

## 열간 압연 시 워크 롤의 열 변형 정밀 예측을 위한 유한요소법 기반의 온라인 모델 개발

최지원\*, 황한동\*\*, 이중형\*\*\*, 황상무\*\*\*  
기계공학과 대학원, 포항공과대학교\*  
철강대학원, 포항공과대학교\*\*  
기계공학과, 포항공과대학교\*\*\*

The development of FE-based on-line model  
for the precise prediction of work roll thermal profile  
in hot strip rolling.

J. W. Choi\*, H. D. Huang\*\*, J. H. Lee\*\*\*, S. M. Hwang\*\*\*  
Graduate School of Mechanical Engineering Department, POSTECH\*  
Graduate School of Iron & Steel Technology, POSTECH\*\*  
Mechanical Engineering Department, POSTECH\*\*\*

### Abstract

An, FE-based, on-line model is presented for the rapid and precise prediction of roll thermal profile in hot strip rolling. The validity of the model is demonstrated through comparison with FE-based off-line model which was verified by measurements. Also demonstrated is its capability of reflecting the effect of diverse process variables.

**Key words** : finite element method, on-line model, roll thermal profile.

### 1. 서론

롤의 열 변형에 의해 발생하는 롤 치수 변화는 제품의 품질을 결정하는 중요한 척도인 판의 프로파일과 평탄 도에 결정적인 영향을 끼친다. 따라서 롤의 열 변형 프로파일(thermal profile)을 예측하기 위한 많은 수학적 모델(1-9)들이 제시 되었으나, 압연 공정 중 롤은 고온의 판에 의한 가열과 냉각수에 의한 냉각이 반복되는 등의 복잡한 환경을 가지기 때문에 많은 가정들이 포함될 수밖에 없었고, 정밀한 롤의 thermal profile을 예측하는 데에는 한계가 있었다.

최근에 SUN et al.(10)에 의해 수치해석 기법인 유한요소법을 이용하여 롤의 thermal profile을 정밀하게 예측하는 연구가 행해졌다. 하지만 수치해석 기법의 특성상 현재의 컴퓨터 연산속도로는 해석에 많은 시간이 걸리며, 이는 모델을 실제 현장에 적용할 때 문제점으로 작용하게 되었다.

본 논문은 현장 적용 시 문제가 되는 계산 시간을 단축 시켜주는 온라인 모델을 제안 하였고, 여러 가지 공정조건에 따른 모델의 검증이 제시 되었다.

## 2. Roll temperature profile.

### 2.1 경계조건

압연 시 롤 내부의 온도는 롤 표면을 제외하면 축 대칭의 온도 프로파일을 갖는 것을 SUN et al.(10)이 유한요소법을 이용하여 발견하였다. 그리고 축 대칭 유한요소 모델을 이용하여 얻은 온도 프로파일이 롤의 표면을 제외하고는 3차원 유한요소 모델을 이용한 것과 거의 차이가 없음을 검증하였다.

축 대칭 유한요소 모델의 경계조건은 다음과 같이 주어진다.  
압연이 되는 시점에서 순 열 유속(net heat flux)  $q_{in}$  은 다음과 같다.

$$q_{in} = - \int_{\Gamma_c} h_{lub}(T_R - T_S)d\Gamma + \int_{\Gamma_c} q_f d\Gamma - \int_{\Gamma_{-c}} h_w(T_R - T_W)d\Gamma \quad (2.1)$$

여기에서  $\Gamma_c$  와  $\Gamma_{-c}$  는 각각 롤과 판의 접촉면과 접촉면을 제외한 나머지 부분,  $T_R$  은 롤 표면온도,  $T_S$  는 판의 표면 온도,  $T_W$  는 냉각수의 온도,  $q_f$  는 판과 롤의 마찰에 의한 열 유속(heat flux)을 나타낸다.

Lee et al.(11)은 압연 공정 조건들의 무차원화와 에너지 보존 법칙을 통해 압연 시 판으로부터 롤로 전달되는 열손실(heat loss)과 마찰 에너지(frictional energy)를 구하는 수식 모델을 개발하였다(Fig. 1).

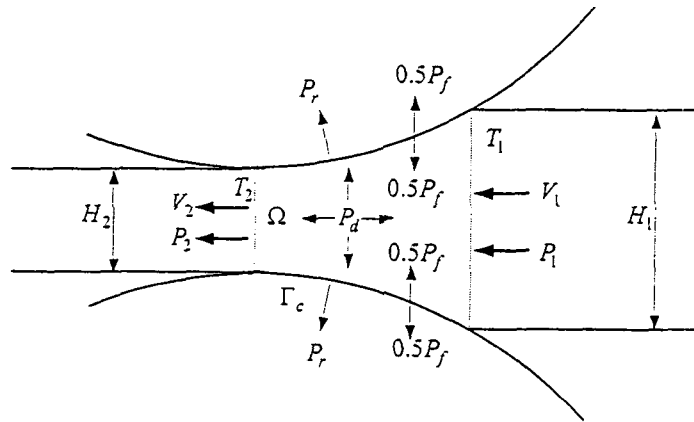


Fig. 1. Energy balance in the bite zone.

여기에서  $P_d, P_f, P_r$  은 각각

$$P_d = \int_{\Omega} \sigma \dot{\epsilon} d\Omega \quad (2.2)$$

$$P_f = \int_{\Gamma_c} \mu \sigma_n |V_s - V_R| d\Gamma \quad (2.3)$$

$$P_r = \int_{\Gamma_c} h_{lub}(T_S - T_R) d\Gamma \quad (2.4)$$

로 표현되며 각각, 변형 에너지(deformation energy), 마찰 에너지(frictional energy), 판으로부터 롤로 전달되는 열손실(heat loss)을 나타낸다.

$P_f, P_r$  을 이용하여 (2.1)식을 다시 표현하면 다음과 같다.

$$q_{in} = P_r + \frac{1}{2} P_f - \int_{\Gamma_{-c}} h_w(T_R - T_W) d\Gamma \quad (2.5)$$

중간 값(mean value)을 써서 근사 화 하면

$$q_{in} \approx P_r + \frac{1}{2}P_f - R(2\pi - \theta_c)\bar{h}_w(\bar{T}_R^{-c} - T_w) \quad (2.6)$$

여기에서  $\theta_c$  는 물과 판의 접촉각도(contact angle),  $\bar{T}_R^c$  와  $\bar{T}_S$  는  $\Gamma_c$  에서 물과 판의 평균 표면 온도,  $\bar{h}_w$  와  $\bar{T}_R^{-c}$  는  $\Gamma_c$  에서의 평균 열전달 계수와 물의 평균 표면 온도를 나타낸다.

한편, 축대칭의 물 온도 프로파일의 가정하였으므로, 순 열 유속(net heat flux)은 다음과 같은 형태가 된다.

$$q_{eq} = -2\pi R h_{eq} (T - T_{eq}) \quad (2.7)$$

$q_{in} = q_{eq}$  의 관계로부터 파라미터  $T_{eq}$  와  $h_{eq}$  를 얻을 수 있다.

압연 시,

$$h_{eq} = \frac{R(2\pi - \theta_c)\bar{h}_w}{2\pi R} \quad (2.8)$$

$$T_{eq} = T_w + \frac{2P_r + P_f}{2\bar{h}_w R(2\pi - \theta_c)} \quad (2.9)$$

냉각 시,

$$h_{eq} = \bar{h}_w \quad (2.10)$$

$$T_{eq} = T_w \quad (2.11)$$

이 파라미터들을 이용하여 경계조건을 축대칭 유한요소 모델에 적용한 결과를 Fig. 2 에 나타내었다. 물이 축대칭이면서 좌우대칭이므로 물 단면의 1/4만 해석하였다.

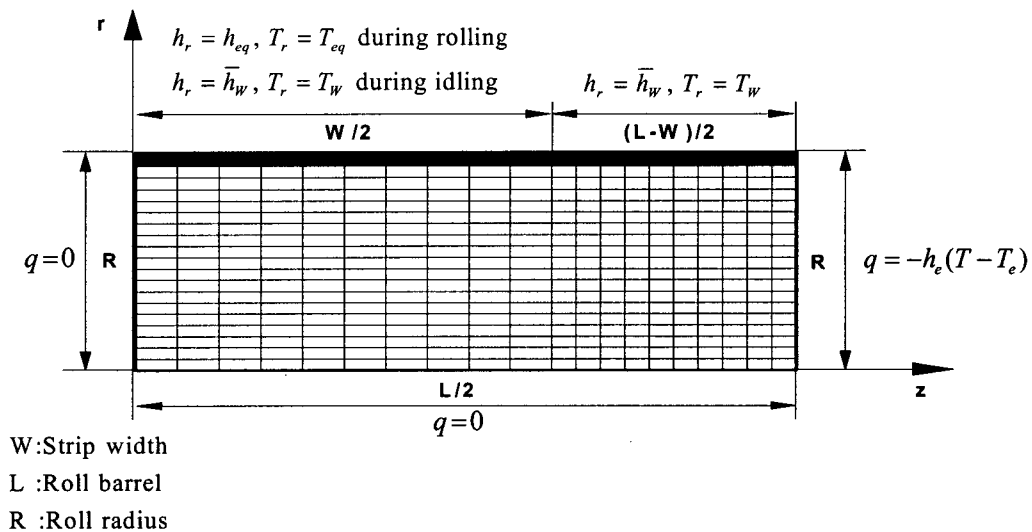


Fig. 2. Thermal boundary conditions and the finite element mesh(axi-symmetric).

## 2.2 결과 비교

시뮬레이션에 사용된 Process condition들을 Table. 1 나타내었다.

Table. 1. Variation of process conditions in consecutive rolling.

Case no.	Ntotal	strip No.	R (mm)	L (mm)	H <sub>0</sub> (mm)	r (%)	C in %	V <sub>R</sub> (mpm)	T <sub>0</sub> (°C)	W (mm)	t <sub>r</sub> (sec)	t <sub>i</sub> (sec)
1 (F <sub>1</sub> )	50	1-50	324.56	1460	30.0	43.9	0.04	90	982	921	63.0	51.0
2 (F <sub>4</sub> )	76	1-18	303.43	1460	11.68	20.4	0.125	201	905	1213	58.0	81.0
		19-32	303.43	1460	10.77	22.0	0.143	198	917	1130	62.0	86.0
		33-41	303.43	1460	9.22	24.5	0.146	218	918	1062	67.0	83.0
		42-50	303.43	1460	5.62	31.5	0.079	330	907	933	60.0	88.0
		51-76	303.43	1460	16.53	12.7	0.185	133	906	847	73.0	73.0
3 (F <sub>5</sub> )	50	1-50	317.85	1460	5.04	25.4	0.04	421	924	921	63.0	51.0
4 (F <sub>7</sub> )	71	1-42	320.97	1460	2.82	17.7	0.036	655	905	916	63.0	75.0
		43-71	320.97	1460	2.81	16.8	0.039	649	913	833	60.0	81.0

- \*\*\* 1. Ntotal : No. of strips rolled, C : carbon content of the strip material.  
 2. t<sub>r</sub> : rolling time, t<sub>i</sub> : idling time.  
 3. F<sub>1</sub> stand : Hi-Cr roll, other stands : Ni-Grain roll.  
 4. flow stress of the strip material was determined from Shida's model(13)  
 5. roll initial temperature = 20°C

Off-line model과 On-line model을 이용하여 예측한 온도 프로파일의 결과가 Fig. 3에 나타나 있다.

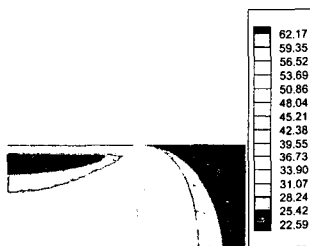


Fig. 3-1(a). Temperature Profile (Case1, Off-line model)

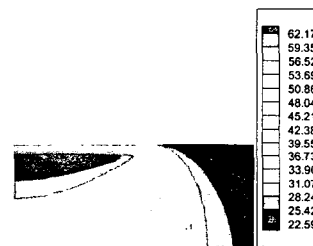


Fig. 3-1(b). Temperature Profile (Case1, On-line model)

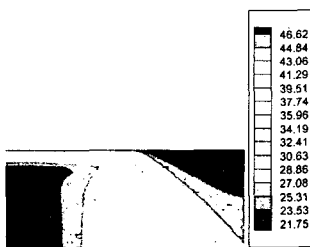


Fig. 3-2(a). Temperature Profile (Case2, Off-line model)

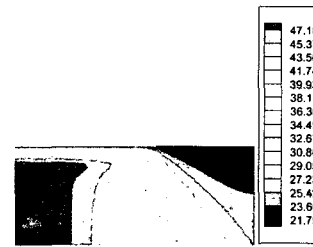


Fig. 3-2(b). Temperature Profile (Case2, On-line model)

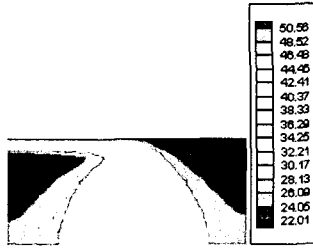


Fig. 3-3(a). Temperature Profile  
(Case3, Off-line model)

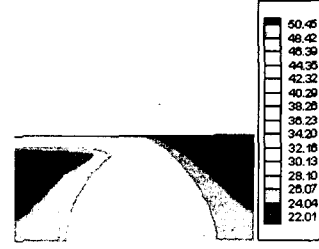


Fig. 3-3(b). Temperature Profile  
(Case3, On-line model)

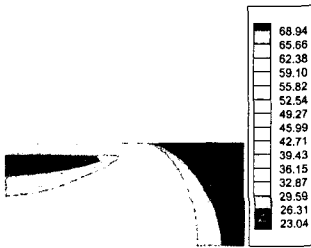


Fig. 3-4(a). Temperature Profile  
(Case4, Off-line model)

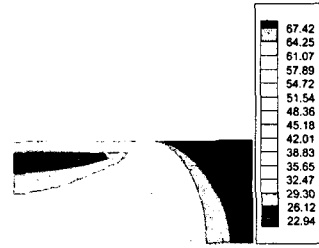


Fig. 3-4(b). Temperature Profile  
(Case4, On-line model)

### 3. Roll thermal profile.

#### 3.1 열 변형 예측 모델

물을 무한한 원통으로 가정하고(infinite cylinder), 축 방향으로 외부에서 가해지는 힘이 없다(zero axial force)고 가정하면, 열 변형 예측 근사 모델은 다음과 같다.(12)

$$u = \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha \left( \frac{1-3\nu}{1+\nu} \frac{r}{R^2} \int_0^R T r dr + \frac{1}{r} \int_0^r T r dr \right) \quad (3.1)$$

여기에서  $u$ 는 물의 반경 방향의 Displacement,  $\nu$ 는 Poisson's ratio,  $R$ 은 물의 반지름,  $T$ 는 온도변화를 나타낸다.

그러므로,  $r=R$  일때 반경방향 Displacement는,

$$u = 2\alpha \frac{1}{R} \int_0^R T r dr \quad (3.2)$$

유한요소법에 의한 해는 요소 내부에서 선형이므로 유한요소 온도분포 해를 이용하여 (3.2)식을 근사적으로 구할 수 있다.

$$u = 2\alpha \frac{1}{R} \sum_i^{element} T_i r_i dr \quad (3.3)$$

### 3.2 결과 비교

열탄성 해석 유한요소법을 이용하였을 때와 Zero axial force model을 이용하여 예측한 롤 열 변형 프로파일의 결과 비교를 Fig. 4에서 보여주고 있다. (Process condition은 Table. 1 참조.)

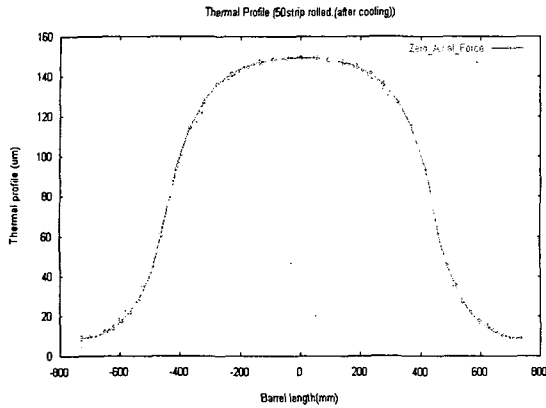


Fig. 4-1. Thermal Profile. (Case1)

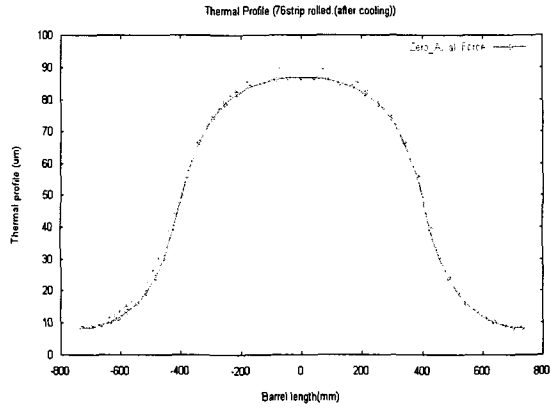


Fig. 4-2. Thermal Profile. (Case2)

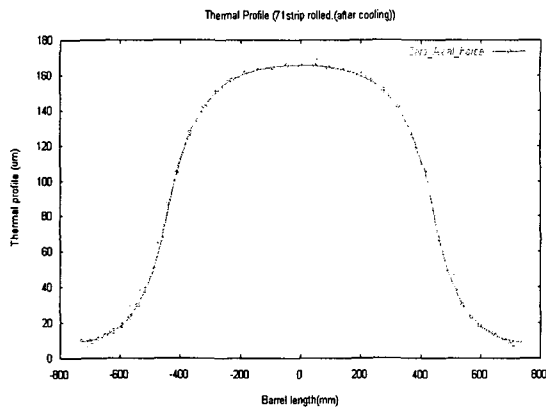


Fig. 4-3. Thermal Profile. (Case3)

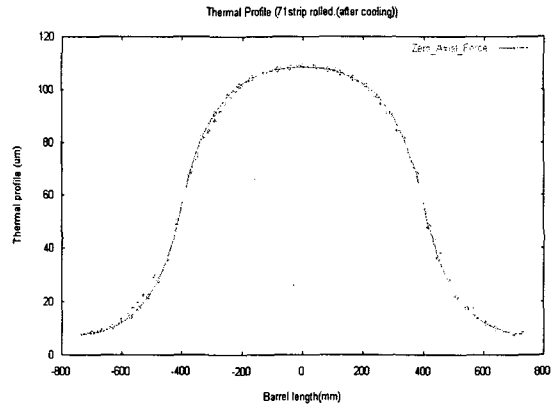


Fig. 4-1. Thermal Profile. (Case4)

## 4. 계산시간

위 결과들은 모두 Pentium 4, 2GHz, 1GB RAM 사양의 컴퓨터에서 시뮬레이션 되었다. 기존의 Off-line model의 경우 판 한 개가 지나갈 때 계산시간은 20분가량이 소요된 반면, On-line model은 5초 이내에 온도 프로파일과 롤 열 변형 프로파일을 예측하였다.

## 5. 결론

기존의 유한요소 시뮬레이션은 비록 정확한 예측이 가능하기는 하지만, 축대칭 온도분포의 경계조건에 필요한 롤과 판의 평균온도, 마찰에너지를 계산하기 위해 부가적인 유한요소 연계해석이 필요하였고, 롤의 열 변형을 예측하는 데에도 유한요소 모델이 사용되었기 때문에, 상당한 해석 시간이 소요되었다.

본 논문에서는 판에서 롤로 전달되는 에너지를 계산하는 수식모델과 열 변형 예측 근사 모델을 이용함으로써 롤의 온도 프로파일과 열 변형 프로파일을 신속하게 예측하는 온라인 모델을 제시하였다.

## 참고문헌

1. W. Y. D. Yuen, Proc. 4th Int. Conf. on Steel Rolling, IRSID, Deauville, France, E23-1(1987).
2. W. L. Roberts, Hot Rolling of Steel, Marcel Dekker, NY, pp. 841(1983).
3. S. Wilmotte and J. Mignon, CRM, no.34, pp. 17(1973).
4. X. Ye and I. V. Samarasekera, Trans. of the ISS, vol. 21, no.7, pp. 49(1994).
5. V. B. Ginzburg, Iron Steel Eng., vol. 74, no. 11, pp. 38(1997).
6. G. T. Pallone, Iron Steel Eng., vol. 60, no. 12, pp. 21(1983).
7. Z. C. Lin and V. H. Lin, J. Mater. Process. Technol., vol. 70, pp. 62(1997).
8. A. A. Tseng, S. X. Tong, M. Raudensky, and T.C. Chen, Steel Res., vol. 67, pp. 188(1996).
9. W. Sauer, Steel Res., vol. 67, pp. 18(1996).
10. C. G. Sun and S. M. Hwang, ISIJ International, vol. 40, no. 8, pp. 794-801(2000).
11. J. H. Lee, J. W. Choi and S. M. Hwang, Trans. of NAMRI/SME, vol.32, pp. 565-572(2004).
12. S. P. Timoshenko and J. N. Goodier, Theory of Elasticity, Third Edition.
13. S. Shida, J. Jpn. Soc. Technol. Plast., vol. 20, pp. 610(1969).