

Grain Refinement를 통한 Mg-Ca-Zn합금의 기계적 특성 및 부식 특성 향상

김대한*, 최종민, 임현규
국방기술품질원

Improvement of Mechanical and Corrosion Properties of Mg-Ca-Zn Alloy by Grain Refinement

Dae-Han Kim*, Jong-Min Choi, Hyun-Kyu Lim
Defense Agency for Technology and Quality

요약 마그네슘은 다른 금속들에 비해 비강도가 높으며, 우수한 진동 흡수능, 전자파 차폐성 등으로 산업 전반에 많이 활용되고 있다. 예를 들면, 자동차 시트 프레임, 실린더 헤드 등 자동차 부품으로도 사용되며 노트북 케이스, 핸드폰 케이스 등의 전자제품에도 널리 사용되고 있다. 또한 신체의 뼈가 금이 가거나 부서졌을 경우, 그 손상된 뼈의 치료를 보조하기 위해 사용되는 골 접합용 임플란트 재료로 각광받고 있다. 현재 임플란트 재료로는 Ti alloy, Stainless steel, Co-Cr-Mo alloy 등이 사용되어 지고, Mg 합금은 연구단계에 머물러 있다. 현재 골접합용 임플란트 재료의 문제점으로는 한번 접합 수술 후에 회복이 되면 이것을 제거하기 위한 수술을 또 해야 한다는 점이 있다. 하지만 마그네슘은 현재 재료와 비교하여 충분한 강도를 실현 할 수 있으며, 일정시간 후 자체적으로 분해되고 인체에 무해한 원소기 때문에 연구가 진행되고 있다. 그러나 순수 Mg으로는 충분한 강도와 내식성을 가질 수 없기 때문에 합금원소를 첨가하여 Mg 합금을 설계한다. 본 논문에서는 마그네슘에 인체에 무해한 Ca, Zn를 첨가하여 합금을 설계하였고, 추가적으로 강도와 내식성을 향상시키기 위해서 Grain refiner로서 Sr을 소량 첨가하여 최종 합금을 설계하였다. Sr은 방사선 원소는 인체에 유해하지만, 그 외 천연 Sr 원소는 인체에 무해하다. 이렇게 제조된 합금을 광학현미경, 주사전자현미경을 통해 미세조직분석을 수행하고, 인장시험, 동전위 분극 시험, 침지시험을 통해 기계적 특성 및 부식특성을 평가하였다. 결론적으로, Sr 첨가에 의해 조직이 미세해졌으며, 기계적 특성 및 내식성이 향상된 것을 확인 할 수 있었다.

Abstract Magnesium has a higher specific strength than other metals and is widely used industry wide due to its excellent vibration absorption ability and electromagnetic wave shielding property. For example, it is used for automobile parts such as car seat frames and cylinder heads, and is widely used in electronic products such as notebook cases and mobile phone cases. In addition, it is in the spotlight as a bone-implant material used to assist in the treatment of damaged bones when the bones are cracked or broken. Currently, Ti alloy, stainless steel and Co-Cr-Mo alloy are used as the implant material, and the Mg alloy remains in research stage. The current problem with bone implant implants is that the patients must undergo reoperation to remove the implants after joint surgery. Magnesium, however, can achieve sufficient strength compared to current materials. In addition, since it is self-decomposed after the recovery, reoperation is not necessary. In this paper, Mg alloys were designed by adding harmless Ca and Zn to the human body. In order to improve the strength and corrosion resistance, the final alloy was designed by adding a small amount of Sr as a grain refiner. The radioactive elements of Sr are harmful to the human body, but other naturally occurring Sr elements are harmless. Microstructure analysis of the alloys was performed by optical microscopy and scanning electron microscopy. The mechanical properties and corrosion characteristics were evaluated by tensile test, potentiodynamic test and immersion test.

Keywords : Bio material, Corrosion Test, Grain refinement, Mg alloy, Tensile Test

*Corresponding Author : Dae-Han Kim(DTAQ)

Tel: +82-55-751-5872 email: dhkim23@dtqa.re.kr

Received June 8, 2017

Revised August 4, 2017

Accepted September 15, 2017

Published September 30, 2017

1. 서론

마그네슘 합금은 우수한 기계적 성질, 전자과 차폐성, 진동감쇠능 등으로 활용도가 매우 높은 비철 금속 중 하나이다. 현재는 자동차 시트 프레임, 실린더 헤드, 노트북 및 핸드폰의 케이스 등에 부분적으로 적용되고 있다. 특히 가장 많이 사용되는 합금계로는 Mg-Al계가 있으며 Mg-Al 계 합금은 상온에서의 기계적 특성은 우수하나, 내식성 및 고온에서의 기계적 특성이 떨어진다[1-3].

하지만 최근에는 마그네슘 합금을 구조용 재료뿐만 아니라 의학용 Biodegradable 재료로써 연구가 활발히 진행되고 있다[4]. 연구가 되고 있는 분야로는 골접합용 임플란트가 대표적이다. 현재는 골접합용 임플란트 재료로 Ti alloy, Stainless Steel, Co-Cr-Mo alloy가 주로 사용되고 있으나, 이러한 소재의 임플란트는 환자가 회복 후 임플란트를 제거하기 위한 2차 수술이 동반되어야 해서 환자의 심적 부담감, 경제적 문제가 발생한다. 마그네슘 합금은 기존 소재만큼의 강도를 가지면서 체내에서 필요한 미네랄 원소 중 하나이고, 활성 금속으로 체내에서 자체적으로 분해된다. 이러한 마그네슘 합금의 특성을 이용하여 임플란트를 제작 시에는 체내에서 구조적인 기능을 하고 자연적으로 용해되어 사라지기 때문에 2차 수술이 필요하지 않게 된다. 현재 진행된 연구를 보면, 마그네슘 합금을 동물체내에서 사용하여 독성이 없는 것을 확인하고 있다[4-8].

본 연구에서는 마그네슘에 합금원소로 Ca, Zn, Sr을 선정하였다. Ca는 체내에서 뼈를 구성하는 원소이며 이온화 되었을 시에 골접합에도 도움을 줄 수 있다. 또한 Zn 역시 체내 필수 미네랄 원소 중 하나이며, 생물학적 기능에 많은 영향을 주는 원소이다. 그리고 Ca와 Zn는 Mg와 합금 시 기계적 강도 및 부식특성을 향상시키는 원소로 알려져 있다. 이렇게 Ca, Zn를 첨가하여 Mg-Ca-Zn 3원계 합금을 제조하고, 여기에 인체에 유해하지 않은 Sr를 첨가하여 Grain refinement 효과를 통해 Mg합금의 강도와 부식특성을 향상 시켰다. 합금은 Mg-0.5wt%Ca-3wt%Zn, Mg-0.5wt%Ca-4wt%Zn, Mg-0.5wt%Ca-4wt%Zn-0.6wt%Sr의 3종류를 제조하였으며, Ca, Zn, Sr의 함량은 선행연구 논문을 참조하여 기계적 특성 및 내식성이 우수하게 나타난 원소별 함량을 선정하였다. 그리고 이렇게 제조된 합금을 OM, SEM, SEM-EDS분석을 통해 미세조직을 관찰하고, 인장시험

및 부식시험을 통해 Grain refinement에 의한 특성 변화를 확인 하였다.

2. 실험방법

2.1 제조 및 실험방법

2.1.1 용해 및 금형주조

마그네슘 합금의 주조시에는 마그네슘 용탕의 폭발 위험성이 있어, 유분, 녹, 수분 등과 같은 이물질의 제거가 중요하다. 합금 주조 시에는 Wire brush를 사용하여 항상 청결을 유지하였다. 본 연구에서의 시험편은 99.9 wt% 이상의 순도를 가진 Mg, Ca, Zn, Sr의 순금속을 사용하여 용해하였고, 용해는 CO₂(70%)+SF₆(30%)혼합가스 분위기하의 전기 저항로에서 용해를 행하였다. 용탕의 온도는 750±5℃의 온도에서 Mg ingot의 용융을 확인한 후 용탕 표면의 dross를 제거하고 합금을 첨가하였다. 기포결함 등의 주조결함을 제거한 건전한 주물을 확보하기 위해 graphite 봉을 사용하여, 용탕의 교반을 실시하고, 고순도 Ar가스를 용탕 내부에 2회 취입하여 탈산, 탈가스 처리한 후 10분동안 진정시켰다. 출탕온도는 750±5℃로 하였으며, 200±5℃로 예열된 금형에 부어 중력 금형 주조하였다. Table. 1에 제조한 시험편의 화학 조성을 나타내었다.

Table 1. Chemical Composition of alloy 1, 2, 3

	Ca	Zn	Sr	Fe	Cu	Ni	Mg
Mg-0.5Ca-3Zn (alloy 1)	0.51	3	-	0.002	0.002	0.001	bal
Mg-0.5Ca-4Zn (alloy 2)	0.5	3.9	-	0.001	0.002	0.001	bal
Mg-0.5Ca-4Zn -0.6Sr (alloy 3)	0.51	4.1	0.6	0.002	0.001	0.001	bal

2.1.2 미세조직 분석 및 인장시험

제조된 마그네슘 합금의 미세조직 관찰을 위해 각 합금의 동일한 위치에서 시편을 채취하였고 SiC 연마지로 폴리싱 후, 3% nital (97ml ethanol + 3 ml nitric acid)을 사용하여 에칭 후 조직관찰을 하였다. Grain size를 관찰하기 위해, 450℃에서 4시간 용체화 처리 후 acetic-picral 용액으로 에칭하였고, 정량적 결정립 크기는 ASTM E112 규격에 따라 측정하였다. 조직관찰은 주사전자현

미경(SEM: Hitachi S-4300)으로 미세조직을 관찰하였으며, 상분석을 실시하였다. 인장시험은 R&B 301 Unitech L 모델의 인장시험 장비를 사용하여 ASTM B557M sub-size 규격에 맞는 시편을 제작하여 수행하였다.

2.1.3 부식시험

부식실험은 전기화학 분석 장치인 Electrochemical interface Solatron 1287을 이용하여 측정하였다. 이때, 기준 전극(reference electrode)은 Ag/AgCl전극을, 상대 전극(counter electrode)은 백금 전극(25mm x 25mm, 60mesh)을 사용하였으며, 전해액(electrolyte)은 상온에서 Hank's solution(Table. 2)을 사용하였다. 시편은 SiC 연마지 #600까지 연마하였고, 분극 시험 시작 전 시편을 전해액에 침지시켜 비교적 일정한 전위로 유지시킨 후 전위범위 -0.3 V vs. OCP ~ -1.0 vs. REF에서 scan rate 0.2mV/sec로 인가하여 시험을 실시하였다. 침지실험 역시 동일한 Hank's solution에서 각 96 h, 144 h, 264 h 침지 후 3분 동안 80 ℃로 유지된 20 wt% CrO₃+1wt%AgNO₃용액에서 부식생성물을 화학적으로 완전히 제거한 후 다시 증류수, 아세톤 순서로 세척하여 각 시편의 무게 감량을 측정하였다. 측정된 무게 감량으로부터 각 합금별 시험편의 부식속도를 아래 식을 이용하여 각각 계산하였다[9].

$$\text{corrosion rate} = 87.6 \cdot W / A \cdot T \cdot D$$

W : 무게감량 (g) A : 노출면적 (cm²)

D : 밀도 (g/cm³) T : 노출시간 (Hour)

Table 2. Concentration of Hank's Solution

Component	Concentration(mg/l)
KCl	400
NaCl	8000
KH ₂ PO ₄	60
Na ₂ HPO ₄	48
CaCl ₂	140
MgSO ₄ ·7H ₂ O	200
NaHCO ₃	350

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미세조직 분석

부식실험 Fig. 1의 (a),(c),(e)는 alloy 1, alloy 2, alloy 3의 as-cast 상태의 광학현미경(OM) 분석 사진이며, (b),(d),(f)는 3가지 합금을 425℃에서 4시간 균질화 처리

를 수행 후 광학현미경 분석 사진이다. Fig. 1의 사진을 보면 alloy 1은 2차상이 입내는 구상으로, 결정입계에서는 길쭉한 형상으로 나타나며, alloy 2는 alloy 1에 비해 입내 및 입계의 길쭉한 형상의 2차상은 감소하고 결정입계에 굵고 단절된 형상의 2차상이 나타난다. alloy 3에서는 입내의 2차상은 감소하고 대부분의 2차상이 조대하게 결정입계를 따라서 연속적으로 생성되는 것을 알 수 있다. 그리고 이러한 OM 분석은 Fig. 2와 같이 SEM 분석에서도 동일한 결과가 나타나는 것을 확인 할 수 있다. Mg matrix에 밝은 색의 2차상들이 생성된 것이 확인 가능하며, alloy 1은 길쭉한 형상, alloy 2는 단절된 형상, alloy 3는 연속된 형상의 2차상이 나타난다. 그리고 추가적으로 SEM-EDS 분석(Fig. 3, 4)을 통해서 3가지 합금에서 나타는 2차상을 분석하였다. alloy 1, alloy 2에서 나타나는 2차상은 선행 연구들[4-7]과 동일한 Ca₂Mg₇Zn₃상이 관찰되나, alloy 3에서는 MgCaZnSr compound가 나타났고 MgCaZnSr compound는 Fig. 4의 SEM-EDS Mapping 분석을 통해서도 확인 할 수 있다.

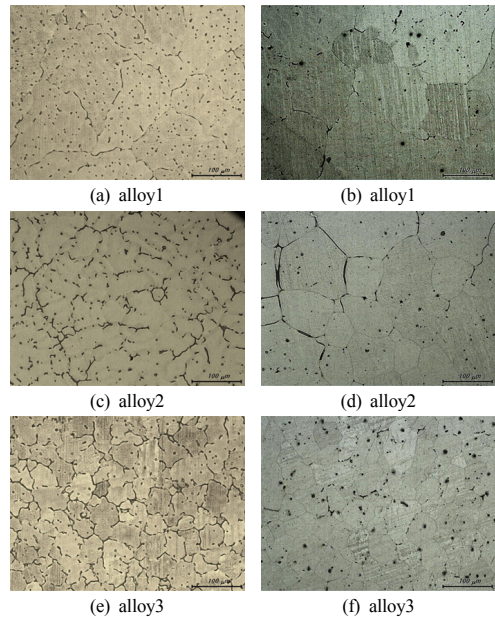


Fig. 1. OM image of Mg alloys (a),(c),(e) as-cast, (b),(d),(f) Homogenized

alloy 1과 alloy 2에서 Zn함량차이는 두 합금의 미세 조직 중 석출된 2차상의 위치 및 형상에 영향을 미쳤다. Zn의 함량이 높아질수록 2차상은 조대해지며 결정입계에 나타남을 확인 하였다. 그리고 alloy 3에서 나타난

MgCaZnSr compound는 현재까지는 자세하게 연구된 결과가 없으며 추가적인 연구가 필요할 것이다[8].

Grain size는 Fig. 1에서 육안으로도 alloy 3가 가장 작다는 것이 확인이 가능하며, ASTM E112격에 따라 측정 결과, alloy1은 125 μ m, alloy2는 98 μ m, alloy3은 57 μ m로 측정되었다. Grain size가 alloy 1에서 alloy 3로 갈수록 작아지는 것은 2차상의 석출과 관계가 있다. Fig. 1을 보면 alloy 2에서는 alloy 1에 비해 Zn가 증가하면서 결정입계의 2차상 분포가 비교적 증가하였으며, alloy 3에서 Sr이 첨가되면 2차상이 결정입계를 따라서 연속적인 형태로 형성되는데 이렇게 결정입계에 형성되는 2차상이 결정립이 조대해 지는 것을 막아주는 효과를 나타낸다고 판단된다.

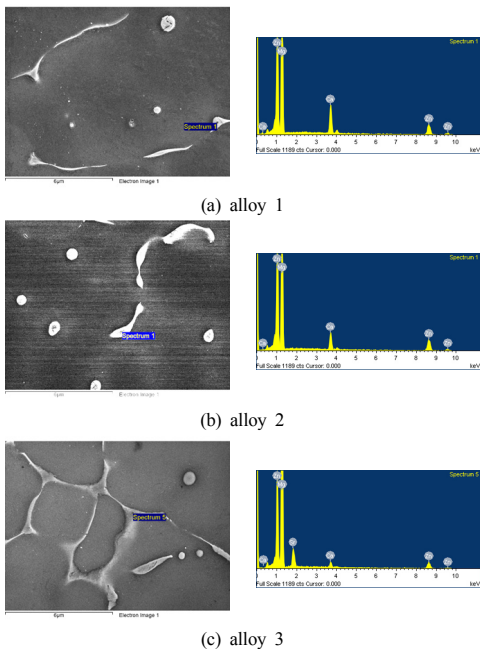


Fig. 2. SEM image of Mg alloys(alloy1, 2, 3)

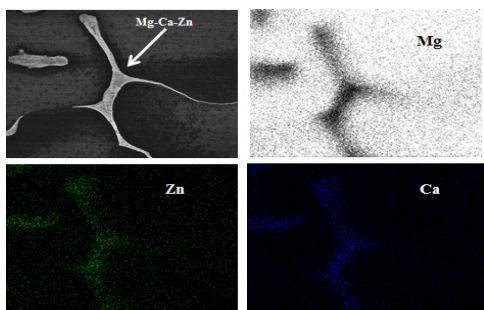


Fig. 3. SEM Mapping image of alloy 2

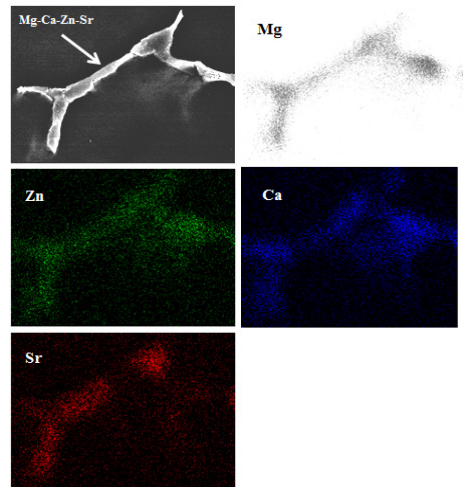


Fig. 4. SEM Mapping image of alloy 3

3.2 인장시험

Fig. 5와 Table. 3는 alloy 1, alloy 2, alloy 3의 Stress-Strain Curve와 UTS(Ultimate Tensile Strength), YS(Yield Strength), Elongation의 값을 나타낸다. 각각의 값을 보면 alloy 3의 UTS 및 Elongation 값이 alloy 1, alloy 2보다 큰 것을 알 수 있다. alloy 3의 UTS 값은 alloy 1에 비해 64MPa 정도가 높으면 Elongation 값은 5%정도가 높게 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 이렇게 합금별로 인장특성이 차이가 나타나는 것은 Grain size의 영향으로 볼 수 있다. Grain size가 작다는 것은 전위의 이동을 막아, slip이 발생하는 것을 방해하는 결정입계가 많다는 것을 의미하며 이렇게 slip이 발생하지 못하면 금속의 강도가 향상되게 된다. 또한 이러한 원리로 금속이 강화되는 것은 Hall-petch equation(1)에 의해서도 알 수 있다. Hall-petch equation에 따르면 금속의 Grain size가 미세할수록 그 재료의 항복강도는 증가한다.

$$\sigma_{ys} = \sigma_0 + kD^{-\frac{1}{2}}$$

σ_{ys} : 항복강도, σ_0 : 결정마찰응력,

k : 재료상수, D : 결정립크기

Table 3. Tensile properties of alloy 1, 2, 3

	Y.S(MPa)	UTS(MPa)	Elongation(%)
alloy 1	48	130	9
alloy 2	63	158	13
alloy 3	80	194	14

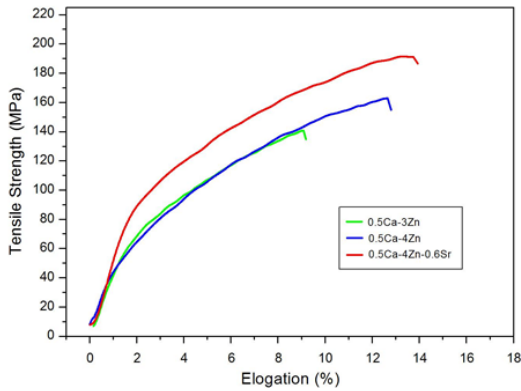


Fig. 5. Stress-Strain curve of alloy 1, 2, 3

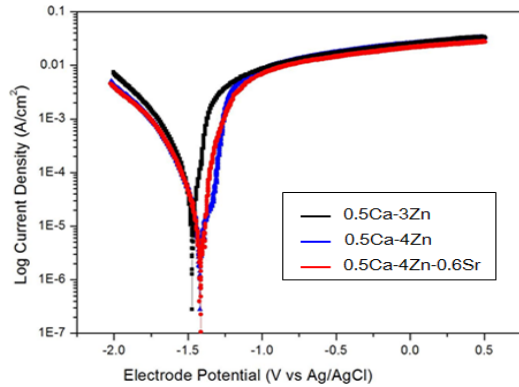


Fig. 6. Potentiodynamic polarization curves for the alloy 1, 2, 3 in Hank's Solution

3.3 부식시험

3.3.1 동전위분극시험

Fig. 6와 Table. 4는 alloy 1, alloy 2, alloy 3의 Hank's solution에서의 동전위 분극 시험 결과를 나타낸다. Fig. 6에서 부식전위를 지난 후 양극 분극 곡선의 전류밀도가 급격히 증가하는 것을 확인 할 수 있는데, 이는 마그네슘 합금의 특징인 음차효과(NDE, Negative Difference Effect)에 의한 것으로 마그네슘 합금의 양극 및 음극 부분에서 반응속도가 급격히 증가하므로 전류 밀도 값 역시 증가하는 것으로 보고된다[10]. Table. 4의 데이터를 보면, alloy 1, alloy 2, alloy 3의 부식전위 (E_{corr}) 값은 각각 -1.49, -1.42, -1.42 V vs. Ag/AgCl 로 alloy 1의 값이 가장 낮고, alloy 2와 alloy 3는 같은 값이 나왔다. 부식전류(I_{corr}) 값은 각각 2.78E-05, 7.16E-06, 5.48E-06 A/cm² 로 나타났으며, alloy 3의 부식전류 값이 가장 낮게 나타났다. 부식전위와 부식전류 결과를 보면 alloy 1이 가장 초기 부식도 빨리 발생하며 부식의 속도로 일컬어지는 교환전류밀도 값도 가장 높아 부식속도도 가장 빠른 것을 알 수 있다. 반면에 alloy 3는 부식전위가 높고 부식전류가 가장 낮아 3가지 합금 중 가장 우수한 내식성을 나타내는 것으로 판단된다.

Table 4. Potentiodynamic polarization data of alloy 1, 2, 3

	$E_{corr}(V)$	$I_{corr}(A/cm^2)$
alloy 1	-1.49	2.78E-05
alloy 2	-1.42	7.16E-05
alloy 3	-1.42	5.48E-06

3.3.2 침지시험

Fig. 7는 Hank's solution에서 침지 시험한 결과를 나타낸다. 침지 시험은 3가지 합금별로 96 h, 144 h, 264 h 까지 수행하였다. 96 h에서 부식속도(mg/cm²/year)는 alloy 1이 0.52, alloy 2가 0.56, alloy 3가 0.06으로 나타났다, 144 h에서는 각각 0.48, 0.39, 0.39, 264h에서는 1.49, 0.75, 0.7로 나타났다. 3가지 침지 시간 모두 alloy 3가 낮은 부식속도를 나타내는 것을 확인 할 수가 있으며, 침지 시간 증가에 따라서 3가지 합금 모두 부식속도는 증가하였다. 다만 alloy 2의 경우는 144 h에서 부식속도의 감소가 나타났는데 이것에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

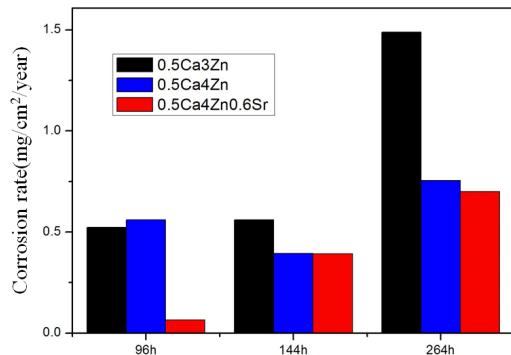
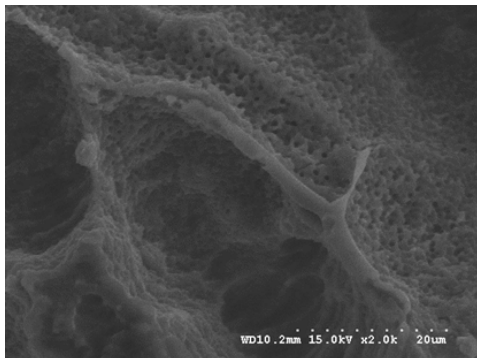


Fig. 7. Corrosion rate of alloy 1, 2, 3

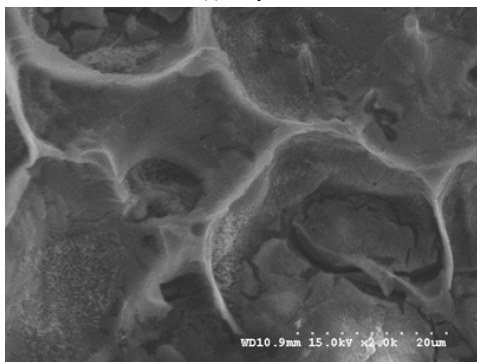
3.3.3 부식면 관찰

Fig. 8는 Hank's solution에서 72h 침지 후 시편의 표면 SEM 분석 사진이다. Fig. 8를 보면 두 합금 모두 2차

상 주변의 Mg matrix에서 많은 부식이 발생한 것을 확인할 수 있다. 이것은 선행연구들[4-7]과 동일한 결과로 Mg matrix와 2차상 사이에서 Mg matrix는 anode로, 2차상은 cathode로 작용하여 Mg matrix에서 우선적으로 부식이 발생한 것으로 판단된다. Mg matrix와 alloy 1, alloy 3의 2차상이 기전력 차이에 의한 Galvanic corrosion이 발생한 것으로 사료되며, 그 중에서 alloy 3의 내식성이 높게 나타난 사유로는 Fig. 8 (b)를 보면 Grain이 미세해지면서 증가된 결정입계를 따라서 2차상이 연속적으로 형성되었으며 이는 부식의 전파를 막아주는 barrier 역할을 하였다고 판단된다. Fig. 8의 사진을 보면 확실히 Fig. 8 (a)는 2차상 주변에서 매우 많은 부식이 발생하였지만, 그에 비하여 (b)는 (a)합금보다는 덜 부식된 것을 확인할 수 있다. 하지만 alloy 3에서 나타나는 2차상에 대해서 기전력 및 연속된 구조의 형성에 관해서는 구체적으로 연구된 바가 없어 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.



(a) alloy 1



(b) alloy 3

Fig. 8. SEM image of corroded surface

4. 결론

본 논문에서는 중력주조를 통해 3가지 마그네슘 합금을 제조하였고, 기계적 특성 및 부식 특성을 분석하였다. Mg-Ca-Zn 합금을 기본으로 하여 Sr를 첨가하여 Grain refinement 효과를 통해 기계적 특성 및 부식특성을 향상시켰다.

- (1) OM, SEM을 통한 미세조직을 보면, alloy 1, 2는 입내 및 입계에 $\text{Ca}_2\text{Mg}_6\text{Zn}_3$ 상이 석출되었으며, alloy 3에서는 Sr 첨가에 의해 CaMgZnSr compound가 입계를 따라 석출되었다. 또한 Grain size는 alloy 1 > alloy 2 > alloy 3 으로 나타났다.
- (2) 3가지 합금별 인장특성을 보면, alloy 1에서 Zn가 1wt% 증가됨에 따라 UTS가 28MPa 이 향상되었으며, Sr이 첨가된 alloy 3에서는 Grain refinement 효과에 의해 alloy 2에 비해 36MPa이 향상되었다. 3가지 합금 중 인장특성은 조직이 가장 미세한 alloy 3가 가장 우수하게 나타났다.
- (3) 3가지 합금의 부식특성을 보면, 인장특성과 마찬가지로 동전위분극시험, 침지시험에서 alloy 3의 부식특성이 가장 우수하게 나타났다. 이것은 alloy 3의 2차상이 입계를 따라서 연속된 구조를 이루어 부식의 전파를 막아주는 barrier 역할을 하였기 때문이라 사료된다.

References

- [1] M. M. Avedesian, N. M. Inc., H. Baker, "Magnesium and magnesium alloys", ASTM International, pp. 3-6, 1989.
- [2] B. L. Mordlike, T. Ebert, "Magnesium: Properties-applications-potential", Materials Science and Engineering A, vol. 302, pp. 37-45, 2001.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01351-4](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01351-4)
- [3] H. E. Friedrich, B. L. Mordlike, Magnesium Technology, p. 20, Springer, German, 2006
- [4] Baoping Zhang, Yunlong Hou, Xiaodan Wang, Yin Wang, Lin Geng, "Mechanical properties, degradation performance and cytotoxicity of Mg-Zn-Ca biomedical alloys with different compositions", Materials Science and Engineering C, vol. 31, pp. 1667-1673, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2011.07.015>
- [5] Erlin Zhang, Lei Yang, "Microstructure, mechanical properties and bio-corrosion properties of Mg-Zn-Mn-Ca alloy for biomedical application", Materials

Science and Engineering A, vol. 497, pp. 111-118, 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.06.019>

- [6] Yu Sun, Baoping Zhang, Yin Wang, Lin Geng, Xiaohui Jiao, "Preparation and characterization of a new biomedical Mg - Zn - Ca alloy", Materials and Design, vol. 34, pp. 58-64, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.07.058>
- [7] Brar HS, Wong J, Manuel MV, "Investigation of the mechanical and degradation properties of Mg-Sr and Mg-Zn-Sr for use as potential biodegradable implant materials", J Mech Behav Biomed Mater, vol. 7, pp. 87-95, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2011.07.018>
- [8] Bo-Kwan Kong, Dae-Hyun Cho, Pil-Hwan Yun, Jeong-Hun Lee, Jin-Young Park, Ik-Min Park, "Effect of Sr Addition on Mechanical and Corrosion Properties of Mg-Zn-Ca Alloy for Biodegradable Implant Material", Journal of Korea Foundry Society, vol. 35, pp. 155-162, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.7777/jkfs.2015.35.6.155>
- [9] Dae Han Kim, Byeong Ho Kim, Kyung Chul Park, In Ki Chang, "Comparison of Electrochemical Corrosion Properties of Permanent Mold Casting GZ21 Alloy and AZ91 Alloy", Journal of Korea Foundry Society, vol. 36, pp. 60-66, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.7777/jkfs.2016.36.2.60>
- [10] Song. G, Atrons. A, "Corrosion Mechanisms of Magnesium alloys", A. Adv. Eng. Mater, vol. 1, pp. 11-33, 1999.
DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1527-2648\(199909\)1:1<11::AID-ADEM11>3.3.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/(SICI)1527-2648(199909)1:1<11::AID-ADEM11>3.3.CO;2-E)

김 대 한(Dae-Han Kim)

[정회원]

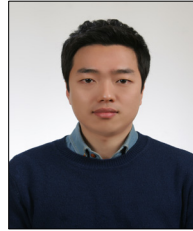


- 2012년 2월 : 부산대학교 재료공학부 졸업 (공학학사)
- 2014년 2월 : 부산대학교 재료공학부 대학원 졸업 (공학석사)
- 2014년 8월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원 재직

<관심분야>
소재, 구조

최 종 민(Jong-Min Choi)

[정회원]



- 2012년 2월 : 부산대학교 재료공학부 졸업 (공학학사)
- 2014년 2월 : 부산대학교 재료공학부 대학원 졸업 (공학석사)
- 2015년 9월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원 재직

<관심분야>
소재, 구조

임 현 규(Hyun-Gyu Lim)

[정회원]



- 1984년 2월 : 부산대학교 금속재료공학과(공학학사)
- 1999년 7월 : 충남대 국가안보정책(행정학 석사)
- 2012년 8월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원 재직

<관심분야>
항공 우주, 금속재료, 국방