

논문

Al₂Ca 를 함유한 A356 합금에서의 다양한 열처리 조건에 따른 공정 Si 개량화 거동

김세준*** · 현승균** · 김세광* · 윤영옥*†

*한국생산기술연구원 희소금속연구실용화그룹, **인하대학교 신소재공학부

Modification Behavior of Eutectic Si with Varying Heat Treatment Conditions in A356 Alloy with Al₂Ca

Se-Jun Kim***, Soong-Keun Hyun**, Shae K. Kim* and Young-Ok Yoon*†

*Rare Metal R&BD Group, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 406-840, Korea

**Dep. Adv. Mater. Eng., Inha Univ., Incheon 402-751, Korea

Abstract

This study is focused on the effect of Al₂Ca as a modifier on eutectic Si modification of A356 alloy. Microstructural observation was carried out for as-cast, as-solution treated and as-aged samples. Solution treatment and aging were performed for 2, 4, 6 and 10 hrs at 540°C and 170°C, respectively. Although A356 alloy, which Al₂Ca was added, has no significant difference in as-cast phases with normal A356 alloys, it shows much more modified eutectic Si, grain refinement and improved tensile property both in as-cast and as-heat treated conditions. TGA result shows that Al₂Ca added A356 alloy has a certain improvement in oxidation resistance.

Key words : A356, Eutectic Si, Modification, Al₂Ca, Oxidation resistance

1. 서 론

Al 합금 중에서도 Al-Si계 주조용 합금인 A356 (Al-7Si-0.4Mg) 합금은 가공성 및 유동성, 주조성이 우수한 합금으로 자동차, 국방, 항공기 등의 산업에 널리 이용되고 있다[1-3]. A356 합금의 경우 T6 열처리를 통한 Mg₂Si상의 석출 반응을 이용하여 강도를 향상시킬 수 있고 공정 Si 및 초정 α상의 크기, 형태 및 분포에 의해서 기계적 특성이 영향을 받는다 [4,5]. 하지만, 공정 Si이 조대한 침상 형태를 갖기 때문에 선단에 응력이 집중되어 크랙이 생성된다. 따라서 이것이 합금의 기계적 특성을 저하시키는 원인이 된다. 이와 같은 문제를 최소화하고 기계적 특성을 향상시키기 위해 침상 형태의 공정 Si을 섬유상 형태로 바꾸기 위한 개량화 처리가 필요하다[6,7]. 공정Si은 주기율표상에서 4, 5족에 해당하는 원소들을 미량 첨

가하는 방법으로 개량화될 수 있다. 일반적인 원소들로는 Sb, Na, Ca 및 Sr 등이 있다.

위와 같이, A356 합금의 기계적 특성에 있어서는 Mg과 개량화제의 첨가가 중요한 이슈라고 할 수 있다. 그러나, Mg은 강한 산소친화력 때문에 다량이 첨가되었을 때는 용해과정 시 발생하는 Mg 산화물 등의 개재물 발생이 문제가 되며 A356 과 같이 미량이 첨가되어도 장시간의 용탕보관 시 Mg 산화에 따른 소실이 문제가 될 수 있다.

최근 상기의 문제를 극복하기 위해 순Mg대신 Mg+Al₂Ca 모합금을 적용시킨 연구가 보고되고 있다[8]. 이 연구결과에 따르면, Mg+Al₂Ca 모합금을 첨가함으로써 용탕보호성 및 산화 저항성이 크게 향상되고 공정 Si의 개량화 및 결정립 미세화의 효과를 얻을 수 있었다고 한다. 또한, Mg+Al₂Ca 모합금을 첨가한 경우에는 Ca 첨가와 달리 유동성의 저하가 억제된다고

Received: Sep. 3, 2014 ; Revised: Sep. 24, 2014 ; Accepted: Oct. 16, 2014
†Corresponding author: Young-Ok Yoon (KITECH)
Tel: +82-32-850-0493, Fax: +82-32-850-0410
E-mail: veryoon@kitech.re.kr

Journal of Korea Foundry Society
2014. Vol. 34 No. 5, pp. 156~161
<http://dx.doi.org/10.7777/jkfs.2014.34.5.156>
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.

보고되었다[9].

적용된 Mg+Al₂Ca 모합금은 일반 Mg-Al-Ca 3원계 합금과 구분된다. Mg+Al₂Ca 모합금은 Mg-Al 합금에 Ca이 아닌 CaO가 적용되어 제조되었다[10-13]. 이론적으로 CaO는 안정한 산화물이기 때문에 Mg 용탕에서 환원될 수 없으나 실제로 환원되어 용탕내의 구성원소와 결합하여 Ca계 금속간화합물을 형성시켰다[10]. Ca의 경우 Mg보다 Al과의 친화력이 강하기에 환원된 Ca은 Mg-Al 용탕 내에서 Al과 반응하여 Al₂Ca를 형성시킨다. 이러한 합금의 적용으로 내산화성 및 용탕보호성의 증가되어 용탕 작업 시 발생할 수 있는 MgO의 생성이 억제되고 Mg 소실억제 및 용탕 청정화에 도움을 줄 수 있다. 또한, 합금내 Al₂Ca 거동은 합금의 결정립 미세화 및 공정 Si 개량화에도 긍정적인 영향을 미쳐 기계적 특성 또한 향상시킬 수 있다.

본 연구에서는 A356합금에 순Mg대신 Mg+Al₂Ca 모합금을 첨가하여(이후부터는 ‘Al₂Ca 첨가’로 기술) 다양한 열처리 조건에 따른 공정 Si의 개량화 거동 및 이에 따른 경도 및 인장특성의 변화에 대해 조사하였고, 이를 범용 A356 합금과 비교하였다. 또한, Al₂Ca 첨가에 따른 합금의 내산화성의 변화를 산화시험을 통해 조사하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용한 합금의 화학조성을 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 명시된 Al₂Ca 함량은 분석을 통해 검출된 Ca 함량으로 표현하였다. 합금제조는 고주파 유도로를 이용하여 수행되었으며 A356 및 Al₂Ca가 첨가된 A356 합금 주괴를 용해하여 용탕온도를 750°C로 하였다. 이후, 용탕온도를 720°C로 떨어뜨려 탈가스 처리를 수행하였고, 5분간 안정화시킨 후에 680°C의 용탕온도에서 금형에 주입하였다. 이 때, 금형의 온도는 200°C로 하였다.

각 합금의 열처리 조건에 따른 공정 Si 개량화 거동 및 이에 따른 기계적 특성을 알아보기 위해 용체화 및 시효 열처리를 수행하였다. 구조조직 및 열처리 조직에 대한 미세조직관찰은 주사전자현미경(장비명: FE-SEM, Quanta 200F)을 이용하여 수행되었다. 용체화 처리는 540°C의 온도에서 유지시간을 각각 2, 4, 6 및 10시간으로 하였고, 용체화 효과를 평가하기 위해 각각의 조건에 대해 브리넬 경도계(모델명: DKB-310)를 이용한 경도 시험을 수행하였다. 하중은 500 kgf로 하였고 10 초 동안 유지하였다. 경도 측정은 각 시편마다 2회씩 측정하였

고 이들의 평균값을 비교 하였다. 용체화 처리 후에 50°C의 온도에서 급랭한 후 170°C에서 각각 2, 4, 6 및 10시간의 시효처리를 수행하였다. 시효 처리 후, 각 시편의 기계적 특성을 평가하기 위하여 인장 시험을 실시하였다. 크로스헤드 이동속도는 1 mm/min로 하였고 표점거리는 30 mm로 신율계를 사용하여 측정하였다.

Al₂Ca 첨가에 따른 A356 합금의 내산화성 변화를 알아보기 위해 고온에서의 산화시험을 수행하였고, 사용된 장비는 TA(SDT-Q600)이다. 산화시험은 Jmat pro 7.0으로부터 얻어진 A356 합금의 액상온도 616°C에 가까운 600°C에서 수행하였고, 10°C/min의 속도로 승온시켜 24시간 유지에 따른 시료의 무게 변화를 관찰하였다. 시료의 크기는 가로 2 mm × 세로 2 mm × 높이 1 mm로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

A356 합금과 Al₂Ca가 첨가된 A356합금의 구조조직을 Fig. 1에 나타내었다. 두 합금은 모두 dendrite 형태의 α-Al 상의 분포를 나타내고 있다. 결정립 크기를 비교해보면 비교적 Al₂Ca가 첨가된 경우가 미세한 것으로 보인다. 1000배의 배율의 조직을 보면 공정 Si 상들의 형태 및 분포를 알 수가 있

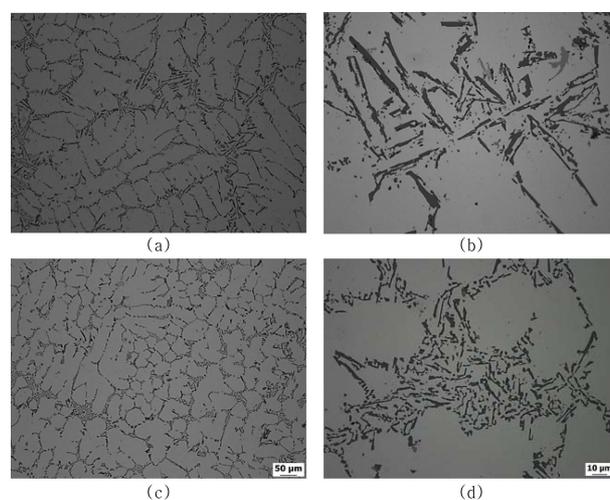


Fig. 1. Microstructures of as-cast A356 and Al₂Ca added A356 alloys with different magnification: (a) A356 (× 200), (b) A356 (× 1000), (c) Al₂Ca added A356(× 200) and (d) Al₂Ca added A356 (× 1000).

Table 1. Chemical compositions of all the examined alloys (wt%).

Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ca	Ti	Sr	Al
A356	6.82	0.1279	0.011	0.0023	0.4032	0.0007	0.0087	-	Bal
Al ₂ Ca added A356	7.25	0.1283	0.0034	0.0050	0.3888	0.0041	0.0099	-	Bal

*Al₂Ca content corresponds to that of Ca in this article.

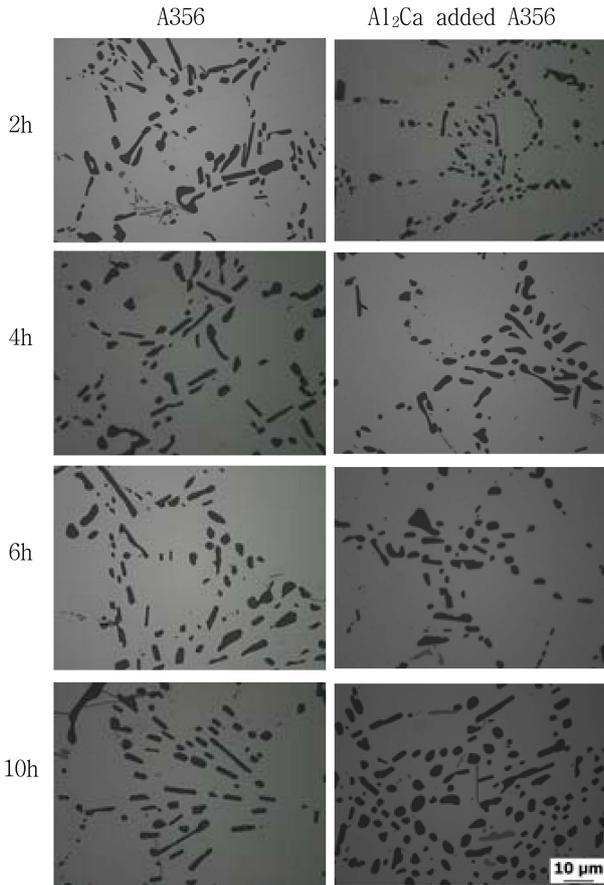


Fig. 2. Change of eutectic Si morphology with solution treatment time at 540°C in A356 and Al₂Ca added A356 alloys.

다. A356의 경우에는 가장 어두운 콘트라스트를 갖는 침상의 공정 Si들이 분포하고 있고 그 사이에는 α-Al과 공정 Si의 중간 정도의 콘트라스트를 갖는 상들의 존재가 보이는데, 이는 Mg₂Si로 추정된다. Al₂Ca가 첨가된 경우에는 공정 Si은 한층 개량화된 층상의 형태를 나타내고 있으며 미세하게 분포하고 있는 것으로 보인다. 이것으로부터 Al₂Ca 첨가에 의해 공정 Si의 개량화 효과가 일어난 것으로 생각된다.

상기의 조직관찰결과, 본 연구에서 제조된 A356 합금들은 α-Al, 공정 Si 그리고 Mg₂Si 상을 구성하고 있는 것으로 판단되고 전형적인 A356 합금의 조직을 나타내었다. 미량의 Fe의 존재를 무시하면 A356 합금의 조직생성은 α-Al 정출 후에 α-Al + Si 2상, α-Al + Si + Mg₂Si 3상의 공정반응을 통해서 되었을 것으로 생각할 수 있다[14]. Fe의 존재를 고려하면, Jmat pro를 이용하여 본 합금의 반응온도를 검토한 결과, 560°C에서 Mg₂Si가 생성되고 573°C에서 β-Al₅FeSi상이 생성되는 것을 확인하였는데, 따라서 A356 합금은 경우 β-Al₅FeSi 상을 포함한 4상의 공정반응에 이르기까지의 응고과정을 거친 것으로 판단된다.

이러한 A356합금에 Al₂Ca가 첨가됨으로써 초기 α-Al의 생

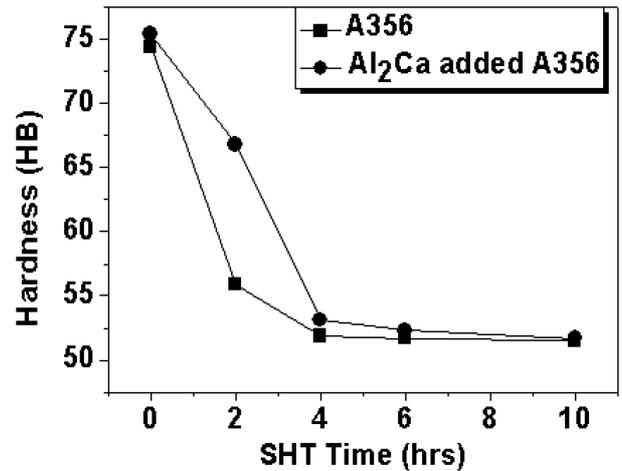


Fig. 3. Hardness change with solution treatment time at 540°C in A356 and Al₂Ca added A356 alloys.

성 시 미세화에 기여를 하고 응고 과정에 있어서 공정 Si의 개량화에 도움을 준 것으로 생각된다. 현재 공정 Si 개량화 기구에 관해서는 불순물조력 쌍정(impurity-induced twinning)과 twin plane re-entrant edge 성장기구, 두 가지 이론이 일반적으로 받아들여지고 있다[15]. 이와 같이, 공정 Si의 개량화는 쌍정의 발생 그리고 쌍정면을 통한 성장과 밀접한 관련이 있는데, 개량화제 원소가 이를 가능하게 한다. 그러나, 1,079°C라는 고용점[16]의 Al₂Ca가 용탕에 첨가된 후의 분배 및 분포거동에 관해서는 그것의 첨가량이 40ppm 수준의 극미량이기 때문에 본 논문에서는 다루기 어렵다. 따라서, 이를 명확하게 하기 위해서는 정밀한 연구가 추후 수행되어야 한다.

Fig. 2는 용체화 처리 시간에 따른 공정 Si 형상의 변화를 보여준다. 용체화 열처리가 적용됨에 따라 두 합금 모두 공정 Si의 개량화를 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3은 용체화 처리에 따른 경도의 변화를 나타낸다. 두 합금의 결과를 비교하면 큰 차이를 나타내고 있지는 않지만, 최초 2시간의 용체화 처리가 진행되었을 때는 Al₂Ca가 첨가된 경우가 높은 값을 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다. 이후의 경도값의 변화를 보면 4시간부터 급격한 경도의 저하를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 일반적으로 용체화 처리는 합금의 연화를 야기시켜 경도를 감소시킨다. 따라서, 이와 같은 결과로부터 4시간부터 용체화 처리의 효과가 뚜렷하게 발생한 것으로 판단되며 10시간에 이르기까지는 큰 차이를 나타내지 않았다. 본 연구에서는 인공시효처리 전의 용체화처리 시간에 대한 조건으로 뚜렷한 용체화 효과 및 시간 등의 효율을 고려하여 6시간을 최적조건으로 선택하였다.

시효에 따른 공정 Si 형상의 변화는 Fig. 4에 나타내었다. 시효 경과에 따른 공정 Si의 형상은 용체화제와 비교하였을 때, 큰 변화를 나타내지 않았으나 비교적 Al₂Ca가 첨가된 경우 더욱 미세하고 균일한 공정 Si의 분포가 얻어졌다. 반면에 범용 A356 합금의 경우에는 시효 시간이 경과됨에 따라 길게

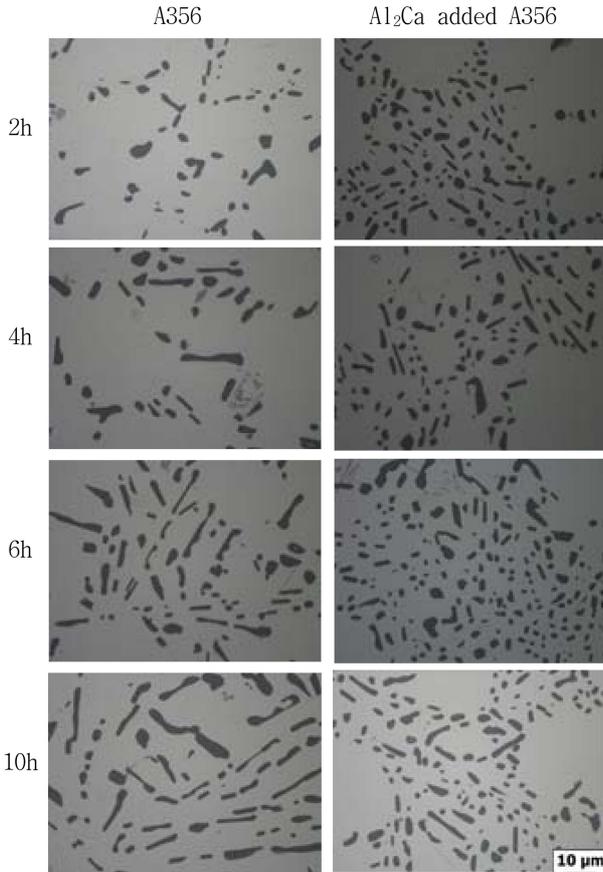


Fig. 4. Change of eutectic Si morphology with aging time at 170°C in A356 and Al₂Ca added A356 alloys.

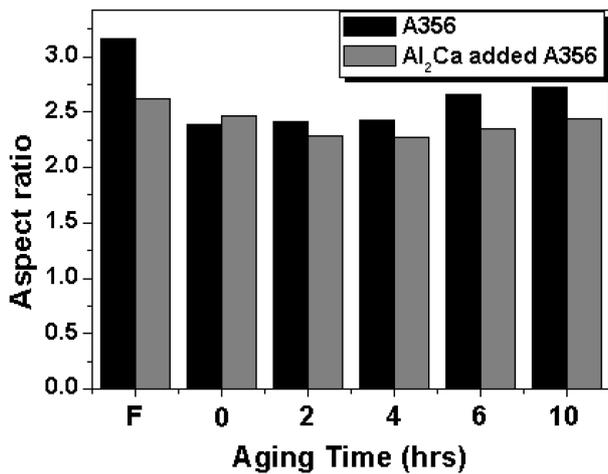


Fig. 5. Aspect ratio of eutectic Si with varying aging time at 170°C in A356 and Al₂Ca added A356 alloys.

성장된 형태의 공정 Si의 분포가 관찰되었다. 공정 Si의 개량화 정도를 정량적으로 나타내기 위해 aspect ratio 측정을 수행하였고, Fig. 5에 나타내었다. 그래프에서 표시된 F는 주조재

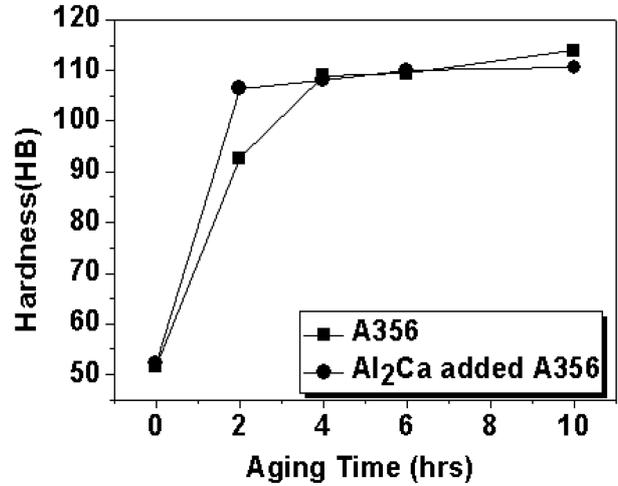


Fig. 6. Hardness change with aging time at 170°C in A356 and Al₂Ca added A356 alloys.

를, 0은 시효 처리 전의 용체화재를 의미하고, 비교를 위해 함께 나타내었다. aspect ratio의 값이 낮을수록 합금의 공정 Si이 더욱 개량화된 것으로 이해할 수 있는데, 주조재에 대한 결과를 보면 큰 차이를 보이고 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 40ppm이라는 미량의 Al₂Ca를 포함하는 것만으로 주조 공정에서 공정 Si의 큰 개량화 효과를 가질 수 있는 것으로 생각될 수 있다. 용체화재부터 시효 처리 4시간이 행하여진 경우에는 범용 합금과 Al₂Ca가 첨가된 합금 사이에는 큰 차이를 나타내지 않으나 시효처리 6시간부터는 전술된 바와 같이, 범용 A356 합금의 경우, 길게 늘어진 형태의 공정 Si이 생성됨에 따라 aspect ratio의 뚜렷한 차를 나타내고 있다. 이와 같은 장시간 열처리에 따른 공정 Si의 조대화는 그것의 구동력과 관련이 있다[17]. 공정 Si의 개량화 정도가 떨어질수록 반대로 조대화 구동력은 증가를 하고 빠른 조대화 속도를 나타낸다. 따라서, Al₂Ca 첨가에 의해서 개량화된 A356 합금에 반해 범용 A356 합금의 경우, 시효처리 시간이 경과함에 따라 공정 Si의 조대화 현상이 비교적 빨리 일어난 것으로 판단된다. 이와 같이, 시효 처리 후의 미세조직에 있어서도 Al₂Ca가 첨가된 합금이 비교적 더욱 개량화된 공정 Si으로 구성되어 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 시효에 따른 경도의 변화를 나타낸다. 두 합금 모두 시효가 지속됨에 따라 경도가 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그러나, Al₂Ca가 첨가된 경우 더욱 경도가 급격하게 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같은 경도의 증가는 Mg₂Si의 석출에 의한 것으로 설명될 수 있다. 일반적으로 알려져 있는 바와 같이, SS → GP → β'(Mg₂Si) → β(Mg₂Si)의 과정을 통한 석출이 일어났을 것으로 판단된다[18].

Fig. 7은 시효열처리에 따른 인장특성의 변화를 나타낸다. 본 연구에서는 선택적으로 2시간과 10시간이 수행된 시편에 대해서만 수행하였고, 또한 비교를 위해 주조재와 6시간의 용체화

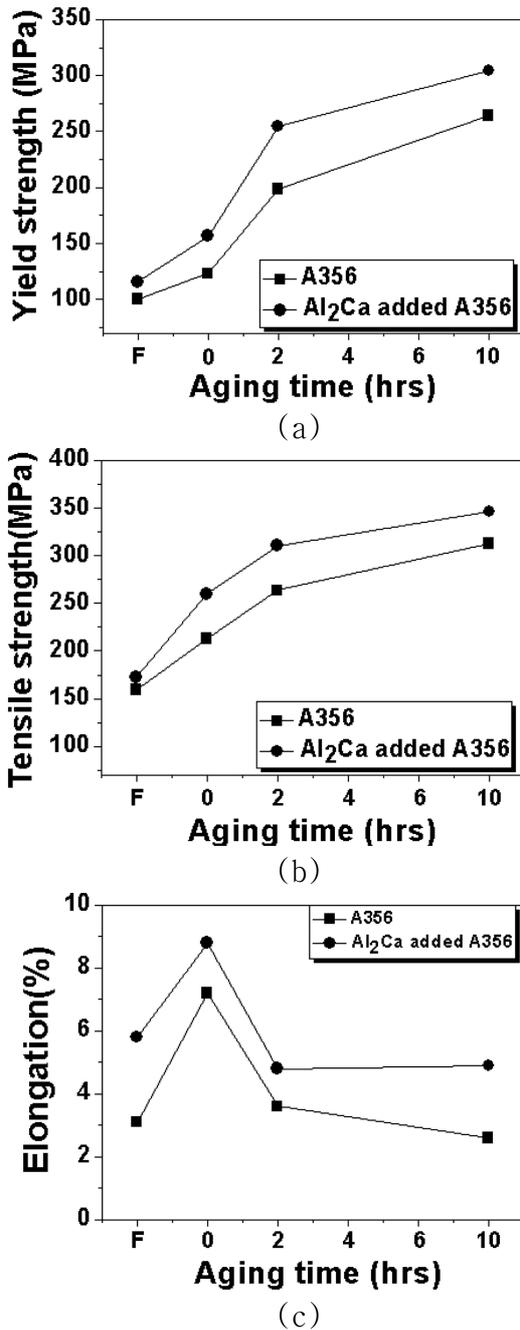


Fig. 7. Change of tensile properties with aging time at 170°C in A356 and Al₂Ca added A356 alloys: (a) Yield strength, (b) Ultimate tensile strength and (c) Elongation.

처리제에 대해서 추가로 수행하였다. Fig. 7(a)에서 보이는 바와 같이, 시효시간이 길어짐에 따라 항복강도가 크게 증가하는 것을 알 수 있고, 증가의 폭은 Al₂Ca가 첨가된 경우 더욱 큰 것으로 나타났다. 인장강도에 있어서도 마찬가지로 큰 폭으로 증가하는 것을 확인할 수 있으며, Al₂Ca가 첨가된 경우 비교적 큰 폭의 상승이 보였다. 연신율은 용체화처리 시에 크게

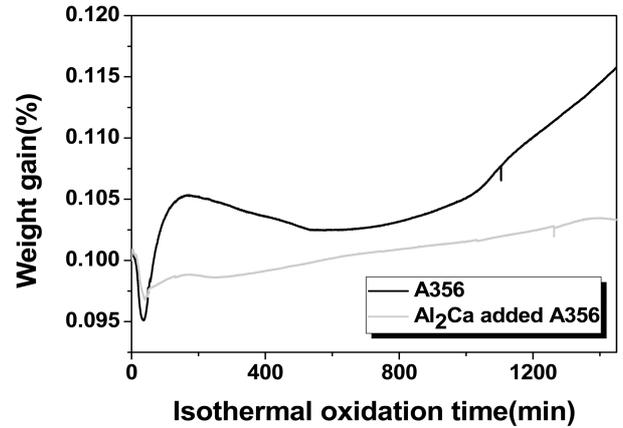


Fig. 8. Weight gain during oxidation at 600°C for 24 hrs under O₂ atmosphere by TGA in A356 and Al₂Ca added A356 alloys.

증가하였다가 시효처리 이후에는 주조제 수준을 나타내고 있고, 전체적으로 Al₂Ca가 첨가된 경우 다소 높은 수치를 나타내었다. 이와 같은 결과로부터, 범용 A356 합금과 Al₂Ca가 첨가된 합금을 비교하였을 때, 조직의 개량화 정도 그리고 기계적 특성에 있어서 Al₂Ca가 첨가된 경우 더욱 우수함을 나타내고 있는 것을 확인할 수가 있다.

본 연구에서는 Al₂Ca 첨가에 의한 공정 Si 개량화 효과 외에 내산화성에 미치는 영향을 조사하기 위해 600°C에서 24 시간동안 산소 분위기하에서의 산화시험을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 시험 초기에는 두 시료 모두 무게가 감소되고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 시료내에 존재하는 수분의 제거에 따른 것으로 판단되며 이 후에는 산화가 지속됨에 따라 무게가 증가한다. 24시간 후에 각각의 시료는 1% 이상에 달하는 무게증가를 나타내고 있다. 그러나, Al₂Ca가 첨가된 경우에는 무게증가의 정도가 크지 않은 반면, 범용 합금은 비교적 큰 무게증가를 나타내고 있고 시간이 지남에 따라 증가의 폭은 더욱 커지는 것을 알 수 있다. 따라서, 0.4wt% 정도의 미량의 Mg를 함유하고 있음에도 불구하고 Al₂Ca의 첨가는 분명한 내산화성 개선의 효과가 있음을 확인할 수 있다. 이러한 내산화성 증가의 원인은 MgO와 CaO의 치밀한 복합산화피막의 생성에 기인한 것으로 판단된다[19]. 상기의 결과로부터 Al₂Ca 첨가는 공정 Si의 개량화 효과 외에도 장시간 용탕보존 시 발생하는 Mg 소실 또한 최소화할 수 있을 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 다양한 열처리 조건에 따른 Al₂Ca가 첨가된 A356 합금의 공정 Si 개량화 거동 및 내산화성에 미치는 영향에 대해 조사되었고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) Al₂Ca가 첨가된 A356 합금의 경우 범용 A356 합금과

비교하였을 때, 주조상태에서부터 공정 Si 개량화 및 결정립 미세화가 일어난 것을 확인할 수 있었고, 열처리가 진행됨에 따라서도 범용 A356 합금보다 Al₂Ca가 첨가된 경우 개선된 효과를 나타내었다.

2) 열처리 조건에 따른 경도 및 인장시험 결과, 공정 Si 개량화 및 결정립 미세화의 영향으로 주조재부터 용체화 및 시효 열처리에 이르기까지 Al₂Ca가 첨가된 경우 범용 A356합금보다 높은 기계적 특성을 나타내는 것을 확인하였다.

3) 합금의 액상온도에 가까운 600°C에서의 TGA 분석결과, Al₂Ca가 첨가된 A356 합금이 범용 합금보다 높은 내산화성을 갖는 것을 알 수 있었다. 이것으로부터 용탕작업에 있어서도 Al₂Ca가 첨가된 A356 합금은 범용합금에 비해 Mg의 소실을 더욱 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2014년 산업통상자원부의 재원으로 우수기술연구센터(ATC) 기술개발사업 (No. 10048755) 의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] M. Tiryakioglu, J. Campbell, N. D. Alexopoulos: Metall. Mater. Trans., "On the Ductility of Cast Al-7%Si-Mg Alloys", **A 40** (2009) 1000-1007.
- [2] M. Aryafar, R. Raiszadeh, A. Shalbazadeh: J. Mater. Sci., "Healing of double oxide film defects in A356 aluminium melt", **45** (2010) 3041-3051.
- [3] E. N. Pan, H. S. Chiou: AFS Transactions, "Effects of modification and solidification conditions on the feeding behavior of A356 Al alloy", **99** (1991) 605-621.
- [4] K. S. Chan, T. S. Lui, L. H. Chen: Material Trans., "Portevin-LeChatelier Effect of Al-7 mass%Si-Mg Cast Alloys", **36** (1995) 615-619.
- [5] S. J. Andersen, H. W. Zandbergen, J. Jansen, C. Treholt, U. Tundal, O. Reiso: Acta Materialia., "The crystal structure of the β phase in Al-Mg-Si alloys", **46** (1988) 3283-3298.
- [6] 原田雅行, 鈴木敏夫, 福井泉: 鑄物, "アルミニウム鑄造用合金のミクロポロシティ及びミクロ組織と機械的性質について", **55** (1983) 742-750.
- [7] C. H. Caceres, J. R. Griffiths: Acta materialia, "Damage by the cracking of silicon particles in an Al-7Si-0.4Mg casting alloy", **44** (1996) 25-33.
- [8] Y. O. Yoon, S. H. Ha, G. Y. Yeom, H. K. Lim, S. K. Kim: Light Metals 2013, TMS 2013, ed. by B. Sadler, "OXIDATION BEHAVIOR OF Al₂Ca ADDED Al-5Mg ALLOY IN THE LIQUID STATE", 323-326.
- [9] N. S. Kim, S. H. Ha, Y. O. Yoon, G. Y. Yeom, H. K. Lim, S. K. Kim: Light metal 2013, TMS 2013, ed by B Saldler, "Effect of Al₂Ca on Melt Fluidity of Al-Mg alloys", 453-456.
- [10] J. Jeong, J. Im, K. Song, M. Kwon, S. K. Kim, Y. B. Kang, S. H. Oh: Acta Materialia, "Transmission electron microscopy and thermodynamic studies of CaO-added AZ31 Mg alloys", **61** (2013) 3267-3277.
- [11] Seong-Ho Ha, Jin-Kyu Lee, Seung-Boo Jung, Young-Jig Kim, Hyoung-Ho Jo, Shae K. Kim: J. Kor. Foundrymen's Soc., "Oxidation behavior of CaO added Mg and Mg-Al alloys", **27** (2007) 126-130.
- [12] Seong-Ho Ha, Jin-Kyu Lee, Shae K. Kim: J. Kor. Foundrymen's Soc., "Development trend of high temperature Mg alloys", **27** (2007) 193-197.
- [13] Seong-Ho Ha, Jin-Kyu Lee, Seung-Boo Jung, Young-Jig Kim, Hyoung-Ho Jo, Shae K. Kim: J. Kor. Foundrymen's Soc., "Effects of CaO and Ca additions on microstructure and ignition resistance of pure Mg", **26** (2006) 146-151.
- [14] American Society of Metals, ASM International, Metals Park, (1993).
- [15] J. H. Li, M. Albu, T. H. Ludwig, Y. Matsubara, F. Hofer, L. Arnberg, Y. Tsunekawa, P. Schumacher: Materials Science Forum, "Modification of eutectic Si in Al-Si based alloys", **794-796** (2014) 130-136.
- [16] H. Okamoto: J. Phase Equilib. Diffus., "Al-Ca (Aluminum-Calcium)", **24** (2003) 91.
- [17] I. M. Lifshitz, V. V. Sloyozov: Journal of Physics and Chemistry of Solids, "The kinetics of precipitation from supersaturated solid solutions", **19** (1961) 1-2.
- [18] Benjamin Milkereit, Nelia Wanderka, Christoph Schick, Olaf Kessler: Mater. Sci. Eng. A, "Continuous cooling precipitation diagrams of Al-Mg-Si alloys", **550** (2012) 87-96.
- [19] B. S. You, W. W. Park, I. S. Chung: Scripta mater., "The effect of calcium additions on the oxidation behavior in magnesium alloys", **42** (2000) 1089-1094.