

〈論 文〉

## 열간박판압연공정의 유한요소해석

강윤호\* 황상무\*\*

(1991년 8월 7일 접수)

### Finite Element Analysis of Hot Strip Rolling Process

Y.H.Kang and S.M. Hwang

**Key Words :** Hot Rolling Process(열간압연공정), Finite Element Method(유한요소법), Coupled Analysis(연계해석), Process Parameters(공정조건)

#### Abstract

This paper presents a new approach for the analysis of hot strip rolling processes. The approach is based on the finite element method and capable of predicting velocity field in the strip, temperature field in the strip, temperature field in the roll, and roll pressure. Basic finite element formulations for heat transfer analysis are described with emphasis on the treatment of numerical instability resulting from a standard Galerkin formulation. Comparison with the theoretical solutions found in the literature is made for the evaluation of the accuracy of the temperature solutions. An iterative scheme is developed for dealing with strong correlations between the metal flow characteristics and the thermal behavior of the roll-strip system. A series of process simulations are carried out to investigate the effect of various process parameters including interface friction, interface heat transfer coefficient, roll speed, reduction in thickness, and spray zone. The results are shown and discussed.

#### 기 호 설 명

$c, m$  : 재료상수(material constant),  $\bar{\sigma} = c\bar{\epsilon}^m$   
 $c$  : 비열(specific heat)  
 $h_{lub}$  : 접촉열전달계수(contact heat transfer coefficient)  
 $h_w, h_e$  : 대류열전달계수(convective heat transfer coefficient)  
 $k$  : 열전도 계수(thermal conductivity)  
 $n_i$  : 외향법선벡터(unit outward normal vector)  
 $N_k$  : 근사함수(interpolation function)  
 $T$  : 온도(temperature)  
 $u_i$  : 속도벡터(velocity vector)  
 $z$  : upwinding을 위한 불연속 임의함수

$\epsilon_{ij}$  : 변형률 속도 텐서(strain rate tensor)  
 $\gamma_s, \gamma_t$  : Peclet수(Peclet number)  
 $\rho$  : 밀도(density)  
 $\sigma'_{ij}$  : 편차응력 텐서(deviatoric stress tensor)  
 $\sigma\epsilon$  : Stefan-Bozmann 상수와 emissivity의 곱  
 $\omega$  : 임의함수(test function)

#### 1. 서 론

열간박판압연공정에서 재결정(recrystallization) 온도 이상으로 가열된 박판(strip)은 점점 감소하는 롤간극사이를 여러번 지나며 최종적인 치수와 형상으로 가공된다. 밀(mill)의 설계자들과 운전자들은 열간박판압연공정의 적절한 설계와 제어에 큰 관심을 기울이고 있다. 공정의 설계와 제어에서 얻

\*정회원, 포항공과대학 기계공학과 대학원

\*\*정회원, 포항공과대학 기계공학과

어려야하는 사항들은 고객과 생산자의 요구에 따라서 매우 다양하지만 대부분의 경우 생산원가와 제품의 품질이 가장 중요한 고려대상이다.

박판의 소성유동은 재료의 기계적 성질에 큰 영향을 주는 상변화(phase change)와 조직변화(alterations in grain structures)를 유발할 수 있으므로 금속의 소성유동에 대한 정보가 압연제품의 품질을 최적화하기 위하여 요구된다. 따라서 금속의 유동특성에 대한 다양한 공정변수들의 영향을 예측할 수 있는 방법의 개발은 필수적이다. 최근 압연공정에서의 금속의 상세한 유동특성과 롤압력, 롤토크를 예측하는 데 유한요소 컴퓨터 시뮬레이션 방법이 유용한 것으로 알려졌다. Ziendiewicz<sup>(1)</sup>과 Dawson<sup>(2)</sup>은 압연공정을 점소성(viscoplasticity) 모델로 해석하였다. Shima 등<sup>(3)</sup>은 완전강소성(rigid-perfectly plastic) 모델을 이용하여 압연공정을 해석하였으며 Li와 Kobayashi<sup>(4)</sup>는 다양한 치수와 재료에 대하여 변형경화재료(work hardening material)의 정상상태와 비정상상태에서의 변형을 해석하였다. 또한 Hwang 등<sup>(5)</sup>은 벌칙강소성(penalty rigid-plastic) 유한요소 수식화 기법이 쿠울롱 마찰조건(Coulomb friction model)과 일정전단 마찰조건(constant shear friction model)에 대하여 롤-박판 접촉면에서의 점선응력과 롤압력을 정확하게 예측할 수 있음을 보였다.

박판으로부터 전달되는 열은 롤표면에 매우 큰 온도변화를 일으키지만 롤의 전체적인 온도는 거의 영향을 받지 않는다. 따라서 롤의 얇은 표면층에 열응력이 발생하게 되며 갈라짐(crack)이나 부스럼짐(spalling)과 같은 롤표면 결함들은 지나친 열응력의 발생에 기인하고 있다. 롤표면층의 결함은 롤의 수명을 짧게하고 압연제품의 표면정도를 떨어뜨린다. 따라서 열응력을 일정한 범위내에서 유지하기 위하여 롤표면온도에 영향을 미치는 공정변수들의 적절한 조절이 필요하다. 롤-박판 시스템의 열전달현상은 많은 연구자들의 중요한 연구대상이었다. 접촉원호를 따라서 나타나는 온도분포의 예측<sup>(6,7)</sup>, 작업롤의 온도분포와 열응력의 예측<sup>(8,9)</sup>, 박판의 온도분포에 대한 연구<sup>(10-12)</sup>가 수행되어졌다. 수치적인 방법에 관련된 연구로 Parke와 Baker<sup>(13)</sup>는 비정상상태 롤의 온도분포를 해석하기 위하여 이차원 유한차분법모델을 개발하였으며 wilmotte와 Mignon<sup>(14)</sup>은 축대칭유한차분법 모델을 이용하여 롤의 평균 축온도변화를 조사하였다. Zienki-

ewicz, Onate, Heinrich<sup>(15)</sup>는 박판의 온도분포를 예측하기 위하여 열전달과 소성유동의 연계해석을 하였다. 위의 연구들은 모두 롤이나 박판의 하나만을 연구대상으로 고려하고 있다. Lahoti, Shah, Altan<sup>(16)</sup>은 박판과 접촉하고 있는 롤의 일부분과 박판의 비정상상태 온도분포를 예측하기 위한 유한차분법 모델을 개발하였으며 박판의 변형에 의한 열과 롤-박판 접촉면에서의 마찰열은 Orowan의 압연이론<sup>(17)</sup>으로부터 구하여 온도계산에 반영하였다. Tseng<sup>(18,19)</sup>은 Eulerian 유한차분법모델을 이용하여 박판과 롤의 온도 분포를 해석하였으며 압연공정중의 열발생은 Alexander의 수정된 압연이론<sup>(20)</sup> 또는 밀의 일을 직접측정하여 구한 자료를 이용하였다. 그런데 열간박판압연공정에서 금속의 유동응력은 온도에 큰 영향을 받으므로 박판의 소성유동은 박판의 온도분포에 큰 영향을 받는다. 한편 박판의 온도분포는 소성유동에 의한 소성열, 롤-박판 접촉면에서 발생하는 마찰열, 박판의 속도장, 롤과의 접촉열전달에 의하여 영향을 받으므로 금속의 유동특성과 롤-박판 시스템의 열적특성의 정확한 예측을 위해서는 롤-박판 시스템의 연계해석이 요구된다.

본 논문에서는 열간박판압연공정에서의 소성유동, 롤압력, 온도분포를 예측하기 위한 새로운 방법을 제안하고 있다. 제안된 방법은 유한요소 수식화에 바탕을 두고 있으며 박판의 소성유동과 온도분포의 연계해석과 롤의 온도해석이 가능하다. 박판의 소성유동과 롤-박판 접촉면에서의 롤압력을 예측하기 위하여 Hwang 등<sup>(5)</sup>이 제안한 벌칙 강소성 유한요소 수식화기법을 사용하였다. 박판과 롤의 온도분포를 예측하기 위하여 Petrov-Galerkin 유한요소 수식화기법을 제시하였으며 제안된 방법에 대한 해의 정확도는 문헌에서의 이론해와 시뮬레이션 결과를 비교하여 확인하였다. 또한 박판에서의 온도장, 속도장과 롤에서의 온도장의 연계해석을 위한 반복계산방법이 제안되었다. 제안된 방법들을 이용하여 다양한 공정에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며 다양한 공정조건에 대한 롤-박판 시스템의 열적특성과 롤간극에서 박판의 유동특성을 조사하였다.

## 2. 열전달현상의 유한요소 수식화

롤과 박판의 정상상태열전달은 다음의 열평형방정식으로 표현된다.

$$\rho c \phi_i T_{,i} = (k T_{,i})_{,i} + Q \quad (1)$$

여기서  $Q$ 는 식 (2)와 같이 표현되는 소성변형에 의한 소성열을 나타낸다.

$$Q = \sigma'_{ij} \epsilon_{ij} \quad (2)$$

또한 박판과 물의 열적경계조건은 다음과 같이 표현된다.

$$T = \bar{T} \quad \text{on } \Gamma_T \quad (3)$$

$$k T_{,i} n_i = q_f - h_{lub} \Delta T \quad \text{on } \Gamma_C \quad (4)$$

$$k T_{,i} n_i = -h_w (T - T_w) \quad \text{on } \Gamma_h \quad (5)$$

$$k T_{,i} n_i = -\sigma \epsilon (T^A - T_e^A) - h_e (T - T_e) \quad \text{on } \Gamma_e \quad (6)$$

여기서 식 (4)의  $\Delta T$ 는 물-박판 접촉면의 온도차를 나타내며,  $q_f$ 는 마찰에 의하여 발생하는 열을 나타낸다.

위의 경계값 문제는 다음과 같은 적분식으로 수식화 될 수 있다:

경계  $\Gamma_T$ 에서  $T=0$ 을 만족하는 임의함수(test function)  $\omega$ 에 대하여 경계  $\Gamma_T$ 에서  $T = \bar{T}$ 를 만족하는  $T$ 를 구하여야.

$$\int_{\Omega} (\rho c u_i n_i \omega + k T_{,i} \omega_{,i} - Q \omega) d \Omega - \int_{\Gamma_C} (q_f - h_{lub} \Delta T) \omega d \Gamma + \int_{\Gamma_h} h_w (T - T_w) \omega d \Gamma + \int_{\Gamma_e} \{ \sigma \epsilon (T^A - T_e^A) + h_e (T - T_e) \} \omega d \Gamma = 0 \quad (7)$$

전체해석영역  $\Omega$ 을 요소영역  $\Omega_e$ 으로 분할한 후  $T$ 와  $\omega$ 를 다음과 같이 근사화하여 적분식 (7)을 Galerkin 유한요소 수식화한다.

$$T = T_k N_k \quad (8)$$

$$\omega = N_k W_k \quad (9)$$

여기서  $N_k$ 는 근사함수(interpolation function)이며  $T_k$ 와  $W_k$ 는 절점값(nodal value)들을 나타낸다.

빠른 물속도로 인하여 물과 박판에서 많은 열이 유동(advection)에 의하여 유동방향(downstream)으로 전달된다. 이와같은 경우 일반적인 Galerkin 유한요소 수식화에 의한 해는 절점들 사이에서 불안정한 진동을 일으키는 것으로 알려져 있다. 이러한 수치적인 불안정성을 없애기 위하여 식(10)에서

와 같이 요소의 경계면에서 불연속적인 새로운 임의함수  $z$ 를 도입하여 식(7)을 Petrov-Galerkin 유한요소식으로 수식화 한다.

$$\int_{\Omega} \{ \rho c u_i T_{,i} - (u T_{,i})_{,i} - Q \} z d \Omega + \int_{\Omega} (\rho c u_i T_{,i} \omega + k T_{,i} \omega_{,i} - Q \omega) d \Omega - \int_{\Gamma_C} (q_f - h_{lub} \Delta T) \omega d \Gamma + \int_{\Gamma_h} h_w (T - T_w) \omega d \Gamma + \int_{\Gamma_e} \{ \sigma \epsilon (T^A - T_e^A) + h_e (T - T_e) \} \omega d \Gamma = 0 \quad (10)$$

본 논문에서  $z$ 는 hughes와 Brooks<sup>(21)</sup>에 의하여 제안된 스트림라인방법에 따라서 다음과 같이 선택하였다.

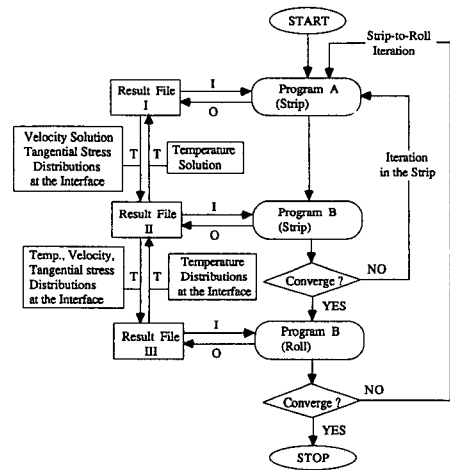
$$z = N_{k_s} f_i W_k \quad (11)$$

$$f_i = k' \frac{\rho c u_i}{|\rho c u_i|^2} \quad (12)$$

$$k' = \frac{1}{2} (a_s |\rho c u_s| h_s + a_t |\rho c u_t| h_t) \quad (13)$$

$$a_s = \coth\left(\frac{\gamma_s}{2}\right) - \frac{2}{\gamma_s} \quad (14)$$

$$a_t = \coth\left(\frac{\gamma_t}{2}\right) - \frac{2}{\gamma_t} \quad (15)$$



Program A : Analysis of plastic flow  
 Program B : Analysis of heat transfer  
 I : Input  
 O : Output  
 T : Data transfer

Fig. 1 Iterative solution scheme for the analysis of metal flow and temperatures in hot strip rolling

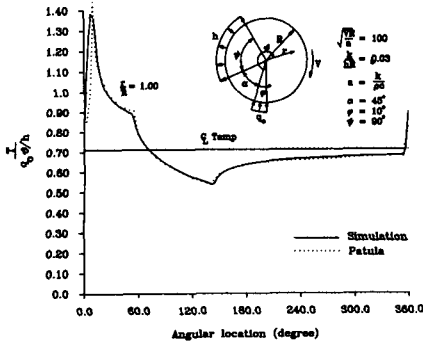


Fig. 2 Comparison between FEM predictions and theoretical solutions. Roll is subject to heat flux and convection heat transfer boundary conditions

여기서  $\gamma_s$ 와  $\gamma_t$ 는 요소의 Peclet 수를 나타내며 다음과 같이 정의된다.

$$\gamma_s = \frac{|\rho c u_s| h_s}{k} \quad (16)$$

$$\gamma_t = \frac{|\rho c u_t| h_t}{k} \quad (17)$$

식 (16)과 (17)에서  $h_s$ 와  $h_t$ 는 선형사각형요소 (bilinear isoparametric quadrilateral)의 특성길이를 나타내며  $u_s$ 와  $u_t$ 는  $h_s$ 와  $h_t$  방향으로의 속도 성분을 나타낸다.

본 논문에서 제안된 유한요소 수식화에 대한 해의 정확도를 알아보기 위하여 주어진 열유속과 대류 열전달을 하는 회전하는 롤에 대한 Patula<sup>(22)</sup>의 이론해와 비교하였다. 시뮬레이션에 사용된 자료들은 Fig. 2에 무차원 수로 표시하였다. 유한 요소격자는 70에서 440 정도의 Peclet수를 가지고 있으며 Fig. 2에서 나타난 것과 같이 예측된 롤의 표면온도와 중심부의 온도는 Patula의 이론해와 잘 일치하고 있다.

### 3. 연계해석

금속의 유동응력(flow stress)이 온도와 밀접한 관계를 가지고 있으므로 박판에서의 소성유동은 박판의 온도분포에 큰 영향을 받는다. 한편 박판의 온도분포는 소성유동에 의한 소성열, 롤-박판 접촉면에서의 마찰열, 롤과의 접촉열전달 등의 영향을 받고 있다. 따라서 롤-박판 접촉면에서의 마찰열, 롤과의 접촉열전달 등의 영향을 받고 있다. 따라서

롤-박판 시스템에서 금속의 열적특성과 유동응력의 관계를 나타내기 위하여 연계해석(coupled analysis)이 요구된다.

금속의 소성유동을 해석하기 위한 프로그램(Program A)과 열전달해석을 위한 프로그램(Program B)의 두 개의 독립된 유한요소 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램은 Fig. 1에서와 같이 반복계산(iteration)에 의하여 박판과 롤에서의 온도분포와 박판에서의 소성유동을 해석할 수 있도록 재구성되었다. 반복계산방법은 박판에서의 반복계산과 롤-박판에서의 반복계산으로 구성된다. 우선 Program A가 박판에서의 속도장과 롤-박판 접촉면에서의 접선/법선응력을 구하여 결과화일 II에 저장한다. 다음에 Program B에 의하여 박판에서의 온도장이 계산되어 결과화일 I에 저장된다. 소성유동에 의한 소성열은 속도장과 유동응력으로부터 구하여진다. 마찰에 의하여 박판으로 전달되는 열은 롤-박판 접촉면에서의 속도장과 접선응력분포에 의하여 구해지며 박판과 롤 사이에서 고르게 나누어진다고 가정하였다. 박판에서의 계산은 속도장과 온도장이 모두 수렴할 때 까지 반복된다. 박판에서의 반복계산이 수렴하면 접촉면에서의 온도분포, 속도장, 접선/법선응력이 결과화일 III에 저장된다. 다음에 Program B에 의하여 롤의 온도분포가 계산되어지며 예측된 롤표면온도는 결과화일 II에 저장된다. 이제 다시 박판에서의 반복계산이 수행되어진다. 롤-박판 사이의 반복계산은 박판에서의 속도장과 온도장과 롤에서의 온도장이 모두 수렴할 때까지 반복된다.

### 4. 해석결과의 고찰

압축응력을 받고 있는 두 물체사이의 접촉열전달 계수의 영향을 미치는 인자들은 표면조도, 압력, 온도차, 윤활조건 등으로 매우 다양하다. Murata 등<sup>(23)</sup>은 압축 상태에서 다양한 조건의 낮은 온도의 시편과 높은 온도의 시편의 열적반응을 조사하여 열간압연공정에 적용될 수 있는 접촉열전달계수를 구하였다. 접촉열전달계수는 산화물질(scale)이 없을 때 물을 윤활유로 사용할 경우 23~81(kW/m<sup>2</sup>°C)의 값을 가지며 본 논문에서는 접촉열전달계수로  $h=30$ (kW/m<sup>2</sup>°C)과  $h=60$ (kW/m<sup>2</sup>°C)을 선정하였다. 냉각수를 분사하는 위치에 따라서 두가지 형태의 롤냉각 시스템이 고려되었으며 Fig. 3에 나

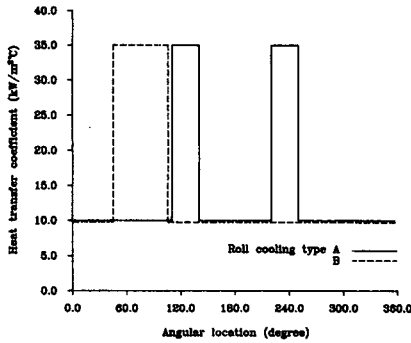


Fig. 3 Two roll cooling types considered in the present investigation

타내었다. Poplawski와 Seccomb<sup>(24)</sup>의 실험결과를 참고하여 냉각수가 분사되는 곳에서의 열전달계수는 35 (kW/m<sup>2</sup>°C)로 하였으며 그 이외의 부분에서의 열전달계수는 10 (kW/m<sup>2</sup>°C)으로 하였다.

열간압연공정에서 생성된 변형경화량이 열연화현상(thermal softening)에 의하여 연속적으로 없어지므로 유동응력은 유효변형률(effectivie strain)에 큰 영향을 받지 않는다. 따라서 유동응력은 Table 1에서와 같이 온도와 유효변형률속도의 함수로 표현된다. 시뮬레이션에 사용한 재료는 AISI 1016 강이며 Cook<sup>(25)</sup>의 실험데이터로부터 구하였다. 박판과 롤의 열적특성은 Table 1에 주어져 있다.

이차원 열전달과 소성유동으로 가정하여 유한요소 시뮬레이션을 하였으며 롤은 강체로 가정하였다. Fig. 4는 시뮬레이션에 사용한 경계조건을 나타내고 있다. 시뮬레이션에 관련된 공정조건들은 Table 2에 주어져 있다. Table 2와 같이 각각의 공정조건은 입하율, 롤속도, 마찰조건, 접촉열전달

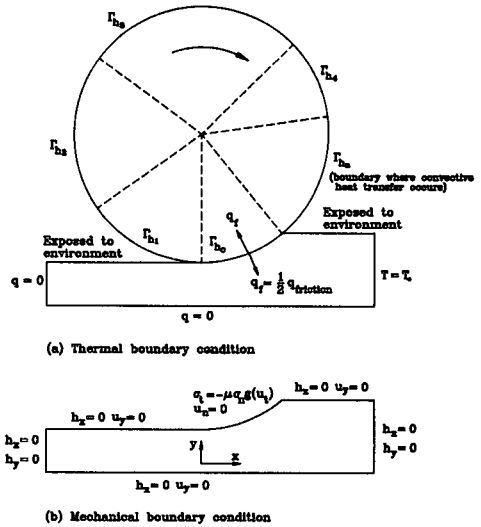


Fig. 4 Thermal and mechanical boundary conditions used in simulation

계수, 롤의 냉각 시스템의 의하여 정의된다.

롤-박과 접촉면의 다양한 열전달조건에 대한 박판의 온도분포는 Fig. 5에 주어져 있다. 접촉열전달이 없는 20퍼센트 압하율의 경우(case 5) 초기온도(1000°C)로 부터 평균온도가 약 25°C 상승하였다. 최대온도는 박판의 접촉면에서 나타나며 이러한 사실로부터 박판의 표면층이 회전하는 롤의 드랙(drag)에 의하여 큰 변형을 받고 있음을 알 수 있다. 접촉면에서 열전달이 일어나는 경우(case 1, 3) 롤쪽으로 전달되는 열량이 생성되는 열량보다 매우 크므로 롤과의 접촉면에서 큰 온도하강이 일어난다. 열발생량이 증가함에 따라서 온도하강은 줄어들며 이러한 현상은 40퍼센트압하율에 대한 해

Table 1 Flow stress and thermal properties of the strip and roll

	Strip	Roll
material	AISI1016	1078 Steel
thermal conductivity (k)	41.0 (kW/m <sup>2</sup> °C)	45.2 (kW/m <sup>2</sup> °C)
heat capacity (c)	0.636 (kJ/kg·°C)	0.540 (kJ/kg·°C)
density (ρ)	7638 (kg/m <sup>3</sup> )	7837 (kg/m <sup>3</sup> )

flow stress expression of strip

$$\bar{\sigma} = c(T) \bar{\epsilon}^{m(T)}$$

$$c(T) = 0.001758 \cdot \exp\left(\frac{4217}{T}\right) \text{ (kN/mm}^2\text{)}$$

$$m(T) = -0.10036 + 0.00014856 \cdot T + 7.9703 \cdot 10^{-8} \cdot T^2$$

**Table 2** Process conditions used in simulation

Simulation No.	Roll cooling type	$h_{lbb}$ (kW/m <sup>2</sup> ·°C)	Reduction (%)	Roll Speed (RPM)	Friction condition
1	A	60	20	60	Sticking
2	A	60	40	60	Sticking
3	A	30	20	60	Sticking
4	A	30	40	60	Sticking
5	A	0	20	60	Sticking
6	A	0	20	60	Sticking*
7	A	60	40	30	Sticking
8	A	60	20	60	Sticking
9	A	60	20	60	$\mu=0.5$
10	A	60	20	60	$\mu=0.4$
11	A	60	20	60	$\mu=0.3$

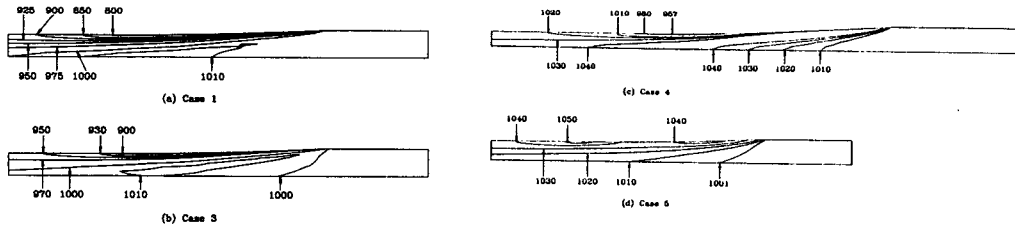
\*No heat generation

Roll diameter=400mm

Initial strip thickness=2mm

Initial strip temperature=1000°C

Environment temperature=20°C



**Fig. 5** Temperature distributions in the strip

석(case 4)으로 부터 확인할 수 있다. 이 경우 물으로 전달되는 열량보다 생성되는 열량이 많으므로 박판의 온도는 초기 온도보다 높게 나타나고 있다. Case 4에 대한 결과로부터 압연이 진행됨에 따라서 표면이 박판의 내부보다 빨리 냉각되며 압연초기단계에 표면에 나타났던 최고 온도는 차츰 내부로 이동함을 알 수 있다.

박판의 온도분포에 대한 롤 속도의 영향은 Fig. 6에 나타나 있다. Case 2와 7의 온도분포를 비교하여 롤속도가 50퍼센트 줄어들음에 따라서 박판의 온도가 약 100°C 정도 떨어짐을 알 수 있다. 그러나 case 2와 7에서 얻어진 결과로부터 박판의 온도 분포가 냉각수가 뿌려지는 위치에 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 7에서

접촉면에서의 물의 온도분포로부터 확인할 수 있다. 그림에서 온도변화는 매우 얇은 표면층에 한정되고 있음을 알 수 있다. 압연이 끝나는 부분부터 냉각수 분사위치 사이의 온도변화가 일어나는 층은 롤반경의 약 2퍼센트 정도이다. 접촉영역이외의 부분에서의 물표면온도분포는 Fig. 8에서와 같이 롤 속도, 냉각수 분사위치, 접촉열전달계수 등의 공정 조건에 큰 영향을 받지 않는다.

Fig. 9에서 접촉면 부근에서의 물표면온도분포에 대한 롤 속도와 접촉열전달계수의 영향이 매우 큼을 알 수 있다. 최대 물표면온도의 약 40퍼센트 감소는 접촉열전달계수를 약 50 퍼센트 줄이면 얻어짐을 알 수 있다. 롤속도의 감소에 따른 물표면온도의 증가는 롤과 박판이 접촉하는 시간이 길어지

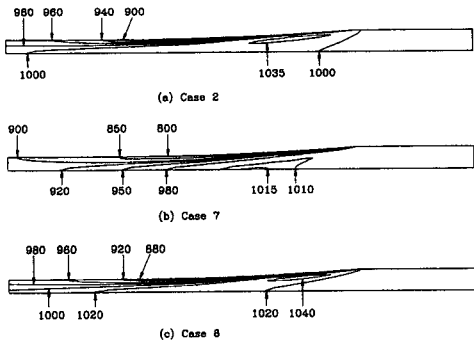


Fig. 6 Effect of roll speed and spray zones on strip temperatures

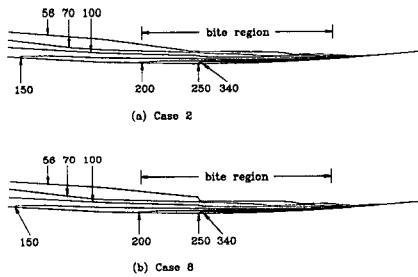


Fig. 7 Roll temperatures in the bite region obtained for different spray zones

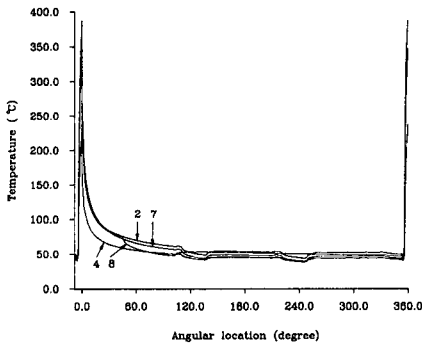


Fig. 8 Roll surface temperatures

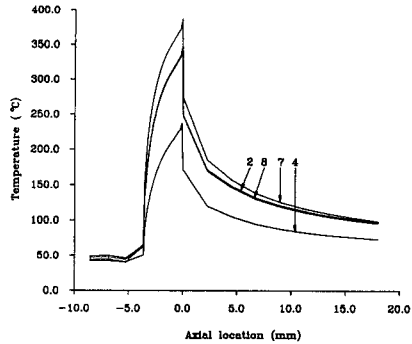


Fig. 9 Roll surface temperatures in the bite region

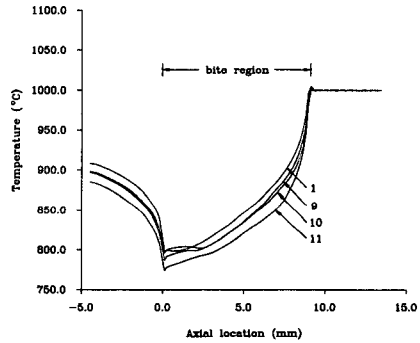


Fig. 10 Strip surface temperatures predicted under various interface friction conditions

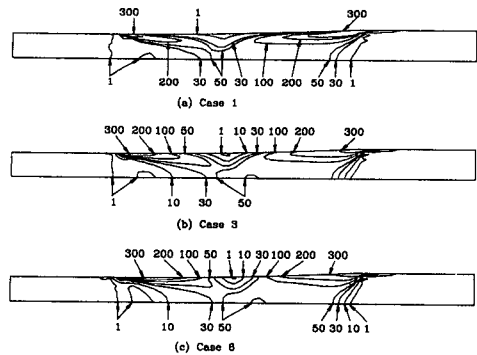


Fig. 11 Effective strain rate distributions in the strip

기 때문에 발생한다. 따라서 롤속도를 조절하여 롤 표면온도분포를 적절한 범위로 조절할 수 있음을 알 수 있다. Fig. 10은 다양한 마찰조건에 대한 박판의 표면온도분포를 나타내고 있다. 쿠울롱 마찰 계수의 변화에 따른 박판의 표면온도분포변화로 부터 최대 온도는 스티킹마찰일 때 얻어짐을 알 수 있다. 따라서 스티킹마찰이 박판의 표면에서 최대

변형을 발생시키는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 다양한 접촉열전달조건에 대한 유효변형률속도분포이다. 표면온도가 낮을 때(case 1, 3) 가장 심한 변형이 나타나는 곳이 표면층 바로 밑임을 알 수 있다. 이러한 사실은 롤에 의한 냉각으로 인하여 표면층이 국부적으로 경화되어 표면층 바로 밑의 연한 재료가 압연중 더욱 큰 변형을 받게되기

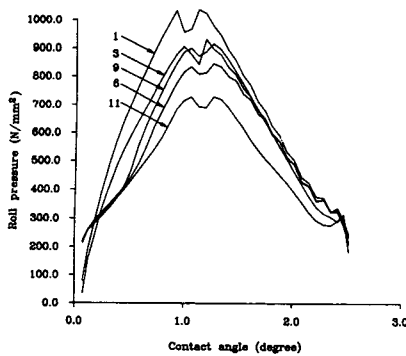


Fig. 12 Roll pressure distributions for the cases of 20 percent reduction

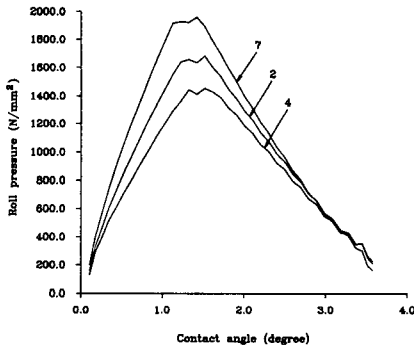


Fig. 13 Roll pressure distributions for the cases of 40 percent reduction

때문에 나타난다. 또한 그림에서 보여지는 표면온도가 감소함에 따른 중립영역(neutral zone)의 범위 확대는 표면층의 경화에 기인하고 있다. Fig. 12는 다양한 공정조건에 대한 20퍼센트 입하율일때의 롤압력분포를 나타내고 있다. 표면냉각이 있을 때(case 1, 3)의 롤압력은 박판의 온도가 일정하다고 가정했을 때(case 6)의 롤압력보다 높게 나타나고 있다. 이러한 사실로부터 등온압연가정은 롤압력을 낮게 예측함을 알 수 있다. 40퍼센트 압하율에 대한 롤압력분포는 Fig. 13에 나타나 있다. 그림으로부터 롤속도 감소에 따른 롤압력의 감소로부터 유동응력은 박판의 온도변화에 큰 영향을 받으며 유동응력에 대한 유효변형률속도의 영향은 상대적으로 작음을 알 수 있다.

## 5. 결론

압연제품의 품질, 롤의 수명, 생산원가에 대하여

큰 영향을 미치는 공정조건을 최적화하기 위하여 열간박판압연공정 해석이 필요하다. 본 논문에서는 롤과 박판의 온도분포, 박판의 유동해석, 롤압력 계산의 연계해석을 위한 유한요소 수식화 기법과 반복계산방법이 제안되었다. 본 연구에서 제안된 방법을 이용하여 다양한 공정변수들의 영향을 조사하였다. 롤과 박판의 온도분포, 소성유동, 롤압력은 롤 속도와 압하율, 접촉열전달계수에 큰 영향을 받고 있음을 확인 하였다. 제안된 방법은 밀의 최적설계와 제어에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 포항제철의 연구비 지원(91-1131A)으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사를 드린다.

## 참고문헌

- (1) Zienkiewicz, O.C., Jain, P.G. and Onate, E., 1978, "Flow of Solids During Forming and Extrusion : some Aspects of Numerical Solutions," Int. J. Solids Structures, Vol. 14, pp. 15~38.
- (2) Dawson, P.R., 1978, "Viscoplastic Finite Element Analysis of Steady-State Forming Processes Including Strain History and Stress Flux Dependence," Application of Numerical Methods to Forming Processes, AMD, Vol. 28, p. 55.
- (3) Shima, S., et al, 1980, "Rigid-Plastic Finite element Analysis of Strip Rolling," Proc. 4th Int. Conf. on Prod. Eng., p. 82.
- (4) Li, G.J. and Kobayashi, S., 1982, "Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Plane Strain Rolling," J. Eng. Ind., Trans. ASME, Vol. 104, pp. 55~64.
- (5) Hwang, S. M., Joun, M.S. and Park, J.S., 1990, "A penalty Rigid-Plastic Finite Element Method for the Determination of Stress Distributions at the Tool-Workpiece interfaces in metal Forming," Proc. 18th NAMRC, University park, Pennsylvania, pp. 13~19.
- (6) Jeswiet, J. and Rice, W. B., 1975, "Measure-



- ment of Strip Temperature in the Roll Gap During Cold Rolling," *Annals of the CIRP*, Vol. 24, pp. 153~156.
- (7) Johnson, W. and Kudo, H., 1960, "The Use of Upperbound Solutions for the Determination of Temperature Distributions in Fast Hot Rolling and Axisymmetric Extrusion Process," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 1, pp. 175~191.
- (8) Cerni, S., Weinstein, A. S. and Zorowski, C. F., 1963, "Temperatures and Thermal Stresses in the Rolling of Metal Strip," *Iron Steel Eng.*, Vol. 40, No. 9, pp. 165~171.
- (9) Stevens, P.G., Ivens, K.P. and Harper, P., 1971, "Increasing Work Roll life by Improved Roll-Cooling Practice," *I. Iron Steel Inst.*, London, Vol. 209, pp. 1~11.
- (10) Serebinski, F., 1973, "Prediction of Plate Cooling During Rolling Mill Operation," *J. Iron Steel Inst.*, London, Vol. 211, p. 197.
- (11) Cornfield, G. C. and Johnson, R.H., 1973, "Theoretical Predictions of Plastic Flow in Hot Rolling Including the Effect of Various Temperature Distributions," *J. Iron Steel Inst.*, London, Vol. 211, p. 567.
- (12) Batra, S.K. and Popoff, A. A., 1973, "On the Use of Heated Rolls for Hot Rolling of Metals," *J. Eng. Mat. Tech.*, *Trans. ASME*, Vol. 95, pp. 27~35.
- (13) Parke, D. M. and Baker, J.L. L., 1972, "Temperature Effects of Cooling Work Rolls," *Iron Steel Eng.*, Vol. 49, No. 12, pp. 83~88.
- (14) Willmotte, S. and Mignon, J., 1973, "Thermal Variations of the Camber of the Working Rolls During Hot Rolling," *Metallurgical Reports CRM*, No. 34, pp. 17~34.
- (15) Zienkiewicz, O.C., Onate, E., and Heinrich, J. C., 1981, "A General Formulation for Coupled Thermal flow of Metals Using Finite Elements," *Int. J. Num. Meth. Engr.*, Vol. 11, pp. 1497~1514.
- (16) Lahoti, G.D., Shah, S.N. and Altan, T., 1978, "Computer-aided analysis of deformations and temperatures in strip rolling," *J. Eng. Ind.*, *Trans. ASME*, Vol. 100, pp. 159~166.
- (17) Orowan, E., 1943, "The calculation of roll pressure in hot and cold flat rolling," *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, Vol. 150, pp. 140~160.
- (18) Tseng, A.A., 1984, "A Numerical Heat Transfer Analysis of Strip Rolling," *J. Heat Transfer*, Vol. 106, pp. 512~517.
- (19) Tseng, A. A., Lin, F. H., Gunderia, A.S. and Ni, D. S., 1989, "Roll cooling and its relationship to roll life," *Metall. Trans. A*, Vol. 20A, pp. 2305~2320.
- (20) Alexander, J.M., 1982, "On the theory of rolling," *Proce. R. Soc. Lond. A*, Vol. 326, pp. 535~563.
- (21) Brooks, A. N. and Hughes, T. J. R., 1982, "Streamline Upwind/Petrov-Galerkin Formulations for Convection Dominated Flows with Particular Emphasis on the Incompressible Navier-Stokes Equations," *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.*, Vol. 32, pp. 199~259.
- (22) Patula, E. H. 1981, "Steady-State Temperature Distribution in a Rotating Roll Subject to Surface Heat Fluxes and Convective Cooling," *J. Heat Transfer*, *Trans. ASME*, Vol. 103, pp. 36~41.
- (23) Murata, K., Morise, H., Mitsutsuk, M., Naito, H., Komatsu, T. and Shida, S., 1984, "Heat Transfer between Metals in Contact and Its Application to Protection of Rolls," *Trans. Iron Steel Inst.*, *Jpn*, Vol. 24, pp. B-309.
- (24) Poplawski, J. V. and Seccombe, D. A., Jr., 1980, "Behlehem's Contribution to the Mathematical Modeling of Cold Rolling Tandem Mills," *J. Iron steel Eng.*, Vol. 57, pp. 47~58.
- (25) Cook, P. M., 1957, "True stress-strain curves for steel in compression at thigh temperatures and strain rates, for application to the calculation of load and torque in hot rolling," *Inst. Mech. Engr.*, *Conf. on Properties of Materials at High Rates of Strain*, pp. 86~97.