

〈技術論文〉

## 트윈롤 연속주조 공정에서의 롤의 온도분포 및 응력해석

이문도\* · 박현철\*

(1991년 5월 24일 접수)

### Analysis of Temperature and Stress Distributions of the Roll for the Twin-Roll Continuous Casting Process

M.D. Yi and H.C. Park

**Key Words:** Roll(롤), Temperature Distribution(온도 분포), Stress(응력), Material(재료), Roll Type(롤 형상)

#### Abstract

In this paper, analysis of temperature and stress distributions in the roll for a twin roll continuous casting process was carried out. Firstly, several state equations were set up to determine the temperature distribution in the roll using finite difference method. Secondly, thermal stress in the roll was calculated numerically. Also, stress distribution due to the roll pressure was calculated to determine the effect of the roll pressure. For analysis of temperature distributions and the stress states of the roll, there are three kinds of roll materials, 21CrMoV5. 11, CuCo/NiBe, CuCrZr and three types of cooling system were used.

#### 기호설명

$C$  : 롤 재료의 비열(J/kgK)  
 $c$  :  $1+t_2/2R$   
 $k$  : 롤 재료의 열전도도(W/mK)  
 $Q_1-Q_8$  : 열유속(heat flux)(W/m<sup>2</sup>)  
 $q$  : 롤 압력(MPa)  
 $R$  : 롤의 반경(mm)  
 $t$  :  $t_1+2R(1-\cos\phi)$ (mm)  
 $t_1$  : 롤 입구측에서 스트립의 두께(mm)  
 $t_2$  : 롤 출구측에서 스트립의 두께(mm)  
 $V_R$  : 롤의 회전 속도(m/s)  
 $\alpha$  :  $\cos^{-1}\{1-(t_2-t_1)/2R\}$ =롤과 스트립의 접촉각(rad)  
 $\phi_n$  : 중립각(neutral angle)(rad)  
 $\rho$  : 롤 재료의 밀도(kg/m<sup>3</sup>)  
 $\tau_y$  : 스트립의 전단항복응력(MPa)

$\bar{\tau}_y$  : 스트립의 평균 전단항복응력(MPa)

( )<sup>+</sup> : 입구 측

( )<sup>-</sup> : 출구 측

## 1. 서론

기존의 압연방법은 재료를 압연하기 전 잉고트(ingot)를 미리 성형하기 때문에 그 공정이 길고 복잡하다.<sup>(1)</sup> 이러한 점을 개선하고 좀더 높은 생산성을 위해 고안된 압연방법이 연속주조공정(continuous casting process)이다. 이 연속주조보다 공정을 짧게하고 연속적인 제품을 얻어내는 방법이 근래에 들어와 개발된 트윈롤 연속주조공정(twin-roll continuous casting process)이다.

이 방법은 기존의 압연공정과 달리 잉고트를 만들지 않고 서로 반대로 회전하는 두개의 물 사이에 직접 용융금속(molten metal)을 부은 후 두개의 롤을 통하여 용융금속을 냉각하여 고상화시키고

\*정회원, 포항공과대학 기계공학과

이 고상화된 부분을 연속적으로 압연하여 원하는 두께의 박판(strip)을 얻어내는 방법이다.<sup>(2)</sup>

트윈롤 연속주조 공정을 통한 제품을 만들기 위해서는 먼저 물의 설계가 우선되어야 한다. 물의 설계시 물에 영향을 미치는 중요한 인자들을 찾고 이 인자들의 영향을 알아보기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션(computer simulation)은 필수적이다.

트윈롤 연속주조공정은 1970년 Babic, Chen 등에 의해서 Al-Fe와 Pd-Si 합금 박판을 제한적으로 만드는데 처음 시도되었다.<sup>(3~4)</sup> 1977년에 Lewis, Ponnald와 Davies 등이 트윈롤(twin-roll) 공정에 의한 박판과 싱글롤(single-roll) 공정에 의한 박판의 미세결정구조를 비교하는 실험을 하였다.<sup>(5)</sup> 이 후 트윈롤 연속주조공정의 보다 많은 이해를 위하여 몇 가지 수학적 모델(model)이 제시되었다. 1981년에는 Miyazawa와 Szekely<sup>(6)</sup>에 의해서 1982년에는 Saitoh, Hojo, Yanguchi와 Kang<sup>(7)</sup>에 의해서 Miyazawa와 szekely의 모델을 좀 더 개선한 모델이 제시되었다. 이들에 의하면 롤 사이에 부여된 용융금속의 고상선(solidus line)은 물의 회전 속도에 큰 영향을 받고 롤 간격의 영향은 작다고 하였다.

본 논문에서는 물의 온도분포를 구하기 위하여 이론적으로 식을 세우고 이를 바탕으로 수치해석(numerical analysis)을 수행하였다. 이 온도분포 결과를 가지고 물의 유한요소 모델의 격자점(gird point)의 입력 데이터(data)로 주어 열응력을 해석하였다. 또한 고상화한 용융금속을 압연하는 부분에서의 롤 압력의 영향을 알아보기 위하여 이 부분에서의 압력을 이론적으로 구하여 이에 대한 응력 해석도 수행하였다.

3가지 롤 재료 21CrMoV5.11, CuCo/NiBe, CuCrZr과 3가지 롤 냉각 방식 Roll Type A, Roll Type B, Roll Type C에 대하여 각각 응력 해석을 수행하여 롤 재료에 대한 롤 냉각 방식의 영향과 냉각 방식에 대한 롤 재료의 영향을 알아보고 그 결과를 제시하고 비교하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 롤 압력 분포

Fig. 1에서 H<sub>0</sub>부터는 y축을 중심으로 대칭인 고상선이 합쳐서 압연되기 시작한다. 이 부분부터 롤은 하중을 받게 된다. 이 하중을 롤 압력(roll pre-

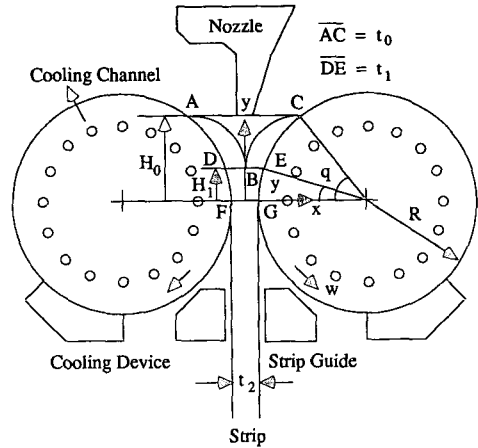


Fig. 1 Configuration of twin-roll continuous casting process

ssure)이라 한다. 압하율이 일정하다면 이 롤압력에 따라 압연 하중(roll load)이 결정된다.<sup>(8)</sup> 롤과 스트립 사이의 접촉을 부착마찰(sticking friction)이라고 가정하면 기존의 열간압연(hot rolling) 이론에 따라 이 부분에서의 압력분포를 식(1)과 (2)에서처럼 나타낼 수 있다<sup>(6~9)</sup>.

$$\frac{q^+}{2\bar{\tau}_y} = \frac{\pi}{4} \left(1 + \ln \frac{t}{t_2}\right) + c \sqrt{\frac{R}{t_2}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{R}{t_2}} \phi - \frac{1}{2} \phi \quad (1)$$

$$(0 \leq \phi \leq \phi_n)$$

$$\frac{q^-}{2\bar{\tau}_y} = \frac{\pi}{4} \left(1 + \ln \frac{t}{t_1}\right) + c \sqrt{\frac{R}{t_2}} \left( \tan^{-1} \sqrt{\frac{R}{t_2}} \alpha - \tan^{-1} \sqrt{\frac{R}{t_2}} \phi \right) - \frac{1}{2} (\alpha - \phi) \quad (2)$$

$$(\phi_n \leq \phi \leq \alpha)$$

압하율이 20%이고  $R=375\text{mm}$ ,  $t_2=2\text{mm}$ 인 경우의 롤 압력분포를 Fig. 2에 보였다. Table 1에서는 압하율과 중립각의 관계를 수치로 나타내었다. 완전히 고상화된 부분이 압연될때 압하율이 작으면 중립각의 위치가 접촉각의 절반에 가까워짐을 알 수 있다.

### 2.2 물의 온도 분포

수치적으로 물의 온도분포를 구하기 위하여 다음의 가정을 하였다.

(1) 반경이 375mm인 롤 표면으로부터 중심을 향하여 깊이 50mm인 곳까지 해석대상으로 정하였다.

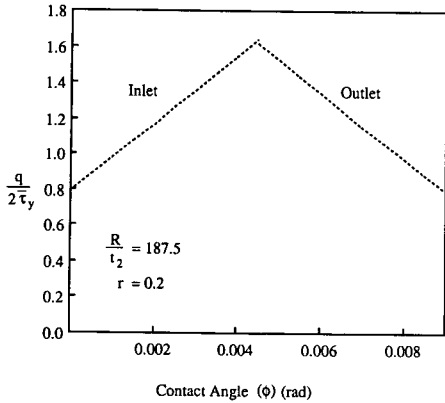


Fig. 2 Distribution of roll pressure

- (2) 롤 표면에서의  $Pe$ 수 (Peclet number)가 매우 크므로 롤 깊이 50mm안쪽으로는 온도 구배는 무시한다<sup>(10~18)</sup>.
- (3) 롤의 축 방향으로의 온도변화는 없다.
- (4) 롤의 회전 속도는 일정하다.

Table 1 Ratio of neutral angle vs contraction

$R/t_2$	$r$	$\phi_n/\alpha$	$R/t_2$	$r$	$\phi_n/\alpha$
5	0.15	0.4532	50	0.05	0.4182
	0.10	0.4285		0.10	0.4668
	0.20	0.3869		0.20	0.4461
	0.30	0.3478		0.30	0.4222
	0.40	0.3083		0.40	0.3996
	0.50	0.2668		0.50	0.3687
	0.60	0.2218		0.60	0.3362
10	0.05	0.4652	100	0.05	0.4848
	0.10	0.4460		0.10	0.4740
	0.20	0.4162		0.20	0.4538
	0.30	0.3803		0.30	0.4326
	0.40	0.3468		0.40	0.4086
	0.50	0.3110		0.50	0.3860
	0.60	0.2714		0.60	0.3513
25	0.05	0.4757	150	0.05	0.4864
	0.10	0.4613		0.10	0.4771
	0.20	0.4351		0.20	0.4571
	0.30	0.4083		0.30	0.4367
	0.40	0.3803		0.40	0.4140
	0.50	0.3496		0.50	0.3884
	0.60	0.3146		0.60	0.3578

$r$  : Contraction Ratio     $\phi_n$  : Neutral Angle  
 $\alpha$  : Contact Angle

(5) 롤과 스트립이 접촉하고 있는 부분의 길이 (31.41mm)가 롤 원주의 길이(2356.19mm)에 비하여 매우 작으므로(1.33%) 극좌표계에서 직교좌표계로 바꾸어 해석하였다.

가정(1)이 가능한 이유는 롤의 빠른 회전속도로 인하여 롤과 용융금속이 접촉하는 시간이 짧아 용융금속으로부터 빼앗은 열이 깊이 침투하지 못하기 때문이다. 가정(2)에서  $Pe$ 수는 대류(convection)에 의해서 전달되는 열에너지와 전도(conduction)에 의해서 전달되는 열에너지의 비이다<sup>(19)</sup>.

가정(5)에 의하여 극좌표계의 모델은 직교좌표계의 모델로 바꾸어 나타낼 수 있다. Fig. 3은 직교좌표계에서 롤의 온도분포 계산을 위한 모델이다. 이 모델에서  $x$  방향(롤의 회전방향)으로 362개,  $y$  방향(롤 깊이방향)으로 12개의 격자점(node point)를 잡았다. 초기조건(initial condition)은  $y=0$ (롤의 표면)에서  $100^\circ\text{C}$ , 다른 위치에서는 모두  $50^\circ\text{C}$ 로 하였다. Fig. 3에서 경계조건(boundary condition)은  $y=H$ (50mm)인 지점에서는 Dirichlet 경계조건인 일정온도(constant temperature)로 하였으며,  $x=0$ 와  $x=2\pi R$ (2356.19mm)에서는  $T^n(0, y) = T^{n-1}(2\pi R, y)$ ,  $\partial T(2\pi R, y)/\partial x = 0$ 로 하였다. 여기에서 위첨자  $n$ 은  $x=0$ 에서  $x=2\pi R$ 까지의 계산이 수행된 수(step number)를 의미한다.  $y=0$ (롤의 표면)에서는 대류, 전도, 복사에 의한 열전달을 모두 등가(equivalent)의 대류 열전달 계수로 주었다. 계산의 시작은 미니스커스(meniscus) 위치에 시작하였다.

지배 방정식을 보면 다음과 같다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C V_R \frac{\partial T}{\partial x} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

계산은 롤 재료 21CrMoV5.11, CuCo/Nibe, CuCrZr에 대해서 수행하였고 계산에 사용된 재료의 물성치는 Table 2에 있다. Fig. 4에서는 롤 재료 CuCrZr에 대해서 롤이 정상상태일때의 온도 분포

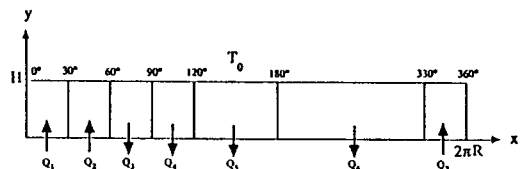
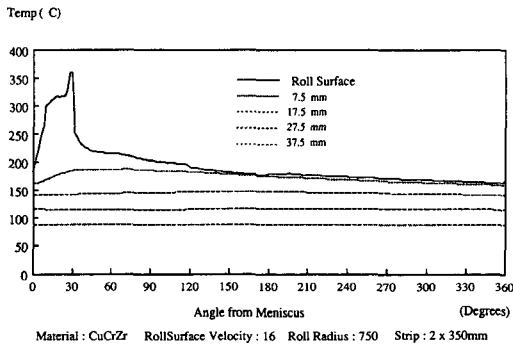


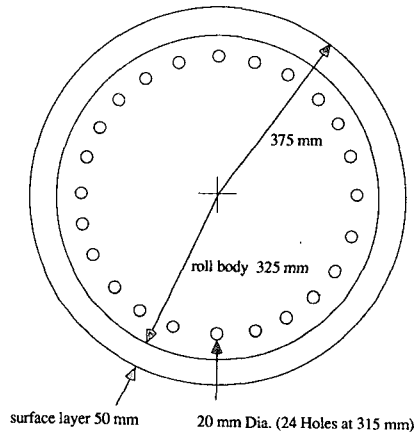
Fig. 3 Model for temperature calculation in cartesian coordinate

**Table 2** Material properties of roll

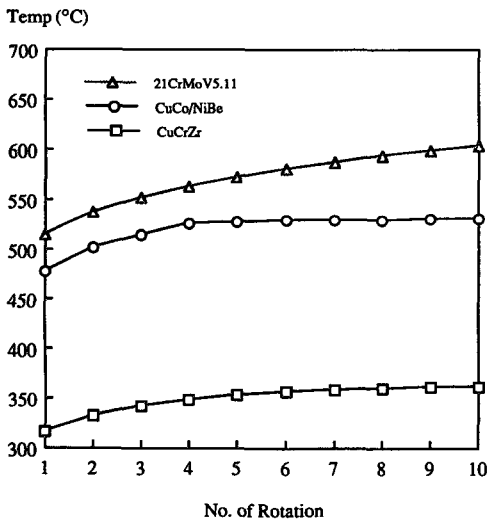
Roll material	Material properties	$E$	$Y$	$\alpha$	$k$	$C$	$\nu$
		(GPa)	(MPa)	( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	(W/mK)	(J/kgK)	
		500 $^{\circ}\text{C}$	500 $^{\circ}\text{C}$	25 $^{\circ}\text{C}$	500 $^{\circ}\text{C}$	500 $^{\circ}\text{C}$	
21CrMoV5.11		200	700	$15.9 \times 10^{-6}$	34	560	0.30
CuCo/NiBe		150	550	$16.0 \times 10^{-6}$	200	450	0.32
CuCrZr		118	310	$16.7 \times 10^{-6}$	367	430	0.33



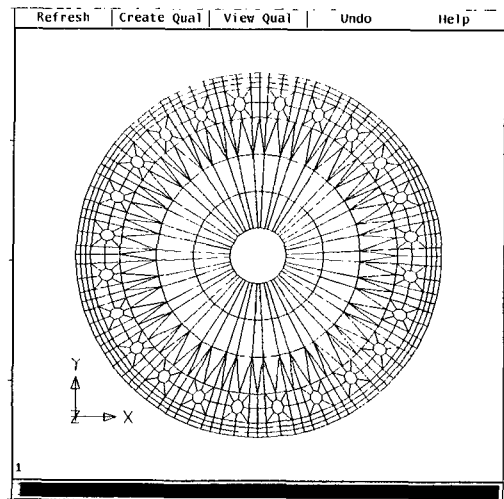
**Fig. 4** Temperature distribution of roll in steady state



surface layer material : 21CrMoV5.11  
roll body material : 21CrMoV5.11



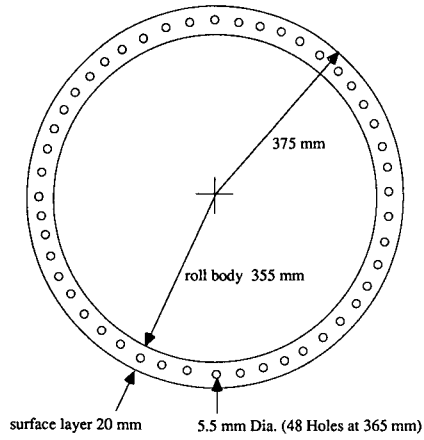
**Fig. 5** Maximum roll temperature vs. no. of rotation for roll type A



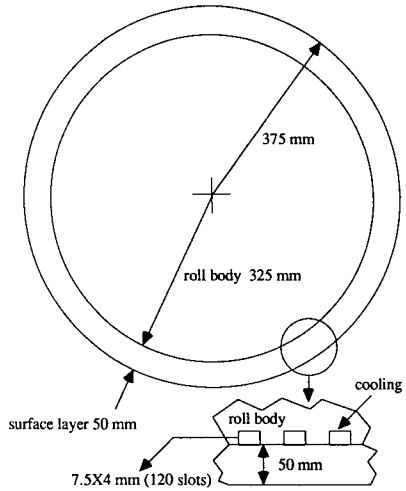
**Fig. 6** Cooling type A and finite element model

를 롤 깊이에 따라 나타내었고, Fig. 5에서는 각 재료에 따라 회전수와 롤 표면의 최대온도 변화를 나타내었다. 10회전까지의 각 재료에 따라 롤의 최대온도 변화를 알아본 결과 Fig. 5에서와 같이

CuCo/NiBe, CuCrZr은 거의 정상상태이고 21CrMoV5.11은 아직 비정상상태이다. 21CrMoV5.11의 정상상태까지의 회전수는 약 100회



surface layer material : CuCo/NiBe  
roll body material : 21CrMoV5.11



surface layer material : CuCrZr  
roll body material : 21CrMoV5.11

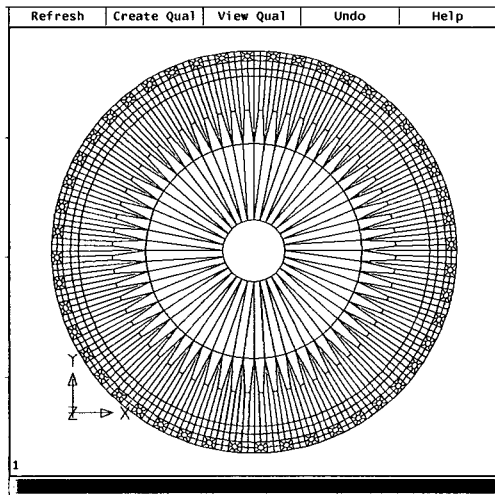


Fig. 7 Cooling type B and finite element model

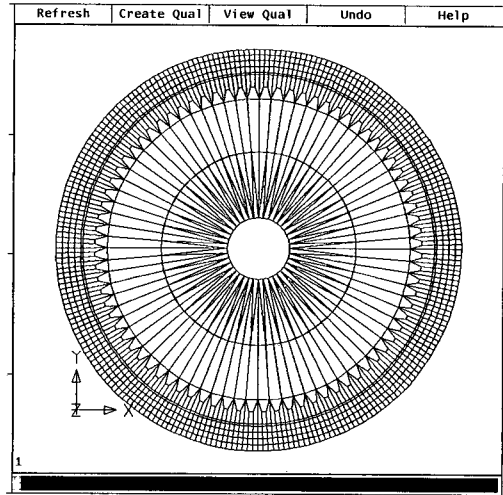


Fig. 8 Cooling type C and finite element model

전이였으며 이때의 온도는 약 690°C 정도이다. 최대 온도는 21CrMoV5.11, CuCo/NiBe, CuCrZr의 순으로 높게 나타났으며 열전도도가 가장 큰 CuCrZr이 21CrMoV5.11과 CuCo/NiBe에 비하여 물의 최대온도가 가장 낮음을 알 수 있다.

롤 온도분포의 수치계산은 FDM(Finite Difference Method) 코드(code)인 EL2D를 사용하였

고,<sup>(20)</sup> 식 (3)의 에너지방정식(energy equation)을 천이 상태(transient state)에 대하여 계산하였다.

### 2.3 응력분포의 해석

앞절에서 계산한 온도분포 결과와 압력분포 결과를 이용하여 응력해석을 수행하였다. 먼저 롤 재료 CuCrZr에 대하여 롤 냉각방식 A,B,C를 해석하여

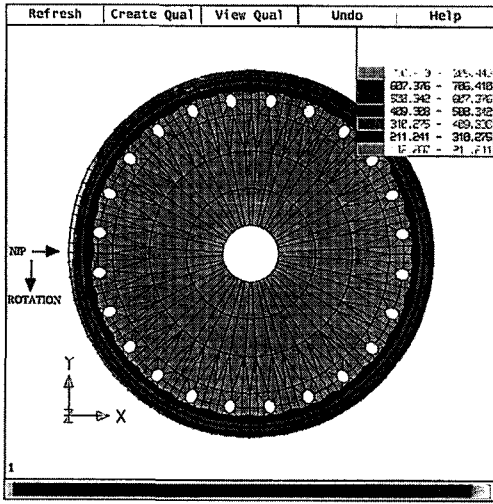


Fig. 9 Von-Mises stress by temperature distribution for cooling type A(material CuCrZr)

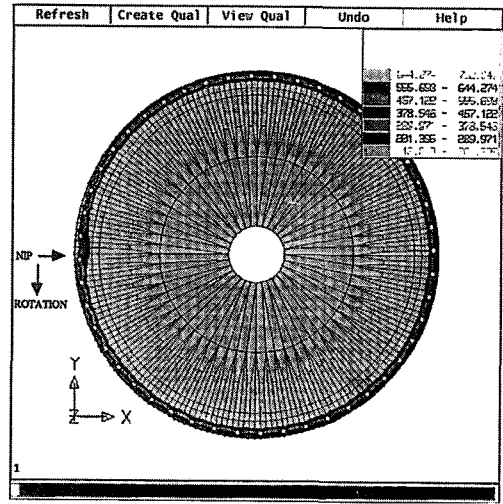


Fig. 10 Von-Mises stress by temperature distribution for cooling type B(material CuCrZr)

같은 재료를 사용하였을때 롤 냉각 방식에 따른 응력의 변화를 알아보았고, 다음으로 롤 냉각 방식 A에 대하여 롤 재료를 21CrMoV5.11, CuCo/NiBe, CuCrZr를 해석하여 같은 롤을 사용하였을 경우 재료에 대한 응력의 변화를 알아 보았다.

롤의 실제 모델과 유한요소 모델을 Fig. 6부터 Fig. 8까지 보였다. Fig. 9부터 Fig. 11은 롤의 유한요소 해석결과를 보였다. Table 3과 Table 4에서는 유한요소 해석결과를 항복강도와 비교하여 나타내었다. Table 5에서는 롤 유한요소 모델의 구성을 나타내었다.

롤의 응력계산을 하기 위해 FEM(Finite Element Method) 코드(code)인 MSC/NASTRAN을 이용하였다. 열응력을 구하기 위한 유한요소 모델의 격자점 입력 데이터(data)는 EL2D를 이용하여 구한 값들을 주었다.

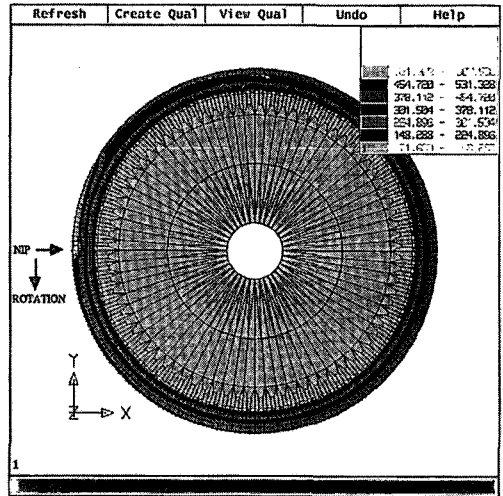


Fig. 11 Von-Mises stress by temperature distribution for cooling type C(material CuCrZr)

Table 3 Results of stress analysis for roll type A

Material	Stress	Von Mises Stress(MPa)		Ratio for Yield Strength	
		Pressure	Temperature	Pressure	Temperature
21CrMoV5.11		111.7	1776.8	0.16	2.54
CuCo/NiBe		111.3	1600.7	0.20	2.91
CuCrZr		111.3	1102.5	0.37	3.56

Table 4 Results of stress analysis for material CuCrZr

Colling Type	Stress	Von Mises Stress (MPa)		Ratio for Yield Strength	
		Pressure	Temperature	Pressure	Temperature
A		111.3	1102.5	0.36	3.56
B		191.5	998.6	0.60	3.22
C		224.4	837.8	0.72	2.70

Table 5 Constitution of finite elements

Roll Type	Node No.	Ele. No.	Ele. Type	Total D.O.F.
A	1058	720	□ 576 △ 144	2020
B	2160	1344	□ 1312 △ 32	4256
C	2511	1722	□ 1476 △ 246	4926

□ : isoparametric linear quadrilateral element

△ : isoparametric linear triangular element

### 3. 결과 및 토론

트윈롤 연속주조 공정에서 롤의 열응력 상태를 알기 위해 먼저 롤의 온도분포를 구하였다. 롤 재료 21CrMoV5.11, CuCo/NiBe, CuCrZr에 대하여 각각 수행하였다. 계산된 정상상태의 온도를 열응력의 계산을 위해 유한요소 모델의 격자점(grid point) 입력 데이터(data)로 주었다. 또 식 (1)과 (2)를 이용하여 롤 압력분포를 구하고 약 3톤(ton)의 힘을 고상화된 부분과 접촉하는 롤의 각종 중립각(neutral angle) 위치의 격자점에 주어 압력에 의한 롤의 응력상태도 해석하였다. 이 부분에서 압연되는 재료는 아주 높은 온도(재료의 고상선 온도)에서 즉, 재료의 전단 항복강도가 급격히 작아진 상태에서 롤과의 부착마찰에 의하여 압연되므로 이에 의한 롤쪽에서의 전단력 영향은 무시할 수 있다.

롤 재료에 따른 응력의 변화를 보기 위하여 롤 냉각 방식 A에 대하여 롤 재료 21CrMoV5.11, CuCo/NiBe, CuCrZr에 대하여 응력 해석을 수행하였고 그 결과를 Table 3에 보였다. 또한 롤 냉각 방식에 따른 응력의 변화를 보기 위하여 롤 재료 CuCrZr에 대하여 롤 냉각방식 A,B,C에 대하여 응

력 해석을 각각 수행하였고 그 결과를 Table 4에 보였다.

계산결과 롤 압력에 의한 응력은 재료의 항복 강도를 넘지 않았다. 반면에 롤의 열에 의한 응력은 모두 재료의 항복강도를 넘었다. 이와 같은 현상이 발생하는 이유는 롤과 용융금속이 접촉하고 있는 부분에서 용융금속으로부터 빼앗은 열이 롤 전체로 전도되지 못하고 국부적으로 집중되기 때문이다. 이러한 현상은 롤의 회전속도를 낮추어서 용융금속과 롤간의 접촉시간을 늘린다하여도 피할 수 없는 현상이다. 이러한 상황에서 롤을 사용한다고 하면 그 수명(roll life)이 짧을 뿐만아니라 롤 표면의 균열 및 표면 파괴에 의하여 제품의 질에 큰 영향을 미친다.

롤의 일부분이 재료의 항복 강도를 넘지 않게 하기 위해서는 그 부분의 온도를 본 계산에서 수행하였던 3가지 재료의 온도보다도 더 낮추어야 한다. 이렇게 하기 위해서는 더 큰 열전도도, 더 큰 비열, 더 큰 항복 강도를 갖는 재료를 사용함과 동시에 스프레이를 통한 롤 냉각을 균일(uniform)하게 하여야 한다. 왜냐하면 롤 표면에서의 더 큰 온도 구배는 더 큰 열응력을 발생 시키기 때문이다. 그러므로 롤 냉각의 위치를 스트립이 롤 사이로 들어가는 입구쪽이나 나오는 출구쪽은 피하여야 한다.

롤을 계속 사용하다보면 롤과 스트립이 접촉하는 부분이 다른 부분에 비하여 높은 열응력을 받게 된다. 이러한 상황은 롤이 회전할 때마다 반복적으로 발생하므로 일종의 피로하중(fatigue load)이라고 할 수 있다. 롤 수명은 이 피로하중의 크기에 반비례한다. 이 롤 수명은 제품의 생산능력(productivity)에 가장 큰 영향을 미친다. 앞부분에서 열응력을 작게하기 위해서 제시한 것은 롤의 수명을 연장시키기 위한 방법이다. 이 열응력을 작게하더라도 롤은 반복적으로 열응력을 받으므로 일정시간 사용

후 교체하여야 한다. 만약 롤 수명이 일정하다면 롤 교체 시간이 제품의 생산능력에 영향을 미치므로 롤 교체 시간을 짧게 하여야 한다. 롤 교체 시간을 짧게하기 위해서는 롤의 설계시 교체가 용이하도록 설계함과 동시에 기존의 압연 공정에서처럼 항상 작업롤(working roll) 옆에 대기롤(stand-by roll)을 두어야 할 것이다.

#### 4. 결론

트윈롤 연속주조 공정의 컴퓨터 시뮬레이션(computer simulation)을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 계산을 수행한 3가지의 롤 재료와 3가지의 롤 냉각 방식에 대하여 롤 압력에 의한 영향은 모두 재료의 항복 강도를 넘지 않았고, 온도에 의한 영향은 모두 항복강도를 넘었다.

(2) 롤 냉각 방식 A에 대하여 온도에 의한 영향은 롤 재료 21CrMoV 5.11이 CuCo/NiBe와 CuCrZr에 비하여 Von Mises 응력과 항복 강도와의 비가 가장 적게 나타났다.

(3) 롤 재료 CuCrZr에 대하여 온도에 의한 영향은 롤 냉각 방식 C가 롤 냉각 방식 A와 B에 비하여 Von Mises 응력과 항복 강도와의 비가 가장 작게 나타났다.

#### 참고문헌

- (1) 이동령, 1985, 소성 가공학, 문운당, pp. 315~349.
- (2) Murty, Y.V. and Adler, R.P.I., 1982, "High-Speed Casting of Metallic Foils by the Double-Roller Quenching Technique," J. of Materials Science 17, pp. 1945~1954.
- (3) Babic, E., Girt, E., Krsnik, R. and Leontic, B., 1970, "Production of large samples of ultra-rapidly quenched alloys of aluminum by means of a rotating mill device," Review of Scientific Instruments, Vol.41, pp.1014~1015.
- (4) Chen, H.S. and Miller, C.E., 1970, "A Rapid Quenching Technique for the Preparation of Thin Uniform Films of Amorphous Solids," Review of Scientific Instruments, Vol.41, pp.1237~1238.
- (5) Lewis, B.G., Poland, I.W. and Davies, H.A., 1977, "Proceeding of the Sheffield International Conference on Solidification and Casting," p. 490.
- (6) Miyazawa, K. and Szekely, J., 1981, "A Mathematical Model of the Splat Cooling Process Using the Twin-Roll Technique," Metallurgical Transaction A, Vol. 12A, pp. 1047~1057.
- (7) Saitoh, T., Hojo, H., Yaguchi, H. and Kang, C.G., 1989, "Two-Dimensional Model for Twin-Roll Continuous Casting," Metallurgical Transaction B, Vol. 20B, pp. 381~390.
- (8) Chakrabarty, J., 1987, "Theory of Plasticity," McGraw-Hill, pp. 574~587.
- (9) William L. Roberts, 1983, "Hot Rolling of Steel," New York : M. Dekker, pp. 649~898.
- (10) Yuen, W.Y.D., 1984, "On the Steady-State Temperature Distribution in a Rotating Cylinder Subject to Heating Over Its Surface," J. of Heat Transfer, Vol. 106, pp. 578~585.
- (11) Patula, E.J., 1981, "Steady-State Temperature Distribution in a Rotating Roll Subject to Surface Heat Fluxes and Convective Cooling," J. of Heat Transfer, Vol. 103, pp. 36~41.
- (12) Williams, R.V. and Boxall, G.M., 1965, "Roll Surface Deterioration in Hot Strip Mills," J. of The Iron and Steel Institute, pp. 369~377.
- (13) Bryant, G.F. and Heslton, M.O., 1982, "Roll-Gap Temperature Models for Hot Mills," Metals Technology, Vol. 9, pp. 469~477.
- (14) Bryant, G.F. and Chiu, T.S.L., 1982, "Simplified Roll-Temperature Model : Convective Cooling," Metals Technology, Vol. 9, pp. 478~484.
- (15) Bryant, G.F. and Chiu, T.S.L., 1982, "Simplified Roll-Temperature Model : Spray Cooling and Stress Effects," Metals Technology, Vol. 9, pp. 485~492.
- (16) Peck, C.F., Monetti, J.M. and Mavis, F.T., 1954, "Temperature Stress in Iron Work Roll," Iron and Steel Engineer, pp. 45~58.
- (17) Cerni, S., Weinstein, A.S. and Zorowski, C.F., 1963, "Temperature and Thermal Stresses in the Rolling of Metal Strip," Iron and Steel Engineer,



- pp. 165~173.
- (18) Samaraserera, I.V. and Brimacombe, J.K., 1979, "The Thermal Field in Continuous-Casting Moulds," *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol. 18, pp. 251~266.
- (19) Kenneth H. Huebner and Earl A. Thornton, 1982, "The Finite Element Method for Engineers," 2nd ed., Wiley, pp. 534~611.
- (20) Patankar, S. V., 1979, "A Calculation Procedure for Two-Dimensional Elliptic Situations," *Num. Heat Transfer*, Vol. 2