

알루미늄 5052 및 6061 합금의 양극산화 표면처리를 통한 발수 특성 및 부식 특성 비교

박영주 · 정찬영[†]

동의대학교 신소재공학과, 부산광역시 부산진구 엄광로 176
(2022년 5월 29일 접수, 2022년 6월 15일 수정, 2022년 6월 15일 채택)

Comparison of Hydrophobicity and Corrosion Properties of Aluminum 5052 and 6061 Alloys After Anodized Surface Treatment

Youngju Park and Chanyoung Jeong[†]

Department of Advanced Materials Engineering, Dong-eui University, Busan 47340, Korea

(Received May 29, 2022; Revised June 15, 2022; Accepted June 15, 2022)

Aluminum alloy is used by adding various elements according to the needs of the industry. Aluminum alloys such as 5052 and 6061 are known to possess excellent corrosion resistance by adding Mg. Despite their excellent physical properties, corrosion can occur. To solve this problem, an anodization technique generally can improve corrosion resistance by forming an oxide structure with maximized hydrophobic properties through coatings. In this study, the anodizing technique was used to improve the hydrophobicity of aluminum 5052 and 6061 by creating porous nanostructures on top of the surface. An oxide film was formed by applying anodizing voltages of 20, 40, 60, 80, and 100 V to aluminum alloys followed by immersion in 0.1 M phosphoric acid for 30 minutes to expand oxide pores. Contact angle and corrosion characteristics were different according to the structure after anodization. For the 5052 aluminum, the corrosion potential was improved from -363 mV to -154 mV as the contact angle increased from 116° to 136°. For the 6061 aluminum, the corrosion potential improved from -399 mV to -124 mV when the contact angle increased from 116° to 134°.

Keywords: Hydrophobic, Anodization, Aluminum, Light Metal, Corrosion

1. 서론

발수성 표면은 물에 대한 젖음성을 감소시키는 것으로 연꽃잎과 소금쟁이의 다리 등 자연에서 영감을 받아 연구되었으며, 방오, 방식, 결빙 방지, 마모 등의 여러 문제를 해결할 방법으로 주목받고 있다 [1-4].

벨브 금속 [5] 중 하나인 알루미늄은 파이프 배관, 모바일 기기, 선박, 자동차, 건축자재, 가전제품 등 다양한 산업에서 사용되고 있으며 [6-7], 사용 목적에 따라 여러 가지 원소를 첨가하여 다양한 알루미늄 합금으로 이용된다. 여러 알루미늄 합금 중에 Mg, Si 주성분으로 첨가된 5천 계열과 6천 계열은 가장 많이 사용되고

내식성이 뛰어난 합금이다 [8-10].

그러나 알루미늄 합금은 자연적인 부동태 피막이 존재하여도 지속적인 부식 물질의 침투가 발생하는 해양 및 대기 환경에서는 부식 문제가 발생한다 [11]. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근 알루미늄 발수성 표면을 제작하기 위한 다양한 연구가 활발히 진행 중이다 [12]. 발수성 표면은 마이크로 또는 나노 구조물을 형성하는 것이 중요하며, 플라즈마 전해 산화 [13], 리소그래피 [14], 산 및 알칼리 에칭법 [15] 등의 여러 방법이 있으나 비용 및 가공 면적에 제한이 있다.

전기화학적 방법인 양극 산화법은 [16] 경제적이고 가공 크기에 제한이 없으며, 표면 나노 구조물 형성의 조절이 가능하다는 장점을 지닌다 [17]. 산 전해액 안에 금속 시편을 양극으로 보조 전극을 음극으로 하여 금속 시편에 인위적으로 두꺼운 산화막을 형성할 수

These authors contributed equally to this work as the first author

[†]Corresponding author: cjeong@deu.ac.kr

정찬영: 교수, 박영주: 연구원

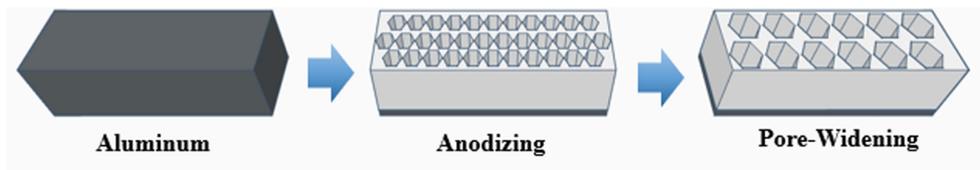


Fig. 1. Schematic of Anodization film formation in the study

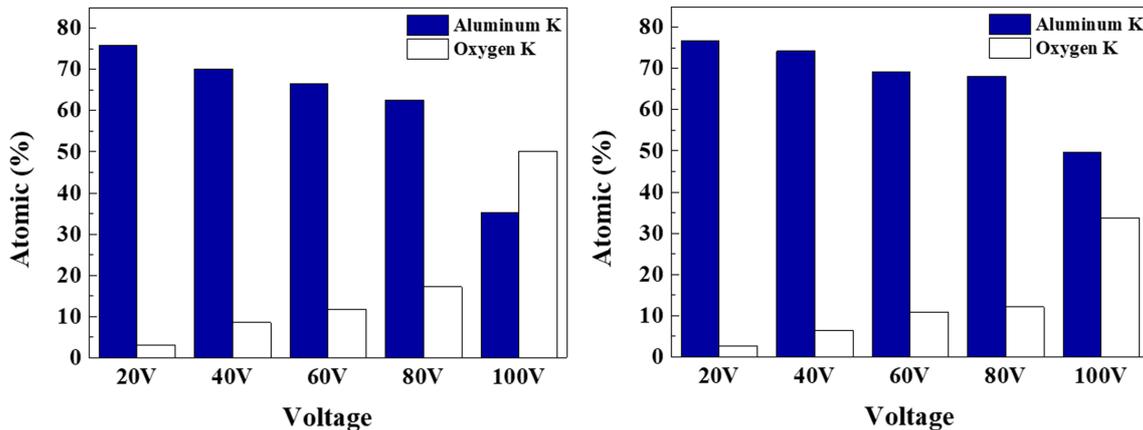


Fig. 2. EDS analysis Comparison of aluminum and oxygen contents by anodization applied voltage: (a) 5052 Aluminum, (b) 6061 Aluminum

있다. 형성된 산화피막은 내부가 치밀하여 기공과 같은 빈공간이 없는 장벽형 산화 피막과 기공과 기공 사이에 빈공간이 존재하며 규칙적으로 배열된 다공성 나노 튜브형 피막으로 나누어진다 [18]. 하지만 기공은 부식 물질 침투의 통로가 되어 기공만 있을 경우에는 부식이 더욱 빠르게 일어난다. 그러므로 다공성 표면에 표면에너지가 낮은 물질을 코팅하여 기공 내에 다량의 공기를 가두어 부식을 막는 절연층 역할을 한다 [19-24].

본 논문에서는 여러 알루미늄 합금 중 대표적인 5천계열과 6천계열 합금의 표면에 양극산화 전압을 조절한 공정으로 나노 구조물 생성 후 표면에너지가 낮은 물질인 FDTS를 코팅하여 [25,26] 각 전압별 구조물의 코팅 전과 후의 표면 접촉각을 측정하여 젖음성을 확인하였으며 [27], 접촉각에 따른 전기화학적 부식 방지 특성을 3 전극 시스템을 통하여 평가하였다.

2. 연구방법

연구에서는 5052 알루미늄과 6061 알루미늄 합금을 2.5 cm × 3.0 cm × 1.2 cm 크기로 가공하였다. 가공된 샘플을 아세톤과 에탄올에 침지 시켜 초음파 세척하여 표면 오염물을 제거한 후 건조하였다.

양극산화 실시 이전에 알루미늄 5052 및 6061 합금

을 상온의 과염소산, 에탄올 1:4 비율 용액에서 20 V, 1분간 전해연마를 실시하였으며, 양극산화는 전해연마된 알루미늄 합금을 양극으로 백금을 음극으로 하여 실시하였다. 0.3 M의 옥살산 전해액에서 이중 자켓 비커 및 온도 순환 장치를 이용하여 양극산화 공정시에는 0 °C로 유지하였다. 인가 전압은 20 V, 40 V, 60 V, 80 V, 100 V로 하고 처리시간을 5분으로 고정하여 실시하였으며, 양극산화 후 화학적 에칭인 기공 확장은 0.1 M 인산 용액에서 30분 동안 침지하여 진행하였다. 공정이 끝난 후에는 아세톤과 에탄올로 세척 후에 건조하였으며, 공정은 Fig. 1에 나타냈다.

표면의 젖음성 특성은 접촉각 측정으로 관찰하였으며, 접촉각은 증류수 3 μL의 액적으로 각 샘플당 5회씩 측정하였다. 양극산화 후의 샘플로 친수성을 측정하였으며, FDTS용액으로 자가조립 단분자막 코팅을 이용하여 발수성 구현 후 접촉각을 분석하였다 [28-30].

나노 구조물 분석을 위해 양극산화 되어진 시편을 절단하여 스테이지 위에 카본 테이프를 고정하였으며, 고정 후 전도성 향상을 위해 40초간 백금 코팅을 하였다. 전계 방사형 주사전자 현미경을 통해 기공의 크기, 기공 사이 거리, 산화피막의 두께를 분석하였으며, 에너지 분산형 분광분석(EDS)을 통하여 산화피막 형성과 두께에 따른 산소 함량을 분석하였다. 내식성 평가는

전기화학적 방법인 동전위 분극 시험을 통하여 측정하였으며, 측정은 3 전극으로 작업 전극에 평가 시편을 상대 전극에 백금(매쉬)을 기준전극은 Ag/AgCl 로 하여 -1.5 V 에서 1.5 V까지 1 mV/sec 주사 속도로 측정하였다.

3. 연구결과 및 고찰

본 연구는 알루미늄 5052, 6061 합금의 양극산화를 동일한 공정 시간에서 20 V, 40 V, 60 V, 80 V, 100 V 의 전압을 인가하여 구조물 형상에 따른 특성을 관찰하였다. Fig. 2는 5052 와 6061 알루미늄 합금의 인가

전압 별 양극산화 후 알루미늄과 산소의 함량을 나타내었으며, Table 1과 Table 2는 산화피막의 표면에서 한 점의 EDS 정량분석 결과이다. Fig. 2와 Table 1 및 Table 2를 통해 두 알루미늄 합금의 양극산화 인가 전압이 증가할수록 알루미늄 함량은 감소하고 산소 함량은 증가하는 것을 알 수 있으며, 5052 알루미늄 합금이 6061 알루미늄 합금보다 산소함량이 더 높은 것을 확인하였다. 양극산화 인가전압이 증가할수록 산화피막은 두꺼워지므로 알루미늄 함량이 감소함에 따라 산소 함량이 증가한다. 이는 6061 합금에 비전도성 물질인 실리콘의 첨가로 인해 산화피막의 두께가 5052 합금보다 작아 산소 함량이 낮은 것으로 보인다.

Table 1. EDS analysis of 5052 aluminum anodization applied voltage

Element (Atomic %)	Voltage					
	Bare 5052	20 V	40 V	60 V	80 V	100 V
C K	13.82	20.49	19.52	19.97	18.45	14.15
Mg K	2.36	0.63	1.91	1.91	1.76	0.55
O K	0.95	3.01	8.53	11.60	17.15	50.16
Al k	82.87	75.87	70.04	66.51	62.64	35.15

Table 2. EDS analysis of 6061 aluminum anodization applied voltage

Element (Atomic %)	Voltage					
	Bare 6061	20 V	40 V	60 V	80 V	100 V
C K	14.40	19.63	18.42	19.10	19.09	15.91
Mg K	0.72	0.68	0.63	0.55	0.54	0.38
Si K	0.34	0.34	0.33	0.30	0.25	0.28
O K	1.05	2.54	6.39	10.78	12.04	33.66
Al k	83.48	76.80	74.23	69.28	68.08	49.78

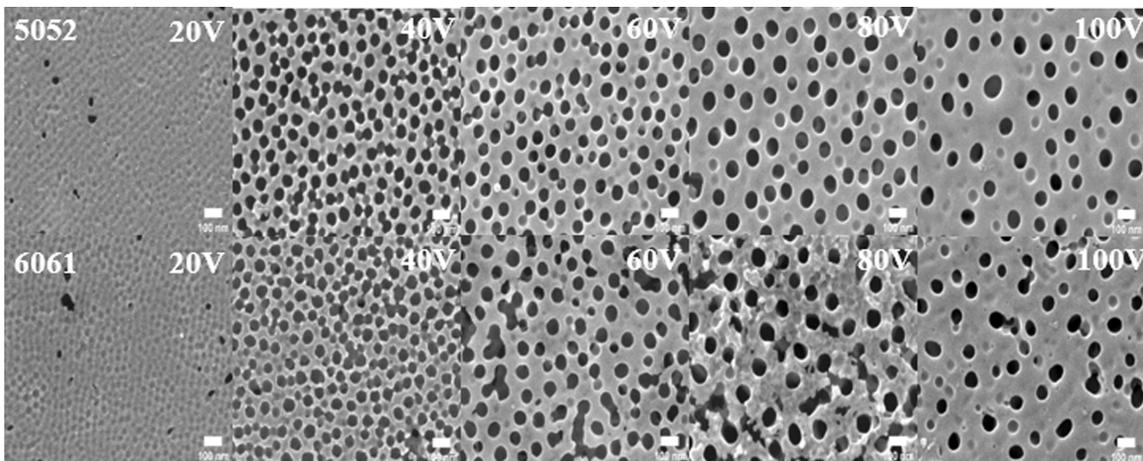


Fig. 3. FE-SEM top view image by applied voltage for anodization

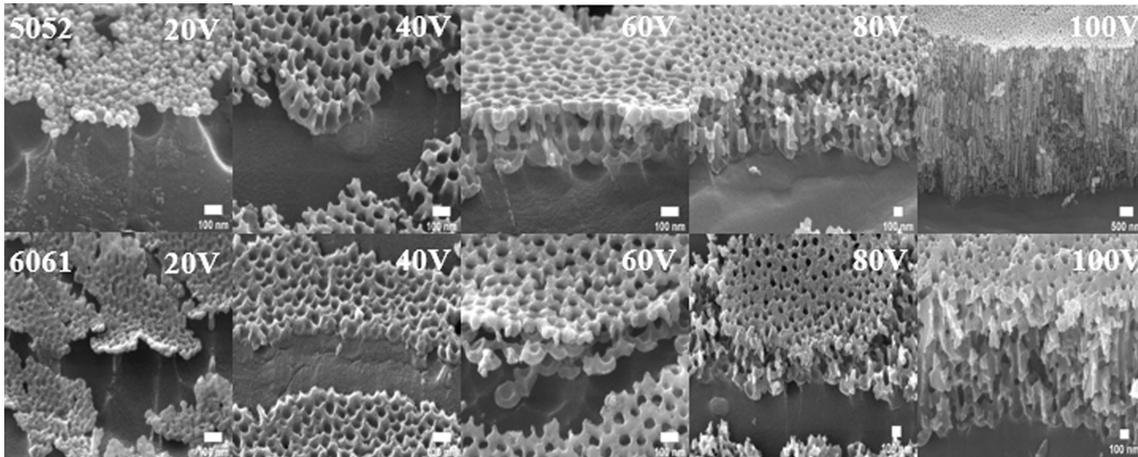


Fig. 4. FE-SEM cross view image by applied voltage for anodization

Fig. 3과 4는 5052, 6061 알루미늄 합금 양극산화 시편의 기공확장 공정후 인가 전압 별 FE-SEM 이미지이다. Fig. 3은 Top view이며 다기공성 양극산화 피막이 형성됨을 알 수 있고, Fig. 4는 Cross view이며 인가 전압이 증가함에 따라 산화 피막이 커지는 것을 확인하

였다. Fig. 5와 Table 3은 기공 크기(Pore size, D_p), 기공 사이 거리(Interpore distance, D_{int}), 양극산화 피막 두께, 고체 분율(Solid fraction)을 그래프 및 수치로 나타내었다. 양극산화 5052 알루미늄 합금의 기공 크기는 20 V ~ 100 V의 인가 전압에서 33.43 ~ 72.16 nm로 증

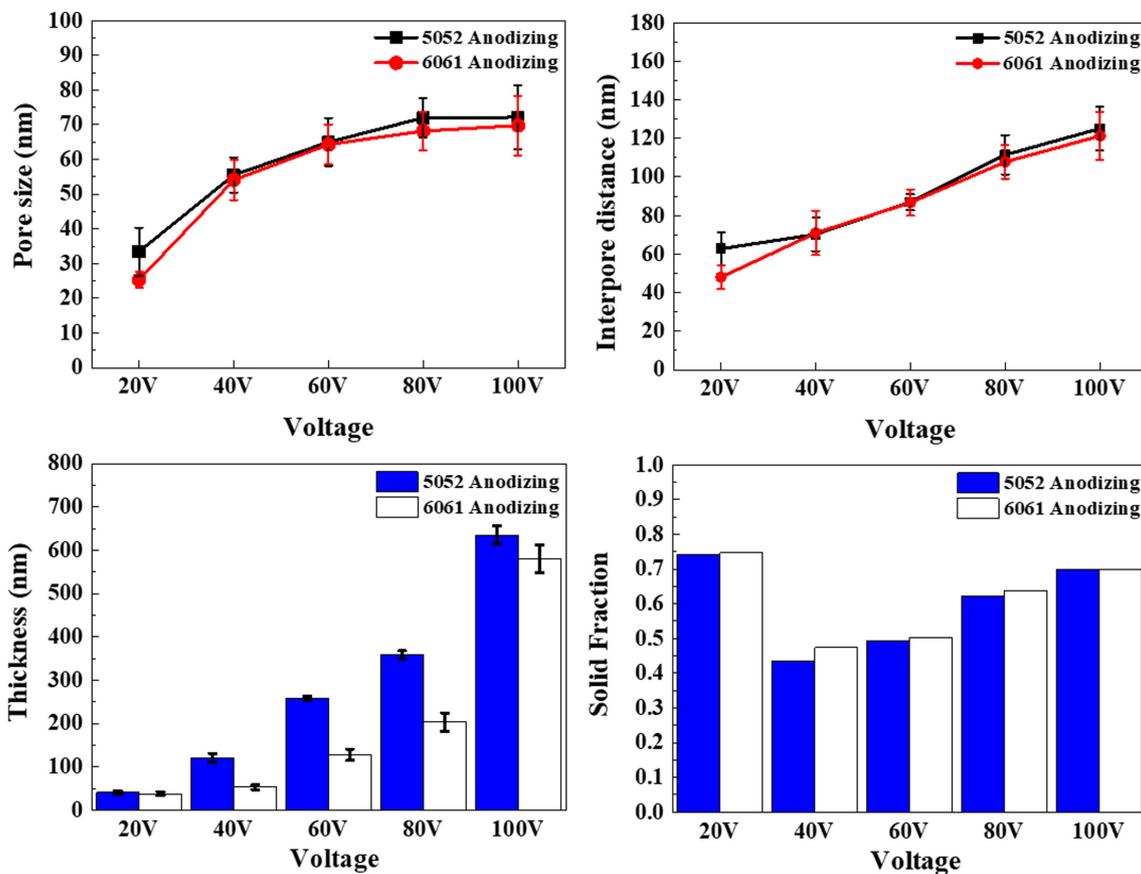


Fig. 5. Comparison of pore size, interpore distance, anodization film thickness and solid fraction after anodization of aluminum 5052 and 6062

Table 3. Analysis of pore size, interpore distance, anodization film thickness and solid fraction after anodization of aluminum 5052 and 6062

	Voltage	D _p (nm)	D _{int} (nm)	Thickness (nm)	Solid Fraction
5052 Anodizing	20V	33.43 ± 6.87	62.73 ± 8.51	40.92 ± 3.49	0.742
	40V	55.50 ± 5.12	70.28 ± 8.73	121.08 ± 10.24	0.435
	60V	64.99 ± 6.91	86.98 ± 4.16	257.67 ± 5.62	0.494
	80V	71.99 ± 5.66	111.48 ± 10.17	359.07 ± 8.84	0.622
	100V	72.16 ± 9.17	125.13 ± 11.37	635.21 ± 21.01	0.698
6061 Anodizing	20V	25.30 ± 2.27	47.99 ± 6.25	37.81 ± 4.30	0.747
	40V	54.07 ± 5.78	70.98 ± 11.40	53.08 ± 5.51	0.474
	60V	64.29 ± 5.72	86.73 ± 6.80	128.10 ± 13.24	0.502
	80V	68.18 ± 5.52	107.81 ± 8.73	203.14 ± 21.33	0.637
	100V	69.75 ± 8.61	121.27 ± 12.38	580.57 ± 32.34	0.700

가하였으며, 기공 사이 거리 또한 62.73 ~ 125.13 nm로 증가하였다. 또한 양극산화 6061 알루미늄 합금은 20 V ~ 100 V의 인가 전압에서 기공 크기는 25.30 ~ 69.75 nm, 기공 사이 거리는 47.99 ~ 121.27 nm로 증가하였다. 양극산화 피막 두께는 5052 알루미늄 합금에서 40.92 ~ 635.21 nm까지 성장하였으며, 6061 합금에서는 37.81 ~ 580.57 nm까지 성장하였다. 표면적 대비 비표면적 비율인 고체 분율은 식 equation (1)에 의해 산출되었다.

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

여기서, f_{SL} 은 고체 분율, a 는 기공 사이 거리, r 는 기공의 반지름을 나타냈다. 양극산화 알루미늄 5052 합금의 고체 분율은 20 V에서 0.742, 40 V는 0.435, 60 V는 0.494, 80 V는 0.622이며, 100 V는 0.698로 측정되었으며, 6061 합금은 20 V에서 0.747, 40 V에서 0.474, 60 V에서 0.502, 80 V에서 0.637, 100 V에서 0.700으로 측정되었다. Fig. 5와 Table 3을 통하여 보았을 때 두 합금 모두 양극산화 시 인가 전압이 증가할수록 기공 크기, 기공 사이 거리가 커지며 양극산화 피막의 두께 또한 선형적으로 증가하였다. 그러나 6061합금에는 양극산화 반응에 참여하지 않는 비전도성 물질인 실리콘의 첨가로 인해 5052 합금보다 기공 크기, 기공 사이 거리, 양극산화 피막 두께가 더 작게 성장하였다. 고체 분율은 두 합금 모두 비슷한 경향을 보였으며, 40 V에서 가장 작은 고체 분율 가지는 것으로 보아, 양극산화 시 같은 처리 시간에서 인가 전압을 다르게 하였을 때 40 V 전압의 비표면적이 가장 큰 것으로 확인되었다.

Fig. 6, 7과 Table 4는 양극산화 후 표면에너지가 낮은 물질인 FDTS 용액으로 코팅 전과 후의 접촉각을 나타내었다. 5052 합금에서 코팅 전의 접촉각은, 20 V

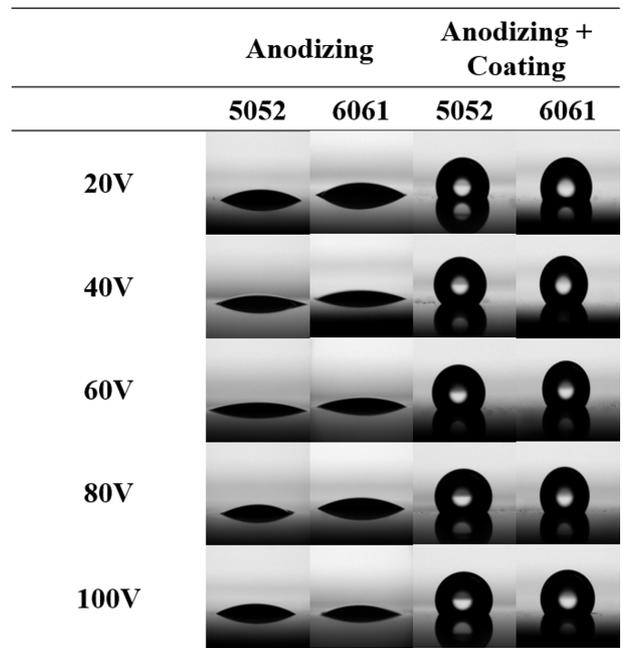


Fig. 6. Contact angle images before and after coating of anodized 5052 and 6061 aluminum

에서는 19.30°, 40 V는 8.85°, 60 V는 13.25°, 80 V는 14.66°, 100 V는 17.90°이며, 6061 합금에서 20 V는 17.86°, 40 V는 9.68°, 60 V는 12.24°, 80 V는 13.29°, 100 V는 16.49°로 측정되었다. 두 합금은 모든 전압에서 친수 특성이 나타났고, 고체 분율이 낮은 40 V의 인가 전압에서 기공 벽이 가장 얇아짐으로 인해 액적이 기공 안으로 빠르게 침투하여 가장 낮은 접촉각을 확인하였다. 코팅 후의 접촉각은 5052 합금에서 인가 전압이 20 V일 때 116.74°, 40 V는 136.02°, 60 V는 134.71°, 80 V는 129.45°, 100 V는 125.26°이며, 6061

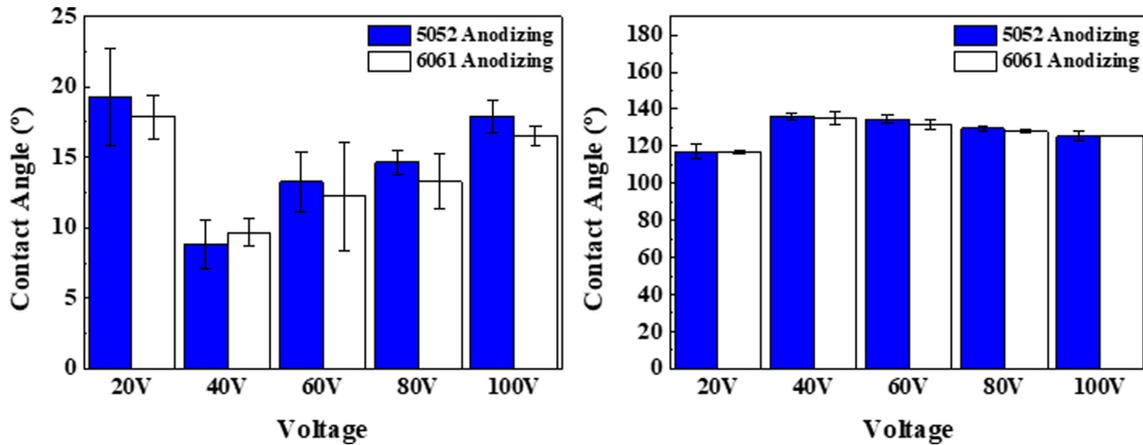


Fig. 7. Comparison of contact angles before and after anodized 5052 and 6061 aluminum coatings

Table 4. Analysis of contact angle before and after anodizing 5052, 6061 aluminum coating

		20V	40V	60V	80V	100V
Anodizing	5052	19.30° ± 3.45	8.85° ± 1.74	13.25° ± 2.11	14.66° ± 0.88	17.90° ± 1.19
	6061	17.86° ± 1.54	9.68° ± 0.99	12.24° ± 3.83	13.29° ± 1.96	16.49° ± 0.70
Anodizing + coating	5052	116.74° ± 4.29	136.02° ± 1.48	134.71° ± 2.17	129.45° ± 1.70	125.26° ± 2.49
	6061	116.95° ± 0.93	135.25° ± 3.48	131.49° ± 2.72	128.09° ± 1.25	125.48° ± 0.26

합금에서 20 V는 116.95°, 40 V는 135.25°, 60 V는 131.49°, 80 V는 128.09°, 100 V는 125.48°로 측정되었다. 코팅 후의 접촉각은 코팅 전과 반대로 두 합금 모두 고체 분율이 낮은 40 V에서 가장 높게 측정되었다. 고체 분율이 낮아짐에 따라 액적과 표면의 접촉 면적이 작아져 높은 접촉각이 측정되는 것으로 사료된다.

Fig. 8과 Table 5는 양극산화 된 5052 및 6062의 동전위 분극 시험을 통하여 측정된 부식 전위 및 부식 전류 밀도이다. 5052 합금의 부식 전위는 양극산화 전

-368 mV이며, 양극산화 인가 전압이 20 V, 40 V, 60 V, 80 V, 100 V순으로 각각 -363 mV, -154 mV, -200 mV, -254 mV, -355 mV이며, 부식 전류밀도는 양극산화 전 9.06×10^{-7} , 양극산화 후 5.38×10^{-7} , 1.86×10^{-8} , 2.67×10^{-8} , 8.82×10^{-8} , 3.16×10^{-7} 이다. 또한 6062 합금의 부식 전위는 양극산화 전은 -537 mV, 양극산화 후에는 각각 -399 mV, -124 mV, -192 mV, -275 mV, -281 mV이며, 부식 전류밀도는 양극산화 전 5.45×10^{-7} , 양극산화 후 3.81×10^{-7} , 9.95×10^{-9} , 5.39×10^{-8} , $9.88 \times$

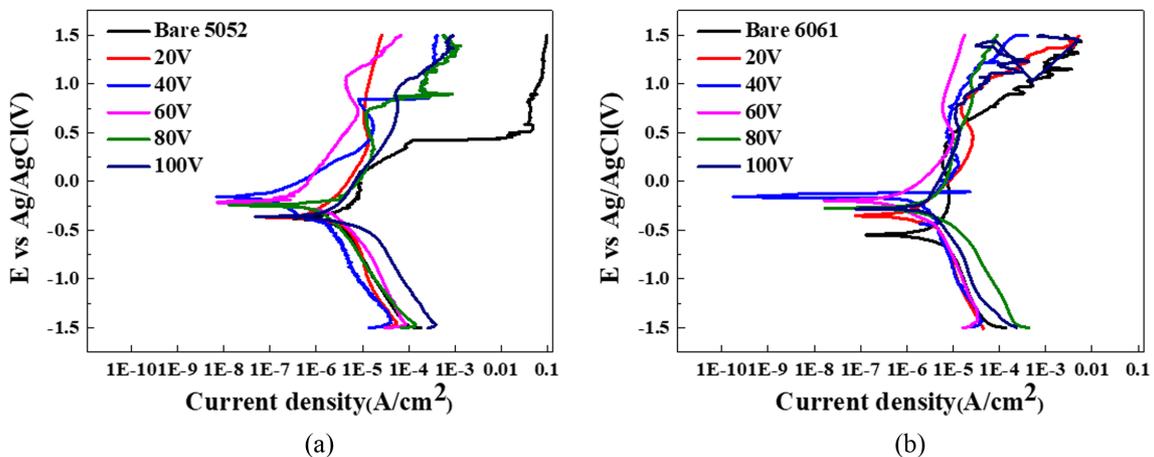


Fig. 8. Potential polarization curve for each applied voltage for anodization: (a) 5052 Aluminum, (b) 6061 Aluminum

Table 5. Potential dynamic polarization test results after FDTS coating of anodized samples at different applied voltages

		Bare Al	20 V	40 V	60 V	80 V	100 V
E_{corr} (mV)	5052	-368	-363	-154	-200	-254	-355
	6061	-537	-399	-124	-192	-275	-281
I_{corr} (A/cm ²)	5052	9.06×10^{-7}	5.38×10^{-7}	1.86×10^{-8}	2.67×10^{-8}	8.82×10^{-8}	3.16×10^{-7}
	6061	5.45×10^{-7}	3.81×10^{-7}	9.95×10^{-9}	5.39×10^{-8}	9.88×10^{-8}	1.54×10^{-7}

10^{-8} , 1.54×10^{-7} 으로 나타났다. 6061 합금에 첨가된 실리콘은 이온화 에너지가 높아 5052 합금보다 높은 부식 전위 및 낮은 부식 전류밀도가 나타나는 것으로 보여진다. 두 합금 모두 양극산화 후 부식특성은 향상되었으며, 40 V의 인가 전압에서 높은 부식 전위와 낮은 전류밀도를 확인하였다. 접촉각이 클수록 부식 전위는 증가하였으며, 부식 전류밀도는 감소하였다. 표면의 접촉각이 클수록 부식을 일으키는 염소이온의 침투가 어려워져 부식 방지 특성이 향상되었다. 낮은 고체 분율을 가지는 표면에서 표면에너지가 낮은 물질을 코팅하여 기공 안에 많은 공기를 가두어 부식물질의 침투가 더욱 어려워지는 것으로 사료된다. 즉, 우수한 발수성 가진 표면에서는 모재에 침투하는 외부의 부식 인자들이 차단되어 우수한 내식성이 나타난다.

4. 결론

본 연구에서는 알루미늄 5052 및 6062 합금에 양극산화 공정을 적용하여 생성된 다공성 산화피막의 특성을 관찰하였다. 양극산화로 형성된 다공성 산화피막에 표면에너지가 낮은 물질을 코팅하여 발수성 표면을 구현하여 비교 평가하였다. 양극산화 인가 전압이 증가할수록 다공성 구조물의 기공 크기, 기공 사이 거리, 산화피막 두께가 증가하였으며, 5052 합금이 비전도성 물질인 실리콘을 함유한 6061 합금보다 더 크게 성장하였다. 두 합금 모두 인가전압이 40 V에서 낮은 고체 분율을 가지는 것으로 확인하였다. 이는 코팅 전에 가장 낮은 접촉각이 측정되며, 코팅 후에는 가장 높은 접촉각이 확인되었다. 또한 내식성 평가도 접촉각이 높은 40 V 인가 전압의 표면에서 고체 분율이 낮아 코팅 후에 많은 양의 공기를 가두어 부식성 물질이 침투하지 못하여 높은 부식 전위가 나타나며, 질량의 손실을 나타내는 부식 전류 밀도는 낮게 측정되었다. 양극산화 기술로 다양한 나노 구조물을 구현하여 발수 특성을 극대화할 수 있다. 이를 다른 합금에도 적용하여 여러 산업에 활용할 수 있도록 지속적인 연구가 필요하다.

References

1. K. Olkowicz, Z. Buczek, B. Nasilowska, K. Kowalczyk, J. Czwartos, Superhydrophobic Coating Based on Porous Aluminum Oxide Modified by Polydimethylsiloxane (PDMS), *Materials*, **15**, 1042 (2022). Doi: <https://doi.org/10.3390/ma15031042>
2. C. Jeong, C. H. Choi, Single-Step Direct Fabrication of Pillar-on-Pore Hybrid Nanostructures in Anodizing Aluminum for Superior Superhydrophobic Efficiency. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **4**, 842 (2012). Doi: <https://doi.org/10.1021/am201514n>
3. Y. Kim, W. Hwang, H. Cho, J. W. Lee, A study on the minute change of the alumina surface structure according to the anodizing conditions for the production of a robust wettability-modified surfaces, *Surface & Coatings Technology*, **439**, 128453 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128453>
4. 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**, 395 (2022). Doi: <https://doi.org/10.3390/coatings12030395>
5. G. D. Sulka, Chapter on-Introduction to anodization of metalsm *Nanostructured Anodic Metal Oxides*, p. 1, (2020). Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816706-9.00001-7>
6. J. G. Carrillo, W. J. Cantwell, Mechanical properties of a novel fiber-metal laminate based on a polypropylene composite, *Mechanics of Materials*, **41**, 828 (2009). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2009.03.002>
7. L. Ferrante, F. Sarasini, J. Tirillo, L. Lampani, T. Valente. P. Gaudenzi, Low velocity impact response of basalt-aluminium fibre metal laminates, *Materials and Design*, **98**, 98 (2016). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.002>
8. C. Blawert, W. Dietzel, E. Ghali, G. Song, Anodizing Treatments for Magnesium Alloys and Their Effect on Corrosion Resistance in Various Environments, *Advanced engineering materials*, **8**, 511 (2006).

- Doi: <https://doi.org/10.1002/adem.200500257>
9. K. K. Lau, J. Bico, K. B. Teo, M. Chhowalla, G. A. Amaralingam, W. I. Milne, K. K. Gleason, Superhydrophobic Carbon Nanotube Forests *Nano Letters*, **3**, 1701 (2003). Doi: <https://doi.org/10.1021/nl034704t>
 10. D. T. H. Hue, V. K. Tran, V. L. Nguyen, V. H. Dinh, T. G. Nguyen, High strain-rate effect on microstructure evolution and plasticity of aluminum 5052 alloy nano-multilayer: A molecular dynamics study, *Vacuum*, **201**, 111104 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111104>
 11. J. L. Trompette, L. Arurault; S. Fontorbes, L. Massot, Influence of the anion specificity on the electrochemical corrosion of anodized aluminum substrates, *Electrochimica Acta*, **55**, 2901 (2010). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2009.12.063>
 12. X. J. Feng, L. Jiang, Design and creation superwetting/Antiwetting surfaces, *Advanced Materials*, **18**, 3063 (2006). Doi: <https://doi.org/10.1002/adma.200501961>
 13. M. Kaseem, S. Fatimah, N. Nashrah Y. G. Ko, Recent progress in surface modification of metals coated by plasma electrolytic oxidation: Principle, structure, and performance, *Progress in Materials Science*, **117**, 100735 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100735>
 14. J. Y. Oh, E. M. Kim, G. S. Heo, D. H. Kim, D. Lee, H. C. Jeong, and D. S. Seo, Superior nanopatterns via adjustable nanoimprint lithography on aluminum oxide in high-K thin films with ultraviolet curable polymer, *Royal Society of Chemistry Advances*, **12**, 88 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1039/D1RA08425A>
 15. A. Z. Zakaria, K. Shelesh-nezhad, T. N. Chakherlou, A. Olad, Effects of aluminum surface treatments on the interfacial fracture toughness of carbon-fiber aluminum laminates, *Engineering Fracture Mechanics*, **172**, 139 (2017). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.01.004>
 16. T. C. Cheng and C. C. Chou, The Electrical and Mechanical Properties of Porous Anodic 6061-T6 Aluminum Alloy Oxide Film, *Journal of Nanomaterials*, **2015**, 141 (2015). Doi: <https://doi.org/10.1155/2015/371405>
 17. A. Rath, P. Theato, Advanced AAO Templating of Nanostructured Stimuli-Responsive Polymers: Hype or Hope?, *Advanced functional materials*, **30**, 1902959 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.201902959>
 18. H. Asoh and T. Sano, Forming Hard Anodic Films on Aluminum by Anodization in Oxalic Acid and Alcohol, *Journal of The Electrochemical Society*, **168**, 103506 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac2ec1>
 19. W. Lee, S.J. Park, Porous Anodic Aluminum Oxide: Anodization and Templated Synthesis of Functional Nanostructures, *Chemical Reviews*, **114**, 7487 (2014). Doi: <https://doi.org/10.1021/cr500002z>
 20. R. Imai, M. Tanaka, H. Hashimoto, H. Asoh, Facile synthesis of size- and shape-controlled freestanding Au nanohole arrays by sputter deposition using anodic porous alumina templates, *Nanotechnology*, **31**, 415303 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab9f76>
 21. C. K. Chung, T. Y. Liu, W. T. Chang, Effect of oxalic acid concentration on the formation of anodic aluminum oxide using pulse anodization at room temperature, *Microsystem Technologies*, **16**, 1451 (2010). Doi: <https://doi.org/10.1007/s00542-009-0944-9>
 22. M. Franco, S. Anoop, R. Uma Rani, and A. K. Sharma, Porous layer characterization of anodized and black-anodized aluminium by electrochemical studies, *International Scholarly Research Notices Corrosion*, **2012**, 1 (2012). Doi: <https://doi.org/10.5402/2012/323676>
 23. S. Kim, C. Jeong, Feasibility of Machine Learning Algorithms for Predicting the Deformation of Anodic Titanium Films by Modulating Anodization Processes, *Materials*, **14**, 1089 (2021). Doi: <https://doi.org/10.3390/ma14051089>
 24. C. Jeong, Ph.D. Thesis, pp. 2 - 5, Stevens Institute of Technology, New Jersey (2013).
 25. H. Wang, D. Dai, X. Wu, Fabrication of superhydrophobic surfaces on aluminum, *Applied Surface Science*, **254**, 5599 (2008). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.03.004>
 26. K. Ellinas, P. Dimitrakellis, P. Sarkiris and E. Gogolides, A Review of Fabrication Methods, Properties and Applications of Superhydrophobic Metals, *Processes*, **9**, 666 (2021). Doi: <https://doi.org/10.3390/pr9040666>
 27. C. Jeong, Observation of Diverse Aluminum Oxide Structures in a Phosphoric Acid Solution according to the Applied Anodization Voltage, *Journal of the Microelectronics and Packaging Society*, **26**, 35 (2019). Doi: <https://doi.org/10.6117/kmeips.2019.26.1.0035>
 28. Y. J. Park, H. J. Ji, C. Jeong, Development of Superhydrophilic 6061 Aluminum Alloy by Stepwise Anodization According to Pore-Widening Time. *Korean Journal of Metals and Materials*, **58**, 97 (2020). Doi: <http://dx.doi.org/10.3365/KJMM.2020.58.2.97>
 29. C. Jeong, H. Ji, Systematic Control of Anodic Aluminum Oxide Nanostructures for Enhancing the Superhydrophobicity of 5052 Aluminum Alloy, *Materials*, **12**, 3231 (2019). Doi: <https://doi.org/10.3390/ma12193231>
 30. C. Jeong, J. Lee, K. Sheppard, C. H. Choi, Air-Impreg-

nated Nanoporous Anodic Aluminum Oxide Layers for
Enhancing the Corrosion Resistance of Aluminum, *Lang-*

muir, **31**, 11040 (2015). Doi: [https://doi.org/10.1021/
acs.langmuir.5b02392](https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.5b02392)