

논문

6극 전자석 전자교반 레오캐스팅에 따른 A356의 조직적 / 기계적 영향분석

김백규*[†] · 노중석* · 방희재* · 허민** · 박진하* · 진충환**

*한주금속(주), **부산대학교

Microstructure and Mechanical Property of A356 for Rheocasting Using 6-Pole Electromagnetic Stirring Casting Process

Baek-Gyu Kim*[†], Jung-Suk Roh*, Hee-Jae Bang*, Min Heo**, Jin-Ha Park* and Chung-Hwan Jeon**

*R&D Center, Hanjoo Metal Co., Ltd., Ulsan 45009, Republic of Korea

**Mechanical Engineering, Pusan National Univ., Pusan 46241, Republic of Korea

Abstract

Rheo-diecasting with stirring has been used in many material industries. As the 4th Industrial Revolution approaches the world, eco-friendly high-strength and light-weight materials become more important. Casting methods have been studied and used for aluminum-alloy automobile parts. This study carried out the effect analysis of the micro-structure and mechanical properties, such as yield/ultimate tensile strength, elongation, and hardness, of A356 using the 6-pole EMS (electro-magnetic stirring) casting process with a high electromagnetic force. As a result, the hardness and elongation of the A356 after T6 heat-treatment show a significant improvement, respectively, by 20% and 50%.

Key words: Semi-solid metal casting, Rheocasting, EMS, A356, Die-casting

1. 서 론

자동차가 발달하면서 다양한 부품이 설치되어 차량의 무게는 증가하는 추세이나, 환경 규제에 따른 고강도 경량화 소재가 요구되며, 그에 따라 SSM공법(Semi Solid Metal Casting)이 실용되고 있다[1,2]. 이 공법은 고상과 액상이 공존하는 구역(레올로지 상태)에서 액체보다 높은 점성을 가지고 있어, 층류로 금형에 충전되어 균일한 조직과 우수한 물성치를 가진 제품을 생산할 수 있다[3,4,6].

SSM공법은 레오캐스팅(Rheocasting)과 틱소캐스팅(Thixocasting)으로 나뉘어진다. 레오캐스팅은 액체 상태인 소재를 응고를 시켜 반응고 상태에서 슬러리를 사출하는 주조 방법

이고, 틱소캐스팅은 고체상태인 소재를 용융시켜 반응용 상태에서 하는 주조이다. 레오캐스팅에서 대표적인 것으로는 회전자를 이용한 기계식 교반, 반응용 기계적 열처리인 SIMA법, 전자기력을 이용한 전자교반등이 있다.

기계식 교반법의 구상화 입자 크기는 100~400 μm 이며 제품 내부에 회전 로터 의해서 공기가 주입되어 생긴 기공이 많아 기계적 성질이 좋지 않다. SIMA법은 고체 상태의 합금을 소성가공을 한 뒤에 고액 공존 구역으로 가열하여 조직 입자를 구상화한다. 그러나 공정이 많고 단조는 성형 후 응고할 시간이 필요하기 때문에 대량생산에 좋지 않다. 전자교반 주조 할 경우, Al- α 초정 크기는 50~70 μm 이고, 구상화 정도는 최소 0.7 이상이며 일반 주조재 제품보다 물성치가

-김백규, 방희재: 기사, 노중석: 차장, 박진하: 연구소장, 허민: 석사과정, 진충환: 교수

Received: Jan. 17, 2020 ; Revised: Mar. 10, 2020 ; Accepted: Apr. 3, 2020

[†]Corresponding author: Baek-Gyu Kim (Hanjoo Metal Co., Ltd.)

Tel: +82-52-231-1909, Fax: +82-52-231-1928

E-mail: gimbaeggyu@gmail.com

Journal of Korea Foundry Society

2020. Vol. 40 No. 3, pp. 61-65

<http://dx.doi.org/10.7777/jkfs.2020.40.3.61>

pISSN 1598-706X / eISSN 2288-8381

© Korea Foundry Society, All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

우수하다[5-7].

전자교반법을 통하여 균일하고 미세화된 구상화 조직을 얻을 수 있으며, 다른 공법에 비해 결함에 대한 제어도 쉽고 공정 수도 적다. 그러나 아직 국내에서는 높은 전자기력을 이용한 전자교반 레오캐스팅에 대한 연구가 미흡하다. 본 연구에서는 대표적인 주조용 알루미늄 합금인 A356를 대상으로 전자교반 레오캐스팅시 전자교반 유무에 따른 주조재 미세조직 변화, 열처리 후 물성을 비교 평가하고자 한다.

2. 실험방법

본 실험에서 사용하는 재료는 알루미늄 합금 중 4000계인 A356이다. 아래의 표에서 확인 할 수 있듯이 Al-Si 아공정 합금이다. A356은 응고 수축성이 낮고 유동성과 내열 균열 성이 좋아 치수 정밀도가 높다. 또한 내열성과 내마모성이 우수해 주로 자동차 엔진 부품이나 휠에 쓰인다.

실험에 사용되는 장치 및 프로그램은 Fig. 1과 같다. Fig. 1(a)는 (주)고려다이캐스팅에서 주문 제작한 기기이며, vertical cold chamber형이다. 금형 형체력은 20ton이고, 플런저 팁의 사출력은 실린더 교체(Ø75→Ø125)를 통해 18ton으로 수정했다. 스트로크 길이 435 m이며, 최대 속도는 150 mm/sec이다. Fig. 1(b)는 6극 전자석 교반기로 기계 슬

Table 1. The composition of A356.

Al	Cu	Si	Mg	Zn	Fe
Bal.	0.05	6.5	0.3	0.03	0.15
Cr	Mn	Ni	Ti	Pb	Sn
0.03	0.1	0.03	0.2	0.03	0.03

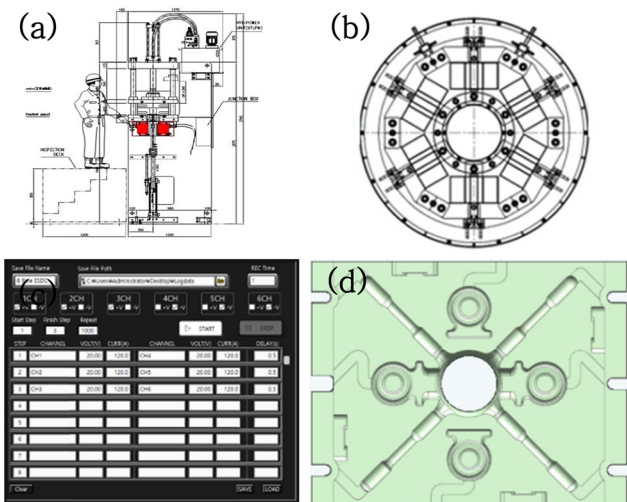


Fig. 1. Experimental equipments and software (a: Die-casting machine b: 6-pole electro-magnetic Stirrer c: Electro magnet control program d: Mold for Die-casting).

리브를 주조기에 장착하여 기계슬리브를 둘러싸고 있으며, 각각 코일로 전자석을 수냉한다. 전자석 구조는 내부 일체형이며 전체크기는 Ø600×260이다. 가우스메타로 측정 결과 600~700Gauss 전자기력을 확인 할 수 있다. Fig. 1(c)는 전자석 컨트롤러로 PC 기반 프로그램이며 DC형식으로 최대 전류 120A와 최대 전압 20V를 6개의 채널로 6개의 전자석을 공급 및 제어한다. 단독인가와 동시인가가 되며 바이폴라 기능이 있다. Fig. 1(d)는 시편 금형이며 여러 수정을 거쳤다. 현 모델은 휠 cavity가 4개에서 2개로 줄었으며, 인장시편은 4cavity이다. 시편 끝 부분에 spot 냉각로, overflow 및 vent를 설치되어 있다.

실험순서는 A356 용탕을 전기로에서 Ar분위기하에 GBF 처리 및 flux를 첨가하여 탈가스화를 한다. 이 때 용탕의 DI 1.5%를 기준으로 둔다. 이후 Fig. 2에 따른 순서로 실험을 진행한다.

용탕 주입시 용탕온도는 660도, 슬리브 온도는 500도, 금형온도는 290~300도이다. 일부 시편은 교반전압, 전류과 전

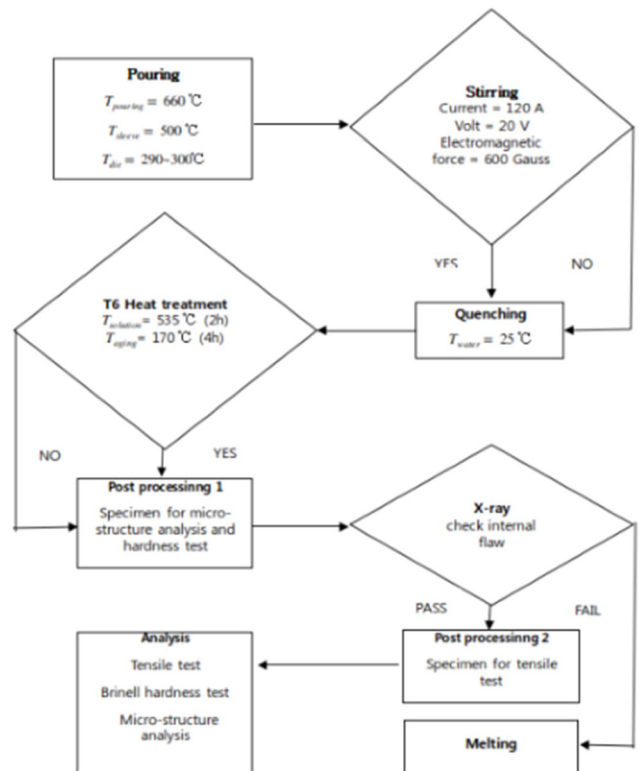


Fig. 2. Flow chart of experiment with die-casting condition.

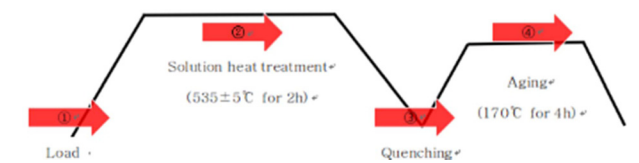


Fig. 3. Schematic of the heat treatment (T6).

자기력은 20V, 120A과 600Gauss으로 슬리브 내에 주입한 용탕을 전자교반 하며 나머지 시편은 무교반을 한다.

Fig. 4 형상인 제품을 취출하여 퀀칭 후, T6 열처리 공정을 진행한다. 열처리 과정은 Fig. 3과 같이 용체화 처리→소입처리→시효처리 순으로 진행한다. 용체화 처리시 균열 온도는 545 ± 5 도로 2시간 유지하고 시효 균열 온도는 170도로 4시간 이상 가열한다.

열처리 전/후 제품 모두 후처리 가공으로 Fig. 4(a)부분에서 경도시험과 조직시험을 실행할 시편을 채취한다. X-ray 검사에서 내부 결함이 적은 제품을 분류하여 실격품은 용해로에 용융시킨다. X-ray 통과품은 Fig. 4(b) 부분을 Fig. 5 규격에 맞게 14호 인장시편으로 가공한다.

전자교반과 열처리 유무로 분류된 총 4개의 비교군으로 조직검사, 브리넬 경도시험과 인장시험을 실시한다. 조직 검사시, 현미경을 이용하여 아래의 두 가지 식을 계산하여 Al- α 상의 등가지름과 구상화도를 구해 조직의 미세화와 구상화 정도를 비교분석을 한다.

$$D_{eq} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \tag{1}$$

D_{eq} : 등가 지름(equivalent diameter)

A: 구상 단면적(area of globule)

$$R = \frac{4\pi A}{P^2} \tag{2}$$

R: 구상화도(Roundness)

P: 구상 둘레(perimeter)

A: 구상 단면적(area of globule)

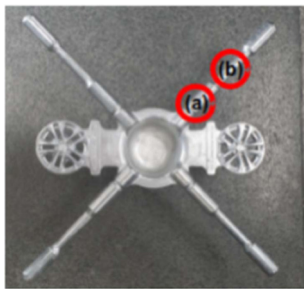


Fig. 4. Specimen cast with 2 wheel cavity.

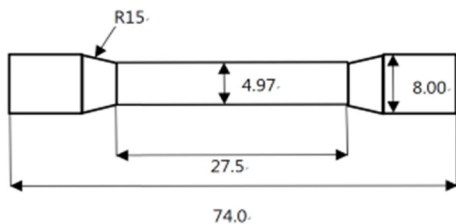


Fig. 5. No. 14 specimen of tensile strength test (unit: mm).

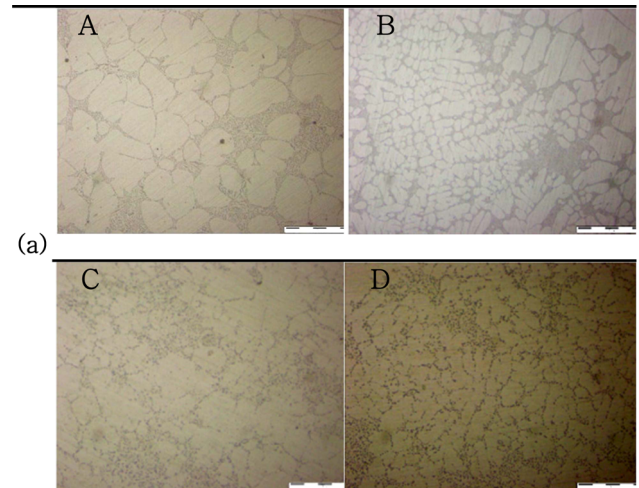
3. 실험결과

3.1 조직 분석

후처리 가공에서 Fig. 3(a)부분에서 채취한 시편들을 폴리싱을 하여 조직 분석을 실시했다. 조직 검사 결과, Fig. 6 (a)같이 나왔으며 A와 C는 열처리 전/후로 무교반과 퀀칭을 한 시편이며, B와 D는 열처리 전/후로 전자교반과 퀀칭을 한 시편이다.

A시편 경우, 조대한 Al- α 상이 조대한 덴드라이트 가지상이 발달한 형태이고, 침상 형태 Si상이 관찰된다. B시편 경우, 전자기력에 의해서 Al- α 상이 A시편 보다 미세화 및 구상화가 되어있으나, 이상적인 완전 구상화된 조직이 아니라 성장 억제와 파괴에 의해 미세화된 구상 조직과 성장 조직이 공존하는 이중 구조가 이다. 즉, 전자교반의 효과는 덴드라이트 조직 파괴, 핵 밀도 및 성장 제어 중에서 조직 파괴는 되었으나 성장 억제가 안된 것으로 사료되며, 이는 교반 시, 슬리브의 온도가 영향을 준 것으로 보인다[6]. Si상은 침상이 아니며 전자기력에 의해서 고르게 분포되어있다.

열처리 공정을 한 C와 D 시편 경우, Al- α 상이 균일한 형태로 있는 것이 확인 가능하다. C시편의 비해 D의 Al- α 상이 미세화와 구상화가 조직을 가지는 것을 확인 할 수 있다. 정량적으로 비교하기 위해 위의 식 (1)과 (2)를 이용하여 AL- α 상의 C와 D시편을 200배율에서 측정된 결과, Fig. 6 (b)와 같이 등가지름은 각각 105 μ m, 50.044 μ m이고 구상화도는 0.407과 0.810이다. 전자기력에 의해 조직이 균일화,



	$D_{eq,C}$	R_C	$D_{eq,D}$	R_D
(b)	105 μ m	0.407	50.044 μ m	0.810

Fig. 6. (a) The comparison of the micro -structure, (b) The equivalent diameter & roundness of specimen C&D (A: without stirring before T6, B: with stirring before T6, C: without stirring after T6, D: with stirring after T6)

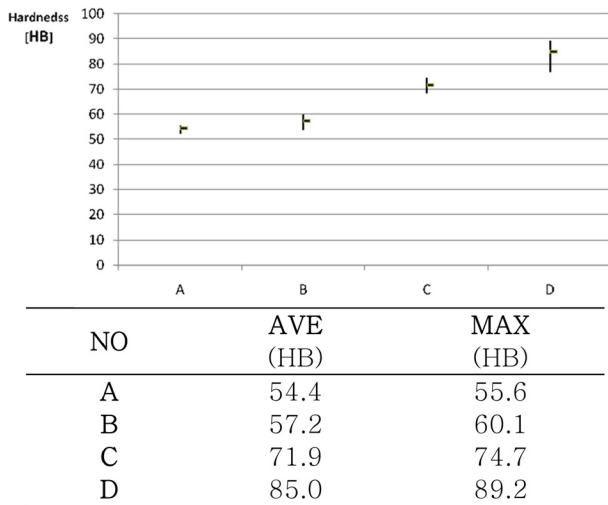


Fig. 7. The result of Brinell hardness test.

미세화와 구상화가 되는 것을 관찰 할 수 있었다.

3.2 브리넬 경도시험

브리넬 경도 시험 결과, 평균 경도가 D-C-B-A 순으로 85.0HB, 71.9HB, 57.2HB, 54.4HB이다. 열처리 후, 전자교반 시편 D의 경도가 무교반 시편 C보다 약 20% 정도 높다. 이는 전자교반에 의해 미세화된 구상의 Al- α 상을 가진 B와 D시편이 전위의 이동에 대한 방해가 커서 소성변형에 대한 저항이 크기 때문에 각각 A와 C시편의 기계적 물성치보다 좋아진 것으로 추정된다. 그리고 열처리에 의해 Mg 함유량이 5% 이하 이기 때문에 제 2상인 Diamond cubic 형태의 Si공정이 석출경화 되어 C와 D시편이 A와 B의 경도보다 높은 것으로 사료된다[8].

3.3 인장시험

14호 시편 인장시험 결과, 항복강도는 C-D-B-A순으로 높았으나, C와 D의 항복강도의 차는 미세하다. 인장강도와 연신율은 D-C-B-A순으로 높았다. 전자교반 열처리 후 제품이 가장 항복/인장강도가 높기는 하나, 기대치보다 낮았다. 이는 Al상의 이중 구조에 의한 영향인 것으로 고려된다.

연신률 경우 전자교반한 시편이 무교반 시편보다 약 50% 정도 더 높다. 이는 전자기력에 의해 Si 공정이 침상 형태가 아닌 미세한 구상 형태가 되었고 균질화 되어 편석이 감소된 영향으로 사료된다.

4. 결 론

6극 전자석 전자교반 레오캐스팅에 따른 A356의 조직과 기계적 성질을 관찰한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) 조직 분석 결과, 열처리 후 무교반 시편의 Al- α 상의

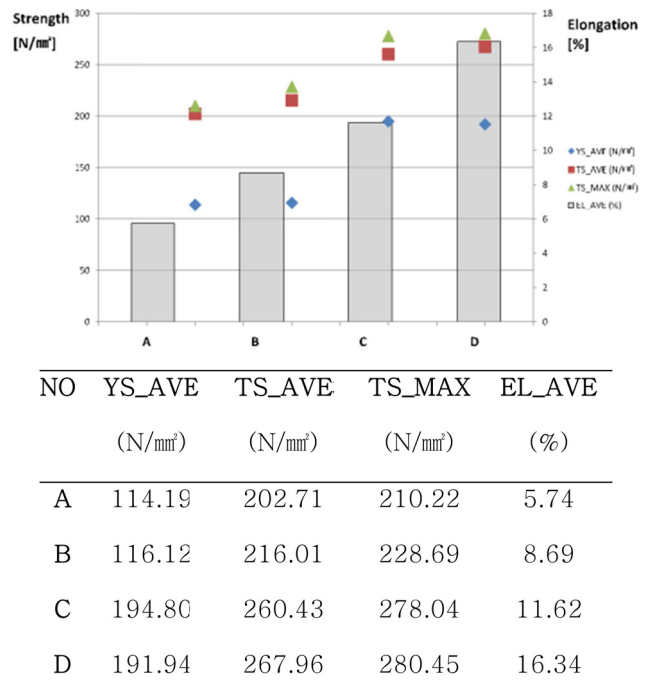


Fig. 8. The result of tensile strength test.

등가 직경은 105 μm 이고 구상화도는 0.407이다. 전자교반 시편의 Al- α 상의 등가 직경은 50.044 μm 이며 구상화도는 0.81이다. 전자기력 600Gauss에 전자교반을 통해 결정립의 미세화가 일어났으나 이상적으로 구상화된 형태가 아닌 이중 구조 조직이다.

2) 열처리 후 시편의 경도시험과 인장시험 결과, 전자교반이 물성치에 영향을 준 것을 확인 할 수 있었다. 경도와 연신률에서 각각 20%와 50% 증가하였다.

3) 전자교반을 한 시편의 인장강도가 기대치보다 낮은 폭으로 증가했다. 이러한 이유는 전자교반 시편의 조직이 성장 억제 및 절단된 미세조직과 성장 조직이 공존하는 이중 구조에 의한 것으로 추정되며, 이는 슬리브의 온도 설정이 영향을 준 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 WC300사업 지원하의 (주)한주금속 기술연구소에서 사업 과제의 지원으로 수행되었습니다.

References

[1] Kim JK, KASE, "Present status and properties of light-weight materials in Automobile", **10** (1988) 29-38.
 [2] Kang CG, Choi JC and Bae WB, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, "Semi-solid forming, casting and forging technology of lightweight materials", **17** (2000) 7-21.

-
- [3] Kim SW, Lee UH and Han SW, J. Korea foundry society, "Fatigue characteristics of Al-Si-Mg cast alloys by semi-solid process", **23** (2003) 94-99.
- [4] Yoon BO, M.Sc. Thesis, Gyeongsang National University, "A study on microstructure and formability in semi-solid metal of hypereutectic Al-Si alloys" (1997) 39-41.
- [5] Jun JI, M.Sc. Thesis, Changwon National University, "Properties of semi-solid formed microstructure and formability by SIMA process in the wrought Al 7075 alloy" (1999) 32-56.
- [6] Cho YR, M.Sc. Thesis, Ulsan National University, "Study on the characteristics of A356 alloy electro-magnetic stirring high-pressure casting process, and gravity/low pressure/squeeze casting process" (2014) 46-59.
- [7] Sung CL and Eui PY, J. Korea foundry society, "Refinement of primary crystals in Al alloy by the electromagnetic stirring", **16** (1996) 430-439.
- [8] Lee YT, Practical Aluminum Heat treatment, S&M media, Seoul (2017) 70-78.