



Chapter 1. 지구와 환경

이나윤 대전 둔산초 3

이은석 서울 갈현초 6

이하랑 경기 판곡중 1

01

# 눈에 보이지 않는 종이를 만들 수 있을까요

A



이덕환 교수가 답하다

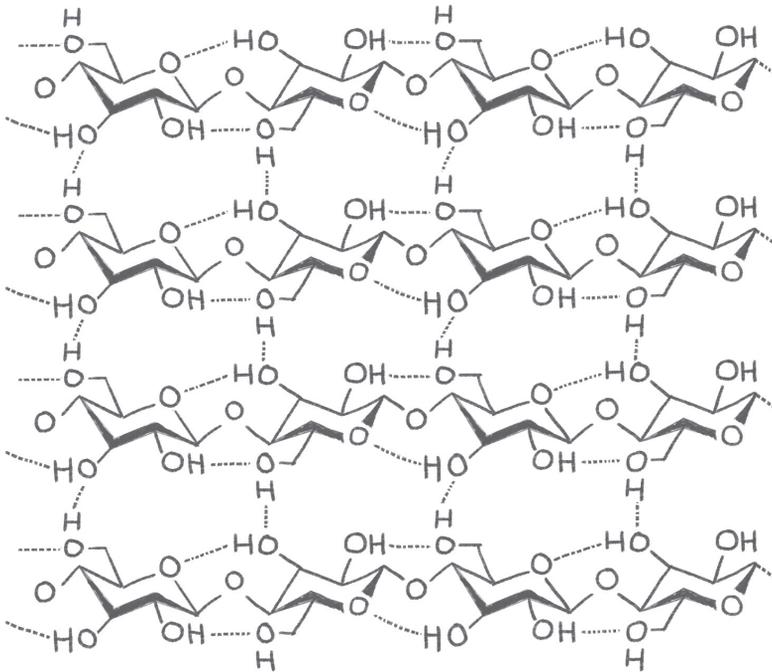
종이는 식물성 섬유를 압착해서 만든 얇은 부직포입니다. 섬유의 주성분은 셀룰로오스로 화학식은  $(C_6(H_2O)_5)_n$ 입니다. 셀룰로오스는 긴 사슬 형태로 연결된 탄수화물로, D-포도당 단위체 수백~수천 개가 글리코사이드 결합으로 연결돼 선형 사슬을 이루고, 이 사슬들이 중첩돼 격자형 모양을 형성합니다. 가시광선을 흡수하지 않아 투명한 소재로 쓰입니다.

하지만 식물성 섬유에서는 셀룰로오스 사슬 사이의 빈틈이 가시광선을 산란시켜 불투명하게 보입니다. 종이 역시 섬유의 올이 제멋대로 배열돼 있어 불투명하지요. 종이의 질감을 부드럽게 만들고, 표면을 매끄럽게 하기 위해서 넣어주는 고령토와 같은 충전재도 종이를 불투명하게 만드는 데 일조합니다.

하지만 투명한 종이가 필요한 순간이 있습니다. 똑같은 그림을 여러 개 그려야 할 때가 대표적이지요. 지금은 똑같은 그림을 여러 장 찍어내고

싶을 때 복사기를 이용하면 됩니다. 하지만 복사기가 일반화되기 전에는 그림을 직접 따라 그리는 수밖에 없었습니다. 이때는 반투명한 ‘트레이싱 용지(기름종이)’를 사용했습니다. 복제할 그림 위에 기름종이를 올려놓으면 그림이 비쳐서 기름종이에 똑같이 따라 그릴 수 있지요. 건축 설계나 디자인 작업을 할 때 많이 사용했습니다. 기름종이는 대부분 면이나 마에서 분리한 셀룰로오스 섬유를 가느다란 극세사로 가공해서 만들었습니다. 새끼 양이나 송아지의 가죽을 가공해서 만든 독피지(벨럼)를 투명한 종이의 대용품으로 사용하기도 했습니다.

최근에는 새로운 기술을 이용해 종이를 투명하게 만듭니다. 셀룰로오스 섬유를 나노미터(nm·1 나노미터는 10억분의 1m) 길이로 가공한 나노 소재를 사



수소결합으로 연결된 셀룰로오스 분자



용하는 게 대표적입니다. 나노 섬유 사이에 만들어지는 빈틈이 가시광선을 산란시키지 못하도록 만드는 기술이 핵심입니다. 이런 방법으로 만든 투명한 종이는 유리보다 훨씬 가벼우면서도 표면이 매끄럽고, 열에도 안정합니다. 또 일반적인 종이와 마찬가지로 말거나 접을 수도 있습니다. 셀룰로오스는 친수성이 좋고 강도가 커서 필름으로 제작해 다양한 곳에서 이용됩니다.

투명한 셀룰로오스 종이를 사용하면 앞으로 다양한 형태의 플렉서블 전자소자를 개발할 수 있을 것으로 기대됩니다. 특히 무겁고 딱딱한 유리로 만든 태양광 소자의 단점도 극복할 수 있습니다.

## 현대 종이를 탄생시킨 화학 기술

종이는 문자, 인쇄술 등과 함께 인류의 위대한 발명품 중 하나로 꼽힙니다. 현대 종이의 시초는 2세기 초 중국 후한의 환관이었던 채륜이 당시 포장용으로 사용하던 전통 종이를 개량해서 만든 ‘채륜지(蔡倫紙)’입니다. 이 채륜지가 식물 섬유를 이용해 만든 종이의 기원이라는 뜻입니다. 얇고 가벼우면서도 아주 질기고, 심지어 값이 싼 채륜지는 글자를 쓰거나 인쇄하는 용도로도 사용되기 시작됐습니다.

채륜지가 중국을 넘어 전 세계로 널리 퍼지면서 파피루스, 양피지, 비단, 대나무의 시대가 막을 내리게 됐습니다. 이후 문자 기록과 학문 연구는 획기적으로 발전하게 됐습니다. 중국의 종이 제조 기술은 4세기 무렵 국내에 전해졌고, 8세기 무렵에는 중국 당나라에서 이슬람을 거쳐 서양에도 전해졌습니다.

오늘날 우리가 사용하는 종이는 목재에서 생산한 셀룰로오스 섬유인 펄

프를 이용해서 만듭니다. 종이를 생산하는 과정에는 다양한 화학 기술이 사용됩니다. 원목을 잘게 쪼갠 칩을 섭씨 150도의 아황산 소듐( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) 수용액에 넣은 뒤 오랜 시간 훈증시켜서 ‘아황산 펄프(sulfite pulp)’로 만듭니다. 수산화 소듐( $\text{NaOH}$ )과 황화 소듐( $\text{Na}_2\text{S}$ )을 넣은 수용액을 이용해서 ‘크라프트 펄프(Kraft pulp)’로 만들기도 합니다.

오늘날 종이는 일상생활에 없어서는 안 되는 필수품입니다. 종이는 글을 쓰기 위한 용도만으로 쓰이는 것이 아닙니다. 포장, 인쇄, 장식지와 벽지, 화장지 등으로 주로 많이 쓰이지만, 지폐와 증권의 발행에 사용되는 종이의 양도 무시할 수 없을 정도로 많습니다.

정보화 사회가 빠르게 진행되면서 ‘종이 없는 세상’을 만들어야 한다는 목소리도 있습니다. 그러나 현실은 그렇게 만만치 않습니다. 컴퓨터와 프린터가 등장하면서 오히려 고급 인쇄용 종이의 소비는 늘었습니다. 택배, 배달 등 비대면 소비가 생활화되면서 포장에 이용되는 종이 소비량도 늘고 있지요.

## 셀룰로오스 기반 종이를 대체할 미래 소재

삶의 질이 개선되면서 전 세계적으로 종이의 사용량이 빠르게 늘어나고 있습니다. 매년 4억 t(톤) 이상의 종이가 생산돼 소비되고 있습니다. 2016년 한국제지연합회 통계에 따르면 세계 지류 생산량은 중국(1억 919만 t), 미국(7267만 t), 일본(2622만 t), 독일(2260만 t) 순으로 많았고, 한국은 세계 5위로 매년 1160만 t의 종이를 생산했습니다. 전 세계에서 생산된 종이의 59%는 포장용지로, 29%는 인쇄용지로 사용됩니다. 신문용지로 사용되는 비율도 4.5%나 됩니다.

종이를 생산하는 제지 산업이 극복해야 할 과제는 만만치 않습니다. 천연 목재와 에너지의 소비를 줄이는 일이 무엇보다 중요합니다. 고급 펄프를 생산하는 과정에서 활용하는 화학 공정에 의한 환경오염 문제도 해결해야 합니다. 종이의 소비를 줄이는 것이 가장 시급하지만, 말처럼 쉬운 일은 아닙니다.

결국 종이 재활용에 더 많은 신경을 써야 하지만, 현재 종이의 재활용 비율은 56% 수준입니다. 국제적으로 폐지의 수출입도 활발하게 이뤄지고 있습니다. 폐지를 재활용하기 위해서는 사용한 종이에 묻어있는 잉크와 염료를 제거하고, 깨끗한 펄프를 회수해야 합니다. 물론 이 모든 과정은 화학 공정으로 이뤄집니다.

종이를 대체할 수 있는 소재를 개발하는 노력도 중요합니다. 인류가 언제까지나 식물이 어렵사리 합성해 놓은 셀룰로오스에만 의존할 수는 없는 일입니다. 골판지와 같은 포장용 종이를 대체할 수 있는 새로운 소재를 만들어야 합니다. 더 가볍고 질긴 인쇄용 종이도 개발해야 합니다. 동시에 재활용이 가능한 소재여야 합니다.

현재 폴리에틸렌, 폴리프로필렌, 폴리스타이렌, 폴리에스터 등으로 만든 새로운 유형의 플라스틱 합성 종이도 빠르게 발전하고 있습니다. 이들은 종지와 필름의 역할을 모두 할 수 있습니다.

미국의 화학기업 듀폰은 1967년부터 합성 종이 '타이벡(Tyvek)'을 판매하고 있습니다. 고밀도 폴리에틸렌(HDPE·high density polyethylene)을 얇고 가늘게 만든 부직포입니다. 화학물질에 의해 쉽게 훼손되지 않으며 방수성이 뛰어나고, 잘 찢어지지 않는 장점이 있습니다. 타이벡은 건축 소재, 의료용 포장재, 우편용 봉투, 우주선 소재, 개인용 방호복, 화폐 등 다양한 용도로 사용되고 있습니다.

미국의 특수 소재 기업인 PPG 인더스트리즈가 1984년에 개발한 ‘테슬린(Teslin)’도 종이의 훌륭한 대체 소재입니다. 테슬린은 다양한 두께로 생산되며 물에 젖지 않으면서도 매우 질깁니다. 일반 프린터로 인쇄를 할 수 있어 이용이 편리하며 면허증, 주차증 등의 다양한 용도로 쓰이고 있습니다.