



Ti-xMo-2Fe 베타계 타이타늄 합금의 기계적 특성 및 부식 특성에 미치는 Mo의 영향 평가

박정연 · 이재관 · 이용재 · 이동근*

순천대학교 신소재공학과

Effect of Molybdenum on the Mechanical and Corrosion Properties of Ti-xMo-2Fe Beta Alloys

Jeong-Yeon Park, Jae-Gwan Lee, Yong-Jae Lee, and Dong-Geun Lee*

Department of Materials Science and Metallurgical Engineering, Sunchon National University, Republic of Korea

Abstract: Titanium alloys are currently used in offshore industries. The titanium alloys used in offshore plants need to have excellent corrosion resistance and mechanical properties because offshore plants are exposed to harsh corrosive environments. At this time, the Ti-6Al-4V ELI alloy is mainly used in offshore plants because it has excellent mechanical properties and corrosion resistance. However, Ti-6Al-4V ELI alloy has the disadvantage of poor formability. To improve this, studies on metastable beta-Titanium alloys with a BCC structure are being actively conducted. In this study, a metastable beta-titanium alloy was fabricated using Mo, which is inexpensive and improves corrosion resistance, and Fe, which improves strength, among the titanium beta stabilizer elements. After the Ti-6Al-4V ELI and Ti-xMo-2Fe alloys solution treatments, electrochemical corrosion experiments were conducted to analyze corrosion characteristics, and mechanical properties were also analyzed through compression tests at room temperature and Vickers hardness measurement. Corrosion properties and the mechanical properties of Ti-xMo-2Fe alloy were considered in connect experiments such as microstructure analysis and hardness measurement. It was confirmed that the corrosion resistance of the Ti-xMo-2Fe alloy was better than that of the Ti-6Al-4V ELI alloy, and it was confirmed that the compressive strength and elongation rate of Ti-xMo-2Fe with its BCC structure get higher than Ti-6Al-4V ELI alloy.

(Received 6 October, 2023; Accepted 13 November, 2023)

Keywords: Ti-Mo-Fe alloy, Beta stabilizer, Corrosion properties, Mechanical properties

1. 서 론

현대 사회에서 타이타늄 합금은 우수한 기계적 특성 및 내식성을 바탕으로 항공·우주, 생체, 해양 등 다양한 산업 분야에서 각광받고 있다 [1-5]. 해양 플랜트 산업에 적용되어지는 소재들은 해풍에 의해 발생 가능한 구조적인 문제로 인한 구조적인 안정성과 우수한 부식 저항성이 요구되고 있다. 이에 해양 산업에서 널리 사용되고 있는 타이타늄 합금들은 TiO_2 와 같은 부동태 피막층을 형성하여 우수

한 부식 저항성을 보유하고 있으며, 저온에서도 우수한 피로강도 및 비강도를 가져 구조재료로서의 역할을 잘 수행해내고 있다 [6-7].

그러나 타이타늄 합금은 낮은 열전도도를 가지고 있어 가공에 어려움이 있으며, 타 소재 대비 가격경쟁력이 떨어진다 단점이 있다 [8]. 이에 최근 기존의 타이타늄 합금들이 가지고 있는 구조적인 안정성 및 우수한 부식 저항성을 보유하고 있으며 성형성 및 가격경쟁력을 확보하기 위한 새로운 타이타늄 합금으로 $\alpha+\beta$ 계 타이타늄 합금들에 비해 열처리가 쉽고 경화능이 크며 체심입방구조 (Body Centerd Cubic lattice, BCC)에 의한 압축 변형률의 증가와 파괴 인성에도 뛰어난 특성을 보인다고 알려져 있는 준안정 β 계 타이타늄 합금에 대한 연구가 활발하게 진행되

- 박정연: 석사과정, 이동근: 교수

*Corresponding Author: Dong-Geun Lee

[Tel: +82-61-750-3555, E-mail: leechodg@snu.ac.kr]

Copyright © The Korean Institute of Metals and Materials

고 있는 추세이다 [9-13]. 하지만 일반적인 타이타늄 합금들과 마찬가지로 β 계 타이타늄 합금들에 사용되는 β 안정화 원소들은 천이금속으로 비중이 크고 밀도와 용융점이 높아 용해 및 제조의 어려움을 겪고 있으며, 이로 인해 타 소재 대비 가격 경쟁력이 떨어지는 문제점을 가지고 있다. 그로 인해 준안정 β 계 타이타늄 합금들이 해양 플랜트 산업에 직접적으로 적용되기 위해서는 비용 문제에 관한 해결이 필수적이다 [14-15].

따라서 본 연구에서는 일반적으로 사용되는 Zr, Nb와 같은 고가의 β 안정화 원소가 아닌 비교적 저렴하고 강도와 경화능 증가 및 내식성 향상에 도움을 주는 Mo와 기계적 강도 향상에 도움을 주는 Fe를 첨가하여 새로운 Ti-Mo-Fe 준안정 β 계 타이타늄 합금을 설계하였다. 그 후 새로 설계된 합금들의 기계적 특성에 대해 고찰하였으며, 3.5 wt% NaCl 전해 용액에서 진행한 동전위 분극 실험 및 5M HCl 용액에서의 침지 실험을 통해 부식 특성에 대해 고찰하였다. 또한 기존에 상용되고 있는 Ti-6Al-4V ELI 합금과의 비교·분석하여 새로 설계한 합금인 Ti-xMo-2Fe ($x = 5, 9.2$ wt%) 합금의 우수성을 제시하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 합금 설계 및 미세조직 관찰

본 연구에서 강력한 β 안정화 원소인 Mo함량의 영향을 조사하기 위해 설계한 합금은 양자역학의 DV-X α 법을 활용하여 원자간 공유 결합성의 정도를 나타낸 Bond order (\overline{Bo}) 및 원소 간 전기음성도의 상관관계를 나타내는 d-orbitla Fermi energy level (\overline{Md})을 고려하였으며 [16-18], 이에 따라 Ti-5Mo-2Fe 합금과 Ti-9.2Mo-2Fe 합금을 선정하였다. 설계한 합금들의 \overline{Bo} , \overline{Md} 를 각각 계산 하였을 때, Ti-5Mo-2Fe 합금의 \overline{Bo} 는 2.795 \overline{Md} 는 2.409, Ti-9.2Mo-2Fe 합금의 \overline{Bo} 는 2.801 \overline{Md} 는 2.397으로 계산되었다. 이를 phase stability map에 적용하면 [19], β 상을 갖는 베타계 타이타늄 합금을 구성하며 주요 변형 메커니즘이 twin이라는 것을 예상할 수 있다.

본 연구에서 설계한 합금들은 비소모성 진공아크재용해 (Vacuum Arc Remelting, VAR)방식으로 10회 재용해 후 잉곳으로 제조하였고, 응고조직을 제거하기 위해 850 °C에서 1시간 동안 용체화 처리 진행 후 노냉을 진행하였다. 제작한 시편들의 Mo 함량 변화에 따른 미세조직학적 거동을 관찰하고자 용체화 처리를 수행한 봉제시편을 6 mm 간격으로 절단하여 절단면을 #400 ~ #2000까지 연마를 진행하였고, 6 μ m, 3 μ m, 1 μ m, 0.04 μ m까지 미세연마를 진

행하였다. 그 후 Kroll 용액 (100 ml H₂O + 5 ml HNO₃ + 3 ml HF)으로 수 ~ 수십 초간 에칭하였다. 이를 광학현미경 (Optical Microscope, OM, BX53M, Olympus), 전계 방사형 주사전자 현미경 (Field Emission Scanning Electron Microscope, JSM-7100F, JEOL)과 후방 산란 전자 회절 패턴 분석기 (Electron Back Scattered Diffraction, EBSD, JSM-7100F, JEOL)를 통해 상 분율 및 미세조직을 관찰하였다.

2.2 기계적 특성 분석

설계한 합금들의 기계적 특성을 고찰하고자 경도 측정 및 상온 압축시험을 진행하였다. 경도 측정은 비커스 경도 시험기 (Vickers Hardness, HM-200M, Mitutoyo)를 이용하여 0.5 kgf의 하중으로 12 point를 측정한 뒤 최대값, 최소값을 제외한 평균과 표준편차를 계산하였다. 상온 압축 시험을 진행하기 위해 $\Phi 6 \times 9$ mm의 규격으로 상온 압축 시편을 가공하였고, 만능 시험기 (Room Temperature Tensile Machine, BESTUTM -10MD, Ssaul Bestech)를 사용하여 하중 5000 kgf, strain rate 1×10^{-3} /sec 의 조건으로 압축 시험을 진행하였다.

2.3 부식 특성 평가

해수 환경에서 설계한 합금들의 내식성을 비교하고자 전기 화학적 부식시험을 진행하였다. 동전위 분극 시험 및 정전위 분극 시험을 위해 전위차계 (SP-150, Bio-Logic Science Instruments)를 사용하였으며, 부식시험 시편들은 와이어 방전가공을 통해 $\Phi 13 \times 7$ mm의 규격으로 제작되었다. CE (Counter Electrode)로는 Pt Coil, RE (Reference Electrode)로는 Ag/AgCl을 설정하였으며 해수 환경과 비슷한 환경을 만들기 위해 3.5% NaCl의 용액 조건에서 시험을 진행하였다. 동전위 분극 시험은 전위 인가 범위를 개방회로전위 (Open Circuit Potential, OCP) 대비 -0.5 V ~ +2 V로 설정, 0.5mV/s의 속도의 전위를 교류로 인가시켰으며, 정전위 분극 시험은 OCP 대비 +4V의 범위에서 전위를 1시간 동안 인가시켜 시험을 진행하였다. 그 후 에너지 분산 X선 분광법 (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS)분석기가 장착된 전계 방사형 주사전자 현미경 (Field Emission Scanning Electron Microscope, JSM-7100F, JEOL)을 이용하여 각 시편의 부식 후 생성되는 원소들과 표면을 관찰하였다. 이와 더불어 좀 더 강한 부식 환경에서의 부식 특성을 파악하고자 5M HCl의 용액에서 7일 동안 침지 후 무게 감량의 정도를 관찰하였다.

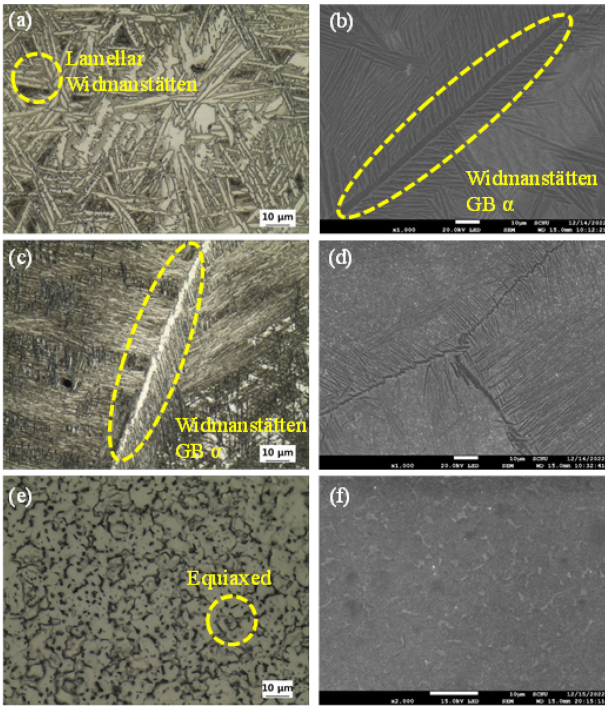


Fig. 1 Optical microstructures and SEM micrographs of (a) Ti-5Mo-2Fe, (b) Ti-9.2Mo-2Fe, (c) Ti-6Al-4V ELI, (d) Ti-5Mo-2Fe, (e) Ti-9.2Mo-2Fe and (f) Ti-6Al-4V ELI alloys

3. 결과 및 고찰

3.1 미세조직

Ti-5Mo-2Fe, Ti-9.2Mo-2Fe, Ti-6Al-4V ELI 합금들을 광학현미경, 전계방사형주사전자 현미경 및 후방 산란 전자 회절 패턴 분석기를 통해 관찰한 상 분율 및 미세조직을 Fig. 1 (a)~(f), Fig. 2 (a)~(c)에 나타내었다.

미세조직을 관찰한 결과 Ti-6Al-4V ELI 합금의 경우에는 3.91 μm 크기를 갖는 매우 미세한 등축정 (equiaxed) 조직이 관찰되었으며, 정밀한 관찰을 위해 전계방사형 주사 전자현미경으로 미세조직을 분석한 결과 α상 결정립의 삼중점 내에서 β상이 형성된 것을 확인하였다 [20]. Ti-5Mo-2Fe 합금과 Ti-9.2Mo-2Fe 합금의 미세조직은 노냉으로 인해 경도 상승에 영향을 주는 α+β lamellar 구조의 Widmanstätten 조직이 나타났으며, 연성 향상에 도움을 주는 Widmanstätten Grain Boundary α (WGBα)상이 관찰되었다. 상 분율을 분석한 결과 Ti-xMo-2Fe (x = 5, 9.2 wt%)합금의 경우 강력한 β 안정화 원소인 Mo의 첨가량이 증가함에 따라 β상 분율이 17.5%에서 41%로 더욱 높아졌으며, α상 분율은 반대로 82.5%에서 59%로 급감하였다. 한편 Ti-6Al-4V ELI 합금의 경우에는 4%의 β상과 96%

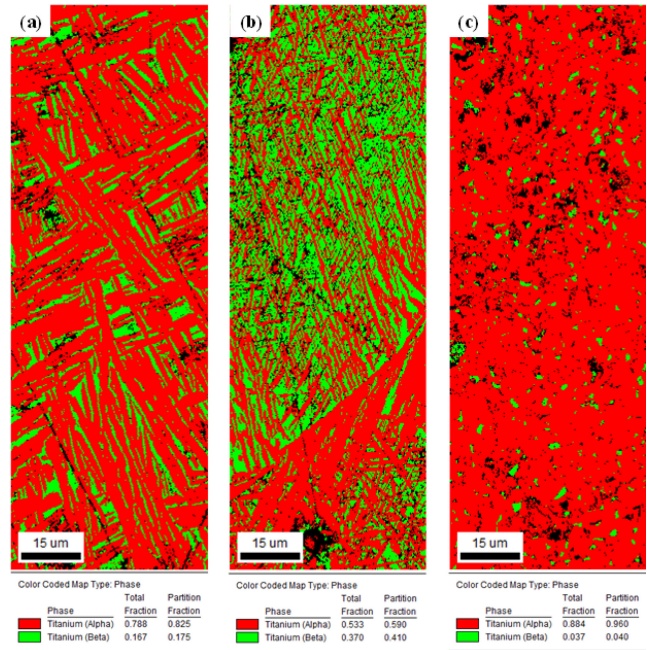


Fig. 2 Phase maps of (a) Ti-5Mo-2Fe, (b) Ti-9.2Mo-2Fe and (c) Ti-6Al-4V ELI alloys

의 α상으로 구성된 등축정조직을 갖는 것을 확인할 수 있다. Ti-xMo-2Fe (x = 5, 9.2 wt%)합금의 lamellar lath 간격을 관찰한 결과 Ti-9.2Mo-2Fe 합금의 lamellar lath 간격이 Ti-5Mo-2Fe 합금에 비해 7.316 μm에서 6.139 μm으로 좁아지는 것을 관찰하였다. 이는 합금원소 Mo이 가지는 낮은 확산속도로 인해 전위의 생성 및 결정립 성장이 느리게 일어난다는 선행 연구 자료와 일치하였다 [21].

3.2 기계적 특성

미세조직과 연계하여 기계적 특성을 고찰하기 위해 비커스 경도 시험을 진행하였고 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 비커스 경도 시험 결과 Ti-5Mo-2Fe 합금의 평균 경도는 305.3±7.2 Hv, Ti-9.2Mo-2Fe 합금의 평균 경도는 332.8±6.1 Hv가 측정되었으며, Ti-6Al-4V ELI 합금의 경우에는 평균 경도 300.7±4.1 Hv가 측정되었다. Ti-xMo-2Fe (x = 5, 9.2 wt%)합금의 경우 β 전을 고용형인 Mo 첨가의 영향으로 고용강화 효과를 통해 Ti-6Al-4V ELI 합금에 비해 우수한 경도 특성을 나타냈다. 또한 Mo의 첨가량이 5 wt%에서 9.2 wt%까지 증가함에 따라 경도값은 9% (27.5 Hv)증가하였다. 이는 α+β lamellar 구조의 Widmanstätten 조직의 영향 및 lamellar lath 간격 차이에서 오는 영향으로 Ti-9.2Mo-2Fe 합금의 더욱 우수한 경도 특성을 확인하였다.

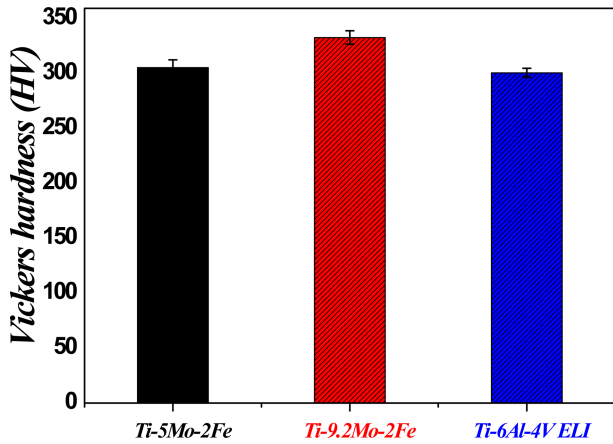


Fig. 3. Vickers hardness of Ti-5Mo-2Fe, Ti-9.2Mo-2Fe and Ti-6Al-4V ELI alloys

각 합금들의 상온 압축 시험을 수행한 응력-변형률 곡선 및 자세한 측정값을 Fig. 4, Table 1에 나타내었다.

상온 압축 시험을 진행한 결과 Ti-5Mo-2Fe 합금의 최대 압축강도는 1739.6 MPa, 압축 변형률 35.7%가 나타났으며, Ti-9.2Mo-2Fe 합금의 최대압축강도는 1679.8 MPa, 압축 변형률 26.4%가 나타났다. Ti-6Al-4V ELI 합금의 경우에는 최대압축강도 1678.2 MPa와 압축 변형률 21.9%으로, Ti-xMo-2Fe (x = 5, 9.2 wt%) 합금이 Ti-6Al-4V ELI 합금보다 높은 최대 압축강도 및 압축 변형률이 나타났다. 이는 Ti-xMo-2Fe (x = 5, 9.2 wt%) 합금이 Ti-6Al-4V ELI 합금보다 높은 β 상 분율을 가지고 있는데, 이는 Ti-xMo-2Fe (x = 5, 9.2 wt%) 합금들은 준안정 β 계 타이타늄 합금들로 유효한 슬립시스템이 더 많이 작용하는 BCC 구조의 β 상 분율이 높아 압축 변형률이 높게 측정되었으며, Widmanstätten Grain Boundary α (WGB α) 근처는 WGB α 상의 생성에 따른 Mo와 Fe의 방출에 의해 입계 근처에 이들 원소의 농도가 증가하여 강도 개선에 도움을 주며, 균열의 전파 방향을 편향시켜 균열의 전파속도를 늦춰 연성 향상에 기여하여 Ti-xMo-2Fe (x = 5, 9.2 wt%) 합금이 우수한 압축 변형률 및 압축강도를 가진다 [22-23].

한편, 압축 항복강도 및 $\epsilon = 20\%$ 일 때 압축 강도를 비교해보면 Ti-5Mo-2Fe 합금이 각각 864.3 MPa과 1366.6

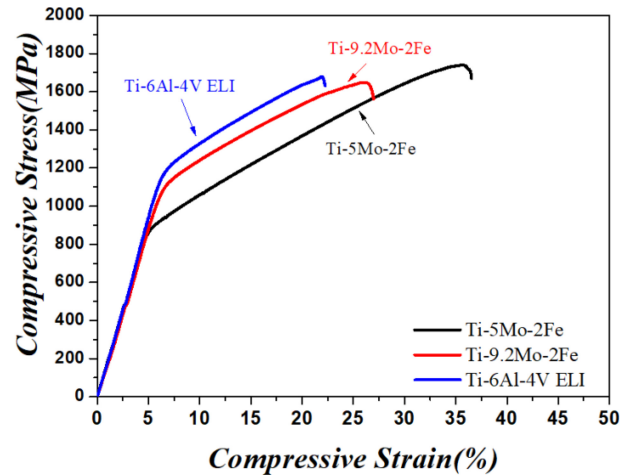


Fig. 4. Compressive stress-strain curves of Ti-5Mo-2Fe, Ti-9.2Mo-2Fe and Ti-6Al-4V ELI alloys

MPa이며, Ti-9.2Mo-2Fe 합금은 1104.7 MPa 1531.6MPa, Ti-6Al-4V ELI 합금은 1167.93 MPa, 1634.8 MPa 으로 측정되었다. 즉 Mo 함량이 증가함에 따라 $\alpha + \beta$ lamellar lath 간격이 감소하여 압축 항복강도가 증가하는 것이다. 또한 매우 미세한 등축정 조직을 갖는 Ti-6Al-4V ELI 합금은 높은 압축 항복특성을 나타내었다 [24].

3.3 부식 특성

타이타늄 합금들은 높은 산소 친화도를 가지고 있어 부동태피막 형성이 쉽고, 산화성 분위기에서 부동태피막이 파손되어도 즉시 재생되는 능력을 가지고 있어 우수한 내식성을 가지며 타 소재 대비 뛰어난 부식 저항성을 나타낸다고 알려져 있다 [25-27]. 이에 Ti-xMo-2Fe (x = 5, 9.2 wt%) 합금들과 Ti-6Al-4V ELI 합금의 부식 저항성 평가를 위해 3.5% NaCl 전해 용액에 노출시킨 뒤, 전위 구간을 각 시편의 OCP 기준 $-0.5V \sim +2V$ 범위로 설정하고 0.5mV/s 의 속도로 인가시켜 실험을 진행하였다. 실험을 통해 얻은 결과인 부식 전류밀도 (I_{corr}), 부식 전위 (E_{corr}), 양극, 음극 Tafel 기울기 (β_a , β_c)를 Fig. 5, Table 2에 나타내었다.

시험 결과, Ti-5Mo-2Fe 합금과 Ti-9.2Mo-2Fe 합금의

Table 1. Room temperature compression test data of Ti-5Mo-2Fe, Ti-9.2Mo-2Fe and Ti-6Al-4V ELI alloys

	Compressive Yield Strength (MPa)	Maximum Compressive Strength (MPa)	Compressive Strength at $\epsilon = 0.2$ (MPa)	Compressive Strain (%)
Ti-5Mo-2Fe	864.3	1739.6	1366.6	35.7
Ti-9.2Mo-2Fe	1104.7	1679.8	1531.6	26.4
Ti-6Al-4V ELI	1167.9	1678.2	1634.8	21.9

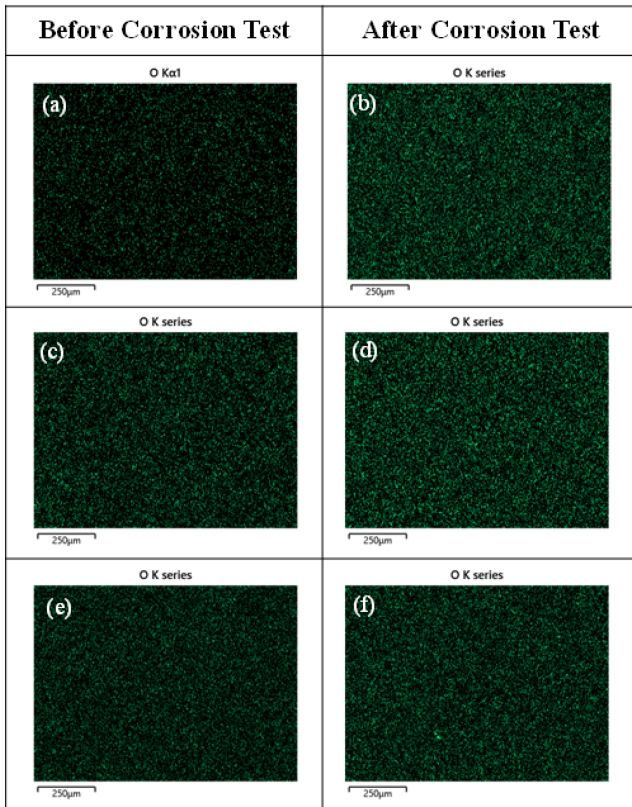


Fig. 8. SEM-EDS analysis O maps of (a) Ti-5Mo-2Fe, (b) Corroded Ti-5Mo-2Fe, (c) Ti-9.2Mo-2Fe, (d) Corroded Ti-9.2Mo-2Fe, (e) Ti-6Al-4V ELI and (f) Corroded Ti-6Al-4V ELI alloys

합금보다 더 우수한 부식 저항성을 나타내는 모습을 보였는데 [28-29], 이는 5M HCl에서의 7일간 침지실험 후 무게감량을 측정된 결과를 보여주는 Fig. 7에서 뚜렷하게 제시되었다.

침지 실험 진행 결과 Mo 첨가량이 가장 높은 Ti-9.2Mo-2Fe 합금이 0.001 g으로 가장 적은 무게 감소량을 나타내었으며, Ti-5Mo-2Fe 합금의 무게 감소량은 0.003 g 이고 Ti-6Al-4V ELI 합금은 0.007g으로 가장 큰 무게 감소를 나타내었다. 또한 전기화학적 부식 시험을 진행한 시편을 EDS 분석을 통하여 표면에 생산된 산소량을 측정하여 관측하였으며, 이를 Table. 3, Fig. 8 (a)-(f)에 나타내었다.

전기 화학적 부식 시험 전 후로 산소량을 상대 평가한 결과 Mo를 첨가한 Ti-xMo-2Fe (x = 5, 9.2 wt%)합금들은 Ti-6Al-4V ELI 합금에 비해 약 4 wt%의 더 많은 양의 산소를 포함하는 모습이 관찰되었다. 이는 합금원소 Mo이 산화 시 MoO를 생성하고 Ti이 산화 시 생성하는 TiO₂와 혼합되어 기존의 타이타늄 합금의 부동태 피막보다 더욱

치밀한 부동태 피막을 형성하여 내식성 향상에 도움을 준다는 선행연구와 일치하는 실험 결과를 나타냈다 [30-32]. 이와 같은 실험 결과들을 토대로 본 연구에서는 기존에 사용되는 Ti-6Al-4V ELI 합금보다 신합금인 Ti-xMo-2Fe (x = 5, 9.2 wt%)합금들이 뛰어난 부식 저항성을 나타내고 있는 것을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 준안정 β계 타이타늄 합금들에 사용되는 β안정화 원소가 밀도 및 용융점이 높아 가격경쟁력이 떨어지는 단점을 보완하고 우수한 내식성 및 기계적 특성을 확보할 수 있는 Mo, Fe를 이용하여 합금을 설계하였고, 이를 상용화되어 있는 Ti-6Al-4V ELI 합금과 비교분석하였다.

1. Ti-xMo-2Fe (x = 5, 9.2 wt%)합금의 미세조직을 관찰한 결과, α+β lamellar 구조의 Widmanstätten 조직과 Widmanstätten Grain Boundary α (WGBα)상이 나타났으며, 또한 Mo의 함량이 증가함에 따라 낮은 확산속도로 인해 lamellar lath 간격 (7.316 μm → 6.139 μm)이 좁아지는 것을 확인하였다.

2. 미세조직 관찰과 연계하여 기계적 특성을 관찰하였을 때, Ti-xMo-2Fe (x = 5, 9.2 wt%)합금의 매우 미세한 lamellar lath 간격으로 인해 비교적 높은 비커스 경도를 나타내었으며, 체심입방구조 (BCC)구조와 WGB α상으로 인한 압축 변형률 및 강도 개선 효과로 최대압축강도 및 압축 변형률에서 Ti-6Al-4V ELI 합금보다 우수한 기계적 특성을 나타내었다.

3. 3.5 wt% NaCl 용액 내에서 전기화학적 부식 시험 결과, Ti-6Al-4V ELI 합금은 합금원소 V의 첨가로 인해 낮은 내식성을 나타내지만, Ti-xMo-2Fe (x = 5, 9.2 wt%)합금들의 경우 Mo의 첨가로 인한 MoO₃의 생성으로 부동태 피막의 조밀화가 이루어져 우수한 부식 저항성을 나타내었다. Ti-6Al-4V ELI 합금보다 부식 전위 (E_{corr})의 경우 최대 15.6%, 부식 전류 밀도 (I_{corr})의 경우 최대 7배 우수한 부식저항성을 갖는 것으로 측정되었다. 또한, 5M HCl 용액 내에서의 침지실험의 결과로 Ti-6Al-4V ELI 합금보다 무게 감소량이 1/7수준으로 매우 강한 부식저항성을 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국산업기술평가관리원(KEIT)의 산업기술혁신사업(No. 20010047)과 2023

년 순천대학교 학술연구비(과제번호: 2023-0283) 공모과제의 연구지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. P. S. Jo, C. S. Youn, H. W. Hwang and D. G. Lee, *Journal of the Korean Society for Heat Treatment* **34**, 66 (2021).
2. D. J. Lee, J. Y. Hwang, K. Y. Lee, *Journal of the Korean Society for Heat Treatment* **18**, 91 (2005).
3. Y. G. Park, M. Y. Wey, J. U. Park, *Journal of the Korean Society for Heat Treatment* **17**, 4 (2004).
4. H. W. Lee, *Korean J. Met. Mater.* **60**, 282 (2022).
5. T. W. Hwang, S. W. Han, I. Y. Oh, Y. H. Moon, *Korean J. Met. Mater.* **57**, 412 (2019)
6. D. G. Lee, S. H. Lee, Y. T. Lee, *Met. Mater. Sci. Eng. A. Int.* **486**, 1 (2008).
7. K. T. Kim, J. H. Sun, *Trends in Metals & Materials Engineering* **27**, 26 (2014).
8. T. J. Kang, P. L. Narayana, S. W. Choi, J. H. Kim, J. K. Hong, T. K. Lee, *Korean J. Met. Mater.* **61**, 714 (2023).
9. H. M. Kim, S. Y. Park, D. G., *Korean J. Met. Mater.* **61**, 545 (2023).
10. Y. W. Kim, R. R. Boyer, *Microstructure/property relationships in titanium aluminides and alloys*, <https://www.osti.gov/biblio/5286957> (1990).
11. P. J. Bania, *Jom* **46**, 16 (1994).
12. S. B. Gabriel, *Journal of Alloys and Compounds* **536**, S208 (2012).
13. M. Yamaguchi, H. Inui, *Acta Mater. Int.* **48**, 307 (2000).
14. C. Leyens, M. Peters, *Titanium and Titanium Alloys: fundamentals and applications*, pp.1-513, Wiley-vch, Weinheim (2006).
15. F. H. Froes, H. B. Bomberger, *JOM* **37**, 28 (1985).
16. H. Y. Hwang, Y. J. Lee, J. H. Park and D. G. Lee, *J. Powder Mater* **29**, 326 (2022).
17. N. A. Moshokoa, M. L. Raganya, *Materials Today* **27**, 1 (2021).
18. Wadood, Abdul, *Materials Transactions* **54**, 568 (2013).
19. M. Morinaga, M. Kato, T. Kamimura, M. Fukumoto, I. Harada and K. Kubo, *TMS*, **217**, 1 (1993).
20. Y.J. Hwang, *Journal of the Korean Society for Heat Treatment* **29**, 221 (2016).
21. J. L. Xu, *Materials Science and Engineering: C* **97**, 156. (2019)
22. H. Zhang, C. Wang G. Zhou, S. Zhang and L. Chen **18**, 5257 (2022).
23. C. Li, D. G. Lee, X. Mi, W. Ye, S. Hui, Y. T. Lee, *Journal of alloys and compounds* **549**, 152 (2013).
24. Y. C. Lin, Y. Tang, X. Y. Zhang, C. Chen, H. Yang, K. C. Zhou, *Vacuum* **159**, 191 (2019).
25. J. H. Han, K. H. Lee and M. C. *Shin Anal. Sci* **9**, 192 (1996).
26. M. A. Khan, L. Rachel, *Biomaterials* **20**, 631 (1999).
27. Dai, Nianwei, *Corrosion Science* **102**, 484 (2016).
28. Ghica, Ștefan-Ioan, *Materials* **16**, 2453 (2023).
29. A. De, L. H., *Journal of Alloys and Compounds* **615**, S666 (2014).
30. Y. L. Zhou, D. M. Luo, *J. Alloys Compd* **509**, 6269 (2011).
31. Xu, Wei, *Corrosion Science* **168**, 108557 (2020).
32. Wei, Ya, *Corrosion Science* **197**, 110079 (2022).