

열에 의한 종이의 구조 변형이 수분 흡수에 미치는 영향

Effect of structural change of paper by heat treatment on water absorption and surface roughening

진성민 · 윤혜정

서울대학교 농업생명과학대학 산림과학부 임산공학전공

1. 서 론

원료 공급의 높은 해외의존도와 더불어 최근 들어 더욱 거세지는 중국 시장의 팽창으로 인해 제지 업체들은 균일하고 표면특성이 우수한 고품위 제품 생산을 강력히 요구받고 있다. 이를 위해 균일한 원지 생산에 대한 연구들이 진행되어 왔으며 사이징, 코팅, 캘린더링 처리 등의 방법이 소개되어 널리 사용되고 있다. 이 중 캘린더는 종이의 표면 거치름을 개선하고 광택을 향상시키는 등의 표면 특성을 향상시키고 두께를 균일하게 하여 종이의 구조적 성질을 변화시킨다. 특히 코팅이나 인쇄 전에 원지의 표면을 매끄럽게 하여 이후의 공정효율을 높이기 위하여 프리캘린더링을 하기도 한다. 이러한 캘린더링 효과는 캘린더 처리 시 온도와 습도에 따라 효과가 달라지며, 캘린더의 종류 및 처리 조건에 따라서도 종이에 미치는 영향이 상이하다. 그런데 프리캘린더 처리 이후 압축되어 있던 섬유들이 코팅이나 인쇄 작업시 도공액이나 잉크속에 함유된 수분에 의해 팽윤되어 표면이 거칠어지고 구조가 뒤틀리는 현상이 발생한다. 이것을 러프닝 현상이라고 하며 이 현상은 섬유의 가역성 때문인 것으로 알려져 있다.

러프닝 현상을 평가하고 이를 억제하기 위한 최적의 캘린더 운전조건에 대한 관해서는 많은 연구가 있었지만 러프닝 현상을 야기시키는 근본적인 메카니즘을 밝히는 데에는 한계가 있었다. 종이를 구성하는 섬유의 성분들은 함수율에 따라 지수함수적으로 감소하며 상응하는 Tg(Glass transition temperature)를 갖고 있는데, 주어진 함수율에서의 Tg 이상의 온도로 종이가 처리될 경우 열적인 변형이 쉽게 야기되며, 이로 인해 외부로부터 압력을 받게 되면 종이의 비가역적인 구조변형이 발생한다. 따라서 본 연구에서는 캘린더 처리시 열에 의한 종이의 구조변화에 대한 분석을 통해 수분 도포

시 표면에서 두께 방향으로 수분이 침투하는 깊이 및 이와 구조 변형과의 상관성을 평가하고 이를 통해 러프닝 현상을 해석하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시재료

본 연구에서는 종이 내 두께방향으로의 수분침투 현상과 이에 따른 러프닝 현상을 분석하기 위하여 기계펄프의 함량이 높은 BCTMP를 기본 원료로 사용하였다. 지료의 여수도는 470 mL CSF 수준이었으며 미세분 함량은 23.3%였다.

2.2 실험방법

2.2.1 지료 조성분 준비 및 수초지 제작

공시재료를 disintegrator를 이용하여 충분히 해리한 후 평량 100 gsm이 되도록 실험용 사각수초지기로 수초하여 couch하고 3.5 kg/cm²에서 5분간 압착한 후 140℃의 롤 표면온도로 cylinder dryer에서 건조시켰다. 23℃, RH 50% 조건의 항온항습실에서 조습 처리였다.

2.2.2 원지 캘린더링

원지의 캘린더링은 실험용 Soft nip calender((주) 동원롤)를 이용하여 실시하였으며 열에 의한 종이의 구조 변형의 영향을 살펴볼 수 있도록 동일한 선압조건(40 kgf/cm)에서 온도 조건(40℃ ~ 160℃)을 달리하였다.

2.2.3 러프닝 현상 모사 및 평가

2.2.3.1 수분도포

Pre-calendering 이후 코팅이나 인쇄공정에서 발생할 수 있는 러프닝 현상을 모사하기 위하여 인위적으로 종이 표면에 수분을 도포하였다. 수분이 z-방향으로 흡수될 때 CLSM 이미지로 그 깊이를 시각화하여 정량할 수 있도록 형광염료(Acridine orange)를 증류수에 희석시켰다. 자체 제작한 3-roll applicator를 이용하여 캘린더 처

리 전후의 종이에 편면 3 ~ 30 gsm 정도의 fluorescent stained water를 도포하였다.

2.2.3.2 러프닝 현상 평가

종이 표면의 러프니스 측정은 PPS roughness tester(L&W Co.)를 이용하였다. 캘린더링 효과를 고려하여 러프닝 현상을 평가하기 위하여 RIM(Roughening Index by Moisture)을 이용하였다.

$$\begin{aligned}
 \text{RIM} &= \frac{\text{Recovery}}{\text{Compressed change}} \\
 &= \frac{R_{c,am} - R_{c,bm}}{R_{uc,bm} - R_{c,bm}} \times 100 [\%] \quad [\text{Eq. 1}]
 \end{aligned}$$

where, $R_{uc,bm}$: Uncalendered roughness of sheet

$R_{c,bm}$: Calendered roughness of sheet before moistening

$R_{c,am}$: Calendered roughness of sheet after moistening

2.2.4 CLSM을 이용한 이미지 분석 및 수분 침투 깊이 평가

마이크로미터를 이용하여 종이의 두께를 측정할 경우 표면의 러프니스와 공극 때문에 실제 두께에 비해 측정데이터가 왜곡되는 될 수 있으므로 effective thickness를 측정하는 것이 바람직하다고 판단되어 본 연구에서는 CLSM 이미지를 이용하여 effective thickness를 구하였으며 정확성과 재현성을 위해 한 시편당 30회 이상의 샘플의 이미지를 얻어 이로부터 분석을 실시하였다.

수분 도포후 CLSM을 통해 종이의 두께 및 형광으로 염색된 부분의 높이를 평가하였으며(Fig. 1) 수분침투 깊이는 Eq. 2에 의거하여 계산하였다. CLSM 이미지 분석과정에서 형광염료에 의해 녹색으로 염색된 부분이 수분의 침투에 의한 것으로 가정하였으며 확산을 통한 종이 내부의 함수율 변이에 의한 변형은 무시하였다.

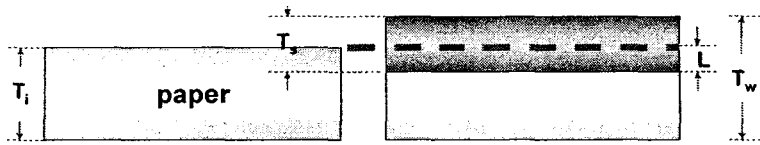


Fig 1. Schematic of water penetration depth.

$$L = T_i - (T_w - T_s) \quad [\text{Eq. 2}]$$

where, L : Water penetration depth

T_w : Total thickness after water application

T_i : Initial thickness

T_s : Strained thickness by fluorescent dye

3. 결과 및 고찰

일반적으로 표면에 도포되는 수분의 양이 증가할수록 깊이 방향으로 팽윤되는 섬유
의 깊이는 깊어진다. Eq. 2에 의해 계산된 수분 침투깊이(water penetration depth)
를 수분 도포량에 따라 나타내면 Fig. 2에서처럼 비교적 선형적으로 증가하는 경향을
보였다. 또한 과량의 수분이 도포되면 처음 두께의 깊이 방향으로 30% 이상까지 수분
의 침투가 이루어졌음을 알 수 있었다.

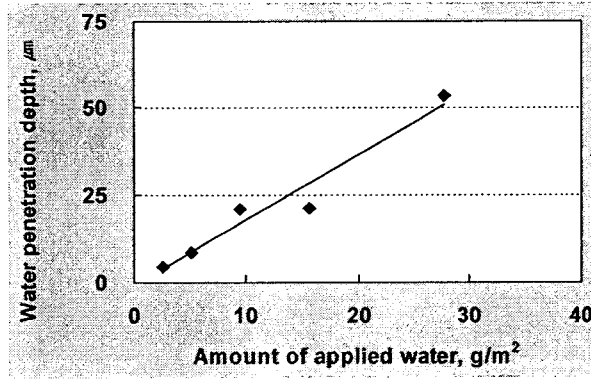


Fig. 2. Water penetration depth vs. amount of applied water.

일정한 선압에서 온도를 증가시키면 종이의 밀도는 Fig. 3에서처럼 직선적으로 증가하게 된다. 그러나 온도 경사가 있는 캘린더링 처리를 받은 종이는 z-방향으로 상이한 밀도분포를 보이므로 가열된 스틸롤에 접촉하고 있는 top side 부분의 공극률이 상대적으로 많이 감소되었다.

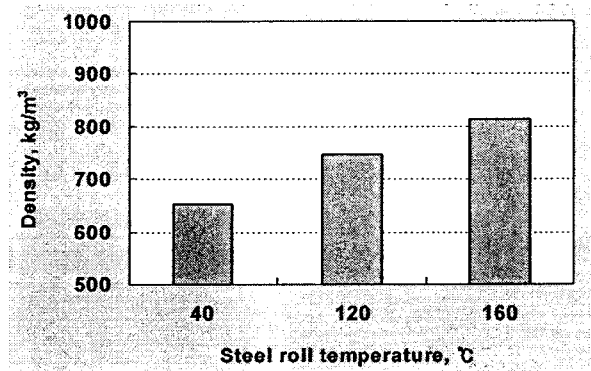


Fig. 3. Density vs. calendering temperature.

이렇게 z-방향으로 압축된 네트워크 구조는 수분의 침투를 억제하게 되며 열과 압력에 의해 캘린더 처리된 종이가 그렇지 않은 것에 비해 수분 침투는 덜 일어났다. 형광염료에 의해 녹색으로 염색된 부분의 넓이는 원지의 것이 훨씬 컸으며 수분침투깊이 또한 원지에서 더 크게 나왔다.

더욱이 고온조건에서 캘린더 처리를 받으면 z-방향으로 일정 깊이까지 T_g 이상의 열이 전달되어 섬유들이 변성되고 비가역적인 변형을 일으킨다. Fig. 4에서는 열처리에 의한 러프닝 현상의 차이를 보여주고 있다. 저온조건인 캘린더 처리조건과 달리 120℃ 이상의 온도에서는 러프닝 현상이 현저히 감소하는 것을 확인하였다. 이것은 열과 압력에 의해 압축된 종이 내의 고밀화된 네트워크가 일차적으로 수분의 침투를 억제하고 이와 더불어 열에 의해 섬유의 가역성이 떨어져 러프닝 현상이 덜 일어난 것으로 생각되었다.

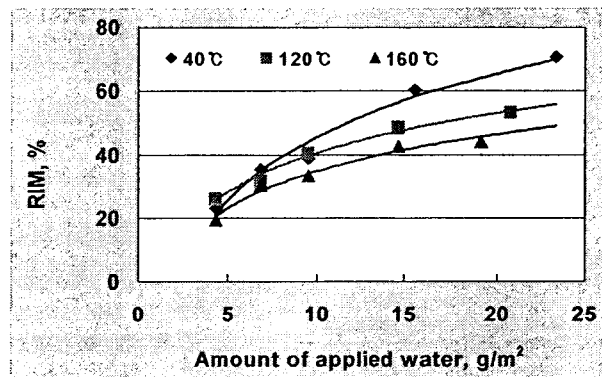


Fig. 4. Roughening index by moisture vs. amount of applied water.

4. 결 론

고밀화된 종이의 구조는 공극의 감소를 야기하고 이것은 수분의 두께방향 침투를 어느 정도 억제하는 효과가 있었다. 깊이 방향으로 충분히 흡수되지 못한 수분은 두께 방향으로 적층된 섬유들을 팽윤시키지 못하기 때문에 압축된 표면이 수분에 의해 되튀어오르거나 뒤틀리는 현상이 어느 정도 억제되었다. 그러나 일반적으로 저온 상태에서 고압조건으로 캘린더링을 하게 되면 섬유의 가역성에는 큰 영향을 미치지 않아 수분에 의한 러프닝 현상을 효과적으로 제어하지 못한다. 그래서 섬유의 열적 변형을 야기시킬 수 있는 충분한 고온조건에서 캘린더를 운전하게 되면 z-방향으로 열전달이 이루

어지고 Tg 이상의 열이 전달된 부분까지 섬유들의 비가역성이 커짐으로 인해 러프닝 현상이 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R04-2002-000-20133-0) 지원에 의해 수행되었음. 진성민 연구원은 두뇌한국 21 핵심 사업 지원을 받아 연구를 수행하였음.

참고문헌

1. J.H. Vreeland, E.R. Ellis and K.B. Jewett, Substrata thermal molding, Part 1 : A breakthrough in the understanding and practice of the hot calendering of paper, Tappi Journal 72(11):139-145 (1989).
2. J.S. Aspler and M.-C. Beländ, A review of fiber rising and surface roughening effects in paper, JPPS : Vol.20, No.1 (1994).
3. M.F. Gratton, J. Hamel and J.D. McDonald, Temperature-gradient calendering : From the laboratory to commercial reality, Pulp and Paper Canada, 98(3):62-70 (1997).
4. Trond Forseth, Knut Wiik and Tobjorn Helle, Surface roughening mechanisms for printing paper containing mechanical pulp, Nordic Pulp and Paper Research Journal No.1 (1997).
5. Peter Rattö and Mikael Rigdahl, Temperature distributions in a paper sheet subjected to a short pressure pulse from a heated plate, Nordic Pulp and Paper Research Journal Vol.13, No.2 (1998).
6. Alan R. Dickson, Quantative analysis of paper cross-sections, Appita Journal Vol.53, No.4 (2000).
7. R.H. Hestemo and M. Lamvik, Heat transfer during calendering of paper,

JPPS : Vol.28, No.4,(2002).

8. H.J. Youn, H.L. Lee, S.M. Chin and S.G. Lee, Effect of roughness and densification of precalendered sheet on surface roughening, 58th APPITA Conference (2004).