 논문

금형 주조한 Mg-4Al-2Sn-1Ca 합금의 부식 거동에 미치는 Ce 첨가의 영향

박정철 · 김병호 · 정재웅 · 조대현 * · 박익민 *[†]

국방기술품질원, *부산대학교 재료공학과

The Effect of Ce Addition on Corrosion Behavior of Permanent Mold Casting Mg-4Al-2Sn-1Ca alloy

Kyung Chul Park, Byeong Ho Kim, Jae Woong Jung, Dae Hyun Cho* and Ik Min Park*[†]

Defence Agency for Technology and Quality

*Department of Material Science and Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

Abstract

In the present work, the effect of adding Ce on the corrosion behavior of Mg-4Al-2Sn-1Ca alloy was investigated. The studied alloys were fabricated by gravity casting method and a potentiodynamic polarization, A.C. impedance and hydrogen evolution tests were carried out in a 3.5% NaCl solution with pH 7.2 at room temperature to measure the corrosion properties of Mg-4Al-2Sn-1Ca-xCe alloys. The microstructure of the Mg-4Al-2Sn-1Ca alloy was composed of α -Mg, Mg₁₇Al₁₂, Mg₂Sn and CaMgSn phase. Also, a Al₁₁Ce₃ phase was newly formed by the addition of Ce. With an increase of the Ce contents, the microstructure became refined and the corrosion resistance improved.

Key words: Permanent mold casting, Mg-4Al-2Sn-1Ca-xCe alloy, Corrosion properties.

1. 서 론

마그네슘 합금은 우수한 비강도, 뛰어난 주조성, 우수한 절삭성 그리고 높은 진동 흡수능 등으로 인해 철강 및 알루미늄 합금을 대체할 수 있는 친환경 초경량 구조 재료로 주목 받고 있으며, 경량화를 통한 연비 향상이 기대되는 자동차 산업에서 사용이 급격히 증대 되고 있다[1-5]. 그러나 마그네슘은 전기 화학적으로 전위가 낮은 활성적인 금속으로 해수 및 대기에서의 내식성이 좋지 않으며, 고온에서의 내열 특성이 낮은 이유로 자동차용 파워트레인 부품으로 사용하기에 아직 많은 제약이 있는 실정이다.

최근 마그네슘 합금의 내열성과 내식성을 높이는 연구는 매우 활발히 이루어지고 있으며, 마그네슘 상용 합금으로 AZ91

과 AM60등의 Mg-Al 계 합금이 높은 주조성과 상온에서의 뛰어난 기계적 특성 때문에 자동차의 seat frame, oil pan, crank case 등으로 이용 되고 있다[6-10]. 그러나 마그네슘 합금의 연구의 대부분은 내열 특성을 높이는 연구에 초점을 맞추어 이루어지고 있으며 내식성의 연구는 상대적으로 부족한 실정이다.

현재 Mg-Al계 마그네슘 합금의 내식성을 향상시키는 연구는 알칼리 토금속 원소인 칼슘(Ca)과 희토류 원소(RE)등을 첨가하여 α -Mg와 갈바닉 부식을 유발하는 Mg₁₇Al₁₂상을 줄이는 방법과 부식 과정에서 발생하는 표면 피막을 안정화시키는 이트륨(Y), 리튬(Li) 및 칼슘(Ca) 원소 등의 첨가 방안이 보고 된다[11-13].

본 연구에서 개발한 Mg-4Al-2Sn-1Ca 마그네슘 합금은 상

Received: Sep. 11, 2014 ; Revised: Nov. 3, 2014 ; Accepted: Nov. 11, 2014

[†]Corresponding author: Ik Min Park (Pusan National Univ.)

Tel: +82-51-510-2383, Fax: +82-51-514-4457

E-mail: imPark@pusan.ac.kr

Journal of Korea Foundry Society

2014, Vol. 34 No. 6, pp. 187~193

<http://dx.doi.org/10.7777/jkfs.2014.34.6.187>

pISSN 1598-706X / eISSN 2288-8381

© 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.

용 마그네슘 합금 AZ91에 비해 Al 첨가량을 4%로 낮춰 주조성은 조금 낮아지지만 Sn과 Ca를 합금화함으로써 내열특성과 내식성을 향상시킨 합금이다. 그러나 Mg-Al-Sn-Ca계 합금에서 조대하게 형성되는 CaMgSn상은 초기 부식 시 갈바닉 부식 기점을 확대 시키는 단점을 안고 있어 이를 제어하는 연구필요한 실정이다. Mingbo에 의하면[14,15], Zr, Y 및 Ce의 첨가에 의해 CaMgSn상을 제어함으로써 마그네슘 합금의 기계적 특성을 향상 시켰다는 보고가 있으나, 부식 특성 변화에 대한 연구는 아직 부족한 실정이며 이에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 Mg-Al-Sn계 합금에서 Ca를 첨가한 ATX421 내열 마그네슘 합금을 기본 합금으로 하여 희토류 원소인 Ce를 0.5 wt%, 1 wt% 첨가한 합금을 통해 Ce이 마그네슘 합금에 미치는 부식 특성에 미치는 미세조직 변화 영향을 검토하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 마그네슘 합금의 용해 및 주조

합금 제조에 사용된 시료는 순금속 Mg(99.98%)와 Al(99.95%), Sn(99.9%), 모합금 Mg-40%Ca 및 Mg-40%Ce를 사용하였다. 마그네슘 용탕에서 합금 원소 첨가시 균질한 조성의 확보 및 대기와의 산화 반응을 억제하기 위해 보호가스인 SF₆+CO₂ 혼합 가스 분위기의 fluxless 용해 방법으로, 750°C에서 용해하였다. Graphite 봉을 사용하여 용탕 교반을 실시하였으며, 고순도 Ar 가스를 용탕 내부에 취입하여 탈산 및 탈가스 처리한 후 용탕을 안정화하였다. 합금의 미세조직 관찰 및 내식성을 평가하기 위해 봉상의 시편이 채취 가능한 금형을 사용하였으며, misrun 없이 내부로의 충분한 급탕이 이루어질 수 있도록 200°C로 예열한 뒤 주입하였다. 시편 제조에 사용된 금형은 Fig. 1에 나타내었으며, 제조된 시편편의 화학 성분 및 합금명은 Table 1에 나타내었다.

2.2 미세조직 관찰

본 연구에서는 마그네슘 주조 합금의 합금 원소에 따른 미세 조직을 관찰을 위해 제조된 합금의 주물의 길이 방향의 아래 5 cm 부분에서 시편을 채취하여 마운팅 후 SiC 연마지를 사용하여 #2000로 연마한 후 최종 연마를 0.25 µm의 diamond paste를 이용하여 경면으로 준비하여 3% nital 용액으로(97 ml ethanol + 3 ml nitric acid)를 부식하였다. 광학현미경(OM)과

Fig. 1. The shape of mold.

주사전자현미경(SEM)으로 미세조직을 관찰하였다. X선 회절 분석(XRD) 시 40 KV, 30 mA의 조건으로 회절각(2θ) 20°~80° 범위에서 상 분석을 실시하였으며, SED-EDS 분석을 통해 각 원소의 미세 조직 내에서의 분포를 통해 상 분포를 파악할 수 있었다. 또한 상분율을 측정하기 위하여 image analyzer를 이용하였다.

2.3 부식거동 평가

ATX421-xCe 합금의 전기화학 시험은 전기화학 분석 장치인 Electrochemical Interface Solartron 1287을 이용하여 측정하였다. 이때, 기준 전극(reference electrode)은 Ag/AgCl 전극을, 상대전극(counter electrode)은 백금 전극(25 mm × 25 mm, 60 mesh)을 사용하였으며, 전해액(electrolyte)은 상온에서 3.5% NaCl 수용액(pH 7.2)을 사용하였다. 시편은 SiC연마지 #600까지 연마하였고, 분극 시험 시작 전 시편을 전해액에 침지시켜 비교적 일정한 전위로 유지시킨 후 전위 범위 -0.3 V vs. OCP ~ -1.0 vs. REF에서 scan rate 0.2 mV/sec로 인가하여 시험을 실시하였다. Ce 첨가에 따른 부식 저항성에 미치는 인자를 분석하기 위해 전기화학적 임피던스 분광법(Electrochemical impedance spectroscopy)을 실시하였으며, Solartron 1260 Frequency Respon Analyzer (FRA)와 Solartron SI 1287 Electrochemical Interface를 이용해 개방회로 전위(OCP)에서 ±10 mV의 사인곡선 전위를 인가하여 주파수 범위 0.1~100 kHz에서 측정하였다.

수소발생 실험은 25 × 12 × 10 mm 크기의 시편을 pH 7.2의 3.5% NaCl 수용액에 완전히 침지시킨 후 갈때기로 시편을 덮고 그 위에 뷰렛을 연결하여, 부식 반응의 결과로 발생되는 수소 기체의 양을 30분마다 72시간 동안 뷰렛의 눈금으로

Table 1. Metallurgical designation and chemical compositions of ATX421-xCe alloys (wt.%).

Alloy	Al	Sn	Ca	Ce	Fe	Ni	Cu	Co	Mg
ATX421	3.9	1.9	0.8	-	0.02	0.01	0.01	-	Bal.
ATX421-0.5Ce	3.8	2.1	0.8	0.4	0.02	0.01	-	-	Bal.
ATX421-1Ce	3.9	2.01	0.7	0.9	0.01	0.01	0.01	-	Bal.

로 읽어 마그네슘 합금의 부식 속도(ml/cm^2)를 측정 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 미세조직 관찰

Fig. 2는 ATX421-xCe 합금의 주방 상태에서의 X-선 회절 분석 결과를 나타내고 있다. X-선 회절 분석 결과 ATX421 합금은 α -Mg상과 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$, Mg_2Sn 및 CaMgSn 상으로 구성되어 있으며, Ce 첨가에 의해 $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$ 상이 새롭게 형성됨을 확인하였다. Fig. 3은 주사전자현미경(SEM)으로 ATX421-xCe 합금의 미세 조직을 관찰한 결과로, ATX421 합금은 수직상정의 응고셀 구조를 나타내고 있으며, Ce를 첨가시 $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$ 상이 최종 응고부에 형성 되는 것을 관찰 할 수 있었다. 또

Fig. 2. X-ray diffraction profiles of the ATX421 alloys.

한 Ce의 첨가량이 늘어나면 ATX421 합금의 조대한 침상의 CaMgSn 상이 미세해지는 것을 확인 할 수 있었다. 결정립 크기를 측정하기 위해, 420°C 에서 4시간 동안 용체화 처리 후 광학현미경으로 미세조직을 관찰하였고, Fig. 4에 결과를 나타 내었다. ATX421, ATX421-0.5Ce, ATX421-1Ce 합금의 결정립 크기는 각각 150, 106, $75\ \mu\text{m}$ 로, Ce 첨가에 결정립 크기는 현저히 감소하였다. Table 2는 ATX421-xCe 합금의 미세조직에 대한 정량적인 분석 결과로, Ce 첨가에 의해 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 상의 분율은 3.3%에서 1.2%로 감소하였으며, $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$ 상의 분율은 0%에서 1.5%로 증가하였다. 하지만 CaMgSn 상의 분율은 거의 변화가 없었으나, CaMgSn 상의 크기는 크게 감소한 것을 확인 할 수 있다. 위의 결과를 통해 Ce의 첨가를 통해 조대한 CaMgSn 상이 크기가 제어되고 $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$ 상 및 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 상의 분율에 영향을 주는 것으로 확인하였다. 이는 Ce은 Mg 기지에서 낮은 고용도로 인해 응고 과정 중 고액계면 전방에 높은 농도로 축적이 되어 조성적 과냉을 일으킴과 동시에 Sn의 확산 속도를 낮추어 CaMgSn 상의 성장을 제어하며, 또한 최종 응고부의 높은 Ce의 농도로 인해 $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$ 상을 형성함으로써 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 상의 분율을 감소시킨 것으로 판단된다.

3.2 부식거동평가

3.2.1 동전위 분극 실험

pH 7.2의 3.5 wt% NaCl 용액에서 시험한 ATX421-xCe 합금의 동전위 분극 시험 결과는 Fig. 4에 나타내었고, Table 3에 전기화학적 데이터를 나타내었다. Fig. 5 에서, 부식 전위를 지난 후 양극 분극 곡선의 전류 밀도 값은 급격히 증가하

Fig. 3. SEM micrographs of as-cast ATX421-xCe alloys; (a) ATX421, (b) ATX421-0.5Ce and (c) ATX421-1Ce alloy.

Fig. 4. Grain size of ATX421-xCe alloys; (a) ATX421, (b) ATX421-0.5Ce and (c) ATX421-1Ce alloy.

Table 2. Quantitative analysis data of microstructure in ATX421-xCe alloys.

Alloy	Volume fraction of phases (%)				Size of CaMgSn (μm)	Grain Size (μm)
	$\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$	Mg_2Sn	$\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$	CaMgSn		
ATX421	3.2	0.2	0	4.3	28~97	150
ATX421-0.5Ce	2.1	0.2	0.7	4.5	15~45	106
ATX421-1Ce	1.2	0.2	1.5	4.6	10~36	75

였는데, 이는 부식 전위 이상에서 마그네슘 합금의 양극 및 음극 부분 반응 속도가 급격히 증가하므로 전류 밀도 값 역시 급격히 증가한 것으로 판단된다. Table 3의 전기화학 데이터로부터, ATX421, ATX421-0.5Ce 및 ATX421-1Ce 합금의 부식 전위(E_{corr})는 각각 -1.43, -1.40, -1.39로 측정되었고 부식 전류(I_{corr})는 $7.24\text{E-}04$, $2.2\text{E-}04$, $1.2\text{E-}04$ 로 나타내었다. 부식 속도라고 일컬어지는 교환 전류 밀도 값은 세 합금 중 ATX421-1Ce 합금이 가장 낮았으며, Ce 첨가시 부식 전압은 소량 감소하였다. 부식전위 이상에서 Ce를 첨가함에 따라 양극 전류 밀도 값이 낮아진 것으로 보아 ATX421-1Ce 합금이 가장 우수한 내식성을 나타내는 것으로 판단된다.

3.2.2 A.C. Impedance 실험

ATX421-xCe 합금의 임피던스 결과를 Fig. 6에 나타내고

Table 3. Potentiodynamic polarization data of the ATX421 alloys.

Alloy	$E_{\text{corr}}(\text{V}, \text{Ag}/\text{AgCl})$	$I_{\text{corr}} (\text{Acm}^{-2})$
ATX421	-1.43	$7.4\text{E-}04$
ATX421-0.5Ce	-1.40	$2.2\text{E-}04$
ATX421-1Ce	-1.39	$1.2\text{E-}04$

Table 4에 전기화학적 정량적 결과를 정리하였다. 각 합금의 Nyquist plot (Fig. 6(a))과 Bode plot (Fig. 6(c))을 보면 임피던스 스펙트럼은 두 개의 arc 형태로 나타내었다. 이는 등가회로 모델 중 피막층이 존재하는 상황에 대한 등가회로 양상이며, 각 합금이 유사한 아크 형태의 임피던스 스펙트럼을 형성하는 것으로 보아 부식 메커니즘은 같은 것으로 사료되며, 아크 직경의 크기로 부식 저항성을 평가할 수 있다. 회로

Fig. 5. Potentiodynamic polarization curves of ATX421-xCe alloys.

Fig. 6. Impedance spectra of (a) the Nyquist, (b) and (c) Bode plots, and (d) equivalent circuit for fitting the electrochemical impedance spectroscopy data.

Table 4. Corrosion parameters obtain from EIS measurement for three alloys.

Specimen	$R_s (\Omega \text{ cm}^2)$	CPE_1		$R_{film} (\Omega \text{ cm}^2)$	CPE_2		$R_{ct} (\Omega \text{ cm}^2)$
		$C_{film} (\text{F cm}^{-2})$	n		$C_{dl} (\text{F cm}^{-2})$	n	
ATX421	5.83	1.147E-5	0.9450	421	9.326E-3	0.54748	562
ATX421-0.5Ce	7.69	1.559E-5	0.8908	562	4.932E-4	0.59621	756
ATX421-1Ce	6.63	1.729E-5	0.9376	615	8.420E-3	0.48983	1023

구성은 용액 자체의 저항(R_s : solution resistance)과 전극 용액 계면 간에 존재하는 정전 용량 성분과의 전하이동저항성분(R_{ct} : charge transfer resistance)이 병렬로 구성된 간단한 회로에서 arc의 하나의 성분이 필름 저항과 필름에 대한 정전 용량성분이 포함된 것으로 정전 용량 성분은 완벽한 capacitor 즉, 위상차가 0 이 아니기 때문에 이를 보완한 CPE (constant phase element) 요소가 각 저항에 병렬로 포함되어 최종적인 등가회로는 Fig. 6(d)와 같이 구성되며, Table 4에 R_s , R_{film} 및 R_{ct} 값을 정리하였다. 이때 R_s 값은 매우 작은 값으로 무시 할 수 있으며, R_{film} 과 R_{ct} 값의 합으로 각 합금의 부식 저항성을 정량적인 값으로 비교 할 수 있다. ATX421 합금의 R_{film} 및 R_{ct} 값은 각각 421, 562 Ω 이었고, ATX421-1Ce 합금의 값은 615, 1023 Ω 으로, Ce첨가량이 증가할 수록 부식 저항성이 증가하였으며, 이는 동전위 분극 실험 결과와도 잘 일치 하였다.

3.2.3 수소 발생 실험

ATX421-xCe 합금을 3.5 wt% NaCl 용액에서 72시간 동안 침지시 발생하는 수소 기체 발생량을 측정하여 부식 속도로 환산한 뒤 결과는 Fig. 7에 나타내었다. 수소 발생량은 시간이 증가함에 따라 함께 증가 하였으며, Ce를 첨가 할수록 ATX421 합금의 부식 속도는 감소하는 경향을 나타내었다.

3.2.4 부식면 관찰

ATX421-xCe 합금의 부식 초기 거동을 관찰하기 위해서 3.5% NaCl 수용액에 시편을 30분, 1시간, 2시간 침지 한 후 광학 현미경으로 동일한 부분의 부식 표면을 관찰한 사진을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8(a)~(d)는 ATX421, (e)~(h)는 ATX421-0.5Ce, (i)~(l)은 ATX421-1Ce 합금을 나타내고 있고 세 합금 모두 일부 지역에서 기지와 2차상의 갈바닉 전위차에 의한 갈바닉 부식이 국부적으로 관찰되었다. 30분이 지남에 따라 ATX421 합금에서 먼저 급격히 부식이 발생하였고, 60분간 침

Fig. 7. Hydrogen evolution rate of ATX421 alloys in 3.5% NaCl solution.

지 후에는 ATX421 합금과 Ce이 첨가량 합금에는 부식면의 면적이 큰 차이를 보이는 것을 확인 할 수 있다. 시간이 지남에 따라 ATX421의 부식은 초기 갈바닉 부식이 발생한 기점에서 넓은 면적으로 생성 되는 것을 확인 할 수 있지만, Ce 첨가량이 증가할수록 부식 기점이 비교적 균일하게 분산되며 부식 면적이 줄어드는 것을 관찰하였다.

Ce첨가에 의한 부식 거동 변화를 관찰하기 위해, ATX421, ATX41-0.5Ce, ATX421-1Ce 합금의 부식 표면 및 부식면에 대한 XRD분석 결과를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9(d)의

XRD 분석 결과, 부식 생성물은 $Mg(OH)_2$ 로 확인 되었다. Fig. 9(a)~(c)의 부식면 관찰 결과, ATX421 합금의 부식면에 형성된 $Mg(OH)_2$ 층의 분포는 불균일하였으나, ATX421-1Ce 합금의 부식면은 치밀하고 균일하게 형성 되는 것을 확인 할 수 있다. 이는 Ce첨가에 의해, 조직이 미세해지면서 이차상간에 네트워크 구조를 형성함으로써 undercutting을 방해하며, 부식 생성물인 $Mg(OH)_2$ 층이 안정화 되어 ATX421 합금의 내식성은 향상된 것으로 판단된다.

4. 결 론

CO_2+SF_6 분위기하에서 Mg합금을 용해하고 금형주조 방법으로 제조된 ATX421-xCe 합금의 부식 특성을 평가하면서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) ATX421 합금은 α -Mg상과 $Mg_{17}Al_{12}$, Mg_2Sn 및 $CaMgSn$ 상으로 구성되어 있었으며, Ce 첨가에 의해 $Al_{11}Ce_3$ 상이 새롭게 형성되었다. Ce 첨가에 의해 ATX421 합금의 조직은 미세화 되었다.

2) 동전위 분극 실험, A.C. 임피던스, 수소 발생 실험을 통해 Ce의 첨가에 의해, ATX421 합금의 내식성은 증가하였다. 이는 Ce첨가에 의해, 조직이 미세해지면서 이차상간에 네트워크 구조를 형성함으로써 undercutting을 방해하며, 부식 생성물인 $Mg(OH)_2$ 층이 안정화 되어 ATX421 합금의 내식성이 향상되었다.

Fig. 8. Optical micrographs of corroded surfaces as a function of immersion time until 2h; (a)~(d) ATX421, (e)~(h) ATX421-0.5Ce and (i)~(l) ATX421-1Ce alloy.

Fig. 9. FE-SEM images of corrosion production film formed on the surfaces of (a) ATX421, (b) ATX421-0.5Ce and (c) ATX421-1Ce alloys (d) X-ray diffraction patterns in the as-corroded surface of ATX421-xCe alloys.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의해 연구되었음.

References

- [1] Kim BH, Park KC, Park YH and Park IM, Mater. Lett., "Effect of Pd on microstructures and tensile properties of as-cast Mg-6Al-1Zn alloys", **65** (2011) 122-125.
- [2] Park KC, Park BH, H. Kimura, Park YH and Park IM, Mater. Trans., "Microstructure and corrosion properties of Mg-xSn-5Al-1Zn (x = 0, 1, 5 and 9 mass%) alloys", **51** (2010) 472-476.
- [3] Jo SM, Park KC, Park BH, H. Kimura, Park SK and Park YH, Mater. Trans., "Investigation on the microstructure and mechanical properties of Mg-Al-Yb alloys", **52** (2011) 1088-1095.
- [4] M.M. Avedesian, N.M. Inc. and H. Baker, Magnesium and magnesium alloys, ASM International, USA, (1999) 3-6.
- [5] Kim BH, Park KC, Park YH and Park IM, Mater. Sci. Eng. A, "Investigations of the properties of Mg-4Al-2Sn-1Ca-xCe alloys", **527** (2010) 6372-6377.
- [6] M. Yang and F. Pan, Mater. Design, "Effects of Sn addition on as-cast microstructure, mechanical properties and casting fluidity of ZA84 magnesium alloy", **31** (2010) 68-75.
- [7] S. Wei, Y. Chen, Y. Tang, H. Liu, S. Xiao, G. Niu, X. Zhang and Y. Zhao, Mater. Sci. Eng. A, "Compressive creep behavior of as-cast and aging-treated Mg-5 wt% Sn alloys", **492** (2008) 20-23.
- [8] C.L. Mendis, C.J. Bettles, M.A. Gibson and C.R. Hutchinson, Mater. Sci. Eng. A, "An enhanced age hardening response in Mg-Sn based alloys containing Zn", **435-436** (2006) 163-171.
- [9] H.E. Friedrich and B.L. Mordike, Magnesium Technology, Springer, Germany, (2006) 20.
- [10] W. Xiao, S. Jia, J. Wang, J. Yang, L. Wang, Acta. Mater., "The influence of mischmetal and tin on the microstructure and mechanical properties of Mg-6Zn-5Al-based alloys", **56** (2008) 934-941.
- [11] Kang YH, Kim SH, Jo SM, Kim BH, Park IM and Park YH, J. Korea Foundry Society, "Microstructure and corrosion behavior of Mg-xSn (x = 1, 3, 5, 7, 9 wt.%) Alloys", **31** (2011) 362-365.
- [12] X. Zhang, Y.J. Li, K. Zhang, C.S. Wang, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, "Corrosion and electrochemical behavior of MgY alloys in 3.5% NaCl solution", **23** (2013) 1226-1236.
- [13] TANG S.Q, ZHOU J.X, TIAN C.W and YANG Y.S, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, "Morphology modification of Mg2Si by Sr addition in Mg-4%Si alloy", **21** (2011) 1932-1936.
- [14] Mingbo. Y and Fusheng. P, Mater. Sci. Eng. A, "Effects of Y addition on as-cast microstructure and mechanical properties of Mg-3Sn-2Ca (wt.%) magnesium alloy", **525** (2009) 112-120.
- [15] Kim JH, Cho DH, Park IM, J. Korea Foundry Society, "Effect of cerium on the microstructure and room temperature tensile properties of Mg-4Al-2Sn-1Si alloys", **32** (2012) 289-295.