

열연 조압연공정에 있어서의 평균온도 예측모델 개발

문창호*, 박해두*
공정제어연구그룹, 포항제철 기술연구소*

Development of Prediction Model for Average Temperature in the Roughing Mill

C. H. Moon* and H. D. Park*
Rolling Technology & Process Control Research Group, POSCO

Abstract

A mathematical model was developed for the prediction of the average temperature and RDT(RM Delivery temperature) in a roughing mill. The model consisted of three parts as follows : (1) The intermediate numerical model calculated the deformation and heat transfer phenomena in the rolling region by steady state FEM and the heat transfer phenomena in the interpass region by unsteady state FEM, (2) The Off-line prediction model was derived from non-linear regression analysis based on the results of intermediate numerical model considering the various rolling conditions, (3) Using the heat flux in rolling region, temperature profile along thickness direction was calculated. For validation of the presented model, the rolling force per pass and RDT measured in on-line process was compared with those of model and the results showed close agreement with the existing data. In order to demonstrate the effectiveness of the proposed model, the various rolling conditions was tested.

Key words : Off-line prediction model, FEM, RM Delivery temperature, Average temperature

1. 서론

가열로내에서 추출된 Slab는 고온에서 O_2 접촉으로 인해 표면이 산화되어 1차 Scale(산화철)이 발생된다. 이것을 그대로 압연하면 표면에 흠집이 생겨 제품품질에 악영향을 끼치게 되므로 이 Scale을 제거하기 위해 열연 조압연공정에서는 수직과 수평압연을 행하면서 전·후면에 설치된 $160kg/cm^2$ 의 고압수로서 표면에 생성된 Scale을 파쇄 제거한다. 이때 수직폭압연기에서는 수평압연에 의해 발생하는 다소의 폭방향 연신을 증감 압연을 행하므로써 목표폭을 얻도록 왕복 또는 편도 폭압연을 행하며, 수평압연기는 다음 압연 공정인 사상압연기에서 소정의 제품 두께를 얻도록 왕복패스 수평압연을 행하여 조압연 Zone를 통과한 Bar 두께가 Max 60mm로 다음 공정으로 보내지도록 한다. 이러한, 열연 조압연공정은 일반적으로 재결정 온도이상의 영역에서 압연이 행해지는 영역으로서, 강종의 화학성분에 따른 재결정-미재결정온도영역에 따라 압연온도가 결정된다. 사상압연영역은 비교적 저온영역으로서 조압연단계에서 형성된 오스테나이트에 변형을 부가하여 미세한 페라이트의 핵생성 장소를 부여하는 공정이라 볼 수 있다. 따라서, 페라이트 핵생성 장소로서 오스테나이트의 크기가 중요한 변수로 작용하므로, 조압연영역에서 가열로를 빠져나온 소재의 오스테나이트 결정립을 미세화하고, 균일화하는 것은 최종제품의 기계적 특성향상에 기여할 수 있다. 이를 위해 압연하중 및 압연온도에 대한 고정도예측은 필수적인 요소이다. 그러나, 기존 현장모델의 경우 작업자의 수동개입과 공정조건에 따른 일정온도패턴을 사용함으로써 소재온도 및 압연하중의 예측정도가 낮으며, 이로 인해 조압연 및 사상압연의 재질변화에 미치는 영향을 규명하기가 어려운 실정이다.

따라서, 본 연구를 통해 조압연 수식모델을 보완함으로써 다양한 조압연조건변화에 따른 패스별 압연하중, 평균온도 및 RDT의 예측정도를 향상시키고자 하였다. 이를 위해 유한요소법에 기초한 intermediate model을 이용하여, 다양한 압연조건변화에 따른 off-line 평균온도 예측모델 및 RDT모델을 개발하였다. 또한, 현장 실적하중 및 실적 RDT와 비교를 통해 모델의 타당성을 검증하였다. 개발된 조압연 모델을 이용하여 다양한 압연조건변화(descaling pattern, 판대기시간, 이송 속도, edging량 및 입.출측두께 등)에 따른 RDT변화 및 압연하중변화를 살펴보았다.

2. 수식모델

2.1 Intermediate 수치 모델

2.1.1 수치모델에 사용된 가정 및 계산방법

Fig. 1에서 보는 바와 같이 가열로 추출후 소재의 열전달영역은 비압연구간 영역(주변대기와의 복사 및 대류열전달, 체류수 및 descale고압수에 의한 대류냉각 및 소재내부의 전도열전달 등)과 압연영역(물과의 접촉 및 마찰에 의한 열전달, 변형에 의한 발열 등)으로 나눌수 있다.

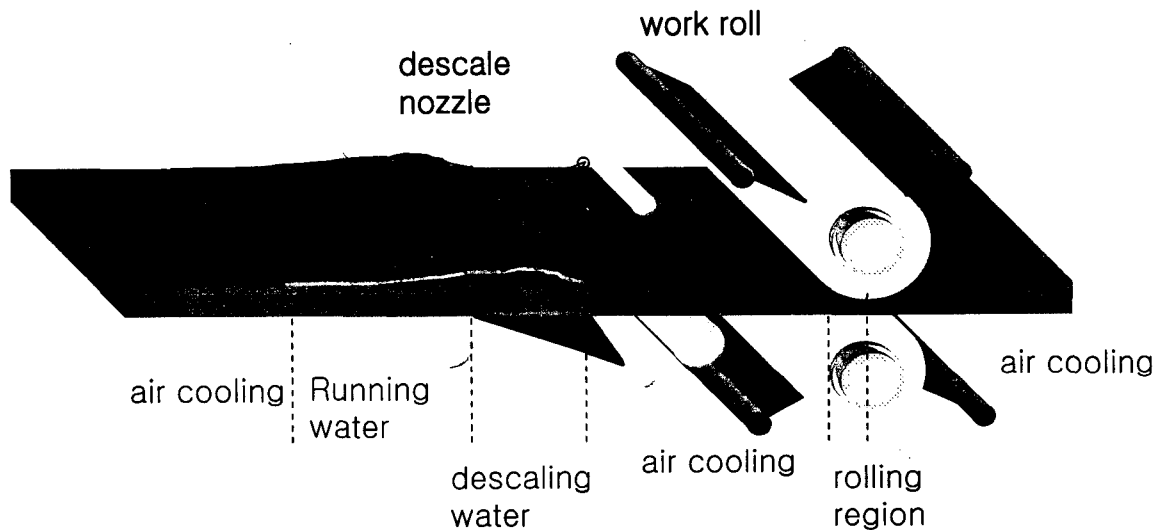


Fig. 1 Thermal boundary conditions in a roughing mill

소재의 온도분포계산을 위해 아래와 같은 가정을 사용하였다.

- (1) 가열로를 빠져 나온 소재의 두께방향온도는 두께방향으로 동일하며, 가열로 추출온도모델에 근거하여 적용되었다.
- (2) slab 및 판의 폭방향 온도는 모두 동일하며, 전체판에 대해 길이방향, 폭방향 중심에서의 두께방향온도분포의 평균을 판을 대표하는 평균온도로 가정한다.
- (3) 소재는 온도에 따라 변하는 열물성치(열전도도, 비열)를 가진다.
- (4) 수직압연에 의한 형상변화는 평균두께변화 및 잔류변형률에만 영향을 미친다.
- (5) 전판이 작업물을 빠져나온 후 정지하는데 걸리는 시간은 2초로 가정한다.

위와 같은 가정에 근거하여, 비압연영역의 경우 시간에 따른 두께방향온도 분포를 계산을 위해 1차원 열전달 방정식을 비정상상태 유한요소법에 적용하였다. 또한, 압연영역에 있어서는 판과 물 간의 열전달 및 변형에 의한 열전달현상을 모사하기 위하여 2차원 열전달 방정식 및 운동량방정식을 정상상태 유한요소법(1)에 적용하였다. 이때 비압연구간의 두께방향 온도분포는 압연영역의 입측온도분포로 가정하고, 실적 압연하중과의 비교를 통해 수냉구간의 열전달 계수를 수정한 후,

실측압연하중과 해석압연하중의 차이가 일정범위내로 수렴하면, 압연출측에서의 온도분포를 비압연영역의 입측온도분포로 가정하여 비압연영역 온도계산을 반복하였다.

2.1.2. 수치모델의 검증

조압연공정 패스별 압연하중측정치에 근거하여 수치모델의 검증을 실시하였으며, 실적압연하중대비 50%의 현장모델에 비해 현저히 낮은 10%정도의 예측정도향상을 볼 수 있다. (Fig. 2)

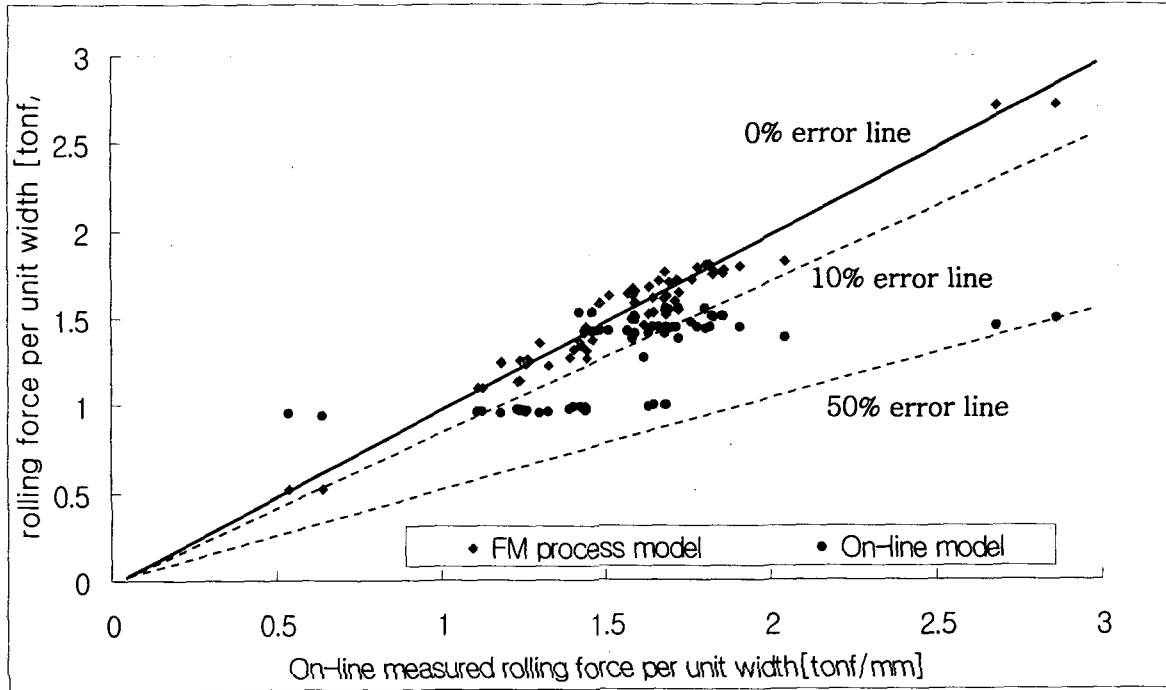


Fig. 2 Comparison between the rolling force of the on-line measurement and those predicted from on-line model and FE process simulation

2.2 판 평균온도 예측모델

판평균온도의 예측을 위해 비압연영역 공냉온도모델, 체류수온도모델, 이송구간모델, descale 고압수영역모델 등을 개발하였으며, 압연영역에 있어서는 물과의 접촉열전달모델, 마찰발열모델, 소성발열모델을 개발하여, 압연영역내의 에너지보존에 근거하여 출측평균온도를 계산하였다.

2.2.1 비압연영역 평균온도모델

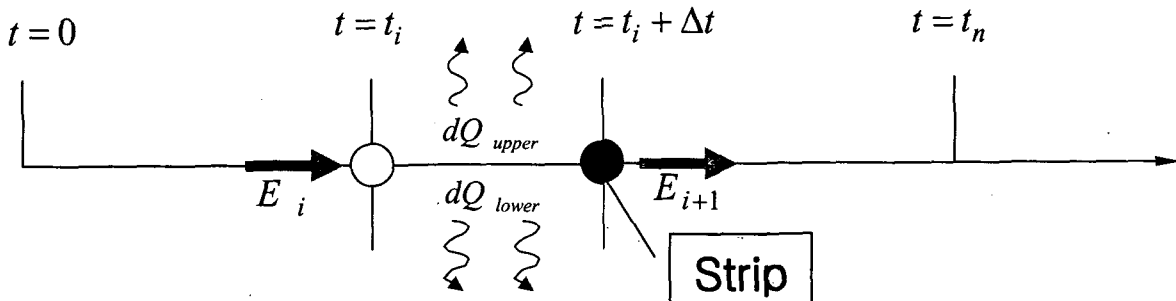


Fig. 3 Average temperature calculation along time increment in interpass region

Fig. 3에서 보는 바와 같이 비압연영역의 평균온도는 시간이 지남에 따라 소재표면에서의 복사 및 대류열전달에 의하여 감소한다. 이때 미소시간증분 Δt 동안 energy balance 조건이 만족되어야 하므로

$$dE = -\rho C_p \cdot Vol \cdot \frac{dT}{dt} \quad \text{where } Vol = Area \times H$$

$$dQ = Area \left[\sigma (\varepsilon_{\text{상부}} + \varepsilon_{\text{하부}}) \left\{ (T + 273)^4 - (T_e + 273)^4 \right\} + (h_{\text{상부}} + h_{\text{하부}}) (T - T_e) \right]$$

$$dE = dQ \quad \text{from Energy balance during time interval,}$$

$$\text{- 공냉구간} \quad T_{i+1} = T_i - \frac{2\Delta t \sigma \varepsilon}{\rho C_p H} \left\{ (T_i + 273)^4 - (T_e + 273)^4 \right\}$$

$$\text{- 이송구간} \quad T_{i+1} = T_i - \frac{2\Delta t \sigma \varepsilon}{\rho C_p H} \left\{ (T_i + 273)^4 - (T_e + 273)^4 \right\}$$

$$\text{- descale 고압수구간} \quad T_{i+1} = T_i - \frac{2h\Delta t}{\rho C_p H} (T_i - T_e)$$

$$\text{- 체류수 구간} \quad T_{i+1} = T_i - \frac{\sigma \varepsilon_{\text{하부}} \Delta t}{\rho C_p H} \left\{ (T_i + 273)^4 - (T_e + 273)^4 \right\} - \frac{(h_{\text{상부}} + h_{\text{하부}}) \Delta t}{\rho C_p H} (T_i - T_e)$$

$$\text{- 대기시간 구간} \quad T_{i+1} = T_i - \frac{2\Delta t \sigma \varepsilon}{\rho C_p H} \left\{ (T_i + 273)^4 - (T_e + 273)^4 \right\}$$

여기서 i 는 current state ($i = 1, \dots, n-1$)를 나타내며, $\Delta t (= t/n)$ 는 미소시간증분이다.

위의 식들은 표면에서의 열전달을 계산하기 위해 평균온도를 사용함으로써 표면에서의 heat flux편차가 발생하므로, 최종적인 평균온도 T_n^f 예측을 위해 시간증분에 의해 계산된 평균온도 T_n 를 보정하는 절차가 필요하다. 이를 위해 Table 1에서와 같은 조압연공정범위내의 변수변화에 따른 test를 실시하여 보정함수 $g_{non}(\varepsilon, H, T_o, t)$ 를 도출하였다.

Table 1. Process parameter conditions for predicting average temperature in non-rolling region.

| Process parameters | Ranges | Process parameters | Ranges |
|--------------------------|---------|--|----------|
| emissivity ε | 0.7~0.8 | Convection coefficient of spray water [$10^{-2}W/mm^2K$] | 0.8~2.6 |
| thickness H [mm] | 60~220 | | |
| Strip speed V [mpm] | 0~120 | Emvient temperature T_e [$^{\circ}C$] | 25 |
| Translation time [sec] | 0.1~15 | Initial temperature T_o [$^{\circ}C$] | 800~1200 |

2.2.2 압연영역 평균온도모델

압연영역의 평균온도는 Hwang(2~3)등에 의해 제시된 압연영역 검사체적에 대해 steady state energy rate balance equation을 적용함으로써 구할 수 있다. 압연영역내의 energy rate balance는

$$P_{in} + P_g - P_{out} = 0$$

여기서 $P_{in} (= P_1 + 2Q_f)$ 은 검사체적을 통해 들어오는 에너지율이며, $P_{out} (= P_2 + 2Q_r)$ 은

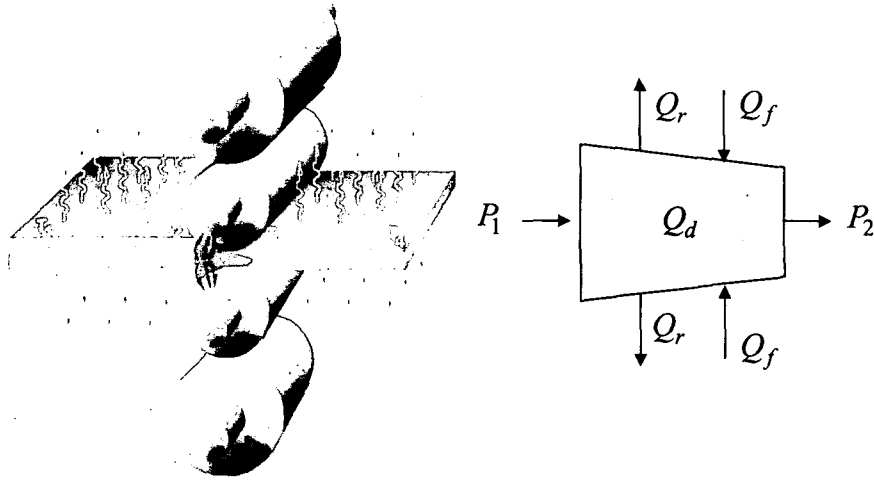


Fig. 4 Control volume and Energy transfer rate per each surface in rolling region

나가는 에너지율이며, $P_g (= Q_d)$ 는 내부에서 생성된 에너지율을 나타낸다.

Fig. 4는 검사체적을 단순화하여 나타낸 것으로, 각 요소에 대한 에너지율은

- 입측을 통해 들어오는 에너지율 : $P_1 = \int_{\Gamma} \rho c T_2 V_2 d\Gamma_1 = \rho c T_2 V_2 H$

- 출측을 통해 나가는 에너지율 : $P_2 = \int_{\Gamma} \rho c T_3 V_3 d\Gamma_2 = \rho c T_3 V_3 h$

- 변형 에너지율 : $Q_d = \int_{\Omega} \sigma \dot{\epsilon} d\Omega$

- 마찰에 의한 에너지율 : $Q_f = \int_{\Gamma} \frac{1}{2} |(u_t - \bar{u}_t)| \sigma_t d\Gamma_r$

- 롤과의 접촉열전달에 의한 에너지율 : $Q_r = \int_{\Gamma} h_{lub} (T_s - T_r) d\Gamma_r$

각각의 에너지율을 결정하기 위하여 Table 2와 같은 조압연공정 영향인자의 다양한 변화에 대해 수치해석을 실시하였다.

Table 2. Process parameter conditions for predicting average temperature in rolling region.

| Process parameter | Variable ranges |
|---|------------------------------------|
| Roll material | R1(Adamite), R2(Hi-Cr주강) |
| Steel | Nb added steel |
| Diameter of W/R [D] | 1260~1350mm |
| Rolling speed [V] | 60 ~ 140 mpm |
| Entry temperature [T] | 700 ~ 1150°C |
| Contact heat transfer coefficient [h_{lub}] | 0.04 ~ 0.16 W/mm ² K |
| Reduction ratio [r] | 2~30% |
| Shape factor [$s(=l_d/h_m)$] | 0.3~2.2 (Entry thickness 48~232mm) |
| Friction coefficient [μ] | 0.2~0.3 |
| Residual strain [ϵ_r] | 0~0.35 |

영향인자들에 대한 검증을 통해 얻어진 압연출측에서의 평균온도는 아래와 같다.

$$T_3 = T_2 + \frac{f_1(1+f_2)}{1+2f_2} \frac{f_4 F'}{\rho c l_d} \ln\left(\frac{H}{h}\right) - \frac{2f_3 h_{\text{lub}} T_2 l_d}{\rho c h V (1+f_5)}, \text{ where } F' = 1.15R\bar{\sigma}_m \sin(\theta)$$

$$f_1 = \frac{4Q_f + Q_d}{P'} = p(s, r, \mu, \varepsilon_r), \text{ where } P' = V_3 h \frac{F}{l_d} \ln\left(\frac{H}{h}\right)$$

$$f_2 = \frac{2Q_f}{Q_d} = |q(s, r, \mu, \varepsilon_r)|$$

$$f_3 = \frac{Q_r}{Q_r'} = z(s, r, \mu, \varepsilon_r), \text{ where } Q_r' = h_{\text{lub}} T_{in} l_d, z_{R2} = z_{R1} - 0.021$$

$$f_4 = \frac{F}{F'} = g(s, r, \mu, \varepsilon_r)$$

$$f_5 = \frac{V_3 - V}{V} = h(s, r, \mu, \varepsilon_r)$$

2.3 RDT 예측모델

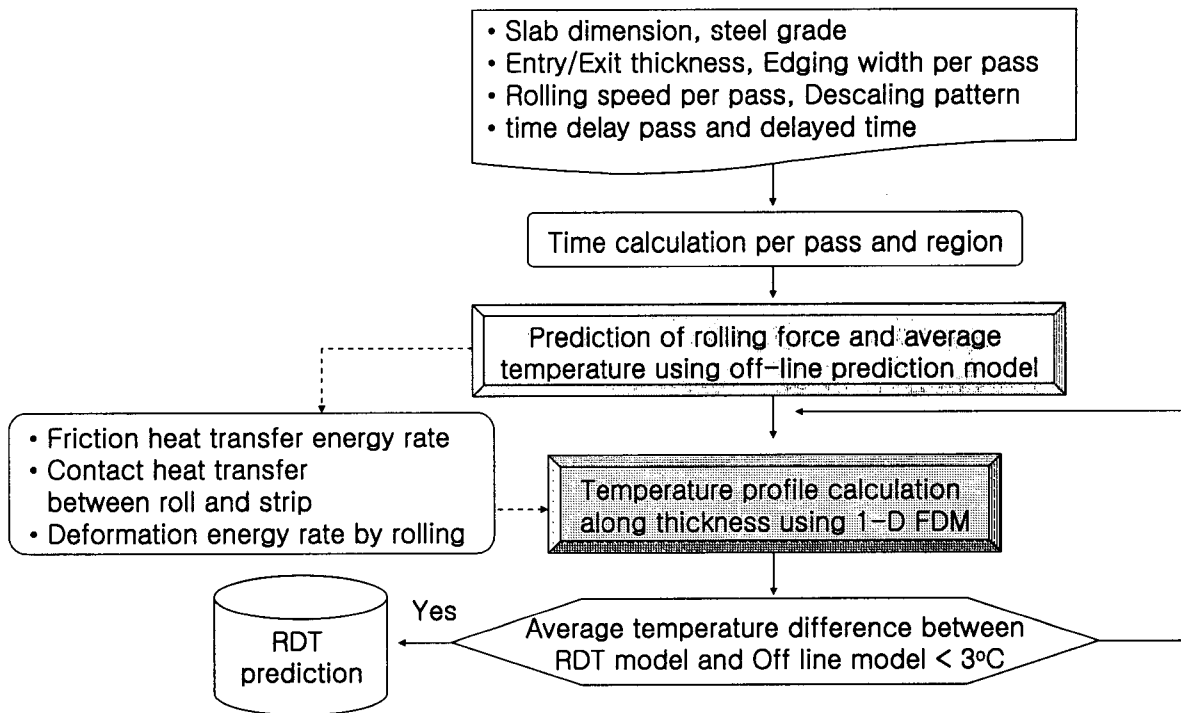


Fig. 5 Computational procedure for the RD Delivery temperature prediction

공정이 진행됨에 따른 두께방향 온도분포를 계산하기 위하여 비정상 1차원 유한차분법을 열전달방정식에 적용하였다.(Fig. 5) 압연구간 검사체적내에서의 시간 증분에 따른 전열현상 모사를 위해 평균온도모델에서 계산된 총마찰발열($Q_f = f_2 Q_d / 2$), 롤과의 접촉열($Q_r = f_3 Q$), 소성발열($Q_d = f_1 P' / (1 + f_2)$)을 시간평균하였다.

3. 적용 및 결과

Fig. 6은 가열로 위치, 강종조성, descale패턴, 대기시간, 압연속도, 폭압연 패스, 이송속도 등의 조업변수가 상이한 조건에 대한 압연하중실측치와 intermediate FEM 수치모델, 현장모델 및 off-line 모델의 하중예측치를 비교한 것으로, off-line model은 수치모델과 동일한 예측정도를 가짐을 알 수 있다.

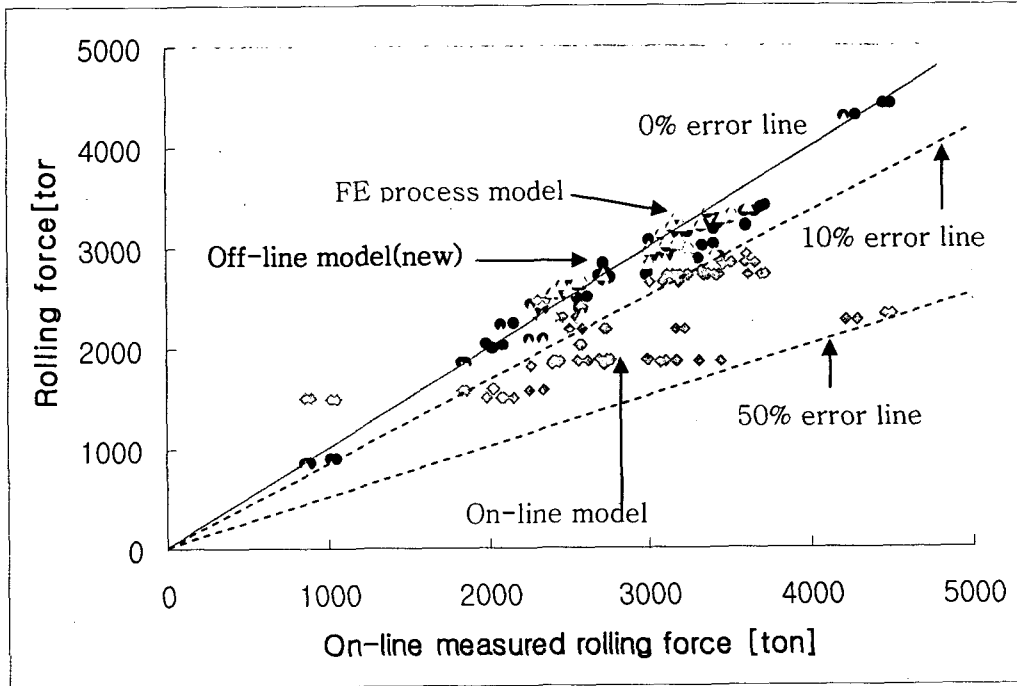


Fig. 6 Comparison between the rolling forces of the on-line measurement and those predicted from On-line model, FE process model and Off-line model developed from this study

Fig. 7은 두께 230mm, 폭 1650mm slab의 조압연패스별 압연하중 및 온도변화(상하부 및 중심, 평균온도 등)을 나타낸 것으로, 현장압연하중모델의 최대 680ton오차에 비해 실적하중과 최대 160ton 이하의 하중오차를 가진다.

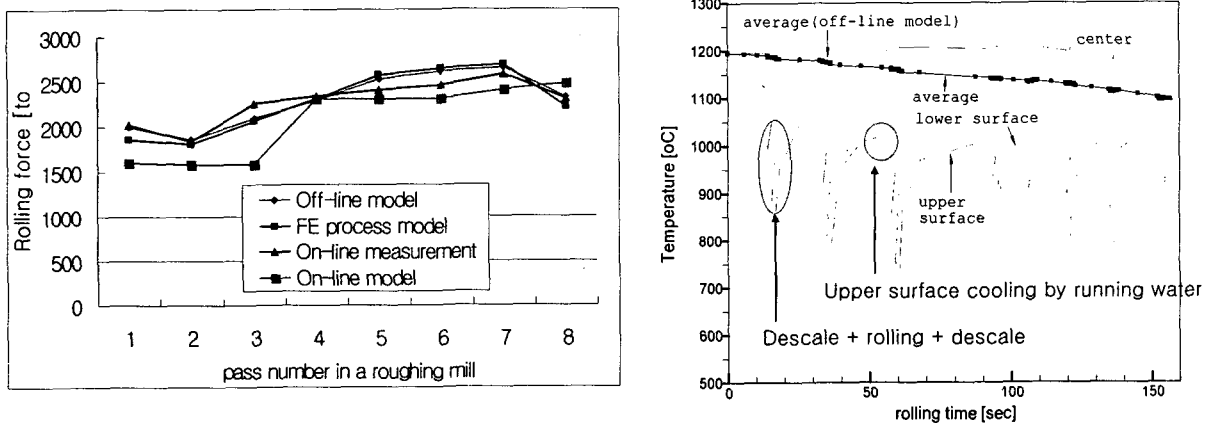


Fig. 7 Temperature profiles along thickness direction and Comparison between the rolling force per pass of the on-line measurement and those predicted from On-line model, FE process model and Off-line model (slab width = 1650mm, total pass number = 8)

또한, 가열로를 빠져나온 소재의 표면은 고압수 및 물과의 열전달에 의해 크게 냉각되고, 이후 소재중심으로부터의 진도에 의해 급속한 복열이 일어나며, 상부표면의 경우 체류수에 의한 냉각으로 인하여 하부온도보다 3.5°C정도 더 낮음을 볼 수 있었다.

Fig. 8은 두께 230mm, 폭 1940mm slab의 조압연패스별 압연하중 및 온도변화(상하부 및 중심, 평균온도 등)을 나타낸 것이다. 현장온도모델의 경우 압연하중계산에 사용된 압연온도의 부정확으로 인해 실측치와 최대 1210ton의 오차를 가지나, 평균온도 예측모델을 이용한 off-line 모델은 최대 175ton 이하의 하중차의 예측정도향상을 볼 수 있다.

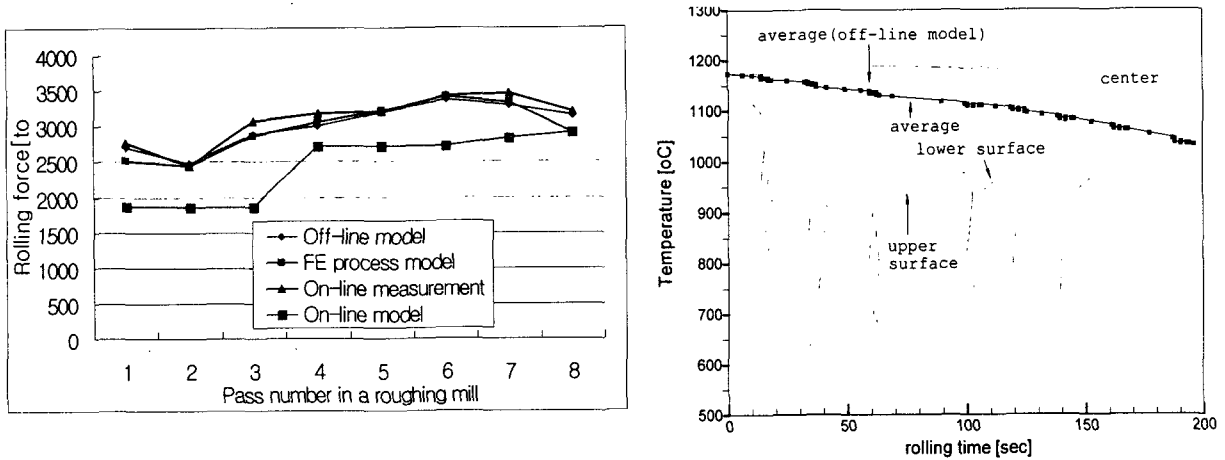


Fig. 8 Temperature profiles along thickness direction and Comparison between the rolling force per pass of the on-line measurement and those predicted from On-line model, FE process model and Off-line model (slab width = 1940mm, total pass number = 8)

Fig. 9는 두께 230mm, 폭 1940mm slab의 조압연패스별 압연하중 및 온도변화(상하부 및 중심, 평균온도 등)을 나타낸 것으로, 현장압연하중모델의 최대 2160ton오차에 비해 실적하중과 최대 320ton 이하의 하중오차를 가지며, RDT실측치와 1.24°C편차를 가짐을 알 수 있었다. 현장하중모델의 경우 5패스이전의 하중오차는 압연온도모델의 부정확에 기인하나, 그 이후패스의 하중오차는 미재결정영역에 의한 잔류변형을 미고려 및 압연온도부정확에 기인하는 것으로 판단된다.

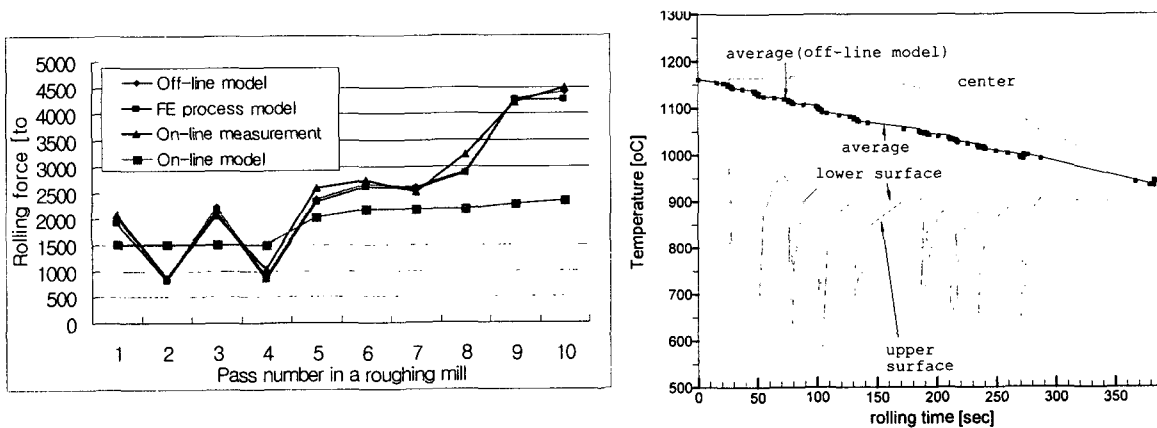


Fig. 9 Temperature profiles along thickness direction and Comparison between the rolling force per pass of the on-line measurement and those predicted from On-line model, FE process model and Off-line model (slab width = 1940mm, total pass number = 10)

Fig. 10은 실적RDT와 예측RDT를 비교한 것으로 test된 소재에 대해 RDT편차가 대부분10°C이며, 오차가 그 이상인 것은 유사조업조건 동일강종의 경우의 RDT비교로부터 가열로추출온도모델의 부정확에 기인한 것으로 판단된다.

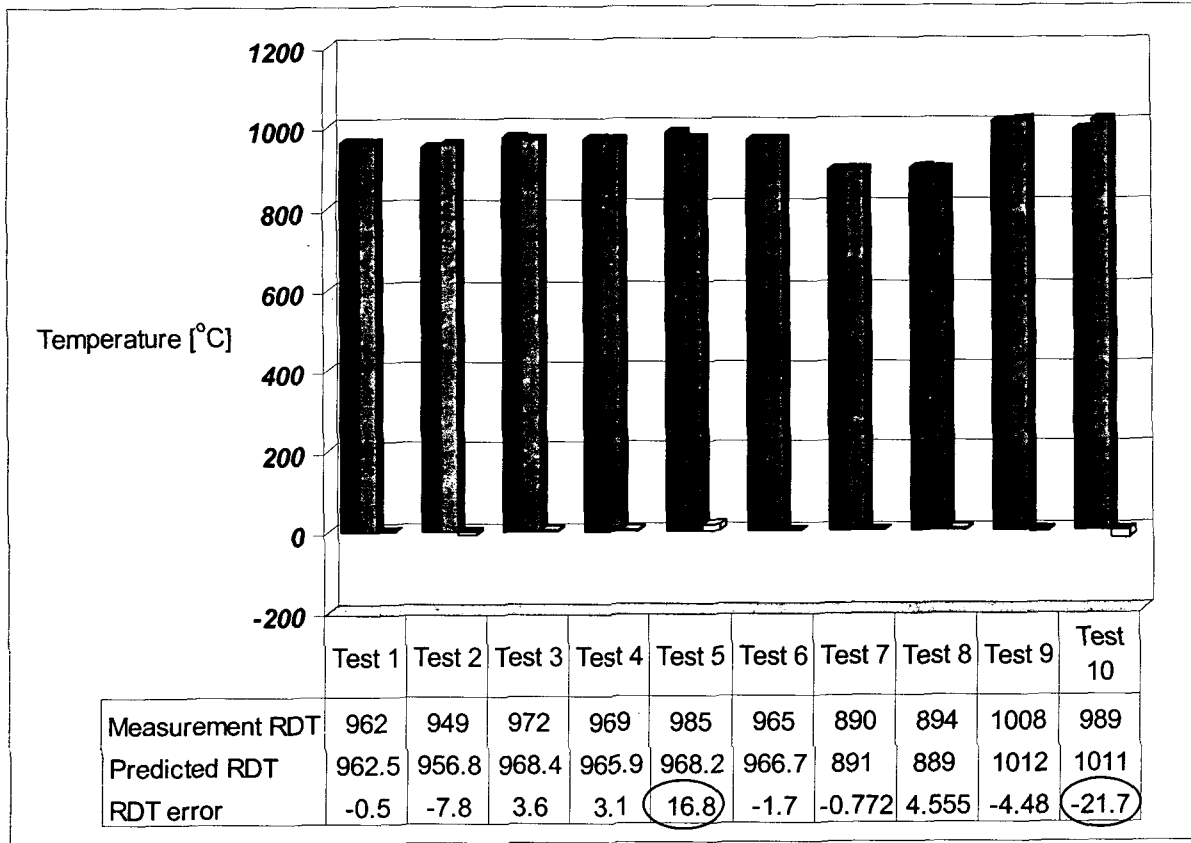


Fig. 10 Comparison between measurement and predicted values for RM Delivery Temperature

4. 결론

개발된 Off-line 압연하중 및 평균온도 예측모델을 이용하여 조압연공정의 압연조건을 test한 결과, 실적하중대비 최대 2100ton의 현장하중모델오차는 500ton이내로 감소됨을 알 수 있었다. 또한, 조압연영역을 공냉구간, 체류수구간, descale구간, 이송구간, 압연구간 등으로 구분하여 각각의 구간에 따른 평균온도모델식을 개발하고, 계산된 패스별 압연구간에서의 열전달량을 유한차분법에 적용하여 RDT를 예측함으로써, 측정RDT와의 온도편차가 10°C이내로 감소함을 알 수 있었다.

본 연구를 통해 개발된 조압연 수식모델은 다양한 압연조건변화(slab조건, 강종변화, descale패턴, 압연중 폭변화, RDT확보를 위한 대기시간, 압연속도 및 압하량 등)를 반영함으로써, 목표RDT확보를 위한 압연조건 설정에 기여하였다. 또한, 모델의 정도향상을 위해 가열로추출온도모델의 개선이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. S.M.Hwang, M.S.Joun and J.S.Park, Proc.18th NAMRC, pp.13(1990)

2. W.J. Kwak, Y.H.Kim, H.D.Park, J.H.Lee and S.M.Hwang, ISIJ International, vol. 40, pp.1013-1018(2000)
3. 고규현, 포항공대 기계공학과 석사학위논문(2002)