



양극산화 모드 전환을 통한 기능성 알루미늄 표면 연구

Fabrication of functional aluminum surface through anodization mode transition

Youngju Park, Chanyoung Jeong *

Department of Advanced Materials Engineering, Dong-eui University, 176 Eomgwang-ro, Busanjin-gu

(Received 14 December, 2022 ; revised 16 December, 2022 ; accepted 20 December, 2022)

Abstract

This research develops an easy-to-use, environmentally friendly method for fabricating functional 1050 aluminum alloy surfaces with excellent corrosion resistance. Functional aluminum surfaces with various nanostructures are fabricated by controlling the experimental conditions of anodizing process. The experiment used a multi-step anodizing process that alternates between two different anodizing modes, mild anodizing (MA) and hard anodizing (HA), together with a pore-widening (PW) process. Among them, the nanostructured surface with a small solid fraction shows superhydrophobicity with a contact angle of more than 170° after water-repellent coating. In addition, the surface with superhydrophobicity is difficult for corrosive substances to penetrate, so the corrosion resistance is greatly improved.

Keywords : Pulse Anodizing; Functional Hydrophilic/Hydrophobic Surfaces; Aluminum 1050 Alloy; Corrosion.

1. 서 론

마이크로 및 나노 구조물 표면은 표면에너지가 낮아 구조물 사이에 공기를 동반하여 액체와 복합 계면을 생성해 우수한 비 습윤성이 나타난다. 초발수, 초발유성을 구현한 기능성 표면은 비습윤 및 비접착 특성을 가져 자기세척, 결빙방지, 부식 방지를 요구하는 다양한 분야에서 주목을 받고 있다[1-3].

지난 수년간 효과적인 기능성 표면을 설계하고 생성하기 위해 마이크로 및 나노구조물 형성 기술은 지속적으로 연구되었지만 기능성 표면을 실제 적용하기 위하여 현재까지 연구된 방법들의 기술은 상당한 발전이 필요하다. 리소그래피 기술은 마이크로 및 나노 패턴이 정렬되어 발수성 및 발유성을 구현하기에 효과적이지만, 주로 웨이퍼나 작은 평면 기판으로 작업하므로 크기가 제한적이며, 고

가의 장비가 요구되어 많은 비용이 발생한다[4-8].

전기방사 및 분무, 줄겔 등 습식화학을 사용하여 코팅하는 방법은 저렴하고 크기의 제한이 없어 우수하지만, 생성된 구조물이 무작위로 분포되어 코팅제를 첨가하여 코팅하는 방법에서 접착 문제가 발생한다. 이에 비해 전기화학적 방법인 양극산화는 작업 표면적에 제한이 없으며, 정렬된 나노 구조를 생성하여 앞의 기술과 비교하여 더욱 우수하다. 특히 산화물층을 성장시키기 비교적 간단하여 많은 응용 분야에서 사용되며, 구조물 성장을 위해 복잡하거나 고가의 장비 설비가 필요하지 않다[9-14].

양극산화 기술은 전압, 시간 및 온도와 같은 변수를 조절하여 기공크기, 기공간 거리, 두께를 조절할 수 있다. 양극산화 기술 중 MA(Mild Anodization) 공정과 비교하여 HA(Hard Anodization)은 상대적으로 높은 전압을 이용하여 규칙적인 다공성 구조물을 빠른 속도로 성장시킬 수 있다. 이렇게 생성된 양극산화 피막은 일반적으로 사용되는 도장 및 금속 도금보다 접착력 및 화학적 특성이 우수하여

*Corresponding Author: Chanyoung Jeong
Department of Advanced Materials Engineering,
Dong-eui University
Tel: +82-51-890-2286; Fax: +82-050-182-6898
E-mail: cjeong@deu.ac.kr

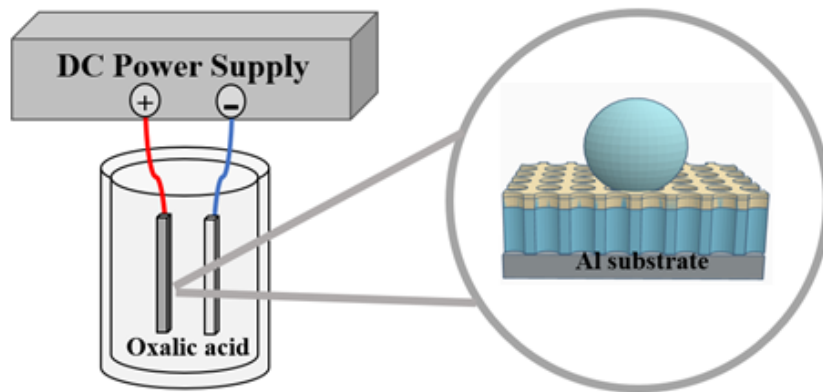


Fig. 1. Schematic diagram showing the formation of anodization film on the aluminum surface.

표면의 노화나 마모로 인하여 피막이 벗겨질 위험이 적다.

그러나 기능성 표면의 효율을 정적 및 동적 조건인 높은 접촉각과 낮은 접촉 이력각이 필요하므로 2차원 육각형 다공성 구조만 형성하는 일반적인 양극산화 방법만으로 기능성 표면의 관점에서는 바람직하지 않다. 현재 연구된 표면은 기둥형 또는 다공성 구조물이며, 기둥형 구조물은 고체 표면과 액체가 접촉하는 부분이 불연속적이며, 다공성 구조물은 연속적이라는 차이점을 가지고 있다. 불연속적인 기둥형 구조물은 낮은 고체 분율로 액체와 접촉시 맞닿는 표면이 적어 높은 접촉각 및 낮은 접촉이력각을 가져 우수한 기능성 표면이 나타난다[29,30]. 따라서 표면의 기능성 효율과 안정된 습윤성을 위하여 두 구조물 형태를 결합한 표면 구조를 설계하고 개발해야 한다 [15-26].

본 연구에서는 전기화학적 양극산화 공정 조건을 조절하여 1050 알루미늄 합금 표면에 다양한 나노기공과 나노기둥형 구조물을 형성시키고 자기조립 단분자막을 코팅한 후 친수/발수 특성 및 부식 특성을 평가하였다. 양극산화 공정을 통해 생성된 나노구조물 및 발수 형상을 그림 1의 모식도에 나타내었다.

2. 실험방법

본연구에서는 25 mm × 30 mm × 10 mm 크

기로 절단된 알루미늄 1050 합금을 사용하였다. 합금의 표면에 잔존 이물질 제거를 위해 아세톤과 에탄올을 이용하여 초음파 세척을 하였으며, 세척 후 건조하였다. 자연산화막을 제거하기 위해 상온의 과염소산과 에탄올을 1:4의 부피 비율로 혼합한 용액에서 20 V의 인가전압으로 1분간 전기화학적 연마 공정을 진행하였다. 온도순환 냉각 장치와 이중 자켓 비커를 이용해 0 °C로 유지된 0.3 M 옥살산 전해액에서 자연산화막을 제거한 알루미늄 합금 샘플의 1차 양극산화를 실시하였다. 양극으로는 알루미늄 합금 샘플을, 음극으로는 백금을 고정하여 두 전극 간 거리는 5cm로 유지하였으며, 직류전원공급장치를 이용해 40 V 전압을 6 시간동안 인가하였다. 이후 균일한 산화막을 얻기 위해 1.8 wt% 크롬산과 6 wt% 인산을 혼합한 용액에서 10시간동안 침지시켜 1차양극산화로 생성된 산화피막을 제거하였다. 산화막이 제거된 샘플은 1차 양극산화 같은 조건하에서 30분간 40 V의 전압을 인가하는 MA모드와, 30초간 80 V의 전압을 인가하는 HA모드를 사용하여 2차 양극산화를 수행하였다. 이후 30 °C의 0.1 M 인산용액에서 40분간 침지하는 기공 확장 공정을 실시하였다. 3차 양극산화는 2차 양극산화 동일한 조건인 MA, HA 모드를 교차하여 계층적 나노 구조를 제조하였으며, 표 1에 실험 조건을 표기하였다. 기능성 표면을 구현하기 위해 나노 구조물에 FDTS 용

Table 1. Staged Anodization Process Conditions (MA: Mild Anodization, HA: Hard Anodization).

Sample	First Anodization	AAO Removal	Second Anodization	Pore Widening	Third Anodization		
	Time		Time		Step	Time	Step
A	6 hour	10 hour	MA	30 min.	50 min.	MA	30 min.
B	6 hour	10 hour	MA	30 min.	50 min.	HA	30 s.
C	6 hour	10 hour	HA	30 s.	50 min.	MA	30 min.
D	6 hour	10 hour	HA	30 s.	50 min.	HA	30 s.

액을 이용하여 자기조립 단분자막 코팅을 실시하였다. 코팅 전에는 표면 유기물 및 잔존오염물 제거를 위해 15분간 산소 플라즈마를 실시하였으며, 표면 불순물 제거 및 코팅 접착력을 증가시키기 위하여 150 °C에서 10분간 열처리하였다. 코팅 후, 구현된 기능성 표면을 확인하기 위해 물과 기름 액적을 사용해 접촉각을 측정하였다. 표면 나노 구조물은 전계 방사형 주사 전자 현미경으로 관찰하였다. 내식성 평가를 전기화학적 방법인 동전위 분극시험을 행하였으며, 시험조건은 3.5 wt%의 NaCl 수용액에서 양극산화된 시편을 작업 전극, 은/염화은(Ag/AgCl)을 기준전극으로 백금을 상대전극으로 하여 - 1.5 V ~ + 1.5 V의 범위에서 1 mV/sec의 주사속도로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2, 3은 FE-SEM으로 관찰한 단계적 양극산화 공정 조건의 변화에 따른 알루미늄 1050 합금 표면에 생성된 양극산화 피막의 Top view, Cross view 이미지이다. Top view 이미지를 통하여 모든 조건에서 기공이 형성됨을 알 수 있으며, Cross view 이미지를 보아 MA 모드와 HA 모드를 달리 하여 실험시 양극산화 피막의 형상 및 두께가 달라지는 것을 확인하였다.

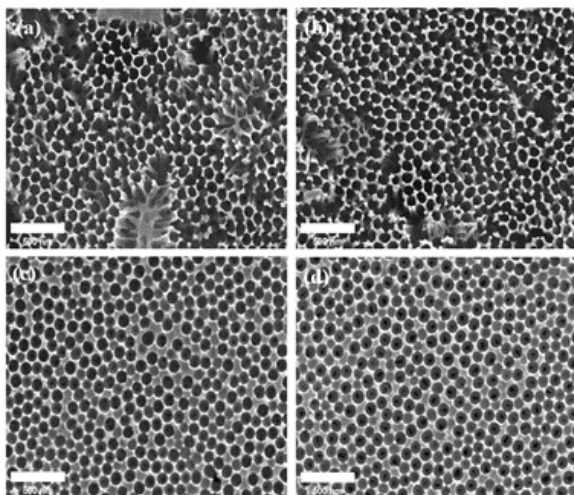


Fig. 2. FE-SEM top view images for each process condition after step-by-step anodizing. (a) MA - PW - MA, (b) MA - PW - HA, (c) HA - PW - MA, (d) HA - PW - HA. Scale bar = 500 nm.

FE-SEM 이미지를 통하여 기공크기(Pore Diameter, D_p), 기공사이 거리(Interpore distance, D_{int}), 산화피막의 두께, 고체 분율을 수치화 하여 그림 4와 표 2에 나타내었다. 기공크기 및 기공사이 거리는 양극산화 공정 조건이 MA - PW - MA 에서 97.50 ± 10.90 nm, 106.60 ± 13.15 nm, MA - PW - HA에서 91.56 ± 8.13 nm, 97.01 ± 12.79 nm, HA - PW - MA에서 100.48 ± 5.67 nm, 113.75 ± 12.40 nm, HA - PW - HA에서 108.37 ± 6.94 nm, 125.14 ± 9.97 nm 로 측정되었으며, 기공 크기 및 기공사이 거리는 HA - PW - HA 조건에서 가장 크게 나타났다. 그러나 산화피막의 두께는 MA - PW - MA 조건에서 1416.47 ± 12.33 nm 로 가장 두꺼웠으며, HA - PW - HA 조건에서 408.47 ± 5.80 nm 로 산화피막이 가장 얇게 형성된 것을 확인하였다. 고체 분율은 기공 크기와 기공 사이 거리에 직접적인 관계가 있으며, 아래의 식(1)에 의해 산출되었다.

$$f_{SL} = 1 - \frac{2\pi r^2}{\sqrt{3}a^2} \tag{1}$$

이 식에서 f_{SL} 은 고체 분율이며, a는 기공사이 거리, r은 기공의 반지름을 나타낸 것이다. 양극산화 공정 조건 중 고체 분율은 MA - PW - HA 에서

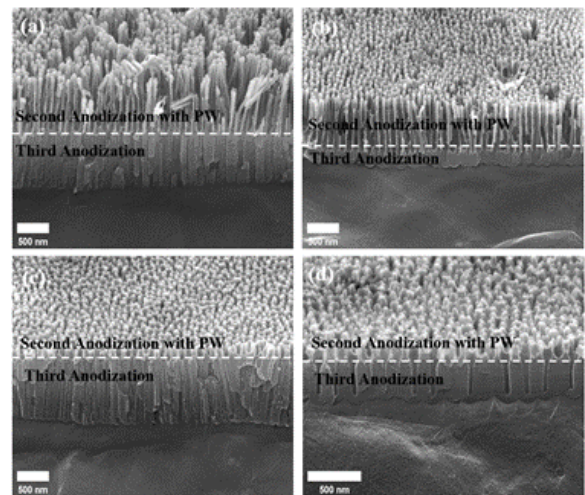


Fig. 3. FE-SEM cross-view images for each process condition after step-by-step anodizing. MA - PW - MA, (b) MA - PW - HA, (c) HA - PW - MA, (d) HA - PW - HA. Scale bar = 500 nm.

Table 2. Characterization of the AAO structures on 1050 aluminum alloy.

Sample	Second Anodization Step	Pore Widening (min.)	Third Anodization Step	Pore Diameter (nm)	Interpore Size (nm)	Thickness (nm)	Solid fraction
A	MA	40	MA	97.50 ± 10.90	106.60 ± 13.15	1416.47 ± 12.33	0.198
B	MA	40	HA	91.56 ± 8.13	97.01 ± 12.79	845.58 ± 14.68	0.093
C	HA	40	MA	100.48 ± 5.67	113.75 ± 12.40	979.32 ± 12.02	0.212
D	HA	40	HA	108.37 ± 6.94	125.14 ± 9.97	408.47 ± 5.80	0.266

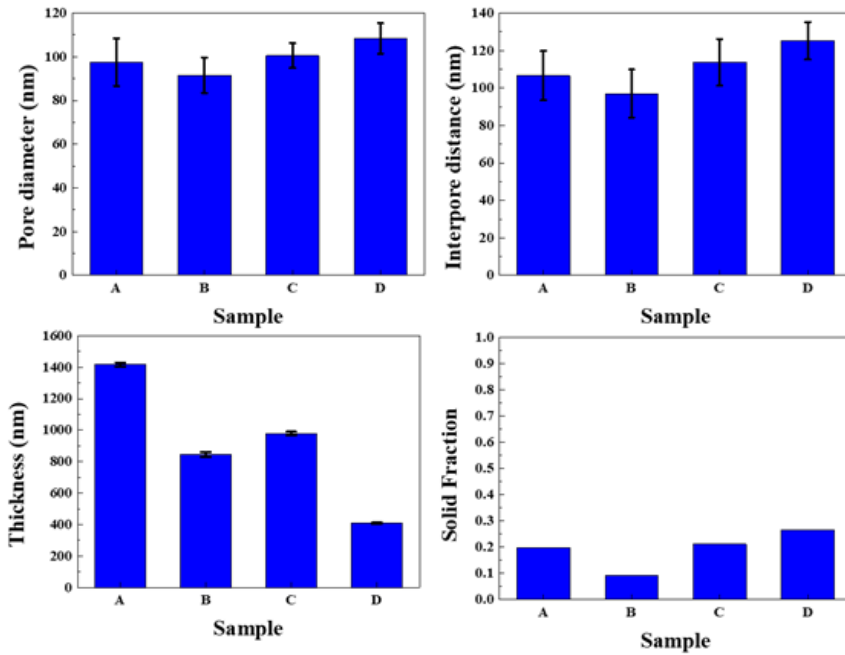


Fig. 4. Variation of pore diameter, interpore distance, thickness, and solid fraction according to stepwise anodization.

0.093으로 가장 작으며, MA - PW - MA 에서 0.198, HA - PW - MA 에서 0.212, HA - PW - HA 에서 0.266으로 측정되었다. 따라서 기공 크기 및 기공 사이거리에 따른 고체 분율과 산화 피막의 두께는 양극산화 공정시 인가전압, 전류밀도, 처리시간으로 조절된다는 것을 알 수 있다.

그림 5와 표 3는 EDS 정량 분석을 통하여 양극산화 공정 조건별 알루미늄과 산소의 함량을 나타낸 것이다. 산소는 MA - PW - HA 조건에서 가장 낮은 함량을 보였으며, HA - PW - HA 조건에서 높은 것을 관찰하였다. 이를 통해 모든 조건에서 산화피막이 형성되었으며, 낮은 고체 분율을 가지

Table 3. EDS analysis by mode of 1050 aluminum anodization process.

Sample	Element (At %)	
	Al	O
A	43.65	42.96
B	48.51	27.24
C	40.93	44.94
D	41.58	45.45

는 조건일수록 적은 산소함량이 관찰되었다.

그림 6, 7, 8과 표 4는 공정 조건별 양극산화 후에 코팅 전, 후의 물과 기름의 접촉각 및 접촉이력각을 측정한 것이다. 그림 6의 (a), (b), (c), (d), (e), (f), (g), (h)와 그림 7에 양극산화 후의 물과 기름의 친수, 친유 접촉각을 나타냈다. MA - PW

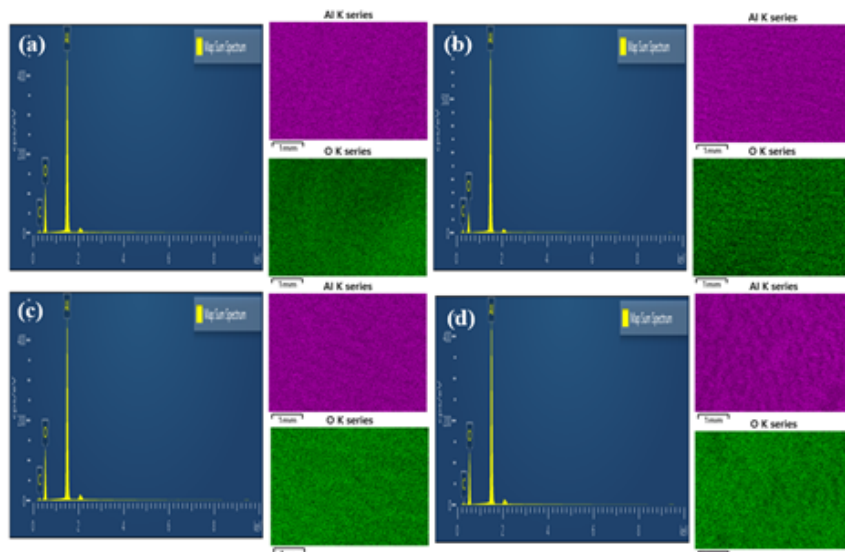


Fig. 5. EDS Analysis Comparison of aluminum and oxygen contents according to the anodization mode: (a) MA - PW - MA, (b) MA - PW - HA, (c) HA - PW - MA, (d) HA - PW - HA.

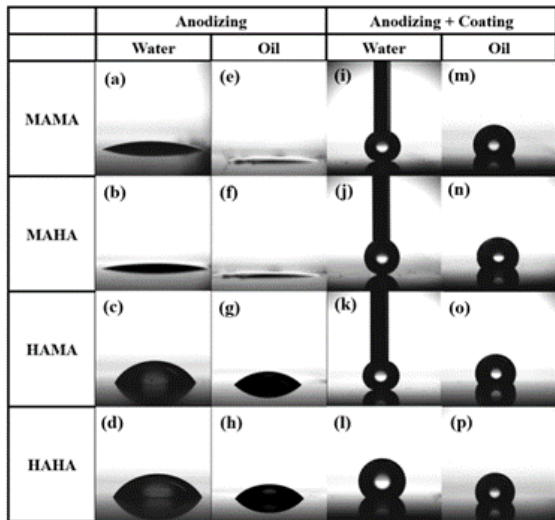
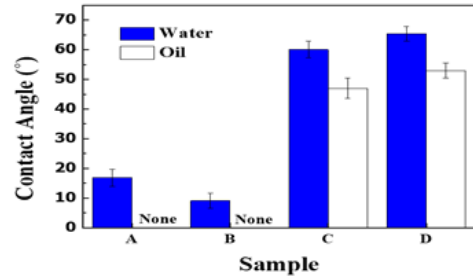


Fig. 6. Contact angle images before and after coating of anodization 1050 aluminum alloy by processing mode.

- MA 와 MA - PW - HA에서 물과 기름의 접촉 각이 가장 낮아 초친수성 및 초친유성을 보였다. 이는 Wenzel-Cassie 이론에 의해 고체-액체 계면위 액적의 모양으로 결정되며, 표면 나노 구조물의 고체 분율은 초친수 및 초친유를 확인하기위한 중요한 인자인 것으로 사료된다[27,28].

그림 6 (i), (j), (k), (l), (m), (n), (o), (p)와 그림 8, 표 4는 공정 조건별 양극산화 샘플을 코팅 후 물과 기름의 접촉각 및 접촉이력각을 나타냈다. MA - PW - MA, MA - PW - HA, HA - PW - HA의 접촉각이 170도 이상으로 초발수성이 나타났으며, MA - PW - HA의 물, 기름 접촉각이 가장 높게 측정되었다. 또한 초발수성 샘플 모두 접촉이력각이 15도 이하로 측정되었으며, MA -



Sample	Water	Oil
A	16.9 ± 2.89°	None
B	9.18 ± 2.53°	None
C	60.06 ± 2.79°	46.87 ± 3.41°
D	65.39 ± 2.41°	52.97 ± 2.48°

Fig. 7. Contact angle of 1050 aluminum alloy by anodization process mode. (A) MA - PW - MA, (B) MA - PW - HA, (C) HA - PW - MA, (D) HA - PW - HA.

PW - HA의 물, 기름 접촉 이력각이 가장 낮게 관찰되었다. 이를 통해 그림 1과 같이 나노구조물이 형성된 표면을 코팅하였을 때 공기가 코팅층으로 인하여 기공과 고체 표면 사이에서 액적을 떠받치는 형상이 구현되어 발수성 및 발유성이 구현되는 것으로 사료된다. 따라서 고체 분율이 낮을수록 액적과 맞닿는 접촉면이 작아져 초발수성이 구현됨을 알 수 있다.

그림 9는 양극산화 공정 후 코팅한 시편의 동전위 분극 곡선이며, 부식전위(E_{Corr})와 부식전류 밀도(I_{Corr})는 표 5에 나타내었다. B의 샘플에서 103mV로 가장 높은 부식 전위가 나타났으며, 전류밀도 또한 $6.39 \times 10^{-11} \text{ A/cm}^2$ 로 가장 작은 값이 측정되었다. 이는 양극산화 조건 중 발수 특성

Table 4. Analysis of Contact Angle and Contact Hysteresis Angle after Coating of Anodized 1050 Aluminum Alloy.

Sample	Water		Oil	
	Contact Angle	Contact Angle Hysteresis	Contact Angle	Contact Angle Hysteresis
A	177.82 ± 1.55°	6.31 ± 1.74°	128.85 ± 1.11°	22.92 ± 5.25°
B	178.23 ± 1.26°	5.45 ± 1.12°	129.68 ± 1.45°	17.36 ± 3.17°
C	176.31 ± 3.76°	13.89 ± 5.44°	128.81 ± 0.41°	23.32 ± 3.66°
D	144.45 ± 3.34°	24.66 ± 5.82°	122.07 ± 4.82°	23.65 ± 3.17°

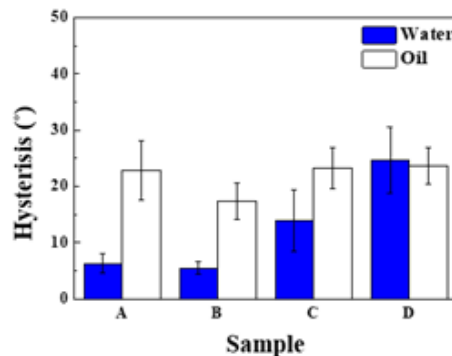
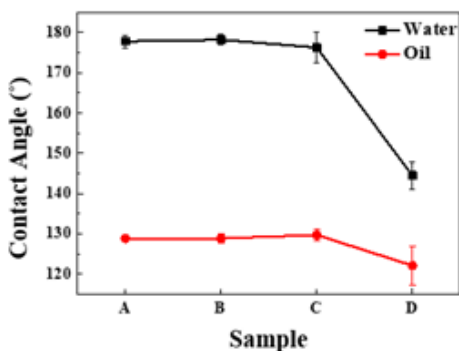


Fig. 8. Contact angle and contact hysteresis graph after coating of anodized 1050 aluminum alloy.

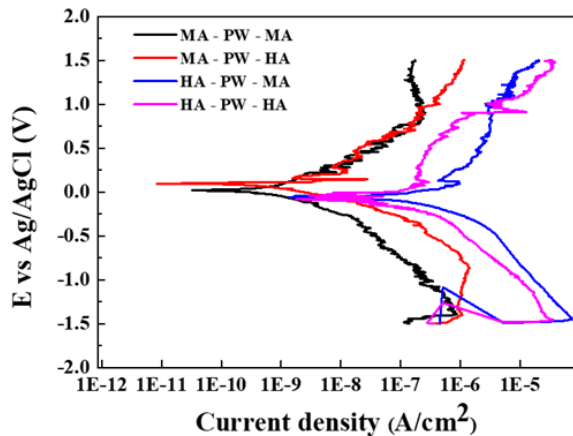


Fig. 9. Potential polarization curves according to anodization process conditions.

Table 5. Potential polarization test measurement according to anodization process conditions. (A) MA - PW - MA, (B) MA - PW - HA, (C) HA - PW - MA, (D) HA - PW - HA.

Sample	E_{Corr} (mV)	I_{Corr} (A/cm ²)
A	18.4	9.56×10^{-11}
B	103	6.39×10^{-11}
C	-49.1	1.39×10^{-9}
D	-111	4.28×10^{-9}

이 우수한 샘플에서 부식전위는 양의방향으로 질량손실을 의미하는 부식 전류밀도는 가장 낮은 것으로 나타났다. 표면의 접촉각이 향상되면 부식을 일으키는 물질의 자체가 모재 내부로 침투가 어려워 내식성이 향상되는 것으로 보이며, 고체 분율이 작은 나노구조물로 형성된 표면에 낮은 표면에너지를 가지는 코팅을 하면 기공내에 많은 공기를 가두어 공기층으로 인한 부식물질의 침투가 더욱 어려워지는 것으로 사료된다. 발수특성이 향상됨에 따라 내식성 또한 향상됨을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 알루미늄 1050 합금을 양극산화 공정 모드를 다르게 하여 표면에 형성된 나노구조물 형상별 특성을 관찰하였다. 표면에 양극산화로 형성된 나노구조물 위에 낮은 표면에너지를 가지는 물질을 코팅하여 기능성 표면을 평가하였다. 각 모드 별 고체 분율이 다르며 이에 따라 친수성 및 발수성이 다름을 확인하였다. 고체 분율이 작은 양극산화 모드 샘플에서 친수성 또한 우수하였으며, 이에 따라 코팅후에 발수성을 관찰하였을 때 발수성 또한 우수한 것을 확인하였다. 낮은 고체 분율을 가지는 나노구조물이 형성된 표면에서 더 우수한 발수성이 얻어졌다 또한 발수성이 우수한 표면이 더 높은 부식전위 및 더 낮은 부식전류

밀도를 나타냈다. 이는 발수성 고분자 코팅 후에 더 많은 공기가 다공성 산화피막 내부에 가두어짐에 따라 부식 물질의 침투가 어려워짐으로써 내식성이 크게 향상된 것으로 사료된다. 각 산업에 맞는 특성을 양극산화 공정으로 구현하여 적용시키는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

본 과제(결과물)는 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 3단계 산학연협력 선도대학 육성사업(LINC 3.0)의 연구결과입니다 (202202110001).

References

- [1] J. R. Davis, Aluminum and aluminum alloys, ASM International, (1993) 3-10.
- [2] A. Belwalkar, E. Grasing, W. Van Geertruyden, Z. Huang, W. Z. Misiolek, Effect of processing parameters on pore structure and thickness of anodic aluminum oxide (AAO) tubular membranes, *J. Membr. Sci.*, 319 (2008) 192-198.
- [3] R. Furneaux, W. R. Rigby, A. P. Davidson, The formation of controlled-porosity membranes from anodically oxidized aluminium, *Nature*, 337 (1989) 147-149.
- [4] T. Onda, S. Shibuichi, N. Satoh, K. Tsujii, Super-water-repellent fractal surfaces, *Langmuir*, 12 (1996) 2125-2127.
- [5] C. Jeong, C.H. Choi, Single-step direct fabrication of pillar-on-pore hybrid nanostructures in anodizing aluminum for superior superhydrophobic efficiency, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 4 (2012) 842-848.
- [6] F. Zhang, L. Zhao, H. Chen, S. Xu, D. G. Evans, X. Duan, Corrosion resistance of superhydrophobic layered double hydroxide films on aluminum, *Angew. Chem., Int. Ed.* 47 (2008) 2466-2469.
- [7] L. Cao, A. K. Jones, V. K. Sikka, J. Wu, D. Gao, Anti-icing superhydrophobic coatings *Langmuir*, 25 (2009) 12444-12448.

- [8] C. Jeong, H. Ji, Systematic control of anodic aluminum oxide nanostructures for enhancing the superhydrophobicity of 5052 aluminum Alloy, *materials*, 12 (2019) 3231.
- [9] F. Keller, M. S. Hunter, D. L. Robinson, Structural features of oxide coatings on aluminum, *J. Electrochem. Soc.*, 100 (1953) 411-419.
- [10] J. Fahim, S. M. M. Hadavi, H. Ghayour, S. H. Tabrizi, Cavitation erosion behavior of super-hydrophobic coatings on Al5083 marine aluminum alloy, *Wear*, 424 (2019) 122-132.
- [11] C. Jeong, J. Lee, K. Sheppard, C. H. Choi, Air-impregnated nanoporous anodic aluminum oxide layers for enhancing corrosion resistance of aluminum, *Langmuir*, 31 (2015) 11040-11050.
- [12] P. A. Dick, A. Konrath, Y. R. Melo, C. Radtke, L. F. Dick, Aluminum anodizing with simultaneous silanization for increased hydrophobicity and corrosion protection, *Applied Surface Science*, 593 (2022) 153392.
- [13] Y. Wang, W. wang, L. Zhong, J. Wang, Q. Jiang, X. Guo, Super-hydrophobic surface on pure magnesium substrate by wet chemical method, *Appl. Surf. Sci.*, 256 (2010) 3837.
- [14] C. Jeong, A study on functional hydrophobic stainless steel 316L using single-step anodization and a self-assembled monolayer coating to improve corrosion resistance, *Coatings*, 12 (2022) 395.
- [15] C. Jeong, Stevens institute of technology, New Jersey (2013) 132.
- [16] E. Puukilainen, T. Rasilainen, M. Suvanto, T. A. Pakkanen, Superhydrophobic polyolefin surfaces: controlled micro- and nanostructures, *Langmuir*, 23 (2007) 7263-7268.
- [17] K. Nielsch, J. Choi, K. Schwirn, R. B. Wehrspohn, U. Gösele, Self-ordering regimes of porous alumina: the 10 porosity rule, *Nano letters*, 2 (2002) 677-680.
- [18] Y. J. Park, H. J. Ji, C. Jeong, Development of superhydrophilic 6061 aluminum alloy by stepwise anodization according to pore-widening time. *Korean J. Met. Mater.*, 58 (2020) 97.
- [19] A. S. Darmawan, T. W. B. Riyadi, A. Hamid, B. W. Febriantoko, B. S. Putra, Corrosion resistance improvement of aluminum under anodizing process, *AIP Conf. Proc.*, 1977 (2018) 020006.
- [20] Y. Huang, H. Shih, H. Huang, J. Daugherty, S. Wu, S. Ramanathan, C. Chang, F. Mansfeld, Evaluation of the corrosion resistance of anodized aluminum 6061 using electrochemical impedance spectroscopy (EIS), *Corros. Sci.*, 50 (2008) 3569.
- [21] L. Benea, N. S. Bogatu, R. Chiriac, Electrochemically obtained Al₂O₃ nanoporous layers with increased anticorrosive properties of aluminum alloy, *J. Mater. Res. Technol.* 17 (2022) 2636.
- [22] A. Rattanasatitkul, S. Prombanpong, P. Tuengsook, An effect of process parameters to anodic thickness in hard anodizing process, *Mater. Sci. Forum.*, 872 (2016) 168.
- [23] A. Z. Zakaria, K. S. nezhad, T. N. Chakherlou, A. Olad, Effects of aluminum surface treatments on the interfacial fracture toughness of carbon-fiber aluminum laminates, *Eng. Fract. Mech.*, 172 (2017) 139-151.
- [24] J. Y. Oh, E. M. Kim, G. S. Heo, D. H. Kim, D. Lee, H. C. Jeong, D. S. Seo, Superior nanopatterns via adjustable nanoimprint lithography on aluminum oxide in high-K thin films with ultraviolet curable polymer, *RSC Adv.*, 12 (2022) 88-93.
- [25] H. Ji, C. Jeong, Fabrication of superhydrophobic aluminum alloy surface with hierarchical pore nanostructure for anti-corrosion, *Corros. Sci. Tech.*, 18 (2019) 228-231.

- [26] C. Jeong, C. H. Choi, Three-dimensional (3D) anodic aluminum surfaces by modulating electrochemical method, *J. Korean Inst. Surf. Eng.*, 50 (2017) 427-431.
- [27] R. N. Wenzel, Resistance of solid surfaces to wetting by water, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 28 (1936) 988-994.
- [28] A. B. D. Cassie, S. Baxter, Wettability of porous surfaces, *J. Chem. Soc. Faraday Trans. 40* (1944) 546-551.
- [29] Wang, D. Zhang, Z. Lu, S. Sun, Fabrication of slippery lubricant-infused porous surface for inhibition of microbially influenced corrosion, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 8 (2016) 1120-1127.
- [30] P. Vengatesh, M. A. Kulandainathan, Hierarchically ordered self-lubricating superhydrophobic anodized aluminum surfaces with enhanced corrosion resistance, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 7 (2015) 1516-1526.