

# 체결용 Ti 합금의 미세조직 특성 및 기계적/전기화학적 거동 분석 연구

이효주<sup>1</sup> · Sam Yaw Anaman<sup>2</sup> · 최정묵<sup>3</sup> · 이근호<sup>4</sup> · 박이주<sup>4</sup> · 조훈휘<sup>5, #</sup>

## A Study of the Microstructure Properties and Mechanical/electrochemical Behavior of Ti Alloy for Fastening

H. J. Lee, S. Y. Anaman, J. M. Choi, K. H. Lee, L. J. Park, H. H. Cho  
(Received April 1, 2022 / Revised May 18, 2022 / Accepted May 18, 2022)

### Abstract

Ti alloys are used in a wide range of applications, especially for aviation and medical purposes, because of their high specific strength and excellent corrosion properties. When subjected to various manufacturing processes, one of the most popular Ti alloys, Ti-6Al-4V, exhibits a variety of microstructural and mechanical properties that makes it an attractive lightweight metal. The purpose of this study was to analyze the microstructure and mechanical properties of Ti alloy wires. Subsequently, the microstructure and electrochemical behavior of Ti alloy bolts produced from these wires were analyzed. The Ti alloy wires are manufactured with different diameters (6.22, 7.81 mm alloys), and their microstructures are measured using electron backscatter diffraction. Recrystallization was observed to occur significantly in the 7.81 alloy than in the 6.81 alloy, and the strain distribution of 7.81 alloy is seen to be likely more uniform than 6.22 alloy. Ti alloy bolt was then forged under moderate temperature by using the 7.81 alloy. Results of the electrochemical analysis indicate that the Ti alloy bolt has excellent corrosion resistance.

**Keywords:** Ti alloys, microstructure, mechanical properties, electrochemical behavior

## 1. 서론

Ti 합금은 고가임에도 높은 비강도와 내식성, 우수한 기계적 특성을 가지고 있어 항공우주, 국방 산업, 해양 분야 등 경량 수송기기 재료로 널리 사용되고 있다[1-4]. 특히, 항공 분야에서는 높은 비강도가 주요 핵심 요소로서, Ti 합금의 체결용 부품으로서의 수요가 지속적으로 확대되고 있다[5]. 체결용 부품은 실제 사용 환경에서 동중 혹은 이중 금속

경계에서 갈바닉 부식(galvanic corrosion) 환경에 노출되게 되고, 이는 전기화학적 불안정성을 야기한다 [6]. 갈바닉 부식을 제어하기 위해서는 부식 저항성이 우수한, 특히 산화 반응에서 부동태 피막(passive layer)을 형성시키는 금속이 우선적으로 선택되어야 하고, Ti 합금은 그 중 하나의 대안으로 대두되고 있다[6-9]. 특히, 항공기 복합재료의 경우, 사용되는 재료와의 열팽창계수 차이가 대체로 적은 Ti 합금의 사용이 증가하는 추세이다[10].

Ti 합금은 저온 안정상인 조밀육방격자(Hexagonal Close Packed, HCP) 구조의  $\alpha$  상과 고온 안정상인 체심입방격자(Body Centered Cubic, BCC) 구조의  $\beta$  상으로 미세조직이 구성되어 있고, 이 중 대표적인 합금계는 Ti-6Al-4V 이다. Ti-6Al-4V 합금은 이상조직(dual

1. 한밭대학교 신소재공학과, 학부 과정

2. 한밭대학교 신소재공학과, 박사 과정

3. ㈜진합 기술연구소, 상무

4. 국방과학연구소, 연구원

5. 한밭대학교 신소재공학과, 교수

# Corresponding Author : Department of Materials Science and Engineering, Hanbat National University, E-mail: hhcho@hanbat.ac.kr

ORCID : 0000-0002-9815-3739

phase,  $\alpha+\beta$ )을 기반으로 하고 있으며, 열처리 조건에 따라 다양한 미세조직과 이에 따른 기계적 성질을 얻을 수 있다[11-13]. 그러나, Ti 합금은 고온에서 가공 시, 금속표면에서 알파-케이스( $\alpha$ -case)를 형성시키고, 이는 2 차 가공 단계에서 표면 균열을 일으킨다. 더욱이, 최종 가공 단계(저온에서 가공)에서 표면 균열을 방지하기 위해 상당히 많은 절삭가공이 요구된다. 또한, 이러한 문제점은 제조비용의 증가 등을 야기하고 있다[14-18].

이를 극복하기 위해 고온과 저온 사이의 온도 구간에서 가공을 하는 온간(600~700 °C) 성형 공정이 하나의 대안이 될 수 있다[19-22]. 온간 성형 공정은 상온에서의 제한된 성형성을 극복하고, 열간 가공 공정에서 유발되는 절삭량 과다문제를 해결할 수 있다. 따라서, 온간 성형에 사용될 Ti 합금은 단조 공정 이전의 소재 선택부터 단조 이후의 최종 체결용 부품에서까지 미세조직 및 이에 따른 기계적/전기화학적 거동에 대한 전방위적 이해가 우선되어야 한다[15,23].

따라서, 본 연구에서는 온간 성형을 통해 제조되는 Ti 합금 체결부품의 기본 소재인 선재의 미세조직 변화 및 기계적 특성을 먼저 분석하고, 선재에 온간 성형 공정을 적용하여 제조된 체결용 Ti 합금의 미세조직 특성과 실제 사용 환경에서의 전기화학적 거동을 분석하고자 한다.

## 2. 실험방법

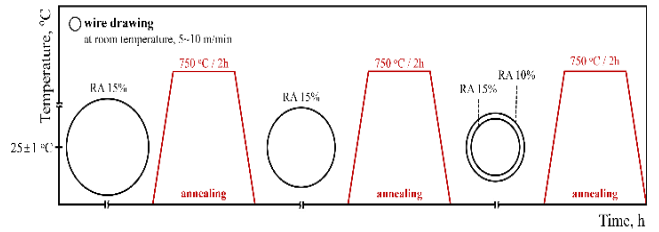
### 2.1 선재 및 볼트 제작 공정

**Table 1 Chemical compositions of Ti-6Al-4V alloy used in the present study (in wt.%).**

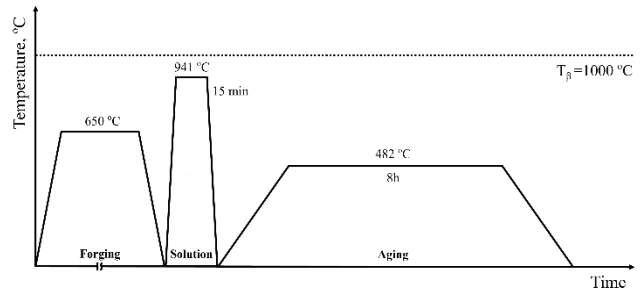
	N	C	H	Fe	O	Al	V	Y	Ti
Ti64	0.002	0.010	0.004	0.210	0.190	6.4	3.95	0.001	Bal

Table 1은 본 연구에서 사용된 Ti합금의 조성을 보여준다. Ti합금은 신선(wire drawing) 및 어닐링(annealing) 공정을 통해 요구되는 직경(6.22, 7.81 mm)의 선재로 가공되었다. Fig. 1은 Ti합금 선재의 가공 열처리 조건을 나타낸다. 초기 직경 14.1 mm의 선재는 단계적인 신선 공정 (총 3차)을 거쳐, 요구되는 직경의 선재로 가공되었다. 합금 미세조직의 불

균일성을 제어하기 위해, 각 신선 공정 후 750 °C에서 2시간 동안 어닐링 공정을 거쳤다. 각 단계별 신선 공정은 단면감소율(Reduction Area, RA) 15%를 기본으로 하였으며, 최종 단계에서 각 선재의 단면감소율을 10, 15%로 하였다. 직경 7.81 mm를 가지는 선재는 650 °C에서 온간 성형공정을 통해 체결용 부품으로 제조되었으며, 가공 열처리 조건은 Fig. 2에서 보여준다.



**Fig. 1 Schematic diagram of heat treatment condition of Ti alloy wire. Black circle shows each diameter of wire after each drawing.**



**Fig. 2 Schematic diagram of heat treatment condition of Ti alloy for fastening after moderate-temperature forge process. Dotted line shows  $\beta$ -transus temperature (1000 °C).**

### 2.2 미세조직 및 기계적 특성 평가

단면감소율에 따른 선재와 체결용 부품의 미세조직은 전자후방산란회절(Electron BackScatter Diffraction, EBSD, JSM-7100F, JEOL, Japan) 분석기를 통해 관찰되었다. 기계적 연마 과정을 거친 시편은 콜로이드 실리카(Colloidal Silica)를 이용하여 화학-기계적 연마 과정을 최종적으로 거쳤다. 측정된 Kikuchi 회절패턴으로부터 각 픽셀의 방위는 계산되고, 그 방위들의 신뢰 지수(Confidence Index, CI)는 0.8 이상의 높은 값을 보여주었다. 선재의 기계적 강도를 비교하기

위해 비커스(Vickers) 경도시험(DK/Duramin-40 M1, Struers, Denmark)을 수행하였다. 선재 단면(Fig. 1)의 중앙 영역에서 12 번 측정하였으며, 다이아몬드 압입자를 300 gf 의 하중으로 15 초 동안 유지하였다.

### 2.3 전기화학적 부식 시험

체결용 Ti 합금의 전기화학적 거동을 분석하기 위해 동전위 분극 시험(Potentiodynamic polarization test)을 수행하였다. 미세연마를 통해 체결용 부품의 머리부 시편을 준비하였다. 3.5 wt.% NaCl 전해질 용액에서 머리부 시편은 산화전극(working electrode), 흑연(graphite)은 환원전극(counter electrode)으로 실험을 수행하였고, 포화 칼로멜 전극(saturated calomel electrode, SCE)을 이용하여 전위를 측정하였다. 동전위 분극 시험을 시작하기 전에 시편을 60 분 동안 전해질 용액에 노출시켜 개방회로 전위(open circuit potential, OCP)를 측정하였다[24]. 이후, 0.1667 mV/sec의 측정속도로 동전위 분극 시험을 실시하였다. 전해질 용액의 온도는 상온(25±1 °C)으로 일정하게 유지되었고, 동전위 분극 시험은 개방회로 전위를 기반으로 -500 mV(SCE)에서 2500 mV(SEC)의 범위로 전위를 가하여 시험을 수행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 선재의 미세조직 및 기계적 특성 분석

Fig. 1의 최종 단계에서 각각 15%, 10%의 단면감소율을 경험한 각 선재를 6.22 합금, 7.81 합금으로 명기하였다. Fig. 3은 6.22 합금의 미세조직 특성을 전자후방산란회절 분석기를 이용하여 선재 단면에서 측정된 결과이다. Fig. 3(a)는 대체로 등축정 조직(equiaxed microstructure) 형상을 보여주며, 평균 결정립 크기는 대략 4.9 μm 로 측정된다. Fig. 3(b)는 IQ (Image Quality) 분포를 나타내며, 결정립계 분포를 그 위에 나타내었다. 전체 입계 중 저경각입계(Low-angle Grain Boundary (2°~15°), LAGB)와 고경각입계(High-angle Grain Boundary (>15°), HAGB) 분율은 각각 30.4, 69.6%인 것을 확인하였다. Fig. 3(c)는 Grain orientation spread(GOS) 분포를 나타내며, 6.22 합금의 재결정 정도를 보여준다. 파란색(2° 이하)으로 표시

된 부분은 내부에 아결정립(subgrain)이 없는 재결정에 의해 새롭게 형성된 결정립을 나타낸다[25]. 6.22 합금의 GOS 분포로부터 신선 공정 이후 선재에서 재결정 조직이 크게 발달하지 않은 것을 확인하였으며, 이는 Fig. 4에서 설명되는 다수의 재결정 조직 분포와 비교된다. Kernel average misorientation(KAM) 분포(Fig. 3(d))로부터 측정된 평균값은 0.50이고, 결정립계에서 높은 값이 집중되어 있는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3(e)로부터 선재의 미세조직은 대부분 α 상으로 구성되어 있는 것을 확인할 수 있다. 또한, 주요 상(α)에 대한 pole figure(Fig. 3(f))는 선재에서 압연집합조직이 발달되어 있는 것을 보여준다[26,27].

Fig. 4는 7.81 합금의 미세조직 특성을 보여준다. 전체적으로 6.22합금의 경우와 같이 등축정 조직 형상이 나타나며, 평균 결정립 크기도 대략 4.8 μm로 비슷하게 측정된다. 그러나, 결정립계 분포 중 고경각입계 분율은 86.1%(Fig. 4(b))로 높게 측정되었고, GOS 분포를 Fig. 3(c)와 같은 조건으로 분석하였을 때, 재결정된 상이 대다수를 차지하는 것을 확인하였다(Fig. 4(c)). 즉, 7.81 합금의 경우, 신선 공정에서 재결정 현상이 일어난 것을 확인할 수 있다. KAM 평균값(0.38)은(Fig. 4(d)) 6.22 합금의 경우보다 낮게 측정되었으며, 이는 재결정 현상으로 생성된 상은 기존의 상들보다 대체적으로 보다 낮은 전위 분포를 가지고 있기 때문이다[28]. 7.81 합금의 경우에도 대부분 α 상으로 구성되어 있는 것을 확인할 수 있고, 압연집합조직도 비슷하게 발달되어 있는 것을 확인할 수 있다.

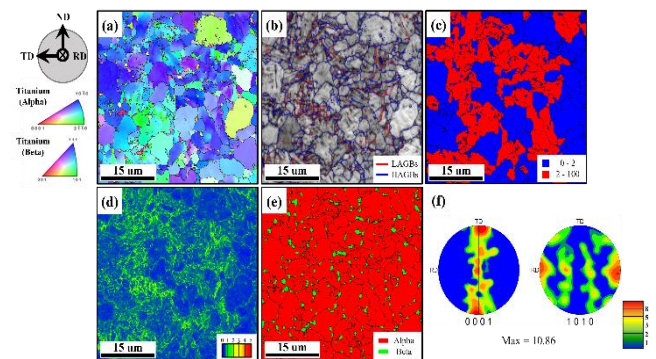


Fig. 3 Microstructural features of 6.22 alloy: (a) RD (rolling direction)-IPF (Inverse Pole figure), (b) IQ (Image quality) (overlaid with grain boundaries), (c) GOS, (d) KAM, (e) phase maps, (f) pole figures.

(f) basal plane {0001} and prismatic plane {10-10} pole figure.

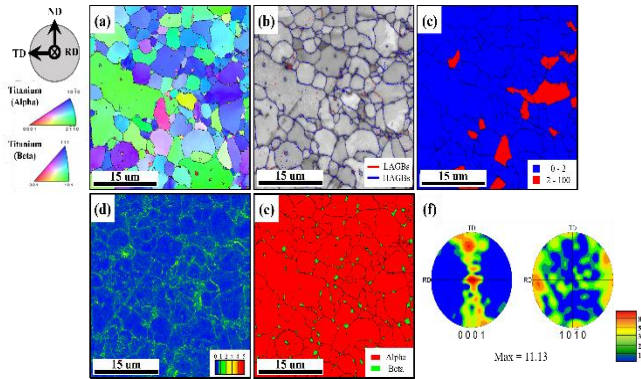


Fig. 4 Microstructural features of 7.81 alloy: (a) RD-IPF, (b) IQ (overlaid with grain boundaries), (c) GOS, (d) KAM, (e) phase maps, (f) basal plane {0001} and prismatic plane {10-10} pole figure.

두 선재에서의 변형률 분포의 차이를 명확히 하기 위해, grain reference orientation deviation (GROD) 값 [29,30]을 도입하였다. Fig. 5 는 6.22, 7.81 합금의 GROD 분포와 그 값들의 상대적인 분율 분포를 보여준다. 실제 공정에서는 국부적인 영역에서의 변형률 집중이 최종 제품의 품질에 크게 영향을 미친다 [31,32]. 따라서, 높은 GROD 값들의 상대적인 분율 분포를 확대해서 나타내었다. 6.22 합금의 평균 GROD 값(3.26)은 7.81 합금의 평균 GROD 값(1.28) 보다 높게 측정되었고, 이는 Fig. 3~4 에서 도시된 KAM 값의 상대적인 차이보다 더 큰 것을 확인할 수 있다. 또한, 6.22 합금의 특정 국부적인 영역에서 변형률 분포가 강하게 집중되어 있는 것을 확인할 수 있고, 이는 선재 공정 이후의 2 차 공정에서 제품 품질 문제를 야기할 수 있다. 실제 현장에서 생산되는 제품에서 다수의 불량품이 6.22 합금에서 보고된 것으로 보아, GROD 분포에서의 국부적인 변형률 집중 분포는 그 사실을 뒷받침하는 근거로 활용될 수 있다. 특히, 높은 GROD 값들의 상대적인 분율 분포는 정량적인 분석의 근거가 되며, 램스케일에서의 결과와 현장에서의 결과를 연관해서 추정할 수 있는 근거가 된다.

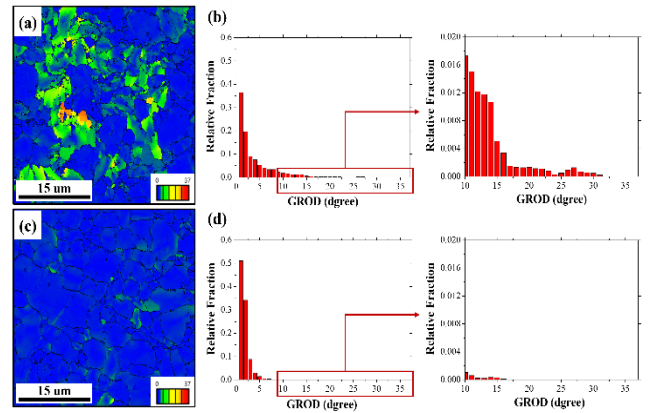


Fig. 5 GROD map and relative fraction with GROD values (a-b) 6.22 and (c-d) 7.81 alloys. Red rectangle shows the magnification of relative fraction over 10 degree.

Fig. 6 은 6.22, 7.81 합금의 선재 단면 중앙 영역에서 비커스 경도시험기를 이용하여 측정된 평균값 및 편차를 보여준다. 6.22 합금의 평균 경도값(352.0 HV)은 7.81 합금의 평균 경도값(313.7 HV)보다 높게 측정되었다. 보다 높은 단면적 감소(제 3 차 신선공정, Fig. 1)는 재료에 보다 과한 소성변형을 가져오기 때문으로 해석할 수 있다.

또한, 열처리 이후, 7.81 합금에서는 재결정 조직이 그대로 남아있는 것이 확인된 반면(Fig. 4(c)), 6.22 합금의 경우 가공 단계에서의 소성 변형이 미세조직 상에 그대로 남아 있는 것(Fig. 3(b))을 확인할 수 있다[33].

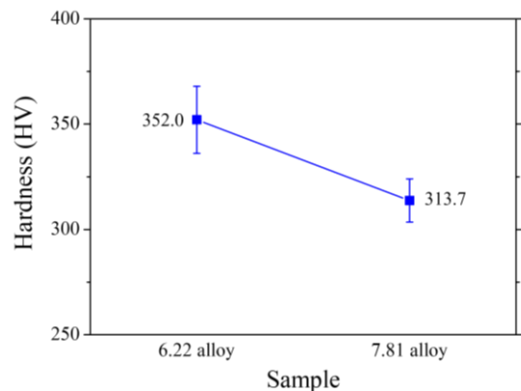
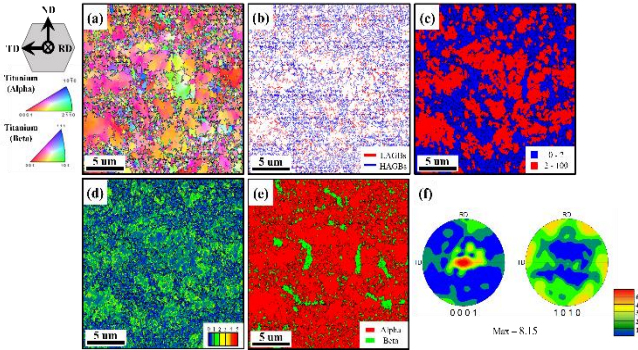


Fig. 6 Vickers hardness profiles of 6.22, 7.81 alloys.



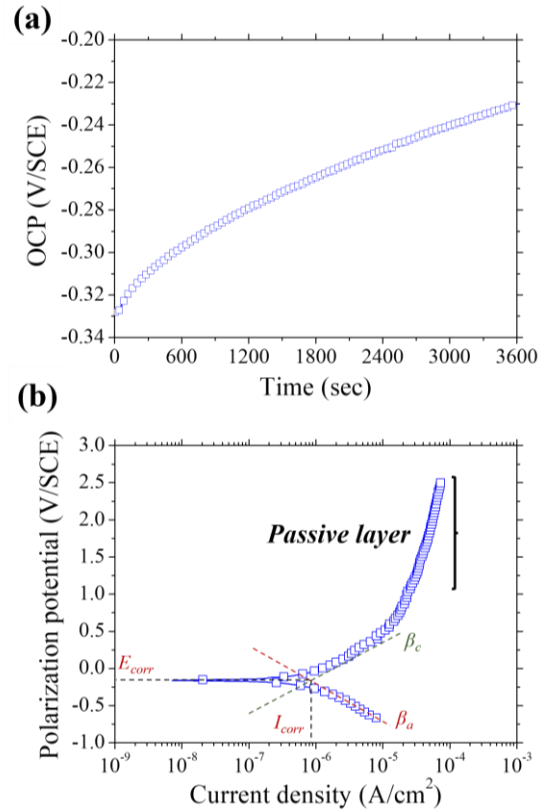
### 3.2 체결용 부품의 미세조직 및 전기화학적 특성 분석

부에서는 단조로 인한 basal texture(Fig. 7(f))가 발달되어 있는 것을 확인할 수 있다[36].



**Fig. 7 Microstructural features of Ti alloy for fastening: (a) IPF-RD, (b) grain boundary (c) GOS, (d) KAM, (e) phase maps, (f) basal plane {0001} and prismatic plane {10-10} pole figure.**

온간 성형 공정을 통해 변형률 분포가 균일한 7.81 합금 선재를 체결용 부품으로 제조하였고, 체결용 부품의 전기화학적 특성을 분석하기 위해 우선적으로 머리부의 미세조직을 전자후방산란회절 분석기를 이용하여 측정하였다(Fig. 7). 머리부는 실제 사용 환경에서 외부로 노출되는 위치이기 때문에, 본 연구에서는 머리부를 중심으로 체결용 부품의 전기화학적 거동 특성을 파악하였다. Fig. 7(a)의 평균 결정립 크기는 대략 1.3  $\mu\text{m}$  로 측정된다. 이는 단조 공정에 기인한 동적 재결정(dynamic recrystallization, DRX) 현상으로 설명할 수 있다 [34,35]. Fig. 7(b)는 전체 입계 중 저각각입계와 고각각입계의 분율이 각각 35.6, 64.4%인 것을 보여준다. 특히, 동적 재결정으로 생성된 미세한 결정립은 보다 높은 고각각입계 분율에 기여한다. 또한, GOS 분포(Fig. 7(c))는 미세한 결정립이 동적재결정에 의해 생성된 것을 다시 한 번 확인시켜 준다. KAM 분포(Fig. 7(d))로부터 측정된 평균값은 0.75 이고, 새롭게 생성된 상(재결정상)보다 기존의 상 내부에서 보다 높은 값을 보여준다. 이는 단조로 인한 전위의 증가가 그대로 기존의 상 내부에 남아있기 때문으로 해석할 수 있다. 머리부의 미세조직도 선재와 마찬가지로 대부분  $\alpha$  상으로 구성되어 있는 것을 확인할 수 있다(Fig. 7(e)). 마지막으로, 체결용 합금의 머리



**Fig. 8 (a) OCP and (b) electrochemical potentiodynamic polarization curves of Ti alloy for fastening in 3.5 wt.% NaCl solution at room temperature, with measured  $E_{corr}$  and  $I_{corr}$  presented in Table 2.**

체결용 합금 머리부의 전기화학적 특성을 정량적으로 평가하기 위해 동전위 분극 시험을 행하였다. 먼저, 동전위 분극 시험을 시작하기 전에 개방회로 전위를 측정하였으며, 개방회로 전위는 상온에서 60 분 동안 측정되었다. 초기 전위는 -0.33 V 이며, 60 분 이후 종료 시점에는 -0.23 V 로 전위가 측정되었다(Fig. 8(a)). 지속적인 전위의 증가가 관찰되었고, 머리부 합금이 해당 전해질 용액에서 안정적으로 반응하는 것을 확인하였다. 특히, 전위의 증가가 선형이 아닌, 점차적으로 증가하는 곡선 형태를 지니는 것으로 보아, 부동태 피막 생성의 가능성을 보여준다[37].

**Table 2 Corrosion current potentials and current densities measured from potentiodynamic polarization curves in Fig. 8(b), and the corresponding corrosion rates.**

Sample	$E_{corr}$ (mV/SCE)	$I_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Corrosion rate (mm/year)
Ti alloy for fastening	-162.66	0.78	0.0090

Fig. 8(b)는 3.5 wt.% NaCl 전해질 용액에서 체결용 합금 머리부에 대한 동전위 분극 시험을 통하여 얻은 분극 곡선이다. 분극 시험시, 개방회로 전위를 기반으로 전위를 가하게 되며, 이는 머리부 표면에서 분극(양극과 음극으로 나뉘)이 형성되어, 각각 산화/환원 반응에 의한 곡선이 형성된다. 이 두 곡선에 Tafel 외삽법[38]을 적용하여 부식 전위( $E_{corr}$ )와 부식 전류 밀도( $I_{corr}$ )를 구할 수 있고, 이 값은 Table 2에 명시되어 있다. 또한, 개방회로 전위의 종료 시점인 -0.23 V/SCE에서부터 전류밀도의 증가에 따라 전위가 증가하는 양상이 anodic branch로부터 관찰되었으며, 1.0 V/SCE에서부터는 전위가 증가함에 따라 전류 밀도 변화가 거의 없는 부동태 피막에 의한 부동태 영역이 관찰되었다[39]. 이는 대상 합금의 우수한 부식 저항성을 증명한다. 또한, 아래 식을 사용하여 연간 mm(mmpy) 단위의 부식 속도를 계산할 수 있으며[24], 결과는 Table 2에 나타내었다.

$$\text{Corrosion rate (mmpy)} = K \frac{i_{corr}}{\rho} EW$$

여기서  $\rho$ 는 밀도( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $K$ 는  $3.27 \times 10^{-3} \text{ mm g}/\mu\text{A cm yr}$  값을 갖는 상수이고,  $EW$ (equivalent weight)는 물질의 당량 무게를 나타낸다. 체결용 합금 머리부는 0.0090 mm/yr의 부식 속도(Table 2)를 가지며, 이는 기존 합금에서 측정된 부식속도와 유사한 값을 가지는 것으로 확인되었다[40–44]. 온간 성형 공정을 통해 형성된 체결용 Ti 합금도 기존의 강종과 유사한 우수한 부식 저항성을 갖는 것으로 재차 확인되었고, 이는 온간 성형 공정이 기존 강종의 전기화학적 특성을 저해하지 않는다는 사실을 보여준다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 Ti-6Al-4V 합금 선재의 미세조직 특성 및 기계적 강도를 비교하고, 체결용 Ti 합금의 미세조직 및 전기화학적 거동을 분석하였다.

1) 신선 공정으로 제조된 Ti-6Al-4V 합금 선재의 미세조직 특성을 전자후방산란회절 분석기를 이용하여 측정하였다. 낮은 단면감소율을 가지는 7.81 합금은 높은 단면감소율을 가지는 6.22 합금에 비해 다수의 재결정 조직을 가지는 것으로 관찰되었고, 변형률 분포 측면에서도 보다 균일한 변형률 분포가 관찰되었다. 국부적인 변형률 집중은 온간 성형 공정 중 불량을 야기하였고, 체결 부품 합금으로 제조된 선재는 7.81 합금이었다.

2) 또한, 6.22 합금은 보다 큰 단면적 감소로 과도한 소성 변형이 일어났고, 가공 단계에서의 소성 변형이 미세조직 상에 그대로 남아 있어 보다 높은 경도값을 야기하였다.

3) 체결용 합금 머리부의 미세조직에서는 온간 성형 공정 중에 발생한 동적 재결정으로 인해 아주 미세한 결정립 분포가 관찰되었다. 재결정상은 변형률 분포 및 저/고경각입계 측면에서 기존의 상과 분명한 차이를 보여주었다.

4) 개방회로 전위와 동전위 분극 시험을 통해 체결용 합금 머리부의 전기화학적 거동이 측정되었으며, 부동태 영역을 통해 체결용 합금은 우수한 부식 저항성을 갖는 것으로 확인되었다.

#### 후 기

본 성과는 산업통상자원부의 경량소재 국가전략 프로젝트 산업기술혁신사업(과제번호: 10081334)의 지원을 받아 수행된 연구임. 또한, 본 성과는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.NRF-2018R1A5A1025224). 또한, 본 성과는 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2020R1I1A3A04037992). 또한, 본 연구는 2021년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과임.(2021RIS-004). 마지막으로, 본 성과는 국방과학연구소의 기타 29(211555-912440203) 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

## REFERENCES

- [1] S.T. Oh, K. Do Woo, J.H. Kim, S.M. Kwak, 2017, The effect of Al and V on microstructure and transformation of  $\beta$  phase during solution treatments of cast Ti-6Al-4V alloy, *J. Korean Inst. Met. Mater.*, Vol. 55, pp. 150~155.  
doi:10.3365/KJMM.2017.55.3.150.
- [2] R. Ullah, J. Lu, L. Sang, M. Rizwan, Y. Zhang, Z. Zhang, 2021, Investigating the microstructural evolution during deformation of laser additive manufactured Ti-6Al-4V at 400 °C using in-situ EBSD, *Mater. Sci. Eng. A.*, Vol. 823, 141761.  
doi:10.1016/j.msea.2021.141761.
- [3] J. Sun, M. Qi, J. Zhang, X. Li, H. Wang, Y. Ma, D. Xu, J. Lei, R. Yang, 2021, Formation mechanism of  $\alpha$  lamellae during  $\beta \rightarrow \alpha$  transformation in polycrystalline dual-phase Ti alloys, *J. Mater. Sci. Technol.*, Vol. 71, pp. 98~108.  
doi:10.1016/j.jmst.2020.02.093.
- [4] A. Gupta, R. Khatirkar, J. Singh, 2021, A Review of Microstructure and Texture Evolution during Plastic Deformation and Heat Treatment of  $\beta$ -Ti alloys, *J. Alloys Compd.*, Vol. 899, 163242.  
doi:10.1016/j.jallcom.2021.163242.
- [5] D.P. Hess, W. Cai, N. Crane, 2015, Ph. D., Thesis, University of South Florida, Tampa, pp. 1~91.
- [6] Y. Kim, S. Park, Y. Yoo, 2012, Corrosion Behavior of the parts of Carbon Steel Bolted GECM(Graphite Epoxy Composite Material)/Al plates, *Corros. Sci. Technol.*, Vol. 11, pp. 232~241.  
doi:10.14773/cst.2012.11.6.232.
- [7] D. Snihirova, D. Höche, S. Lamaka, Z. Mir, T. Hack, 2019, Galvanic corrosion of Ti6Al4V -AA2024 joints in aircraft environment: Modelling and experimental validation, *Corros. Sci.*, Vol. 157, pp. 70~78.  
doi:10.1016/j.corsci.2019.04.036.
- [8] C.D. dos Reis Barros, J.C. Rocha, B.F. Braz, R.E. Santelli, J.A. da Cunha Ponciano Gomes, 2020, Galvanic corrosion of Ti6Al4V Coupled With NiCr as a dental implant alloy in fluoride solutions, *Int. J. Electrochem. Sci.*, Vol. 15, pp. 394~411.  
doi:10.20964/2020.01.07.
- [9] R. Sánchez-Tovar, M.T. Montañés, J. García-Antón, 2010, The effect of temperature on the galvanic corrosion of the copper/AISI 304 pair in LiBr solutions under hydrodynamic conditions, *Corros. Sci.*, Vol. 52, pp. 72  
doi:10.1016/j.corsci.2009.10.032.
- [10] S. Park, S. Kim, D. Lee, S. Ahn, S. Kim, 2018, Effect of microstructural factors on fatigue and fatigue crack propagation behaviors of mill-annealed Ti-6Al-4V alloy, *J. Korean Inst. Met. Mater.*, Vol. 56, pp. 845~853.  
doi:10.3365/KJMM.2018.56.12.845.
- [11] Y. H. Lee, T. J. Shin, N. K. Park, I. O. Shin, S. M. Hwang, C. S. Lee, 2004, Prediction of Microstructure During High Temperature Forming of Ti-6Al-4V Alloy, *J. KIMS Technol.*, Vol. 7, No. 4, pp. 70~78.  
doi:10.5228/KSPP.2003.12.4.290.
- [12] Y. Tanaka, K. Hattori, Y. Harada, 2021, Micro-cantilever testing of microstructural effects on plastic behavior of Ti-6Al-4V alloy, *Mater. Sci. Eng. A.*, Vol. 823, 141747. doi:10.1016/j.msea.2021.141747.
- [13] H.R. Javadinejad, G. Shin, H. Lee, M.S. Choi, J. Park, J. Yoon, J.H. Kim, 2021, Origin of surface ridging in Ti-6Al-4V sheets produced by pack rolling and its effect on microstructural and mechanical properties, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 297, 117228.  
doi:10.1016/j.jmatprotec.2021.117228.
- [14] C. Chun, S. Kim, 2018, The Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Behaviors of Laser Direct Energy Deposited Ti-6Al-4V Plate, *JWJ.*, Vol. 36, No. 5, pp. 75~80. doi:10.5781/JWJ.2018.36.5.10.
- [15] J. H. Song, Y. S. Kim, Y. W. Chang, 1997, Deformation Characteristics of Ti-6Al-4V Alloy during Isothermal Forging, *J. Kor. Inst. Met. Mater.*, Vol. 35, No. 3, pp. 312~318
- [16] H. Ohnishi, K. Takamoto, H. Matsumoto, R. Matsumoto, 2020, Microstructural evolution of a Ti-6Al-4V alloy produced by forging process combined with torsional motion, *J. Manuf. Process.*, Vol., pp. 1161~1170.  
doi:10.1016/j.jmapro.2020.09.019.
- [17] M. Chandrasekaran, Z.S. Xia, 2005, Effect of alloying time and composition on the mechanical properties of Ti alloy, *Mater. Sci. Eng. A.*, Vol. 394, pp. 220~228.  
doi:10.1016/j.msea.2004.11.056.

- [18] I.K. Kwon, D.S. Kim, T.D. Park, H.S. Park, S.S. Hong, I.O. Shim, 2010, Development of Hot die Forging Process for Large-size Titanium Alloy Container, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 19, pp. 50~58.  
doi:10.5228/kspp.2010.19.1.050.
- [19] G.S. Shin, J.G. Park, J.H. Kim, Y.S. Kim, Y.H. Park, N.K. Park, 2015, Effect of Processing Conditions on the Deep Drawability of Ti-6Al-4V Sheet at Warm Temperatures, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 24, pp. 5~12.  
doi:10.5228/KSTP.2015.24.1.5.
- [20] S. H. Chang, C. S. Choi, Y. C. Choi, D. G. Seo, 2000, *Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf.*, *Trans. Mater. Process*, Seoul, pp. 168~173.
- [21] Y.L. Hao, Z.B. Zhang, S.J. Li, R. Yang, 2012, Microstructure and mechanical behavior of a Ti-24Nb-4Zr-8Sn alloy processed by warm swaging and warm rolling, *Acta Mater.*, Vol. 60, pp. 2169~2177.  
doi:10.1016/j.actamat.2012.01.003.
- [22] J. T. Yeom, 2011, Warm Forming Die Design and Process Optimization of Titanium Alloy Bolt, <https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=TRKO201300014507&dbt=TRKO&rn=>
- [23] S.G. Lim, J.H. Kim, J.H. Kim, C.H. Lee, J.K. Hong, J.T. Yeom, 2009, *Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf.*, *Trans. Mater. Process*, Seoul, pp. 80~81.
- [24] S.Y. Anaman, H.H. Cho, H. Das, J.S. Lee, S.T. Hong, 2019, Microstructure and mechanical /electrochemical properties of friction stir butt welded joint of dissimilar aluminum and steel alloys, *Mater. Charact.*, Vol. 154, pp. 67~79.  
doi:10.1016/j.matchar.2019.05.041.
- [25] S. Ding, T. Taylor, S.A. Khan, Y. Sato, J. Yanagimoto, 2022 Further understanding of metadynamic recrystallization through thermomechanical tests and EBSD characterization, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 299, 117359  
doi: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117359.
- [26] M. Wang, Y. Wang, A. Huang, L. Gao, Y. Li, C. Huang, Promising tensile and fatigue properties of commercially pure titanium processed by rotary swaging and annealing treatment, *Materials (Basel)*. 11 (2018). <https://doi.org/10.3390/ma11112261>.
- [27] L. da Silva, G. Sivaswamy, L. Sun, S. Rahimi, Effect of texture and mechanical anisotropy on flow behaviour in Ti-6Al-4V alloy under superplastic forming conditions, *Mater. Sci. Eng. A*. 819 (2021) 141367.  
doi: 10.1016/j.msea.2021.141367.
- [28] I. Yamaguchi, M. Yonemura, 2021, Recovery and Recrystallization Behaviors of Ni-30 Mass Pct Fe Alloy During Uniaxial Cold and Hot Compression, *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, Vol. 52, pp. 3517~3529.  
doi:10.1007/s11661-021-06323-4.
- [29] X. Wei, M. Xu, J. Chen, C. Yu, J. Chen, H. Lu, J. Xu, 2018, Materials Characterization Fractal analysis of Mo and Nb effects on grain boundary character and hot cracking behavior for Ni-Cr-Fe alloys, *Mater. Charact.*, Vol. 145, pp. 65~76.  
doi:10.1016/j.matchar.2018.08.024.
- [30] C. Schayes, J. Bouquerel, J. Vogt, F. Palleschi, S. Zaeferrer, 2016, Materials Characterization A comparison of EBSD based strain indicators for the study of Fe-3Si steel subjected to cyclic loading, *Mater. Charact.*, Vol. 115, pp. 61~70.
- [31] M. Lee, J.B. Jeon, T. Jun, 2018, Investigation of Local Deformation Behaviour of Metallic Materials and Recent Research Trends : A Review, *J. Kor. Inst. Met. Mater.*, Vol. 56, pp. 635~644.  
doi:10.3365/KJMM.2018.56.9.635.
- [32] H. J. Kim, J. M. Lim, 2004, A Study of Static and Dynamic Deformation Behaviors of SCM415 steel on the Change of Spheroidization of Cementite., *KSHT*, Vol. 17, No. 6, pp. 327~335.
- [33] B.H. Choe, H.S. Jang, H.S. Kim, J.U. Moon, 2017, Age Hardening and Re-crystallization Softening of a CoCrFeMnNi High Entropy Alloy, Vol. 55, pp. 684~688.  
doi:10.3365/KJMM.2017.55.10.684.
- [34] M. Jawad, G. Sivaswamy, A. Rosochowski, S. Boczkal, 2017, *Materials Science & Engineering A* On the evolution of microstructure and texture in commercial purity titanium during multiple passes of incremental equal channel angular pressing ( I-ECAP ), *Mater. Sci. Eng. A.*, Vol. 699, pp. 31~47.  
doi:10.1016/j.msea.2017.05.040.
- [35] J. Kawalko, P. Bobrowski, P. Kopyrowski, A. Jarzębska,



- M. Bieda, M. Łagoda, K. Sztwiertnia, 2017, Microstructure evolution of CP titanium during deformation in KoBo process followed by cold rolling, *J. Alloys Compd.*, Vol. 707, pp. 298~303.  
doi:10.1016/j.jallcom.2016.11.202.
- [36] S. Choi, J. Hong, C.H. Park, S. Lee, N. Kang, Y.S. Choi, J.T. Park, S.T. Ahn, J. Yeom, S. Steel, 2019, Manufacturing Process of Titanium Alloys Flux-Metal Cored Wire for Gas Tungsten Arc Welding, *JWJ*, Vol. 37, No. 3, pp. 268-274,  
doi: 10.5781/JWJ.2019.37.3.11.
- [37] L. Zha, H. Li, N. Wang, 2020, In Situ Electrochemical Study of the Growth Kinetics of Passive Film on TC11 Alloy in Sulfate Solution at 300oC/10 MPa, *Materials*, Vol. 13, 1135.  
doi:10.3390/ma13051135.
- [38] Z. Shi, M. Liu, A. Atrens, 2010, Measurement of the corrosion rate of magnesium alloys using Tafel extrapolation, *Corros., Sci.* 52, pp. 579~588.  
doi:10.1016/j.corsci.2009.10.016.
- [39] W. G. Kim, C. H. Lee, C. H. Chung, H. C. Choe, 2010, Corrosion Behavior of Nanotube Formed on the Bone Plate of Ti-6Al-4V Alloy for Dental Use, *J. Kor. Inst. Surf. Eng.*, Vol. 43, No. 1, pp. 25~30.
- [40] R.O. Hussein, X. Nie, D.O. Northwood, 2012, A spectroscopic and microstructural study of oxide coatings produced on a Ti-6Al-4V alloy by plasma electrolytic oxidation, *Mater. Chem. Phys.*, Vol. 134, pp. 484~492.  
doi:10.1016/j.matchemphys.2012.03.020.
- [41] E. Fazakas, F. Ahnia, D.L. Alontseva, 2021, Pitting Corrosion behaviour of Austenitic Stainless-Steel Coated on Ti6Al4V Alloy in Chloride Solutions, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, Vol. 21, No. 2(68), pp. 4~15.  
doi:10.2478/adms-2021-0007.
- [42] H.S. Abdo, E.M. Sherif, H. A. El-Serehy, 2020, Manufacturing of Ti-6%Al and Ti-6%Al-4%V Alloys and Their Corrosion in Sodium Chloride Solutions, *Crystals.*, Vol. 10, 181.  
doi:10.3390/cryst10030181.
- [43] R. M. Abou Shahba, W. A. Channem, A. E. S. El-Shenawy, A. S. I. Ahmed, S. M. Tantawy, 2011, Corrosion and Inhibition of Ti-6Al-4V Alloy in NaCl Solution, *Int. J. Electrochem. Sci.*, Vol. 6, pp. 5499~5509.
- [44] Y.P. Dong, J.C. Tang, D.W. Wang, N. Wang, Z.D. He, J. Li, D.P. Zhao, M. Yan, 2020, Additive manufacturing of pure Ti with superior mechanical performance, low cost, and biocompatibility for potential replacement of Ti-6Al-4V, *Mater. Des.*, Vol. 196, 109142.  
doi:10.1016/j.matdes.2020.109142.