

<論 文>

# 용탕직접압연공정의 초기조건예측 및 냉각로울 설계

강충길\* · 김영도\*\*

(1995년 3월 24일 접수)

## A Cooling Roll Design and Prediction of Initial Conditions for Direct Rolling Process of Molten Metal

Chung-Gil Kang and Young-Do Kim

### Abstract

Rolling force in the direct rolling(or twin-roll strip continuous casting) process of semi-solid material has been computed using rigid-viscoplastic finite element method. Temperature distributions for calculations of rolling force and roll deformation are obtained from thermofluid analysis. Three dimensional roll deformation analysis has also been performed by using commercial package ANSYS. From the results, behavior of metal flow, rolling force and roll deformation have been investigated according to the process conditions of semi-solid direct rolling.

**Key Words :** Direct Rolling(직접압연), Twin-roll Strip Continuous Casting(쌍로울 연속주조), Semi-solid Metal(반용융 금속), Rigid-Viscoplastic Finite Element Method(강점소성 유한요소법)

———— 기 호 설 명 ————

$C(T)$  : 계수

$f_s$  : 고상율

$f_x, f_y$  : 각각  $x$ 와  $y$ 방향으로 절점력

$F$  : 표면마찰력(traction force)

$H$  : 용탕면에서 로울출구까지 거리

$He$  : 응고완료점에서 로울출구까지 거리

$Ho$  : 로울출구간격의 절반

$K$  : 벌칙상수

$m(T)$  : 변형률속도민감성지수

$n$  : 로울회전수

$P$  : 로울의 단위폭당 압하력

$S$  : 면

$T$  : 온도

$T_L$  : 액상선온도

$TS$  : 고상선온도

$u, v$  : 각각  $x$ 와  $y$ 방향으로의 속도성분

$V$  : 체적

$Vr$  : 로울의 접선방향 선속도

$\dot{\epsilon}$  : 변형률속도

$\dot{\epsilon}_v$  : 체적변형률속도

\*부산대학교 정밀기계공학과, 정밀정형 및 금형가공연구소

\*\*부산대학교 기계기술연구소

- $\sigma$  : 응력
- $\theta$  : 용탕과 로울의 접촉각
- $\omega$  : 로울의 각속도

### 1. 서 론

직접압연법(혹은 쌍로울식 연속주조법)은 용탕으로부터 1차가공공정에 의해 두께 1~10 mm의 판재를 제조할 수 있는 판재성형에 있어서 대표적인 정형가공법이라 할 수 있다. 기존의 판재성형법에 있어서는 두께 200~250 mm 정도의 슬래브(slab)로부터 열간압연과 냉간압연공정을 통하여 수 mm의 판재로 성형하게 된다. 그러나 직접압연법에서는 열간압연공정을 생략하고 냉간압연공정만으로 소비자가 요구하는 두께의 판재를 생산할 수 있기 때문에 공정생략에 따른 원가절감, 에너지절감 및 생산성향상 등과 같은 효과를 얻을 수 있다. 또한 재질면에서는 직접압연에 사용되는 냉각로울의 냉각효과에 의하여 용탕이 급냉 응고되어 수지상정 및 편석의 감소를 기대할 수 있어서 판재의 기계적 성질을 향상시킬 수 있다.

직접압연에 관한 연구의 대부분은 용융상태의 용탕을 회전하는 로울사이에 주입하여 두께가 1~10 mm 이내의 판재를 제조하는 연구가 대부분이다.<sup>(1~3)</sup> 직접압연 공정의 문제점으로는 로울측면에서의 용탕유출로 인한 조업정지, 폭방향의 재질불균일, 로울변형으로 인한 판재두께의 불균일 및 로울수명 등이 문제가 되고 있다. 따라서 최근에는 액상선온도 이상의 용탕을 회전하는 로울사이에 주입하는 것이 아니고, 외부에서 일정한 고상율로 제어한 후 회전하는 로울사이에 재료를 주입하여 고속으로 판재를 제조하는 공정이 시도되고 있다.

이상과 같은 방법으로 판재를 제조할 때 응고초기에는 로울의 온도상태가 비정상상태이기 때문에 소재로부터 연속적으로 판재를 제조하고 조업조건을 안정화를 가능한

빨리 유지하기 위해서는 응고완료점이 일정한 위치에 생성되도록 로울사이의 간격을 제어하여야 한다.

액상에 고상이 균일하게 분포하는 반응용금속을 이용한 가공법의 잇점으로는 응고과 진행되는 반응용상태에서 교반시킴으로써 응고 중에 성장하는 수지상정을 파괴하여 비수지상정조직을 얻을 수 있으며, 또한 편석을 감소시킬 수 있다. 주조법에 비하여 낮은 온도에서 가공을 하므로 금형의 수명연장은 물론 주입온도에서 응고까지 온도범위가 작아 응고시간이 짧으므로 고속으로 로울을 회전시켜야 하며, 따라서 생산성을 향상시킬 수 있다.<sup>(4~6)</sup> 만일 이와 같은 반응용금속을 이용한 가공법에서 얻을 수 있는 장점을 직접압연법과 결합한다면, 판재의 기계적 성질을 향상시킬 수 있을 뿐 아니라 냉각로울의 수명도 연장시킬 수 있을 것이다. 그러나 현재까지 직접압연법에 있어서 공정변수의 결정 및 고온에서 장시간 견딜 수 있는 냉각로울의 설계 등과 같은 공정변수의 제어 및 압연로울설계의 문제가 해결되지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 로울회전수와 고상율이 판재의 성형가능성에 미치는 영향을 파악하기 위해 수치해석을 통하여 판재제조가 가능한 로울간격의 제어조건을 정량적으로 구하였다. 또한 강점소성 유한요소법을 이용하여 2차원 평면변형률문제에 직접압연공정을 모델링하여 재료의 유동 및 압하력을 계산하고, 계산된 로울의 온도분포<sup>(7)</sup>와 압하력을 경계조건으로 하여 로울의 열응력을 3차원 탄소성해석을 통하여 예측하였다.

### 2. 강점소성 유한요소 압연해석

Fig. 1은 반응용금속을 이용한 직접압연공정을 개략적으로 나타내고 있다. 장치의 구성은 크게 반응용금속의 온도를 제어하고 교반하는 전기로 및 교반장치와 두께의 회

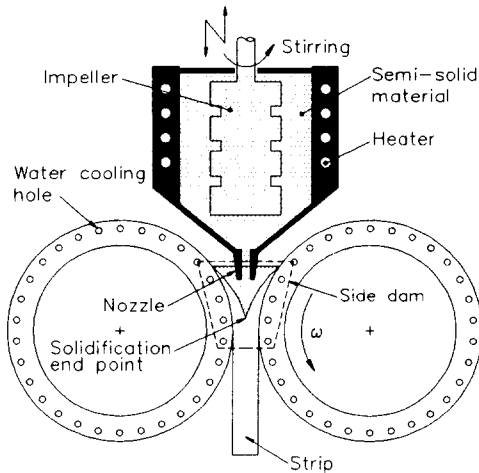


Fig. 1 Schematic representation of direct rolling process

전하는 냉각로울로 구성된다. 교반장치의 역할은 금속이 응고되는 동안 성장하는 수지상정을 파괴하고 액상에 고상이 균일하게 분포하도록 한다. 직접압연공정에서 판재의 성형가능성은 두개의 로울표면에 성장하는 응고셀이 만나는 응고완료점의 위치에 좌우된다. 응고완료점으로부터 로울출구까지는 열간압연으로 가정할 수 있다. 따라서 응고완료점이 로울출구로부터 지나치게 상류에 위치하면 압하율이 크게 되어 과대압하력이 작용하게 되며, 과대압하력은 로울에 심한 변형을 야기시키거나 혹은 과도할 경우 전공정의 정지를 가져오게 된다. 반대로 응고완료점이 너무 로울출구쪽에 위치하거나 응고완료점이 생성되지 않는 경우에는 응고셀

이 결합되어 판재로 성형되지 못하고 갈라지는 브레이크아웃(break-out)이나 혹은 반응용상태로 로울을 빠져 나오게 된다. 따라서 조업에서 있어서는 작업초기에 더미판재(dummy sheet)를 사용하여 제조하는 판재와 결합하여 판재의 이송을 제어하면서 초기응고를 유도하는 방법이 있고, 또한 초기에 로울간격을 변화시켜 성형하고자 하는 판재두께에 도달할 때까지 응고완료점을 제어하는 방법이 있다. Fig. 2(a), (b)는 응고완료점의 위치를 로울간격으로 제어할 경우에 있어서 로울간격의 변화를 나타내고 있다. (a)는 초기상태로서 응고셀의 성장이 작아 응고완료점이 생성되지 못하거나 너무 출구쪽에 위치하기 때문에 로울간격을 좁혀서 응고완료점이 적절한 위치에 생성되도록 하여 점차 정상상태에 도달하게 되면 (b)와 같이 로울간격을 넓혀서 성형하고자 하는 판재두께로 로울간격을 제어하게 된다. 따라서 응고완료점을 정량적으로 예측하여야 초기에 적절한 공정변수를 결정할 수 있다.

반용용상태의 금속에 가공력을 가하게 되면 고상의 밀도가 높아지게 되며 반면 고상의 밀도가 높아진 만큼 액상은 자유면으로 빠져나가게 되므로 압축성재료로 가정하여 해석을 행하는 것이 일반적이다.<sup>(8,9)</sup> 그러나 반응용금속은 변형저항이 적고 특히 직접압연공정에서는 대부분의 압하력은 완전 고상상태인 두개의 응고셀이 만나는 응고완료점 이후 압연변형부분에 작용함을 예측할 수

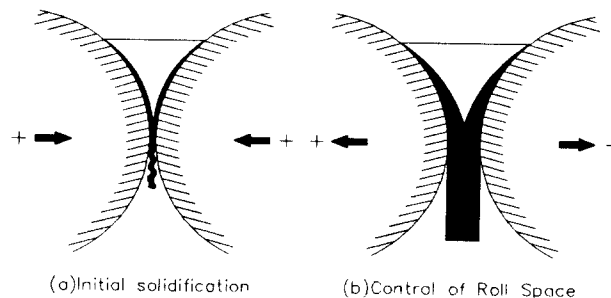


Fig. 2 Control of roll nip gap for (a) initial state and (b) steady state

있으므로 비압축성재료로 가정하여 다음과 같은 일반적인 강점소성 지배방정식을 사용하였다.<sup>(10)</sup>

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_F} F_i \delta u_i dS = 0 \quad (1)$$

식(1)은 비선형방정식이므로 Newton-Raphson법을 이용하여 반복적으로 계산하여 해를 구하였으며, 계산을 위하여 다음과 같이 가정을 하였다.

(1) 직접압연은 2차원 평면변형률문제에 취급하며, 정상상태의 해석을 행한다.

(2) 로울의 열팽창 등에 의한 기하학적변형은 없는 것으로 가정한다.

(3) 반응용금속을 비압축성재료로 취급한다.

(4) 로울과 응고셀 사이에 마찰은 고착마찰상태로 가정한다.

본 연구에서는 직접압연재료를 AISI 304 스테인리스강으로 하였다. 두개의 로울 사이에 채워지는 직접압연로울과 용탕의 온도분포 또는 유동을 고려한 2차원 비정상상태의 응고해석결과로부터 계산된 온도분포를 사용하였다.<sup>(7)</sup>

유동응력과 변형률속도의 관계는 다음과 같이 온도의 함수로 하였다.<sup>(11)</sup>

$$\bar{\sigma} = C(T) \bar{\epsilon}^{m(T)} \quad (2)$$

$$T_s \geq T \text{ 일 때}$$

$$C(T) = (2.424E-5) T^2 - 0.0795 T + 63.84 (\text{kgf/mm}^2)$$

$$m(T) = -2.3675E-9 T^3 + 7.1523E-$$

Table 1 Calculation conditions of direct rolling

Parameters	Values
Roll diameter	750(mm)
Roll nip gap	3.2(mm)
Roll width	350(mm)
Roll material	Cu alloy(sleeve두께 55 mm) Carbon steel(shaft)
Contact angle	30(degree)
Frictional shear factor	1(Sticking)
Solid fraction	0, 15 and 30(%)

\* 고상율 0%는 액상선온도

$$6 T^2 - 6.701E-3 T + 2.11135$$

$T_s < T < T_L$  일 때

$$C(T) = -0.06204 \times \frac{T - T_s}{T_L - T_s} + 0.06205 (\text{kgf/mm}^2)$$

$$m(T) = 0.25$$

$T > T_L$  일 때

$$C(T) = 1.0E-5 (\text{kgf/mm}^2)$$

$$m(T) = 0.25$$

여기서, AISI 304 스테인리스강의 액상선 및 고상선온도는 각각  $T_L = 1451^\circ\text{C}$  과  $T_s = 1399^\circ\text{C}$  이다. Table 1은 계산에 사용된 조건을 나타내고 있다.

Fig. 3은 압연해석을 위한 격자구성 및 경계조건을 나타내고 있다. 직접압연공정은 대칭이므로 반만을 해석대상으로 하였다. 로울과 접촉하는 면은 고착마찰로 가정하여 로울표면의 회전속도와 같은 것으로 하였다. 요소는 사각형요소를 사용하였고, 요소수와 절점수는 각각 3705개와 3840개이다.

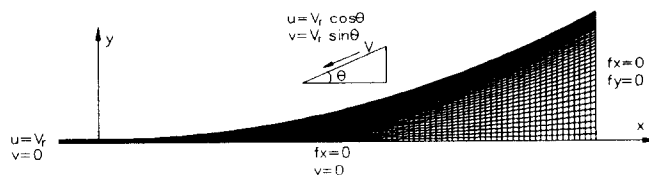


Fig. 3 Mesh system and boundary conditions for rigid-viscoplastic finite element analysis of direct rolling

### 3. 로울변형해석

로울의 3차원 열탄소성 응력해석을 위하여 상용구조해석 유한요소패키지 ANSYS를 사용하였다. 냉각로울은 외부로부터 열하중 및 압하력을 받아 변형이 발생하게 된다. 2차원으로 계산된 로울의 온도분포 및 압하력을 3차원으로 확장하기 위하여 로울의 폭방향으로 동일하게 분포하는 것으로 가정한다. 로울의 온도분포를 계산하기 위한 격자와 로울의 열응력해석을 위해 분할한 격자가 일치하지 않으므로 보간법을 사용하여 로울의 열응력해석을 위한 모델의 절점온도로 변환하였다. 계산된 압하력은 로울의 면압(surface pressure)으로 적용하였다.

Fig. 4(a), (b)는 계산된 로울의 온도분포를 각각 (a)는 고상율  $f_s=0\%$ , 직접압연

속도  $\omega=2 \text{ rad/s}$ 이고, (b)  $f_s=30\%$ ,  $\omega=5 \text{ rad/s}$ 이고 로울이 10회전하였을 때의 결과이다. 결과를 보면 고상율을 0%에서 30%로 증가시키므로써 로울의 최대온도가  $105^\circ\text{C}$  정도 감소하였다. 로울에 채워지는 반응용금속으로부터 유입되는 열량의 대부분은 로울표면 주위에 있는 냉각수홀을 통하여 빠져나가게 되어 로울내부쪽으로 열유입은 거의 없음을 알 수 있다. 따라서 로울 표면에 사용되는 스리브(sleeve)에서는 온도구배가 크기 때문에 물성치를 온도의 함수로 하여야 좀더 정확한 결과를 얻을 수 있다. 스리브재료인 Cu합금의 물성치를 구하기 위하여 온도를 변화시키며 단축인장시험을 하여 탄성계수와 소성계수를 구하였다. 인장시험은 10톤 MTS로 하였다. Table 2는 단축인장시험결과를 나타내고 있다. 탄성계수의 경우 온도증가에 따른 값의 변화가 크지 않으나, 소성계수의 경우에는 온도

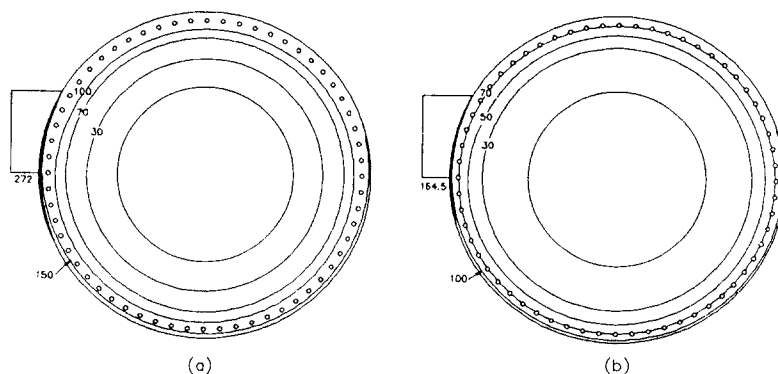


Fig. 4 Temperature distributions for (a)  $f_s=0\%$ ,  $\omega=2 \text{ rad/s}$  and (b)  $f_s=30\%$ ,  $\omega=5 \text{ rad/s}$  after 10 revolutions(unit :  $^\circ\text{C}$ )

Table 2 Results of uniaxial tensile test of cu alloy

Temperature ( $^\circ\text{C}$ )	0.2% offset yield stress(kgf/mm <sup>2</sup> )	Elastic modulus (kgf/mm <sup>2</sup> )	Plastic modulus (kgf/mm <sup>2</sup> )
R.T	46.18	13554	117.4
100	44.65	12406	91.7
200	42.92	11620	66.1
300	37.72	10956	40.6
400	37.61	9487	21.0

**Table 3** Mechanical properties of roll material

Parameters	Cu alloy	Carbon steel
Elastic modulus(kgf/mm <sup>2</sup> )	See Table 2	20800
Poisson's ratio	0.3	0.3
Thermal expansion(mm/mm°C)	0.185E-4	0.111E-4
Density(kgf/mm <sup>3</sup> )	0.888E-5	0.761E-5

상승에 따라 값이 현저하게 감소함을 알 수 있다. Table 3은 Cu합금의 탄성계수와 소성계수외의 물성치 및 로울축부 재료인 탄소강의 물성치를 나타내고 있다.

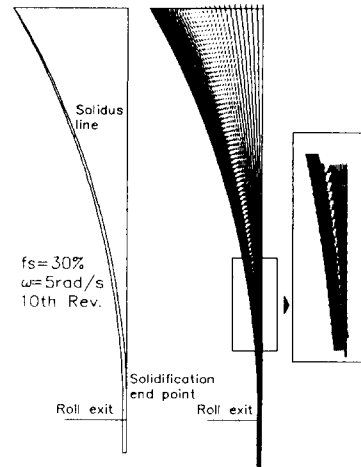
로울변형해석은 판재성형이 가능한 조건 즉 응고완료점의 위치가 적절한  $f_s=0\%$ ,  $\omega=2$  rad/s와  $f_s=30\%$ ,  $\omega=5$  rad/s에 대하여 행하였다. 이때  $f_s=0\%$ ,  $\omega=2$  rad/s인 경우는 로울이 10회전했을 때의 해석만을 행하고,  $f_s=30\%$ ,  $\omega=5$  rad/s인 경우는 로울회전이 2, 4, 6, 8, 10회전일 때에 대하여 그 변화를 예측하였다. 로울의 형상을 보면 로울의 폭방향으로는 대칭이므로 그 반만을 해석모델로 하였다. 요소는 6면체요소(hexahedral element)를 사용하여 요소수와 절점수를 각각 8070개와 11880개로 분할하였다.

**4. 결과 및 고찰**

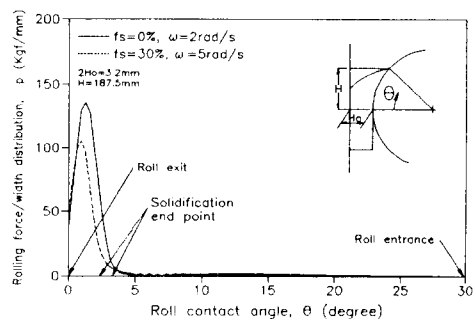
Fig. 5는  $f_s=30\%$ ,  $\omega=5$  rad/s이고 로울이 10회전일 때 응고셸프로파일(solidified shell profile)과 강점소성 압연해석에서 수렴된 속도장을 나타내고 있다. 이때 응고완료점의 위치는 로울출구로부터 14.3 mm에 위치한다. 로울표면에 생성되는 응고셸과 응고셸부근의 반응용금속은 로울출구쪽으로 유동을 하지만 응고완료점부근에서 반응용금속은 변형저항이 작기 때문에 로울회전에 의한 단면감소에 의해 로울출구로 빠져나가지 못하고 상류로 돌아 올라가는 유동특성을 보인다.

Fig. 6는  $f_s=0\%$ ,  $\omega=2$  rad/s 과  $f_s=$

30%,  $\omega=5$  rad/s이고 로울이 10회전하였을 때의 온도장을 사용하여 계산한 단위폭당 압하력분포를 보이고 있다. 내부에 반응용 상태로 존재하는 경우 거의 압하력이 작용하지 않으며 대부분의 압하력은 응고완료점 이후 로울출구까지 압연영역에 작용함을 알 수 있다.  $f_s=30\%$ ,  $\omega=5$  rad/s의 경우가 응고완료점이 더 로울출구쪽에 가깝게 위치



**Fig. 5** Solidified shell profile and converged velocity field for  $f_s=30\%$  and  $\omega=5$  rad/s



**Fig. 6** Rolling force/width distributions along the contact angle

하기 때문에 압하율이 작아지므로 또한 압하력도 작은 값을 가진다.

Fig. 7은  $\omega=2$  rad/s이고 로울이 10회전일 때  $f_s=0, 15, 30\%$ 인 경우 응고완료점의 위치와 로울의 단위폭당 압하력을 비교하여 나타내었다. 일정한 속도일 때 주입하는 재료의 고상율이 증가할 수록 응고완료점의 위치가 증가하는 결과를 보인다. 응고완료점의 증가에 따라 압하율도 커지게 되어 압하력도 비례적으로 증가함을 알 수 있다.  $\omega=2$  rad/s인 경우  $f_s=15$ 와  $30\%$ 일 때 압하율도 크고 또한 압하력도 과도하게 작용하기 때문에 판재성형이 불가능한 조건으로 생각된다. 따라서 고상율  $f_s=15$ 와  $30\%$ 인 경우에는 로울의 회전속도를 증가시켜야만 응고완료점의 위치를 로울출구쪽으로 옮길 수 있다.

길 수 있다.

Fig. 8은  $f_s=30\%$ 이고  $\omega=5$  rad/s으로 하였을 때 로울회전에 따른 응고완료점의 위치 및 단위폭당 압하력의 변화를 보이고 있다. 로울회전이 시작되어 4회전까지는 응고완료점이 급격히 증가를 하다가 6회전이후에는 거의 정상상태를 유지하게 되고, 또한 압하력도 비례적인 결과를 보인다. 이때 2회전까지는 응고완료점이 생성되지 못하여 응고셸이 결합되지 않는 브레이크아웃(breakout)결함이 생기게 됨을 예측할 수 있다.

Fig. 9(a), (b)는 각각  $f_s=0\%$ ,  $\omega=2$  rad/s와  $f_s=30\%$ ,  $\omega=5$  rad/s일 때 응고완료점을 일정하게 유지시키기 위한 로울간격의 변화를 보이고 있다. 응고완료점의 높이는

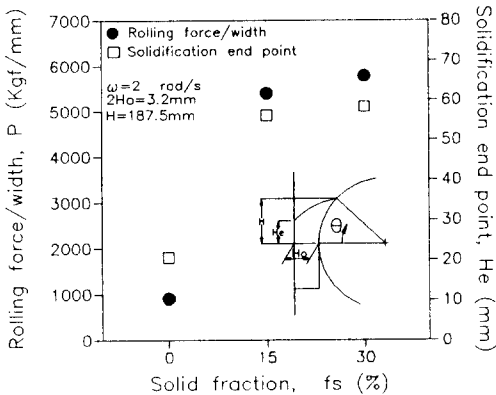


Fig. 7 Comparison of rolling force/width and location of solidification end point for solid fraction

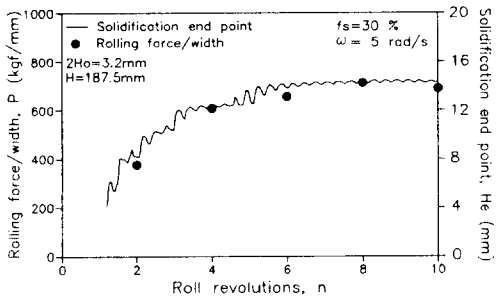


Fig. 8 Comparison of rolling force/width and locations of solidification end point according to roll rotation

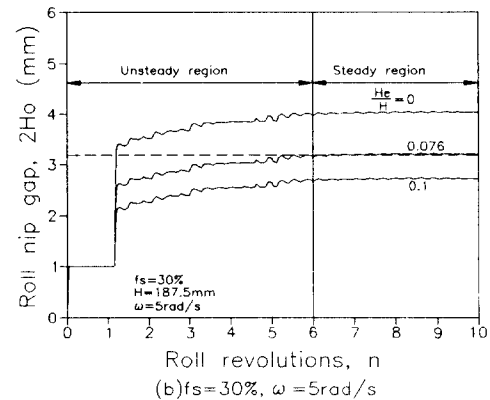
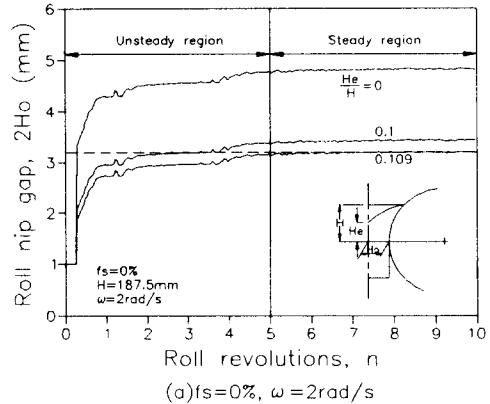


Fig. 9 Control of roll nip gap to maintain the constant solidification end point for (a)  $f_s=0\%$ ,  $\omega=2$  rad/s and (b)  $f_s=30\%$ ,  $\omega=5$  rad/s

계산된 응고셀의 프로파일(profile)로부터 구하였다. 이때 응고완료점이 생성되지 못하는 곳에서 최소로울간격을  $2Ho=1\text{ mm}$ 로 가정하였다. (a)의 경우  $2Ho=3.2\text{ mm}$ 의 판재를 성형할 경우 5회전까지  $He/H=0.109$ 로 유지시키기 위해서는 초기  $2Ho=1\text{ mm}$ 부터 점차 로울간격을 넓혀 제어해야 하며, 5회전이후 정상상태에서  $He/H=0.109$ 를 유지하게 된다. 또한  $He/H=0.1$ 정도 범위에서는 판재성형이 가능하므로  $f_s=0\%$ ,  $\omega=2\text{ rad/s}$ 의 조건에서 두께  $3.4\sim 4\text{ mm}$  정도의 판재성형이 가능함을 예측할 수 있다. (b)의 경우에는 로울이 6회전할때까지 로울간격을 변화시켜 응고완료점의 위치를 제어해야 하며 6회전이후에는 거의 정상상태에도달하게 된다. 이 경우에도 판재성형이 가능한 응고완료점의 위치를  $He/H=0.1$ 로 본다면  $f_s=30\%$ ,  $\omega=5\text{ rad/s}$ 일때 두께  $2.5\sim 3.5\text{ mm}$  정도의 판재성형도 가능함을 알 수 있다.

Fig. 10은  $f_s=0\%$ ,  $\omega=2\text{ rad/s}$ 이고 로울이 10회전했을 때 열하중인 온도분포만을 고려한 경우와 로울온도와 동시에 압하력을 고려한 경우에 있어서 로울의 열응력해석으

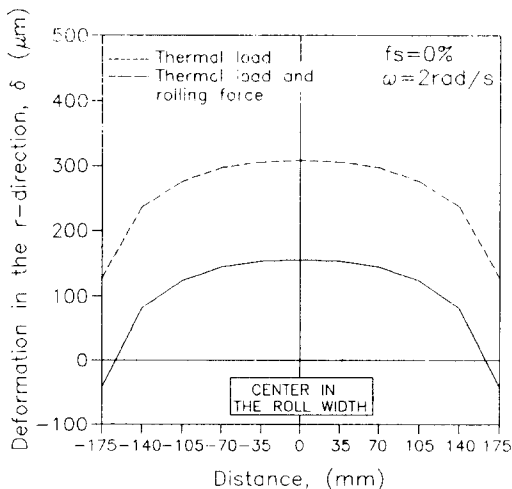


Fig. 10 Comparison of roll expansion at roll nip considering thermal load only, and thermal load and rolling force simultaneously

로부터 계산한 로울출구에서의 로울폭방향으로의 변형량분포를 보이고 있다. 열하중만 고려한 경우 열팽창에 의해 로울크라운이 발생하게 되며 이때 변형량분포를 보면 로울의 폭방향중 중앙에서 최대가 되어  $300\ \mu\text{m}$  정도 팽창하게 된다. 그러나 열하중과 동시에 압하력이 작용하면 압하력은 로울에 대해 압축력이므로 로울의 팽창을 구속하게 되어 로울의 변형이 감소된다. 이 경우에도 로울폭방향중 중앙에서 최대가 되어  $150\ \mu\text{m}$  정도 외부로 팽창하는 결과를 보인다. 이 결과로부터 로울에 작용하는 외력중에서 열하중이 압하력에 비해 로울변형에 더 크게 영향을 미침을 알 수 있다. 이와 같은 로울변형은 성형하는 판재의 두께에 영향을 미치게 되는데 변화가 작은 경우에는 2차가공인 냉간압연공정 중 사상압연공정에서 칫수세어가 가능하다. 그러나 로울의 팽창량이 큰 경우에는 로울의 설계시에 로울의 변형량을 고려하여 로울의 칫수를 보정하여야 한다.

Fig. 11은  $f_s=30\%$ ,  $\omega=5\text{ rad/s}$ 이고 로울이 10회전했을 때 로울의 반경방향으로 변형량분포를 보이고 있다. 압연영역에서는 최대  $62\ \mu\text{m}$  정도의 팽창량을 유지하고 있으며, 압연영역을 벗어난 후에는 압하력의 영향이 없기 때문에 팽창량이 증가하여 최대  $193\ \mu\text{m}$  정도 팽창하는 결과를 보인다. 그러나 판재의 두께칫수에 영향을 미치는 부분은 압연영역이므로 압연영역의 로울변형량을 기준으로 하여 로울의 칫수를 보정하여야 할 것이다.

Fig. 12는  $f_s=30\%$ ,  $\omega=5\text{ rad/s}$ 이고 로울이 10회전했을 때 축방향으로의 응력분포인 굽힘응력분포를 나타내고 있다. 압연영역에서는 압축응력으로 작용하게 되고 로울의 반대편에서는 인장응력으로 작용하게 된다. 이와 같은 응력상태는 로울회전에 의하여 주기적으로 반복되므로 로울의 파단을 야기시키게 된다. 만일 로울표면에 미소한 파이



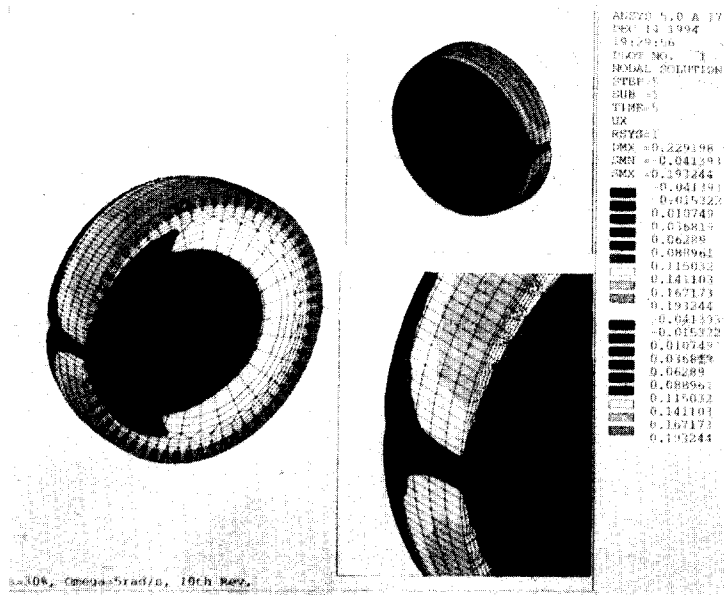


Fig. 11 Roll deformation in the r-direction for  $f_s=30\%$  and  $\omega = 5$  rad/s after 10 revolutions of roll(unit : mm)

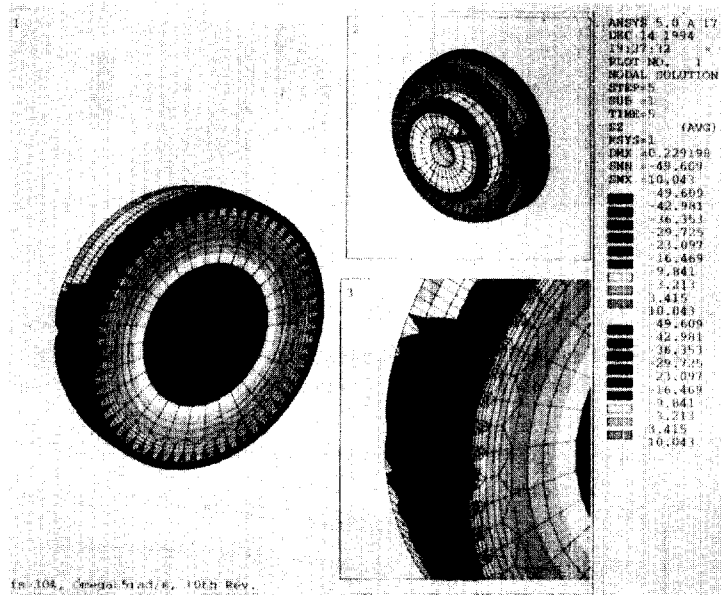


Fig. 12 Bending stress distributions for  $f_s=30\%$  and  $\omega = 5$  rad/s after 10 revolutions of roll(unit : kgf/mm<sup>2</sup>)

어크랙(fire crack)이 발생할 경우 로울회전에 의한 응력상태의 변화(압축↔인장)로 인해 크랙이 진전되어 로울파단이 발생할 수

있다.<sup>(12)</sup> 따라서 로울의 열하중을 낮추고, 또한 응고완료점을 되도록 로울출구쪽에 위치시켜 압하력을 작게 하여야 만 로울수명

을 연장시킬 수 있다.

Fig. 13은  $f_s=30\%$ ,  $\omega=5 \text{ rad/s}$ 이고 로울이 10회전했을 때 상당응력분포를 나타내고 있다. 로울사이에 채워지는 반응용금속과 접촉하는 면에서 응력이 큰 값을 보이며 이때 최대상당응력은  $39 \text{ kgf/mm}^2$  정도이다. Table 2에서  $200^\circ\text{C}$ 에서 Cu합금의 0.2% 오프셋(offset) 항복강도가  $43 \text{ kgf/mm}^2$  정도이므로 로울에 심한 소성변형을 발생하지는 않을 것으로 생각된다.

Fig. 14는  $f_s=30\%$ ,  $\omega=5 \text{ rad/s}$ 일 때 로울의 회전에 따른 로울의 최대온도, 최대굽힘응력 및 최대상당응력의 변화를 비교하여 나타내었다. 최대로울온도의 변화와 거의 비례적으로 굽힘응력과 상당응력이 변화함을 알 수 있다. 변화량은 로울의 6회전이후에 거의 정상상태를 유지함을 알 수 있다.  $f_s=0\%$ ,  $\omega=2 \text{ rad/s}$ 과 비교하여 보면 로울이 10회전했을때  $f_s=0\%$ ,  $\omega=2 \text{ rad/s}$ 인 경우에는 굽힘응력이  $-60 \text{ kgf/mm}^2$ , 상당응

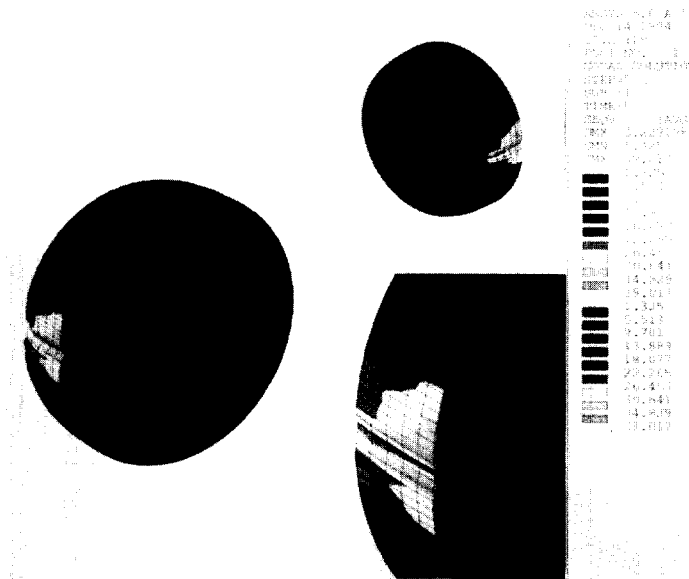


Fig. 13 Equivalent stress distributions for  $f_s=30\%$  and  $\omega=5 \text{ rad/s}$  after 10 revolutions of roll(unit :  $\text{kgf/mm}^2$ )

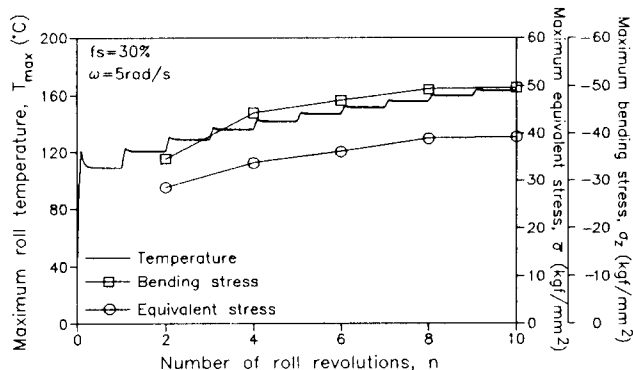


Fig. 14 Comparison of maximum equivalent stress and maximum bending stress according to roll rotation for  $f_s=30\%$  and  $\omega=5 \text{ rad/s}$

력 51 kgf/mm<sup>2</sup>이고  $f_s=30\%$ ,  $\omega=5$  rad/s 인 경우에 있어서는 굽힘응력이 -50 kgf/mm<sup>2</sup>, 상당응력이 39 kgf/mm<sup>2</sup> 정도로서 고상울을 30%로 증가시키므로써 굽힘응력 및 상당응력 모두 10 kgf/mm<sup>2</sup> 정도 감소되었다.

## 5. 결 론

반용융금속을 이용한 직접압연공정에 대하여 2차원 강점소성 유한요소압연해석과 로울의 3차원 열탄소성 응력해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 압하력의 대부분은 응고완료점 이후 로울출구까지 압연영역에 작용하며, 응고완료점의 위치변화와 비례적으로 압하력이 변화하는 결과를 보였다. 따라서 응고완료점을 로울출구 가까이 위치시키므로써 로울에 작용하는 압하력을 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

(2) 고상율  $f_s=15\%$ 와 30%, 로울각속도 = 2 rad/s인 경우에는 과대압하력의 작용으로 판재성형이 불가능할 것으로 예측되며,  $f_s=30\%$ 인 경우에는 로울각속도 = 5 rad/s가 판재성형이 가능한 조건이다.

(3) 로울의 열응력해석으로부터 열하중이 압하력보다 로울변형에 더 크게 영향을 미침을 알 수 있다. 고상율을 30%로 증가시킴에 의해 굽힘응력 및 상당응력을 모두 10 kgf/mm<sup>2</sup> 정도 감소시킬 수 있었다. 따라서 반용융금속을 이용하여 직접압연을 행하게 되면 로울수명의 연장 및 생산성 향상을 기대할 수 있다.

## 후 기

이 논문은 1994년도 교육부 학술연구조성비(기계공학분야)에 의해 연구되었음(ME94-E-04)

## 참고문헌

- (1) Yanagi, K. et. al., 1994, "Development of Twin-Drum Strip Caster for Stainless Steel", 2nd European Continuous Casting Conference, Germany, Vol. 1, pp. 423 ~ 427.
- (2) Tonelli, R. Sartini, L., Capotosti, R. and Contaretti, A., 1994, "Recent Developments of Twin-roll Strip Casting Process at AST TERNI Steelworks", 2nd European Continuous Casting Conference, Germany, Vol.1, pp. 426 ~ 434.
- (3) Saito, Y., 1994, "Production of Aluminum-Silicon Alloy Sheet by Means of Melt Direct Rolling", 3rd Int. Conf. of Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, Japan, pp. 369 ~ 378.
- (4) Yoshida, N., Murata, Y., Morita, T. and Yoshida, C., 1994, "Strip Rheocasting of High Melting Point Alloys", 3rd Int. Conf. of Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, Japan, pp. 337 ~ 346.
- (5) Flemings, M. C., Riek, R. G. and Young, K. P., 1976, "Rheocasting", Mat. Sci. and Eng., Vol. 25, pp. 103 ~ 117.
- (6) Flemings, M. C., 1991, "Behavior of Metal Alloys in the Semi-Solid State", Metall. Trans., 22A, pp. 957 ~ 981.
- (7) Kim, Y. D., Kang, C. G. and Ha, M. Y., 1994, "A FDM/FEM Coupled Thermo-fluid Analysis in Twin-roll Strip Continuous Casting Process using Semi-Solid Materials", 3rd Int. Conf. of Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, Japan, pp. 347 ~ 356.
- (8) Shima, S. and Oyane, M., 1976, "Plasticity Theory for Porous Metals", Int. J. Mech. Sci., 18, pp. 285 ~ 291.

- (9) Toyoshima, S. and Takahashi, Y., 1991, "A Numerical Simulation of Forming Processes for Semi-Solid Materials", ISIJ, pp. 577~582.
- (10) Kobayashi, S., Oh, S. I. and Altan, T., 1989, Metal Forming and the Finite-Element Method, Oxford University Press.
- (11) Altan, T., Oh, S. I. and Gegel, H. L., 1983, Metal Forming - Fundamentals and Applications, American Society for Metals, p. 63.
- (12) Saito, M., Ota, S. and Toyoda, H., 1988, "Improvement of Resistance to Breakage of Hot Work Roll with High Rolling Load on the Basis of Fracture Mechanical," Tetsu-to-Hagane, p. 1.