

소프트 닥 캘린더의 닥 내 열전달 현상에 대한 해석

이 사 용 · 이 학 래 · 박 선 규

서울대학교 임산공학과

1. 서 론

국내에서 현재 도공지와 신문용지의 캘린더링에 이용되고 있는 소프트 닥 캘린더링은 캘린더링 시 적용되는 압력과 온도에 따라 가공된 지필의 평활도와 광택도가 크게 달라진다. 이는 적용된 압력에 의해 닥에서 일어나는 마찰현상과 복제현상 뿐 아니라 가열롤에서 지필로 열전달이 발생함에 따라 지필 표층의 온도가 지필의 유리전이점을 넘게 되면 표층의 열변형이 발생하기 때문이다. 따라서 소프트 닥 캘린더링 시 적절한 평활도와 광택도의 구현에 적합한 온도조건을 구하기 위해서는 닥 내에서 일어나는 열전달 현상과 지필의 표면변형과의 관계에 대한 정확한 이해가 필요하다. 본 연구에서는 신문용지와 도공지의 소프트 닥 캘린더링 시 발생하는 닥 내 지필의 열전달 현상을 반무한판(Semi-infinite plate)에서의 1차원 열전도와 유한차분법(Finite different method)을 이용한 1차원 비정상상태의 열전도로 가정하여 검토하고 닥 내 지필의 온도분포를 구하고 이를 해석하였다.

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

닥 내에서 지필의 열전달을 반무한판에서 1차원 비정상상태의 열전달로 생각하고 가열롤과 접촉하는 지필표면의 온도를 가열롤의 온도와 같다고 가정하면 지필의 온도분포를 식 [1]과 같이 나타낼 수 있다.^{1,2)}

$$T(x, t) = T_i + (T_0 - T_i) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha \cdot t}}\right) \text{-----[1]}$$

$T(x, t)$: 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 : 닥 체류시간 sec,

α : 종이의 열확산계수(thermal diffusivity) ; $\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p}$,

k : 열전도율(thermal conductivity, W/m·K),

ρ : 밀도(density, kg/m³),

C_p : 비열(specific heat, J/kg·K),

erfc : 에러보함수(complementary error function) ; $\text{erfc } w = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^w e^{-v^2} dv$

2.1 신문용지의 온도 분포

신문용지의 열전도도와 비열이 각각 0.06 J/m·s·K와 1340 J/kg·K³ 일때 평량 46 g/m², 밀도 0.47847 g/cm²인 경우 열확산계수는 9.0445×10^{-4} cm²/s였고, 평량 54 g/m², 밀도 0.47847 g/cm²인 경우 열확산계수는 9.3579×10^{-4} cm²/s였다. 이를 식[1]에 적용하여 유입지의 온도 23°C에서 각 평량에 따른 온도분포식인 식[2], [3]을 구했다.

- 평량 46 g/m² : $T(x, t) = 23 + (T_0 - 23) \cdot \text{erfc}\left(\frac{x}{20\sqrt{0.90445 \cdot t}}\right)$ -----[2]

- 평량 54 g/m² : $T(x, t) = 23 + (T_0 - 23) \cdot \text{erfc}\left(\frac{x}{20\sqrt{0.93579 \cdot t}}\right)$ -----[3]

이 식에 가열물의 표면온도 80, 120, 160°C를 T_0 로, 닙 체류시간 4, 7, 10 ms를 t 로 하여 각 캘린더링 조건에서 닙 내 신문용지의 온도 분포를 구하였다(Fig. 1). 닙 체류시간 t 와 가열물의 표면온도 T_0 가 증가할수록 종이 내부의 온도가 증가하였고 가열물과 접한 지필 표면부위에서의 온도 감소 경사는 닙 체류시간이 짧을수록 더 크게 나타났다.

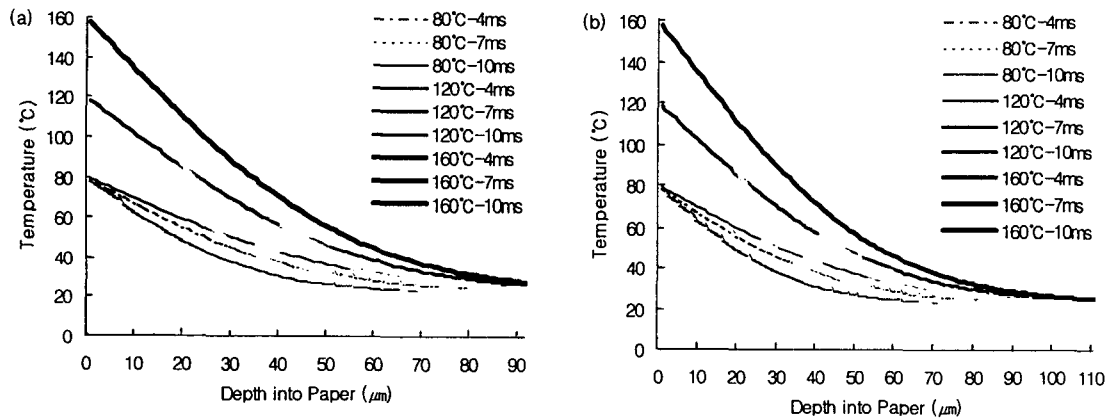


Fig. 1. Z-directional temperature profile of newsprint as a function of the distance from the surface contacting hot metal roll and NRT(t) by semi-infinite plate method : (a) 46 g/m², (b) 54 g/m².

2.2 도공지의 온도 분포

도공지의 경우 도공층과 원지층으로 구성된 이층의 반무한판으로, 또 도공층의 두께를 도공지 두께의 1/10로 가정하여 두 구간으로 나누어 식[4], [5]에 의해 캘런더 낱에서의 온도분포를 구하였다.

$$- 0 \leq x \leq c/10 : \quad T(x, t) = T_i + (T_0 - T_i) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_c \cdot t}}\right) \text{-----[4]}$$

$$- c/10 < x < \infty : \quad T(x, t) = T_i + (T_0 - T_i) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{c/10}{2\sqrt{\alpha_c \cdot t_1}}\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{c/10}{2\sqrt{\alpha_p \cdot (t - t_1)}}\right) \text{-----[5]}$$

T_0 : 가열롤의 표면온도 $^{\circ}\text{C}$, T_i : 도공지의 유입지 온도 $^{\circ}\text{C}$,
 x : 도공지 표면에서 부터의 깊이 mm, c : 도공지의 두께 mm,
 t : 낱 체류시간 sec, t_1 : 도공층까지 열전도가 되는 시간 sec,
 α_c : 도공층의 열확산계수(thermal diffusivity),
 α_p : 도공원지의 열확산계수(thermal diffusivity).

적용된 도공안료의 GCC와 Clay 비율은 7:3 이었고 공극률은 0.4364였다.⁴⁾ 도공지의 평량 115 g/m^2 , 도공량 34 g/m^2 , 도공지의 두께 $110 \mu\text{m}$ 와 가정한 도공층의 두께를 고려하여 구한 도공원지와 도공층의 밀도는 각각 0.9198 g/cm^3 와 1.4532 g/cm^3 이었다.

도공원지의 열전도도와 비열 값으로 각각 $0.06 \text{ J/m}\cdot\text{s}\cdot\text{K}$ 와 $1340 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ 를 도공원지의 밀도와 함께 적용하였을 때 도공원지의 열확산계수는 $4.8680 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ 이었다. 도공안료인 GCC의 열전도도는 $2.80 \text{ J/m}\cdot\text{s}\cdot\text{K}$, 비열은 $830 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$, Clay의 열전도도는 $1.3 \text{ J/m}\cdot\text{s}\cdot\text{K}$, 비열은 $880 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ 를 적용하였다.⁵⁾ 도공층의 열전달이 공극을 제외한 부분에서 일어난다고 가정하고, 도공안료의 구성 비율과 공극률을 GCC와 Clay의 열전도도와 비열에 적용하여 도공층의 열전도도 $1.32 \text{ J/m}\cdot\text{s}\cdot\text{K}$ 와 비열 $845 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ 를 얻었다. 이를 도공층의 밀도와 같이 적용하여 도공층의 열확산계수 $1.079 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ 의 값을 구했다. 이렇게 구한 도공층과 도공원지의 열확산 계수를 식[4], [5]에 적용하여 낱 내에서 도공지의 온도 분포식[6], [7]을 구하고 온도분포를 도시하였다(Fig. 2).

$$- 0 \leq x \leq c/10 : \quad T(x, t) = 23 + (T_0 - 23) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x \times 10^{-2}}{2\sqrt{0.1079 \cdot t}}\right) \text{-----[6]}$$

$$- c/10 < x < \infty : \quad T(x, t) = 23 + (T_0 - 23) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{11 \times 10^{-2}}{2\sqrt{0.1079 \cdot t_1}}\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{(x - 10)}{20\sqrt{0.4868 \cdot (t - t_1)}}\right) \text{-----[7]}$$

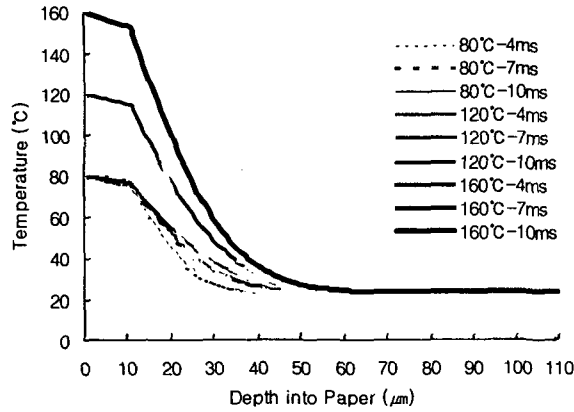


Fig. 2. Temperature profile of coated paper as a function of paper depth and NRT(t) by semi-infinite plate method.

여기서 t_1 은 열이 표면으로부터 11 μm 까지 전도되는데 걸리는 시간이다.

Fig. 2에서 보는 바와 같이 도공지의 열전달은 가열롤의 온도와 닢 체류 시간의 변화에 상관없이 50 μm 까지 밖에 이루어지지 않는다. 도공층까지 온도는 거의 직선적으로 감소하였으며 그 감소의 기울기는 그리 크지 않았다. 실제로 도공층의 열확산 계수는 도공원지의 열확산 계수보다 약 39.3 배가 더 컸다. 따라서 도공층에서의 열전달이 도공원지의 열전달보다 상당히 빨리 이루어졌다.

따라서 켈린더 닢에서 코팅층은 가열롤의 열 전달에 빠르게 반응하여 쉽게 열적연화를 일으킨다.

3. 유한차분을 이용한 1 차원 비정상상태의 열전도

푸리에 법칙(Fourier's Law)을 기본으로 한 1차원 비정상상태의 열전달 공식인 식[8]에서 유한차분법을 이용하여 1 차원 비정상상태의 열전도 방정식을 유도하여 식[9]를 얻었다.⁶⁾

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \text{-----}[8]$$

$$T_m^{p+1} = \frac{\alpha \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2} \cdot (T_{m+1}^p + T_{m-1}^p) + \left[1 - \frac{2\alpha \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2} \right] \cdot T_m^p \text{-----}[9]$$

T : 지필 내부의 온도 °C,

Δt : 미세시간 ; $\Delta t = (p+1) - p$,

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

3.1. 신문용지의 온도분포

상부를 온도 120°C, 하부를 온도 80°C, 유입지 온도 24, 40°C인 초기조건에서 NRT를 1, 2, 3, 4 ms로 적용하여 일차원 비정상상태에서 지필의 온도분포 그래프를 그렸다(Fig. 3).

적용된 신문용지의 평량과 열확산계수는 54 g/m^2 과 $9.3579 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ 였다. NRT가 길어질수록 온도분포곡선은 완만해지는 것을 확인할 수 있었다.

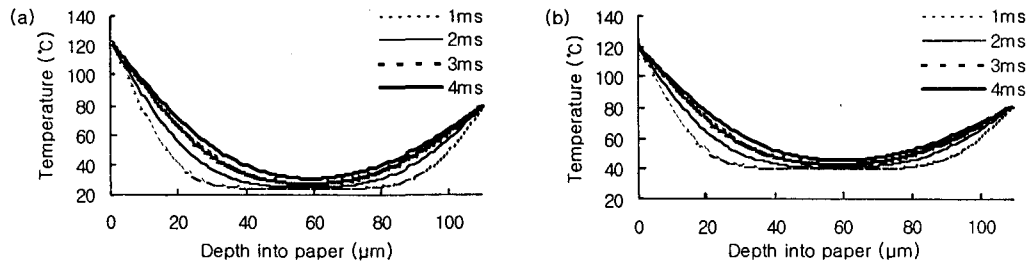


Fig. 3. Z-directional temperature profile of newsprint as a function of the distance from the surface contacting hot metal roll and NRT(t) by finite different method : ingoing sheet temp. (a) 24°C , (b) 40°C .

3.2. 도공지의 온도분포

초기 온도조건은 신문용지와 같고 적용된 도공지를 2.2와 같이하여 식[9]에 따라 도공층과 도공원지층의 온도분포를 구했다(Fig. 4). 신문용지의 같이 NRT의 증가에 따라 온도분포 곡선은 완만해졌다. 2.2의 반무한판을 이용한 온도분포곡선(Fig. 2)에서처럼 도공층과 도공원지층 사이의 확연한 온도경사의 차이는 나타나지 않았다. 따라서 도공층과 도공원지의 열 확산계수 차이에 따른 온도경사의 차이를 알아보기 위해 Fig. 4의 각 그래프를 미분하였다(Fig. 5).

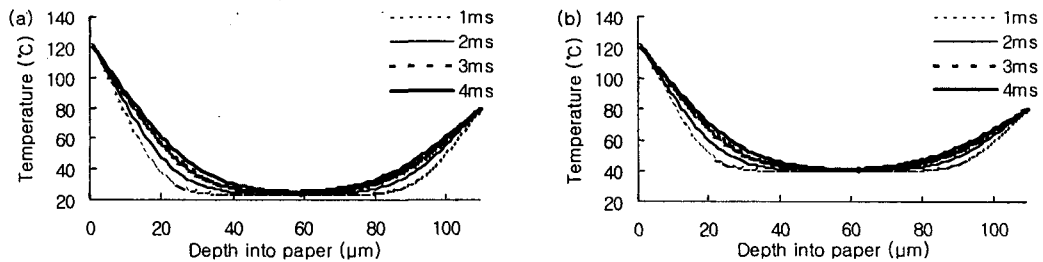


Fig. 4. Z-directional temperature profile of coated paper as a function of the distance from the surface contacting hot metal roll and NRT(t) by finite different method : ingoing sheet temp. (a) 24°C , (b) 40°C .

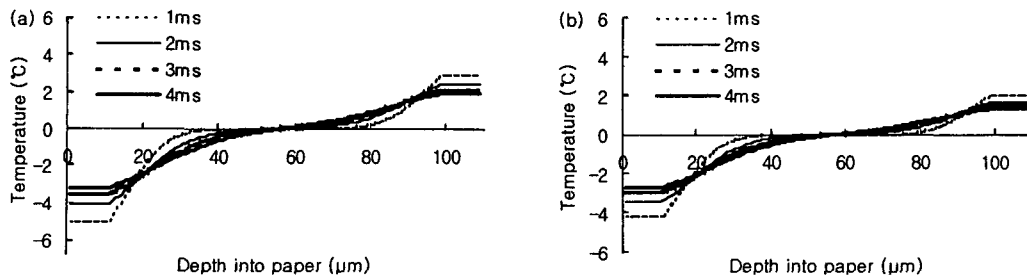


Fig. 5. Differential curves of Fig. 4 : ingoing sheet temp. (a) 24°C, (b) 40°C.

도공층인 1 - 11, 99 - 110 μm 에서 기울기의 변화는 거의 나타나지 않았다. 이것은 도공층에서의 열전달이 도공원지층보다 훨씬 잘 이루어짐을 의미하며 Fig. 2의 결과와도 부합된다.

4. 결론

신문용지와 도공지에 대해 반무한판(Semi-infinite plate)에서 1 차원 비정상상태의 열전도와 유한차분법(Finite different method)을 이용한 1 차원 비정상상태의 열전도에 의해 납내 지필의 온도분포곡선을 구한 결과는 다음과 같다.

전반적으로 NRT의 증가에 따라 지필내부의 온도분포곡선이 완만해지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 열원에 접촉되는 시간이 늘어남에 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 내부구조의 파괴가 더 많이 일어나 불투명도가 감소할 것으로 예상된다.

신문용지의 경우 반무한판을 이용한 방법과 유한차분법의 결과가 유사하게 나타났다. 반면 도공지의 경우 반무한판을 이용한 방법보다 유한차분법을 이용한 것이 도공층과 도공원지층 사이의 온도분포에서 더 매끄러운 곡선을 얻을 수 있었다.

Fig. 5에서 보는 것과 같이 도공층과 도공원지층 간에 열전달 속도의 차이는 존재하며 이는 반무한판을 이용한 방법의 결과(Fig. 2)에서도 확인할 수 있다. 하지만 유한차분법이 반무한판을 이용한 방법에 비해 지필 양쪽의 온도분포를 살펴볼 수 있고 더 정확한 온도분포를 구할 수 있다는 점에서 지필의 온도분포를 살펴보는 데 더 타당한 방법으로 생각되어진다.

5. 참고문헌

1. Vreeland, H., Ellis, R., and Jewett, B., Substrata Thermal Molding(1), Tappi J., 72(11) : 139 - 145 (1989).
2. Vreeland, H., Ellis, R., and Kenneth, B. Jewett, Substrata Thermal Molding(2), Tappi J., 72(12) : 201 - 206 (1989).
3. Mark, R., Handbook of Physical and Mechanical Testing of Paper and Paperboard Vol.2, Marcel Dekker : 245 - 250 (1983).
4. Lee, H.L., FCC and Structuring Characteristics of Coating Pigment Blends, Reprinted from Journal of Korea Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 26(4) : 25 - 32 (1994).
5. Incropera, F.P. and DeWitt, D.P., Introduction to Heat Transfer, Third Edition, Wiley : 755 - 756 (1996).
6. Holman, J.P., Heat Transfer, Eighth Edition, Mc Graw Hill : 168 - 179 (1997)