

논문

고압하에서의 Al-4.5wt.%Cu합금의 응고현상

조인성, 홍준표

Solidification Phenomena of Al-4.5wt.% Cu Alloy under Moderate Pressures

In-Sung Cho and Chun-Pyo Hong

Abstract

Solidification of aluminum alloys under moderate pressures has been investigated. Interfacial heat transfer coefficient at the casting/mold interface varies with time after pouring the molten metal into the die cavity, and therefore plays an important role in determining solidification sequence. The heat transfer coefficients were evaluated by using an inverse problem method, based on the measured temperature distribution. The calculated heat transfer coefficients were used for solidification simulation in the squeeze casting process. The effects of applied pressure and positions of insulation in the mold have also been investigated on solidification microstructures and on the formation of macrosegregation of Al-4.5wt.%Cu alloys. (Received February 14, 1995)

1. 서 론

용탕단조법은 용탕에 기계적 고압력을 응고종료시까지 가하여 주물을 생산하는 방법으로써 미세기공이나 수축공과 같은 구조결함을 고압력(~200MPa)을 가하여 제거할 수 있다. 용탕단조시 주물의 응고속도는 상당히 증가하는데, 가압력에 의하여 주물과 주형간의 계면 밀착이 개선되기 때문이다[1]. 따라서 용탕단조 주물은 미세한 응고조직을 얻을 수 있다. 그러나, 용탕단조시 발생하는 거시편석(macroseggregation)은 피할 수 없는 구조결함이며, 이는 응고중 일어나는 고/액 공존 구간에서의 변형, 수축공 등에 의하여 생성된다고 보고되었다[2-4].

용탕단조시 열전달은 주물/주형 계면간의 계면 열전달계수에 의해서 지배된다. air gap의 형성, 주형 표면의 거칠기, 주물과 주형의 팽창 및 수축, 이형재의 종류에 따른 계면 열전달 계수의 변화는 주물의 냉각과 응고과정에 영향을 미치며, 또한 주형의 온도분포에도 영향을 미친다[5

-7].

용탕단조시 계면 열전달계수가 가압후 급격히 증가한다는 사실은 잘 알려져 있다. 그러므로 시간의 변화에 따른 계면 열전달계수의 변화를 추정하는 것은 응고과정을 시뮬레이션하는데 아주 중요하다. Nishida[8], Sekhar[9], Hong[10-11] 등에 의하여 용탕단조시 계면 열전달계수의 측정에 대해 연구가 이루어져 왔으나, 1차원 열전달 해석을 적용하였으며, 실제 주물의 응고해석에 적용되지는 못하였다.

본 연구에서는 용탕단조시 응고과정이 거시편석과 조직형성에 어떠한 영향을 미치는가에 대하여 연구하였다. 응고과정을 정확하게 해석하기 위해서 주물/주형 계면 열전달계수를 역문제해법에 의하여 정확히 평가하였다. 이를 응고 시뮬레이션에 적용하여 주물내 응고양상을 계산하였으며, 여러 구조 파라미터를 계산하여 용탕단조 주물의 응고조직과 거시편석 양상을 평가하였다. 또한 가압력의 변화와 단열재의 위치에 따라 응고과정과 거시편석 양상에 대하여 고찰하였다.

2. 실험방법

Fig. 1(a)는 본 연구에서 사용된 모식도이다. 주물재료는 Al-4.5wt.%Cu를 사용하였다. 시간의 변화에 따른 측면 및 하면의 주물/주형 계면 열전달계수를 계산하고 응고과정과 거시편석 양상을 평가하기 위하여 Fig. 1(b)와 같이 주물과 주형 계면의 각 방향에 단열재를 설치하였다. 주물 및 주형의 온도를 측정하기 위하여 주형 cavity와 주형내에 CA type 열전대를 설치하였으며, TC 1, TC 2, TC 3은 각각 열전대의 위치를 나타내고 있다.

Case (i)은 측면의 주물/주형 계면 열전달계수 계산과 응고조직 및 거시편석 양상을 관찰하기 위하여 주물의 윗면과 아래면에 단열재를 설치한 경우이며, Case (ii)는 주물의 윗면, 아랫면을 단열하고 측면에 두께 1mm의 슬리브를 설치한 경우로서, 슬리브 설치 유무에 따른 측면 열전달계수의 변화를 고찰하고자 하였다. 주물 아래면의 주물/주형 계면 열전달계수 계산 및 응고양상을 관찰하기 위하여 Case (iii)에서 보는 바와같이 주물의 윗면과 측면을 단열하였으며, Case(i),(ii) 및 (iii)은 모두 중력주조와 50MPa 가압시 실험을 행하였다. Case (iv)는 단열재를 설치하지 않은 경우이며, 가압력 50MPa, 150MPa의 두가지 경우에 대하여 실험을 행하였다.

금형의 예열온도는 250°C였으며, 주입온도는

750°C로 하였다. 주입직후 용탕을 30ton 유압 프레스로 가압하였으며, 가압중 시간에 따른 온도와 압력변화를 열전대와 로드셀을 이용하여 측정하였다. 제조된 용탕단조 시편은 측방향으로 절단하여 거시조직 및 거시편석 양상을 관찰하였다.

3. 해석방법

본 연구에서는 주물/주형 계면 열전달계수를 계산하기 위하여 역문제 해법을 적용하였다. 기존의 연구자들[8-11]은 계면 열전달계수의 계산시 역문제 해법을 1차원 열전달 문제로 가정하였으나, 본 해석에서는 축대칭 2차원 열전달 문제로 확장하여 이를 역문제 해법에 적용하였다. 본 연구에서는 측면의 주물/주형 계면 열전달계수 평가를 위해 Case (i)에 대해 역문제 해법을 적용하였으며 Case (iii) 해석을 통하여 아랫면의 주물/주형 열전달계수를 평가하였다.

3.1 계면 열전달 계수의 계산

계면 열전달계수를 계산하기 위하여 역문제 해법이 도입되었으며, 본 연구에서는 비선형 평가법[12-13]으로 주물/주형 계면 열전달계수를 계산하였다. 비선형 평가법은 역문제 해법 중 하나이며, 반복법에 의해 열유속을 결정하여 측정 유도값과 온도값의 차이를 최소화 하는 방법이다.

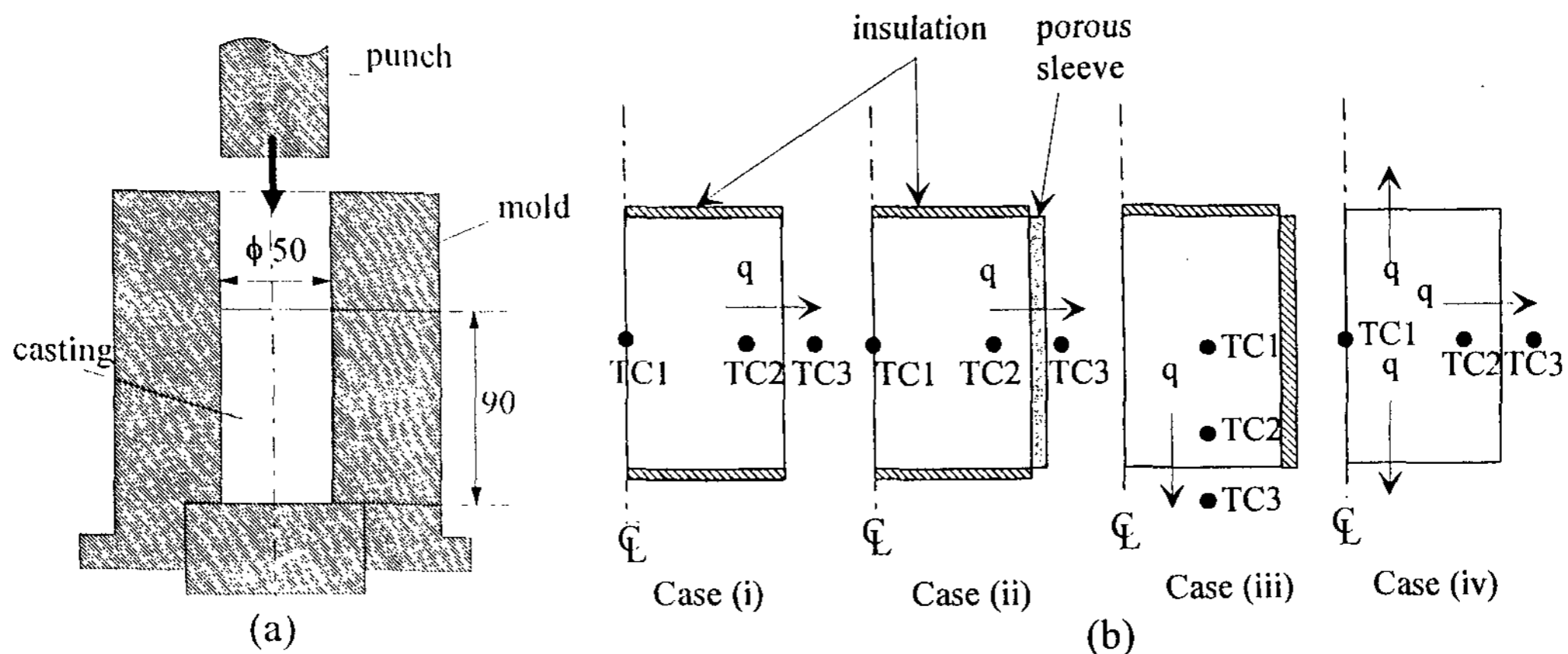


Fig. 1. (a) Schematic diagram showing the mold assembly and (b) 4 cases of experimental conditions showing the position of insulation, porous sleeve and thermocouples.

주형내 온도분포를 계산하기 위한 2차원 원주좌표계 열전달 방정식은 다음과 같다.

$$\rho_m C_{p,m} \frac{\partial T}{\partial t} = k_m \left[\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (1)$$

여기서, ρ_m , $C_{p,m}$, k_m 는 각각 주형의 밀도, 열용량, 열전도도이다. 초기조건은 용탕 주입완료시의 주물의 온도와 주형의 온도를 이용하였다. 또한 시간에 따른 주물/주형 계면의 경계조건은 다음과 같다.

$$q = h(T_{\text{casting}} - T_{\text{mold}}) \quad (2)$$

이때 열유속 q 는 다음의 함수를 최소화 함으로써 예측된다.

$$F(q) = \sum_i^M (Y_i - T_i)^2 \quad (3)$$

여기서 Y_i 는 측정온도이며, T_i 는 계산된 온도이다. 본 연구에 사용된 측정 온도값은 주형에 설치한 열전대(TC 3)의 온도를 이용하였다. 예측된 열유속은 다음 시간 스텝의 열유속의 초기치로 대입하여 이를 해석종료시간까지 반복하였다[14]. 그후 계면 열전달계수 h 는 식 (2)에 의하여 계산되어진다.

3.2 주물내 응고과정의 해석

응고과정과 주물내 거시편석 패턴을 계산하기 위하여 Case (i) 및 Case (iv)에 대하여 응고 시뮬레이션을 행하였다. 응고과정을 고려한 2차원 원주좌표계 열전달 방정식은 다음과 같다.

$$\rho_c (C_{p,c} - L \frac{\partial f_s}{\partial T}) \frac{\partial T}{\partial t} = k_c \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (2)$$

여기서 ρ_c , $C_{p,c}$, k_c 는 각각 주물의 밀도, 열용량, 열전도도이고, L 은 주물의 잠열, f_s 는 고상율이다. 주물/주형간 계면에서의 경계조건은 식(2)에서 구해지며 시간의 변화에 따른 계면 열전달계수는 응고 시뮬레이션에 사용된다. 비정상 열전도 문제를 해석하기 위하여 유한차분법을 이용

하였으며, 잠열처리방법으로는 Scheil식을 적용한 온도회복법을[15] 사용하였다.

계산에 사용된 열전도도 및 비열에 관한 열물성값을 Table 1에 나타내었으며, 각 재질의 경우 그 값들은 온도의존성을 고려하여 온도의 함수로 주어지도록 하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 계면 열전달계수의 계산

Fig. 2(a)는 Case (i)의 경우에 있어서 주물 측면의 가압개시시간부터 시간에 따른 열유속의 변화를 나타내었다. 중력주조인 경우 전 응고과정 동안 열유속은 일정하게 유지된다. 그러나 가압시에는 용탕과 주형 계면의 이상적인 밀착으로 인하여 열유속이 가압직후 급격히 상승하였다가 점차 감소함을 볼 수 있었다. 계면 열전달 계수에 대한 압력의 효과를 Fig. 2(b)에 보였으며, 50MPa가압시 계면 열전달 계수는 중력주조보다 약 3배정도 증가하였다.

Fig. 3은 Case (iii)의 경우에 있어서 주물 하면의 열유속 및 계면 열전달계수의 변화를 나타낸 것으로, Case (i)의 측면의 계면 열전달계수에 비해 그 값이 작았으며, 시간에 관계없이 일정하게 열이 방출됨을 알 수 있다. 또한 계면 열전달계수도 시간에 관계없이 일정한 값을 가짐을 알 수 있었다.

용탕단조 실험시 다기공 슬리브는 가압전 응고를 방지하기 위하여 단열재로 흔히 사용된다. 그러므로 용탕단조시 다기공 슬리브의 열유속 및 계면 열전달계수에 미치는 영향을 조사하는 것은 중요하다. Fig. 4는 Case (i)와 Case (ii)의 경우에 대하여 역문제 해법으로 열유속 및 계면 열전달계수를 계산한 결과로서 다기공 슬리브의 유무에

Table 1. Thermal and physical properties used in the numerical analysis.[16]

	Density (kg/m ³)	Specific heat (kJ/kg)	Thermal conductivity (W/mK)	Latent heat of fusion(kJ/kg)
Metal	2706	0.749+4.442×10 ⁻⁴ T	192.5 (T<502°C)	397.5
		1.287-2.5×10 ⁻⁴ T	818.67-0.808T (502°C<T<648°C)	
		1.059	52.56+0.033T (648°C<T)	
Mold	7860	0.574-5.708×10 ⁻⁴ T +8.9369×10 ⁻⁷ T ²	59.37-0.03126T	

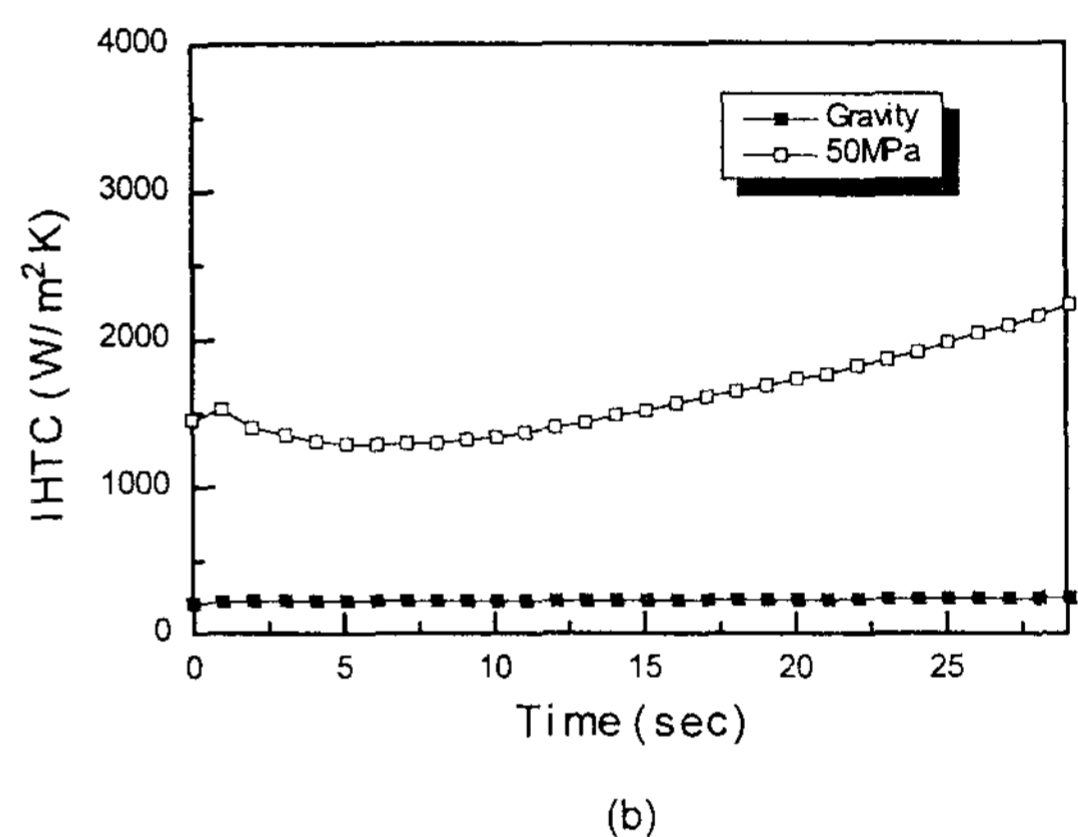
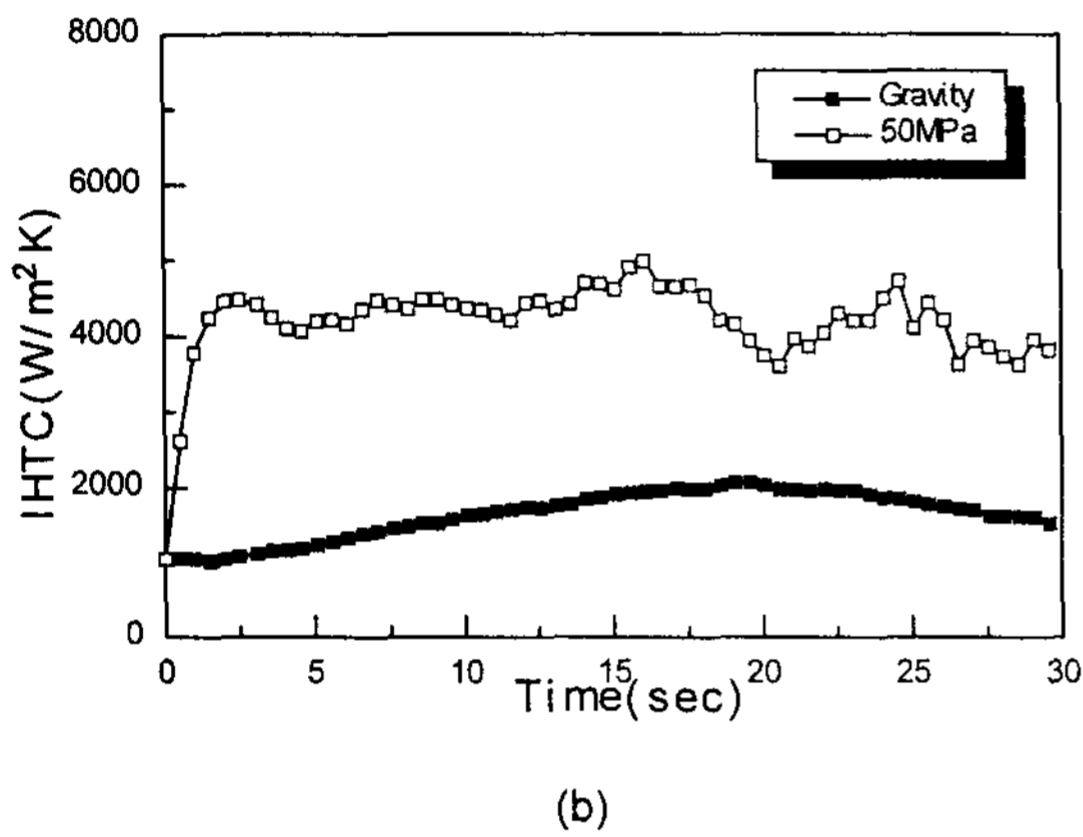
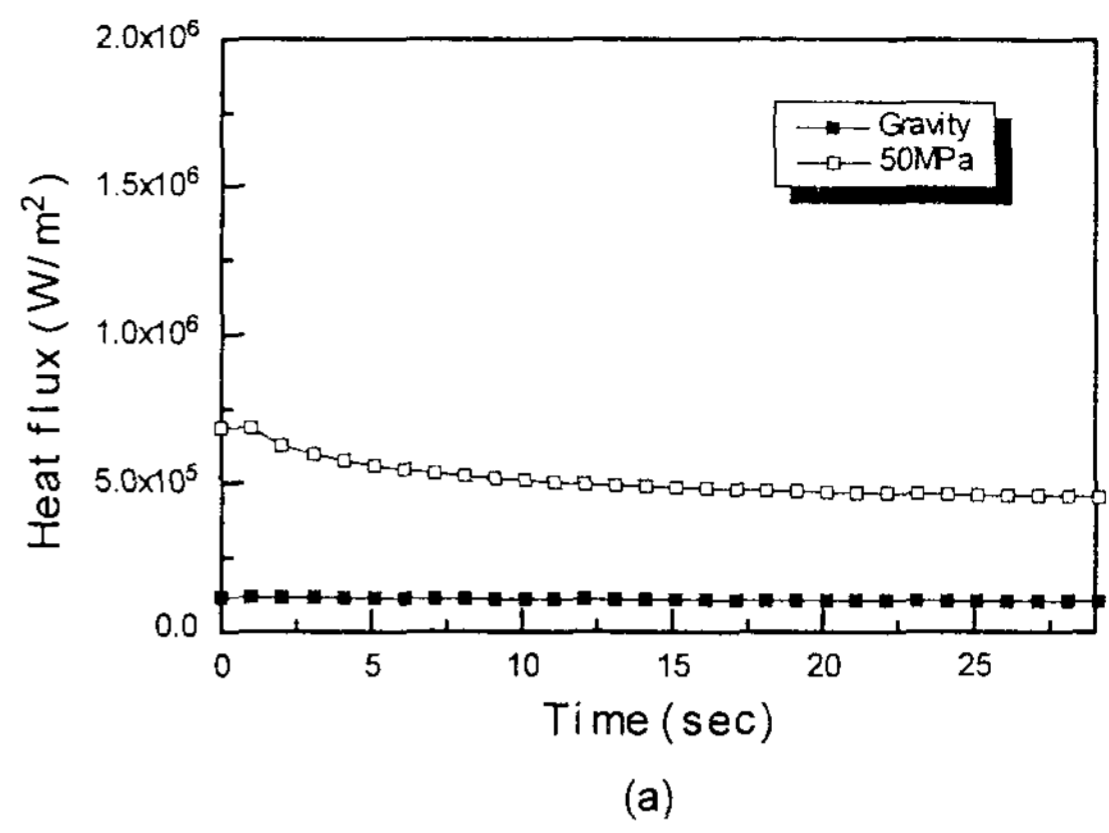
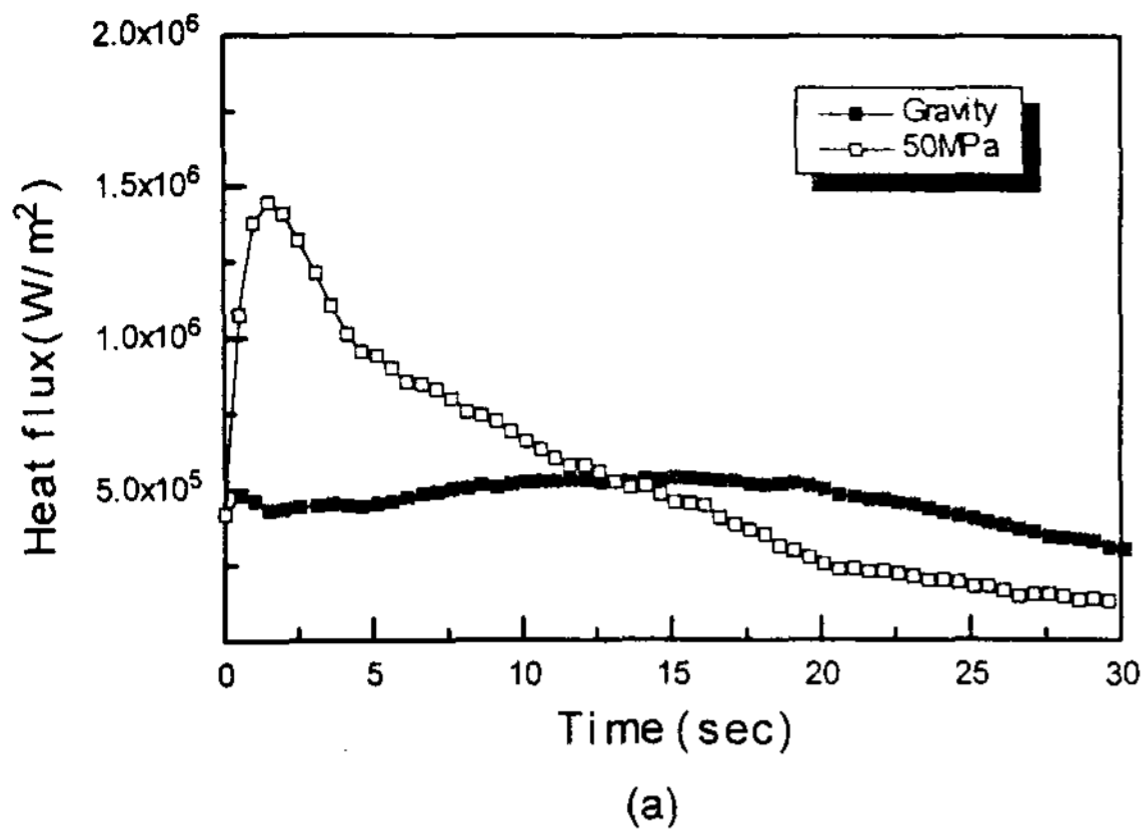


Fig. 2. Effect of pressure on heat flux and the interfacial heat transfer coefficient(IHTC) of Al-4.5wt.%Cu at the side of the mold wall in case (i); (a) the variation in heat flux with time and (b) the variation in IHTC value with time.

Fig. 3. Effect of pressure on heat flux and the IHTC value of Al-4.5wt.%Cu at the bottom surface of the casting in case (iii); (a) the variation in heat flux with time and (b) the variation in IHTC value with time.

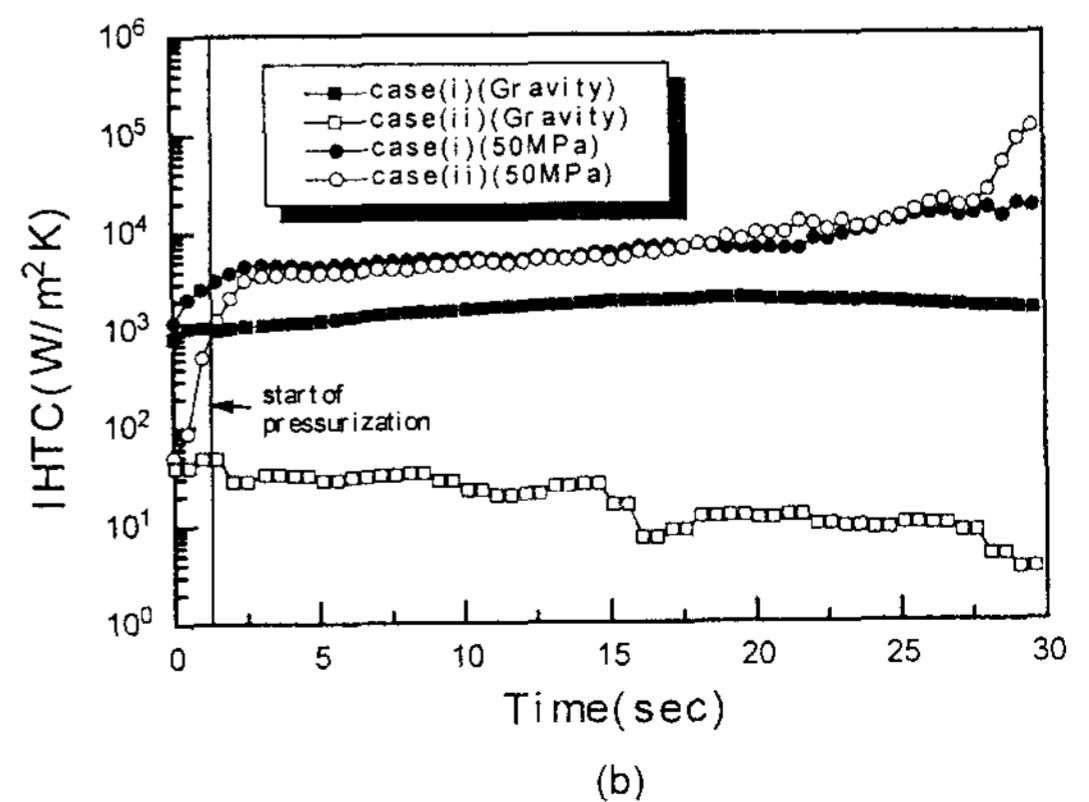
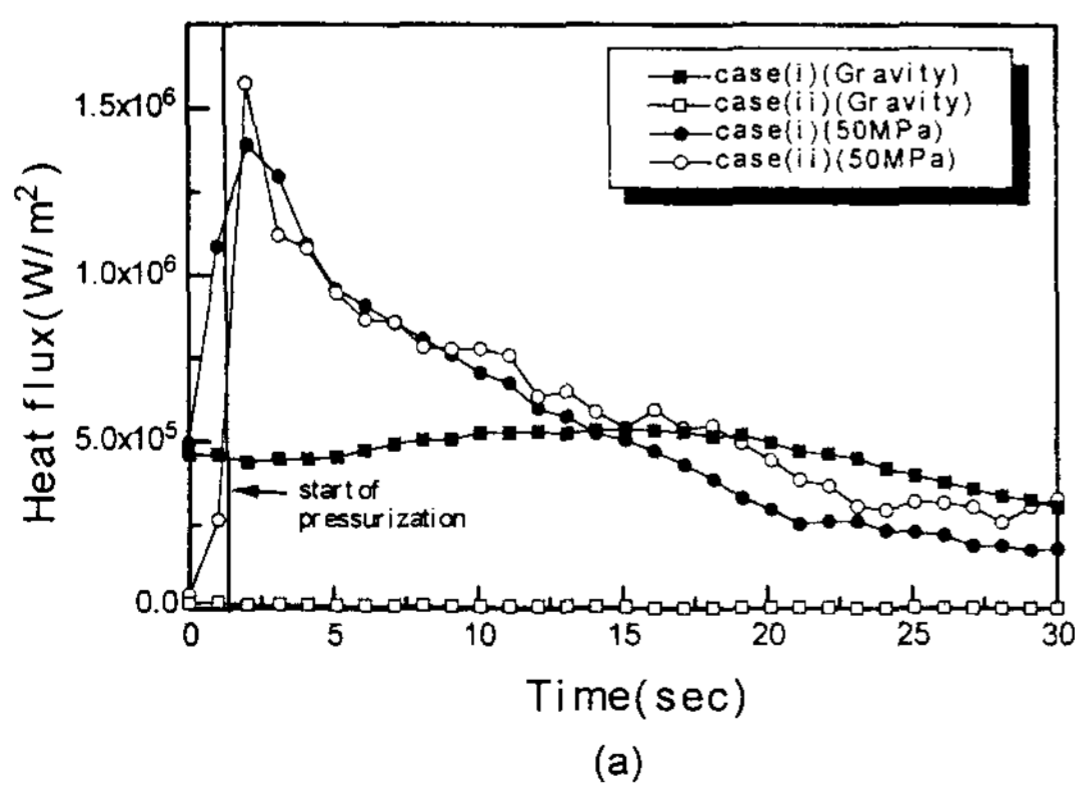


Fig. 4. Effect of porous sleeve on heat flux and IHTC value of Al-4.5wt.%Cu at the side of the mold wall in case (i) and case (ii); (a) the variation in heat flux with time and (b) the variation in IHTC value with time.

다른 변화를 나타낸 것이다. 중력주조시에는 용탕이 슬리브에 침투하지 못하기 때문에 슬리브가 단열재로서 작용할 수 있다. 그러나 용탕단조시 가압직후 열유속과 계면 열전달계수는 급격히 증가하는데, 이는 용탕이 가압에 의해 슬리브에 쉽게 침투할 수 있어 주물과 주형간의 이상적인 밀착이 이루어지기 때문이다.

각 방향으로 구해진 열전달계수를 이용, 주물내의 온도분포를 구하였으며, Fig. 5는 Case (i)의 중력과 50MPa가압시 실험 온도곡선과 계산 온도곡선을 비교한 것으로 두 곡선이 비교적 잘 일치하였다.

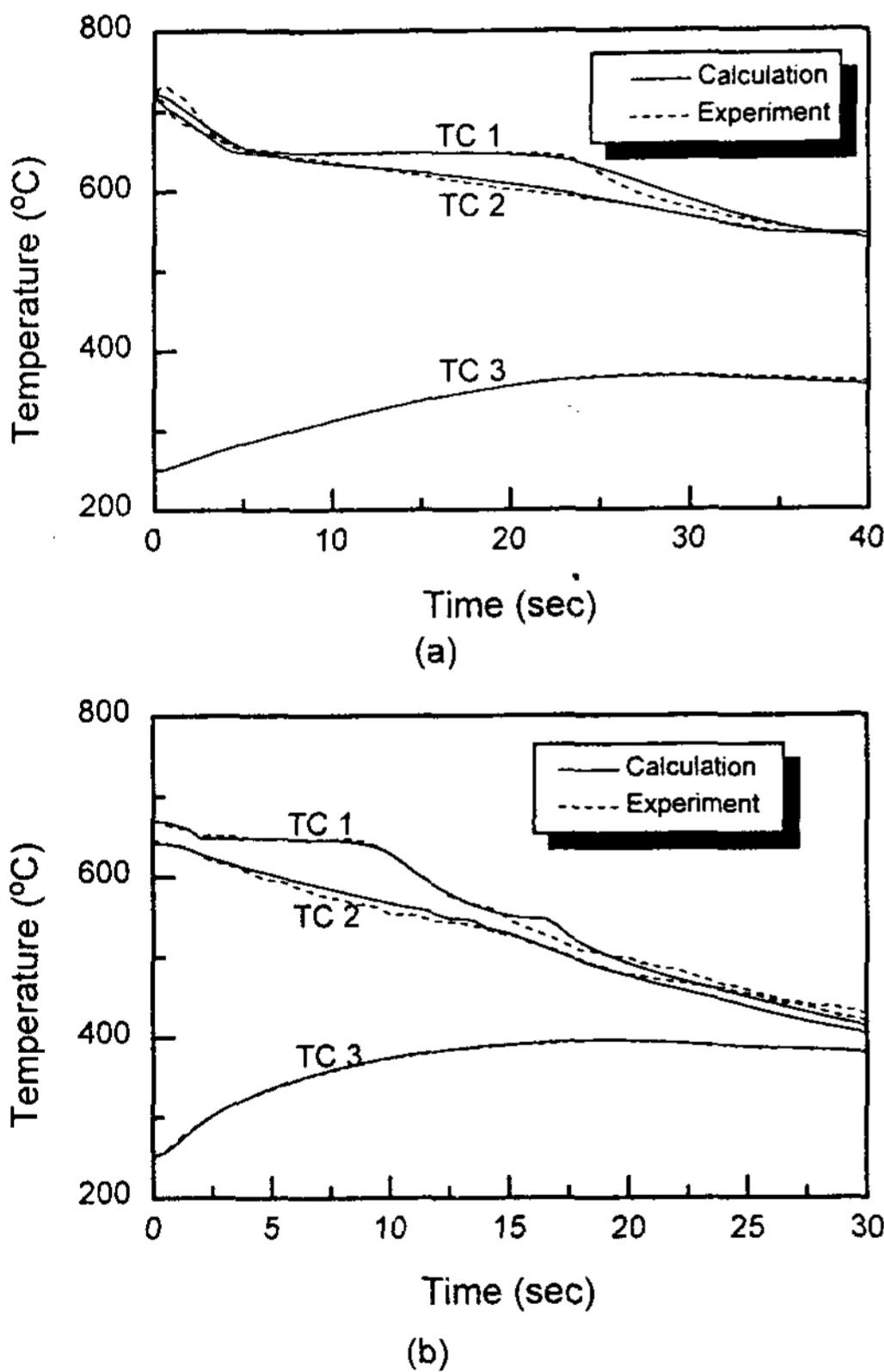


Fig. 5. Calculated and measured cooling curves of Al-4.5wt.%Cu in case (i); (a) gravity diecasting and (b) squeeze casting under the pressure of 50MPa.

4.2 각 단열방향에 따른 주물의 응고현상

Al-Cu합금 및 Al-Si합금의 가압응고시 두 종류의 편석현상-최종응고부위에 발생하는 수축공

편석과 freckles-이 관찰되고 있다. Fujii등에 의하면[2], 수축공에 의한 편석은 응고수축에 의한 수축공 생성후 잔류하고 있던 고농도의 액상이 가압에 의해 수축공으로 이동하여 편석을 발생시킨다고 보고하였다. 또한, Flemings등은[3] 주물의 응고시 freckle의 형성이 interdendritic fluid flow의 방향과 온도구배방향에 관계한다고 보고하고 있다. freckle의 형성조건은 다음과 같다.

$$\frac{\vec{v} \cdot \nabla T}{\dot{T}} > 0, \quad \text{stable solidification}$$

$$-1 < \frac{\vec{v} \cdot \nabla T}{\dot{T}} < 0 \quad \text{intermediate solidification} \quad (5)$$

$$\frac{\vec{v} \cdot \nabla T}{\dot{T}} < -1 \quad \text{unstable solidification}$$

여기서 \vec{v} 는 interdendritic fluid flow velocity이며, ∇T 는 온도구배, \dot{T} 는 냉각속도이다. 이때 \vec{v} 는 D'Arcy의 식에서 구해지며 다음과 같다 [4].

$$\vec{v} = \frac{K}{\mu g_L} (\nabla P + \rho g_r) \quad (6)$$

여기서 μ 는 액상의 점도, g_L 은 액상을, ρ 은 액상의 밀도, g_r 은 중력가속도이다. 용탕단조시 중력가속도는 압력구배(∇P)보다 3 order정도로 작으므로 (6)식에서 중력항(ρg_r)을 무시하고 (5)식에 대입하여 정리하면,

$$C = B(\nabla P \cdot \nabla T), \quad B = \frac{K}{\mu g_L \dot{T}} \quad (7)$$

이다. 이 조건에 의하여 freckle은 $C < -1$ 인 구역에 발생할 수 있다.

용탕단조한 Al-4.5wt.%Cu합금에서 거시편석 양상은 응고과정과 밀접한 관계를 가지고 있다. 응고과정과 거시편석 양상을 연관시키기 위해 Case (i)과 Case (iv)의 실험을 행하였다. Fig. 6(a)에서 바와같이 Case (i)의 경우 수축공에 의한 편석이 발견되었다. 이 경우 주물의 윗쪽과 아랫쪽을 단열하였다. Fig. 6(b)에서 보면 고상율이 임계 유동 고상율($f_s = f_{s, critical}$)일때의 온도구배 벡터에 의해 제시된 열흐름 방향과 주상정 조직의 방향이 일치하고 있다. Fig. 6(c)에 의하면, 거시편석의 위치는 G/\sqrt{R} 값이 0.5이하인 부분에서 예측될 수 있다. 이러한 종류의 거시편석은 수축공에 의한 편석이라고 사료된다.

Case (iv)의 경우, Fig. 7에서 보는 바와같이

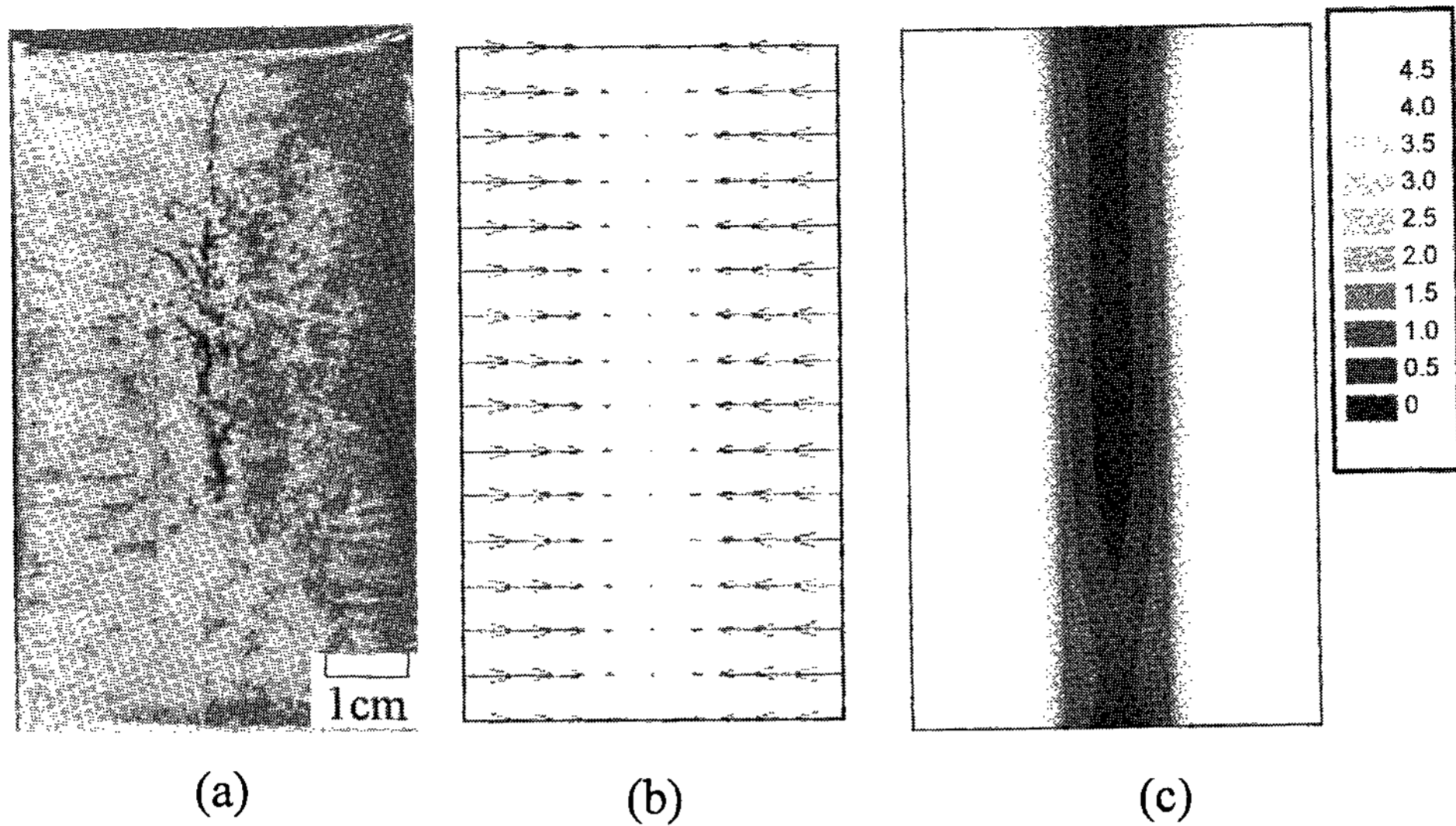


Fig. 6. Solidification structure and macrosegregation of Al-4.5wt.%Cu of squeeze cast under the pressure of 50MPa in case (i); (a) macrostructure and segregation pattern, (b) vector plot of the temperature gradients when $f_s=f_{s, critical}$ and (c) contour map of the distribution of G/\sqrt{R} values.

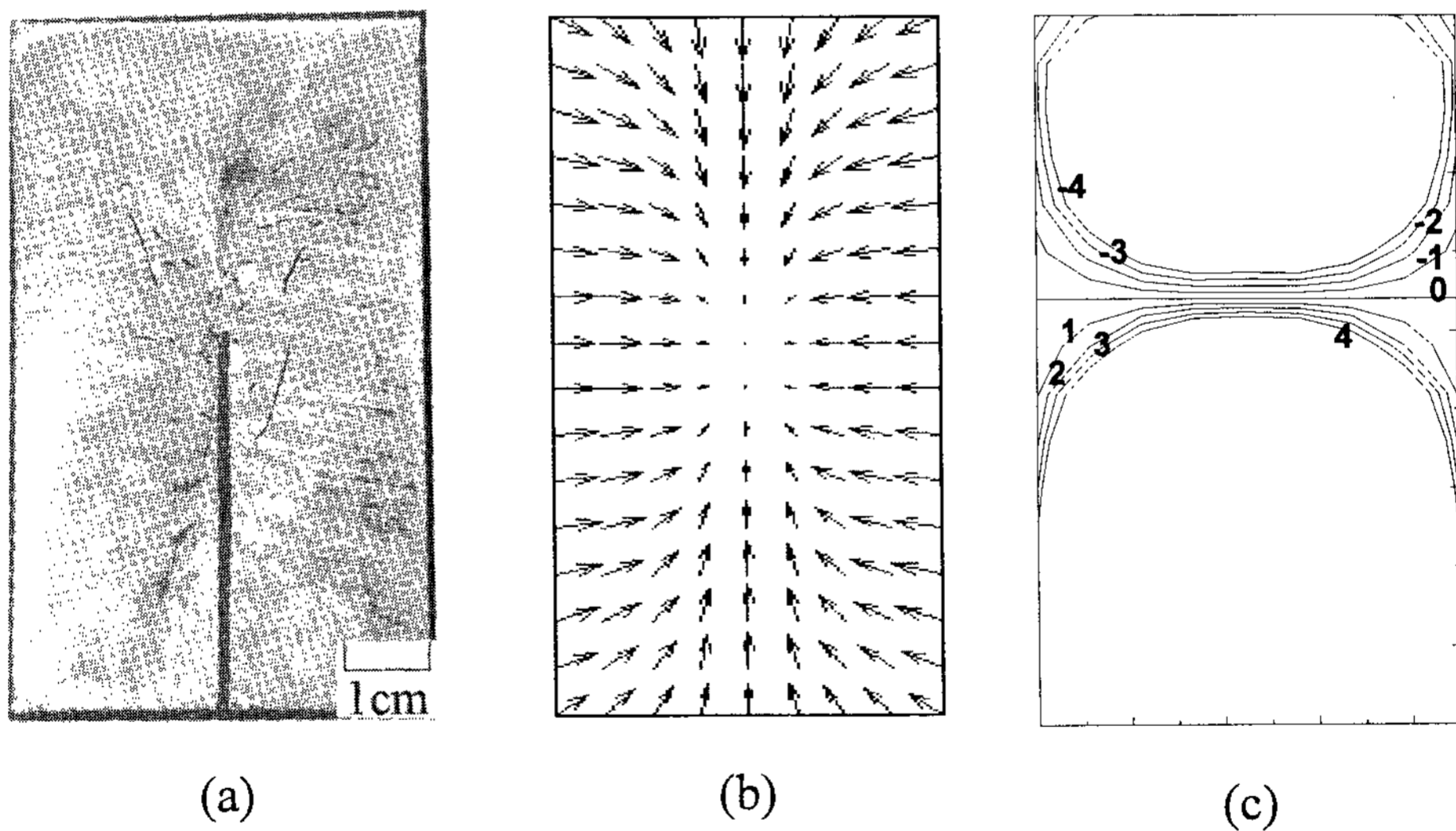


Fig. 7. Solidification structure and macrosegregation of Al-4.5wt.%Cu of squeeze cast under the pressure of 50MPa in case (iv); (a) macrostructure and segregation pattern, (b) vector plot of the temperature gradients when $f_s=f_{s, critical}$ and (c) contour lines of the distribution of C values.

freckle이 관찰되었다. 식 (9)에서 언급한 바와 같이 freckle은 $C < -1$ 인 부분에서 발생할 수 있다. Fig. 7(b)와 7(c)를 결합하여 볼 때, freckle의 위치를 정성적으로 예측할 수 있다. Fig. 8은 가압

력을 50MPa에서 150MPa로 가압력을 증가시킨 경우로 freckle이 존재하는 영역이 주물의 원주 바깥쪽으로 확장되는 경향을 보였다.

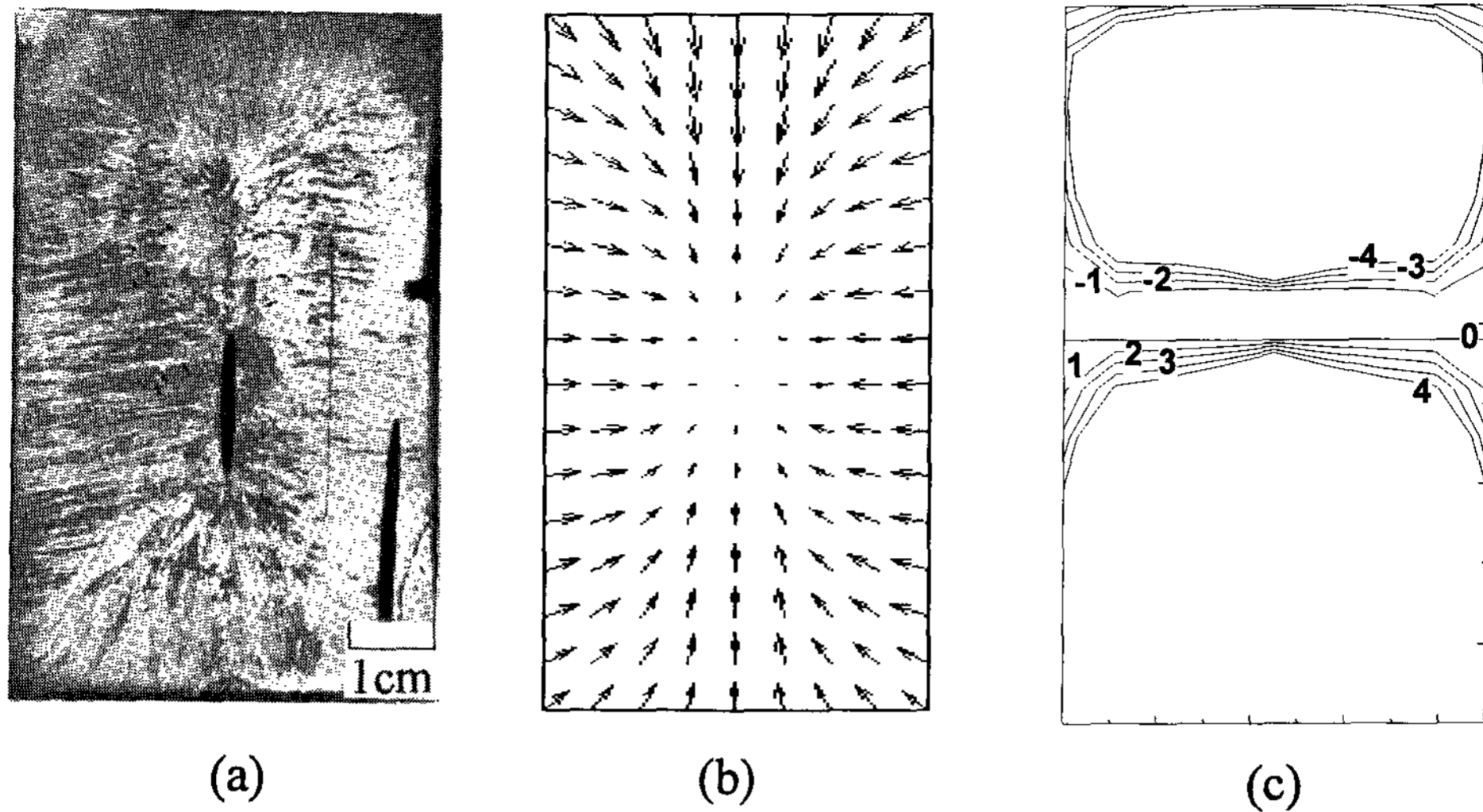


Fig. 8. Solidification structure and macrosegregation of Al-4.5wt.%Cu of squeeze cast under the pressure of 150MPa in case (iv); (a) macrostructure and segregation pattern, (b) vector plot of the temperature gradients when $f_s = f_{s, critical}$ and (c) contour lines of the distribution of C values.

5. 결 론

가압시 Al합금의 응고현상을 해석하기 위하여, 주형/주물 계면 열전달계수를 역문제 해법에 의하여 계산하고 계산된 열전달계수를 이용, 주물의 응고과정을 해석하였다. 또한 가압력과 단열재의 위치에 따른 응고과정과 거시편석 양상을 평가하였다.

계면 열전달계수의 값은 가압시점부터 상당히 증가하였고, 다기공 슬리브를 설치한 경우 가압전의 계면 열전달계수는 아주 작은 값을 가지고 있었으나 가압직후 급격히 상승하였다. Al-4.5wt.%Cu용탕단조 주물의 주상정 조직은 $f_s = f_{s, critical}$ 일때의 온도구배와 밀접한 관계를 가지고 있었다. 거시편석이 형성되는 위치는 수축공 형성 조건변수인 G/\sqrt{R} 값과 freckle 생성 조건변수인 C 값과 관련이 있었다.

후 기

본 연구는 1994년도 교육부 신소재 학술연구 조성비 지원을 받았으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] G. S. Reddy and J. A. Sekhar : Acta Metall., 37, 5 (1989) 1509
- [2] M. Fujii, N. Fujii, S. Morimoto and S. Okada : Light Metals, 30, 6 (1986) 353
- [3] R. Mehrabian, M. Keane and M. C. Flemings : Metall. Trans., 1 (1970) 1209
- [4] V. R. Voller, J. J. Moore and N. A. Shah : Metals Technology, 10 (1983) 81
- [5] Y. Nishida, W. Droste and S. Engler : Metall. Trans., 17B (1986) 833
- [6] K. Ho and R. D. Pehlke : Metall. Trans., 16B (1985) 585
- [7] M. Sugutama, T. Umeda, H. Takeuchi and H. Kato : IMONO, 47 (1977) 178
- [8] Y. Nishida and M. Matsubara : British Foundrymen, 69 (1976) 274
- [9] J. A. Sekhar, G. J. Abbaschian and R. Mehrabian : Mat. Sci. & Tech., 40 (1979) 105
- [10] 유승목, 한요섭, 이호인, 홍준표 : 한국주조 공학회지, 14 (1994) 248

- [11] 김진수, 안재영, 한요섭, 이호인, 홍준표 :
한국주조공학회지, 14 (1994) 248
- [12] J. V. Beck : Int. J. Heat Mass Transfer,
213 (1970) 703
- [13] K. Ho and R. D. Pehlke : AFS Trans., 91
(1983) 689
- [14] T. S. P. Kumar and K. N. Prabhu :
Metall. Trans., 22B (1991) 717
- [15] C. P. Hong, T. Umeda and Y. Kimura :
Metall. Trans., 15B (1984) 91
- [16] R. D. Pehlke, A. Jayarajan and H. Weda
: Summary of Thermal Properties for
Casting Alloys and Mold Materials, The
University of Michigan, (1982)
- [17] E. Niyama, T. Uchida, M. Morikawa, and
S. Saito : 49th Int. Foundry Congress
(1982), Paper No.10