

## 알루미늄 1050 합금의 양극산화 시간에 따른 산화피막 성장 거동 및 부식 손상 연구

최예지 · 정찬영<sup>†,‡</sup>

동의대학교 신소재공학과, 부산광역시 부산진구 엄광로 176  
(2022년 7월 04일 접수, 2022년 7월 18일 수정, 2022년 7월 18일 채택)

### Growth Behavior and Corrosion Damage of Oxide Film According to Anodizing Time of Aluminum 1050 Alloy

Yeji Choi and Chanyoung Jeong<sup>†,‡</sup>

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

(Received July 04, 2022; Revised July 18, 2022; Accepted July 18, 2022)

Aluminum 1000 series alloy, a pure aluminum with excellent workability and weldability, is mainly used in the ship field. Aluminum alloy can combine with oxygen in the atmosphere and form a natural oxide film with high corrosion resistance. However, its corrosion resistance and durability are decreased when it is exposed to a harsh environment for a long period of time. For solving this problem, a porous oxide film can be formed on the surface using an anodizing treatment method, a typical surface technique among various methods. In this study, aluminum 1050 alloy was anodized for 2 minutes, 6 minutes, and 10 minutes. The structure and shape of the oxide film were then analyzed to determine the corrosion resistance according to the thickness of the oxide film that changed depending on working condition using 15 wt% NaCl. After it was immersed in NaCl solution for 1, 5, and 10 days, corrosion damage was observed. Results confirmed that the thickness of the oxide film increased as the anodization time became longer. The depth of surface damage due to corrosion became deeper when the film was immersed in the 15 wt% NaCl solution for a longer period of time.

**Keywords:** Corrosion resistance, Aluminum alloy, Anodization time, Thickness, Porous oxide film

## 1. 서론

알루미늄 합금은 우수한 절삭가공 및 성형성, 친환경 특성을 가져 가전제품 및 휴대폰 케이스 등 다양한 산업 분야에서 사용된다 [1,2]. 또한 경량 금속이라는 이점으로 항공, 건축 분야에서 더욱 주목받고 있으며, 합금 원소 및 가공에 따라 내식성, 내구성 등 다양한 물리적 특성을 가질 수 있다. 그 중 1000 계열 합금은 순수한 알루미늄으로 다른 계열에 비해 강도는 낮지만 높은 열, 전기 전도도를 가지며, 가공성과 용접성이 좋아 열교환기 핀, 포일, 와이어 등의 주 용도로 현재 산업에

서 많이 사용되고 있다 [3-7].

일반적으로 알루미늄 합금은 높은 활성도를 가져 대기 중 산소와 결합해 표면에 형성된 자연 산화 피막의 존재로 금속 표면을 보호해 대기 중에서 안정하게 사용이 가능하기에 부식 저항 특성이 높은 금속으로 알려져 있다. 그러나 염소 이온이 다량으로 포함된 해수와 같이 부식에 쉽게 노출된 환경에서는 자연 산화 피막 두께가 얇아 빠르게 손상되며, 국부적인 부식이 진행하여 내식성을 충분히 나타내지 못하는 경우가 발생한다 [8]. 따라서, 알루미늄 합금의 부식 속도를 감소시키는 표면 처리 공정이 필요하다 [9-15].

금속의 내마모성 및 내식성을 향상시키기 위한 방법으로 다양한 표면 처리 기법이 사용되고 있다. 대표적인 표면 처리 기술로는 양극산화 처리 방법이 있는데, 이는 금속 표면에 인위적으로 두껍고 단단한 산화 피막

<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, 최예지: 학부 연구생

을 생성시키는 기술이며, 우수한 공정성 및 경제성을 가져 다양한 소재에 적용 가능하다 [16-18]. 또한 금속 표면에 생성되는 산화 피막의 절연 특성을 나타내는 이점이 있으며, 생성된 산화 피막은 오염, 마모, 부식으로부터 금속을 보호하는 역할을 하여 산업 현장에서 사용되는 금속의 내마모성, 내구성 및 내식성을 향상시킬 수 있다 [19-22].

양극산화 처리 방법은 양극에 표면 처리하고자 하는 시편을 연결하고, 음극에는 보조 전극을 연결하여 액상의 산성 전해질 내에서 전류를 인가 시 음극에서는 산소가 발생하는 환원 반응이 일어나며, 양극에서는 산소와 금속 원소가 만나 화학적으로 결합하는 산화 반응이 발생한다. 양의 전위를 처리하고자 하는 금속에 인가 시 피막의 국부적 용해로 기공이 형성된다 [23]. 그 결과 알루미늄 표면에 두껍고 단단한 산화 피막을 형성시킬 수 있다 [23]. 즉, 산성 전해질 내에서 처리하고자 하는 금속을 양극으로 하여 금속 표면에서 일어나는 산화 반응을 이용해 인위적으로 산화 피막을 성장시켜 주는 것을 양극산화 처리라 한다 [24-26].

양극산화 처리 방법 중 정전압법으로 산화피막을 형성 시 전압을 일정하게 공급하여 초기에 많은 전류가 흘러 일정한 시간이 지나면 용액과 접한 피막 바깥 부분의 화학적 용해 반응으로 인하여 피막의 성장이 더욱 어려워지게 된다. 그러나 상대적으로 균일한 두께의 실린더 형 기공이 생성되고 비교적 낮은 전압에서 두껍고 단단한 산화 피막을 얻을 수 있다는 특징이 있다 [24-28].

본 연구에서는 알루미늄 1050 합금을 동일한 전압 조건하에서 시간에 따른 양극산화를 실시하였으며 FE-

SEM 및 EDS를 통해 산화 피막 형상 및 두께와 화학 조성 분석하였다. 또한 인가 시간에 따른 산화 피막의 두께로 인한 내식성을 관찰하고자 15 wt% NaCl 용액으로 동 전위 분극 시험을 실시하였고, 15 wt% NaCl 용액에 양극산화 된 알루미늄 1050을 침지시켜 3D 광학현미경을 통해 부식 손상 깊이를 확인하였다.

## 2. 연구방법

본 연구는 알루미늄 1050 합금을 25 mm × 30 mm × 1 mm의 크기로 절단하여 Fig. 1과 같이 DC Power Supply를 통해 정전압 조건하에서 양극산화 처리를 실시하였다. 표면 불순물 제거를 위한 전처리 단계로 아세톤 및 에탄올에 침지하여 10분간 초음파 세척을 실시하였으며, 양극산화 처리 전 자연 산화 피막 제거를 위해 70% 과염소산( $\text{HClO}_4$ )과 에탄올을 1:4 부피 비의 비율로 혼합하여 상온에서 양극으로는 알루미늄 1050을 사용하고, 음극으로는 백금을 사용하여 전해 연마를 1분간 실시하였다. 전해 연마 후 0.3 M 옥살산(Oxalic Acid) 전해액을 통하여 양극산화 처리를 진행하였으며, 이중 비커를 이용하여 냉각수를 순환시켜 옥살산 전해액의 온도를 0 °C로 유지하였고, 전극 간 거리는 5 cm, 인가전압은 50 V로 2, 6, 10 분간 실시하였다. 각 단계가 끝난 후 표면 세척을 위해 아세톤과 에탄올로 알루미늄 1050 합금을 세척 및 건조하였다. 양극산화 처리가 끝난 후 생성된 산화 피막의 형상을 관찰하기 위해 백금 코팅 후 전계 방사형 주사 전자 현미경(Field Emission Scanning Electrode Microscope)을 사용하였으며,

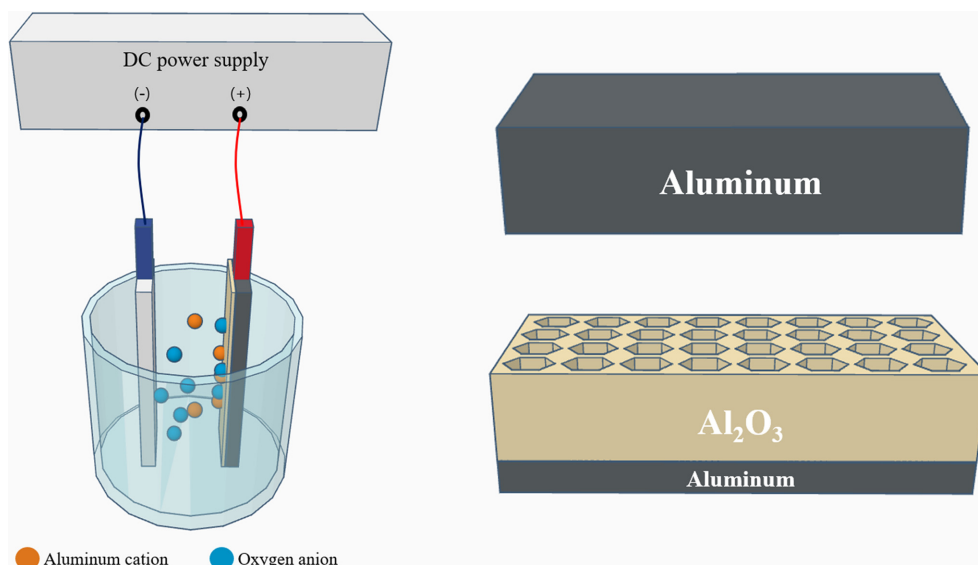


Fig. 1. Experimental method diagram

에너지 분산형 분광기(Energy Dispersive Spectroscopy)를 통해 생성된 산화 피막의 성분을 분석하였다. 또한 부식 특성을 평가하기 위해 상온의 15 wt% NaCl 용액에서 동 전위 분극 시험(Potentiodynamic Polarization Test)을 실시하였다. 작업 전극으로는 양극산화 처리된 알루미늄 1050 합금, 기준 전극으로 은/염화 은(Ag/AgCl)전극, 상대 전극으로 백금(Pt)을 사용하였으며, 주사 속도는 1 mV/sec, 범위는 -1.5 V ~ +1.5 V로 5회 측정하여 평균과 표준편차를 구하였다. 또한 극한 환경에서의 부식 정도를 확인하기 위해 상온의 15 wt% NaCl 용액에 1, 5, 10일간 침지 후 3D 광학 현미경으로 분석하였다.

### 3. 연구결과 및 고찰

본 연구에서는 알루미늄 1050 합금을 시간에 따른 양극산화 처리를 하여 형성된 산화 피막의 구조물 및 표면 형상을 확인하였다. 양극산화 처리 시간은 2, 6, 10 분으로 하였으며 인가전압은 50 V로 동일하게 진행하였다. Fig. 2는 알루미늄 1050 합금 표면에 형성된 양극산화 피막의 형상을 전계 방사형 주사 전자 현미경(FE-

SEM)으로 분석한 결과를 나타냈다. SEM 이미지 분석 결과 표면에 기공이 관찰되는 것을 보아 기공형 산화 피막이 형성됨을 확인할 수 있다. Table 1은 기공 직경, 기공 간 거리, 산화 피막 두께를 측정하여 평균값을 산출한 결과이다. 양극산화 처리 시간 2, 6, 10분 순으로 기공 직경 및 기공 사이 거리는 각각 약 7.51 nm, 11.36 nm, 15.47 nm와 89.21 nm, 105.65 nm, 115.8 nm로 측정되었으며, 산화 피막의 두께는 113.71 nm, 157.71 nm, 297.86 nm로 나타났다. 결과적으로 양극산화 처리 시간이 길어질수록, 기공 크기, 기공 사이 거리, 산화 피막의 두께가 증가하는 것으로 확인되며, Fig. 3을 통하여 선형적으로 증가하는 양상임을 알 수 있다. 이는 양극산화 처리 시간이 길어질수록 금속 표면에서 반응하는 이온의 양이 많아지기에 다공성 산화 피막이 형성되며, 기공 크기, 기공 사이 거리, 산화 피막의 두께 등 구조물 성장에 영향을 미친 것으로 사료된다.

Fig. 4와 Table 2는 50 V 인가 전압 조건하에서 양극산화 처리 시간을 달리하여 생성된 알루미늄 산화 피막 표면에서 한 점의 조성을 에너지 분광형 분광기(EDS)를 통하여 정량 분석한 결과이며 전해연마 후 산소의

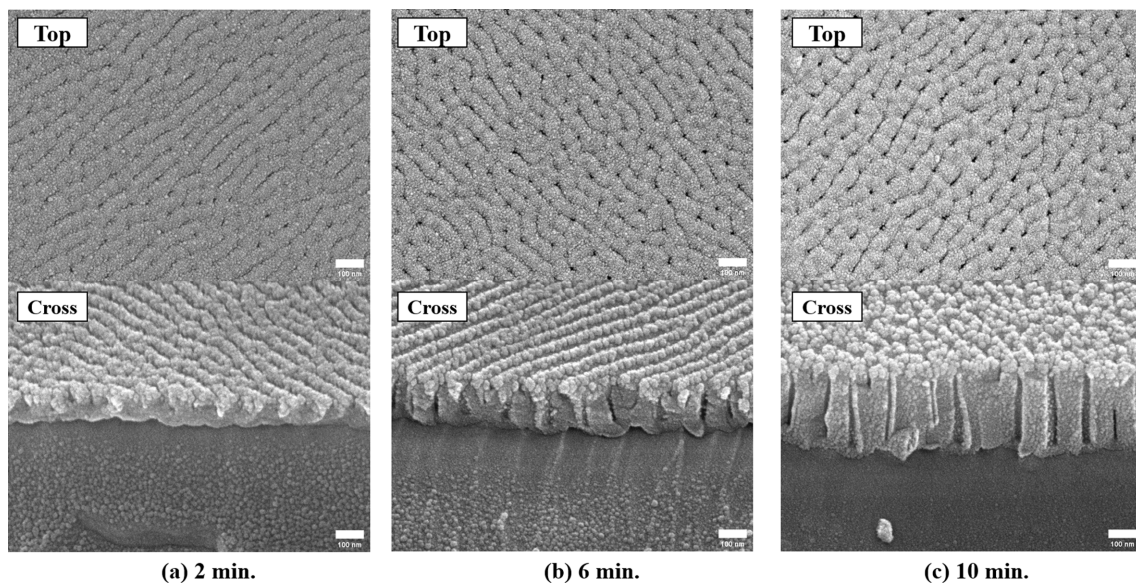


Fig. 2. FE-SEM of surface morphology and thickness of the aluminum oxide film prepared at applied voltage of 50 V for each anodization time

Table 1. Measurement of pore size and thickness of aluminum oxide film according to anodization time

Sample	Pore diameter (nm)	Interpore distance (nm)	Thickness (nm)
2 min.	7.51 ± 1.53	89.21 ± 9.65	113.71 ± 7.72
6 min.	11.36 ± 2.14	105.65 ± 14.39	157.71 ± 8.84
10 min.	15.47 ± 2.57	115.80 ± 13.54	297.86 ± 10.59

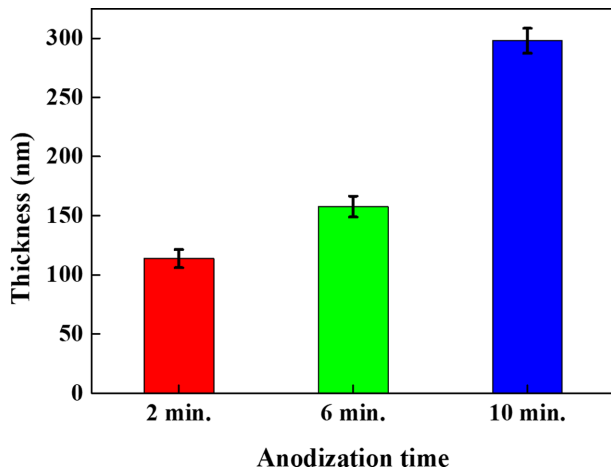


Fig. 3. Variation of thickness according to anodization time at 50 V

함량은 0.49 at.%로 미미한 수치이지만 양극산화 처리 시간이 2, 6, 10 분으로 증가할수록 11.39 at.%, 20.65 at.%, 33.76 at.%로 증가하였다. Fig. 5를 통하여 알루미늄의 함량은 줄어들고 산소 함량은 증가함을 확인하였다. 이는 알루미늄 성분이 양극산화 처리 과정을 통하여 알루미늄 표면에 산화 피막이 형성되었음을 유추할 수 있으며, 알루미늄 성분이 산소 성분을 가지는 알루미늄 산화 피막으로 변환된 것으로 판단된다.

Fig. 6과 Table 3은 양극산화 된 알루미늄 1050 합금의 분극 곡선이며, 부식 전위 및 부식 전류를 나타낸 것이다. 양극산화 된 알루미늄 1050 합금의 부식 전위는 양극산화 인가시간이 2, 6, 10분 순으로 각각 -0.271 V, -0.196 V, 0.022 V로 인가시간이 늘어날수록 부식 전위의 값은 양의 값으로 늘어나며, 부식 전류 밀도는  $2.03 \times 10^{-7}$  A/cm<sup>2</sup>,  $2.07 \times 10^{-8}$  A/cm<sup>2</sup>,  $1.46 \times 10^{-8}$  A/cm<sup>2</sup>로

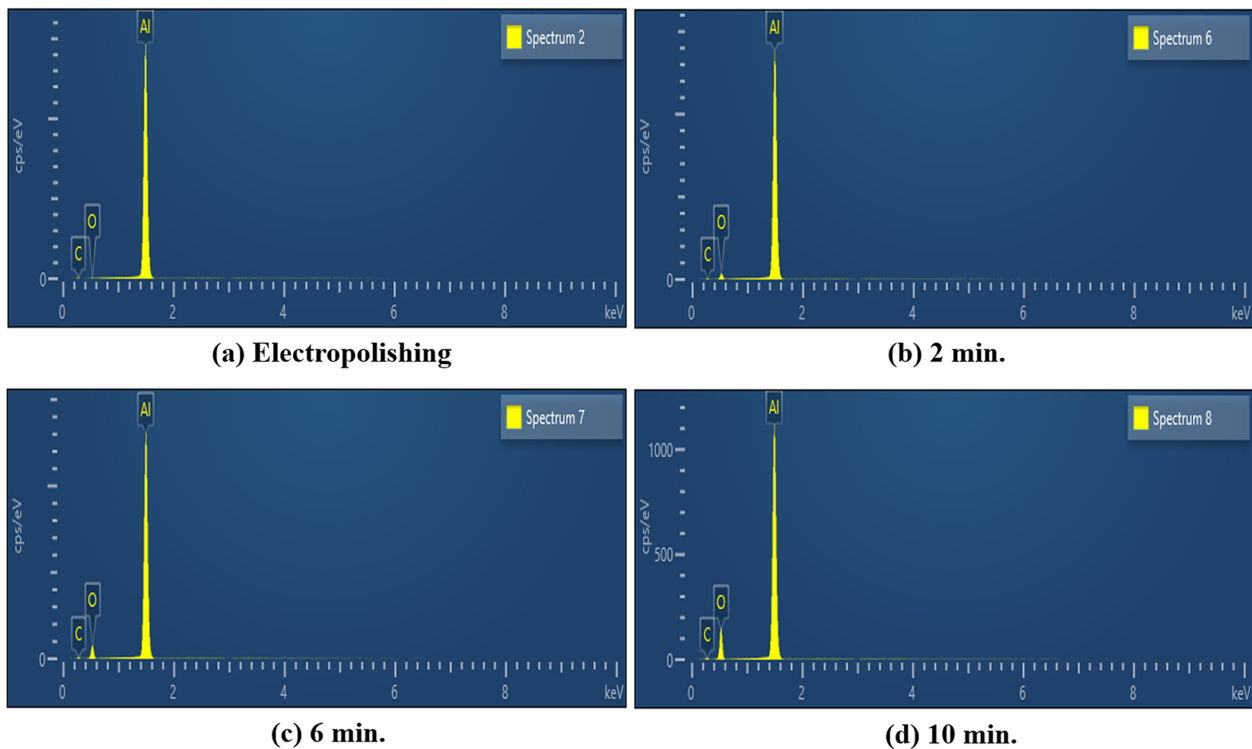


Fig. 4. EDS analysis after anodization with time at 50 V applied voltage

Table 2. Chemical composition after anodization with time at 50 V applied voltage

Sample	Elements (Atomic %)		
	Al K	O K	C K
Electropolishing	85.28	0.49	14.23
2 min.	75.55	11.39	13.05
6 min.	66.23	20.65	13.12
10 min.	55.44	33.76	10.80

인가시간이 늘어날수록 부식 전류 밀도의 값은 감소하는 경향을 보인다. 즉, 산화 피막이 두꺼워질수록 높은 부식 전위 값과 부식으로 인한 피막의 질량 손실을 의

미하는 부식 전류 밀도 값이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 두껍게 형성된 산화 피막이 부식 환경에 노출되었을 때 부식 물질로부터 모재를 보호하는 역할을

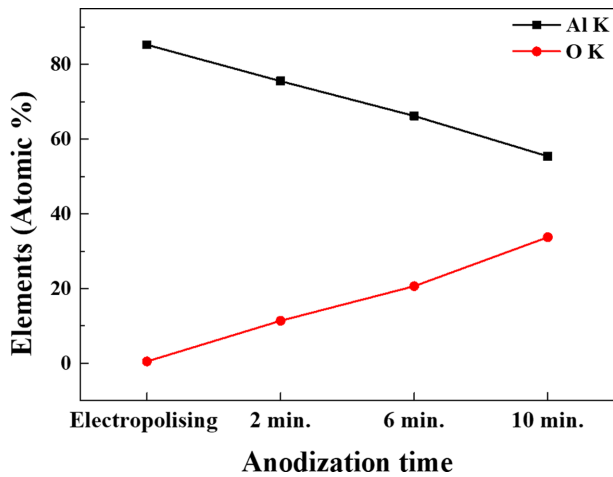


Fig. 5. Variation of chemical composition of Al 1050 with anodization time

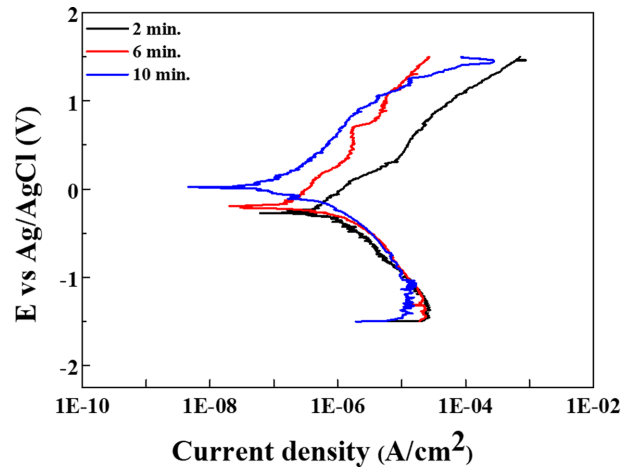


Fig. 6. Potential polarization curve according to anodization application time

Table 3. Potential polarization test measurement according to the application time of anodization

	2 min.	6 min.	10 min.
$I_{\text{corr}}$ (A/cm <sup>2</sup> )	$2.03 \times 10^{-7}$	$2.07 \times 10^{-8}$	$1.46 \times 10^{-8}$
$E_{\text{corr}}$ (V)	-0.271	-0.196	0.022

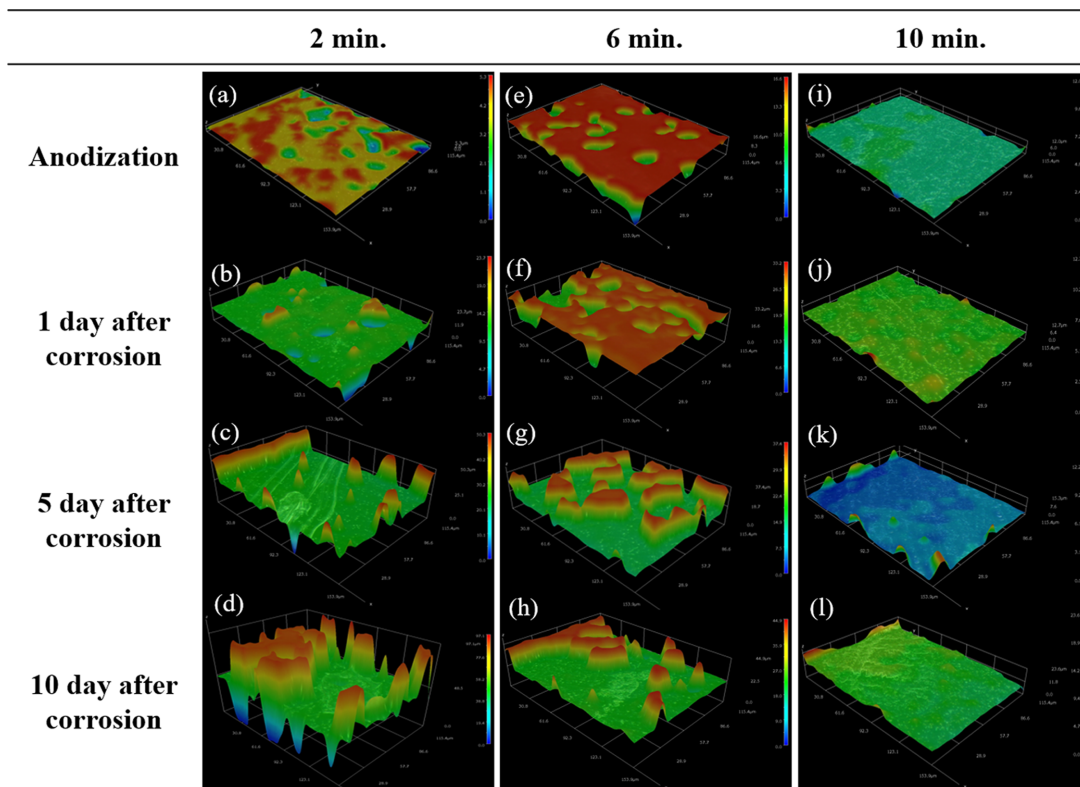
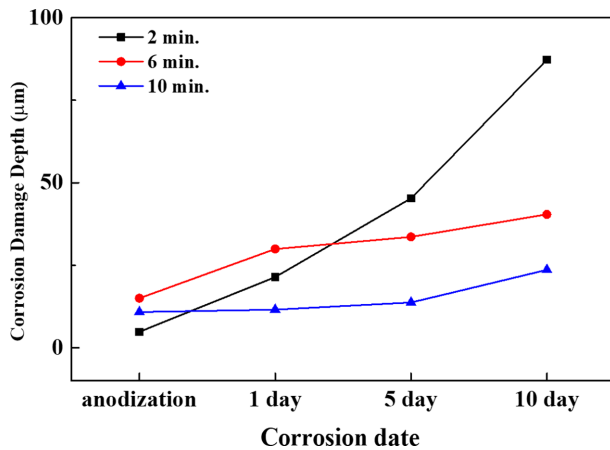


Fig. 7. 3D surface analysis of Al 1050 immersed in 15 wt% NaCl after anodization

**Table 4. Height difference analyzed by 3D image**

	2 min.	6 min.	10 min.
Anodization	4.8 $\mu\text{m}$	15 $\mu\text{m}$	10.8 $\mu\text{m}$
1 day	21.4 $\mu\text{m}$	29.9 $\mu\text{m}$	11.5 $\mu\text{m}$
5 day	45.3 $\mu\text{m}$	33.6 $\mu\text{m}$	13.7 $\mu\text{m}$
10 day	87.3 $\mu\text{m}$	40.4 $\mu\text{m}$	23.6 $\mu\text{m}$

**Fig. 8. Variation of Height analyzed by 3D image**

하여 내식성이 더욱 우수하게 나타남을 확인하였다.

Fig. 7은 양극산화 공정을 2, 6, 10분간 실행한 후 15 wt% NaCl 용액에 1, 5, 10일간 침지하여 3D 광학 현미경을 통하여 관찰한 부식 깊이 이미지이며 Table 4를 통하여 수치를 나타냈다. Fig. 7a, e, i는 양극산화 후 산화 피막의 형상을 나타냈으며, 4.8  $\mu\text{m}$ , 15  $\mu\text{m}$ , 10.8  $\mu\text{m}$ 로 표면에 양극산화 피막이 치밀하게 생성된 것을 볼 수 있다. Fig. 7b, c, d는 양극산화를 2분간 행한 후 15 wt% NaCl 용액에 1, 5, 10 일간 침지 시켜 놓은 알루미늄 1050 합금의 부식 손상 정도이다. Table 4에 따르면 (b)의 부식 깊이는 양극산화 후 산화 피막 두께 대비 21.4  $\mu\text{m}$ 로 약 4.5배, (c)는 45.3  $\mu\text{m}$ 로 9.4배, (d)는 87.3  $\mu\text{m}$ 로 18.2배 정도 급격하게 증가한 것으로 나타났다. Fig. 7 f, g, h는 양극산화를 6분간 행한 후 15 wt% NaCl 용액에 1, 5, 10 일간 침지 시켜 놓은 알루미늄 1050 합금의 부식 손상 정도이며, (f)의 부식 깊이는 양극산화 후 산화 피막 두께 대비 29.9  $\mu\text{m}$ 로 2배, (g)는 33.6  $\mu\text{m}$ 로 2.2배, (h)는 40.4  $\mu\text{m}$ 로 2.7배 정도로 부식이 진행되었음을 확인할 수 있다. Fig. 7 j, k, l는 양극산화를 10 분간 행한 후 15 wt% NaCl 용액에 1, 5, 10 일간 침지 시켜 놓은 알루미늄 1050 합금의 부식 손상 정도이며 (j)의 부식 깊이는 양극산화 후 산화 피막 두께 대비 11.5  $\mu\text{m}$ 로 1.1배, (k)는 13.7  $\mu\text{m}$ 로 1.3배, (l)는 23.6  $\mu\text{m}$ 로 2.2배 증가하였다. Fig. 8에 의하면 양극산화 처리

시간이 길어짐에 따라 산화 피막의 두께가 두꺼워지기에 부식의 진전이 어렵고, 15 wt% NaCl 용액에 오래 침지 시킬수록 염소 이온이 산화 피막 내로 침투할 수 있는 시간이 충분하여 공식 특성이 더욱 잘 나타나 부식으로 인한 표면 손상 깊이가 깊어진 것으로 확인된다 [29-32].

#### 4. 결론

본 연구에서는 알루미늄 1050 합금의 50 V 인가전압에서 양극산화 처리 시간을 2, 6, 10 분으로 다르게 하여 시간에 따른 다공성 산화 피막의 구조물과 형상에 따른 특성을 관찰하였다. 양극산화 처리 시간이 길어질수록 산화 피막의 기공 크기, 기공 사이 거리 및 산화 피막의 두께는 선형적으로 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 이는 양극산화 처리 시간이 증가함에 따라 금속 표면에서 반응하는 이온의 양이 많아지기에 구조물 성장에 영향을 미친 것으로 사료된다. 또한 화학 성분 분석을 통하여 양극산화 인가시간이 길어질수록 알루미늄 함량은 감소하며, 산소의 함량은 증가하는 것을 보아 알루미늄 성분이 양극산화 처리 과정을 통해 산소 성분으로 변환되어 산화 피막이 형성된 것으로 판단된다. 부식이 발생하는 극한 환경인 15 wt% NaCl 용액에 알루미늄 1050 합금이 장기간 노출되었을 경우, 양극 산화 시간이 길어질수록 표면 손상 깊이는 양극산화 피막 대비 최대 18.2배, 2.7배, 2.2배로 줄어든다. 이는 양극산화 피막의 두께가 두꺼워질수록 부식 물질의 침투를 막아 부식의 진전이 느려지는 것으로 판단되며, 15 wt% NaCl 용액에 알루미늄 1050 합금이 장기간 노출되었을 경우, 부식 물질로 인한 산화 피막 내의 침투가 진행되기 충분한 시간을 가져 부식의 진전이 빠른 것으로 확인된다. 결과적으로 양극산화 피막의 성장 거동은 처리 시간의 영향이 있으며, 처리 시간이 길어질수록 반응하는 이온의 양은 많아지기에 양극산화 피막의 두께가 두꺼워진다. 또한 높은 부식 전위 값과 낮은 부식 전류 밀도 값을 가지는 것을 보아 산화 피막이 부식 환경에 노출되었을 때 부식 물질로부터 모재를 보호하여 내식성이 우수하게 나타날 수 있음을 확인하였다. 더 나아가,



양극산화 방법으로 다공성 산화 피막을 이용하여 부식 방지 효과를 얻어 내식성을 충분히 확보한 후 자동차 및 수송기기, 기계분야 등 다양한 산업에서 알루미늄 합금이 사용할 수 있도록 관련 연구가 필요하다.

## References

1. S. J. Lee, 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>
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. H. Takahashi, M. Chiba, Role of Anodic Oxide Films in the Corrosion of Aluminum and its Alloys, *Corrosion Reviews*, **36**, 35 (2018). Doi: <https://doi.org/10.1515/correv-2017-0048>
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. C. Jeong, J. Lee, K. Sheppard, 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>
6. V. Dumitrascu, L. Benea, E. Danaila, Corrosion Behavior of Aluminum Oxide Film Growth by Controlled Anodic Oxidation, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **209**, 012016 (2017). Doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/209/1/012016>
7. S. H. 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>
8. A. M. Abd-Elnaiem, A. M. Mebed, A. Gaber, M. A. Abdel-Rahim, Effect of the Anodization Parameters on the Volume Expansion of Anodized Aluminum Films, *Int. J. Electrochem. Sci*, **8**, 10515 (2013). Doi: <http://www.electrochemsci.org/papers/vol8/80810515.pdf>
9. L. Bouchama, N. Azzouz, N. Boukmouche, J. P. Chopart, 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>
10. 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>
11. C. Jeong, Ph.D. Thesis, pp. 2 - 5, Stevens Institute of Technology, New Jersey (2013).
12. I. Tsangaraki-Kaplanoglou, S. Theohari, T. Dimogerontakis, Y. M. Wang, H.H. Kuo, S. Kia, Effect of Alloy Types on the Anodizing Process of Aluminum, *Surface and Coatings Technology*, **200**, 2634 (2006). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.07.065>
13. Y. Ma, X. Zhou, Y. Liao, X. Chen, C. Zhang, H. Wu, Z. Wang, W. Huang, Effect of Anodizing Parameters on Film Morphology and Corrosion Resistance of AA2099 Aluminum-Lithium Alloy, *Journal of the Electrochemical Society*, **163**, C36 (2016). Doi: <https://doi.org/10.1149/2.1081607jes>
14. L. Benea, N. Simionescu-Bogatu, R. Chiriac, Electrochemically Obtained Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanoporous Layers with Increased Anticorrosive Properties of Aluminum Alloy, *Journal of Materials Research and Technology*, **17**, 2639 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.038>
15. 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>
16. K. S. Choudhari, C. H. Choi, S. Chidangil, 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>
17. 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>
18. 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)
19. R. T. Foley, Localized Corrosion of Aluminum Alloys- A Review, *Corrosion*, **42**, 277 (1986). Doi: <https://doi.org/10.5006/1.3584905>
20. A. M. Abd-Elnaiem, A. Gaber, Parametric Study on the Anodization of Pure Aluminum Thin Film Used in Fabricating Nano-Pores Template, *International Journal of*

- Electrochemical Science*, **8**, 9741 (2013). Doi: <http://www.electrochemsci.org/papers/vol8/80709741.pdf>
21. S.K. Thamida, H. C. Chang, Nanoscale Pore Formation Dynamics during Aluminum Anodization, *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, **12**, 240 (2022). Doi: <https://doi.org/10.1063/1.1436499>
  22. 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>
  23. F. Zhang, L. Zhao, H. Chen, S. Xu, D. G. Evans, X. Duan, Corrosion Resistance of Superhydrophobic Layered Double Hydroxide Films on Aluminum, *Angewandte Chemie*, **120**, 2500 (2008). Doi: <https://doi.org/10.1002/ange.200704694>
  24. J. A. Davies, B. Domeji, J. P. S. Pringle, F. Brown, The Migration of Metal and Oxygen during Anodic Film Formation, *Journal of the Electrochemical Society*, **112**, 675 (1965). Doi: <https://doi.org/10.1149/1.2423662>
  25. M. Mehdizade, M. Soltanieh, A. R. Eivani, Investigation of Anodizing time and Pulse Voltage Modes on the Corrosion Behavior of Nanostructured Anodic Layer in Commercial Pure Aluminum, *Surface and Coatings Technology*, **358**, 741 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.08.046>
  26. L. Zaraska, G. D. Sulka, J. Szeremeta, M. Jaskula, Porous Anodic Alumina Formed by Anodization of Aluminum Alloy(AA1050) and High Purity Aluminum, *Electrochimica Acta*, **55**, 4377 (2010). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2009.12.054>
  27. A. Aballe, M. Bethencourt, F. J. Botana, M. J. Cano, M. Marcos, Localized Alkaline Corrosion of Alloy AA5083 in neutral 3.5% NaCl Solution, *Corrosion Science*, **43**, 1657 (2001). Doi: [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(00\)00166-9](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(00)00166-9)
  28. J. Oh, C. V. Thompson, The Role of Electric Field in Pore Formation during Aluminum Anodization, *Electrochimica Acta*, **56**, 4044 (2011). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2011.02.002>
  29. S. De Souza, D. S. Yoshikawa, W. A. S. Izaltino, S. L. Assis, I. Costa, Self-assembling Molecules as Corrosion Inhibitors for 1050 Aluminum, *Surface and Coatings Technology*, **204**, 3238 (2010). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.03.021>
  30. S. Wang, Y. Gu, Y. Geong, J. Liang, J. Zhao, J. Kang, Investigating Local Corrosion Behavior and Mechanism of MAO Coated 7075 Aluminum Alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, **826**, 153976 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.153976>
  31. R. Najjar, S. A. Katourani, M. G. Hosseini, Self-healing and Corrosion Protection performance of Organic Polysulfide @ Urea-formaldehyde Resin Core-shell Nanoparticles in Epoxy/PANI/ZnO Nanocomposite coatings on Anodized Aluminum Alloy, *Progress in Organic Coatings*, **124**, 10 (2018). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.08.015>
  32. J. Oh, C. V. Thompson, The Role of Electric Field in Pore Formation during Aluminum Anodization, *Electrochimica Acta*, **15**, 4044 (2011). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2011.02.002>
  33. B. Kasalica, J. Radic-Peric, M. Peric, M. Petkovic-Benazzouz, L. Belca, M. Sarvam, The Mechanism of Evolution of Microdischarges at the Beginning of the PEO Process on Aluminum, *Surface and Coatings Technology*, **298**, 24 (2016). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.04.044>