

< 論 文 >

박판 연속 주조과정에 있어서 회전 로울러의 열변형에 관한 연구

백 남 주* · 이 상 매**

(1987년 7월 20일 접수)

The Study on the Thermal Deformation of the Rotating Rollers in Strip Continuous Casting Process

Nam Ju Baek and Sang Mae Lee

Key Words; Rapid Solidification(급냉), Roll Separating Force(로울러 분리력), Initial Roll Gap(초기 로울러 설정 간격), Angular Velocity of the Rollers(로울러 회전속도), Finite Element Method(유한요소법), Thermal Stress(열응력)

Abstract

In this paper the solidification phenomena at the molten pool has been modeled and simulated in terms with the one dimensional unsteady-state heat transfer of the solid and molten phase and the pressure distribution in the solid phase for the twin-roller continuous casting of Sn-15% Pb. The further purpose of this study was to effectively analyze the thermal and mechanical deformation of roll applying the results of the heat transfer and the pressure distribution to the boundary conditions. The strip thickness of rapidly solidified metallic strip decreases with increasing angular velocity of the roller and with increasing initial roll gap. For this reason the roll spacing and angular velocity of the rolls are considered to be main variables. The recommended optimal casting regimes for continuous strip dimensions is near 0.8mm~1.0mm in thickness at the given angular velocity $\omega=2.0$ rad/sec. Results of the experiment using Sn-15% Pb are compared with model predictions. The calculated roll deformation has been in good agreement with the observed value of roll deformation. All the deformation of the roller is within the elastic range, the plastic yielding are not occurred. However, these elastic stresses are sufficient to take place of the shortened roller life by the thermal fatigue and a notch fatigue. The higher cooling rates were obtained by a twin-roller quenching technique. Also the quenched microstructure of the rapidly solidified shell was verified.

기 호 설 명

A, B : 재료상수

Cp : 비열

* 정회원, 부산대학교 공과대학 생산기계공학과

** 정회원, 부산대학교 대학원

E : 탄성계수

f : 열원

fi : 함수

g : 열유속

gi : 변위

- H : 로울러 간격의 절반
- h : 탕면에서 로울러 중심선까지의 거리
- h_r : 응고계면에서의 열전달 계수
- h_i : 전인력
- h_0 : 로울러 표면의 열전달계수
- K_{ij} : 열전도도
- k_{ij} : 스프링상수
- k_0 : 열전달계수
- L : 응고감열
- m : 응력지수
- n : 수직단위벡터
- q : 용융금속유동율
- $q_0(t)$: 로울러 표면에서의 열유속
- $q_r(t)$: 응고계면에서의 열유속
- Ro : 로울러 반경
- r : 반경좌표
- T : 온도
- T_r : 응고온도
- T_i : 액상온도
- T_s : 초기온도
- T_{su} : 로울러 표면온도
- T_w : 주변온도
- t : 시간
- U : 변위벡터
- \bar{U} : 가상변위벡터
- U_x : 주편의 x 방향 속도상분
- T_w : 냉각수온도

그리스 문자

- α : 열확산율
- ϕ : 응고전방에 수직인 반경방향 사이의 각
- β_{ij} : 열팽창 텐서
- ϵ_{ij} : 변형율텐서
- δ : 응고층 두께
- ρ : 밀도
- σ_{ij} : 응력 텐서

1. 서 론

최근까지 확립된 슬래브와 빌렛 등의 연속주조에 의해서, 알루미늄, 알루미늄 합금, 동과 동합금 등의 비철금속박판을 연속주조에서 생산하는 시험이 행해졌다⁽¹⁾. 거기에는 Hunter 법과 Bessemer 법(쌍로울식),

Hazellet 법(쌍벨트법), 로울-벨트법(Rotary Caster), Alussise 형(이동주형법)등⁽²⁾이 있다. 이것들의 어느 방법도 현재 보급되지 않고 있다.

최근, 박판연속주조에 있어서 제조공정을 생략하여 최종제품에 가까운 형상의 제작에 의한 원가절감⁽³⁾, 가공이 곤란한 재질의 박대 및 세선의 가공⁽⁴⁾, 급냉에 의하여 고용도의 확대, 조직의 미세화, 편석과 입자 석출의 감소, 석출물의 균일 분포⁽⁵⁾ 등 새로운 응고 조직을 이용한 잇점을 활용하기 때문에 연속 주조에 있어서의 강의 박판 제작이 활발히 연구되고 있다. 강의 박판 연속 주조 중에서 쌍로울식 연속 주조법⁽⁶⁾은 가장 유망하고, 많은 연구자들이 도전하는 방법이다. 그러나 현재까지 필요한 기초지식은 확립되어 있지 않으며 일본 및 미국에서 가장 활발하게 연구되고 있지만 기초 연구의 단계에 있다.

쌍로울법 연속 주조에 있어서 응고 과정의 전열 해석은 일차원 이론에 의하여 행해졌다. 즉, Clyne-Carcia⁽⁷⁾, Pimitkar-Carfonara⁽⁸⁾ 등은 쌍로울식 연속 주조에 있어서 해석적 방법에 의해서 응고셸(shell)의 윤곽(profile)을 계산했고, Miyazawa-Szekely⁽⁹⁾ 등은 액상과 고상의 유동을 고려하여 응고셸의 윤곽과 용융 금속의 흐름을 해석하였다.

쌍 로울법에 의하여 급냉 시료를 제작할 때, 균일한 형상의 주편이 얻어질 때 처럼 주편을 지배하는 공정의 냉각 특성을 밝히는 것이 기본적으로 중요하다. 쌍로울식 연속 주조에 있어서 냉각 속도와 조직의 연구는 竹本⁽¹⁰⁾ 등에 의하여 시험되었다. 또, Miyazawa, Choh and Inouye⁽¹¹⁾은 쌍 로울법에 있어서 판두께 방향의 냉각 속도의 분포와 그것에 수반하는 응고 조직의 변화에 관하여 보고하였다.

로울러 수명, 시료의 성질과 두께 등을 잘 조절할려면 응고셸과 회전 로울러의 응력에 대한 지식이 필요하다. 쌍로울법 연속 주조에 대한 문제로서 Ohnaka⁽¹²⁾는 아모르포스(amorphous) 금속 재료의 제조시 로울러의 열팽창 또는 열응력으로 인한 열변형때문에 로울러 간격이 좁아지므로 그 제어 방법이 문제가 된다고 했으며, Murty-Adler⁽¹³⁾ 등은 로울러 압하력에 의한 제품 두께의 증가에 대한 실험적인 결과를 얻었으나 열팽창에 의한 두께 변화 효과 및 응력에 대하여는 언급이 없었다. 그리고, 슬래브와 빌렛의 수직형 연속 주조에 있어서 주형의 열유동과 응력에 대한 연구는 Samarasekera-Brimacombe⁽¹⁴⁻¹⁶⁾ 등에 의해서 행해졌다. 그러나, 드림형의 두께가 얇은 중공 로울러를 주형으로 사용하는 쌍로울식 연속 주조에 대한 로울러의

온도 분포 및 열변형에 관한 연구는 행해진 바가 없으며, 또한 로울러변형과 두께변화에 대한 연구가 확립되어 있지 않은 실정이다. 그러므로 로울러면의 최대 열부하시의 로울러 열변형과 압하력을 고려하는 경우, 로울러와 용융금속의 직접 접촉하에서의 열계산 및 부하 계산에 의한 로울러변형의 검토가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 Sn-15% Pb 재료에 대하여 실험에 의한 쌍 로울러 연속 주조의 주요특성을 구하고 로울러 열팽창과 열응력에 대한 유한요소해석을 통하여 제품 두께와 로울러 변형과의 관계를 밝히고자 한다.

2. 이론 해석

2.1 응고 해석

쌍 로울러법에 있어서 용융금속의 응고상태를 전열해석을 통하여 계산하고 그 때 주변의 표면온도를 로울러의 표면온도로 정했다. 로울러의 내면에는 강제냉각, 표면에는 용융금속의 흐름에 의한 열전달이 존재한다 (Fig. 1).

이때 반경방향의 일차원 비정상 상태 열전도를 전제로 해서 계산했다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

초기조건 및 경계조건들은 다음과 같다.

$$t=0, \delta=0, T=T_0 \quad (2)$$

이때 로울러 냉각면에 대한 열수지식은

$$r=R_0, T=T_{su}(t) \quad (3)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial r} = q_0(t) \quad (4)$$

$$q_0(t) = h_0(T_{su}(t) - T_w) \quad (5)$$

이다.

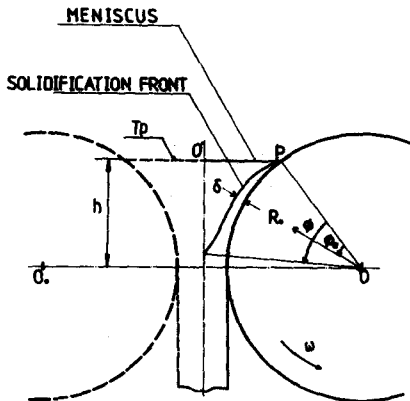


Fig. 1 Schematic model and coordinate system for twin-roll continuous casting

로울러와 용강간의 열수지식은

$$r=R_0+\delta, T=T_1 \quad (6)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial r} = q_1(t) + \rho L \frac{d\delta}{dt} \quad (7)$$

$$q_1(t) = h_r(T_1 - T_r) \quad (8)$$

이다. 그 때 주변의 표면온도를 로울러의 표면온도로 정했다. 수치해석 방법에는 Runge-Kutta-Gill 법을 적용했다.

2.2 탕류(Pool)안의 로울러 표면에 대한 압력분포 계산

응고한 주조재료의 고온 비탄성 구성관계에서 변형 속도는 온도와 응력, 내부조직 변화 등에 의존한다. 따라서 항복조건 등의 개념없이 일차원 응력 상태하의 변형속도는 다음 식과 같다.

$$\dot{\epsilon} = A \sigma^n \quad (9)$$

위 식에서 재료상수를 구하고 다음 식 (9)로부터 압력 분포를 계산하였다.

$$dPs/dx = 1/BH((m+2)/H)^{1/m}$$

$$|Ux - q/2H|^{1/m-1} \cdot (Ux - q/2H) \quad (10)$$

여기서 계산한 압력분포는 로울러변형을 해석할 때 경계조건이 된다. 수치해석 방법에는 Runge-Kutta 법을 적용했다. 이 때 주조 재료 Sn-15%Pb에 대하여 $m=4.34$ 이다⁽¹⁷⁾.

2.3 로울러의 열전도 해석

이차원 정상상태 열전도방정식에 대한 유한요소해석을 행했다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = f \quad (11)$$

경계조건들은 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} T &= T_a && \Gamma_1 \text{에 대하여} \\ k_{ij} \frac{\partial T}{\partial n} &= g && \Gamma_2 \text{에 대하여} \\ k_{ij} \frac{\partial T}{\partial n} &= -k_0(T - T_w) && \Gamma_3 \text{에 대하여} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

위 경계조건들을 적용하여 유한요소해석에 쓰여진 범함수를 유도하면 다음과 같다.

$$\int_0^1 K_{11} T_1 T_1 d\Omega + \int_{\Gamma_2} K_0 T \bar{T} d\Gamma_2 = \int_0^1 f \bar{T} d\Omega + \int_{\Gamma_3} g \bar{T} d\Gamma + \int_{\Gamma_3} K_0 T_w \bar{T} d\Gamma_3, \bar{T} = 0 \text{ on } \Gamma_1 \quad (13)$$

2.4 열탄성모델에 의한 로울러의 유한요소해석

다음 식으로 로울러의 온도 변화를 고려한 응력해석

을 하였다.

$$\sigma_{ij} = E_{ijkl} \epsilon_{kl} - \beta_{ij}(T - T_0) \quad (14)$$

이 때 경계조건들은 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} U_i &= g_i && \Gamma_{i1} \text{에 대하여} \\ \sigma_{ij} n_j &= h_i && \Gamma_{i2} \text{에 대하여} \\ \sigma_{ij} n_j &= -\hat{k}_{ij}(U_i - U_\infty) && \Gamma_{i3} \text{에 대하여} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

유한요소해석에 쓰여진 범함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \sigma_{ij} \epsilon_{ij} d\Omega + \int_{\Gamma_{i3}} \hat{k}_{ij} U_i \bar{U}_j d\Gamma + \int_{\Gamma_{i2}} T_i \bar{U}_i d\Gamma \\ & = \int_{\Omega} \rho f_i \bar{U}_i d\Omega + \int_{\Gamma_1} h_i \bar{U}_i d\Gamma + \int_{\Gamma_3} \hat{k}_{ij} U_\infty \bar{U}_j d\Gamma \quad (16) \end{aligned}$$

유한요소해석에 적용한 로울러의 요소분할은 Fig. 2 와 같다.

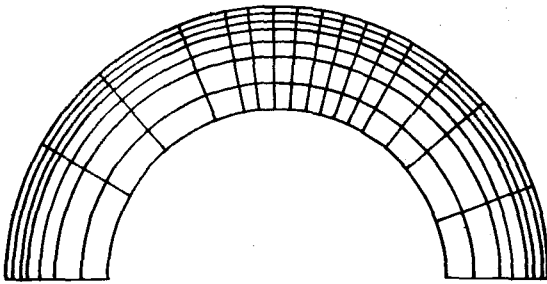


Fig. 2 Finite element mesh of the roller

3. 실험 장치 및 방법

쌍 로울식 연속 주조 과정에서의 기본적인 현상을 관찰하기 위하여 실험을 행했다. Fig. 3은 실험 장치를 나타냈다. Sn-15% Pb 용융금속이 210°C로 텀디쉬(tundish)에서 채워져 있다가 밸브가 개폐될 때 노즐을 통하여 유출하여 회전하는 로울러 표면에 떨어져서 탕류를 만들고, 그 때 로울러 표면에서부터 응고하여

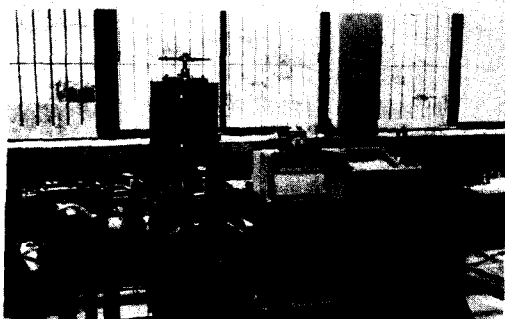


Fig. 3 Experimental apparatus of strip continuous casting

Table 1 Specifications of equipment for continuous casting

Item	Specification
Roll diameter	210 mm
Cooling type	Water cooling of inner surface in roll
Number of roll rotation	0~79 rpm
Injection type of molten	Valve
Roll gap	0~10. 0 mm
Weir	Teflon sheet
Load cell	500 kg

계속적인 얇은 박판이 되어 나온다. 두 개의 로울러 사이에 응고셀에 대한 압하력이 작용되며 이것을 로드셀(load cell)에 의해서 측정했다. 실험장치의 주요 사양은 Table 1과 같다.

텀디쉬 및 노즐의 온도는 A-C 또는 C-C 열전대로 측정하였다. 급냉시편의 응고조직을 관찰하기 위해서 연마한 후 초산(8ml) + 빙초산(16ml) + 글리세린(76ml)의 부식액으로 에칭(etching)하였다.

4. 결 과

쌍 로울식 박판 연속 주조 방법에서 두 개의 로울러 표면에서 급냉 응고한 셀로부터 연속적인 박판의 제품을 얻었다.

Fig. 4, 5는 박판 제조의 주요 가능영역과 표면의 형태별 성질을 나타내었다. Fig. 5에서 주편 표면을 형태별로 나누면 표면양호, 길이방향의 크랙, 브레이크 아웃(break out), 리플마크(ripple mark) 등의 상태로 나누어졌다. 이는 로울러의 회전 속도와 초기 로울러 설정간격과의 관계에서 Fig. 5에서 도시한 부분의 좌측과 하단은 과대 압하력 상태로 나타나며, 상단은 브레이크 아웃, 우단은 길이 방향의 크랙으로 나타났

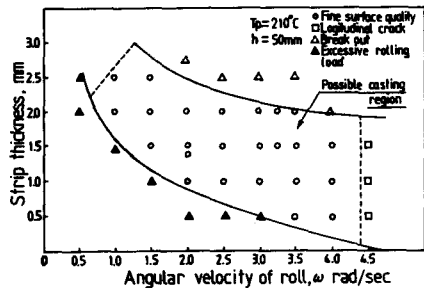


Fig. 4 The representation of the casting condition

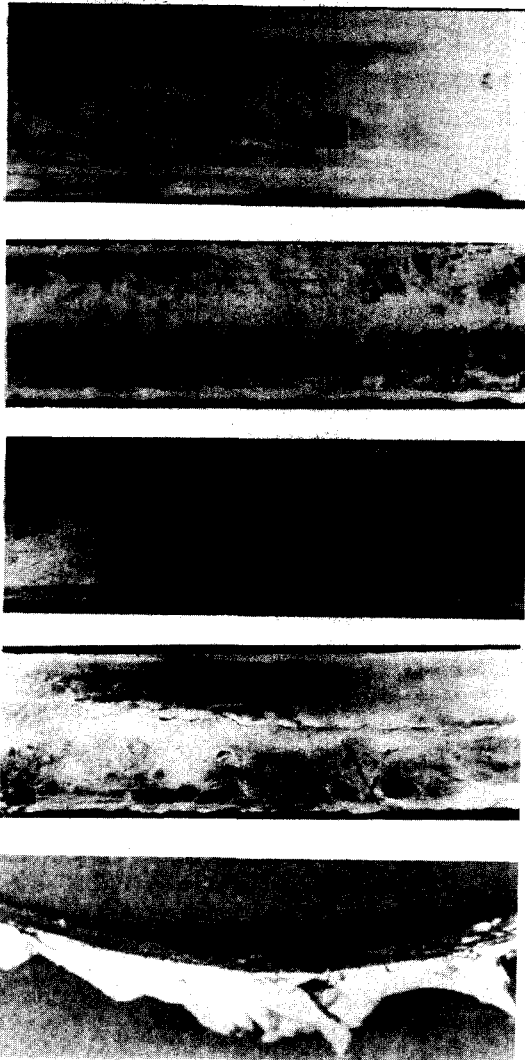


Fig. 5 Surface quality of strip by twin-roller technique

다. 초기 로울러 설정간격이 작으면 과도한 압하력이 걸리고 로울러 갭이 너무 크면 용고셀이 결합되지 않고 벌어져 분리되거나 브레이크 아웃 현상이 된다. 따라서, 주조 가능 영역에서 로울러 회전수 및 로울러 간격의 적정화에 의해서 연속적인 급냉시료가 얻어질 수 있었다.

주편의 고체상태 부분의 계산된 압력 분포를 Fig. 6에 나타냈다. 압력구배가 0이 되는 중립점을 얻었고 그때 압력은 최대로 되었다. Fig. 7은 단위폭당의 압하력 F_y 의 측정결과를 보였다. 여기서 시간경과에 따라서 기록된 측정치의 평균치로서 F_y 를 구했다. 정상

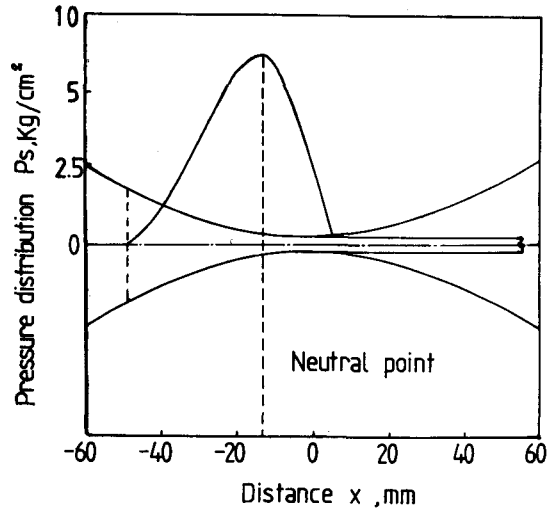


Fig. 6 Distribution of hydrostatic pressure of solid

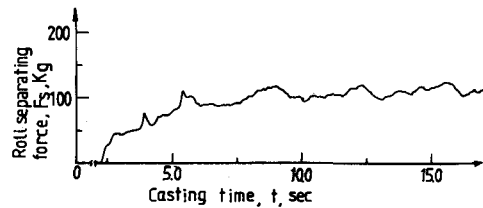


Fig. 7 Relation of roll separating force vs. casting time ($\omega=2.0$ rad/sec, $2H_0=0.5$ mm)

상태에서는 용융금속의 탕류높이가 일정하게 조절되므로 압하력은 일정하다.

Fig. 8, 9은 압하력과 초기 로울러 설정간격, 로울러의 회전 속도와의 관계를 나타냈다. 압하력의 계산치와 측정치는 잘 일치하였다. 여기서 압하력은 로울러의 각 속도와 초기 로울러 설정간격의 증가에 따라 감

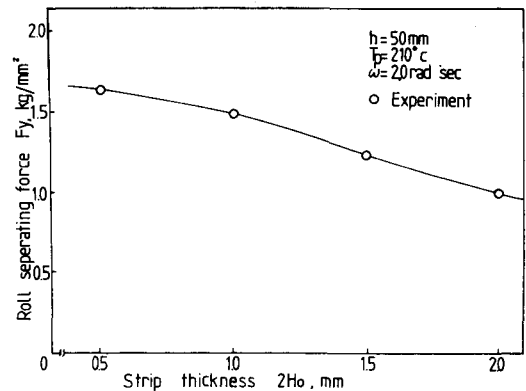


Fig. 8 Effects of strip thickness on roll separating force

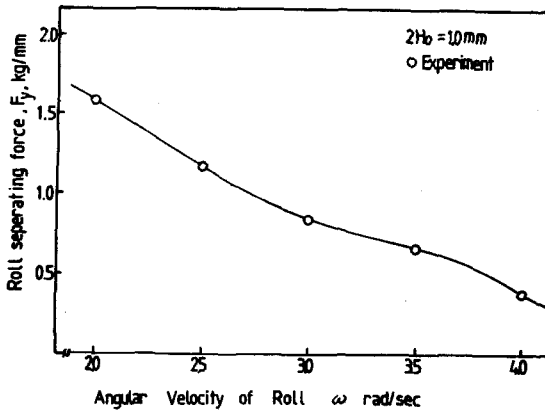


Fig. 9 Effects of angular velocity of roll on roll separating force

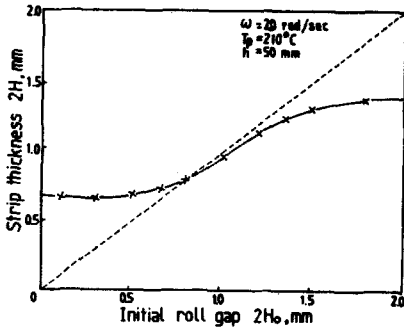


Fig. 10 Effects of initial roll gap on strip thickness

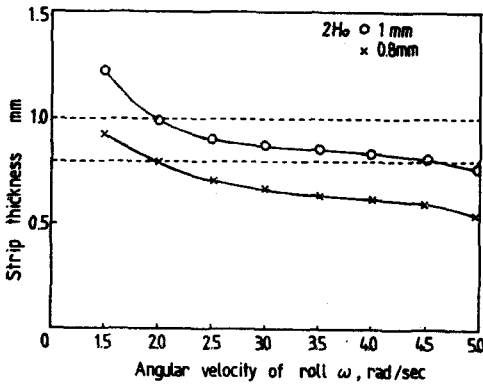


Fig. 11 Effects of angular velocity of roll on strip thickness

소하였다.

쌍 로울러식 연속 주조에 의해 만들어진 박판의 두께와 초기 로울러 설정 간격과의 관계를 Fig. 10에 나타냈다. 여기서, 초기 로울러 설정 간격이 0.8 mm 보다 더 얇은 경우, 박판 두께는 초기 로울러 설정 간격보다

훨씬 크며, 초기 로울러 설정 간격이 증가함에 따라 감소하다가 0.8 mm 보다 초기 로울러 설정 간격이 클 때는 박판 두께는 초기 로울러 설정 간격보다 작아졌다.

Fig. 11은 박판 두께와 로울러 회전 각속도의의 관계를 나타냈다. 실험 결과는 급냉한 박판의 두께는 로울러 각속도를 증가함에 따라 감소한다는 것을 나타내고 있다. 여기서, 초기 로울러 설정 간격과 시료의 두께가 일치하는 적절한 주조 영역으로서 로울러 회전 각속도 $\omega = 2.0 \text{ rad/sec}$ 에서 초기 로울러 설정 간격 0.8 mm~1.0 mm의 영역을 얻었다.

Fig. 12에 초기 로울러 설정 간격의 변화에 따른 로울러의 변형에 대한 효과를 보였다. 계산 결과와 실험 결과가 잘 일치하였다. 로울러 회전 속도 $\omega = 2.0 \text{ rad/sec}$ 일 때 초기 로울러 설정 간격이 0.8 mm~1.0 mm 사이의 간격에서 로울러의 변형이 거의 0에 가까웠다.

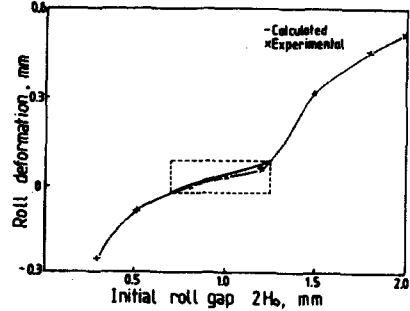


Fig. 12 Effects of the initial roll gap on the roll deformation ($\omega = 2.0 \text{ rad/sec}$)

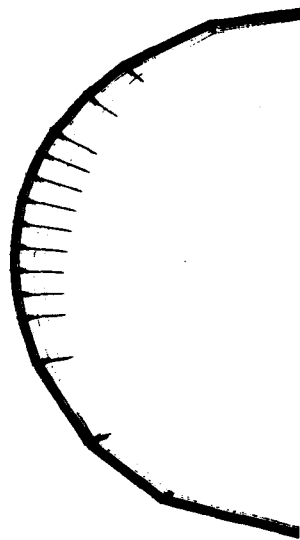


Fig. 13 The deformed finite element configuration of the roller ($\omega = 2.0 \text{ rad/sec}$, $2H_0 = 1.0 \text{ mm}$)

0.8 mm~1.0 mm 를 분기점으로 하여 초기 로울러 설정간격이 적을수록 압축, 끌수록 열팽창 됨을 알 수 있다.

Fig. 13은 압하력과 열팽창에 의한 로울러의 변형의 유한요소해석의 결과를 보였다. 열팽창이 미소한 크기로 나타나므로 100 배로 확대해서 그렸다. 여기서 초기의 유한요소 모델보다도 열변형에 의하여 로울러가 열팽창 하였음을 알 수 있다.

로울러의 변형이 항복에 도달 했는지를 평가하는데 유효응력을 계산했다. Fig. 14는 유효응력의 등 응력선과 크기를 나타냈다. 이것은 로울러의 단면의 응력상태가 일정한 유효응력의 선으로서 이루어진다. 최대 유효응력은 로울러와 응고셀의 접촉부분에서 일어났다.

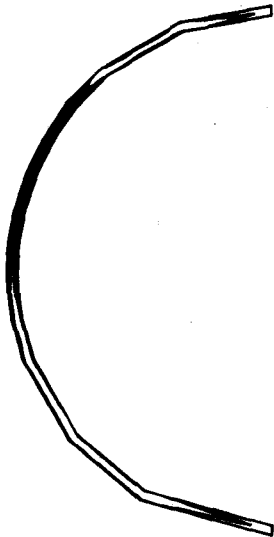


Fig. 14 Contour lines of equivalent stress of the roller ($\omega=2.0$ rad/sec, $2H_0=1.0$ mm)

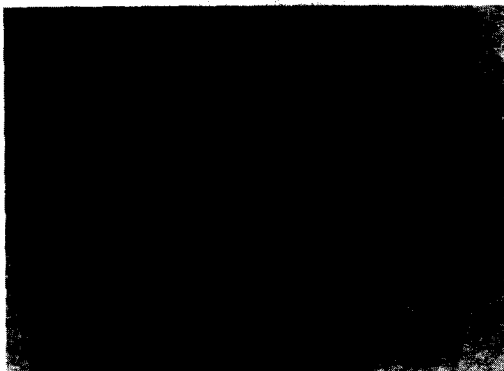


Fig. 15 Microstructures of rapidly solidified shell in Sn-15% Pb ($\omega=2.0$ rad/sec, $2H_0=1.0$ mm) $\times 150$

더구나 로울러의 모든 변형은 탄성 범위내이고 소성변형은 일어나지 않았다.

Fig. 15은 급냉 응고한 셀의 주변 두께 방향단면의 응고조직을 나타냈다. Sn을 많이 포함한 백색의 입상 조직의 입경이 평균적으로 작은 것을 알 수 있으며, 또 Sn 수지상정이나 Pb 수지상정은 관찰되지 않으며, 두께 방향으로 응고 조직의 방향성이 없다.

5. 고 찰

본 실험에서는 노즐 출구경과 풀(pool) 깊이, 용체온도등이 일정하고 벨브의 개폐로 용체유량을 일정하도록 조절하며, 중요한 조작변수로서 로울러의 초기 설정간격과 회전속도를 변화시켰다. 노즐을 통과한 용탕은 두개의 로울러 사이의 간격이 매우 좁을 때 로울러 사이에서 탕류를 만들고 응고셀 근방의 용탕 온도는 응점부근까지 떨어져 응고완료점이 위로 올라가며 시료의 두께와 폭이 커져서 탕류안을 확장하는 경향이 있음을 알았다. 이 조건에서 응고셀은 더 이상 균일하게 성장하지 못한다. 회전속도가 증가하면 접촉개시위치로부터 응고개시 위치로까지의 거리가 길어지며⁹⁾, 마찬가지로 용탕이 과열되면 접촉개시위치로부터 응고개시 위치까지의 거리가 길어질 것으로 생각된다. 과도한 냉각은 과도한 압하력의 발생으로 로울러에 대한 기계적 변형을 야기하며, 응고점이 상류쪽으로 크게 이동하여 유동성이 악화되고 응고금속의 압하율이 증가하므로 제품 두께에도 압하력이 커져서 로울러 설정간격보다 두꺼운 두께를 가지는 제품이 된다. 그러나 로울러 회전속도가 증가되거나 로울러 설정간격이 커서 냉각이 부적당하면 브레이크 아웃이 발생한다. 그리고 주변길이방향의 크랙은 로울러 회전속도의 증가에 의하여 부분적인 응고의 지연에 의해 야기됨을 알 수 있었다. 슬라브, 빌렛 등의 연속주조의 경우 포울딩(folding), 오버플로우마크(overflow mark), 리플마크(ripple mark)^{18,19)} 등이 탕면에서 처음으로 발생하는 것과 마찬가지로 쌍 로울식 연속주조에서도 탕면에서의 부분적인 응고에 의해 응고층은 매끄러운 표면을 만드는데 필요한 탕면의 변형을 방해하여 리플마크가 형성된다. 그것은 로울러의 열전달계수가 크면 입구와 응고완료점까지의 거리가 짧아지기 때문이다. 표면 성질의 개선은 용탕주입시 과열로 응고 출발점을 지연시키거나, 노즐의 적정화에 의한 주입방법의 개선 적절한 로울러 설정간격 및 주조속도의 선정등에 의하여 가능할 수 있다고 생각된다.

Miyazawa-Szekely⁽⁹⁾에 의하면 로울러의 열전달계수가 클수록 용탕의 분출속도와 로울러의 회전속도는 증가되어도 좋다고 하였다. 이는 로울러의 냉각특성은 로울러의 회전수와 용융금속의 분출속도 또는 초기 로울러 설정간격 등임을 말해 주고 있다. 따라서 용융금속의 푸울 깊이, 과열도^(20,21) 및 용융금속쪽의 열전달계수에 의해 지배되는 열 공급율은 수냉각을 통한 열 제거율과 균형을 이루어야 한다. 열 제거율은 셀 두께와 분부쪽의 열전달계수에 의해 영향을 받는다. 냉각매체로서 스테인리스 강을 사용했을 때 용융금속 Sn에 대한 냉각속도 및 열전달 계수는 각각 $1.7 \times 10^6 \sim 6.4 \times 10^6 \text{ C/s}$, $0.28 \text{ cal/cm}^2 \text{ C/s}$ 이며, Cu는 Al, Pb, Sn-Pb 등의 용융금속에 대하여 각각 $6.9 \times 10^6 \sim 1.2 \times 10^6 \text{ C/s}$, $4.4 \sim 5.0 \text{ cal/cm}^2 \text{ C/s}$ 정도이다⁽²²⁾. 따라서, 스테인리스 강의 로울러를 사용해서 적절한 냉각조건을 얻었다. 본 연구에서는 평균냉각속도 및 열전달 계수는 각각 $50 \sim 200 \text{ C/s}$, $0.3 \text{ cal/cm}^2 \text{ C/s}$ 이다. 吉田千厘⁽²²⁾ 등의 연구에 의하면 동합금계 로울러를 사용한 경우에는 스테인리스 강 연속주조에서 중심부에서 수지상정(dendrite)이 발생했지만, 스테인리스 강 로울러를 사용했을 때에는 중심부에 등축정이 생성되며, 이는 로울러 재료의 차에 의하여 응고완료 위치가 다른 것이 영향인 것으로 보고하고 있다. 또 회전속도의 증대에 따라서 응고완료 위치는 로울러 간격의 하류측으로 내려가므로 응고금속의 압하력이 감소한다. 그리고 여기서 로울러의 용탕쪽으로부터의 열수수에 의하여 로울러의 과도한 열팽창이 초래된다. 따라서 초기 로울러 설정 간격의 효과는 설정 로울러 간격이 증가하면 응고완료 위치가 로울러 간격의 하류측에 크게 이동하기 때문에 압연시의 로울러간 거리의 증가에도 불구하고, 응고완료 위치에 있어서의 시료의 두께가 감소할 것이 예견된다. 실제로 시료의 두께는 감소하고 있으며 이는 뒤에 서술하듯이 열팽창에 의한 것으로 생각된다. 따라서 쌍 로울러법에 의하여 박판금속을 제조하는 경우에 로울러 간격에서의 응고의 완료와 로울러 온도 상승의 억제에 대하여 적절한 로울러 설정 간격 및 회전속도가 존재한다고 생각된다.

쌍로울식 연속 주조에서의 압연특성은 로울러의 회전수와 초기 로울러 설정간격에 의하여 달라지는 것을 알았다. 노즐에서 분출되는 유량의 크기⁽⁹⁾에도 크게 달라진다. 이는 냉각속도를 변화시키며 그로 인하여 시료의 압하율에 영향을 미치므로써 제품의 질과 치수에 영향을 미친다. 본 연구에서는 유량의 크기는 일정하게 하여 로울러 회전수와 초기 로울러 설정간격

의 효과만을 검토하였다. 쌍 로울러법 박판 제조시에는 시료 두께가 폭방향의 중앙부에는 로울러의 열팽창에 의하여 감소하며, 양측으로는 온도 저하에 인하여 압하율이 저하되어 두께가 증가하는 경향⁽¹¹⁾이 있다. 본 실험에서는 시료의 두께가 폭방향으로는 비교적 균일했다. 그 이유로서 주조재료를 로울러제보다도 아주 부드러운 합금을 사용한다는 점 및 시료 폭이 비교적 적은 실험조건을 적용한 때문으로 생각된다. 실험결과에서 알 수 있었듯이, 설정 로울러간 거리의 증가에 따라 시료 두께는 증가하여 설정 로울러간 거리에 접근한다. 이 경우에는 용탕이 로울러의 접점에 달하기 전에 상당히 온도가 떨어져 응고완료 위치가 푸울의 상류에 위치하여 압하정도가 커지기 때문에, 그 때 로울러의 탄성변형이 가미되어 두께가 커지는 것으로 생각된다. 초기 로울러 설정간격을 계속 증가하며 주조를 할 경우 시료두께와 로울러 설정 간격이 일치한 이후로 시료 두께가 오히려 감소하는데, 이는 매우 많은 열방출이 이루어져서, 압하력에 의한 로울러의 변형보다는 열팽창에 의한 로울러의 변형이 더 커져서 로울러의 간격이 좁아졌기 때문이다. 로울러 회전수와 초기 로울러 설정 간격의 증가는 박판으로부터 방출되는 열유속 밀도를 증가시켜, 그로 인한 로울러의 열팽창이 커져서 제품의 두께는 로울러 회전수와 초기 로울러 설정 간격이 클수록 작아진다고 생각된다. 용접부근에서의 열간제품(hot solid)에 대한 심각한 변형은 열간 압연중에 고유한 열간 크랙(hot cracks)과 같은 결점들을 만들므로써 시료를 손상하게 한다. 본 실험에서 박판의 효율적인 제조에 적당한 회전속도 및 두께는 각각 2.0 rad/sec , $0.8 \text{ mm} \sim 1.0 \text{ mm}$ 가 좋다고 생각된다.

쌍 로울러법에서 로울러의 조건은 냉각성능, 압연력에 대한 변형저항, 내마멸성이 큰 재질이 요구된다. 그래서 로울러제의 선정에 관하여는 여러가지 표면처리를 사용하며, 또 로울러의 표면이 거칠어지므로 재연마의 용이성도 공업적으로 중요하다. 따라서 로울러 재료는 재연마가 용이하며 내마멸성이 큰 고속도강, 다이스강, 동합금재 등의 사용이 유리한 것으로 알려졌다. 냉각성능면에서는 순동계 로울러와, 스테인리스강 로울러의 최소두께를 결정하기 위해서는 냉각매체 내에서의 온도변화와 응력상태를 조사하여야 한다. 유효응력은 전단응력의 척도이며 로울러의 변형이 왕복에 도달했는지를 평가하는데 사용되며, von Mises 항복조건을 적용하였다. 순동계 로울러에 의하여 비정질 합금 박판을 만드는 경우에 연한 순동계 로울러가 상

당한 압하를 받으면 소성변형하여 판 두께 차를 야기한다고 보고되고 있다⁽²⁴⁾. 본 실험에서는 스테인리스강 로울러를 사용했기 때문에 소성변형은 일어나지 않았다. 그러나 열간압연할 때와 마찬가지로 로울러의 회전으로 인하여 로울러 표면은 반복적으로 높은 피로 하중과 열충격을 받아서 로울러의 마멸과 수명^(25,26)에 상당한 영향을 미친다. 고용력을 받는 부분의 응력 수준을 줄여 변형을 감소시키는 한 방법으로서 냉각수의 속도를 크게하여 로울러 온도를 줄이면 열팽창이 줄어들므로 로울러의 과도한 변형을 억제하여 로울러의 수명 단축을 방지하고, 박판 두께의 변화에 대한 방지도 기할 수 있다고 사료된다. 따라서 로울러의 압연특성에 영향을 미치는 인자는 로울러의 두께와 재질로서 냉각수 속도등에도 로울러의 냉각성과 상관관계가 있다고 생각된다. 강을 주조할 경우에 적절한 냉각속도를 얻고 변형에 대한 적절한 두께를 가질 수 있도록 로울러의 설계가 필요하다. 본 연구에서 행한 실험에서 로울러의 두께는 냉각속도에 대하여 로울러 변형을 고려할 때 최소 두께로서 적당하다고 생각된다. 이는 강의 주조에 대하여 응용될 수 있다.

급냉 응고시에는 큰 과냉각이 얻어지고 냉각 속도가 빠르기 때문에 결정립의 미세화, 고용도의 확대 등의 효과를 얻는다. Sn-15% Pb에서는 Pb 함량이 적으므로 Sn 수지상정이나 Pb 수지상정은 관찰되지 않는다는 보고⁽²⁷⁾와 일치한다. Chu, Shiohara 와 Flemings⁽²⁸⁾ 등은 과냉도가 큰 상태에서 응고할 때 아공정 조성에서는 Sn 수지상정이 관찰되지 않으며, 과공정 조성에서는 Pb 수지상정이 잘 생성된다고 보고하고 있다. Pb 양이 적으면 주위 액상내의 Sn 농도가 높기 때문에 Pb 상과 액상의 계면에서의 용질 재분배 속도가 늦어 Pb 상의 성장 속도가 늦게 될 것이며, 따라서 Pb 상이 완전한 수지상정으로 성장하기 전에 주위의 액상이 빨리 응고⁽²⁷⁾하는 것으로 여겨진다. 또 두께방향으로는 응고 조직의 방향성이 없다는 것은 Sn-Pb 고용체로 응고한 다음 냉각 중에 Pb 상이 석출되었다고 보는 방법과 응고중에 Sn 상과 Pb 상이 거의 동시에 생성된 것으로 보는 방법⁽²⁷⁾이 있는데, 로울러 부근에서 백색의 입상 조직의 입경이 평균적으로 작음으로 봐서, 급냉 응고시 과냉도가 매우 커서 용질 확산이 불충분하므로 Sn 상의 핵생성의 빈도는 크지만 성장이 억제되어 백색 Sn 이 미세립화한 것으로 보인다. 따라서 로울러 표면에 가까울수록 수지상정의 성장 없이 냉각이 빠르다는 것을 알 수 있다. 또 여기 쌍 로울식 연속 주조에서 정적인 응고조직의 경우와는 달리 압연 변형되기 때문에

응고 조직에 압연효과도 함께 가미되었다. 로울러의 회전 속도가 낮고 로울러 설정간격이 좁을 경우, 응고 완료되는 상류로 이동하고 응고금속의 압하력은 증대하므로 압연변형의 영향을 받기 쉬울 것으로 생각된다.

6. 결 론

쌍 로울식 박판연속주조에 대한 실험 결과와 해석 결과를 종합하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 로울러 회전수 및 로울러 간격의 적정화에 의하여 표면 상태가 양호한 연속적인 박판을 얻었다.

(2) 로울러 두께 방향에 있어서 열팽창이 급냉 시료의 두께 변화에 현저하게 영향을 주었다.

(3) 본 연구의 실험조건에서 로울러회전속도 $\omega=2.0$ rad/sec 일 때 초기 로울러 설정간격이 0.8 mm~1.0 mm 를 진후하여 시료의 두께와 잘 일치했다. 초기 로울러 설정 간격이 0.8 mm~1.0 mm 보다 작을 때 과대 압하력에 의하여 급냉 시료의 두께는 커지며 0.8 mm~1.0 mm 보다 크면 열팽창이 커지므로 급냉 시료의 두께가 작아진다.

(4) 로울러의 열팽창을 고려한 열탄성 유한요소모델에 의하여 로울러 변형을 계산한 결과, 실험치와 잘 일치하여 해석방법의 유효성을 입증하였다. 그리고 본 연구에서 로울러의 변형은 탄성 범위내에서 일어나며, 소성 변형은 일어나지 않았다. 그러나 이 열응력의 변화는 로울러에 대하여 열피로로 작용하여 로울러의 수명단축에 요인이 된다.

(5) 본 실험에서 얻어진 급냉응고 시료의 주변 두께 방향에 대한 응고조직은 백색 Sn 이 미세립화 하여 입경이 균일하며, 로울러 표면에 가까울수록 냉각이 빠르므로 수지상정의 성장이 없었다.

참 고 문 헌

- (1) Emley, E.F., 1976, "Continuous Casting of Aluminum, International", Metals Reviews, Vol. 21, p. 75.
- (2) Kusakawa, T., 1986, "Outline of Today's Strip Casting of Ferrous Materials", Trans. ISIJ, Vol. 26, pp. B-123~B-125.
- (3) Itoh, Y., 1986, "Current Status of Continuous Casting Technology and Quality", Tetsu to Hagane, No. 16, pp. 1667~1673.
- (4) Yoshida, C. et al, 1886, "Characteristics of Rapidly Solidified Cast Iron and High Carbon Steel",

- Tetsu to Hagane, No. 16, pp. 2240~2246.
- (5) 小菊 外, 1985, “高硅素鋼急冷薄帯の凝固の特性”, 鐵と鋼, Vol. 25, No. 16, pp. A 229~A 232.
- (6) Nishioka, S. et al, 1986, “Research On Twin-Roll Casting Process”, Trans. ISIJ, Vol. 26, p. B-147.
- (7) Clyne, T.W. and Garcia, A., 1981, “Application of a New Solidification at Flow Model to Splat Cooling”, J. of Materials Science, Vol. 16, pp. 1643.
- (8) Pimitkar, S.M. and Carfonara, K.S. and Rayment, J.J. and Mecal, L. and Clauer, A.H., 1984, “Comparison of Single Roller and Double Roller Processes for Casting Low Carbon Steel”, Proc. 5th. Int. Rapidly Quenched Metals Conf., p. 95.
- (9) Miyazawa, K. and Szekely, 1981, “A Mathematical Model of the Splat Cooling Processes Using the Twin-Roll Technique”, Met. Trans. Vol. 12A, pp. 1047~1051.
- (10) 竹本弘郷 外, 1986, “双ロール式連続機の薄板鑄片の引抜き実験(双ロール式連続鑄造機の開發)”, 鐵と鋼, Vol. 26, No. 4, p. S142.
- (11) Miyazawa, K. and Choh, T. and Inoue, M., 1982, “Cooling Characteristics of the Twin-Roll Rapid Solidification Process”, J. JIM, Vol. 46-11, pp. 1102~1108.
- (12) Ohnaka, I., 1985, “Production of Amorphous Alloy Materials and Rapid Quenching Techniques”, J. JSME, Vol. 88~802, pp. 60~64.
- (13) Murty, Y.V. and Adler, R.P., 1982, “High Speed Casting of Metallic foils by the Double-Roller Quenching Technique”, J. of Materials Science, Vol. 17, pp. 1945~1954.
- (14) Samarasekera, I.V. and Anderson, D.L. and J. K. Brimacombe, 1982, “The Thermal Distortion of Continuous Casting Billet Mold”, Metallurgical Transaction B, Vol. 13B, pp. 91~104.
- (15) Samarasekera, I.V. and Brimacombe, J.K., 1982, “The Influence of Mold Behavior on the Production of Continuously Cast Steel Billets”, Metallurgical transaction B, Vol. 13B, pp. 105~106.
- (16) Samarasekera, I.V. and Brimacombe, J.K., 1982, “Thermal and Mechanical Behavior of Continuous Casting Billet Molds”, Ironmaking and Steelmaking, No. 1, pp. 1~15.
- (17) Pinsky, D.A. and Charreyron, P.O. and Flemings, M.C., 1984, “Compression of Semi-Solid Dendritic Sn-Pb Alloys at Low Strain Rates”, Met. Trans. Vol. 15B, pp. 171~173.
- (18) Tomono, H. and Ackermann, P. and Heinemann, W., 1984, “Elements of Surface Mark Formation in Continuous Casting of Steel”, The Metals Society, AIM Solidification Technology, pp. 524~531.
- (19) Clyne, T.W. and Wolf, M. and Kurz, W., 1982, “The Effect of Melt Composition on Solidification Cracking of Steel with Particular Reference to Continuous Casting”, Metallurgical Transactions B, Vol. 13B, pp. 259~266.
- (20) Birat, J.P. and Foussal, J. and Larrecq, M. and Saguez, C. and M. Wanin, 1983, “Influence of Convective Heat Transfer on Solidification in the Mold During Continuous Casting of Steel”, The Metals Society, AIM, Solidification Technology, pp. 536~543.
- (21) Irving, W.R. and Perking, A., 1977, “Basic Parameters the Quality of Continuous Cast Slabs”, Ironmaking and Steelmaking, No. 5, pp. 292~299.
- (22) Suzuki, T. and Miyata, Y. and Sakata, H. and Othta, M., 1987, “Measurement of Heat Transfer coefficient between Melt and Chill”, Tetsu to Hagane, Vol. 289~296.
- (23) 吉田千里 外, 1987, “SUS 304の凝固組織に及ぼすロール材質の影響(双ロール式ストリップキャスターの開發(1))”, 鐵と鋼, Vol. 27, p. S142
- (24) Ishihara, I. and Ikuta, I., 1982, “Non-Uniformity of the Thickness of Amorphous Ribbon Made by the Double Roller Quenching Method”, J. JIM, Vol. 46-1, pp. 94~99.
- (25) 平剛久 外, 1985, “熱延仕上げ前段用高クロム鑄鐵の肌荒れにつて”, 鐵と鋼, Vol. 25, No. 4, p. A257.
- (26) Ohkomori, Y. et al, 1987, “Study of Spalling Hot Strip Mill Backup Roll”, Tetsu to Hagane, No. 1, pp. 691~698.
- (27) Kim, W.T. and Kim, T.H., 1985, “On the Microstructure of Rapidly Sn-Pb Alloys”, J. KIM, Vol. 23, pp. 437~442.
- (28) Chu, M.G. and Shiohara, Y. and Flemings, M. C., 1984, “Solidification of Highly Undercooled Sn-Pb Alloy Droplets”, Met. Trans. Vol. 15A, pp. 1303~1310.