

차원해석을 통한 열간 사상압연중 온도해석모델 개발

이중형* · 곽우진** · 황상무***

FE-based Strip Mean Temperature Prediction On-Line Model in Hot Strip Finishing Mill by using Dimensional Analysis

J.H. Lee, W.J. Kwak and S.M. Hwang

Abstract

The mean temperature prediction of strip is very important in hot strip finishing mill because of affecting on product quality and shape. Also, temperature can be used by basic information in other on-line control models with affecting control accuracy in factory. So, FE based on-line temperature model was developed for predicting strip mean temperature accurately in various process conditions and factory environments. There are many variables in affecting strip mean temperature in on-line states of factory. But some problems are occurred in considering all variables for making temperature model because of the bad efficiency of regression or fitting analysis. In this report, we have adopted dimensional analysis for solving these problems. We have many variables with dimensions affecting strip temperature but we are able to make non-dimensional variables less than dimensional variables from the combination of dimensional variables caused by PI-Theorem in fluid mechanics. The developed models are divided by two parts. The one is interstand temperature prediction model. The other is roll gap temperature model.

Key Words : On-Line Model, Strip Mean Temperature, Finishing Mill, PI-Theorem, Roll Gap, Interstand

1. 서 론

사상압연중 판의 온도 제어는 제품의 형상 및 재질을 결정하는 중요한 요소가 된다. 사상압연중 판의 온도는 상당히 복잡한 경로를 거치며 변화한다. 대기, 복사열, 냉각수, 이물질과의 접촉, 압연중 소성발열, 마찰발열, 롤로의 열전달등의 냉각환경 및 압연공정조건의 영향 뿐만 아니라 판재질 자체의 고유한 열적인 특성치들이 환경과 연계하여 계속적으로 변하기 때문에 정밀하게 판의 평균온도를 예측하기는 쉽지가 않다. 이에, 정밀한 수치해석 기법인 유한요소법을 이용하여 기존의 온도 모델들([1]~[3])이 고려하지 못했던 많은 변수들을

고려한 온도모델을 개발하고 차원해석을 통해 온라인 모델로서의 적용이 가능토록 했다. 그리고, 온도모델은 스탠드간 온도모델과 압연중 롤갭에서의 온도모델의 2가지 방향으로 개발하였다.

2. 스탠드간 수냉 온도모델

2.1 해석 및 경계조건

열간 사상압연중 스탠드간 판은 물에 의한 수냉의 작용으로 냉각되어 다음 스탠드로 들어가게 된다. 여기서 대기와 복사에 의한 냉각은 열전달 계수의 변화를 통해서 수냉에 포함시켜 고려할 수 있다. [Fig.1]은 스탠드간 판의 열전달 해석을

* 포항공과대학교 기계공학과 대학원

** 포스코기술연구소

*** 포항공과대학교 기계공학과

위한 유한요소 격자 체계와 경계조건들이다. 판의 앞, 뒷부분과 수냉이 이루어지는 판의 윗부분은 밀도가 높은 격자체계를 씌므로 표면에서의 급격한 온도변화를 잘 묘사할 수 있도록 했다. [Table1]에는 판의 평균온도(T_2)에 영향을 미치는 여러 공정변수들의 의미와 그 차원을 나타내었다.

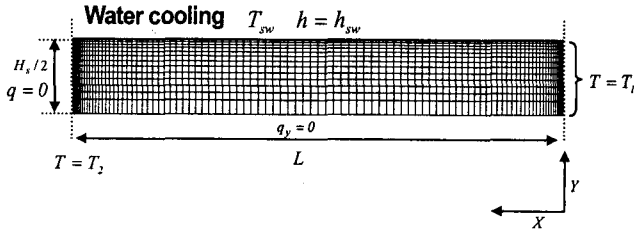


Fig. 1 Boundary condition for temperature analysis of strip in interstand region

Table 1 Related variables and their dimensions for strip mean temperature in interstand region

Related variables	dimension
H_s : Strip thickness	mm
L : Strip length	mm
V_s : Strip velocity	mm/sec
T_1 : Strip initial temperature	$^{\circ}C$
T_{sw} : Cooling temperature	$^{\circ}C$
h_{sw} : Heat transfer coefficient	$W/mm^2^{\circ}C$
$k(T)$: Conductivity of strip	$W/mm^{\circ}C$
$\rho c_p(T)$: Heat capacity of strip	$J/mm^3^{\circ}C$
T_2 : Strip mean temperature (Output)	$^{\circ}C$

2.2 무차원 변수의 구성

판의 평균온도 T_2 는 식(1)과 같이 [Table1]에 나오는 관련변수들의 함수로 표현된다.

$$T_2 = f(T_1, T_{sw}, h_{sw}, V_s, H_s, L, k_m, (\rho c_p)_m) \quad (1)$$

여기서, $k, \rho c_p$ 는 온도에 따라 변하는 값이므로 해석도중 하나의 대표값인 평균값으로 사용된다. 그 평균값의 정의는 식(2)와 같다.

$$k_m = \frac{\int_{T_1}^{T_2} k dT}{T_2 - T_1}, (\rho c_p)_m = \frac{\int_{T_1}^{T_2} \rho c_p dT}{T_2 - T_1} \quad (2)$$

이때, 식(1)의 기본 관련변수들은 차원해석(PI-Theorem)에 의해서 무차원변수로 이루어진 식(3)으로 표현 할 수 있다.

$$\frac{T_2 - T_1}{T_1} = f\left(\frac{h_{sw}}{(\rho c_p)_m V_s}, \frac{(\rho c_p)_m V_s H_s}{k_m}, \frac{L}{H_s}, \frac{T_1 - T_{sw}}{T_1}\right)$$

$$\frac{T_2 - T_1}{T_1} = \eta_0 = f(\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4) \quad (3)$$

식(3)은 식(1)과 같은 결과(T_2)를 주지만 식의 구성변수의 8 개에서 4 개($\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$)로 줄어들어 효율적인 모델식의 구성을 가능하게 해 준다.

식(3)에서 특정 $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$ 를 만드는 기본변수들의 많은 조합이 있을 수 있지만 같은 $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$ 에 대해서 같은 η_0 를 가지는 특성이 있다.

2.3 수식모델의 구성

식(3)의 모델식을 구현하기 위해 필요한 유한요소 해석을 [Table2]와 같은 범위에서 행했으며 그때의 무차원 변수들의 범위를 [Table3]에 나타내었다. 식(3)의 구성을 위해서 최소자승법이 쓰였으며 각각의 무차원변수 $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$ 들은 이제 [Table3]의 범위 안에서 적용가능하다.

Table 2 FE process condition for making temperature on-line model in interstand region

The FE analysis range of Related variables with dimension	dimension
H_s : 1~60	mm
L : 1000~10000	mm
V_s : 500~15000	mm/sec
T_1 : 600~1100	$^{\circ}C$
T_{sw} : 0~80	$^{\circ}C$
h_{sw} : 0.000001~0.001	$W/mm^2^{\circ}C$
k : 0.02~0.04	$W/mm^{\circ}C$
ρc_p : 0.003~0.02	$J/mm^3^{\circ}C$

Table 3 The range of non-dimensional parameters derived from dimensional related variables for on-line model in interstand region

The range of non-dimensional parameters in on-line model	No dimension
η_0 : -0.3~0	
η_1 : $0.3333 \times 10^{-7} \sim 0.6666 \times 10^{-3}$	
η_2 : 37.5~900000	
η_3 : 16.6666~10000	
η_4 : 0.91666~0.995454	

[Fig.2]는 [Table2]에서 사용하지 않은 공정자료(약 5000 여개)를 이용하여 유한요소해석한 결과(x 축)와 식(3)에 의해 구성된 모델식의 결과(y 축)를 나타낸 것이다. 점선은 1% 오차를 나타낸다.

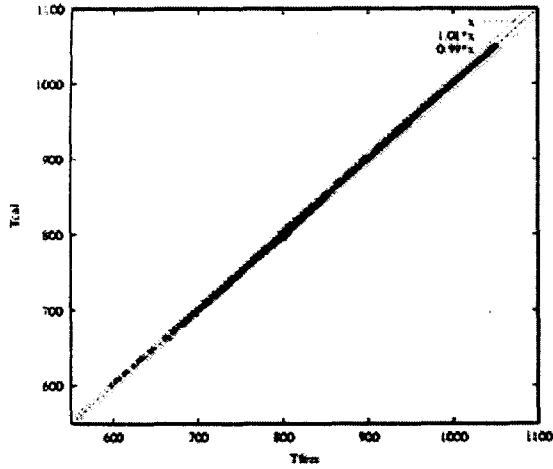


Fig. 2 Comparison between the values of the strip mean temperature predicted from the on-line model and those predicted from the FE process model in interstand

3. 롤갭 온도모델

3.1 해석 및 경계조건

열간 사상압연중 롤갭에서는 소성발열, 마찰발열, 롤로의 열전달등으로 인한 복잡한 열적 거동이 일어난다. [Fig.3],[Fig.4] 에서는 롤갭 온도의 유한 요소해석을 위한 격자체계와 경계조건을 나타내었다.

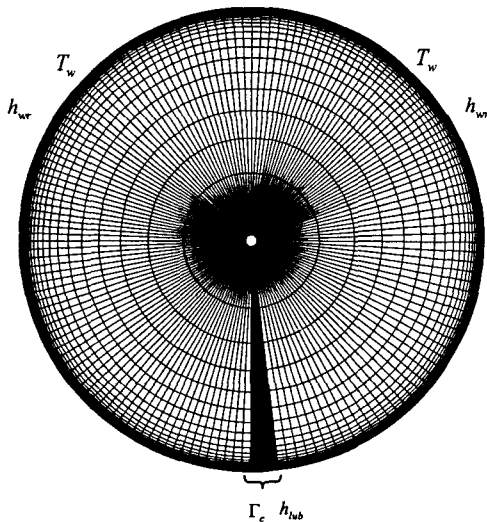


Fig. 3 FE mesh and boundary conditions for the roll

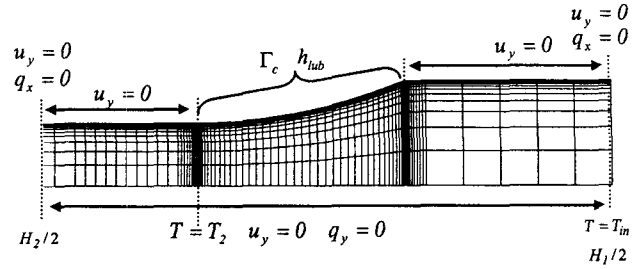


Fig. 4 FE mesh and boundary conditions for the strip

에너지 평형방정식에 의해 압연후 판의 온도 T_2 는 식(4)와 같이 표현된다.

$$\Delta T = T_2 - T_{in} = \frac{P_d + P_f - P_r}{(\rho c_p)_m V_2 H_2} \quad (4)$$

여기서, P_d, P_f, P_r 는 각각 소성발열량, 마찰발열량, 롤로의 열전달량을 나타내며 식(5)~식(7)로 표현된다.

$$P_d = \int_{\Omega} \bar{\sigma} \dot{\epsilon} d\Omega \quad (5)$$

$$P_f = \int_{\Gamma} 0.5 |u_t - V_r| \sigma_t d\Gamma \quad (6)$$

$$P_r = \int_{\Gamma} h_{lub} (T_s - T_r) d\Gamma \quad (7)$$

식(5), 식(6)에 대해서는 참고문헌[4]에 나타나 있으며, 여기서는 식(7)을 구한다.

Table 4 Related variables and their dimensions for strip mean temperature in roll gap

Related variables	dimension
s : Shape factor	mm
r : Reduction ratio	mm
μ : Friction coefficient	
R : Roll radius	mm
V_r : Roll velocity	mm/sec
T_{in} : Strip initial temperature	$^{\circ}C$
T_w : Cooling temperature of roll	$^{\circ}C$
h_{rw} : Heat transfer coefficient	$W/mm^2^{\circ}C$
h_{lub} : Contact heat transfer coefficient	$W/mm^2^{\circ}C$
k^s : Conductivity of strip	$W/mm^{\circ}C$
ρc_p^s : Heat capacity of strip	$J/mm^3^{\circ}C$
k^r : Conductivity of roll	$W/mm^{\circ}C$
ρc_p^r : Heat capacity of roll	$J/mm^3^{\circ}C$
$\bar{\sigma}$: Flow stress of material	kN/mm^2
T_s : Strip temperature in contact zone	$^{\circ}C$
T_r : Roll temperature in contact zone	$^{\circ}C$

[Table4]에 관련변수들을 나타내었다. 무차원변수의 구성을 위한 몇가지 기본변수들을 정의한다(식(8),(9)).

$$\text{형상계수 } S = \frac{2}{2-r} \sqrt{\frac{Rr}{H_1}} \quad (8)$$

$$P^* = V_r H_2 \int \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} V_r H_2 \int_{H_2}^{H_1} \frac{\bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}, \bar{\varepsilon}_0^s, T_{in})}{h} dh \quad (9)$$

식(7)은 판과 롤의 접촉면에서의 평균 롤온도 (T_{mr})와 평균 판온도 (T_{ms})를 고려하면 식(10)과 같이 표현된다.

$$P_r = h_{lub}(T_{ms} - T_{mr}) l_d \quad (10)$$

여기서 l_d 는 롤과 판의 접촉길이이다.

3.2 무차원 변수의 구성

식(10)을 구성하기 위해 T_{mr} , T_{ms} 를 알아야 하는데 식(11)과 식(12)에서 차원해석에 의해 무차원화된 변수의 형태로 표현하였다. 식(10)은 롤과 판의 경계지점에서 P_r 를 수립시키는 과정에 T_{mr} , T_{ms} 를 얻을 수 있는 잇점도 있으며 판과 롤을 분리시켜 관련변수의 수를 줄인후 차원해석을 가능케 하는 장점도 가져다 준다. 식(11)과 식(12)에 들어간 h_w, T_w 는 판과 롤의 분리과정에서 발생하는 오차를 줄여주는 역할을 한다.

$$\frac{T_{ms}}{T_{in}} = g_1 \left(s, r, \mu, \frac{P_r}{k_s T_{in}}, \frac{P^*}{k_s T_{in}}, \frac{\rho c_p^s V_r H_1}{k_s}, \frac{h_w}{\rho c_p^s V_r} \right) \quad (11)$$

$$\frac{T_{mr}}{T_{in}} = g_2 \left(\frac{l_d}{2\pi R}, \frac{P_r + P_f}{k_r T_{in}}, \frac{h_w}{\rho c_p^r V_r}, \frac{\rho c_p^r V_r H_1}{k_r}, \frac{T_{in} - T_w}{T_{in}} \right) \quad (12)$$

3.3 수식모델의 구성

[Table5]는 롤깎에서 모델식 구성을 위해 사용한 유한요소 공정조건이며, 최소자승법을 사용하였다. [Fig.5]는 이 모델식에 의한 결과와 유한요소 해석의 결과를 비교한 것이다(x:해석치, y:모델식).

Table 5 FE process condition for making temperature on-line model in roll gap

The FE analysis range of Related variables with dimesnion	dimesnion
s : 2~7	mm
r : 5~60%	mm
μ : 0.2~0.4	mm/sec
R : 400	

Table 5 continue

V_r : 1000~12000	mm/sec
T_{in} : 800~1200	$^{\circ}C$
T_w : 20	$^{\circ}C$
h_{sw} : 0.011667	$W/mm^2^{\circ}C$
h_{lub} : 0.02~0.2	$W/mm^2^{\circ}C$
k^s : 0.02~0.03	$W/mm^{\circ}C$
ρc_p^s : 0.004~0.008	$J/mm^3^{\circ}C$
k^r : 0.027	$W/mm^{\circ}C$
ρc_p^r : 0.004248	$J/mm^3^{\circ}C$

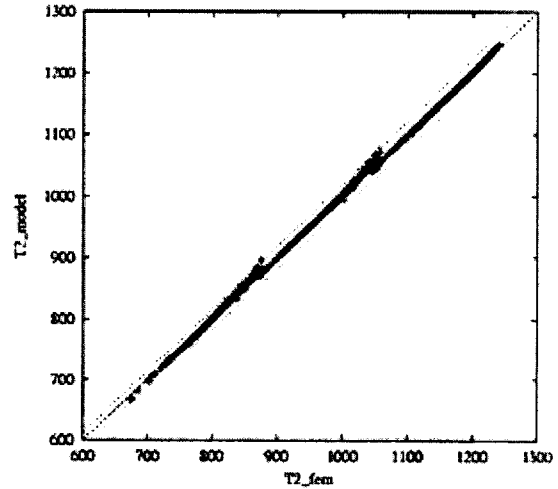


Fig. 5 Comparison between the values of the strip mean temperature predicted from the on-line model and those predicted from the FE process model in rollgap

4. 결론

차원해석을 통하여 관련변수들을 줄이는 작업이 가능하므로 해석의 시간과 모델식의 효율성을 높일 수 있었다. 유한요소 해석을 모델식의 기반으로 함으로 기존의 근사해석과 다른 정밀해석을 수행할 수 있었고 모델식이 유한요소 해석치를 잘 따라감을 알 수 있었다.

참고 문헌

- (1) Manabu KIUCHI, J.Y. and E. W., 1999, "Thermal Analysis of Hot Plate/Sheet Rolling", STEEL ROLLING '99, pp.227~232
- (2) J.D.Fletcher and J.H.Beynon., 1996, "Heat transfer conditions in roll gap in hot strip rolling", Ironmaking and Steelmaking, Vol. 23, pp.52~57.
- (3) W.C.CHEN, I.V.SAMARASEKERA, and E.B.HAWBOLT, 1993, "Fundamental Phenomena Governing Heat Transfer During Rolling", Metallurgical Transaction A, pp.1307~1320
- (4) FE-based on-line model for the prediction of strip mean temperatures in hot strip rolling after roll-gap 2002, 포항공과대학교 석사학위 논문