

## 알루미늄 6061 합금 양극산화 후 열처리에 따른 표면 특성 관찰

이승민 · 정찬영<sup>†,††</sup>

동의대학교 금속소재공학과, 부산광역시 부산진구 엄광로 176  
(2022년 11월 3일 접수, 2022년 11월 18일 수정, 2022년 11월 19일 채택)

### Effects of Heat Treatment on Surface Properties of Aluminum 6061 Alloy After Anodization

Seungmin Lee and Chanyoung Jeong<sup>†,††</sup>

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

(Received November 03, 2022; Revised November 18, 2022; Accepted November 19, 2022)

Anodization is a representative electrochemical surface treatment method that can improve both heat resistance and corrosion resistance by forming an anodization film on the surface of the aluminum. However, these properties can be changed after an additional heat treatment process. In this study, Al 6061 was subjected to an anodization process at 60 V for 1 hour, 5 hours, or 9 hours. An additional heat treatment process was performed at 500 °C for 30 minutes. Field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) analysis revealed that the thickness of the anodized film was increased in proportion to the anodization time. Both pore size and pore diameter of the anodized film was also increased after anodization. After an additional heat treatment process, there were no significant changes in the thickness, pore size, or pore diameter of the anodized film. Heat resistance was confirmed through thermal analysis and chemical resistance was evaluated with a potentiodynamic polarization test.

**Keywords:** Anodization, Aluminum 6061 alloy, Heat Treatment, Delta H, Corrosion resistance

### 1. 서론

세계적으로 친환경 정책 구체화에 따른 환경규제로 인하여 많은 산업 분야에 변화가 일어나고 있다. 대표적으로 내연기관을 사용하는 자동차 산업의 경우 배기 가스로 인한 환경오염 문제가 심화되며, 이를 해결하고자 전기 자동차나 수소 자동차와 같은 친환경 자동차 산업으로 전환되고 있다. 배터리 팩 사용으로 인한 무게 증가 및 배터리 화재 문제를 해결하기 위해 탄소 복합재나 그래핀을 기반으로 한 복합 신소재가 개발되어 산업적으로 사용되고 있다 [1]. 그러나 배터리 팩 케이스에 사용되는 복합 신소재 재료는 제조 공정 과정에서 상당한 비용이 요구되는 단점이 있다. 이러한 단점을 해결하고자 상대적으로 저렴하고 가벼운 알루미늄 6061 합금을 활용한 연구가 주목받고 있다 [2-7].

알루미늄 6061의 경우 순수 알루미늄(Al)에 약 0.45 ~ 0.9% 마그네슘(Mg), 0.2 ~ 0.6 % 실리콘(Si)으로 이루어져 순수 알루미늄에 비해 압출 가공성, 내식성, 강도가 우수하다. 하지만 알루미늄 6061은 일반적인 철강 제품보다 내마모성, 내열성, 내충격성이 취약하다는 단점을 가지고 있어 이를 해결하고 화학적 및 기계적 특성을 증가시키기 위해 표면처리 공정을 필요로 한다 [8-12]. 대표적인 표면처리로는 양극산화, 화성 피막 처리, 전기도금 및 플라즈마 전해 산화 등이 있으며, 그 중 양극산화법은 균일한 산화 피막을 형성할 수 있으며, 내마모성, 내식성, 심미성을 향상할 수 있어 주로 사용된다 [13-18].

양극산화는 전기 화학적 방법으로 산성 및 알칼리성 전해액 내에 모재를 양극, 상대 전극을 음극으로 하여 전압을 인가 시 모재 표면에 발생하는 산화 반응으로 인해 피막을 형성시킨다 [19-21]. 양극산화 피막의 경우 전처리 및 후처리, 인가전압 및 전류 밀도, 용액의 농도, 조성, 온도, 합금의 조성에 의해 물성 및 형상이 달라질 수 있다 [22-25].

<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, 이승민: 학부연구생

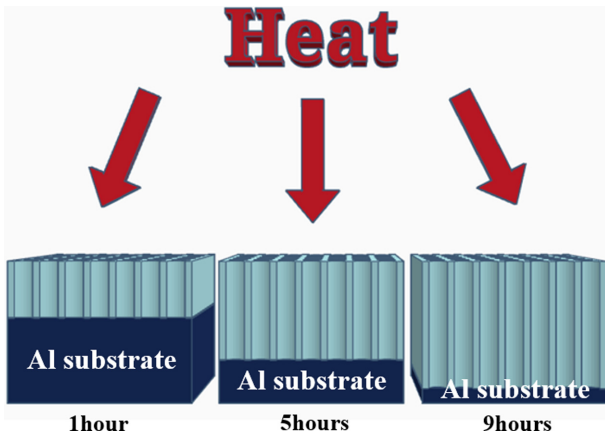


Fig. 1. Experimental method diagram

양극산화 공정 후 표면에 발생한 산화 피막은 사파이어와 알루미늄 모재의 중간 특성을 가지게 되며, 단결정 구조로 되어 있는 사파이어와 달리 소량의  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  결정 구조를 함유하고 있는 비정질이다. 비정질 구조인 산화 피막의 결정화는 후 열처리를 통해 높일 수 있으며, 이에 따른 화학적 및 기계적 특성 향상도 기대할 수 있다. 과한 후 열처리의 경우 산화 피막의 밀도 변화 및 모재와 양극산화 피막의 열팽창이 유발되어 표면에 균열이나 원통형 기공의 배열에 문제를 발생시킬 수 있다. Kang et al.의 선행연구에 따라 열팽창 균열은 가열온도로 인한 모재와 양극산화 피막이 늘어난 길이 차이로 일어나며 [26], 이러한 문제점들은 기계적 물성이나 화학적 특성을 저하한다 [27,28].

본 연구에서는 알루미늄 6061 합금의 양극산화 피막 두께에 따른 후 열처리 특성 변화를 관찰하기 위해 정전압 조건에서 인가 시간을 달리하여 산화 피막 성장을 관찰하였다. 산화 피막 성장이 완료된 시편에 후 열처리를 진행하여 여러 특성에 미치는 영향을 연구하였으며, 이를 Fig. 1의 연구 모식도로 나타냈다.

## 2. 연구방법

본 연구에서는 알루미늄(6061-T6) 합금 소재를 25 mm × 30 mm × 1 mm 크기로 절단하여 양극산화 실험에 사용했으며 화학적 조성은 Table 1에 나타냈다. 음극으로는 20 mm × 40 mm × 1 mm 크기의 백금을 사용하였다. 시편의 이물질 제거를 위해 아세톤, 에탄올, 증류수를 이용하여 조음과 세척을 진행하였다. 그 이후 합금의 자

Table 1. Chemical compositions of aluminum 6061 alloy

Elements sample	Al	Si	Fe	Cu	Mg	Cr
Al 6061-T6 (Atomic %)	97.7	0.62	0.33	0.28	0.90	0.17

연 산화 피막을 제거하기 위해 20 V의 인가전압을 가한 후 1분 동안 상온에서 전해연마 공정을 실시하였으며, 전해연마 공정에 사용된 용액은 과염소산( $\text{HClO}_4$ , 70%)과 에탄올을 1:4 비율로 혼합용액으로 사용하였으며, 전해연마 후 아세톤, 에탄올, 증류수 순서로 표면에 남은 잔존물을 세척하였다 [29].

양극산화 공정은 전해연마가 완료된 시편을 0 °C의 0.3 M 옥살산(Oxalic acid) 용액에서 60 V의 인가 전압으로 각각 1, 5, 9시간 동안 진행하였으며 양극과 음극 간의 거리는 5 cm로 일정하게 유지하며 실험하였다. 산화 피막 성장이 완료된 시편을 5 °C/min씩 등온 시킨 대기 분위기 전기로에 500 °C의 온도로 30분 동안 열처리를 진행한 후 냉각 시켰다.

양극산화 공정을 진행한 시편과 양극산화 후 추가적으로 열처리 진행 한 시편의 양극 산화 피막의 두께 및 표면 형상 관찰을 위해 전계 방출형 주사 전자 현미경(Field emission scanning electron microscope, FE-SEM)과 실험 조건 별 양극산화 피막의 성분 분석을 위해 에너지 분산형 X-선 분광분석기(Energy Dispersive X-ray Spectrometer, EDS) 및 EDS Mapping을 진행하였다. 전기 화학적 부식 특성을 알아보기 위해 3.5 wt% NaCl 용액을 사용하여 상대 전극은 백금(Pt), 작업 전극은 양극산화 및 후 열처리 진행한 시편, 기준 전극은 은-염화은(Ag/AgCl)으로 동 전위 분극 시험(Potentiodynamic Polarization Test)을 진행하였다. 측정 주사 속도는 1 mV/sec로 설정하였으며, -1,500 mV ~ +1,500 mV의 범위를 측정하였다 [30]. 양극산화 피막의 온도 변화에 대한 상태를 알아보고, 흡열 반응과 발열 반응을 분석하기 위해 열 분석기(Thermal Analysis, TA)를 사용하였으며, 20 °C/min씩 등온 시켜 100 °C~900 °C 온도 범위를 측정하였다.

## 3. 연구결과 및 고찰

본 연구에서는 대표적인 알루미늄 합금인 Al 6061을 60 V의 전압에서 처리 시간에 따른 양극산화 피막의 두께와 기공 크기 및 형태를 관찰하였고, 후 열처리 공정 이후 양극산화 피막의 두께 및 기공 크기, 형태, 배열에 영향을 끼치는지 확인하였다.

Fig. 2는 60 V 전압 조건에서 양극산화 공정만 수행된 시편의 양극산화 피막 단면 및 표면이며, Fig. 3은 양극산화 후 추가적인 열처리 공정이 수행된 시편의 양

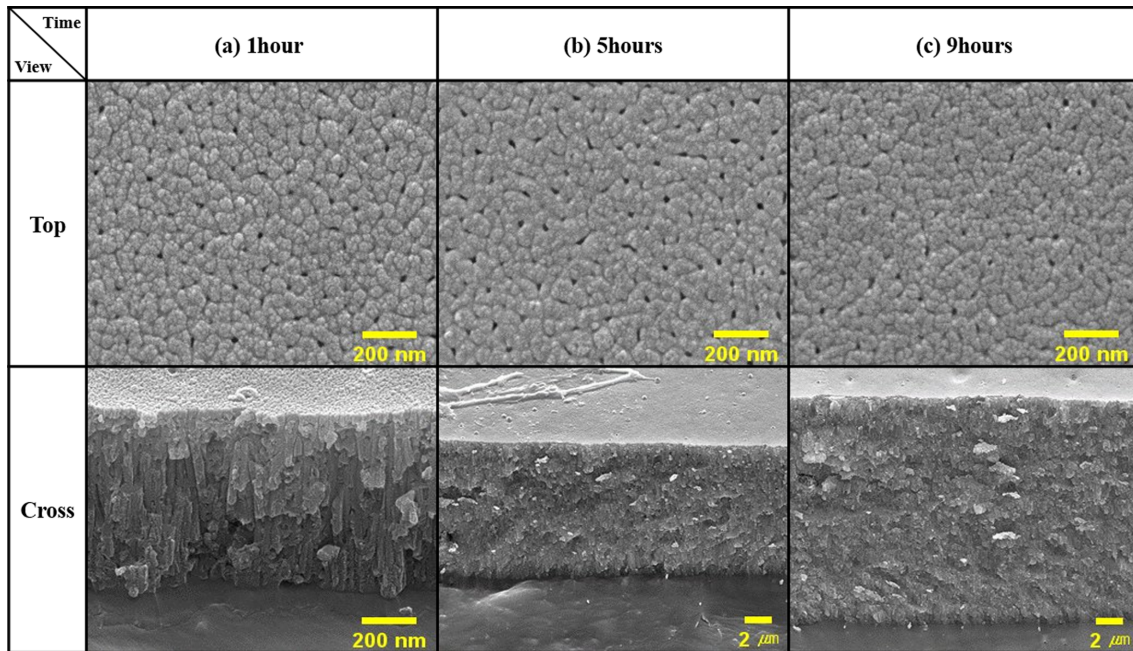


Fig. 2. FE-SEM of surface morphology and thickness of the aluminum anodization film prepared at the applied voltage of 60 V by anodization 1 h, 5 h, and 9 h time

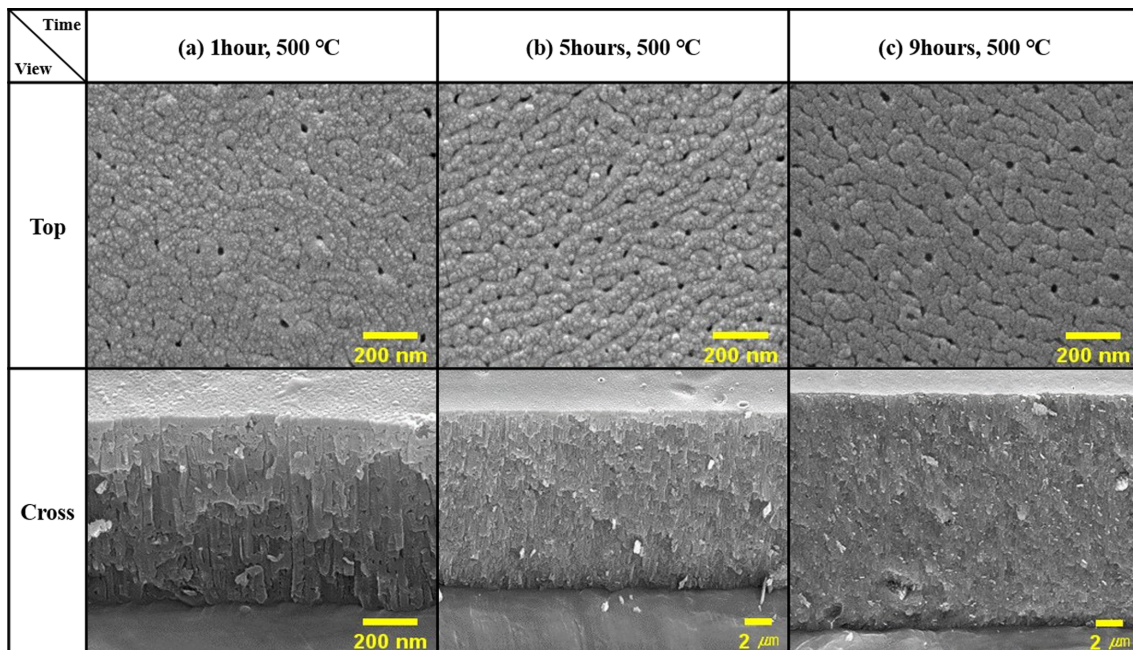


Fig. 3. FE-SEM of surface morphology and thickness of the aluminum anodization film prepared at applied by anodized 1 h, 5 h, and 9 h time and heat treatment by 500 °C

극산화 피막 단면 및 표면을 FE-SEM으로 분석한 결과이다. Fig. 2, Fig. 3에 대한 FE-SEM 분석을 바탕으로 관찰한 기공의 직경(Pore-Distance,  $D_p$ ), 기공간 거리(Interpore-Distance,  $D_{int}$ ), 양극산화 피막의 두께(Thickness)의 측정값은 Table 2에 나타냈다. Fig. 2a는 양극산화 공

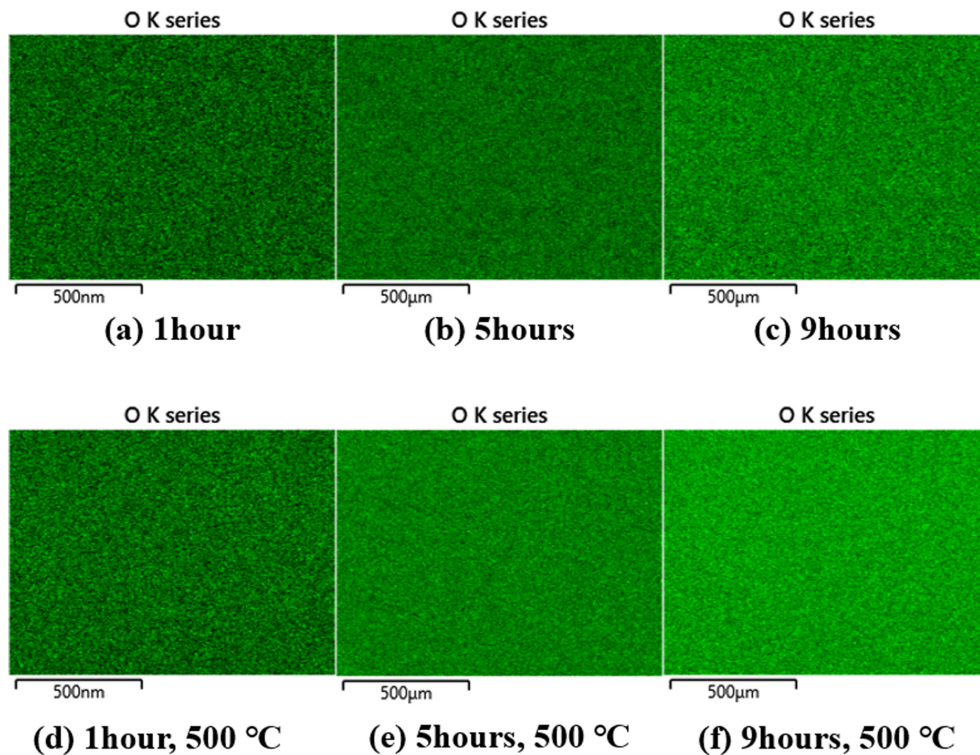
정을 1시간 진행하였으며 평균 기공의 직경, 기공간 거리, 양극산화 피막의 두께가 각각  $17.98 \pm 3.12$  nm,  $81.58 \pm 9.81$  nm,  $1.90 \pm 0.039$   $\mu$ m 이다. (b)의 경우 양극산화 공정 시간은 5시간이며  $18.32 \pm 2.82$  nm,  $86.80 \pm 9.91$  nm,  $780.92 \pm 11.15$   $\mu$ m 로 앞서 나온 (a)결과값들

**Table 2. Measurement of pore size and anodization film thickness of anodized aluminum 6061 alloys by applying different times and heat treatment**

Heat treatment		1 hour	5 hours	9 hours
X	Pore diameter (nm)	17.98 ± 3.12	18.32 ± 2.82	19.28 ± 4.47
	Interpore distance (nm)	81.58 ± 9.81	86.80 ± 9.91	95.51 ± 3.82
	Thickness (μm)	1.90 ± 0.039	780.92 ± 11.15	1326.28 ± 14.66
O	Pore diameter (nm)	19.56 ± 3.98	20.94 ± 2.68	22.19 ± 3.56
	Interpore distance (nm)	79.35 ± 9.57	86.08 ± 9.35	90.08 ± 8.84
	Thickness (μm)	1.87 ± 2.31	783.14 ± 8.27	1331.16 ± 12.93

보다 증가함을 보이며 양극산화 피막 두께의 경우 급격한 증가를 보이고 있다. (c)는 양극산화 공정을 9시간 진행하였으며 19.28 ± 4.47 nm, 95.51 ± 3.82 nm, 1326.28 ± 14.66 μm 로 측정된 것을 보아 기공 사이 간격, 기공의 직경, 양극산화 피막의 두께가 양극산화 시간에 비례함을 알 수 있었으며, 이는 선행 연구와 유사함을 확인하였다 [31]. Fig. 3은 Fig. 2 와 동일한 조건에서 양극산화 공정을 수행하였으며 후 열처리 공정을 500 °C로 30 분간 추가적으로 진행하여 단면 및 표면 형상을 FE-SEM 으로 분석하였다. Fig. 3a는 양극산화 공정을 1시간 동안 진행한 후 열처리를 수행한 것으로 기공의 직경, 기공간 거리, 양극산화 피막의 두께가 각각 19.56 ± 3.98 nm, 79.35 ± 9.57 nm, 1.87 ± 2.31 μm 이다. (b)는 양극산화 공

정을 5 시간동안 행한 후 열처리를 진행하였다. 측정값은 각각 20.94 ± 2.68 nm, 86.08 ± 9.35 nm, 783.14 ± 8.27 μm 이며, (c)의 경우 양극산화를 9시간동안 행한 후 열처리 공정을 수행하였으며 22.19 ± 3.56 nm, 90.08 ± 8.84 nm, 1331.16 ± 12.93 μm 로 양극산화 공정 시간에 비례하여 기공의 직경, 기공간 거리, 양극산화 피막의 두께 모두 증가함을 확인할 수 있다. 그러나 Fig. 2와 달리 추가적인 후 열처리 공정을 진행하였음에도 기공의 직경, 기공간 거리, 산화 피막의 두께가 크게 달라지지 않고 유사함을 관찰할 수 있다. 이를 통해 500 °C 에서의 열처리 공정 조건이 양극산화 피막의 배열에 크게 영향을 주지 않는다는 것을 확인할 수 있으며, 이는 열처리로 인한 기계적 특성 저하가 발생하지 않은 것으로 사료된다 [32].

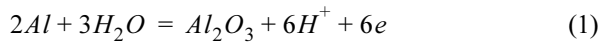


**Fig. 4. EDS Mapping Image post-heat treatment after anodizing aluminum 6061**

Table 3. Component content of anodization film for different time through EDS

Heat treatment	Elements (At%)	1 hour	5 hours	9 hours
X	O	49.27	50.39	51.02
	Mg	0.14	0.14	0.13
	Si	0.27	0.25	0.24
O	O	50.08	51.24	52.17
	Mg	0.13	0.12	0.12
	Si	0.24	0.26	0.25

후 열처리 공정으로 인한 양극산화 피막의 화학적 조성 변화를 관찰하기 위해 EDS 및 EDS Mapping을 진행하였으며, 양극 산화 및 후 열처리 공정을 진행한 샘플의 산소(At%)를 Fig. 4로 나타냈다. Fig. 4와 Table 3을 통해 알 수 있듯 양극산화 공정 시간에 비례하여 점차 산소 함량이 증가함을 확인할 수 있다. 이는 양극(anode)에서 일어나는 산화반응과 음극(cathode)에서 일어나는 환원반응으로 인해 알루미늄과 산소가 화학적으로 결합하므로 산화 피막에 산소가 점진적으로 증가하는 것을 식 (1)로 설명할 수 있다 [33].



또한 Fig. 4와 Table 3에서 보는 바와 같이 후 열처리 공정을 실시한 샘플의 양극산화 피막에서 산소가 더 많이 관찰됨을 확인할 수 있으며, 이러한 현상은 후 열처리 공정이 추가된 샘플이 고온 환경에서 산화반응이 일어나 이와 같은 변화가 관찰되는 것으로 사료된다.

Fig. 5는 60 V 전압에서 1, 5, 9 시간 양극산화 처리한 시편과 동일한 양극산화 시간에 후 열처리 공정을 추가로 진행한 시편의 Delta H 즉, 엔탈피 값을 나타내고 있다. Fig. 5에서의 엔탈피(Delta H)는  $\Delta H > 0$  이므로 흡열반응을 나타내며, 양극산화 공정 시간이 길어짐에 따라 양극산화 피막 두께가 증가하여 열 반응에 대해 안정함을 나타내고 있다. 또한 후 열처리 공정을 실시한 샘플의 경우 양극산화 공정만 실시한 샘플보다 엔탈피(Delta H)의 값이 감소함을 확인할 수 있다. 양극산화만 실시한 샘플보다 후 열처리 공정을 수행한 샘플의 경우 더 큰 엔탈피 감소량을 가져 열 반응에 더욱 안정된 모습을 보이는데, 이는 후 열처리 공정을 통한 산화 피막 내부의 결정화 비율이 높아져 나타날 수 있는 변화로 사료된다.

Fig. 6은 60 V 전압 조건에서 1, 5, 9 시간 양극산화 공정 처리한 시편과 동일한 양극산화 시간에 후 열처리 공정을 추가로 진행한 시편의 동 전위 분극 곡선을 나

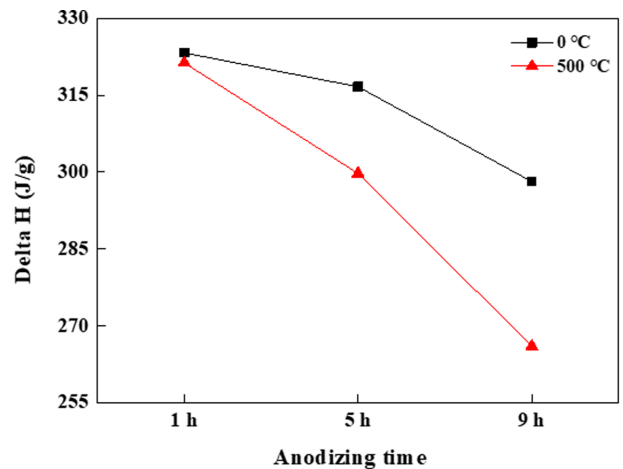


Fig. 5. Thermal Analysis of post-heat treatment after anodizing aluminum 6061

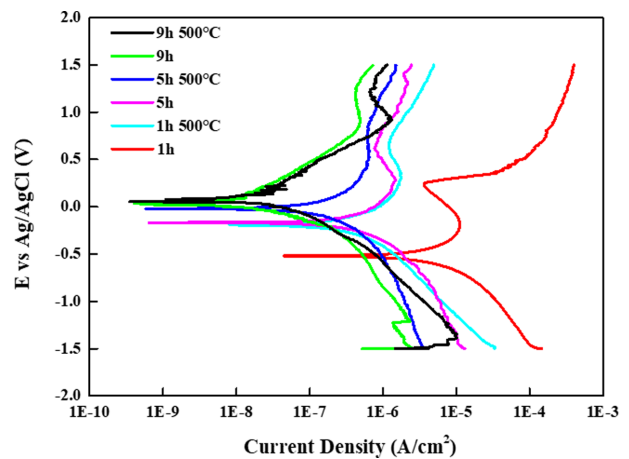


Fig. 6. Potentiodynamic polarization curves for aluminum oxide formed at 60 V and post-heat treatment

타냈으며, Table 4는 Fig. 6의 부식 전류 밀도( $I_{corr}$ )와 부식 전위( $E_{corr}$ )의 값을 수치화 한 것이다. 동 전위 분극 시험의 경우 높은 부식 전위와 낮은 부식 전류 밀도를 가질수록 부식에 대한 저항이 우수하다. Fig. 6과 Table 4에서 양극산화 공정 시간이 증가함에 따라 높은 부식

**Table 4. Potentiodynamic polarization test results for aluminum formed at 60 V and post-heat treatment**

Heat treatment	Time	$E_{corr}$ (V)	$I_{corr}$ (A/cm <sup>2</sup> )
X	1 h	-0.52	$3.63 \times 10^{-7}$
	5 h	-0.16	$1.87 \times 10^{-8}$
	9 h	-0.01	$1.28 \times 10^{-9}$
O	1 h	-0.19	$2.78 \times 10^{-8}$
	5 h	-0.03	$1.12 \times 10^{-8}$
	9 h	0.04	$3.09 \times 10^{-10}$

전위 값을 가지게 되며, 부식 전류 밀도는 낮은 값을 가지게 되는 것을 확인할 수 있다. 추가적인 후 열처리 공정을 진행한 시편의 경우도 양극산화 공정 시간이 증가함에 따라 부식 저항이 우수해짐을 관찰할 수 있다. 또한 양극산화 공정만 수행한 시편보다 후 열처리 공정을 실시한 시편의 부식 전위 값이  $1 \text{ h} < 1 \text{ h}/500^\circ\text{C} < 5 \text{ h} < 5 \text{ h}/500^\circ\text{C} < 9 \text{ h} < 9 \text{ h}/500^\circ\text{C}$  순서로 높아지며 부식 전류 밀도는 반비례하므로 부식 저항이 더 우수함을 알 수 있다. 이는 후 열처리 공정으로 인한 부분 결정화가 이루어짐에 따라 양극산화 피막의 격자 배열, 밀도 등이 변화하여 내식성이 향상되는 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구는 0.3 M 옥살산(Oxalic acid) 용액을 통해 양극산화를 진행한 알루미늄 6061 시편에서 형성된 양극산화 피막은 공정 시간이 길어짐에 따라 기공의 직경, 기공간 거리, 두께가 증가함을 확인하였다. 추가적인 후 열처리를 진행한 시편의 경우 전계 방출형 주사 전자현미경을 통해 표면을 관찰하였으나, 양극산화 공정만 실시한 시편과 비교하여 특별한 변화는 관찰되지 않았다. 이는 본 실험의 후 열처리 조건에서는 양극산화 피막의 배열, 두께에는 크게 영향을 주지 않는다는 것을 확인할 수 있다. EDS 및 EDS Mapping을 통해 추가적인 후 열처리 공정을 실시한 시편에서 산소함량이 증가함을 관찰할 수 있으며, 열 분석기(TA)를 통해 양극산화 피막이 두께가 증가할수록 엔탈피(Delta H)가 감소함을 알 수 있다. 또한 후 열처리 공정을 한 시편의 경우 열 반응에 더욱 안정한 결과를 볼 수 있는데, 이는 후 열처리를 통하여 양극산화 피막의 부분 결정화가 이루어진 것으로 사료된다. 산화 피막 결정화의 경우 보고된 선행연구에 따르면  $500^\circ\text{C}$  30분의 후 열처리 조건에서  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  결정화를 이룰 수 있음을 알 수 있다 [34]. 산화 피막 결정화로 인한 내식성 향상 효과를 기대하여 동 전위 분극 시험 곡선을 통해 부식 전위와 부식 전류

밀도를 확인하였으며, 양극산화 시간이 증가함에 따라 낮은 전류밀도와 높은 부식 전위를 가지게 된다. 후 열처리 공정을 수행한 시편의 경우 양극산화 공정만 실시한 시편보다 우수한 곡선을 보여주며 이를 통해 내식성이 향상됨을 알 수 있다. 그러나 과한 후 열처리의 경우 산화 피막 밀도변화 및 균열을 유발하여 기계적, 화학적 특성 저하 문제를 발생할 수 있기에 후 열처리 공정을 추가함으로써 나타날 수 있는 특성 변화를 통해 다양한 산업에 적용할 수 있는 추가적인 연구가 필요하다.

#### 감사의 글

이 논문은 2022년도 밀양시와 한국재료연구원의 지원 받아 연구되었음(PICO240).

#### References

1. Y. J. Lee, S. C. Lee, A Study on Electric Vehicle Composite Material Frame Battery Case Using Collision Analysis, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, **21**, 15 (2022). Doi: <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2022.21.01.015>
2. C. Park, S. Moon, I. Cheong, D. Yun, Effect of AC Current Density on the PEO Film Formation of Al6061 Alloy, *Journal of the Korean institute of surface engineering*, **52**, 138 (2019). Doi: <https://doi.org/10.5695/JKISE.2019.52.3.138>
3. 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>
4. Y. Madhavi, N. Narasaiah, A. Jyothirmayi, Influence of surface-roughness on the corrosion-fatigue behavior of MAO coated 6061-T6 Al alloy assessed in NaCl medium, *Surface and Coatings Technology*, **14**, 127102 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127102>
5. L. Telmenbayar, A.G. Ramu, D. Yang, M. Song, O. Erdenebat, D. Choi, Corrosion resistance of the anodization/glycidoxypolytrimethoxysilane composite coating on 6061 aluminum alloy, *Surface and Coatings Technology*, **403**, 126433 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126433>
6. R. Krishna, Y. Madhavi, T. Sahithi, N. P. Wasekar, N. M. Chavan, D. S. Rao, Influence of prior shot peening variables on the fatigue life of micro arc oxidation coated 6061-T6 Al alloy, *International Journal of Fatigue*, **106**,

- 165 (2018). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfatigue.2017.09.020>
7. J. Zang, S. Yu, G. Zhu, X. Zhou, Fabrication of superhydrophobic surface on aluminum alloy 6061 by a facile and effective anodic oxidation method, *Surface and Coatings Technology*, **380**, 125078 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125078>
  8. E. Song, Y. T. Kim, J. Choi, Effects of Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> Concentration on the Porosity of Plasma Electrolytic Oxidation Coatings Surface on the 6061 Al Alloy and Subsequent-NaAlO<sub>2</sub> Sealing, *Journal of the Korean institute of surface engineering*, **52**, 117 (2019). Doi: <https://doi.org/10.5695/JKISE.2019.52.3.117>
  9. 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 and Interfaces*, **4**, 842 (2012). Doi: <https://doi.org/10.1021/am201514n>
  10. 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>
  11. 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>
  12. C. Jeong, J. Lee, K. Sheppard, CH 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>
  13. 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>
  14. 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>
  15. 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>
  16. M. Franco, S. Anoop, R. Uma Rani, 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>
  17. 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>
  18. C. Jeong, Ph.D. Thesis, pp.2-5, Stevens Institute of Technology, New Jersey (2013).
  19. M. Ardelean, S. Lascau, E. Ardelean, A. Josan, Surface treatments for aluminium alloys, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **294**, 012042 (2018). Doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/294/1/012042>
  20. 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>
  21. M. Sanghyuck, M. Sungmo, L. Sugun, Formation Characteristics of Hard Anodizing Films on 6xxx Aluminum Alloys, *Journal of the Korean institute of surface engineering*, **52**, 203 (2019). Doi: <https://doi.org/10.5695/JKISE.2019.52.4.203>
  22. Z. B. Xie, S. Adams, D. J. Blackwood, J. Wang, The effects of anodization parameters on titania nanotube arrays and dye sensitized solar cells, *Nanotechnology*, **19**, 405701 (2008). Doi: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/19/40/405701>
  23. G. D. Sulka, Highly Ordered Anodic Porous Alumina Formation by Self-Organized Anodizing, *Nanostructured Materials in Electrochemistry*, **1**, 1 (2008). Doi: <https://doi.org/10.1002/9783527621507.ch1>
  24. Y. Goueffon, L. Arurault, C. Mabru, C. Tonon, P. Guigue, Black anodic coatings for space applications: study of the process parameters characteristics and mechanical properties, *Journal of Materials Processing Technology*, **209**, 5145 (2009). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.02.013>
  25. I. Levin, D. Brandon, Metastable alumina polymorphs: crystal structures and transition sequences, *Journal of the American Ceramic Society*, **81**, 1995 (1998). Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1998.tb02581.x>
  26. S. Kang, Convergent Study of Aluminum Anodizing Method on the Thermal Fatigue, *Journal of the Korea Convergence Society*, **7**, 169 (2016). Doi: <https://doi.org/10.15207/JKCS.2016.7.5.169>
  27. J. Lee, Y. Kim, H. Jang, U. Jung, W. Chung, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Seal-

- ing of Anodized Aluminum Alloy by Heat Treatment, *Surface and Coatings Technology*, **243**, 34 (2014). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.05.071>
28. S. Y. Kang, D. W. Lee, Study on Improvement of Mechanical Properties after Heat Treatment of Hard Chromium Electrodeposits with Additives, *Journal of the Korean institute of surface engineering*, **47**, 116 (2014). Doi: <https://doi.org/10.5695/JKISE.2014.47.3.116>
  29. Y. Park, C. Jeong, The Formation of Anodic Oxide Film by Anodizing Voltage and Time of 6061 Aluminum Alloy, *Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers*, **34**, 68 (2021). Doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2021.34.1.68>
  30. H. Ji, 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>
  31. J. Kim, C. Jeong, A Study on the Surface Properties and Corrosion Behavior of Functional Aluminum 3003 Alloy using Anodization Method, *Corrosion Science and Technology*, **21**, 290 (2022). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2022.21.4.290>
  32. Y. Jeon, S. Kim, J. Park, N. Jeong, Enhanced Properties of Aluminum Oxide Layers with Post Heat Treatment, *Journal of the Korean institute of surface engineering*, **52**, 275 (2019). Doi: <https://doi.org/10.5695/JKISE.2019.52.5.275>
  33. M. Sungmo, Anodic oxidation treatment methods of metals, *Journal of the Korean institute of surface engineering*, **51**, 1 (2018). Doi: <https://doi.org/10.5695/JKISE.2018.51.1.1>
  34. J. Chang, C. Lin, C. Liao, C. Chen, W. Tsai, Effect of Heat-Treatment on Characteristics of Anodized Aluminum Oxide Formed in Ammonium Adipate Solution, *Journal of the Electrochemical Society*, **151**, B188 (2004). Doi: <https://doi.org/10.1149/1.1646140>