
 논문

원심주조를 이용한 2종 알루미늄의 접합에 대한 연구

장영수[†] · 이문형 · 문준영 · 홍준표

연세대학교 금속시스템공학과 재료공정 모델링 연구실

A Study on the Joining of Different Al Alloys by Centrifugal Casting

Young-Soo Jang[†], Moon-Hyoung Lee, Jun-Young Moon, and Chun-Pyo Hong

Center for Computer-Aided Solidification Processing (CASP), Dept. of Metallurgical Engineering,
Yonsei University, shinchon-dong 134, Seodaemun-ku, Seoul, Korea

Abstract

To improve the quality of the product and the cost efficiency, the joining of A356 alloy to an Al-18wt%Si alloys has been performed by centrifugal casting. The influence of the mold preheating temperature, the pouring temperature and the rotational velocity of the mold on the microstructures of the shell in the centrifugal casting was investigated using the experimental and simulation methods. In the present study, the cellular automaton (CA) technique and the finite volume method (FVM) were adopted to simulate the evolution of the macrostructures and to calculate the temperature profiles, respectively. The evolution of the microstructures was also simulated using a modified cellular automaton (MCA) model. The optimal rotational speed of the mold for obtaining the sound shape of the shell was estimated experimentally to be over 1200 rpm. For the uniform microstructure, the outer shell needs to be cast with higher preheated mold temperature and lower pouring temperature, and the melt was poured at lower temperature in the inner shell. In order to obtain the sound shape of the joining, the different materials were poured simultaneously.

Key words : Centrifugal casting, Joining, Cellular automaton, Finite volume method.

(Received September 10, 2007 ; Accepted November 18, 2007)

1. 서 론

최근, 자동차 산업 발전과 더불어 에너지 절감을 위해 자동차 부품의 경량화, 고강도화가 절실히 요구됨에 따라 새로운 소재 개발의 필요성이 점차 증가되고 있다. 특히 소재의 각 특성을 이용할 수 있는 복합체에 대한 관심은 지속적으로 높아지고 있다.

원심주조법에 의한 2종금속 접합기술은 이러한 요구에 부응한 특수주조법으로, 원심력에 의해 2종 금속을 접합시켜 각기 다른 특성을 이용할 수 있고, 고가의 금속을 절약하여 원가절감이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 특히 원심력의 효과를 이용하여 특수 파이프의 2종접합 부품 생산에 많은 장점을 보이고 있다. 그러나 지금까지 2종접합 원심주조 기술은 강이나 주철에 국한 되어있었으며 알루미늄 합금과 같은 비철 소재에 대한 2종접합 기술에 비해 상대적으로 미비하였다[1-3].

본 연구는 원심주조를 이용하여 외부에는 내마모성이 뛰어난 과공정 알루미늄 합금을, 내부에는 연성이 좋은 A356합금(JIS)을 2종 접합시켜 비철 소재 제품의 품질 및 기계적 성질을 향상시키고자 하였다. 이와 같은 접합 기술은 외부와 내부에 서로 다른 기계적 특성을 요하는 피스톤 및 기타 원통형 제품에 적용이 가능할 것으로 예상된다. 또한 표면 고강도가 중요

한 제품의 주조시, 2종접합기술을 응용한다면 고가의 과공정 재료만을 사용했을 경우와 비교할 때 재료비 감소를 통한 원가절감의 효과도 기대된다.

원심주조시 제품의 특성에 영향을 미치는 주요변수로는 주형의 회전속도, 주형의 예열온도, 용탕의 주입온도 등이 있다. 2종 접합은 외부재와 내부재의 서로 다른 각각의 기계적 특성을 살리기 위해 내부셀과 외부셀의 구조변수가 다르게 된다. 원심주조에서의 2종접합을 하기 위한 최적의 구조조건을 찾기 위해, 외부 과공정 합금 셀에서는 초정 Si의 분포에 미치는 구조변수의 영향을 조사하고, 내부 A356 셀에서는 응고조직에 미치는 구조변수의 영향을 조사하였다. 또한 접합도에 영향을 미치는 내부재와 외부재의 주입방법에 따른 효과를 관찰하였다. 그리고 실험에 들어가기에 앞서 실험의 효율을 증대시키기 위해 외부셀 형성 후 접합시 내부재 A356 합금의 응고조직을 CA와 MCA법을 이용한 계산으로 예측하였다.

2. 실험방법

Fig. 1은 수직원심주조기의 개략적인 그림을 보여준다. 본 실험에 사용된 주형은 외경 100 mm, 내경 70 mm, 높이 70 mm의 SUS304(JIS) 로서 이형체인 BN을 도포한 후에 예열하여

[†]E-mail : poinix@yonsei.ac.kr

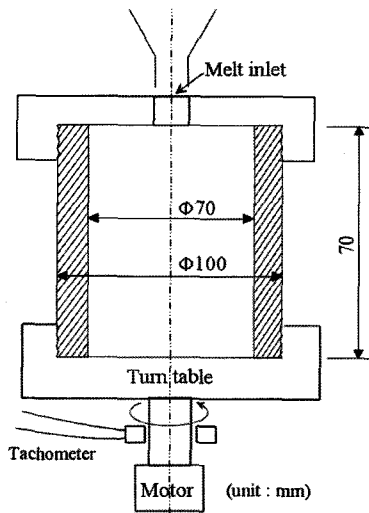


Fig. 1. A schematic diagram of a vertical centrifugal casting apparatus.

사용하였다. Fig. 1에서와 같이 예열된 주형을 DC모터로 구동하는 턴테이블에 장착하고 0~1800 rpm 으로 회전하는 주형에 일정한 온도로 과열된 용탕을 주입하였다. 실험에 사용된 외부재 과공정 알루미늄 합금으로는 Al- 18wt.%Si 합금을 사용했고 아공정 알루미늄 합금으로는 A356(Al-7%Si-3%Mg)합금을 사용하여 고주파 유도로를 사용한 흑연도가니에서 합금을 각각 용해하고 주입하였다. 우선 외부셀의 주조조건을 확립하였고 집합을 하기 위해 내부셀을 2가지 주입방법으로 주입하였다. 하나는 순차주입법으로 외부재 주입 후 외부셀이 형성된 후 내부셀을 주입하는 방법이고, 다른 하나는 동시주입법으로 외부재를 주입 후 바로 내부재를 주입하는 방법이다. 두 방법의 차이는 외부재 주입후 내부재를 주입하기 까지의 시간차이다. 본 실험에서는 순차주입법의 경우 외부재 주입 후 3~4초 뒤에 내부재를 주입하였다. 그리고 내부재의 주조변수를 결정하였다.

주조된 시편의 조직분석을 위하여 밀면에서 약 1/3 지점을 절단하여 #2000까지 연마하였다. 연마된 시편의 거시조직은 Keller 시약(75 ml HCl + 25 ml HNO₃ + 5 ml HF)으로 에칭시켰고, 미세조직은 에칭액(92 ml H₂O + 6 ml HNO₃ + 2 ml HF)에 10~20초간 침지한 후에 광학현미경으로 관찰하였다.

3. 모델설명 및 해석방법

3.1 핵생성과 결정성장

본 연구에서는 주형과 액상에서 불균일 핵생성을 설명하기

위하여 2개의 서로 다른 가우스(Gaussian) 정규분포가 고려된 연속핵생성 모델을 채택하였다. 핵생성 밀도의 증가, dn 은 다음의 가우스 정규분포에 따른 과냉도의 증가, $d(\Delta T)$ 로부터 계산된다[6].

$$\frac{dn}{d(\Delta T)} = \frac{n_{max}}{\sqrt{2\pi}\Delta T_{\sigma}} \times \exp\left[-\frac{2}{2}\left\{\frac{\Delta T - \Delta T_{mn}}{\Delta T_{\sigma}}\right\}^2\right] \quad (1)$$

여기서 ΔT_{mn} 은 평균 핵생성 과냉온도, ΔT_{σ} 은 표준편차, n_{max} 은 최대 핵생성 밀도이다.

그러므로, 과냉도 ΔT 에서의 핵생성 밀도 $n(\Delta T)$ 는 다음의 식으로 주어진다.

$$n(\Delta T) = \int_0^{\Delta T} \frac{dn}{d(\Delta T)} d(\Delta T) \quad (2)$$

수직형 원심주조에서 원심력과 액상유동에 의한 뚜렷한 조직의 불연속에 따른 밴드현상이 수반되는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 대류현상과 액상유동을 고려하지 않고 생성된 모든 핵과 수지상 조각들은 같은 위치에 있다고 간주하였다.

계산을 간단히 하기 위하여 표면에서의 핵생성 과냉도는 일정한 온도인 0.5°C로 가정하고, 식(1)의 표준분산값은 0.1°C로 하여 임계과냉도에 도달하면 거의 모든 잠재적인 핵생성 자리수가 활성화되도록 하였다[4]. 용탕 내의 특정한 과냉도와 온도에서 수지상 선단의 성장속도는 KGT 모델을 이용하여 계산하였다[5]. Al-Cu 및 Al-Si 합금에 있어서 성장속도와 국부적 과냉도의 관계를 계산하기 위하여 사용된 물리적 상수는 Table 1과 같다. 주형벽 또는 벌크액상 내에서 형성된 핵은 48개 중 임의의 결정학적 방위를 가진다고 가정하였다. 2차원에서 정방금속의 우성성장방위는 <10>과 일치한다.

3.2 거시적 열전달

수직형 원심주조의 단면의 기하학적 대칭성을 고려하여 본 모델에서는 온도분포의 계산을 위하여 1차원 극좌표계를 채택하였다. 용탕에서 대류열전달은 고려하지 않았다. 1차원 극좌표의 열전달의 지배방정식은 식(3)과 같이 주어진다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \rho L \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad (3)$$

T 는 온도, ρ 는 밀도, C_p 는 비열, λ 는 열전도율, L 은 응고시

Table 1. Growth kinetics used in the present calculation.

Alloy system	Growth velocity [m/sec] $v(\Delta T) = k_1\Delta T^2 + k_2\Delta T^3$
Al-Si alloy (< 12wt.%Si)	$k_1 = 1.0245 \times 10^{-6} - 0.00146 \cdot \exp\left(-\frac{wt \%Si + 1.31556}{1.23852}\right) - 0.78671 \cdot \exp\left(-\frac{wt \%Si + 1.31556}{0.37001}\right)$ $k_2 = 0.00031 \cdot (wt \%Si)^{-2.603}$

잡열, f_s 는 고상율이다. 주형과 주물의 경계층과 주형과 대기의 경계층에서 경계조건은 각각 식(4) 및 식(5)으로 주어진다.

$$q = h_{cm}(T_{mold} - T_{casting}) \quad (4)$$

$$q = h_{ma}(T_{air} - T_{mold}) \quad (5)$$

여기서 q 는 열유속, h_{cm} 과 h_{ma} 는 각각 주형/주물 및 주형/대기 사이의 계면 열전달계수, T_{mold} , $T_{casting}$ 및 T_{air} 는 각각 주형, 주물 및 대기의 온도이다. 주형과 대기 사이의 열전달 계수, 는 $50 \text{ W/m}^2\text{K}$ 로 간주하였다. 앞에서 식(3), 식(4) 및 식(5)으로 주어진 지배방정식과 경계조건은 양적해 차분법(explicit finite difference)의 알고리즘으로 해를 구하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 셸의 형상에 미치는 주형회전속도의 영향

수직형 원심주조에서는 회전하는 원통형 주형에 용탕을 주입하면, 내부가 빈 중공으로 된다. 주입된 용탕의 표면은 단면의 형상이 포물선으로 된다고 알려져 있다[6]. 그러나 실제 수직형 원심주조를 하는 경우, 포물선의 일부만을 이용하게 되므로 이 경우 주형의 회전속도와 주물의 크기 사이에는 다음과 같은 관계가 있다[6].

$$N = \sqrt{\frac{60^2 g}{2\pi^2}} \cdot \sqrt{\frac{H}{r_a^2 - r_b^2}} \approx 423 \sqrt{\frac{H}{r_a^2 - r_b^2}} \quad (6)$$

여기서 N 은 주형의 회전속도, r_a 와 r_b 는 주물형태의 상단과 하단의 직경이고, y_a 와 y_b 는 각각 포물선의 정점에서 상단 및 하단까지의 높이이며, H 는 주물높이이다.

주물의 직경이 클수록, 주형의 회전속도가 높아야 한다. 또한 주물의 상단과 하단의 내경 차이를 작게 할수록, 회전속도를 증가시키지 않으면 안된다는 것을 알 수 있다. 위의 식에서 계산한 바에 의하면 본 실험에 필요한 주형의 회전속도는 1200 rpm 이상이다. 본 실험에서는 Fig. 2 에서와 같이 0, 300, 600, 900, 1200, 1500, 1800 rpm에서 셸을 제작해보았다. 실제 실험의 결과를 보면 900 rpm 이상에서 셸의 형상을 얻을 수가 있지만, 낮은 속도에서는 주물의 내부 표면에 산화막이 형성되는 것을 볼 수 있다. 주형의 회전속도가 빠를수록 원심력의 효과에 의해 내부 산화막의 부유 현상이 발생하여 산화막이 셸의 상부를 통해 빠져나간다. 따라서 본 연구에서는

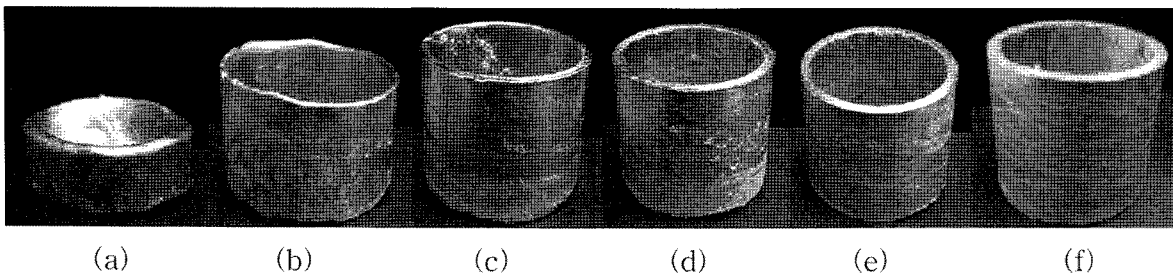


Fig. 2. The shape of the shell for various mold rotation velocities in centrifugal casting: a) 300 rpm, b) 600 rpm, c) 900 rpm, d) 1200 rpm, e) 1500 rpm and f) 1800 rpm.

건전한 형상의 셸을 얻기 위해서 1500 rpm의 속도로 주형을 회전하였다.

4.2 외부재 과공정 알루미늄 합금 셸에 미치는 주조변수의 영향

원심주조를 이용한 2중접합을 하기위해 우선 Al-18wt.%Si의 외부셸을 주조하고 주조변수에 따른 영향을 관찰하였다. 셸의 형상을 위한 주형의 회전속도는 앞선 실험에서 결정하였으므로 외부셸의 조직에 영향을 미치는 주형의 예열온도와 용탕의 주입온도를 변수로 하여 실험하였다.

4.2.1 주형 예열 온도의 영향

외부재 주조시 주형의 예열온도에 따른 영향을 조사하기 위

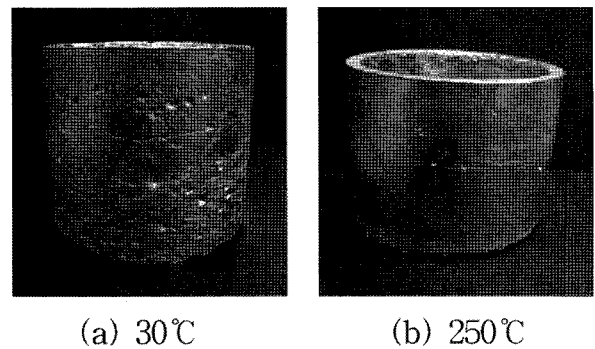


Fig. 3. The surface of the outer shell for various preheated mold temperature.

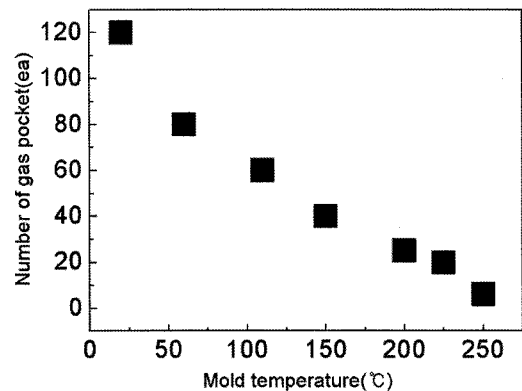


Fig. 4. The relationship between the preheated mold temperature and the number of the gas pocket.

해 630°C의 Al-18wt.%Si 합금을 1500 rpm으로 회전하는 주형에 주입하였다. 이때의 주형은 30°C에서 250°C까지 예열하였다. Fig. 3은 각각 주형의 예열온도가 30°C와 250°C일때의 셸의 외부 표면을 보여준다. 주형의 예열온도가 250°C일때에 비해 30°C에서 현저히 많은 양의 Gas pocket 이 발견되었다. 이는 용탕 주입시 낮은 주형 온도에 의해 급격히 냉각이 이루어져 표면의 가스가 빠져나오지 못한 채 응고가 되기 때문이다. 주형예열온도와 Gas pocket 수와의 관계를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에 따르면 주형의 예열온도가 증가할 수록 셸의 표면에 Gas pocket의 수가 줄어드는 것을 볼 수 있었다. 특히 250°C 이상에서는 Gas pocket이 거의 발견되지 않았다. 이에 본 연구에서의 외곽셸을 주조하기 위한 주형의 예열온도는 250°C로 고정하였다.

4.2.2 주입온도의 영향

용탕의 주입온도에 따른 영향을 관찰하기 위해서 각각 610°C와 690°C로 용융된 Al-18wt.%Si 합금을 1500 rpm으로 회전하는 250°C로 예열된 주형에 주입하였다. Fig. 5는 외부셸의 미세조직에 미치는 주입온도의 영향을 보여준다.

일반적으로 과공정 합금의 내마모성을 증대시키기 위해서는 미세한 Si의 균일한 분포가 매우 중요하다. Fig. 5와 같이 고온 주입에서는 큰 온도구배에 의하여 초기 응고층과 내부 미세조직간의 불균일성이 크고, 내부에서는 조대한 수지상 성장이 관찰되어 Si의 불균일성이 조장되고 있음을 확인할 수 있다. 이는 2중접합시에도 Si의 불균일성으로 인해 내부재와의 접합에 어려움이 있을것으로 사료된다. 2중접합을 위해서는 외부재의 내부에 상대적으로 높은 잠열을 가지는 Si 이 균일하게 분포되어야 접합율을 높일 수 있기 때문이다. 그러므로 보다 미세하고 균일한 미세조직을 위해서는 610°C의 저온 주입이 적절할 것으로 사료된다.

4.3 접합시 내부재 A356 셸에 미치는 주조변수의 영향

앞선 실험에서 정해진 주조조건으로 외부셸을 주조한 후 2중접합을 하기 위해 내부재를 주입하므로 내부셸의 조직에 영향을 미치는 주조변수로는 주입방법과 주입온도가 있다.

4.3.1 주입 방법의 영향

주입방법의 영향을 조사하기 위해 Al- 18wt.%Si 합금을 1500 rpm 으로 회전하는 250°C의 주형에 주입온도 610°C인 조건으로 주입하고, 내부셸은 A356 합금을 순차주입법과 동시주입법의 2가지 방법에 따라 주입온도 620°C로 하여 주입하였다. Fig. 6는 주입방법에 따른 A356 합금의 미세조직에 대한 시뮬레이션 결과와 미세조직 사진이다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 순차주입시 수지상이 발견되는 반면에 동시주입시에는 등축정 조직이 성장한다. 이러한 현상은 주입법에 따른 냉각속도의 차이에 의한 것으로 보인다. Fig. 7에 주입방법에 따른 내부재 A356 합금의 온도변화 곡선을 열전달 계산 프로그램으로 계산하여 나타내었다. Fig. 7에 따르면 순차주입시 먼저 주입된 외부재가 셸을 형성하면서 내부재에는 주형의 역할을 하게되어 동시주입법에 비해 내부셸의 냉각속도가 증가하였다. 이에 순차주입한 내부셸에서 수지상조직이 발생한 것으로 보인다. 접합의 용이성과 좋은 기계적 성질을 얻기 위해서는 균일한 조직을 얻는것이 중요하므로 순차주입법보다 동시주입법이 적합하다.

Fig. 8은 두 가지 방법으로 Al-18wt.%Si 합금에 A356 합금을 접합한 표면이다. 접합의 조건은 접합율과 혼합율로 판별할 수 있다. 일반적으로 접합율이 95%이상이고, 혼합율이 20%일 때 좋은 접합이라 알려져 있다[7]. Fig. 8에서 순차주입법의 경우 위의 접합조건을 만족하지 못하는 반면 동시주입법의 경우 낮은 주입온도에서도 추가적인 공정없이 접합의 가능성을 보인다. 이에 동시주입법이 원심주조에서의 2중접합법으로 적합하다.

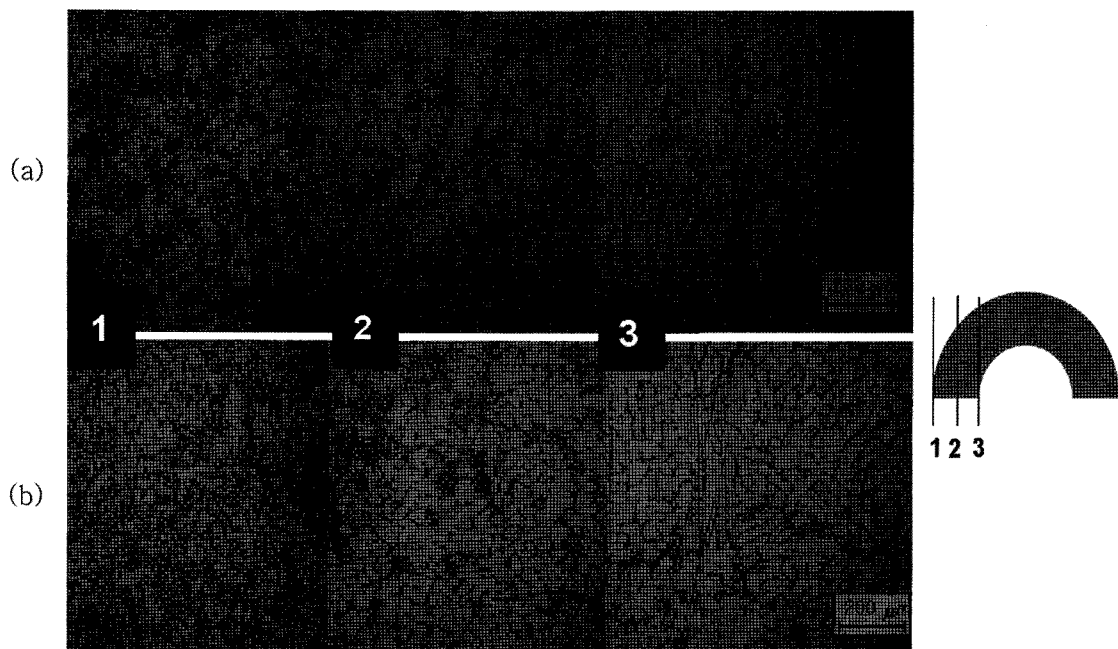


Fig. 5. The microstructures of the outer shell for the pouring temperature: a) 610°C and b) 690°C.

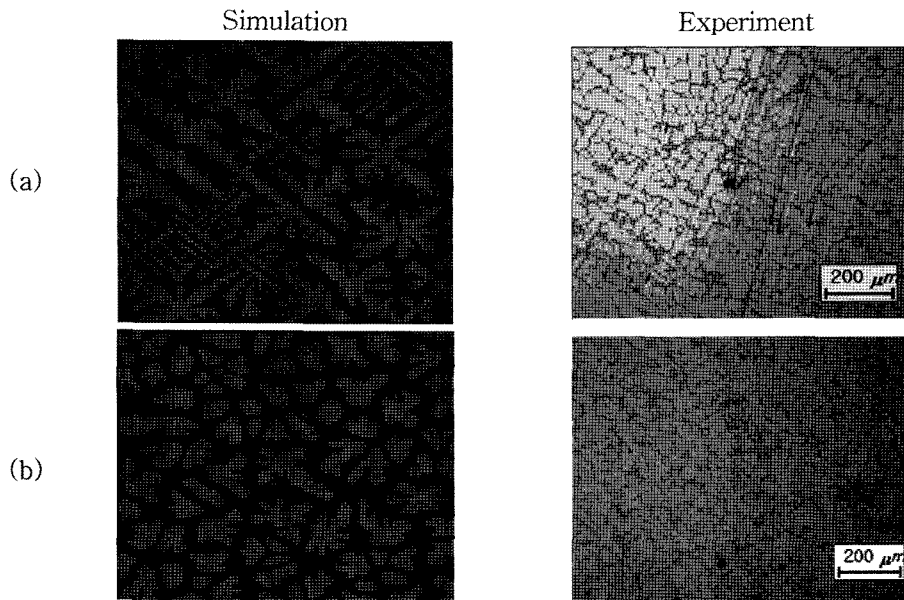


Fig. 6. Simulated and experimental microstructures of the inner shell of an A356 alloy for two different pouring methods: (a) the step pouring method and (b) the simultaneous pouring method.

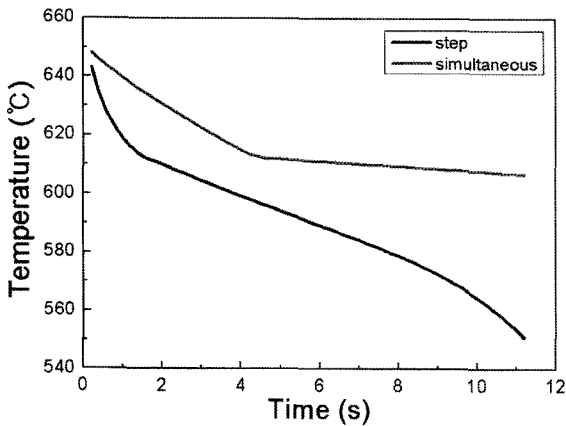
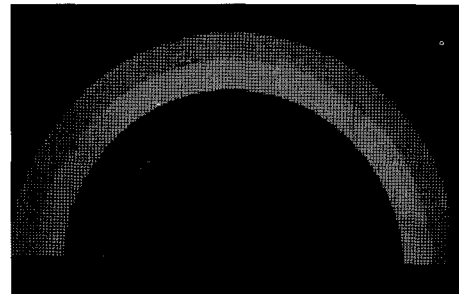
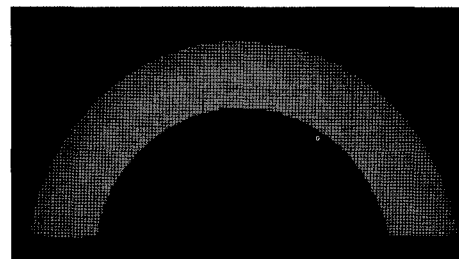


Fig. 7. Comparison of the simulated cooling curve with two pouring method by calculation: (a) the step pouring method and (b) the simultaneous pouring method.



(a)



(b)

Fig. 8. The shape of the joining shell with two pouring method: (a) the step pouring method, and (b) the simultaneous pouring method.

이용한 2중 접합시 우수한 접합도와 내부셀의 균일한 조직을 얻기 위해서 낮은 주입온도와 동시주입법이 적절한 것으로 사료된다.

5. 결 론

내외부에 서로 다른 기계적 성질을 요구하는 원통형 제품의 생산에 있어서, 제품의 품질을 향상시키고, 원가절감으로 생산

4.3.2 주입 온도의 영향

접합시 내부재 조직에 미치는 주입온도의 영향을 알아보기 위해서 620°C, 650°C, 690°C의 다양한 주입온도로 A356합금을 주입하여 관찰하였다. 이때 외부셀은 610°C의 온도 250°C의 1500 rpm으로 회전하는 주형에 주입하였다. Fig. 9는 동시주입법으로 Al-18wt.%합금에 접합한 A356 합금의 내부셀의 거시조직에 대한 시뮬레이션과 실험 결과이다. 주입온도가 감소할수록 내부의 등축정 조직의 크기가 미세해지고, 등축정 영역이 좁아지는 것을 볼 수 있다. 이는 낮은 과열도에 의해 용탕의 점도가 증가하고, 응고 시간이 짧아지게 되어 생성된 핵들이 원심력에 의해 셀의 바깥쪽으로 이동하기 힘들기 때문이다. 이와 같은 결과는 원심력을 이용한 2중접합시 내부셀 A356 합금의 균일한 조직을 얻기 위해서 낮은 온도에서의 주입이 필요하다는 사실을 의미한다. 이상의 실험에서 원심력을

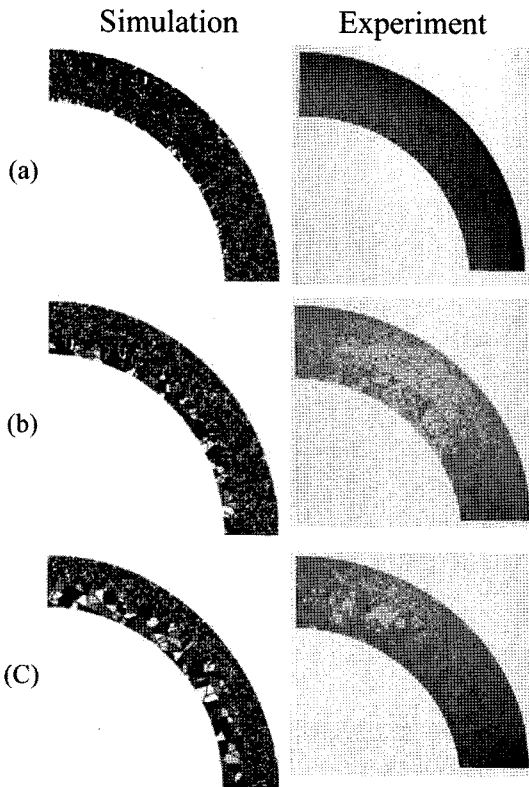


Fig. 9. The macrostructures of the inner shell for the various pouring temperature : (a) 620°C, (b) 650°C, and (c) 690°C.

비용을 줄이기 위해서 원심주조를 이용하여 과공정 알루미늄 합금과 아공정 알루미늄 합금을 접합하였다. 본 연구에서는 원심력을 이용한 2종금속의 접합에 있어서 주조조건이 제품성형에 미치는 영향에 관하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 주형의 회전 속도는 주물의 직경이 클수록, 주물의 상단과 하단의 내경 차이를 작게 할수록, 회전속도를 증가시켜야 한다. 1500 rpm에서 제품의 형상과 내부의 산화막 부유 효과로 깨끗한 내부 표면을 얻을 수 있었다.
2. 외부셀에서 기계적 성질을 향상시키고 Gas pocket 결함을 줄이기 위해서는 높은 주형 예열 온도와 낮은 용탕 주입 온도가 필요하다.
3. 내부재 아공정 알루미늄은 낮은 과열도에서 주입시 균일한 미세조직을 얻을 수 있었다.
4. 동시주입법을 적용할 경우 순차주입법에 비해 월등히 좋은 접합 상태를 보였다.

참 고 문 헌

- [1] A. Halvae and A. Talebi: Materials Processing Technology, "Effect of process variables on microstructure and segregation in centrifugal casting of C92200 alloy", 118 (2001), 123-127.
- [2] K. Liu et al : Intermetallics, "Single step centrifugal casting TiAl automotive valves", 13 (2005), 925-928.
- [3] Li Changyun et al. : Materials Processing Technology, "Model experiment of mold filling process in vertical centrifugal casting", 176 (2006), 268-272.
- [4] M. Rappaz and Ch. A. Gandin: Acta Metall. Mater, "Probabilistic modelling of microstructure formation in solidification processes", 41 (1993), 345.
- [5] W. Kurz, B. Giovanola, and R. Trivedi : Acta Metall, "Theory of microstructural development during rapid solidification", 34 (1986), 823.
- [6] S. R. Jang: "A Study on the Solidification Characteristics of Al Alloys in Vertical Centrifugal Casting" (Ph. D. thesis, Yonsei University, 2002), 13-16.
- [7] Saburo sugiura, K. Yamano, S. Hayakawa, H. Yamazaki: Electric Furnace Steel. 52 (1981), 36.