

박판과 롤러의 주조과정에서 응력의 변화에 대한 연구

김 만 수*

A Study on Changes of Stress in Casting of thin Plate and Roller

Kim Man-soo

Summary

The purpose of this study is to effectively analyze the results of heat transfer in obtaining the proper condition for a continuous casting process with stainless steel.

The thermoelastic finite element of calculating roll deformation is represented. A thermoelastic model prediction regarding roll deformation is in good agreement with the experimental results considering thermal expansion of the roll.

The magnitude of roll deformation due to the thermal expansion and roll separation force is quantitatively represented in analysis of continuous casting with stainless steel.

* 공과대학 교수

서 론 이 론 해 석

최근, 설비의 간소화, 공정생략에 의한 원가절감 및 에너지 절감과 급냉 효과를 이용한 재질적 효과의 잇점 등 때문에 용융 금속으로부터 직접 재품을 얻는 가공방법이 주목되어 지고 있다(小薮, 1985; Itoh, 1986; Yoshida, 1986).

재질적 효과에 대해서는 급냉제의 조직의 관점에서 비정질상을 포함하는 준완전상의 출현, 합금 원소의 고용한계의 확대, 조직 및 석출물의 미세화 및 균일화, 편석의 감소 등이 기대되어 지기 때문에 재료의 기능을 향상시킬 수 있다.

특히 용탕으로부터 박편을 직접 제조하는 박편 제조법의 실현을 위해서는 로울의 온도변화 및 열변형이 응고조직의 변화, 응고후의 압연특성, 제품의 두께변화 및 제품의 표면형상에 미치는 영향을 미치는 영향을 밝히는 것이 극히 중요하다.

Miyazawa와 Szekely(1981)은 액상과 고상의 유동을 고려하여 응고셀의 윤곽과 용탕의 흐름을 해석하였다.

Ohnaka(1986)는 아모르포스 금속재료의 제조시 로울의 변형의 제어방법이 문제가 된다고 했으며, Murty와 Adler(1982)은 초급냉 방법에서 로울 압연력에 의한 제품 두께의 증가에 대한 실험적인 결과를 얻었으나 열팽창에 의한 두께 변화 효과와 응력에 대하여는 언급이 없었다.

철강제조업계의 일대혁신이라 할 수 있는 강의 연속주조법이 1960년대 이래 안정된 압연용 소재 제조방법으로 정착된 이래 용강으로부터 직접 제품에 가까운 소재를 얻으려는 박편 연속주조법은 강에서도 특히 스테인리스 강이나 전기강판의 생산에 유리한 것으로 알려져 있다(Nikkei, 1986). 그러나 실험실에서 강의 연속주조 실험을 행하는 것은 곤란하다. 따라서 스테인리스강의 연속주조에 대한 해석적 방법에 의하여 로울러의 온도분포와 로울러의 열응력 계산에 접근하고자 한다.

1. 로울러의 온도분포 해석

먼저, 로울러의 열변형을 해석하기 위해서는 로울러의 온도분포를 해석하여야 한다. 로울러의 온도분포해석을 위해서는 로울러의 온도해석에 대한 경계조건을 먼저 산출해야 하며 로울러의 경계는 주변과 접촉하고 있는 부분과 공기 또는 냉각수와 접촉하는 부분 등으로 나누어진다. 여기서 주변과 접촉하고 있는 부분은 응고해석 결과로부터 산출한 온도를 지정해주며, 공기 또는 냉각수와 접촉하는 부분 등으로 나누어진다. 여기서 주변과 접촉하고 있는 부분은 응고해석 결과로부터 산출한 온도를 지정해주며, 공기 또는 냉각수와 접촉하고 있는 경계는 대류가 일어나는 경계로 삼는다. 여기서 로울의 열전도는 정상상태로 가정하며 경계치 문제를 적용하였다. 해석을 위하여 유도된 유한요소방정식을 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega_e} K_{ij} N_{\alpha_i} N_{\beta_j} d\Omega + Ko \int_{\Gamma_e} N_{\alpha} N_{\beta} d\Gamma \\ & T_{\beta} = \int_{\Omega_e} f N_{\alpha} d\Omega \\ & + \int_{\Gamma_2} g N_{\alpha} d\Gamma + \int_{\Gamma_3} Ko T_{\infty} N_{\alpha} d\Gamma, \quad \bar{T} = 0 \text{ on } \Gamma_1 \end{aligned}$$

여기서 유한요소방정식 유도에 사용된 경계조건들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T &= Ts(\phi) && \text{on } \Gamma_1 \\ (K_{ij} T_{,j}) n_i &= g && \text{on } \Gamma_2 \\ (K_{ij} T_{,j}) n_i &= -Ko(T - T_{\infty}) && \text{on } \Gamma_3 \end{aligned}$$

Fig. 1은 연속주조시 로울의 열전도해석을 위한 유한요소분할과 경계조건을 표시하였다. 여기서 Γ_1 은 로울러가 주변과 접촉하고 있는 부분의 온도를 지정해 주기 위한 경계를 나타내며, Γ_2 는 로울러로 흘러 들어오는 경계, Γ_3 은 로울이 공기와 냉각수에 의해서 열이 유출되는 대류경계를 나타낸다.

Tables 1, 2는 계산에 사용된 Sn-15%pb 스테인리스강의 물성치들을 나타냈다.

2. 로울의 열응력 해석

앞에서 구한 로울의 온도분포를 이용하여 주조 조건에 따른 로울변형해석을 기한다.

로울은 선형탄성체, 등방성 재료이며 평면 변형문제를 적용하고 계산에 필요한 물성치는 온도

에 무관한 것으로 가정한다. 이상의 가정하에서 열변형 및 열응력을 구하는 구성 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= E_{ijkl} \epsilon_{kl} - \beta_{ij} (T - T_g) \\ \beta_{ij} &= K_T \alpha \delta_{ij} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{여기서 } U_i = g_i \text{ on } \Gamma_{11} \quad (4)$$

$$\sigma_{ij} n_j = h_i \text{ on } \Gamma_{12} \quad (5)$$

Table 1. The physical constants and properties of austenitic stainless steel used in calculation

Item	Sumbol	Unit	Value
Thermal conductivity in solid zone	K_S	cal/cm sec °C	0.07
Thermal conductivity in liquid zone	K_L	cal/cm sec °C	0.01
Density	ρ	g/cm	7.4
Specific heat	C_L	cal/g °C	0.16
Latent heat	L	cal/g	65
Solid line temperature	T_S	°C	1399
Liquid line temperature	T_L	°C	1460

Table 2. Physical constants and properties of Sn-15% Pb used in calculation

Item	Sumbol	Unit	Value
Thermal conductivity in solid zone	K_S	cal/cm sec C	0.12
Thermal conductivity in liquid zone	K_L	cal/cm sec C	0.05
Specific heat in liquid zone	C_L	cal/g C	0.055
Density in solid zon	ρ	g/cm	7.2
Solid line temperature	T_S	C	183
Liquid line temperature	T_L	C	208
Dynamic viscosity coefficient	ν	cm/sec	2.64×10

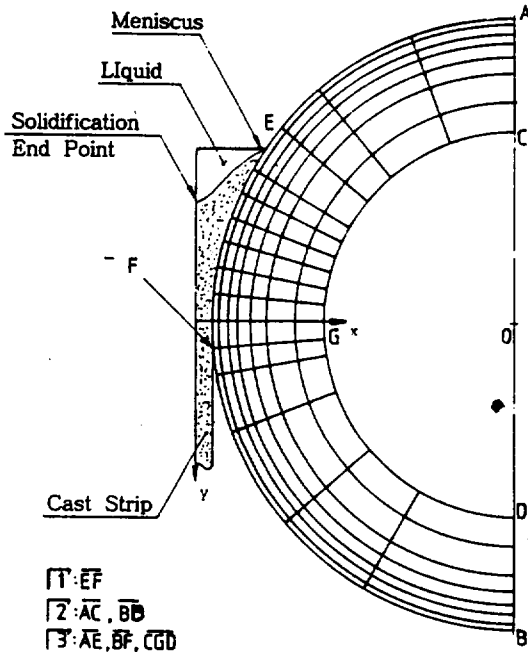


Fig. 1. Finite element mesh and boundary conditions for heat conduction in roll at continuous casting.

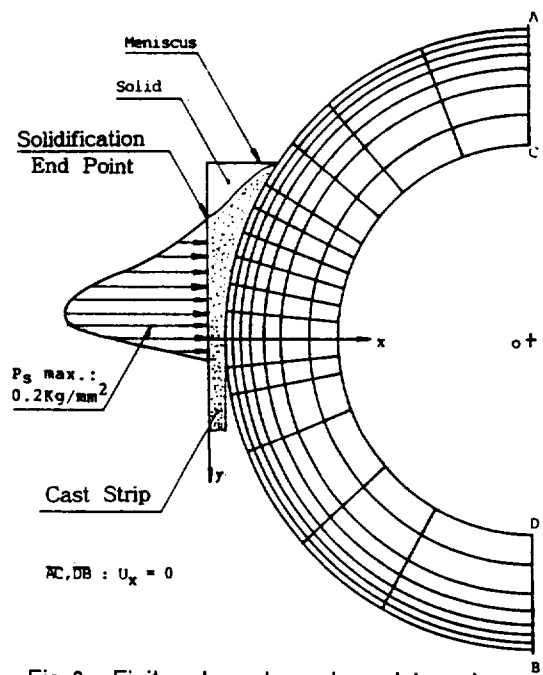


Fig. 3. Finite element mesh and boundary conditions in roll at continuous casting for stainless steel.

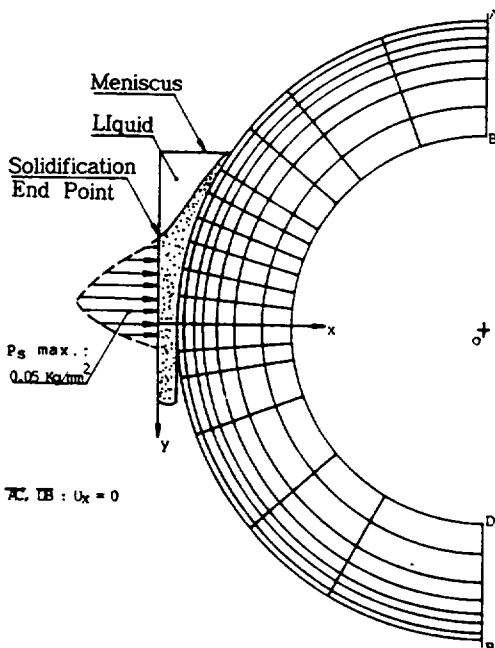


Fig. 2. Finite element mesh and boundary conditions for thermoelastic stress analysis in roll.

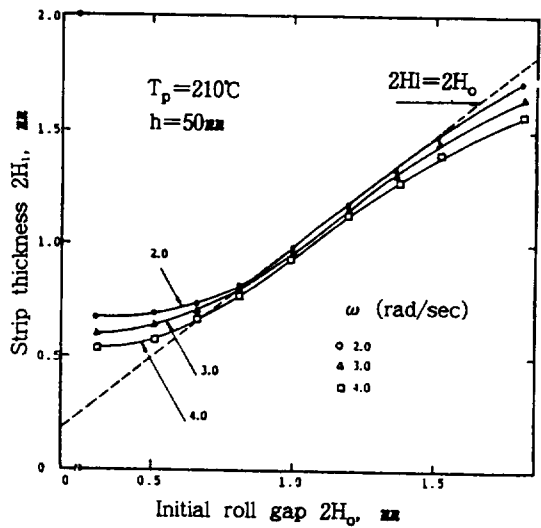


Fig. 4 Effects of initial roll gap on strip thickness.

위의 기본구성방정식을 이용하여 가상일의 원리로부터 유한요소 강성방정식을 정식화 하면

$$\int_{\Omega_e} E_{ijkl} N_{\alpha, k} N_{\beta, l} d\Omega u_j \beta = \int_{\Omega_e} (T - T_g) \beta_{ij} N_{\alpha, j} d\Omega + \int_{\Omega_e} \rho f_i N_{\alpha} d\Omega + \int_{\Gamma_e} h_i N_{\alpha} d\Gamma \quad (6)$$

의 유한요소방정식을 얻는다. 여기서 압연력의 계산은 Miyazawa의 계산식을 적용하였다.

Fig. 2, 3는 응력해석을 위한 요소분할과 경계조건을 나타내며 계산에 적용된 Sn-15%Pb와 Stainless steel의 재료상수 및 냉각로울의 물성치는 각각 다음과 같다.

실험장치 및 방법

Sn-15% Pb 금속이 210C로 텀디쉬에서 채워져 있다가 벨브가 개폐될 때 회전하는 로울의 표면에 떨어져 탕류를 만들고 그때 로울표면에서부터 응고하여 계속적인 얇은 박판이 제작되어진다.

로드셀(Load cell)에 의해 압하력이 측정되며 AC 열전대를 사용하여 텀디쉬 및 탕류의 온도를 조절하였다.

쌍로울식 연속주조에 의해 만들어진

Table 3. The material constants of austenitic stainless steel used in calculation

Item	Sumbol	Unit	Value
Material constants for	A(Sn-15%Pb)		2.7×10^{-7}
	A(Stainless steel)		11.86
Sn-15% Pb alloy	$\epsilon A \sigma^m$ m		4.34
Stainless steel	m		3.4×10^{-7}
Thermal expansion coefficient	α	$^{\circ}C^{-1}$	0.125×10
Poisson's ratio	ν_p		0.13
Young modulus	E	kg/mm^2	19312

Table 4. Specifications of equipment for continuous casting

Roll diameter	210mm
Cooling type	water cooling of inner surface
Number of roll rotation	0~79rpm
Injection type of molten	valve type
Weirs	teflon sheet
Load cell	500kg

Sn-15%Pb 박판의 두께와 초기 로울러 설정간격과의 관계를 Fig. 4에 나타내었다. 여기서, 박판의 두께가 0.8-1.2mm보다 더 얇은 경우, 박판두께는 초기 로울러 설정간격보다 커지며, 초기 로울러 설정간격이 증가함에 따라 감소하다가 0.8 mm 보다 박판두께가 클 때에는 박판 두께는 초기 로울러 설정간격보다 작아졌다. 이는 주조조건에 따른 응고완료점의 위치가 각각 다르므로 그것으로 인하여 각각 상이한 로울러 압연력과 열팽창이 일어났음을 알 수 있다.

급냉시편의 응고조직을 관찰하기 위해서 연마기로 연마하고 초산(8ml), 빙초산(16ml), 글리세린(76ml)의 부식액으로 부식한 후의 응고조직을 Fig. 5에 나타냈다. Sn을 많이 포함한 백색의 입상조직의 입경이 평균적으로 작을 것을 알 수 있으며, 또 Sn 수치 상정이나 Pb 수치상정은 관찰되지 않았으며, 응고조직의 방향성이 없었다.

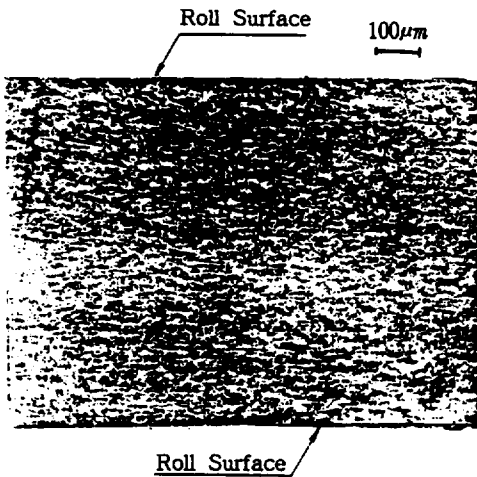


Fig. 5. Microstructures of rapidly solidified shell in Sn-15% Pb ($2H_0 = 1.0\text{mm}$, $\omega = 2.0\text{ rad/sec}$).

결 과

Fig. 6은 Sn-15% Pb의 주조시 로울러의 온도 분포를 해석한 결과를 나타내었다. 정상상태에서 로울러의 표면온도는 50°C이다.

Fig. 7은 온도분포와 압력분포를 고려하여 초기 로울러 설정 간격에 따른 로울러의 변형에 대한 효과를 열탄성 해석에 의한 결과와 실험결과를 비교하였다. 계산결과와 실험결과는 비교적 잘 일치하였다.

다음은 Sn-15% Pb의 박판제조 및 해석에서 이론의 유효성이 입증되었으므로 스테인리스강의

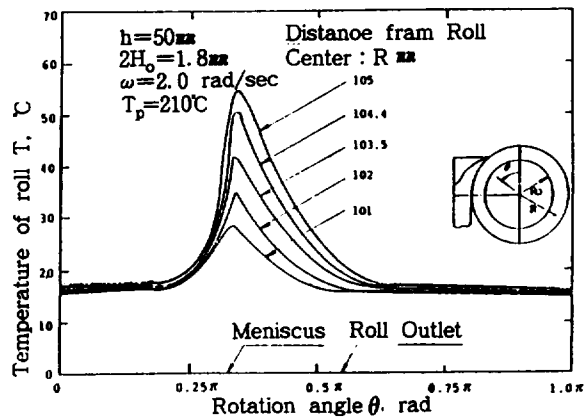


Fig. 6. Temperature distribution on roll.

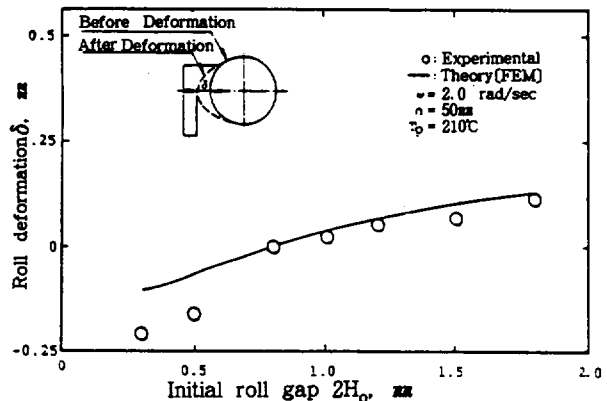


Fig. 7. Effects of initial roll gap on roll deformation.

연속주조 해석에 적용하여 로울러의 변형해석을 위한 결과를 나타내었다.

로울러의 온도분포를 계산하여 Fig. 8에 나타내었다. 계산결과는 로울러의 단면에서 로울러 표면으로부터 반경방향과 원주방향의 온도구배가 로울러 내부방향으로 갈수록 작아짐을 알 수 있다. 로울러 표면에서의 최대 온도는 310°C 정도이다.

Fig. 9은 압연력과 온도에 의한 로울러의 변형을 도시하였다. 본래의 유한요소 분할 모델보다 크게 나타나는데 이것은 압연력에 의한 압축보다 온도에 의한 열팽창이 크게됨을 알 수 있다.

Fig. 10은 등가응력의 등 응력선을 보였다. 로울러의 단면에서 보면 광면부근에서 소성변형이 발생하였으며 그 외 부분은 탄성변형을 보여주고 있다. 그러나 소성변형은 무시될 정도로 작았다.

따라서 스테인리스 강의 연속주조 경우에 본 연구에서 적용한 로울러의 재질 및 크기는 냉각 특성 및 압연특성면에서 적당한 것으로 생각된다. 그리고 이 연구에서 적용된 수치모델 및 절차들은 철과 강에 대한 박판연속주조에 유용하다고 생각된다.

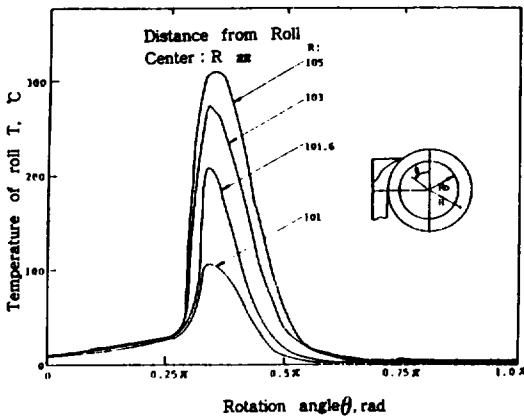


Fig. 8. Temperature distribution in the roll (stainless steel as-cast material).

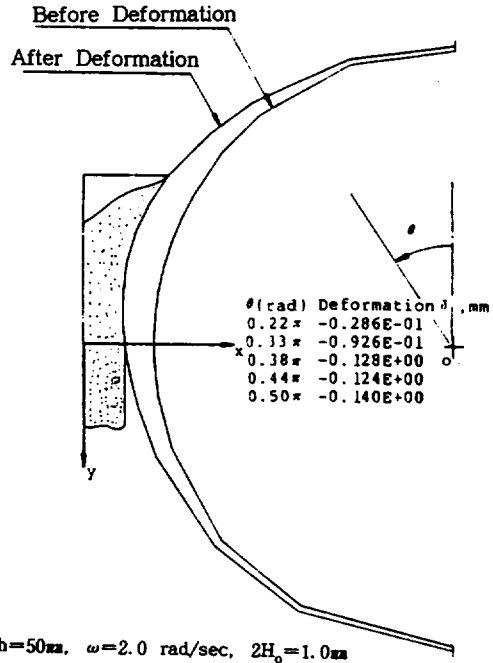
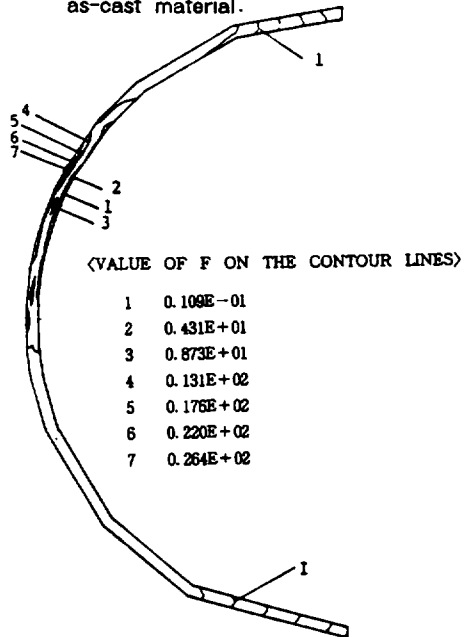


Fig. 9. The deformed finite element configuration of roll for stainless steel as-cast material.



h=50mm, ω=2.0 rad/sec, 2H₀=1.0mm, T_p=210°C

Fig. 10. Contour lines of equivalent stress.

고찰

쌍로울식 연속주조에서 로울의 회전속도의 증대에 따라서 옹고완료 위치는 로울러 간격의 하류측으로 내려가므로 옹고금속의 압하력이 감소한다. 그리고 여기서 로울러의 용탕쪽으로 부터의 열수수에 의하여 로울러의 과대한 열팽창이 초래된다.

따라서 초기 로울러 설정간격의 효과는 설정 로울러 간격이 증가하면 옹고완료 위치가 로울러 간격의 하류측에 크게 이동하기 때문에 압연시의 로울러간 거리의 증가에도 불구하고 옹고완료 위치에 있어서의 시료의 두께가 감소할 것이 예상된다. 실제로 시료의 두께는 감소하고 있으며 이는 뒤에 서술하듯이 열팽창에 의한 것으로 생각된다. 따라서 쌍로울법에 의하여 박판금속을 제조하는 경우에 로울러 간격에서의 옹고의 완료와 로울러 온도상승의 역제에 대하여 적절한 로울러 설정간격 및 회전속도가 존재한다고 생각된다.

실험결과에서 알 수 있었던듯이, 설정 로울러간 거리의 증가에 따라 시료두께는 증가하여 설정 로울러간 거리에 접근한다. 이 경우에는 용탕이 로울러의 점점에 닿기 전에 상당히 온도가 떨어져 옹고완료 위치가 풀(Pool)의 상류에 위치하여 압하정도가 커지기 때문에, 그때 로울러의 탄성변형이 가미되어 두께가 커지는 것으로 생각된다. 초기 로울러 설정 간격을 계속 증가하며 주조를 할 경우 시료 두께와 로울러 설정간격이 일치한 이후로 시료 두께가 오히려 감소하는데, 이는 매우 많은 열방출이 이루어져 압하력에 의한 로울러의 변형보다는 열팽창에 의한 로울러의 변형이 더 커져서 로울러의 간격이 좁아졌기 때문이다. 로울러 회전수와 초기 로울러 설정간격의 증가는 박판으로부터 방출되는 열유속 밀도를 증가시켜 그로 인한 로울러의 열팽창이 커져서 재물의 두께는 로울러 회전수와 초기 로울러 설정 간격이 클수록 작아진다고 생각된다.

본 실험에서 박판의 효율적인 제조에 적당한 회전속도 및 두께는 각각 2.0~2.5rad/sec, 0.8

mm~1.6mm가 좋다고 생각된다.

유효능력은 전단응력의 척도이며 로울러의 변형이 항복에 도달했는지를 평가하는데 사용되며, Von Mises 항복조건을 적용하였다.

본 실험에서는 스테인리스 강 로울러를 사용했기 때문에 소성변형은 일어나지 않았다.

본 연구에서 행한 실험에서 로울러의 두께는 각속도에 대하여 로울러의 변형을 고려할 때 최소 두께로서 적당하다고 생각된다. 이는 강의 주조에 대하여 응용될 수 있다.

급냉 옹고시에는 큰 과냉각이 얻어지고 냉각속도가 빠르기 때문에 결정립의 미세화, 고용도의 확대등의 효과를 얻는다. Sn-15% Pb에서는 Pb 함량이 적으므로 Sn 수지상정이나 Pb 수지상정은 관찰되지 않는다는 보고와 일치한다.

또 여기 쌍로울식 연속주조에서 정적인 옹고조직의 경우와는 달리 압연 변형되기 때문에 옹고조직에 압연효과도 함께 가미되었다.

박판 연속주조에 유리한 스테인리스 강의 연속주조에 있어서 로울러의 온도분포 및 열변형에 관하여는 옹고해석을 통하여 적절한 주조조건을 얻었으며 그 최적주조 조건에서 온도분포와 압연력 계산을 행하여 로울러의 열응력 및 열변형 해석을 행한 결과 본 연구소에서는 스테인리스 강의 적정 주조 조건으로서 직경 210mm, 로울러의 두께 4mm의 회전로울러를 사용했을 경우 초기 로울러 설정간격 2H₀=1.0mm 로울러의 회전 각속도 $\omega=2.0\text{rad/sec}$ 정도가 적절하다고 생각된다.

적요

쌍로울식 박판연속주조에 대한 열전도 해석, 열응력 해석을 기하고 실험결과와 해석결과를 종합하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 로울변형을 계산하기 위한 열탄성 유한요소 모델을 제안하였으며 그 해석결과는 실험치와 잘 일치하였다.

2) 본 실험에서 얻어진 급냉옹고 시료의 주변 두께방향에 대한 옹고조직은 백색 Sn이 미세립화하여 입경이 균일하며, 로울러 표면에 가까울수

록 냉각이 빠르므로 수지상징(dendrite)의 성장이 없었다.

3) 모델재료에 대한 쌍로울식 연속주조실험과 입증된 이론해석을 스테인리스 강에 적용하여 최적주조조건을 제안하였으며, 그 조건에 대한 로울의 열팽창 및 압하력에 의한 로울 변형량을 정량적으로 계산하여 박판두께 조절에 유용한 결과를 제시할 수 있었다.

기 호 설 명

- A: 재료상수
- E: 탄성계수
- $E_{ij}K_i$: 탄성 텐서 성분
- g: 열유속
- gi: 변위
- H: 로울러 간격의 절반
- H_0 : 초기로울러 설정 간격의 절반
- H_1 : 제1품두께의 절반
- H_2 : 응고완료점에서의 로울러 간격의 절반
- h: 탕면에서 로울러 중심선까지의 거리
- h_f : 의력
- K: 열전도도
- K_T : 열변형의 응력·변형을 행렬
- m: 응력지수
- n: 수직단위벡터
- $N(x)$: 형상함수
- Ro: 로울러 반경
- $T_2(\phi)$: 초기온도
- T_w (Tar, Tw): 주변온도(공기의 온도, 물의 온도)
- U: 변위벡터
- α : 열팽창계수
- β_{ij} : 열팽창 텐서
- ϵ_{ij} : 변형을 텐서
- δ_{ij} : Kronecker delta
- ρ : 밀도
- σ_{ij} : 응력 텐서
- σ : 동가인력

Ω : 경계

<하첨차>

- l: 액상
- m: 고액공존상
- s: 고상
- x: x방향
- y: y방향
- i, j: 텐서의 성분
- α, β : 유한요소의 절점수

참 고 문 헌

- Itoh, Y. 1986. Current Status of Continuous Casting Technology and Quality, Tetsu to Hagane, 16, 1667-1673.
- Kim, W. T. and T. H. Kim 1985. The Microstructure of Rapidly Sn-Pb Alloys, J. Kim, 23, 437-442.
- 小菊, 1985. 高珪素 鋼急 薄帶의凝固의特性, 鐵と鋼, 16, 229-232.
- Miyajawa, K. and Szekely. 1981. A Mathematical Model of the Splat Cooling Processes using the Twin Roll Technique. Met. Trans., 12A, 1047-1051.
- Murty, Y. V. and R. P. Adler, 1982. High Speed Casting of Metallic Foils by the Double-Roller Quenching Technique, J. of Materials Science, 17, 1945-1954.
- Nikkei. 1986. 製鋼プロセスを變える急冷凝固法 特殊鋼か弓實用化, Nikkei New Materials, 18, 212-216.
- Ohnaka, I. 1986. Production of Amorphous Alloy Materials and Rapid Quenching Techniques, J. JSME, 88-802, 60-64.
- Yoshida, C. 1986. Characteristic of Rapidly Solidified Cast Iron and High Carbon Steel. Tetsu to Hagane, 16, 2241-2246.