 논문

Al-Mg 계 다이캐스팅 합금의 미세조직 및 기계적 성질에 미치는 Mg 및 Si의 영향

조재익[†] · 김철우

한국생산기술연구원 호남권지역본부

Effects of Mg and Si on Microstructure and Mechanical Properties of Al-Mg Die Casting Alloy

Jae-Ik Cho[†] and Cheol-Woo Kim

Korea Institute of Industrial Technology, Gwangju 500-480, Korea

Abstract

The effects of Mg and Si contents on the microstructure and mechanical properties in Al-Mg alloy (ALDC6) were investigated. The results showed that phase fraction and size of Mg_2Si and $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ phase in the microstructure of Al-Mg alloy were increased as the Mg and Si contents were raised from 2.5 to 3.5 wt%. With Si content of 1.5 wt%, freezing range of the alloy was significantly reduced and solidification became more complex during the final stage of solidification. While there was no significant influence of Mg contents on mechanical properties, Si contents up to 1.5 wt%, strongly affected the mechanical properties. Especially elongation was reduced by about a half with more than 1.0 wt%Si in the alloy. The bending and impact strength were decreased with increased amount of Si in the alloy, as well. The lowered mechanical properties are because of the growth of particle shaped coarse Mg_2Si phase and precipitation of the needle like $\beta-AlFeSi$ in the microstructure at the last region to solidify due to presence of excess amount of Si in the alloy.

Key words : Al-Mg alloy, Die casting, Mechanical property, Microstructure, Thermodynamic simulation, Alloying element effect.

1. 서 론

Al-Mg 계 합금은 절삭성, 성형 가공성, 내식성이 뛰어나고 높은 연성 및 기계적 강도를 가지고 있어 건축용 내외장재 및 자동차 시트 등 차체 프레임에 많이 사용되고 있다. 특히 열처리를 하지 않아도 연성이 감소하지 않으면서 강도를 향상시키기 때문에 적용되는 분야가 점차적으로 확대되고 있다. 이처럼 우수한 특성을 나타내는 원인은 Mg이 Al 기지에 있어서 고용 한도가 높아 과포화 고용강화 효과가 크기 때문이며, Mn이나 Cr, Zr등 Al에 대한 고용도가 매우 작은 합금원소의 첨가로 인한 석출 강화 효과 때문이다[1,2].

그러나 Mg 첨가량이 증가할수록 용해조건이 까다로워지고

용탕의 유동성이 저하되며 고온 취성을 증가시켜 응고 시 제품에 열간 균열을 일으키기 쉬운 단점을 가지고 있다. 이로 인해 현재까지 Al-Mg계 합금은 주로 가공용으로 많이 쓰이고 있으며, 유동성 등 주조성이 요구되는 다이캐스팅 분야에서는 그 사용이 제한되어 있는 실정이다. 높은 응고 잠열로 유동성 향상 및 고온 취성 방지에 효과적인 원소로 알려져 있는 Si를 첨가하여 주조성을 향상시키고자 하였으나, 1 wt% 이상의 Si이 첨가되면 Mg_2Si 의 형성으로 기계적 성질이 뚜렷하게 저하된다는 문제가 보고되고 있다. 이에 Al-Mg계 합금에서 Si이 기계적 성질에 미치는 영향을 파악하여 주조성 확보를 통한 안정적인 다이캐스팅 부품 적용을 위한 노력이 필요하다.

본 연구에서는 다이캐스팅용 ALDC6 합금의 조성 내·외에

Received: September 7, 2012 ; Accepted: October 16, 2012

[†]Corresponding author: Jae-Ik Cho (KITECH)

Tel: +82-62-600-6220, Fax: +82-62-600-6149

E-mail: uwjaeik@kitech.re.kr

Journal of Korea Foundry Society

2012. Vol. 32 No. 5, pp. 219~224

<http://dx.doi.org/10.7777/jkfs.2012.32.5.219>

ISSN 1598-706X

© The 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.

서의 Mg 및 Si이 미치는 영향을 파악하기 위하여 기계적 성질의 변화를 분석 하였으며, 관찰된 미세조직 결과와 상분석 예측결과를 비교하였다.

2. 실험 방법

Al-Mg계 다이캐스팅 합금인 ALDC6 합금의 Mg 성분 범위 (2.5~4.0 wt%)내의 세 가지 조성인 2.5, 3.0 및 3.5 wt%Mg을 함유하는 합금에 Si 함량을 0.5, 1.0 및 1.5 wt% 첨가한 조성으로 합금을 제조하였다. ALDC6 합금의 Si 최대 함량은 1.0 wt%이다. 각 합금의 제조에는 Al 순 금속(99.7%) Ingot와 Al-50%Mg 및 Al-25%Si 모합금이 사용되었으며, Fe와 Mn의 첨가는 각 원소를 75%를 함유한 ALTAB을 이용하였다. 탈가스 처리한 용탕을 720°C에서 20분간 유지한 후, 100°C로 예열된 금형에 주조하였다. 본 연구에 사용된 합금의 조성과 실제 분광 분석을 통한 화학성분 분석결과는 Table 2에 나타내었다.

기계적 성질의 평가를 위한 인장시험용 시편은 ASTM E8M을 기초로 하여 평행부 거리 32 mm, 표점거리 20 mm인 판상

Table 1. Chemical composition of ALDC6 alloy (wt.%).

Mg	Si	Fe	Mn	Cu	Zn	Al
2.5~4.0	~1.0	~0.6	0.4~0.6	~0.1	~0.4	balance

Table 2. Chemical compositions of the alloys studied (wt.%).

Series	Alloy	Mg	Fe	Mn	Si	Al
1	2.5Mg-0.5Si	2.46	0.76	0.65	0.35	balance
	2.5Mg-1.0Si	2.50	0.74	0.63	0.92	balance
	2.5Mg-1.5Si	2.50	0.72	0.59	1.59	balance
2	3.0Mg-0.5Si	2.99	0.83	0.63	0.33	balance
	3.0Mg-1.0Si	2.95	0.84	0.60	0.82	balance
	3.0Mg-1.5Si	2.89	0.82	0.58	1.43	balance
3	3.5Mg-0.5Si	3.61	0.76	0.60	0.33	balance
	3.5Mg-1.0Si	3.42	0.75	0.58	0.80	balance
	3.5Mg-1.5Si	3.35	0.74	0.57	1.43	balance

형태로 제작하였으며, 인장시험기(AG-IS, SHIMADZU)를 이용하여 2 mm/min의 변형속도 조건에서 수행하였다. 충격시험은 샤르피 충격시험기(Ceast 9050 Pendulum Impact Systems, INSTRON)를 사용하여 실험하였다. ASTM E23의 type A 규격인 10 × 10 × 55(mm), 공차 ± 0.02 mm로 가공하였으며 노치(notch)형상은 V형으로 하고 노치 깊이는 2 mm로 제작하였다. 굽힘시험은 KS B 0803에 기초하여 80 × 20 × 2t(mm)의 시편을 제작하였으며, 인장시험기를 이용하여 3 mm/min의 변형속도 조건에서 3점 굽힘 시험 방식으로 수행하였다.

시편의 연마 후 미세조직은 광학현미경으로 관찰하였으며, 석출상은 SEM-EDS를 이용하여 분석하였다. 또한 미세조직에서 관찰된 석출상은 열역학 해석 프로그램인 Pandat에서 예측한 석출상과 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 응고 시뮬레이션

열역학 해석 프로그램인 Pandat을 이용하여 생성상들의 예측 및 평형상들의 석출양에 대한 분석을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 1과 Table 3에 나타내었다. Fig. 1에서는 Al-2.5%Mg 합금에 Si 함량을 0.5, 1.0 및 1.5 wt%로 변화시키며 진행한 시뮬레이션 결과 중 각 석출상이 생성되는 온도와 고상을 결과를 보여준다. 용탕의 온도가 고상선 아래로 내려가게 되면 α-Al이 수지상 형태로 석출하여 성장하게 되고 뒤이어 Fe를 함유한 상들이 석출한다. 낮은 Si 함량을 가진 합금의 경우 Al₁₃Fe₄ 상과 Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂ 상 두 가지가 석출한 후 Mg₂Si 및 β-AlMg 상 등 Mg 상이 석출하는 것으로 예측되었다. 반면 1.5 wt% Si를 함유한 합금은 Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂ 상의 형성 후 또 다른 Fe 상인 α-AlFeSi, β-AlFeSi 및 Al₈(Fe,Mg)₃Si₆ 상이 약 95%의 응고가 완성된 후 석출하는 것을 알 수 있다. Table 3에서 보여지듯이 Al-Mg 합금에서 Si 함량을 0.5 wt%에서 1.5 wt%로 높일수록 Mg₂Si 상이 크게 증가하였다. Mg₂Si 상이 생성되는 고상을 및 생성온도는 0.5 wt%Si의 경우 85%~90%(약 585°C), 1.0 wt%Si 및 1.5 wt%Si는 각각 80%~86%(약 589°C), 75%~82%(약 590°C)로 Si 함량이 증가할수록 낮

Fig. 1. Simulation results for Al-2.5%Mg alloys showing fraction solid vs. temperature.

Table 3. Simulation results for Al-Mg alloys showing phase fraction of each phase after solidification (%).

Alloy		Al_3Fe_4	$\text{Al}_{15}(\text{Fe,Mn})_3\text{Si}_2$	Mg_2Si	$\alpha\text{-AlFeSi}$	$\beta\text{-AlFeSi}$	$\beta\text{-AlMg}$	$\text{Al}_8(\text{Fe,Mg})_3\text{Si}_6$	Si
2.5Mg	0.5Si	1.80	0.13	0.78	-	-	0.62	-	-
	1.0Si	0.12	2.65	1.48	-	-	0.10	-	-
	1.5Si	-	2.71	1.99	-	0.03	-	0.12	0.24
3.0Mg	0.5Si	1.98	0.10	0.76	-	-	1.13	-	-
	1.0Si	0.49	2.42	1.61	-	-	0.35	-	-
	1.5Si	-	3.09	2.37	0.001	0.07	-	0.06	0.12
3.5Mg	0.5Si	1.82	0.08	0.78	-	-	1.77	-	-
	1.0Si	1.76	0.24	1.87	-	-	0.43	-	-
	1.5Si	-	2.84	2.78	0.02	0.02	-	0.02	0.04

은 고상율에서 생성됨을 알 수 있으며, 결과적으로 그 석출량 또한 증가하는 것으로 나타났다. 반면 Al_3Fe_4 상은 Si 함량 증가에 따라 감소하는 경향을 보이는데, 이는 보다 안정적인 상인 $\text{Al}_{15}(\text{Fe,Mn})_3\text{Si}_2$ 상으로 석출하기 때문으로 판단된다.

Al-Mg 합금에서 Si의 조성 변화에 따른 응고 모드를 살펴 보면, Si 함량이 고상선 온도 및 이에 따른 응고구간에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. Si 함량이 0.5 wt%와 1.0 wt%에서는 고상선 온도가 450°C로 응고 구간이 185~190°C로 예측된 반면 1.5 wt%의 경우 고상선 온도 555°C로 상대적으로 짧은(80°C) 응고 구간으로 100°C 정도의 차이를 보이고 있다. 이는 높은 Si 함량에 따라 마지막 응고 구간에서의 복잡한 응고 양상과 공정 Si 상의 석출 때문으로 사료되어진다.

3.2 미세조직

광학 현미경을 통하여 Al-Mg 합금의 미세조직을 관찰한 결과 Fig. 2에서 알 수 있듯이 Mg 및 Si 함량 변화에 따라 조직적 차이가 나타남을 알 수 있었다. $\alpha\text{-Al}$ 기지에 $\text{Al}_{15}(\text{Fe,Mn})_3\text{Si}_2$, Mg_2Si 상들이 주로 관찰되었는데 전반적인 경향으로는 Pandat 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 Mg 및 Si 함량이 높아질수록 $\text{Al}_{15}(\text{Fe,Mn})_3\text{Si}_2$, Mg_2Si 상들이 많이 생성됨을 알 수 있었으며, 둘 다 Chinese script 형태로 존재하고 있는 것을 확인하였다. Mg_2Si 상의 경우는 Si 함량이 증가할수록 점점 조대해지는 경향을 나타냈으며, Chinese script 형태뿐만 아니라 조대한 particle 형태로 존재함을 알 수 있다. Fig. 3과 Fig. 4는 SEM

분석 결과를 보여 주고 있는데 Chinese script 형태 중 흰색 부분은 $\text{Al}_{15}(\text{Fe,Mn})_3\text{Si}_2$ 상이며 검은색 부분은 Mg_2Si 상, particle 형태인 검은색 부분은 조대해진 Mg_2Si 상으로 확인되었다. 각 상의 조성은 Fig. 3 및 4에서와 같이 SEM-EDS 분석을 통해 검증하였다. Si 함량이 1.5 wt%일 때에 Fig. 4와 같이 $\beta\text{-AlFeSi}$ 상이 침상의 형태로 존재하고 있는 것을 확인할 수 있었는데 1.0 wt%Si 및 0.5 wt%Si에서는 $\beta\text{-AlFeSi}$ 상들이 관찰되지 않았다. 이는 Table 3에서 예측된 열역학 시뮬레이션 결과와 일치하였다.

3.3 기계적 성질

Al-Mg 합금의 기계적 성질에 미치는 Mg, Si의 영향을 파악하기 위하여 인장 및 굽힘, 충격시험을 수행하였다. 먼저 인장 시험 결과를 Fig. 5에 나타내었는데, Mg 및 Si 함량 변화에 따른 인장특성을 분석한 결과이다. Fig. 5에서 보여지듯이 각 Al-Mg 합금에서 Si 함량이 0.5 wt%일 때 가장 높은 최대 인장강도를 나타냈으며, 1.0 wt%, 1.5 wt%로 Si 함량이 증가하였을 때 점차 감소하는 경향을 보였다. 이에 비해 Mg 함량에 따른 인장강도의 차이는 그다지 크지 않았으며, 3.0 wt%Mg일 때 인장강도 및 연신율이 가장 우수하게 나타났다. 연신율의 변화 Fig. 5(b)를 보듯이 Si의 영향을 크게 받고 있는 것을 알 수 있으며, Si 함량이 0.5 wt%에서 1.0 wt%로 증가할 때 연신율이 1/2 이상 감소함을 알 수 있다. 하지만, 1.5 wt%로 추가적인 Si 함량의 증가에 의한 연신율의 변화는 상대적으로

Fig. 2. Typical microstructures of Al-Mg alloys.

Fig. 3. SEM micrographs of Al-3.5%Mg-1.5%Si alloy showing Mg_2Si and $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ intermetallic phases ; (a) SEM-SEI, (b) and (c) SEM-EDS analysis.

Fig. 4. SEM micrographs and SEM-EDS analysis of Al-3.5%Mg-1.5%Si alloy showing needle-shaped $\beta-AlFeSi$.

Fig. 5. Tensile properties of Al-Mg alloys with different amount of Mg and Si ; (a) Tensile Strength, (b) Elongation.

거의 없었다. 이를 통해 Al-Mg 합금에서 Mg에 비해 Si이 인장특성에 미치는 영향이 더 큰 것으로 보이며, 특히 연신율에

있어서 Si 영향이 더 크게 작용하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 Fig. 6의 굽힘 시험에서도 동일하게 나타났다. 3.0 wt%Mg

Fig. 6. Bending test results of Al-Mg alloys showing maximum deflection.

의 굽힘 특성이 가장 뛰어났지만, Mg 함량에 따른 최대 굽힘 변형량의 차이는 그다지 크지 않았다. Si 함량이 0.5 wt%에서 1.0 wt%로 증가할 때 최대 굽힘 변형량 차이가 가장 컸으며, 이 또한 Mg에 비해 Si이 굽힘 성질에 더 큰 영향을 미치는 것으로 사료된다.

Fig. 7(a)는 Mg 함량을 3.0 wt%로 고정시킨 후 Si 함량을 0.5 wt%, 1.0 wt% 그리고 1.5 wt%로 변화시키면서 샤르피 충격 시험을 실시한 결과를 보여주고 있으며, 다이캐스팅 합금 중에서 가장 널리 사용되고 있는 ALDC12 합금(9.6~12 wt%Si 함유)과 비교 분석하였다. ALDC12는 높은 Si 함량으로 용탕의 유동성이 우수하지만, 인성이 좋지 않은 취성재료에 속한 합금으로 분류된다. 시편이 충격을 받아 균열이 시작될 때부터 균열이 진행되어 재료가 파단 될 때까지의 경향을 나타낸 Force-Time Impact curve에서 알 수 있듯이 Si 함량이 0.5 wt%일 때 합금의 인성이 가장 우수하게 나타났으며, 충격 강도 6.0 J/cm^2 로 1.4 J/cm^2 인 ALDC12에 비해서도 약 4.5배 높게 나타났다. Si 함량이 1.0 wt%일 경우 3.1 J/cm^2 , 1.5 wt%에서 2.3 J/cm^2 로 충격 강도는 급격히 하락하였으며, ALDC12

에 비해서 $1\sim 2 \text{ J/cm}^2$ 밖에 차이가 나지 않았다. 이는 Si 함량이 증가하면서 조대해진 particle 형태의 Mg_2Si 상들이 결정립계에 형성되어 결정립계 부근에서 응력집중이 일어나고 균열을 발생시키는 요인으로 작용하기 때문이다. 또한 Mg_2Si 상에 비하여 기계적 성질 저하에 미치는 영향이 상대적으로 작기는 하지만, 성질 저하의 원인으로 알려져 있는 Chinese script 형태의 $\text{Al}_{15}(\text{Fe,Mn})_3\text{Si}_2$ 상이 Mg과 Si 함량이 높아질수록 많이 생성되어 있기 때문에 판단된다[3]. 그리고 Pandat 시뮬레이션 결과와 SEM분석에 의해 확인된 침상 형태의 $\beta\text{-AlFeSi}$ 상이 석출되면서 인성 및 연성을 심각하게 저하시키기 때문으로 사료된다[4-6]. Al 기지에 Mg은 고용한도가 높아 고용강화 효과가 크기 때문에 강도가 상승하지만, 3.0 wt% Mg 이상이 함유될 경우 결정립계에 $\beta\text{-phase}$ 인 Mg_2Al_3 상이 석출되어 기계적 성질을 오히려 감소시킨다는 보고가 있지만 실제 시편에서는 관찰되지 않았다[7,8].

4. 결 론

Al-Mg계 다이캐스팅 합금인 ALDC6의 미세조직 및 기계적 성질에 미치는 합금원소, Mg 및 Si의 영향을 조사하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) Al-Mg 합금에서 Mg 및 Si의 함량 증가에 따라 Mg_2Si 및 $\text{Al}_{15}(\text{Fe,Mn})_3\text{Si}_2$ 상의 상분율이 미세조직 내에서 크게 증가하는 경향을 보였으며, Al-2.5%Mg 합금에서 Si 함량이 1.5 wt% 일 때 응고구간이 크게 줄어들고 마지막 응고 영역에서 복잡한 응고 양상을 보였다.

2) Al-Mg 합금인 ALDC6 합금에서 조성 내 범위인 2.5~3.5 wt%Mg 함량 변화에 따른 기계적 성질에 미치는 영향은 그리 크지 않으나, 최대 허용량인 1.0 wt% 정도에서 Si 함량이 미치는 효과는 매우 큰 것으로 분석되었다. 특히, 연신율에 크게 영향을 미쳐 인장, 굽힘 및 충격강도 저하의 원인이 된다. 이는 조대하게 성장하는 Mg_2Si 상과 상대적으로 효과는 적지만 $\text{Al}_{15}(\text{Fe,Mn})_3\text{Si}_2$ 상의 상분을 상승 및 마지막 응고 구간에서의 침상의 $\beta\text{-AlFeSi}$ 상 등의 석출 때문으로 사료된다.

Fig. 7. Charpy test results of the Al-3.0 wt%Mg alloy and ALDC12; (a) Force-Time Impact curve, (b) Impact Strength.

참고문헌

- [1] Miljana Popovic and Endre Romhanji, J. Mater. Proc. Tech., "Stress corrosion cracking susceptibility of Al-Mg alloy sheet with high Mg content", 125-126 (2002) 275-280.
- [2] Kim JM, Seong KD, Jun JH, Kim KT and Jung WJ, J. KFS, "Variation of fluidity and mechanical properties of Al-Mg alloys with addition of Si, Mn and Zn", **24** (2004) 138-144.
- [3] Kim JM, Seong KD, Jun JH, Kim KT and Jung WJ, J. KFS, "Effects of Mn and Si contents on the castabilities and mechanical properties of Al-5%Mg base alloys", **25** (2005) 216-220.
- [4] Kim JM, Park JS, Kim HY, Cho JI and Jung CY, J. KFS, "Effects of Mn, Cr, and Sr additions on the microstructure and tensile properties of Al-7Si-0.4Mg-1Fe casting alloy", **29** (2009) 27-32.
- [5] Kim HY, Han SW and Lee HM, Mater. Lett., "The influence of Mn and Cr on the tensile properties of A356-0.2Fe alloy", **60** (2006) 1880-1883.
- [6] S.S.Sreeja Kumari, R.M.Pillai, T.P.D. Rajan and B.C.Pai, Mater. Sci. Eng.(A), "Effects of individual and combined additions of Be, Mn, Ca and Sr on the solidification behavior, structure and mechanical properties of Al-7Si-0.3Mg-0.8Fe alloy", 460-461 (2007) 561-573.
- [7] J.R. Davies, ASM Specialty Handbook. Aluminum and aluminum alloys, ASM international Materials Park, OH (1999) 88-94, 579-622.
- [8] T.J. Summerson and D.O. Sprowls, Virginia University, "Aluminum alloys, their physical and mechanical properties", **III** (1986) 1576-1662.