
 논문

Al-5%Mg 계 주조합금의 물성 및 시효경화특성에 미치는 합금원소의 영향

김정민[†] · 박준식 · 조재익* · 김현길**

한밭대학교 신소재공학부, *한국생산기술연구원 광주연구센터

**한국원자력연구원 첨단노심재료개발Lab

Effects of Alloying Elements on the Properties and Aging Hardening of Al-5%Mg Based Casting Alloys

Jeong-Min Kim, Joon-Sik Park, Jae-Ik Cho*, and Hyun-Gil Kim**

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

*Kwangju R&D Center, Korea Institute of Industrial Technology, Kwangju 500-480, Korea

**Advanced Core Materials Lab, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-600, Korea

Abstract

The microstructure of Al-5%Mg based alloy mainly consists of aluminum matrix with a small amount of AlMn phase. The addition of Sc or Zn to the base alloy significantly improved the as-cast tensile strength, while the addition of Fe deteriorated both strength and ductility. Although the Al-5%Mg based alloy was not heat-treatable, aging hardening could be observed in the case that Sc or Zn was added to the base alloy. TEM analysis showed that very fine AlSc or AlMgZn precipitates were formed after T6 heat treatment, resulting in enhanced strength. The corrosion resistance measured as corrosion potential was found to decrease a little by adding Zn, whereas other alloying elements were not clearly influential.

Key words : Aluminum, Casting, Tensile properties, Corrosion.

(Received December 18, 2009 ; Accepted January 20, 2010)

1. 서 론

알루미늄-마그네슘 주조용 합금은 Al-Si계 합금에 비하여 조성비가 낮고 시효강화성이 없는 등의 이유로 사용량이 상대적으로 적은 편이다. 하지만 Al-Mg계 합금은 주조상태에서 우수한 강도와 연성을 동시에 가지며 양극산화처리가 Al-Si계에 비해 용이하다는 점 등 많은 장점을 가지고 있어 잠재적으로 유망한 합금계이다. Al-Mg계 합금의 적용범위를 확대하기 위한 방안의 하나로서 소량의 합금원소 첨가를 통한 시효강화성의 확보를 꾀할 수 있는 데, 소량의 Sc이나 적절한 양의 Zn를 첨가함으로써 우수한 연성과 동시에 고강도를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

Al-Mg합금에 Sc이나 Zr을 첨가하여 고용화 및 시효 열처리를 수행하면 미세한 Al₃(Zr,Sc)석출상이 형성되어 강도가 향상되고 재결정시 결정립성장억제에 상당한 효과가 있는 것으로 알려져 있으나[1-4], 이는 주로 소성가공재료 관점에서 중요한 연구결과들로 주조재료로서의 연구는 아직 수행하여야 할 것이 많다. 한편, Al-Mg합금에 Zn를 첨가하면 시효열처리 후 Al₃Mg₂Zn₃ 또는 MgZn₂ 석출상이 형성되어 강도가 뚜렷하게 증가하며[5],

또한 부식특성에도 현저한 영향을 미치는 것으로 보고된 바 있다[6]. 하지만 Zn가 2%이하로 비교적 소량 첨가되었을 경우에도 강도와 부식특성에 큰 영향이 있는 지 여부는 아직 명확히 파악되어 있지 않다.

알루미늄 주조합금에서 Fe의 경우는 불순물로서 종종 존재하며, 특히 다이캐스팅 합금에서는 금형과의 소착성을 줄이기 위해 일정 범위 내에서 의도적으로 허용하고 있다. Al-Si계 합금에서 Fe가 첨가되면 침상형태의 Al₃FeSi상이 형성되어 기계적 성질이 저하되는 경향을 보이며, Al-Mg-(Mn)계에서도 Al₃Fe상 또는 Al₆(MnFe)상을 형성하여 부정적인 영향을 보일 것으로 예측된다[7]. Al-Mg합금을 다이캐스팅 및 중력금형주조에 활용하고 재활용성을 높이기 위해서는 약간의 잔류 Fe는 허용 가능해야 하며, 이에 대한 영향을 조사할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 강도와 연성을 겸비한 Al-5%Mg(wt.%)-(0.2%Mn-0.2%Ti)합금을 기본조성으로 선정하고 여기에 Sc, Zn 및 Fe를 소량 첨가하여 주조상태 합금의 미세조직, 기계적 성질 그리고 부식특성에 미치는 영향을 조사하였다. 또한 Sc이나 Zn가 첨가된 합금의 경우에는 T6열처리를 통한 미세조직 및 기계적 성질의 변화를 관찰하였다.

[†]E-mail : jmk7475@hanbat.ac.kr

Table 1. Chemical compositions of alloys (wt.%).

Alloy	Mg	Mn	Ti	Sc	Zn	Fe	Al
Base	4.51	0.20	0.18	-	-	-	balance
0.4Sc	4.66	0.19	0.18	0.35	-	-	"
1Zn	4.11	0.19	0.14	-	1.00	-	"
1.5Zn	3.77	0.15	0.15	-	1.26	-	"
0.2Fe	4.49	0.19	0.19	-	-	0.22	"
0.4Fe	4.62	0.20	0.17	-	-	0.43	"

2. 실험 방법

Al 및 Zn 순금속(99.8%)과 Al-50%Mg(wt.%), Al-10%Mn, Al-5%Ti-1%B, Al-5%Fe, Al-5%Sc의 모합금을 사용하여 유도 로에서 용해를 실시하였으며, 주탕 전에 Ar가스를 용탕내로 15분간 주입하여 탈가스 처리를 수행하였다. 처리가 완료된 용탕을 대기중에서 금형에 주입함으로써 두께 25 mm의 판재형상으로 주조하였으며, 실제 제조한 시편들의 화학조성 분석결과는 Table 1에 나타내었다. Mn은 고용강화효과와 불순물로서 존재하는 Fe의 부정적인 영향을 줄이기 위하여, 그리고 Ti은 B과 함께 주조조직의 결정립 미세화를 위해 첨가되었다. T6열처리는 Sc첨가합금의 경우 550°C에서 24시간 유지하여 고용화 처리를 한 후 수냉시키고 다시 350°C에서 24시간까지 등은 시효처리 하였으며, Zn첨가합금의 경우에는 500°C에서 6시간 유지한 후 수냉하고 160°C에서 24시간까지 등은 시효처리 하였다.

판재시편의 인장시험은 ASTM B 557M 규격에 따라 수행하였으며, 미세조직은 광학현미경(OM), 주사전자현미경(SEM-EDS) 및 투과전자현미경(TEM)으로 관찰하였다. TEM시편은

Table 2. SEM-EDS results of 2nd phases observed in Al-5%Mg based alloys (at.%).

2 nd phase	Mn	Fe	Mg	Zn	Al
AlMn	1.4~1.7	-	-	-	balance
AlFeMn	0.2~1.1	2.8~7.7	-	-	"
AlMgZn	-	-	20.1~27.2	3.7~8.6	"

먼저 100 μm이하의 두께까지 기계적으로 연마한 후 전해용액(HClO₄:CH₃OH = 1:9)를 사용하여 전해연마(twin-jet electropolisher)를 실시하여 준비하였다. 부식특성을 조사하기 위해서는 3.5%NaCl 용액을 사용하여 분극시험을 하였으며, 여기서 측정된 부식전위(E_{corr})를 가지고 부식저항성을 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 주조합금의 미세조직, 기계적 성질 및 부식특성

Al-5%Mg합금에서 Mg은 거의 전부 기지 내에 고용되기 때문에 사실상 Al기지 단상조직을 나타내지만 미량의 첨가원소 Mn으로 인하여 Fig. 1에서와 같이 소량의 AlMn상이 발견되었다. AlMn상은 기본합금조성(base)을 포함해서 Fe가 첨가되지 않은 모든 합금조성에서 관찰되었으며, SEM-EDS 분석결과를 볼 때 Al₆Mn상인 것으로 판단된다[5]. Fe가 첨가된 합금들에서는 Al₆(Mn,Fe)상이 형성된 것을 알 수 있으며[7], 대표적인 EDS분석결과는 Table 2에 요약하여 나타내었다. Fig. 2에서는 Zn가 첨가된 합금들에서 발견되는 AlMgZn상의 모습을 나타내고 있는데, SEM-EDS 결과를 토대로 관련문헌을 참고하여 볼 때 Al₂Mg₃Zn₂상인 것으로 생각된다[5-6].

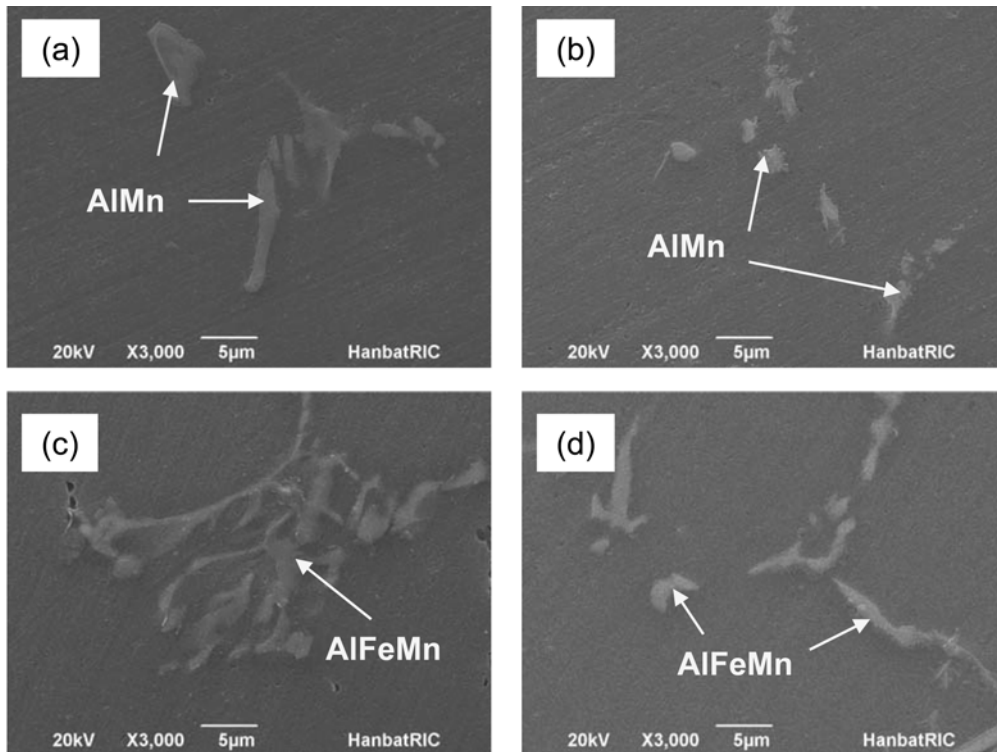


Fig. 1. SEM micrographs of as-cast Al-5%Mg based alloys: (a) base, (b) 0.4%Sc, (c) 0.2%Fe, (d) 0.4%Fe.

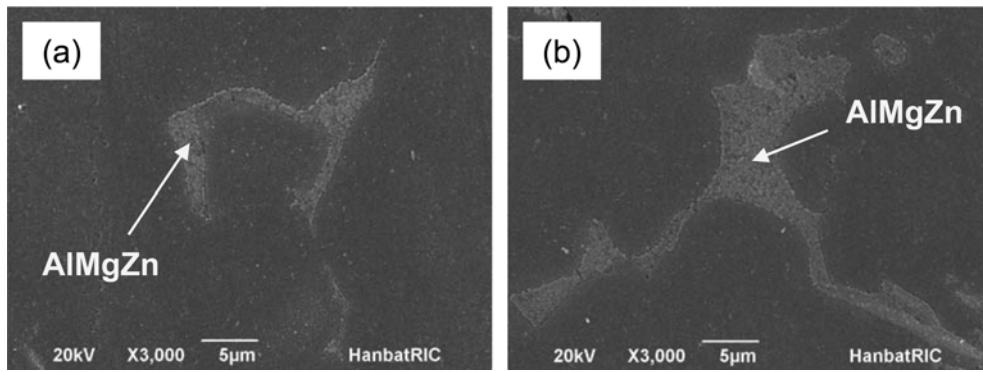


Fig. 2. SEM micrographs showing AlMgZn phases formed in as-cast Al-5%Mg-Zn alloys: (a) 1Zn, (b) 1.5Zn.

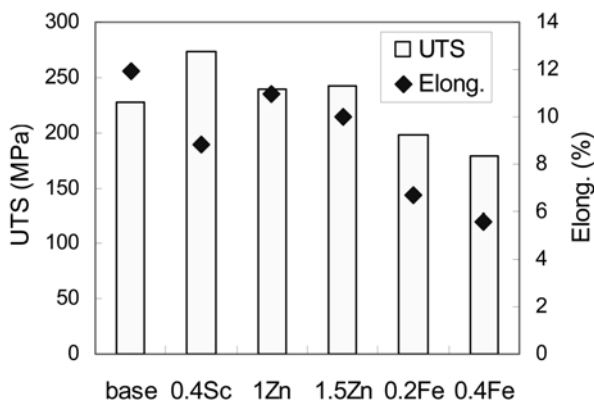


Fig. 3. Tensile properties of as-cast Al-5%Mg based alloys at room temperature.

본 연구에서 조사한 주조합금들의 인장 특성은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 비교적 뚜렷한 몇 가지 경향을 나타낸다. 먼저, Sc이나 Zn가 첨가된 합금들은 기본합금에 비하여 강도는 높고 연성은 낮은 특성을 보였으며, 원인은 주로 합금원소첨가로 인한 고용강화효과 때문인 것으로 사료된다. 여기서 주목할 점은 Sc을 첨가한 경우가 가장 높은 강도를 보인다는 것인데, 석출강화를 위해 첨가된 Sc이 주조상태에서도 강도향상에 크게 기여한다는 것을 알 수 있었다. 이에 대한 원인으로서는 고려할 만한 중요한 특징은 Sc첨가로 인한 주조상태에서의 결정립 미세화 효과이다. Table 3에서는 여러 합금들의 주조상태 평균결정립 크기를 비교하여 나타내고 있는데, 측정방법으로는 광학현미경 화상분석법을 이용해서 주조결정립들의 최대 직경 값을 구해 평균값을 산출하는 방식을 취하였다. 예상한 바와 같이 Sc이 첨가된 합금의 경우 상대적으로 결정립 크기가 작은 것을 확인할 수 있었다. Fe 첨가의 경우 인장강도와 연신율을 모두 저하시키는 것으로 조사되었으며, Fig. 1에서 나타난 취약한 AlFeMn상의 양이 Fe첨가량에 비례하여 증가하기 때문인 것으로 보인다.

Table 4에서는 주조합금들의 평균 부식전위를 나타내는 것으로 값이 증가할수록(음수이므로 절대 값이 작을수록) 내식성이 큰 경향을 갖는다. Sc은 거의 영향을 미치지 않는 데 반해 Zn는 내식성을 감소시키는 영향을 보였는데, 분극시험 중 $Al_2Mg_3Zn_2$ 상으로 인해 산화보호피막이 상대적으로 쉽게 파괴되었기 때문

Table 3. Average grain size of as-cast alloys (μm).

Alloy	Base	0.4Sc	1Zn	1.5Zn	0.2Fe	0.4Fe
Grain Size	90	72	89	88	89	90

Table 4. Electrochemical measurement results of as-cast alloys.

Alloy	Base	0.4Sc	1Zn	1.5Zn	0.2Fe	0.4Fe
$E_{\text{corr.}}$ (V)	-0.891	-0.891	-0.967	-1.111	-0.859	-0.861

으로 추정된다[6]. Fe첨가는 내식성을 약간 증가시키는 경향을 나타내었지만 그 영향이 크지는 않았다.

3.2 열처리합금의 시효경화 특성

Sc 및 Zn가 첨가된 합금의 경우 시효열처리를 통해 석출경화효과를 유발할 것으로 예상되어 시효열처리에 따른 미소경도의 변화를 조사하였다. 각 합금별 적정한 시효열처리 온도는 선행연구 및 문헌조사를 통해 선정되었으며[5,8,9], Sc첨가합금에서 상대적으로 높은 시효온도가 사용되는 원인 중의 하나는 Al기지내 Sc의 확산속도가 Mg같은 다른 합금원소에 비하여 상당히 낮기 때문이다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 Sc첨가합금에서는 8시간 이후 경도가 급격히 증가한 후 증가속도가 서서히 감소하는 경향을 보여 석출경화가 일어남을 확인할 수 있었다. Zn첨가의 경우도 1.5%Zn에서는 12시간 이후부터 경도증가가 현저히 일어나는 석출경화현상을 관찰할 수 있었지만 1%Zn합금에서는 경도의 증가현상이 뚜렷하게 관찰되지 않았다. 0.4%Sc첨가합금의 경우 Sc의 Al기지에 대한 최대용도가 약 0.4wt%로 매우 낮아서 본 실험에서 Sc첨가량이 비교적 소량임에도 불구하고 T6처리시 시효경화효과가 뚜렷이 관찰된 것으로 판단된다.

T6열처리를 수행한 시편들을 TEM으로 분석하였으며, Fig. 5와 6에서는 관찰되는 석출상들의 형상과 EDS결과를 보여 주고 있다. Sc과 Zn가 첨가된 합금들에서는 약간의 미세한 AlMnFe상이 발견되었는데, 여기서 Fe가 발견된 것은 불순물로 포함된 소량의 Fe에 의한 것으로 보인다. 또한 Sc 및 Zn가 첨가된 합금에서는 미세한 AlSc상 및 AlMgZn상이 관찰되었는데, EDS결과를 근거로 관련 문헌을 참고하여 볼 때 Al_3Sc 및 $Al_2Mg_3Zn_2$ 상인 것으로 판단된다[6,8]. 이러한 미세석출상의 형

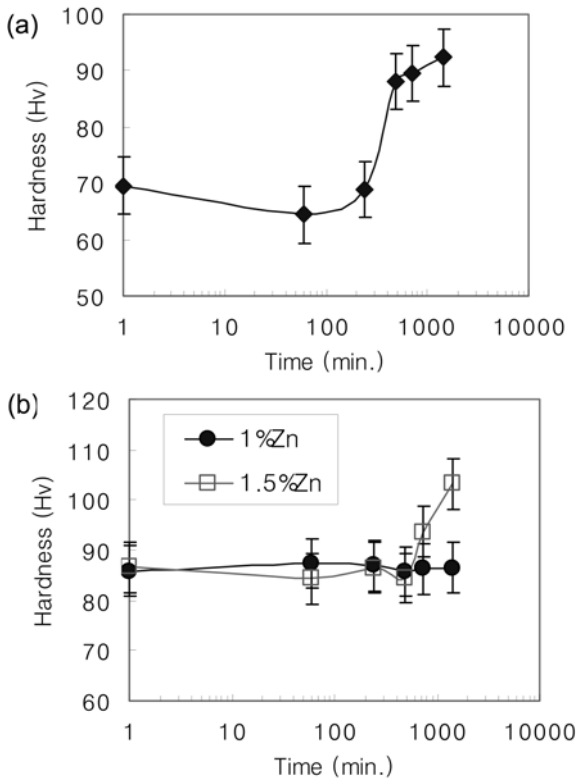


Fig. 4. Micro-hardness variations of Al-5%Mg based alloys during aging treatment: (a) 0.4%Sc alloy at 350°C. (b) Zn-containing alloys at 160°C.

성으로 인하여 석출경화효과가 발생하는 것으로 생각되며, 실제 T6열처리를 통한 인장강도의 변화는 Fig. 7(a)에서 나타낸 바와 같이 뚜렷하게 증가하는 것으로 조사되었다. 증가의 폭은 1%Zn합금과 비교하여 1.5%Zn합금에서 훨씬 높은 것으로 나타나 미소경도의 결과와 유사한 경향을 보였으며, Sc첨가합금에서 가장 높은 인장강도가 얻어지는 것으로 나타났다. 한편, Sc첨가합금의 연신율은 주조상태에서보다 T6열처리 후 약간 증가하는 경향을 나타내는 반면 Zn첨가합금에서는 거의 변화가 없거나 감소하는 것으로 조사되었다(Fig. 7(b)). 참고로 Sc첨가합금에서 관찰되는 Al₃Sc상은 Al기지와 유사한 격자상수를 가지며 Al기지내에서의 Sc의 확산속도가 작아서 조대화에 대한 구동력이 작으며[1], 따라서 시효열처리시 조대화에 의한 과시효에 대한 위험도 낮을 것으로 기대된다.

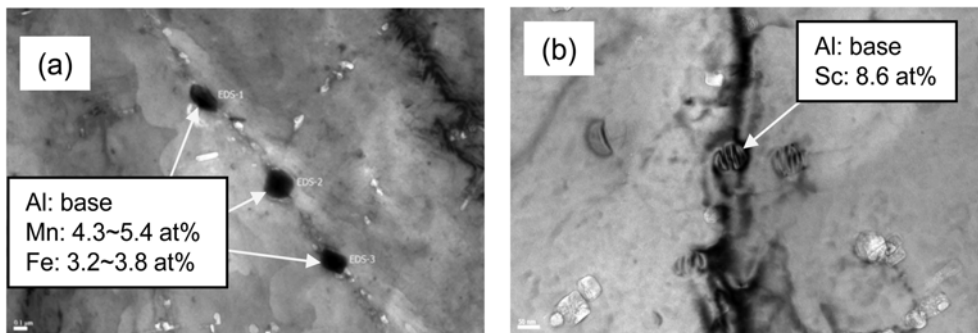


Fig. 5. TEM micrographs showing precipitates of the T6-treated Al-5%Mg-0.4%Sc alloy: (a) AlMnFe (b) AlSc.

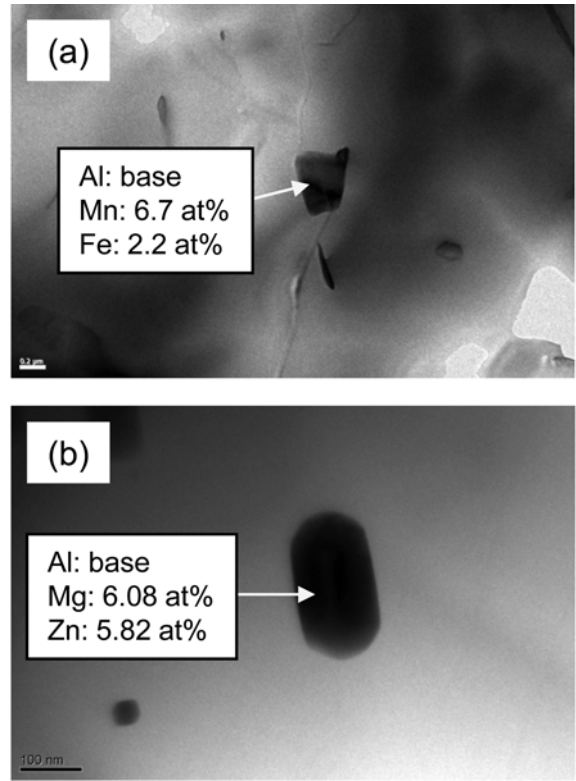


Fig. 6. TEM micrographs showing precipitates of the T6-treated Al-5%Mg-1.5%Zn alloy: (a) AlMnFe (b) AlMgZn.

4. 결 론

Al-5%Mg 주조용 합금에 Sc, Zn, Fe의 합금원소를 첨가하여 미세조직, 기계적 성질, 시효경화성 등을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 기본합금의 주조조직은 사실상 Al기지 단상으로 구성되어 있으며, 약간의 Al₆Mn상이 관찰되었다. Sc이 첨가된 합금의 경우도 유사한 조직을 보였으나 결정립의 크기가 뚜렷하게 감소하는 경향을 나타내었다.
- 2) 기본합금조성에 Fe가 소량 첨가되면 비교적 조대한 Al₆(Mn,Fe)상이 형성되었으며, Zn첨가합금에서는 Al₂Mg₃Zn₂상이 관찰되었다.
- 3) 주조상태의 인장강도는 Sc 및 Zn 첨가를 통해 현저히 향상되었으며, Fe는 소량만 첨가되어도 강도와 연신율 모두 저

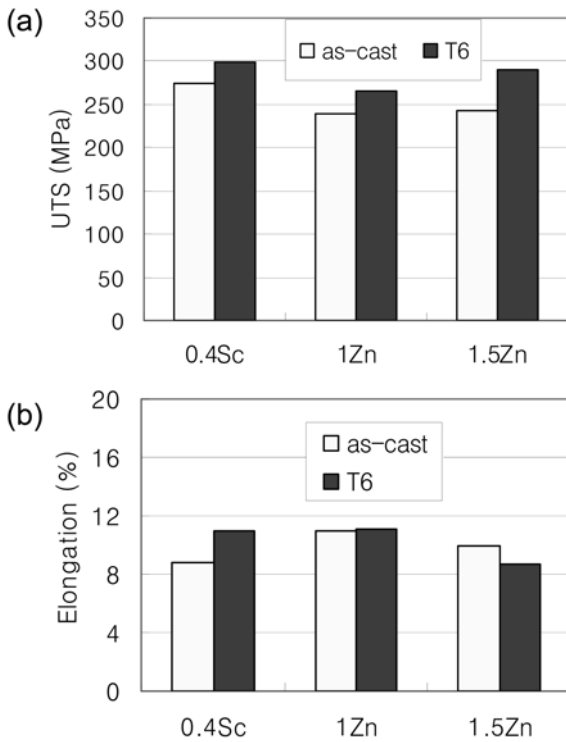


Fig. 7. Tensile property variations of as-cast and T6-treated Al-5%Mg based alloys at room temperature: (a) UTS (b) Elongation.

하시키는 경향을 보였다.

4) 주조시편의 내식성은 Zn첨가를 통해 감소하는 것으로 관찰되었고, Fe첨가는 내식성을 약간 개선시키는 영향을 나타내었다.

5) 0.4%Sc 및 1.5%Zn 첨가합금에서는 시효열처리를 통해 미소경도 및 인장강도가 증가하는 시효경화성을 갖는 것으로 조사되었으며, 이는 시효 중 형성되는 Al_3Sc 및 $Al_2Mg_3Zn_2$ 석출상으로 인한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 광주지역 첨단부품소재기술개발사업의 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] K. L. Kendig and D. B. Miracle : Acta Mater., "Strengthening mechanisms of an Al-Mg-Sc-Zr alloy", 50 (2002) 4165-4175
- [2] V. Ocenasek and M. Slamova : Mater. Characterization, "Resistance to recrystallization due to Sc and Zr addition to Al-Mg alloys", 47 (2001) 157-162
- [3] J. S. Vetrano, S. M. Bruemmer, L. M. Pawlowski and I. M. Robertson : Mater. Sci. & Eng., "Influence of the particle size on recrystallization and grain growth in Al-Mg-X alloys", A238 (1997) 101-107
- [4] Z. Liu, Z. Li, M. Wang and Y. Weng : Mater. Sci. & Eng., "Effect of complex alloying of Sc, Zr and Ti on the microstructure and mechanical properties of Al-5Mg alloys", A483-484 (2008) 120-122
- [5] J. M. Kim, K. D. Seong, J. H. Yoo, J. H. Jun, K. T. Kim and W. J. Jung : J. of Korean Soc. for Heat Treatment, "Microstructure and mechanical properties of Al-5%Mg-1%Mn-xZn alloys", 18 (2005) 12-17
- [6] A. Barbucci, P. L. Cabot, G. Bruzzone and G. Cerisola : J. of Alloys & Compounds, "Role of intermetallics in the activation of Al-Mg-Zn alloys", 268 (1998) 295-301
- [7] N. A. Belov, A. A. Aksenov and D. G. Eskin : 'Iron in aluminum alloys', Tayer & Francis (2002)
- [8] E. A. Marquis and D. N. Seidman : Acta Mater. "Coarsening kinetics of nanoscale Al_3Sc precipitates in an Al-Mg-Sc alloy", 53 (2005) 4259-4268
- [9] L. B. Ber : Mater. Sci. & Eng., "Accelerated artificial ageing regimes of commercial aluminium alloys", A280 (2000) 91-96