

## 열간 사상 압연중 판 온도예측 모델 개발 및 적용

이중형\*, 최지원\*, 곽우진\*\*, 황상무\*  
기계공학과, 포항공과대학교\*  
광양기술연구소, POSCO\*\*

### The development and application of on-line model for the prediction of strip temperature in hot strip rolling

J. H. Lee\*, J. W. Choi\*, W. J. Kwak\*\* and S. M. Hwang\*  
Mechanical Engineering Department, POSTECH\*  
POSCO Gwangyang Technical Research Laboratories\*\*

#### Abstract

Investigated via a series of finite-element(FE) process simulation is the effect of diverse process variables on some selected non-dimensional parameters characterizing the thermo-mechanical behavior of the roll and strip in hot strip rolling. Then, on the basis of these parameters, on-line models are derived for the precise prediction of the temperature changes occurring in the bite zones as well as in the inter-stand zones in a finishing mill. The prediction accuracy of the proposed models is examined through comparison with predictions from a FE process model.

**Key words** : hot strip rolling, on-line model, temperature change, dimensional analysis

#### 1. 온도모델의 개발 배경

열간 압연 공정중 판은 매우 복잡한 냉각 및 가열의 조건을 거치게 된다. 조압연 후 판은 사상압연 공정으로의 이동 도중 공냉 및 복사, 스케일 제거 장치에 의한 수냉에 의한 냉각을 거치게 되고 때로는 판의 온도보존을 위한 덮개에 의해, 판의 온도 균일 확보를 위한 가열장치에 의해서 냉각 속도가 느려지거나 상승하게 된다. 또한 사상압연중 판은 롤갭 내에서 소성변형에 의한 에너지, 마찰에 의한 에너지, 롤로의 열전달량 등의 복합적인 작용에 의해 다양한 온도변화 조건을 거치게 되고 압연 스탠드 사이에서 수냉 또는 공냉에 의한 냉각을 겪게 된다[Fig.1]. 판 온도는 제품의 질에 직접적인 영향을 미칠 뿐 만 아니라 안정적인 제품 생산에 영향을 주는 요소로 그의 제어는 필수적이라 하겠다.

많은 연구자들이 판의 온도해석을 위해 유한차분법[1-5], 유한요소법[6-10] 그리고 단순화 된 가정에 의한 해석 모델을 제시하였으나 압연중 판의 소성변형 뿐만 아니라 온도변화의 요소가 고려되고 롤의 온도 함께 연계된 해석을 수행하기에는 유한요소법이 가장 정밀한 수치해석 기법이라 할 수 있다. 그러나 유한요소법에 의한 해석은 많은 시간을 요구하므로 실제 현장의 생산공정에 직접 활용하기는 어렵다. 본 연구는 조압연후 사상압연까지 다양한 압연조건과 판의 냉각,가열 조건을 고려하여 유한요소법을 수행하고 그 결과를 최소자승법과 차원해석[13]에 의해 식으로 구현함으로써 유한요소법의 장점인 정확성을 보존하고 단점인 해석시간을 줄임으로 실시간 모델로서의 활용이 가능하게 하였다. 본 연구에서 개발된 실시간 모델은 수냉에 의한 판의 온도변화, 공냉 및 복사에 의한 판의 온도 변화 그리고 롤갭에서의 온도변화의 3 가지 형태로 개발 되었으며 그 결과는 유한요소 해석의 결과와 비교, 검증 되었다.

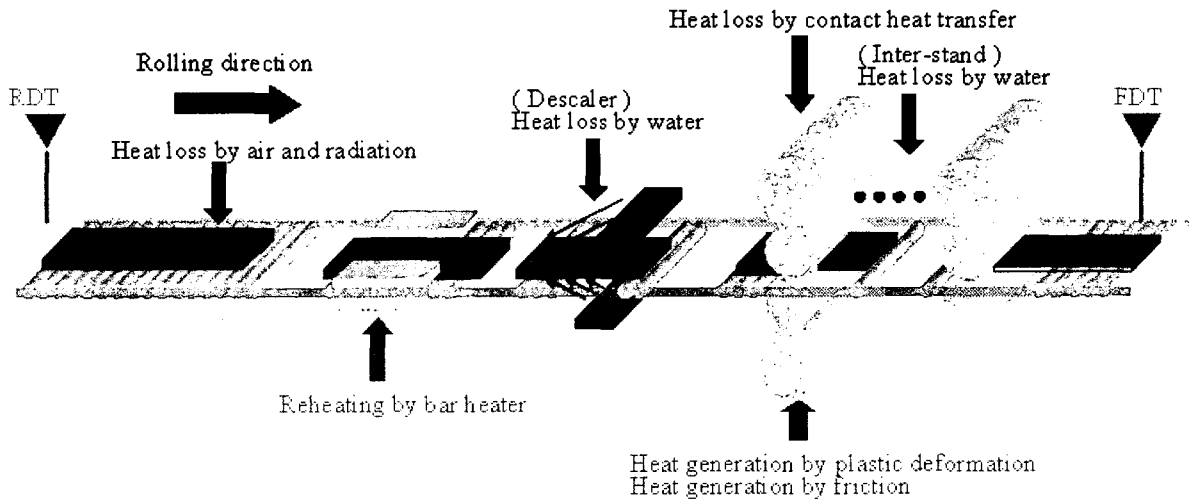


Fig.1 Schematic procedures of hot strip rolling in finishing mill

## 2. 수냉에 의한 판의 온도변화

열간 압연중 판은 이동 도중 또는 압연 스탠드 사이에서 냉각수에 의해 냉각을 받게 된다(Fig.7). 스탠드간의 초기 온도  $T_1$ , 수냉에 의한 냉각후의 판의 평균온도를  $T_2$  라고 했을 때 스탠드간 ( $F_i, F_{i+1}$ ) 온도 변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_2 - T_1 = \phi(T_1, T_w, h_w, V, H, L, k, \rho c_p) \quad (1)$$

여기서, 판의 열전도계수 ( $k$ )와 열용량 ( $\rho c_p$ )은 스탠드간에서 평균적인 값으로 고정되어 해석된다.

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

차원해석 ( $pi$  theorem)에 의해서 식(1)은 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$\frac{T_2 - T_1}{T_1} = f\left(\frac{h_w}{\rho c_p V}, \frac{\rho c_p V H}{k}, \frac{L}{H}, \frac{T_1 - T_w}{T_1}\right) = f(\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4) \quad (3)$$

$(T_2 - T_1)/T_1$ 의 값은 유한요소법에 의해 구해질 수 있으며 유한요소 해석을 위한 격자체계와 경계조건은 Fig.2에 표시하였다. Fig.3에는 그 해석결과의 예시를 나타내었다. 식(3)는 다양한 공정조건에 대해 유한요소 해석을 수행한 후 무차원변수 ( $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$ )와 유한요소결과를 이용, 최소자승법을 수행함으로써 다변수의 다항식의 형태로 수식모델화 할 수 있다.

다항식의 형태로 구성된 수식모델(식(3))은 다양한 공정조건에 대해서 유한요소 해석결과와 비교되었으며(Fig.4) 대부분 2% 이내의 오차를 보여준다.

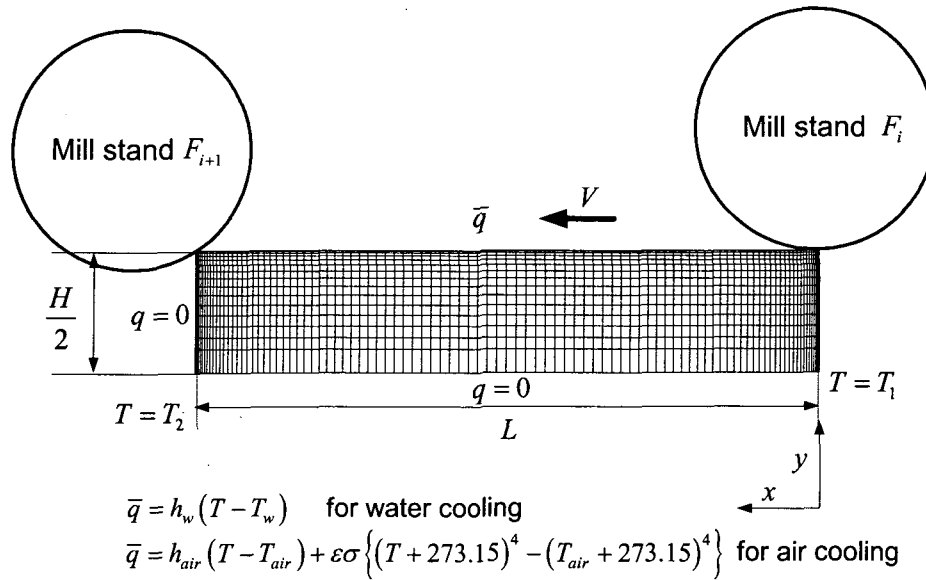


Fig.2 Boundary conditions and the FE mesh used for the analysis of heat transfer in an inter-stand zone

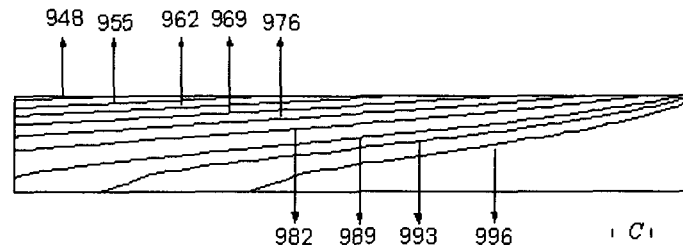


Fig. 3 Temperature distributions in an inter-stand zone predicted from FE process simulation, for the case of water spray cooling. Process conditions are; carbon content of the strip material = 0.1%,  $L = 5800\text{mm}$ ,  $H = 10\text{mm}$ ,  $T_1 = 1000^\circ\text{C}$ ,  $V = 4000\text{mm/sec}$ ,  $T_w = 20^\circ\text{C}$ ,  $h_w = 0.0006\text{W/mm}^2\text{ }^\circ\text{C}$ .

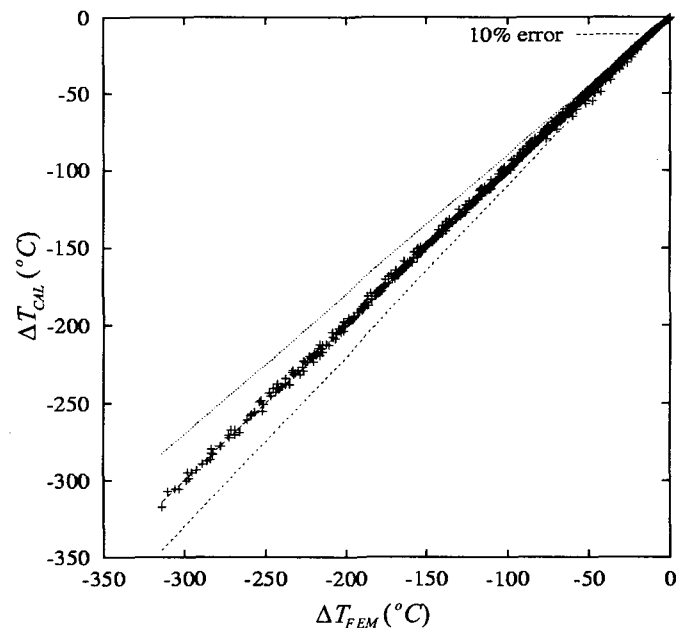


Fig. 4 Comparison between the values of  $\Delta T = T_2 - T_1$  predicted from the on-line model and predictions from the FE process simulation.

### 3. 공냉 및 복사 열전달에 의한 판의 온도변화

판이 스탠드간에서 또는 이동중 공냉 및 복사 열전달에 의해 냉각이 될 때의 유한요소 격자체계와 경계조건은 Fig.2 와 같다. 유한요소 해석을 통해서 판의 온도변화는 판의 길이 방향(x)에 대해서 다음과 같은 선형적인 관계가 있음을 알 수 있었다(Fig.5).

$$\frac{T(x)}{T_1} = A \frac{x}{L} + 1 \quad (4)$$

( $T(x), T_1$  are in  $^{\circ}C$ )

기울기  $A$ 는 다음과 같은 9 개의 변수의 함수로 표현이 가능 하다.

$$A = A(T_1, T_{air}, h_{air}, \varepsilon\sigma, V, H, L, k, \rho c_p) \quad (5)$$

여기서  $\varepsilon$ 는 방사율,  $\sigma$  슈테판 볼츠만 상수를 의미한다.

차원해석에 의해서 식(5)는 5 개의 무차원 변수로 표현이 가능하나 에너지 유입과 손실의 비를 나타내는 다음의 무차원 변수를 제안한다.

$$D = \frac{\varepsilon\sigma \left\{ (T_1 + 273.15)^4 - (T_{air} + 273.15)^4 \right\} L + h_{air} (T_1 - T_{air}) L}{\rho c_p V T_1 H} \quad (6)$$

( $T_1, T_{air} : ^{\circ}C$ )

$\rho c_p$ 는 온도에 따라 변한다면 평균적인  $(\rho c_p)_m$ 으로 대체 할 수 있다.

이때 식(5)의  $A$ 는 유한요소 해석의 경향성 조사로 인해서 무차원 변수  $D$ 에 선형적으로 비례함을 알 수 있었다(Fig.6).

$$A = aD + b \quad (7)$$

유한요소 해석결과와 공정조건을 이용한 최소자승법에 의해 계수는 다음과 같이 결정된다.

$$a = -1.94978$$

$$b = -4.30142 \times 10^{-5}$$

식(6),(7) 의해 구성된 모델식(4)에서  $T_2 - T_1$ 는 다양한 공정조건의 유한요소 해석결과와 비교 되었으며 2%이내의 오차를 보여주고 있다(Fig.7).

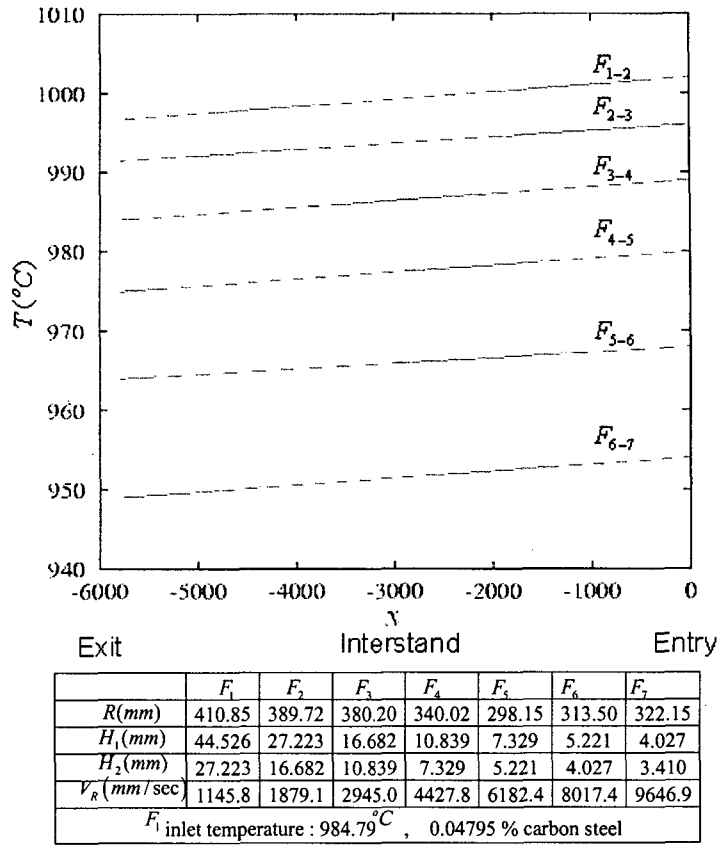


Fig. 5 Variation of the average strip temperature  $T(x)$  with position  $x$  in the inter-stand zone, predicted from FE process simulation.

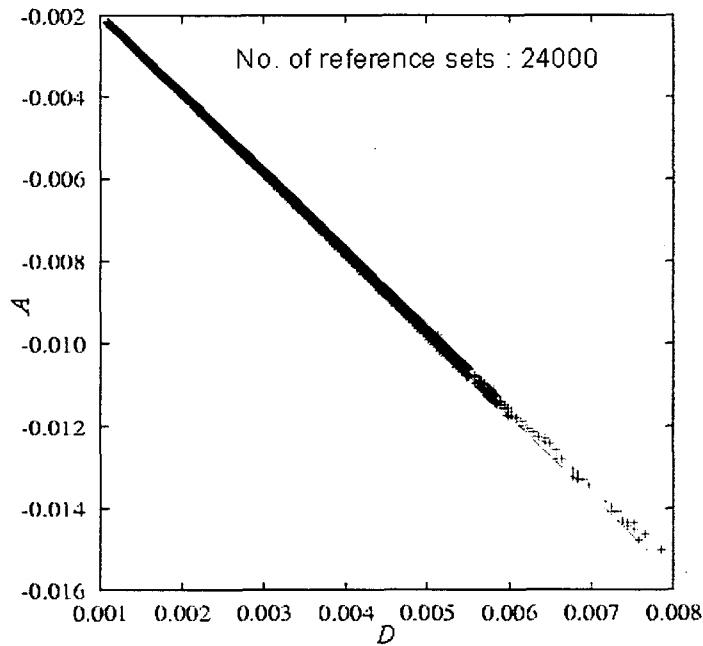


Fig. 6 The relation between  $A$  and  $D$  predicted from FE process simulation with all the reference sets of process variables shown in Table 2.

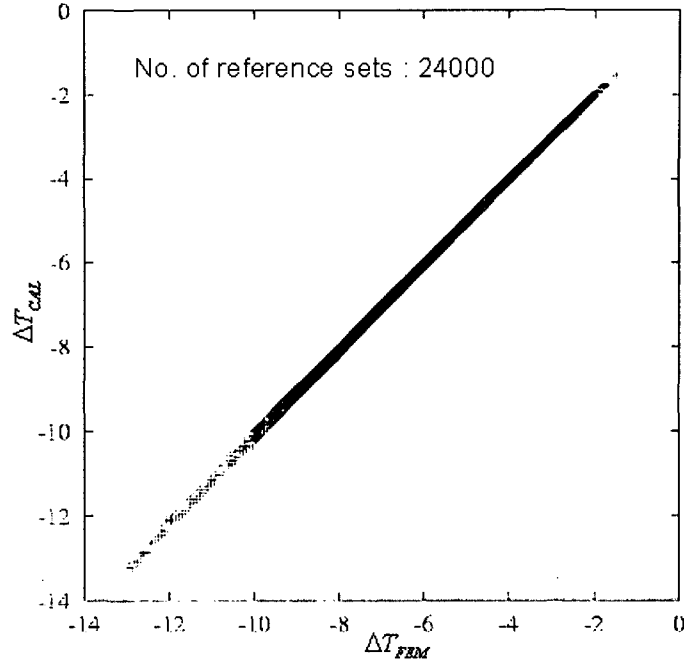


Fig. 7 Comparison between the values of  $\Delta T = T_2 - T_1$  predicted from the on-line model and predictions from the FE process simulation. The drawing includes all the reference sets of process variables shown in Table 2.

#### 4. 압연중 롤갭에서의 판 온도변화

##### 4.1 롤갭에서의 에너지 평형 방정식

롤갭에서의 온도변화는 Fig.8 에서 알 수 있듯이 판의 소성변형에 의한 에너지( $P_d$ ), 물과 판의 마찰에 의한 에너지( $P_f$ ), 물로의 열전달량( $P_r$ )과 물질의 이동에 의해 나타나는 에너지의 평형에 의해 다음의 식으로 결정될 수 있다.

$$P_d + P_f - 2P_r - H_2 V_2 (T_2 - T_1) \rho c_p = 0 \quad (8)$$

$P_d$ ,  $P_f$  그리고  $P_r$  는 다음과 같이 정의 된다.

$$P_d = \int_{\Omega} \bar{\sigma} \dot{\epsilon} d\Omega \quad (9)$$

$$P_f = \int_c \mu \sigma_n |V_s - V_R| d\Gamma \quad (10)$$

$$P_r = \int_c h_{lub} (T_s - T_R) d\Gamma \quad (11)$$

식(8)에 식(9)~(11)을 대입하여 롤갭내에서의 온도변화  $T_2 - T_1$ 를 식(12)에 의해 결정한다.

$$T_2 - T_1 - \frac{P_d + P_f - 2P_r}{\rho c_p H_2 V_2} = 0 \quad (12)$$

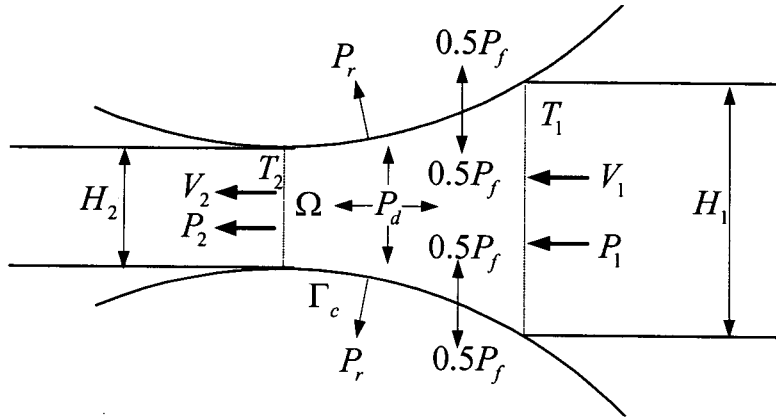


Fig. 8 Energy balance in the bite zone

#### 4.2 압연의 가설 이론

압연중 마찰의 영향을 고려하지 않으며 판이 두께 방향으로 균일한 변형율과 변형율속도의 분포를 가지고 판 내부의 온도분포는 초기온도와 같다고 가정하면 이론적인 소성변형에너지  $P'$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P' = V_2 H_2 E' \quad (13)$$

$$E' = \int \bar{\sigma} d\bar{\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \int_{H_2}^{H_1} \frac{\bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T_1)}{h} dh \quad (14)$$

$$\bar{\epsilon} = -\frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{h}{H_1} \quad (15)$$

$$\dot{\bar{\epsilon}} = \frac{4}{\sqrt{3}} \frac{\tan \phi}{h^2} V_2 H_2 \quad (16)$$

식(13)은 재료의 유동응력식[12]  $\bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T_1)$ 를 안다고 했을 때 수치적으로 계산 가능하며, 이론적인 소성변형에너지  $P'$ 는  $P_d$ ,  $P_f$  그리고  $P_r$  등의 에너지 변수들을 무차원화 시키는 데 사용될 것이다. 판의 출측속도  $V_2$ 는 선진율 모델식[11]에 의해 구해 질 수 있다.

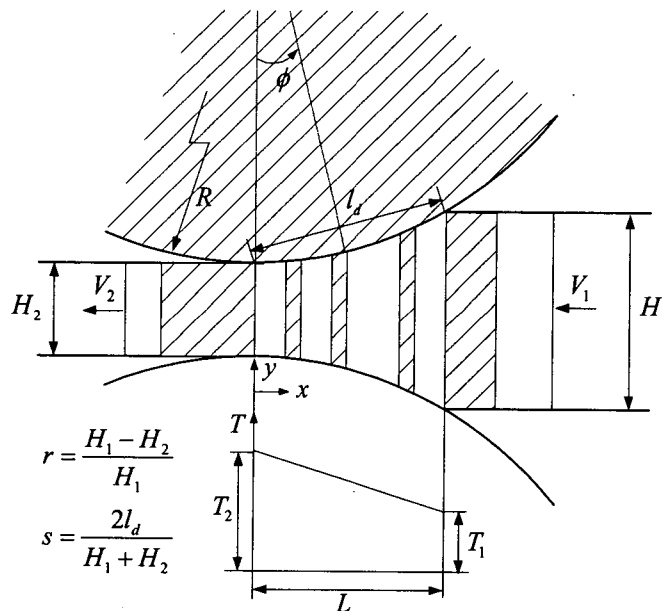


Fig. 9 An hypothetical model of rolling





$$T_{ms} = \int_{T_c} T_s d\Gamma / l_d \quad (21)$$

$$T_{mr} = \int_{T_c} T_r d\Gamma / l_d \quad (22)$$

$T_{ms}$  은 식 (23)에 나타난 변수들의 함수이며 차원해석과 최소자승법에 의해 식 (24)로 수식모델화 할 수 있다.

$$T_{ms} = \phi_s (R, H_1, H_2, \mu, T_1, V_R, k_s, \rho c_{ps}, P_r, P_d, P_f) \quad (23)$$

$$\frac{T_{ms}}{T_1} = g_s \left( s, r, \mu, \frac{2l_d q_s}{k_s T_1}, \frac{P^*}{k_s T_1}, \frac{\rho c_{ps} V_R H_1}{k_s} \right) = g_s (\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6) \quad (24)$$

여기서,  $P^* = P'/(1+f_s)$  ( $T_{ms}, T_1 : ^\circ C$ ),  $2l_d q_s = P_f - 2P_r$

$T_{mr}$  은 식 (25)에 나타난 변수들의 함수이며 차원해석과 최소자승법에 의해 식 (26)으로 수식모델화 할 수 있다.

$$T_{mr} = \psi_r (R, l_d, T_w, \bar{h}_{rw}, V_R, k_r, \rho c_{pr}, P_r, P_f) \quad (25)$$

$$\frac{T_{mr}}{T_w} = g_r \left( \frac{l_d}{2\pi R}, \frac{2l_d q_r}{k_r T_w}, \frac{\bar{h}_{rw}}{\rho c_{pr} V_R}, \frac{\rho c_{pr} V_R l_d}{k_r} \right) = g_r (\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4) \quad (26)$$

여기서,  $\bar{h}_{rw} = \int_0^{2\pi} h_{rw} d\phi / (2\pi)$ ,  $2l_d q_r = P_f + 2P_r$

식 (24)와 (26)을 식 (20)에 대입하면  $P_r$ 에 관한 비선형 방정식을 구성할 수 있다.

$$P_r - h_{lub} \{g_s (P_r, T_2) T_1 - g_r (P_r, T_2) T_w\} l_d = 0 \quad (27)$$

앞서 유도된  $P_d$ ,  $P_f$  그리고  $P_r$ 을 식 (12)에 대입하면 롤갭에서의 온도변화를 있으며, 여러가지 공정조건에 대해 유한요소 해석치와 비교하였다(Fig.11).

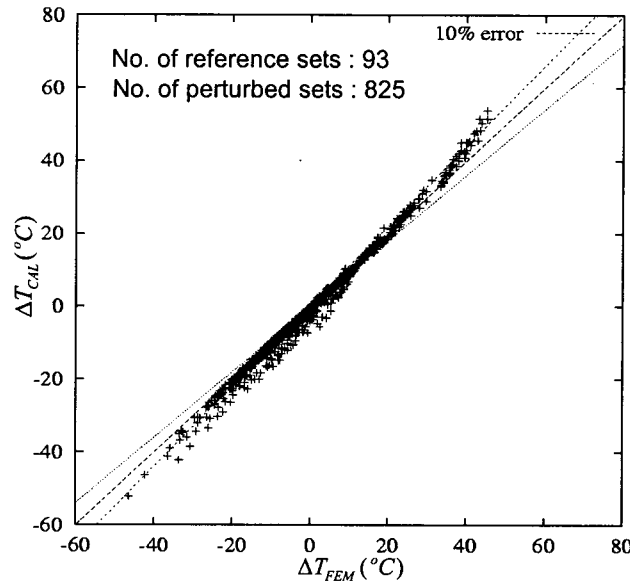


Fig. 11 Comparison between the values of  $\Delta T = T_2 - T_1$  predicted from the on-line model and predictions from the FE process simulation

## 5. 결론 및 향후 계획

개발된 실시간 모델들은 유한요소 해석치와 비교되었고 10%이내의 오차 범위내에서 일치함을 알 수 있었다. 또한 상기 개발된 모델은 다양한 공정변수들을 포함하고 있어 현장의 복잡한 열전달 현상과 다양한 압연조건 및 설비의 변화에 따른 온도의 변화를 묘사하기에 적합하다(Fig.12). 좀더 정밀한 온도의 제어 및 예측을 위해서 재료의 열적인 성질 및 열전달 계수등의 값들에 대한 고찰이 필요하며 평균적인 개념의 온도 뿐만 아니라 폭방향, 두께방향의 온도분포에 대한 모델도 유한요소 해석 기반으로 개발되어야 할 것이다.

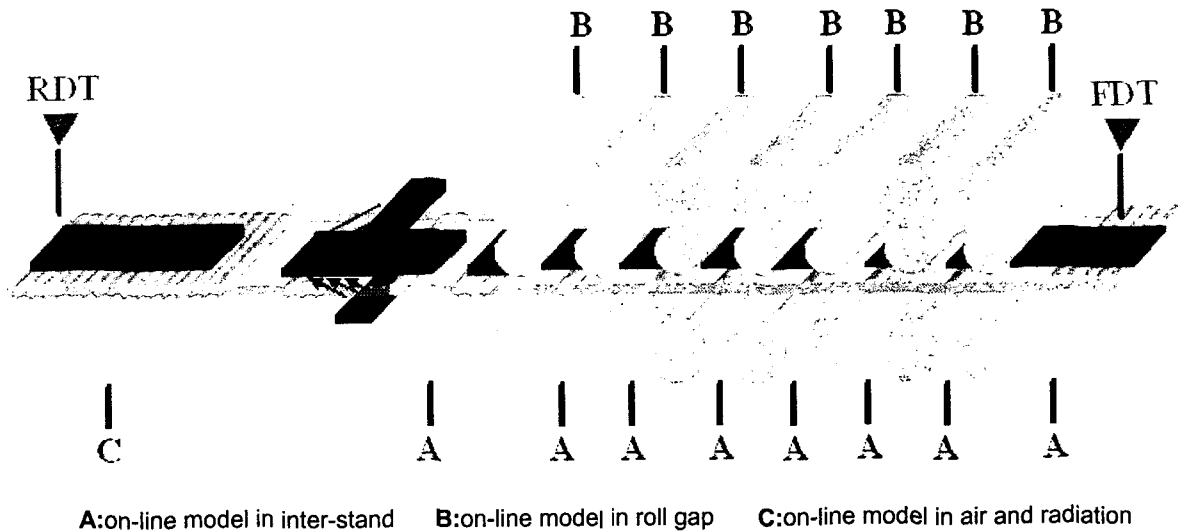


Fig. 12 Application of temperature on-line modes to the factory

## 6. 참고문헌

1. D. M. Parke and J. L. L. Baker: *Iron Steel Eng.*, 1972, Vol. 49, No. 12, pp. 83-88.
2. Y. Sekimoto, K. Tanaka, K. Nakajima, and T. Kawanami: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, 1976, Vol. 16, pp. 551-560.
3. G. D. Lahoti, S. N. Shah, and T. Altan: *ASME J. Eng. Ind.*, 1978, Vol. 100, pp. 159-166.
4. A. Ohnuki and K. Nakajima: *Proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Production Engineering*, Tokyo, 1980, pp. 1041-1046.
5. W. C. Chen, I. V. Samarasekera, and E. B. Hawbolt: *Metallurgical Trans.*, 1993, Vol. 24A, pp. 1307-1320.
6. O. C. Zienkiewicz, E. Onate, and J. C. Heinrich: *Int. J. Num. Meth. Eng.*, 1981, Vol. 11, pp. 1497-1514.
7. J. H. Beynon, P. R. Brown, S. I. Mizban, R. S. Ponter, and C. M. Sellars: *NUMIFORM '86*, Gothenburg, Sweden, 1986, pp. 213-218.
8. K. Yamada, S. Ogawa, and S. Hamazu: *Iron Steel Inst. Jpn. Int.*, 1991, Vol. 311, No. 6, pp. 566-570.
9. C. G. Sun, C. S. Yun, J. S. Chung, and S. M. Hwang: *Met. Mater. Trans.*, 1998, Vol. 29A, pp. 2407-2423.
10. S. M. Hwang, C. G. Sun, S. R. Ryoo, and W. J. Kwak: *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 2002, Vol. 191, pp. 4015-4033.
11. W. J. Kwak, Y. H. Kim, J. H. Lee, S. M. Hwang: *Met. Mater. Trans.*, 2002, Vol. 33A, pp. 3255-3272.
12. S. Shida: *J. Jpn. Soc. Technol. Plasticity*, 1969, Vol. 20, pp. 610.
13. Marko Zlokarnik: *Dimensional analysis and scale-up in chemical engineering*, Springer-Verlag, Berlin, 1991.