

## 5083-O 알루미늄 합금의 양극산화피막 특성에 미치는 기계적 연마조건에의 영향

이상준<sup>1</sup> · 김대문<sup>1</sup> · 신동호<sup>2</sup> · 김성종<sup>3,†</sup>

<sup>1</sup>국립목포해양대학교 대학원 기관시스템공학과, 전라남도 목포시 해양대학교로 91

<sup>2</sup>국립목포해양대학교, 전라남도 목포시 해양대학교로 91

<sup>3</sup>국립목포해양대학교 기관시스템공학부, 전라남도 목포시 해양대학교로 91

(2025년 12월 16일 접수, 2026년 3월 13일 수정, 2026년 3월 25일 채택)

### Effects of Mechanical Polishing Condition on Characteristics of Anodized Oxide Film for 5083-O Aluminum Alloy

Sang-Jun Lee<sup>1</sup>, Dae-Mun Kim<sup>1</sup>, Dong-Ho Kim<sup>2</sup>, and Seong Jong Kim<sup>3,†</sup>

<sup>1</sup>Department of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, 91, Haeyangdaehak-ro, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Republic of Korea

<sup>2</sup>Mokpo National Maritime University, 91, Haeyangdaehak-ro, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Republic of Korea

<sup>3</sup>Division of Marine System Engineering, Mokpo National Maritime University, 91, Haeyangdaehak-ro, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Republic of Korea

(Received December 16, 2025; Revised March 13, 2026; Accepted March 25, 2026)

In this research, we investigated the effects of mechanical polishing conditions prior to anodizing in a sulfuric acid electrolyte on the characteristics of the anodized oxide film of a 5083-O aluminum alloy. Experimental results indicated that as the polishing process became finer, the height and Vickers hardness of the  $Al_2O_3$  oxide film increased, while surface roughness decreased. Electrochemical experiments showed that with finer polishing, the corrosion potential shifted in a noble direction, the corrosion current density decreased, and the anodic Tafel slope increased. In sliding friction and wear experiments, the coefficient of friction increased rapidly during the initial running-in period under all conditions. Specifically, the coarse polishing condition maintained a high coefficient of friction, while a relatively low coefficient was observed under fine polishing conditions as the frictional distance increased. Consequently, mechanical polishing prior to anodizing a 5083-O aluminum alloy significantly enhances corrosion and wear resistance by controlling the growth and microstructure of the oxide film.

**Keywords:** 5083-O aluminum alloy, Anodizing, Sulfuric acid, Corrosion resistance, Wear resistance

## 1. 서론

알루미늄 합금은 경량 구조재로서 우수한 비강도와 내식성을 바탕으로 다양한 해양 구조물 및 중소형 선박 분야에 폭넓게 사용되고 있다 [1]. 알루미늄 합금은 화학적 조성 차이에 따라 다양한 합금계열이 존재하며, 이에 따라 전기화학적 및 기계적 특성이 뚜렷하게 구분된다. 그 중 5000계열 알루미늄 합금은 마그네슘 (Mg)을 주요 합금원소로 하는 비열처리형 합금으로, 용

체화 및 인공시효 대신 가공경화를 통해 강도를 확보한다 [2]. 또한, 우수한 내식성과 뛰어난 용접성을 나타내며, 해양환경에서 균열 민감성이 상대적으로 낮아 소형 선박의 선체 및 해양플랜트 구조재로 널리 적용된다 [3]. 대표적인 합금인 5083 알루미늄 합금은 높은 강도, 우수한 용접성 및 해수 환경에서의 내식성을 동시에 요구되는 환경에서 적합한 소재로 알려져 있다 [4].

5083-O 알루미늄 합금은 어닐링 상태로 상대적으로 낮은 잔류응력과 우수한 연성을 가지며, 충분한 항복강도와 피로 특성을 유지한다는 점에서 해양 구조물에 매우 적합하다 [5]. 그러나 해수는 염소이온(Cl<sup>-</sup>)을 포함한 고전도성 전해질이며, 용존산소를 다량 함유하고 있어 알루미늄 합금에 가혹한 부식환경을 제공한다 [6].

<sup>†</sup>Corresponding author: [ksj@mmu.ac.kr](mailto:ksj@mmu.ac.kr)

이상준: 대학원생, 김대문: 대학원생, 신동호: 연구원, 김성종: 교수

알루미늄 합금 표면에 자연적으로 형성되는 알루미늄 산화피막( $Al_2O_3$ )은 일반적으로 수~수십 nm 두께에 불과하므로, 해양환경과 같이 가혹한 부식환경에서 장기적으로 충분한 부식방지 기능을 제공하기 어렵다. 특히, 5083-O 알루미늄 합금이 해수에 장기간 노출되면 입계 부근에 석출되는  $\beta-Al_3Mg_2$  상의 선택적 용해로 인해 입계부식, 틸부식 및 공식과 같은 국부부식이 촉진되며, 응력부식균열(Stress corrosion cracking, SCC)에 대한 민감성이 증가한다 [7]. 따라서 5083-O 알루미늄 합금을 해양환경에서 안정적으로 사용하기 위해서는 자연적으로 형성된 산화피막보다 두껍고 치밀하며, 기공 구조를 제어할 수 있는 인공적인 산화피막 형성이 필요하다.

양극산화(Anodizing)는 알루미늄 합금 표면에 인위적으로 두껍고 치밀한 산화피막을 형성하는 대표적인 표면처리 공정이다 [8]. 일반적으로 양극산화 공정 중 알루미늄 합금과 산화피막 계면에서는 전기장 유도 이온 이동(Field-assisted migration)에 의해 산화피막이 성장하며, 전해액과 산화피막 계면에서는 산화피막의 용해가 동시에 발생한다 [9,10]. 이 과정에서 기판과 인접한 치밀한 장벽층(Barrier layer)과 그 상부의 다공성층(Porous layer)이 결합된 특유의 다층 구조가 형성된다. 이렇게 형성된 알루미늄 산화피막은 모체보다 높은 경도와 내식성을 제공하나, 과도한 산화피막 성장에 따른 취성 증가, 기공 구조에 기인한 결합 발생 및 피로 강도 저하 등은 공정 조건 최적화로 제어해야 할 문제로 지적된다 [11].

특히, 양극산화 초기 단계에서의 기판 표면 상태, 즉 표면거칠기와 결합 분포는 전기장 분포와 기공 핵생성 거동, 산화피막 성장 균일성에 직접적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 [12]. 거친 표면은 국부 전기장 집중에 의해 불균일한 산화피막 성장과 결합 형성을 유도할 수 있으며, 이는 장기 내식성 및 마찰·마모 거동에도 영향을 미칠 수 있다. 그럼에도 불구하고 기존 연구들은 주로 전해액 조성, 전압, 전류밀도 및 온도와 같은 공정 변수에 초점을 맞춘 경우가 많다 [13-15]. 특히, 전해연마 후 양극산화층의 두께, 정도, 결합 크기,

조밀성 등에 대한 연구가 수행되었다 [16-19]. 그러나 전해연마는 대면적의 해양 구조물에 적용하기 매우 어렵고 공정 복잡성 및 고비용의 문제가 존재한다. 반면, 기계적 연마는 적용 난이도와 공정 복잡성이 상대적으로 낮고 비용이 저렴하여 해양 구조물에 적용 가능하다. 따라서, 양극산화 전 기계적 연마 조건에 따른 표면거칠기 변화가 산화피막의 성장 특성과 전기화학적 및 기계적 특성에 미치는 영향성에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 양극산화된 5083-O 알루미늄 합금의 산화피막 특성에 미치는 기계적 연마조건의 영향에 대해 연구하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시험편 준비 및 양극산화 공정

본 연구에 사용된 시험편은 5083-O 알루미늄 합금이며, 화학적 조성은 Table 1에 나타났다. 시험편은 20 mm × 20 mm의 크기로 가공하였으며, 각각 400, 600, 800, 1200 grit의 SiC 연마지를 이용하여 표면연마하였다. 본 연구에 사용된 연마지는 거친연마(연마흔적이 뚜렷하게 관찰)부터 미세연마(연마흔적이 거의 관찰되지 않음)까지의 표면상태를 체계적으로 나타내기 위해 선정되었다. 이후 아세톤과 증류수로 각각 5분 동안 초음파 세척하였으며, 24시간동안 진공건조하였다. 양극산화 공정은 98 wt%의  $H_2SO_4$ 를 증류수로 희석하여 제작된 10 vol.%의  $H_2SO_4$  전해질(약 1.84 M)을 사용하였으며, 온도는 10 °C를 유지하였다. 이후 3전극 셀을 구성하여 양극산화를 실시하였다. 작동전극은 5083-O 알루미늄 합금이며, 전용홀더를 이용하여 1 cm<sup>2</sup>의 면적만 노출시켰다. 또한, 대응전극과 기준전극은 각각 20 mm × 20 mm 크기의 백금판과 은/염화은 전극(sat. 3.3 M KCl solution)을 사용하였다. 그리고 전위차계(Reference 3000, Gamry Instruments)를 이용하여 정전류를 인가하였으며, 전류밀도와 인가시간은 각각 20 mA/cm<sup>2</sup> 및 3600초로 설정하였다. 양극산화 공정에 대한 자세한 사항은 Table 2에 나타났다.

Table 1. Chemical composition of 5083-O aluminum alloy (wt%)

Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti	Mg	Al
0.40	0.15	0.18	0.18	0.12	0.04	0.01	6.42	Bal.

Table 2. Process parameter for anodizing

Electrolyte	Temperature	Applied current density	Distance between electrode	Time
10 vol.% $H_2SO_4$	10 °C	20 mA/cm <sup>2</sup>	3 cm	3600 sec

**Table 3. Chemical composition and properties of seawater solution**

Chemical composition (mg/L)						pH	Dissolved oxygen (mg/L)	Electric conductivity (mS/cm)
Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>			
15,721	8,401	1,746	1,121	357	344	7.9	16.1	45.3

## 2.2 마이크로 인덴테이션 실험

양극산화 전/후 5083-O 알루미늄 합금의 표면연마에 따른 비커스경도 분석을 위해 마이크로 인덴테이션 실험을 수행하였다. 먼저, 비커스경도 측정을 위해 반각 68°의 다이아몬드 비커스 인덴터가 장착된 마이크로 인덴테이션 시험기(MCT<sup>3</sup>, Anton Paar, Austria)를 사용하였다. 실험 조건으로 최대하중, 침투속도 및 최대하중에서의 유지시간을 각각 300 mN 및 300 mN/min, 5초로 하였다. 이후 획득한 하중-변위 곡선 데이터에 대해 Oliver & Pharr 방법에 기반하여 압입 경도를 산출하였으며, 시험 장비에서 제공하는 자동 환산된 비커스 경도를 사용하였다 [20].

## 2.3 전기화학적 실험

전기화학적 실험은 3전극 셀 구성 후 전위차계를 이용하여 수행하였다. 작동전극은 전용홀더에 시험편을 삽입하여 1 cm<sup>2</sup>의 면적만 노출시켰다. 대응전극과 기준전극은 각각 20 mm × 20 mm 크기의 백금망과 은/염화은 전극(sat. 3.3 M KCl solution)을 사용하였다. 양극산화된 시험편의 전기화학적 특성을 연구하기 위해 전위 측정 및 동전위분극실험을 수행하였다. 전기화학적 실험에 사용된 수용액은 25 °C의 천연해수이며, 화학적 조성은 Table 3에 나타났다. 전위측정은 30분 동안 수행하였다. 동전위분극실험은 30분 안정화 후 주사범위 -0.25 V에서 1.2 V (vs. OCP)까지 1.0 mV/s의 주사속도로 수행하였다. 이후 획득한 동전위분극곡선을 이용하여 개로전위 기준 ±0.25 V 범위에서 타펠외삽법으로 부식전위( $E_{corr}$ ), 부식전류밀도( $i_{corr}$ ), 양극 및 음극 타펠기울기를 산출하였다.

## 2.4 미끄럼 마찰·마모 실험

미끄럼 마찰·마모 실험은 트라이보미터(TRB<sup>3</sup>, Anton Paar, Graz, Austria)를 이용하였으며, 볼 온 디스크 실험법을 채택하여 실시하였다. 마찰·마모 실험에서 사용된 대응볼은 직경 6 mm 및 비커스경도 1650 Hv의 알루미늄나볼을 사용하였다. 또한, 디스크의 회전반경, 회전속도 및 인가하중은 각각 3 mm, 3 cm/s 및 5 N으로 설정하였다. 이후 equation (1)에 의해 마찰계수를 산출하였다.

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (1)$$

$\mu$  = Friction coefficient

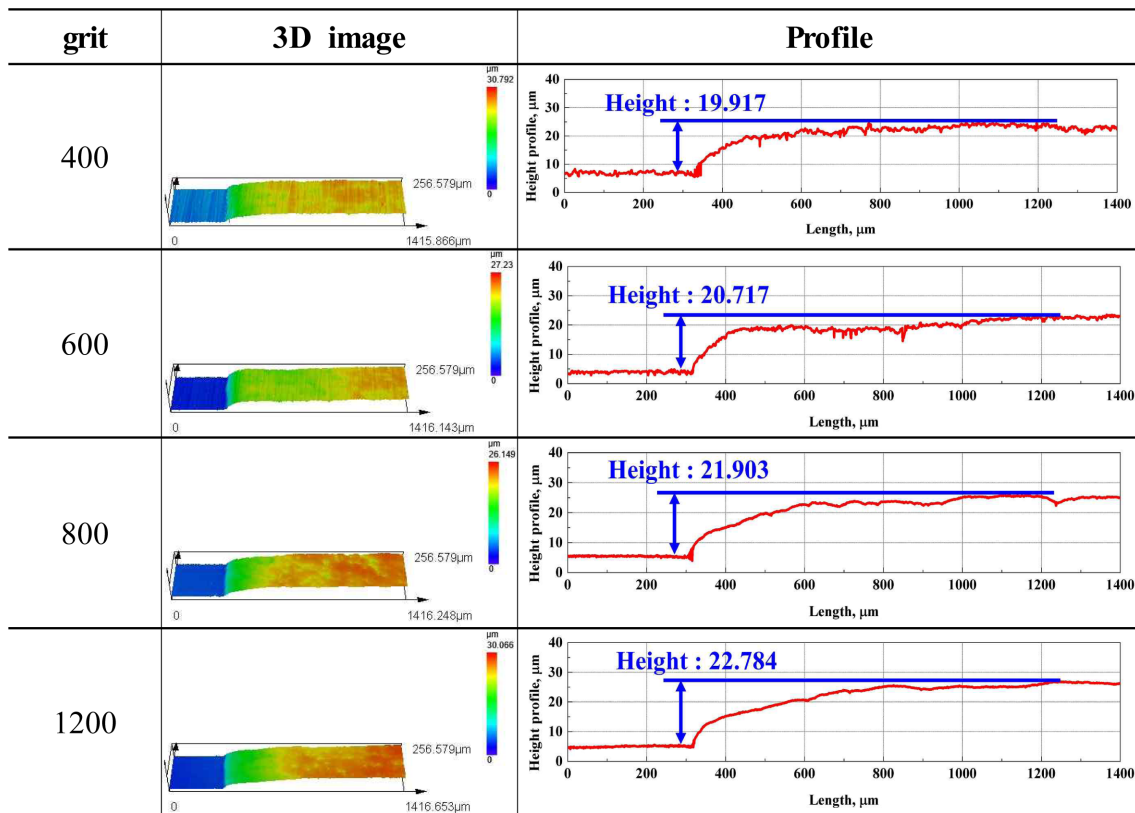
F = Frictional force

N = Normal force (Applied load)

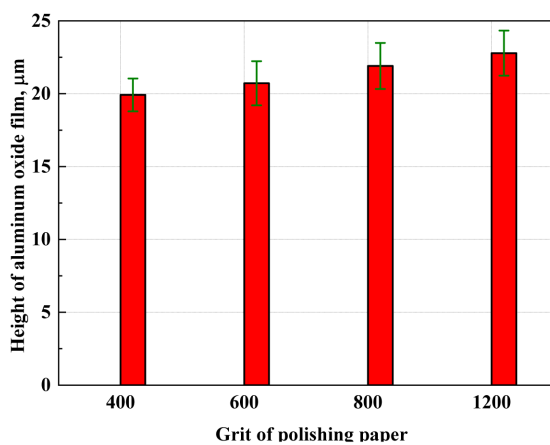
본 연구에서 사용된 트라이보미터는 좌우 대칭 구조의 측정 암(Symmetric measuring arm)과 2개의 마찰센서(Friction sensor)로 이루어져 있다. 마찰마모에 의한 Symmetric measuring arm이 휘어지는 정도를 Friction sensor가 측정한다. 이때 측정되는 값은 마찰력이며, 이를 실험조건으로 설정한 인가하중으로 나누면 마찰계수가 산출된다. 이러한 원리를 통해 실시간으로 마찰력을 측정하여 마찰계수를 획득하였다. 양극산화 조건에 따른 마찰·마모 실험은 건식 조건에서 수행되었으며, 실험 온도와 거리는 각각 상온 및 50 m이다. 또한, 동일한 조건에서 3회 수행되었으며, 평균에 근사한 데이터를 사용하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

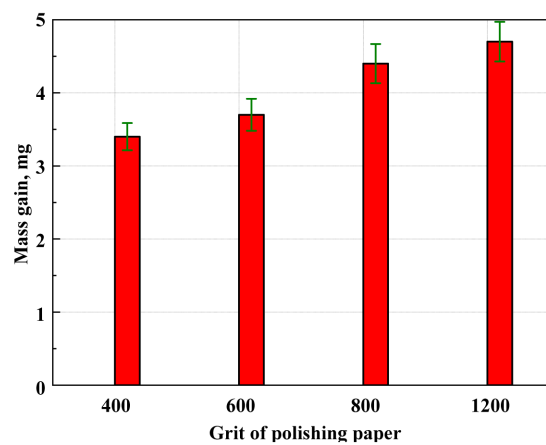
Fig. 1은 양극산화 공정 후 5083-O 알루미늄 합금 표면에 형성된 알루미늄 산화피막( $Al_2O_3$ )의 높이 및 무게 증가량 측정 결과이다. 본 연구에서 측정된 산화피막의 높이는 표면 프로파일 기반 파라미터로서, 알루미늄 합금 표면 외부로 성장한 산화피막의 높이이며, 절대 두께(Thickness)와는 구분된다. 400 grit로 표면연마한 시험편은 약 19.917  $\mu$ m 높이의  $Al_2O_3$  산화피막이 형성되었으며, 연마 단계가 미세해질수록 산화피막의 높이는 증가하였다. 또한, 무게 증가량도 유사한 경향을 나타냈다. 일반적으로 알루미늄 합금의 양극산화 시 다양한 공정 변수에 따라 산화피막의 성장과 용해가 경쟁적으로 발생하며, 피막의 두께, 밀도 및 기계적 특성이 크게 달라진다 [21]. 특히, 알루미늄 합금의 양극산화 시 초기 표면형상은 전기장 분포와 산화피막 성장 거동에 직접적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 [22]. 즉, 거친 알루미늄 합금의 경우, 산과 골이 뚜렷하고 합금 내 2차상의 불균일한 분포로 인해 금속과 산화피막 계면에서 국부 전기장이 과도하게 집중되어 특정 영역에서 산화와 용해는 가속화된다. 이는 산화피막의 성장 속도를



(a) 3D analysis



(b) Height of aluminum oxide film



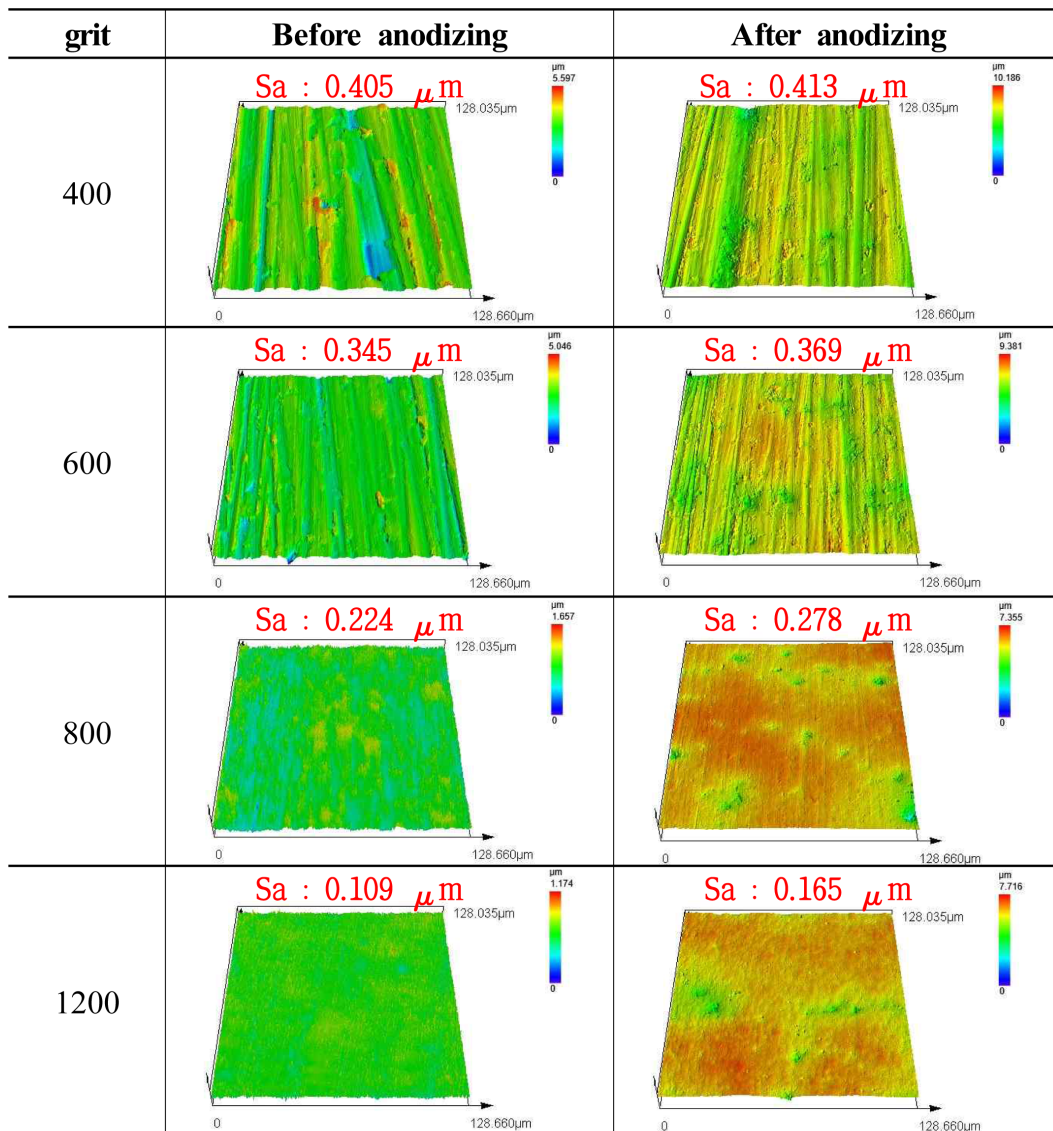
(c) Mass gain

Fig. 1. 3D analysis and mass gain measurement of anodized 5083-O aluminum alloy with mechanical polishing condition

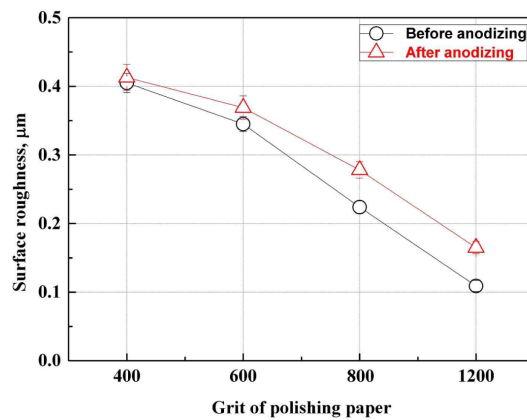
증가시키나, 용해와 결합 형성 또한 증가시켜 산화피막의 두께와 내부 응력이 크게 불균일해질 수 있다[23]. 반면, 미세 연마를 통해 산과 골의 높이 차가 거의 없는 경우, 알루미늄 합금 표면에서 형성되는 초기 장벽형  $Al_2O_3$ 의 형성 두께와 조성이 보다 균일해져 전기장 분포의 편차는 감소한다. 이는 산화피막의 성장 속도가 균일하고, 과도한 국부 용해가 억제되어 주어진 전하량

당 실질적인 산화피막 성장 효율이 증가하게 된다 [24]. L. Lorenzetti *et al.*에 따르면, 사전 연마를 통해 기관 표면을 평탄화한 경우 더 두껍고 조밀한 알루미늄 산화피막이 형성된다고 보고하였다 [25]. 따라서 알루미늄 합금의 기계적 연마는 양극산화 시 형성되는 산화피막의 두께에 큰 영향을 미치는 것으로 사료된다.

Fig. 2는 3D 공초점 레이저 현미경을 이용하여 5083-



(a) 3D analysis



(b) Surface roughness

Fig. 2. 3D analysis and surface roughness of anodized 5083-O aluminum alloy with mechanical polishing condition

O 알루미늄 합금의 양극산화 전/후 표면거칠기 측정 결과이다. 양극산화 조건에 따른 3D 분석 및 표면거칠기 측정 면적은  $128 \mu\text{m} \times 128 \mu\text{m}$ 이며, 각각 5회 분석 후 평균에 근사한 데이터를 사용하였다. 또한, 사용된 표면거칠기 파라미터는 Sa이다. 400 및 600 grit의 연마지로 표면연마한 알루미늄 합금 시험편은 연마흔적(산과 골의 형상)이 뚜렷하게 관찰되었으며, 표면거칠기는 각각 0.405 및  $0.345 \mu\text{m}$ 로 측정되었다. 그러나 800 grit로 연마한 경우, 연마흔적이 매우 희미하게 관찰되었으며, 1200 grit에서는 관찰되지 않고 매우 매끄러운 표면(표면거칠기  $0.109 \mu\text{m}$ )을 나타냈다. 결과적으로, 본 연구에 사용된 알루미늄 합금의 초기 표면 거칠기는 약  $0.4 \mu\text{m}$ 에서  $0.1 \mu\text{m}$ 의 범위를 나타낸다. 연마에 의해 매끄러운 시험편의 표면거칠기 감소 경향은 양극산화된 시험편에서도 유사하게 나타났다. 400 및 600 grit로 표면연마 후 양극산화된 시험편 표면에서는 연마흔적이 관찰되었으나, 양극산화층이 형성되면서 기존에 존재하는 산과 골의 형상이 감소 및 평탄화되었다. L. F. Mendes *et al.*의 알루미늄 합금의 전기화학적 용해에 관한 연구에 따르면, 초기 용해 단계에서 알루미늄 합금 표면의 산 부위에 전류가 집중되고, 골에서는 전류밀도가 상대적으로 낮아진다 [26]. 이는 양극산화 시 산 부위의 용해속도가 더 크고, 골에서는 상대적으로 느리고 완만하게 진행되는 것을 의미한다. 또한, 양극산화된 시험편 표면에서는 기공과 같은 결함이 관찰되었다. 특히, 800 grit의 조건까지 기공 수가 증가하였으나, 1200 grit에서 그 수는 감소하였다. 400 grit로 표면연마 후 양극산화된 시험편의 표면거칠기는  $0.413 \mu\text{m}$ 로 양극산화 전과 거의 유사한 거칠기값을 나타냈다. 이후 연마단계가 미세해질수록 표면거칠기는 최대  $0.165 \mu\text{m}$ 까지 감소하였다. 연마단계가 미세해질수록 양극산화 전과 후의 표면거칠기 차이는 증가하였다. 일반적으로 황산계 전해질에서 알루미늄 합금 양극산화 시 초기에는 장벽층이 형성되며, 그 위에 다공성  $\text{Al}_2\text{O}_3$  산화피막이 성장한다. 특히, 다공성  $\text{Al}_2\text{O}_3$  산화피막의 성장이 진행될수록 기둥형(Porous columnar) 구조, 표면 기공(pore) 및 미세 돌기가 형성되면서 표면거칠기를 증가시킨다 [27]. 본 연구에서 이러한 경향은 거친 표면보다 매끄러운 표면을 가진 시험편에서 더욱 뚜렷하게 나타났으며, 연마단계가 미세해질수록 양극산화 전과 후의 표면거칠기 차이가 증가하는 것을 나타낸다.

Fig. 3은 마이크로 인텐테이션 실험 후 비커스경도 산출 결과이다. 재현성 확보를 위해 인텐테이션 실험은 16회 수행하였으며, 평균에 근사한 데이터를 사용하였다. 양극산화 전 5083-O 알루미늄 합금의 경우, 연마단계가 미세해질수록 비커스경도는 증가하였으나, 그 차이는 크

지 않았다. 그러나 표면거칠기가 클수록 비커스경도의 편차는 크게 나타났으며, 연마단계가 미세해질수록 편차는 감소하였다. 일반적으로 인텐테이션 실험은 매우 작은 크기의 압입자를 이용한다. 그래서 표면이 거칠거나 결함이 다량 존재할 경우 실험결과에 큰 편차를 나타낸다 [28]. 본 연구에서 사용된 시험편의 경우, 400에서 800 grit까지 연마흔적이 관찰되었으며, 이는 표면에 존재하는 산과 골의 형상에 기인한다. 이러한 산과 골의 형상으로 인해 압입자의 측정 영역이 불균일하게 되어 인텐테이션 실험에 의한 비커스경도 값의 편차가 크게 나타난 것으로 사료된다. 특히, 연마단계가 미세해질수록 편차가 작아지는 것은 산과 골의 높이차가 감소되어 평탄화된 것에 기인한다. 양극산화되지 않은 알루미늄 합금과 마찬가지로 양극산화된 시험편의 비커스경도는 유사한 경향을 나타냈다. 특히, 연마단계가 미세해질수록 비커스경도 증가는 뚜렷하게 나타났다. 이는 연마에 의해 매끄러운 시험편 표면의 산화피막이 두꺼워져 공극도가 감소하고 연속성이 향상되어 표면경도가 증가한 것으로 사료된다 [29,30]. 그러나 비커스경도의 편차는 현저히 크게 나타났다. 이는  $\text{Al}_2\text{O}_3$  산화피막의 다공성 구조 및 표면에 존재하는 결함에 기인한다. 특히, 5083-O 알루미늄 합금에 함유된 마그네슘(Mg)은 양극산화 초기 단계에서 Al보다 산화 및 용해성이 높아  $\text{Al}_2\text{O}_3$  산화피막의 연속적인 성장을 방해하고 보이드나 취약 스팟(weak spot)을 형성시킨다 [31]. 또한,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  산화피막 내에서 MgO 및  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ (스피넬 구조)와 같은 이차상이 형성되어 복합 산화층을 이룬다. 이는  $\text{Al}_2\text{O}_3$  산화피막의 조성과 구조를 변화시켜 미세조직을 불균일하게 한다 [32,33]. 이는  $\text{Al}_2\text{O}_3$  산화피막에 다양한 크기의 결함을 형성시키는 요인이며, 인텐테이션 실험 시 실험결과와의 편차가 크게 나타나는 원인으로 사료된다.

Fig. 4는 표면연마 변수에 따른 양극산화된 시험편의 천연해수에서의 전위측정 결과이다. 입도가 가장 큰 400 grit에서 표면연마 후 양극산화된 시험편의 전위는 초기 약  $-0.45 \text{ V}$ 에서 개시되었으며, 시간 경과에 따라 큰 변동폭을 보이며 약  $-0.50 \text{ V}$ 까지 감소하여 가장 낮은 전위를 나타냈다. 600 grit에서 표면연마된 시험편의 전위는 약  $-0.38 \text{ V}$ 에서 개시되었으며, 시간 경과에 따라 점차적으로 감소하여 최종전위는 약  $-0.41 \text{ V}$ 를 나타냈다. 400 grit와 비교하여 전위는 귀방향으로 이행하였으며, 변동폭은 감소하였다. 800 grit로 연마된 시험편의 경우, 전위는 약  $-0.35 \text{ V}$ 에서 개시되어 500초까지 증가하였다. 이후 시간 경과에 따라 완만하게 저하하는 경향을 나타내어 약  $-0.36 \text{ V}$ 까지 감소하였다. 이는 400 및 600 grit와 비교하여 높은 전위를 나타냈으며, 변동은 현저히 감소하였다. 그리고 1200 grit는 약  $-0.32 \text{ V}$ 에서 개

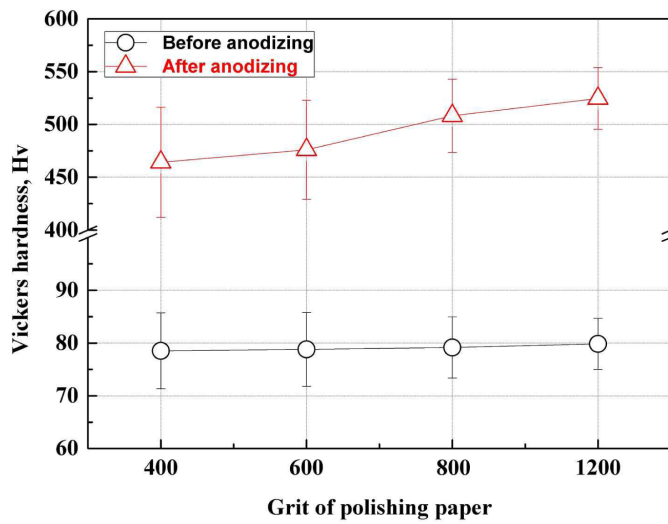
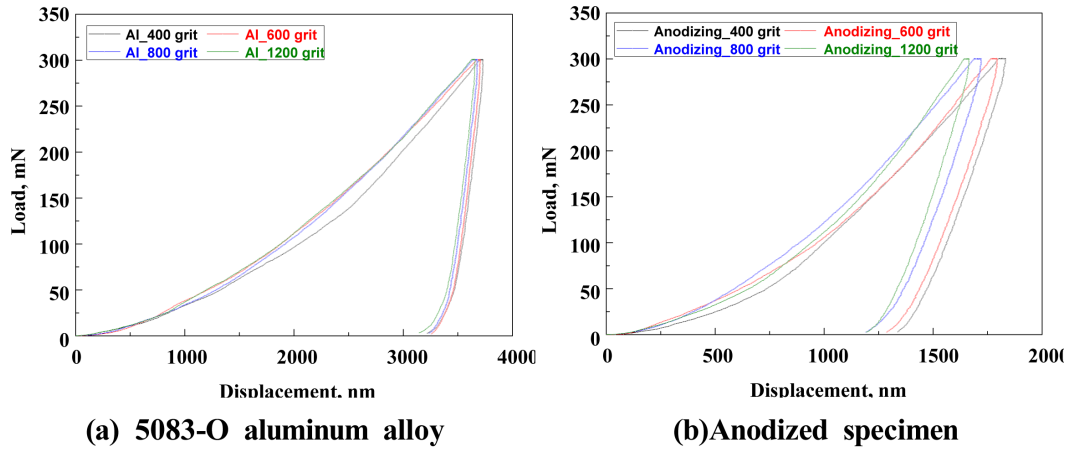


Fig. 3. Load-displacement curves and Vickers hardness after Micro-indentation experiments of anodized 5083-O aluminum alloy with mechanical polishing condition

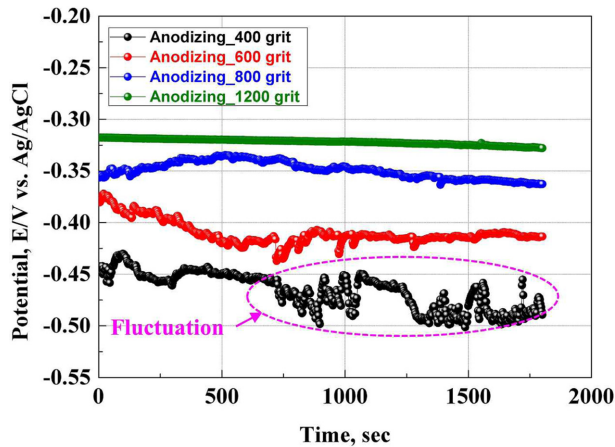


Fig. 4. Potential measurement of anodized 5083-O aluminum alloy in natural seawater solution with mechanical polishing condition

시되어 시간 경과에 따라 약  $-0.33$  V까지 감소하였으며, 전위 변동은 거의 관찰되지 않고 완만하게 저하한 경향을 나타냈다. 결과적으로 모든 조건에서 시간 경과에 따라 전위는 감소하였다. 이는  $Al_2O_3$  산화피막의 다공성 구조로 인해 시간 경과에 따라 부식성 이온이 산화피막을 관통하여 알루미늄 합금 표면에 도달하는 것에 기인한다. 또한, 연마단계가 미세해질수록 전위는 증가하였으며, 전위 변동폭은 현저히 작게 나타났다. 이는 알루미늄 합금 표면이 매끄러울수록  $Al_2O_3$  산화피막의 균일한 성장에 기인한다. 특히, 균일한 전기장 형성에 따라 더 조밀하고 두꺼운  $Al_2O_3$ 가 성장하기 때문에 부식성 이온의 침투 및 관통을 억제 또는 지연시키는 것으로 사료된다 [34-36].

Fig. 5는 표면연마 변수에 따른 양극산화된 시험편의

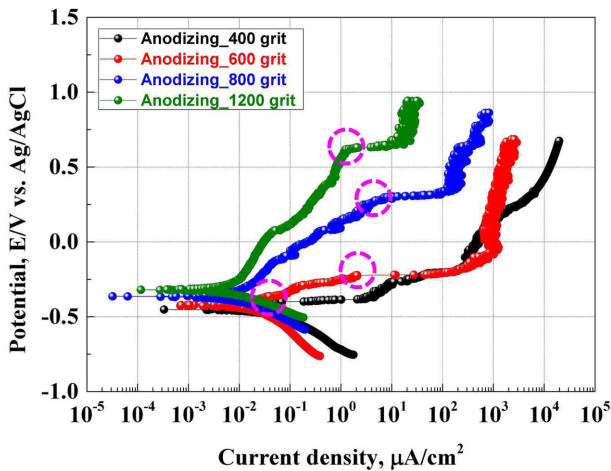
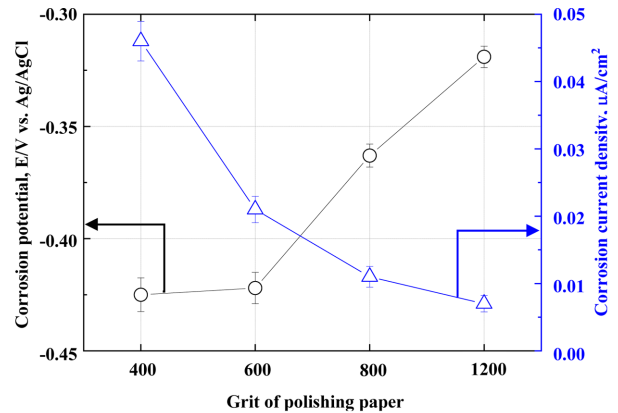


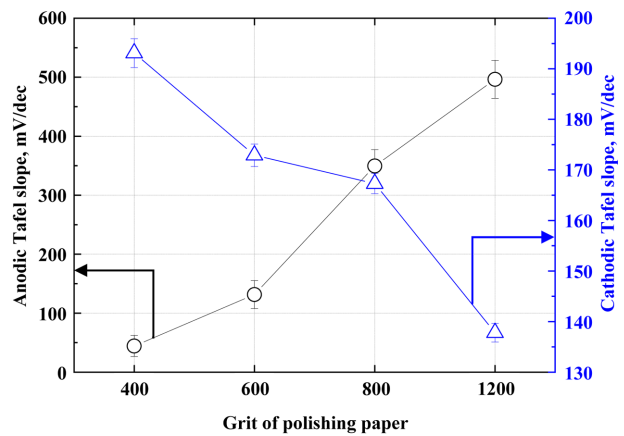
Fig. 5. Potentiodynamic polarization curves of anodized 5083-O aluminum alloy in natural seawater solution with mechanical polishing condition

천연해수에서 동전위분극실험 결과이다. 모든 연마조건  
의 경우, 개로전위부터 전위 상승에 따라 전류밀도는 지  
속적으로 증가하였으며, 현저한 부동태 거동은 관찰되  
지 않았다. H. Euzer *et al.*에 따르면, 염소이온 존재 시  
알루미늄 합금은 부동태 거동이 매우 짧게 나타나거나  
사라지며, 전위 상승에 따라 전류밀도가 급격히 증가하  
는 활성-과부동태 거동을 나타낸다 [37]. 특히, 5083-O  
알루미늄 합금은  $\beta$ - $Al_3Mg_2$ 와 같은 Mg-rich 상이 우선  
용해되어 산화피막의 국부부식을 야기하는 것으로 알려  
져 있다 [38]. 400 grit의 연마지로 표면연마 후 양극산  
화된 알루미늄 합금의 경우, 초기 전위 상승에 따라 전  
류밀도가 급격히 증가하는 경향이 관찰되었다. 반면,  
600, 800 및 1200 grit에서 연마된 시험편의 경우, 400  
grit에 비해 작은값의 전류밀도를 나타낸 후 급격한 전  
류밀도상승 전위는 각각  $-0.22$ ,  $0.29$  및  $0.62$  V (vs. Ag/  
AgCl reference electrode)로 연마단계가 미세해질수록 증  
가하였다. 이러한 전위의 증가는 동일한 전류밀도를 유  
도하기 위해 더 큰 과전압이 필요하다는 의미이므로, 표  
면이 매끄러울수록  $Al_2O_3$  산화피막의 전기화학적 안정  
성이 우수하다는 것을 나타낸다. 이러한 표면거칠기에  
따른 전기화학적 특성은 산화피막의 결함밀도 및 전기  
장 국부집중과 연관된다. 특히, 산과 골의 큰 차이로 인  
해 국부 전류밀도가 증가하면  $Al_2O_3$  산화피막의 성장속  
도보다 용해속도가 지배적으로 나타나 두껍고 조밀한  
산화피막을 형성하기 어렵다 [39].

Fig. 6과 Table 4는 동전위분극곡선을 이용하여 타펠  
분석 후 부식전위, 부식전류밀도, 양극 및 음극타펠기울  
기를 나타낸 것이다. 연마단계가 미세해질수록 부식전  
위는 증가하였으며, 부식전류밀도는 감소하였다. 특히,



(a) Corrosion potential and corrosion current density



(b) Anodic and cathodic Tafel slope

Fig. 6. Corrosion parameters after potentiodynamic polarization experiments of anodized 5083-O aluminum alloy in natural seawater solution with mechanical polishing condition

Table 4. Corrosion parameter after potentiodynamic polarization experiments of anodized 5083-O aluminum alloy in natural seawater solution with mechanical polishing condition

grit	$E_{corr}$ (V)	$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	$\beta_a$ (mV/dec)	$\beta_c$ (mV/dec)
400	-0.425	0.046	44.4	193.1
600	-0.422	0.021	131.6	172.9
800	-0.363	0.011	349.6	167.3
1200	-0.319	0.007	496.4	137.8

부식전위는 800 grit의 실험조건부터 현저히 큰 값을 나  
타냈으며, 부식전류밀도는 600 grit부터 현저히 감소하  
였다. 일반적으로 부식전위가 높을수록 시험편의 전기  
화학적 안정성은 우수하다. 또한, 부식전류밀도는 Faraday  
법칙에 의해 부식속도로 환산할 수 있다. 따라서 표면

이 매끄러울수록  $Al_2O_3$  산화피막의 전기화학적 안정성은 우수한 것으로 나타났다. 이는 매끄러운 표면에서 성장한  $Al_2O_3$  산화피막 내에서 양극 용해가 일어날 수 있는 활성 사이트 수와 유효 면적이 상대적으로 작기 때문으로 사료된다. 특히, 표면거칠기에 따른 부식전류밀도는 600 grit에서 급격히 감소하였으며, 이러한 표면거칠기에 따른 부식속도의 단계적 저하는 A. Almansour *et al.*의 실험 결과와 일치한다 [40]. 또한, 연마단계에 따라 양극 타펠기울기는 증가하였으며, 음극 타펠기울기는 감소하였다. 양극 및 음극 타펠기울기는 다음의 equation (2)와 (3)과 같다.

$$\text{Anodic Tafel slope} : \eta_a = \beta_a \log(i_a) + \text{const.} \quad (2)$$

$\eta_a$  : Anodic overpotential  
 $\beta_a$  : Anodic Tafel slope  
 $i_a$  : Anodic current density

$$\text{Cathodic Tafel slope} : \eta_c = \beta_c \log(i_c) + \text{const.} \quad (3)$$

$\eta_c$  : Cathodic overpotential  
 $\beta_c$  : Cathodic Tafel slope  
 $i_c$  : Cathodic current density

일반적으로 타펠기울기가 작을수록 전류 증가에 필요한 과전압이 작고 전기화학적 반응을 위한 전하이동이 더 빠르다고 알려져 있다 [41,42]. 특히, 양극 타펠기울기는 시험편의 부식속도에 큰 영향을 미치는 부식 파라미터이다. 결과적으로, 연마단계가 미세해질수록 양극 타펠기울기는 증가하였다. 이는  $Al_2O_3$  산화피막의 높은 불활성 특성으로 인해 용해반응이 강하게 나타나기 위해서는 더 큰 과전압이 필요하다는 것을 의미한다. 연마에 의해 매끄러운 시험편의 경우, 내식성 향상은 더욱 두껍고 조밀한 산화피막 형성에 기인한다. 일반적으로, 산화피막 두께 및 경도 증가는 결함 밀도의 감소를 나타내며, 더욱 조밀하고 연속적인 산화피막 구조를 나타낸다 [43]. 이러한 산화피막은 양극 용해 영역을 제한하고, 부식성 이온의 침투를 지연시켜 내식성을 현저히 향상시키는 것으로 사료된다.

Fig. 7은 표면연마 변수에 따른 양극산화된 시험편의 미끄럼 마찰-마모 실험 후 마찰계수 측정 결과이다. 모든 시험편의 마찰계수는 0.1 이하에서 시작하여 초기 마모거리 증가에 따라 급격히 증가하였다. 마찰-마모 초기의 마찰계수 증가는 길들이기 구간(Running-in period)으로 알려져 있으며, 마모트랙이 형성되는 과정에서 마찰계수는 급격히 증가한다 [44]. 특히, 시험편의 초기 표

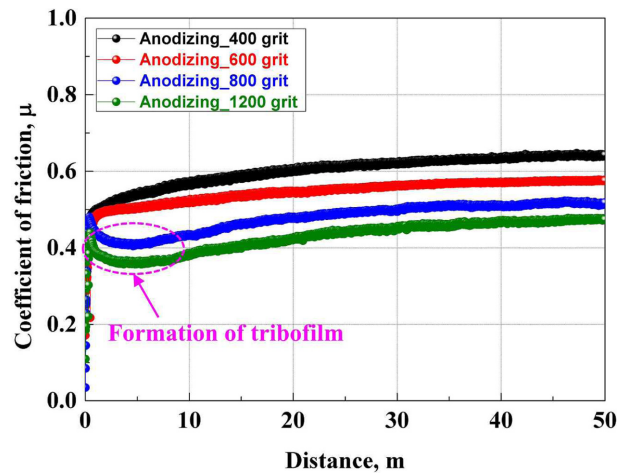


Fig. 7. Coefficient of friction after sliding friction/wear experiments of anodized 5083-O aluminum alloy in natural seawater solution with mechanical polishing condition

면거칠기는 길들이기 구간에서의 마찰계수 증가에 큰 영향을 미치는 요인 중 하나이다. L. Chen *et al.*은 양극산화된 알루미늄 합금을 이용하여 표면거칠기에 따른 마찰-마모 모델에 대해 연구하였다 [45]. 실험 결과, 표면이 거칠수록 실제 접촉면적과 골(Valley)의 면적이 증가하여 쟁기효과(Ploughing effect)에 의한 마찰계수가 급격히 증가하였다. 이와 같이, 본 연구에서 초기 마찰계수의 급격한 증가는 쟁기효과에 기인한 것으로 사료된다. 특히, 연마단계가 미세해질수록 쟁기효과가 감소하여 초기 마찰계수의 증가는 다소 낮게 측정된 것으로 사료된다. 400 및 600 grit로 연마된 시험편은 마모거리 약 0.5 m까지 마찰계수는 급격히 증가하였으며, 이후 안정화되었다. 특히, 안정화 구간에서 마찰계수의 감소는 관찰되지 않고, 지속적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 최종 마모거리 50 m에서 400 및 600 grit에 해당하는 시험편의 마찰계수는 각각 0.642 및 0.576로 측정되었다. 800 및 1200 grit로 연마된 시험편의 경우, 마모거리 약 0.5 m까지 마찰계수는 급격히 증가하였으며, 이후 안정화 구간을 나타냈다. 특히, 약 5 m까지 마찰계수의 감소가 나타났다. 그러나 마모거리 증가에 따라 마찰계수는 지속적으로 증가하였다. 최종 마모거리 50 m에서 800 및 1200 grit에 해당하는 시험편의 마찰계수는 각각 0.518 및 0.474로 측정되었다. 결과적으로, 연마단계가 미세해질수록 마찰계수는 감소하였다. 특히, 800 및 1200 grit에서 초기 마찰계수의 감소가 나타난 것은 마찰-마모로 인해  $Al_2O_3$  산화피막 표면에 형성될 수 있는 마찰피막(Tribofilm)의 형성 및 거동에 의한 것과 유사한 경향으로 사료된다 [46]. 마찰피막은 두 재료가 접촉하여 마찰-마모 발생 시 재료 표면에 형성되는

얇은 피막이다 [47,48]. 이는 마찰열에 의해 형성되며,  $Al_2O_3$  산화피막 표면에서도 강하게 형성된다 [49]. 알루미늄 합금 표면에 형성된 산화피막의 표면거칠기가 낮고 경도가 높을수록 마찰피막은 더욱 강하게 형성된다 [50]. 특히, 경도가 높을수록 표면의 소성변형이 억제되어 마찰피막의 형성 및 유지가 용이한 것으로 알려져 있다 [51]. 이러한 마찰피막은 마찰력 감소, 마모 방지 및 윤활성능 강화를 통해 재료의 수명을 연장시킬 수 있다 [52]. 결과적으로, 매끄러운 표면에 형성되는  $Al_2O_3$  산화피막은 마찰피막을 더욱 강하게 형성시켜 상대적으로 낮은 마찰계수를 나타낸 것으로 사료된다. 그러나 마모거리 증가에 따른 마찰계수 증가는 마찰피막의 균열 및 국부적 파괴에 기인한다 [53].

#### 4. 결론

본 연구에서는 양극산화된 5083-O 알루미늄 합금의 산화피막 특성에 미치는 기계적 연마조건의 영향에 대해 연구하였다.

연마단계가 미세해질수록  $Al_2O_3$  산화피막의 높이와 무게 증가량은 증가하고 표면거칠기는 감소하였다. 이는 기계적 연마를 통해 산과 골의 높이 차이가 완화되어 초기 장벽층이 보다 균일하게 형성된 것에 기인한다. 특히, 전기장 집중과 국부 용해가 억제되고 동일 전하량 대비 실질적인 산화피막 성장 효율이 향상된 것으로 사료된다.

마이크로 인텐테이션 실험결과, 연마단계가 미세해질수록 비커스경도는 증가하였다. 이는 두껍고 연속적인  $Al_2O_3$  산화피막 형성 및 공극도 감소에 기인한다. 그러나 5083-O 알루미늄 합금 내 함유된 Mg로 인해 형성되는 MgO,  $MgAl_2O_4$  이차상 및 보이드 형성으로 인해 산화피막 내부에 다양한 크기의 결함이 존재하기 때문에 비커스경도값의 편차는 상대적으로 크게 나타났다.

전기화학적 실험결과, 연마단계가 미세해질수록 부식 전위는 귀방향의 값을 나타냈으며, 부식전류밀도는 감소하였고, 양극 타펠기울기는 증가하였다. 이는 매끄러운 표면에서 성장한  $Al_2O_3$  산화피막 내 활성 사이트와 유효 양극 용해 면적이 감소하여 전기화학적 안정성이 향상되었음을 나타낸다. 특히 800 grit 조건부터 내식성 향상이 뚜렷하게 나타났다.

미끄럼 마찰·마모 실험결과, 모든 조건의 초기 길들이기 구간에서 마찰계수는 급격히 증가하였다. 특히, 연마조건이 거칠수록 마찰계수는 높은 값을 유지하였다. 반면, 연마조건이 미세할수록 마모거리 증가에 따라 마찰계수는 감소 및 안정화되었다. 이는 매끄러운  $Al_2O_3$  산화피막 표면에서 형성된 마찰피막이 쟁기효과를 저감한 것에 기인한다.

#### References

1. M. Atif, W. Arshad, N. Siddiquee, and Z. A. Khan, Aluminum alloys in marine construction: characteristics, application, and problems from a fabrication viewpoint, *Marine Systems & Ocean Technology*, **15**, 70 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1007/s40868-019-00069-w>
2. Y. Tzeng, R. Chen, and S. Lee, Nondestructive tests on the effect of Mg content on the corrosion and mechanical properties of 5000 series aluminum alloys, *Materials Chemistry and Physics*, **259**, 124202 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.124202>
3. I. Park, H. Hwang, D. Shin, and S. Kim, Electrochemical and cavitation-erosion properties in natural seawater of cast aluminum alloys, *Corrosion Science and Technology*, **23**, 437 (2024). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2024.23.5.437>
4. M. Ma, R. Lai, J. Qin, B. Wang, H. Liu, and D. Yi, Effect of weld reinforcement on tensile and fatigue properties of 5083 aluminum metal inert gas welded joint: experiments and numerical simulations, *International Journal of Fatigue*, **144**, 106046 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106046>
5. E. L. Huskins, B. Cao, and K. T. Ramesh, Strengthening mechanisms in an Al-Mg alloy, *Materials Science and Engineering A*, **527**, 1292 (2010). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.11.056>
6. J. Shin, H. J. Kwon, H. Kim, and D. Lee, Atmospheric corrosion model of carbon steel considering relative humidity, chloride deposition rate, and surface particles, *Corrosion Science and Technology*, **23**, 324 (2024). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2024.23.4.324>
7. S. Lee and S. Kim, Essential anti-corrosive behavior of anodized Al alloy by applied current density, *Applied Surface Science*, **481**, 637 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.03.155>
8. S. Park and C. Jeong, Surface electrical conductivity and growth behavior of aluminum 3003 oxide film, *Corrosion Science and Technology*, **21**, 487 (2022). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2022.21.6.487>
9. N. M. Abdeltawab, M. Elshazly, A. Y. Shash, and M. El-Sherbiny, Studying the effect of processing parameters on the microstructure, strength, hardness, and corrosion characteristics of friction stir dissimilar welded AA5083 and AA7075 aluminum alloys reinforced with Al-SiC matrix, *Heliyon*, **11**, e41362 (2025). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41362>
10. S. Lee and C. Jeong, Effects of heat treatment on surface

- properties of aluminum 6061 alloy after anodization, *Corrosion Science and Technology*, **21**, 495 (2022). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2022.21.6.495>
11. E. Karakoç and O. Çakır, Examination of surface roughness values of 6061-T6 aluminum material after machining and after anodizing process, *Materials Today: Proceedings*, **80**, 32 (2023). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.058>
  12. J. Lee, Y. Kim, U. Jung, and W. Chung, Thermal conductivity of anodized aluminum oxide layer: the effect of electrolyte and temperature, *Materials Chemistry and Physics*, **141**, 680 (2013). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2013.05.058>
  13. M. P. Martínez-Viademonte, S. T. Abrahimi, T. Hack, M. Burchardt, and H. Terryn, A review on anodizing of aerospace aluminum alloys for corrosion protection, *Coatings*, **10**, 1106 (2020). Doi: <https://doi.org/10.3390/coatings10111106>
  14. S. Theohari and C. Kontogeorgou, Effect of temperature on the anodizing process of aluminum alloy AA5052, *Applied Surface Science*, **284**, 611 (2013). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.07.141>
  15. K. H. Rashid, A. A. Khadom, A. Amir, and H. Kadhum, International Journal of Electrochemical Science Optimization of process parameters for 4643 Al alloy anodization in mixed oxalic / phosphoric electrolytes : Doehlert experimental design, *International Journal of Electrochemical Science*, **20**, 100945 (2025). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2025.100945>
  16. R. K. Choudhary, K. P. Sreeshma, and P. Mishra, Effect of surface roughness of an electropolished aluminum substrate on the thickness, morphology, and hardness of aluminum oxide coatings formed during anodization in oxalic acid, *Journal of Materials Engineering and Performance*, **26**, 3614 (2017). Doi: <https://doi.org/10.1007/s11665-017-2798-0>
  17. E. Karakoç and O. Çakır, Examination of surface roughness values of 6061-T6 aluminum material after machining and after anodizing process, *Materialstoday Proceedings*, **80**, 32 (2023). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.058>
  18. L. F. Mendes, A. S. Moraes, J. S. Santos, F. L. Leite, and F. Trivinho-Strixino, Investigation of roughness and specular quality of commercial aluminum (6061 alloy) for fabrication of nanoporous anodic alumina films, *Surface and Coatings Technology*, **310**, 199 (2017). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.12.068>
  19. C.-U. Yu, C.-C. Hu, A. Bai, and Y.-F. Yang, Pore-size dependence of AAO films on surface roughness of Al-1050 sheets controlled by electropolishing coupled with fractional factorial design, *Surface and Coatings Technology*, **201**, 7259 (2007). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.01.033>
  20. G. M. Pharr and W. C. Oliver, Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: advances in understanding and refinements to methodology, *Journal of Materials Research*, **19**, 3 (2004). Doi: <https://doi.org/10.1557/jmr.2004.19.1.3>
  21. F. Guo et al., Effect of the anodizing temperature on microstructure and tribological properties of 6061 aluminum alloy anodic oxide films, *Coatings*, **12**, 314 (2022). Doi: <https://doi.org/10.3390/coatings12030314>
  22. R. K. Choudhary, K. P. Sreeshma, and P. Mishra, Effect of surface roughness of an electropolished aluminum substrate on the thickness, morphology, and hardness of aluminum oxide coatings formed during anodization in oxalic acid, *Journal of Materials Engineering and Performance*, **26**, 3614 (2017). Doi: <https://doi.org/10.1007/s11665-017-2798-0>
  23. S. A. Shamsuddin, M. N. Derman, and U. Hashim, Surface characterization study of nanoporous anodic aluminum oxide thin film synthesized by single-step anodization, *AIP Conference Proceedings*, **2339**, 020245 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1063/5.0044176>
  24. E. Razzouk, D. Koncz-Horváth, and T. I. Török, Critical challenges in the anodizing process of aluminium-silicon cast alloys-A review, *Crystals*, **14**, 617 (2024). Doi: <https://doi.org/10.3390/cryst14070617>
  25. L. Lorenzetti, L. Tonelli, I. Boromei, L. Ceschini, P. Shashkov, and C. Martini, Anodizing by electrochemical oxidation of the laser powder bed fusion-processed A357 aluminium alloy: microstructural characterization and dry sliding behaviour, *Progress in Additive Manufacturing*, **8**, 629 (2023). Doi: <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00353-z>
  26. L. F. Mendes, A. S. Moraes, J. S. Santos, F. L. Leite, and F. Trivinho-Strixino, Investigation of roughness and specular quality of commercial aluminum (6061 alloy) for fabrication of nanoporous anodic alumina films, *Surface and Coatings Technology*, **310**, 199 (2017). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.12.068>
  27. N. A. Mat Tahir, S. Liza, K. Fukuda, S. Mohamad, M. Z. F. Hashimi, M. S. M. Yunus, Y. Yaakob, and I. S. Othman, Surface and tribological properties of oxide films

- on aluminium alloy through fly-ash reinforcement, *Coatings*, **12**, 256 (2022). Doi: <https://doi.org/10.3390/coatings12020256>
28. J. Kim, S. Kang, J. Lee, J. Jang, and Y. Lee, Influence of surface roughness on indentation size effect, *Acta Materialia*, **55**, 3555 (2007). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.02.006>
  29. Z. Pei, E. Process, M. Science, C. Technology, F. P. Processing, and C. Base, Correlation between microhardness and microstructure of anodic film on 2024 aluminum alloy, *Journal of Materials Engineering and Performance*, **30**, 586 (2015). Doi: <https://doi.org/10.1007/s11595-015-1193-7>
  30. L. E. Fratila-Apachitei, J. Duszczuk, and L. Katgerman, Vickers microhardness of AlSi(Cu) anodic oxide layers formed in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> at low temperature, *Surface and Coatings Technology*, **165**, 309 (2003). Doi: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00750-8](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00750-8)
  31. M. P. Martínez-Viademonte, S. T. Abrahami, T. Hack, M. Burchardt, and H. Terryn, A review on anodizing of aerospace aluminum alloys for corrosion protection, *Coatings*, **10**, 1106 (2020). Doi: <https://doi.org/10.3390/coatings10111106>
  32. K. Kim, Formation of endogenous MgO and MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> particles and their possibility of acting as substrate for heterogeneous nucleation of aluminum grains, *Surface and Interface Analysis*, **47**, 429 (2015). Doi: <https://doi.org/10.1002/sia.5726>
  33. G. Wu, K. Dash, M. L. Galano, and K. A. Q. O. Reilly, Oxidation studies of Al alloys: Part II Al–Mg alloy, *Corrosion Science*, **155**, 97 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.04.018>
  34. P. Lv, X. Zhang, L. Chen, S. Wang, Z. Wang, R. He, and L. Guan, Simulation and optimization of the auxiliary cathode for inter-electrode discharge electric field in microarc oxidation, *Materials*, **16**, 5065 (2023). Doi: <https://doi.org/10.3390/ma16145065>
  35. Y. Li, Y. Shi, R. Chen, H. Lin, and X. Ji, Corrosion behavior and comprehensive evaluation of Al<sub>0.8</sub>Cr<sub>0.2</sub>FeCoNiCu<sub>0.5</sub>B<sub>0.1</sub> high-entropy alloy in 3.5% NaCl solution, *Lubricants*, **11**, 282 (2023). Doi: <https://doi.org/10.3390/lubricants11070282>
  36. A. Kozik, M. Nowak, K. Limanówka, and A. Góral, Synthesis of a hard anodic oxide coating with a structure allowing for its modification by nanoparticles, *Coatings*, **14**, 1416 (2024). Doi: <https://doi.org/10.3390/coatings14111416>
  37. H. Ezuber, A study on the corrosion behavior of aluminum alloys in seawater, *Materials & Design*, **29**, 801 (2008). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.01.021>
  38. W. Jiaming, Y. Haodong, D. U. Min, H. O. U. Jian, and P. Wenshan, Corrosion mechanism of 5083 aluminum alloy in seawater containing phosphate, *Corrosion Science*, **20**, 372 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1007/s11802-021-4545-2>
  39. C. Yu, C. Hu, A. Bai, and Y. Yang, Pore-size dependence of AAO films on surface roughness of Al-1050 sheets controlled by electropolishing coupled with fractional factorial design, *Surface and Coatings Technology*, **201**, 7259 (2007). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.01.033>
  40. A. Almansour, M. Azizi, A. M. Jesri, and S. Entakly, Effect of surface roughness on corrosion behavior of aluminum alloy 6061 in salt solution (3.5% NaCl), *International Journal of Academic Scientific Research*, **3**, 37 (2015). <https://www.ijasrjournal.org/wp-content/uploads/2015/12/DEC4s-15.pdf>
  41. Q. Zhou, L. Liao, H. Zhou, D. Li, D. Tang, and F. Yu, Innovative strategies in design of transition metal-based catalysts for large-current-density alkaline water/seawater electrolysis, *Materials Today Physics*, **26**, 100727 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2022.100727>
  42. G. Abrham, M. V. Martínez-Huerta, and M. Jesus, Recent progress on bimetallic NiCo and CoFe based electrocatalysts for alkaline oxygen evolution reaction: a review, *Journal of Energy Chemistry*, **67**, 101 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2021.10.009>
  43. C. C. Lee, C. W. Chen, J. S. Lin, S. H. Wang, C. S. Lee, C. C. Chen, Y. H. Lin, and C. Y. Cehn, Effect of anodization treatment on the thickness, hardness, and microstructural characterization of anodic aluminum oxide film on AA6061 and critical patent analysis, *Journal of Materials Engineering and Performance*, **31**, 667 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06205-1>
  44. S. Ghatrehsamani, S. Akbarzadeh, and M. M. Khonsari, Experimentally verified prediction of friction coefficient and wear rate during running-in dry contact, *Tribology International*, **170**, 107508 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107508>
  45. L. Chen, Z. Liu, B. Wang, Q. Song, Y. Wan, and L. Chen, Surface characterization and tribological performance of anodizing micro-textured aluminum-silicon alloys, *Materials*, **12**, 1862 (2019). Doi: <https://doi.org/10.3390/ma12111862>
  46. X. Yin, J. Jin, X. Chen, A. Rosenkranz, and J. Luo, Ultra-wear-resistant MXene-based composite coating via in

- situ formed nanostructured tribofilm, *ACS Applied Materials & Interfaces*, **11**, 32569 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.9b11449>
47. H. Kato and K. Komai, Tribofilm formation and mild wear by tribo-sintering of nanometer-sized oxide particles on rubbing steel surfaces, *Wear*, **262**, 36 (2007). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.03.046>
48. W. M. Rainforth, The wear behaviour of oxide ceramics: a review, *Journal of Materials Science*, **39**, 6705 (2004). Doi: <https://doi.org/10.1023/B:JMSC.0000045601.49480.79>
49. D. H. Shin and S. J. Kim, Tribocorrosion characteristics of hard anodized Al alloys on hydrogen valve application for fuel cell electric vehicles, *Advanced Engineering Materials*, **26**, 2400142 (2024). Doi: <https://doi.org/10.1002/adem.202400142>
50. N. A. M. Tahir, S. Liza, K. Fukuda, S. Mohamad, M. Z. F. Hashimi, M. S. M. Yunus, Y. Yaakob, and I. S. Othman, Surface and tribological properties of oxide films on aluminium alloy through fly-ash reinforcement, *Coatings*, **12**, 256 (2022). Doi: <https://doi.org/10.3390/coatings12020256>
51. A. Ghanbarzadeh, E. Piras, M. C. T. Wilson, A. Morina, and A. Neville, Numerical study of effect of tribofilm kinetics and its hardness on the roughness evolution of the substrate in boundary lubrication regime, *Tribology Transactions*, **62**, 747 (2004). Doi: <https://doi.org/10.1080/10402004.2019.1615160>
52. Q. Luo, Temperature dependent friction and wear of magnetron sputtered coating TiAlN/VN, *Wear*, **271**, 2058 (2011). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.01.054>
53. C. Soffritti, A. Fortini, A. Nastruzzi, R. Sola, M. Merlin, and G. L. Garagnani, Dry sliding behavior of an aluminium alloy after innovative hard anodizing treatments, *Materials*, **14**, 3281 (2021). Doi: <https://doi.org/10.3390/ma14123281>