

전자교반식 수평연속주조법에 의한 반응고 Al 합금의 제조에 관한 연구

박기범 · 송영배 · 김영환 · 김경현* · 김인배

부산대학교 금속공학과

*한국기계연구원 재료기술연구부

A Study on the Fabrication of Semi-solid Al Alloys by EMS Horizontal Continuous Casting Process

Ki-Bum Park, Young-Bae Song, Yeong-Hwan Kim, Kyung-Hyun Kim*, and In-Bae Kim

Dept. of Metallurgical Eng., Pusan National University, Pusan 609-735

*Dept. of Materials Eng., KIMM, Changwon 641-010

(1999년 11월 10일 받음, 1999년 12월 15일 최종수정본 받음)

초 록 본 연구에서는 반응고 Al 합금을 얻기 위해서 3상 2극의 전자교반장치를 이용하였으며, 주입온도와 주입전압을 변화시켜 Al 합금의 초정입자크기, aspect ratio, 표준편차, 경도 및 공정 Si 입자의 크기 및 형상 변화를 조사하였다. 같은 주입온도에서는 주입전압이 증가함에 따라 aspect ratio, 표준편차 및 초정입자의 크기는 감소되었다. 전자교반식 수평연속주조방법에 의한 Al 합금의 최적제조 조건은 주입전압 220V, 주입온도 680°C 이었으며, 이 조건에서 초정입자의 크기는 54 μ m 이었고, aspect ratio는 1.56 이었으며 그 표준편차는 0.4 이었다. 그리고 공정 Si의 크기는 0.5 μ m 이었으며 제조된 Al 합금의 경도는 72.1 Hv를 나타내었다. 본 연구를 위해 제작된 3상 2극 전자교반장치에 의해서 매우 낮은 aspect ratio 및 표준편차를 갖는 반응고 A356 Al 합금을 제조할 수 있었다.

Abstract In this study, to fabricate the semi-solid Al alloy, the 3phase-2poles electromagnetic stirring system was adopted. The changes of primary grain size, aspect ratio, standard deviation, hardness and the size morphology of eutectic Si with pouring temperatures and input voltages were investigated. At the same pouring temperature, with increasing input voltage, aspect ratio, standard deviation and primary grain size were decreased. The optimum condition for fabrication of semisolid Al alloys by EMS horizontal continuous casting process was determined that the input voltage was 220V and the pouring temperature was 680°C. At this optimum conditions the primary grain size was 54 μ m, the aspect ratio was 1.56 and the size of eutectic Si was 0.5 μ m. The micro-hardness of the Al alloy was 72.1 Hv. The semi-solid A356 Al alloy which has very low aspect ratio and standard deviation value could be fabricated by adopting the EMS horizontal continuous casting facility that was manufactured for this study.

Key words : A356 Al alloy, Semi-solid Al alloy, EMS stirring system, aspect ratio, size of eutectic Si

1. 서 론

최근 산업 고도화와 환경보존 문제로 인하여 저 공해배출 제조공정기술의 개발과 에너지절약형 경량소재의 개발이 요구되고 있다. 특히 자동차의 경우 배기가스 및 연비에 대한 강화규제가 법제화까지 이르고 있어 이의 해결을 위한 개발 연구에 치열한 기술경쟁이 이루어지고 있다.¹⁾ 이러한 관점에서 미국, 유럽, 일본 등에서는 자동차에 사용되는 기존의 철강재료 부품 및 내압 부품을 알루미늄 합금으로 대체하려는 개발 연구에 많은 투자를 하고 있으며, 그 생산공정 중의 하나인 반응고 성형(thixofforming) 공정은 액상과 고상이 공존하는 온도 영역에서 금속재료를 성형하는 기술로서²⁻⁴⁾, 1970년대 초반 MIT 연구진에 의하여 반응고 상태에서의 독특한 점도특성이 발견^{5,6)}됨으로서 시작되었으며, 기존의 주조와 단조 공정의 장점만을 취할 수 있는 공정으로 알려져 있다.⁷⁾ 또한 반응고금속 성형 기술은 복잡한 형상의 제품을 액체상태보다 높은 점성으로 인해 충전시 유동

형태가 난류로 발달하지 않기 때문에 가스결함이 적고 초기 온도가 낮으므로 금형의 열피로를 줄일 수 있으며⁸⁾, 금형내로 완전 충전이 가능하므로 실형상(near net shape)으로 생산 가능하고 고액공존영역에서의 점성도는 0.01에서 10000 Pa·s 정도⁹⁾이다. 그리고 반응고 성형시에는 통상의 주조품에 나타나는 조대한 수지상 조직 대신에 구형에 가까운 초정입자들을 얻을 수 있으므로 유동성이 좋고 변형 저항이 낮다^{10,11)}는 장점도 갖는다. 국내에서는 이러한 반응고 합금제조방법으로 간단한 원리로 높은 전단력을 낼 수 있고 구형화된 조직을 쉽게 얻을 수 있는 기계적 교반법에 관한 연구는 많이 이루어 졌으나, 대량생산을 위한 전자교반법에 대한 연구는 부족한 실정¹²⁾이다. 따라서 반응용 가 공용 반응고 Al 합금을 연속적으로 대량 생산할 수 있기 위해서는 전자교반법을 적용한 연속 주조 기술의 기초 연구가 요구되는 실정으로서, 본 연구에서는 A356 Al 합금을 대상으로 하여 전자교반을 이용한 연속주조 방법을 적용하였을 때, 초정입자의 크기, aspect ratio, 표준편차, 공정 Si 입자

Table 1. Chemical composition of A356 alloys.

Element	Si	Mg	Fe	Cu	Pb	Mn	Ti	Al
Weight (%)	6.70	0.43	0.27	0.06	0.01	0.09	0.04	bal

Table 2. Variation of solid fraction with temperature.

Temperature (°C)	617	612	607	602	597	592	587	582	577	572
Solid fraction (%)	6	14	21	27	32	37	41	44	47	49

의 크기에 미치는 주입온도, 주입전압등의 공정변수의 영향에 대하여 조사하였다.

2. 실험 방법

본 실험에 사용된 재료는 A356 합금으로서 합금성분을 Table 1에 나타내었다. 온도에 따른 고상율의 변화를 식 (1)의 Scheil방정식¹²⁾에 의해 예측하였으며, 온도에 따른 A356 합금의 고상율의 변화를 Table 2에 나타내었다.

$$f_s = 1 - \left(\frac{T_m - T_L}{T_m - T} \right)^{\frac{1}{1-K}} \quad (1)$$

여기서 T_m은 순금속의 용융온도이고 T_L은 모합금의 액상선 온도, K는 평형분배계수이다.

또한 A356 합금의 액상선과 고상선 측정을 위해 DTA (MTC 1000)을 사용하여 액상선과 고상선을 구하였다. DTA 측정결과 A356 합금의 액상선온도는 620°C이며, 고상선온도는 560°C로 측정되었다. 본실험에 사용된 전자교반 장치는 3상 2극의 형태로서 출력은 30kw이고 최대 회전수는 분당 3600회이며 공급되는 전압의 세기를 변화시키기 위해 변압기를 사용하였다. 주입전압이 A356합금의 응고시 미세조직에 미치는 영향을 조사하기 위하여 A356합금을 고주파 용해로에서 용해한 후 전자교반기내에 장치된 챔버형 Cu 몰드에 용탕을 주입하여 무교반 및 전자교반된 상태에서 챔버형 Cu 몰드내에 6 l/min의 냉각수를 흘려 강제 수냉방식을 채택하여 냉각하였다. 주입전압은 무교반 및 140V, 180V, 220V로 변화를 주었고, 주입온도를 650°C, 680°C, 그리고 750°C로 각각 변화를 주어 주입온도 및 주입전압이 미세조직에 미치는 영향을 조사하였다. 그림 1은 전자교반시험장치의 개략적인 모식도이다. 시험에 사용된 몰드는 자체 제작된 Cu챔버형 수냉 몰드로서 그림 2에 나타내었으며 정확한 온도측정을 위해 열전대를 몰드 밑부분에서부터 4cm되는 부분의 중앙부에 설치하여 온도를 측정하였다.

또한 주입전압 및 용탕주입온도에 따른 미세조직의 변화와 초정입자크기 및 aspect ratio에 미치는 영향을 조사하기 위해 제작된 시편을 0.5% HF시약(증류수 99.5ml + HF 0.5ml)로 45초 가량 에칭한 후 광학현미경을 이용하여 미세조직의 변화를 관찰하였으며, 화상분석기(Image-Pro Plus 3.0)를 이용하여 초정입자크기와 aspect ratio를 측정하였으며, 공정 Si입자의 형상 및 크기를 주사전자현미경으로 관찰하였다. 또한 재료의 기계적인 성질을 알기 위해 시편의 표면을 깨끗이 연마한 후 미세 비커스 경도기

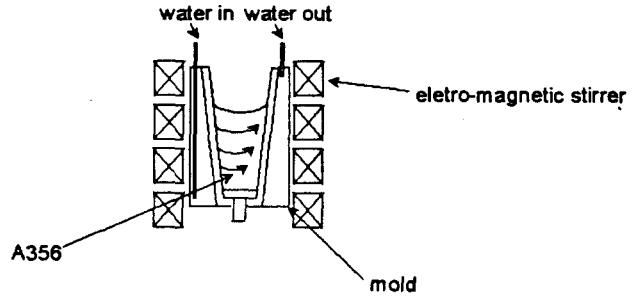


Fig. 1. Schematic diagram of electromagnetic stirring apparatus.

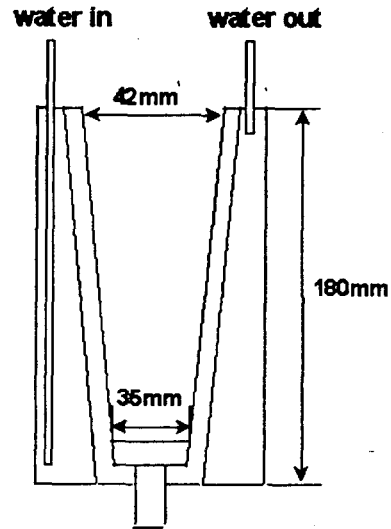


Fig. 2. Schematic diagram of chamber type Cu mold.

(Mitutoyo, MVK-H100)을 이용하여 하중 300g, 시간 10sec의 조건에서 측정하였으며, 동일 조건하에서 주형의 표면부에서 중심부로 1mm 간격으로 10회 측정한 후 평균값을 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

전자교반력에 따른 미세조직의 영향

그림 1의 장치와 그림 2의 mold를 사용하여 용탕의 주입온도를 680°C로 고정시킨 상태에서 주입전압을 140, 180, 220V로 변화시켜 미세조직을 관찰하였다. 그림 3은 용탕의 주입온도를 680°C로 고정시킨 다음 주입전압의 변화에 따른 미세조직의 변화를 관찰한 결과를 나타낸 것이다. 주입전압이 140V인 경우, 시편의 가장자리(a)로부터

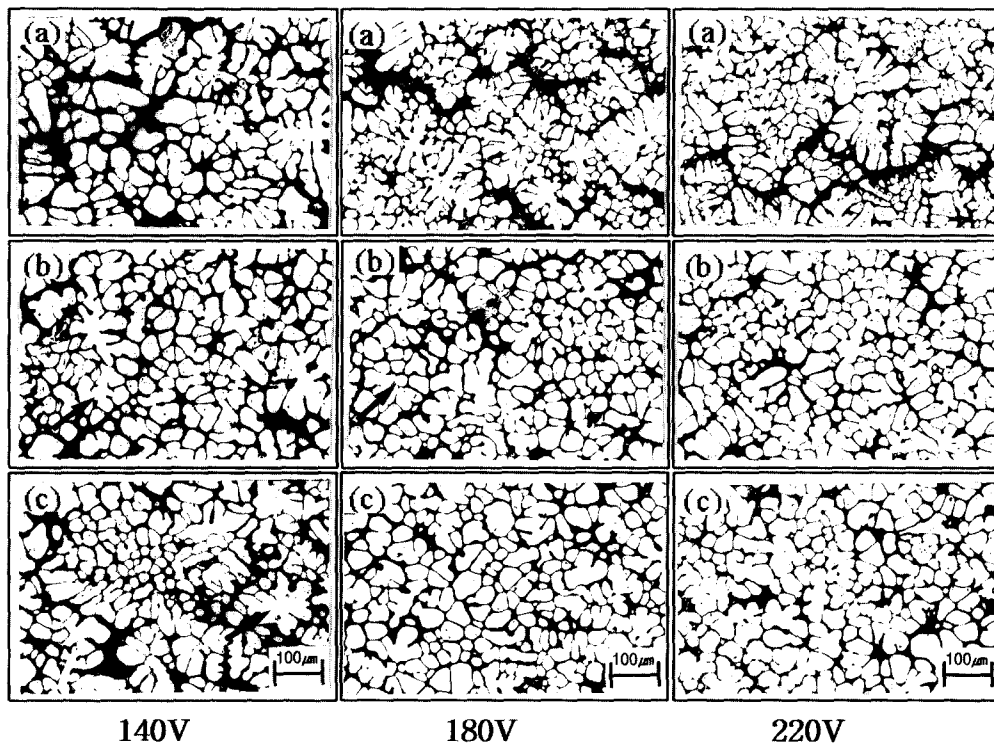


Fig. 3. Changes of microstructure depending on the distance from surface and stirring voltages (140V, 180V, 220V) at 680°C pouring temperature. (a) surface, (b) middle, (c) center

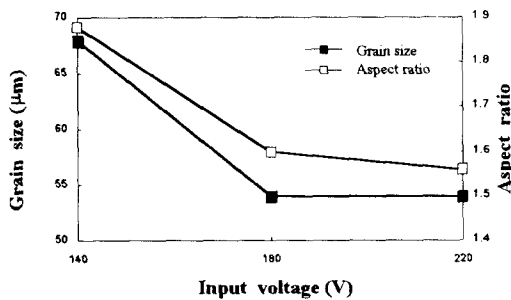


Fig. 4. Variation of primary grain size and aspect ratio with input voltages at 680°C pouring temperature.

Table 3. Variation of standard deviation with input voltage at 680°C pouring temperature.

Pouring temperature	680°C		
Input voltage	140V	180V	220V
Standard deviation	0.7	0.5	0.4

중심부(c)로 갈수록 구상화가 증가되었으나, 중심부에는 rosette 형태의 조직(화살표 표시부)과 구상화 조직이 혼재하고 있음을 알 수 있다. 주입전압이 180V 인 경우에는 가장자리부(a)에는 140V의 경우와 비슷한 조직이고, middle부(b)에는 rosette 형태의 조직이 관찰되지만 중심부(c)에는 거의 구상화된 조직만이 관찰된다. 주입전압이 더욱 증가된 220V의 경우 가장자리부(a)에는 140V와 180V의 조직과 유사한 조직을 나타내지만 middle부(b) 및 중심부(c)에서는 모두 구상화된 조직만이 관찰되며 구상화 정도

는 180V에 비해 증가되었다. 이와같이 주입전압이 증가함에 따라 구상화 정도가 증가되는 이유는 주입전압의 증가에 의해 교반력이 증가되고 그에 따라 초기 생성된 수지상정조직의 파쇄가 더욱 용이해졌을 뿐 아니라 파쇄된 수지상정조직의 마멸과 합체가 용이하게 일어나기 때문^(12,13)이라 판단된다. 상대적으로 교반력이 낮은 경우에는 수지상정조직의 파쇄가 적을 뿐 아니라 교반에 의한 마멸 및 합체의 과정이 상대적으로 부족하여 rosette 형태와 구상화된 조직이 혼재하게 된다고 판단된다.

그림 3의 미세조직으로부터 주입전압의 증가에 따른 초정입자크기의 변화를 조사하였으며, 그 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 초정입자크기는 표면부 및 중심부의 입자크기의 평균값으로서 주입전압이 140V의 경우 초정입자의 평균크기는 68μm이며 180V 및 220V의 경우 54μm로 비슷하였다. 주입전압이 140V에서 180V 이상으로 증가함에 따라 초정입자의 크기가 작아졌는데 그 이유는 주입전압의 증가에 따라 교반력이 증가되고, 교반력이 증가됨으로서 파쇄된 수지상정조직이 새로운 초정입자의 핵생성 site 역할을 함과 동시에 초정입자의 성장을 방해하는 barrier의 역할을 하기 때문이라고 생각된다. 그림 4와 Table 3은 주입전압의 증가에 따른 aspect ratio 및 표준편차의 변화를 조사한 것으로서, 140V의 경우 aspect ratio가 1.88이며 표준편차는 0.7이었으며, 주입전압의 증가에 따라 aspect ratio와 표준편차가 각각 180V의 경우 1.6과 0.5이었으며, 220V의 경우에는 1.56과 0.4로 감소되었다. aspect ratio가 감소된다는 것은 구상화 정도가 증가된다는 것을 의미하

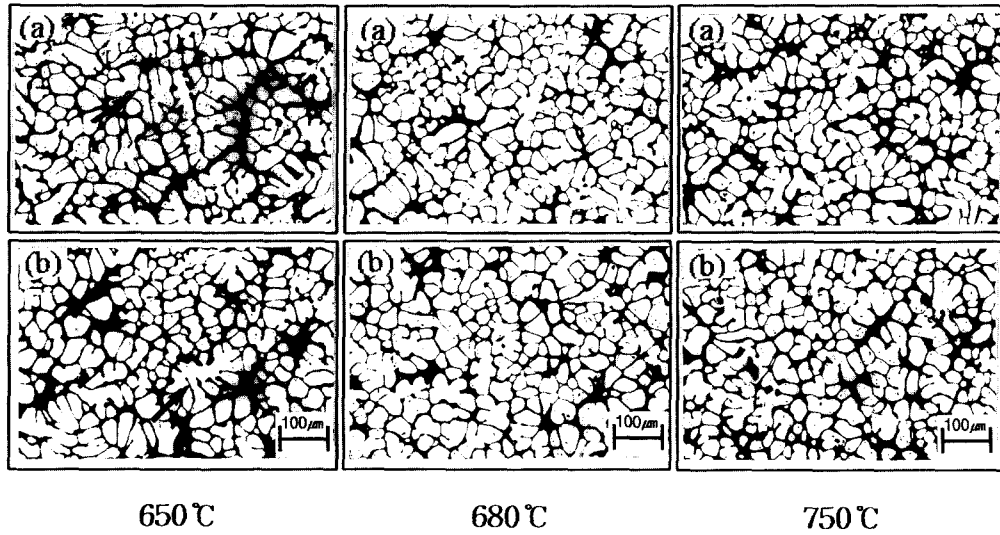


Fig. 5. Changes of microstructure depending on the distance from surface and pouring temperatures (650°C, 680°C, 750°C) at 220V input voltage. (a) middle, (b) center

기 때문에 주입전압이 증가함에 따라 구상화정도가 증가된다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 주입전압의 증가에 따른 교반력의 증가에 의한 것으로서 그림 3의 결과에서 고찰한 바와 같이 주입전압이 증가함에 따라 교반력이 증가되기 때문이라고 판단된다.

주입온도에 따른 미세조직의 영향

주입전압의 증가에 따라 수지상정조직의 파쇄가 뚜렷이 나타남에 따라 주입전압을 220V로 고정시킨 후 주입온도의 영향을 조사하였다. 그림 5는 주입전압을 220V로 고정시키고 용탕의 주입온도를 변화시켰을 때 시편의 middle부 (a)와 중심부 (b)의 미세조직 변화를 관찰한 것으로서, 주입온도가 650°C의 경우 구상화된 조직과 rosette 형태의 조직(화살표 표시부)이 공존하고 있는 반면에, 주입온도가 680°C 이상으로 증가되면 구상화는 크게 증가되어 650°C에서 관찰되었던 rosette 형태의 조직도 사라지고 거의 구상화된 조직만이 관찰되었다. 이와 같이 주입온도가 증가함에 따라 구상화정도가 증가되는 것은 주입온도가 증가함으로써 응고시 냉각속도의 증가와 더불어 과냉도가 커지고 그에 따라 액상선적하의 온도에서 유지되는 시간이 길어짐으로서 고액공존구역에서 교반시간이 증가하기 때문이라고 생각된다. 그림 6은 주입전압을 220V로 고정후 주입온도에 따른 초정입자의 크기를 측정된 것으로서, 주입온도가 650°C인 경우 초정입자크기는 약 67µm였으며, 680°C 이상에서는 54µm 정도로서, 주입온도가 증가함에 따라 초정입자의 크기는 감소되었다. 그림 6과 Table 4는 주입전압을 220V로 고정하고 각 주입온도에 따른 aspect ratio 및 표준편차를 구한 값으로서 650°C의 경우 aspect ratio는 1.8이었고 표준편차는 0.7이었으며, 680°C에서는 1.56, 0.4, 750°C에서는 1.53, 0.38이었다. 따라서 주입온도가 상승함에 따라 aspect ratio가 감소(구상화 정도는 증가)하였으며 표준편차도 감소한다는 것을 알 수 있다. 그림 7은 주입

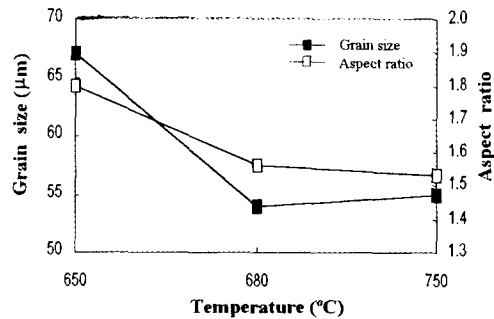


Fig. 6. Variation of primary grain size and aspect ratio with pouring temperatures at 220V input voltage.

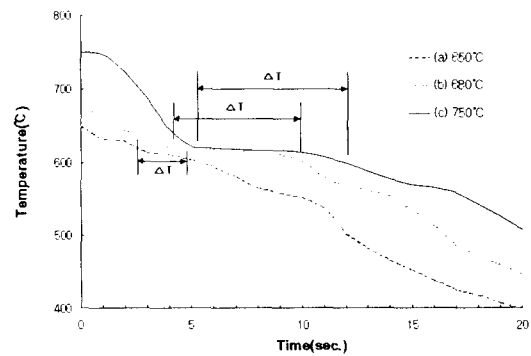


Fig. 7. Cooling curves in chamber-type Cu mold with various pouring temperatures.

전압을 220V로 일정하게 유지하고 주입온도를 변화시켜 구한 냉각곡선으로서 주입온도가 650°C (a)의 경우에는 냉각속도가 5.4°C/sec이었으며, 680°C (b)의 경우는 7.2°C/sec, 750°C (c)의 경우는 7.3°C/sec이었다. Table 5는 그림 7로부터 얻은 주입온도의 변화에 따른 액상선적하의 유지온도시간(ΔT)의 변화를 나타낸 것으로서 주입온도가 650°C의 경우 ΔT의 값은 2초였고, 주입온도가 680°C,

Table 4. Variation of standard deviation with pouring temperatures at 220V input voltage.

Input voltage	200V		
Pouring temperature	650°C	680°C	750°C
Standard deviation	0.7	0.4	0.38

Table 5. The change of holding time(ΔT) at less 30% solid fraction depending on the pouring temperatures.

Pouring temperature	ΔT
650°C	2sec.
680°C	6sec.
750°C	7sec.

750°C인 경우는 각각 6초 및 7초이었다. 따라서 주입온도가 증가함에 따라 냉각속도가 증가될 뿐 아니라 ΔT 가 2초에서 6~7초로 증가한다는 것을 알 수 있다. 주입온도가 증가할수록 ΔT 가 증가된 이유는 주입온도의 증가에 따라 과냉도가 증가하기 때문이다. 이와 같이 ΔT 가 증가되면 고액공존구역에서 전자교반시간이 길어지게 되고, 그 결과 수지상정조직의 파쇄가 용이하여 구상화가 촉진됨으로서 그림 6의 결과와 같이 주입온도가 증가함에 따라 aspect ratio가 감소하게 된다. 결국 초기응고시 생성된 수지상정조직을 전자교반에 의해 파쇄하여 구상화시키기 위해서는, 액상선 직하의 온도에서 교반시간이 긴(ΔT 가 큰) 주조조건이 효과적이라는 것을 알 수 있다. 따라서 최적의 용탕주입 온도 및 주입전압은 680°C에서 220V로 교반을 가한 경우로 판단된다. 적정주입온도를 680°C로 판단한 이유는 주입온도가 750°C인 경우 주입전압을 220V로 가한 경우와 비교해서 초정입자크기 및 aspect ratio가 비슷한 수준으로

관찰되었으나, 주입온도가 750°C일 때는 주입온도의 상승으로 인하여 주조시 수축공이나 보다 많은 기공의 발생 및 주입온도의 상승으로 인한 금형수명의 단축이 발생할 여지가 있기 때문이다.

전자교반 및 주입온도에 따른 경도의 변화

아공정 Al-Si 합금의 경우 공정 Si의 형상 및 분포는 기계적 특성을 좌우하는 중요한 요소중의 하나로서 공정 Si의 형상을 조대한 침상에서 미세한 섬유상으로 개량화시킬 필요가 있다. 공정 Si의 형상은 개량화제의 종류 및 양, 용탕내 불순물등에 의해서 좌우되나 주형재료나 예열온도, 주조방법, 냉각조건의 차이에 의해서도 형태나 크기 및 분포 상태가 현저히 달라지게 된다. 그림 8은 용탕주입온도와 주입전압에 따른 SEM조직으로서, 주입온도가 680°C이고 주입전압이 220V인 경우 (a)와 750°C, 220V (b)인 경우 공정 Si입자의 크기는 0.5 μ m정도로서 650°C, 220V 및 680°C, 무교반의 경우(1~2 μ m)보다 미세하였으며, 공정 Si의 형상은 미세한 섬유상으로 개량화되었음을 알 수 있다. 이와같은 형상변화는 그림 7의 결과에서 보는바와 같이 주입온도가 680°C이상으로 높아짐에 따라 고액 공존구역에서 전자교반시간이 증가되고, 그렇게 됨으로서 초기에 생성된

Table 6. Comparison of aspect ratio, its standard deviation and hardness of 680°C, 220V with commercial product of Pechiney.

	This study	commercial product of Pechiney
Aspect ratio	1.56	1.64
Standard deviation	0.4	0.47
Hardness(Hv)	72.1	73.2

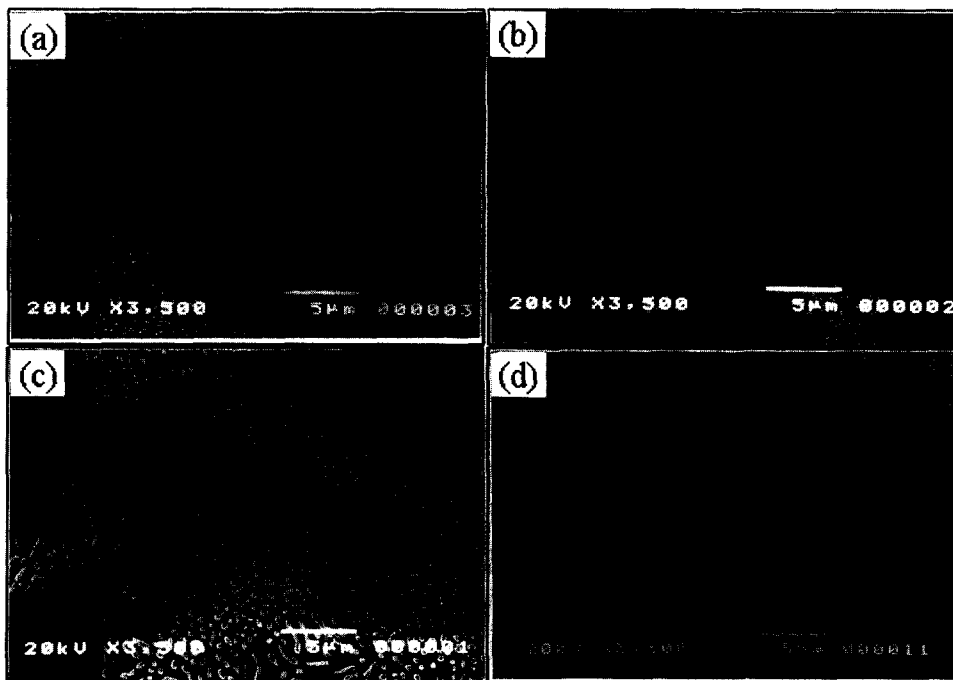


Fig. 8. SEM micrographs of eutectic Si particles of A356 Al alloy in (a) 220V, 680°C (b) 220V, 750°C (c) 220V, 650°C (d) no-stirred, 680°C conditions.

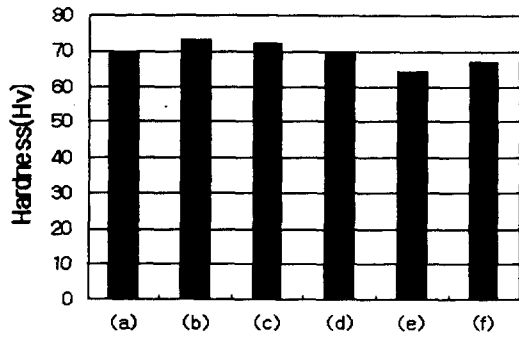


Fig. 9. Hardness of A356 Al alloy in various condition (a) 680°C, no-stirred (b) 750°C, 220V (c) 680°C, 220V (d) 680°C, 180V (e) 680°C, 140V (f) 650°C, 220V

미세한 초정입자가 용탕중에서 공정 Si입자의 성장을 방해하는 역할을 함으로서 공정 Si입자의 성장이 억제되었기 때문이라고 생각된다. 그림 9는 각 조건에 따른 경도값을 측정함으로써 용탕주입온도가 750°C에서 주입전압이 220V 및 680°C 220V의 경우 경도값은 각각 73.2 Hv, 72.1 Hv로서 다른조건에서 측정된 경도값에 비해 높은 값을 나타내었다. 이러한 결과는 주입전압 및 주입온도가 증가함에 따라 초정입자의 크기가 감소되고, 미세한 초정입자가 용탕중의 공정 Si입자의 성장을 방해함으로서 공정 Si입자를 미세화 시킬 뿐 아니라 형상을 미세한 섬유상으로 변화시키기 때문이라고 판단된다. 그림 10은 680°C에서 무교반 및 220V에서 전자교반된 A356합금의 광학현미경 조직 및 SEM 조직사진으로서, 그림에서 보는 바와 같이 무교반의 경우는 수지상조직을 가지는 반면에 전자교반으로 제조된 A356합금의 경우는 초정입자가 구상화되었다는

것을 확실히 구분할 수 있으며, 공정 Si입자 크기 역시 전자교반된 경우(d)가 무교반(b)의 경우보다 크게 미세화되었음을 알 수 있다. Table 6은 기존의 시판 소재인 프랑스 Pechiney 사의 전자교반된 A356 Al합금과 본 연구합금을 비교한 것으로서 구상화 정도 및 그 편차는 본 실험의 적정조건에서 제조된 시편이 우수하였으며, 경도값은 비슷한 결과를 나타내었다.

본 연구에 사용된 전자교반기는 3상 2극의 형태로서 최대 출력이 30kw이고 분당 최대회전수가 3600회로 본 연구를 위해서 자체 제작되었으며 이와같은 전자교반장치에 의해서 매우 낮은 aspect ratio 및 표준편차를 갖는 반응고 A356 Al합금을 제조할 수 있었다.

4. 결 론

A356 Al합금을 전자교반을 이용한 연속주조 방법에 의하여 제조 할 경우, 초정입자의 크기, aspect ratio, 표준편차, 공정 Si입자의 크기에 미치는 용탕주입온도, 주입전압 등의 공정변수의 영향에 대하여 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 같은 용탕주입온도에서 주입전압이 증가할수록, 즉 교반력이 증가할수록 초정입자의 aspect ratio, 표준편차 및 초정입자의 크기가 감소되었다.
- 2) 구상화 조직을 위한 최적 제조조건은 용탕주입온도 680°C에서 주입전압 220V이었으며, 이 조건으로 제조하였을 때 초정입자의 크기는 54µm이었고, aspect ratio는 1.56, 표준편차는 0.4이었으며, 공정 Si입자의 크기는 0.5 µm이었다.
- 3) 냉각곡선 분석결과 액상선 부근에서 응고시간이 길수

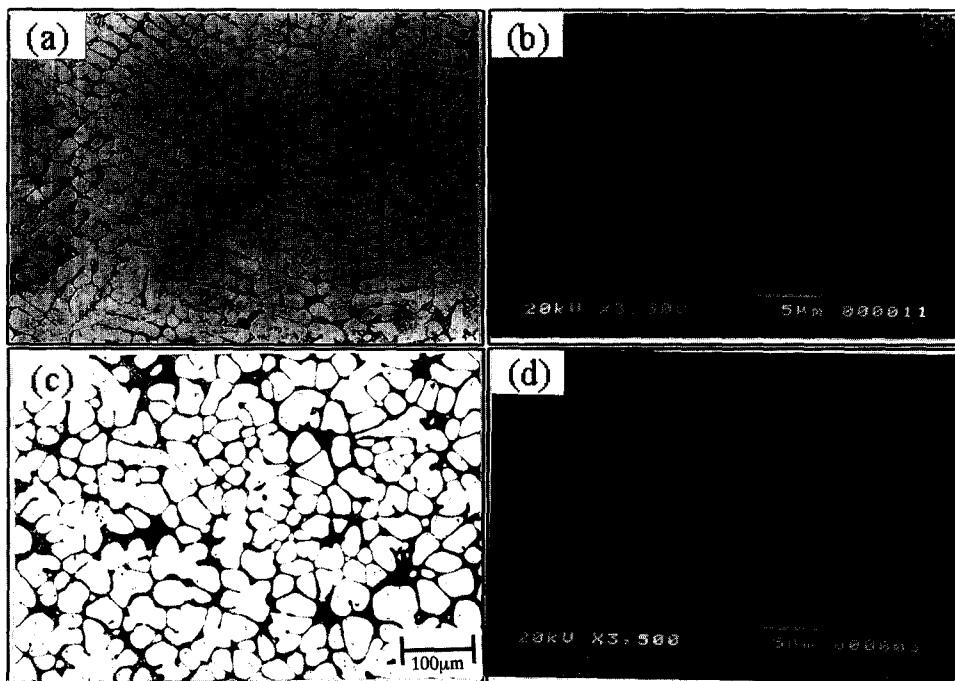


Fig. 10. Microstructures of A356 Al alloy (a) no-stirred, 680°C (Optical) (b) no-stirred, 680°C (SEM) (c) 220V, 680°C (Optical) (d) 220V, 680°C (SEM)

록 구상화 조직을 얻기 위한 교반효과 가 향상되었다.

4) 주입전압 및 주입온도가 상승할수록 공정 Si입자의 크기가 감소하였으며 경도값은 증가하였다.

5) 본 연구를 위해 제작된 3상 2극 전자교반장치에 의해서 매우 낮은 aspect ratio 및 표준편차를 갖는 반응고 A356 Al합금을 제조할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 1997년 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 대한금속학회, 반응고 성형기술의 연구개발 동향, **10**, 135, (1997).
2. M.P.Kenny, J.A.Courtois, Metal Handbook, Ninth Ed., **15**, 327, (1994).
3. P.A.Joly and R.Mehrabian, J. of Met. Sci., **11**, 1393, (1976).
4. M.C.Flemings, R.G.RieK and K.P.Young, Mat. Sci. Eng., **25**, 103, (1976).
5. D.B.Spencer, R.Mehrabian, and M.C.Flemings, Met. Trans. **A3**, 1925, (1972).
6. K.P.Young, Nature and properties of Semi-solid Materials, **245**, (1992).
7. T.Z.Kattamis, and T.J.Piccone, Nature and Properties of Semisolid Materials, Publication of TMS, **69**, (1992).
8. P.O.Charaeyron and M.C.Flemings, Int. J.Mech. Sci., **27**, 781. (1985).
9. M.C.Flemings, Metall. Trans., **27A**, 957, (1991).
10. S.D.Ewakil, Advanced Technology of Plasticity, **1**, 45, (1984).
11. M.Hirai, K.Takebayashi and Y.Yoshika, ISIJ, **78-10**, 1538, (1992).
12. D.A.Porter, K.E.Easterling, Phase Transformations in Metals and Alloys, 212, (1992).
13. A.Vogel, R.D.Doherty, B.Cantor, Proc. Int. Vonf. on Solidification and Casting of Metals, Sheffield, Metal society, 518, (1979).
14. R.D.Doherty, H.I.Lee, E.A.Feest, J. Mat. Sci, **65**, 181, (1984).