# 강재의 유도가열 방법의 수치적 승온 해석

김형진† · 정원철* · 조병수**

# A Numerical Study on Temperature Profiles of Steel Plates Heated by Induction Heater

Hyeong-Jin Kim, Won Cheol Chung and Byoung Soo Cho

**Key Words :** Minimill(미니밀), Induction Heater(유도가열로), Skin Depth(침수깊이)


## Abstract

Induction Heaters are commonly used in heating steel strip product, because it can rapidly and efficiently heat steel strip/bar. In this study, a inductive heating model is developed and the predictions are compared with measured temperatures. The temperatures are measured from POSCO thin-slab rolling facility (so called Minimill). Induction heater is installed between reduction unit and holding furnace. This induction heater raise the temperature of steel bars from 930 °C to about 1100 °C, which gives the required temperature for finishing mill process after holding period at holding furnace. Unlike other simple equation models, this model allows us to predict temperature profiles of sections of steel bars.


## 기호설명

$\rho$ : 밀도 (kg/m$^3$)
$\varepsilon$ : 방사율
$\sigma$ : 스테판볼츠만상수, $4.88\times10^{-8}$ [Kcal/m$^2$HrK$^4$]
$\delta$ : 침투깊이 (skin depth)
$\mu$ : 투자율 (henry=kgm/A$^2$s$^2$)
$\rho_{IH}$ : 저항 ($\Omega$m)
$\sigma_{IH}$ : 전기전도도 (1/$\Omega$m)
$\mu_r$ : 비투자율
$\kappa$ : 열전도율 (W/mK)
Bi : Biot 수 (hL/k)
f : 전류 주파수 (Hz)
Fo : Fourier 수 ($\alpha t/L^2$)
H : 소재의 두께
J : 유도 전류량
Q : 전체 공급 전력량 (W)
T : 온도 (°C)
$t_{IH}$ : 소재가 가열되는 시간 (s)
v : 통판 속도 (m/s)
W : 유도 전력량
w : 폭 길이 (m)
x : 두께 방향의 위치

### 첨자

air : 공기(water)
IH : 유도 가열로 (Induction heater)
s : 표면 (surface)
surr : 주위(surrounds)


† POSCO 기술연구소, 계측제어연구그룹
E-mail : firekim@posco.co.kr
TEL : (061)790-8648 FAX : (061)790-9287
* POSCO 기술연구소, 계측제어연구그룹
* 군장대학, 자동차기계계열


## 1. 서 론

유도 가열(Induction Heating)은 산업 현장에서 물체의 가열, 용해, 표면처리, 접합, 결정성장과 전자기 주조등에 널리 사용되고 있다. 특히, 제철 공정에서는 주조 시에 쇳물의 원할 한 교란을 위해, 중심부에 비해 냉각된 강재의 에지부(edge)의 승온을 위해, 후 공정에 알맞은 온도 확보를 위한 전체 강재의 승온용으로 많이 사용되고 있다.

본 연구에서는 포스코 미니밀에서 강재(bar)의 승온을 위해 사용되고 있는 유도 가열로

(Induction/Inductive Heater)의 승온 과정을 수치적으로 계산하였고, 그 계산 결과를 시험 데이터와 비교 검토하였다.

.

고철을 주원료로 사용하는 미니밀은 전기로, 박슬라브 연주기, 열간 압연기로 구성되어 있고, 그 공정은 기존 공정에 비해 공정 길이가 짧아 에너지의 저감, 생산소요시간의 단축 및 시황변화에 따른 설비가동의 유연성 등의 많은 장점을 가지고 있다. 제강, 연주, 열연의 단위공정이 연속적으로 연결되어 있기 때문에 각 단위 공정에서 소재의 온도 관리가 기존의 고로밀에 비해 더욱 중요하다. 포스코(광양제철소)에서는 MDH 사의 ISP 형 미니밀 기본 설계안을 채택하여 97 년 1 월 이후 열연판을 생산하고 있다.

### 1.1 포스코 미니밀 공정[1]

미니밀 압연 공정이 그림 1 에 도시되었다. 먼저 전기로에서 용융된 고철이 레이들(ladle)에서 야금학적인 성분 조정 및 게재물 제거등을 거쳐 턴디쉬(turndish)에 보관된다. 턴디쉬에 보관된 용강은 연주기를 통하여 슬라브(slab)화(두께:67.5mm) 되고, 조압연기(reduction unit)에서 바(bar) 두께(20~30mm)까지 압연된다. 조압연기에서 거칠게 압연된 바는 유도 가열로(induction heater)에서 표면에 유도되는 유도전류로 적절히 가열된 후에 다음 공정을 위하여 권취한다. 권취된 코일은 체류로(holding furnace)에서 다음 공정을 위해 대기하게 된다. 연주기부터 권취기(coiler)까지 동기 운전되며, 2 개의 연주기에서 나오는 소재를 수합하고 필요시 체류로는 버퍼 기능도 한다. 권취된 바는 다시 풀어 주어(uncoiler) 사상압연기(finishing mill)에서 최종 제품 두께(1.2~12.7mm)까지 압연된다. 최종 압연된 스트립(strip)은 소정의 냉각 속도로 냉각하는 런아웃테이블(Run-Out-Table:ROT)에서 냉각되어 다운코일러(down coiler)에서 완제품으로 권취된다. 압연 직전에 스트립에 부착되어 있는 산화 물 제거를 위하여 디스케일러(descaler)가 설치되어 있으며 런아웃테이블에서는 라미나 수류(Laminar Flow)를 이용하여 냉각하여 강의 구성 및 권취에 적절한 온도로 냉각한다.

### 1.2 유도 가열로

포스코에서는 유도 가열 방법을 열연 공장 등에서 강재의 에지부 승온(edge heating)용으로 처음 사용하였고, 미니밀에서는 연주 후 공정인 조압연

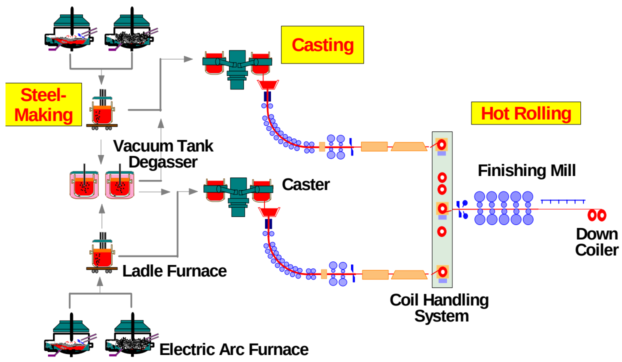


Fig. 1 Diagram of POSCO minimill

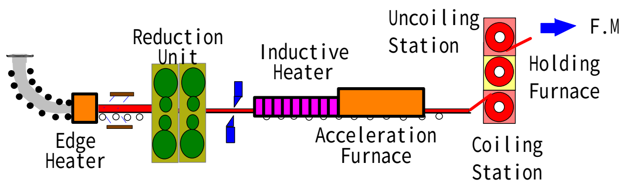


Fig. 2 Diagram from caster to holding furnace

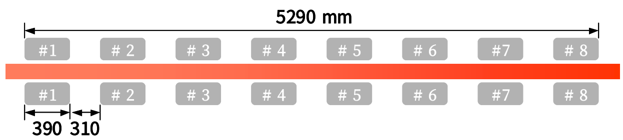


Fig. 3 Diagram of induction heater

기에서 압연된 강재(bar)를 사상 압연 과정에 적절한 온도를 확보하기 위하여 유도 가열로에서 가열 강재의 전 폭에 대한 가열 장치로 사용된다(그림 2 참조). 조압연을 마친 강재는 약 섭씨 930 도 정도이고, 유도 가열로에서 섭씨 1100 도 정도로 가열된다.

유도 가열로는 그림 3 에서와 같이 8 개의 코일 박스로 구성되어있으며, 한 개의 코일 박스의 사이즈는 380mm, 코일 박스의 사이는 310mm 이다.

## 2. 해석 방법

### 2.1 유도 가열로 원리

유도 가열의 원리는 변압기와 유사하다. 이는 전자기학의 멕스웰(Maxwell) 방정식으로부터 시작하며, 코일(coil)에 흐르는 고주파 전류에 의해 소재에 작용하는 자기장 변화가 소재에 코일 전류와 같은 주파수로 유도 되는 현상을 이용한 것이다. 이렇게 전자유도 작용에 의해 발생된 유도전류가

금속 물체 안에서 저항 손실 때문에 열로 변환되는 것을 전도체의 승온의 목적으로 이용한 것이다. 유도된 전류는 특성상 강재의 표면에 집중하여 유도되는데 전류가 표면강도의 약 37% (1/e)로 감소한 지점의 깊이를 침수깊이(skin depth)라고 부르고, 보통 δ로 표기한다(2). 침수깊이는

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\sigma_{IH}\mu f}} = 503.3\sqrt{\frac{\rho_{IH}}{\mu_r f}}$$

로 표시된다. 비투자율( $\mu_r$ )은 진공에 대한 투자율 $4\pi\cdot10^{-7}$ (henry=kg·m/A$^2$·s$^2$)에 대한 비이며, 소재가 비자성체이면 (철의 경우, 섭씨 723 도 보다 높으면) 비투자율은 1 이다.

소재에 유도되는 전류와 전력량은 아래 식 들과 같은 분포를 가진다. 빠른 이해를 위하여 그림 4 에 유도된 전류 및 전력량을 표면에 값과의 비로 도시하였다.

$$J(x) = J_s \cdot e^{-\frac{x}{\delta}} \quad \text{(표면으로부터의 유도 전류)}$$

$$W(x) = W_s \cdot e^{-\frac{2x}{\delta}} \quad \text{(표면으로부터의 유도 전력)}$$

소재의 상하부에서 유도된 전류는 중심부에서는 서로 상충되어 실제로는 아래와 같은 분포를 가진다.

$$J(x) = J_s \cdot (e^{-\frac{x}{\delta}} - e^{\frac{x-H}{\delta}})$$

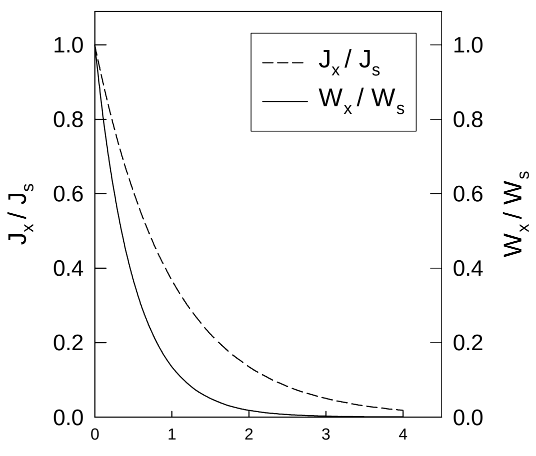


Fig. 4 Relation between eddy current / power density and distance from strip surface

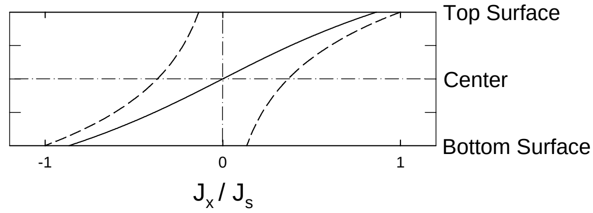


Fig. 5 Effect of strip thickness on current distribution

그림 5 는 소재의 두께가 침수깊이의 두 배인 소재에 유도되는 전류량을 보여준다. 점선은 소재의 두께를 고려하지 않았을 때에 유도될 전류량 분포이고, 실선이 실제로 소재에 유도되는 전류량이다. 상하에서 발생되는 유도 전류의 상쇄를 최소화하여 좋은 효율을 가지기 위해서는 소재의 두께가 침수깊이의 보통 3 배 이상이 되도록 설계되어야 한다.(3)

### 2.2 수치적 열전달 해석

소재의 폭 방향, 길이 방향의 열전달을 무시하면, 1 차원 열전달 모델을 이용하여 유도 가열로 입축에서 출측까지의 소재의 온도를 근사적으로 예측할 수 있다. 1 차원 열전달 모델의 지배 방정식은 소재의 두께 방향을 x 좌표로 선정하여 다음과 같은 전도 방정식으로 대표된다.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial^2 x} + \dot{q}(x)$$

$\dot{q}(x)$ 는 유도된 전류에 의한 소재 내부의 단위 면적당 발열량으로 x 에 대한 함수이다. 본 연구의 계산에서는 유도 가열로의 코일 직하에서만 열이 발생되는 것으로 가정하였다. 단위 면적당 발열량은 전체 공급 전력량을 Q 로하여 아래 식과 같이 표시된다.

$$\dot{q}(x) = f(Q,\sigma,H,w)\cdot J(x)^2$$
$$= \eta \frac{Q}{H\cdot w\cdot v\cdot t_{IH}} \cdot \frac{e^{\frac{-2x}{\delta}} - 2e^{\frac{-H}{\delta}} + e^{\frac{2(x-H)}{\delta}}}{\delta - 2H\cdot e^{\frac{-H}{\delta}} - \delta\cdot e^{\frac{-2H}{\delta}}}$$

제일 오른쪽 분수항은 적분값이 1 이 되도록 설정하였다. 결국 효율치($\eta$), 공급전력량(Q), 소재의 크기와 통판 속도에 의해 가열 능력이 결정됨을 알 수 있다. 위의 지배 방정식에 대한 초기 조건과 경계 조건은 아래와 같은 일반적인 형태를 가진다.

- 초기 조건 : $T(x,0)=T_0(x)$
- 경계 조건 :

$$\kappa\frac{\partial T}{\partial x}(0,t)=h_{top}\left[T(0,t)-T_{air}\right]+\varepsilon\sigma\left[T^4(0,t)-T^4{}_{surr}\right]$$

$$\kappa\frac{\partial T}{\partial x}(H,t)=h_{bottom}\left[T(H,t)-T_{air}\right]+\varepsilon\sigma\left[T^4(H,t)-T^4{}_{surr}\right]$$

수치적 해석을 위하여, 위의 지배 방정식과 경계 조건을 FTCS(forward time/central space) 방법으로 차분화하였다. 상하부의 열손실을 같다고 가정하여 소재 두께의 반절만을 해석하였다. 즉, 경계 조건은 소재의 중심부에서는 단열의 조건이 된다. 차분방정식은 아래와 같다.

$$T_m^{new}=Fo\left(T_{m+1}^{old}+T_{m-1}^{old}+\dot{q}_m\cdot\frac{(\Delta x)^2}{k}\right)+(1-2Fo)T_m^{old}$$

- 경계 조건 :

$$T_0^{new}=2\cdot Fo\left(Bi\cdot T_\infty+Bi_{rad}\cdot T_\infty^4+\dot{q}_m\cdot\frac{(\Delta x)^2}{2k}+T_1^{old}\right)$$
$$+(1-2Fo-2Bi\cdot Fo)T_0^{old}-2Bi_{rad}\cdot Fo\cdot(T_0^{old})^4$$

$$T_M^{new}=Fo\left(2\cdot T_{M-1}^{old}+\dot{q}_M\cdot\frac{(\Delta x)^2}{k}\right)+(1-2Fo)T_M^{old}$$

경계층에서 복사 열전달이 없고 대류에 의한 열손실 만 있는 경우에 위 수치방법의 안정성은

$$Fo(1+Bi)\le 0.5$$

을 만족하는 Fo 로 판단된다. 복사 열전달이 포함된 본 계산의 안정성 판단을 위해 등가 복사 열전달 계수( $h_{rad}=\varepsilon\sigma(T_s+T_{surr})(T_s{}^2+T_{surr}{}^2)$ ) 와[4] 대류 열전달 계수의 합을 이용하여 시험 조건에서 최소의 Bi 수를 찾아 안전한 최대의 시간 간격을 계산해 본 결과 두께 20mm 소재에 11 절점을 사용하였을 때 0.519 초로 판정되었다. 본 계산에서는 안정성을 고려하여 0.01 초를 사용하였다.

## 3. 결과 및 토론

### 3.1 수치적 결과

차분화된 방정식을 이용하여 미니밀의 유도 가열로 설치 시 시행되었던 시운전 실험 조건을 계산하였다. 실험에 사용된 소재는 스테인레스 스틸(SUS 304)로 20mm×1000mm×2000mm 와 30mm×1000mm×2000mm 가 사용되었다. 여러 시험 조건 중 600V 를 인가하였을 때의 실측 온도를 계산된 결과와 비교하였다. 계산에 사용된 물성치는[5] 막 온도(file temperature)를 섭씨 100 도 가정하여 상수값으로 사용하였다.

20mm(두께)×1000mm(폭)×2000mm(길이)의 소재를 5.25 m/min 의 속도로 통판 시켰을 때의 측정된 온도와 계산된 온도를 그림 6 에서 비교하였다. 이 조건에서는 유도가열로에는 각각의 코일에 600V 가 인가되었고, 인가된 600V 에 의한 각 코일의 전력량은 200.15kW 로 측정되었다. 시간이 경과함에 따라 소재는 유도 코일 아래의 승온 부분과 코일 사이의 냉각 부분을 반복하여 진행한다. 그림 6 에서 보이는 바와 같이 수치적으로 계산된 결과는 측정 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 최대 오차는 온도가 낮은 측정 데이터에서 7.1%로 전체 평균값은 2.1%로 나타났다. 그림 7 은 같은 조건에서 수치 계산으로 얻은 데이터를 이용하여 두께와 시간 경과에 대한 온도 등고선을 표시하였다. 표면이 중심부에 비해 많은 승온량을 가지고 코일사이에서 표면이 냉각됨을 알 수 있다.

그림 8 과 9 는 두께 30mm 의 소재를 같은 속도로(5.25 m/min) 통판 시켰을 때의 결과이다. 역시 600V 가 인가되었고, 이 때 전력량은 216.33.kW 로 측정되었다. 20mm 의 소재의 경우와 유사한 양상을 보였고, 온도 계산의 최대 오차는 온도가 낮은 데이터에서 12.5%로 전체 평균 오차는 5.62%로 나타났다.

### 3.2 수치 결과에 대한 고찰 및 의의

현재 포스코 미니밀에서 사용되고 있는 유도 가열

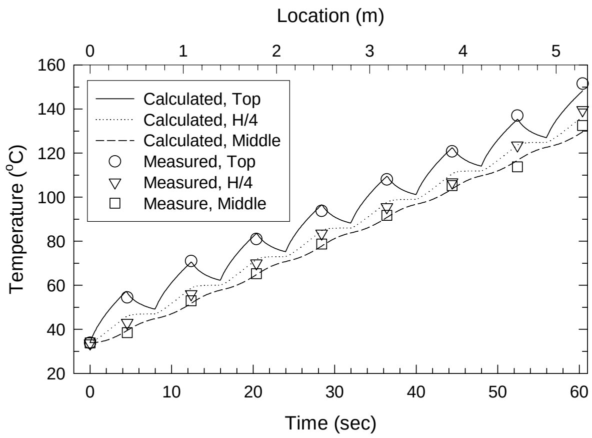


Fig. 6 Comparison of measured and calculated temperatures at surface, H/4 (or 3H/4) and middle of stainless steel bar heated by IH (20t×1000w)

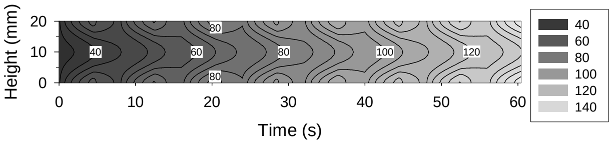


Fig. 7 Temperature contour from calculated result (20t ×1000w)

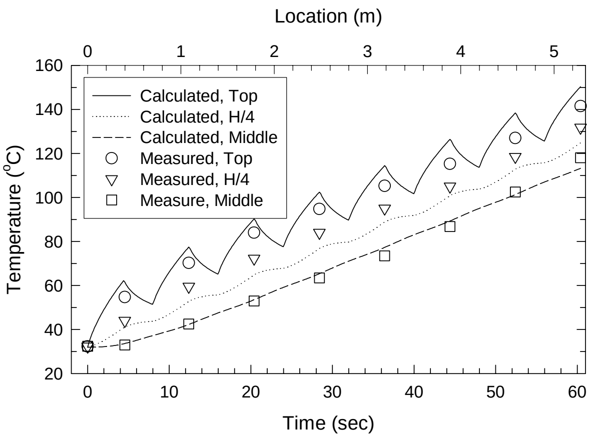


Fig. 8 Comparison of measured and calculated temperatures at surface, H/4 (or 3H/4) and middle of stainless steel bar heated by IH (30t×1000w)

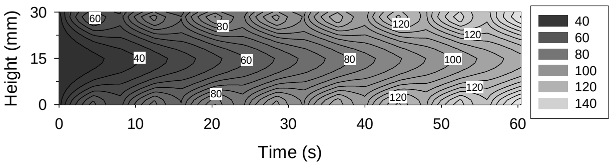


Fig. 9 Temperature contour from calculated result (30t ×1000w)

로의 승온량 예측 계산 식은 총 유도 가열로의 평균 승온량 만을 계산하여 소재 각 부분의 시간에 대한 온도 이력은 계산할 수 없고, 또한 코일 안의 승온 부분과 코일 사이의 냉각 영역의 구분이 없다. 본 연구는 유도 가열 승온 모델을 제시함으로써 소재 각 부위의 시간에 대한 온도 이력을 계산 할 수 있었고, 현장 데이터를 수집 후 회기분석 하여 모델을 조율한다면 좀 더 정확한 온도를 예측할 수 있을 것이다.

수치 결과에서(그림 6 과 8) 온도 곡선의 미분값 들이 불연속인 점들이 나타나는 것은 소재가 각 코일의 직하에서만 100% 가열되고 코일 영역을 빠져 나오면서 가열이 완전히 멈추는 것으로 가정되었기 때문으로 실제 현상과는 다를 것이다. 현재로써는 코일 직하와 주변의 자속밀도 분포에 대한 파악이 어려웠기 때문에 그러한 가정을 사용하였으나 앞으로 이 문제에 대한 연구를 계속하여야 할 것이다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 포스코 미니밀의 공정을 간략이 소개하고 조압연 공정과 체류로 사이에 소재의 온도 상승을 위해 사용하는 유도 가열로의 승온 모델을 FTCS 차분화 방법으로 제시하였다. 이 수치적 승온 모델은 실측 값과 평균 3.9%의 낮은 오차를 가지고 낮은 온도의 몇 부분을 제외하고는 10% 이하의 오차로 정도가 높았다. 본 연구에서 개발된 유도 가열로의 승온 모델은 소재의 각 부분의 시간에 대한 온도 분포를 파악하는데 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

## 참고문헌

(1) POSCO Minimill Group, "Minimill White Book," POSCO.

(2) Ross, N. V. and Jackson, G. J., "Induction Heating of Strip: Solenoidal and transverse flux," Iron and Steel Engineer, June

(3) Ross, N. V., Scherer, R. W. and Jancosek, D. G., "Induction Heating of Strip: Solenoidal and transverse flux," Iron and Steel Engineer, June

(4) Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., 1985, "Introduction to Heat Transfer."

(5) Davis, J. R. etc, 1990, "Metals Handbook," $10^{th}$ Ed, Vol. 1.