

## Ti-5Mo-xFe (x=2,4 wt%) 합금의 Fe 첨가에 따른 마모 메커니즘 변화와 내마모 특성 분석

정영훈<sup>1</sup> · 이용재<sup>1</sup> · 이동근<sup>1,†</sup>  
<sup>1</sup>국립순천대학교 신소재공학과

### Analysis of Wear Resistance and Wear Mechanism Change of Ti-5Mo-xFe (x=2,4 wt%) Alloys Based on Fe Addition

Yeong-Hun Jung<sup>1</sup>, Yong-Jae Lee<sup>1</sup>, Dong-Geun Lee<sup>1,†</sup>

Department of Materials Science and Metallurgical Engineering, Suncheon National University,  
Suncheon 59772, Republic of Korea

**Abstract:** Metastable  $\beta$  titanium alloys have been used in implants due to their high specific strength and excellent corrosion resistance. However, the high cost of  $\beta$ -stabilizing elements limits the application of metastable  $\beta$  titanium alloys. Consequently, research has been conducted on low-cost metastable  $\beta$  titanium alloys using relatively inexpensive  $\beta$ -stabilizing elements such as Mo and Fe. This study analyzes the wear resistance of Ti-5Mo-xFe (x=2,4 wt%) alloys, designed and manufactured as low-cost metastable  $\beta$  titanium alloys. The wear mechanisms of Ti-5Mo-xFe alloys were identified through ball-on disk testing and observation of the worn surfaces. Additionally, the influence of Fe addition on the microstructure and the resulting changes in wear resistance were examined. The wear resistance of the Ti-5Mo-xFe alloys were evaluated in comparison to the Ti-6Al-4V ELI alloy.

(Received September 10, 2024; Revised September 19, 2024; September 24, 2024)

**Keywords:** Low-cost metastable  $\beta$  Titanium, Ti-5Mo-xFe, Wear resistance, Wear debris

## 1. 서 론

Ti-6Al-4V ELI 합금은 높은 강도 및 연성, 우수한 내식성을 나타냄에 따라 체내 임플란트의 대표적인 소재로 여겨지고 있다 [1-4]. 그러나 Ti-6Al-4V ELI 합금 소재의 임플란트와 뼈 조직 간 탄성계수 차이로 인한 응력 차폐 현상이 발생함에 따라 골다공증 발병 사례가 발견되었고 [5-7], 해당 합금의 구성 원소인 Al과 V의 경우 장기간 체내에 이온 형태로 방출될 경우 알츠하이머병 및 골연화증을 유발하는 것으로 보고된 바 있다 [8-11]. 따라서 인체에 악영향을 유발하지 않는 Ta, Nb 등의  $\beta$  안정화 원소를 첨가하여 저탄성계수를 비롯한 우수한 물성의  $\beta$  타이타늄 합금이 개발되었다 [12,13]. 그러나 고가의 합금 원소를 다량 첨가함에 따라 가격이 높다는 단점이 존재하며, 이러

한 문제를 해결하기 위해 Mo, Fe 등의 상대적으로 저렴한  $\beta$  안정화 원소를 활용하여 저비용 준안정  $\beta$  타이타늄 합금 설계에 관한 연구가 이루어지고 있다 [14-17].

저비용 준안정  $\beta$  타이타늄 합금은 기존 Ti-6Al-4V ELI 합금에 비해 상대적으로 우수한 가공성을 가지므로써 가격 경쟁력을 가질 수 있다 [18-20]. 또한, 기존 임플란트 외에 항공기 구조재 및 전자기기 (스마트폰, 스마트 워치) 등 이외의 다양한 상업적 분야에서 타이타늄의 적용이 활발하게 일어나고 있다. 해당 제품에 저비용 준안정  $\beta$  타이타늄 합금을 적용할 경우, 가볍고 알레르기 반응을 적게 일으키면서도 가격 경쟁력을 확보할 수 있는 장점이 있다. 그러나, 기존 타이타늄을 적용한 제품에서 타이타늄의 낮은 내마모성으로 인해 스크래치가 쉽게 발생하는 문제점이 존

<sup>†</sup>Corresponding author. E-mail [leechodg@scnu.ac.kr](mailto:leechodg@scnu.ac.kr)  
Copyright © The Korean Society for Heat Treatment

재한다 [21-23]. 따라서 이러한 문제점을 개선하고 해당 분야에 적용하기 위해서는 타이타늄 합금의 마모 특성을 면밀히 분석해야 할 필요가 있다.

소재의 슬라이딩 마모에 관한 일반적인 마모 예측 모델인 Archard 방정식에 따르면, 마모량과 소재의 경도는 반비례한다 [24,25]. 그러나 Ti-6Al-4V 합금에서 경도의 향상은 파괴 메커니즘을 취성 파괴로 변화시켜 내마모 특성의 변화가 거의 없거나 오히려 감소한다는 연구 결과가 보고된 바 있다 [26]. 이처럼 타이타늄 합금은 경도 등 일반적으로 내마모 특성에 영향을 미치는 요소에 대한 분석뿐만 아니라, 합금의 마모 메커니즘에 대한 고찰과 이를 기반으로 하는 내마모 특성 예측이 필요하다.

본 연구에서는  $\beta$  안정화 원소인 Mo, Fe를 활용하여 Ti-5Mo-xFe ( $x=2,4$  wt%) 합금을 설계 및 제조하였다. Ti-5Mo-xFe 합금의 내마모 특성을 비교 분석하고자 Ti-6Al-4V ELI 합금을 대조군으로 설정하여 ball-on disk tribometer를 통해 마찰계수를 측정하였고, 마모 시험 후 합금의 무게 변화를 바탕으로 마모율을 계산하여 Archard 방정식과 상호비교하였다. 또한, Fe의 첨가로 인한 미세조직학적 변화와 및 이에 따른 내마모성의 변동에 대해 고찰함으로써 Ti-5Mo-xFe 합금의 마모 메커니즘을 분석하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서는 비소모성 진공 아크 재용해 (VAR, Vacuum arc remelting)를 통해 Ti-5Mo-xFe 잉고트를 제조하였고, 이를 850°C에서 1시간 용체화 처리 후 상온으로 냉각시켜 냉간 스웨이징을 통해  $\phi 11$ 의 봉상 형태로 가공하였다. Ti-6Al-4V ELI 합금은  $\phi 16$ 의 봉상 Ti-6Al-4V ELI 합금을 사용하였다. 두 합금을 4 mm 두께로 정밀 절단하고 탄소 레진을 통해 마운팅하여 마모 시험용 시편을 제작하였다. 또한 해당 시편의 표면 조도를 균일하게 하고자 1  $\mu\text{m}$  까지 연마를 수행하였다.

이후 Ball-on disk tribometer (MPW110, NEOPLUS, Korea)를 이용하여 합금의 마찰계수를 측정하였다. 마모 시험에 이용된 ball은 직경 3 mm의  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ball을 이용하였으며, 인가된 하중은 20 N, 회전속도 50 RPM, 총 마모거리 100 m로 설정하여 건

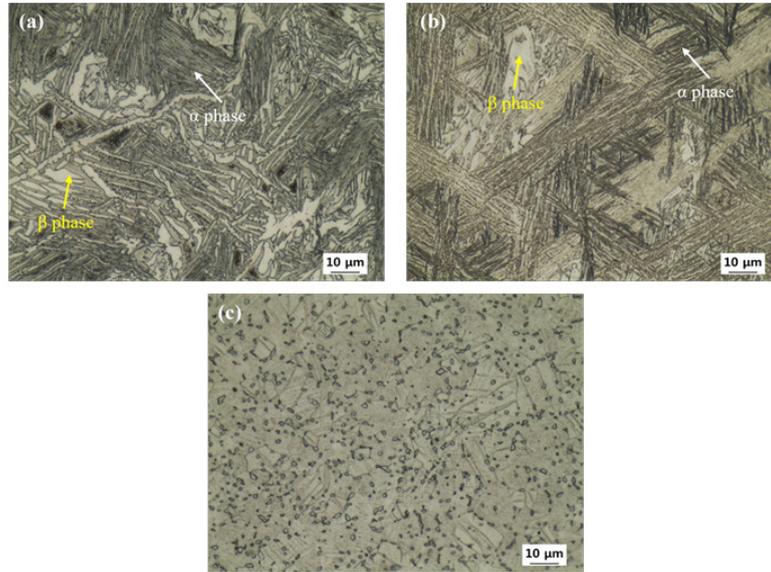
식 슬라이딩 마모로 수행되었다. 마모시험 분위기는 온도 22°C, 습도 40% 이며, 마모시험이 종료된 후 합금의 무게 변화를 측정하여 무게손실률을 통해 마모율 (wear rate)을 각각 계산하여 비교하였다.

마모 전 합금의 미세조직 및 마모 후 단면 분석을 위해 광학현미경 (OM, Optical microscope, BX53M, OLYMPUS, Japan)을 통해 합금을 관찰하였다. 합금의 내마모 특성과 경도 간 관계를 분석하고자 비커스 경도 시험기 (HM-200, Mitutoyo, Japan)를 이용한 경도 측정이 수행되었다. 이후 각 합금의 상분율이 해당 합금에 내마모 특성에 미치는 영향을 고찰하고자 XRD (X-Ray diffraction) 분석을 수행하였다. 또한, 합금의 마모 메커니즘을 분석하기 위해서 주사 전자 현미경 (SEM, scanning electron microscope, JSM-7100F, JEOL, Japan)과 입체 레이저 현미경 (3D microscope, VK-X1050, Keyence, Japan)을 이용하여 마모 트랙의 형상 관찰 및 폭, 깊이, 부피 등을 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

본 실험에 이용한 용체화 처리된 Ti-5Mo-xFe 합금과 Ti-6Al-4V ELI 합금의 미세조직을 광학현미경으로 관찰한 결과를 Fig. 1에 나타내었다. Ti-5Mo-xFe 합금에서 미세한  $\alpha + \beta$  lamellar Widmanstätten 조직이 주로 관찰되었으며, 이는 용체화 처리 이후 낮은 냉각속도로 인해 Widmanstätten 조직이 형성된 것이다 [20]. Ti-5Mo-xFe 합금의 결정립 크기를 측정해 비교한 결과 2.44  $\mu\text{m}$ 로 측정된 Ti-5Mo-2Fe 합금에 비해 1.94  $\mu\text{m}$ 로 Ti-5Mo-4Fe 합금에서 더 미세한 조직이 발견되었다. 이는 Fe가  $\alpha$  상에서 매우 낮은 고용도를 가져 성장을 방해하여 더 미세한 조직이 생성하기 때문이다 [27]. 또한,  $\beta$  변태 온도가 감소함에 따라  $\alpha$  상이 비교적 늦게 생성되어 결정립 성장이 일어나는 시간이 감소한다. 반면, Ti-6Al-4V ELI 합금의 경우 주로 등축정 조직이 발견되었다. 일반적으로 등축정 조직이 lamellar 조직에 비해 경도가 낮은 것으로 보고되고 있으며 [28], 이에 Ti-5Mo-xFe 합금이 Ti-6Al-4V ELI 합금에 비해 경도가 높을 것으로 예측할 수 있다.

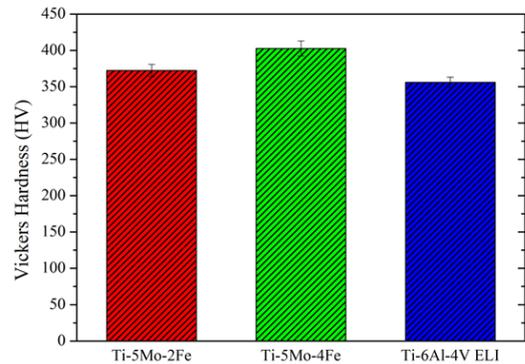
각 합금의 미세조직과 연관된 기계적 물성을 분석



**Fig. 1.** Optical microstructures of (a) Ti-5Mo-2Fe, (b) Ti-5Mo-4Fe and (c) Ti-6Al-4V ELI specimens.

하기 위해 경도를 측정하여 Fig. 2에 나타내었다. Ti-5Mo-2Fe 합금에서 375.5 HV, Ti-5Mo-4Fe 합금에서 402.6 HV로 측정되었다. 이는 Fe 첨가량에 비례한 결정립 미세화 효과와 더불어, Ti 원자와 Fe 원자 간 크기 차이로 발생하는 고용 강화 효과가 증가하여 Ti-5Mo-4Fe 합금에서 높은 경도를 나타내었다. 또한 Ti-6Al-4V ELI 합금은 356.2 HV로 Ti-5Mo-xFe 합금에 비해 상대적으로 낮은 경도를 나타내었고 앞서 언급한 미세조직 분석 결과와 일치한다.

Ti-5Mo-xFe 합금 및 Ti-6Al-4V ELI 합금의 건식 슬라이딩 마모 시험에서 측정된 마찰계수를 Fig. 3에 나타내었다. 측정된 평균 마찰계수는 Ti-5Mo-2Fe 합금에서 0.353, Ti-5Mo-4Fe 합금에서 0.373인 반면 Ti-6Al-4V ELI 합금에서는 0.196으로 상대적으로 낮았다. 또한, Ti-5Mo-xFe 합금은 마찰계수가 비교적 유지되는 경향을 나타내지만, Ti-6Al-4V ELI 합금의 마찰계수는 마모 후기 단계에서 마찰계수가 상승하는 것이 발견되었다. 이러한 마찰계수의 거동에 대한 분석은 다음과 같다. 마찰학적 관점에서 마찰력의 크기는 소재 표면에 존재하는 미세 돌기에서 생성된 화학적 결합인 응착의 발생 정도에 비례한다. 응착 현상은 해당 소재의 결정구조에 큰 영향을 받으며, 일반적으로 hcp 구조가 bcc, fcc 구조에 비해 응착 현상에 덜



**Fig. 2.** Hardness properties of Ti-5Mo-xFe alloys and Ti-6Al-4V ELI alloy.

민감하다고 알려져 있다 [29,30]. 이는 hcp의 적은 슬립계와 그로 인한 소성 변형의 어려움에 의해 미세 돌기의 변형이 적어 접촉 면적을 최소화할 수 있으며, 마모 과정에서 발생하는 마찰열에 의한 소재의 영향이 가장 적기 때문이다. 따라서 본 시험에 이용된 합금의 미세구조와 응착의 연관성을 확인하고자 XRD를 활용하여 상 분석을 진행하였으며, 그 결과를 Fig. 4과 Table 1에 도시하였다. 세 합금 모두  $\alpha$  및  $\beta$  상만이 검출되었으며, 이들의  $\beta$  상분율을 계산한 결과 Ti-5Mo-2Fe, Ti-5Mo-4Fe 합금에서는 각각 27.3%,

31.1%인 반면 [20], Ti-6Al-4V ELI 합금에서는 약 6.9%로 상대적으로 낮게 측정되었다. 다량의  $\beta$  상을 보유하는 Ti-5Mo-xFe 합금에서 응착이 과다하게 발생하였고, Ti-6Al-4V ELI 합금에 비해 높은 마찰계수가 측정되었다.

각 합금의 마모 속도를 비교하기 위해 식 (1)을 이용하여 마모율 (wear rate)을 계산하였다. 식 (1)에서  $m_{before} - m_{after}$ 은 합금의 무게손실량 (g),  $F_p$ 는 인가된 힘 (N),  $L$ 은 마모거리 (m),  $\rho_{disc}$ 는 합금의 밀도 ( $g/cm^3$ )이다. 해당 결과값을 Fig. 5과 Table 2에 각각 나타내었다. Ti-5Mo-2Fe 합금의 경우  $13.52 \times 10^{-4} m^2/N$ , Ti-5Mo-4Fe 합금에서  $14.39 \times 10^{-4} m^2/N$ 이었으나, Ti-6Al-4V ELI 합금에서는  $7.245 \times 10^{-4} m^2/N$ 으로 가장 낮은 마모율을 보였다. Ti-5Mo-xFe 합금에서 높은 마모율을 나타내는 이유는 응착으로 결합한 미세 돌기에 전단응력이 가해질 때 발생하는 마모 메커니즘인 응착 마모 (adhesive wear)에 의한 파괴가 일어나기 때문이다. 이러한 응착 마모는 심각한 소성 변형을 동반하며, 부피가 큰 debris를 다량 형성함에 따라 높은 마모율을 나타낸다 [31]. 따라서 높은  $\beta$  상분율을 가진 Ti-5Mo-xFe 합금은 비교적 심한 응착 마모가 발생하여 높은 마찰계수 및 마모율을 나타내는 것이다.

$$W_{s(disc)} = \frac{m_{before} - m_{after}}{F_p \times L \times \rho_{disc}} \quad (1)$$

마모 시험 후 각 합금의 마모 트랙을 SEM으로 관찰하여 Fig. 6에 나타내었다. Ti-5Mo-xFe 합금에서 응착 마모에 의한 severe adhesive wear들이 주로 관찰되었고, 대표적인 연삭 마모 (abrasive wear) 기구로 알려진 plowing line의 발생이 동시에 확인되었다. 마모 초기에는 경질의  $Al_2O_3$  ball 미세 돌기에 의한 절삭으로 연삭 마모가 주로 발생하고, 후기에서 축적된

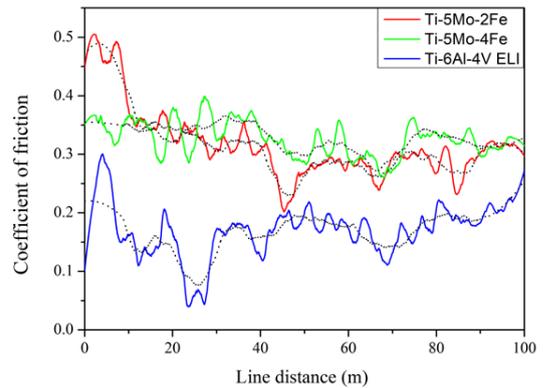


Fig. 3. Friction coefficient profiles of Ti-5Mo-xFe alloys and Ti-6Al-4V ELI alloy.

Table 1. Phase volume fraction by XRD analysis of Ti-5Mo-xFe alloys and Ti-6Al-4V ELI alloy.

	Ti-5Mo-2Fe	Ti-5Mo-4Fe	Ti-6Al-4V ELI
$\alpha$ phase (%)	72.7	68.9	93.1
$\beta$ phase (%)	27.3	31.1	6.9

Table 2. Wear rate of Ti-5Mo-xFe alloys and Ti-6Al-4V ELI alloy.

	Ti-5Mo-2Fe	Ti-5Mo-4Fe	Ti-6Al-4V ELI
Wear rate ( $m^2/N$ )	$13.52 \times 10^{-4}$	$14.39 \times 10^{-4}$	$7.245 \times 10^{-4}$

Table 3. Profiles of wear track on Ti-5Mo-xFe alloys and Ti-6Al-4V ELI alloy.

	Ti-5Mo-2Fe	Ti-5Mo-4Fe	Ti-6Al-4V ELI
Wear width ( $\mu m$ )	2081.2	2215.3	1732.9
Wear depth ( $\mu m$ )	147.8	184.6	123.4
Wear volume ( $mm^3$ )	0.4255	0.4853	0.3052

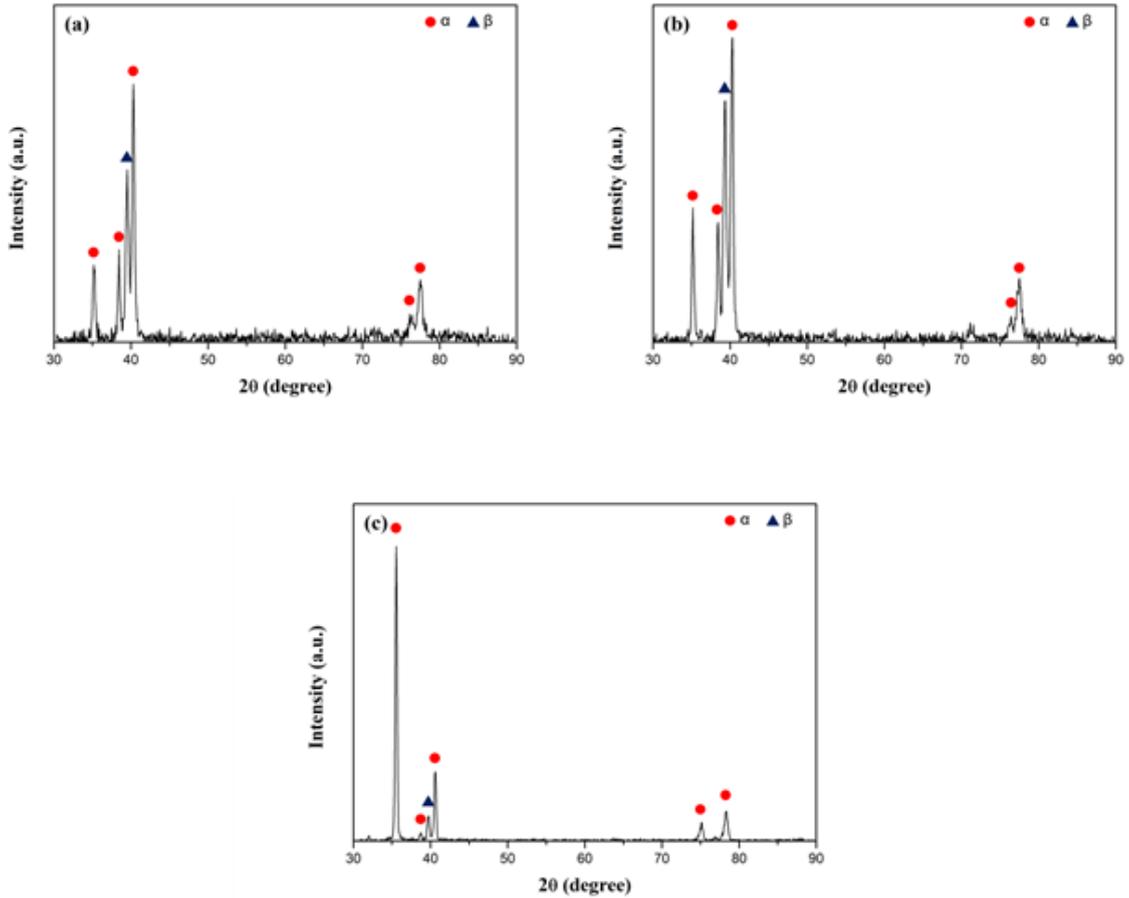


Fig. 4. XRD analysis results; (a) Ti-5Mo-2Fe (b) Ti-5Mo-4Fe and (c) Ti-6Al-4V ELI.

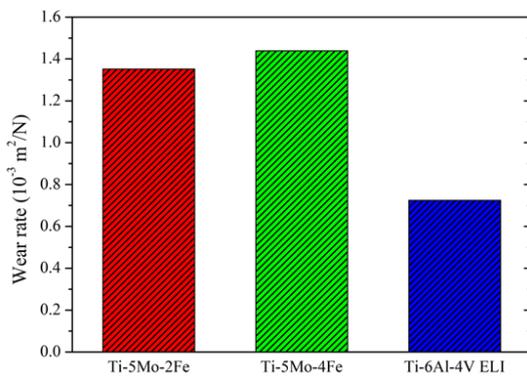
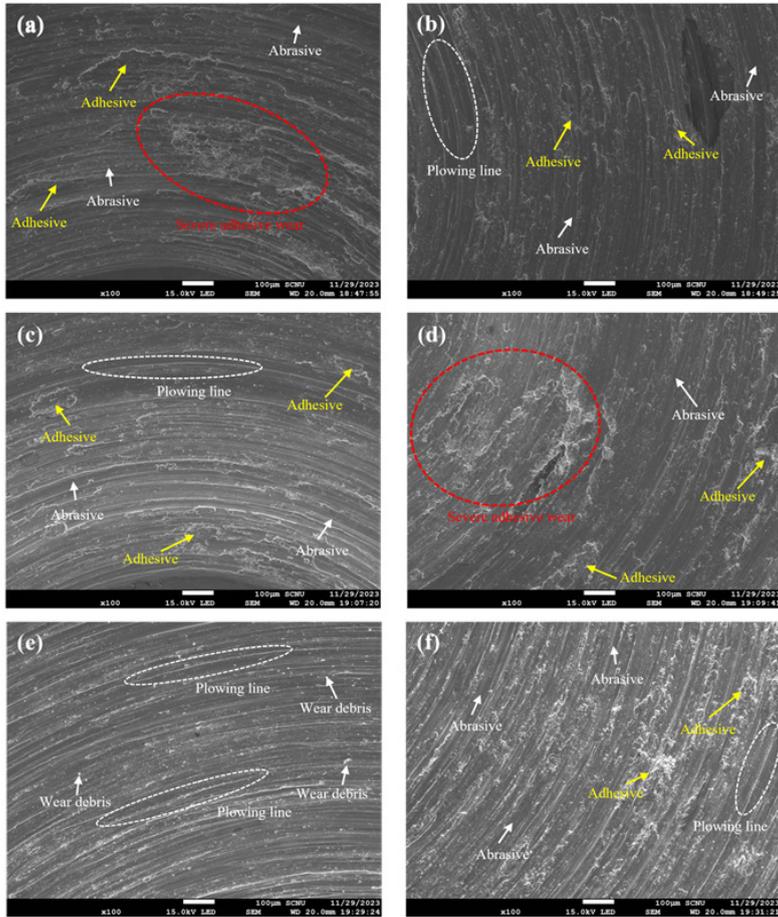
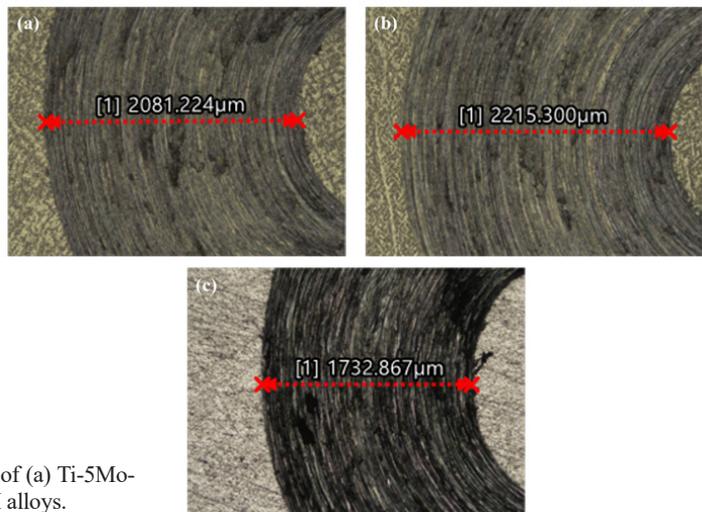


Fig. 5. Wear rates of Ti-5Mo-xFe alloys and Ti-6Al-4V ELI alloy.

debris의 개입에 의한 연삭 마모가 발생하였다. 또한, 높은  $\beta$  상분율로 인해 마모 초기에 응착 마모가 발생하여 유지됨에 따라 마찰계수의 변동이 적었다. 반면, Ti-6Al-4V ELI 합금의 대부분은 응착 마모에 의한 거친 표면이 균일하게 분포하는 것을 발견하였으나, 일부는 plowing line, wear debris 등 연삭 마모 흔적만이 발견되었다 (Fig 6e). 이는 Fig. 3 및 Table. 1에서의 마찰계수 거동과 연계하여 분석하였을 때, 낮은  $\beta$  상분율로 인해 응착이 최소화되어 마모 초기 연삭 마모가 주로 발생하였기 때문이다. 그러나 마모가 진행되며 축적된 debris는 일종의 연마제로 작용하여 마모율을 증가시키며 이로 인해 접촉 면적이 증가한다. 동시에 마찰열에 의한 고온 상태에서의 접촉은 소재를 연



**Fig. 6.** SEM images showing the wear track and wear types of (a)(b) Ti-5Mo-2Fe, (c)(d) Ti-5Mo-4Fe, and (e)(f) Ti-6Al-4V ELI alloys.



**Fig. 7.** Wear shapes and wear track widths of (a) Ti-5Mo-2Fe, (b) Ti-5Mo-4Fe, and (c) Ti-6Al-4V ELI alloys.

화시킴에 따라 응착을 비교적 쉽게 발생시킨다. 따라서 Ti-6Al-4V ELI 합금의 응착 마모는 주로 마모 후기에 발생하며 연삭 마모와 응착 마모의 복합 마모로 변화하였고, 이로 인해 마찰계수가 증가하였다.

마모 트랙의 표면 상태를 분석하기 위해 입체 레이저 현미경을 이용하여 분석한 결과를 Fig. 7과 Table 3에 나타내었다. Ti-5Mo-xFe 합금은 높은 마모율로 인해 마모 트랙의 폭, 깊이와 마모 부피가 Ti-6Al-4V ELI 합금에 비해 큰 것을 확인할 수 있다. 또한 Ti-6Al-4V ELI 합금의 마모 트랙 경계가 뚜렷하게 나타난 것에 비해, Ti-5Mo-xFe 합금은 마모 트랙의 좌측면 경계가 비교적 희미한 것이 관찰되었다. 이는 Ti-5Mo-xFe 합금의 상대적으로 높은 경도에 의해 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ball의 마모가 빠르게 진행되어 접촉 면적이 증가하였기 때문이다. 따라서 넓은 영역에서 응착 마모에 의한 다량의 마모 손실이 발생하여 높은 마모율을 보인다. 반면 Ti-6Al-4V ELI 합금의 경우 낮은 경도로 인해 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ball의 마모가 적게 발생하고, 비교적 장기간에 걸쳐 작은 접촉 면적을 유지할 수 있다. 또한 응착 마모의 개시를 지연시킴으로써 다량의 마모 손실을 방지함에 따라 마모율이 낮다. 따라서 Ti-5Mo-xFe 합금의 내마모 특성은 다량의 마모를 유발하는 요소에 의해 Ti-6Al-4V ELI 합금에 비해 상대적으로 낮았다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 고강도 준안정 β 타이타늄 합금으로 설계 및 제조된 Ti-5Mo-xFe 합금의 내마모 특성을 평가하기 위해 마모 메커니즘을 분석하고 이를 Ti-6Al-4V ELI 합금의 마모 메커니즘과 비교하여 고찰하였다. 본 실험을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

Ti-5Mo-xFe 합금에 첨가된 Fe의 함량에 비례하는 결정립 미세화 효과와 고용 강화 효과로 인해 Ti-6Al-4V ELI 합금에 비해 높은 경도를 나타내었다. 그러나 응착이 비교적 쉽게 발생하는 β 상의 영향으로 Ti-5Mo-xFe 합금에서 더 높은 마찰계수가 측정되었다.

Ti-5Mo-xFe 합금에서 높은 β 상분율로 인해 발생하는 응착 마모가 마모 초기에 개시되어 높은 마모율을 나타내었다. 반면 Ti-6Al-4V ELI 합금은 α 상 비율이 높아 마모 초기에 연삭에 의한 마모가 주로 발생하였고, 이후 마찰열 및 축적된 debris에 의해 마모율이 증

가함에 따라 응착 마모가 비교적 늦게 개시되어 낮은 마모율을 나타내었다.

Ti-5Mo-xFe 합금의 비교적 높은 경도는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ball에서 더 큰 마모를 유발함에 따라 접촉 면적을 증가시켜 마모를 가속하여 큰 마모 손실을 나타내었다. 반면 Ti-6Al-4V ELI 합금은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ball의 마모가 적어 접촉 면적을 최소화됨에 따라 비교적 마모 손실이 적었다.

#### 감사의 글

이 논문은 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업 (No. 2021RIS-002)과 기초연구사업(RS-2023-00244296)의 연구지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### REFERENCES

1. R. P. Verma: *Mater. Today: Proc.* **26**, (2020) 3148-3151.
2. M. Kaur and K. Singh: *Mater. Sci. Eng. C*, **102**, (2019) 844-862.
3. E.B. Taddei, V. A. R. Henriques, C. R. M. Silva and C. A. A. Cario: *Mater. Sci. Eng. C*, **24**, (2004) 683-687.
4. S. Prasad, M. Ehrensberger, M. P. Gibson, H. G. Kim and E. A. Monaco Jr.: *J. Oral Biosci.* **57**, (2015) 192-199.
5. P. Laheurte, and F. Prima, A. Eberhardt, T. Gloriant, M. Wary and E. Patoo: *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* **3**, (2010) 565-573.
6. S. X. Liang, X. J. Feng, L. X. Yin, X. Y. Liu, M. Z. Ma and R. P. Liu: *Mater. Sci. Eng. C*, **61**, (2016) 338-343.
7. E. Alabort Y. T. Tang, D. Marba and R. C. Reed: *Acta Mater.* **229**, (2022) 117749.
8. J. Martins, R. A. Nogueira and R. O. de Araujo: *Mater. Res.* **14**, (2011) 107-112.
9. V. S. A. Challa, S. Mali and R. D. K. Misra: *J. Biome. Mater. Res. A*, **101**, (2013) 2083-2089.
10. K. Satoh, N. Ohtsu, S. Sato and K. Wagatsuma: *Surf. Coat. Technol.* **232**, (2013) 298-302.
11. P. Pesode and S. Barve: *J. Eng. Appl. Sci.* **70**, (2023) 25.
12. S. S. Sidhu, H. Singh and M. A. H. Gepreel: *Mater. Sci. and Eng. A*, **121**, (2021) 111661.
13. S. Guo and Q. Meng, X. Zhao, Q. Wei and H. Xu: *Sci. Rep.* **5**, (2015) 14688.
14. R. P. Kolli and A. Devaraj: *Metals*, **8**, (2018) 506.
15. G. Senopati, R. A. R. Rashid, I. Kartika and S. Palanisamy: *Metals*, **13**, (2023) 194.
16. Y. Abe-elrhman, M. A. -H. Gepreel, A. Abdel-Moniem, S. Kobayashi: *Mater. & Des.* **97**, (2016) 445-453.
17. C. C. Li, C. Xin, Q. Wang, J. Q. Ren, B. Zhao, J. P. Wu, X. L. Pan and X. F. Lu: *J. Alloys Compd.* **959**, (2023) 170497.
18. A. Devaraj, V. V. Joshi, A. Srivastava, S. Manandhar, V.

- Moxson, V. A. Duz and C. Lavender: *Nat. commun.* **7**, (2016) 1-8.
19. Z. Yang, W. Xu, W. Zhang, Y. Chen and D. Shan: *J. Mater. Sci. & Technol.* **136**, (2023) 121-139.
20. Y. J. Lee, J. G. Lee and D. G. Lee: *J. Korean Soc. Heat Treat.* **36**, (2023) 303-310.
21. H. Bai, L. Zhong, L. Kang, J. Liu, W. Zhuang, Z. Lv and Y. Xu: *J. Alloys Compd.* **882**, (2021) 160645.
22. H. Dong and T. Bell: *Wear*, **238.2**, (2000) 131-137.
23. G. D. Revankar, R. Shetty, S. S. Rao and V. N. Gaitonde: *J. Mater. Res. Technol.* **6**, (2017) 13-32 (2017).
24. Y. Hu M. Watson, M. Maiorino, L. Zhou, W. J. Wang, H. H. Ding, R. Lewis, E. Meli, A. Rindi, Q. Y. Liu and J. Guo: *Wear*, **477**, (2021) 203831.
25. O. A. Zambrano, J. A. Gomez, J. J. Coronado and S. A. Rodriguez: *Wear*, **418**, (2019) 201-207.
26. C. Feng and T. I. Khan: *J. Mater. Sci.* **43**, (2008) 788-792.
27. L. Meng, Y. Zhang, X. Zhao and D. Zhang: *Mater. Sci. Eng. A*, **825**, (2021) 141877.
28. M. Amirnejad, M. Rajabi and R. Jamaati: *Mater. Chem. Phys.* **256**, (2020) 123725.
29. J. H. Choi and S. J. Choi, J. K. Kim, Y. D. Kim, H. S. Kim, J. H. Mun, H. C. Baek, D. H. Lee and S. J. Kim: *Korean J. Mater. Res.* **8**, (1998) 1115-1120.
30. S. H. Kim, S. H. Bae, S. B. Park, H. Seonwoo and S. E. Shin: *Korean J. Met. Mater.*, **62**, (2024) 351-359.
31. K. W. Kim, M. S. Baek, K. J. Euh and K. A. Lee: *Korean J. Met. Mater.* **59**, (2021) 870-879.