 논문

Mg-Al-Zn-CaO 합금의 부식 거동

문정현 · 전중환[†] · 김영직^{*}한국생산기술연구원 융합신공정연구그룹, ^{*}성균관대학교 공과대학 신소재공학부

Corrosion Behavior of Mg-Al-Zn-CaO Alloy

Jung-Hyun Moon, Joong-Hwan Jun[†] and Young-Jik Kim^{*}

Advanced Fusion Process R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 406-840, Korea

^{*}School of Advanced Materials Science & Engineering, Sungkyunkwan University, Kyunggi-do 440-746, Korea

Abstract

The influences of a small amount of CaO addition on the microstructure and corrosion behavior of AZ81 casting alloy have been investigated by means of optical microscopy, scanning electron microscopy, X-ray photoelectron spectroscopy, immersion and electrochemical tests. The added CaO led to the refinement of α -Mg grains and the decrease in β precipitate content by the formation of an Al_2Ca phase. The AZ81-CaO alloy had a better corrosion resistance than the AZ81 alloy. The microstructural characterization on the corroded surface revealed that the enhanced corrosion resistance of the CaO-containing alloy may well be ascribed to the increased barrier effect of precipitates formed more continuously along the grain boundaries and the incorporation of Al and Ca elements into the corrosion film, by which it became more protective.

Key words: CaO, ECO-Mg, Microstructure, Corrosion properties

1. 서 론

마그네슘(Mg) 합금은 탁월한 경량성 이외 우수한 주조성, 절삭성, 진동 및 충격 흡수성, 전자파 차단성 등으로 인해 자동차 및 휴대용 IT 관련 부품에 적용되고 있으며, 활용범위를 넓히기 위한 연구가 현재 다각도로 진행되고 있다[1,2]. 체심입방구조(BCC)인 Mg-Li 합금을 제외한 모든 Mg 합금은 육방조밀구조(HCP)를 갖기 때문에 근본적으로 가공성이 취약하며, 따라서 Mg 부품은 주로 주조공정에 의해 제조되고 있다[3]. 이미 잘 알려져 있는 바와 같이 Mg 용탕은 공기와의 접촉에 의해 쉽게 발화되기 때문에 주조공정 중 공기와의 접촉을 차단하기 위한 육불화황(sulfur hexafluoride, SF_6)과 같은 보호가스의 사용이 불가피하다. 하지만 SF_6 가스는 탁월한 보호특성에도 불구하고 지구온난화지수(GWP)가 이산화탄소(CO_2)의 22,000배에 달하는 온실가스로 전세계적으로 사용이 제한되고

있는 실정이다. 최근 Kim 등[4,5]은 SF_6 가스의 사용을 배제하거나 사용량을 최소화할 수 있는 ECO-Mg 소재를 개발하였다. ECO-Mg은 상용합금에 소량(0.3~1.0 wt.%)의 CaO를 첨가한 것으로 용탕의 표면에 높은 밀도의($\text{MgO} + \text{CaO}$) 복합산화층을 형성, 공기와의 접촉을 효과적으로 차단하여 발화저항성을 향상시키는 것으로 알려져 있다[4,5]. 이때 첨가된 CaO는 용탕에서 Ca로 환원되어 조직 내에 포함되는데, Mg 내의 낮은 고용도로 인해 Ca 원소의 대부분은 Mg_2Ca , Al_2Ca 또는 $(\text{Mg,Al})_2\text{Ca}$ 등 금속간화합물을 형성하여 결정립계나 아결정립계에 분포하게 되며[6], 이로 인해 CaO의 첨가는 상용 Mg 합금의 조직을 미세화하고 이와 더불어 상·고온 기계적 특성을 향상시키는 추가적인 효과가 나타나는 것으로 확인되고 있다[6-9].

현재 Mg 합금의 상용화에 가장 큰 문제점 중 하나는 낮은 내식성이다. Mg 합금의 부식 특성은 합금 내 불순물, 결정립의 크기, 석출상의 분포 및 형상 등에 영향을 받는다고 알려

Received: April 22, 2013 ; Accepted: June 26, 2013

[†]Corresponding author: Joong-Hwan Jun (KITECH)

Tel: +82-32-850-0425, Fax: +82-32-850-0430

E-mail: jhjun@kitech.re.kr

Journal of Korea Foundry Society

2013. Vol. 33 No. 3, pp. 127~133

<http://dx.doi.org/10.7777/jkfs.2013.33.3.127>

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.

져 있으며[10-12], 표면처리와 미세조직 제어, 합금원소 첨가 등을 통해 이를 개선하기 위한 연구가 진행되고 있다[13-15]. 최근 Nam 등[16]은 AZ91-(0~0.6) wt.% CaO 합금에 대한 부식 거동을 조사한 결과, CaO의 첨가량이 증가함에 따라 부식저항성이 지속적으로 증가한다고 보고하였다. 하지만 이들의 연구는 CaO의 영향을 전기화학적(electrochemical)인 방법으로만 평가한 것으로, 보완되어 함께 이루어져야 할 무게감량(weight loss)에 대해서는 조사가 이루어지지 않았다. Shi 등[17]에 따르면 소재의 부식특성을 평가하기 위해서는 전기화학적 방법 이외에 침지시험(immersion test), 염수분무시험(salt-spray test), 수소방출량 측정(H_2 evolution)과 같은 무게감량 관련 데이터가 제시되어야 하며, 따라서 CaO가 첨가된 Mg 소재에 대해서도 무게감량을 통한 부식저항성 평가가 필요하다고 생각된다. 본 연구에서는 Mg-Al-Zn 합금을 대상으로 Non-SF₆ 공정이 가능한 최소한의 함량인 ~0.4 wt.% 수준의 CaO 첨가가 부식 거동에 미치는 영향을 전기화학 및 침지시험을 병행하여 조사하고 이를 미세조직의 변화와 연관지어 분석하였다.

2. 실험 방법

AZ81 합금 및 1.0 wt.% CaO 함유 AZ81 모합금을 이용하여 목적 조성으로 평량한 후 전기저항로에서 재용해한 다음 700°C로 유지한 용탕을 250°C로 예열된 금형에 중력주조하였다. 이때 CaO가 첨가되지 않은 합금은 보호가스(SF₆+CO₂)를 사용하여 주조하였고, CaO가 첨가된 합금은 CO₂ 가스만 사용하여 주조하였다. 주조된 합금의 화학조성을 유도결합 플라즈마(inductively coupled plasma, ICP)로 분석하였으며, 그 결과를

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

Alloy	Chemical compositions (wt%)			
	Al	Zn	Ca	Mg
AZ81	8.53	0.64	-	Bal.
AZ81-0.4CaO	8.00	0.67	0.41	Bal.

Table 1에 나타내었다. 실험에 사용된 Mg 합금 시편은 60(L)×30(W)×2(T) mm³ 크기로 제작하여 SiC 연마지로 #4000까지 연마 후 알코올로 세척하여 사용하였다. 침지시험은 상온의 5 wt.% NaCl 수용액에서 각각 4시간, 48시간 동안 유지한 시편을 크롬산(18 wt.% CrO₃+0.1 wt.% AgNO₃) 용액에서 5분간 산세한 다음 에탄올로 세척 한 뒤 무게 변화를 측정하여 부식 속도(corrosion rate)를 계산하는 방법으로 진행하였다. 전기화학 시험은 작동전극에 Mg 시편, 상대전극에 고순도 탄소봉, 기준전극에 포화감홍전극(saturated calomel electrode, SCE)을 사용하여 상온의 5 wt.% NaCl 수용액에서 개방회로준위(open circuit potential, OCP)로 1시간 유지 후 진행하였다. 동전위 분극(potential-dynamic polarization) 시험은 Potentiostat (AMETEK VersaSTAT3)를 이용하여 -2,400 mV_{SCE} ~ -400 mV_{SCE} 전위 범위에서 1 mV/sec의 주사속도로 진행하였으며 Tafel 외삽법을 이용하여 부식전위(E_{cor}) 값과 부식전류밀도(i_{cor}) 값을 구하였다. 또한, 100 kHz ~ 10 mHz의 주파수 범위에서 전기화학적 임피던스 분광법(electrochemical impedance spectroscopy, EIS)으로 임피던스 데이터를 측정하였다. 시편의 미세조직은 광학현미경(OM, Nikon Epiphot 200BD)과 주사전자현미경(SEM, FEI Quanta 200F)으로 관찰하였고, 에너지 분산 X-선 분광기(EDS, AMETEK PV72-60030F)와 X-선 광전자 분광기(XPS, Thermo VG Scientific Multilab 2000)를 이용하여 부식생성물을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 미세조직

Fig. 1은 중력주조한 AZ81 합금과 AZ81-0.4CaO 합금의 OM 미세조직으로, CaO의 미량 첨가로 인해 결정립의 크기가 줄어들고 결정립계에 주로 분포해있는 β -Mg₁₇Al₁₂상이 약간 미세해지는 것이 관찰된다. 영상분석기(image analyzer)로 미세조직을 분석한 결과, AZ81 합금과 AZ81-0.4CaO 합금의 결정립 크기는 각각 59 μ m, 49 μ m로 확인되었으며, β 상의 양은 AZ81 합금이 ~8 vol.%, AZ81-0.4CaO 합금이 ~7 vol.%로 약

Fig. 1. Optical microstructures of (a) AZ81 and (b) AZ81-0.4CaO alloys in as-cast state.

Fig. 2. SEM image showing precipitate particles (left) and EDS maps of the elements Mg, Al, Mn and Ca (right) in AZ81-0.4CaO alloy.

간 감소하는 것으로 나타났다. CaO 첨가로 인한 Mg-Al계 합금의 결정립 미세화와 β상의 함량 감소는 Cho 등[8]의 연구 결과에서도 이미 확인된 바 있으며, Ca 첨가에 따른 Mg-Al계 합금의 미세조직 변화와도 유사하다. Wang 등[18]은 AZ91-Ca 합금의 미세조직을 관찰한 결과 Ca 함량이 증가함에 따라 β상이 구조적 안정성과 원자간 친화도가 높은 Al_2Ca 상으로 대체되면서 함량이 점차 감소한다고 보고하였다. 한편, Fig. 1로부터 CaO가 첨가된 합금에서 결정립계에 형성된 β상이 CaO가 첨가되지 않은 합금과 비교하여 더 연속적으로 분포되고 있는 것이 관찰되는데 이는 결정립 크기 감소와 관련이 있다고 판단된다. Fig. 2는 AZ81-0.4CaO 합금의 SEM 미세조직과 Mg, Al, Mn, Ca 원소들에 대한 EDS mapping 결과를 나타낸 것이다. 이 결과로부터, β상과 인접하여 Al_2Ca 상이 미량 형성되어 있고 β상 내부에 Ca 원소가 불균일하게 분포되어 있음을 확인할 수 있다. 이 결과는 CaO로부터 환원된 Ca가 Al_2Ca 상의 생성에 관여함과 동시에 일부 β상에도 포함됨을 의미하는 것이다. 이와 같은 결과는 Regev 등[19]의 보고와도 일치하는 것으로, Mg-Al 합금에서 Ca는 Mg 기지의 낮은 고용도로 인해 β상에 포함될 수 있으며 이때 β상을 구성하는 Mg 원자의 일부가 Ca로 대체되면서 용융온도와 고온에서의 열적 안정성을 향상시킨다고 주장하였다.

3.2 부식 특성

Fig. 3은 AZ81과 AZ81-0.4CaO 합금을 5 wt.% NaCl 수용액에서 각각 4시간, 48시간 침지시험한 후 부식속도를 측정한 결과이다. 4시간 후 부식속도는 AZ81 합금과 AZ81-0.4CaO 합금이 각각 0.79, 0.37 $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{day}$, 48시간 후 부식속도는 각각 0.70, 0.30 $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{day}$ 로 침지시간에 관계없이 CaO가 첨가된 합금의 부식속도가 CaO가 첨가되지 않은 합금의 ~50% 이하 수준에 불과했다. Fig. 4는 4시간과 48시간 침지시험한 시편의 미세조직을 OM으로 관찰한 결과이다. Fig.

Fig. 3. Corrosion rates calculated from weight loss after immersion tests for AZ81 and AZ81-0.4CaO alloys.

4-(a)와 (b)는 4시간 침지시험 후의 조직사진으로, 초기 부식이 α -Mg과 β상의 경계에서 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 α -Mg과 β상이 마이크로 갈바닉 셀을 형성하여 전위차에 의해 부식이 시작되기 때문이다. Fig. 4-(c)와 (d)는 48시간 침지시험 후 조직사진으로, AZ81 합금에서는 β상이 결정립계를 따라 불연속적으로 분포되어 있어 α -Mg에 발생한 부식의 전파를 효과적으로 방해하지 못하며 부식에 의해 α -Mg이 소멸되면서 β상이 떨어져 나가 고립되는 모습이 관찰되는 반면 (Fig. 4-(c)), CaO가 첨가된 합금에서는 보다 연속적으로 분포된 β상이 장애물(barrier) 역할을 함으로써 AZ81 합금보다 부식의 전파를 더욱 효과적으로 억제하는 모습을 확인할 수 있다 (Fig. 4-(d)). Song 등[20]은 Mg-Al 합금에서 생성되는 금속간화합물인 β상이 그 자체로 α -Mg에 비해 부식저항성이 매우 뛰어나며, α -Mg과 공존할 경우 이중 역할(dual role)을 한

Fig. 4. Optical microstructures of corrosion surface morphology for AZ81 and AZ81-0.4CaO alloys after immersion test : (a) AZ81-4h, (b) AZ81-0.4CaO-4h, (c) AZ81-48h and (d) AZ81-0.4CaO-48h.

Fig. 5. Potentiodynamic polarization curves of AZ81 and AZ81-0.4CaO alloys.

다고 주장하였다. 즉, β 상은 부식의 전파를 막는 장애물로 작용할 수도 있고 반대로 갈바닉 음극(galvanic cathode) 역할을 하여 부식속도를 가속화시킬 수도 있다는 것이다. 어떤 역할이 부식에 있어 더 우세하게 작용하는지는 β 상의 양과 분포양상에 의존하는데, 만약 β 상이 미세하게 연속적으로 분포해 있다면 불연속적으로 분포하는 경우와 비교하여 갈바닉 음극으로 작용

Table 2. Electrochemical corrosion data for AZ81 and AZ81-0.4CaO alloys in 5 wt.% NaCl solution.

Alloy	E_{corr} (V _{SCE})	i_{corr} (10^{-4} A/cm ²)	Corrosion rate (mm/y)
AZ81	-1.427	0.083	0.190
AZ81-0.4CaO	-1.368	0.039	0.089

하는 표면적이 작아지고 이와 더불어 부식 전파를 억제하는 장애물로서의 역할도 더욱 효과적으로 수행할 수 있으므로 부식속도는 감소하게 된다.

Fig. 5는 AZ81과 AZ81-0.4CaO 합금의 동전위 분극(potentiodynamic polarization) 시험 결과이다. 이 곡선으로부터 Tafel 외삽법[21]을 이용하여 부식전위(E_{corr})와 부식전류밀도(i_{corr})를 구하였으며 다음 식[22]을 통해 부식속도(mm/year)를 계산하여 함께 Table 2에 나타내었다.

$$\text{Corrosion rate} = (22.85 \times i_{\text{corr}} \text{ (mA/cm}^2\text{)}) \quad (1)$$

동전위 분극 시험 결과 AZ81 합금이 AZ81-0.4CaO 합금보다 높은 i_{corr} 값을 나타내고 있어 AZ81-0.4CaO 합금보다 부식속도가 더 높은 것을 알 수 있으며, 이러한 결과는 Fig. 3에 나타난 침지시험 결과와도 잘 일치한다. Fig. 6은 100 kHz ~ 100 mHz의 주파수 범위에서 전기화학적 임피던스 분광

Fig. 6. (a) Nyquist and (b) Bode plots of AZ81 and AZ81-0.4CaO alloys.

Fig. 7. SEM microstructures and EDS analyses of corrosion products for AZ81 and AZ81-0.4CaO alloys : (a), (b) AZ81 and (c), (d) AZ81-0.4CaO alloys, respectively.

법(EIS)으로 얻은 임피던스 데이터를 나타낸 것이다. Fig. 6-(a)는 임피던스의 실수부(Z_r)와 허수부($-Z_{im}$)를 주파수의 함수로 나타낸 그래프로 Nyquist plot이라 불리고, Fig. 6-(b)는 위상각을 주파수의 함수로 나타낸 그래프로 Bode plot이라 불린다. 일반적으로 Nyquist plot에서 $-Z_{im}$ 의 최대값이 클수록 부식특성이 우수하며[23], Bode plot은 45° 위상각에 대한 주파수가 저주파일수록 도막 박리에 대한 저항이 크다고 알려져 있다[24]. EIS 실험 결과 Nyquist plot과 Bode plot 모두 AZ81 합금보다 AZ81-0.4CaO 합금의 부식저항성이 우수한 것으로

나타났으며, 이는 이전 CaO 첨가 AZ91 합금에서 보고된 결과와도 동일하다[16].

Fig. 7과 8은 CaO 첨가가 부식생성물에 미치는 영향을 파악하기 위해 48시간 침지시험 후 시편의 표면에 형성된 부식생성물을 각각 SEM-EDS 및 XPS로 분석한 결과이다. Fig. 7의 (a)와 (c)는 각 합금의 부식생성물에 대한 SEM 사진으로 AZ81 합금과 비교하여 AZ81-0.4CaO 합금의 부식생성물이 더 미세하고 밀도가 높은 것을 관찰할 수 있다. Fig. 7의 (b)와 (d)의 EDS 분석결과를 살펴보면 AZ81-0.4CaO 합금의 부식생

Fig. 8. XPS analyses of corrosion products for AZ81 and AZ81-0.4CaO alloys : (a) survey scan spectra and narrow scan spectra of (b) Mg, (c) Al, (d) Cl, (e) O and (f) Ca.

성물이 Ca를 포함하고 있으며 상대적으로 Al의 함량도 AZ81 합금에 비해 더 높은 것을 알 수 있다. 한편, Fig. 8의 XPS 스펙트럼에서는 Al 및 O 원소에 대한 피크 강도가 AZ81 합금 보다 AZ81-0.4CaO 합금에서 상대적으로 더 크며, 또한 Ca 원소에 대한 피크가 AZ81-0.4CaO 합금에서 검출되고 있는데 이러한 결과는 앞의 EDS 결과와 잘 일치하는 것이다. Fig. 7과 8의 결과들은 AZ81-0.4CaO 합금의 부식생성물이 Al_2O_3 , $Al(OH)_3$ 와 같은 화합물을 더 많이 포함하고 있으며 [16], 또한 AZ81 합금에서는 존재하지 않는 CaO, $Ca(OH)_2$ 와 같은 화합물이 추가적으로 부식생성물 내에 도입되어 있음을

의미한다. 이와 같은 Al계, Ca계 산화물 및 수산화물의 증가는 부식생성물의 밀도를 높여 안정성(stability)을 향상시키기 때문에 Cl^- , CO_3^{2-} 와 같이 부식과 관련된 해로운 양이온의 침투를 더 효과적으로 억제하게 된다[25]. Fig. 4의 미세조직, Fig. 7과 8의 표면 분석결과를 종합해보면, Mg-Al-Zn 합금에서 CaO의 첨가는 결정립계에 존재하는 정출상의 연속성을 향상시켜 α -Mg 기지를 통한 부식전파를 더욱 효과적으로 억제하고, 다른 한편으로는 부식생성물 내에 Al계, Ca계 산화물 및 수산화물의 밀도를 증가시켜 Cl^- , CO_3^{2-} 와 같은 이온들의 침투를 효과적으로 억제하는데 기여하여 부식저항성을 향상시키

는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 중력주조한 AZ81 합금의 미세조직과 부식저항성에 미치는 미량 CaO 첨가의 영향을 분석하기 위해 진행되었다. 0.4 wt.% CaO 첨가로 인해 AZ81 합금의 결정립 크기와 β 상의 함량이 감소하였지만 결정립계를 따라서 형성된 β 상의 분포는 보다 연속적인 형태를 나타내었다. AZ81-0.4CaO 합금의 경우 CaO로부터 환원된 Ca로 인해 미세조직 내에 미량의 Al_2Ca 상이 생성되었으며 β 상의 내부에 Ca 성분이 불균일하게 분포하는 것이 관찰되었다. 침지시험 및 전기화학시험 결과 AZ81-0.4CaO 합금의 부식저항성이 AZ81 합금에 비해 우수하였는데, 부식 후 미세조직에 대한 OM 분석 및 부식생성물에 대한 SEM-EDS, XPS 분석 결과 CaO 첨가로 인한 부식저항성 향상의 원인은 β 상이 결정립계를 따라 더욱 연속적으로 분포하여 α -Mg 기지를 통한 부식전파를 더욱 효과적으로 억제하는 점과 부식생성물 내에 Al계, Ca계 산화물 및 수산화물의 도입으로 안정성을 향상시켜 Cl^- , CO_3^{2-} 와 같은 이온들의 침투를 효과적으로 억제하는 점이 복합적으로 작용하였기 때문으로 생각된다.

감사의 글

본 연구에 사용된 CaO 첨가 합금은 한국생산기술연구원 김세광 박사로부터 제공되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Mordike BL and Ebert T, Mater. Sci. Eng. A, "Magnesium: Properties - Applications - Potential", **302** (2001) 37-45.
- [2] Friedrich H and Schumann S, J. Mater. Proc. Tech., "Research for 'A New Age of Magnesium' in the Automotive Industry", **117** (2001) 276-281.
- [3] Caceres CH, Davidson CJ, Griffiths JR and Newton CL, Mater. Sci. Eng. A, "Effects of Solidification Rate and Ageing on the Microstructure and Mechanical Properties of AZ91 Alloy", **325** (2002) 344-355.
- [4] Lee JK and Kim SK, Mater. Trans., "Effect of CaO Addition on the Ignition Resistance of Mg-Al Alloys", **52** (2011) 1483-1488.
- [5] Ha SH, Lee JK and Kim SK, Mater. Trans., "Effect of CaO on Oxidation Resistance and Microstructure of Pure Mg", **49** (2008) 1081-1083.
- [6] Jang DI, Yoon YO, Jung SB and Kim SK, Mater. Trans., "Effect of CaO on AZ31 Mg Strip Castings", **49** (2008) 976-979.
- [7] Lim HK, Kim SK and Kim DH, J. Korean Foundry Soc., "Effect of Alloying Elements on Creep Behavior of Mg-Al Alloys", **32** (2012) 44-49.
- [8] Cho EH, Jun JH and Kim YJ, Kor. J. Mater. Res., "Microstructure and Mechanical Properties at Room and Elevated Temperatures in AM50-0.3wt%CaO Alloy", **22** (2012) 499-503.
- [9] Jun JH, Mater. Trans., "Effect of CaO Addition on Microstructure and Damping Capacity of AM50 Magnesium Alloy", **54** (2013) 409-411.
- [10] Song GL and Atrons A, Corr. Sci. Tech., "Magnesium Corrosion Mechanisms", **31** (2002) 103-115.
- [11] Song GL and Atrons A, Adv. Eng. Mater., "Understanding Magnesium Corrosion-A Framework for Improved Alloy Performance", **5** (2003) 837-858.
- [12] Yim CD, Kim YM, Park SH and You BS, Korean J. Met. Mater., "Corrosion Behavior of AZ91 Magnesium Alloy", **9** (2012) 619-627.
- [13] He MF, Liu L, Wu YT, Tang ZX and Hu WB, Corr. Sci., "Corrosion Properties of Surface-modified AZ91D Magnesium Alloy", **50** (2008) 3267-3273.
- [14] Ralston KD, Birbilis N, and Davies CHJ, Scripta Mater., "Revealing the Relationship between Grain Size and Corrosion Rate of Metals", **63** (2010) 1201-1204.
- [15] Song GL, Adv. Eng. Mater., "Recent Progress in Corrosion and Protection of Magnesium Alloys", **7** (2005) 563-586.
- [16] Nam ND, Bian MZ, Forsyth M, Seter M, Tan M and Shin KS, Corr. Sci., "Effect of Calcium Oxide on the Corrosion Behaviour of AZ91 Magnesium Alloy", **64** (2012) 263-271.
- [17] Shi ZM, Liu M and Atrons A, Corr. Sci., "Measurement of the Corrosion Rate of Magnesium Alloys Using Tafel Extrapolation", **52** (2010) 579-588.
- [18] Wang Q, Chen W, Zeng X, Liu Y, Ding W, Zhu Y, Xu X and Mabuchi M, J. Mater. Sci., "Effects of Ca Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of AZ91 Magnesium Alloy", **36** (2001) 3035-3040.
- [19] Regev M, Aghion E and Rosen A, Mater. Sci. Eng. A, "Creep studies of AZ91D Pressure Die Casting", **234-236** (1997) 123-126.
- [20] Song GL and Atrons A, Adv. Eng. Mater., "Corrosion Mechanisms of Magnesium Alloys", **1** (1999) 11-33.
- [21] Jones DA, Principles and Prevention of Corrosion (2nd Edition), Prentice-Hall Inc (1996).
- [22] Zhao MC, Schmutz P, Brunner S, Liu M, Song GL and Atrons A, Corr. Sci., "An Exploratory Study of the Corrosion of Mg Alloys during Interrupted Salt Spray Testing", **51** (2009) 1277-1292.
- [23] Lee WJ and Pyun SI, J. Corr. Sci. Soc. of Korea, "Fundamentals and Applications of Electrochemical Impedance Spectroscopy to Corrosion Sciences", **26** (1997) 120-140.
- [24] Kim JT, Jeong HS, Ryu SS, Lee GD and Park JM, Korean Chem. Eng. Res., "Anti-Corrosion Performance of the Novel Pigment, Ion-Exchanged Zeolite for the Protection of Galvanized Steel", **49** (2011) 745-751.
- [25] Song YL, Liu YH, Yu SR, Zhu XY and Wang SH, "Effect of Neodymium on Microstructure and Corrosion Resistance of AZ91 Magnesium Alloy", **42** (2007) 4435-4440.