

건식 필름 적층 성형기에서 고온 롤러의 열해석

임 광 옥* · 이 관 수*

(2001년 1월 30일 접수, 2001년 4월 24일 심사완료)

Thermal Analysis of Hot Roller in a Dry Film Laminator

Kwang-Ok Lim and Kwan-Soo Lee

Key Words: Hot Roller(고온 롤러), Dry Film(건식 필름), Laminator(적층 성형기), PCB(인쇄 회로기판), PDP(플라즈마 표시장치), Cartridge Heater(카트리지 히터), Contact Angle(접촉각도)

Abstract

The thermal analysis of the hot roller in a dry film laminator is studied numerically by steady-state two-dimensional heat transfer. In the laminating process for PDP glass or PCB, the temperature distributions in a hot roller are presented considering the effects of the roller rotation speed and the inner and outer radii of the roller. The results show that the temperature distributions are strongly dependent on Peclet number. If Pe number becomes larger, the iso-thermal lines are more concentric about the rotating axis and the temperature difference on the hot roller surface decreases exponentially. It also shows that if the contact angle between the roller and the film becomes smaller the temperature difference becomes smaller. However, the changes of the roller's inner or outer radius have little effect on the temperature difference.

기호설명

e : 롤러와 제품간의 접촉 편심량 [m]
 h : 대류 열전달계수 [$W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$]
 k : 열전도계수 [$W/m\text{ }^\circ\text{C}$]
 L : 롤러의 길이 [m]
 Pe : Peclet 수, $\omega R_o^2/\alpha_a$
 Q_0 : 히터의 발열량 [W]
 R_i : 알루미늄 롤러의 안반지름 [m]
 R_o : 실리콘 롤러의 바깥 반지름 [m]
 R_s : 실리콘 롤러의 안쪽 반지름 [m]
 r : 반경방향 좌표 [m]
 T : 온도 [$^\circ\text{C}$]

θ_0 : 롤러와 필름의 접촉각도 [rad]
 ω : 롤러의 회전 각속도 [rad/s]

하첨자

a : 알루미늄
 p : 제품
 s : 실리콘
 ∞ : 주위

그리스문자

α : 열확산계수 [m^2/s]
 θ : 원주방향의 좌표 [rad]

1. 서론

적층 성형(laminating)은 전자장비, 사진코팅 및 식품포장 등에 건식 필름을 입히는 방법으로 그 응용분야는 매우 다양하다. 예를 들어 인쇄용 회로기판(PCB) 혹은 평판 디스플레이 유리(PDP, ITO glass)에는 수 십 μm 두께의 건식 필름 혹은 다층막 필름을 유리표면에 고온 롤러(roller)의 열과 회전접촉으로 부착한다. 이 때 부착된 필름에는 기포발생이 없어야 하고 필름의 부착상태도 평탄해야 한다. 금속의 압연공정은 롤링(rolling)을 이용한 대표

* 책임저자, 회원, 한양대학교 BK21사업단
 E-mail : kolim@hanyang.ac.kr
 TEL : (02)2290-1263 FAX : (02)2299-1485
 * 회원, 한양대학교 기계공학부

적인 기술로 롤러 내의 열분포 및 표면층의 온도 분포에 관하여 많은 연구가 있다.⁽¹⁻³⁾ 압연공정에서는 약 1,000℃의 고온 금속 스트립(strip)을 다 단계에 걸쳐 롤러사이를 통과시키면서 접촉으로 박판(薄板) 혹은 후판(厚板)을 제조한다. 이 때 롤러의 표면온도는 약 100~500℃로 금속 스트립의 온도보다 낮으나 연속작업 시에 롤러의 온도는 계속 상승하므로 적절한 냉각이 요구된다.

PCB 및 PDP용 유리의 적층 성형에 사용되는 고온 롤러는 금속 압연공정과는 열전달적으로 정반대의 메커니즘으로 상대적 저온의 PCB는 약 70℃로 예열을 하고, 고온 롤러는 표면온도가 약 120℃를 유지하여 열의 흐름이 롤러로부터 건식 필름과 PCB로 전달된다. 즉 압연공정은 롤러의 냉각이 필요한 반면에 PCB 적층 성형은 롤러의 가열이 필요하다. 이와 같은 전자장비용 적층 성형에 관한 연구문헌은 거의 전무한 상태이다. 적층 성형기의 문제점은 롤러와 필름간의 접촉에 따라 롤러 표면에서 온도차가 발생하는 것이다.

본 연구에서는 Fig. 1처럼 롤러의 주(主) 재질이 알루미늄이고 열원으로 롤러 중심부에 카트리리지 히터가 설치된 알루미늄-카트리리지 히터 방식(aluminium-cartridge heater)의 적층 성형기에서 롤러의 회전수, 롤러의 크기 및 롤러와 필름의 접촉각이 롤러 내부 및 표면온도 분포에 미치는 열전달 특성을 수치적으로 조사하고자 한다.

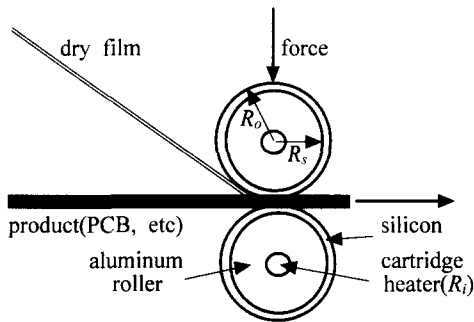


Fig. 1 Laminator of an aluminum-cartridge heater

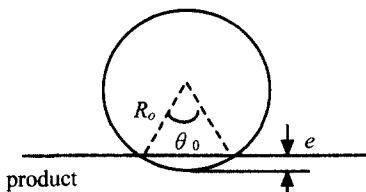


Fig. 2 Contact angle of rolling laminator

2. 수학적 모델링 및 해석

롤러의 중심부에 설치된 카트리리지 히터는 롤러의 안지름보다 작고 고정되어 회전하지 않으며 표면복사에 의하여 알루미늄 롤러의 안지름 표면에 균일한 열량을 공급한다.

적층 성형 공정은 콘베이어 벨트를 통하여 일정한 주기로 제품이 연속적으로 투입되고, 건식 필름은 제품의 상부에 위치하여 두 개의 고온 롤러 사이를 통과한다. 롤러를 제품에 접촉하면서 약 120℃의 롤러 표면으로부터 열이 가해지면서 이루어진다.

접촉과정에서 제품과 필름의 손상을 방지하기 위하여 롤러 외부에 탄력있는 실리콘으로 5 mm 정도의 두께로 도포한다. 제품과 롤러는 Fig. 2에서 처럼 탄성 실리콘의 변형 형태에 따라 선접촉(line contact) 또는 면접촉(surface contact)을 하게 된다. 이러한 롤러와 필름의 접촉면을 통하여 고온 롤러는 전도열에 의하여 상대적으로 온도가 낮은 필름과 제품으로 열전달이 일어난다. 롤러와 제품간의 접촉상태는 편심량(e)과 접촉각도(θ_0)로 표현할 때 다음과 같다.

$$\theta_0 = 2\cos^{-1}(1 - e/R_o) \quad (1)$$

여기서 R_o 는 실리콘의 바깥 반지름이고, 접촉이 일어나는 시작점을 원주방향 각도의 기준점으로 하였다. 롤러 재료의 열 물성치는 일정하다고 가정하고 Euler 관점에서 극좌표계 2차원 정상상태 열전도에 관한 지배방정식 및 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{\omega}{\alpha_a} \frac{\partial T}{\partial \theta} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2}, \quad R_i < r < R_o, \quad 0 < \theta < 2\pi \quad (2a)$$

$$\frac{\omega}{\alpha_s} \frac{\partial T}{\partial \theta} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2}, \quad R_s < r < R_o, \quad 0 < \theta < 2\pi \quad (2b)$$

$r = R_o$ 에서

비접촉부 : $\theta_0 < \theta < 2\pi$

$$-k_s \frac{\partial T}{\partial r} = h_\infty (T - T_\infty) \quad (3a)$$

접촉부 : $0 < \theta < \theta_0$

$$-k_s \frac{\partial T}{\partial r} = h_p(T - T_p) \quad (3b)$$

$r = R_i$ 에서

$$-k_a \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{Q_0}{2\pi R_i L}, \quad 0 < \theta < 2\pi \quad (3c)$$

여기서 h_p 는 실리콘 표면과 제품간의 총괄 열전달계수로 접촉을 하는 실리콘과 필름, 필름과 제품간의 열접촉저항(thermal contact resistance)은 무시하고 필름의 전도(필름열전도계수/필름두께)만을 고려하여 $6.5 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ 를 사용한다.

수치해석은 식 (2)와 (3)를 SIMPLER⁽⁴⁾ 알고리즘에 의한 유한체적법으로 해를 구한다. 격자 의존성은 반지름 및 원주방향 모두 50개 이상이면 나타나지 않았으며 수치 정확도 향상을 위하여 150×150 개의 비균일 격자계를 사용하고, 대류항의 처리는 QUICK scheme을 사용한다.

식 (2)의 좌변 항은 물리의 회전에 의한 대류항이다. 금속 압연공정에서는 대류항이 확산항에 비하여 매우 커지면 수치해석시에 false-diffusion에 의해 수치해석 시에 수치적 진동이 나타난다.⁽⁵⁾ 그러나 전자장비용 적층 성형 물리의 지름 및 회전수는 압연공정에 비해 작아서 물리 표면의 접선속도가 압연공정 접선속도의 약 1/100 정도이므로 수치적 불안정성은 나타나지 않았다.

3. 결과 및 고찰

물리의 재료로 알루미늄과 실리콘이 사용되며 열확산계수는 각각 8.864×10^{-5} , $9.768 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 이고, 물리 표면에서의 대류 열전달계수는 $15 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ 이다. 본 연구에서 검토한 물리의 기본 사양으로 히터 발열량은 1 kW , 길이는 1.0 m , 실리콘 바깥 지름은 0.08 m , 실리콘 안지름(알루미늄 바깥지름)은 0.07 m , 알루미늄 안지름은 0.02 m , 물리와 제품의 접촉 편심량은 $7 \times 10^{-4} \text{ m}$, 회전수는 20 rpm 이다. 본 연구에서 각 인자의 증감을 통하여 물리의 온도분포 및 표면 온도차에 미치는 영향을 조사한다.

3.1 회전수의 변화

Fig. 3은 물리의 회전수 변화에 따른 물리 단면

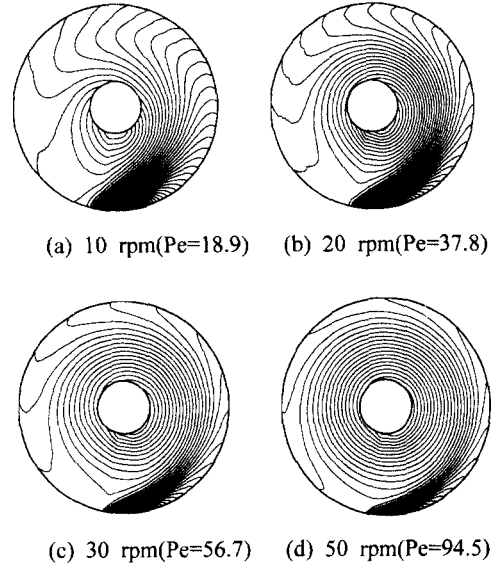
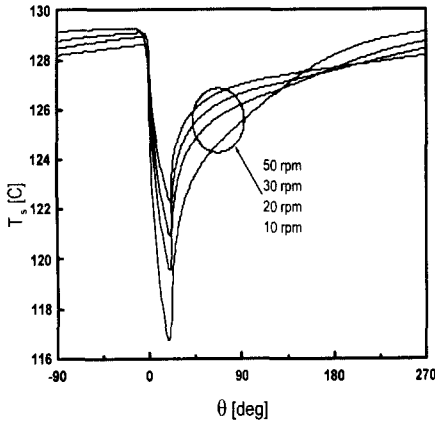


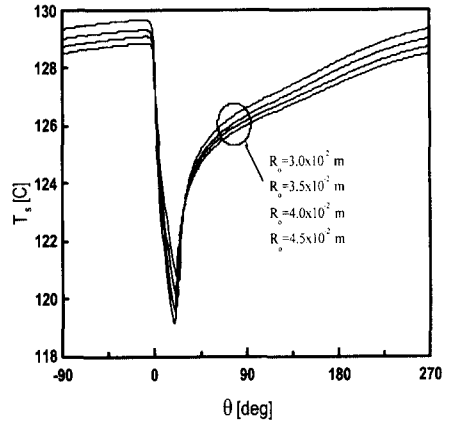
Fig. 3 Temperature distributions with rpm. (Contour levels are equally spaced with $0.2\text{ }^\circ\text{C}$)

의 온도분포를 나타낸 것이다. 물리 내부의 온도 분포를 결정하는 변수는 Peclet($= \omega R_o^2 / \alpha_a$) 수⁽¹⁾이며, 본 연구에서 물리의 회전수가 20 rpm 일 때에 Pe 수는 37.8 로 압연공정의 약 10^5 정도에 비해서는 매우 작다. 물리 단면의 온도분포는 히터로부터 열을 공급받는 안지름 표면에서 최대 온도가 되고, 열전달이 일어나는 필름과의 접촉면에서 최저 온도가 된다. 물리 표면의 온도분포는 필름과 접촉을 하고 있는 동안에 온도가 급격하게 떨어지며, 필름과 분리된 후에는 점차 회복하여 필름과 재 접촉하기 직전에 표면온도가 가장 높게 된다. 물리의 회전수가 증가할수록 등온선은 회전축에 대하여 동심원을 형성하고, 외부 영역에서는 대류와 전도가 복합적으로 발생한다. 이와 같은 등온선의 동심원 분포 현상은 물리의 회전수가 커지면 전도에 의한 열 확산보다는 회전에 의한 대류효과가 강하기 때문이다. 반면에 회전수가 감소하면 전도에 의한 열 확산이 지배적인 열전달 메카니즘이며, 궁극적으로 회전수가 "0"인 경우에는 물체의 순수 열전도문제와 같아진다.

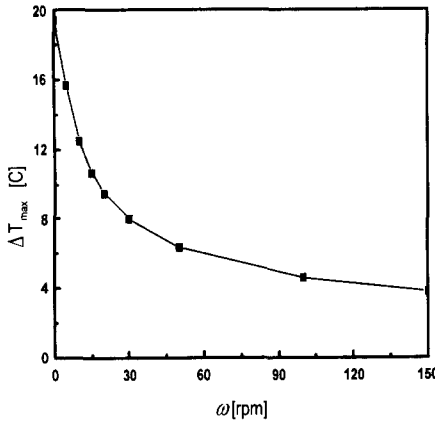
Fig. 4는 회전수 변화에 따른 물리 표면의 온도 분포를 나타낸 것이다. 회전수가 10 rpm 때에는 표면온도의 최고, 최저가 각각 $129.3\text{ }^\circ\text{C}$, $116.7\text{ }^\circ\text{C}$ 로 차이가 $12.6\text{ }^\circ\text{C}$ 이었으나, 50 rpm 이 되면 최고, 최



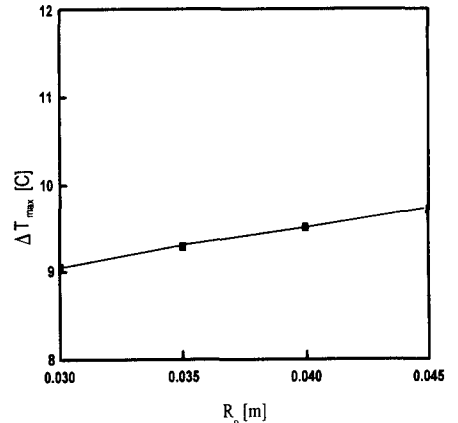
(a) Distributions



(a) Distributions



(b) Maximum difference



(b) Maximum difference

Fig. 4 Surface temperatures with rpm

Fig. 5 Surface temperatures with outer radius

저가 각각 128.6°C, 122.3°C로 그 차이가 6.3°C로 감소한다. 표면 온도분포에서 최고온도는 회전수에 상관없이 유사한 반면에 최저온도는 회전수가 증가할수록 상승한다. 따라서 표면온도의 편차는 회전수 증가에 따라 지수함수적으로 감소한다. 이것은 회전수가 높아질수록 롤러와 제품간의 접촉시간이 짧아지는 만큼의 열전달이 감소하기 때문이다.

3.2 바깥 반지름의 변화

전자장비용 적층 성형 공정의 일반적인 생산속도는 3~6 m/min로 롤러 표면의 원주속도로 표현된다. 따라서 동일한 생산속도하에서 롤러의 크기 변화가 롤러의 온도분포에 미치는 영향을 조사하기 위하여 $R_o\omega=0.04 \text{ m} \times 20 \text{ rpm}$ 의 생산속도

를 일정하게 유지하면서 실리콘의 바깥 반지름과 회전수를 변화시켰다.

Fig. 5는 동일한 원주속도 조건에서 바깥 반지름 R_o 변화에 따른 표면온도 및 표면온도의 편차를 나타낸 것이다. Fig. 5(a)에서 바깥 반지름이 커질수록 표면온도는 전체적으로 낮아진다. 이는 바깥 반지름이 커지면 롤러의 열용량이 증가하여 롤러 전체의 평균온도는 낮아지기 때문이다. Fig. 5(b)에서 표면온도의 편차는 바깥 반지름이 커질수록 완만하게 선형적으로 증가한다. 즉 예를 들어 바깥 반지름을 0.03 m에서 0.045 m로 증가시키면 롤러의 체적이 약 1.7배 커져서 재료가 증가함에도 불구하고 표면온도 편차는 오히려 약 0.5°C 커진다.

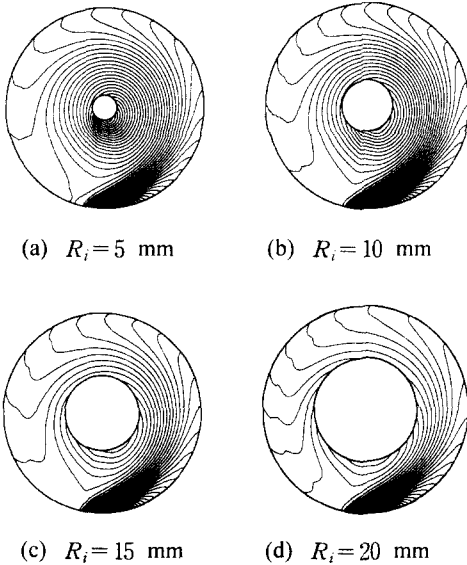


Fig. 6 Temperature distributions with inner radius. (Contour levels are equally spaced with 0.2°C)

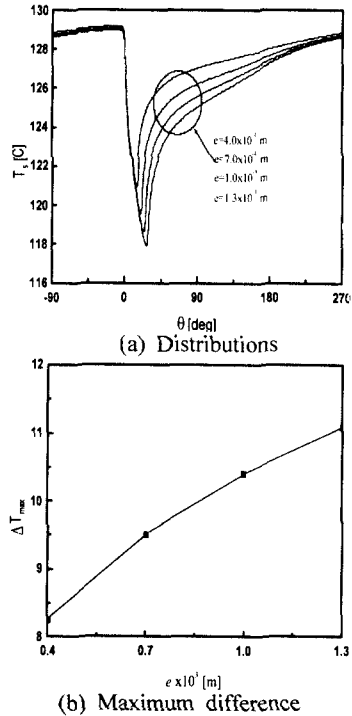


Fig. 8 Surface temperatures with contact angle between the roller and the product

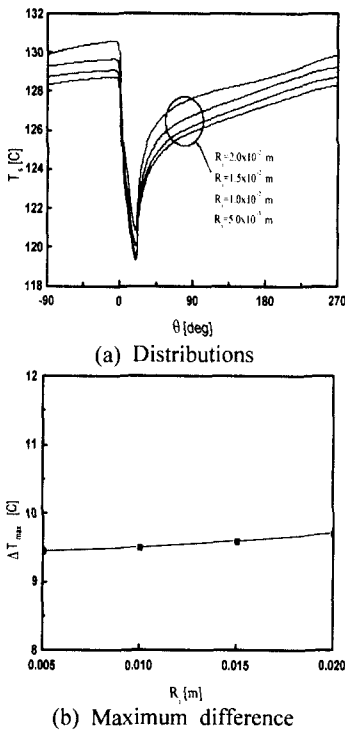


Fig. 7 Surface temperatures with inner radius

3.3 안쪽 반지름의 변화

Fig. 6은 카트리지 히터로부터 일정한 열량을 공급받는 안쪽 반지름의 변화에 따른 롤러의 온도분포를 나타낸 것이다. 안쪽 반지름이 작을수록 롤러 중심영역의 등온선은 동심원 분포하고, 안쪽 반지름이 클수록 온도분포는 반지름과 각도에 따라 크게 달라진다. 이것은 회전 롤러의 열전달 특성을 잘 보여주는 것으로 롤러의 회전축에 가까운 중심 영역은 대류항이, 롤러 표면에 가까운 표면 영역은 전도항이 중요한 열전달 메카니즘임을 의미한다. 즉 안쪽 반지름이 클수록 온도분포에 미치는 영향은 회전의 영향은 약해지는 반면에 필름과의 접촉에 의한 열확산의 영향은 커진다.

Fig. 7에서 안쪽 반지름이 0.005 m에서 0.02 m로 증가하면 롤러 표면온도가 전체적으로 약 2°C 정도 상승하지만, 표면온도의 편차는 9.5°C에서 9.7°C로 별 변화가 없다. 이것은 일정한 열량을 받을 때에 안쪽 반지름이 증가하면 롤러의 열용량이 감소하여 롤러 온도는 상승하지만 표면온도

의 편차는 거의 차이가 없다.

3.4 접촉각도의 변화

롤러와 제품간의 접촉상태는 식 (1)에서 편심량과 접촉각도로 설명하였다. Fig. 8(a)에서 접촉 시작점에서의 표면온도는 접촉각도에 상관없이 거의 같지만, 접촉각도가 클수록 제품과 롤러간의 접촉면적이 넓어지면서 필름으로의 열전달이 증가하고 롤러의 표면온도는 더욱 낮아진다. 하지만 접촉이 분리된 이후에는 표면온도가 접촉각도에 상관없이 거의 같은 온도로 급격하게 회복한다. Fig. 8(b)에서 표면온도의 편차는 접촉각도가 증가할수록 급격하게 커진다.

4. 결 론

건식 필름 적층 성형기에서 고온 회전 롤러의 열분포 특성을 정상상태 2차원 열전달 해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

회전롤러의 Pe 수가 클수록, 롤러 중심영역에서는 등속 회전운동에 의한 대류효과가 강해지면서 등온선은 회전축을 중심으로 동심원을 이루는 반면에, 롤러의 외부 영역에서는 원주 방향의 대류와 반지름 방향의 전도가 복합적인 열전달 현상이 발생한다.

롤러 표면의 온도차는 롤러의 회전수 및 편심량(접촉각도)이 각각 50rpm, 0.4mm일 때가 가장 작았다. 이는 롤러와 저온 필름간의 접촉시간이 짧아지면서 열전달을 감소하기 때문이며 표면 온도차 감소효과도 4~20℃ 정도로 그 영향이 크게 나타난다. 반면에 롤러의 안쪽 및 바깥 반지름

은 변경을 하더라도 표면 온도차의 개선효과는 약 2℃ 정도로 미약하므로 설비의 장치구조상 현재의 크기를 유지하는 것이 바람직하다.

후 기

이 연구는 2000년도 두뇌한국 21 사업의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Tseng, A. A., 1984, "Finite-Difference Solutions for Heat Transfer in a Roll Rotating at High Speed," *Numerical Heat Transfer*, Vol. 7, pp. 113~125.
- (2) Said, A., Lenard, J. G., Ragab, A. R. and Elkhier, M. A., 1999, "The Temperature, Roll Force and Roll Torque during Hot Bar Rolling," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 88, pp. 147~153.
- (3) Guerreo, M. P., Flores, C. R., Perez, A. and Colas, R., 1999, "Modelling Heat Transfer in Hot Rolling Work Rolls," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 94, pp. 52~59.
- (4) Partankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill.
- (5) Huang, C. H., Ju, T. M. and Tseng, A. A., 1995, "The Estimation of Surface Thermal Behavior of the Working Roll in Hot Rolling Process," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 1019~1031.