

Semi-solid 재료의 직접압연 공정해석

김 영 도* (부산대 기계기술연구소), 강 충 길 (부산대 공대)

ABSTRACT

A computer program has been developed for analyzing the two-dimensional unsteady conservation equations for transport phenomena in the pool region of direct rolling with semi-solid metal in order to describe the velocity and temperature, and the solidification process of the semi-solid metal. The energy equations of cooling roll is solved simultaneously with semi-solid metal in order consider heat transfer through the cooling roll. The FDM(finite difference method) and FEM(finite element method) are used in region of pool and roll, respectively, to reduce computing time and to improve accuracy of calculation. In the present study, influence of solid fraction and casting speed are investigated in a point of view of strip formability with semi-solid metal.

1. 서론

직접압연법은 1회의 공정에서 용탕으로부터 두께 1-5 mm 정도의 판재를 제조할 수 있기 때문에 공정의 대폭적인 생략이 가능하며 따라서 설비의 간소화 및 에너지절감의 잇점이 있다.⁽¹⁾ 재료적인 측면에 있어서는 냉각로울의 담금질효과에 의하여 판재의 기계적 성질을 향상시킬 수 있으며, 비정질상의 아모퍼스(amorphous)조직을 갖는 박편의 제조가 가능하다.⁽²⁾

일반적인 직접압연공정의 연구대상은 압연재료의 온도를 액상선 온도 이상으로 가열하여 완전 용융상태로 주입하는 것이 대부분이다. 그러나 재료를 반응용융상태로 하여 주입할 경우, 재료를 주입하기 전에 고액공존범위의 온도로 제어하는 동안 교반에 의하여 용고시에 성장하는 수지상정조직을 파괴함으로써 조직이 미세하고 균일한 판재를 제조할 수 있다.^(3,4) 고액공존영역에서는 고상과 액상이 공존하며 수지상정이 성장하는데 이때 교반을 하게 되면 수지상정이 파괴되어 균일한 분포의 구상조직을 갖는 슬러리(slurry)를 제조할 수 있다. 이러한 반응용융속을 이용하여 직접압연을 행한다면 냉각로울의 급냉효과에 의해 미세한 조직을 갖는 판재를 제조할 수 있으므로 판재의 기계적성질을 향상시킬 수 있다.

직접압연에 사용되는 냉각로울은 고온인 용탕과 접촉을 하므로 열피로가 누적되며, 또한 가열과 냉각이 반복적으로 작용하기 때문에 이러한 열피로 사이클은 로울에 열크랙을 발생시키는 원인이 된다. 따라서 주입하는 재료의 온도를 낮춤으로써 로울에 작용하는 열피로를 감소시킬 수 있다. 그러나 급속은 용고가 진행될 수록 접성이 증가하게 되므로 유동성이 저하되어 노즐을 통해 균일하게 주입하기 곤란한 문제가 있다.⁽⁵⁾

따라서 공정의 복잡성 때문에 우선 수치해석을 통하여 반응용융속을 이용한 직접압연의 가능성을 예측해보아야 한다. 또한 수치해석을 통하여 재료의 고상율, 압연속도, 로울간격, 용탕깊이 등과 같은 공정변수의 관계를 파악하여야만 적절한 초기 압연조건을 결정할 수 있다.

로울사이에 채워지는 반응용융속이 용고가 진행되면 고액공존상과 완전한 고상이 존재하게 된다. 고상은 로울의 최전과

니분이 로울출구방향으로 이동하지만, 고액공존상은 점성을 갖는 유체로써 내부에 유동장을 형성하게 된다. 고액공존상은 고상과 액상이 동시에 존재하여 고상사이로 액상이 유동하는 통기성체로 볼 수 있다.⁽⁶⁾ 그리고 급속은 용융상태에서 용고가 진행되면 용고잠열을 방출하게 된다. 용고잠열을 고려하는 방법으로는 등가비열법, 온도회복법 및 엔탈피법이 있다. 등가비열법은 프로그램에 사용하기 편리한 잇점이 있으나 액상선 및 고상선을 지날 때 온도보정을 하기 위해 시간중분을 작게 해주어야 하기 때문에 본 연구에서는 엔탈피법을 사용하여 용고현상을 고려하였다.⁽⁶⁾ 용고해석에 있어서 상변환문제를 취급하는 데에는 각각의 상을 분할하고 상들이 접하는 면에 적절한 경계조건을 주어 각 영역을 해석을 하는 방법이 있다.⁽⁷⁾ 그러나 이와 같은 방법은 이동격자를 사용하여 좌표변환을 해주어야 하고 또한 각 상들의 접촉면에서 경계조건을 시간과 공간의 함수로 결정하여야 하는 어려움이 있다. 따라서 해석하는 영역을 연속체로 가정하여 격자를 고정시키고, 절점의 온도를 기준 하여 상변환을 고려하는 방법이 편리하며 계산시간도 단축시킬 수 있다.^(8,9)

본 연구에서는 고액공존상의 유동정율 Darcy's law를 사용하여 해석하였고, 엔탈피법을 사용하여 용고잠열을 고려하였다. 두개의 로울사이에 주입되는 반응용융속의 유동해석 및 용고해석은 일반좌표계를 사용한 체적제어법(control volume method)으로 해석하였고, 회전하는 로울은 로울의 형상의 복잡성으로 인하여 유한요소법을 이용하였다. 로울과 용탕이 접하는 면은 연속체가 아니기 때문에 이 부분에는 열지형이 존재한다. 열지형을 대류경계로 하여 용탕과 로울을 연계하여 계산하였다. 고상율 0, 15, 30 %에 대하여 계산을 행하여 유동장, 용고배면 및 온도분포를 구하고 그 결과로부터 판재성형 가능성을 검토하였다.

2. 지배방정식

Fig.1은 직접압연공정을 도식화하여 나타낸 것이다. 장치는 크게 두개의 냉각로울, 용탕의 온도를 제어함과 동시에 교반하여 주입하는 교반장치, 로(furnace)와 노즐 및 로울구동장치로 구성된다. 이때 로울은 내부(혹은 외부)에서 냉각수로써

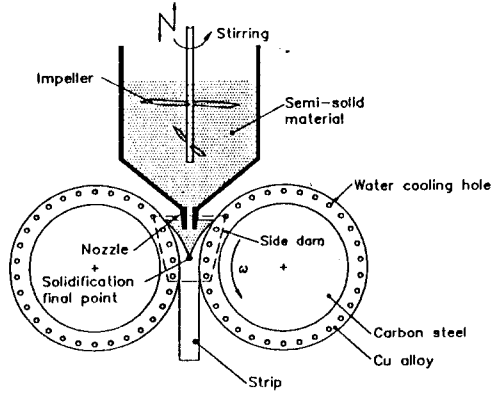


Fig.1 Schematic representation of direct rolling process using semi-solid materials

냉각을 시킨다. 두개의 회전하는 냉각로울사이에 주입된 반용융상태의 금속은 로울표면에 용고층을 형성하고, 두개의 용고층이 집합하는 용고완료점에서 로울출구까지 압연되어 로울을 빠져나가게 된다.

용탕이 완전액상 ($T \geq T_L$)인 경우 비압축성 점성유체로 가정하고, 반용융상태 ($T_S < T < T_L$)인 경우는 통기성체로 하여 Darcy's law를 따르는 것으로 가정한다. 식(1)은 x와 y방향으로의 운동량방정식을 나타내고 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \cdot (\rho \vec{V}u) = \nabla \cdot (\mu_l \frac{\rho}{\rho_l} \nabla u) - \frac{\mu_l}{K} \frac{\rho}{\rho_l} (u - u_s) - \frac{\partial P}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla \cdot (\rho \vec{V}v) = \nabla \cdot (\mu_l \frac{\rho}{\rho_l} \nabla v) - \frac{\mu_l}{K} \frac{\rho}{\rho_l} (v - v_s) - \frac{\partial P}{\partial y}$$

여기서 K는 재료의 투과율로써 다음과 같이 정의된다.

$$K = K_0 \left[\frac{g_1 + \chi}{1 - g_1} \right] \quad (2)$$

액상 ($g_1 \rightarrow 0$)으로 갈수록 K는 0에 접근하게 된다. 이 조건에서는 해가 발산할 수 있으므로 χ 를 작은 값(=0.01)로 가정하였다. 고액공존영역에서는 물성치를 혼합법칙을 사용하여 결정하였다. 또한 체적액상율 g_1 와 체적고상율 g_2 는 질량고상율 f_2 와 질량액상율 f_1 과 같은 것으로 두고, 고상율 f_2 는 고액공존영역에서 선형적으로 분포하는 것으로 가정하여 식(3)으로 계산하였다.

$$f_2 = \frac{T_L - T}{T_L - T_S} \times 100 \quad (\%) \quad (3)$$

두개의 로울사이에 채워지는 반용융금속의 온도분포와 용고량을 계산하기 위한 열평형방정식은 식(4)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{V}H) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{C_s} \nabla H \right) + \nabla \cdot \left(\frac{k}{C_l} \nabla (H_l - H) \right) - \nabla \cdot (\rho k_f (\vec{V} - \vec{V}_s)(H_l - H_s)) \quad (4)$$

엔탈피와 온도의 관계는 Voller^{(8),(9)}가 제안한 방법을 사용하였다.

로울의 온도분포를 계산하기 위한 열평형방정식은 식(5)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{C} \nabla T \right) + Q \quad (5)$$

식(5)를 Galerkin법으로 유한요소정식화 하였다.

3. 계산방법

Fig.2는 용탕부와 로울의 기자를 나타내고 있다. 용탕부는 x와 y방향으로 각각 40개, 91개로 분할하였다. 로울영역의 경우 질점수 6360개, 요소수 6120으로 분할하였다.

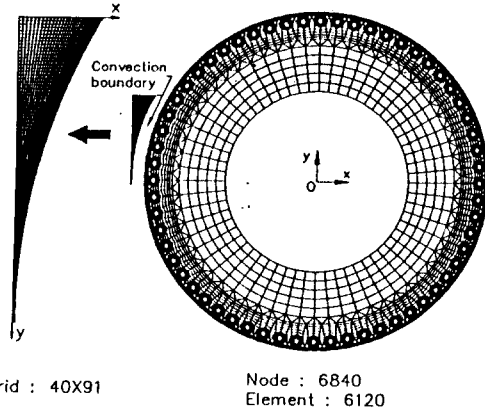


Fig.2 Coordinate system and mesh discretization

용탕과 로울이 접촉하는 면에서 열저항이 존재한다. 열저항을 대류경계로 취급하여 로울과 용탕을 연계하였다. 이때 경계온도는 서로의 접촉면의 온도로 하였다. 접촉면에서 열전달계수는 용고층부근에 액상이 존재하는 부분은 열전달계수를 10000 W/m²K으로 하였고, 용고완료점부터는 압연력에 의해 용고층과 로울이 더 밀착하게 되므로 열전달계수는 증가하게 된다. 따라서 이 영역에서는 열전달계수를 20000 W/m²K으로 하였다.

시간중분 Δt 는 로울의 원주방향의 분할격자 중에서 한 개의 격자가 회전하는 시간으로 하여 시간중분에 따라 로울의 경계도 동시에 이동시켜 실제의 로울회전과 같은 경계조건을 주었다.

로울의 내부는 로울의 표면부근에 설치된 흡수 통하여 냉각수를 계속 흘려 냉각을 시킨다. 이에 냉각수의 열전달계수는 원관을 지나는 난류유동에 대한 식을 사용하여 계산하였다. 1개의 로울에 150 l/min의 냉각수를 흘릴 때 계산된 열전달계수는 2302 W/m²K

압연재료는 오스테나이트계 스테인리스강 304(ANSI 304)로 하였다. 계산에 사용된 ANSI 304의 열물성치를 Table 1에 나타내었다. 로울재료의 열물성치는 온도의 함수로 하여 사용하였다. 식(6)은 로울의 슬리브(sleeve)재료인 구리합금의 물성치이고, 식(7)은 로울의 축부에 사용된 탄소강의 열물성치이다.

$$\begin{aligned} \text{Cu Alloy - Roll sleeve material} \\ k &= 311.2172 + 0.07211T - 0.0000001T^2 \quad (\text{W/m} \cdot \text{K}) \\ \rho &= 9026.8906 - 0.40802T + 0.00017^2 \quad (\text{kg/m}^3) \\ C &= 379.2776 + 0.019659T + 0.0005977^2 \quad (\text{J/kg} \cdot \text{K}) \end{aligned} \quad (6)$$

Carbon Steel - Roll shaft material

$$\begin{aligned} k &= 67.839 + 0.0179T - 0.0000197^2 & (W/m \cdot K) \\ \rho &= 7934.202 - 0.2401T + 0.0000947^2 & (kg/m^3) \\ C &= 466.579 + 0.1316T + 0.0005637^2 & (J/kg \cdot K) \end{aligned} \quad (7)$$

Table 1 Thermophysical properties of ANSI 304

Parameters	Value
Liquidus temperature	1451 (°C)
Solidus temperature	1399 (°C)
Conductivity in liquid	30.3 (W/m·K)
Conductivity in solid	30.3 (W/m·K)
Density in liquid	7244 (kg/m ³)
Density in solid	7266 (kg/m ³)
Specific heat in liquid	701 (J/kg·K)
Specific heat in solid	696 (J/kg·K)
Latent heat	260 (KJ/kg)
Viscous coefficient in liquid	4.4×10^{-4} (Kg/m·s)
Permeability coefficient	6.2×10^{-8} (m ²)

4. 결과 및 고찰

Fig.3(a)-(d)는 로울이 10회전한 후의 용탕의 유동장용 나타내고 있다. (a)-(c)는 압연속도 $V=45$ m/min, 고상율이 각각 $f_s=0, 15, 30$ %일 때의 결과이고, (d)는 고상율 $f_s=30$ %, 압연속도 $V=50$ m/min로 하였을 때의 유동장의 계산결과이다. 고상율이 15%와 30%인 경우 점성이 크기 때문에 반응용상태를 유지하는 부분에서 유동이 크지 않다. 로울표면에 생성되는 용고셀은 로울출구쪽으로 유동하지만, 용고완료점부근에 있는 용고되지 않은 반응용상태의 금속은 로울회전에 의한 단면감소에 따라 로울출구쪽으로 유동하지 못하고 변형저항이 작기 때문에 로울출구의 반대방향으로 돌아올라 가는 결과를 보인다. 또한 중량의 노즐을 통해 분출되는 용탕이 용고완료점부근까지 유동하다가 용고완료점 부근에서 노즐쪽으로 방향을 바꾸어 용고셀추민을 따라 유동을 하게 된다. 노즐부근의 유동장용 보면 고상율 0%인 경우는 노즐출구에서 분출되는 용탕의 일부가 노즐의 추민을 따라 탕면쪽으로 유동을 하지만, 반면 고상율 15%와 30%인 경우는 노즐추민에 있는 용탕이 노즐출구쪽으로 들어오는 결과를 보인다. 고상율 30%에 대하여 속도를 40과 50 m/min으로 계산해 보았으나 유동장용 거의 변화가 없었다.

Fig.4(a)-(d)는 로울이 10회전한 후의 용탕내의 등온도 분포이다. (a)-(c)는 압연속도 $V=45$ m/min, 고상율이 각각 $f_s=0, 15, 30$ %일 때의 결과이고, (d)는 고상율 $f_s=30$ %, 압연속도 $V=50$ m/min로 하였을 때의 온도분포이다. 고상율 0 %일 때는 냉각로울과 접촉하는 표면부근에서만 온도구배를 보이며 내부는 용탕주입온도를 유지하는 결과를 보인다. 그러나 고상율 15와 30 %인 경우에는 노즐의 출구부근에서 온도구배를 보이는 데 이는 노즐의 추민에서 노즐출구쪽으로 들어오는 유동장의 영향으로 생각된다. 4가지 계산조건에 대하여 계산된 로울출구로부터 용고완료점까지의 거리는 각각 20.5, 56.1, 58.2, 58.0 mm로 계산되었다. 고상율의 변화에 따라 용고완료점의 위치가 크게 변화하며, 따라서 주입하는 재료의 온도가 직접압연에 있어서 판재의 성형을 가름하는 가장 중요한 변수인 용고완료점의 위치에 크게 영향을 미칠을 알 수 있다. 고상율의 30 %인 경우 속도를 5 m/min 더 증가시켰을 때에는 용고완료점의 변화가 거의 나타나지 않았다. 고상율 15 %와 30 %인 경우 압연속도 45-50 m/min에서는 용고완료점이 로울출구로부터 너무 상부에 위치하기 때문에 압연율이 커지르

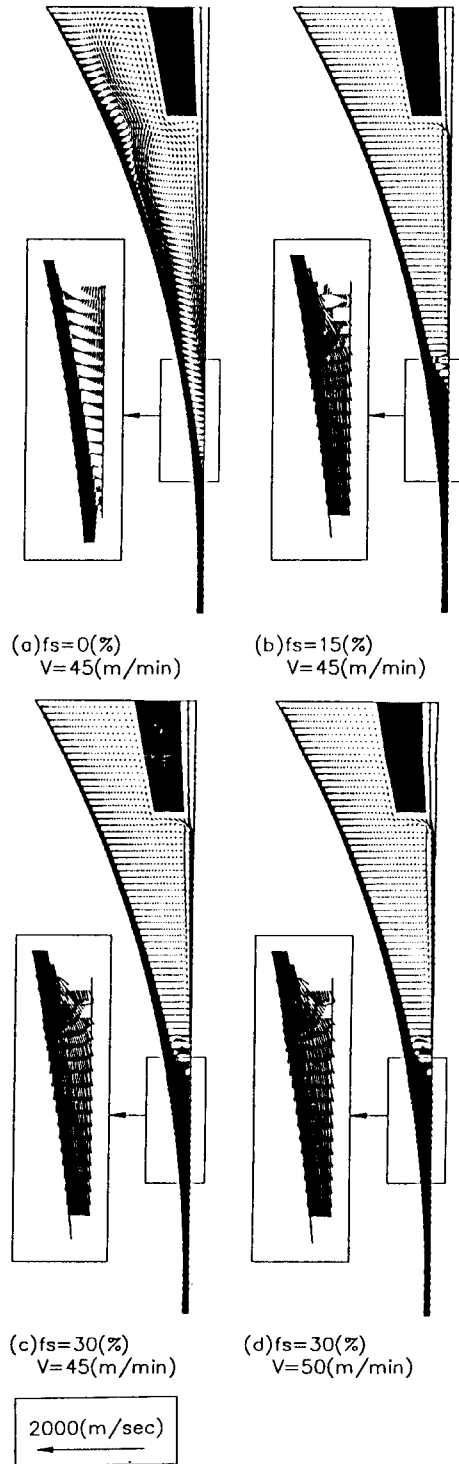
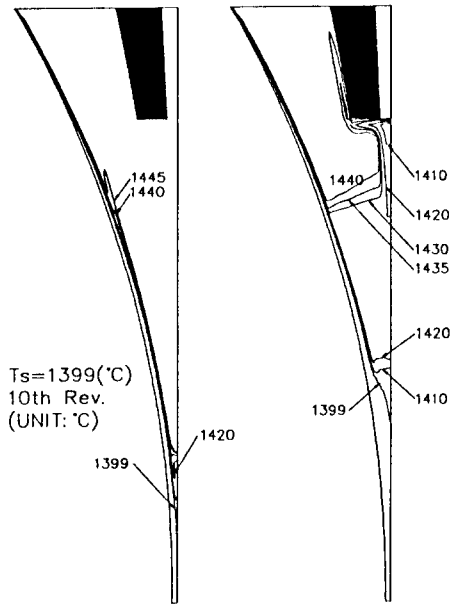


Fig.3(a)-(d) Flow fields in the pool region after 10 revolutions of roll

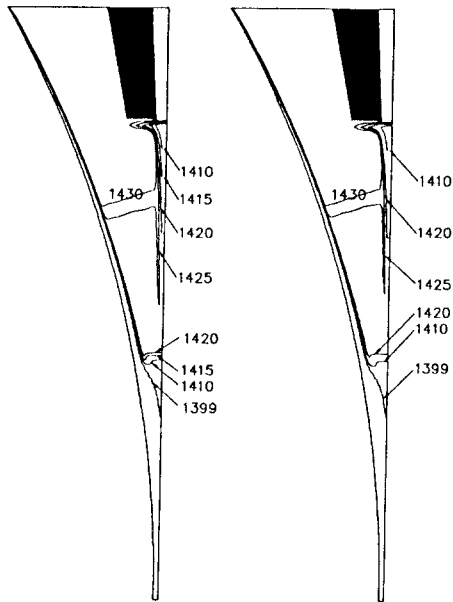
로 과대압하력이 작용할 수 있다. 따라서 고상율이 높을 경우에는 압연속도를 크게 상승시키야만 용고완료점의 위치를 로울출구쪽에 유지시켜 판재의 제조가 가능할 것이다.

Fig.5는 시간에 따른 용고완료점의 위치의 변화를 나타내고



(a) $f_s=0(\%)$
 $T_p=1451(^{\circ}\text{C})$
 $V=45(\text{m}/\text{min})$

(b) $f_s=15(\%)$
 $T_p=1443.2(^{\circ}\text{C})$
 $V=45(\text{m}/\text{min})$



(c) $f_s=30(\%)$
 $T_p=1435.4(^{\circ}\text{C})$
 $V=45(\text{m}/\text{min})$

(d) $f_s=30(\%)$
 $T_p=1435.4(^{\circ}\text{C})$
 $V=50(\text{m}/\text{min})$

Fig.4(a)-(d) Temperature distributions in the pool region after 10 revolutions of roll

있다. 고상율 0 %인 경우에는 용고완료점이 급격히 증가하여 초기에 거의 정상상태에 도달하는 결과를 보이지만, 고상율 15와 30 %인 경우는 초기에 급격히 증가하다가 점차 증가량이 완만해지지만 정상상태에는 도달하지 않았다.

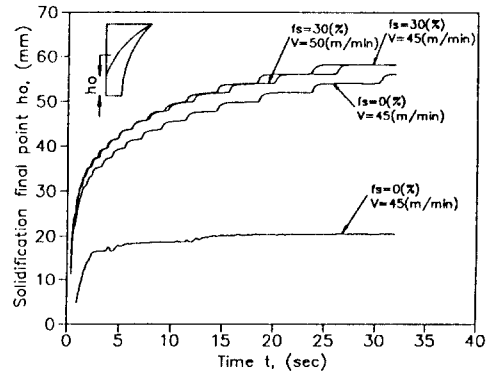


Fig.5 Variations of solidification final point as function of roll rotation

Fig.6은 로울표면에 있는 임의의 한 점의 온도변화량을 로울회전에 따라 나타낸 것이다. 용탕과 접촉하는 부분에서 로울의 표면온도가 급격히 증가를 하여 로울출구에서 최대가 되며, 용탕과 접촉을 끝낸 후 외부 공기에 의한 복사와 내부에 순환하는 냉각수의 냉각효과로 서서히 냉각이 되어 온도가 감소한다. 그러나 로울의 초기온도로는 완전히 냉각이 되지 못한 상태에서 용탕과 다시 접촉하기 때문에 회전이 거듭될 수록 온도가 상승을 한다. 고상율의 증가에 따라 로울온도의 상승량은 감소함을 알 수 있다.

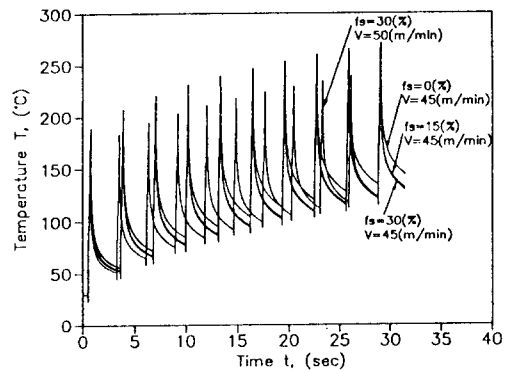


Fig.6 Temperature histories in a arbitrary point of roll surface as function of roll rotation

Fig.7은 로울출구에 있는 로울표면질점의 온도변화를 압연 시간에 대하여 나타내고 있다. 로울출구에서의 온도 또한 로울의 회전이 증가할 수록 계속적으로 상승을 하는 결과를 보인다. 또한 고상율이 증가할 수록 로울의 온도상승량은 감소함을 알 수 있다.

Fig.8(a)-(c)는 압연속도 $V=45 \text{ m}/\text{min}$ 이고 고상율이 각각

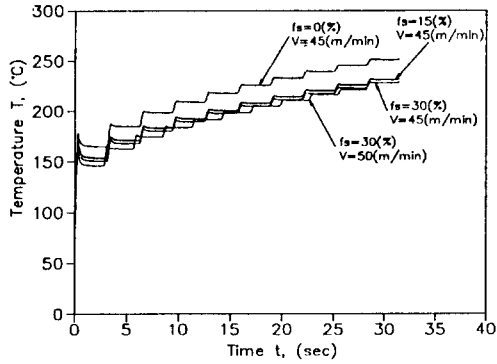


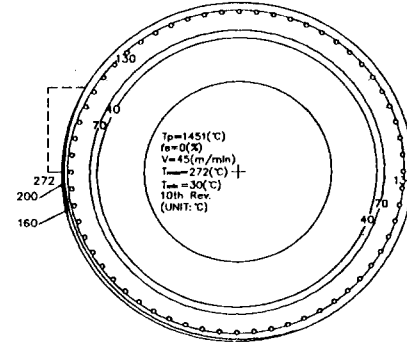
Fig.7 Temperature histories at the nip point of roll surface as function of roll rotation

$f_s=0, 15, 30$ %일 때 로울의 등온도분포를 나타내고 있다. 로울의 온도는 표면에서 로울내부쪽으로 전도를 하지만 로울의 표면부근에 설치된 냉각수 홀에서 열량중 대부분이 방출되기 때문에 로울중심에서는 온도가 높게 상승하지 않는다. 온도구배는 주로 로울표면과 냉각수 홀사이에서만 나타나며, 용탕과 접촉이 끝나는 로울표면의 표면에서 온도가 최대로 상승하게 된다. 최대온도상승치를 비교하면 고상율이 0%인 경우 272 °C이고 고상율이 30%인 경우 248 °C로써 고상율을 30 %로 하면 로울온도를 24 °C가량 억제시킬 수 있음을 알 수 있다.

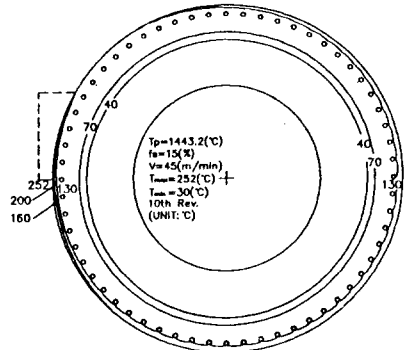
5. 결론

반용융금속을 이용한 직접압연공정의 유동장 및 열전도해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

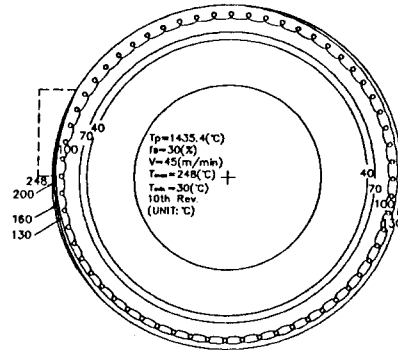
- (1) 유동장의 계산결과로부터 고상율이 증가하면 점성이 커지므로 탱내의 유동장이 거의 정적인 상태를 유지한다. 또한 노즐에서 분출되는 용탕이 용고원료점부근으로 유동을 하다가 로울회전에 의한 단면감소로 인하여 로울출구로 빠져나가지 못하고 탱면쪽으로 방향을 바꾸어 돌아 올라가는 유동현상을 보인다.
- (2) 계산된 용고원료점의 위치는 고상율이 $f_s=0, 15, 30$ %이고 압연속도 $V=45$ m/min인 경우 각각 20.5, 56.1 58.2 mm이고, 고상율 $f_s=30$ %, $V=50$ m/min일 때는 58.0 m이었다. 따라서 주입하는 금속의 고상율이 클수록 용고속도가 빠르므로 용고원료점이 증가하며, 온도분포를 보면 노즐출구부분에서 온도구배를 보인다. 이러한 결과는 원활한 판재성형을 방해하는 원인이 될 수 있기 때문에 이를 방지하기 위해서는 압연속도 및 노즐에서의 용탕분출속도를 빠르게 하여 용고원료점이 좀 더 로울출구쪽에 생성되도록 하여야 한다. 또한 고상율이 높으면 탱류가 거의 정적인 상태를 유지하므로 탱내에서 용고가 진행될 수 있다. 따라서 용탕 깊이를 낮게 유지하여 로울사이에 채워지는 용탕의 양을 작게 하여야 한다.
- (3) 압연재료의 고상율이 로울온도분포에 미치는 영향을 보면 고상율이 증가할 수록 로울의 온도상승이 작게 된다. 최대



(a) $f_s=0$ (%)



(b) $f_s=15$ (%)



(c) $f_s=30$ (%)

Fig.8 Temperature distributions of cooling rollers after 10 revolutions

온도상승치를 비교하여 보면 고상율이 0%인 경우 272 °C이고 고상율이 30%인 경우 248 °C로써 24 °C가량을 낮출 수 있다. 따라서 고상율을 높일수록 로울의 온도상승이 적게 되므로 로울에 작용하는 열하중을 줄여 수명을 더 연장시킬 수 있을 것이다.

기호설명

C	: 비열
f_L, f_S	: 질량액상율과 질량고상율
g_L, g_S	: 체적액상율과 체적고상율
h	: 열전달계수
h_{cont}	: 용탕과 로울의 접촉면에서의 열전달계수
H	: 엔탈피
k	: 열전도율
K_o	: 투과율 계수
K	: 투과율
L	: 용고잠열
P	: 압력
\dot{Q}	: 열량
t	: 시간
Δt	: 시간중분
T	: 온도
T_L, T_S	: 액상선온도와 고상선온도
T_p	: 주입온도
u, v	: x와 y방향의 속도성분
V	: 압연속도
\vec{V}	: 속도벡터
x, y	: x와 y좌표
μ	: 점성계수
ρ	: 밀도
ω	: 로울의 각속도

첨자

l	: 액상
s	: 고상
w	: 냉각수

참고문헌

- (1) L.L.Teoh, "Technological Developments in Continuous Thin Slab and Strip Casters", iron and Steel Engineer, pp.34-40 (1988)
- (2) Y.V.Murty and R.P.I.Adler, "High-speed Casting of Metallic Foils by the Double-roller Quenched Technique", J. of Materials Science, Vol.17, pp.1945-1954 (1982)
- (3) M.C.Flemings, R.G.Rick and K.P.Young, "Rheocasting", material Science and Engineering, 25, pp.103-117 (1979)
- (4) M.Kiuchi and S.Sugiyama, "Mashy State Rolling of Al-alloys and Cast Irons", Workshop for Mushy-state/Semi-solid Metal Forming Technology, The 3rd Int. Conf. on the Technology of Plasticity (1990)
- (5) Y.D.kim and C.G.Kang, "Comparison of Molten Metal Pouring and Mashy State Pouring in Direct Rolling Process", The 3rd Int. Conf. on the Technology of Plasticity, Vol.2, pp.841-846 (1990)
- (6) 大中逸雄 : コンピュータ傳熱・凝固解析 : 丸善株式會社 (1984)
- (7) C.F.Hsu, E.M.Sparrow and S.V.Patankar, "Numerical Solution of Moving Boundary Problems by Boundary Immobilization and a Control-Volume-Based Finite-Difference Scheme", Int. J. Heat Mass Transfer 24, pp.1335-1343 (1981)
- (8) V.R.Voller and C.Prakash, "A Fixed Grid Numerical Modelling Methodology for Convection-Diffusion Mushy Region Phase-change Problems", Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 30, No. 8, pp. 1709-1719 (1987)
- (9) V.R.Voller, C.R.Swaminathan and B.G.Thomas, "Fixed Grid Techniques for Phase Change Problems: A Review", Int. J. for Numerical Methods in Engineering, Vol. 30, pp. 875-898 (1990)