

〈논 문〉

쌍롤에 의한 박판주조시 열전달 특성에 대한 실험적 고찰

박승운* · 김기운* · 김 유**

(1995년 3월 18일 접수)

An Experimental Study on Heat Transfer Characteristics of a Rapid Cooling Process by Twin-Roll

Seung-Woon Park, Ki-Woon Kim and Yoo Kim

Key Words : Twin-Roll(쌍롤), Rapid Cooling Casting (급냉주조), Heat Transfer Characteristics(열전달특성)

Abstract

An Experimental investigation was carried out to examine the heat transfer characteristics of rapid cooling process by Twin-Roll. The experimental results were compared with numerical solutions. The measured temperature showed the about 3 % difference to the calculated results. But the cooling rate estimated by the microstructure interpretation method has much difference to the calculated results.

기호설명

Ⅲ : 3구역(고체)

- C : 비열
- H : 수준별 롤의 반거리
- h : 열전달 계수
- K_i : 액상 열전도도
- K_s : 고상열전도도
- T_r : 롤온도
- T_s : 응고 온도
- α : 열 확산 계수
- ρ : 열 확산 계수
- λ : 잠열
- μ : 점도
- σ_{ij} : 응력벡터
- ω : 롤 회전 속도
- I : 1구역(액체)
- Ⅱ : 2구역(액체-고체)

1. 서 론

쌍롤식 급냉주조법에 의한 박판의 제조는 기존의 소성가공에 따른 중간공정을 생략할 수 있을뿐만 아니라, 박판의 기계적성질 및 조직의 미세화를 기대할 수 있어 신주조기술로 최근 각광을 받고 있다.

1857년 영국의 Bessemer⁽¹⁾가 용강으로부터 직접 박판 제조를 시도한 이래 Miyazawa K. 등,⁽²⁾ Saitoh T, 등⁽³⁾이 수학적 model에 의한 열전달 문제를 해석한 바 있으며 Murty Y. V. 등⁽⁴⁾은 주석과 Al-Si 합금에 대한 박판제조공정이 유체이동과 열 흐름에 의해 제어된다는 것을 실험에 의해 고찰하였다. 국내에서는 황,⁽⁵⁾ 박⁽⁶⁾ 등이 수치해석에 의해 쌍롤주조시 열전달 특성을 연구한 바 있으며, 백⁽⁷⁾ 및 오⁽⁸⁾는 Sn-Pb 합금 및 Stainless 강에 대

*회원, 국방과학연구소

**회원, 충남대학교 기계공학과

한 실제 주조과정에서 나타날 수 있는 여러 가지 시스템의 특성과 제조된 박판의 조직 및 기계적 성질에 대해 연구하였다.

본 연구에서는 쌍롤식 급냉주조법을 이용한 박판의 주조시 운용조건에 따른 열전달 특성을 실험을 통하여 규명하였으며, 실험결과와 수치해석 결과를 비교하였다. 실험대상 금속으로 순도 99.8%의 알루미늄을 사용하였다.

2. 이론적 배경

본 연구에서는 쌍롤식 급냉주조의 해석모델로써 Miyazawa K.⁽²⁾가 제안한 Fig. 1의 2차원 유동모델을 적용하여 해석하였으며, 이의 적용을 위한 가정 조건은 다음과 같다.

① roller는 변형이 없으며, 운용시 용융금속과의 미끄러짐이 없다.

② 온도장과 속도장은 두 roller 사이의 중심선에 대해 대칭이다.

③ $\partial u/\partial x$, $\partial v/\partial x$, $\partial v/\partial y$ 는 $\partial u/\partial y$ 에 비해 매우

작은 값이므로 무시한다.

④ 용융금속에 미치는 정압은 y 방향으로 일정하다.

⑤ 상변화면에서 mush zone 영향은 무시한다.

2.1 지배방정식

· 연속방정식 :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

· 운동량방정식 :

$$\frac{dP}{dx} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (\text{액상영역}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = 0 \quad (\text{고상영역}) \quad (3)$$

· 에너지방정식 :

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (4)$$

· 질량균형방정식 :

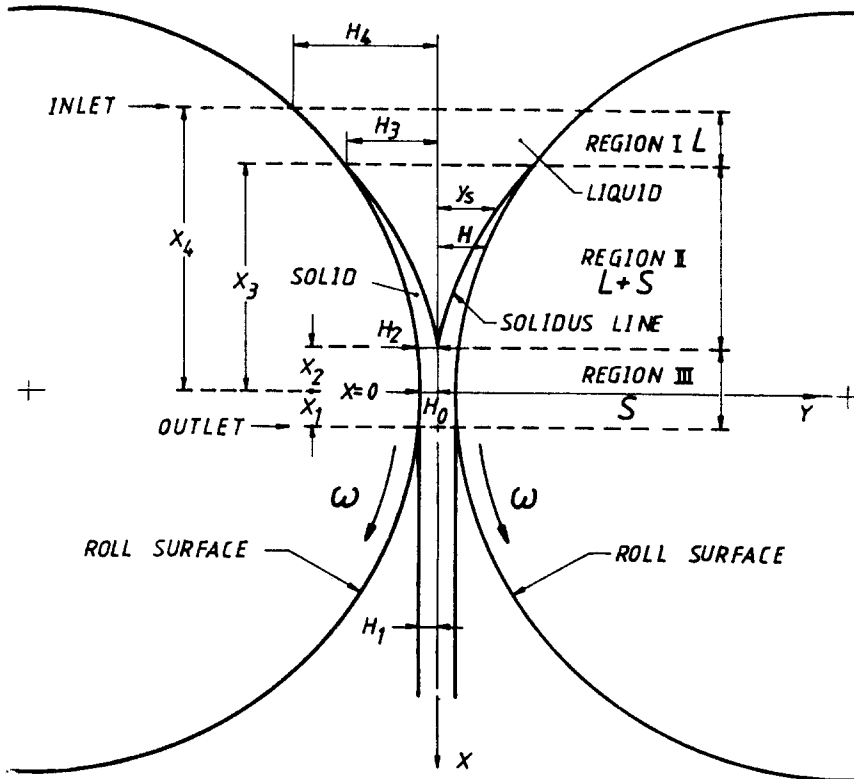


Fig. 1 Schematic diagram of twin-roll rapid solidification process

$$\frac{q}{2} = \int_0^H u dy \text{ (액상 및 고상영역)} \quad (5)$$

$$\frac{q}{2} = \int_0^{y_s} u_i dy + \int_{y_s}^H u_s dy \text{ (mushzone 구역)} \quad (6)$$

2.2 경계조건

2.2.1 속도 및 압력장

· 액상구역 (I)

$$0 \leq Y \leq H, \quad X = X_4; \quad u_i = u_o = 0, \quad v_i = v_o = 0$$

$$0 \leq Y \leq H, \quad X = X_3; \quad (u_i)_1 = (u_i)_2,$$

$$(v_i)_1 = (v_i)_2 \quad (7)$$

$$Y = 0, \quad X_4 \leq X \leq X_2; \quad \frac{\partial u_i}{\partial y} = 0, \quad v_i = 0$$

$$Y = H, \quad X_4 \leq X \leq X_3; \quad u_i = u_m, \quad v_i = v_m$$

· 액상과 고상 혼합구역(II)

$$Y = 0, \quad X_3 \leq X \leq X_2; \quad \frac{\partial u_i}{\partial y} = 0, \quad v_i = 0$$

$$Y = Y_s, \quad X_3 \leq X \leq X_2; \quad u_i = u_s = u_{so},$$

$$v_i = v_s = v_{so} \quad (8)$$

$$0 \leq Y \leq H, \quad X = X_2; \quad \left(\frac{\partial P_s}{\partial x} \right)_2 = \left(\frac{\partial P_s}{\partial x} \right)_3$$

$$(u_s)_2 = (u_s)_3, \quad (v_s)_2 = (v_s)_3$$

· 고상구역(III)

$$Y = 0, \quad X_2 \leq X \leq X_1; \quad \frac{\partial u_s}{\partial y} = 0, \quad v_s = 0$$

$$Y = H, \quad X_2 \leq X \leq X_1; \quad u_s = u_m, \quad v_s = v_m \quad (9)$$

$$X = X_2, \quad X = X_1; \quad P_s = P_{so}$$

$$X = X_1; \quad \frac{q}{2} = H u_m$$

여기서

$$u_m = (u_r - u_o) \left(\frac{X_4 - X}{X_4 - X_2} \right)^n + u_o; \text{ 영역 I 및 II}$$

$$u_m = \frac{v_i}{R} \sqrt{(R^2 - X^2)}; \text{ 영역 III}$$

$$v_m = \frac{v_i}{R} X; \text{ 영역 I, II, III}$$

2.2.2 온도장

· 액상구역 (I)

$$0 \leq Y \leq H, \quad X = X_4; \quad T_i = T_o$$

$$Y = 0, \quad X_4 \leq X \leq X_3; \quad \frac{\partial T_i}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

$$Y = H, \quad X_4 \leq X \leq X_3; \quad -k_i \frac{\partial T_i}{\partial y} = h(T_i - T_r)$$

$$0 \leq Y \leq H, \quad X = X_3; \quad (T_i)_1 = (T_i)_2$$

· 액상과 고상 혼합구역(II)

$$Y = Y_s, \quad X_3 \leq X \leq X_2; \quad T_i = T_s = T_{so}$$

$$Y = H, \quad X_3 \leq X \leq X_2; \quad -k_s \frac{\partial T_s}{\partial y} = h(T_s - T_r)$$

(11)

$$0 \leq Y \leq H, \quad X = X_2; \quad (T_s)_2 = (T_s)_3$$

$$Y = Y_s; \quad k_i \frac{\partial T_i}{\partial y} - k_s \frac{\partial T_s}{\partial y} = \rho \lambda \left(v - u \frac{dy_s}{dx} \right)$$

· 고상구역(III)

$$Y = 0, \quad X_2 \leq X \leq X_1; \quad \frac{\partial T_s}{\partial y} = 0$$

$$Y = H, \quad X_2 \leq X \leq X_1; \quad -k_s \frac{\partial T_s}{\partial y} = h(T_s - T_r)$$

(12)

여기서 $h = h_0 \frac{u_m}{u_r}$; 영역 I 및 II

$h = h_0$; 영역 III

3. 수치해석

이론식을 근거로 유한차분법(FDM)에 의한 수치 해석 Code는 황,⁽⁵⁾ 박⁽⁶⁾ 등에 의해 검증된 바 있다. 계산과정에 대한 흐름도는 Fig. 2와 같으며, 입력자료로 사용된 AI의 물리적 특성 및 제조조건은 Table 1과 같다.

4. 실험장치 및 실험방법

4.1 실험장치

실험장치의 개략도는 Fig. 3과 같으며, 구성은 급냉주조장치, 용융금속 공급장치 및 측정장치로 되어 있다.

급속냉각 주조장치는 2개의 롤러와 이를 구동하는 모터 등 구동장치와 롤러의 냉각을 위한 냉각수 탱크 및 냉각수 펌프 등 냉각장치로 구성되어 있다. 서로 반대방향의 동일한 속도로 회전하는 2개의 롤러는 회전수 및 간격을 조절할 수 있으며, 롤러를 냉각하기 위한 냉각수는 교류모터에 의해 구동되는 펌프에 의해 냉각수 탱크($\phi 600 \times 600$)로부터 롤러의 내부로 공급되고, 공급된 물은 다시 냉각수탱크로 순환되도록 하여 용융금속에 의한 롤러 표면의 온도상승을 억제할 수 있다.

가열로는 교류 220 volt 용 전기로를 사용하였으

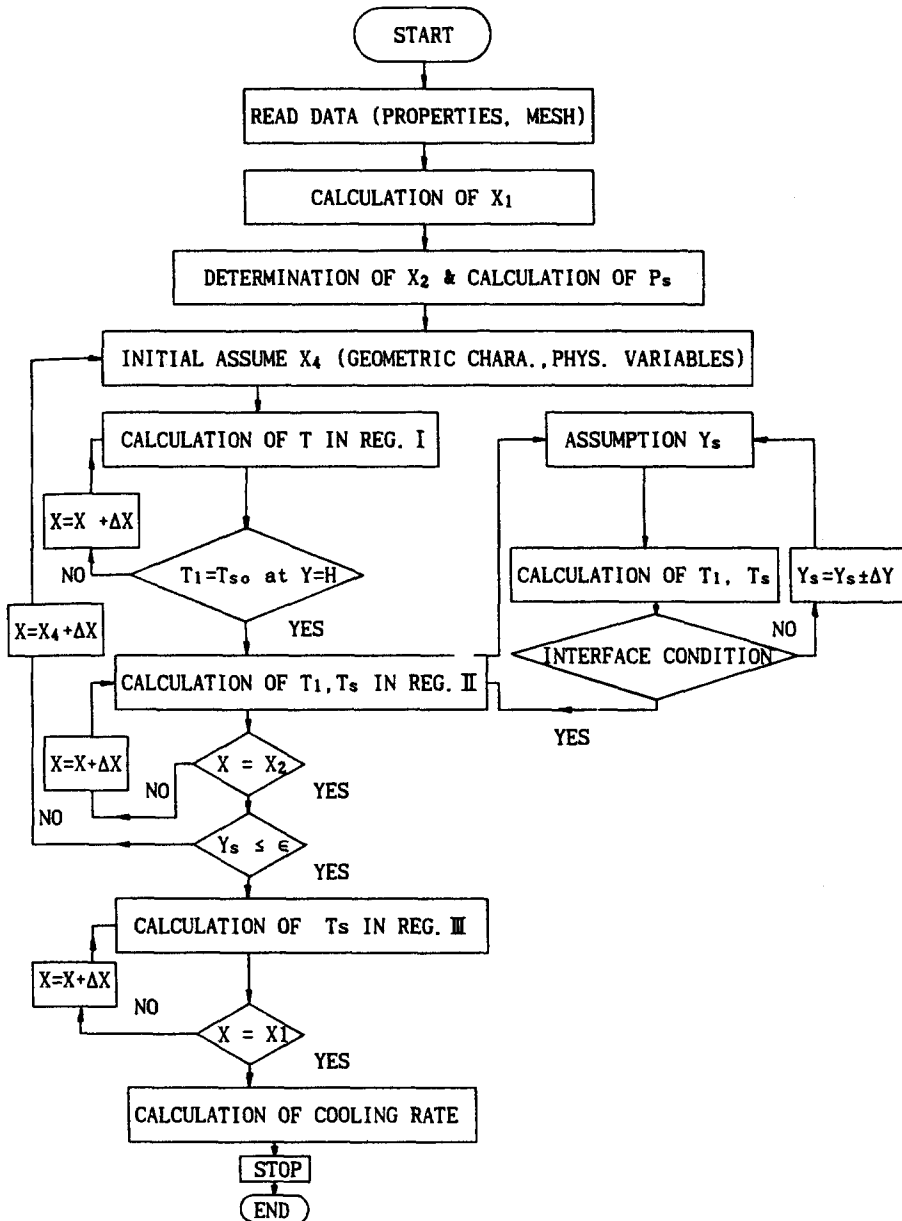


Fig. 2 Flow chart for simulation (TRTEC)

며, digital thermometer (Omega, 2168A)를 사용하여 온도를 측정할 수 있도록 하였다. Tundish는 용융된 금속을 양 롤러의 사이에 주입하는 동시에 유량을 조절할 수 있도록 되어 있다.

열전대로부터 얻어진 전기적신호는 온도측정용 증폭기(우진계기, 모델 I2ST-T)에 의해 200배 정도로 증폭되어 IBM PC의 모니터에 나타날 수 있

도록 하였다. 또한 sampling 주기는 40 ms로 하였으며, 이때의 측정시간은 약 8초 정도로 하였다.

본 실험장치에 대한 주요 제원은 Table 2와 같다.

Fig. 4는 온도측정 위치를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 양 롤러의 중심선상 및 롤러의 표면으로 1~1.5 mm 이격거리에 X 방향으로 각

Table 1 Thermophysical properties of Al and input conditions^(5,6)

| Property | Symbol | Unit | Al |
|-------------------------------|-----------|---------------------------|--------------------|
| Specific heat | C | (cal/g°C) | 0.25 |
| Thermal conductivity (solid) | Ks | (cal/cm s°C) | 0.52 |
| Thermal conductivity (liquid) | Kl | (cal/cm s°C) | 0.15 |
| Latent heat | λ | (cal/g) | 96.3 |
| Density | ρ | (cal/cm ³) | 2.7 |
| Solidus temperature | Ts | (°C) | 660 |
| Roll temperature | Tr | (°C) | 20 |
| Heat transfer coefficient | h | (cal/cm ² s°C) | 1.0 ⁽⁹⁾ |

Table 2 Specifications of experimental apparatus

| Item | Specification |
|----------------|--|
| Roll size | $\phi 300 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ |
| Rotation speed | 0~120 RPM (0~1.9m/sec) |
| Roll Material | Low carbon steel (S45C) |
| Driving motor | 3HP, 110/208 Volt AC |
| Cooling type | Water cooling by water pump |
| Water tank | $\phi 600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ steel tank |

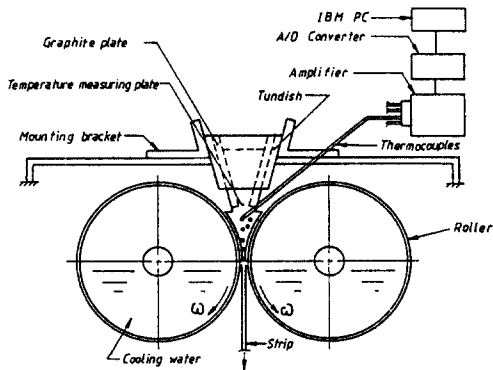


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

각 2 mm, 6 mm, 9 mm, 12 mm, 15 mm에서 측정하였다. 지름 0.3 mm K형 열전대를 tundish 내부 안내판으로 사용된 흑연판에 지름 1.5 mm의 구멍을 가공하고 세라믹 단열판으로 보호된 2선의 열전대를 삽입하여 사용하였다.

Table 3 Specifications of thermocouple

| Item | Specification |
|-------------------|------------------------|
| Type | K (Chromel-Alumel) |
| Wire diameter | 0.3 mm |
| Wire length | 2 m |
| Wire type | solid |
| Temperature range | 0~1250 °C |
| Time constant | 0.3 sec |
| Accuracy | $\pm 0.75 \%$ |
| Insulation | Glass Braid |
| Maker | Omega Engineering Inc. |

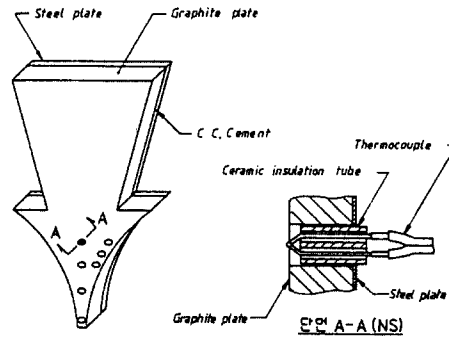


Fig. 4 Temperature measurement

사용된 열전대의 제원 및 특성치는 Table 3과 같다.

4.2 실험방법

실험에 사용된 알루미늄은 순도 99.8%로서, 용융금속의 응고시에 mush zone의 영향이 작은 순도 높은 금속을 사용하였다. 900 W 용 전기로를 사용하여 과열도 약 100 °C가 되도록 가열하였으며, 내화성 단열상자에 넣어 온도강하를 최소한으로 줄인 후 주입온에 도달하였을 때 용융금속을 tundish에 주입하였다. 양 롤러의 간격, 롤러의 회전속도를 변화하면서 실험하였다. 냉각속도의 추정을 위하여 주조에 의해 제조된 박판시료의 단면을 절단 채취하여 직경 약 50 mm의 크기로 molding 재에 cold mount하여 emery paper (#600~1200)로 단계적으로 연마한 후 16 μm , 1 μm 다이아몬드 polisher paste로 정마하고 0.5 μm Al₂O₃ 분말로 폴리싱하였

다. 폴리싱이 종결된 후 다시 흐르는 물과 알콜로 세척하고 압축공기로 건조하였다. 연마가 끝난 시료는 불산(48%) 5 ml과 증류수 95 ml의 비율로 혼합한 불산수용액으로 약 15초 동안 부식시켜 광학 현미경에 의해 조직을 관찰하였다.

5. 실험결과 및 고찰

본 연구는 기존 수치해석 code에 의한 해석결과와 실험결과를 비교분석하고, 실험에서 얻어진 시편의 미세조직을 관찰하여 냉각속도를 추정하였다. Fig. 5는 특정운동조건에서 측정된 온도분포를 보여주고 있으며, 정상상태를 유지한 약 6초 동안의 측정된 온도를 자료로 활용하였다.

Fig. 6은 공급유량 및 롤러의 간격이 일정할 경우, 롤러의 회전속도에 따른 온도분포를 보여주고 있다. 전반적으로 해석결과와 실험결과는 비슷한 온도분포를 보이고 있으나 실험결과의 온도분포가 약간 낮게 나타나고 있다. 이러한 결과는 수치해석상의 가정에 의한 오차와 사용된 열전대 및 실험장치상에서 오는 측정오차에 기인하는 것으로 판단된다.

그림에서 보는 바와 같이 동일 운동조건에서 롤러의 속도가 증가할수록 롤러 표면에서의 응고시작점(X_3)과 중앙에서의 응고시작점(X_2)은 박판의 출구방향으로 이동하는 현상을 보이고 있다. 이것은 롤러의 빠른 회전속도에 의해 롤러 표면에서의 충분한 열전달이 미흡한 원인과, 회전속도 증가에 따른 소요공급유량의 부족에서 오는 현상으로 판단된다. 이러한 현상은 회전속도에 따른 공급유량(q/ω)을 일정하게 공급해 줄 경우 회전속도의 변화에 관계 없이 X_2 위치는 일정하게 나타나며, 본 실험에서는 롤러의 간격이 0.3 cm 일 경우 $q/\omega=5.4 [cm^3/rad-cm]$ 에서 가장 안정적인 연속주조가 가능하였다. 용융금속의 주입온도에 대한 변화는 과열도 50 °C와 70 °C에서 관찰한 결과 동일 운동조건 ($2H_0=0.3 cm, \omega=150 rad/s, q=11.2 cm^3/s.cm$)에서 과열도가 높을수록 공급유량의 초기높이(X_4) 및 응고시작점(X_3)은 주입구방향으로 미소한 이동을 보였으며, X_2 및 X_1 은 양 롤러의 중심선상에 고정되어 변화가 없었다. 이러한 결과는 박판주조 조건내에서 용융금속의 과열도가 높을수록 초기공급유량의 증가를 의미하며 이는 롤러에 의한 충분한 냉각시간이 요구되기 때문으로 판단된다.

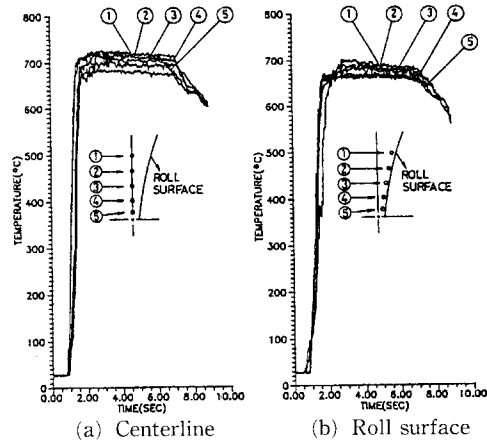


Fig. 5 Experimental temperature distributions of Al ($T_0=730\text{ }^\circ\text{C}, 2H_0=0.3\text{ cm}, \omega=150\text{ rad/min}$)

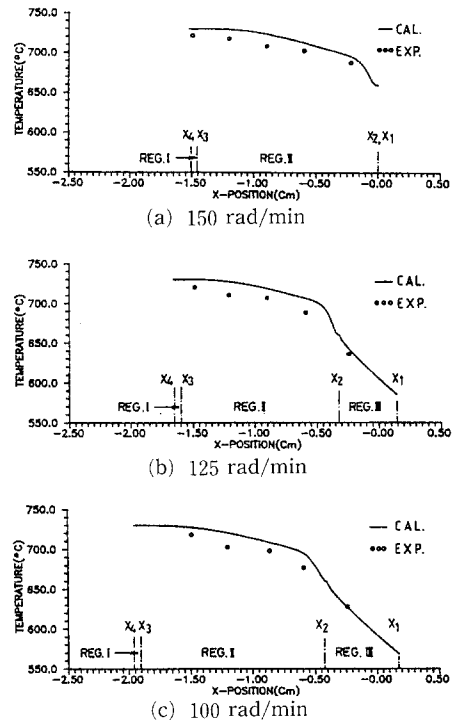


Fig. 6 Comparison between calculated and experimental temperature distribution for various roll speeds ($T_0=730\text{ }^\circ\text{C}, 2H_0=0.3\text{ cm}$)

냉각속도 예측방법으로 주조된 박판의 시편조직의 수치상간격법을 이용하였다. 냉각속도와 수치상간격과의 사이에는 다음과 같은 실험 관계식이 성립한다.⁽¹⁰⁾

$$d = a(T_{ave})^{-n} \tag{13}$$

여기서 d : 수지상 간격(μm)
 a, n : 상수
 T_{ave} : 평균냉각속도($^{\circ}\text{C/s}$)

Table 4 Comparison between calculated and estimated the cooling rate

| Roll gap (cm) | Roll speed (rad/min) | Dendrite arm spacing (μm) | Cooling rates ($^{\circ}\text{C/s}$) | |
|---------------|----------------------|--|---|-------------------|
| | | | Estimated | Calculated |
| 0.03 | 500 | 1 ~ 1.5 | $0.4 \times 10^4 \sim 1.2 \times 10^4$ | 1.8×10^4 |
| 0.05 | 300 | 1.2 ~ 2 | $0.2 \times 10^4 \sim 0.8 \times 10^4$ | 1.5×10^4 |
| 0.05 | 250 | 1.4 ~ 2.3 | $0.15 \times 10^4 \sim 0.5 \times 10^4$ | 0.9×10^4 |
| 0.05 | 200 | 1.6 ~ 2.5 | $0.12 \times 10^4 \sim 0.4 \times 10^4$ | 0.6×10^4 |
| 0.2 | 150 | 3 ~ 3.5 | $0.5 \times 10^3 \sim 0.7 \times 10^3$ | 2.0×10^4 |
| 0.3 | 150 | 3 ~ 4 | $0.4 \times 10^3 \sim 0.5 \times 10^3$ | 1.0×10^4 |

a 와 n 은 금속특성에 따른 상수로서, 본 연구에서는 a 값 40과 n 값 0.39를 사용하였다.⁽¹¹⁾

수지상간격과 냉각속도와의 관계식을 이용하여 냉각속도를 추정한 결과는 Table 4에 나타내었다.

표에서 보는 바와 같이 본 실험에서 롤러의 회전수를 변화시키면서 구조한 알루미늄박판의 단면을 광학현미경으로 관찰한 결과 주로 세포상 조직으로 나타나고 있으나 수지상간격은 약 1~4 μm 로서 냉각속도가 $0.04 \sim 1.2 \times 10^4$ 로 추정되었다. 이 결과는 계산결과와 많은 차이를 보이고 있으며, 수지상간격의 관독시 오차가 많은 것으로 추측된다.

알루미늄의 구조시 박판의 두께가 작을수록 수지상간격이 감소하는 경향으로 보아 냉각속도가 커졌으며, 동일한 두께의 경우에는 롤러의 회전속도가 증가함에 따라 냉각속도가 커짐을 알 수 있었다.



(a) $2 H_o = 0.03 \text{ cm}$ (500 rad/min)



(b) $2 H_o = 0.05 \text{ cm}$ (300 rad/min)



(c) $2 H_o = 0.2 \text{ cm}$ (150 rad/min)



(d) $2 H_o = 0.3 \text{ cm}$ (150 rad/min)

Fig. 7 Optical micrographs of rapidly solidified aluminum for various roll gap ($T_o = 730^{\circ}\text{C}$)

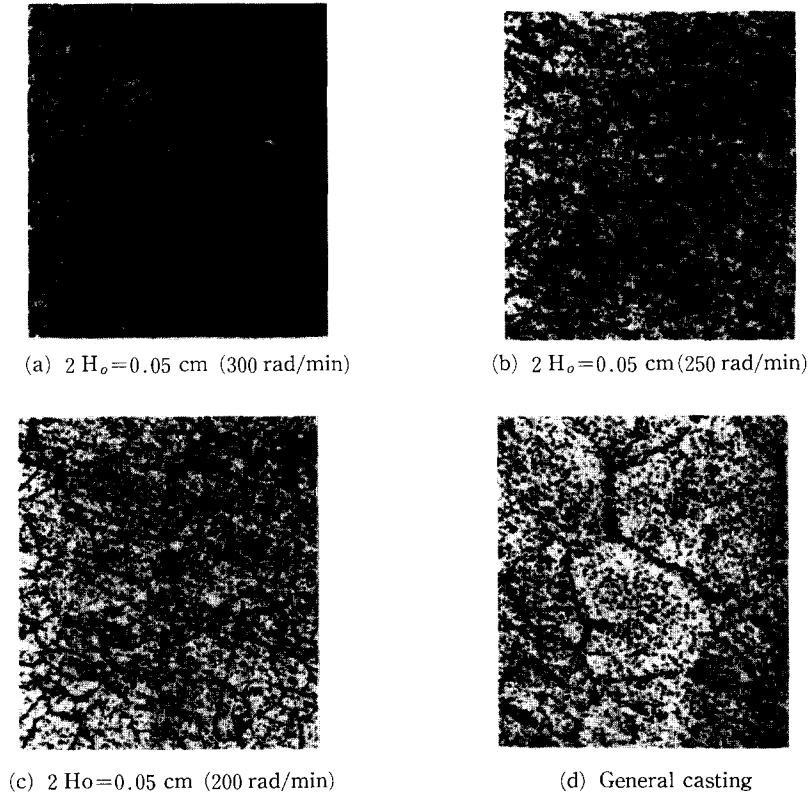


Fig. 8 Optical micrographs of rapidly solidified aluminum for various roll speeds ($T_o = 730 \text{ }^\circ\text{C}$)

Fig. 7 및 Fig. 8은 본 실험장치로부터 얻은 시편에 대한 미세조직을 보여주고 있다. Fig. 7은 운용 조건(롤의 간격과 롤의 속도)에 따른 미세조직을 보여주고 있으며, 롤의 간격이 작고, 홈의 속도가 빠를수록 더욱 미세조직을 함유함을 볼 수 있다. Fig. 8은 동일 롤 간격에서 롤의 속도가 빠를수록 더욱 미세한 조직이 형성됨을 볼 수 있으며, 또한 일반 주조시의 조직에 비해 매우 미세조직이 얻어짐을 알 수 있다. Fig. 7은 롤러의 간격에 따른 주조 금속의 미세조직을 보여주고 있으며, Fig. 8은 롤러의 회전수에 따른 미세조직을 보여 주고 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 쌍롤을 이용하여 급냉주조하였을 때 주조장치의 운용조건에 따른 열전달 특성을 실험을 통하여 규명하였으며, 이론적 해석과 비교하였다. 실험용 금속으로 99.8%의 알루미늄을 사용하였으며, 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 동일 운용조건에서 q/ω 값이 일정할 경우에 안정적인 박판주조가 가능하였으며, 본 연구에서 0.3 cm의 박판을 주조하기 위한 조건으로 $q/\omega = 5.4 [\text{cm}^3/\text{rad} - \text{cm}]$ 임을 밝혔다.

(2) 용융금속의 과열도는 초기 공급유량의 미소한 증가를 필요로 하며, 본연구 범위내에서는 q/ω 가 적정한값을 유지할 경우 박판주조에 크게 영향을 주지 않는다.

(3) 용융금속의 평균냉각속도는 급속냉각주조시의 냉각속도로 규정된 $10^4 \sim 10^5 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 를 만족하였다. 또한, 동일 조건에서 회전속도가 증가할수록 냉각속도가 증가하였으며 롤러의 간격, 즉 시료의 두께가 작을수록 냉각속도가 증가하는 경향을 나타내었다.

(4) 주조된 금속의 미세조직은 일반주조에 의한 응고조직에 비해 매우 미세한 조직이 형성되었으며, 롤러의 회전속도의 증가와 롤러 사이의 간격의 감소에 따라 더욱 미세한 조직이 나타남을 조직사진에 의해 판독할 수 있었다.

(5) 온도분포는 수치해석결과와 약 3% 이내의 오차를 보였으며, 냉각속도에서는 계산결과와 추정 결과는 많은 차이를 보였다. 따라서, 수치상 간격 측정에 의한 냉각속도의 추정은 많은 오차를 포함한다.

후 기

본 연구는 충남대학교 신소재 연구센터의 지원과 제로 수행되었으며, 지원하여 주신 관계자 여러분에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Bessemer, H., 1965, *J. of Metal*, Vol. 17, p. 1189.
- (2) Miyazawa, K. and Szekely, J., 1981, "A Mathematical Model of the Splat Cooling Process using the Twin-Roll Technique," *Met. Trans. A*, Vol. 12A, pp. 1047~1057.
- (3) Saitoh, T., Hojo, H., Yaguchi, H. and Kang, C. G., 1989, Two Dimensional Model for Twin-Roll Continuous Casting, *Met. Trans. B*, Vol. 20B, pp. 381~390.
- (4) Murty Y. V. and I. Adler, R. P., 1982, "High Speed Casting of Metallic Foils by the Double-Roller Quenching Technique," *J. of Mater. Sci.*, pp. 1945~1954.
- (5) 황수권, 1989, 상변화를 포함한 쌍롤법의 2차원 수치해석, 석사학위 논문, 충남대학교 대학원, 대전.
- (6) 박승운, 1989, 쌍롤식 급속냉각구조에서의 Variable-weighted method에 의한 열전달 수치해석, 석사학위 논문, 충남대학교 대학원, 대전.
- (7) 백남주, 이상매, 1989, 박판연소구조과정에 있어서 회전 롤러의 열변형에 관한연구, 대한기계학회논문집 제11권 제6호, pp. 913~922.
- (8) 오명석, 1988, 급속응고한 스테인리스 강판의 조직 및 기계적 성질에 관한 연구, 박사학위 논문, 충남대학교 대학원, 대전.
- (9) Suzuki, T., Miyata, Y., Sakuta, H. and Ohta, M., 1987, "Measurement of Heat Transfer Coefficient Between Melt and Chill," *ISIJ*, pp. 289~296.
- (10) E. Flinn, J., 1985, *Rapid Solidification Technology for Reduced Consumption of Strategic Materials*, Noyes Pub., New Jersey.
- (11) Mehradian, R., 1978, *Relationship of Heat Flow to Structure in Rapid Solidification Processing*, Claitor's Pub. LA.