

Mg+Al₂Ca 첨가 ADC12 (Al-Si-Cu) 합금의 미세조직, 인장 및 고주기 피로 특성

김영균¹ · 김민종² · 김세광³ · 윤영옥³ · 이기안^{4, #}

Microstructure, Tensile Strength, and High Cycle Fatigue Properties of Mg+Al₂Ca added ADC12 (Al-Si-Cu) Alloy

Y. K. Kim, M. J. Kim, Shae K. Kim, Y. O. Yoon, K. A. Lee

(Received August 21, 2017 / Revised August 25, 2017 / Accepted September 5, 2017)

Abstract

This study investigated the microstructure, tensile strength, and high cycle fatigue properties of ADC12 aluminum alloys with different Mg+Al₂Ca contents manufactured using die casting process. Microstructural observation identified the presence of α -Al, eutectic Si, Al₂Cu, and Fe-intermetallic phases. The increase of Mg+Al₂Ca content resulted in finer pore size and decreased pore distribution. Room temperature tensile strength tests were conducted at strain rate of 1×10^{-3} /sec. For 0.6%Mg ADC12, measured UTS, YS, and El were 305.2MPa, 157.0MPa, and 2.7%, respectively. For 0.8%Mg ADC12, measured UTS, YS, and El were 311.2 MPa, 159.4 MPa, and 2.4%, respectively. Therefore, 0.8% ADC12 alloy had higher strength and slightly decreased elongation compared to 0.6% Mg ADC12. High cycle fatigue tests revealed that 0.6% Mg ADC12 alloy had a fatigue limit of 150 MPa while 0.8% Mg ADC12 had a fatigue limit of 160MPa. It was confirmed that Mg+Al₂Ca added ADC12 alloy achieved finer, spherical eutectic Si particles, and Al₂Cu phases with greater mechanical and fatigue properties since size and distribution of pores and shrinkage cavities decreased as Mg+Al₂Ca content increased.

Key Words : ADC12, Mg+Al₂Ca, Die Casting, Microstructure, Tensile, Fatigue

1. 서론

최근 고 비중의 구조 재료인 철강을 대체하기 위해 경량 소재, Al 합금 및 Mg 합금에 대한 관심이 증가하고 있다. 그 중 알루미늄 합금은 철강 소재와 비교하여 약 60% 가량 경량화가 가능하고 우수한 비강도, 높은 주조성 및 가공성 그리고 뛰어난 내부식, 내산화 특성의 장점을 가지고 있다[1~3]. 대표적인 주조용 합금인 Al-Si-Cu계 ADC12 합금은 뛰어난

내부식성, 높은 유동성 그리고 주조 시 낮은 분율의 수축공 생성의 장점을 가지고 있어 현재 자동차용 주조재로 활용되고 있다.

ADC12 합금에 대한 공정, 특성 연구들은 다양하게 수행되어왔고, 이와 더불어 특성 향상에 대한 시도도 꾸준히 지속되고 있다. 그 중에서도 ADC12 합금에 대한 Mg의 첨가는 기계적 특성을 향상시키고 추가적으로 소재의 경량화가 가능한 방안으로 알려져 있다. 그러나 과도한 Mg의 첨가 시 해로운 산화

1. 인하대학교 신소재공학과

2. 영신금속공업(주)

3. 한국생산기술연구원

4. 국립 안동대학교 신소재공학부

Corresponding Author : School of Advanced Materials Engineering,
Andong National University, E-mail: keeahn@andong.ac.kr

물이 생성될 수 있어 일반적으로 그 함량을 0.3%로 제한하고 있고, 이에 ADC 합금에서 Mg을 이용한 특성 향상에는 한계가 있어왔다.

최근 Seo 등[4, 5]은 Al 합금에서 Mg 함량을 높여 특성을 향상시키고자 pure Mg 대신 Mg+Al₂Ca 합금을 첨가한 개량화 Al 합금들을 개발하였다. 여기서 Mg+Al₂Ca은 Mg-Al 용탕에 CaO를 첨가하여 Ca 환원을 유발시키고 이 때 생성된 Ca이 Mg-Al 용탕에서 상대적으로 산소 친화도가 높은 Al과 반응함에 따라 얻어진다[6]. 결과적으로 CaO를 첨가하여 Mg+Al₂Ca 합금을 제조하고 이를 ADC12에 첨가하여 Mg 함량을 증가시킬 수 있을 것으로 예상된다. 또한 Al₂Ca 첨가할 경우 Al-Li 및 Al-Zn 합금 등에서 결정립 미세화 및 Si 개량화에 이로인한 영향을 미친다고 보고되고 있다. 이와 함께 근래에는 마그네슘 용해 주조 공정 시 용탕 표면을 보호하기 위해 지구 온난화에 영향을 미치는 온실가스인 SF₆를 사용하고 있는 데 이를 사용하지 않을 수 있어 CaO 사용은 환경적, 경제적으로 많은 이점을 가진다.

한편 Al 합금에 Mg+Al₂Ca 첨가에 관한 관심이 증가함에 따라 기계적 특성과 관련한 연구들이 진행되고 있으며 S.H. Kim 등[7], K.Y. Kim 등[8]은 A2024 및 A7075 합금에 Mg+Al₂Ca를 첨가할 경우 인장, 피로 특성이 향상됨을 확인한 바 있다. 이와 함께 자동차 부품으로 많은 관심을 받고 있는 ADC12 합금에 대해서도 인장 특성에 미치는 Mg+Al₂Ca 첨가 영향에 대한 연구들이 일부 수행된 바 있다[9,10]. 그러나, ADC12를 실제 구조 재료로 사용하기 위해서는 인장 특성뿐만 아니라 피로 특성도 그 중요도가 높음에도 불구하고 현재까지 주조재 ADC12 합금의 피로 특성에 미치는 Mg+Al₂Ca 첨가 영향은 보고된 바 없다.

본 연구에서는 정밀 주조법 중 하나인 die casting 공정을 이용하고 ADC12 합금에 Mg+Al₂Ca 합금을 첨가하여 개량화 ADC12 합금을 제조하였다. 이 때 Mg+Al₂Ca의 형태로 Mg 함량을 제어하여 ADC12 합금의 Mg 함량을 각각 0.6%, 0.8%로 증가시켰다. 본 연구에서는 개량화 다이 캐스팅 ADC12(0.6% Mg, 0.8% Mg)에 대한 미세조직, 인장 그리고 고주기 피로 특성을 조사하였으며 이와 함께 미세조직과 기계적 특성의 상관 관계를 규명하고자 하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 die casting 공정으로 Mg+Al₂Ca 합금을 ADC12 합금에 첨가하여 개량화 ADC12 합금을 제조하였다. 제조된 개량화 ADC12가 적절한 화학 조성을 가지고 있는지 알아보기 위해 inductively coupled plasma(ICP)을 이용하여 화학 조성 분석을 수행하였으며 그 결과를 Table 1에 나타내었다. 두 합금 모두 ADC12의 표준 조성에 준하는 범위의 화학 조성을 보였으며 Mg 함량이 기존 ADC 합금보다 높게 의도한 바 대로 제어되었음을 확인할 수 있었다. 또한, 일부 Mn이 검출되었으며 0.6% Mg, 0.8% Mg 합금에서 각각 0.30, 0.33%로 측정되었다.

제조된 합금들의 생성 상을 알아보기 위해 X-ray diffractometer를 이용하여 상분석을 수행하였다. 이와 함께 미세조직 관찰을 위하여 SiC 연마지(~#2000)와 1 μ m 수준의 diamond suspension을 이용하여 기계적 연마를 수행하였다. 이후 1ml HF + 100ml H₂O 용액으로 에칭한 후 OM(optical microscope) 및 SEM(scanning electron microscope)을 이용하여 미세조직을 관찰하였다. 또한 미세조직에서 원소 분포를 알아보기 위해 기계적 연마 후 EPMA(electron probe micro analyzer)를 이용하여 추가적인 관찰을 수행하였다.

개량화 ADC12 합금의 기계적 특성을 평가하기 위해 상온 인장 및 상온 고주기 피로 시험을 수행하였다. 인장 및 피로 실험의 경우 ASTM E 466 조건에 맞게 시편을 가공하여 실험을 진행 하였으며, 시편의 직경 6mm, 게이지 길이 25mm의 형상을 가지는 봉상 시편을 이용하여 실험을 진행하였다. 인장 및 피로 실험을 진행하기 전, 표면 거칠기의 영향을 줄이기 위해 시편의 표면 부분을 #2000 SiC 연마지로 최종 연마를 하여 표면 결함의 변수를 최소화 하여 실험의 정확성을 높였다. 상온 인장 실험은 MTS 810 장비를 사용하였으며 초기 1 \times 10⁻³/s 변형 속도로 3번 반복 실시했으며 얻어진 결과를 바탕으로 항복 강도, 최대 인장 강도 및 연신율을 분석하고 그 평균 값을 사용하였다. 상온 고주기 피로 실험은 Instron 8501 장비를 이용하여 응력비(R) 0.1, 주파수 10Hz 그리고 응력 제어 조건으로 수행하였다. 또한, 개량화 ADC12(0.6%Mg, 0.8% Mg) 합금의 고주기 피로한(fatigue limit)은 10⁷ 사이클에 도달하였을 때 파괴가 일어나지 않는 최대 응력 조건으로 설정하였다. 한편 인장 및 고 주기 피로 실험 후 파괴

Table 1 chemical compositions of ADC12 alloys used in this study (wt.%)

	Al	Si	Cu	Fe	Zn	Mg	Mn	Ca
ADC12 Standard	Bal.	9.6~12.0	1.5~3.5	~1.0	~1.0	~0.3	~0.3	-
Modified ADC12 (0.6%Mg)	Bal.	11.40	1.70	0.82	0.82	0.60	0.30	0.0070
Modified ADC12 (0.8%Mg)	Bal.	10.72	1.60	0.93	0.93	0.82	0.33	0.0090

거동을 미세 조직과 연계하여 해석하기 위해 SEM 및 EDS를 이용하여 파단면을 분석하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 Mg+Al₂Ca 함량에 따른 미세조직 변화

Fig. 1은 Mg+Al₂Ca 합금을 첨가하여 개량한 ADC12 합금의 초기 미세조직 관찰 결과이다. 여기서 (a)는 0.6% Mg, (b)는 0.8% Mg로 제어된 ADC12 합금들이다. 미세조직 관찰 결과, 일반적으로 다이캐스팅을 이용하여 제조한 알루미늄 합금에서와 유사한 미세조직으로 판단되며 밝은 영역은 Al 수지상, 어두운 수지상 간 영역은 공정(eutectic) 영역임을 유추할 수 있었다. 한편 수지상 및 수지상 간 영역에 초점을 맞추어 조금 더 면밀히 관찰해보면, 0.8%Mg로 제어된 (b) 합금이 (a) 합금(0.6%Mg)에 비해 상대적으로 수지상의 크기가 미세화되고 수지상 간 영역 역시 작아지는 경향을 보인다. 즉 Mg+Al₂Ca 합금 첨가량이 증가함에 따라 수지상 및 수지상 간 미세화되는 것을 알 수 있었다. 이러한 원인은 미세화 작용을 유발하는 Ca의 영향에 기인하는 것으로 예상된다. 일반적으로 Sr 혹은 Ca 등과 같은 미세화제가 알루미늄이나 알루미늄 합금에 첨가된 경우 결정립 크기가 감소하고 석출상 역시 미세화되는 것으로 보고되고 있다[11~13].

미세조직 상에서 수지상 및 수지상 간 영역의 차이를 보이는 개량화 ADC12(0.6% Mg, 0.8% Mg) 합금들에 대한 XRD 상 분석 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

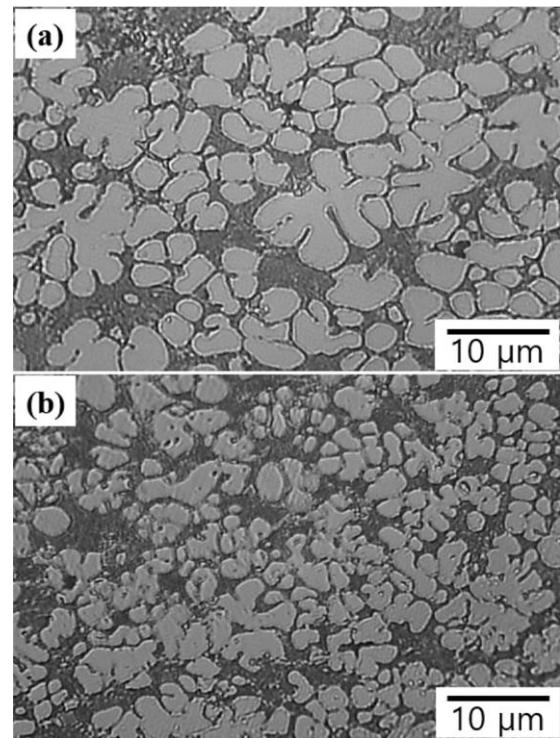


Fig. 1 Optical micrographs of modified ADC12 alloys with (a) 0.6%Mg and (b) 0.8%Mg

미세조직(Fig. 1)에서 예상된 바와 같이 α -Al 및 eutectic Si 상이 주된 상으로 검출되었으며 미미한 Al₂Cu 피크 역시 확인되었다. 이와 함께 초기 CaO 첨가를 통해 형성된 Al₂Ca 상이 두 합금 모두에서 일부 검출되었다. 한편 두 합금에서 서로 다른 상은 검출되지 않았으며 이를 통해 Mg+Al₂Ca 첨가는 상의 변화 보다는 앞서 언급한 결정립의 크기와 공정조직의 개량에 영향을 미치는 것으로 유추해 볼 수 있었다.

이러한 두 합금의 생성상 분포를 더욱 면밀히 알아보기 위하여 EPMA 관찰을 수행했으며 그 결과를 Fig. 3에 도시하였다. 여기서 (a)는 0.6%Mg, (b)는 0.8%Mg로 제어된 합금이다. 먼저 Al에 초점을 맞춰보면, 0.8%Mg로 제어된 (b) 합금에서 Al intensity가 높은 수지상 영역이 미세화되고 고르게 분포하는 것으로 나타났다. 이와 함께 (b) 합금에서 상대적으로 Mg 원소의 intensity가 증가하고 넓게 분포하며 이에 반해 Ca 원소의 차이는 거의 확인되지 않았다. 한편 XRD 결과에서는 검출되지 않았던 Fe-Mn계 금속간화합물 상도 추가적으로 일부 존재하는 것을 알 수 있었다.

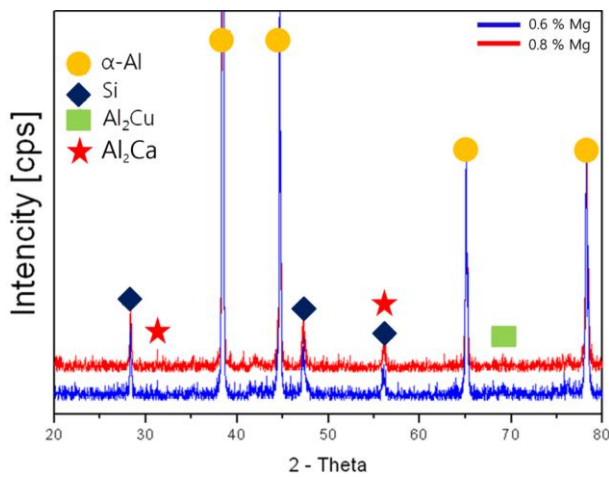


Fig. 2 X-ray diffraction analysis results of modified ADC12 alloys

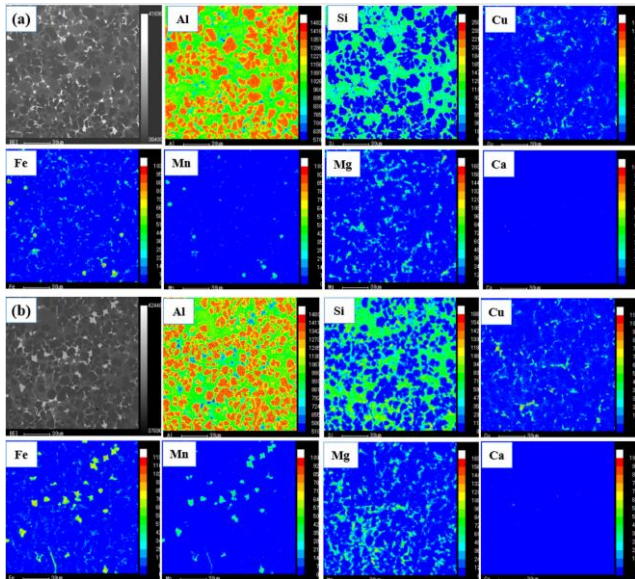


Fig. 3 EPMA images of modified ADC12 alloys with (a) 0.6%Mg and (b) 0.8%Mg

상기 두 합금의 SEM 미세조직 관찰 결과를 Fig. 4에 나타냈다. 수지상 간 영역의 공정(eutectic) Si 상은 침상 형태를 가지는 것으로 확인되었다. 이와 함께 두 합금에서 서로 유사한 크기의 Fe계 금속간화합물 상도 관찰되었고 Al₂Cu 상은 수지상과 공정 Si 상 계면에서 형성된다는 것을 알 수 있었다. 또한, 수지상 내부를 확대해보면(square area) 두 합금 모두에서 약 수 백 nm 수준의 미세한 구형 상들이 형성된 것으로 나타나는 데 이는 XRD 상에서 검출되었던 Al₂Ca 상으로 예상된다[14].

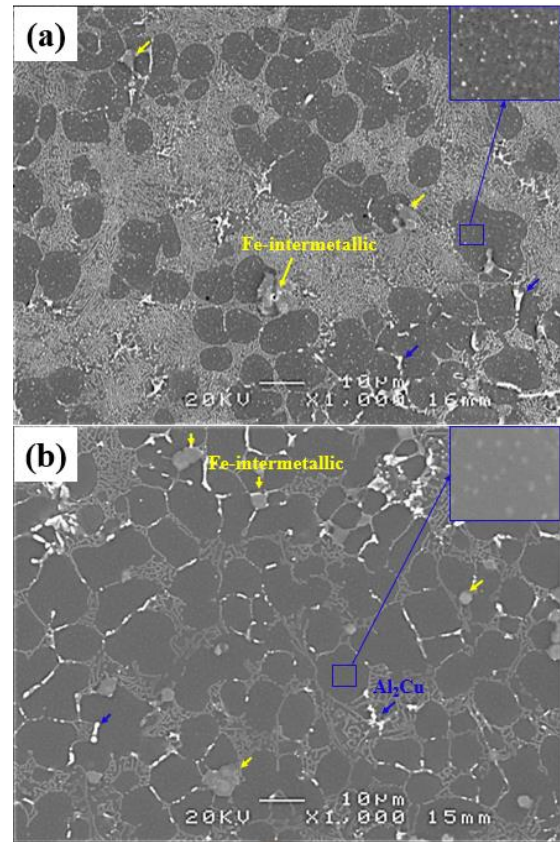


Fig. 4 SEM micrographs of modified ADC12 alloys with (a) 0.6% Mg and (b) 0.8% Mg

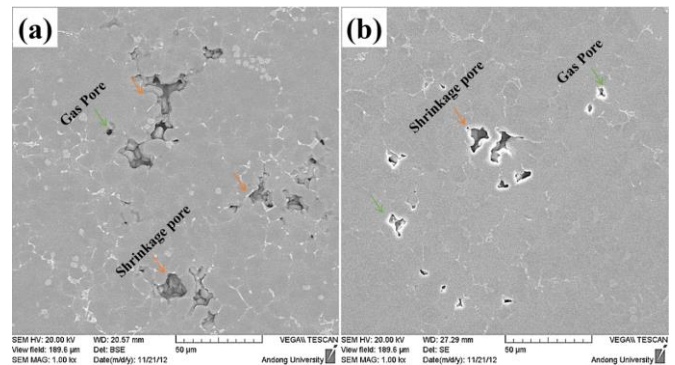


Fig. 5 SEM observation results showing the casting defects of modified ADC12 alloys with (a) 0.6%Mg and (b) 0.8%Mg

한편 주조재의 경우 주조 결함이 특성 저하에 결정적인 역할을 할 수 있으므로 기공 및 수축공에 대한 분석이 필수적이다. 본 연구에서 사용된 ADC12 합금들에 대한 기공 형태 및 분포를 관찰한 결과들을 Fig. 5에 나타내었다. 여기서 (a)는 0.6%Mg, (b)는 0.8%Mg로 제어된 합금이며, (b) 합금이 (a) 합

금에 비해 기공 및 수축공의 크기가 미세하게 형성된 것으로 확인되었다. 또한 (b) 0.8%Mg 합금의 경우 기공 및 수축공의 분포 역시 특정 영역에 밀집되지 않고 고르게 존재하였다. Image analyzer를 이용하여 미세조직으로부터 기공도를 측정해 본 결과, 기공도는 (a), (b) 합금에서 각각 0.83%, 0.76%로 Mg+Al₂Ca 첨가량이 증가함에 따라 그 양이 소폭 감소하는 경향을 보였다. 이러한 원인은 Mg+Al₂Ca가 용탕 내에서 산화물 및 개재물 형성을 억제하여 기공도 제어에도 영향을 미쳤기 때문으로 생각된다.

3.2 개량화 ADC12 합금의 상온 인장 특성 및 변형 거동

Table. 2에 개량화 ADC12 (0.6%Mg, 0.8%Mg) 합금들의 상온 인장 실험 결과를 정리하였다. 0.6%Mg로 제어된 합금의 경우 항복 강도(YS): 157.0MPa, 인장 강도(TS): 305.2MPa, 그리고 연신률(TE): 2.7%로 얻어졌으며, 0.8%Mg로 제어된 합금은 항복 강도: 159.4MPa 인장 강도: 311.2MPa, 그리고 연신률: 2.4%로 확인되었다. 일반적인 다이캐스팅 ADC12 합금의 UTS는 250.0MPa 수준으로 보고되고 있어 Mg+Al₂Ca 첨가의 영향은 기계적 특성 향상에 긍정적인 영향을 미치는 것을 알 수 있었다[10]. 또한 기존 다이캐스팅 ADC12 합금의 연신율 역시 약 2.2%로 알려져 있어 Mg+Al₂Ca 첨가는 연신율 저하없이(오히려 미미하나마 향상) 강도를 증가시키는 효과적인 방안임을 확인할 수 있었다. 이러한 개량화 ADC12 합금의 기계적 특성 향상은 미세 수지상의 제어, 공정 Si 상의 개량 그리고 제 2상(Al₂Ca)의 석출이 그 원인일 것으로 생각된다. 또한, Mg 함량 증가 역시 고용 강화 측면에서 상기 두 소재의 강도 증가에 큰 영향을 미친 것으로 판단된다. 한편 Mg 함량에 따라 미세조직학적 차이가 있었던 두 개량화 ADC12 합금들에서 상온 인장 특성의 차이는 크게 나타나지 않았다.

인장 변형 거동을 조사하고자 수행하였던 SEM 파단면 관찰 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 파단면들에서 두 합금 모두 주로 취성 파괴 양상을 보였으며 파단면 전체에서 기공 및 수축공들이 쉽게 관찰되었다. 이러한 원인은 Al-Si 합금의 경우 공정 Si 상이 매우 취약하고 초기 주조 결함(기공 및 수축공)에 쉽게 응력이 집중되기 때문으로 사료된다. 그러나 앞서 미세조직 관찰 결과에서 결함의 크기가

Table 2 Room temperature tensile properties of modified ADC12 alloys

YS: yield strength, UTS: ultimate tensile strength and TE: total elongation.

	YS [MPa]	UTS [MPa]	TE [%]
Modified ADC12 (0.6%Mg)	157.0	305.2	2.7
Modified ADC12 (0.8%Mg)	159.4	311.2	2.4

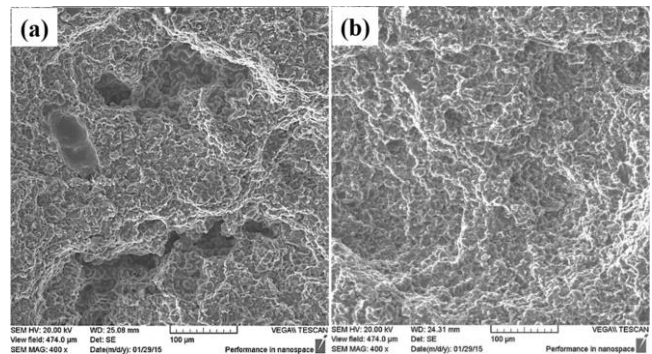


Fig. 6 Tensile fracture surfaces of the modified ADC12 alloys; (a) is 0.6% Mg and (b) is 0.8% Mg

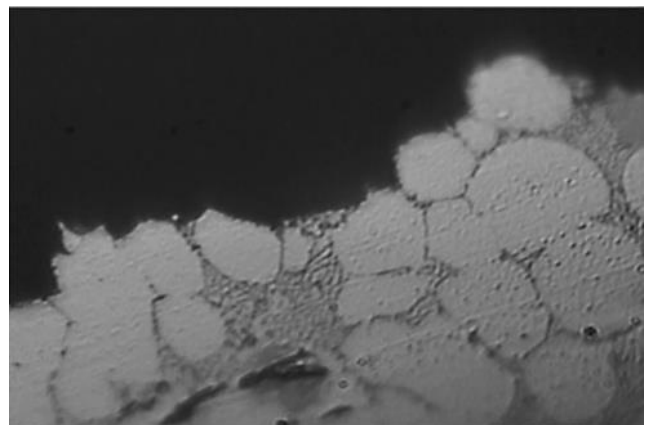


Fig. 7 Tensile fractured cross-sectional image of modified ADC12(with 0.8% Mg) alloy

감소하고 분율 역시 줄어드는 경향을 보인 (b) 합금의 강도 및 연신율이 (a) 합금과 유사한 수준을 보이는 것은 흥미로운 결과이다. 파단된 (b) 합금 시편의 수직 단면을 관찰했으며 그 결과를 Fig. 7에 도시하였다. 단면 관찰 결과, 대부분의 균열은 공정(eutectic) 조직을 따라 진전되었으며 이를 통해 수지상정과 공정 조직의 계면은 소성 변형을 수용

함에 있어 취약 부위로 작용한다는 것을 알 수 있었다. 즉 수지상이 미세화되고 결합이 감소했음에도 불구하고 균열 진전을 촉진시키는 공정 Si 상들이 여전히 합금 전체에 분포되어 존재하기 때문에, 다른 조직의 변화에도 불구하고 (a), (b) 합금에서의 강도 및 연신율의 차이는 크지 않다고 이해될 수 있다.

3.3 개량화 ADC12 합금의 상온 피로 특성 및 피로 변형 거동

Fig. 8은 두 개량화 ADC12 합금들의 상온 고 주기 피로 실험으로 얻어진 S-N(stress versus the number of cycles to failure) 곡선들을 도시한 결과이다. 고주기 피로 시험 결과, 0.6%Mg로 제어된 합금의 피로 한도(fatigue limit)는 150.0MPa로 측정되었고 0.8%Mg로 제어된 합금의 피로 한도(fatigue limit)는 160.0MPa로 나타났다. 일반적인 기존 ADC12 합금의 피로 한도는 140.0MPa 수준으로 보고되고 있어 Mg+Al₂Ca 합금 첨가는 인장 뿐만 아니라 고 주기 피로 특성 향상에도 효과가 있음을 알 수 있었다[15]. 이와 함께 앞선 상온 인장 특성의 경우 두 합금에서 큰 특성 차이가 나타나지 않았지만, 탄성 영역에서 수행되는 고주기 피로 시험에서는 0.8% Mg로 제어된 합금이 모든 응력 범위에서 조금 더 우수한 피로 특성을 보였다.

피로 시험 후 파단면에 대한 SEM 관찰을 수행했으며 그 결과를 Fig. 9에 나타냈다. 먼저, 고주기 피로 시험의 경우 대부분의 피로 수명은 초기 균열 생성에 좌우되고 균열 전파 수명은 길지 않다. 또한 피로 균열 시작점은 대개 개재물, 기공, 금속간화합물 등으로부터 생성될 수 있다고 알려져 있다[16]. Fig. 9(a, b)에서 관찰된 바와 같이 두 합금 모두 표면에서 균열 생성 점이 관찰되었으며 개재물 혹은 조대한 금속간 화합물에 의한 영향은 적은 것을 알 수 있었다. 주조용 알루미늄 합금의 경우 기공으로부터 균열이 쉽게 생성될 수 있는데 개량화 ADC12 합금 역시 표면 주변에 존재하는 주조 결함에서 균열이 시작된다는 것을 확인할 수 있었다[17,18]. 한편 두 합금에 대한 균열 생성점에서의 차이를 살펴보면 (a) 합금의 경우 조대한 기공에서부터 형성된 반면 (b) 합금의 경우 상대적으로 미세한 기공으로부터 균열이 생성, 전파 한다는 것을 알 수 있었다. 즉 고주기 피로의 경우 수지상이 미세하고

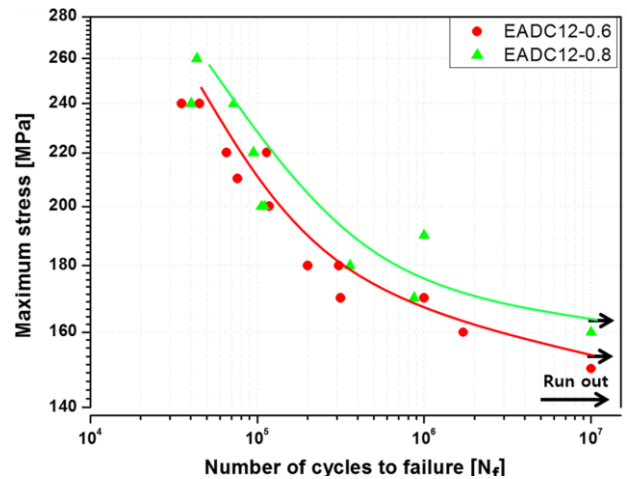


Fig. 8 Maximum applied stress vs. the number of cycles to failure for modified ADC12 alloys

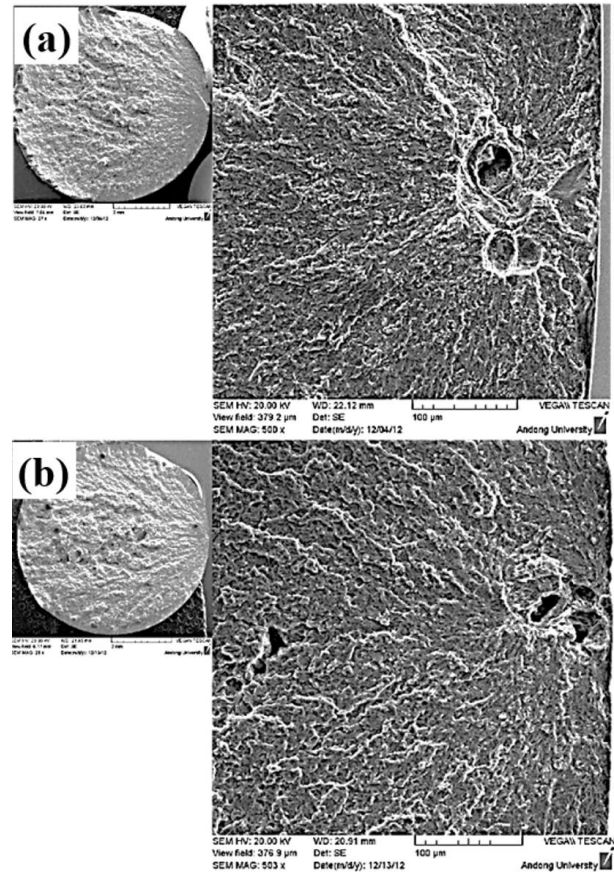


Fig. 9 Fatigue fractographies of modified ADC12 specimens ; with (a) 0.6% Mg and (b) 0.8% Mg

Si 상들이 고루 분포하며 주조 결함이 적은 (b) 합금이 상대적으로 뛰어난 특성을 나타내었다. 이상의 결과들을 바탕으로 ADC12 합금에 Mg+Al₂Ca을 첨

가 할 경우, 조직이 미세해지고 결함이 저감되어 고주기 피로 특성이 향상된다는 것을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 다이캐스팅 공정을 이용하여 ADC12 합금에 Mg+Al₂Ca를 첨가한 개량화 ADC12 합금을 제조하고 Mg 함량에 따른 미세조직, 인장, 고주기 피로 특성에 대해 조사했으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 개량화 ADC12 합금은 수지상과 공정 Si 상이 존재하는 일반적인 Al-Si-Cu계 합금의 미세조직과 유사하게 나타났으며 추가적으로 Al₂Cu, Al₂Ca 그리고 Fe-Mn계 intermetallic 상이 관찰되었다. 이와 함께 Mg+Al₂Ca 함량이 증가함에 따라 수지상이 미세해지고 공정 영역도 균일하고 미세하게 분포하였으며, 내부에 존재하는 기공 및 수축공 또한 미세해지고 감소된 분율을 나타내었다.

(2) 인장 시험 결과 0.6%Mg로 제어된 합금의 경우 UTS: 305.2MPa, YS: 157.0Pa 그리고 TE: 2.7%의 특성을 보였으며, 0.8%Mg 합금은 UTS: 311.2MPa, YS: 159.4MPa 그리고 TE: 2.4%의 결과를 나타내었다. 즉, 두 합금 모두 상용 ADC12 합금(UTS: 250.0MPa, TE: ~2.0%)과 비교하여 연신율은 유사한 수준을 보였으나 강도는 증가하는 것을 알 수 있었다.

(3) 고주기 피로 시험 결과, 0.6%Mg 합금의 피로 한도(fatigue limit)는 150.0MPa, 0.8% Mg 합금의 피로 한도(fatigue limit)는 160.0MPa로 얻어졌으며 상용 ADC12 합금(fatigue limit: 140.0MPa)과 비교하여 뛰어난 피로 한도를 보였다. 또한 개량화 ADC12 합금에서 0.8%Mg로 제어된 합금이 모든 피로 응력 범위에서 0.6%Mg 합금보다 우수한 피로 특성을 보였다. 이는 0.8%Mg 합금의 미세한 수지상정과 공정 Si의 분포 및 주조 결함의 저감에 기인하는 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 안동대학교의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] W. S. Miller, L. Zhuang, J. Bottema, A. J. Wittebrood, P. DE Smet, A. Hazler, A. Vieregge, 2000, Recent Development in Aluminium Alloys for the Automotive Industry, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 280, No. 1, pp. 37~49.
- [2] S. Ashley, 1997, Getting a Hold on Mechatronics, Mech. Eng., Vol. 119, No. 5, pp. 56~61.
- [3] K.-T. Kim, 2011, High Strength Aluminum Alloy for Die Casting, J. Kor. Fou. Soc., Vol. 31, No. 3, pp. 101~105.
- [4] J. H. Seo, S. K. Kim, 2011, Mechanical Properties of 0.25-0.65wt% CaO Added AM60B Eco-Mg Die Castings at Room and Elevated Temperatures, J. Kor. Fou. Soc., Vol. 31, No. 1, pp. 11~17.
- [5] J. H. Seo, H. K. Lim, S. K. Kim, 2010, Microstructures and Mechanical Properties of Die Cast 0.7wt% CaO Added Eco-Mg Parts, J. Kor. Fou. Soc., Vol. 30, No. 6, pp. 224~230.
- [6] S. J. Kim, S. K. Hyun, S. K. Kim, Y. O. Yoon, 2014, Modification Behavior of Eutectic Si with Varying Heat Treatment Conditions in A356 Alloy with Al₂Ca, J. Kor. Fou. Soc., Vol. 34, No. 5, pp. 156~161.
- [7] S. H. Kim, K. S. Kim, S. K. Kim, Y. O. Yoon, K. S. Cho, K. A. Lee, 2013, Microstructure and Mechanical Properties of Eco-2024 Aluminium Alloy, Adv. Mater. Res., Vol. 602-604, pp. 623~626.
- [8] G. Y. Kim, K. S. Kim, J. C. Park, S. K. Kim, Y. K. Yoon, K. A. Lee, 2014, High Cycle Fatigue and Fatigue Crack Propagation Behaviors of Modified A7075-T73 Alloy, Korean J. Met. Mater., Vol. 52, No. 4, pp. 283~291.
- [9] C. H. Caceres, B. I. Selling, 1996, Casting defects and the tensile properties of an Al-Si-Mg alloy, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 32, No. 1-2, pp. 109~166.
- [10] K. Nakata, Y. G. Kim, H. Fujii, T. Tsumuram T. Komazaki, 2006, Improvement of Mechanical Properties of Aluminum Die Casting Alloy by Multi-Pass Friction Stir Processing, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 437, No.2, pp. 274~280.
- [11] M. Q. Cong, Z. Q. Li, J. S. Liu, M. Y. Yan, K. Chen, Y. D. Sun, M. Huang, C. Wang, B. P. Ding, S. L. Wang, 2012, Effect of Ca on the Microstructure and Tensile Properties of Mg-Zn-Si Alloys at Ambient and Elevated Temperature, J. Alloys Comp., Vol. 539,

- pp. 168~173.
- [12] G. Y. Kim, K. S. Kim, J. C. Park, S. K. Kim, Y. O. Yoon, K. A. Lee, 2014, High Cycle Fatigue and Fatigue Crack Propagation Behaviors of Modified A7075-T73 Alloy, Korean J. Met. Mater., Vol. 52, No. 4, pp. 283~291.
- [13] Y. Zeng, B. Jiang, D. Huang, J. Dai, F. Pan, 2013, Effect of Ca Addition on Grain Refinement of Mg-9K1-1Al Alloy, J. Magnesium Alloys, Vol. 1, No. 4, pp. 297~302.
- [14] M. Liu, Q. Wang, X. Zeng, G. Yuan, Y. Zhu, W. Ding, 2005, Mechanical Properties and Creep Behavior of Mg-Al-Ca Alloys, Mater. Sci. Forum, Vol. 488-489, pp. 763~766.
- [15] [Http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx](http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx).
- [16] C. H. Caceres, C. J. Davidson, J. R. Griffiths, 1995, The Deformation and Fracture Behaviour of an Al-Si-Mg Casting Alloy, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 197, No. 2, pp. 171~179.
- [17] J. Z. YI, Y. X. Gao, P. D. Lee, H. M. Flower, T. C. Lindley, 2003, Scatter in Fatigue Life due to Effects of Porosity in Cast A356-T6 Aluminum-silicon Alloys, Met. Mater. Trans., Vol. 34, No. 9, pp. 1879~1890.
- [18] Q. G. Wang, C. J. Davidson, J. R. Griffiths, P. N. Crepeau, 2006, Oxide Films, Pores and the Fatigue Lives of Cast Aluminum Alloys, Met. Mater. Trans., Vol. 37, No. 6, pp. 887~895.