

## 알루미늄 3003 산화피막 성장 거동에 의한 표면 절연 특성 관찰

박수빈 · 정찬영<sup>†,††</sup>

동의대학교 신소재공학과, 부산광역시 부산진구 엄광로 176  
(2022년 10월 25일 접수, 2022년 11월 17일 수정, 2022년 11월 18일 채택)

### Surface Electrical Conductivity and Growth Behavior of Aluminum 3003 Oxide Film

Subin Park and Chanyoung Jeong<sup>†,††</sup>

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

(Received October 25, 2022; Revised November 17, 2022; Accepted November 18, 2022)

Anodizing is a typical electrochemical surface treatment method that can improve the corrosion and insulating properties of aluminum alloys. The anodization process can obtain a dense structure. It can be used to artificially grow the thickness of an anodization film. Aluminum 3003 alloy used in this study is the most commonly used alloy for batteries due to its high strength and excellent formability as well as its weldability and corrosion resistance. Aluminum 3003 alloy was anodized at 0 °C with 0.3 M oxalic acid at 20 V, 40 V, or 60 V for 1 hour, 6 hours, or 12 hours. As a result of analyzing the composition of each specimen with an Energy Dispersive Spectrometer (EDS), aluminum was converted into an oxide film. The thickness of the formed anodization film increased when the applied voltage and anodization time increased. High corrosion potential values and low corrosion current density values were observed for the thickest oxide layer. The anodization film formed by anodization acted as a protective layer. The electrical resistance increased as the applied voltage and anodization time increased.

**Keywords:** Aluminum 3003 alloy, Insulation properties, Anodization processes, Corrosion resistance, Battery

### 1. 서론

최근 배기규제, 연비규제 등으로 인하여 전세계 자동차 생산업체는 온실가스나 대기오염물질이 배출되지 않는 전기자동차 개발을 가속화하고 있다. 특히 전기자동차에 사용되는 대용량 배터리의 수명 향상과 성능은 차량개발에 있어 중요한 부분이므로 환경 정책에 따라 내연기관차량으로 인한 온실가스 배출량 감소를 목표로 하여 전기차 보급확대와 다양한 연구가 진행되고 있다 [1-5].

그러나 전기자동차용 배터리가 들어간 USB 충전 포트, 차량용 공기청정기, 블랙박스 등에서 방전 문제가 발생되고 있다. 배터리의 가장 큰 문제점은 장시간동안 공급되는 전기 없이 배터리를 사용하면 방전되어

효율이 낮아지는 것이다 [6].

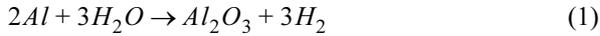
배터리 효율저하를 해결하기 위해 여러가지 전기화학적 표면처리 방법들을 사용하고 있으며, 대표적으로 플라즈마 전해산화와 양극산화 방법이 있다 [7-11]. 플라즈마 전해산화는 일반적인 양극산화 처리보다 고전압을 필요로 하기 때문에 피막 형성에 전력 소모량이 크며, 표면 형태와 내부 기공 등의 제어가 어렵고 아크 발생에 의해 피막의 표면 거칠기가 형성되기 때문에 활용 분야에 제한이 있고, 후속 연마 공정을 필요로 한다는 단점이 있다 [12-17]. 그러나 양극산화는 플라즈마 전해산화보다 저렴하므로 경제적이며, 열에 의한 산화법보다 폭이 넓고 치밀한 조직을 얻을 수 있다 [18-24].

알루미늄은 자연에서 준안정상으로 존재할 수 없기 때문에 안정상으로 변하려는 특성을 갖고있기 때문에 자연 산화 피막을 형성하나 이는 두께가 얇아 충분한 내식성 및 절연성을 나타내지 못하므로 산화 피막 두께를 인위적으로 성장시키는 양극산화 표면처리 공정

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

<sup>††</sup>These authors contributed equally to this work as the first author.  
정찬영: 교수, 박수빈: 학부연구생

이 필요하다 [25-30].



양극산화법은 용액 내에 금속시편을 양극, 상대전극을 음극으로 하여 전류를 인가함으로써 표면에서 발생하는 산화반응을 이용하여 전기화학적으로 산화 피막을 성장시키는 것으로 양극 산화 피막은 금속이온이 이온화되어 산소를 포함한 음이온들과 반응하여 형성되는 것을 식 (1)로 설명할 수 있다. 양극산화 시 전류 밀도, 전해액의 조성, 온도 등은 산화 피막의 특성을 결정할 수 있는 중요한 요소이며, 이에 따라 물리적, 기계적 특성을 조절하여 각종 산업에 적용할 수 있다 [31-35].

본 연구에서는 강도가 높고 성형성, 용접성, 내식성이 우수하여 배터리에 가장 많이 사용되는 알루미늄 3003 합금을 양극으로 사용하였으며, 양극산화 인가전압과 처리 시간을 다르게 하여 형성한 산화피막을 주사 전자 현미경(FE-SEM)으로 관찰하였으며, 전기화학적 절연특성 및 내식성을 절연 저항기와 동 전위 분극 시험으로 평가하였다.

## 2. 연구방법

본 연구에서는 알루미늄 3003 합금의 크기를 25 mm × 30 mm × 1 mm 로 가공하여 아세톤과 에탄올로 각 10분 동안 초음파 세척을 하였다. 양극산화를 하기 전 알루미늄 합금 표면에 존재하는 자연산화막을 제거하기 위해 에탄올(DUKSAN, Ethanol, 95%)과 과염소산(SAMCHUN, HClO<sub>4</sub>, 70%)을 4:1 비율로 혼합한 용액에 작업 전극에는 알루미늄 3003 합금을, 상대 전극에는 백금을 사용하여 상온에서 20 V 전압을 인가하여 1분간 전해연마를 실시하였다. 0.3 M 옥살산(SAMCHUN, Oxalic acid) 전해액을 사용하여 양극으로는 알루미늄 3003 합금을, 음극으로는 백금을 사용해 두 전극간 거리는 5 cm로 유지하였다. 전압을 20 V, 40 V, 60 V로 인가하였고, 1시간, 6시간, 12시간 동안의 처리시간으로 양극산화를 실시하였다. 양극산화 시 전해액 온도를 0°C로 유지하기 위해 이중 자켓 비커에 냉각수를 순환시켰다. 양극산화 후 알루미늄 3003 합금에 형성된 산화막 두께와 기공 크기를 관찰하기 위해 전계 방사형 주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM)을 사용하였고, 에너지 분산형 분광기(Energy Dispersive Spectroscopy, EDS)를 사용하여 산화막 표면의 화학 조성 및 성분 함량을 확인하였다. 절연성을 측정하기 위해 절연저항기(Megger)를 사용하

여 시편의 전기저항을 확인하였다. 전기화학적 분극 특성을 평가하기 위해 3.5 wt% NaCl 용액에서 작업 전극에는 양극산화를 실시한 시편을, 상대 전극으로는 백금(Pt)을, 기준 전극에는 은-염화은(Ag/AgCl)을 고정시켜 3 전극 시스템으로 동 전위 분극 시험(Potentiodynamic Polarization Test)을 행하였으며, -1.5 V ~ +1.5 V의 범위를 1 mV/sec 주사 속도로 측정하였다.

## 3. 연구결과 및 고찰

본 연구에서는 알루미늄 3003 합금에 양극산화 인가 전압을 20 V, 40 V, 60 V로 하고 처리 시간을 1시간, 6시간, 12시간으로 하여 서로 다른 두께의 산화 피막을 형성하였으며, 이에 따른 부식 특성과 절연 특성을 확인하였다. 인가 전압과 양극산화 처리 시간이 증가함에 따라 알루미늄이 감소하고, 산소가 증가하여 알루미늄이 산화 피막으로 변화해 두꺼워지고 절연성이 보이는 과정을 Fig. 1 모식도로 나타내었고, 화학적 조성은 Table 1에 나타냈다 [36].

Fig. 2와 Table 2은 20 V, 40 V, 60 V 전압 조건에서 1시간, 6시간, 12시간 동안 양극산화를 실시한 후 FE-SEM으로 산화 피막의 두께를 분석한 결과이다. 양극산화 시간이 1시간, 6시간, 12시간 일 때, 산화 피막 두께는 20 V 전압 조건에서 563 ± 15.51 nm, 2180 ± 36.02 nm, 7580 ± 40.44 nm, 40 V 전압 조건에서 956 ± 12.11 nm, 3283 ± 24.87 nm, 8249 ± 49.08 nm, 60 V 전압 조건에서 1567 ± 37.34 nm, 3606 ± 54.10 nm, 17064 ± 139.94 nm로 성장하였다. Table 2를 통해 산화 피막 두께가 가장 얇은 것은 20 V 전압 조건에서 양극산화

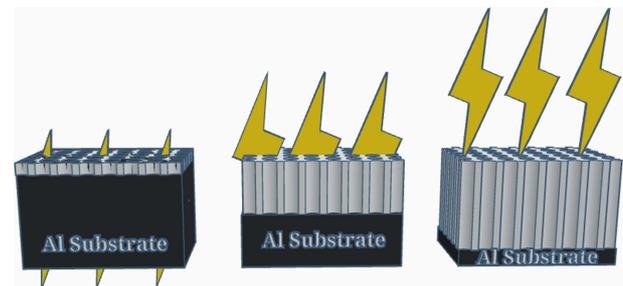


Fig. 1. Schematic diagram of electrical penetration as the thickness of the anodization film increases

Table 1. Chemical compositions of Al 3003 alloy

Wt (%)				
Al K	Mn K	Fe K	Si K	Cu K
98.345	1.052	0.470	0.081	0.022

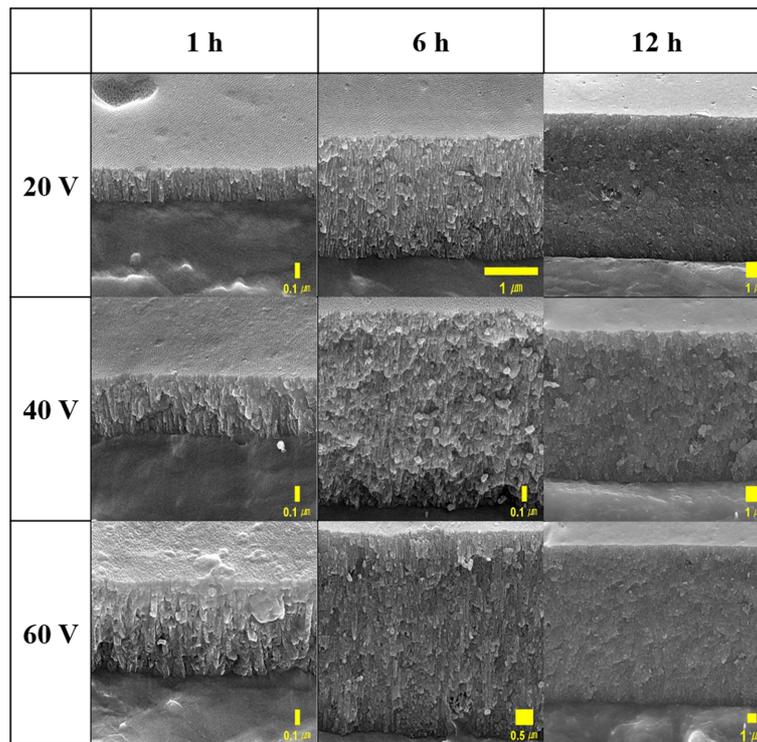


Fig. 2. FE-SEM of surface morphology and thickness of aluminum oxide produced by anodization time at 20 V, 40 V, and 60 V applied voltage

Table 3. EDS component content according to anodization time and voltage

Wt (%)	20 V			40 V			60 V		
	Al K	O K	Mn K	Al K	O K	Mn k	Al K	O K	Mn K
1 h	76.45	22.94	0.61	60.77	39.01	0.23	58.09	41.51	0.40
6 h	57.54	41.88	0.58	56.92	42.72	0.36	56.70	43.03	0.28
12 h	56.16	43.61	0.23	55.87	43.86	0.27	55.76	43.92	0.31

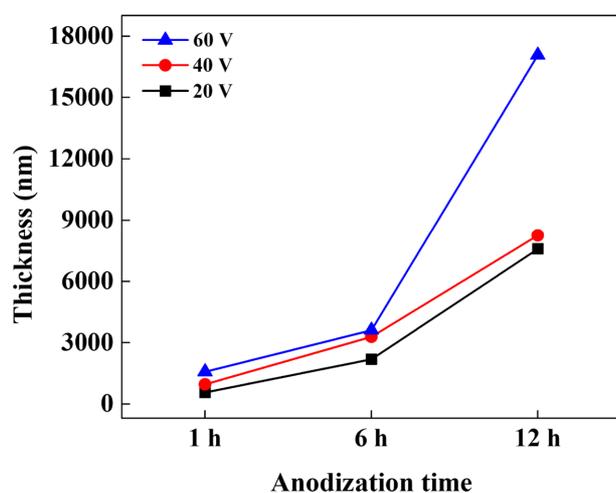


Fig. 3. Variation of thickness according to anodization time and voltage

1시간 동안 실시한 시편이라는 것을 알 수 있고, 60 V 에서 12시간 동안 양극산화를 실시한 시편이 가장 두 겹께 산화 피막의 두께가 형성된 것을 알 수 있다. Fig. 3은 전압과 시간에 따른 산화 피막의 두께 변화를 나타낸 그래프로, 높은 전압과 시간이 증가할수록 산화 피막의 두께가 증가함을 관찰하였다.

Table 2. Oxide thickness of aluminum oxide formed at 20 V, 40 V, and 60 V

Thickness (nm)	Anodizing Volt		
	20 V	40 V	60 V
Time			
1 h	563 ± 15.51	956 ± 12.11	1567 ± 37.34
6 h	2180 ± 36.02	3283 ± 24.87	3606 ± 54.10
12 h	7580 ± 40.44	8249 ± 49.08	17064 ± 139.94

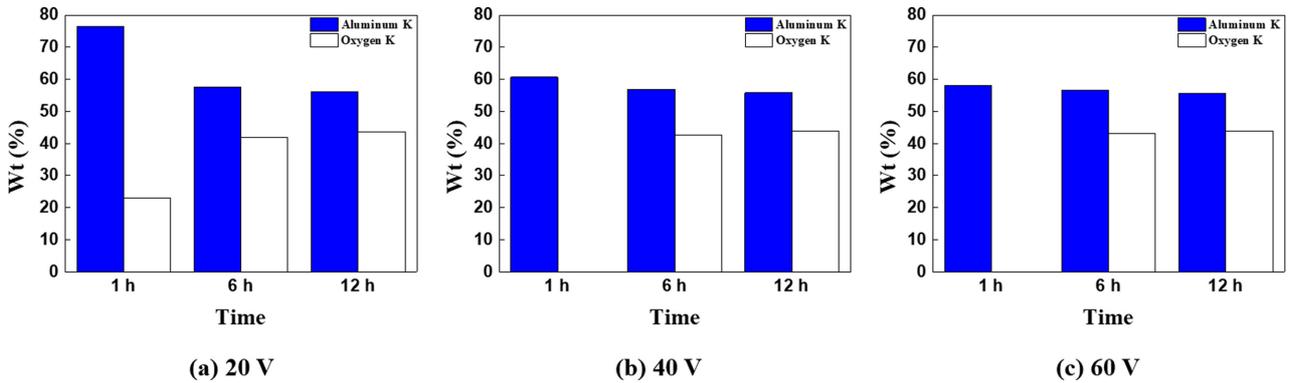


Fig. 4. EDS analysis after anodization with anodization time and voltage; (a) 20 V, (b) 40 V, (c) 60 V

Table 3은 전압 및 시간 조건에 따라 EDS로 알루미늄 산화 피막의 화학 성분 및 조성을 분석한 결과이다. 모든 조건에서 알루미늄과 산소가 주성분으로 검출되었으며, 그 외 카본테이프의 영향으로 탄소와 알루미늄 3003 합금에 첨가된 미량의 망간이 검출되었다. Fig. 4는 Table 3을 바탕으로 전압과 시간에 따라 알루미늄과 산소의 변화량을 나타낸 그래프이다. 모든 전압 조건에서 시간이 증가할수록 알루미늄은 감소하고, 산소는 증가하는 것을 보아 알루미늄이 산화 피막으로 변환되었고, 이를 통해 산화 피막의 두께가 증가함을 알 수 있다.

Fig. 5는 20 V의 전압 조건에서 시간별로 형성된 산화 피막의 동 전위 분극 곡선을 나타낸 것이다. Table 5에서는 전기화학적 인자인 부식 전위( $E_{corr}$ )와 부식 전류 밀도( $I_{corr}$ )를 확인할 수 있으며, 양극산화 처리 시간이 증가함에 따라 분극 저항이 증가하는 것을 관찰하였다. 1시간 동안 양극산화를 실시한 산화 피막의 부식 전위는  $-30.854$  mV, 부식 전류 밀도는  $1.80 \times 10^{-8}$  A/cm<sup>2</sup> 이고, 6시간 양극산화를 실시한 산화 피막의 부식 전위는  $18.967$  mV, 부식 전류 밀도는  $2.54 \times 10^{-9}$  A/cm<sup>2</sup> 인 것을 확인하였다. 12시간 동안 양극산화를 실시한 산화 피막은  $179.984$  mV의 가장 높은 부식 전위와  $2.75 \times 10^{-10}$  A/cm<sup>2</sup>의 가장 낮은 부식 전류 밀도의 값을 가진다는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 40 V의 전압 조건에서 시간별로 형성된 산화 피막의 동 전위 분극 곡선이다. Table 5는 전기화학적 인자들을 나타낸 것으로, 시간이 증가할수록 내식성이 향상되는 것을 확인할 수 있다. 1시간 동안 양극산화를 실시한 산화 피막의 부식 전위는  $-16.87$  mV, 부식 전류 밀도는  $1.03 \times 10^{-8}$  A/cm<sup>2</sup> 이고, 6시간 양극산화를 실시한 산화 피막의 부식 전위는  $21.492$  mV, 부식 전류 밀도는  $8.30 \times 10^{-9}$  A/cm<sup>2</sup> 인 것을 확인하였다. 12시간 동안 양극산화를 실시한 산화 피막은  $182.457$  mV의 가장 높은 부식 전위와

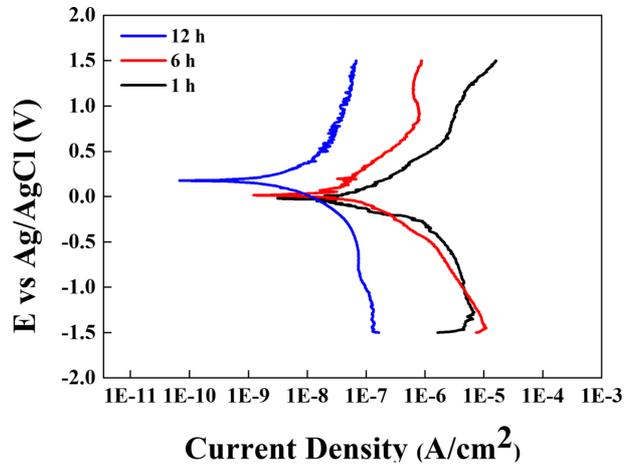


Fig. 5. Potentiodynamic polarization curves for aluminum oxide formed at 20 V

Table 4. Potentiodynamic polarization test results for aluminum formed at 20 V

	$E_{corr}$ (mV)	$I_{corr}$ (A/cm <sup>2</sup> )
1 h	-30.854	$1.80 \times 10^{-8}$
6 h	18.967	$2.54 \times 10^{-9}$
12 h	179.984	$2.75 \times 10^{-10}$

$6.65 \times 10^{-10}$  A/cm<sup>2</sup>의 가장 낮은 부식 전류 밀도의 값을 가진다는 것을 알 수 있다. 40 V의 전압 조건에서 가장 우수한 부식 저항을 가지는 시편은 12시간 양극산화를 실시한 시편이라는 것을 의미한다. Fig. 7은 60 V의 전압 조건에서 시간별로 형성된 산화 피막의 동 전위 분극 곡선을 나타낸 것이다. Table 6은 전기화학적 인자들을 나타낸 것이고, 1시간 동안 양극산화를 실시한 산화 피막의 부식 전위는  $-15.97$  mV, 부식 전류 밀도는  $3.85 \times 10^{-9}$  A/cm<sup>2</sup> 이고, 6시간 양극산화를 실시한 산화 피막의 부식 전위는  $44.614$  mV, 부식 전류 밀도는  $6.23 \times 10^{-10}$  A/cm<sup>2</sup> 인 것을 확인하였다. 12시간 동

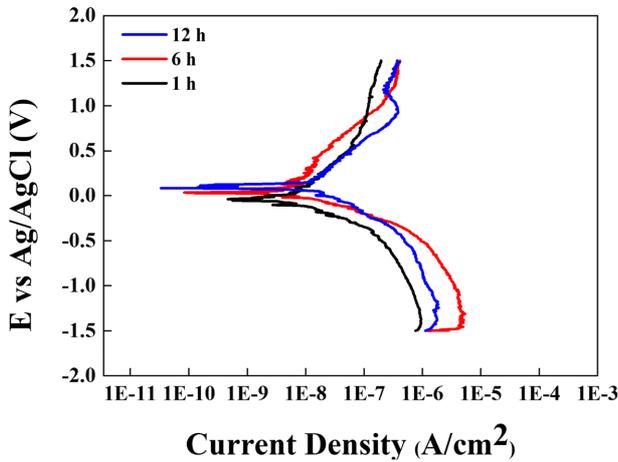


Fig. 6. Potentiodynamic polarization curves for aluminum oxide formed at 40 V

Table 5. Potentiodynamic polarization test results for aluminum formed at 40 V

	$E_{corr}$ (mV)	$I_{corr}$ (A/cm <sup>2</sup> )
1 h	-16.87	$1.03 \times 10^{-8}$
6 h	21.492	$8.30 \times 10^{-9}$
12 h	182.457	$6.65 \times 10^{-10}$

안 양극산화를 실시한 산화 피막은 191.254 mV의 가장 높은 부식 전위와  $6.68 \times 10^{-11}$  A/cm<sup>2</sup>의 가장 낮은 부식 전류 밀도의 값을 가진다는 것을 알 수 있다. 이는 60 V의 전압조건에서 12시간 동안 양극산화를 실시한 시편이 가장 우수한 부식 저항성을 가진다는 것을 의미하며, 따라서 인가 전압과 양극산화 시간이 증가할수록 높은 부식 전위 값과 낮은 부식 전류 밀도 값을 가진다는 것을 확인할 수 있고, 부식 전류 밀도가 감소할수록 부식되는 부위가 적어져 부식이 적게 되기 때문에 부식 전류 밀도가 낮을수록 내식성이 좋다는 것을 알 수 있다. 이를 통해, 부식 저항은 부식 속도와 반비례하고 부식 전류 밀도는 비례 관계이며 분극 저항의 증가와 낮은 부식 전류 밀도가 시간이 증가할수록 부식 속도가 감소되며 산화 피막의 두께가 두꺼울수록 부식물질이 표면에서부터 모재까지 침투하는 거리가 멀어지면서 부식 저항성이 증가하는 것으로 사료된다 [37-41].

Fig. 8과 Table 7은 20 V, 40 V, 60 V 전압에서 1시간, 6시간, 12시간 동안 양극산화를 실시한 후 전기저항을 측정하여 나타낸 결과이다. Table 7에서 20 V 전압 조건에서는 양극산화 시간 별로 저항값이 0.061 MΩ, 4.346 MΩ, 15.930 MΩ, 40 V 전압조건에서는 1.917 MΩ, 7.873 MΩ, 19.915 MΩ, 60 V 전압 조건에서는 2.896 MΩ, 8.608 MΩ, 34.320 MΩ으로 저항값이 측정되는 것을 알

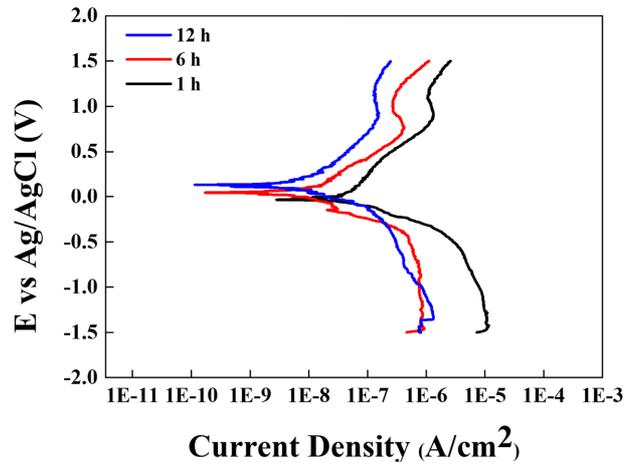


Fig. 7. Potentiodynamic polarization curves for aluminum oxide formed at 60 V

Table 6. Potentiodynamic polarization test results for aluminum formed at 60 V

	$E_{corr}$ (mV)	$I_{corr}$ (A/cm <sup>2</sup> )
1 h	-15.97	$3.85 \times 10^{-9}$
6 h	44.614	$6.23 \times 10^{-10}$
12 h	191.254	$6.68 \times 10^{-11}$

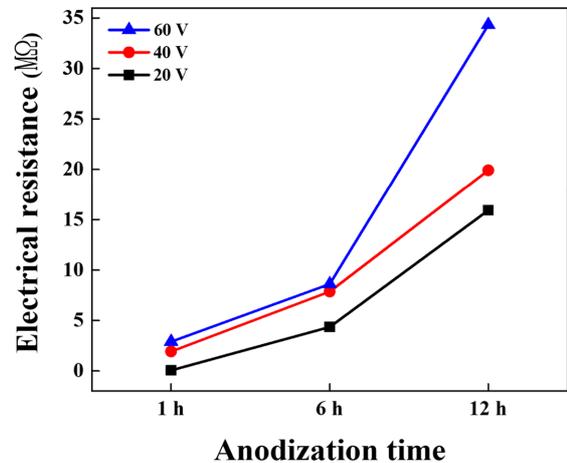


Fig. 8. Electrical resistance measurement results for aluminum formed at 20 V, 40 V, and 60 V

Table 7. Insulation resistance measurement results for aluminum formed at 20 V, 40 V, and 60 V

Electrical Resistance (MΩ)	Anodizing Volt		
	20 V	40 V	60 V
Time			
1 h	0.061 ± 0.001	1.917 ± 0.001	2.896 ± 0.004
6 h	4.346 ± 0.002	7.873 ± 0.046	8.608 ± 0.002
12 h	15.930 ± 0.004	19.915 ± 0.003	34.320 ± 0.025

수 있다. Table 7을 통해 20 V 전압 조건에서 양극산화 1시간 동안 실시한 시편의 산화 피막 두께가 가장 얇아 저항값이 낮은 것을 알 수 있고, 60 V에서 12시간 동안 양극산화를 실시한 시편의 산화 피막 두께가 가장 두껍게 형성되어 저항값이 높아진다는 것을 확인할 수 있다. 이는 인가 전압과 양극산화 시간이 증가할수록 절연층인 산화 피막의 두께가 두꺼워져 전자의 이동을 방해하거나 차단하기 때문에 저항값이 높아지는 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 알루미늄 3003 합금을 20 V, 40 V, 60 V 전압에서 1시간, 6시간, 12시간 동안 양극산화를 실시한 후 생성된 산화 피막 두께, 부식 특성과 절연 특성을 인가 전압과 양극산화 공정 시간에 따라 관찰하였다. 20 V 전압에서 1시간 동안 양극산화 공정을 한 시편의 산화 피막의 두께 563 nm에서 60 V 전압에서 12시간 동안 양극산화 공정을 한 시편의 산화 피막의 두께 17064 nm까지 형성되었으며, 인가 전압과 양극산화 공정 시간이 증가할수록 산화 피막의 두께가 점점 두꺼워지는 것을 확인하였다. 양극산화 공정을 수행한 후 EDS(Energy Dispersive Spectrometer)로 각 시편의 조성 성분을 분석한 결과, 인가 전압과 양극산화 공정의 시간이 증가할수록 알루미늄의 함량이 감소하고, 산소 함량이 증가한 것으로 보았을 때 알루미늄이 산화 피막으로 변화되었고, 이를 통해 산화 피막 두께의 증가를 확인할 수 있다. 그리고 60 V 전압에서 12시간 동안 양극산화 공정을 실시한 시편이 가장 높은 부식 전위 값과 가장 낮은 부식 전류 밀도 값을 가진다는 것을 관찰하였다. 이는 인가 전압과 양극산화 공정 시간을 증가할수록 부식 전류 밀도가 감소할수록 부식되는 부위가 적어져 부식이 적게 되기 때문에 가장 우수한 부식 저항성이 나타난다. 이는, 산화 피막의 두께가 두꺼울수록 부식물질이 표면에서부터 모재까지 침투하는 거리가 멀어지면서 부식 저항성이 증가하는 것으로 사료된다. 저항값은 최대 34.320 MΩ으로 인가 전압과 양극산화 공정 시간이 증가할수록 절연층 역할을 하는 산화 피막의 두께가 두꺼워져 전자의 이동을 방해하거나 차단하기 때문에 저항값이 증가함을 확인하였다. 이를 통해 12시간 동안 양극산화에 의해 형성된 산화 피막이 보호층 역할을 하여 뛰어난 절연 특성을 가진다는 것을 관찰하였다. 따라서 인가 전압과 시간을 조절하여 알맞은 조건을 찾아 양극산화 공정을 수행하여 뛰어난 절연 특성을 가지는 알루미늄에 대해 연구가 더 필요하다.

#### 감사의 글

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

#### References

1. A. Voltes-Dorta, J. Perdiguero and J. L. Jiménez, Are car manufacturers on the way to reduce CO<sub>2</sub> emissions. A DEA approach, *Energy Economics*, **38**, 77 (2013). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2013.03.005>
2. A. Ajanovic, R. Haas, Dissemination of electric vehicles in urban areas: Major factors for success, *Energy*, **115**, 1451 (2016). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.040>
3. W. Kempton, S. E. Letendre, Electric vehicles as a new power source for electric utilities, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **2**, 157 (1997). Doi: [https://doi.org/10.1016/S1361-9209\(97\)00001-1](https://doi.org/10.1016/S1361-9209(97)00001-1)
4. H. Ma, F. Balthasar, N. Tait, X. Riera-Palou, A. Harrison, A new comparison between the life cycle greenhouse gas emissions of battery electric vehicles and internal combustion vehicles. *Energy policy*, **44**, 160 (2012). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.01.034>
5. A. M. Andwari, A. Pesiridis, S. Rajoo, R. Martinez-Botas, V. Esfahanian, A review of Battery Electric Vehicle technology and readiness levels, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **78**, 414 (2017). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.138>
6. F. Simchen, M. Sieber, A. Kopp, T. Lampke, Introduction to plasma electrolytic oxidation—An overview of the process and applications, *Coatings*, **10**, 628 (2020). Doi: <https://doi.org/10.3390/coatings10070628>
7. S. Moon and Y. Jeong, Generation mechanism of microdischarges during plasma electrolytic oxidation of Al in aqueous solutions, *Corrosion Science*, **51**, 1506 (2009). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.10.039>
8. L. Bouchama, N. Azzouz, N. Boukmouche, J. P. Cho-part, A. L. Daltin, Y. Bouzmit, Enhancing aluminum corrosion resistance by two-step anodizing process, *Surface and Coatings Technology*, **235**, 676 (2013). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.08.046>
9. S. Lin, H. Greene, H. Shih, F. Mansfeld, Corrosion protection of Al/SiC metal matrix composites by anodizing, *Corrosion*, **48**, 61 (1992). Doi: <https://doi.org/10.5006/1.3315920>
10. C. Jeong, J. Lee, K. Sheppard and C. H. Choi, Air-

- impregnated nanoporous anodic aluminum oxide layers for enhancing the corrosion resistance of aluminum, *Langmuir*, **31**, 11040 (2015). Doi: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.5b02392>
11. J. G. Buijnsters, R. Zhong, N. Tsyntsar, J. P. Celis, Surface wettability of macroporous anodized aluminum oxide, *ACS applied materials & interfaces*, **5**, 3224 (2013). Doi: <https://doi.org/10.1021/am4001425>
  12. J. M. Montero-Moreno, M. Sarret, C. Müller, Influence of the aluminum surface on the final results of a two-step anodizing, *Surface and Coatings Technology*, **201**, 6352 (2007). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.12.003>
  13. S. H. Kim and 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>
  14. Y. Huang, H. Shih, H. Huang, J. Daugherty, S. Wu, S. Ramanathan, ... and F. Mansfeld, Evaluation of the corrosion resistance of anodized aluminum 6061 using electrochemical impedance spectroscopy (EIS), *Corrosion Science*, **50**, 3569 (2008). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.09.008>
  15. C. J. Donahue, J. A. Exline, Anodizing and coloring aluminum alloys, *Journal of Chemical Education*, **91**, 711 (2014). Doi: <https://doi.org/10.1021/ed3005598>
  16. C. Jeong and 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>
  17. Y. Alivov, M. Pandikunta, S. Nikishin and Z. Y. Fan, The anodization voltage influence on the properties of TiO<sub>2</sub> nanotubes grown by electrochemical oxidation, *Nanotechnology*, **20**, 225602 (2009). Doi: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/20/22/225602>
  18. K. S. Choudhari, C. H. Choi, S. Chidangil and S. D. George, Recent Progress in the Fabrication and Optical Properties of Nanoporous Anodic Alumina, *Nanomaterials*, **12**, 444 (2022). Doi: <https://doi.org/10.3390/nano12030444>
  19. 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>
  20. C. Blawert, W. Dietzel, E. Ghali and 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>
  21. Y. Ma, X. Zhou, Y. Liao, X. Chen, C. Zhang, H. Wu, ... and W. Huang, Effect of anodizing parameters on film morphology and corrosion resistance of AA2099 aluminum-lithium alloy, *Journal of The Electrochemical Society*, **163**, C369 (2016). Doi: <https://doi.org/10.1149/2.1081607jes>
  22. Z. Szklarska-Smialowska, Pitting corrosion of aluminum, *Corrosion science*, **41**, 1743 (1999). Doi: [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(99\)00012-8](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(99)00012-8)
  23. J. Kim and C. Jeong, Study of surface properties and corrosion behavior of functional aluminum 3003 alloy using anodic oxidation method, *Corrosion Science and Technology*, **21**, 290 (2022). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2022.21.4.290>
  24. V. N. Kale, J. Rajesh, T. Maiyalagan, C. W. Lee and R. M. Gnanamuthu, Fabrication of Ni–Mg–Ag alloy electrodeposited material on the aluminium surface using anodizing technique and their enhanced corrosion resistance for engineering application, *Materials Chemistry and Physics*, **282**, 125900 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.125900>
  25. S. U. Ofoegbu, F. A. Fernandes and A. B. Pereira, The sealing step in aluminum anodizing: A focus on sustainable strategies for enhancing both energy efficiency and corrosion resistance, *Coatings*, **10**, 226 (2020). Doi: <https://doi.org/10.3390/coatings10030226>
  26. Y. Choi and C. Jeong, Study of anodized film growth behavior and corrosion damage over anodization time of aluminum 1050 alloy, *Corrosion Science and Technology*, **21**, 282 (2022). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2022.21.4.282>
  27. Z. Zhang, J. G. Shan, X. H. Tan and J. Zhang, Effect of anodizing pretreatment on laser joining CFRP to aluminum alloy A6061, *International journal of adhesion and adhesives*, **70**, 142 (2016). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.06.007>
  28. Y. Park and C. Jeong, Correlation of Surface Oxide Film Growth with Corrosion Resistance of Stainless Steel, *Corrosion Science and Technology*, **20**, 152 (2021). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2021.20.3.152>
  29. Y. Suzuki, K. Kawahara, T. Kikuchi, R. O. Suzuki and S. Natsui, Corrosion-resistant porous alumina formed via anodizing aluminum in etidronic acid and its pore-sealing behavior in boiling water, *Journal of The Electro-*

- chemical Society*, **166**, C261 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1149/2.0221912jes>
30. C. Jeong and 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>
  31. J. Li, H. Wei, K. Zhao, M. Wang, D. Chen and M. Chen, Effect of anodizing temperature and organic acid addition on the structure and corrosion resistance of anodic aluminum oxide films. *Thin Solid Films*, **713**, 138359 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2020.138359>
  32. S. J. Lee and S. J. 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>
  33. Y. Xu, G. E. Thompson and G. C. Wood, Mechanism of anodic film growth on aluminium, *Transactions of the IMF*, **63**, 98 (1985). Doi: <https://doi.org/10.1080/00202967.1985.11870715>
  34. H. Ji and C. Jeong, Study on corrosion and oxide growth behavior of anodized aluminum 5052 Alloy, *Journal of the Korean institute of surface engineering*, **51**, 372 (2018). Doi: <https://doi.org/10.5695/JKISE.2018.51.6.372>
  35. C. L. Ban, F. R. Wang, J. H. Chen, Z. Q. Liu, Effect of Hydration on Microstructure and Property of Anodized Oxide Film for Aluminum Electrolytic Capacitor, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **29**, 16166 (2018). Doi: <https://doi.org/10.1007/s10854-018-9705-9>
  36. Q. Y. Yang, Y. L. Zhou, Y. B. Tan, S. Xiang, M. Ma, and F. Zhao, Effects of microstructure, texture evolution and strengthening mechanisms on mechanical properties of 3003 aluminum alloy during cryogenic rolling, *Journal of Alloys and Compounds*, **884**, 161135 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161135>
  37. H. Yang, Y. Gao, W. Qin, Y. Li, Microstructure and corrosion behavior of electroless Ni-P on sprayed Al-Ce coating of 3003 aluminum alloy, *Surface and Coatings Technology*, **281**, 176 (2015). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.10.001>
  38. L. Bouchama, N. Azzouz, N. Boukmouche, J. P. Chopard, A. L. Daltin, Y. Bouznit, Enhancing aluminum corrosion resistance by two-step anodizing process, *Surface and Coatings Technology*, **235**, 676 (2013). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.08.046>
  39. Y. Zuo, P. H. Zhao, J. M. Zhao, The influences of sealing methods on corrosion behavior of anodized aluminum alloys in NaCl solutions, *Surface and Coatings Technology*, **166**, 237 (2003). Doi: [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00779-X](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00779-X)
  40. H. Yang, Y. Gao, W. Qin, J. Sun, Z. Huang, Y. Li, J. Sun, A robust superhydrophobic surface on AA3003 aluminum alloy with intermetallic phases in-situ pinning effect for corrosion protection, *Journal of Alloys and Compounds*, **898**, 163038 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.163038>
  41. A. S. Darmawan, T. W. B. Riyadi, A. Hamid, B. W. Febriantoko, B. S. Putra, Corrosion Resistance Improvement of Aluminum under Anodizing Process, *AIP Conference Proceedings*, **1977**, 020006 (2018). Doi: <https://doi.org/10.1063/1.5042862>