

가압회전식 장비를 이용한 A356 합금의 미세조직과 재가열 특성

서판기¹, 고재홍², 강충길[#]

Characteristics of Microstructure and Reheating of A356 Aluminum Alloy by Pressure Rotation Equipment

P. K. Seo, J. H. Ko, C. G. Kang

Abstract

Many rheocasting processes had been proposed because of the difficulty of recycling, the limit of material, and the high cost of raw material in thixocasting. But, these rheocasting processes also had disadvantages such as the high initial investment cost and the lower mechanical properties than thixocasting. In this study, a continuous fabrication of rheological material with pressure rotation equipment was newly devised to overcome the disadvantages of rheocasting process. In order to investigate the thixof ormability, reheating experiments were carried out with the material fabricated by the newly devised equipment. Morphological characteristics between mechanical stirring and reheating were compared.

Key Words : Pressure Rotation Equipment, A356 Aluminum Alloy, Globular Microstructure, Reheating

1. 서 론

금속의 반응용 성형공정은 주로 틱소캐스팅(Thixocasting)과 레오캐스팅(Rheocasting)으로 대별된다. 1970년대 초반에서 1980년대 중반까지는 주로 반응용 재료의 레오로지(Rheology) 거동과 레오캐스팅에 관한 연구가 이루어졌다. 1980년대 중반부터 2000년대 초반까지는 틱소캐스팅이 주요한 연구대상이었다. 현재는 틱소캐스팅에 있어서 재료 리사이클링(Recycling)의 어려움, 재료 선택의 한계성과 고가의 원재료비로 인하여 레오캐스팅이 새로이 각광받고 있으며, 사용자의 요구조건을 만족시키기 위해서 많은 레오캐스팅 공법이 새롭게 제안되고 있다[1].

UBE사에서 개발된 New Rheocast (NRC)[2], MIT의 Semisolid rheocasting (SSR), WPI의 Continuous

rheoconversion process (CRP), THT Presses사의 Subliquidus casting (SLC), Alcan사의 Swirl enthalpy equilibration device (SEED) 등의 레오캐스팅 공법이 보고되어지고 있다[1].

상기의 새롭게 고안된 레오캐스팅 공법 또한 여러가지 단점을 가지고 있다. 예를 들면, 틱소캐스팅에 비해서 초기 투자비가 매우 높고, 제품의 기계적 물성치가 낮다. 본 연구에서는 레오캐스팅의 단점을 극복하기 위해서 저가의 투자비로 연속적으로 레오로지 소재를 제조할 수 있는 가압회전식 장비를 새롭게 고안하였으며, A356 알루미늄 합금에 있어서 교반시간, 교반속도, 초기 용탕 온도가 미세조직에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 가압회전식 장비로 제조된 소재를 재가열하여 틱소캐스팅에의 적용가능성을 조사하였으며, 교반 직후의 미세조직과 재가열 이후의 미세조직을 비교분석하였다.

1. 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구센터

2. 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

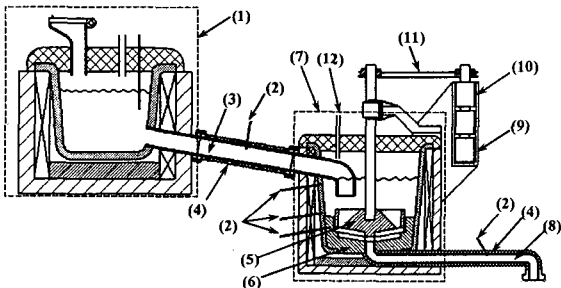
교신저자: 부산대학교 기계공학과, cgkang@pusan.ac.kr

2. 장비 설계 및 실험

2.1 가압회전식 장비 설계

가압회전식 장비의 개념은 밀폐된 공간 내에서 온도를 제어하면서 연속적으로 레오로지 소재를 제조하는 것이며, Fig. 1 은 장비의 개략도이다. 가압회전식 장비는 용해로, 보온로, 연결관, 모터, 토크미터 (Torque meter), 상부 및 하부 교반자, N₂ 가스 주입관, 토출관으로 구성되어 있다.

용해로에서 용해된 용탕은 연결관을 통해서 교반온도로 설정된 보온로로 이송되고, 보온로에는 N₂ 가스를 주입하여 이송된 용탕의 산화를 방지하도록 하였다. 용탕의 온도가 액상선 (Liquidus) 이하에 도달하면 설정된 교반속도로 모터를 작동시키고, 모터와 연결된 회전축에 의해 상부교반자가 회전한다. 상부 교반자의 회전으로 반응용 상태의 재료는 상부 교반자의 홈을 통해 하부 교반자의 상부로 이동하고, 이때 상부 교반자와 하부 교반자 사이에서 회전력과 마찰력을 받게 된다. 그 후 반응용 상태의 재료는 상하 교반자 사이의 점차 좁은 단면적을 통과하는 동안 N₂ 가스 압력의 증가에 의해 강한 압축력이 가해진다. 반응용 상태에서 상실한 회전력, 마찰력, 압축력에 의해 상하 교반자 사이의 재료에 난류와 강제 대류[3]가 가해지는 구조이며, 초기 생성된 핵 (Nuclei)이 수지상 (Dendrite) 조직이 아닌 구상화 (Globular) 조직으로 성장하고, 연속적으로 레오로지 소재를 제조할 수 있도록 설계하였다.



(1) Melting furnace; (2) thermocouple; (3) connecting pipe; (4); induction coil; (5) upper stirrer; (6) lower stirrer; (7) stirring tank (holding furnace); (8) outlet pipe; (9) motor; (10) torque meter; (11) chain; (12) N₂ gas

Fig. 1 Schematic of pressure rotation equipment

Table 1 Experimental conditions for rheological material with pressure rotation equipment

No.	Stirring time, t_s (sec)	Stirring temperature, T_p (°C)	Stirring speed, v_s (rpm)
1	120	650	40
2	120	650	60
3	120	650	80
4	120	650	100
5	300	650	60
6	600	650	60
7	120	620	40
8	120	620	60
9	120	620	80
10	120	620	100
11	300	620	60
12	600	620	60

2.2 실험방법

가압회전식 장비에서 구상화 조직을 가진 레오로지 소재의 제조조건과 재가열 특성을 파악하기 위해서 교반시간 (t_s), 초기 용탕온도 (T_p), 교반속도 (v_s)를 주요변수로 설정하여 실험하였다. 실험에 사용된 소재는 A356 알루미늄 합금이며, Table 1 은 교반실험에 사용된 조건이다. 교반시간은 120, 300, 600 sec, 초기 용탕온도는 650, 620 °C, 교반속도는 40, 60, 80, 100 rpm 이었으며, 각각의 조건으로 제조된 소재는 급냉 후 Fig. 2 의 조건으로 재가열하였다. 재가열은 고출력과 저출력이 반복되는 6 단계로 설정하였으며, 최종 유지시간을 조절하여 설정온도에 도달하도록 하였다. 교반실험과 재가열 실험 이후에 시편을 채취하여 실험조건에 따른 미세조직을 관찰하였다.

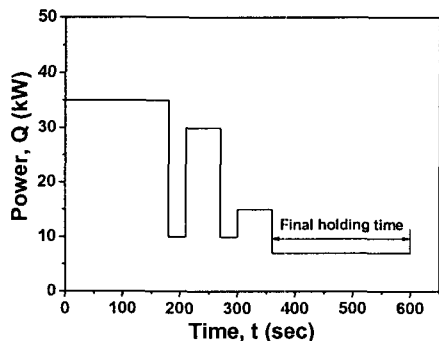


Fig. 2 Relationship between reheating time and reheating power

3. 실험결과 및 고찰

3.1 교반시간의 영향

교반시간에 따른 미세조직의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 동일한 초기 용탕온도 ($T_p = 650\text{ }^\circ\text{C}$)와 교반속도 ($v_s = 60\text{ rpm}$)에서 교반시간이 120 sec에서 600 sec로 증가되면서 수지상이 많은 조직에서 구상화 조직으로 변화되었다. 이것은 교반시간의 증가에 따라 수지상 가지에 강한 전단력이 연속적으로 가해져서 수지상 조직으로 발달되는 것이 방해받고, 절단된 수지상 가지 또한 연속적인 전단력에 의해 수지상 조직으로 성장할 수 없게 된다. 이러한 교반력 하에서 생성된 결정립은 표면에너지를 감소시키기 위해서 장미상 형상에서 점점 구상화되어, $t_s = 600\text{ sec}$ 에서는 시편 전체에서 구상화 조직을 나타내었다.

3.2 초기 용탕온도의 영향

동일한 교반시간 ($t_s = 120\text{ sec}$)과 교반속도 ($v_s = 60\text{ rpm}$) 하에서 초기 용탕온도에 따른 미세조직을 Fig. 4에 나타내었다. A356 합금의 액상선은 약 $613\text{ }^\circ\text{C}$ 이며, 용탕과열도[4]는 $650\text{ }^\circ\text{C}$, $620\text{ }^\circ\text{C}$ 에서 각각 $37\text{ }^\circ\text{C}$, $7\text{ }^\circ\text{C}$ 였다. 용탕과열도가 $37\text{ }^\circ\text{C}$ 인 경우, 수지상 조직이 지배적이었으며, $7\text{ }^\circ\text{C}$ 인 경우에는 로제트 형상과 다수의 구상화 조직이 혼재하였다. 이것은 용탕과열도가 $7\text{ }^\circ\text{C}$ 인 경우 주입 직후 과냉이 발생하여 초기 응고 시에 미세한 등축정의 핵

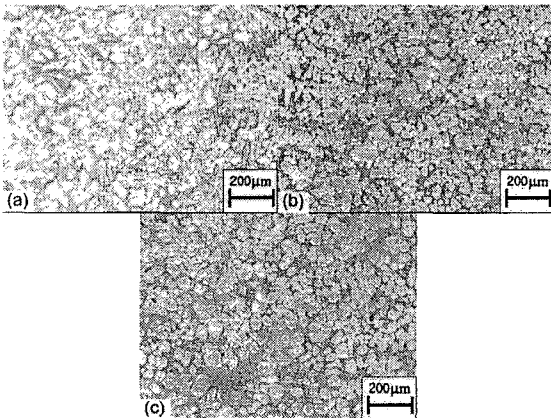


Fig. 3 Microstructural evolution according to the stirring time: (a) $t_s = 120\text{ sec}$ (No. 2); (b) $t_s = 300\text{ sec}$ (No. 5); (c) $t_s = 600\text{ sec}$ (No. 6)

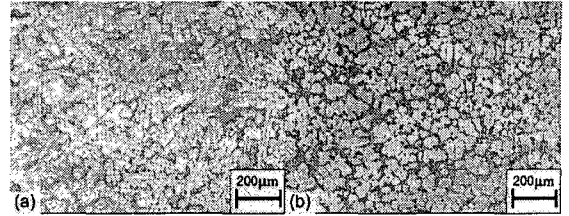


Fig. 4 Microstructural evolution according to the pouring temperature: (a) $T_p = 650\text{ }^\circ\text{C}$ (No. 2); (b) $T_p = 620\text{ }^\circ\text{C}$ (No. 8)

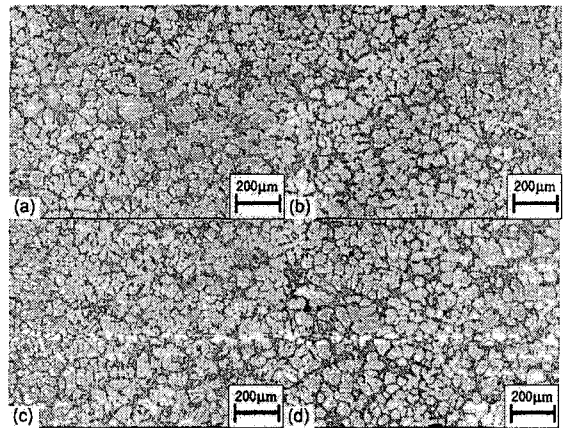


Fig. 5 Microstructural evolution according to the stirring speed: (a) $v_s = 40\text{ rpm}$ (No. 7); (b) $v_s = 60\text{ rpm}$ (No. 8); (c) $v_s = 80\text{ rpm}$ (No. 9); (d) $v_s = 100\text{ rpm}$ (No. 10)

생성이 촉진되고, 교반에 의해 전단변형을 속도가 증가하여 수지상 성장이 억제되어, 구상화 조직을 나타내는 것으로 판단된다. 반면에 용탕과열도가 $37\text{ }^\circ\text{C}$ 인 경우에는 용탕 주입 시 과열이 발생하므로 초기 핵생성이 감소하고, 소수의 초정들이 성장하여 수지상 조직으로 발달된다. 교반에 의한 전단력과 강제 대류에 의해 일부 수지상 조직은 장미상과 구상화 조직으로 변하지만, 교반시간과 교반속도가 비교적 낮은 경우에는 Fig. 4 (a)와 같이 수지상 조직이 지배적이었다.

3.3 교반속도의 영향

교반속도의 증가는 용탕 내부에서 난류 발생을 유발하여, 강제 대류의 정도를 증가시키기 때문에 연속적으로 불균일하게 생성된 핵은 빠른 성장속도로 구상화된다[5]. Fig. 5는 교반속도의 증가에 따른 미세조직의 변화를 나타낸 것이다. $v_s = 40\text{ rpm}$ 인 저속의 교반속도에서는 부분적으로 수지상

조직이 관찰되었다. 하지만 60 rpm 이상의 교반속도 (Fig. 5 (b) - (d))에서는 장미상과 구상화 조직이 지배적이었으며, 수지상 조직은 거의 관찰되지 않았고, 미세한 결정립이 보다 많이 생성되었다.

따라서, 레오캐스팅에 적합한 미세한 구상화 조직을 가진 레오로지 소재를 제조하기 위해서는 교반시간, 교반속도, 초기 용탕온도의 영향이 복합적으로 검토되었다. 그 결과 미세한 구상화 조직은 초기 용탕온도, 교반시간, 교반속도의 순서로 영향을 받는 것으로 판단되었다.

3.4 재가열의 영향

재가열의 목적은 미세조직을 완전히 구상화시키면서 텍소캐스팅에 적합한 성형온도로 가열하는 것이다. 가압회전식 장비로 제조된 소재를 재가열하여 미세조직을 관찰한 결과를 Fig. 7 에 나타내었다. 동일한 조건으로 제조된 Fig. 5 (a)와 Fig. 7 (a)를 비교했을 때, 교반 후의 조직에서 관찰되었던 수지상 조직과 각진 모서리를 가진 초정상들은 재가열 이후에 전체적으로 구상화되었으며, 부분적으로 포집된 공상상이 관찰되었다. 초기 용탕온도가 낮으면서 교반속도가 빠르고 (Fig. 7 (b)), 교반시간이 긴 (Fig. 7 (c), (d)) 경우에는 전체 조직이 미세한 구상화 조직으로 구성되어 있기 때문에 향후 텍소캐스팅에 적합할 것으로 사료된다.

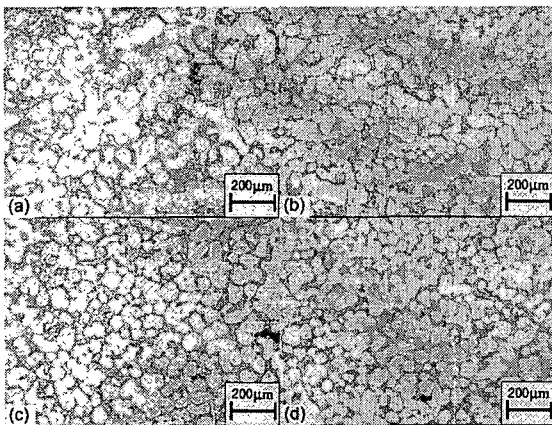


Fig. 7 Microstructural evolution after reheating: (a) No. 7; (b) No. 10; (c) No. 11; (d) No. 12

4. 결론

새롭게 고안된 가압회전식 장비를 이용한 A356 알루미늄 합금의 교반실험과 재가열 실험을 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 밀폐된 공간 내에서 온도를 제어하면서 기계식 회전력과 압축력을 이용하여 레오로지 소재를 연속적으로 제조할 수 있는 가압회전식 장비를 설계 및 제작하였다.

(2) 가압회전식 장비를 기계식 교반실험에서 교반시간과 속도가 증가하고, 초기 용탕온도가 낮을수록 구상화 정도가 우수한 미세조직을 얻을 수 있었다

(3) 기계식 교반으로 제조한 소재를 재가열한 결과, 교반 직후의 조직에 비해 초정상의 구상화 정도가 보다 우수하고 균일하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지원 국가지정연구실 - Thixo-Rheo 성형연구실(NRL)- 사업과제로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] J.L. Jorstad, 2004, SSM process – an overview, Proc. of the 8th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, CD-Rom.
- [2] M. Adachi and S. Sato, Characterizations of the New Rheocasting process, Trans. 20th International Die Casting Congress and Exposition, pp. 47~52.
- [3] A. Hellawell, 1996, Grain evolution in conventional and rheo-casting, Proc. of the 4th Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp. 60~65.
- [4] 한요섭, 이호인, 이재철, 2003, AlSi7Mg 알루미늄 합금의 초정 구형화에 대한 주조조건 영향, 한국주조공학회지, 제 23 권, 제 1 호, pp. 40~46.
- [5] Z. Fan and G. Liu, 2005, Solidification behavior of AZ91D alloy under intensive forced convection in the RDC process, Acta Materialia, Vol. 53, pp. 4345~4357.