

소프트넵 캘린더의 넵 압력 프로파일 평가와 넵 내 열전달 현상에 대한 해석

이 사 용 · 이 학 래[†] · 박 선 규

Evaluation of the Nip Pressure Profile and Analysis of Heat Transfer in Soft Nip Calender

Sayong Lee, Hak Lae Lee[†], and Sun Kyu Park

ABSTRACT

Understanding the nip geometry and heat transfer phenomena of soft nip calenders, which has been used in the production of newsprint and coated papers for many years, is very important since improper setting of soft nip calendering conditions causes deterioration of paper quality and productivity.

In this study theoretical analysis on nip pressure and heat transfer phenomena in the nip of soft nip calenders has been made. The variables examined were calendering pressure, surface temperature of the heating roll, nip residence time and ingoing sheet moisture.

By measuring nip widths and maximum nip pressure with Prescale film at a normal temperature, accurate line load has been obtained. With this line load, nip pressures at different temperature and nip widths were calculated. Results showed that as temperature increased, nip widths increased and nip pressures decreased.

Equations derived for the heat conduction phenomena in soft nip calender nip were derived based on the semi-infinite plate and finite difference method and were used for the analysis of heat transfer within the nip. Temperature profiles in z-direction of paper within the nip were obtained. Finite difference method allowed more accurate analysis of the heat transfer in the calender nip. In this study newsprint and coated paper were considered as a single plate and two-layer plate consisted of sheet and coating layers, respectively. Heat transfer to paper increased as heated roll surface temperature and nip residence time were increased.

1. 서 론

넵폭이 넓고 넵 체류시간(NRT)이 길며 롤 내

구성이 우수하여 초지 속도와 같은 수준으로 온
머신 작업이 가능할 뿐만 아니라 슈퍼캘린더링에
준하는 캘린더링 품질을 얻을 수 있는 소프트넵

• 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

캘린더는 1980년대 후반부터 개발되어 최근에는 유럽과 북미 지역에서 고급 도공지와 신문용지에 널리 적용되고 있으며 국내에서도 도공지와 신문용지의 캘린더링에 이용되고 있다.

국내에서 소프트넵 캘린더의 적용이 가장 널리 행해지고 있는 신문용지의 경우 제지 원료면에서 볼 때 외국과 달리 고지의 함량이 매우 높기 때문에 외국의 소프트넵 캘린더링 적용 기술을 단순히 도입하여 사용하는 것은 부적절하다. 이는 고지의 함량이 높을수록 캘린더링에 따른 두께 감소가 크게 발생하기 때문이다. 따라서 우리의 원료구성에 알맞은 소프트넵 캘린더링 기술의 확립이 절실히 요청되고 있다.

소프트넵 캘린더링은 캘린더링 시 적용되는 압력과 온도에 따라 캘린더링된 지필의 평활도와 광택도가 크게 달라진다. 이는 소프트넵 캘린더에서는 가열롤에서 지필로 열전달에 의해 지필 표면의 온도가 유리전이점을 넘게 되어 일어나는 표면 변형과 적용된 압력에 의해 넵에서 일어나는 마찰현상과 복제현상으로 지필의 평활도와 광택도가 발현되기 때문이다. 따라서 소프트넵 캘린더링 시 적절한 평활도와 광택도의 구현에 적합한 캘린더링 조건을 구하기 위해서 정확한 넵폭의 측정과 이를 근거로 한 넵의 기하구조 해석을 통한 압력 프로파일 평가, 그리고 넵 내에서 일어나는 열전달 현상과 지필의 표면변형과의 관계에 대한 정확한 이해가 필요하다.

본 연구에서는 국내에서 개발된 소프트넵 캘린더용 연질롤(90 Shore D)¹⁾의 넵 기하구조를 실제로 정확히 평가할 수 있는 방법을 확립하고, 넵 내 지필의 열전달 현상을 반무한판(Semi-infinite plate)에서의 1차원 열전도와 유한차분법(Finite difference method)을 이용한 1차원 비정상상태의 열전도로 가정하여 검토하고, 넵 내 지필의 온도분포를 구하여 이를 해석하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 캘린더

소프트넵 캘린더는 상부와 하부롤은 금속롤로, 중앙롤은 연질롤의 3롤로 구성된 것을 사용하였다. 상부 금속롤은 최고온도 200℃까지 가열할

수 있는 것이었으며, 최고속도는 64 m/min였다. 중간롤은 경도 90 Shore D의 연질롤을 사용하였다. 금속롤의 지름과 길이는 각각 180 mm, 255 mm였으며, 연질롤의 지름과 길이는 각각 220 mm, 250 mm였다.

분석의 대상으로는 국내 신문용지와 도공지를 설정하였다. 신문용지는 평량 46 g/m²와 54 g/m²의 두 종류를 대상으로 하였다. 이들의 두께는 각각 95 μm와 113 μm였다. 도공지는 양면도공된 평량 115 g/m²인 도공지를 분석대상으로 설정하였다. 이 도공지의 두께는 110 μm였으며, 도공안료로 GCC와 클레이를 70:30 사용하여 제조된 것이었다.

2.2 넵 기하구조 해석

넵폭 측정은 Fuji사의 프리스케일 필름(Prescale Film) 중 초저압용(LLW)을 사용하여 행하였다. 넵압의 측정을 위해서 중압용(MW), 고압용(HS) 프리스케일 필름을 이용하였으며, Fig. 1에 도시된 넵 내의 최대압력 P_{max} 를 측정하였다. 또 넵 내의 압력 $P(x)$ 는 식 [1]²⁾에

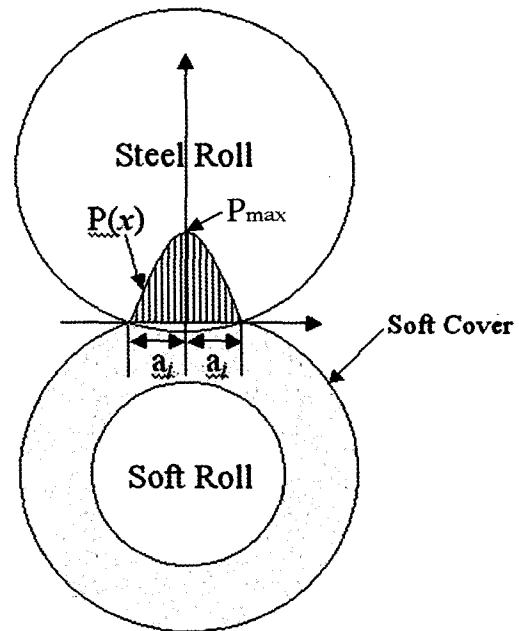


Fig. 1. Geometry of a soft calender nip.

의해 계산하였다. 납압 측정 시에는 상부롤과 하부롤 사이에 프리스케일 필름을 놓고 5초간 가압 후 1.5 m/min으로 연질롤 원주의 1/4을 회전시켰다. 이를 Fuji사에서 제공하는 전용농도계(FPD301)와 압력환산기(FPD303)를 사용하여 필름에 발색된 붉은색의 농도를 롤의 축방향으로 5mm 간격으로 MPa 단위의 면압으로 환산하였다. 이 환산된 값(P_{max})과 측정된 납폭의 1/2($a_i = W_i/2$)을 식 [2]²⁾에 대입하여 압력을 측정한 위치의 선압(F_i)을 계산하였다. 이렇게 계산된 측정 위치의 선압 F_i 를 롤의 종축방향으로 구분구적법을 써서 납 전체에 가해진 힘 F_{total} (식 [3])을 구하고, 이를 다시 납의 길이(L)로 나누어 납 전체에 걸린 선압 F(식 [5])를 계산하였다. F_1 은 첫 번째 측정위치에서 계산된 선압이며 F_n 은 마지막 측정위치에서 계산된 선압이다.

$$P(x) = P_{max} \left(1 - \frac{x^2}{a_i^2} \right) \cos \left(\frac{\pi}{2} \frac{x^2}{a_i^2} \right) dx \quad [1]$$

$$F_i = 2P_{max} \int_0^{a_i} \left(1 - \frac{x^2}{a_i^2} \right) \cos \left(\frac{\pi}{2} \frac{x^2}{a_i^2} \right) dx \quad [2]$$

$$F_{total} = \sum_{i=1}^n 0.5 \times F_i - 0.25 \times (F_1 + F_n) \quad [3]$$

$$L = 0.5 \times (n-1) \quad [4]$$

$$F = \frac{F_{total}}{L} \quad [5]$$

2.3 반무한판(Semi-infinite plate)에서 1차원 비정상상태의 열전도

납 내에서 지필의 열전달을 반무한판에서 1차원 비정상상태의 열전도로 생각하고 가열롤과 접촉하는 지필표면의 온도를 가열롤의 온도와 같다고 가정하면 지필의 온도분포를 식 [6]과 같이 나타낼 수 있다.^{3,4)}

$$T(x, t) = T_i + (T_0 - T_i) \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha \cdot t}} \right) \quad [6]$$

$T(x, t)$: 가열롤 표면으로부터 거리 x 에서 종이의 온도, $^{\circ}\text{C}$

T_i : 유입지의 온도, $^{\circ}\text{C}$

T_0 : 가열롤의 표면온도, $^{\circ}\text{C}$

x : 가열롤 표면으로부터 거리, mm

t : 납 체류시간, sec

α : 종이의 열확산계수(thermal diffusivity) :

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p}$$

k : 열전도율(thermal conductivity, $\text{W/m} \cdot \text{K}$),

ρ : 밀도(density, kg/m^3),

C_p : 비열(specific heat, $\text{J/kg} \cdot \text{K}$),

erfc : 에러보함수(complementary error function) :

$$\operatorname{erfc} w = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^w e^{-v^2} dv$$

2.4 유한차분을 이용한 1차원 비정상상태의 열전도

푸리에 법칙(Fourier's Law)을 기본으로 한 1차원 비정상상태의 열전달 공식인 식 [7]에서 유한차분법을 이용하여 1차원 비정상상태의 열전도 방정식을 유도하여 식 [8]을 얻었다.⁵⁾

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad [7]$$

$$T_m^{p+1} = \frac{\alpha \cdot t}{(\Delta x)^2} \cdot (T_{m+1}^{p+1} + T_{m-1}^p) +$$

$$\left[1 - \frac{2\alpha \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2} \right] \cdot T_m^p \quad [8]$$

T_m^{p+1} : 지필 내부의 온도, $^{\circ}\text{C}$

Δt : 미세시간 ; $\Delta t = (p+1) - p$

Δx : 지필 내부의 열전달 방향으로의 미세구간 ; $\Delta x = (m+1) - m$

3. 결과 및 고찰

3.1 넵 압력 프로파일 평가

3.1.1 선압측정

파일럿 캘린더의 실린더 압력을 $60 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 에서 $160 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 까지 $20 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 의 간격으로 변화시켰다. 각 압력에서 초저압용 프리스케일 필름으로 넵 프로파일 이미지를 찍고 이를 70배 확대하여 5 mm의 간격으로 넵폭(W_i)을 측정하였다 (Fig. 2). 넵폭 측정과 같은 실린더 압력조건에서 얻어진 넵 내 최고압력 P_{\max} 는 Fig. 3에 나타

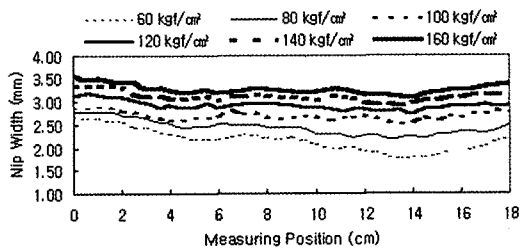


Fig. 2. Nip widths profiles.

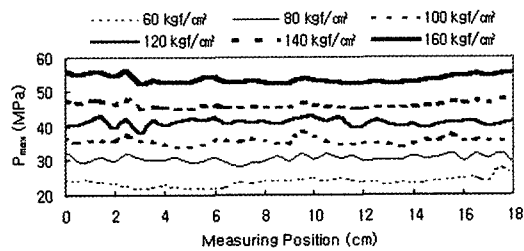


Fig. 3. P_{\max} profiles.

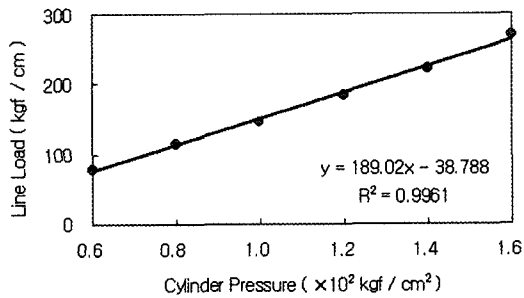


Fig. 4. Line load in soft nip cylinder pressure.

내었다.

이렇게 측정된 P_{\max} 와 W_i 으로부터 전술한 방법대로 F_i , F_{total} , F 를 구하였다. Fig. 4에는 실린더 압력과 선압의 관계를 도시하였다.

초저압용 프리스케일 필름을 사용하여 80, 120, 160°C에서의 넵폭을 실온에서의 넵폭측정과 같은 방법으로 측정한 결과 가열물의 표면온도와 선압의 증가에 따라 넵폭이 증가하였다(Fig. 5).

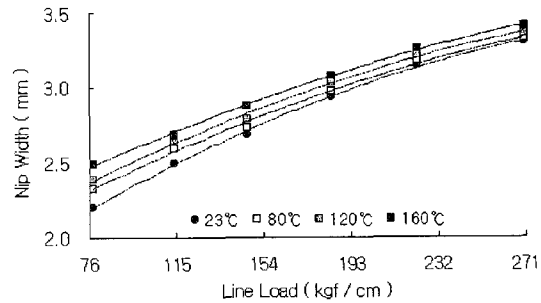


Fig. 5. Effects of line load and temperature variation on nip width.

3.1.2 넵폭과 선압을 이용한 넵 내 최고압력의 계산

3.1.1에서 측정된 선압 F 와 각 온도별 넵폭 a_i 를 식 [2]에 적용하여 넵폭 a_i 를 측정된 위치에서의 넵 내 최고압력 P_{\max} 를 구하였다(Fig. 6).

Hertz의 방정식⁶⁾에 의하면 넵 내 최고압력

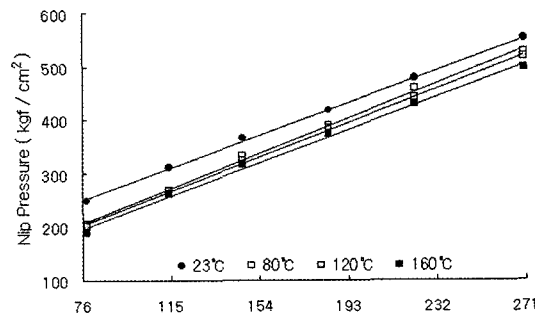


Fig. 6. Effect of line load and temperature variation on nip pressure.

P_{max} 는 닢 내에서의 탄성모듈러스와 선압에 비례한다. 즉 가열물의 표면온도가 증가하면 탄성 모듈러스가 감소하여 P_{max} 가 감소하게 되고 선압이 증가하면 P_{max} 는 증가하게 된다.

3.2 반무한판에서 1차원 비정상상태의 열전도

3.2.1 신문용지의 온도분포

신문용지의 열전도도와 비열이 각각 $0.06 \text{ J/m} \cdot \text{s} \cdot \text{K}$ 와 $1340 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ 일 때 평량 46 g/m^2 , 밀도 0.47847 g/cm^3 인 신문용지의 열확산계수는 $9.0445 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$, 평량 54 g/m^2 , 밀도 0.47847 g/cm^3 인 신문용지의 열확산계수는 $9.3579 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ 이 된다. 이를 식 [6]에 적용하면 유입지의 온도 23°C 에서 각 평량 별 온도 분포식 [9]와 [10]을 구할 수 있다.

평량 46 g/m^2 인 신문용지

$$T(x, t) = 23 + (T_0 - 23) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{20\sqrt{0.90445 \cdot t}}\right) \quad [9]$$

평량 54 g/m^2 인 신문용지

$$T(x, t) = 23 + (T_0 - 23) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{20\sqrt{0.93579 \cdot t}}\right) \quad [10]$$

이 식에 가열물의 표면온도 $80, 120, 160^\circ\text{C}$ 를 T_0 로, 닢 체류시간 $4, 7, 10 \text{ ms}$ 를 t 로 하여 각 캘린더링 조건에서 닢 내 신문용지의 온도분포를

구하였다(Fig. 7). 닢 체류시간 t 와 가열물의 표면온도 T_0 가 증가할수록 종이 내부의 온도가 증가하였고, 가열물과 접한 지필 표면부위에서의 온도 감소 경사는 닢 체류시간이 짧을수록 더 크게 나타났다.

함수율 9%와 12%인 신문용지의 유리전이온도를 식 [11]로부터 구하면 각각 72°C 와 49°C 가 된다.

$$T_g = 234.2 \times e^{-0.13 \cdot mc} \quad [11]$$

이 두 온도를 Fig. 7(a)에 적용하여 교차되는 부분을 구하면 72°C 의 경우 $24\text{--}25 \mu\text{m}$ 지점에서 $120^\circ\text{C}, 7 \text{ ms}$ 와 $160^\circ\text{C}, 4 \text{ ms}$ 의 두 조건이 교차한다. 이는 지필의 표면에서부터 $24\text{--}25 \mu\text{m}$ 까지 열변형이 일어나는 유리전이온도 T_g 로 가열하는데 두 조건이 모두 가능함을 의미한다. 하지만 $25 \mu\text{m}$ 를 지나면서부터는 같은 깊이에서 $120^\circ\text{C}, 7 \text{ ms}$ 의 조건이 $160^\circ\text{C}, 4 \text{ ms}$ 의 조건보다 온도가 더 높게 나타나는데, 이는 그 이후의 위치에서는 $120^\circ\text{C}, 7 \text{ ms}$ 의 조건이 $160^\circ\text{C}, 4 \text{ ms}$ 의 조건보다 열적 변형이 더 쉬운 상태에 이르도록 함을 의미한다. 따라서 원하는 부분까지 열변형을 시키는 방법으로는 그 부분에서 원하는 온도를 형성하는 조건 중 가열물의 표면온도가 더 높고 닢 체류시간이 더 짧은 조건이 유리하다고 볼 수 있다. 49°C 의 경우도 마찬가지로 $80^\circ\text{C}, 10 \text{ ms}$ 의 조건과 $120^\circ\text{C}, 4 \text{ ms}$ 의 조건이 $31 \mu\text{m}$ 지점에서, $120^\circ\text{C}, 10 \text{ ms}$ 의 조건과 $160^\circ\text{C}, 7 \text{ ms}$ 의 조건이 $48 \mu\text{m}$ 지점에서 각각 교차한다. 평량간의 차이는 거의 나타나지 않았다.

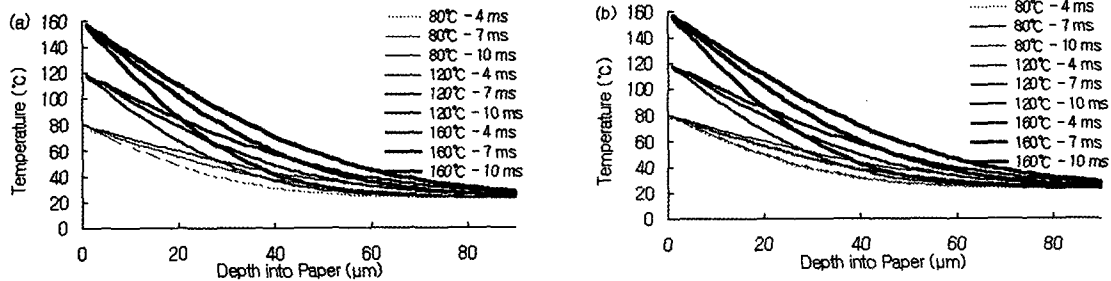


Fig. 7. Z-directional temperature profiles of newsprint as a function of the distance from the surface contacting hot metal roll and NRT(t) by semi-infinite plate method : (a) 46 g/m^2 , (b) 54 g/m^2 .

3.2.2 도공지의 온도분포

도공지의 경우 도공층과 원지층으로 구성된 이층의 반무한판으로, 또 도공층의 두께를 도공지 두께의 1/10로 가정하여 두 구간으로 나누고 식 [12]와 [13]에 의해 캘린더 님에서의 온도분포를 구하였다. 먼저 전체 두께의 1/10인 부분은 도공층으로 구성되어 있으므로 $0 \leq x \leq c/10$ 의 범위에서의 온도분포는 식 [12]와 같이, 도공층 범위 이외의 곳, 즉 $c/10 < x < \infty$ 인 부분에서의 온도분포는 식 [13]과 같이 주어진다.

$$T(x, t) = T_i + (T_0 - T_i) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_c \cdot t}}\right) \quad [12]$$

$$T(x, t) = T_i + (T_0 - T_i) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{c/10}{2\sqrt{a_c \cdot t_1}}\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{c/10}{2\sqrt{a_p \cdot (t - t_1)}}\right) \quad [13]$$

- T_0 : 가열롤의 표면온도, °C
- T_i : 도공지의 유입지 온도, °C
- x : 도공지 표면에서부터의 깊이, mm
- c : 도공지의 두께, mm
- t : 님 체류시간, sec
- t_1 : 도공층까지 열전도가 되는 시간, sec
- a_c : 도공층의 열확산계수(thermal diffusivity)
- a_p : 도공원지의 열확산계수(thermal diffusivity)

GCC와 클레이의 비율이 7:3으로 사용된 도공층의 공극률은 0.4364이라 가정하였다.⁸⁾ 또 도공지의 평량은 115 g/m², 도공량은 34 g/m², 도공지의 두께는 110 μm이라 가정하였다. 그리고, 도공지 전체 두께의 1/10인 11 μm를 도공층 두께라 가정하여 도공원지와 도공층의 밀도를 계산한 결과 각각 0.9198 g/cm³와 1.4532 g/cm³이 얻어졌다.

도공원지의 열전도도와 비열 값으로 각각 0.06 J/m·s·K와 1340 J/kg·K를, 도공원지의 밀도와 함께 적용하여 계산된 도공원지의 열확산계수는 4.8680×10^{-4} cm²/s이었다. 도공안료인 GCC의 열전도도는 2.80 J/m·s·K, 비열은

830 J/kg·K, 클레이의 열전도도는 1.3 J/m·s·K, 비열은 880 J/kg·K를 적용하고,⁹⁾ 도공층의 열전달이 공극을 제외한 부분에서 일어난다고 가정하였다. 또 도공안료의 구성비율과 공극률을 GCC와 클레이의 열전도도와 비열과 함께 고려하여 도공층의 열전도도 1.32 J/m·s·K와 비열 845 J/kg·K를 구하였다. 이를 도공층의 밀도와 같이 적용하여 도공층의 열확산계수로 1.079×10^{-2} cm²/s의 값을 얻었다. 이렇게 구한 도공층과 도공원지의 열확산계수를 식 [12]와 [13]에 적용하여 님 내에서 도공지의 온도분포식 [14]와 [15]를 구하고 온도분포를 도시하였다 (Fig. 8).

먼저 도공층 부분, 즉 $0 \leq x \leq c/10$ 인 곳의 온도분포는 식 [14]와 같았다.

$$T(x, t) = 23 + (T_0 - 23) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x \times 10^{-2}}{2\sqrt{0.1079 \cdot t}}\right) \quad [14]$$

또 원지층, 즉 $c/10 < x < \infty$ 인 부분의 온도분포는 다음 식 [15]와 같았다.

$$T(x, t) = 23 + (T_0 - 23) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{11 \times 10^{-2}}{2\sqrt{0.1079 \cdot t_1}}\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x - 10}{20\sqrt{0.4868 \cdot (t - t_1)}}\right) \quad [15]$$

여기서 t_1 은 열이 표면으로부터 11 μm까지 전도되는 데 걸리는 시간이다.

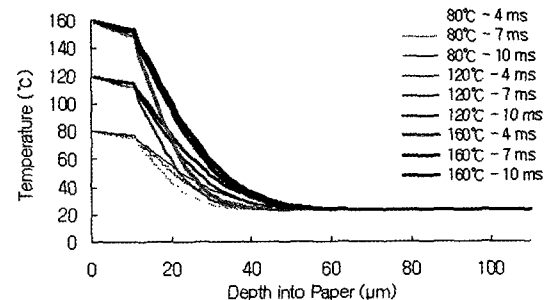


Fig. 8. Temperature profile of coated paper as a function of paper depth and NRT(t) by semi-infinite plate method.

Fig. 8에서 보는 바와 같이 도공지의 열전달은 가열물의 온도와 닢 체류시간의 변화에 상관없이 50 μm 까지 밖에 이루어지지 않았다. 도공층까지 온도는 거의 직선적으로 감소하였으며, 그 감소의 기울기는 그리 크지 않았다. 실제로 도공층의 열확산계수는 도공원지의 열확산계수보다 약 39.3배가 더 크게 나타났다. 따라서 도공층에서의 열전달이 도공원지의 열전달보다 상당히 빨리 이루어짐을 알 수 있다. 이는 Keller¹⁰⁾에 의해 보고된 바와 일치한다. 따라서 캘린더 닢에서 코팅층은 가열물의 열전달에 빠르게 반응하여 쉽게 열적연화를 일으키고, 특히 가열물의 온도를 고온으로 적용했을 경우 캘린더링의 효과는 닢 체류시간에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

3.3 유한차분을 이용한 1차원 비정상상태의 열전도

3.3.1 신문용지의 온도분포

상부를 온도 120 $^{\circ}\text{C}$, 하부를 온도 80 $^{\circ}\text{C}$, 유입지 온도 24, 40 $^{\circ}\text{C}$ 인 초기조건에서 NRT를 1, 2, 3, 4 ms로 변화시킬 경우 일차원 비정상상태에서 지필의 온도분포 그래프를 구하고 이를 도시하였다 (Fig. 9). 적용된 신문용지의 평량과 열확산계수는 각각 54 g/m^2 과 $9.3579 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ 였다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 NRT가 길어질수록 온도분포곡선은 완만해졌으며, 60 μm 지점을 기준으로 해서 그래프의 왼쪽은 반무한판에서의 열전도와 같은 경향을 나타내었다. 이 경우에는 특

히 하부물의 온도를 함께 적용하였기 때문에 마찰에 의해 가열되어 일정 온도를 유지하는 소프트롤이 열전도에 미치는 영향도 살펴볼 수 있다.

3.3.2 도공지의 온도분포 초기

온도조건은 신문용지와 같았으며, 도공지의 조건을 3.2.2와 같이하여 식 (8)에 따라 도공층과 도공원지층의 온도분포를 구하고 이를 도시하였다 (Fig. 10). 그 결과 신문용지의 같이 NRT의 증가에 따라 온도분포곡선은 완만해졌다. 또 반무한판을 이용한 온도분포곡선(Fig. 8)에서처럼 도공층과 도공원지층 사이의 확연한 온도경사의 차이는 나타나지 않았다. 따라서 도공층과 도공원지의 열확산계수 차이에 따른 온도경사의 차이를 알아보기 위해 Fig. 10의 각 그래프를 미분하였다 (Fig. 11). 그 결과 도공층을 의미하는 1-11 μm 부분과 99-110 μm 부분에서 온도경사의 변화는 거의 나타나지 않았다. 이것은 도공층에서의 열전달이 도공원지층보다 훨씬 잘 이루어짐을 의미하며 반무한판의 열전도로 해석한 Fig. 8의 결과와도 부합된다.

4. 결론

소프트닙 캘린더 닢 내의 CD 및 MD 압력 프로파일을 평가하기 위해 프리스케일 필름을 이용하여 닢폭과 면압을 측정하고 이를 압력 환산식에 적용하여 해석하였으며, 이를 바탕으로 압력과 온도 증가에 따라 닢 내의 정확한 압력분포를 구할

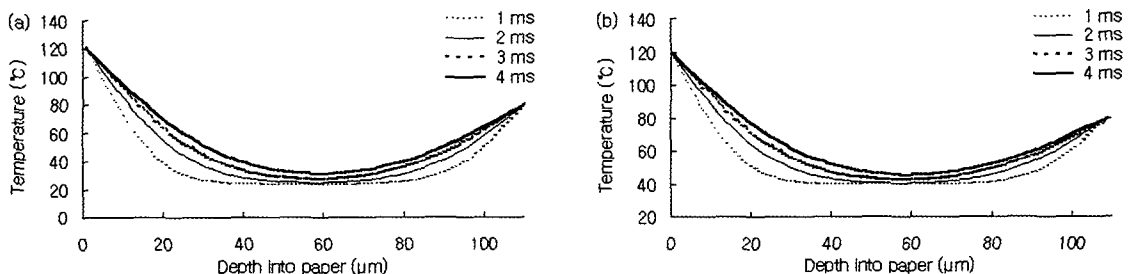


Fig. 9. Z-directional temperature profiles of newsprint as a function of the distance from the surface contacting hot metal roll and NRT(t) by finite difference method : ingoing sheet temp. (a) 24 $^{\circ}\text{C}$, (b) 40 $^{\circ}\text{C}$.

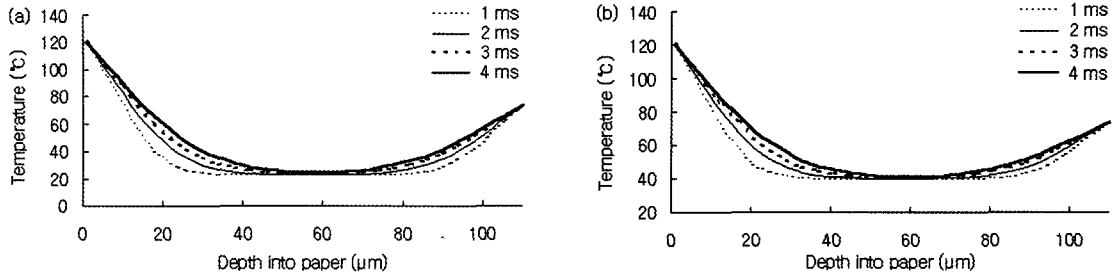


Fig. 10. Z-directional temperature profiles of coated paper as a function of the distance from the surface contacting hot metal roll and NRT(t) by finite difference method : ingoing sheet temp. (a) 24 °C, (b) 40 °C.

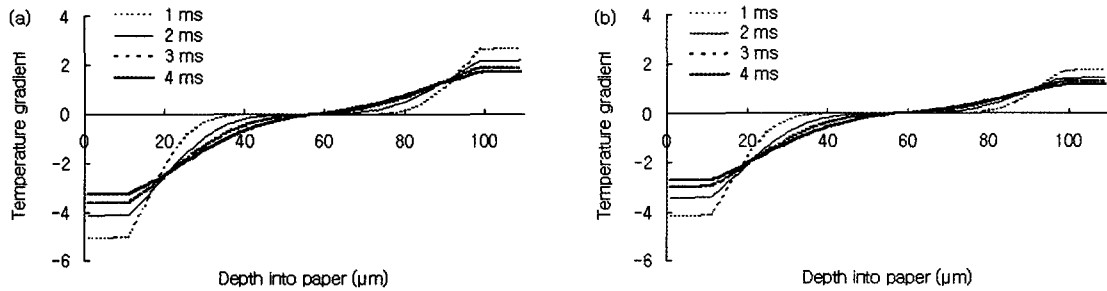


Fig. 11. Differential curves of Fig. 10 : ingoing sheet temp. (a) 24 °C, (b) 40 °C.

수 있는 방안을 제시하였다. 신문용지와 도공지에 대해 반무한판(semi-infinite plate)에서 1차원 비정상상태의 열전도와 유한차분법(finite difference method)을 이용한 1차원 비정상상태의 열전도에 의해 넵 내 지필의 온도분포곡선을 구한 결과는 다음과 같다. 전반적으로 NRT의 증가에 따라 지필 내부의 온도분포곡선이 완만해지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 열원에 접촉되는 시간이 증가함에 따라 지필 내부까지 열전달이 일어남으로 인해 지필 내부의 온도가 상승되었기 때문이다. 따라서 NRT가 증가할수록 지필 내부의 상태는 물리적인 변형이 이루어지기 쉬운 상태가 되므로 압력에 의한 지층의 고밀화가 더 많이 일어나 불투명도가 감소할 것으로 예상된다. 신문용지의 경우 반무한판을 이용한 방법과 유한차분법의 결과가 유사하게 나타났다. 반면 도공지의 경우 반무한판을 이용한 방법보다 유한차분법을 이용한 경우가 도공층과 도공원지층 사이의 온도분포에서 더 완만한 변화를 나타내는 결과를 주었다. 하지만 이 경우에도 도공층과 도공원지층간에 열전달

속도의 차이는 존재하는 것을 미분결과를 통하여 확인하였다. 유한차분법은 반무한판을 이용한 방법에 비해 지필 양쪽의 온도분포를 동시에 분석할 수 있을 뿐 아니라, 더 정확한 온도분포를 구할 수 있다는 점에서 지필의 온도분포를 살펴보는 데 더욱 타당한 방법으로 생각되었다.

인용 문헌

1. 광성고무를, 제지용 소프트 넵 캘린더 개발 및 적용성 평가 (1999).
2. Huu Luong, C. and Lindem, P. E., Nordic Pulp Paper Res. J., 12(3):207 (1997).
3. Vreeland, H., Ellis, R., and Jewett, B., Tappi J., 72(11):139 (1989).
4. Vreeland, H., Ellis, R., and Kenneth, B. Jewett, Tappi J., 72(12):201 (1989).
5. Holman, J. P., Heat Transfer, Eighth Edition, McGraw Hill, pp. 168-179 (1997).

6. Lyons, A. V. and Thuren, A. R. TAPPI Finishing and Converting Conference Proceedings, TAPPI PRESS, Atlanta, GA, 5 (1990).
7. Mark, R., Handbook of Physical and Mechanical Testing of Paper and Paperboard Vol. 2, Marcel Dekker, pp. 245-250 (1983).
8. Lee, H. L., J. Korea TAPPI 26(4):25 (1994).
9. Incropera, F. P. and De Witt, D. P., Introduction to Heat Transfer, Third Edition, Wiley, pp. 755-756 (1996).
10. Keller, S. F., 1992 TAPPI Coating Conference Proceedings, TAPPI Press, Atlanta, GA, 71 (1992).