 논문

고압 금형 주조용 Al-4%Mg-0.9%Si 합금의 주조특성에 미치는 Fe, Mn 함량의 영향

김현주[†]

부경대학교 공과대학 금속공학과

Effect of Fe, Mn Content on the Castability of Al-4%Mg-0.9%Si Alloys for High Pressure Die Casting

Heon-Joo Kim[†]

Dept of Metallurgical Eng., Pukyong National Univ., Busan 608-739, Korea

Abstract

Effect of Fe and Mn contents on the castability of Al-4wt%Mg-0.9wt%Si system alloy has been studied. According to the analysis of cooling curve for Al-4wt%Mg-0.9wt%Si-0.3wt%Fe-0.3/0.5wt%Mn alloy, α -Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂ and β -Al₃FeSi phases crystallized above eutectic temperature of Mg₂Si. Therefore, these phases affected both the fluidity and shrinkage behaviors of the alloy during solidification. As Fe and Mn contents of Al-4wt%Mg-0.9wt%Si system alloy increased from 0.1 wt% to 0.4 wt% and from 0.3 wt% to 0.5 wt% respectively, the fluidity of the alloy decreased by 26% and 33%. When Fe content of the alloy increased from 0.1 wt% to 0.4 wt%, 23% decrease of macro shrinkage and 19% increase of micro shrinkage appeared. Similarly, Mn content of the alloy increased from 0.3 wt% to 0.5 wt%, 11% decrease of macro shrinkage and 14% increase of micro shrinkage appeared. Judging from the castability of the alloy, Al-4wt%Mg-0.9wt%Si alloy with low content of Fe and Mn, 0.1 wt% Fe and 0.3 wt% Mn, is recommendable.

Key words: Al-4wt%Mg-0.9wt%Si alloy, Castability, Fe content, Mn content.

1. 서 론

알루미늄합금의 자동차 차체적용에 대한 관심이 모아지면서 높은 가격 경쟁률 및 탁월한 생산력을 갖추고 동시에 우수한 기계적 특성을 지닌 고압금형주조(High Pressure Die Casting)용 알루미늄합금의 개발이 요구되고 있다[1-3]. Al-Mg-Si계 합금은 다른 주조용 합금과 비교하여 as-cast 상태에서 우수한 강도와 인성 및 내식성을 지니고 있어 차체용 재료로써 각광받고 있으나, 주조용 합금으로서 Al-Si계 합금에 비해 주조성이 떨어지고 첨가원소 중 Mg의 산화로 인해 주조하기가 어려운 단점을 지니고 있다.

잉고트 제조과정에서 스크랩 사용비율이 증가함에 따라 잉고

트의 불순물 영향에 관심이 높은 것이 현실이다. 특히 불순물 중 Fe는 알루미늄 합금에서 β 상으로 일컫는 판상의 AlFeSi 3원계 상을 형성하여 기계적 특성 및 내식성을 크게 감소시키고 있다[4]. Mn은 판상의 β 상을 chinese script 형상의 α 상으로 개량시켜 인성을 증가시킴과 동시에 고압금형주조에서 야기되는 금형소착현상을 감소시키는 원소로 알려져 있다[5,6]. 하지만 부적절한 Mn의 첨가는 알루미늄 용탕 내에서 슬러지를 형성하여 합금의 주조성을 오히려 감소시킨다[5].

현재 Al-Mg계 합금에서 주조성과 관련된 Si 함량에 관한 연구는 많이 이루어졌다[3,7-9]. 그러나, Al-Mg-Si계 합금에서, 특히 소량으로 첨가되는 합금원소 중 Fe 및 Mn 함량에 따른 미세조직적 고찰과 주조성과의 연관성에 관한 세부적인 연구가

Received: April 3, 2013 ; Accepted: April 4, 2013

[†]Corresponding author: Heon-Joo Kim (Pukyong National Univ.)

Tel: +82-51-629-6347, Fax: +82-51-629-6339

E-mail: metjoo@pknu.ac.kr

Journal of Korea Foundry Society

2013. Vol. 33 No. 2, pp. 055~062

<http://dx.doi.org/10.7777/jkfs.2013.33.2.055>

ISSN 1598-706X

© 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.

따라서 본 연구에서는 이런 관점에서 Al-4Mg-0.9Si-xFe-yMn 합금에서 Fe 및 Mn 원소에 대해 적정 함량을 설정하고 주조성을 평가하여 각 원소에 대한 영향을 살펴보고자 하였다.

각곡선(cooling curve) 분석 및 주사전자현미경(SEM/EDX) 분석을 행하였다. Table 2의 모든 조성에서 냉각곡선을 측정된 시편들을 절단한 후, 각 시편들의 핫정선부(hot junction part)의 조직을 광학 현미경으로 관찰하였다. Fe 함량에 따른 β 상의 분율과 Fe, Mn 함량에 따른 α 상의 분율을 화상분석 프로그램(Image-pro 4.1)을 사용하여 각 시편의 조직을 5회 현미경 촬영한 후 산술 평균하였다. α 상의 분율은 현미경으로 촬영한 사진에서 α 상들이 차지하는 총 면적으로 표시하였다. β 상은 촬영한 현미경 사진에서 β 상들의 총 길이로 분율을 표시하였으며, Fe 함량에 따른 β 상의 형상 변화를 관찰하기 위해 β 상 각각의 aspect ratio를 측정하고 산술평균하였다.

냉각곡선 측정은 상온의 금형몰드[10]에 710°C인 용탕을 주입하여 용탕 냉각시의 응고거동을 측정하였다. 몰드 내부에는 직경 0.3 mm K-Type CA 열전대를 장착하여 냉각시 온도변화를 측정하였다. 냉각곡선의 변곡점으로부터 조성, α -Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂상 및 공정조직의 정출온도를 확인하였다[11].

3. 실험 결과

3.1 미세조직 관찰

조성별 미세조직관찰은 광학 현미경 및 주사전자 현미경을

통하여 관찰하였다. Table 2의 모든 조성에서 α -Al, eutectic Mg₂Si, α -Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂상이 공통적으로 관찰되었고, 2, 3번 조성에서는 판상의 β -Al₅FeSi상이 관찰되었다.

Fig. 3은 Fe 함량에 따른 현미경 조직사진을 나타낸다. 본 실험에서 Fe 함량이 0.1 wt%일 때 판상의 β 상은 관찰되지 않았으나, Fe 함량이 0.3 wt%, 0.4 wt%로 증가함에 따라 β 상이 관찰되었다.

Fig. 4는 Mn 함량에 따른 현미경 조직사진을 나타낸다. Mn 함량이 0.3 wt%일 때 소량 존재하는 β 상들이 Mn이 0.5 wt%로 증가함에 따라 침상의 β 상이 소멸되면서 α 상으로 개량화되었다.

Fig. 5는 실험조성 중 3번 조성(0.4Fe-0.3Mn)의 구성상에 대한 SEM/EDX 분석결과를 나타낸다. 분석결과, 3번 조성은 α -Al, eutectic Mg₂Si 그리고 소량의 α -Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂상 및 β -Al₅FeSi상으로 구성되어 있음을 확인하였다. Fe는 Al내에서 낮은 고용도를 가지기 때문에 응고하는 동안 수지상간 영역내의 액상에서 많은 양이 존재하게 되며 이 중 Si, Mn, Mg 등과 함께 금속간화합물을 형성하는 원소이다.

Fig. 6은 응고중 α -Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂상이 형성되는 온도를 측정하기 위해 Table 2의 2번과 5번 조성을 대상으로 측정된 냉각곡선을 나타낸 것이다. 냉각곡선 측정결과 α -Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂

Fig. 3. Comparison of optical microstructures with the change of Fe content in Al-4Mg-0.9Si-0.3Mn alloys.

Fig. 4. Comparison of optical microstructures with different α phase fraction as Mn content change in Al-4Mg-0.9Si-0.3Fe alloys.

Fig. 5. SEM/EDX results of main phases in Al-4Mg-0.9Si-0.4Fe-0.3Mn alloys.

상은 초정온도 약 630°C 보다 낮은 온도에서 정출되었으며, Mn 함량이 0.3 wt%에서 0.5 wt%로 증가함에 따라 정출온도가 약 4°C 가량 상승하였다. 그러므로 α-Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂상은 공정 Mg₂Si보다 우선적으로 형성되며 Mn 함량이 증가함에 따라 α상의 정출온도가 증가되고 따라서 Mn 함량 증가에 따라 α상의 크기 및 분율이 증가된 것으로 판단된다[12].

Fig. 6. Cooling curves with Mn contents for measurement of α-phase crystallization temperature in (a) Al-4Mg-0.9Si-0.3Fe-0.3Mn alloy and (b) Al-4Mg-0.9Si-0.3Fe-0.5Mn alloy.

Fig. 7. Effect of Fe contents on morphology of β-phase in Al-4Mg-0.9Si-0.3Mn alloys.

Fig. 7은 화상분석 프로그램을 사용하여 Fe 함량변화에 따른 β상의 분율을 β상의 총 길이로 측정하여 나타낸 것이다. Fe 함량이 0.3 wt%에서 0.4 wt%로 증가함에 따라 β상의 총 길이는 76.6 μm에서 130.5 μm로 증가하였으며, 그 형상 또한 길이방향으로 커져 aspect ratio가 22.5에서 35.4로 증가하였다. Fe 함량이 0.1 wt%인 합금에서 판상의 β상은 관찰되지 않았으나, Fe 함량이 0.3 wt% 이상 되면 β상의 분율과 aspect ratio가 증가됨을 알 수 있었다.

Fig. 8은 Mn 함량변화에 따른 α상의 분율변화를 화상분석 프로그램을 사용하여 측정하여 나타낸 것이다. Fe 함량이 0.1 wt%에서 0.4 wt%로 증가할 때 α상의 분율은 0.4%에서 0.57%로 매우 소량 증가한 것에 반하여, Mn 함량이 0.3 wt%에서 0.5 wt%로 증가할 때 α상의 분율은 0.5%에서 2.3%로

Fig. 8. Effect of Fe and Mn content on area fraction of α -phase in Al-4Mg-0.9Si alloys.

현저하게 증가하였다.

Fig. 7과 Fig. 8의 결과로부터 본 실험에서 Fe를 0.3 wt% 이상 함유한 시료에 Mn이 0.5 wt% 첨가되면 침상의 β - Al_3FeSi 상이 소멸되면서 chinese script 형상의 α - $\text{Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$ 상으로 대체됨을 알 수 있었다.

3.2 Fe, Mn 함량에 따른 유동성

알루미늄 합금의 유동성은 합금원소의 종류와 함량에 따라 좌우되며, 합금의 유동성은 용탕의 구조성 평가의 주요 항목으로 되어 있다. 유동성이 좋은 용탕은 Mis-run과 같은 주조 결함을 방지한다. 본 실험은 합금 원소의 함량 변화에 따른 유동성의 차이를 살펴보기 위해 실시되어 졌으며, 그 결과는 Fig. 9와 같다.

유동성 평가 결과, Table 2의 1번 조성(Al-4Mg-0.9Si-0.1Fe-0.3Mn)에서 충전길이의 합이 468 mm로 실험조성 중 유동성이 가장 좋았으며, Fe 함량이 0.1 wt%에서 0.4 wt%로 증가함에 따라 충전길이의 합은 346 mm로 유동성이 26%정도 저하하는 경향을 나타내었다. 또한, Table 2의 2, 5번 조성의 경우, Mn 함량이 0.3 wt%에서 0.5 wt%로 증가함에 따라 충전된 길이의 총합은 413 mm에서 277 mm로 약 33%정도 감소하는 경향을 나타내었다.

알루미늄 합금의 유동성에 미치는 변수로는 응고잠열, 용탕선단부의 표면장력 및 응고거동, 주입온도 등 여러 가지가 있으며[13], 합금원소들이 다량 첨가된 Al합금에서 다른 변수의 변화가 없다고 가정할 때, 합금의 유동성은 용탕선단부의 응고거동에 의해서 좌우되는 경향이 높다[14]. 먼저 첨가원소에 따른 응고잠열을 살펴보면 Si는 단위체적당 Al의 약 3.9배의 응고잠열을 방출하여 소량 첨가에도 유동성을 뚜렷하게 증가시키는 원소로 알려져 있다[7-9,13].

알루미늄합금에서 Fe, Mn이 유동성에 미치는 영향을 응고잠열로 비교하면, Fe는 응고잠열이 단위중량당 Al의 약 69%로

Fig. 9. The fluidity results with the change of Fe and Mn contents in Al-4Mg-0.9Si-Fe-Mn alloys.

작지만 밀도차이를 고려해 환산하면 단위체적당 Al의 약 2배로 높다. 또한 Mn은 단위중량당으로는 Al의 약 67%로 낮지만 역시 밀도를 고려하여 단위체적당으로 환산하면 방출되는 응고잠열은 Al의 약 1.8배로 높다.

용탕선단부의 표면장력에 미치는 Fe, Mn의 영향을 비교하면, Fe, Mn은 각각 Al합금에서 표면장력을 증가시키는 원소로써 합금의 유동성을 저해하는 원소이나, 알루미늄 합금 용탕의 표면장력에 미치는 영향은 서로 유사한 수준으로 알려져 있어 Fe와 Mn의 함량에 따른 영향을 각각 비교하기는 곤란하며[15], Flemings[16]가 제시한 channel에서 유동하는 금속액상에 대한 표면장력의 영향을 뚜렷하게 관찰할 수 있는 최소직경을 2.5mm로 제한하는 것에 비해, 본 실험의 channel은 가장 작은 표면적을 가지는 홈의 경우 너비 8 mm, 깊이 2 mm로 원으로 환산하여도 약 5.1 mm로 크기 때문에 본 실험조건에서 Fe, Mn원소가 용탕선단부에 미치는 표면장력의 영향은 적을 것으로 추정된다.

Fig. 10 및 Fig. 11은 각각 Fe, Mn 함량에 따른 유동성 및 α , β 상의 분율을 나타낸 그래프이다. 그래프에서 Fe, Mn 함량이 증가함에 따라 α , β 상들의 분율이 증가하였으며 합금의 유동성은 감소하는 것을 알 수 있다.

따라서 Fe, Mn이 동시에 첨가된 Al-Mg-Si계 주조용 합금에서 유동성은 용탕선단부의 응고거동과 연관이 있으며 용탕선

Fig. 10. Effect of Fe contents on melts fluidity of Al-4Mg-0.9Si-0.3Mn alloys.

1.

Fig. 12. Effect of Fe contents on shrinkage of Al-4Mg-0.9Si-0.3Fe alloys.

Fig. 11. Effect of Mn contents on melts fluidity of Al-4Mg-0.9Si-0.3Fe alloys.

2.

Fig. 13. Influence of β-phase on the formation of micro shrinkage in Al-4Mg-0.9Si-0.3Mn alloys.

단부에서 응고가 시작될 때, 초정 Al이 정출되고 Fe 및 Mn 함량이 증가함에 따라 공정 Mg_2Si 보다 먼저 정출되는 판상의 β상 및 chinese script 형상의 α상의 분율이 증가하므로 합금의 유동성을 방해하는 요인으로 작용하였다고 판단된다[17].

3.3 Fe, Mn 함량에 따른 수축 특성

수축으로 인해 발생하는 수축기공은 가장 일반적인 주조결함으로, 주조품의 기계적 성질 감소로 이어진다. 대부분 합금의 액상-고상 응고과정에서 체적 감소로 인해 발생하는 응고수축은 원활한 액상금속 보급이 일어나지 못할 경우 수축결함으로 나타난다[18,19].

순금속 혹은 공정합금의 경우, 준액상 온도범위가 작고, 응고가 평활한 계면으로 진행하므로 수축에 동반한 변형에 대하여 충분한 강도를 지녀, pipe상 수축이 형성된다. Al-4Mg-0.9Si계 합금에서 Fe, Mn 함량에 따른 수축실험을 행하여 pipe상 수축을 macro shrinkage로, 내부의 porosity 및 미세수축을 micro shrinkage로, 합을 total shrinkage로 표시하였으며 Fe 함량에

따른 실험결과를 Fig. 12에 나타내었다. Mn 함량이 0.3 wt%로 일정할 때 Fe 함량이 0.1 wt%에서 0.4 wt%로 증가함에 따라 macro-shrinkage는 23% 감소되고 micro-shrinkage는 19% 증가하였다. Fig. 13은 미세 수축에 미치는 β상의 영향을 나타낸다. 초정상 다음으로 정출되는 β상은 합금의 응고시 판상의 형상으로 인해 액상금속의 보급을 방해하는 요인으로 작용하여 미세 수축기공 형성을 증가시키는 것으로 판단된다[20].

Fig. 14는 Mn 함량에 따른 실험결과를 나타낸다. Fe 함량이 0.3 wt%로 일정할 때 Mn 함량이 0.3 wt%에서 0.5 wt%로 증가함에 따라 macro-shrinkage는 11% 감소되고 micro-shrinkage는 14% 증가하였다.

Fig. 15는 미세 수축에 미치는 α상의 영향을 나타낸다. 미세 조직적으로 고찰할 때 이러한 결과는 Fe, Mn 함량이 증가할수록 합금내 판상 및 chinese script 형상의 상들을 형성하며 이 상들이 응고시 원활한 액상금속의 보급을 방해하고 내부에 미세 기공들을 형성함으로써 체적이 상대적으로 커지므로

Fig. 14. Effect of Mn contents on shrinkage of Al-4Mg-0.9Si-0.3Fe alloys.

Fig. 15. Influence of α -phase on the formation of micro shrinkage in Al-4Mg-0.9Si-0.3Fe alloys.

macro-shrinkage는 감소하고 micro-shrinkage는 증가하는 것으로 판단된다[20].

4. 결 론

주조용 Al-4Mg-0.9Si계 합금에서 주조성에 미치는 Fe, Mn 함량에 대해 연구한 결과, 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) Al-4Mg-0.9Si-xFe-yMn계 조성의 합금에서 냉각곡선 분석 결과 α -Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂상과 β -Al₃FeSi상은 α -Al의 초정 온도 630°C 보다 낮으며 Mg₂Si상의 공정 온도 592°C 보다 높은 온도에서 정출되어, 합금의 Fe, Mn 함량에 따라 Al-4Mg-0.9Si-xFe-yMn계 합금의 유동 및 수축특성에 영향을 주었다.

2) Fe 함량이 0.1 wt%에서 0.4 wt%로 증가하고, Mn 함량이 0.3 wt%에서 0.5 wt%로 증가함에 따라 용탕 선단부의 응고 과정에서 판상의 β -Al₃FeSi상과 α -Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂상의 분율이

증가하면서 합금의 유동성은 각각 26%와 33% 감소하였다.

3) Fe 함량이 0.1 wt%에서 0.4 wt%로 증가하고, Mn 함량이 0.3 wt%에서 0.5 wt%로 증가함에 따라 합금의 응고과정에서 판상의 β -Al₃FeSi상과 chinese script 형상의 α -Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂상의 분율이 증가하면서 합금의 수축량은 Fe의 경우 macro-shrinkage는 23% 감소, micro-shrinkage는 19% 증가되었으며, Mn의 경우 macro-shrinkage는 11% 감소, micro-shrinkage는 14% 증가되었다.

4) Al-4Mg-0.9Si계 합금의 주조성 관점에서 Fe, Mn 함량이 낮은 Al-4Mg-0.9Si-0.15Fe-0.3Mn조성의 합금이 가장 우수한 것으로 나타났다.

참고문헌

- [1] Jorstad JL, Die Casting Engineer, "Future technology in Aluminum die casting", **9** (2006) 18-25.
- [2] Koch H, Hielsher U, Sternau H and Franke AJ, TMS, "Silafont-36, the new low iron high-pressure die-casting alloy", (1995) 1011-1018.
- [3] Makhlof M and Makhlof D. Apelian, ACRC, Paper No. DEFC07-99ID13716, "Casting characteristics of Aluminum die casting alloys", (2002) 1-46.
- [4] Belov NA, Aksenov AA and Eskin DG, Advances in Metallic Alloys, Taylor and Francis, "Iron in Aluminum alloys: Impurity and Alloying Element", **2** (2002) 190-191.
- [5] Jarstad JL, Proc. of the 14th SDCE International Die Casting Congress and Exposition, Toronto, Ont. Canada, "Understanding Sludge" paper no. G-T87-011 (1987) 11-14.
- [6] Shankar S and Apelian D, Metallurgical and Materials Transactions B "Mechanism of the Interface Reaction between Molten Aluminum Alloy and Tool Steel", **33B** (2002) 465-476.
- [7] Kim JM, Seong KD and Jun JH, J. KFS, "Variation of fluidity and mechanical properties of Al-Mg alloys with the addition of Si, Mn and Zn", **24** (2004) 138-144.
- [8] Kim JM, Seong KD and Jun JH, J. KFS, "Effects of Mn and Si contents on the castabilities and mechanical properties of Al-5%Mg base alloys", **25** (2005) 216-220.
- [9] Lee WS and Ye BJ, J. KFS, "Variation of fluidity in Al alloys with the addition of Si, Mg and melt treatments", **19** (1999) 310-317.
- [10] Kim HJ, J. KFS, "Effect of Fe and Mn contents on the tensile property of Al-9%Si-0.3%Mg alloy for high pressure die casting", **31** (2001) 18-25.
- [11] Lennart Backerud, Guocai Chai and Jarmo Tamminen, AFS/SKANALUMINIUM, "Solidification characteristics of Aluminum alloys", **2** (1990) 231-236.
- [12] Kim HY, Han SW and Lee HM, J. Kor. Inst. Met. and Mater., "The effects of Mn on the crystallization of α phase in 356 alloys", **43** (2005) 413-417.
- [13] Ravi KR, Pillai RM, Amaranathan KR, Pai BC and Chakraborty M, Journal of Alloys and compounds, JALCOM-15778, "Fluidity of aluminum alloys and composites", (2007) 201-210.
- [14] Flemings MC, McGraw-Hill, "Solidification Processing", (1974) 219-224.

-
- [15] Davis JR, ASM Specialty Hand book, ASM international, Materials Park, "Aluminum and aluminum alloys", (1993) 10.
- [16] Feliu S, Fleming MC and Taylor HF, The British Foundryman, "Effect of mode of solidification on the fluidity of aluminium-tin alloys", **53** (1960) 413-425.
- [17] Taghaddos E, Hejazi MM, Taghiabadi R and Shabestari SG, Journal of Alloys and Compounds, "Effect of iron inter-metallics on the fluidity of 413 Al alloy", **468** (2009) 539-545.
- [18] Campbell J, Elsevier Science, "Castings", (2003) 212-222.
- [19] Lee PD, Chirazi A and See D, Journal of light metal, "Modeling microporosity in aluminum-silicon alloys", (2001) 15-30.
- [20] Moustafa MA, Journal of materials processing technology, "Effect of iron content on the formation of β -Al₅FeSi and porosity in Al-Si eutectic alloys", **209** (2009) 605-610.