

열간 압연 중 판의 온도 분포 모델 개발

김재부¹, 이중형², 황상무[#]

An analytical model for the prediction of strip temperatures in hot strip rolling

J. B. Kim, J. H. Lee, S. M. Hwang

Abstract

In hot strip rolling, sound prediction of the temperature of the strip is vital for achieving the desired finishing mill draft temperature (FDT). In this paper, a precision on-line model for the prediction of temperature distributions along the thickness of the strip in the finishing mill is presented. The model consists of an analytic model for the prediction of temperature distributions in the inter-stand zone, and a semi-analytic model for the prediction of temperature distributions in the bite zone in which thermal boundary conditions as well as heat generation due to deformation are predicted by finite element-based, approximate models. The prediction accuracy of the proposed model is examined through comparison with predictions from a finite element process model.

Key Words : finite element method, heat transfer, strip temperatures, finishing mills, analytical solution

1. 서론

열간 압연시 판의 온도는 판의 변형과 미세조직구조에 영향을 미치는 중요한 인자이다. 그리고 압연에 있어서 roll force와 roll torque는 온도에 따라 변하는데, 이는 flow stress가 온도, effective strain, effective strain rate 의 함수이기 때문이다. 압연시 판은 상대적으로 저온의 롤과 접촉하면서 열 에너지를 빼앗기게 된다. 그리고 롤을 통과한 이후에도 공냉과 수냉등에 의해 외부에 열 에너지를 빼앗기게 된다. 그리고 압연시 판은 소성변형을 하게 되는데, 이때 내부에 소성변형에너지가 열의 형태로 발산한다. 소성발열과 열에너지의 손실은 판의 온도 구배를 발생시키며, 이러한 온도 구배는 판의 불균일한 미세조직형성에 영향을 준다. 예를 들어, $Fe-Fe_3C$ 상태를 보면 탄소함량과 온도에 따라서 판의 미세조직이 오스테나이트

조직이나 페라이트 조직으로 형성 될 수 있다.

이 때 판 내의 온도구배에 의해 두개의 상(phase)이 동시에 존재하는 영역이 발생하면 목표로 하는 균일한 재질을 얻기가 어렵다. 판의 온도 분포는 열연제품의 정밀한 생산 및 품질 예측을 하는데 지배적인 도움이 된다. 이러한 이유로 본 연구에서는 판의 온도 분포를 구해보고자 한다. 최근에는 컴퓨터의 발달과 더불어 FDM(Finite difference method)과 FEM(Finite element method)등과 같은 수치해석적인 기법으로 바탕으로 판 온도를 예측하는 연구들이 많이 행해져 왔고, 비교적 정확한 해를 구하고 있다. 하지만, 이러한 수치해석 기법(FEM)을 이용한 모델들은 최신의 컴퓨터에서조차 많은 해석 시간을 요구한다. 실제로는 압연 공정 중 계속적으로 판온도를 예측하고 공정 조건 들을 제어해야 하기 때문에 긴 해석시간은 실제 현장에의 적용에 어려움을 준다. 따라서, 본 연구에서는 유한 요소법에 기초하여 조업시 바로 이용할 수 있는 on-line 모델을 만들고자 한다. 모

1. 포항공과대학교 기계공학과
2. 포스코 기술연구소 박판연구그룹
교신저자: 포항공과대학교 기계공학과,
E-mail: smhwang@postech.ac.kr

델의 검증을 위해 실측치가 가장 적당하나, 실측치가 없으므로, 실제 경향을 잘 반영하는 유한 요소 해석 결과와 비교할 것이다.

2. 열간 압연 중 온도 모델

2.1 유한요소 해석 모델

열간 압연 공정에서 판의 온도 분포를 구하기 위해서 4개의 기본 모델이 필요하다. bite zone에서는 판의 소성 변형 유한 요소 해석 모델(model A), 판의 정상상태 열전달 유한 요소 해석 모델(model B), 롤의 정상상태 열전달 유한 요소 해석 모델(model C)의 통합 모델이 필요하다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 판과 롤의 접촉부에서 발생하는 상호 영향을 고려하기 위해 iteration scheme을 사용하였다.[1] 그리고 inter-stand zone에서는 판의 비정상상태 열전달 유한 요소 해석 모델(model D)이 필요하다.

2.2 inter-stand zone 온도 모델.

사상압연 중 inter-stand zone에서 판 온도는 표면에 머무르는 냉각수에 의한 대류에 지배적인 영향을 받는다. Fig.2에서 $T_i(y)$, $T_{i+1}(y)$ 는 F_i stand와 F_{i+1} stand 사이 구간에서 입측과 출측 온도로 한다.

Inter-stand zone에서의 온도분포를 구하기 위해 풀어야 할 초기값 경계치 문제는 다음과 같다.

지배방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T(y,t)}{\partial y} \right) = \rho c \frac{\partial T(y,t)}{\partial t} \quad (1)$$

경계조건 :

$$\frac{\partial T(y,t)}{\partial y} = 0 \quad \text{at } y = 0 \quad (2)$$

$$-k \frac{\partial T(y,t)}{\partial y} = h(T(y,t) - T) \quad \text{at } y = h \quad (3)$$

초기조건 :

$$T(y,0) = T_i(y) \quad (4)$$

이 문제에 대한 closed form solution은 변수분리법에 의해 다음과 같이 구해진다.

$$T(y,t) = T_w + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{4\lambda_n \int_0^h T_i(y) \cdot \cos(\lambda_n y) dy - 4T_w \cdot \sin(\lambda_n h)}{2\lambda_n h + \sin(2\lambda_n h)} \cdot \cos(\lambda_n y) \cdot \exp\left(-\frac{k \cdot \lambda_n^2}{\rho c} t\right) \right) \quad (5)$$

여기서, T_w 는 냉각수 온도이고, h_w 는 냉각수의 대류 열전달 계수이고, h 는 판의 두께이고, k 는 판의 열전도 계수이고, ρc_p 는 판의 단위부피당 열용량이며, λ_n 은 다음의 식을 만족하는 값으로 쉽게 구할 수 있다.

$$k\lambda_n \sin(\lambda_n h) - h_w \cos(\lambda_n h) = 0 \quad (6)$$

이렇게 구해진 해의 정확성은 model D와 비교하여 검증하였다.

2.3 bite zone 소성 발열 분포 모델

bite-zone에서 판의 온도는 소성변형에 의해 발생하는 열량에 영향을 받는다. 판의 표면부에서 전단변형이 크지 때문에 소성 발열 분포는 두께 방향으로 어느정도의 구배가 있을 것으로 판단된다.

판의 진행 방향 평균 발열값의 두께 방향 분포는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\dot{q}(y') = \frac{\int_y^1 \bar{\sigma} \dot{\epsilon} d\Omega}{\int_y^1 d\Omega} \quad (7)$$

여기서 y' 은 판의 중심으로부터 normalized distance로 $y' = 1$ 은 판의 표면을 의미한다.

소성발열 분포 모델은 통합 유한 요소 모델(A,B,C)을 이용한 반복 시뮬레이션을 통해 다음과 같은 분포로 가정할 수 있었다.(Fig.5-6)

$$\frac{\dot{q}(y')}{\dot{q}(1)} = 1 - (1-A) \frac{\arctan\{a(1-y')\}}{\arctan a} \quad (8)$$

여기서,

$$A = \frac{\dot{q}(0)}{\dot{q}(1)} \quad (9)$$

(8)식을 적분하면,

$$\frac{\dot{q}_{avg}}{\dot{q}(1)} = 1 - (1-A)B \quad (10)$$

여기서,

$$\dot{q}_{avg} = \frac{\int_{\Omega} \bar{\sigma} \dot{\varepsilon} d\Omega}{\int_{\Omega} d\Omega} = \frac{P_d}{\int_{\Omega} d\Omega} \quad (11)$$

$$B = \int_0^1 \frac{\arctan\{a(1-y')\}}{\arctan a} dy' \quad (12)$$

최종적으로 정리하면 판의 두께방향으로 소성발열분포는 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\dot{q}(y') = \frac{\dot{q}_{avg}}{1 - (1-A)B} \left\{ 1 - (1-A) \frac{\arctan\{a(1-y')\}}{\arctan a} \right\} \quad (13)$$

여기서, A 는 반복 유한요소 해석을 통해 압연공정변수의 함수로 구해진다. \dot{q}_{avg} 또한 반복 유한요소 해석을 통해 압연공정변수의 함수로 구해졌다. [2] $a=5$ 로 하여 구해진 모델을 적용하여 유한요소해석 결과와 비교하였는데 잘 맞고 있는 것을 관찰할 수 있다. (Fig.5-6)

2.4 bite zone 온도 모델

bite-zone에서 판의 온도는 판과 롤의 접촉부에서 발생하는 열이동과 판의 내부에서 소성변형에 의해 발생하는 열량에 지배적인 영향을 받는다. 판과 롤의 접촉부에서 경계조건을 다루기 위해 다음과 같이 정의되는

$$P_d = \int_{\Omega} \bar{\sigma} \dot{\varepsilon} d\Omega \quad (14)$$

$$P_f = \int_c \mu \sigma_n |V_s - V_R| d\Gamma \quad (15)$$

$$P_r = \int_c h_{lub} (T_s - T_R) d\Gamma \quad (16)$$

P_d (변형에너지), P_f (마찰에너지)와 P_r (판에서 롤로 이동하는 에너지)을 이용하였다.[2]

판에서 롤로 이동하는 평균 열유속은 다음과 같다.[2]

$$q_s = \frac{P_f - 2P_r}{2l_d} \quad (17)$$

bite zone에서의 온도분포를 구하기 위해 풀어야 할 초기값 경계치 문제는 다음과 같다

지배방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T(y,t)}{\partial y} \right) + \dot{q}(y) = \rho c_p \frac{\partial T(y,t)}{\partial t} \quad (18)$$

경계조건 :

$$\frac{\partial T(y,t)}{\partial y} = 0 \quad \text{at } y=0 \quad (19)$$

$$k \frac{\partial T(y,t)}{\partial y} = q_s \quad \text{at } y=h \quad (20)$$

Fig. 2에서 보는 바와 같이

$$h = \frac{H_1 + H_2}{4} \quad (21)$$

로 가정한다.

초기조건 :

$$T(y,0) = T_1(y) \quad (22)$$

이 문제에 대한 closed form solution 은 eigenfunction expansion 법에 의해 다음과 같이 구해진다.

$$T(y,t) = \frac{1}{h} \int_0^h T_1(y) \cdot \phi_n(y) dy + \frac{1}{h \cdot \rho c_p} \left(q_s + \int_0^h \dot{q}(y) dy \right) \cdot t + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\exp\left(-\frac{\lambda_n^2 \cdot k \cdot t}{\rho c_p}\right) \cdot \left\{ a_n(0) + \frac{2 \cdot (-1)^n}{h \cdot \rho c_p} \cdot \int_0^t q_s \cdot \exp\left(\frac{\lambda_n^2 \cdot k \cdot t}{\rho c_p}\right) dt \right\} + \frac{2}{\lambda_n^2 \cdot k \cdot h} \left(1 - \exp\left(-\frac{\lambda_n^2 \cdot k \cdot t}{\rho c_p}\right) \right) \cdot \int_0^h \dot{q}(y) \cdot \phi_n(y) dy \right] \cdot \phi_n(y) \quad (23)$$

여기서 $\phi_n(y) = \cos(\lambda_n y)$,

$$\lambda_n = n\pi/h,$$

$$a_n(0) = \frac{2}{h} \int_0^h T_1(y) \cdot \phi_n(y) dy$$

3. 결과 및 고찰

사상압연은 여러 개의 stand 로 이루어져 있으며, 압연 방향으로의 길이가 판의 두께에 비해 굉장히 길다. 따라서 사상압연 전체 domain 에 대해 해석하는 것보다 domain 을 나누어 해석하는 것이 효율적이다. Fig.10(a)에서 보는 바와 같이, 사상압연 중의 각 영역은 다음 4 가지 중에 하나로 분류 될 수 있다 : First zone 은 첫번째 stand 전에

위치하고 있으며, last zone 은 마지막 stand 와 ROT 구간 전 어느 위치이다. 그리고 mill stand zone 과 inter-stand zone 은 롤과 판시스템 및 각 스탠드 사이의 영역이다. Fig.10(b)에서 보는 바와 같이, first zone 을 시작으로 last zone 까지 current zone 에서 예측한 온도 분포를 초기 조건으로 해서 다음 영역에서 온도 분포를 구하였다. inter-stand zone 온도 모델과 bite zone 온도 모델을 이용하면 사상압연중 임의의 위치에서 온도 분포를 구할 수 있다.

Figs.7-8 에서 보는 바와 같이 유한요소 해석 결과와 본 논문에서 제안한 두 모델의 해석 결과는 매우 잘 맞고 있음을 알 수 있다. 이로써 모델을 유도하는 과정에서 가정한 것들이 적절하다고 판단된다. 그리고 판의 평균 온도를 F7 stand 출측 근방에서 측정하여 예측했다면 그 값은 실제 판의 평균온도보다 상당히 작게 예측할 가능성이 크다고 판단된다. 그리고 F7 stand 에서 멀어질수록 판의 두께방향 온도는 거의 일정해지는 경향이 있음을 관찰 할 수 있었다.

4. 결 론

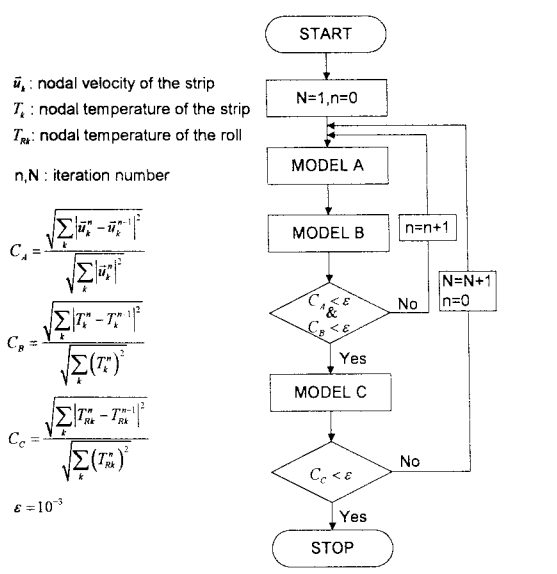
본 논문에서 제안한 온도 모델은 원하는 FDT를 얻기 위한 finishing mill set-up 모델로 활용될 수 있으며, 현장에서 측정된 판의 표면 온도 정보로부터 판의 평균 온도 및 두께방향 온도 분포를 예측하는데 활용될 수 있을 것이라 판단된다. 또한 roll force 및 roll torque 예측 정밀도 향상에도 도움이 되리라 생각된다.

후 기

Simulation을 위해 필요한 현장조건을 제공한 포스코 기술연구소에 감사드립니다..

참 고 문 헌

- [1] C. G. Sun, C. S. Yun, J. S. Chung, and S. M. Hwang, Investigation of thermo-mechanical behavior of a work roll and of roll life in hot strip rolling, Met. Mater. Trans. 29A (1998) 2407-2423.
- [2] J. H. Lee, W. J. Kwak, C. G. Sun, K. H. Ko and S. M. Hwang, Precision online model for prediction of strip temperature in hot strip rolling, Ironmaking and



MODEL A : a FE model for the analysis of steady-state thermo-mechanical behavior of the strip
 MODEL B : a FE model the analysis of steady-state heat transfer in the strip
 MODEL C : a FE model for the analysis of steady-state heat transfer in the roll

Fig. 1 An integrated FE process model for the analysis of the thermo-mechanical behavior of strip.

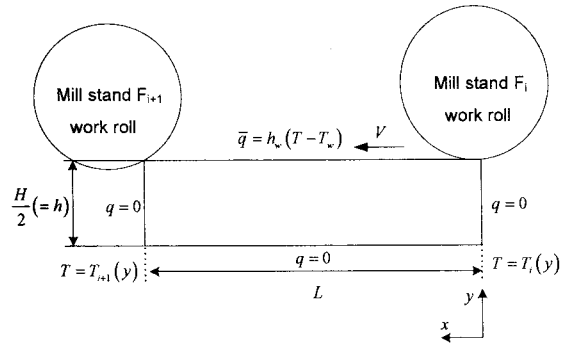


Fig. 2 A definition sketch of an inter-stand zone, inlet = outlet of the bite zone of F_i stand, outlet = inlet of the bite zone of F_{i+1} stand.

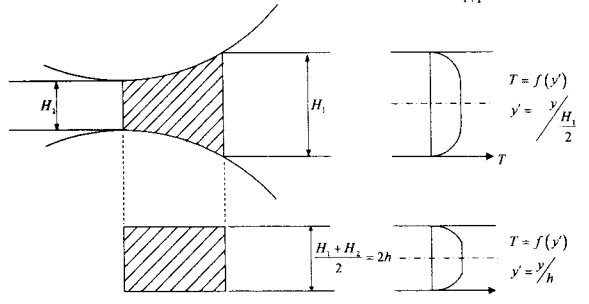
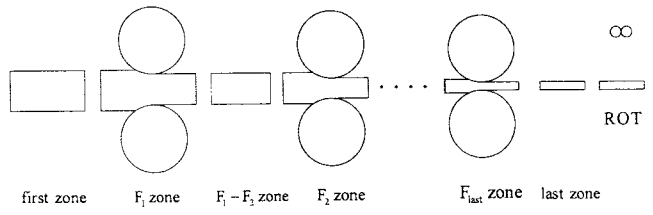
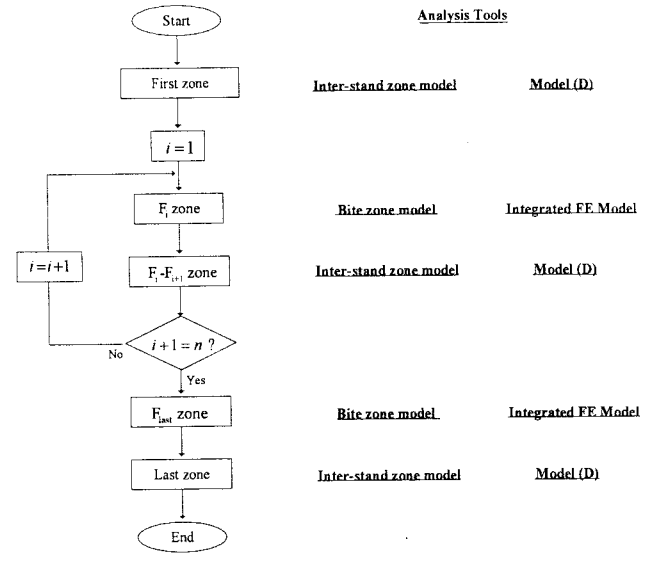


Fig. 3 approximation of bite zone and temperature distributions at the inlet.



(a)



(b)

Fig. 4 (a) Division of a finishing mill into several sub-zones, (b) computational procedure.

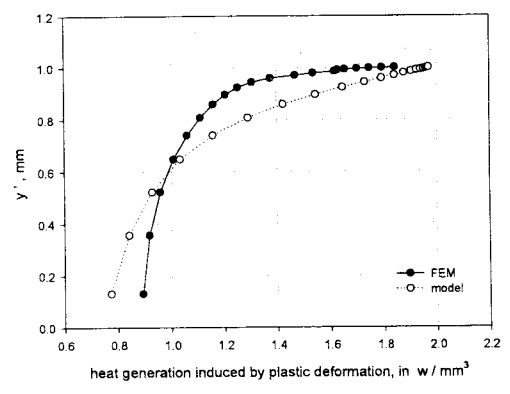


Fig. 5 the average heat generation along the thickness direction in the bite zone of F1 stand. Process conditions are shown in table 1

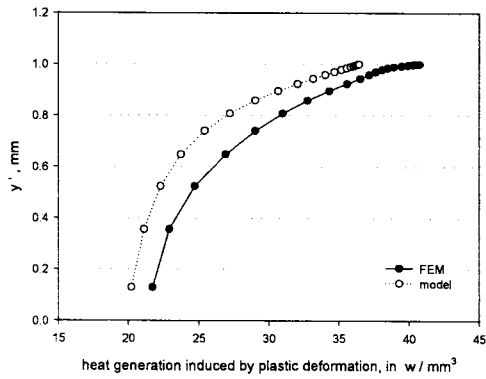


Fig. 6 the average heat generation along the thickness direction in the bite zone of F7 stand. Process conditions are shown in table 1.

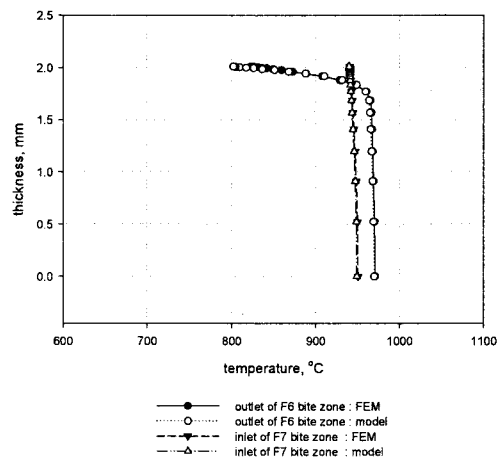


Fig. 8 Temperature distributions along the thickness direction in the finishing mills at the outlet of the bite zone of F6 stand and at the inlet of the bite zone of F7 stand. Process conditions are shown in table 1.

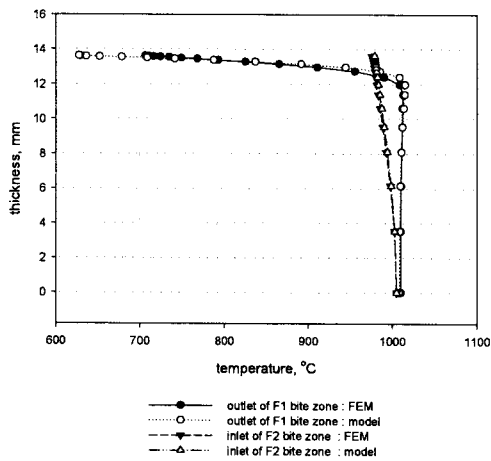


Fig. 7 Temperature distributions along the thickness direction in the finishing mills at the outlet of the bite zone of F1 stand and at the inlet of the bite zone of F2 stand. Process conditions are shown in table 1.

Table 1. FE process conditions

Variables	Unit	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	
H_1	mm	44.52	27.22	16.68	10.82	7.32	5.22	4.02	
H_2	mm	27.22	16.68	10.82	7.32	5.22	4.02	3.4	
V_1	mm/s	1145	1879	2945	4427	6182	8017	9646	
R_1	mm	410	389	380	340	298	313	322	
h_1	W/mm ² ·°C	0.000988	0.000132	0.0001584	0.0003	0.0003	0.0003	0.0001584	
σ_1	kN/mm ²	0.155% carbon steel							
T_1	°C	20							
h_2	W/mm ² ·°C	0.1							
\bar{h}_1	W/mm ² ·°C	0.011667							
k_1	W/mm·°C	0.027							
ρc_1	J/mm ² ·°C	0.004248							
k_2	W/mm ² ·°C	0.03							
ρc_2	J/mm ² ·°C	0.00688							
T_2	°C	1000, uniform strip temperature at the inlet F1 bite zone							
L_1	mm	5800, inter-stand zone length							