

# 소프트 닙 캘린더링 변수가 도공지의 물성에 미치는 영향

이 사 용 · 이 학 래†

(2001년 10월 20일 접수; 2001년 12월 10일 채택)

## The Effect of Soft Nip Calendering Variables on the Property of Coated Papers

Sayong Lee and Hak Lae Lee†

(Received on October 20, 2001; Accepted on December 10, 2001)

### ABSTRACT

The effect of soft nip calendering variables including pressure, temperature, nip residence time and sheet moisture on the properties of coated papers was investigated. The change of gloss, opacity, bulk and brightness were determined after calendering.

Increase of calendering pressure and temperature increased gloss, but it decreased opacity, bulk and brightness of coated papers. Nip residence time and sheet moisture content showed similar effects on these properties.

Calendering conditions of 160°C of temperature, 146kg/cm of line load or less were found to provide optimum conditions to obtain reasonable gloss and smoothness while minimizing the loss of bulk and opacity for coated papers.

### 1. 서 론

캘린더링은 종이의 표면특성을 개선하고, 폭방향의 두께 프로파일의 개선을 통해 균일한 릴 권취가 가능토록 함으로써 종이 자체의 상품성과 제지공정의 작업성을 높이는 기능을 가지고 있다. 이러한 목표를 달성하기 위해 과거에는 온머신 캘린더로 금속 롤로 구성된 머신 캘린더가 주로 사용되었으나 최근에는 소프트 닙 캘린더(soft nip calender; SNC)가 개발되어 고급용지 부문에서도 널리 사용되고 있으며 오프머신으

로 운전되는 수퍼 캘린더에 버금가는 효과를 나타내기도 한다. 하지만 Brown과 Latimer<sup>1)</sup> 4종류의 바인더와 2종류의 고분자 안료를 사용하여 다양한 코팅컬러를 구성하고 그 구성에 따라 도공지를 파일럿 스케일에서 수퍼캘린더링과 소프트 닙 캘린더링에 적용하여 광학적 특성과 인쇄적성을 테스트한 결과 수퍼캘린더링에 적절한 코팅 컬러가 소프트 닙 캘린더링에 적절하지 않을 수도 있음을 밝혔다. Keller<sup>2)</sup>는 캘린더 닙에서 코팅층은 가열롤의 열전달에 빠르게 반응하여 쉽게 열적연화를 일으키며, 따라서 고온의 가열롤 온도

• 서울대학교 농업생명과학대학 임산공학과(Department of Forest Products, College of Agriculture and Life Sciences Seoul National University, Suwon 441-744, Republic of Korea)

† 주저자 (Corresponding author) e-mail:lhakl@plaza.snu.ac.kr

를 적용했을 때는 닢 체류시간에 별로 구애받지 않고 광택도를 개선할 수 있다고 하였다. 또 원지의 섬유는 상대적으로 도공층보다 상당히 먼 위치에 존재함으로써 가열로 온도가 높아도 닢 체류시간을 길어야만 열적변형을 일으키게 되므로 닢 체류시간을 짧게 하고 가열로 온도를 높게 하면 온도구배에 의한 캘린더링을 통해 두께의 감소를 최소화하면서 높은 광택도를 얻을 수 있다고 하였다.

Groshek<sup>3)</sup>은 1,372m/min의 운전속도에서도 LWC를 적절한 조건으로 소프트 닢 캘린더를 사용하여 캘린더링하면 슈퍼캘린더링 수준의 종이물성과 옵션 인쇄적성을 얻을 수 있다고 보고한 바 있다. 또 고평활도를 얻기에는 충분하지 않으나 강도를 유지하면서 광택도를 얻기에는 슈퍼캘린더링보다 소프트 닢 캘린더링이 유리하여 충분히 슈퍼캘린더를 대체할만한 잠재성을 가지고 있다고 하였다.

특히 LWC 등급에서 Hot/Soft Calendering으로 슈퍼캘린더링 수준의 광택도와 평활도를 얻을 수 있으며, 도공액의 최적화를 통하여 비용절감 효과도 거둘 수 있다고 보고된 바 있다.<sup>4)</sup> SNC는 또 온도경사 캘린더링 기술을 병용할 경우 벌크와 강도적 특성을 유지하면서 종이의 표면 특성을 개선할 수 있으며, 이 기술을 이용하여 더 좋은 등급의 종이로 개선하고, 지분문제와 인쇄적성 등을 개선할 수 있다.<sup>5)</sup> 특히 경량인쇄용지에서 코팅보드의 등급까지 온도경사 캘린더링의 적용이 가능하며 고온 캘린더링의 효과는 소프트 닢에서 더 많이 얻을 수 있다.

이처럼 소프트 닢 캘린더는 많은 장점을 지니고 있지만 국내에서는 소프트 닢 캘린더를 이용한 도공지의 캘린더링에 대한 연구가 진행되지 못하고 있다. 본 연구에서는 연질 소프트 닢 캘린더 롤을 장착한 파일럿 캘린더를 이용하여 닢압, 닢폭, 가열로의 표면온도, 운전속도, 유입지의 함수율 등 캘린더링 인자에 따른 도공지의 광택도, 불투명도의 광학적 특성과 벌크 등 물성변화를 평가하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 도공지

현재 국내 도공지 생산업체에서 생산되는 양면 코팅된 평량 115g/m<sup>2</sup>의 캘린더링 되지 않은 도공지를 사용하였으며 도공 안료의 구성과 일반적인 성질은 Table 1과 같았다.

캘린더링에 앞서 도공지의 함수율은 5.5%와 6.5%가 되도록 항온항습 처리하였다. 도공지의 함수율 5.5%는 공시재료를 온도 23℃, 상대습도 65%의 항온항습 조건에서 24시간 이상 조습처리하여 얻었다. 또 도공지 6.5%의 함수율은 온도 23℃, 상대습도 80%의 항온항습조건에서 24시간 이상 조습처리하여 얻었다.

### 2.2 캘린더 및 캘린더링

소프트 닢 캘린더는 하나의 연질롤과 두 개의 금속롤로 구성된 것을 사용하였다. 실험에 사용된 캘린더의 자세한 내용과 실험 조건은 문헌 (6) 과 같다. 소프트 닢 캘린더의 가열로 표면온도가 캘린더링 효과에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 80, 120, 160℃의 온도를 적용하였다.

캘린더링에 따른 도공지 내의 온도변화를 계산하기 위해서 도공지는 도공층과 원지층으로 구성된 반무한판으로, 또 도공층의 두께를 도공지 두께의 1/10으로 가정하고 문헌 (6)의 방법으로 구하였다. 또 도공층까지 유리전이온도로 가열하기 위한 가열로의 표면온도  $T_{mst}$ 를 다음의 식 [1]에 의해 구했다.

$$T_{mst} = T_i + (T_{ge} - T_i) / \operatorname{erfc} \left( \frac{c/10}{2\sqrt{\alpha_c \cdot t}} \right) \quad [1]$$

여기에서

**Table 1. Physical properties and color formulation of uncalendered coated paper**

| Basis Weight (g/m <sup>2</sup> ) | Thickness (μm) | Gloss (%)    |      | PPS (μm)        |      | Brightness (%)                  |       | Opacity (%) |
|----------------------------------|----------------|--------------|------|-----------------|------|---------------------------------|-------|-------------|
|                                  |                | Top          | Wire | Top             | Wire | Top                             | Wire  |             |
| 115                              | 110            | 32.0         | 31.5 | 1.92            | 1.90 | 84.59                           | 84.65 | 95.68       |
| Pigment (pph)                    |                | Binder (pph) |      | Lubricant (pph) |      | Coat Weight (g/m <sup>2</sup> ) |       |             |
| GCC                              | Clay           | Latex        |      |                 |      | Top                             |       | Wire        |
| 70                               | 30             | 12           |      | 1               |      | 16                              |       | 18          |

- $T_i$  : 도공지의 유입지 온도  $^{\circ}\text{C}$ ,
- $T_{gc}$  : 도공 바인더의 유리전이온도  $^{\circ}\text{C}$ ,
- $c$  : 도공지의 두께 mm,
- $t$  : 닥 체류시간 sec,
- $\alpha_c$  : 도공층의 열확산계수(thermal diffusivity),
- erfc : 에러보함수(complementary error function).

도공안료인 GCC와 클레이는 광물질로서 유리전이 온도가 상당히 높기 때문에 도공층의 열변형은 도공바인더의 열변형에 의한 도공안료의 재배열로 인해 일어난다고 할 수 있다. 따라서 식 [1]에서는 도공 바인더의 유리전이온도를 적용하였다.

본 실험의 캘린더링 조건을 요약하여 Table 1 에 기술하였다.

**Table 1. Calendering conditions**

|  |              |
|--|--------------|
| Ingoing sheet temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )           | 2            |
| Surface temperature of heating roll ( $^{\circ}\text{C}$ ) | 80, 120, 160 |
| Nip residence time (ms)                                    | 4, 7, 10     |
| Cylinder Pressure ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )              | 60, 100, 140 |
| Ingoing Moisture (%)                                       | 5.5, 6.5     |

### 2.3 물성 측정

Table 1의 조건에 따라 캘린더링을 실시한 후에 TAPPI Standard T 402 om-82에 의거 시편을 조습처리하였다. 이후 도공지의 벌크, 광택도, 불투명도와 백색도를 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

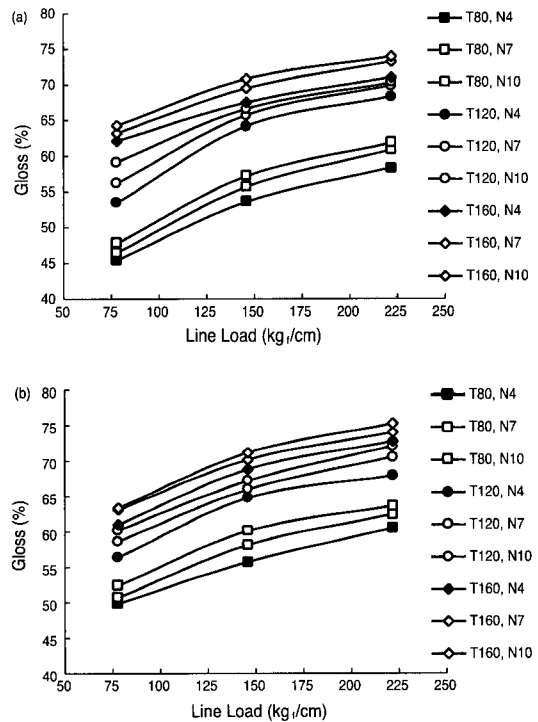
### 3.1 광택도의 변화

도공지의 캘린더링 후 각 캘린더링 인자의 변화에 대한 광택도의 변화를 Figs. 1-3에 도시하였다. 여기에서 보는 바와 같이 선압의 증가에 따라 광택도는 증가하였다. 이는 선압의 증가로 인해 지필에 가해지는 마찰력과 복제현상이 커졌기 때문이다. Fig 1(a)를 살펴보면 가열롤의 표면온도 80 $^{\circ}\text{C}$ 와 120 $^{\circ}\text{C}$  사이에서 광택도의 차이가 크게 나타났다. 이는 열전도량의 증가에 따라 온도가 급격히 올라가는 도공층에서 도공안료

의 재배열이 더 활발히 일어나기 때문이다. 비슷한 경향을 Fig. 2에서도 확인할 수 있다. 가열롤 표면온도의 증가에 따라 광택도는 지속적으로 증가하였으며, 선압 78 $\text{kg}_f/\text{cm}$ 와 146 $\text{kg}_f/\text{cm}$  사이에 차이가 크게 나타났다.

본 실험에서 적용된 조건 중 온도 120 $^{\circ}\text{C}$ , 선압 146 $\text{kg}_f/\text{cm}$ 인 경우 좋은 광택도를 얻을 수 있었다 (Figs. 1-2). 가열롤의 표면온도 120 $^{\circ}\text{C}$ , 선압 146 $\text{kg}_f/\text{cm}$ 의 조건이 온도 80 $^{\circ}\text{C}$ , 선압 222 $\text{kg}_f/\text{cm}$ 의 조건이나 온도 160 $^{\circ}\text{C}$ , 선압 78 $\text{kg}_f/\text{cm}$ 의 조건보다 광택도가 더 높게 나타났으며 (Fig. 3), 닥 체류시간 증가에 따른 광택도의 증가는 크게 나타나지 않았다.

함수율 변화에 따른 광택도의 변화는 각 그래프의 (a), (b)를 비교하면 알 수 있다. Fig. 1-3 모두 비슷한 경향을 나타내었다. 온도 80 $^{\circ}\text{C}$ , 선압 78 $\text{kg}_f/\text{cm}$ 인 경우 함수율 변화에 따라 광택도가 크게 변화했지만, 선압, 온도, 닥 체류시간의 증가함에 따라 광택도의 변화



**Fig. 1. Effect of pressure on gloss of coated paper.**

Moisture content (a) : 5.5%, (b) : 6.5%  
 T : Heated roll temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), N : Nip residence time (ms)

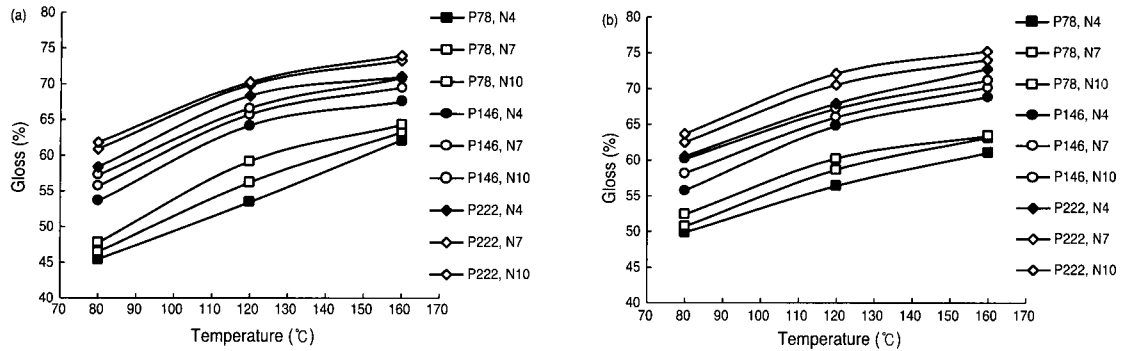


Fig. 2. Effect of temperature on gloss of coated paper.

Moisture content (a) : 5.5%, (b) : 6.5%

P : Line load(kg/cm), N : Nip residence time (ms)

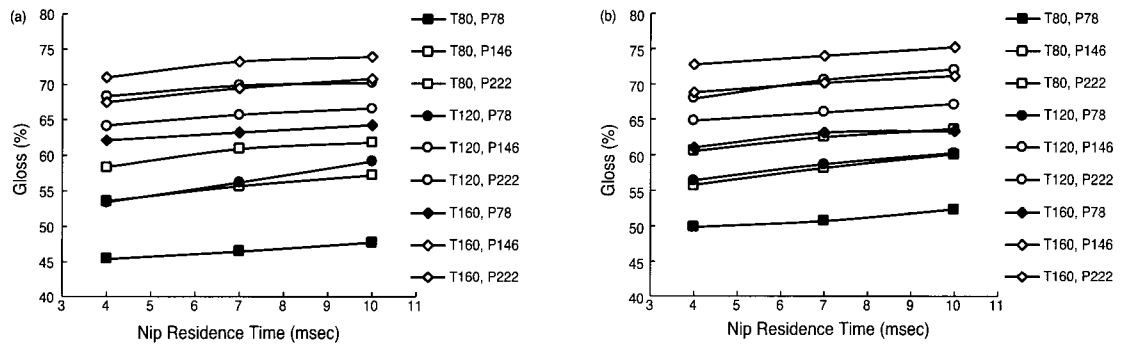


Fig. 3. Effect of nip residence time on gloss of coated paper.

Moisture content (a) : 5.5%, (b) : 6.5%

T : Heated roll temperature (°C), P : Line load (kg/cm)

폭은 점점 작아져 선압, 온도, 닙 체류시간이 모두 가장 크게 적용된 경우에는 거의 차이가 나타나지 않았다.

### 3.2 불투명도의 변화

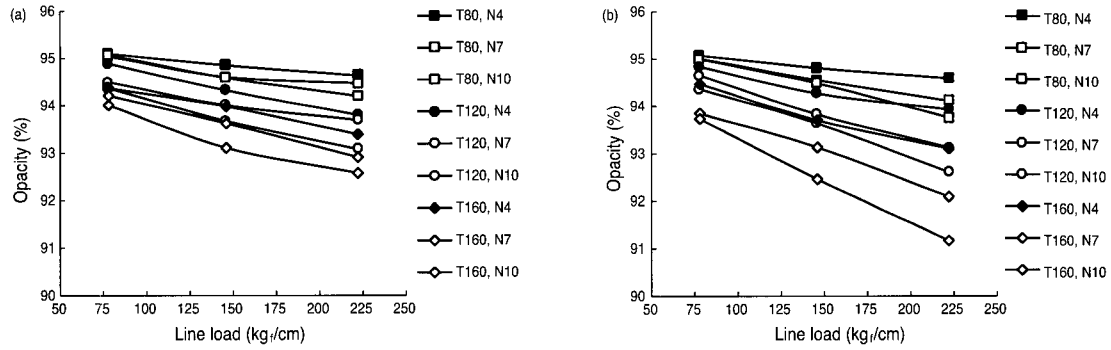
도공지의 캘린더링 후 각 캘린더링 인자의 변화에 대한 불투명도의 변화는 Figs. 4-6에 도시하였다. 여기에서 보는 것과 같이 선압, 온도, 닙체류시간의 증가에 따라 불투명도는 감소하였다.

Figs. 4-6 에서 (a)와 (b)를 비교하면 선압과 온도가 높고 닙 체류시간이 길게 적용되었을 때 함수율 변화에 따른 불투명도의 변화를 알 수 있다. 여기에서 보는 것과 같이 함수율이 증가했을 때 선압과 온도가 높

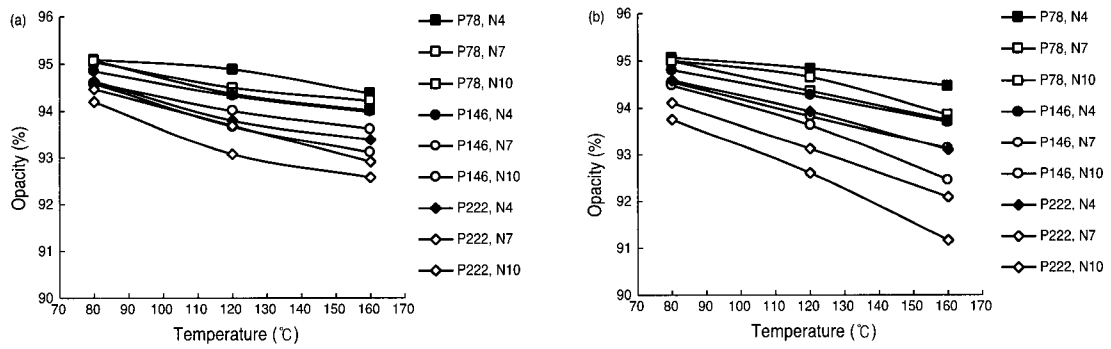
고 닙 체류 시간이 길면 불투명도는 크게 감소하였다. 이는 함수율의 증가에 따라 도공원지의 유리전이온도가 감소하여 더 쉽게 변형되기 때문이다. 특히 함수율의 증가하면 섬유가 유연해지므로 선압과 닙 체류시간의 증가에 의한 압축 변형이 커지게 되어 벌크의 감소에 따른 불투명도의 감소가 커지는 것으로 볼 수 있다. 전반적으로 도공지의 경우 소프트닙 캘린더링에 의한 불투명도의 변화는 크게 나타나지 않았다.

### 3.3 벌크의 변화

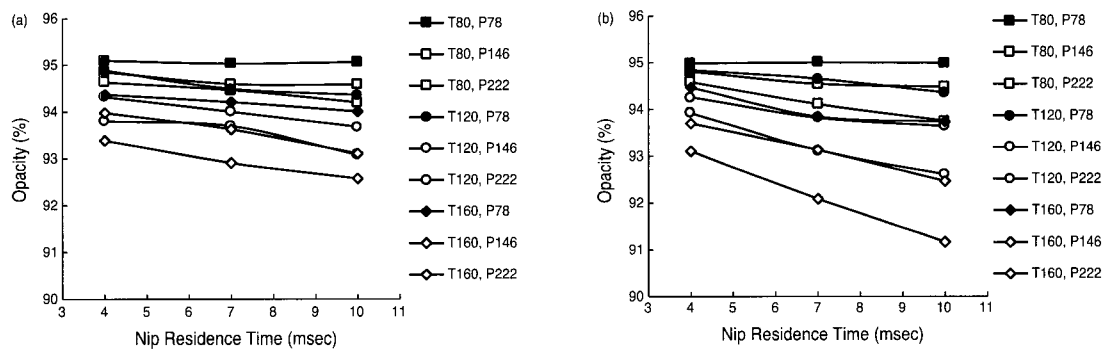
도공지의 캘린더링에서 각 캘린더링 인자의 변화에 따른 벌크 변화를 Figs. 7-9에 도시하였다. 벌크는 선압과 가열롤의 표면온도가 증가하고 닙 체류시간이 길



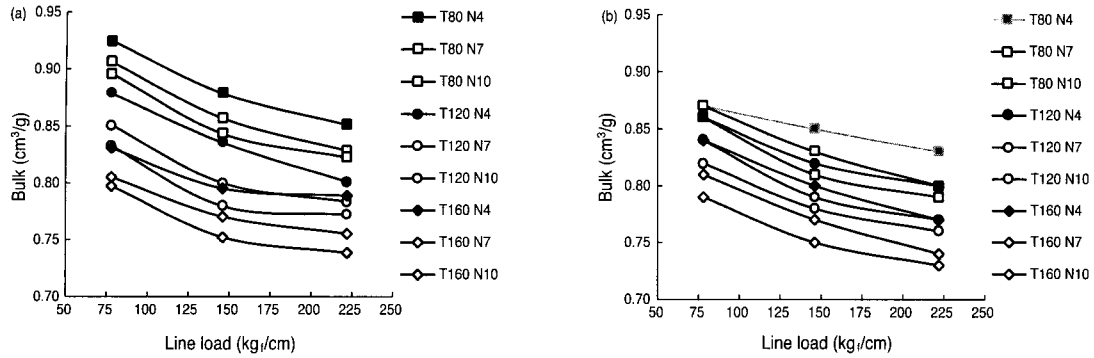
**Fig. 4. Effect of pressure on opacity of coated paper.**  
 Moisture content (a) : 5.5%, (b) : 6.5%  
 T : Heated roll temperature (°C), N : Nip residence time (ms)



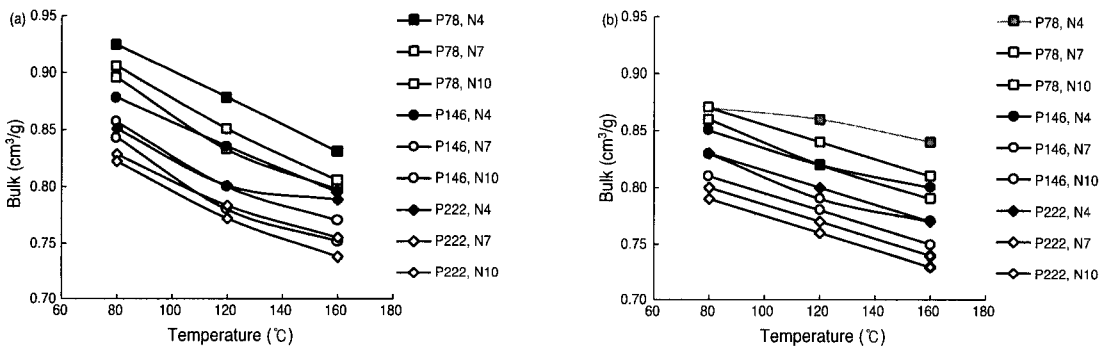
**Fig. 5. Effect of temperature on opacity of coated paper.**  
 Moisture content (a) : 5.5%, (b) : 6.5%  
 P : Line load (kg/cm), N : Nip residence time (ms)



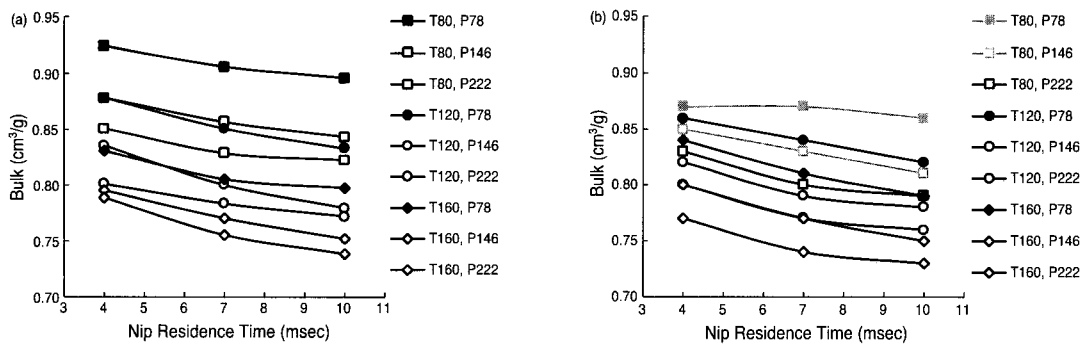
**Fig. 6. Effect of nip residence time on opacity of coated paper.**  
 Moisture content (a) : 5.5%, (b) : 6.5%  
 T : Heated roll temperature (°C), P : Line load (kgf/cm)



**Fig. 7. Effect of pressure on bulk of coated paper.**  
 Moisture content (a) : 5.5%, (b) : 6.5%  
 T : Heated roll temperature (°C), N : Nip residence time (ms)



**Fig. 8. Effect of temperature on bulk of coated paper.**  
 Moisture content (a) : 5.5%, (b) : 6.5%  
 P : Line load (kg/cm), N : Nip residence time (ms)



**Fig. 9. Effect of nip residence time on bulk of coated paper.**  
 Moisture content (a) : 5.5%, (b) : 6.5%  
 T : Heated roll temperature (°C), P : Line load (kg/cm)

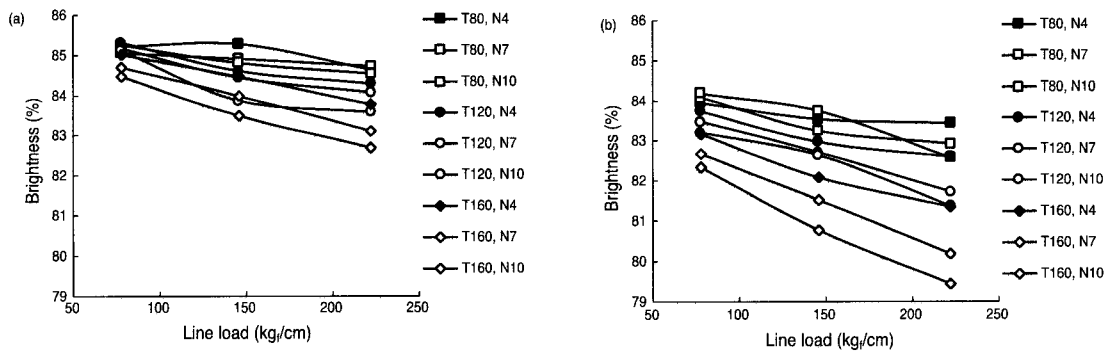
어지면 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 선압의 증가로 인해 님 내에서 주어지는 압력이 증가하여 종이 내부구조가 압축되면서 벌크가 감소한 것으로 생각된다. 또 가열롤의 표면온도와 님 체류 시간의 증가는 종이의 온도 상승을 유발하여 더 많은 압축이 일어난 것으로 생각된다. 캘린더링 인자의 증가에 따라 함수율 6.5%의 경우가 함수율 5.5% 경우보다 더 심하게 감소하였다. 예를 들어 함수율이 6.5%인 경우 최저조건인 온도 80℃, 선압 78kg<sub>f</sub>/cm, 님 체류시간 4ms에서 함수율 5.5%의 중선압 조건인 146kg<sub>f</sub>/cm의 결과와 비슷한 수치를 나타내었다. 이는 함수율의 증가하면서 유리 전이점이 낮아지게 되어 종이 표면에서 좀 더 깊은 곳까지 유리 전이점으로 가열되므로 물리적 압축에 의해 압축되는 부분이 더 많아지기 때문이다. 님 체류 시간의 변화에 의한 벌크의 변화는 다른 캘린더링 조

절인자의 변화에 의한 벌크의 변화보다 작았다.

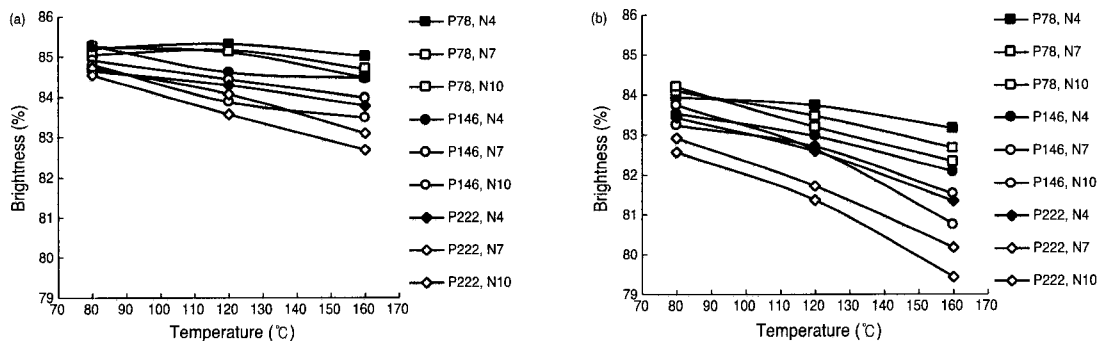
### 3.4 백색도의 변화

캘린더링 인자의 변화에 따른 백색도의 변화는 Figs. 10-12 에 도시되었다. 백색도는 과중한 조건이 적용되었을 때 종이가 과밀화 되면서 생기는 블랙닝 정도를 관찰하기 위해 측정하였다. 선압, 가열롤의 표면온도, 님 체류 시간 증가에 따라 백색도는 조금씩 감소하였는데 이는 불투명도와 벌크의 변화에서 충분히 예견할 수 있다.

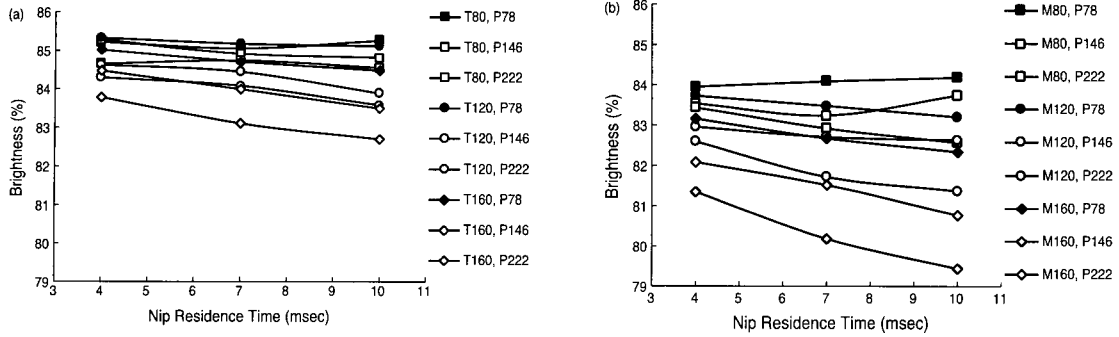
함수율 5.5%, 선압 78kg<sub>f</sub>/cm, 가열롤의 표면온도 80℃, 님 체류 시간 10ms의 적용 시 가장 높은 백색도를 나타내었다. 네 가지의 캘린더링 조절 인자 중 세



**Fig. 10. Effect of pressure on brightness of coated paper.**  
Moisture content (a) : 5.5%, (b) : 6.5%  
T : Heated roll temperature (°C), N : Nip residence time (ms)



**Fig. 11. Effect of temperature on brightness of coated paper.**  
Moisture content (a) : 5.5%, (b) : 6.5%  
P : Line load (kg<sub>f</sub>/cm), N : Nip residence time (ms)



**Fig. 12. Effect of nip residence time on brightness of coated paper.**  
 Moisture content (a) : 5.5%, (b) : 6.5%  
 T : Heated roll temperature (°C), P : Line load (kg/cm)

가지 인자를 일정하게 낮게 적용하고 한 가지만을 변화시켰을 때 백색도는 큰 변화를 보이지 않았다. 네 변수 가운데 선압에 의한 영향이 가장 컸으며, 그 다음으로 함수율의 영향이 컸다.

**3.5 SEM분석**

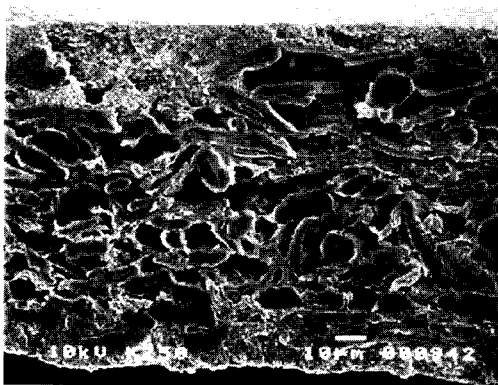
소프트 닙 캘린더링에 따른 도공지의 지층구조 변화를 관찰하기 위해 주사 전자 현미경을 이용하여 캘린더링된 도공지의 단면을 촬영하였다.

Fig. 13에서 (a)는 최저 적용 조건인 온도 80°C, 선압 78kg<sub>r</sub>/cm, 닙 체류시간 4ms에서 캘린더링한 도공지의 단면을 촬영한 사진이며, Fig. 13(b)는 (a)의 사진 중 도공층 부분을 확대한 사진이다. Fig. 13(c)는

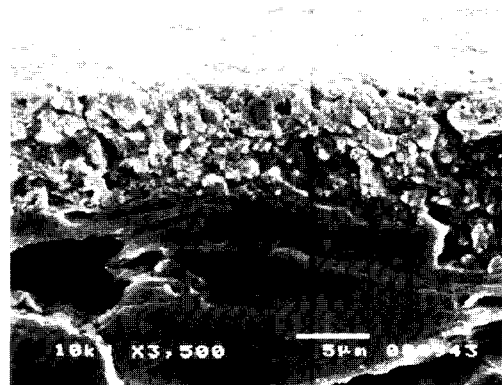
최대 적용 조건인 온도 160°C, 선압 222kg<sub>r</sub>/cm, 닙 체류시간 10ms를 적용하여 캘린더링한 도공지의 단면 촬영 사진이고 Fig. 13(d)는 (c)의 사진 중 도공층 부분을 확대한 사진이다.

Fig. 13(a)와 Fig. 13(c)의 두 사진을 비교해 보면 압력과 온도가 낮게 적용된 (a)의 경우 도공원지의 구조가 별키하게 유지되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 반면 (c)의 경우 도공원지가 상당히 고밀화되어 있는 것을 발견할 수 있는데, 이는 불투명도, 벌크, 백색도의 변화에서 이미 설명한 바와 같이 선압 증가에 의한 물리적 변형 증가와 온도 증가로 인한 열전달 증가로 유리 전이점까지 가열되는 지점이 도공원지층 내로 깊어짐으로 인해 열변형과 압축변형의 증가된 때문이다.

Fig. 13(b)와 Fig. 13(d)의 두 사진은 도공층의 확대사진을 찍은 것으로 두 조건간에 차이가 거의 없음

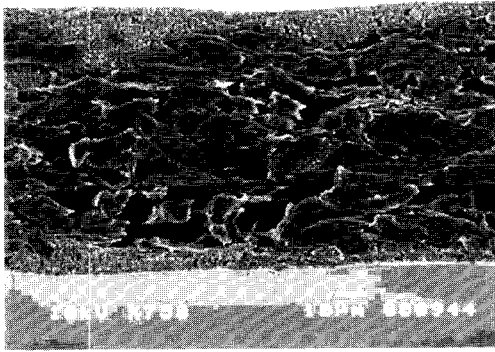


(a) SEM photograph in soft nip calendaring at roll temp. 80°C, line load 78kg<sub>r</sub>/cm, NRT 4ms

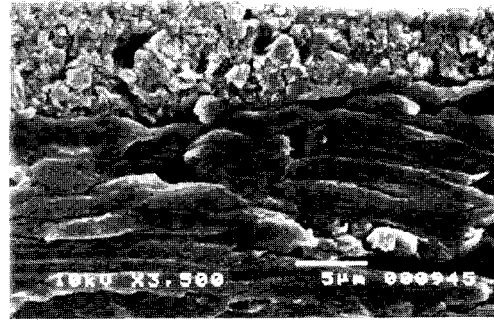


(b) SEM photograph zoomed from (a)





(a) SEM photograph in soft nip calendering at roll temp. 160°C, line load 222kg/cm, NRT 10ms



(d) SEM photograph zoomed from (c)

Fig. 13. Scanning electron micrographs of the cross section of soft nip calendered coated paper.

을 알 수 있다. 따라서 소프트 닙 캘린더링 시 본 실험에서 적용한 최저조건인 온도 80°C, 선압 78kg/cm, 닙 체류시간 4ms도 도공층의 열변형을 일으키기에 충분함을 알 수 있다. 반면 온도, 선압, 닙 체류시간이 증가되면 도공원지층의 과밀화에 의한 벌크, 불투명도의 감소를 피할 수 없으며, 그에 따라 블랙크닝 현상도 발생하게 된다.

#### 4. 결론

소프트 닙 캘린더링의 공정변수에 따른 도공지의 물성변화를 연구한 결과 캘린더링 압력, 함수율 및 온도의 증가에 따라 광택도는 증가하였으나 벌크, 백색도, 불투명도는 감소하였다.

도공지의 캘린더링 시 160°C의 고온을 적용하고 선압을 146kg/cm 이하로 적용하고 닙 체류 시간을 조절하여 적절한 광택도를 얻으면서 벌크와 불투명도의 감소를 최소화하여 블랙크닝이 일어나는 것을 방지할 수 있었다.

#### 인용문헌

1. Brown, J.T. and Latimer, J.J., A Comparative Study of Hot/Soft Nip Calendering and Conventional Supercalendering, TAPPI Coating Conference Proceedings, TAPPI PRESS : 77-90 (1992).
2. Keller, S.F., Calendering Variables Affecting Coated Paper Properties, TAPPI Coating Conference Proceedings, TAPPI PRESS : 71-76 (1992).
3. Groshek, J.M., A Finishing Alternative for Offset LWC, TAPPI Finishing and Converting Conference Proceedings, TAPPI PRESS, Atlanta, p. 73 (1994).
4. Schultz, B.J., The Effect of Calender and Formulation Variables on Optical Properties in "On-Line" Soft Nip Calendering, TAPPI Finishing and Converting Conference Proceedings, TAPPI PRESS, Atlanta, p. 147 (1996).
5. Gratton, M.F., Hamel, J. and McDonald, J.D., Temperature-Gradient Calendering : From the Laboratory to Commercial Reality, Pulp & Paper Canada, 98(3) : 62-70 (1997).
6. 이사용, 이학래, 펄프종이기술 34(1): 37 (2002).