 논문

다이캐스팅용 Al-Zn-Mg-Fe 합금의 특성에 미치는 Zn 및 Mg 첨가의 영향

김기태[†] · 임영석 · 신제식 · 고세현 · 김정민 *

한국생산기술연구원 주조기술센터, *한밭대학교 신소재공학부

Effects of Alloying Elements on the Properties of High Strength and High Thermal Conductivity Al-Zn-Mg-Fe Alloy for Die Casting

Ki-Tae Kim[†], Young-Suk Lim, Je-Sik Shin, Se-Hyun Ko and Jeong-Min Kim*

Foundry Technology Center, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 406-800, Korea

*Dept. of Applied Materials Eng., Hanbat National University Daejeon 305-719, Korea

Abstract

The effects of alloying elements on the solidification characteristics, microstructure, thermal conductivity, and tensile strength of Al-Zn-Mg-Fe alloys were investigated for the development of high strength and high thermal conductivity aluminium alloy for die casting. The amounts of Zn and Mg in Al-Zn-Mg-Fe alloys had little effect on the liquidus / solidus temperature, the latent heat for solidification, the energy release for solidification and the fluidity of Al-Zn-Mg-Fe alloys. Thermo-physical modelling of Al-Zn-Mg-Fe alloys by the JMatPro program showed MgZn₂, AlCuMgZn and Al₃Fe phases in the microstructure of the alloys. Increased amounts of Mg in Al-Zn-Mg-Fe alloys resulted in phase transformation, such as MgZn₂ ⇒ MgZn₂ + AlCuMgZn ⇒ AlCuMgZn in the microstructure of the alloys. Increased amounts of Zn and Mg in Al-Zn-Mg-Fe alloys resulted in a gradual reduction of the thermal conductivity of the alloys. Increased amounts of Zn and Mg in Al-Zn-Mg-Fe alloys had little effect on the tensile strength of the alloys.

Key words: Aluminum alloy, Die casting, Thermal conductivity, Tensile strength.

1. 서 론

자동차 산업에서의 신재생에너지 사용과 연비향상 등 지구환경보호 추세에 따라서 하이브리드차를 포함한 친환경 자동차 개발 및 생산이 활발하게 진행되고 있으며, 이에 따른 모듈, 부품, 소재 관련 기술개발이 빠르게 추진되고 있다. 내연기관차 뿐만 아니라 전기차, 하이브리드차, 연료전지차 등 친환경 자동차의 고효율화 및 고출력화가 중요한 기술 이슈로 다루어지고 있으며, 특히 인버터 하우징, 모터 하우징, LED 램프 하우징 등의 열관리 부품의 에너지 효율 향상을 위한 고효율 부품소재 적용이 요구되고 있다. 또한 전기, 전자기기의 고출력화 추

세에 따라 제품의 효율을 향상시키고 신뢰성을 높일 수 있는 방열부품의 중요성이 증대되고 있다. 특히 차세대 친환경 조명 원으로 주목받고 있는 LED 조명의 경우 전기 에너지에서 빛 에너지로 변환되는 과정 중에 약 70~85% 가량이 열에너지로 방출되고 있어[1], 고효율 방열부품의 개발이 매우 중요한 이슈로 부각되고 있다. 이러한 열관리 부품은 지금까지 대부분 열전도도가 95 W/mK 정도인 알루미늄 소재(ADC12)를 사용하여 다이캐스팅 기술에 의하여 생산되고 있다. 또한 이외의 다이캐스팅용 Al-Si 및 Al-Mg 합금들도 90~130 W/mK 정도의 열전도도를 나타내고 있는 수준이다. 그러나 자동차 및 전자기기용 열관리 부품의 에너지 효율 및 신뢰성 향상을 위해서는 일

Received: July 12, 2013 ; Revised: July 24, 2013 ; Accepted: July 30, 2013

[†]Corresponding author: Ki-Tae Kim (KITECH)

Tel: +82-32-850-0422, Fax: +82-32-850-0410

E-mail: kitae@kitech.re.kr

Journal of Korea Foundry Society

2013, Vol. 33 No. 4, pp. 171~180

<http://dx.doi.org/10.7777/jkfs.2013.33.4.171>

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.

정한 수준의 인장강도와 열전도도를 나타내면서 우수한 주조성을 갖는 알루미늄 합금개발이 필수적으로 선행되어야 한다. 최근에 고강도와 고열전도도를 나타내는 다이캐스팅용 알루미늄 합금에 대한 관심이 높아지면서 Al-Zn 합금계에 대한 연구개발이 활발하게 이루어지고 있다[2-4]. Al-Zn 합금계는 대부분 압출, 압연 등의 소성가공용 합금소재로서 사용되고 있으며, 석출강화 열처리 후 600MPa 수준의 높은 인장강도를 나타내고 있다. 그러나 주조용 Al-Zn 합금계는 300MPa 정도의 인장강도를 나타내지만 주조성이 열악하여 주조용 합금소재로 사용하는 데에 한계가 있기 때문에 주조 크랙 방지 및 유동성 향상 등 주조성 향상을 위한 합금조성 개량, 주조속도 조절, 냉각속도 조절 및 결정립 미세화 등과 같은 여러 연구결과가 보고되었다[5-14]. 그러나 다이캐스팅용 Al-Zn-Mg 합금의 응고특성, 열전도도, 인장강도 및 미세조직에 미치는 합금원소 첨가의 영향에 대하여 보고된 연구결과는 거의 없다.

따라서, 본 연구에서는 230MPa 이상의 인장강도를 나타내면서 동시에 130 W/mK 이상의 열전도도와 우수한 주조성을 갖는 다이캐스팅용 고강도, 고열전도도 Al-Zn-Mg-Fe 합금개발을 목적으로 하여, Al-Zn-Mg-Fe 합금의 응고특성, 열전도도, 인장강도 및 미세조직에 미치는 Zn 및 Mg 첨가의 영향을 조사하고자 하였다. 이를 위하여 Al-Zn-Mg-Fe 합금이 우선 230MPa 이상의 인장강도와 130 W/mK 이상의 열전도도를 나타낼 수 있도록 합금을 설계하였으며, 주조성 향상, 인장 강도 향상 및 금형 소착 방지에 합금 효과를 나타낼 수 있도록 Mg, Zn 및 Fe 등의 합금원소 첨가량을 조절하였다. 이와 같이 설계한 Al-Zn-Mg-Fe 합금에서 Zn 및 Mg 첨가에 따른 응고 특성, 열전도도, 인장강도 및 미세조직의 변화를 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1 합금 설계

고효율 열관리 부품에 적용할 수 있는 우수한 인장강도와 열전도도를 나타내는 다이캐스팅용 알루미늄 합금을 개발하기 위해서는 일정한 수준의 인장강도, 우수한 열전도도 및 주조성을 동시에 만족시키는 합금 설계가 필요하다. 이를 위하여 Table 1[15]에서와 같이 합금원소가 알루미늄의 전기비저항[16], 응고에너지[17], 용탕점도[18] 및 인장강도[16]에 미치는 영향을 종합적으로 고려하여 Zn 및 Mg을 주요 합금원소로 선택하였으며, 다이캐스팅시에 용탕의 금형과의 소착성을 줄이기 위하여 Fe를 추가 합금원소로 첨가하는 Al-Zn-Mg-Fe 합금계를 선정하였다.

먼저 알루미늄의 합금원소 첨가에 따른 열전도도의 영향을 살펴보면, 알루미늄 합금의 전기전도도와 열전도도는 Wiedemann-Franz식과 같이 선형적인 관계가 있고[16], 합금원소의 첨가량이 적을 경우에는 합금의 열전도도 예측에 전기전도도를 유용하게 활용할 수 있다. Table 1에서 합금원소 첨가에 따른 알루미늄의 전기 비저항 영향은 합금원소의 종류에 따라서 크게 달라지며 알루미늄에의 고용도 이내와 고용도를 초과하는 경우가 확연히 다르게 나타난다. 알루미늄의 전기 비저항 증가를 줄려면, 즉 알루미늄의 열전도도 감소를 최소화하려면 알루미늄에의 고용도가 낮은 원소(Fe, Ni), 알루미늄에의 고용도 내에서의 전기 비저항 증가 효과가 작은 원소(Cu, Mg, Ni, Si, Zn)를 합금원소로 선택하여야 한다.

그리고 알루미늄의 주조성에 영향을 미치는 주요 인자로서 본 연구에서는 Table 1에서와 같이 합금원소 첨가에 따른 알

Table 1. Effects of alloying elements on electrical resistivity, energy release for solidification, viscosity and strength of aluminum.

Element	Maximum solubility in Al (wt%)	Resistivity		Energy release for solidification				Strength			
		Resistivity increment of Al per wt% ($\mu\Omega\text{cm}$)		Latent heat, H of pure elements (kJ/kg)	Specific heat, c' of pure elements (kJ/kg)	H + c'DT increment of Al per wt% (kJ/kg)	Viscosity variation of Al with alloying	Yield strength /%addition		Tensile strength /%addition	
		In solution	Out of solution					MPa /at%	MPa /wt%	MPa /at%	MPa /wt%
Cr	0.77	4.00	0.180	402	0.66	-0.3	(+)				
Cu	5.65	*0.34	0.030	205	0.45	-2.5	(+)	16.2	13.8	88.3	43.1
Fe	*0.05	2.56	0.058	272	0.78	-1.5	(+)				
Li	4.00	3.31	0.680	422	4.46	*3.7					
Mg	14.90	*0.54	0.220	362	1.34	*0.0	*(-)	17.2	18.6	51.0	50.3
Mn	1.82	2.94	0.340	268	0.70	-1.6	(+)	-	30.3	-	53.8
Ni	*0.05	*0.81	0.061	292	0.56	-1.5	(+)				
Si	1.65	*1.02	0.088	1,804	0.93	*14.0	*(-)	9.3	9.2	40.0	39.6
Ti	1.00	2.88	0.120	366	0.68	-0.6	(+)				
V	0.50	3.58	0.280	329	0.62	-1.1					
Zn	82.80	*0.09	0.023	111	0.48	-3.4	*(0)	6.6	2.9	20.7	15.2
Zr	0.28	1.74	0.044	212	0.37	-2.5					

Table 2. Intermetallic phases in aluminum-rich aluminum alloy systems.

alloy systems	Intermetallic phase
binary systems	Ag ₂ Al, AlB ₂ , CaAl ₄ , Co ₂ Al ₉ , CrAl ₇ , CuAl ₂ , FeAl ₄ , FeAl ₆ , AlLi, Mg ₂ Al ₃ , MnAl ₆ , NiAl ₃ , NiAl, AlSb, TiAl ₃ , VAl ₆ , ZrAl ₄ , TiB ₂ , Mg ₂ Si, Mg ₂ Zn ₁₁ , MgZn ₂
ternary systems	Cr ₂ Mg ₃ Al, Cr ₄ Si ₄ Al ₁₃ , Cu ₂ FeAl ₇ , Cu ₅ Li ₂ Al ₁₅ , CuLiAl ₂ , CuMgAl ₂ , CuMgAl, CuMg ₄ Al ₆ , FeNiAl ₉ , Fe ₂ SiAl ₈ , Mg ₃ Zn ₃ Al ₂ , Mg ₂ MnAl ₁₀ , Mn ₃ SiAl ₁₀
quaternary systems	CuMgAlZn, Cu ₂ Mg ₈ Si ₆ Al ₅ , CuMg ₅ Si ₄ Al ₄ , FeMg ₃ Si ₆ Al ₈

루미늄의 응고에너지 및 유동도를 고려하였다. 응고에너지는 응고잠열(H)에 비열(c')을 이용하여 과열도(ΔT) 100°C를 가정하여 구한 에너지 증분(c' ΔT)을 더한 값으로 정의하여 사용하였다. Table 1에 정리된 합금화에 따른 알루미늄의 응고에너지 변화 효과는 합금원소별로 계산된 응고에너지를 단순 혼합물 법칙(Simple rule of mixture)을 이용하여 구한 값들이다. 이렇게 정의된 응고에너지는 그 값이 클수록 주형 내에서의 응고시간을 늘려 유동도를 증가시키는 효과를 기대할 수 있는데, 대부분의 원소가 알루미늄에 첨가됨에 따라 응고에너지를 감소시키는 효과를 야기하였고 Si, Li, Mg 만이 순 알루미늄 대비 응고에너지를 증가시키거나 동등 수준을 유지하는 효과가 기대되었다. 또한 용탕의 점도가 낮을수록 유동도는 증가하게 되는데, Mg과 Si는 알루미늄의 용탕 점도를 감소시키는 효과가 있으며 Zn의 경우에는 별 영향이 없으며 나머지 원소들은 대부분 알루미늄 용탕의 점도를 증가시키는 효과가 있다.

또한 합금원소 첨가에 따른 알루미늄의 인장강도에 미치는 영향은 Table 1과 같으며, 알루미늄의 강도 향상을 위해서는 합금원소 첨가에 따른 알루미늄의 인장강도 증가에 미치는 효과가 큰 원소를 선택하여야 한다. 그리고 Table 2와 같이 알루미늄과 합금원소 사이 또는 합금원소들 사이에 석출물 혹은 금속간 화합물이 생성될 수 있는 합금원소를 선택하여 합금원소 첨가에 따른 알루미늄의 전기 비저항의 증가는 최소화 하면서 동시에 알루미늄의 강도증가에 기여할 수 있도록 하여야 한다.

지금까지 살펴본 합금원소 첨가에 따른 알루미늄의 전기비저항, 응고에너지, 유동도 및 인장강도에 미치는 영향의 관점에서, Table 1에 유리한 영향을 미칠 것으로 판단되는 합금원소에 * 표시를 하였다. 이에 따라서 본 연구에서는 합금원소 첨가에 따른 알루미늄의 열전도도와 주조성 그리고 인장강도에 미치는 영향을 종합적으로 고려하여 Zn 및 Mg을 주요 합금원소로 선택하였으며, 다이캐스팅시에 용탕의 금형과의 소착성을 줄이기 위하여 Fe를 추가 합금원소로 첨가하는 Al-Zn-Mg-Fe 합금계를 선정하였다. 그리고 Al-Zn-Mg-Fe 합금이 230MPa 이상의 인장강도와 130 W/mK 이상의 열전도도를 나타낼 수 있도록 하기 위하여, Zn 첨가량이 6 wt%인 합금에서의 Mg 첨가량은 0.6~2 wt% 범위로 설계하였고 Zn 첨가량이 8 wt%인 합금에서

의 Mg 첨가량은 0.8~2.7 wt% 범위로 설계하였다. 그리고 Fe 첨가량은 용탕의 금형과의 소착성을 줄이기 위하여 대표적 다이캐스팅용 합금인 ADC12 합금과 비슷한 수준인 0.5~1.0 wt% 범위로 설계하였다.

2.2 합금 제작 및 특성 평가

Al, Zn 및 Mg 등의 순금속(99.9%)과 Al-50%Fe 모합금을 흑연 도가니를 사용하여 전기로에서 용해하였으며, 용탕의 유동성 확보와 과열에 따른 산화를 최소화하기 위하여 용탕온도를 730°C~750°C로 유지하였다. 다음에 환원성 플럭스(flux)를 용탕 표면에 산포하고 교반하여 용탕 내 산화물을 제거하였으며, Ar 가스 및 흑연 플런저를 사용하여 용탕의 탈수소처리를 수행하였다. 용해 및 주조가 완료된 합금으로부터 채취한 시험편들의 화학조성을 분광 분석기를 이용하여 분석한 결과를 Table 3에 나타내었다. Al-Zn-Mg-Fe 합금의 인장특성, 열전도도 및 미세조직을 조사하기 위하여 계단형 금형에 합금을 주조하여 Fig. 1과 같은 시험편을 얻었다. 계단형 시험편의 크기는 폭 100 mm, 높이 25 mm, 각각의 계단 두께는 3, 6, 9 및 12 mm이며 일정한 주조조건에 따라서 주조하였다. 유동도 평가를 위하여 Fig. 2와 같은 spiral length 780 mm의 나선형 금형을 이용하여 일정한 주조조건에 따라서 주조하였다. 용탕 온도 730°C, 금형 온도 200°C의 조건으로 시험편을 주조하였다. 주조된 계단형 시험편은 120°C에서 24시간 시효 처리하였다. 인장시험은 3 mm 및 6 mm 두께의 계단형 시험편을 가공하여 ASTM B 557M 규격에 따라 상온에서 3회 측정하고 이의 평균값을 인장강도로 하였다. 합금의 예측 열전도도는 Table 1의 합금원소별 전기비저항 값을 이용하여 먼저 전기전도도를 계산한 후에 전기전도도-열전도도 관계식인 Wiedemann-Franz 식[16]을 이용하여 열전도도로 환산하였다. 합금의 열전도도 측정은 먼저 와전류 방식(SIGMASCOPE SMP10 모델)으로 상온에서 전기전도도를 측정하고 Wiedemann-Franz의 관계식을 이용하여 환산하는 방법을 사용하였다. 그리고 시험편의 생성상 및 미세조직은 SEM, EDX 및 XRD 등을 이용하여 분석하였

Fig. 1. Step mold specimen for evaluation of the physical properties and tensile strength of Al-Zn-Mg-Fe alloys.

Fig. 2. Spiral mold for evaluation of the fluidity of Al-Zn-Mg-Fe alloys.

고, 합금의 액상선 및 고상선 온도 그리고 응고잠열은 TG/DTA 열분석기(SDT Q600 모델)를 이용하여 Ar 분위기에서 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 의 승온속도로 700°C 까지 승온하여 측정하였다. 한편 실험 합금의 열물리적 특성의 변화 거동을 이해하기 위해서 상용 프로그램 JMatPro 5.0을 이용하여 열물리 모델링을 수행하였다. 열물리 모델링에서는 Sheil 응고 모델을 사용하여 응고 공정의 상평형을 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 응고 온도, 응고 잠열 및 유동도

Fig. 3 및 Fig. 4는 각각 Al-Zn-Mg-Fe 합금의 조성에 따른 액상선 온도(T_L), 고상선 온도(T_S) 및 그 차이($T_L - T_S$) 그

(a) Al-6%Zn-x%Mg-Fe alloys

(b) Al-8%Zn-x%Mg-Fe alloys

Fig. 3. Variation of liquidus and solidus temperature of Al-Zn-Mg-Fe alloys with Zn and Mg contents.

(a) Al-6%Zn-x%Mg-Fe alloys

(b) Al-8%Zn-x%Mg-Fe alloys

Fig. 4. Variation of latent heat on solidification of Al-Zn-Mg-Fe alloys with Zn and Mg contents.

리고 응고잠열(H)을 나타낸 것이다. 액상선 온도(T_L)와 고상선 온도(T_S)의 차이($T_L - T_S$) 및 응고잠열(H)은 합금의 응고 특성 및 유동도에 영향을 미치는데, 응고 온도 차이가 클수록 머쉬 타입의 응고거동이 지배적으로 작용하여 용탕의 유동도는 감소하게 되고 또한 응고잠열이 작을수록 용탕의 유동도는 감소하게 된다[19]. 유동도에 관한 Flemings의 이론식을 살펴보면(식 1), 액상 금속의 유동도 L_f 는 용탕의 밀도 ρ , 응고잠열 H , 비열 c 와 함께 유동 채널 직경 a , 용탕 주입속도 v , 용탕 과열도 ΔT 에 비례하고, 계면열전달계수 h 및 합금의 용융점과 급형온도의 차이 $T_M - T_o$ 에 반비례한다[19].

$$L_f \approx \frac{\rho a v}{2h(T_M - T_o)}(H + c' \Delta T) \quad (1)$$

Fig. 5. Variation of spiral length of Al-Zn-Mg-Fe alloys with Zn and Mg contents.

Fig. 6. Variation of energy release for solidification of Al-Zn-Mg-Fe alloys with Zn and Mg contents.

Zn이 6 wt% 첨가된 합금들의 액상선 온도(T_L)와 고상선 온도(T_S)의 차이($T_L - T_S$)는 33~63°C 범위이고 Zn이 8 wt% 첨가된 합금들의 액상선 온도(T_L)와 고상선 온도(T_S)의 차이($T_L - T_S$)는 38~70°C 범위로서, Mg 첨가량이 증가함에 따라서 $T_L - T_S$ 가 증가하는 하지만 그 값은 적은 것으로 판단된다. 상대 비교로서 Al에 Si를 1.65 wt% 첨가하였을 경우, 평형상태도에서의 $T_L - T_S$ 는 73°C이다. 그리고 Zn이 6 wt% 첨가된 합금들의 응고잠열은 249~305 J/g 범위이고 Zn이 8 wt% 첨가된 합금들의 응고잠열은 231~326 J/g 범위로서 Zn 및 Mg 첨가량에 따라서 응고잠열의 차이가 작은 것을 알 수 있다. Table 1에서 Al에 합금원소를 첨가하였을 때의 응고잠열(kJ/kg)은 Si(1,804), Mg(362), Zn(111)순으로 Zn 및 Mg이 Si에 비하여 응고잠열이 월등히 작은 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 5는 Al-Zn-Mg-Fe 합금의 응고에너지($H + c\Delta T$)의 변화를 나타낸 것으로서, Zn 및 Mg 첨가량에 따라서 응고에너지는 487~499 kJ/kg 범위로 거의 차이가 없는 것을 알 수 있다. 따라서 Zn 및 Mg 첨가량이 Al-Zn-Mg-Fe 합금의 응고온도, 응고잠열 및 응고에너지에 미치는 영향이 작기 때문에 실험합금의 용탕의 유동도에 미치는 영향은 미미할 것으로 예상되는데, Fig. 6은 Al-Zn-Mg-Fe 합금의 유동도 변화를 나타낸 것으로서 합금별로 약간의 유동도의 차이가 있지만 큰 차이는 없는 것으로 판단된다.

3.2 열물리 모델링

Fig. 7은 Al-Zn-Mg-Fe 합금의 열물리적 특성의 변화 거동을 이해하기 위해 상용 프로그램 JMatPro 5.0을 이용하여 열

물리 모델링을 수행하고 온도별 생성상의 변화를 나타낸 것이다. Al-Zn-Mg-Fe 합금에서 응고시에 나타나는 주요 생성상으로는 $MgZn_2$ (M-phase), $AlCuMgZn$ (T-phase) 및 Al_3Fe 등이 있는 것을 알 수 있다. Zn 및 Mg 첨가량 변화에 따른 Al-Zn-Mg-Fe 합금에서의 생성상의 변화를 살펴보면, Al_3Fe 상은 모든 합금에서 나타나고, Mg를 포함한 상은 Mg 첨가량이 증가함에 따라서 $MgZn_2 + AlCuMgZn \rightarrow AlCuMgZn$ 으로 변화하는 것을 알 수 있다. Table 4는 Fig. 7의 열물리 모델링 결과로부터 Zn 및 Mg 첨가량에 따라서 상온에서 Al-Zn-Mg-Fe 합금의 생성상의 중량분을 변화를 나타낸 것이다. Mg 첨가량 증가에 따라서 $MgZn_2$ 와 $AlCuMgZn$ 상의 분율 합계가 Zn이 6 wt% 첨가된 합금에서는 1.14%에서 3.09%로, Zn이 8 wt% 첨가된 합금에서는 1.82%에서 4.92%로 증가하는 것을 알 수 있다.

Table 3. Chemical compositions of Al-Zn-Mg-Fe alloys (wt%).

alloys	Zn	Mg	Fe	Al
1	6.06	0.64	1.02	92.23
2	6.10	1.25	1.04	91.45
3	6.05	1.59	0.53	91.65
4	5.92	2.08	0.60	91.21
5	7.93	0.73	0.93	90.30
6	8.14	1.62	0.97	89.09
7	7.90	2.07	0.49	89.46
8	8.10	2.71	0.56	88.50

Fig. 7. Phase equilibrium of Al-Zn-Mg-Fe alloys calculated by JMatPro.

Table 4. Weight fraction of phases on Al-Zn-Mg-Fe alloys calculated by JMatPro.

alloys	Al ₃ Fe	MgZn ₂	AlCuMgZn
1	2.362	1.142	-
2	2.369	0.847	1.203
3	1.163	0.300	2.121
4	1.166	-	3.094
5	2.367	1.820	-
6	2.376	1.599	1.702
7	1.165	0.667	3.206
8	1.169	-	4.916

3.3 미세조직

Fig. 8은 XRD를 이용하여 Al-Zn-Mg-Fe 합금의 생성상을 분석한 결과를 나타낸 것이다. Al-Zn-Mg-Fe 합금의 생성상으로는 Al₃Fe, MgZn₂ 및 AlMgZn등이 나타난 것을 알 수 있는데, 대부분의 합금에서 XRD 분석결과와 열물리 모델링 결과와 대부분 일치한다. 다만 금형주조 정도의 빠른 냉각속도로서 주조한 Al-Zn-Mg-Fe 합금에서의 Al-Fe 화합물로는 Al₃Fe가 아닌 Al₆Fe가 나타난 것으로 판단되며, AlCuMgZn는 Cu가 포함되지 않은 AlMgZn으로 나타났다. 또한 alloy 2 및 alloy 3에서는 Fig. 6의 열물리 모델링 결과에서는 MgZn₂ 및

Fig. 8. XRD analysis results of Al-Zn-Mg-Fe alloys.

AlMgCuZn 상들이 나타났으나, XRD 분석에서는 나타나지 않았는데 이것은 Table 4와 같이 AlMgCuZn과 MgZn₂의 상 분율이 낮기 때문인 것으로 판단된다. 한편 Zn이 8 wt% 첨가된 합금 5~8에서 MgZn₂ 및 AlMgZn 상의 피크높이 합계를 측정 한 결과, Mg 첨가량이 증가함에 따라서 MgZn₂ 및 AlMgZn 상의 피크높이 합계는 0.27, 0.61, 0.79, 1.04로 점차 증가하였는데, 이것으로 Zn이 8 wt% 첨가된 합금 5~8에

Fig. 9. SEM microstructures and EDX analysis results of Al-Zn-Mg-Fe alloys.

서 Mg 첨가량이 증가함에 따라서 $MgZn_2$ 및 $AlMgZn$ 상의 분율함계가 증가하는 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 9는 Al-Zn-Mg-Fe 합금의 미세조직을 SEM 및 EDX를 이용하여 분석한 결과이다. Zn이 6 wt% 첨가된 합금 1에서는 Al_6Fe 로 추정되는 정출상이 나타났으나 $MgZn_2$ 는 검출되

지 않았는데, 열물리 모델링 결과에서와 같이 $MgZn_2$ 의 상 분율이 낮기 때문인 것으로 판단된다. 합금 4에서는 Al_6Fe 및 $AlMgZn$ 으로 추정되는 상이 나타난 것을 알 수 있다. 그리고 Zn이 8 wt% 첨가된 합금 5에서는 Al_6Fe 및 $MgZn_2$ 로 추정되는 상이 나타났으며, Mg 첨가량이 많은 합금 8에서는 Al_6Fe

및 AlMgZn으로 추정되는 상이 나타난 것을 알 수 있다. 이러한 미세조직 분석결과는 열물리 모델링 및 XRD 분석 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

3.4 열전도도

Fig. 10은 Al-Zn-Mg-Fe합금의 조성에 따른 열전도도를 나타낸 것이다. Al-Zn-Mg-Fe 합금의 열전도도는 주 합금원소인 Zn 및 Mg의 조성함수로써 그 경향을 파악할 수 있다. Al-Zn-Mg-Fe 합금의 열전도도는 133~163 W/mK 범위로서 일반 다이캐스팅용 알루미늄 합금(ADC12)의 열전도도(95 W/mK)에 비해 140~171% 수준으로 높다. Fig. 10에서 주 합금원소인 Zn 및 Mg의 첨가량이 증가함에 따라 열전도도가 점차 감소하는 경향을 알 수 있다. 2원계 시스템에서의 알루미늄의 전도도에 미치는 합금원소의 영향에 관한 데이터부터 단순 혼합물 법칙을 이용하여 다음 식과 같이 계산하였다[16].

$$\rho(\mu\Omega\cdot\text{cm}) = 2.67 + 0.094x\text{Zn}(\text{wt}\%) + 0.27\text{Mg}(\text{wt}\%) + 0.029\text{Fe}(\text{wt}\%) \quad (2)$$

$$\sigma(\% \text{IACS}) = 172.41/\rho$$

ρ : electrical resistivity, σ : electrical conductivity

Al-Zn-Mg-Fe 합금의 예측 열전도도는 133~180 W/mK 범

(a) Al-6%Zn-x%Mg-Fe alloys

(b) Al-8%Zn-x%Mg-Fe alloys

Fig. 10. Variation of thermal conductivity of Al-Zn-Mg-Fe alloys with Zn and Mg contents.

위이지만 측정 열전도도는 133~163 W/mK 범위로 상대적으로 낮으며 값의 차이는 0~17 W/mK로 나타났다. 예측 열전도도는 2원계 합금에서 평형 응고시에 알루미늄에의 합금원소 고용도를 참고로 하였지만, 실제 주조한 4원계 합금에서는 각 합금원소의 알루미늄에의 고용도가 달라지기 때문에 예측 열전도도와 측정 열전도도와의 차이가 발생할 수 있다. 또한 4원계 합금에서는 주조시에 합금원소들 간의 다양한 금속간화합물 생성될 수 있고 기타 불순 원소의 영향이 있기 때문이다. 한편 Zn이 6 wt% 첨가된 합금들과 Zn이 8 wt% 첨가된 합금들은 각각 Mg 첨가량 증가에 따라서 예측 열전도도와 측정 열전도도와의 차이가 점차 줄어드는 것을 알 수 있다. 이것은 Table 4의 Al-Zn-Mg-Fe 합금의 열물리 모델링 결과에서 Mg과 Zn의 첨가량 증가에 따라서 MgZn₂와 AlCuMgZn 상의 분율합계가 높아지고 결국 알루미늄에 고용되어 열전도도를 감소시키는 Mg과 Zn의 고용량이 줄어드는 효과인 것으로 판단되며, 또한 이것은 XRD 분석 결과에서도 Zn이 6 wt% 첨가된 합금들은 확인이 어렵지만 Zn이 8 wt% 첨가된 합금들에서는 Mg 첨가량 증가에 따라서 MgZn₂ 및 AlMgZn 상의 분율 합계가 증가한 효과인 것으로 판단할 수 있다.

3.5 인장강도

Fig. 11은 Al-Zn-Mg-Fe 합금의 조성에 따른 인장강도의 측

(a) Al-6%Zn-x%Mg-Fe alloys

(b) Al-8%Zn-x%Mg-Fe alloys

Fig. 11. Variation of tensile strength of Al-Zn-Mg-Fe alloys with Zn and Mg contents.

정치와 예측치를 나타낸 것이다. Al-Zn-Mg-Fe 합금의 측정 인장강도는 Zn 및 Mg 첨가량 증가에 따라서 큰 차이가 없는 것으로 판단되며, Al-Zn-Mg-Fe 합금의 예측 인장강도도 Zn이 6 wt% 및 8 wt% 첨가된 합금에서 Mg 첨가량 증가에 따라서 증가하지만 증가량은 크지 않은 것으로 판단된다. 이것은 Table 4 및 Fig. 8의 Al-Zn-Mg-Fe 합금의 열물리 모델링 결과와 XRD 분석 결과에서 알 수 있는데, 우선 열물리 모델링 결과로부터 Al-Zn-Mg-Fe 합금의 인장강도에 기여하는 것으로 판단되는 $MgZn_2$ 및 $AlCuMgZn$ 상의 분율 합계가 Zn이 6 wt% 첨가된 합금에서 Mg 첨가량 증가에 따라서 1.14%에서 3.09%로 증가하고 Zn이 8 wt% 첨가된 합금에서는 Mg 첨가량 증가에 따라서 1.82%에서 4.92%로 증가하는데, 이 정도의 상 분율의 증가는 Al-Zn-Mg-Fe 합금의 인장강도 증가에 미치는 영향이 크지 않은 것으로 판단된다. 또한 이것은 XRD 분석 결과에서도 Zn이 8 wt% 첨가된 합금들에서는 Mg 첨가량 증가에 따라서 $MgZn_2$ 및 $AlMgZn$ 상의 분율 합계가 증가하지만 증가량이 크지 않아 인장강도에 미치는 효과가 미미한 것으로 판단할 수 있다.

4. 결 론

230MPa 이상의 인장강도와 130 W/mK 이상의 열전도도를 함께 나타낼 수 있는 다이캐스팅용 고강도, 고열전도도 알루미늄 합금개발을 목적으로, Al-Zn-Mg-Fe 합금을 설계하였고 Al-Zn-Mg-Fe 합금의 응고온도, 응고잠열, 열전도도, 인장강도 및 미세조직에 미치는 Zn 및 Mg 첨가의 영향을 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Al-Zn-Mg-Fe 합금에서 6~8 wt% Zn 및 0.6~2.7 wt% Mg 첨가에 따른 액상선 온도(T_L)와 고상선 온도(T_S)의 차이($T_L - T_S$)는 33~70°C, 응고잠열은 231~326 J/g, 그리고 응고에너지($H + c\Delta T$)는 487~499 kJ/kg로서, Zn 및 Mg 첨가는 합금의 응고온도, 응고잠열, 응고에너지 및 유동도에 미치는 영향이 작았다.

2) Al-Zn-Mg-Fe 합금의 열물리 모델링 결과, 주요 생성상으로는 $MgZn_2$, $AlCuMgZn$ 및 Al_3Fe 등이 나타났다. Zn 및 Mg 첨가량 증가에 따라서 각각의 상 분율이 변화되었고 Mg를 포함하는 $MgZn_2$ 및 $AlCuMgZn$ 상의 분율 합계가 증가하였으며, Mg 첨가량 증가에 따라서 $MgZn_2 \Rightarrow MgZn_2 + AlCuMgZn \Rightarrow AlCuMgZn$ 으로 변화하였다.

3) Al-Zn-Mg-Fe 합금에서 Zn이 6 wt% 첨가된 합금들과 Zn이 8 wt% 첨가된 합금들은 각각 Mg 첨가량 증가에 따라서 열전도도가 감소하였으며, 예측 열전도도와 측정 열전도도와의 차이가 점차 줄어들었다.

4) Al-Zn-Mg-Fe 합금에서 6~8 wt% Zn 및 0.6~2.7 wt% Mg 첨가는 인장강도에 미치는 영향이 크지 않았다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 국가플랫폼기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Jang DS, Yu SH and Lee KS, Int. J. Heat & Mass Trans., "Multidisciplinary optimization of a pin-fin radial heat sink for LED lighting applications", **55** (2012) 515-521.
- [2] L. Jen, Y. Xinyan and Z. Wenping, PCT Patent, "High strength, high stress corrosion cracking resistant and castable Al-Zn-Mg-Cu-Zr alloy for shape cast products" WO 2008/036760 (2008).
- [3] J. Dong, J.Z. Cui, F.X. Yu, Z.H. Zhao and Y.B. Zhuo, J. Mater. Proc. Tech., "A new way to cast high-alloyed Al-Zn-Mg-Cu-Zr for super-high strength and toughness" **171** (2007) 399-404.
- [4] Kim KT, Yang JH and Lim YS, J.KFS, "Effects of Zn amounts on the castability and tensile properties of Al-Zn-Mg-Cu alloys for die casting" **30** (2010) 137-141.
- [5] D. Jie, C. Jianzhong, D. Wenjiang, J. Crystal Growth, "Theoretical discussion of the effect of a low-frequency electromagnetic vibrating field on the as-cast microstructures of DC Al-Zn-Mg-Cu-Zr ingots" **295** (2006) 179-187.
- [6] J. Dong, J. Cui, X. Zeng and W. Ding, Mater. Letters, "Effect of low-frequency electromagnetic field on microstructures and macrosegregation of $\phi 270$ mm DC ingots of Al-Zn-Mg-Cu-Zr alloy" **59** (2005) 1502-1506.
- [7] S. Geoffrey K, US Patent, "Method for grain refinement of high strength aluminum casting alloys" 6,645,321 (2003).
- [8] Z. Yubo, C. Jianzhong, Z. Zhihao, Z. Haitao, and Q. Ke, Mater. Sci. Eng. A, "Effect of low frequency electromagnetic field on casting crack during DC casting superhigh strength aluminum alloys ingots" **406** (2005) 286-292.
- [9] B. Zhang, J. Cui and G. Lu, Mater. Sci. Eng. A, "Effect of low-frequency electromagnetic field on microstructures and macrosegregation of continuous casting 7075 aluminum alloy" **355** (2003) 325-330.
- [10] R.K. Paramatmuni, Chang KM, Kang BS and X. Liu, Mater. Sci. Eng. A, "Evaluation of cracking resistance of DC casting high strength aluminum ingots" **379** (2004) 293-301.
- [11] E. Gebhardt, M. Becker and S. Dorner, Aluminium, "Effect of alloying additions on the viscosity of aluminum" **31** (1955) 315-321.
- [12] Kim JM, Park JS, Kim KT and Ko SH, J.KFS, "Effects of Mg contents on the properties and casting characteristics of Al-2Zn-0.2Fe-xMg alloys" **32** (2012) 86-90.
- [13] Cho JS, Kim JM, Sim WJ and Im HJ, J.KFS, "The influence of alloying elements on the fluidity of Al-Zn-Mg alloys" **32** (2012) 127-132.
- [14] Kim KT, Lim YS and Kim JM, J.KFS, "Effects of Mg and Cu amounts on the casting characteristics and tensile property of Al-Zn-Mg-Cu alloys" **32** (2012) 38-43.
- [15] Shin JS, Kim KT, Ko SH, An DJ and Kim MH, J.KFS, "Design and evaluation of aluminum casting alloys for thermal managing application" **33** (2013) 22-31.
- [16] J. E. Hatch, "Aluminum: Properties and physical metallurgy",

- ASM (1984).
- [17] W. F. Gal and, T. C. Totemeier, "Smithells Metals Reference Book", 8th ed., ASM, Oxford (2004).
- [18] A. T. Dinsdale and P. N. Quested, Journal of Materials Science, "The viscosity of aluminum and its alloys-A review of data and models" **39** (2004) 7221-7228.
- [19] M. C. Flemings, "Solidification processing", McGRAW-HILL (1974).