구조적 성분이 포함되어 있기 때문이다. 두 쌍 이상의 이중결합이 단일결합을 사이에 두고 연속적으로 연결된 구조를 켤레이중결합(conjugated double bond) 또는 짝이중결합이라 한다. 이러한 켤레 구조에서는 π 전자가 분자 전체에 걸쳐 비편재화(delocalization)되어 존재하게 되며, 켤레 이중결합의 수가 많을수록 더 긴 파장(장파장)의 빛을 흡수하게 된다. 일반적으로 가시광선 영역의 빛을 흡수하기 위해서는 켤레를 이루는 C=C 결합이 약 7~8개 이상 켤레이중결합 형태로 존재해야 한다. 그러나 C=O(carbonyl group) 또는 N=N(azo group)과 같은 발색단을 포함하는 경우에는, 켤레 결합의 수가 상대적으로 적더라도 가시광선 영역의 빛을 흡수할 수 있다. 따라서 유기 화합물의 색은 분자 내 켤레 구조의 길이와 발색단의 종류에 의해 결정되며, 표백 공정에서는 이러한 발색 구조를 화학적으로 파괴하거나 변형함으로써 색을 제거하게 된다.

예를 들어, 도표 13-11에 나타난 바와 같이 과산화수소는 리그닌으로부터 유래한 발색단 중 C=O를 산화적으로 분해하는 효과가 있다. 이는 주로 리그닌 구조 내의

발색단을 제어하여 밝기를 향상시키는 방식이다. 한편 $Na_2S_2O_4$(sodium dithionite)는 환원 표백제로서 C=O뿐만 아니라 일부 N=N(아조기) 결합까지 환원시킬 수 있다. 또한 formamidine sulfinic acid(FAS)는 C=N 결합까지 환원·분해할 수 있는 특성을 가진다. N=N 및 C=N 결합은 주로 합성 염료에 포함된 관능기로, 이들 결합의 존재는 펄프의 백색도를 저하시키는 주요 원인이 된다. 따라서 리그닌 유래 발색단의 제어에 주로 작용하는 과산화수소와 달리, $Na_2S_2O_4$ 및 FAS와 같은 환원 표백제는 염료로 인한 백색도 저하를 개선하는 데에도 효과적이다.

전술한 과산화수소, $Na_2S_2O_4$, 또는 FAS와는 달리, C=C 결합을 직접적으로 산화·절단하는 오존이나 이산화염소는 리그닌뿐만 아니라 기타 펄프 추출 성분까지 산화·용해시킬 수 있다. 이로 인해 표백 효과는 크지만, 동시에 펄프의 수율 저하를 유발할 수 있는 단점이 있다. 한편, 과산화수소는 알칼리 조건에서 수산화나트륨과 반응하여 과수산이온(perhydroxyl ion, $HOO^-$)을 형성한다. 이 $HOO^-$ 이온은 리그닌의 카보닐기(C=O)와 반응하여 발색단을 파괴함으로써 표백 효과를 나타낸다.

$$H_2O_2 + NaOH \leftrightarrow HOO^- + H_2O$$

이와 같이 $HOO^-$ 이온이 생성되는 경로는 표백에 유효한 반응이다. 그러나 과산화수소는 다음과 같은 경쟁 반응에 의해 분해될 수도 있다.

$$H_2O_2 \leftrightarrow \frac{1}{2}\, O_2 + H_2O \qquad H_2O_2 \rightarrow 2\cdot OH$$

위와 같은 반응에서는 유효한 $HOO^-$ 이온이 충분히 형성되지 못하고, 산소 발생 또는 하이드록실 라디칼(·OH) 생성으로 이어진다. 특히 ·OH 라디칼은 반응성이 매우 높아 선택성이 낮은 산화를 유발할 수 있으며, 이는 섬유 손상이나 과도한 약품 소비로 이어질 수 있다.

과산화수소의 경쟁 분해 반응을 촉진하는 주요 인자로는 금속 이온(Fe, Mn, Cu, Al), 카탈라제(catalase), 그리고 고온 조건을 들 수 있다. 이 가운데 카탈라제는 공정수 내 미생물로부터 유래하는 효소로, 과산화수소를 물과 산소로 분해하는 작용을 한다. 따라서 이산화염소 또는 바이오사이드를 적절히 사용하여 미생물의 활성을 억제하면 과산화수소의 불필요한 분해를 줄일 수 있다.

또한 철, 망간, 구리 등 전이금속 이온은 과산화수소의 분해를 촉진하는 촉매로 작

용하므로, 금속 이온 봉쇄제(chelating agent)의 사용이 필수적이다. 규산소다($Na_2SiO_3$) 역시 일정 부분 금속 이온을 제어하는 효과가 있으나, 스케일 형성이나 초지용구의 오염을 고려할 때 전용 금속 이온 봉쇄제의 활용이 보다 바람직하다.

과산화수소 표백 효율은 알칼리도의 영향도 크게 받는다. 가성소다(NaOH)와 규산소다의 합으로 표현되는 전체 알칼리도(TA)는 TA = %NaOH + 0.115% $Na_2SiO_3$와 같다. 알칼리도가 너무 낮으면 과수산이온($HOO^-$)의 생성이 감소하여 표백 효율이 저하된다. 반대로 알칼리도가 과도하게 높으면 기계펄프에 포함된 리그닌이 알칼리 조건에서 산화되어 황변(yellowing)을 유발할 수 있다.

표백 온도 역시 중요한 인자이다. 온도가 상승하면 화학 반응 속도는 증가하나, 동시에 과산화수소의 분해 반응($H_2O_2 \rightarrow 2 \cdot OH$)과 황변 반응도 촉진된다. 따라서 과산화수소를 이용한 표백 공정에서는 pH를 일반적으로 9~11 범위로 조절한다. 신문지 재활용 공정과 같이 고수율 펄프의 함량이 높은 경우에는 과도한 pH 상승이나 고온 조건을 피하는 것이 중요하다. 반면, 화장지 재활용 공정처럼 고수율 펄프의 비율이 낮은 경우에는 비교적 높은 온도에서 표백을 실시하는 것이 효율적일 수 있다.

과산화수소를 이용한 알칼리 표백 공정에서는 산화 반응에 의해 생성되는 용해성 유기물 및 교질 입자가 증가하여 공정수의 COD(Chemical Oxygen Demand)를 상승시키는 문제가 발생할 수 있다. 이러한 문제를 개선하기 위한 방안으로 중성 표백(neutral bleaching)이 제안되었다. 중성 표백에서는 기존에 사용되던 가성소다 대신 $MgCO_3$, $Mg(OH)_2$ 혹은 $Ca(OH)_2$ 등을 알칼리제로 활용한다. 이러한 조건에서 동일한 백색도 향상을 달성하면서도 COD를 약 20% 절감할 수 있는 것으로 보고되고 있다. 또 다른 방법으로는 가성소다 사용량을 줄이는 동시에, 표준 규산소다($SiO_2/Na_2O$: 3.2-3.7)를 알칼리 규산소다 ($SiO_2/Na_2O$: 1.75)로 대체하는 방안이 제안되어 현장에서 적용·검증된 바 있다. 다만, 알칼리 규산소다는 잉크 입자의 재흡착(redeposition)을 방지하는 기능이 충분하지 않다는 한계가 있다.

과산화수소는 일반적으로 펄퍼 단계 또는 1차 부상부유 처리 후의 표백 타워(bleaching tower)에 적용된다. 펄퍼에 과산화수소를 투입하는 경우, 고수율 펄프가 알칼리 조건에서 해리되면서 발생할 수 있는 황변을 방지하기 위해 비교적 낮은 농도와 온도 조건에서 운전하게 된다. 그러나 이러한 조건에서는 표백 효과가 제한적이라는 단점이 있다. 표백 타워에서의 과산화수소 표백은 고수율 섬유의 백색도를 개선하는 데 효과적이지만, 염료나 특정 발색단에 의해 나타나는 색

상을 완전히 제거하는 데에는 한계가 있다. 따라서 색상 제거가 중요한 경우에는 환원 표백제의 병용이 요구된다. 다만, 미표백 화학펄프가 일부 혼입된 화이트 레저의 경우에는 갈색 기조를 제어하기 위하여 고온 조건의 과산화수소 표백이 적용되기도 한다. 일반적으로 과산화수소 표백은 지료 농도가 높을수록 반응 속도가 증가하므로, 고농도 조건에서 운전되는 디스퍼저에 투입하는 경우가 많다. 이때 과산화수소는 잉크의 탈착을 촉진하고, 분산된 잉크의 재흡착을 방지하는 효과를 동시에 기대할 수 있다.

도표 13-12에는 탈묵 펄프의 과산화수소 표백 조건을 정리하였다. 과산화수소는 대표적인 산화 표백제로서, 재활용 제지 공정에서 사용되는 조건에서는 리그닌 유도체를 산화·탈색함으로써 펄프의 백도를 향상시킨다. 그러나 과산화수소는 알칼리 조건과 금속 이온의 존재 하에서 쉽게 분해되므로, 표백 효율을 확보하고 섬유의 산화 손상을 방지하기 위해서는 반응 조건의 정밀한 제어가 요구된다. 과산화수소의 투입량은 일반적으로 0.5~3% 범위로 설정된다. 우리나라의 탈묵 펄프는 고수율 펄프의 함량이 비교적 낮으므로 과도한 약품 투입이 필요하지 않다. 과량 투입 시 과산화수소의 자가 분해가 증가하고 섬유의 산화 열화가 유발될 수 있으므로, 목표 백색도를 달성할 수 있는 최소 투입량을 선정하는 것이 바람직하다. 과산화수소의 표백 반응은 알칼리 조건에서 활성화되므로 수산화나트륨(NaOH)을 첨가하여 pH를 9~11 범위로 유지한다. 이 조건에서 과산화수소는 과수산이온($HOO^-$) 형태로 존재하며, 이 이온이 실제 표백 반응의 주요 활성종(active species)으로 작용한다. pH가 낮으면 $HOO^-$의 생성이 충분하지 않아 표백 효율

**도표 13-12.** 탈묵펄프의 과산화수소수 표백조건

| | | |
|---|---|---|
| Peroxide dosage | | 0.5~3% |
| NaOH dosage | | 0.5~2% |
| Stabilizing agents | Silicate | 1~3% |
| | DTPA | 0.1~0.3% |
| Pulp consistency | MC | 10~15% |
| | HC | 30% |
| Temperature | | 60~90 °C<br>(100 °C for woodfree grade) |
| Reaction time | | ½ to 3 hours |
| pH range | | 9~11 |
| Residual peroxide | | 15~20% |

이 저하되며, 반대로 pH가 과도하게 높으면 과산화수소의 급격한 분해가 촉진된다. 따라서 적정 pH 범위를 유지하는 것이 표백 공정의 핵심 관리 요소이다.

탈묵 펄프에는 철, 구리, 망간 등 전이금속 이온이 잔존하는 경우가 많으며, 이들 금속 이온은 과산화수소의 분해를 촉진하는 촉매로 작용한다. 특히 이러한 금속은 과산화수소로부터 하이드록실 라디칼(·OH)의 생성을 유도하여 약품의 비선택적 분해와 섬유 손상을 초래할 수 있다. 이를 억제하기 위하여 DTPA(diethylenetriaminepentaacetic acid)와 같은 킬레이트제(chelant)가 첨가되어 금속 이온을 착화합물 형태로 안정화시킴으로써 촉매 활성을 억제한다. 또한 규산나트륨은 pH 완충 작용을 수행하는 동시에, 과산화수소의 안정화 및 섬유 표면 보호 기능을 제공한다. 규산나트륨은 금속 이온을 부분적으로 제어하고, 섬유 표면에 보호층을 형성하여 과도한 산화를 방지하는 역할도 한다. 이와 같은 안정화제의 사용은 과산화수소의 유효 반응 시간을 연장시켜 약품 이용 효율을 향상시키며, 동일한 약품 투입량으로도 보다 안정적인 표백 효과를 얻을 수 있도록 한다.

표백 처리 시 펄프 농도는 약품 반응 효율과 혼합 특성을 고려하여 중농도(10~15%) 또는 고농도(약 30%) 조건에서 운전된다. 고농도 조건에서는 반응계 내 자유 수분량이 감소하여 과산화수소의 유효 농도가 상대적으로 증가하고, 이에 따라 표백 효율이 향상된다. 표백 온도는 일반적으로 60~90 °C 범위에서 유지되며, 이는 반응 속도의 증가와 과산화수소의 안정성 사이의 균형을 고려한 조건이다. 온도가 상승하면 반응은 가속화되지만, 동시에 과산화수소의 분해와 섬유 손상 가능성도 증가하므로 적정 범위의 유지가 중요하다. 반응 시간은 보통 0.5~3시간으로 설정된다. 초기에는 급속 표백이 진행되고, 이후에는 잔존 착색 물질의 제거가 점진적으로 이루어진다. 반응 종료 시 일정량의 과산화수소가 잔존하도록 관리하는 것은 표백의 균일성을 유지하고 재퇴색(reversion)을 방지하는 데 기여하며, 동시에 공정 제어의 안정성 지표로 활용된다.

결론적으로, 탈묵 펄프의 과산화수소 표백 조건은 표백 활성종의 효율적 생성, 과산화수소의 안정화, 섬유 손상 억제, 그리고 약품 사용의 경제성을 동시에 만족하도록 설정되어야 한다. 이러한 조건의 최적화는 재생 섬유 기반의 고품질 인쇄·포장용지를 생산하기 위한 핵심 공정 기술이라 할 수 있다.

미표백 펄프가 일부 혼입된 화이트 레저의 경우, 이에 기인한 갈색 기조를 제어하기 위하여 산소 표백을 병용하는 경우가 있다. 다만, 이러한 공정은 고수율 펄프의 함량이 약 30%를 초과하지 않는 조건에서 적용하는 것이 바람직하다. 고수율

펄프의 비율이 과도하게 높을 경우, 산소에 의한 리그닌 산화가 과도하게 진행되어 수율 저하 및 황변 가능성이 증가할 수 있기 때문이다. 산소 표백을 병용하는 경우, 과산화수소의 투입량은 기존과 유사한 수준으로 유지하면서 산소 압력을 4~6 bar로 가압하고, 온도는 80~110 °C 범위로 설정한다. 반응 시간은 일반적으로 30~60분으로 운전된다.

### (2) 환원표백제의 특성 표백조건

도표 13-13에는 산화 및 환원 표백 약품 별 기능과 장단점을 정리하였다.
환원 표백제는 산화 표백제와 달리 아조기(azo group, N=N)를 환원시키는 특성을 가진다. 아조기는 대부분의 합성 염료에 포함된 대표적인 발색단이므로, 환원 표백제는 색상을 제거하는 데 있어 산화 표백제보다 효과적인 경우가 많다. 대표적인 환원 표백제로는 sodium hydrosulfite(SHS, $Na_2S_2O_4$)와 formamidine sulfinic acid(FAS)가 있다. 그러나 두 약품 모두 황을 포함하는 화합물이므로, 혐기성 소화조를 수처리 설비로 운영하는 제지 공정에서는 사용에 제약이 따른다. 이는 공정수에 존재하는 황 화합물을 환원하는 황산염 환원균과 메탄 생성균(methanogen) 간의 경쟁으로 인해, 메탄 생성 효율이 저하되고 혐기성 소화조의 처리 효율이 떨어질 수 있기 때문이다. SHS는 다음과 같은 환원 반응을 통해 펄프를 표백하며, 이때 dithionite 음이온($S_2O_4^{2-}$)이 실제 표백 반응의 주 활성종으로 작용한다. 이 음이온은 리그닌 유래 카보닐기 및 염료의 아조기를 환원시켜 발색 구조를 파괴함으로써 백색도를 향상시킨다.

**도표 13-13.** 표백 약품별 기능 및 장단점

| 표백제 | | 약칭 | 기능 | 펄프종류 | 장점 | 단점 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 산화제 | 하이포아염소산염 | H | 리그닌 산화, 탈색, 가용화 | 화학펄프 | 제조, 이용이 쉽고 가격이 저렴함 | 낮은 펄프 강도, 클로로포름 생성 |
| | 과산화수소 | P | 리그닌 산화 및 탈색 | C, 기계펄프 | 이용이 편리하고 설비 단가가 저렴함 | 높은 약품 단가, 낮은 표백효율 및 펄프강도, 입자 제거가 어려움 |
| 환원제 | SHS | Y | 리그닌 환원 및 탈색 | 기계펄프 | 이용이 편리하고 설비 단가가 저렴함, 재생섬유에 적합 | 급속한 분해, 제한적인 백색도 개선 |
| | FAS | | 리그닌환원 및 탈색 | | 과수표백된 재생섬유에 적합 | 용액상태로 저장불가능 분해 시 ammonia sulfite와 이산화황 생성 |

$$Na_2S_2O_4 + H_2O + pulp \rightarrow bleached\ pulp + Na_2HSO_3 + H_2O$$

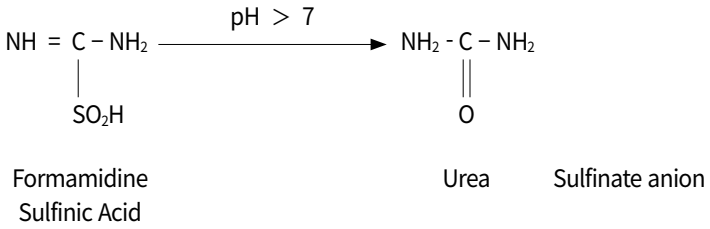
SHS의 표백작용을 방해하는 부반응으로 산소에 의한 다음과 같은 bisulfite 혹은 bisulfate의 형성을 들 수 있다.

$$Na_2S_2O_4 + H_2O + O_2 \rightarrow Na_2HSO_3 + NaHSO_4\ (bisulfite\ and\ bisulfate)$$

따라서 환원표백제의 경우 공기와의 접촉을 최소화하여야 한다.
SHS가 물과 반응하는 경우 설비의 부식을 유발하는 thiosulfate를 형성하기에 이를 최소화하기 위하여 SHS의 과량 적용을 피하고 펄프와의 혼합을 균일하게 하며 pH를 높이는 조건을 조성하여야 한다.

$$Na_2S_2O_4 + H_2O \rightarrow Na_2S_2O_3 + 2\ NaHSO_3$$

Sodium hydrosulfite(SHS)의 운전 조건은 처리 농도에 따라 달라진다. 먼저, 약 3%의 저농도 조건에서는 60~80 °C의 저농도 표백 타워를 활용하며, 반응 시간은 60~120분으로 설정된다. 이때 SHS의 투입량은 일반적으로 0.2~2% 범위에서 조절된다. 중농도(10~15%) 조건에서는 80~100 °C의 중농도 표백 타워를 사용하며, 반응 시간은 약 30분으로 단축된다. SHS의 투입 수준은 역시 0.2~2% 범위를 기본으로 한다. 가장 일반적으로 활용되는 25~30%의 고농도 조건에서는 80~100 °C로 운전되는 디스퍼저를 이용하며, 반응 시간은 약 15분으로 더욱 짧다. 이 경우에도 SHS 투입량은 0.2~2% 범위에서 설정된다. 이와 같이 농도가 높아질수록 반응 속도가 증가하므로 반응 시간은 단축되며, 설비 형태 또한 저농도 타워에서 디스퍼저로 전환된다. 따라서 목표 백색도, 설비 구성 및 공정 조건에 따라 적절한 농도와 반응 조건을 선택하는 것이 중요하다.
FAS는 SHS보다 산소에 덜 민감하며 표백효율이 2배 이상 높은 장점이 있지만 가격이 비싸고 반응 온도를 높여줘야 하는 단점도 있다.




FAS는 일반적으로 1~3% 수준으로 투입되며, 이때 가성소다는 FAS 투입량의 약 1/2 수준으로 조정된다. 표백 반응의 초기 pH는 8~11 범위에서 설정되며, 반응이 진행됨에 따라 pH는 점차 감소하여 말기에는 7~8 수준으로 중화된다. 처리 조건은 펄프 농도 15~30%, 온도 80~120 °C 범위에서 15~90분간 반응시키는 것이 일반적이다. 이와 같은 환원 표백은 단독으로 적용되기보다는 산화 표백과 조합된 다단계 표백 공정의 일부로 구성되는 경우가 많다. 2단 표백 구성에서는 일반적으로 산화 표백 후 환원 표백을 수행하는 순서가, 그 역순보다 더 효과적인 것으로 알려져 있다. 이는 산화 표백으로 리그닌 유래 발색단을 우선 제거한 후, 환원 표백을 통해 잔존 염료성 발색단을 선택적으로 제어하기 위함이다. 이와 같이 다단계로 표백된 탈묵 펄프는 고급 신문용지, 잡지용지, 화장지류 및 마켓 DIP(deinked pulp) 제품의 제조에 활용된다.

## 6. 결론

탈묵 펄프의 제조는 폐지 자원의 선별로부터 해리, 정선, 탈묵, 분산, 세척 및 표백에 이르는 일련의 물리·화학적 공정을 통해 잉크와 각종 이물질을 제거하고 재생 섬유의 품질을 회복하는 과정이다. 이들 공정은 각각 독립적으로 기능하는 것이 아니라, 상호 유기적으로 연계되어 작동한다. 예를 들어 해리 단계에서는 잉크의 효과적인 탈착과 동시에 이물질의 과도한 미분화를 방지하는 것이 중요하다. 이어지는 정선 및 분산 단계에서는 선택적 분리를 통해 이물질을 제거하면서 섬유 손실을 최소화해야 한다. 또한 부상부유 및 세척 공정은 잉크 입자와 미세오염 물질을 효율적으로 제거하는 핵심 단계이며, 최종적으로 표백공정에서는 발색단을 화학적으로 파괴하여 목표 백색도를 달성한다.

특히 탈묵 공정의 성패는 잉크 입자와 미세 오염물질의 크기 및 표면 특성을 적절히 제어하여, 제거가 가능한 상태로 유도하는 데 달려 있다. 이를 위해서는 해리 조건의 설정, 탈묵 약품의 조성, 기포의 크기와 분포, 세척 조건, 그리고 표백반응 환경의 최적화가 필수적이다. 해리 단계에서는 잉크의 탈착을 촉진하되 과도한 미분화를 방지해야 하며, 부상부유 단계에서는 기포와 잉크 입자의 충돌 및 부착 확률을 극대화할 수 있는 조건을 유지해야 한다. 세척공정에서는 미세입자가 효율적으로 배출되도록 물의 흐름과 공정 조건(hydrodynamic conditions)을 정밀하게 제어해야 하며, 표백 단계에서는 발색단의 선택적 파괴와 섬유 손상 억제 사이의 균형이 요구된다. 또한 과도한 전단력이나 약품 사용은 잉크 및 점착성 이물질의 미분화를 촉진하여 재흡착과 품질 저하를 초래할 수 있다. 따라서 각 단계의 운전 조건은 품질 향상과 수율 유지, 에너지 절감, 그리고 설비 보호를 동시에 고려하여 종합적으로 설정되어야 한다.

결국 탈묵펄프 제조 기술은 재활용 자원을 효율적으로 활용함으로써 천연 섬유 사용을 절감하고, 고품질 재생지 생산과 환경 부하 저감을 동시에 달성하는 핵심 제지 공정 기술이라 할 수 있다. 재활용 섬유의 활용 확대는 자원 순환과 탄소 배출 저감 측면에서 중요한 의미를 가지며, 탈묵 공정의 고도화는 재생지의 품질을 천연 펄프 기반 제품과 동등한 수준으로 향상시키는 데 기여한다.

향후에는 잉크 종류의 다양화, 점착성 이물질의 증가, 고백색도 제품에 대한 요구 확대 등 새로운 도전에 대응하여 탈묵 효율을 더욱 향상시키고 공정 안정성을 확보하는 방향으로 지속적인 기술 발전이 요구된다. 이를 위해 공정 통합 제어, 약품 최적화, 에너지 절감 기술 및 환경 친화적 설비 개발이 병행되어야 할 것이다.

## 참고문헌

[1] SPS-KPRA 1501-6237 재활용제지 원료, 3 page
[2] HYPERLINK "http//www.engineeringtoolbox.com/water-dynamic-kinematic-viscosity-d_596.html"http://www.engineeringtoolbox.com/water-dynamic-kinematic-viscosity-d_596.html, 7 page
[3] HYPERLINK "http//www.fibrelab.ubc.ca/files/2013/01/Topic-5-Mechanical-Pulping-Screening-text.pdf"http://www.fibrelab.ubc.ca/files/2013/01/Topic-5-Mechanical-Pulping-Screening-text.pdf, 22page
[4] HYPERLINK "http//www.thedpda.org/sites/thedpda.org/files/Deinking_Difficulties.pdf"http://www.thedpda.org/sites/thedpda.org/files/Deinking_Difficulties.pdf, 28 page
[5] HYPERLINK "http//www4.ncsu.edu/~richardv/documents/Presentation108HOdetailedpart2.pdf"http://www4.ncsu.edu/~richardv/documents/Presentation108HOdetailedpart2.pdf, 30 page
[6] KS M ISO 287의 5.1






**권 수 진** 경상국립대학교 조교수

**2025 – 현재** 경상국립대학교 환경재료과학과 조교수

**2025 – 현재** 한국펄프종이공학회 편집부위원장

**2024 – 2025** 서울대학교 농림생물자원학부 박사후연구원

**2023 – 2024** Postdoctoral Research Scholar, Department of Chemical and Biomolecular Engineering, University of Delaware

**2022 – 2023** Postdoctoral Research Scholar, Department of Forest Biomaterials, North Carolina State University

soojin@gnu.ac.kr

# 14

# 종이의 친환경성

## 1. 서론: 종이는 왜 친환경 소재인가?

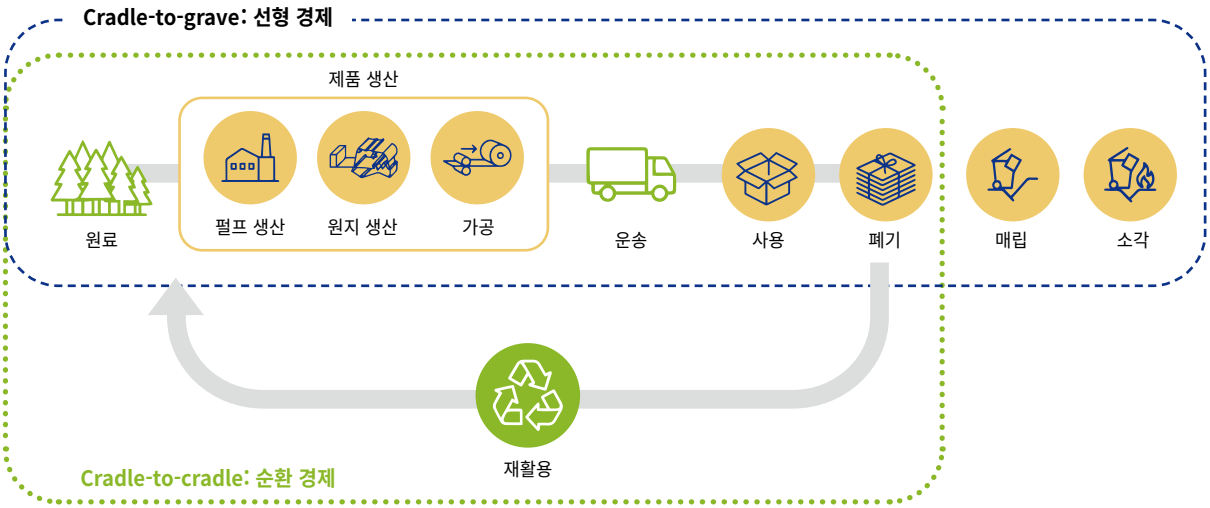
종이는 인류와 수천 년의 역사를 함께해 온 기록 매체이자, 오늘날에도 생활 전반에서 널리 활용되는 필수 소재이다. 그러나 종이에 대한 인식은 항상 긍정적이지만은 않다. 일부 소비자들은 종이를 '나무를 베어 만든다'라는 단순한 이미지로 바라보며, 종이 소비가 곧 산림훼손과 환경파괴로 이어진다고 생각한다. 종이 생산 과정에서 토지, 목재, 물, 에너지 등의 자원이 소요되고 제조 과정에서 다양한 환경부하가 발생한다는 점에서 이러한 우려는 전적으로 근거 없는 것은 아니다. 하지만 이러한 시각은 종이의 생애주기적 특징과 순환 가능성을 충분히 반영하지 못한 것이다.

종이는 원료 단계에서부터 생산, 사용, 폐기에 이르기까지 복잡하면서도 체계적인 과정을 거친다. 원료로는 주로 두 가지가 사용된다. 첫째는 목재에서 추출한 천연펄프, 둘째는 사용 후 회수된 종이자원에서 얻는 재활용펄프이다. 천연펄프는 벌채된 목재를 칩으로 분쇄한 뒤 화학적 또는 기계적 펄핑 과정을 통해 셀룰로오스 섬유를 분리해 얻는다. 재활용펄프는 종이자원(폐지)을 수거하여 선별·탈묵·재펄프화 과정을 거쳐 생산된다. 이렇게 얻어진 펄프는 물에 분산되어 종이 시트로 형성되며, 탈수·건조·가공 과정을 통해 최종 종이제품으로 완성된다. 이 전체 과정에서 물 사용량, 에너지 소비, 화학물질 투입은 환경 부담 요인이 되지만, 동시에 재생 가능한 원료 사용, 에너지 회수, 폐수 처리 기술 등을 통해 환경 영향을 최소화하려는 노력이 지속되고 있다.

종이의 생애주기를 살펴보면 두 가지로 구분할 수 있다(그림 14-01). 첫째는 cradle-to-grave의 선형 모델로, 종이가 생산→소비→폐기→매립·소각으로 일방향적인 과정을 거치는 경우이다. 둘째는 cradle-to-cradle의 순환 모델로, 종이가 생산→소비→수거·재활용→재생산 과정을 통해 다시 자원으로 활용되는 경우이다. 전통적인 선형 모델을 따르더라도 종이는 다른 소재와 구별되는 특징을 가진다. 종이의 기본 구조인 셀룰로오스는 환경 조건에서 미생물 작용에 의해 이산화탄소, 물, 바이오매스로 분해되는 생분해성 소재이다. 즉, 플라스틱처럼 미세입자로 장기간 잔존하여 환경에 피해를 주지 않고, 자연순환에 다시 편입된다는 점에서 친환경성이 뚜렷하다.

한편, 종이는 단순히 한 번 생산되어 사용되고 버려지는 'cradle-to-grave'방식만을 택하는 것이 아니라, 이미 오랜 기간 동안 매우 높은 재활용률로 순환경제의

그림 14-01. 종이의 생애주기: cradle-to-grave vs. cradle-to-cradle




대표적 소재로 각광받아 왔다. 실제로 현재 세계적으로 생산되는 종이 및 판지의 재활용률은 60~80%에 달하며, 다른 소재에 비해 높은 자원순환 비율을 보여준다[11-13]. 특히 한국은 종이자원 회수율이 2023년 기준 89.1%로, 미국(69%), 일본(81.6%)보다도 높은 세계 최고 수준을 기록하고 있다.

이러한 특성을 종합해 보면, 친환경 소재의 조건을 다음과 같이 정리할 수 있다. 첫째, 생분해성: 자연환경에서 비교적 짧은 기간 내 완전히 분해되어 토양이나 수계의 물질순환에 부담을 주지 않아야 한다. 둘째, 재생 가능성: 원료가 한정된 자원이 아니라, 지속가능한 공급 체계를 통해 안정적으로 확보될 수 있어야 한다. 종이의 경우 FSC, PEFC 등 인증 산림에서 벌채된 목재를 사용하면 벌채 후 즉각적인 재조림이 이루어져 생태계와의 공존이 가능하다. 셋째, 재활용성: 사용 후에도 물리적·화학적 처리 과정을 통해 새로운 제품으로 다시 생산될 수 있어야 한다. 실제로 종이는 보통 6~8회까지도 재활용이 가능하다. 마지막으로, 생산과정의 환경 부담 저감: 에너지 및 물 사용량을 줄이고, 온실가스와 오염물질 배출을 최소화하는 지속가능한 공정 관리가 필요하다. 제지산업은 이를 위해 고효율 보일러, 폐수 처리 시설, 재생에너지 활용 등을 지속적으로 확대하고 있다.

결국 종이가 친환경 소재로 주목받는 이유는 단순히 자연 분해 가능하다는 점에 그치지 않는다. 재생 가능한 원료, 높은 재활용성, 기술적·정책적 관리, 소비자의 적극적 참여라는 네 가지 축이 동시에 맞물리며 그 친환경성이 강화된다. 앞으로

종이는 지구환경과 공존하면서 기록, 포장, 커뮤니케이션 등 다양한 영역에서 그 가치를 계속 확인받을 것이다. 본 장에서는 이러한 종이의 친환경성을 원료, 생산 과정, 재활용과 폐기 등 생애주기적 관점에서 살펴보고, 나아가 친환경인증과 제품 개발 사례를 통해 종이 산업의 지속가능성을 논의하고자 한다.

## 2. 원료의 지속가능성

제지산업의 특징은 '선택할 수 있는 원료 경로가 두 가지'라는 점에 있다. 하나는 목재를 이용해 제조되는 천연펄프(virgin pulp)이고, 다른 하나는 사용 후 회수된 종이에서 얻어지는 종이자원(recycled paper)이다. 이 두 원료는 각기 다른 환경적 특성과 장단점을 가지고 있으며, 제지산업은 이들을 균형적으로 활용함으로써 지속가능성을 추구한다. 산업계 입장에서 중요한 것은 어느 한쪽이 절대적으로 우위에 있다는 이분법적 구도가 아니라, 각 원료가 지닌 장점을 이해하고 조화롭게 사용하는 것이다. 천연펄프는 종이의 품질을 유지하기 위해 반드시 필요하며, 종이자원은 자원 절약과 순환경제 측면에서 큰 기여를 한다. 따라서 두 원료는 서로 대체 관계가 아니라 상호보완 관계에 있다.

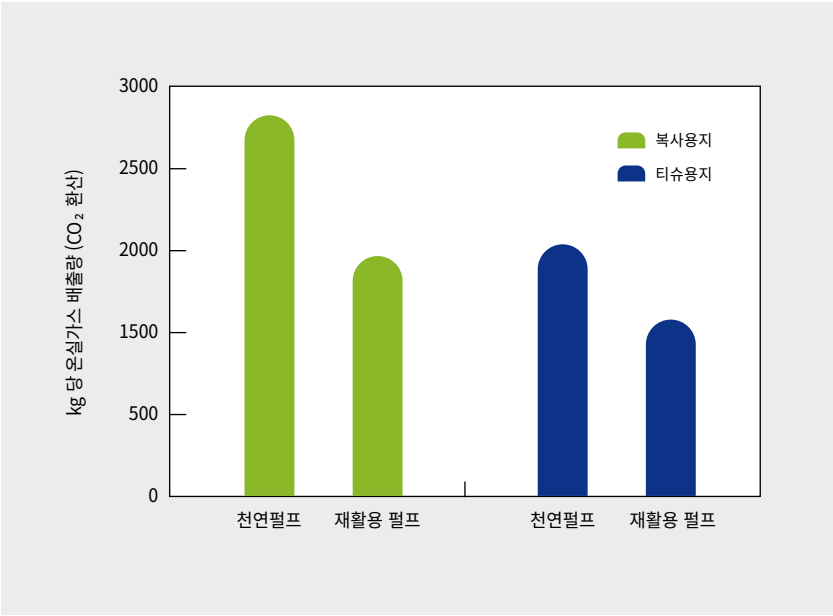
우선 전반적인 환경 영향 비교에서 재활용펄프는 뚜렷한 장점을 보인다 (그림 14-02). Environmental Paper Network의 '페이퍼 계산기(paper calculator)' 결과를 보면, 톤당 100% 재활용펄프를 사용할 경우 천연 복사용지에 비해 상당한 절감 효과가 나타난다(도표 14-01)[10, 20, 31]. 예를 들어, 톤당 약 24그루의

**도표 14-01.** 복사용지 1 톤 생산 시 천연펄프와 재활용펄프의 환경영향 비교

| | 천연펄프 | 100% 재활용펄프 | 재활용펄프 사용에 따른 환경 절감 효과 |
|---|---|---|---|
| 나무 사용량 | 24 그루 | 0 그루 | 100% |
| 에너지 | 34,817 MJ | 23,211 MJ | 33% |
| 온실가스 배출량 ($CO_2$ 환산) | 2,540 kg | 1,603 kg | 37% |
| 폐수 발생량 | 86,478 L | 44,048 L | 49% |
| 고형 폐기물 | 872 kg | 531 kg | 39% |

출처: EPN-recycled-fiber-fact-sheet. (n.d.).
Kinsella, S. (2012). Paperwork: Comparing recycled to virgin paper.
Recycled Paper Fact Sheet: Paper to Protect the Planet. (n.d.).

그림 14-02. 천연펄프와 종이자원 온실가스 배출 비교




출처: Hong, S., Park, J., Kang, S., Oh, K., & Kwon, S. (2025). Recent Trends in LCA Studies on Pulp-and Paper-Based Materials. Journal of Korea TAPPI, 57(6), 5–24.
Kinsella, S. (2012). Paperwork: Comparing recycled to virgin paper.
Gemechu, E. D., et al. (2013). GHG emissions comparison of tissue paper. The International Journal of Life Cycle Assessment, 18(8), 1618–1628. HYPERLINK "https//doi.org/10.1007/s11367-013-0597-x"https://doi.org/10.1007/s11367-013-0597-x

나무를 절약할 수 있으며, 이는 원료 투입 측면에서 100% 절감 효과를 의미한다. 또한 에너지 사용량은 약 33% 감소하고, 온실가스 배출량은 이산화탄소 환산 기준으로 37% 줄어드는 것으로 나타났다. 더불어 폐수 발생량은 49%, 고형폐기물 배출량은 39% 감소한다. 이러한 수치는 종이자원이 원료와 자원을 절약하고 오염을 최소화하는 데 매우 효과적이라는 사실을 보여준다.

천연펄프와 재활용펄프의 환경적 차이는 어디에서 비롯될까? 가장 근본적인 차이는 바로 원료 조달 방식이다. 천연펄프는 산림에서 벌채된 목재를 원료로 하며, 재활용펄프는 소비자가 사용한 종이를 회수하여 원료로 사용한다. 이러한 원료 조달 방식의 차이는 각각 고유한 환경적 특성을 만든다.

천연펄프는 주로 침엽수와 활엽수에서 얻어진다. 침엽수는 섬유 길이가 길어 종이의 강도를 높이는 데 기여하며, 활엽수는 섬유가 짧아 종이의 표면 품질과 인쇄적성을 향상시키는 데 중요한 역할을 한다. 이러한 섬유 특성 덕분에 천연펄프는 고품질 인쇄용지, 포장재, 백판지 등 다양한 용도에서 필수적으로 활용되고 있다. 다만 화학펄프 1 톤을 생산하기 위해 약 2 톤 이상의 전건목재가 필요하다. 이는




FSC 인증 친환경 종이 물티슈
(사진제공_무림P&P)

천연펄프 생산은 목재 자원에 대한 의존도가 높다는 것을 보여준다.

그러나 오늘날 제지산업은 과거와 달리 무분별한 벌목을 지양하고 있으며, FSC (Forest Stewardship Council), PEFC (Programme for the Endorsement of Forest Certification) 등 국제적으로 공신력 있는 산림 인증 제도를 적극 도입하여 합법적이고 지속가능한 산림경영을 실천하고 있다(이에 대한 내용은 '5. 친환경 인증'에서 다시 다룬다). 이러한 인증 제도는 벌채 이후의 즉각적인 재조림은 물론, 생물다양성 보존, 토양과 수질관리까지 포함하는 종합적인 관리 체계를 담고 있다. 따라서 천연펄프는 단순히 산림 자원을 소비하는 것이 아니라, 산림관리와 재조림, 그리고 탄소 흡수 기능과 결합되어 오히려 순환경제를 지탱하는 중요한 자원으로서 기능한다. 산업계 입장에서 이는 책임 있는 자원 사용과 지속가능성 확보라는 두 가지 목표를 동시에 충족시키는 전략적 선택이라 할 수 있다.

천연펄프 생산에는 원거리 운송이라는 요소도 고려된다. 목재 자원은 지역에 따라 공급이 제한적일 수 있으며, 이 경우 다른 지역이나 국가에서 수입된다. 예를 들어, 슬로바키아에 있는 크라프트 펄프제지일관공장은 원료 80%를 자국에서 공급받지만, 나머지 20%는 우크라이나, 체코, 폴란드 등에서 평균 500 km 이상을 기차로 운송한다[25]. 캐나다에서 생산되는 CTMP 펄프는 해상 운송으로 약

**그림 14-03.** 자원으로 재활용되는 종이




출처: 제지연합회 종이자원 캠페인

6,000 km, 이어 기차로 800 km를 이동하여 유럽 시장에 공급되고 있다[25]. 이러한 장거리 운송은 화석 연료 소비와 온실가스 배출을 증가시키지만[16], 동시에 글로벌 공급망과 국제무역이라는 현실적인 맥락 속에서 불가피한 요소다. 제지산업은 이를 보완하기 위해 현지 조달 비율을 높이고 물류 효율화를 강화하는 방향으로 꾸준히 노력하고 있다.

반면 재활용펄프는 사용 후 회수된 종이에서 얻어진다. 이는 자원을 한 번 쓰고 버리는 일회성 소비 구조를 넘어, 동일한 섬유를 여러 차례 순환시켜 활용할 수 있게 한다는 점에서 순환경제의 대표적 사례라 할 수 있다. 재활용펄프 활용은 목재 자원에 대한 의존도를 줄이고, 동시에 에너지와 물 사용량 절감, 온실가스 배출 저감에 기여한다는 점에서 큰 의미를 가진다. 실제로 과거에는 흔히 '폐지'라 불리던 회수 종이를 이제는 '종이자원'이라고 명명하기로 제지연합회에서 공식적으로 밝힌 바 있다(그림 14-03). 이는 사용된 종이가 더 이상 버려지는 쓰레기가 아니라, 산업적으로 재투입되어 가치를 창출하는 소중한 자원으로 인정받고 있다는 사실을 보여준다.

회수된 종이는 선별, 재펄프화, 탈묵, 세척, 농축 단계를 거쳐 새로운 재활용펄프로 다시 태어난다. 이러한 회수 효율성은 상당히 높아, 약 1.4 톤의 회수 종이자원으로 1 톤의 탈묵펄프를 생산할 수 있다. 이는 목재를 직접 펄핑하는 것에 비해 훨씬 효율적일 뿐 아니라, 자원 활용의 측면에서도 산림자원에 가해지는 압력을 줄여주는 효과가 있다. 더 나아가 재활용펄프의 활용은 단순히 산림자원을 절약하는 수준을 넘어 토지 이용 압력을 완화하는 데도 기여한다[25]. 유럽연합이 제시한 저탄소 경제 로드맵에서도 목재 및 종이제품의 재사용과 재활용 확대가 토지 이용 효율성을 높이고 산림 보존에 기여하는 핵심 전략으로 언급된다[40]. 실제 사례를 보더라도, 재활용펄프는 대체로 지역 내에서 회수된 종이를 원료로 사용하기 때문에 운송 과정에서의 환경 부담이 최소화된다. 예를 들어 스페인의 한 티슈 공장에서는 필요한 원료의 대부분을 지역 시장에서 공급받고 있어 운송 거리가 짧고, 그만큼 탄소 배출량이 현저히 줄어든 것으로 보고되었다[16].

물론 재활용펄프도 여러 한계점을 가지고 있다. 일부 지역에서는 재활용 섬유의 수급이 부족할 수 있으며, 특히 고품질 인쇄용지에 적합한 사무용 폐지는 여전히 매립되거나 소각되는 경우도 많다. 북미 지역만 보더라도 사무실에서 사용된 고급 종이의 절반 가까이가 회수되지 않고 있으며, 이는 약 9백만 톤에 달하는 고급 섬유가 활용되지 못하는 것을 의미한다. 그러나 이는 동시에 잠재적 기회이기도



바이오매스 연료 흑액 (사진제공_무림P&P)

하다. 재생용지에 대한 수요가 늘어나면, 회수시스템이 더욱 강화되어 추가적인 자원 확보가 가능해질 것이다. 산업계는 이를 위한 회수 네트워크 강화와 품질 개선을 위한 기술 개발에 꾸준히 투자하고 있다.

에너지 소비는 펄프 생산에서 가장 중요한 환경 영향 요소 중 하나이다. 일반적으로 재활용 크라프트 펄프는 천연 화학 펄프에 비해 평균적으로 약 33% 적은 에너지를 사용한다고 보고된다(도표 14-01). 이러한 차이는 원료 조달과 전처리 과정에서 비롯된다. 천연펄프 생산에는 박피, 칩 정제, 증해, 표백, 세척, 건조 등 다수의 공정이 포함되며, 이는 종이자원을 펄프화하는 과정에 비해 상대적으로 많은 에너지를 요구한다는 것을 보여준다[16, 23]. 반면 재활용펄프 생산은 전체적인 에너지 수요가 낮은 편이지만, 해리와 탈묵, 세척과 같은 단계에서는 전력 사용량이 다소 높을 수 있다. 다만, 천연펄프 공장은 공정 부산물인 흑액(black liquor)을 연료로 활용해 자체적으로 에너지를 생산하는 반면, 재활용펄프 공장은 이와 같은 부산물이 없어 국가 전력망에 의존하는 경우가 많다. 전력망이 화석연료 기반일 경우 환경적 부담이 일부 발생할 수 있지만, 전체적인 온실가스 배출량을 비교하면 여전히 재활용펄프가 천연펄프에 비해 환경적으로 유리하다. 또한 최근 재활용펄프 공장에서는 화석연료 기반 전력 사용을 줄이기 위해 열병합 발전(CHP) 시스템을 도입하는 등[14] 지속적인 개선 노력이 이루어지고 있다. 이러한 점은 제지산업이 단순히 현 상태에 안주하지 않고, 에너지 효율화를 통해 친환경

**도표 14-02.** 1 kg 티슈 생산시 천연펄프 vs 종이자원 (폐지) 온실가스 배출량(GHG) 비교

| 천연펄프 (1 kg 티슈 생산) | | 재활용펄프 (1 kg 티슈 생산) | |
|---|---|---|---|
| 항목 | GHG ($g\ eq\ CO_2\ kg^{-1}$) | 항목 | GHG ($g\ eq\ CO_2\ kg^{-1}$) |
| 화학약품 | 43 | 화학약품 | 52 |
| 전기 | 465 | 전기 | 512 |
| 펄프 | 559 | 종이자원 (폐지) | 173 |
| 스팀 | 438 | 스팀 | 541 |
| 운송 | 368 | 운송 | 27 |
| 용수 | 2 | 용수 | 3 |
| **계** | **1,875** | **계** | **1,307** |

출처: Gemechu, E. D., et al. (2013). GHG emissions comparison of tissue paper. The International Journal of Life Cycle Assessment, 18(8), 1618–1628. HYPERLINK "https//doi.org/10.1007/s11367-013-0597-x"https://doi.org/10.1007/s11367-013-0597-x

성을 더욱 강화해 나가고 있음을 보여준다.

이러한 차이는 실제 제품 생산 과정에서도 잘 드러난다. 예를 들어, 티슈 생산에서 천연펄프와 종이자원을 각각 원료로 사용했을 때의 온실가스 배출량을 항목별로 분석하면 더욱 분명한 차이를 확인할 수 있다(도표 14-02)[16]. 종이 생산 단계만 고려할 경우, 화학약품, 전기, 스팀, 용수 사용으로 인한 온실가스 배출량은 종이자원을 원료로 할 때 다소 높은 수치를 보인다. 이는 재활용펄프 공정에서 탈묵과 지료 조성 과정에서 전력이 추가로 필요하기 때문이다. 그러나 전체적인 온실가스 배출량을 비교하면 천연펄프를 사용하는 경우가 훨씬 높은 수준을 보인다. 이는 펄프 생산 자체에서 화석연료 사용과 바이오매스 소각에 따른 배출이 크게 작용하기 때문이다. 여기에 운송 단계도 중요한 변수가 된다. 천연펄프는 해외 수입이나 장거리 운송이 필요한 경우가 많아, 원거리 물류 과정에서 발생하는 온실가스 배출량이 불가피하게 증가한다. 반면 재활용펄프는 대부분 지역 내에서 회수된 종이자원을 원료로 사용하기 때문에 운송으로 인한 환경 부담이 크게 줄어든다.

재활용펄프 사용은 폐기물 관리 측면에서도 분명한 강점을 가진다. 회수된 종이를 재활용하면 매립지로 향할 종이를 줄여 메탄 발생을 억제할 수 있고, 동시에 소각에 따른 자원 손실도 감소시킬 수 있다. 이러한 순환적 자원활용은 누적적인 자원 절감을 가능하게 한다는 점에서 제지산업이 순환경제에 기여하는 중요한 사례라 할 수 있다. 물론 탈묵 공정에서는 잉크, 코팅제, 충전제, 단섬유 등이 포함된 슬러지가 발생한다[16]. 그러나 이 슬러지는 본래라면 매립이나 소각으로 처리되었을 물질이 산업적으로 관리되는 것이므로, 전체적으로 보았을 때는 환경적 측면에서 긍정적인 효과가 더 크다.

펄프 수율과 섬유 수명 또한 중요한 고려 요소이다. 천연 크라프트 펄프의 경우 전건 목재 대비 섬유 수율이 40~55% 수준이며, 기계 펄프는 약 80~95%의 높은 수율을 보인다. 재활용 크라프트 펄프는 회수된 폐지에서 약 70%의 섬유를 회수할 수 있으며, 이미 가공된 자원을 재이용한다는 측면에서 자원 활용 효율성이 매우 높다. 종이 섬유는 평균 6~8회 재활용이 가능하며, 이는 원래 목재펄프의 사용 수명을 크게 연장시킨다. 물론 재활용 횟수가 늘어날수록 섬유장이 짧아지고 강도가 떨어지는 한계가 있지만, 이는 재활용펄프의 품질에 맞는 지종에 투입하거나, 첨가제 및 보강재를 활용하는 방식으로 충분히 보완할 수 있다. 특히 인쇄 및 필기용지에서는 섬유가 여러 번 순환될 수 있고, 티슈 페이퍼는 섬유의 마지막 사용 단계로 적합하다. 이는 자원의 전 생애를 최대한 활용하는 현명한 방식이라 할

수 있다. 다만 재활용 섬유만으로는 영구적인 순환이 어려우므로, 일정 비율의 새로운 천연섬유 투입은 반드시 필요하다.

결국 천연펄프와 재활용펄프는 서로 경쟁하는 관계가 아니라 상호 보완적인 관계에 있다. 재활용펄프는 자원 절약과 온실가스 감축에 뚜렷한 효과를 보이지만, 섬유 품질 유지와 장기적 재활용 체계의 지속성을 위해서는 천연펄프의 안정적 공급이 필수적이다. 제지산업은 두 원료를 균형 있게 활용함으로써 고품질 종이를 안정적으로 생산·공급하는 동시에, 에너지와 물 절약, 온실가스 감축이라는 지속가능성 목표를 달성하고 있다. 따라서 펄프 원료 선택은 단순히 친환경성과 경제성을 저울질하는 문제가 아니라, 산업적 지속가능성을 확보하기 위한 전략적 선택이라고 할 수 있다.

## 3. 종이 생산 과정의 환경 영향

제지산업은 오늘날 자원 부족과 온실가스 배출이라는 전 지구적 환경 문제와 직결되어 있으며, 탄소중립 사회로 전환하는 과정에서 탈탄소화를 요구받고 있다. 그러나 이 산업은 단순히 원료를 투입해 종이를 생산하는 구조가 아니라, 원료 조달·펄핑·제지·가공·폐기물 관리 등 여러 복합적 단계로 이루어진 고도의 시스템 산업이다[32]. 따라서 환경 영향의 특성을 정확히 이해하기 위해서는 단순 수치 이상의 섬세한 접근이 필요하다.

종이 생산 과정에서 나타나는 환경적 영향은 매우 다면적이다. 목재를 조달하는 단계에서부터 펄프화 과정의 에너지 소비, 제지 공정에서의 물 사용과 폐수처리, 보일러와 건조공정에서의 대기오염물질 배출, 그리고 공정 중 발생하는 다양한 고형폐기물 관리에 이르기까지 전 과정에서 다양한 환경적 이슈가 발생한다. 특히 에너지 소비와 탄소배출의 흐름을 추적해보면 공정의 복잡성이 더욱 명확히 드러난다[39]. 펄프제지공정은 단순히 목재 및 펄프를 종이제품으로 가공하는 단계를 넘어, 흑액과 부산물 등을 연소하여 공정에 필요한 고압스팀과 전력을 생산하는 열병합 발전 단계, 그리고 무기물을 환원시키는 약품 회수 공정 등이 유기적으로 긴밀하게 얽혀 있다. 바로 이러한 공정 간의 복잡한 상호 연결성 때문에, 펄프제지 산업의 환경 영향은 단편적으로 해석하기 어려우며 에너지, 물, 폐기물 문제가 혼재된 다면적인 양상을 띤다.

그럼에도 불구하고 제지산업은 지난 수십 년간 환경부하를 지속적으로 줄여 왔다. 에너지 효율 향상, 공정 내 에너지 회수시스템 도입, 친환경표백 기술 전환, 고도 폐수 처리 기술 보급 등은 이미 산업 전반에 자리잡았다. 오늘날 많은 제지 기업들은 국제적 환경 기준을 충족할 뿐만 아니라, 그 이상을 목표로 삼아 기술 혁신과 지속가능한 경영 전략을 추진하고 있다. 이러한 노력은 제지산업이 단순히 환경 부담을 유발하는 산업이 아니라, 오히려 순환경제와 탄소중립 사회로의 전환 과정에서 적극적인 해결책을 제공할 수 있는 산업임을 잘 보여준다.

이와 같이 제지산업의 생산 과정은 다양한 환경적 변수를 수반하며, 그 영향의 양상은 공정별로 달리 나타난다. 따라서 본 절에서는 종이 생산의 환경 영향을 보다 구체적으로 살펴보고자 한다. 먼저 제지 공정에서 공통적으로 발생하는 주요 환경부하 항목을 정리한 뒤, 온실가스 배출과 에너지 소비의 특성을 분석한다. 이어서 물 사용량과 폐수 처리 문제를 다루고, 마지막으로 이러한 영향들을 최소화하기 위해 산업계에서 도입하고 있는 저감기술과 지속가능한 생산 전략을 소개한다. 이러한 논의를 통해 독자는 제지산업이 직면한 환경적 과제와 동시에 이를 해결하기 위한 산업의 노력과 성과를 균형 있게 이해할 수 있을 것이다.

### (1) 종이 생산의 주요 환경부하 항목

펄프 및 제지공정에서 대표적으로 지적되는 환경 부하 항목은 아래와 같다.

| | |
|---|---|
| **1.**<br>**자원 고갈** | • 목재 : 천연펄프 생산은 상당한 양의 목재를 소비한다. 이는 산림 탄소 배출 및 토지 이용 변화와도 밀접하게 연관된다. 예를 들어, 1 톤의 표백 크라프트지를 생산하는 데 약 2.2 톤의 목재가 필요하다.<br>• 물 : 펄프 및 제지 공정 전반에 걸쳐 냉각수 및 공정수로서 대량의 물이 사용된다.<br>• 광물 자원 : 탄산칼슘(GCC 또는 PCC)이 충전물 등으로 사용되며, 이는 광물자원 사용과 연결된다. |
| **2.**<br>**대기 오염** | • 온실 가스 및 대기오염 물질 발생: 보일러에서 석탄, 천연가스, 중유 등 화석 연료를 연소할 때 이산화탄소($CO_2$), 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx), 미세먼지(PM2.5)와 같은 온실가스 및 대기 오염 물질이 발생할 수 있다. |
| **3.**<br>**수질 오염** | • 폐수 및 수질 오염: 공정에서 발생하는 폐수는 적절한 정수처리를 거치지 않을 경우 높은 화학적 산소 요구량(COD), 생화학적 산소 요구량(BOD), 영양분(질소, 인), 유기 할로겐 화합물(AOX), 염소페놀, 중금속 이온과 같은 유독성 물질을 함유할 수 있다[3]. 또한, 탈묵 공정에서는 과산화수소, 지방산 등의 화학물질이 사용되며, 이 과정에서 발생하는 폐수는 잉크, 코팅제, 충전제, 미세 섬유, 스테이플, 유리, 플라스틱과 같은 오염 물질을 포함할 수 있다. |

| | |
|---|---|
| **4.**<br>**고형 폐기물** | • 슬러지 : 슬러지는 펄프 제조, 제지 및 폐수 처리 과정에서 발생하는 주요 고형 폐기물이다. 이 슬러지는 매립 또는 소각될 수 있다. 탈묵 공정에서는 잉크, 사용된 코팅제 및 충전제, 너무 작아 재활용할 수 없는 미세 섬유, 스테이플, 유리, 플라스틱 등 오염 물질을 포함한 슬러지가 발생할 수도 있다[3].<br>• 회분 : 폐기물 소각 및 흑액 연소 후 발생하는 회분도 고형 폐기물로 처리된다[3]. |
| **5.**<br>**독성 영향** | • 화학 물질 및 나노입자 : 표백 화학 물질, 특정 첨가제 및 기능성 코팅에 간혹 사용되는 나노 입자는 잠재적인 인간 독성 및 생태독성 위험을 제기할 수 있다. 일부 펄프 제조 과정에서 생성되는 염소페놀과 같은 유해 물질도 독성 우려가 있다.<br>• 배출 물질 : PM2.5와 같은 미세먼지 및 지표면 오존을 유발하는 NOx에 대한 노출은 인간 건강에 해로운 영향을 미친다. |
| **6.**<br>**토지 이용 변화** | • 산림 벌채 : 천연펄프를 위한 목재 조달은 산림 벌채를 초래하여 탄소 흡수원의 감소와 생물 다양성 손실을 가져올 수 있다. 그러나 지속적인 산림 경영을 통해 이는 보완될 수 있다.<br>• 폐기물 매립 : 고형 폐기물 매립 또한 상당한 토지 면적을 차지할 수 있다. |

이와 같이 제지 공정에서는 자원고갈, 대기오염, 수질오염, 고형폐기물 발생, 독성 물질 배출, 토지 이용 변화 등 다양한 환경부하가 복합적으로 나타난다[29]. 이러한 영향들은 공정별로 성격과 강도가 다르며, 원료 조달에서부터 최종 제품 생산과 폐기 관리에 이르기까지 전 과정에 걸쳐 분포되어 있다. 그러나 제지산업은 이러한 공정별 환경 영향을 면밀히 파악하고, 배출 저감과 자원 효율 향상을 위한 기술적·관리적 노력을 지속적으로 기울여 왔다. 이러한 맥락에서 다음 절에서는 펄프 및 제지산업에서 특히 비중이 큰 환경영향 요소인 온실가스 배출과 에너지 소비를 중심으로 그 특성과 변화 양상을 보다 면밀히 살펴보고자 한다.

### (2) 온실가스 배출 및 에너지 소비

제지산업의 온실가스 배출량은 지난 수십 년간 꾸준히 증가해왔다. 1960년대 이후 산업의 성장과 함께 배출량은 가파르게 상승하여 2010년대 초반 정점을 기록하였으며, 이후에도 일정한 수준을 유지하면서 전 세계 탄소 배출 구조에서 중요한 비중을 차지하게 되었다(그림 14-04(a)). 세부적으로 살펴보면, 원료수집 단계부터 화학펄프와 기계펄프 생산, 제지 및 인쇄 과정에 이르기까지 모든 단계가 배출에 기여하고 있으며, 특히 펄프 제조와 제지·인쇄 단계가 전체 배출량의 큰 부

분을 차지한다. 또한 매립지에서 발생하는 메탄이나 폐수 처리 과정에서 발생하는 배출까지 고려하면, 제지산업의 탄소발자국은 단순한 생산 공정을 넘어 자원 이용과 폐기물 관리 전반에 걸쳐 영향을 미친다는 사실을 확인할 수 있다. 그러나, 2010년대 이후부터는 지속적인 산림경영, 재활용 확대, 에너지효율 개선과 같은 노력이 성과를 내면서 배출 증가세가 완화되고 있다. 이는 제지산업이 과거 온실가스 배출의 주요 원인 중 하나였지만, 현재는 기술 혁신과 관리 체계 개선을 통해 점차 감축 성과를 보이고 있음을 보여준다.

제지산업의 온실가스 배출은 제지산업이 에너지 다소비산업이기 때문이다[33]. 그러나 제지산업 내부를 세부적으로 살펴보면 단순한 '에너지 다소비산업'이라는 인식과는 다른 양상이 드러난다. 유럽에서 두 번째로 큰 생산 규모를 갖추고 있으며, 국가 전체 산업 에너지의 거의 50%를 차지하는 핀란드 펄프·제지 산업을 예로 들면(그림 14-05) 목재의 벌채와 운반, 펄프 생산, 종이 생산, 유통, 폐기물 처리의 여러 단계 중 가장 많은 에너지를 소모하는 단계는 펄프 생산이지만 펄프공장은 외부 에너지를 소비하는 것이 아니라 공정에서 발생하는 부산물인 흑액을 비롯한 바이오매스 폐기물을 자체 연료로 활용하여 에너지를 생산한다. 이러한 내부 자원 순환 시스템은 펄프 생산에 필요한 에너지 수요를 대부분 충족시킬 뿐만 아니라, 경우에 따라서는 생산량을 초과하는 에너지를 공급하기도 한다(그림 14-05)[6]. 따라서 제지산업은 외부적으로 볼 때 에너지 다소비산업으로 분류되지만, 공정 내 에너지 회수와 재생 가능 자원 활용으로 많은 에너지가 공급되므로 실제 순수 외부 에너지 투입량은 크지 않다. 따라서 제지산업은 에너지 다소비산업인 동시에 에너지 자급과 순환의 대표적인 산업이기도 하다.

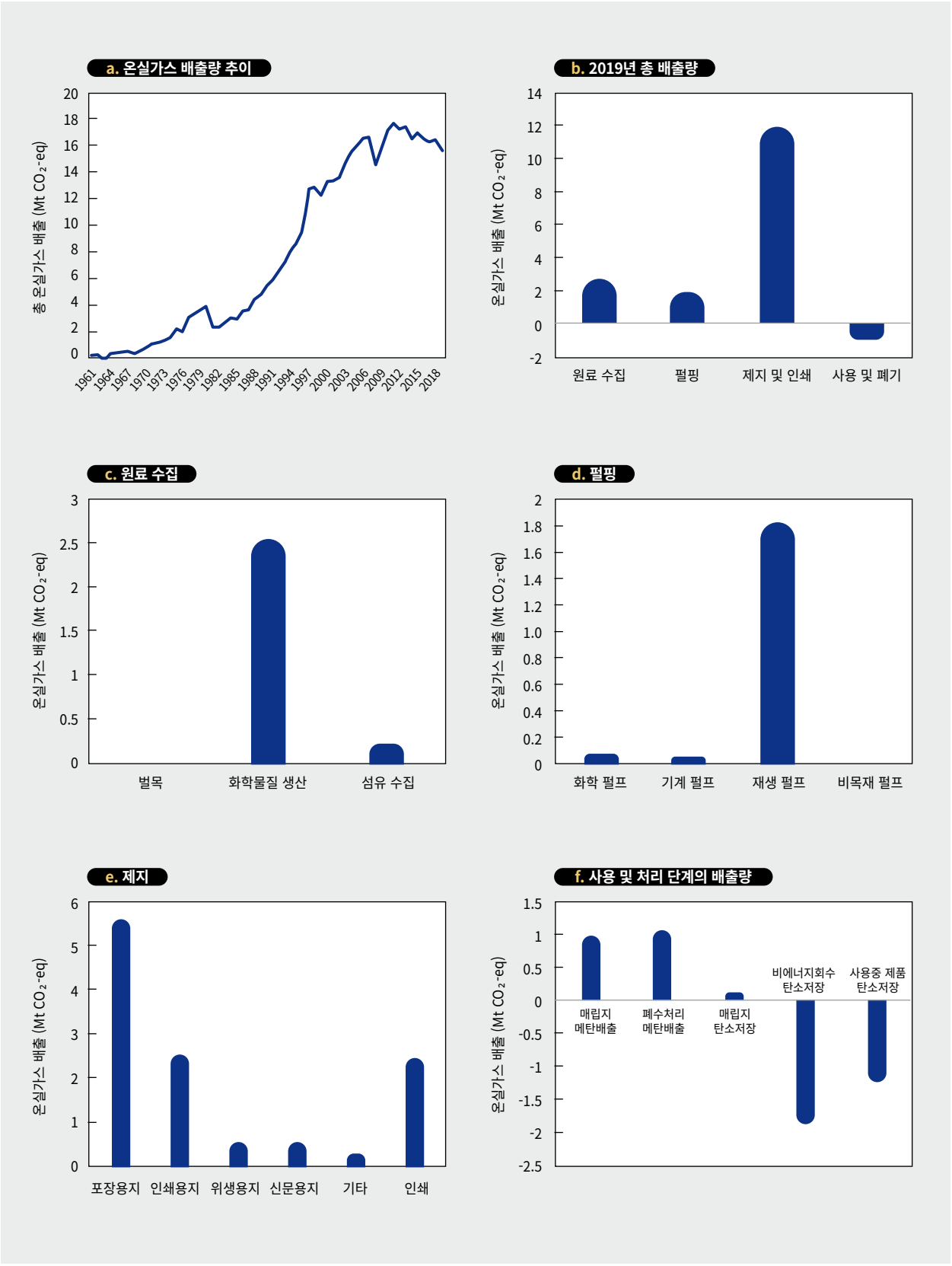


흑액을 에너지로 전환하는 친환경 고효율 회수보일러 (사진제공_무림P&P)

도표 14-03은 유럽연합에서 발행한 보고서에 제시된 펄프·제지 공정의 평균 에너지 소비량 추정치를 인용한 것으로, 펄프 및 제지산업 전과정에서 에너지 소비가 어떤 공정에 집중되는지를 직관적으로 보여준다[9, 26].

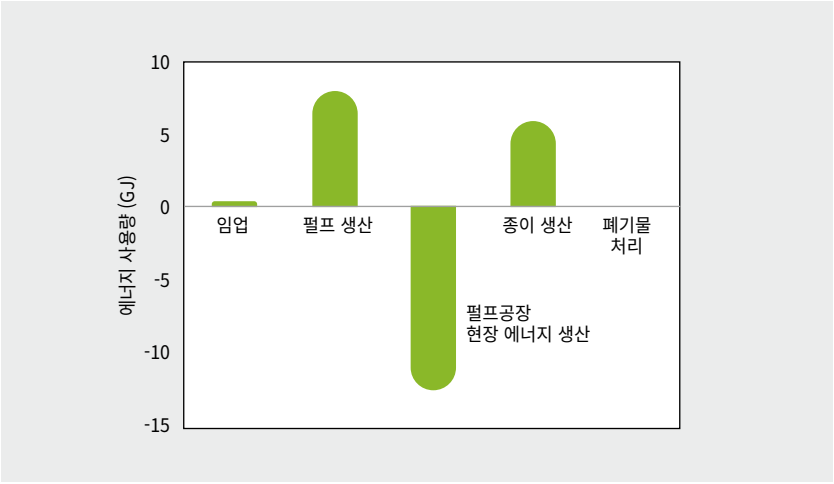
먼저 원료 준비 단계에서는 상대적으로 낮은 에너지 소비가 관찰된다. 박피와 칩핑 및 이송과정은 공정의 필수 단계임에도 불구하고 전체 에너지 소비는 크지 않다. 이는 작업이 단순하고, 열·전력 집약도가 낮기 때문이다. 펄프화 과정에서 에너지 소비는 급격히 증가한다. 화학펄프보다 기계펄프의 에너지 소비가 더 높은 것으로 나타나며, 특히 TMP와 CTMP의 경우 7 GJ/t 이상으로 매우 큰 에너지 의존도를 보인다. 이는 기계펄프 공정이 화학적 처리 대신 고도의 기계적 분쇄와 리파이닝을 요구하기 때문이다. 반면, 재활용펄프는 1.37 GJ/t로 상대적으로 낮아,

그림 14-04. 국내 펄프·제지 산업의 온실가스 배출




출처: Dai, M., Sun, M., Chen, B., et al. (2024). Country-specific net-zero strategies of the pulp and paper industry. Nature, 626(7998), 327–334. HYPERLINK "https//doi.org/10.1038/s41586-023-06962-0"https://doi.org/10.1038/s41586-023-06962-0

그림 14-05. 핀란드 펄프제지 산업 에너지 사용량 예시




출처: Corcelli, F., Fiorentino, G., Vehmas, J., & Ulgiati, S. (2018). Energy efficiency and environmental assessment of papermaking from chemical pulp—A Finland case study. Journal of Cleaner Production, 198, 96–111. HYPERLINK "https//doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.018"https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.018

에너지 효율성 측면에서  매우 유리하다.

크라프트 화학펄프의 회수 공정에서는 증발, 회수보일러, 재가성화, 소성 등에서 추가적인 에너지 수요가 발생한다. 특히 증발 공정과 소성 공정은 화학약품 회수와 재활용 과정에서 높은 에너지가 요구된다. 표백 공정은 약 2.43 GJ/t의 소비를 기록하고 있는데, 이는 표백약품 투입과 공정 운전에 에너지가 요구되기 때문이다.

제지 공정에서는 초지와 건조 과정이 핵심 에너지 소비 지점으로 나타난다. 신문지, 티슈, 미도공지, 코팅지, 라이너보드 등 모든 제품군에서 건조 단계가 공통적으로 높은 에너지 강도를 보이며, 특히 티슈 건조(8.39 GJ/t)는 매우 큰 값을 기록한다. 이는 제지산업에서 건조 공정이 전체 에너지 부하의 가장 큰 원천임을 다시 확인시켜 준다.

그림 14-06의 캐나다 제지공정 에너지 소비량을 보면 제지 공정에서 어떤 에너지가 어디서 많이 소비되는지 보다 세부적으로 살펴볼 수 있다. 전력은 주로 기계 구동과 초지공정에서 사용되고, 천연가스는 증기생산과 열공정에 투입된다. 바이오매스는 회수보일러에서 발생하는 흑액과 같은 부산물을 연료로 활용하는 경우이며, 기타 화석연료는 일부 보조적 연소원으로 쓰인다.

공정별로 살펴보면 화학펄프와 기계펄프 생산 단계에서 특히 에너지 소비가 높다. 화학펄프의 경우 증해와 회수보일러 공정에서 전력과 바이오매스 사용이 두

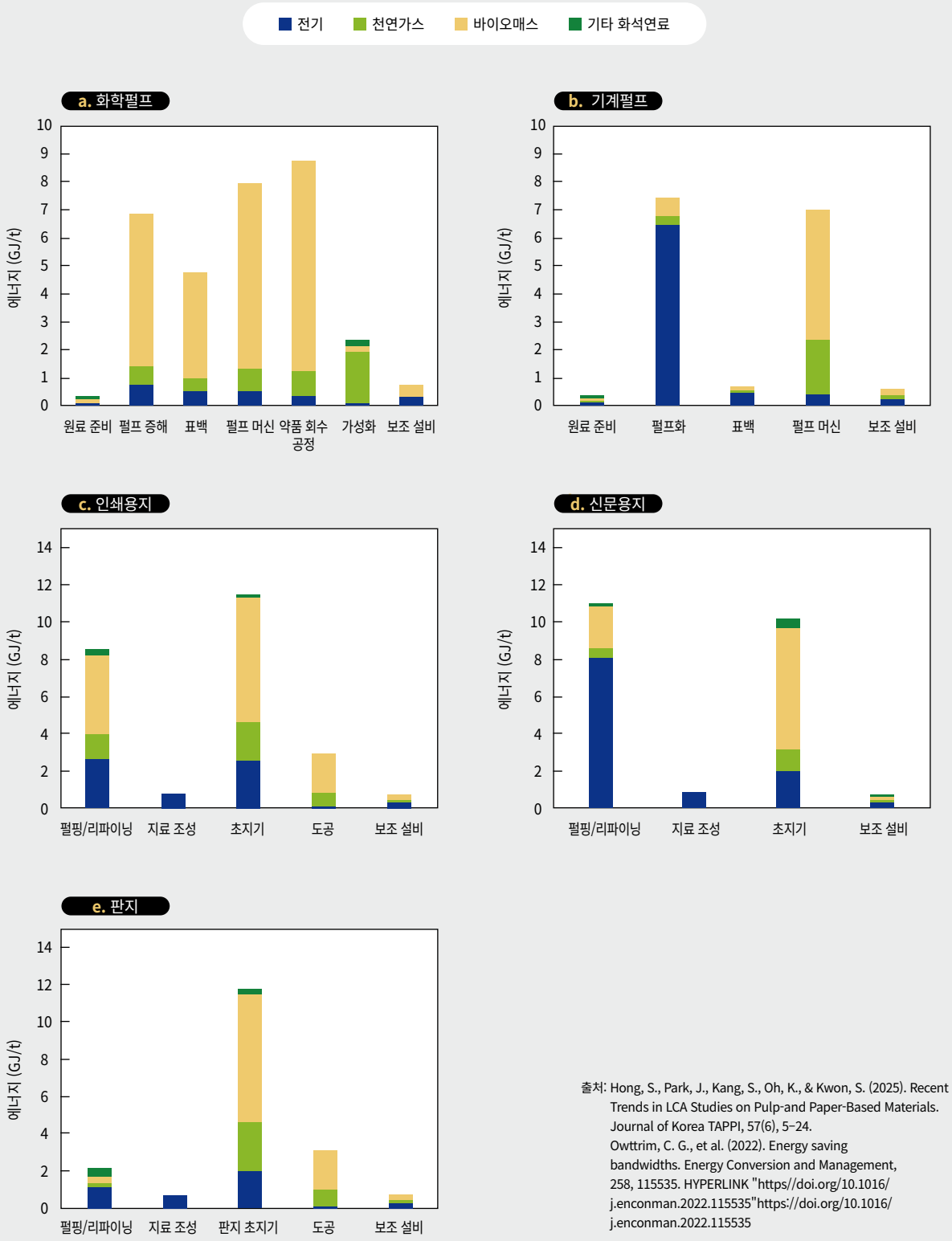
드러지는데, 이는 리그닌 제거와 화학약품 회수를 위한 높은 열수요 때문이다. 반면 기계펄프는 리파이닝 과정에서 전력소비가 압도적으로 높아 전력의존도가 큰 특징을 보인다. 제지 단계에서는 모든 제품군에서 초지기가 가장 큰 에너지 부하

**도표 14-03.** 펄프제지 공정에서 평균 에너지 소비량 추정치 (GJ/톤)

| 공정 단계 | 세부 공정 | 에너지 소비량 (GJ/톤) |
|---|---|---|
| 목재 준비 | 박피 | 0.11 |
| | 칩제조 및 이송 | 0.37 |
| 펄프화 | 크라프트화학펄프 | 2.75 |
| | 아황산화학펄프 | 5.68 |
| | 반화학펄프 | 4.08 |
| | 쇄목펄프 | 5.40 |
| | 리파이너기계펄프(RMP) | 6.44 |
| | 열기계펄프(TMP) | 7.49 |
| | 화학열기계펄프(CTMP) | 8.11 |
| | 재활용펄프 | 1.37 |
| 크라프트 약품 회수 공정 | 증발/농축 | 4.08 |
| | 회수보일러 | 1.19 |
| | 가성화 | 1.08 |
| | 소성 | 2.14 |
| 표백 | 펄프표백 | 2.43 |
| 종이 및 판지 생산 | 고해 및 스크리닝 | 0.89 |
| | 신문용지초지, 압착, 마감 | 1.52 |
| | 신문용지건조 | 4.40 |
| | 티슈초지, 압착, 마감 | 1.92 |
| | 티슈건조 | 8.39 |
| | 비도공지초지, 압착, 마감 | 1.90 |
| | 비도공지건조 | 5.38 |
| | 도공지초지, 압착, 마감 | 1.90 |
| | 도공지건조 | 5.60 |
| | 라이너보드초지, 압착, 마감 | 0.97 |
| | 라이너보드건조 | 4.28 |

출처: Energy efficiency and GHG emissions: Prospective scenarios for the pulp and paper industry. (2018). Publications Office. https://doi.org/10.2760/035301 Moya, J. A., & Pavel, C. C. (2018). Energy efficiency and GHG emissions report.

그림 14-06. 캐나다 제지공정 에너지 소비량



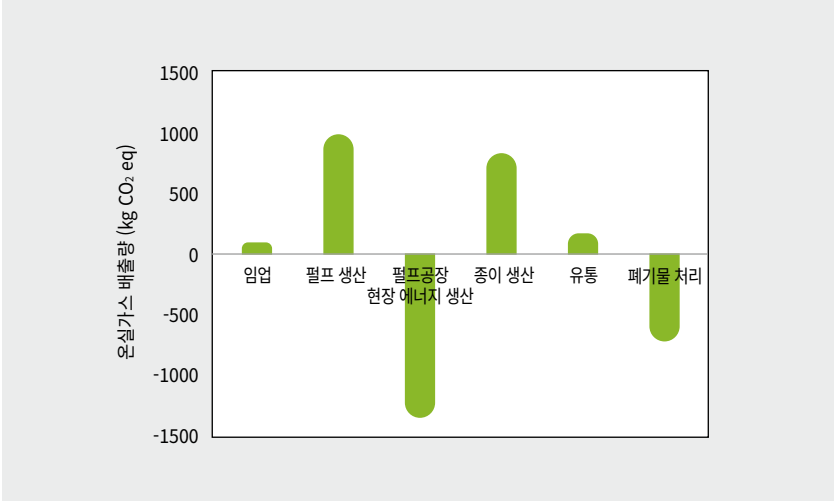

출처: Hong, S., Park, J., Kang, S., Oh, K., & Kwon, S. (2025). Recent Trends in LCA Studies on Pulp-and Paper-Based Materials. Journal of Korea TAPPI, 57(6), 5-24.
Owttrim, C. G., et al. (2022). Energy saving bandwidths. Energy Conversion and Management, 258, 115535. HYPERLINK "https//doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115535"https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115535

를 차지한다. 초지기는 펄프 슬러리의 탈수, 압착, 건조 과정을 포함하는데, 이 과정에서 많은 전력과 열이 요구된다.

이러한 에너지 소비 구조에 대한 이해를 바탕으로 온실가스 배출량을 살펴보면 펄프·제지산업의 특성을 보다 명확하게 파악할 수 있다. 그림 14-07은 핀란드의 임업, 펄프 생산, 펄프공장 현장 에너지 생산, 종이 생산, 유통, 폐기물 처리의 여섯 단계에서 발생하는 온실가스 배출량을 이산화탄소 배출량으로 환산하여 kg $CO_2$-eq 단위로 나타낸 것이다[6]. 우선, 펄프 생산과 종이 생산 단계에서 가장 큰 배출량이 발생함을 알 수 있다. 펄프 생산은 목재칩의 화학적 또는 기계적 처리 과정에서 많은 열과 전력이 필요하며, 특히 화학약품 사용과 표백 과정이 에너지 소비를 증대시킨다. 종이 생산 단계 역시 초지와 건조공정이 에너지 집약적이어서 상당한 배출을 유발한다. 이는 전 세계 제지산업에서 공통적으로 나타나는 현상으로, 에너지 효율 개선과 건조 공정 최적화가 주요 저감 전략으로 강조되는 이유이다[15, 33].

반면 펄프공장 현장 에너지 생산 항목은 마이너스 값으로 나타난다. 이는 펄프 제조 과정에서 부산물로 발생하는 흑액이나 기타 바이오매스를 자체적으로 연소하여 전력과 증기를 생산하는 과정에서 화석연료 대체효과가 반영된 것이다. 즉, 공정 내에서 에너지를 자급하면서 동시에 외부 화석연료 사용을 줄여 온실가스 배

**그림 14-07.** 핀란드 펄프제지 산업 온실가스 배출량 예시




출처: Corcelli, F., Fiorentino, G., Vehmas, J., & Ulgiati, S. (2018). Energy efficiency and environmental assessment of papermaking from chemical pulp—A Finland case study. Journal of Cleaner Production, 198, 96–111. HYPERLINK "https//doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.018"https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.018

출량을 상쇄하는 긍정적 효과가 발생한다. 이 부분은 제지산업이 흔히 단순한 에너지 다소비산업으로 오해되지만, 실제로는 재생에너지 생산자로서의 기능도 함께 수행한다는 점을 보여준다. 폐기물 처리 단계 역시 음수 값을 나타내는데, 이는 주로 재활용 확대와 에너지 회수 효과 때문이다. 폐지를 매립할 경우 메탄 배출이 크지만, 재활용을 통해 섬유를 재사용하거나 슬러지를 건축자재나 바이오연료로 활용하면 전체 시스템에서 상당한 탄소 절감 효과가 발생한다.

종합하면, 그림 14-07의 온실가스 배출량은 제지산업의 온실가스 배출 구조가 단순히 '높은 배출'로만 규정될 수 없음을 잘 보여준다. 펄프 및 종이 생산 단계에서는 상당한 배출이 나타나지만, 현장 에너지 생산과 폐기물 관리 단계에서는 오히려 순흡수 또는 상쇄 효과가 발생한다. 이는 제지산업이 탄소중립 사회로 나아가는 데 있어 잠재적 기여 가능성이 크다는 것을 시사한다. 결국 향후 저감 전략은 펄프 및 종이 생산 단계의 효율화를 강화하는 동시에, 공정 내 에너지 자급과 폐기물 자원화 기능을 극대화하는 방향으로 전개될 필요가 있다[24].



세계 제지업계 최초로 폐기물 매립 제로화 검증 플래티넘을 획득한 무림P&P (사진제공_무림P&P)

### (3) 물 사용량과 폐수 처리

펄프·제지 산업은 세계적으로 물과 에너지를 많이 사용하는 산업 부문 중 하나이며, 동시에 상당량의 화학물질과 연소 부산물을 사용하고 배출한다[2]. 전통적으로 제지산업은 물을 다량으로 소비하는 것으로 알려졌으나, 지난 수십 년 동안 기술 발전과 환경 규제 강화로 인해 물 사용 효율성이 크게 개선되었다. 미국의 경우 1959년에는 종이 1 톤 생산에 250 $m^3$의 물이 소요되었으나, 1995년에는 50 $m^3$ 수준으로 줄어들었으며, 이는 폐쇄형 시스템(closed water system)과 고도 폐수처리 기술 덕분이다[18, 30].

물 사용 및 수질오염과 관련하여 주로 연구되는 환경 영향으로는 부영양화(freshwater eutrophication potential; FEP), 인체 독성(human toxicity potential; HTP), 물 고갈 가능성(water depletion potential; WDP) 등을 꼽을 수 있다[17, 24, 29]. 이와 관련하여 펄프 제지 공정에서 각각의 환경영향에 미치는 공정을 살펴보면, 슬러지 매립, 표백공정, 리파이닝, 펄프 증해, 건조공정 등이 가장 큰 영향을 주는 것으로 분석이 된다. 그러나 이 경우 대체로 에너지 사용으로 인한 영향이 큰 것으로 보이며, 실제로 펄프 제지산업에서는 폐수 관리가 엄격히 이루어지기 때문에 실질적인 환경영향에 대해 알기 위해서는 폐수를 더 면밀

히 분석할 필요가 있다.

폐수 처리는 일반적으로 1차, 2차 그리고 필요 시 3차 이상의 단계로 이루어진다[2, 18, 32]. 1차 처리에서는 침전(sedimentation)과 부상(flotation)을 통해 큰 입자와 섬유 미세분을 제거하며, 응집·응결(coagulation/flocculation) 공정을 병행하여 효율을 높인다. 2차 처리 단계는 생물학적 처리로, 용해성 유기물을 미생물이 분해하여 $CO_2$와 물, 바이오매스로 전환한다. 3차 또는 고도 처리는 더욱 엄격한 방류 기준을 충족하거나 처리수를 재활용할 목적으로 도입된다. 막여과(UF, NF, RO)는 색도와 난분해성 유기물 제거에 효과적이며, 고급 산화 공정(AOP, 오존, Fenton, UV, 광촉매 등)은 리그닌 관련 물질의 생분해 저항성을 극복하는 데 사용된다[18, 30]. 슬러지 처리 역시 중요한 관리 대상인데, 슬러지는 농축, 탈수, 건조 과정을 거쳐 매립, 퇴비화, 소각, 또는 바이오연료, 건축자재, 흡착제 등으로 활용될 수 있으며, 소각을 통해 부피를 줄이는 동시에 증기와 전기를 생산하기도 한다[3]. 용수 회수 및 재사용도 산업 내 중요한 전략으로 자리잡고 있다. 정화된 처리수는 공정수나 세척수, 냉각수로 재이용되며, 멤브레인 및 전기투석 기술을 통해 90% 이상의 물 회수가 가능하다는 보고도 있다. 이를 통해 전체 취수량을 최소화하고, 수자원 부담을 크게 줄일 수 있다[18, 30].

한편, 폐수 처리 과정은 온실가스 배출과도 관련된다. 호기성 처리 공정은 산소 공급과 슬러지 처리로 인해 에너지 소모와 $CO_2$ 배출이 있으며, 혐기성 공정은 메탄을 발생시킬 수 있다. 그러나 혐기성 공정의 경우 호기성 공정에 비해 슬러지 발생량이 적다는 장점을 가지고 있다[2]. 따라서 이 두 가지를 결합한 하이브리드 시스템을 통해 오염물질을 제거하고 온실가스 배출을 최소화하는 노력을 기울이고 있다. 연구에 따르면 활성슬러지 공정은 kg BOD당 330 g $CO_2$를 배출하는 반면, 하이브리드 시스템은 1.1 kg $CO_2$-eq/kg BOD 가량을 배출하여 수치상으로는 더 높게 나타나기도 한다[2]. 그러나 하이브리드 시스템은 슬러지 발생량을 kg BOD당 190 g에서 77 g 수준으로 감소시킬 수 있으며, 발생한 바이오가스를 연소하여 폐수처리장의 에너지 수요를 자급하기도 한다.

종합적으로 볼 때, 펄프·제지 산업은 효율적인 폐수 처리 기술과 에너지 회수, 물 재사용 전략을 통해 환경 영향을 크게 줄이고 있다. 특히, 재생 가능한 목재 섬유를 원료로 한다는 점에서 다른 다소비 산업에 비해 순환경제와 지속가능성에 기여할 수 있는 여지가 크며, 미래에도 환경 친화적 제조업의 대표적 사례로 자리매김할 수 있다.

### (4) 환경 영향 저감 기술 및 지속가능한 생산 전략

한국 제지산업은 에너지 집약적 성격을 가지고 있어 온실가스 배출과 자원 소비라는 도전을 안고 있지만, 동시에 재생 가능한 목재 섬유를 주원료로 활용하며 높은 재활용률을 기록하는 순환경제적 기반을 갖추고 있다는 점에서 지속가능한 발전에 기여할 수 있는 잠재력이 크다. 최근 국제 연구 결과에서도 한국은 2050년까지 탄소중립 달성이 상대적으로 용이한 국가군으로 분류되었으며, 한 가지의 최적 조치나 두 가지 정도의 중간 수준 조치만으로도 순배출 제로를 실현할 수 있는 것으로 분석되었다. 이는 한국 제지산업이 이미 높은 수준의 자원 회수 체계와 효율적 생산 구조를 갖추고 있음을 의미한다.

Dai 등[8]이 2023년에 출판한 논문에서는 2050년까지 탄소중립 목표를 달성하기 위해 전 세계 30개국의 펄프·제지 산업이 요구받는 주요 개선 항목을 비교하였다. 항목은 펄프원료 수확 관리, 에너지 조합, 단위당 에너지 소비, 폐기물 처리 방식, 메탄 포집률, 재활용률의 여섯 가지로 구분되며, 각 국가가 넷제로를 달성하기 위해 어떤 수준의 개선이 필요한지를 보여준다. 한국은 'easy group'에 속해 상대적으로 달성이 용이한 국가로 분류되었으며, 특히 에너지믹스와 재활용률 조정, 메탄포집이 주요 과제로 제시되었다. 이는 한국 제지산업이 이미 높은 탄소배출 조절 체계를 갖추고 있어, 극적인 제도 변화 없이도 탄소중립 달성이 가능함을 시사한다. 다시 말해, 한국은 기존의 순환경제 기반 위에 에너지 전환 정책과 폐기물 처리 효율화를 결합함으로써 2050년 탄소중립을 실현할 수 있는 잠재력이 크다는 것이다.

우선 에너지 효율화와 에너지원 전환은 한국 제지산업의 가장 중요한 과제로 제시된다. 국내 펄프·제지 공정에서 사용되는 에너지원 중 전력이 차지하는 비율은 상당히 높은데, 한국 전력망의 특성상 석탄과 천연가스 의존도가 여전히 높기 때문에 전기 사용 증가는 곧바로 탄소 배출 증가로 이어질 수밖에 없다. 따라서 제지산업의 탄소중립 전략은 단순한 전력 절감에 국한되지 않고, 사용되는 전력의 공급 구조를 친환경적으로 전환하는 것과 긴밀하게 연결되어야 한다. 특히 펄프와 제지공정에서 소비되는 에너지 중 일부를 다른 에너지원으로 대체한다면 탄소 배출량을 크게 줄일 수 있다. 이를 위해 공정 내에서 발생하는 흑액과 슬러지와 같은 부산물을 활용한 내부 자원 순환형 에너지 생산은 매우 효과적인 대안이 될 수 있다[15]. 실제로 일부 공장에서는 바이오매스 보일러와 열병합발전(CHP) 시스템을 통해 증기와 전력을 동시에 생산하며, 외부 화석연료 사용을

크게 줄이고 있다[19, 24]. 이러한 구조는 단순한 에너지 절약 차원을 넘어, 공정 내에서 발생하는 부산물을 다시 에너지로 전환하는 순환경제적 접근이라는 점에서 의미가 크다. 궁극적으로 한국 제지산업은 전력 의존도를 낮추고, 바이오매스·재생에너지 활용을 확대하며, 공정 효율화를 결합하는 전략을 통해 탄소 배출을 최소화할 수 있다. 이는 제지산업이 흔히 '에너지 다소비 산업'으로만 인식되는 한계를 넘어, 오히려 에너지를 자급하고 순환시키는 산업으로 자리매김할 수 있음을 보여준다.

한국의 경우 이미 세계적으로 손꼽히는 높은 종이자원 회수율을 달성하고 있다. 그러나 단순히 회수율을 높이는 것이 최선은 아니다. 재활용이 반복되면 섬유 길이가 짧아져 품질이 저하되고, 탈묵과정에서 슬러지가 발생하는 한계가 있다. 따라서 앞으로는 재활용률을 무조건적으로 확대하기보다는, 고품질 재생섬유의 활용을 극대화하고 첨가제를 통한 보완 기술을 도입하여 효율성을 높이는 방향이 필요하다. 동시에 슬러지를 시멘트 클링커, 벽돌, 바이오연료 등으로 전환하는 다각적 자원화 전략이 병행된다면, 단순한 폐기물 처리 단계를 넘어 타 산업과 연계된 순환경제 모델을 구축할 수 있을 것이다.

온실가스 감축을 위해서는 메탄 관리도 중요한 과제다. 특히 폐수 처리 과정에서 발생하는 메탄은 이산화탄소보다 훨씬 높은 지구온난화 잠재력을 가지므로, 포집과 활용을 통해 배출을 최소화하는 노력이 필요하다. 매립을 회피하고 재활용과 에너지 회수를 확대하는 것은 이러한 문제를 근본적으로 줄이는 데 기여한다. 한국은 이미 매립 비중이 낮은 편이지만, 향후에도 재활용을 통한 순환 구조를 강화함으로써 메탄 배출 억제 효과를 극대화할 수 있다.

마지막으로, 원료의 상당 부분을 해외에서 수입하는 한국 제지산업의 특성상 산림 자원의 지속가능성 확보는 필수적이다. 국제 산림인증(FSC, PEFC)을 통한 책임 있는 조달을 확대하고, 제재 부산물이나 비목재 자원의 활용을 늘린다면 공급 안정성과 환경적 신뢰성을 동시에 확보할 수 있다.

결론적으로, 한국 제지산업의 환경 영향 저감 전략은 단순히 공정 효율화에 국한되지 않는다. 재활용 체계의 질적 고도화, 메탄포집 및 활용, 공정 내 에너지 자급 확대, 그리고 지속가능한 산림 경영과 국제적 책임 조달이 결합될 때 비로소 통합적 접근이 가능하다. 이러한 전략을 통해 한국 제지산업은 탄소중립을 넘어 순환경제를 선도하는 산업으로 도약할 수 있을 것이며, 이는 국가 차원의 기후 목표 달성에도 크게 기여할 수 있다.

## 4. 종이의 재활용성과 생분해성

### (1) 종이 재활용의 환경 효과

종이 재활용은 단순히 폐기물의 양을 줄이는 차원을 넘어, 에너지와 자원 절약, 온실가스 배출 저감, 매립지 사용 감소 등 다양한 환경적 이점을 제공한다. 전반적으로 다수의 LCA 연구들은 재활용이 소각이나 매립과 같은 다른 처리 방식에 비해 환경적 이점이 크다는 점을 일관되게 보여주고 있다[4, 53, 33, 36, 37, 38]. 특히 에너지 사용 측면에서 재활용은 매립이나 소각과 비교했을 때 뚜렷한 효과를 나타낸다[37]. 버진 펄프 생산에는 목재 벌채, 칩 가공, 화학적 증해 및 표백과 같은 다수의 공정이 수반되며 이 과정에서 막대한 에너지가 소비된다. 반면 회수된 종이는 이미 섬유 상태에 가까워 상대적으로 단순한 공정을 거쳐 재펄프화가 가능하다. 이러한 특성 덕분에 종이 재활용은 에너지 절약과 온실가스 저감이라는 두 가지 효과를 동시에 달성하는 데 결정적인 역할을 한다.

매립된 종이는 혐기성 분해 과정에서 이산화탄소보다 약 20배 이상 강력한 온실가스인 메탄을 발생시키는데, 재활용은 이러한 메탄 발생을 근본적으로 차단한다는 점에서 큰 의미를 갖는다. 소각은 에너지 회수를 통해 일부 보완 효과가 있더라도 필연적으로 이산화탄소를 배출하기 때문에, 순 배출량 측면에서는 여전히 재활용보다 불리하다. 따라서 전반적으로 재활용이 기후변화 영향을 최소화하는 가장 효과적인 경로라 하겠다.

자원 절약 효과 역시 중요하다. 버진 펄프 생산은 산림 자원에 대한 높은 의존도를 요구하는 반면, 재활용은 이미 사용된 섬유를 다시 활용함으로써 목재 투입을 크게 줄인다. 이에 따라 산림 훼손 및 토지 이용 부담이 줄어들고, 장기적으로는 생물다양성 보전에도 기여할 수 있다.

수질 오염과 폐기물 관리 측면에서도 재활용은 상대적으로 유리하다. 버진 펄프 공정은 COD, BOD, AOX 등 수질 오염 부하가 높은 반면, 재활용 공정은 이러한 오염물 배출이 적은 편이다. 물론 탈묵 과정에서 잉크, 코팅제, 충전제, 단섬유 등이 포함된 슬러지가 발생하지만, 이는 기존에 매립될 수밖에 없었던 자원을 체계적으로 관리하는 방식으로 처리되기 때문에 환경적 순효과는 긍정적으로 평가된다. 종합하면, 재활용은 에너지 절감, 온실가스 배출 저감, 산림 자원 절약, 수질 오염 저감 등 다방면에서 명백한 환경적 이점을 갖는다.

### (2) 종이제품의 생분해 특성과 주요 영향 요소

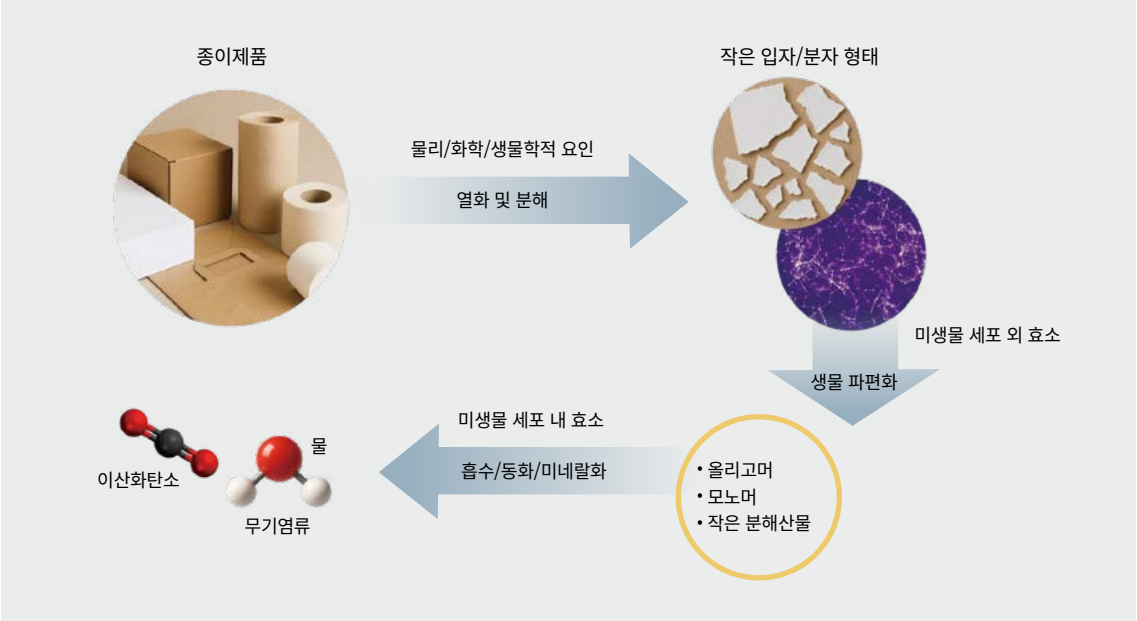
종이는 오랜 시간 동안 인류가 가장 널리 사용해 온 친환경 소재 중 하나로, 자연 순환에 편입될 수 있다는 점에서 높은 지속가능성을 가진다. 특히 폐기 후 자연환경에서 미생물에 의해 분해되어 최종적으로 이산화탄소와 물, 바이오매스로 전환되기 때문에 환경 부담이 상대적으로 적다. 최근 플라스틱 대체 소재에 대한 관심이 높아지면서, 종이제품의 생분해 특성은 더욱 주목받고 있다. 그러나 종이는 단순히 쉽게 분해되는 소재라는 일반적 인식을 넘어, 화학적 조성, 섬유 구조, 화학적 처리, 첨가제 사용, 펄프의 종류 등 다양한 요인에 따라 분해 속도와 거동이 달라질 수 있다. 따라서 종이제품의 생분해 특성과 이를 결정하는 주요 영향 요소를 이해하는 것은 제지 산업에서 제품의 성능과 환경성을 균형 있게 설계하는 데 중요한 의미를 가진다.

종이제품은 목재 섬유를 주원료로 하며, 그 주성분인 셀룰로오스와 헤미셀룰로오스는 미생물에 의해 쉽게 분해되는 특징을 가지고 있다. 따라서 종이제품은 일반적으로 높은 생분해성을 나타내며, 이는 환경 친화적인 소재로서 종이가 갖는 중요한 장점 중 하나이다. 다양한 연구 결과에 따르면, 모든 종이 재료는 표준 비교 대상으로 사용되는 미세결정 셀룰로오스(microcrystalline cellulose, MCC)보다 더 높은 최종 생분해도를 보이는 것으로 보고되었다. 이러한 결과는 특히 활엽수 표백 펄프, 침엽수 표백 펄프 등 리그닌이 제거된 종이에서 두드러지며, 이는 펄프의 높은 생분해 잠재력과 관련이 있다.

종이제품의 생분해 과정은 여러 단계로 이루어진다[21]. 먼저 물리적·화학적 요인에 의해 종이가 열화 및 분해되며, 이로 인해 미생물이 접근할 수 있는 표면적이 증가한다. 이후 미생물의 효소 작용에 의한 생물학적 파편화(biological fragmentation)가 일어나면서 섬유가 작은 조각으로 분해된다. 이 과정에서 올리고머, 모노머, 그리고 더 작은 분해산물이 형성되며, 최종적으로는 미생물의 대사 과정에 의해 흡수·동화 및 무기화(mineralization)가 진행된다. 그 결과 이산화탄소, 물, 그리고 기타 무기물이 최종 산물로 방출된다.

생분해 과정은 일반적으로 잠복기(lag phase), 급격히 분해가 일어나는 생분해 구간(biodegradation phase), 그리고 생분해율이 안정적으로 유지되는 구간(plateau phase)으로 구분할 수 있다[21]. 일반적으로 종이는 상대적으로 짧은 잠복기를 거쳐 빠른 초기 분해 속도를 보이며, 높은 최종 분해율에 도달한다. 이

그림 14-08. 종이의 생분해 과정




는 종이에 함유된 다당류의 구조적 특성과 밀접하게 관련되어 있다. 세부적으로 살펴보면, 종이를 구성하는 셀룰로오스와 헤미셀룰로스는 쉽게 미생물 효소에 의해 가수분해되어 단당류로 전환된다[22]. 특히 헤미셀룰로오스는 셀룰로오스보다도 분해가 용이하여 전체 생분해 과정에서 초기 반응을 주도하는 역할을 한다. 반면, 종이제품에 포함될 수 있는 리그닌이나 일부 불용성 첨가제는 생분해성을 저해하는 요인으로 작용하기도 한다.

종이제품의 생분해성에 영향을 주는 주요 요소는 크게 원료 조성, 가공 방식, 환경 조건으로 구분할 수 있다. 원료 측면에서는 활엽수 펄프가 침엽수 펄프보다 높은 생분해성을 보이는 경향이 있으며, 재활용 섬유의 경우 섬유 손상과 잔류 화학물질에 의해 생분해 속도가 다소 저하될 수 있다[22]. 가공 측면에서는 코팅이나 충전재 사용이 미생물 접근성을 제한하여 분해 속도를 늦추기도 한다. 또한 환경 조건 역시 중요한데, 온도, 수분, 산소 공급 여부가 생분해 속도와 최종 분해율을 크게 좌우한다. 호기성 조건에서는 비교적 빠른 분해가 일어나지만, 혐기성 조건에서는 메탄과 같은 온실가스가 발생할 수 있다.

종이의 생분해성은 화학적 처리 이후에도 일정 수준 유지되는 것으로 알려져 있다[41]. 예를 들어, 표백이나 충전재 첨가와 같은 가공 과정을 거친 뒤에도 종이

는 여전히 미생물에 의해 분해될 수 있는 성질을 유지한다. 이러한 특성은 종이가 지속가능한 순환 자원으로서 재활용뿐만 아니라 최종적으로 자연 분해 가능하다는 점에서 큰 의의를 지닌다.

일부 가공 처리는 생분해 속도에 영향을 줄 수 있다. 특히 종이의 내수성을 높이기 위해 흔히 사용하는 AKD(alkyl ketene dimer)와 같은 소수성 처리제는 섬유 표면에 발수성을 부여하여 물과 효소의 침투를 억제한다. 이로 인해 초기 생분해 속도가 지연되거나, 미생물 효소가 섬유 내부에 도달하는 데 시간이 더 소요될 수 있다. 그러나 이러한 소수성 처리가 된 종이 역시 시간이 지나면서 점차적으로 분해되어, 장기적으로는 종이 전체의 생분해가 이루어질 수 있다.

종합적으로 볼 때, 종이제품은 구조적으로 높은 생분해성을 지니며, 다양한 환경 조건에서도 자연적으로 분해될 수 있는 친환경적 특성을 가진다. 다만, 가공 처리와 환경적 요인에 따라 분해 속도와 정도가 달라질 수 있으므로, 종이제품의 생분해성을 평가할 때는 이러한 영향 요소들을 종합적으로 고려할 필요가 있다.

## 5. 친환경 인증

종이는 재생 가능한 목재 섬유를 기반으로 한 대표적 바이오 소재로서, 그 친환경성을 공신력 있게 검증하기 위해 다양한 국제적·국내적 인증 제도가 운영되고 있다. 이러한 인증은 단순히 '환경 친화적'이라는 홍보 수준을 넘어, 원료 조달에서 생산, 유통, 소비, 폐기까지 전 과정에서 환경적·사회적 책임을 체계적으로 보장하는 장치로 작동한다[7, 28]. 제지산업은 이러한 인증 제도를 적극적으로 도입함으로써 지속가능한 산림 관리와 책임 있는 생산, 그리고 소비자의 신뢰 확보라는 세 가지 목표를 동시에 달성하고자 한다.

우선, 산림 관리 인증은 종이 원료의 합법성과 지속가능성을 보장하는 핵심 제도이다. 대표적으로 FSC(Forest Stewardship Council, 산림관리협의회)와 PEFC (Programme for the Endorsement of Forest Certification, 산림인증제도) 두 가지 국제 인증이 널리 활용된다. FSC는 환경적 보전, 사회적 책임, 경제적 타당성을 균형 있게 고려한 산림 관리 원칙을 제시하며, PEFC는 각국의 지역적 특성을 반영한 인증 체계를 국제적으로 상호인정하는 방식으로 운영된다. 이들 인증을 받은 목재 원료는 단순한 벌채-조림 수준을 넘어 생물다양성 보존, 토양·수질 관리,

지역 공동체 권익 보장을 포함한 보다 포괄적인 지속가능성 기준을 충족시킨다.

다음으로, 친환경 종이제품인증은 생산과 유통 단계에서의 환경 성과를 소비자에게 직접적으로 보여주는 제도이다. 이 제도는 단순히 기업의 자율적 주장에 그치지 않고, 제3의 공신력 있는 기관이 과학적 근거를 바탕으로 평가·검증한다는 점에서 의미가 크다. 국제적으로는 유럽연합의 EU 에코라벨(EU Ecolabel), 북미의 Green Seal, 일본의 Eco Mark, 그리고 한국의 환경표지제도(환경마크, Korea Eco-Label) 등이 대표적이다.

EU 에코라벨은 제품 전 과정에서의 환경 성과를 종합적으로 고려하는데, 예컨대 인쇄용지의 경우 재생섬유 사용 비율, 표백공정에서의 염소 화합물 사용 여부, 생산 과정에서의 에너지 효율성, 수질오염 지표(COD, AOX 등), 대기 배출 관리 수준을 모두 종합적으로 평가한다. 북미의 Green Seal 역시 재활용 원료 사용량, 수명주기 전반의 환경 성과, 제품 안전성까지 포함해 평가하며, 인증 제품은 공공조달 시장에서도 경쟁력을 갖게 된다. 일본의 Eco Mark는 '환경에 친화적인 제품임을 소비자가 한눈에 알 수 있도록 하는' 목적이 강하며, 일본 내 친환경 조달제도(Green Purchasing Law)와 연계되어 있다.

한국의 환경마크 제도는 1992년부터 운영되어 온 대표적인 친환경 제품 인증 제도이며, 제지산업과의 연계성이 특히 크다. 이 제도는 환경부와 한국환경산업기술원이 관리하며, 종이제품에 대해서는 재생섬유 사용 비율이 일정 기준 이상일 것, 유해 화학물질(형광증백제, 염소계 표백제 등)의 사용이 제한 기준 이하일 것, 제품 생산 과정에서의 에너지 및 수자원 사용이 합리적일 것, 폐수·배출가스 관리가 법적 규제를 충족하거나 그 이하일 것 등을 평가한다. 예를 들어, 포장재가 환경마크를 획득하기 위해서는 중질지 및 백상지는 30%, 아트지 및 크라프트지는 30%, 골판지는 골심지 90% 이상, 라이너 원지 50% 이상, 백판지 65% 이상의 재생섬유를 포함해야 하며, 무염소 표백(ECF/TCF 공정)을 적용했는지도 중요한 기준이 된다(EL606:2024).

환경마크 인증은 국내 제지업체들이 국제 기준에 부합하는 제품을 생산·공급할 수 있도록 유도한다는 점에서 의미가 크다. 동시에 소비자 입장에서는 제품에 부착된 로고를 통해 '이 종이가 재생섬유를 사용했고, 유해 화학물질 관리와 배출 저감을 충족했다'는 사실을 쉽게 확인할 수 있다. 이는 소비자의 친환경 소비를 장려하는 한편, 기업이 시장에서 친환경 이미지를 제고하고 경쟁력을 강화하는 데 중요한 역할을 한다.

또한, 환경마크는 단순히 인쇄용지에 국한되지 않고 포장재, 위생용지, 특수지 등 다양한 제품군에도 적용된다. 최근에는 친환경 패키징 수요 증가에 따라 포장재 분야에서 환경마크 인증이 크게 확대되고 있으며, 이는 국내외 브랜드 기업들의 ESG 경영 요구와도 직접적으로 연결된다. 결과적으로 한국의 환경마크 제도는 외국의 제도(EU Ecolabel, Green Seal, Eco Mark)와 유사한 구조를 가지면서도, 국내 산업과 소비자 환경에 맞춘 특화된 기준을 제공하여 제지산업의 지속가능성과 소비자 신뢰를 동시에 뒷받침하고 있다.

**그림 14-09.** 다양한 친환경 인증 마크




탄소발자국(Carbon Footprint) 인증은 최근 들어 더욱 주목받고 있는 분야이다. 이는 제품 생산과정에서 발생하는 온실가스 배출량을 계량화하고, 이를 소비자에게 라벨로 제공하는 제도로, 영국의 Carbon Trust 라벨이나 한국의 저탄소제품 인증이 대표적이다. 제지산업에서는 종이제품 1 톤당 배출되는 $CO_2$-eq를 평가하여 저감 노력을 소비자에게 투명하게 알림으로써, 탄소중립 사회로의 전환 과

정에서 책임 있는 산업 이미지를 구축할 수 있다.

마지막으로, 국제표준화기구(ISO) 인증은 경영 시스템 차원에서의 환경 관리와 품질 보증을 뒷받침한다. ISO 14001(환경경영시스템), ISO 14040(전과정평가), ISO 50001(에너지경영시스템) 등은 제지 기업이 국제적으로 통용되는 관리체계를 도입·운영하고 있음을 의미한다. 이는 단순히 개별 제품의 친환경성을 넘어서 기업 전체가 지속가능경영을 실천하고 있음을 보여주는 신호로 작용한다.

종합하면, 친환경 인증은 원료 단계의 지속가능성(FSC, PEFC)에서부터 제품 차원의 환경 성과(EU Ecolabel, 환경마크), 탄소 배출 관리(Carbon Footprint), 그리고 기업 경영 시스템(ISO)에 이르기까지 다층적으로 운영된다. 한국 제지산업은 이러한 인증 제도를 적극 활용함으로써 국제 경쟁력을 강화하는 동시에, 소비자에게 책임 있는 선택지를 제공하고 있다. 이는 곧 제지산업이 단순히 '친환경 소재'를 생산하는 데 그치지 않고, 지속가능성과 투명성을 제도적으로 보장하는 산업으로 발전해가고 있음을 보여준다.

## 6. 친환경 종이제품

종이는 본래부터 재생 가능하고 생분해되는 친환경적 속성을 가지고 있지만, 최근에는 기존의 일반 용도를 넘어 플라스틱 대체 소재, 기능성 포장재 등 새로운 응용 분야에서 그 가능성이 확장되고 있다. 이러한 제품들은 단순히 종이의 이미지 개선을 넘어, 자원 절약·탄소 저감·플라스틱 오염 완화라는 구체적 환경 효과를 실현한다는 점에서 의미가 크다.

가장 주목받는 변화 중 하나는 일회용 플라스틱을 대체하는 종이 기반 소재의 확산이다. 일회용 빨대, 쇼핑백, 식품포장재 등은 과거 플라스틱 의존도가 높았으나, 전 세계적으로 플라스틱 사용 규제가 강화되면서 종이로의 전환이 빠르게 이루어지고 있다. 종이는 자연 분해가 가능하다는 근본적 장점 덕분에, 사용 후 처리 문제에서 플라스틱과 뚜렷이 차별화된다. 예를 들어 유럽과 미국에서는 이미 대형 유통업체들이 종이 쇼핑백을 표준으로 채택하고 있으며, 국내에서도 다수의 식음료 브랜드가 종이 빨대와 종이 포장재를 도입하여 환경친화적 브랜드 이미지를 강화하고 있다.

그림 14-10은 다양한 소재로 제작된 일회용 컵의 생애주기 전 과정에서 발생하는



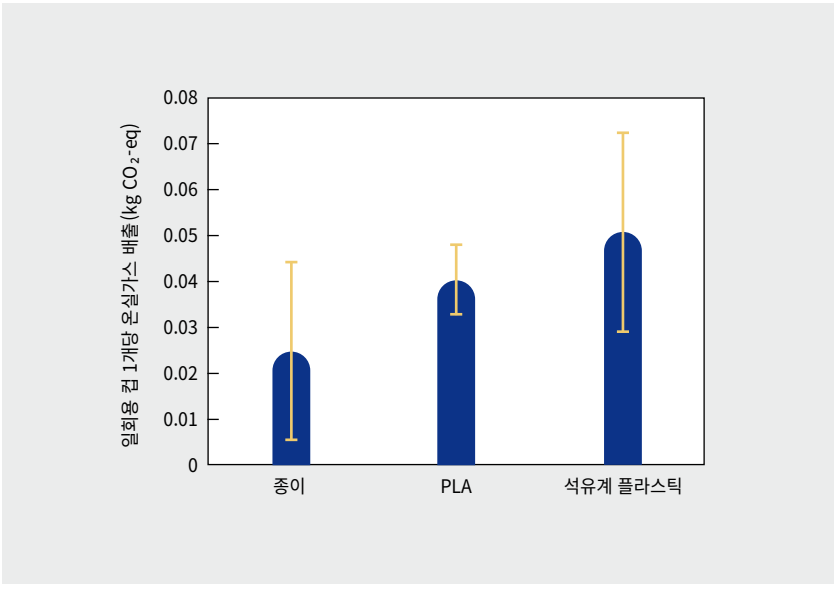
플라스틱 포장을 대체할 친환경 종이 패키징 (사진제공_무림페이퍼)

온실가스 배출량을 비교한 결과를 보여준다[35]. 내수성을 확보하기 위해 적용되는 코팅 소재에 따라 세부적인 영향은 다소 차이가 있지만, 전체적으로 종이컵은 플라스틱 컵에 비해 더 낮은 온실가스 배출량을 기록하였다. 이는 재생섬유 사용과 높은 회수율, 그리고 폐기 후 생분해성을 고려할 때 더욱 두드러지는 결과다. 따라서 일회용 제품 분야에서도 종이는 플라스틱 대비 명확한 환경적 우위를 지니며, 향후 제도적 규제와 소비자 친환경 인식 변화에 따라 그 활용 범위가 더욱 확대될 것으로 전망된다.

그중에서도 포장재는 제지산업의 큰 응용 분야 중 하나이며, 최근에는 단순한 포장 기능을 넘어 기능성을 갖춘 친환경 포장재 개발이 활발하다. 예를 들어 고강도 라이너보드, 방습·방유 특성을 강화한 종이 패키징, 전자상거래용 완충 포장재 등은 기존 플라스틱 필름과 스티로폼을 대체하고 있다. 특히 식품포장재의 경우, 보관 중 변질을 막으면서도 재활용이 가능하여야 하므로, 다층구조 종이나 기능성 코팅 종이가 널리 연구·개발되고 있다. 국내에서도 주요 제지기업들이 방습 기능을 갖춘 친환경 포장재를 출시하며 글로벌 시장에 대응하고 있다.

일반적인 종이제품은 물이나 기름에 약하다는 단점이 있었기 때문에, 플라스틱이나 알루미늄 코팅이 불가피하게 사용되었다. 그러나 최근에는 생분해성 코팅 기

**그림 14-10.** 일회용 컵의 온실가스 배출량

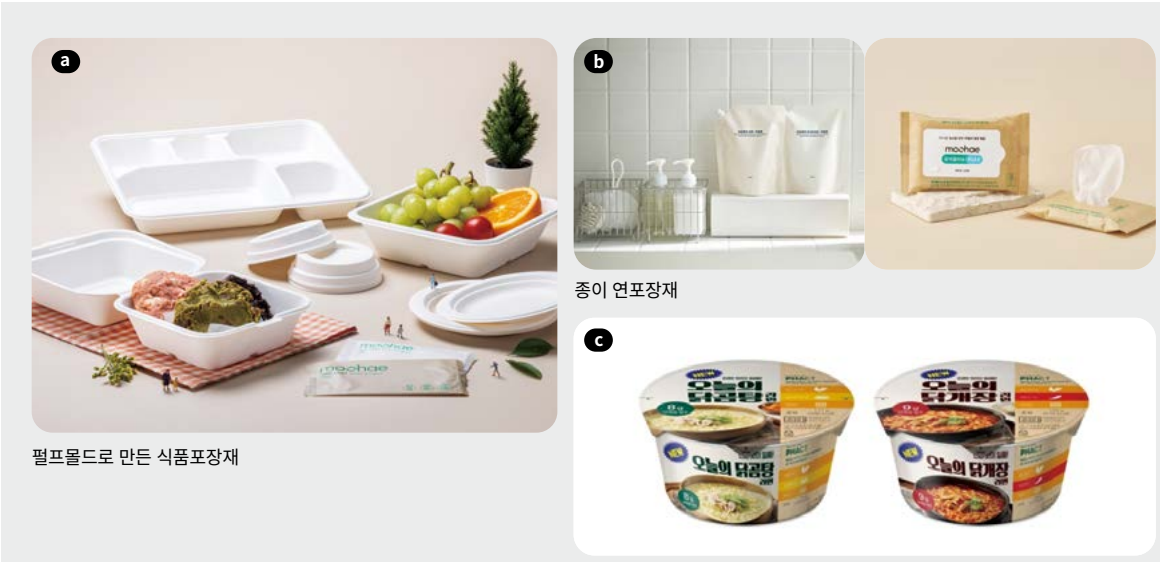



출처: Van Der Harst, E., & Potting, J. (2013). Disposable cup LCAs. Environmental Impact Assessment Review, 43, 86-96. HYPERLINK "https//doi.org/10.1016/j.eiar.2013.06.006"https://doi.org/10.1016/j.eiar.2013.06.006

술이 빠르게 발전하고 있다. PLA(폴리락트산), PHA(폴리하이드록시알카노에이트) 등 바이오 기반 고분자를 종이 표면에 코팅하여 내수성·내유성을 확보하면서도, 폐기 후에는 생분해가 가능하도록 한 것이다. 이러한 기술은 일회용 컵, 패스트푸드 포장지, 식품 접촉용 포장재 등에서 플라스틱 대체 효과를 극대화한다. 국내에서도 2020년대 들어 다수의 제지기업이 '플라스틱 프리(plastic free)'를 표방하며 바이오 코팅 종이컵과 포장재를 상용화하고 있다. 이는 정부의 일회용 플라스틱 규제와 ESG 경영 강화 요구에 부응하는 동시에, 국제적으로도 시장 경쟁력을 확보하는 기반이 된다.

그림 14-11은 최근 국내에서 개발·상용화된 다양한 친환경 종이 소재 및 제품 사례를 보여준다. 좌측 상단은 펄프몰드(Molded pulp)를 이용해 제작된 식품포장재로, 성형 과정에서 플라스틱 용기를 대체할 수 있도록 설계되었다. 우측 상단은 세제나 생활용품을 담는 데 사용되는 종이 연포장재로, 기존의 플라스틱 파우치를 대체하며 재활용이 용이하다는 장점을 지닌다. 하단의 사례는 생분해성 고분자 코팅 기술을 적용한 종이 용기 포장재로, 즉석식품과 같은 내용물의 보관에 필요한 내수성과 내유성을 확보하면서도 사용 후에는 플라스틱 쓰레기를 발생시키지 않는다.

**그림 14-11.** 다양한 친환경 종이제품




출처: CJ제일제당, 무림P&P, 한솔제지

이처럼 다양한 형태의 친환경 종이제품들은 플라스틱 대체 효과, 재활용 용이성, 생분해성 보장이라는 측면에서 환경적 이점을 제공할 뿐 아니라, 실제 생활 속에서 소비자가 체감할 수 있는 친환경 선택지를 확대한다. 특히 국내 제지기업과 포장기업들은 정부의 일회용 플라스틱 규제와 ESG경영 요구에 대응하여, 생활용품·식품·전자상거래 포장 등 다양한 분야로 이러한 제품군을 빠르게 확대해 나가고 있다.

## 7. 요약 및 결론

종이는 인류 역사 속에서 가장 오래된 소재 중 하나이자, 오늘날에도 기록·포장·커뮤니케이션 등 다양한 영역에서 필수적인 역할을 하고 있다. 그러나 단순히 '나무를 베어 만든다'는 인식 속에서 환경 부담의 상징처럼 오해받기도 한다. 본 장에서는 종이의 생애주기적 관점에서 친환경성을 분석하고, 원료·생산·재활용·폐기까지 전 과정을 살펴보았다. 이를 통해 종이가 단순한 소비재를 넘어 지속가능한 사회로의 전환을 이끄는 핵심 소재임을 확인할 수 있었다.

첫째, 원료의 지속가능성 측면에서 종이는 천연펄프와 재활용 펄프라는 두 축 위에서 발전해 왔다. 천연펄프는 고품질 종이 생산을 위해 여전히 필수적이며, FSC와 PEFC 같은 국제 산림 인증제도는 지속가능한 조달을 보장한다. 동시에 재활용 펄프는 에너지·물·온실가스 배출 저감 효과가 뚜렷하며, 한국은 세계 최고 수준의 폐지 회수율(85.6%)을 달성하고 있다. 이는 제지산업이 천연 자원과 재활용 자원을 균형 있게 활용하는 순환경제의 대표적인 모델임을 보여준다.

둘째, 생산 과정에서의 환경 영향은 자원 고갈, 에너지 소비, 온실가스 배출, 수질오염, 고형폐기물 발생 등 다양한 차원에서 나타난다. 그러나 제지산업은 단순히 에너지 다소비 산업으로 규정되기보다는, 공정 내 부산물을 에너지원으로 회수해 자급하는 독특한 구조를 갖는다. 흑액을 연료화한 에너지 회수, 폐수 고도 처리, 건조 공정 최적화 등은 이미 보편적으로 도입되었으며, 이를 통해 외부 화석연료 의존도를 줄이고 탄소중립 사회로의 전환에 기여할 수 있는 잠재력을 입증하고 있다.

셋째, 재활용성과 생분해성은 종이가 가진 가장 큰 환경적 장점이다. 다수의 LCA 연구는 재활용이 소각이나 매립에 비해 명백한 환경 이점을 제공한다는 점을 일관되게 보여준다. 특히 매립 회피를 통해 메탄 배출을 근본적으로 차단하는 효과는 기후변화 완화에 결정적이다. 또한 종이는 셀룰로오스를 기반으로 한 생분해성 소

재이므로, 폐기 후에도 미세플라스틱처럼 장기적 환경 부담을 남기지 않는다.

넷째, 친환경 인증 제도는 종이의 지속가능성을 제도적으로 보장하는 핵심 수단이다. 국제적으로 FSC·PEFC(산림 관리), EU 에코라벨·Green Seal·Eco Mark(제품 성과), Carbon Footprint 라벨(탄소 배출 관리), ISO 시리즈(경영 시스템) 등이 활용되고 있으며, 국내에서도 환경마크(환경표지 인증) 제도가 운영되어 재생섬유 비율, 유해 화학물질 사용, 에너지·폐수 관리 등 구체적 기준을 제시한다. 이러한 인증은 기업의 책임 있는 생산을 유도하고 소비자에게 신뢰성 있는 정보를 제공한다는 점에서 의의가 크다.

다섯째, 친환경 종이 제품 사례는 종이가 더 이상 단순한 기록재가 아니라는 사실을 보여준다. 플라스틱 빨대·컵·쇼핑백을 대체하는 종이 소재, 방습·방유 기능을 갖춘 고기능성 포장재, PLA·PHA 기반의 생분해성 코팅 기술은 대표적이다. 특히 국내 기업들이 출시한 펄프몰드 식품 용기, 종이 연포장재, 생분해성 코팅 종이 용기는 ESG 경영과 글로벌 규제 변화에 대응하는 실질적 성과로 평가된다.

결론적으로, 종이의 친환경성은 생분해성, 재생 가능성, 재활용성, 생산공정 개선이라는 네 가지 축을 통해 입증된다. 제지산업은 과거의 오해와 달리, 원료 관리·에너지 회수·재활용 체계·친환경 인증·신기술 도입을 통해 순환경제와 탄소중립 사회에 기여할 수 있는 대표적 산업이다. 앞으로의 과제는 재활용 섬유의 품질을 높이고, 슬러지와 같은 부산물의 자원화를 확대하며, 친환경 에너지원 전환을 추진하고, 소비자의 인식을 제고하는 방향으로 나아가는 것이다. 이러한 노력이 결합될 때 종이는 단순한 대체재를 넘어, 지속가능한 미래 사회를 설계하는 핵심 친환경 소재로 자리매김할 수 있을 것이다.



자원순환과 지속가능성을 담고 있는 펄프·종이제품

## 참고문헌


[1] Ali, M., & Sreekrishnan, T. R. (2001). Aquatic toxicity from pulp and paper mill effluents: A review. Advances in Environmental Research, 5(2), 175–196. HYPERLINK "https//doi.org/10.1016/S1093-0191(00)00055-1"https://doi.org/10.1016/S1093-0191(00)00055-1

[2] Ashrafi, O., Yerushalmi, L., & Haghighat, F. (2015). Wastewater treatment in the pulp-and-paper industry: A review of treatment processes and the associated greenhouse gas emission. Journal of Environmental Management, 158, 146–157. HYPERLINK "https//doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.05.010"https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.05.010

[3] Bajpai, P. (2015). Management of Pulp and Paper Mill Waste. Springer International Publishing. HYPERLINK "https//doi.org/10.1007/978-3-319-11788-1"https://doi.org/10.1007/978-3-319-11788-1

[4] Bloemhof-Ruwaard, J. M., Van Wassenhove, L. N., Gabel, H. L., & Weaver, P. M. (1996). An environmental life cycle optimization model for the European pulp and paper industry. Omega, 24(6), 615–629. HYPERLINK "https//doi.org/10.1016/S0305-0483(96)00026-6"https://doi.org/10.1016/S0305-0483(96)00026-6

[5] Chang, J. C., Beach, R. H., & Olivetti, E. A. (2019). Consequential effects of increased use of recycled fiber in the United States pulp and paper industry. Journal of Cleaner Production, 241, 118133. HYPERLINK "https//doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118133"https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118133

[6] Corcelli, F., Fiorentino, G., Vehmas, J., & Ulgiati, S. (2018). Energy efficiency and environmental assessment of papermaking from chemical pulp—A Finland case study. Journal of Cleaner Production, 198, 96–111. HYPERLINK "https//doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.018"https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.018

[7] Costa, D., Quinteiro, P., Pereira, V., & Dias, A. C. (2022). Social life cycle assessment based on input-output analysis of the Portuguese pulp and paper sector. Journal of Cleaner Production, 330, 129851. HYPERLINK "https//doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129851"https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129851

[8] Dai, M., Sun, M., Chen, B., et al. (2024). Country-specific net-zero strategies of the pulp and paper industry. Nature, 626(7998), 327–334. HYPERLINK "https//doi.org/10.1038/s41586-023-06962-0"https://doi.org/10.1038/s41586-023-06962-0

[9] Energy efficiency and GHG emissions: Prospective scenarios for the pulp and paper industry. (2018). Publications Office. HYPERLINK "https//doi.org/10.2760/035301"https://doi.org/10.2760/035301

[10] EPN-recycled-fiber-fact-sheet. (n.d.).

[11] European Paper Recycling Council. (2019). Monitoring Report 2019—European Declaration on Paper Recycling 2016–2020.

[12] European Paper Recycling Council. (2022a). Monitoring Report 2022—European Declaration on Paper Recycling 2021–2030.

[13] European Paper Recycling Council. (2022b). Monitoring Report 2023—European Declaration on Paper Recycling 2021–2030.

[14] Ferrara, C., & De Feo, G. (2021). Environmental Assessment of the Recycled Paper Production: The Effects of Energy Supply Source. Sustainability, 13(9), 4841. HYPERLINK "https//doi.org/10.3390/su13094841"https://doi.org/10.3390/su13094841

[15] Furszyfer Del Rio, D. D., Sovacool, B. K., et al. (2022). Decarbonizing the pulp and paper industry. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 167, 112706. HYPERLINK "https//doi.org/10.1016/j.rser.2022.112706"https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112706

[16] Gemechu, E. D., et al. (2013). GHG emissions comparison of tissue paper. The International Journal of Life Cycle Assessment, 18(8), 1618–1628. HYPERLINK "https//doi.org/10.1007/s11367-013-0597-x"https://doi.org/10.1007/s11367-013-0597-x

[17] Hong, S., Park, J., Kang, S., Oh, K., & Kwon, S. (2025). Recent Trends in LCA Studies on Pulp-and Paper-Based Materials. Journal of Korea TAPPI, 57(6), 5–24.

[18] Hubbe, M. A., et al. (2016). Wastewater Treatment and Reclamation. BioResources, 11(3), 7953–8091. HYPERLINK "https//doi.org/10.15376/biores.11.3.Hubbe"https://doi.org/10.15376/biores.11.3.Hubbe

[19] Kasah, T. (2014). LCA of a newsprint paper machine. The International Journal of Life Cycle Assessment, 19(2), 417–428. HYPERLINK "https//doi.org/10.1007/s11367-013-

0640-y"https://doi.org/10.1007/s11367-013-0640-y

[20] Kinsella, S. (2012). Paperwork: Comparing recycled to virgin paper.

[21] Kwon, S. (2025). Biodegradation Mechanisms Review. Journal of Korea TAPPI, 57(2), 5–19. HYPERLINK "https//doi.org/10.7584/JKTAPPI.2025.4.57.2.5"https://doi.org/10.7584/JKTAPPI.2025.4.57.2.5

[22] Kwon, S., et al. (2021). Effect of lignocellulosic fiber composition on the aquatic biodegradation of wood pulps and the isolated cellulose, hemicellulose and lignin components: kinetic modelling of the biodegradation process. Cellulose, 28(5), 2863–2877. HYPERLINK "https//doi.org/10.1007/s10570-021-03680-6"https://doi.org/10.1007/s10570-021-03680-6

[23] ENVIRON. (2012). Life Cycle Assessment of Deinked and Virgin Pulp.

[24] Lopes, E., et al. (2003). LCA in Portuguese pulp and paper industry. Journal of Cleaner Production, 11(1), 51–59. HYPERLINK "https//doi.org/10.1016/S0959-6526(02)00005-7"https://doi.org/10.1016/S0959-6526(02)00005-7

[25] Manda, B. M. K., et al. (2012). Innovations in papermaking LCA. Science of The Total Environment, 439, 307–320. HYPERLINK "https//doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.09.022"https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.09.022

[26] Moya, J. A., & Pavel, C. C. (2018). Energy efficiency and GHG emissions report.

[27] Owttrim, C. G., et al. (2022). Energy saving bandwidths. Energy Conversion and Management, 258, 115535. HYPERLINK "https//doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115535"https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115535

[28] Pihkola, H., et al. (2025). Social-LCA insights. The International Journal of Life Cycle Assessment, 30(6), 1435–1450. HYPERLINK "https//doi.org/10.1007/s11367-024-02374-y"https://doi.org/10.1007/s11367-024-02374-y

[29] Pineda‐Henson, R., et al. (2002). Environmental Performance Evaluation. Journal of Industrial Ecology, 6(1), 15–28. HYPERLINK "https//doi.org/10.1162/108819802320971614"https://doi.org/10.1162/108819802320971614

[30] Pokhrel, D., & Viraraghavan, T. (2004). Wastewater treatment review. Science of The Total Environment, 333, 37–58. HYPERLINK "https//doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.05.017"https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.05.017

[31] Recycled Paper Fact Sheet: Paper to Protect the Planet. (n.d.).

[32] Smook, G. A. (2002). Handbook for pulp & paper technologists (3rd ed.).

[33] Sun, M., et al. (2018). Energy use and carbon emissions review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 92, 823–833. HYPERLINK "https//doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.036"https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.036

[34] Thompson, G., et al. (2001.). Treatment of pulp and paper mill effluent: a review. Bioresources Technology, 77(3), 275-286. HYPERLINK "https//doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00060-2"https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00060-2

[35] Van Der Harst, E., & Potting, J. (2013). Disposable cup LCAs. Environmental Impact Assessment Review, 43, 86–96. HYPERLINK "https//doi.org/10.1016/j.eiar.2013.06.006"https://doi.org/10.1016/j.eiar.2013.06.006

[36] Van Ewijk, S., et al. (2018). Global Life Cycle Paper Flows. Journal of Industrial Ecology, 22(4), 686–693. HYPERLINK "https//doi.org/10.1111/jiec.12613"https://doi.org/10.1111/jiec.12613

[37] Villanueva, A., & Wenzel, H. (2007). Paper waste LCA review. Waste Management, 27(8), S29–S46. HYPERLINK "https//doi.org/10.1016/j.wasman.2007.02.019"https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.02.019

[38] Wang, L., et al. (2012). LCA of waste paper management. Bioresource Technology, 120, 89–98. HYPERLINK "https//doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.130"https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.130

[39] Zhao, Q., et al. (2019). Energy flows and carbon footprint. Forests, 10, 725.

[40] European commission (EC). (2011) A roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050. HYPERLINK "http//ec.europa.eu/clima/documentation/roadmap/docs/com_2011_112_en.pdf"http://ec.europa.eu/clima/documentation/roadmap/docs/com_2011_112_en.pdf

[41] Kwon, Soojin, et al. Effect of Paper-making Additives on Biodegradation of Lignocellulosic Fibers. BioResources 19.4 (2024): 8028.

# 제지공정공학: 기초와 응용

PAPERMAKING PROCESS ENGINEERING
PRINCIPLES AND APPLICATIONS


**발 행 일** 2026년 8월 31일(1판 1쇄)

**발 행 처** 사단법인 한국펄프종이공학회

**발 행 인** 김진두

**지 은 이** 이학래, 이태주, 김진두, 김철환
임완희, 이지영, 윤혜정, 정명준
성용주, 이중명, 오규덕, 한정수
류정용, 권수진

**제작후원** 무림페이퍼, 무림SP, 무림P&P

**디 자 인** ㈜디자인페이지 02.324.9422
esccity@naver.com

**사단법인 한국펄프종이공학회**
www.ktappi.or.kr
ISBN 978-89-950520-6-8



• 본 책자의 판권은 사단법인 한국펄프종이공학회에 있습니다.
• 이 책 내용의 전부 또는 일부를 재사용하려면
반드시 사단법인 한국펄프종이공학회의 서면 동의를 받아야 합니다.

# PAPERMAKING PROCESS ENGINEERING

PRINCIPLES AND APPLICATIONS


이학래

이태주

김진두

김철환

임완희

이지영

윤혜정

정명준

성용주

이중명

오규덕

한정수

류정용

권수진

공저



비매품/무료

93530

9 788995 052068

ISBN 978-89-950520-6-8