

논문

Cu 및 Mg 첨가량에 따른 Al-Fe-Cu-Mg계 주조합금의 특성변화

김정민[†] · 김남훈 · 신제식* · 김기태* · 고세현*

한밭대학교 신소재공학과, *한국생산기술연구원 인천연구센터

Influence of Cu and Zn Contents on the Properties of Al-Fe-Cu-Mg Based Casting Alloys

Jeong-Min Kim[†], Nam-Hoon Kim, Je-Sik Shin*, Ki-Tae Kim* and Se-Hyun Ko*

Dept. of Advanced Materials Engineering, Hanbat National University Daejeon 305-719, Korea

*Incheon R&D Center, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 406-840, Korea

Abstract

Efforts have been made to develop new silicon-free aluminum casting alloys that possess high electrical and thermal conductivity. In this research Al-Fe-Cu-Mg alloys with various Cu and Mg contents were investigated for their various properties. As the Cu or Mg content was increased, the electrical conductivity gradually decreased, while the tensile strength of the Al-Fe-Cu-Mg alloy tended to be improved. It was found that fluidity was generally inversely proportional to the Cu content, but the alloys containing 1%Mg showed considerably low fluidity, regardless of the Cu content.

Key words : Aluminum, Casting, Conductivity, Tensile strength, Fluidity

1. 서 론

알루미늄 및 알루미늄합금은 대표적인 경량소재로서 비강도가 높고 전기 및 열 전도도가 우수하므로 자동차, 항공, 전기/전자 산업 등에서 널리 사용되고 있다. 예를 들어, 고출력 LED 방열부품소재로서 중요하게 활용되고 있는데, 최근 전기/전자제품의 소형화 및 고집적화가 진행됨에 따라 보다 전도성이 우수한 새로운 알루미늄합금의 출현이 필요한 시점이기도 하다. 기존에 주로 사용되는 알루미늄 주조합금은 주조성과 강도가 우수하지만 통상적으로 다량의 Si를 포함하고 있어 전도성이 상대적으로 낮고 주조공정 후 표면처리에 어려움이 있다. 상용합금계인 Al-Si계 주조합금은 순수한 알루미늄에 비해 열전도도가 절반 수준까지 낮은 경우가 대부분인 것으로 알려져 있으며[1], 따라서 최근 들어 전도성을 현저히 저하시키는 Si를 완전히 배제한 상태에서 양호한 강도와 주조성을 보유한 새로운 고전도성 알루미늄합금의 개발연구가 활발하게 진행되

고 있다[2,3].

방열부품용 알루미늄합금은 보통 높은 강도가 요구되지는 않으나 활용분야에 따라 일정 수준이상의 강도가 필요하므로 새로운 고전도성 합금의 조성에 따른 기계적 성질을 조사할 가치가 있다. 또한 방열부품용 알루미늄합금은 생산성과 경제성이 우수한 주조공정으로 대부분 제조되므로 주조특성이 중요하며, 특히 주형 충전성을 의미하는 유동도가 낮으면 불량률의 증가와 생산성의 저하가 예상된다. 알루미늄합금에서 Si은 응고 중 응고잠열을 다량 방출함으로써 유동도의 증가에 매우 효과적인 합금원소이므로 제거할 경우 유동도의 저하가 심각할 수 있어 확인이 필요하다. 합금의 유동도는 여러 가지 재료 및 공정변수의 영향을 받는 복잡한 현상으로서 많은 연구에도 불구하고 아직도 완전하게 규명되어 있지 못 하다[4-6]. 그럼에도 불구하고 일반적으로 합금의 유동도는 응고구간과 매우 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있는데, 즉 응고구간이 확대될수록 유동도는 감소하는 일반적인 경향을 보인다[4,7].

Received: May. 25, 2014; Revised: Aug. 5, 2014; Accepted: Aug. 18, 2014
[†]Corresponding author: Jeong-Min Kim (Hanbat National Univ.)
Tel: +82-42-821-1235, Fax: +82-42-821-1592
E-mail: jmk7475@hanbat.ac.kr

Journal of Korea Foundry Society
2014. Vol. 34 No. 4, pp. 130~135
<http://dx.doi.org/10.7777/jkfs.2014.34.4.130>
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.

본 연구에서는 합금원소 Si 대신 전도성의 저하에 미치는 영향이 상대적으로 작은 Cu와 Mg을 소량 첨가하면서 합금조성의 변화에 따른 전기전도도, 인장강도 및 유동도를 조사하고자 하였다. Fe는 금형과의 소착을 방지하기 위해 필수적으로 첨가되는 원소로서 약 1%정도 첨가되는 것이 바람직한 것으로 알려져 있으나 전도성에는 부정적이므로 약 0.5%로 정하였다 [3,8]. Mg은 알루미늄기지에 고용도도가 크므로 주로 고용강화 효과를 기대하여 합금원소로서 선정하였다. Cu의 경우 고용강화효과 이외에도 Al에 일정량 이상 첨가되면 석출경화효과가 있는 것으로 알려져 있으나 본 연구에서는 주조상태에서의 미세조직 및 물성의 변화 위주로 조사를 진행하였다.

2. 실험 방법

Al 순금속(99.8%), Cu 및 Mg 순금속(99.9%), Al-5%Fe (wt%) 모합금을 장입재로 사용하여 전기유도로에서 용해를 하였으며, 대기 중에서 금형 주조함으로써 두께 10 mm의 판재 형상으로 시편을 준비하였다. Table 1에서는 제조한 주조시편의 화학조성을 분석한 결과를 정리하여 보여주고 있다. 주조시편들의 미세조직은 광학현미경(OM)과 주사전자현미경(SEM, JEOL, JSM-5610)을 사용하여 관찰하였으며, 상 분석은 SEM-EDS (energy dispersive X-ray spectrometer)와 X-ray diffractometer (XRD, Rigaku, Smartlab)를 이용하여 수행하였다. 미세조직의 현미경관찰을 위해 사용한 부식액은 총 100 ml기준으로 HNO₃ 10 ml, HCl 1.5 ml, HF 1.5 ml, 나머지 물로 구성

Table 1. Chemical compositions of Al-0.5Fe-Cu-Mg alloys (wt.%).

	Fe	Cu	Mg	Al
1Cu-0.5Mg	0.59	1.01	0.52	balance
1Cu-1Mg	0.55	0.91	1.08	"
1.5Cu-0.5Mg	0.62	1.37	0.51	"
1.5Cu-1Mg	0.59	1.34	1.07	"
2Cu-0.5Mg	0.62	1.90	0.56	"
2Cu-1Mg	0.60	1.86	1.07	"

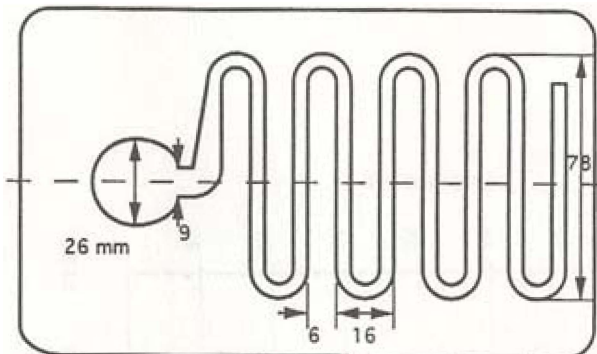


Fig. 1. Illustration of fluidity serpentine test mold (lower part).

되었다.

합금의 응고특성을 측정하기 위해 Ar가스분위기에서 5°C/min의 속도로 시차주사열량계(Differential scanning calorimeter (DSC), TA instrument, Q20)를 이용하여 열분석을 실시하였으며, 실험 합금에서 응고 중 형성되는 상들을 예측하기 위하여 Sheil 응고 모델을 사용하는 상용 프로그램 JMatPro 5.0을 활용하였다. 주조합금의 전기전도도는 접촉식 시험기(Fischer, Sigmascope SMP10)를 사용하여 측정하였으며, 인장성질은 판재 형태의 sub-size 시편을 준비하여 ASTM B 557M 규격에 따라 시험을 진행하여 평가하였다. 유동도는 200°C로 전체를 예열시킨 나선형태(serpentine)의 내열강 주형(Fig. 1)을 이용하여 50°C의 과열도(superheat)를 가진 용탕을 금형에 주입하여 5 × 5 mm의 통로를 금속이 응고 전에 유동한 총 길이를 측정하여 정량적으로 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 주조합금의 미세조직 특성

Fig. 2는 합금별 주조상태 미세조직을 SEM으로 관찰한 결과이며, 알루미늄 기지와 결정립계와 수지상 사이에 제2상이 다량 형성된 조직임을 알 수 있다. 제2상에 대한 SEM-EDS 분석결과에서 층상구조를 가지는 AlCuMg(Fe)상은 Cu가 다량 포함되어 있고 추가로 Mg이 검출되었으며, 일부에서는 Fe가 함께 측정되었다. AlCu상은 Mg나 Fe가 없이 주로 Cu만 포

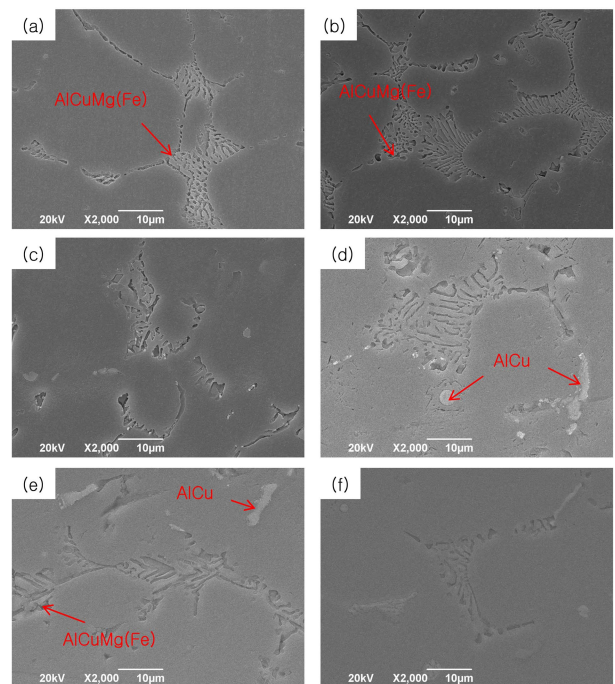


Fig. 2. Microstructure of as-cast Al-0.5Fe-Cu-Mg alloys: (a) 1Cu-0.5Mg, (b) 1Cu-1Mg, (c) 1.5Cu-0.5Mg, (d) 1.5Cu-1Mg, (e) 2Cu-0.5Mg, (f) 2Cu-1Mg.

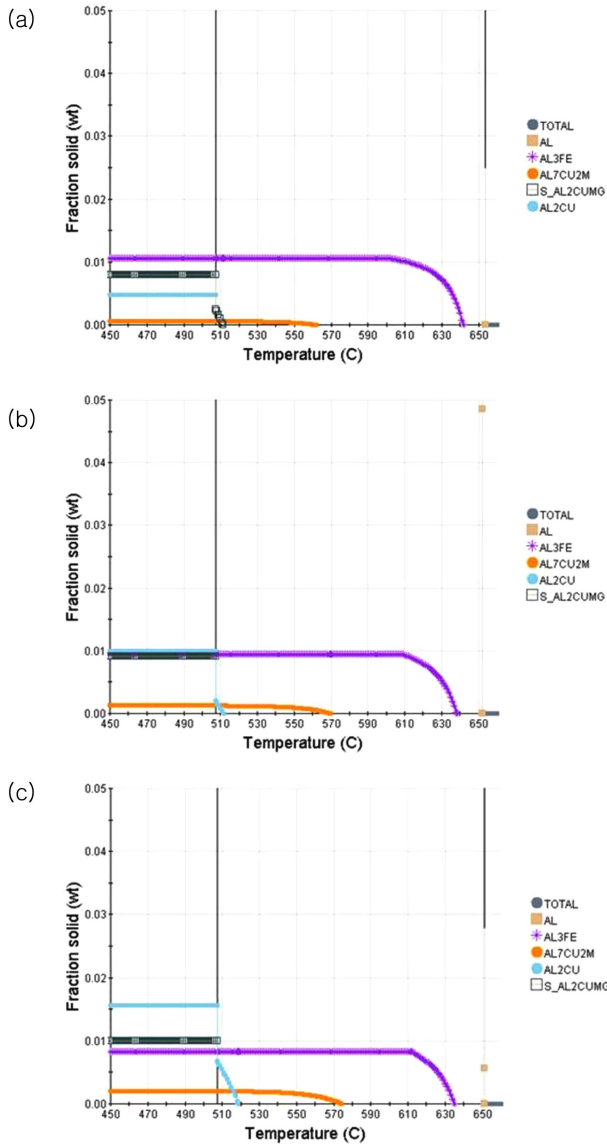


Fig. 3. Phases that are formed during solidification of Al-Fe-xCu-0.5Mg alloys by JMatPro: (a) 1Cu, (b) 1.5Cu, (c) 2.0Cu.

함한 것으로 조사되었으며 따라서 Al_2Cu 상인 것으로 생각된다 [9]. 층상구조 상의 경우 Cu의 첨가량이 증가함에 따라 Cu함유량이 다소 증가하는 경향을 나타내었으나 합금 조성과의 연관성을 뚜렷하게 관찰할 수는 없었다. Fig. 3과 4에서는 응고 중 형성되는 상 예측결과에서는 Al_2CuMg , Al_2Cu , Al_7Cu_2Fe , Al_3Fe 등 다양한 상이 형성될 수 있음을 보여주고 있다. 주목할 사항은 Al_2Cu 상 보다는 Al_2CuMg 상이 더 많이 형성될 것으로 예측되는 것인데, 특히 저Cu 고Mg첨가 합금들에서는 Al_2Cu 상이 형성되지 않는다.

Fig. 5의 XRD분석결과로부터 제2상은 주로 Al_2CuMg , Al_2Cu 또는 Al_7Cu_2Fe 인 것으로 나타났으나 역시 화학조성과의 연관성이 명확하게 관찰되지는 않았다. Al_2CuMg 상은 Al/

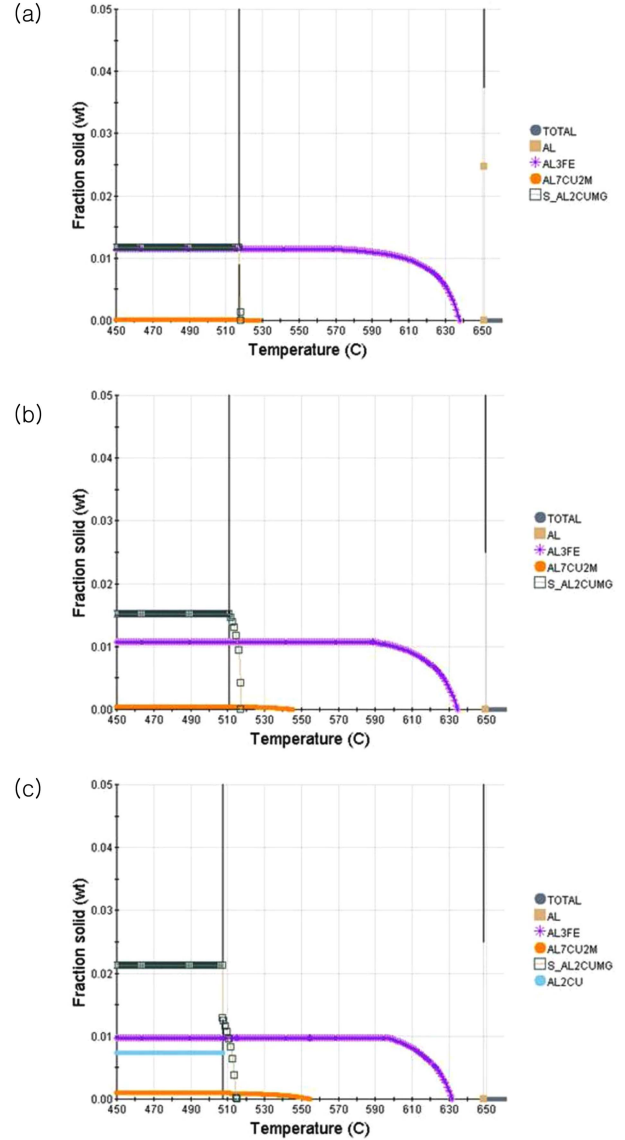


Fig. 4. Phases that are formed during solidification of Al-Fe-xCu-1Mg alloys by JMatPro: (a) 1Cu, (b) 1.5Cu, (c) 2.0Cu.

Al_2CuMg 의 준 공정반응을 통해 형성되어 층상조직을 나타낸 것으로 생각된다[10]. 평형 상의 예측결과와는 다르게 Al_3Fe 와 같은 $AlFe$ 상은 거의 형성되지 않은 것으로 보이며, 오히려 Al_2Cu 상은 Mg함량에 상관없이 상당수 형성된 것으로 나타나 실제 응고조건에서는 다른 상들이 형성될 수 있음을 확인할 수 있었다. Fe가 소량 첨가된 Al-Cu-Fe합금에서는 한자(chinese script)형태의 α -Fe상과 침상의 β -Fe상이 주로 Fe포함 상으로 존재하는 것이 보고되어 있으나 본 시편에서는 β -Fe상인 Al_7Cu_2Fe 만이 관찰되었다[9].

3.2 Al-Fe-Cu-Mg합금의 전도성 및 기계적 성질

이미 언급한 바와 같이 알루미늄합금의 전도성을 저해하는

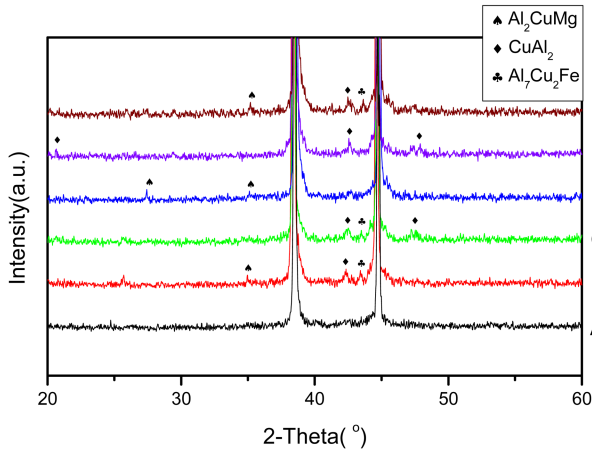


Fig. 5. XRD analysis results of as-cast Al-0.5Fe-Cu-Mg alloys: (a) 1Cu-0.5Mg, (b) 1Cu-1Mg, (c) 1.5Cu-0.5Mg, (d) 1.5Cu-1Mg, (e) 2Cu-0.5Mg, (f) 2Cu-1Mg.

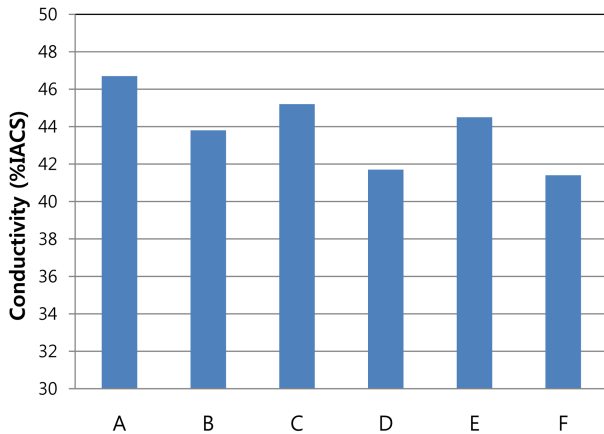


Fig. 6. Electrical conductivity of as-cast Al-0.5Fe-Cu-Mg alloys: (a) 1Cu-0.5Mg, (b) 1Cu-1Mg, (c) 1.5Cu-0.5Mg, (d) 1.5Cu-1Mg, (e) 2Cu-0.5Mg, (f) 2Cu-1Mg.

합금원소인 Si이 전혀 포함되지 않은 실험합금들은 Fig. 6에서 보여주듯이 전기전도도가 모두 우수한 것으로 관찰되었다. 참고로 널리 사용되는 다이캐스팅 합금인 A380(8.5Si-3.5Cu)의 전기전도도는 약 27%IACS인 것으로 알려져 있다[11], 비록 합금원소 Cu는 Si에 비해 알루미늄의 전도도 저하에 미치는 효과가 작지만 동일 Mg함량에서 Cu의 첨가량 증가에 따라 전도도가 약간 감소하는 경향을 보였다. Mg의 첨가효과는 상대적으로 더 큰 것을 알 수 있는데, 동일 Cu에서 Mg의 함량을 0.5에서 1%로 증가시킴에 따라 전도도의 저하가 뚜렷하게 관찰되었다. 본 실험합금들에서의 Cu 및 Mg함량은 알루미늄의 고용한도 이하이므로 제2상의 형성에 기여하고 남은 합금원소는 기지에 고용될 것으로 생각된다. 고용상태에서 알루미늄의 전기전도도를 저하시키는 상대적인 정도는 Mg이 더 큰 것으로 알려져 있다[3].

Al-Fe-Cu-Mg합금의 주조상태 인장강도를 Fig. 7에 비교하여

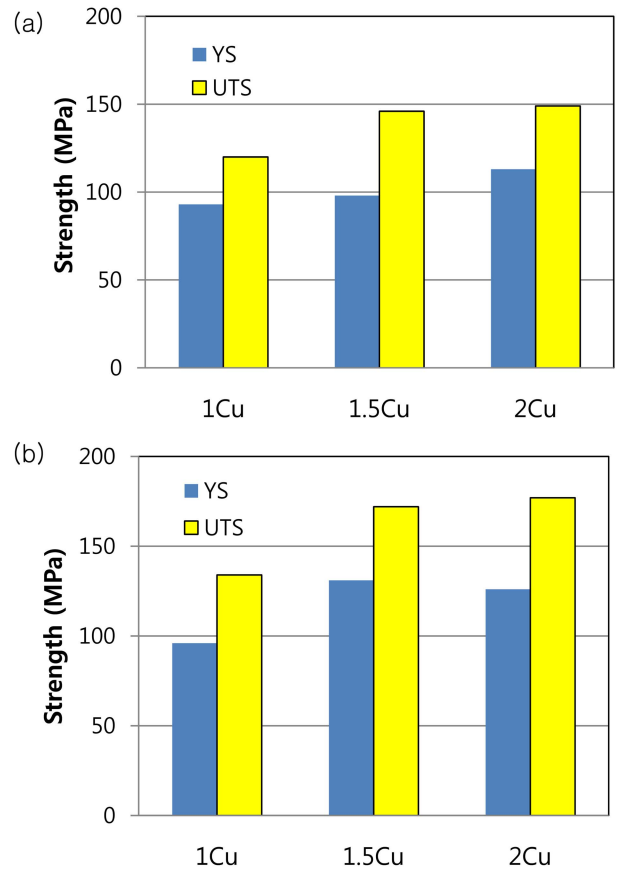


Fig. 7. Tensile strength of as-cast Al-0.5Fe-Cu-Mg alloys: (a) xCu-0.5Mg, (b) xCu-1Mg.

나타내었으며, Cu 및 Mg의 첨가량이 증가하면 강도도 비례하여 점차 증가하는 추세를 보이고 있다, 하지만 Mg의 함량에 상관없이 Cu의 함량이 1.5에서 2%로 증가한 경우는 1에서 1.5%로 증가한 경우에 비해 강도증가가 덜 현저한 것을 알 수 있었다. 전술한 미세조직의 관찰결과를 근거로 이러한 강도증가는 첨가된 합금원소 Cu와 Mg의 지지고용 및 제2상의 형성에 기인한 것으로 생각되며, 요구 물성에 따라 화학조성을 조절하여 일정 부분 전도도와 강도를 변화시킬 수 있는 유용한 정보로 생각된다. 동일한 첨가량이라도 Mg이 Cu에 비해 알루미늄의 고용강화효과가 더 큰 것으로 알려져 있으며, 일정량 이상 첨가된 합금원소의 상당부분은 고용되지 않고 제2상의 형성에 사용되어 강화효과에 기여하기 때문에 1.5%이상의 Cu 첨가효과는 상대적으로 크지 않았던 것으로 추정된다[3,12].

3.3 Al-Fe-Cu-Mg합금의 주조특성

합금조성별로 DSC 열분석을 실시하여 얻은 결과를 Table 2에 나타내었으며, 동일 Mg함량에서 Cu의 첨가량이 증가하면 주로 고상선 온도의 저하가 현저하게 발생하여 결과적으로 응고구간이 넓어지는 경향을 보이고 있다. Mg의 경우에도 Cu와 유사한 영향을 미치는 것으로 보이는데, 즉 동일 Cu함량에서

Table 2. Thermal analysis results of Al-0.5Fe-Cu-Mg alloys (°C).

	Liquidus Temp.	Solidus Temp.	Solidification Range
1Cu-0.5Mg	657	620	37
1Cu-1Mg	655	612	43
1.5Cu-0.5Mg	657	612	45
1.5Cu-1Mg	656	601	55
2Cu-0.5Mg	654	602	52
2Cu-1Mg	650	590	60

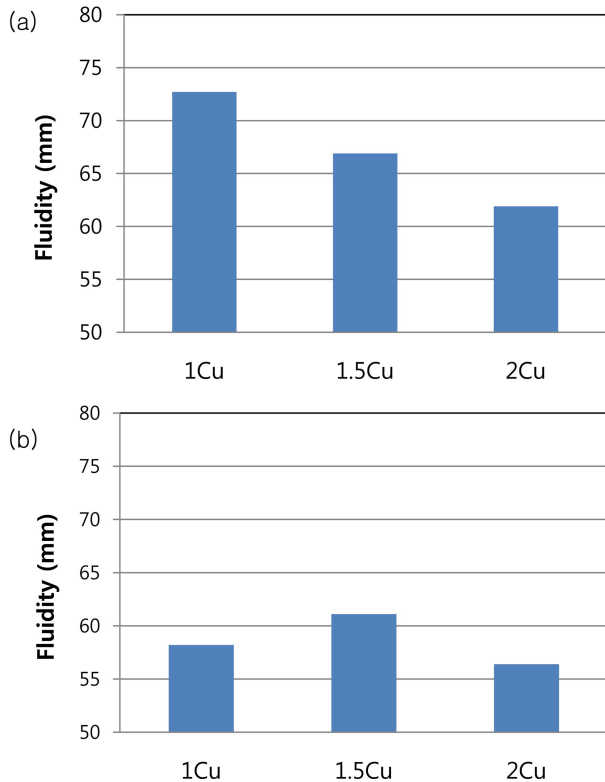


Fig. 8. Fluidity serpentine test results of as-cast Al-0.5Fe-Cu-Mg alloys: (a) xCu-0.5Mg, (b) xCu-1Mg.

Mg을 0.5에서 1%로 증가시키면 뚜렷한 고상선 온도의 저하와 더불어 응고구간의 확대가 관찰된다.

Fig. 8에서는 유동도에 미치는 Cu 및 Mg의 첨가효과를 보여주고 있는데, Table 2의 응고구간으로부터 예측할 수 있듯이 동일 0.5%Mg에서는 Cu의 첨가량이 증가하면 합금들이 상대적으로 낮은 유동도를 나타냄을 알 수 있다. 즉, 전술한 바와 같이 합금의 유동도는 많은 변수들과 연관되어 있지만 응고구간에 반비례하는 일반적인 경향이 알려져 있으므로 유동도에 미치는 Cu의 영향은 어느 정도 설명이 가능하다[7]. 그러나 1%Mg에서의 유동도 결과는 응고구간과 연관하여 설명하기는 어려운데, Cu의 첨가량이 증가하면 응고구간이 마찬가지로 확대되지만 유동도는 이와 밀접한 연관성을 보이지 않기

때문이다.

합금원소 Mg은 산소와의 친화력이 높기 때문에 알루미늄에 첨가되면 용탕의 산화가 용이하고 표면에 산화피막이 형성되기 쉬운 상황에 놓이게 된다. 유동도 시험 중 좁은 통로를 흐르는 용탕의 선단부에 산화피막이 형성되면 표면에너지 증가로 상당한 역압력(back pressure)가 발생할 수 있는데, 이러한 효과가 1%Mg합금에서 전반적으로 낮은 유동도를 나타내는데 크게 작용한 것으로 판단된다. 유동도에 영향을 미치는 변수 중에는 응고 중 형성되는 금속간화합물이 있으며, Al-Si합금의 경우 Fe의 첨가로 인한 금속간화합물의 형성으로 유동도가 감소하는 거동이 보고된바 있다[13]. 하지만 본 시험합금들에는 Fe가 일정량 그리고 비교적 소량 첨가되어 있으므로 그 효과는 크지 않을 것으로 사료된다.

4. 결 론

고전도성 알루미늄합금계인 Al-0.5Fe-Cu-Mg합금의 미세조직, 전도성, 인장강도 및 유동도 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Al-Fe-Cu-Mg합금의 주조상태 미세조직은 알루미늄 기지의 수지상간 및 결정립계에 Al_2CuMg , Al_2Cu 또는 Al_7Cu_2Fe 석출상이 형성된 특징을 나타냈다.
- 2) Al-Fe-Cu-Mg합금의 전기전도도는 일반적인 주조용 Al-Si계 합금들에 비해 현저하게 우수한 것을 확인할 수 있었으며, Cu 및 Mg의 첨가량에 비례하여 점차 감소하는 경향을 나타내었다.
- 3) 주조상태 인장강도는 Cu 및 Mg의 함량 증가에 따라 뚜렷하게 증가하는 모습을 나타내었으나 2%Cu이상에서는 증가폭이 크게 감소하였다.
- 4) 합금의 유동도는 Cu함량이 증가함에 따라 응고구간의 감소로 인해 감소하는 경향을 나타내었으며, Mg의 첨가량이 증가하면 Cu함량에 상관없이 비교적 낮은 유동도를 보였다.

감사의 글

본 연구는 산업자원통상부 산업원천기술개발사업의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- [1] F. Cardarelli, 'Materials Handbook', Springer (2000) 45-57.
- [2] Yun H.S, Kim J.M, Park J.S, Kim K.T and Ko S.H, J. Korea Foundry Soc., "Properties and casting capabilities of Al-Fe-Zn-Cu alloys for high conductivity parts", **33** (2013) 242-247.
- [3] Kim K.T, Lim Y.S, Shin J.S, Ko S.H and Kim J.M, J. Korea Foundry Soc., "Effects of Zn and Mg amounts on the properties of high thermal conductivity Al-Zn-Mg-Fe alloys for die casting", **33** (2013) 113-121.

- [4] Y.D Kwon and Z.H. Lee, *Mater. Sci. Eng. A*, "The effect of grain refining and oxide inclusion on the fluidity of Al-4.5Cu-0.6Mn and A356 alloys", **360** (2003) 372-376.
- [5] A. Heidarzadeh, M. Emamy, A. Rahimzadeh, R. Soufi, D. Sohrabi Baba Heidary and Sh. Naibi, *J. Mater. Eng. Performance*, "The effect of copper addition on the fluidity and viscosity of an Al-Mg-Si alloy", **23** (2014) 469-476.
- [6] W. Prukkanon, N. Srisukhumbowornchai and C. Limmaneevichitr, *J. Alloys Compd.*, "Influence of Sc modification on the fluidity of an A356 aluminum alloy", **487** (2009) 453-457.
- [7] K.R. Ravi, R.M. Pillai, K.R. Amaranathan, B.C. Pai, and M. Chakraborty, *J. Alloys Compounds*, "Fluidity of aluminum alloys and composites: a review", **456** (2008) 201-210.
- [8] J.M. Kim, H.S. Yun, J.S. Park, and K.T. Kim, *Int. J. Cast Met. Res.*, "Microstructure and hot cracking susceptibility of high conductivity Al-Fe-Si alloys", **27** (2014) 141-145.
- [9] W. Zhang, B. Lin, D.T. Zhang and Y.Y. Li, *Mater. Design*, "microstructures and mechanical properties of squeeze cast Al-5.0Cu-0.6Mn alloys with different Fe content", **52** (2013) 225-233.
- [10] C. Mondal and A.K. Mukhopadhyay, *Mater. Sci. Eng. A*, "On the nature of T(Al₂Mg₃Zn₃) and S(Al₂CuMg) phases present in as-cast and annealed 7055 aluminum alloy", **391** (2005) 367-376.
- [11] J.R. Davis, 'ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys', ASM International (1993) 722-723.
- [12] J.F. Shackelford, 'Introduction to materials science for engineers', Macmillan Publishing Co. (1985) 582-584.
- [13] E. Taghaddos, M.M. Hejazi, R. Taghiabadi and S.G. Shabestari, *J. Alloys Compd.*, "Effect of iron-intermetallics on the fluidity of 413 aluminum alloy", **468** (2009) 539-545.