Journal of Korea TAPPI
Vol.37.No.4, 2005
Printed in Korea

캘린더링 이론

원종명†

1. 서 론

대부분의 제지 분야에 종사하는 사람들이 제지 공정 중 주로 습부 화학, 초지 및 종이 도공 기술 등에 관심이 집중되어 있으며, 국제 시장 개방, 국제 원자재 가격 상승 및 에너지 비용 증가 등에 대한 위기감으로 최근 공정 개선을 통한 에너지 비용 절감을 위하여 건조부에 대한 관심이 점차 증가되고 있다. 물론 종이의 성질은 원료의 선택에서부터 시작하여 얼마나 양호한 지필을 형성하는가에 의하여 좌우되며, 또한 적절한 기술과 조건으로 압착 건조함으로써 이미 앞에서 형성된 지필의 성질을 극대화하는 것이 가능하게 될 것이다. 이러한 이유 때문에 캘린더링에 대하여는 상대적으로 관심이 적어지게 되었고, 제지회사에 입사할 경우에도 완정부에 배치되는 것을 대부분이 꺼려하는 이유라 할 수 있다.

그러나 캘린더링은 제지 공정 및 도공 공정의 가장 마지막 부분에 위치하여 최종적으로 종이의 성질을 튜닝하여 사용하고자 하는 용도에 부합하는 성질을 지닐 수 있도록 하는 마무리 과정이라 할 수 있으며, 이 공정에서 제 조건의 최적화 및 그 역할을 다하지 못할 경우 최종 제품의 품질에 중대한 결함을 야기할 수 있는 결코 무시할 수 없는 중요한 제지 공정의 한 부분이라 할 수 있다.

캘린더링 공정은 아마도 제지 공정 중 가장 높은 압력을 집중적으로 가하는 단위 공정이라 할 수 있다. 캘린더는 점차 보다 우수하고 균일한 종일 품질에 대한 요구를 만족시키기 위하여 초지기의 한 부분으로 도입하게 되었다. 따라서 캘린더를 초지기의 일부분으로 도입하면서 이러한 수요자의 요구와 관련하여 1) 지필에서의 불균일성을 보정하고, 2) 종이 표면의 평활성을 개선하며, 3) 보다 치밀하게 구조를 개선하기 위한 목적으로 캘린더를 설계하는 주안점으로 작용하게 되었다. 캘린더의 도입 초기

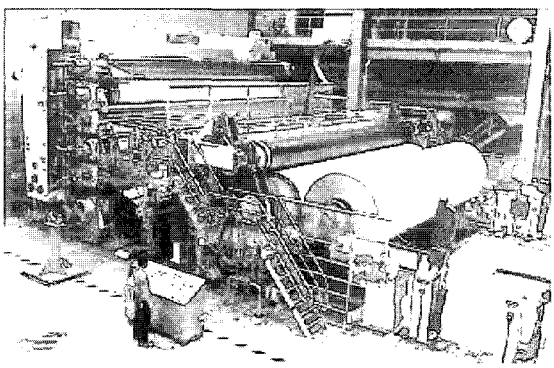

Fig. 1. 머신 캘린더.

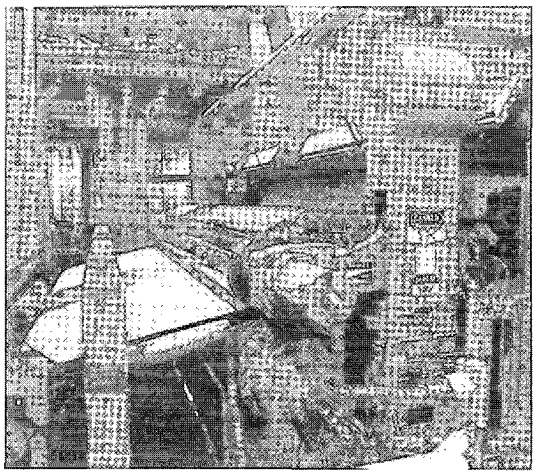

Fig. 2. Breaker stack.

• 강원대학교 산림과학대학 제지공학과(Dept. of Paper Science & Engineering, Kangwon National University, Chunchon, 200-701. KOREA)
† 주저자(Corresponding author): E-mail : wjm@kangwon.ac.kr

당시에만 해도 캘린더 롤의 표면을 고도로 연마하는 것이 쉬운 일이 아니었다.

전술한 바와 같이 캘린더링의 중요성이 증가됨에 따라 캘린더의 위치와 그 기능은 처음 캘린더가 도입된 이래 여러 번의 변화가 있었다. 최근에는 흔히 릴 바로 앞에서 볼 수 있으나(Fig. 1) 경우에 따라서는 보다 높은 함수율 상태에서 지필의 표면을 개선하기 위하여 건조부 사이에 하나 또는 그 이상의 닙을 지니는 breaker stack(Fig. 2)을 설치한 것을 종종 볼 수 있다. 습부에서는 습부 압착 프레스 바로 앞에서 진공 카우치 롤 바로 위에 lump breaker roll(Fig. 3)이라는 이름으로 사용되기도 하였다. 그러나 습부 공정에 속하기 때문에 캘린더링 공정으로 고려되지는 않고 있다.

수요자 취향의 고급화와 인쇄 기술의 발달 및 도공 인쇄용지의 도입과 더불어 도공 처리 후에 보다 평활한 면을 지닌 롤을 이용한 추가적인 표면 처리가 필요하게 되었다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 목면이나 다른 물질로 채운 롤을 사용하는 슈퍼 캘린더가 등장하게 되었다. 초기의 슈퍼 캘린더링은 종이 도공과 마찬가지로 off-line 공정이었으나, 최근에는 초지공정의 연속 공정으로 in-line 작업을 하는 것이 일반적인 경향이다.

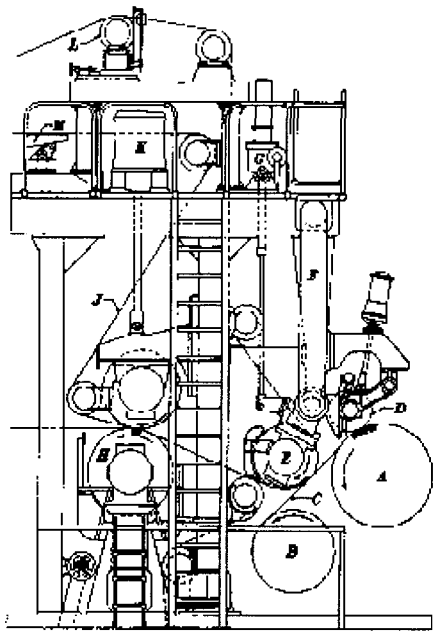

Fig. 3. Lump breaker.

2. 캘린더링 이론

종이 제조법이 중국에서 발명되었다고 한다면, 캘린더링 기술은 아라비아에서 처음 발명되었다고 할 수 있다. 아라비아사람들은 평활성을 개선하기 위하여 제조된 종이 표면을 두들기는 방법을 사용하였다. 이 후 이러한 캘린더링 기술은 햄머를 이용하여 기계화되었고, 1820년대에 오늘날 머신 캘린더라고 불리는 캘린더만큼 정밀하고, 충분히 둥근 롤이 만들어질 수 있을 때까지는 종이의 평활성을 개선하기 위하여 이러한 방법이 사용되었었다.

초기의 머신 캘린더에서는 롤 중의 하나에 연한 재료가 사용되었다. 처음에는 bowl이라 불리는 나무의 속 부분이 이러한 목적으로 사용되었었다. 사실상 bowl이라는 용어는 아직까지 filled roll (fibrous roll, bowl, 탄력을 제공해주며, 경도가 70~93 Shore Durometer에 해당되도록 금속, 종이, cotton, wool 또는 composite fiber를 적층 압착시킨 캘린더 롤 또는 엠보싱 롤)을 만들기 위하여 사용되는 디스크를 나타내는 말로 사용되고 있다.

2.1 플래스틱 재료로서의 종이

캘린더에서 일어나는 대부분의 변화는 종이 자체의 점성과 탄성(Figs. 4 & 5)에 의하여 좌우된다.

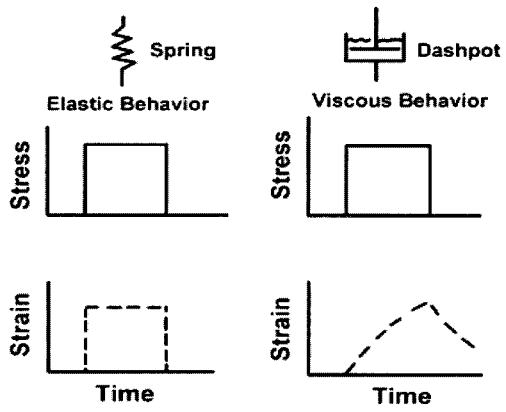

Fig. 4. 종이의 탄성과 점성.

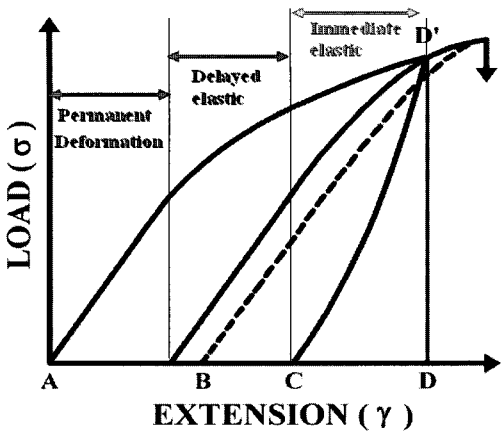

Fig. 5. 종이의 점탄성 곡선.

비록 변화의 일부가 도공 층에서 일어나기도 하지만, 도공층 표면의 개선에 전적으로 기여한다고는 할 수 없다. 캘린더링은 종이의 내부에서 어떤 변화가 일어났는가에 따라 노출된 표면에 영향을 미친다. 캘린더링이 도공 층에 대하여 미치는 가장 큰 영향은 도공 층에 압착된 표면을 그대로 복사하는 것이다.

캘린더링한 도공 층의 표면을 현미경으로 관찰해보면 캘린더 표면을 연마한 자국이 찍혀있는 것을 볼 수 있다. 철이나 금속 롤은 연질 롤보다 평활한 면을 지니도록 연마할 수 있기 때문에 같은 온도에서 캘린더링을 하더라도 경질 롤을 사용할 경우 더 양호한 광택을 얻을 수 있다. 따라서 철 또는 금속 롤에서의 표면 연마 상태가 매우 중요하다고 할 수 있다.

비록 캘린더 닙에서 전단력이 작용하기는 하지만 닙에서의 마찰계수는 종이가 캘린더 닙을 떠날 때 압력이 거의 제거되는 지점까지 닙에서 종이가 미끄러지는 것을 방지할 수 있을 정도로 충분하다. 이러한 캘린더링에 의한 광택의 발현은 닙에서의 미끄러짐에 좌우되지는 않는다. 그러나 전단력은 도공 층에 있는 안료 입자를 배열시키는 경향이 있다.

종이가 압축 하중을 받으면 다음과 같이 세 가지 형태로 반응한다.

1) 종이는 탄성체와 같은 작용을 한다.
2) 종이는 응력 하에서 영구 변형을 일으키는 소성체로서 작용한다.
3) 종이는 이전에 어떤 처리를 받았는가에 따라 그 흔적을 지닌다.

종이가 압축력을 받으면 탄성한계에 도달할 때까지 균일하게 압축되며, 닙에서 이 한계를 넘는 하중이 가해지면 영구적인 변형을 일으키게 된다. 종이가 캘린더 닙을 떠날 때 탄성 변형을 일으킨 부분이 회복된다. 물론 탄성 변형을 일으킨 부분 중 일부는 즉시 회복되나, 나머지 부분은 회복에 시간이 걸린다. 이러한 현상들이 매우 간단하게 보이나 실제로는 매우 복잡하다. 즉 매우 낮은 하중에서도 영구변형이 일어나기 시작하며, 이러한 변형 속도도 일정하지가 않고, 종이는 또한 동질성을 지니지 않는다.

종이의 불균일한 정도가 캘린더링 공정에서의 종이의 거동에 크게 영향을 미친다. 비록 평균 섬유 구조가 균일하다고 가정을 한다 하더라도 종이 구조에서 높고 낮은 부분이 존재하게 되며, 이것이 캘린더링 시 종이의 거동에 영향을 미치게 된다. 따라서 다른 부분이 캘린더 롤의 표면에 닫기 전에 종이의 일부가 먼저 변형을 일으키기 시작하며, 불균일 변형을 초래한다. 이러한 현상 때문에 어떤 캘린더링 방식을 채택하더라도 마틀 현상을 경험하게 된다.

연질 캘린더(soft calender) 롤은 경질 롤에 비하여 종이에 전달되는 하중을 보다 균일하게 해준다. 즉 경질 롤의 경우에는 다른 부위에 접촉을 하기 전에 먼저 접촉한 부위의 섬유를 변형시키지만, 연질 롤은 롤 자체가 변형을 일으켜 종이와 보다 긴밀한 접촉이 이루어지도록 해준다.

실제로 경질 롤 일수록 더 높은 광택을 얻을 수 있으나, mottle이라고 불리는 광택을 지니는 표면의 불규칙한 외관을 야기 시킨다. 이러한 이유 때문에 모두 경질 롤로 구성되어 있는 머신 캘린더(machine calender)는 주로 종이의 두께를 조절하는 용도로 사용된다. 연질 롤은 경질 롤에 비하여 더 넓은 닙을 만들어준다. 동일 선압 하에서 연질 롤에 의하여 형성된 닙에 가해지는 실제 압력은 경질 롤에서보다 낮다. 그러나 연질 롤은 종이가 닙에 체류하는 시간을 길게 해주며, 광택은 낮지만 평활도가 우수한 종이를 만들어준다. 닙의 폭과 닙 하중과의 관계는 응력 분석을 위한 Hertzian 방정식에

근거하여 1950년대에 처음 제안되었다.

$$W^2 = [8LD_1D_2(1-r^2)]/[\pi E(D_1+D_2)]$$

W : 닙의 폭(inch, m)
L : 닙에서의 하중(lb/in., kN/m)
D : 롤의 직경(inch, m)
r : 포아송 비(0.2~0.45)
E : 커버의 탄성계수(psi, Pa)

머신 캘린더, 슈퍼 캘린더 및 온-라인 소프트 캘린더에서 일반적으로 적용되는 하중은 Table 1과 같다. 캘린더의 하중의 높이면 높일수록 더 많은 종이 표면이 롤과 접촉을 하게 되며, 종이의 높은 부분이 낮은 곳보다 더 높은 응력이 걸린다. 따라서 이 부분에서 더 많은 변형을 일으키게 된다.

Fig. 6은 캘린더링 압력이 증가됨에 따라 종이 표면의 접촉의 균일성을 반영하는 광택의 표준편차를 보여준다. 여기에서 평가된 모든 종이는 동일한 광택 수준으로 캘린더링 처리가 실시되었지만 다른 온도와 캘린더링 속도를 적용한 결과이다. 이 결과에 의하면 캘린더링 압력이 증가될수록 표준편차가 감소되고 있음을 알 수 있다.

외관이 균일한 종이를 만들기 위해서는 최소한 어느 정도의 압력이 필요하다. 이 압력의 수준은 초기 연구에서 30 MPa(4300 psi)인 것으로 보고된 바 있으나, 종이의 균일성, 탄성계수, 온도, 함수율 등에 의한 영향을 받기 때문에 이러한 주장은 지종에 따라 적용될 수 없는 것도 있을 수 있다.

종이 표면의 불규칙성은 다음과 같이 두 가지 다른 방식으로 종이의 성질에 영향을 미칠 수 있으며, 캘린더는 이들 불규칙성을 다른 정도로 변화시켜준다.

1) 미시적 크기와 낮은 수준의 거칠기에서 불규칙성은 정반사적인 광택에 영향을 미친다.
2) 섬유 덩어리 크기 또는 섬유속(fiber bundle) 수준에서 불규칙성은 공기 누출 방식(air leak method)에 의하여 측정되는 평활도에 영향을 미친다.

Table 1. 캘린더 종류별 적용되는 하중의 범위

캘린더 종류	하중(pli)	하중(kN/m)
머신 캘린더	400~1000	70~75
슈퍼 캘린더	1200~2000	210~350
온-라인 연질 캘린더	1000~2500	175~440

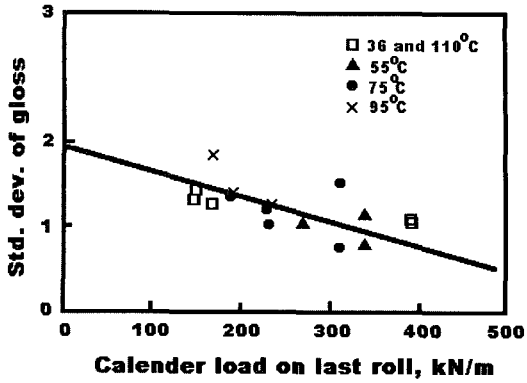

Fig. 6. 지필 양면에서의 광택도의 균일성.

따라서 종이 표면의 평활도에 대한 평가는 미시적 수준 및 거시적 수준에서 모두 검토되어야 하며, 요구되는 종이의 성질에 따라 어느 크기의 거칠기를 조절할 것인가를 결정해야 한다.

2.2 섬유에 영향을 미치는 인자

섬유의 가소성에 영향을 미치는 주요 인자로서 온도와 함수율이 고려될 수 있다. Ernst Back 등은 여러 수준의 함수율에서 섬유의 연화점과 유리 전이 온도를 측정하였다. 유리 전이 온도는 고분자 물질이 유동성을 나타낼 수 있는 온도를 의미한다. 쇄목펄프를 함유하는 종이의 경우 보다 낮은 유리 전이 온도를 지니는 리그닌도 유동성을 나타낼 것이다. 따라서 섬유의 영구 변형은 유리 전이 온도 이상으로 올려진 종이의 부분에서 일어나게 된다. 고온에서 종이를 처리할 경우 수분에 의한 종이의 팽윤 특성은 어느 정도 영구적으로 변화된다.

고온 캘린더링 공정은 다음과 같은 여러 측면 때문에 매우 복잡하다.

- 분자량 분포 때문에 유리 전이 온도가 광범위하게 나타난다.
- 종이의 일부분은 유리 전이 온도 범위에 도달

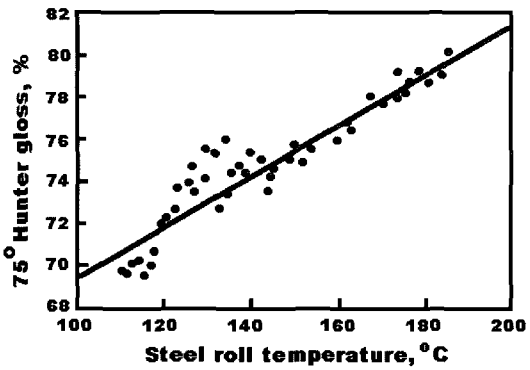

Fig. 7. 금속 롤의 온도 변화에 따른 광택도 변화.

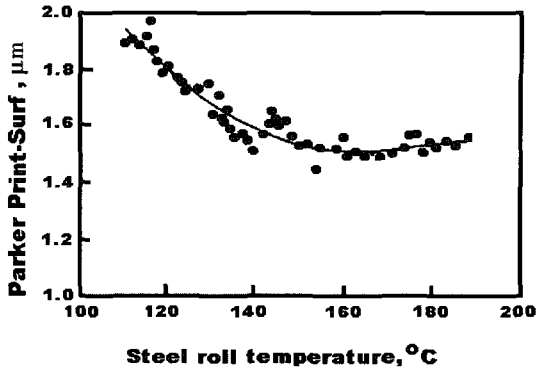

Fig. 8. 금속 롤의 온도에 따른 거칠기의 변화.

한다 할지라도 나머지 부분은 그 이하의 온도를 지니어 일반적으로 온도 경사를 나타낸다.

- 유동, 또는 크립, 성질의 변화가 온도의 변화에 따라 불균일하게 일어나서 느린 유동성을 나타내는 매우 점성이 높은 상태를 초래한다.
- 섬유가 수분을 함유하고 있기 때문에 캘린더 닙에서 수분이 확산될 때 함수율이 변한다.
- 종이가 캘린더 닙을 떠날 때 수분의 증발이 급속히 일어나 종이의 냉각 효과를 나타낸다.

2.2.1 온도의 영향

일반적으로 캘린더링 시 지필에 온도 경사가 발생되기 때문에 극단적인 조건이 적용되지 않는 한 매우 균일한 종이 성질의 개선이 가능하다. Fig. 7은 탄성을 지니는 백킹 롤을 이용한 경량 도공 인쇄용지의 고온 캘린더링 결과를 나타낸 것이다. 이 실험 결과 예상하고 있는 유리 전이 온도 범위를 30℃ 이상 초과하지 않는 한 광택도 개선 경향이 갑자기 변화되는 현상이 관찰되지 않았다. 평활도(Fig. 8)도 가열이 된 지필 내부의 추가적인 압착이 한계에 달할 때까지 유사한 경향을 보여주었다.

고온 캘린더링의 기본 원리는 지필의 내부에 있는 보다 차고 탄성을 지니는 섬유가 바깥쪽에 있는 더 온도가 높은 섬유만큼 변형이 일어나지 않는다는 것이다. 이러한 온도 경사는 종이의 내부에서의 변화를 최소화하면서 표면 쪽을 평활하게 만들어준다. 따라서 고온 캘린더 닙은 동일한 수준의 평활도와 광택도(gloss)를 얻는데 필요한 압력이 일반 캘린더 닙에서 보다 낮다. 그러나 닙 체류시간이 길어지면 종이의 내부까지 열이 전달되기 때문에 온도 경사의 효과를 더 이상 보기 어렵다. 온도 경사 캘린더링의 결과는 동일하거나 보다 높은 벌크에서 보다 우수한 평활도와 광택도를 지니는 종이를 얻는 것이다. Crotogino에 의하여 제공된 사진은 200℃에서 함수율 6%인 신문용지를 온도 경사를 주어 캘린더링을 할 경우 바깥 섬유층(5~10 ㎛)만이 고온 캘린더링에 의한 변형되었음을 보여준다. 이러한 유사한 결과는 연질 롤을 이용한 온도 경사 캘린더링에서도 얻어졌다.

Vreeland 등은 종이의 평활도와 광택도를 개선하기 위하여 소위 아층(sub-stratum)을 유리 전이 온도 또는 그 이상으로 가열하는 공정을 제안하였다. 이 기술은 단지 연질 백킹 롤을 사용한 온도 경사 캘린더링의 변형이라 할 수 있다. 이들은 종이의 표면 쪽에 있는 섬유만 연화시키는데 필요한 정도로만 열을 제한하기 위하여 운전자가 사용할 수 있는 방정식을 제안하였다. 이 방정식은 유입 지필의 함수율, 온도 및 드럼의 표면 온도를 확보하는데 필요한 닙에서의 체류 시간을 포함하고 있다.

2.2.2 수분의 영향

수분의 종이 및 섬유의 탄성계수와 유리 전이 온도에 영향을 미치기 때문에 함수율의 조절은 매우 중요하다. 종이의 함수율이 높을 경우 함수율의 변이가 심하며, 과잉의 수분을 제거해야 하고,

blackening 현상이 발생되기 쉬운 문제를 수반한다. 수분 경사도 온도 경사와 유사하게 탄성, 소성 및 크립 현상의 경사를 가져오며, 이러한 수분 경사는 증기 또는 작은 물방울을 분무하는 방식으로 얻어질 수 있다. 최근 일부 제지기계 제조업체에서 지필의 손상을 일으키지 않으면서 작은 물방울을 분무하여 수분 경사를 유발하는 기술을 개발하여 실용화를 추진하고 있다.