

레오로지 단조를 위한 전자교반용 알루미늄 합금의 결정립 제어

오세웅¹ · 고재홍¹ · 김태원¹ · 강충길[#]

Grain Control of Aluminum Alloys with Electromagnetic Stirring for Rheology Forging

S.W. Oh, J.H. Ko, T.W. Kim, C.G. Kang

Abstract

Microstructures according to experimental conditions (pouring temperature, stirring current and stirring time) and hardness according to aging time were investigated for A356 cast aluminum alloy and 7075 wrought aluminum alloy. In pouring temperature control, grains became larger and non-uniform at high temperature, however dendritic shapes were shown at lower temperature. In stirring current control, dendritic grains were not destroyed enough at lower current, however fine grains were agglomerated at higher current. And, in stirring time control, grains were more globular but grew larger and larger with the stirring time increasing.

Key Words : Electromagnetic stirring, Microstructure, Hardness, Wrought alloy, Rheology forging

1. 서론

70년대 초 Flemings[1] 등에 의해 발달되어온 반용융 기술 (Semi-solid processing) 은 최근 많은 관심을 받고 활발한 연구가 진행 중이다[2-4]. 반용융 성형은 반용융 상태로 제조된 슬러리를 직접 성형하는 레오폴딩과 반용융 상태에서 제조된 빌렛을 재가열하여 성형하는 텍소포밍 두 가지로 분류된다.

현재까지 텍소/레오 성형 공정을 위한 레올로지 소재 제조 방법으로는 임펠러를 이용한 기계식 교반법[5], Haga 등의 용탕을 냉각판에 흘려 용탕의 온도를 제어하는 Simple Rheo-casting Process [6], Adachi 등의 냉각과 가열을 동시에 조절하여 성형에 적합한 용탕 온도를 만드는 New Rheocasting Process[7], 전자기력에 의한 전자교반[8] 방법들이

있다. 이러한 반용융 성형 공정에는 지금까지 주조용 합금에 국한되어 연구되어 왔으나 최근 기계적 성질이 우수한 20, 60, 70 계열의 구조용 합금의 반용융 성형에 관한 연구가 진행되고 있다. 하지만 구조용 합금의 전자교반에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 전자 교반 장치를 이용하여 주조용 A356 과 구조용 7075 알루미늄 합금의 용탕 온도, 교반전류, 교반시간의 교반조건에 따른 미세조직의 변화를 비교 관찰하고, 결정립의 크기를 제어할 수 있는 전자장 응용기술을 제시하고자 한다. 본 결과는 향후 다양한 구조용 소재의 레오로지 단조 및 텍소오 단조공정에 활용할 수 있는 기초성형기술로써 응용하고자 하며 T6 처리를 통한 물성변화와 미세조직 사이의 관계를 규명하여 향후 단조품의 열처리 기술에 응용하고자 한다.

1. 부산대학교 대학원 정밀기계공학과
#. 부산대학교 기계공학부, cgkang@pusan.ac.kr

Table 1 The chemical compositions (wt %) and thermal characteristics of A356 and 7075 Al alloy

	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Mn	Ti	Al	T_L	T_S	$T_L - T_S$
A356	0.01	0.33	0.01	0.13	7.0	0.01	0.01	Bal.	614 °C	554 °C	60 °C
7075	5.53	2.21	1.41	0.26	0.1	0.05	-	Bal.	635 °C	477 °C	158 °C

2. 실험

실험에 사용된 소재의 성분과 고상선과 액상선의 온도를 Table 1에 표시하였다.

Fig. 1은 전자기식 교반 장치 (Electromagnetic stirrer, EMS)의 개략도와 사진이다. 본 연구의 교반장치는 3상 3극으로 되어 있으며 전자 교반시 발생하는 전자기력으로 수평의 원주 방향으로 용탕이 회전하게 된다.

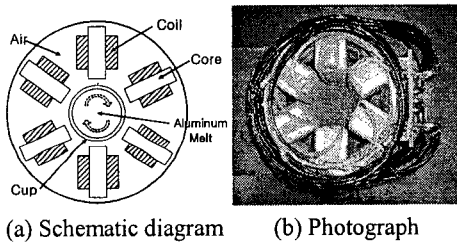


Fig. 1 Equipment for electromagnetic stirring

교반 장치 시스템은 교반기와 함께 용해·보온로, 출력을 조절하는 전류컨트롤러, 교반기 내부 코일의 냉각 장치, 용탕의 탈가스 장치 그리고 용탕을 담기 위한 컵으로 구성된다. 전자 교반을 위한 컵은 전자기력의 영향을 받지 않도록 하기 위하여 비자성체로 제작되었으며, 외경 90 mm, 내경 80 mm와 높이 230 mm이다.

교반기의 출력은 전류 제어 방식이고, 가우스메타 (Gauss-meter)를 이용하여 자속밀도를 측정한다

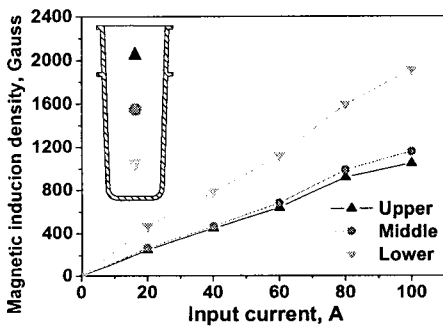


Fig. 2 Measured magnetic flux density by gauss meter

결과를 Fig. 2에 나타내었으며, 교반전류에 따라서 자속밀도가 비례하여 증가 함을 알 수 있었다. 이 결과는 $B=\mu IR$ (μ : 유도전류, R : 유도거리, I : 전류)의 식으로 설명할 수 있다.

Table 2는 본 실험의 조건을 정리한 것이며, 각각의 조건에서 미세조직을 관찰하였다.

Table 2 Experimental conditions for electromagnetic stirring in A356 and 7075

Material	Pouring temperature, T_p (°C)	Stirring current, C (A)	Stirring time t_s (sec)
A356	715 ~ 655	60 ~ 100	30 ~ 90
7075	730 ~ 670	20 ~ 60	40 ~ 90

제조된 빌렛은, A356은 540 °C에서 4시간을 7075는 480 °C에서 17시간 용체화 처리한 후 시효시간을 변화시키면서 경도를 측정하여 시효경화특성을 관찰 하였다

3. 실험 결과

교반 전류의 크기에 따른 빌렛의 형상은 Fig. 3과 같다. 교반 전류가 증가하면서 용탕의 회전력이 커져 75 A에서는 빌렛이 컵모양의 중심부가 움푹패인 형상이 된다. 교반기 내 코일의 형상에 따라 용탕이 수평의 원주 방향으로 회전하면서, 반응용 상태의 용탕에 전단력을 작용해 수지상을 파괴하고 고상입자의 크기가 조절된다.

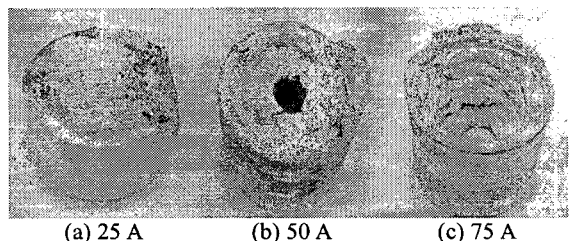


Fig. 3 Shapes of the billets according to stirring current

Fig. 4 는 알루미늄 원소재를 용해시킨 뒤의 as-cast 상태의 조직들이며, (a)는 A356 으로 모든 부분이 수지상들로 이루어져 있고 초정의 용고방향이 불균일하였다. (b)는 7075 이며 결정이 조대하여 입계가 불분명한 것을 볼 수 있다.

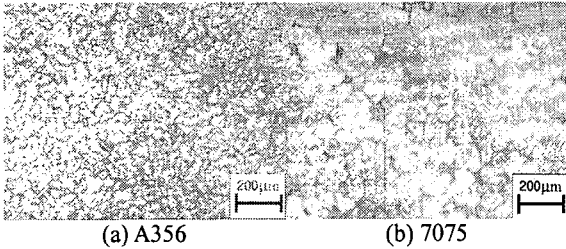


Fig. 4 Microstructures of the as-cast

Fig. 5 는 A356 소재와 7075 소재를 전자 교반시 용탕의 온도에 따른 미세조직을 비교관찰한 것이다. A356 과 7075 의 용탕온도 715 °C 와 730 °C 의 고온의 용탕 온도에서의 교반은 액상온도 613 °C, 635 °C 이상의 온도에서의 교반으로 교반효과가 크지 않았으며, 용탕의 온도가 낮을 수록 교반이 잘되는 것을 볼 수 있다. 이것은 전자교반이 고액공존 영역에서 강력하게 교반하는 것이 미세하고 구상화된 초정 입자를 얻을 수 있음으로 사료된다.

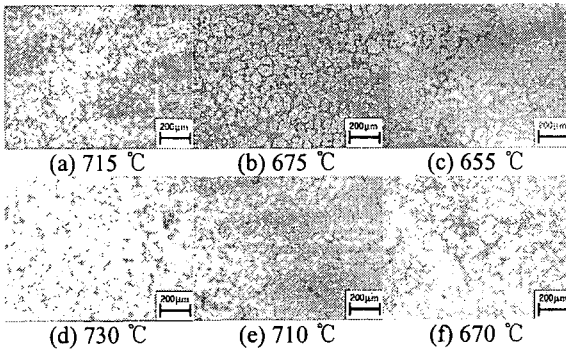


Fig. 5 Microstructures according to each temperature : (a), (b) and (c) are A356 (C: 80 A; t_s : 60 sec), (d), (e) and (f) are 7075 (C: 60 A; t_s : 60 sec)

Fig. 6 은 교반 전류에 따른 조직사진이다. (a)~(c) 는 A356 이며 60 A 에서는 대부분의 수지상 조직이 파괴되었고 80 A 이상의 교반 전류에서는 초정의 조직들이 조대해진 것을 알 수 있다. 이것은 60 A 에서 파괴된 초정의 조직들이 교반력에 의해 회전되는 동안 재결합되어 조대화된 것으로 사료된다.

(d)~(f)는 7075 의 조직이고, 60 A 에서 교반 효과가 잘 나타난다. 20 A 와 40 A 의 실험에서는 Fig. 3 과 같이 용탕이 잘 교반되지 않고 그 힘이 모자라는 것을 제조된 빌렛의 형상에서 알 수 있다. 조직 사진에서 보면 (d)의 20 A 에서는 as-cast 상태에서 보여진 수지상정들이 거의 파괴되지 않았고 (e)의 40 A 에서는 미세한 수지상정들은 파괴되었으나 장미상의 조직들이 많이 남아 있는 것을 볼 수 있다.

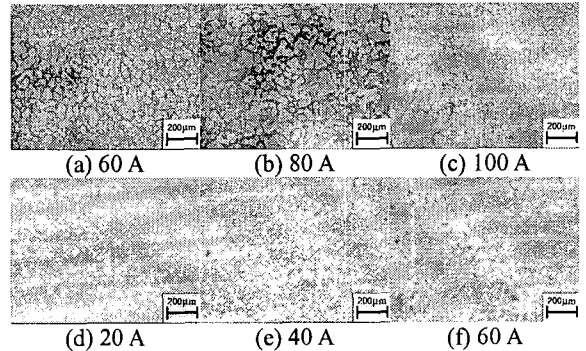


Fig. 6 Microstructures according to stirring current : (a), (b) and (c) are A356 (T_p : 655 °C, t_s : 60 sec), (d), (e) and (f) are 7075 (T_p : 710 °C, t_s : 60 sec)

Fig. 7 은 교반 시간에 따른 조직 사진이다. 교반 도중 컵 속의 용탕은 자연 냉각되기 때문에 시간의 경과에 따라 고상율이 변한다. 따라서 교반 시간의 조절은 전단력의 유지 시간과 더불어 고상율을 조절하는 역할도 한다.

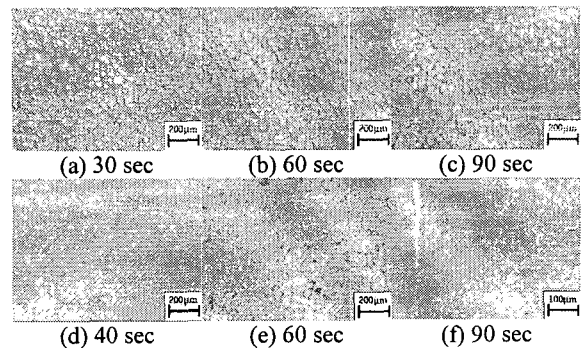


Fig. 7 Microstructures according to each stirring time (a) (b) and (c) are A356 (T_p : 655 °C, C: 60 A), (d) (e) and (f) are 7075 (T_p : 710 °C, C: 60 A)

Fig. 7 (a)와 (d)는 교반 시간이 짧기 때문에 수지상정들이 완전히 파괴되지 못하고 고상에 비하여

액상이 많은 상태이기 때문에 공정이 차지 하는 부분이 많아지게 된다. 7075의 경우에는 넓은 공정 부분에서 미세하게 성장한 수지상을 관찰 할 수 있다. (b)와 (e)는 60 초 동안 교반된 것이고 미세하고 구상화된 초정 입자를 보인다. (c)와 (f)는 (b)와 (e)의 조건보다 오랜 시간을 교반하였을 때이며 A356의 경우에는 짧은 시간일 때 보다 더욱 구상화 되지만 입자의 크기가 조대해지는 것을 볼 수 있다. 7075에서는 조직은 조대하지만 A356에 비하여 구상화는 잘 되지 않았다.

전자교반 결과 A356 합금은 용탕온도 655 °C, 교반전류 60 A에서 60 초 동안, 7075 합금은 용탕온도 710 °C, 교반전류 60 A에서 60 초 동안 교반한 조직이 미세하고 구상화된 초정입자를 얻을 수 있었으며 이 조건에서 제조된 빌렛을 시효시간을 달리하여 경도를 측정하였다. 경도는 초정부분과 공정부분을 구분하여 측정하였고, 그 결과를 Fig. 8에 도시하였다.

Fig. 8 (a)는 A356의 시효경화 곡선으로 12시간에서 초정과 공정 부분 모두 가장 높은 경도를 보인다. (b)는 7075 소재이고 24시간에서 높은 경도를 보이고 초정과 공정부분의 경도 차이가 A356보다 확연히 나타난다. 7075는 구조용 합금으로 구조용 합금인 A356보다 높은 경도를 가지는 것도 확인할 수 있고, 반응용 성형에 구조용 합금의 적용이 필요함을 알 수 있다.

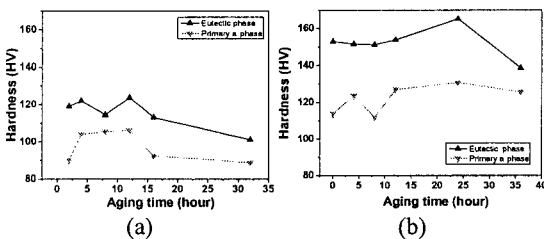


Fig. 8 Hardness according to aging time (a) A356 (T_p : 655 °C, C: 60 A, t_s : 60 sec), (b) 7075 (T_p : 710 °C, C: 60 A, t_s : 60 sec)

4. 결론

구조용 합금인 A356 과 구조용 합금인 7075 를 사용한 전자기 교반실험을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 초기 용탕의 온도가 미세조직에 미치는 영향을 조사한 결과 A356의 경우에는 초기 용탕의

온도가 675 °C, 7075의 경우에는 730 °C 일때 조대한 조직이 생성된다. A356은 655 °C에서, 7075는 710 °C에서 미세하고 구상화된 조직을 얻을 수 있었다.

(2) 교반 전류 60 A에서 A356과 7075 모두 수지상정이 파괴되어 미세한 조직들이 만들어졌다. 80 A 이상에서는 파괴된 조직들이 서로 충돌하여 다시 응집되었다.

(3) 교반 시간은 두 재료 모두 60 초 일때 가장 미세하고 구상화된 조직들을 관찰 할 수 있었다. 교반 시간이 길어지면 조직들은 더욱 구상화 되었지만 초정입자의 응집으로 인하여 조직이 조대한 조직을 나타내었다.

(4) 시효 시간은 A356은 12시간, 7075는 24시간에서 가장 높은 경도를 보이고 그 이후에는 파시효로 인하여 경도가 낮았다.

후 기

본 연구는 과학기술부 지정 Thixo/Rheo 성형 국가지정연구소 (NRL) 사업으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] V. Laxmanan, M. C. Flemings, 1980, Metallurgical Transactions A, Vol. 11A, pp. 1927~1937.
- [2] S.Y. Lee, S.I. Oh, 2002, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 130~131, pp. 587~593.
- [3] A. Maciel Camacho, H. V. Atkinson, P. Kapranos, B. B. Argent, 2003, Acta Materialia, Vol. 51, pp. 2319~2330.
- [4] J. Dong, J.Z. Cui, Q.C. Le, G.M. Lu, 2003, Material Science & Engineering A, Vol. 345, pp. 234~242.
- [5] K. Sukumaran, B. C. Pai and M. Chakraborty, 2004, Material Science & Engineering A, Vol. 369, pp. 275~283.
- [6] T. Haga, P. Kapranos, 2002, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 130~131, pp. 594~598.
- [7] M. Adachi, S. Sato, H. sasaki, Y. Harasa, T. Maeda, N. Ishibash, 2002, Proceedings of the Advanced Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp. 629~634.
- [8] 임성철, 윤의박, 1992, 한국주조공학회, 제 16권, 제 6호, pp. 565~575.