알루미늄 합금의 표면처리에 있어서 2단계 양극산화의 젖음성 영향

어재동¹ · 김진규² · 정용석³ · 이종항⁴ · 김옥배^{2,*}

¹주에스앤디이엔지, ²한국산업기술대학교 기계설계공학과, ³한국산업기술대학교 신소재공학과,
⁴한국산업기술대학교 기계공학과

Effects of Two-Step Anodization on Surface Wettability in Surface Treatment of Aluminum Alloy

Jae Dong Eo¹, Jingyu Kim², Yongsug Jung³, Jong-Hang Lee⁴, and Wook Bae Kim^{2,*}

¹S&D ENG Co., Ltd, Sihung, 15118, Republic of Korea

²Department of Mechanical Design Engineering, Korea Polytechnic University, Sihung 15073, Republic of Korea

³Department of Advanced Materials Engineering, Korea Polytechnic University, Sihung 15073, Republic of Korea

⁴Department of Mechanical Engineering, Korea Polytechnic University, Sihung 15073, Republic of Korea

Abstract: Industrial anodizing of aluminum alloys is widely employed for various products, to improve corrosion and contamination protection as well as aesthetic appearance. At the same time, nanostructure fabrication using highly ordered porous aluminum oxides has been increasingly investigated in academic research for diverse micro-/nano applications. This approach is based on two-step anodization with limited process conditions, such as extended process time and low temperature. In this study, two-step anodizing was employed to anodize hairline-finished Al 1050 with sulfuric acid considering industrial processing conditions. The method is particularly suited for anodized products that require post-processing such as printing, dyeing and/or bonding. Porous anodized layers that were fabricated using conventional single anodizing, and two-step anodizing under identical processing conditions were compared. Variations in porosity, pore diameter, and inter-pore distance were examined in relation to the anodizing parameters, such as temperature and voltage. The results showed that two-step anodizing caused an increase in all measured pore-related measurements, and produced a much more uniform porous layer than the conventional anodizing process. Water contact angles were evaluated on the anodized surface of the previously machined hairline specimen. It was found that the water contact angles clearly decreased on the surfaces treated by two-step anodization, compared to the conventional anodizing process.

(Received September 23, 2020; Accepted December 17, 2020)

Keywords: anodizing, two-step anodization, porous material, wetting angle, aluminum alloy, superhydrophilicity

1. 서 론

알루미늄은 높은 비강도 (strength-to-weight ratio), 열/전기 전도도, 광택도 등의 우수한 기계적, 물리적 특성을 갖는 소재로서 다양한 분야에 활용되어왔다. 최근 알루미늄은 IT기기 및 가전제품 등의 몸체나 외장재로 활용이 급격히 증가하고 있어 표면처리의 중요성이 커지고 있다.

알루미늄 양극산화는 표면에 산화피막을 형성하기 위한 전기화학적 기법으로서, 제조업에서의 표면처리 공정의 핵심이다. 양극산화에 의한 피막은 고밀도의 원통형 기공이 균일하게 형성되는 다공성 (porous) 구조로서, 알루미늄 합금 제품을 부식, 오염, 마모로부터 보호하는 기본적인 역할 외에도 심미성을 부여하는 역할도 한다. 양극산화 처리에 의해 외관의 투명도와 밝기가 개선되며, 그 피막 특성에 따라 색상과 내구성이 달라지기도 한다 [1-4]. 이처럼 전통적으로 부품, 부재의 표면처리 공정에 활용되던 양극산화는 최근 나노기술의 중요 도구로도 활용되기 시작하였다. 양극산화는 특별한 공정조건을 통해 2차원의 규칙적 자가

- 어재동: 대표이사, 김진규: 석사과정, 정용석·이종항·김옥배: 교수

*Corresponding Author: Wook Bae Kim

[Tel: +82-31-8041-0430, E-mail: wkim@kpu.ac.kr]

Copyright © The Korean Institute of Metals and Materials

정렬 (self-organized) 기공구조를 얻을 수 있는데, 나노와이어 (nanowire), 나노튜브 (nanotube) 등 나노구조물을 위한 템플릿 (template) 기반 제조법이나 바이오 및 광학 센서, 물질분리용 멤브레인 등에 다양하게 활용되고 있다 [5,6-15].

정렬도 높은 기공구조를 만드는 방법으로서 10시간 이상 장시간 양극산화한 후 알루미늄 기판과 피막의 바닥면 쪽의 배리어 (barrier)층을 제거하여 관통 마스크로 제작하는 방법 [16,17], 돌출구조가 있는 스탬프에 의한 임프린팅 혹은 리소그래피 기술을 이용하여 정렬된 나노 기공의 피막을 만드는 pre-patterning 방법 [18,19], 그리고 1차 양극산화하고 그 피막을 제거한 후에 다시 2차 양극산화하는 2단계 양극산화법이 있다 [20,21]. 이 중 2단계 양극산화법은 pre-patterning이 필요없고, 전해액, 양극산화 전위, 전해액 온도, 반응시간 등을 통하여 나노 기공의 직경, 간격, 깊이 등을 조절할 수 있기 때문에 가장 많이 이용되는 방법이다.

알루미늄 양극산화 피막에 조절가능한 정렬된 기공구조를 형성한다면 제품의 기능성을 더욱 개선할 수 있을 것이다. 디자인 표면처리에서는 전처리로서 표면의 기계적 텍스처링 (texturing)을 행한 다음에 양극산화를 수행하게 되는데, 마이크로 스케일의 표면거칠기나 양극산화에 의한 나노 기공의 복합 구조는 액체의 젖음성 (wettability)에 영향을 주는 물리적 요인이다. 후처리로서 착색 또는 인쇄 공정은 염료나 안료의 수용액이 다공질 피막의 기공 속으로 젖음 또는 충전 (infiltration)되는 현상에 의존하므로, 정렬된 기공구조는 양극산화 후처리 공정에 큰 영향을 줄 수 있다. 관련 연구로서 최근 양극산화 나노 구조를 바탕으로 마이크로-나노 스케일의 복합적 계층구조를 구현하거나, 실란 (silane) 코팅과 같은 화학적 공정을 추가한 복합적 표면처리를 통해 부재 표면의 초소수 (superhydrophobic)/초친수 (superhydrophilic)화 연구가 다양하게 진행되고 있으며 향후 산업적 응용 가능성이 높다 [22-32].

이처럼 정렬도 높은 기공 패턴을 이용한 나노기술 및 액체와의 젖음성을 제어하는데 2단계 양극산화법 등이 적극적으로 활용되어왔으나, 표면처리산업에서는 정렬도 높고 조절된 기공 패턴 효과에 관한 연구결과를 찾아보기 어렵다. 이는 종래의 표면처리공정에 부합하지 않는 공정조건 때문으로 생각된다. 전형적인 2단계 양극산화법 연구에서는 10 h 이상의 1차 양극산화 시간, 다소 높은 전압 조건 및 능동적인 표면의 발열처리 (냉각)가 적용되었는데, 이들은 대량의 부품을 경제적으로 생산해야 하는 산업의 표면처리 공정에 실질적으로 적용하기 어려운 부분이다

[21,33,34]. 따라서 적용이 용이한 조건으로 2단계 양극산화를 적용하여 다공성 피막의 변화와 그 효과를 확인할 필요가 있다.

본 연구에서는 헤어라인 가공으로 전처리된 알루미늄 합금에 대해 황산 용액을 이용한 산업의 양극산화 조건을 고려하여 2단계 양극산화를 수행하고, 공정조건을 달리하여 생성한 피막의 기공 특성 및 표면에서의 물 접촉각 (water contact angle, WCA)을 종래의 1차 양극산화에서의 그것들과 비교, 분석하였다. 또한 2단계 양극산화 적용시의 온도, 전압, 시간 등 공정변수와 그 효과를 확인하고자 하였다.

2. 실험방법

본 실험에서 사용한 주 시료는 알루미늄 합금 A1050의 두께 1 mm 판재이다. 우선 300 mm × 200 mm 압연 판재에 헤어라인 (Hair-line, HL) 가공을 수행하였다. 헤어라인 가공은 탄력성있고 피가공물의 형상에 잘 적응하는 금속브러시나 공업용 수세미를 이용하여 방향성 머리결의 느낌을 내는 가공법으로서 IT, 가전, 가구 제품 등에 다양하게 사용된다. 헤어라인을 위한 공업용 연마패드 (Scotch-Brite, 3M)를 벨트타입 연마기에 부착하여 판재의 압연방향으로 왕복운동하여 가공하였다. 연마패드는 철심에 연마재가 부착된 형태로서, 본 연구에서는 등가 연마재 입도(mesh)가 각기 #180, #240, #320인 3종의 패드를 사용하여 표면거칠기를 조절하였다. 측정식 표면거칠기 측정기 (SJ-210, Mitutoyo)을 이용하여 헤어라인 가공표면에 대해 헤어라인에 수직인 방향 (across HL)과 헤어라인에 평행한 방향 (along HL)으로 거칠기를 5군데 측정하여 거칠기 평균과 표준편차를 구하였다. 거칠기 효과를 검토하기 위해 경면 연마 (mirror finish) 시편은 별도 구입하여 표면세척만하여 접촉각 측정에 사용하였다. 각 시편의 표면거칠기를 표 1에 나타내었다.

전처리된 시편은 양극산화를 위해 30 mm × 17 mm의 직사각형으로 커팅하였다. 헤어라인 가공된 시편은 초음파 세

Table 1. Surface roughness of specimens (μm).

		Along HL		Across HL	
		Mean	SD	Mean	SD
Hairline finish	#180	0.537	0.185	1.131	0.044
	#240	0.452	0.051	0.677	0.048
	#320	0.419	0.086	0.544	0.058
Mirror finish		Mean 0.038, SD 0.011			

척기를 이용하여 아세톤과 에탄올에 순차적으로 15분 간 세정한 후에 정제수로 충분히 세척하였다. 양극산화를 시작하기에 앞서 표면의 자연산화 피막은 제거하기 위해서 1.8 wt% 크롬산과 6 wt%의 인산 혼합용액 60 °C에 30분 유지한 후에 꺼내어 정제수로 5분 동안 초음파 세정하였다. 양극산화는 1.8 L의 이중벽 비이커 용기에 2 M의 황산용액을 담고, 백금망을 보조전극으로 이용하여 양극산화하였다. 공정변수로서 디지털 파워서플라이를 사용하여 인가전압 15 V와 25 V로, 용액의 온도는 온도조절기를 활용하여 1 °C와 25 °C로, 양극산화시간은 10분, 25분, 45분으로 가변하며 실험하였다. 1차 양극산화 종료 후에 위에서 설명한 크롬산-인산 혼합용액 60 °C에 60분 유지하여 1차 피막을 제거하고 동일 조건으로 양극산화를 다시 수행하였다. 양극산화 종료 후 5 wt%의 황산 수용액 60 °C에 1분 간 유지하여 기공 확대 (pore widening) 후 정제수로 충분히 세척하고 충분히 건조하였다. 양극산화 조건은 표면 처리분야의 작업지침(ISO 7599:2018)을 조건을 고려하여 설정하였다.

1차 양극산화 시편과 2차 양극산화 시편 준비하여 표면을 전자현미경 (Scanning Electron Microscope, SEM)으로 관찰하였다. 또한 오프소스 프로그램인 ImageJ를 이용하여 전자현미경 사진을 분석하였다. 조건별로 얻은 피막 샘플들의 사진에서 기공들의 외곽선을 추출하여 기공률 (porosity, 기공면적/전체면적), 기공직경 (pore diameter), 기공 간 간격 (interpore distance, 이웃하는 기공 중심 간 거리)을 분석하였다.

각 조건별 양극산화 피막의 젖음성을 측정하기 위해 물 접촉각을 측정하였다. 접촉각은 일정 조건 (온도 23±2°C,

상대습도≥50%)에서 슈린지 펌프 (Fusion200, Chmyx)를 이용하여 탈이온수 10 µL를 표면에 떨어트리고 5초 후 촬영하였다. 이미지는 역시 ImageJ의 접촉각 측정용 플러그인을 사용하여 접촉각을 분석하였다. 시편당 8회 물방울을 투하하여 접촉각의 평균값과 표준편차를 산출하였다.

3. 결 과

3.1 1차 양극산화 피막과 2차 양극산화 피막의 비교

헤어라인 가공 (#320)된 황산용액에서 양극산화 시간을 25분 진행한 1단 양극산화 피막과 이를 제거하고 다시 양극산화를 25분 진행한 2차 피막에 대해서 표면의 SEM사진을 그림 1에 나타내었다. 1차 양극산화 피막에서는 헤어라인에 의한 칩 (chip)과 웨지 (wedge) 등 소성변형과 함께 양극산화에 의한 작은 기공들이 헤어라인의 결 방향으로 형성된 반면, 2차 피막에서는 소성변형이 사라지고 규칙적 패턴의 증가된 기공크기를 확인할 수 있다. 1차 피막은 표면부근에서 기공의 분기와 열리지 않는 기공 무질서도가 높다. 이 때문에 전압의 증가에도 기공의 크기 변화가 뚜렷하지 않다. 반면, 2차 양극산화 피막에서는 닫힌 기공이 없고 균일도가 뚜렷하다. 이러한 결과는 모서리 근방을 제외하면 시편 내에서 편차 없이 균일하였다. 1차와 2차 양극산화 피막에 대해, 인가전압과 용액온도 별로 얻어진 샘플의 이미지 분석 결과를 그림 2에 제시하였다.

그림 2(a)는 2단계 양극산화에 의한 2차피막의 기공율이 1차에 비해 크게 증가함을 알 수 있는데 온도 1 °C 조건에서는 5배 가까이 증가하였다. 기공의 직경 역시 2~3배 증가하였다. 기공 직경은 전압에 비례하므로 25 V에서 제일

Fig. 1. SEM images of porous layers by 1-step and 2-step anodizing, according to three conditions of voltage and temperature (scale bar: 200 nm).

(a) Porosity

(b) Pore diameter

(c) Interpore distance

Fig. 2. Porosity, pore diameter, and interpore distance of porous layers by 1-step and 2-step anodizing, according to three conditions of voltage and temperature.

크지만, 15 V에서도 전해액의 온도에 비례한 증가를 보인다. 기공간 거리는 2단계 양극산화 표면에서 평균이 크고 표준편차 (오차막대)가 작는데, 그림 1에서와 같이 기공 패턴이 뚜렷하고 규칙적 특성 때문으로 생각된다.

양극산화 메커니즘 원리에 따라 기공 직경과 기공간 간격은 전압에 비례하여 증가하므로 25 V 조건이 뚜렷하게

Fig. 3. RMS roughness evolution after hairline finish, 1-step, and 2-step anodizing.

크고, 15 V 조건에서는 온도가 높은 경우가 평균 직경이 약간 크지만 기공간 간격은 거의 동일하다. 기공율은 15 V, 25 °C 조건에서 제일 높는데, 기공간격이 작고 기공크기는 15 V, 1 °C 조건보다 크기 때문이다.

표면처리의 진행에 따른 표면거칠기를 측정하였다. 헤어라인가공으로 인해 표면거칠기는 방향에 따라 다르므로 그림 3과 같이 헤어라인에 평행한 방향 (along HL)과 수직 방향 (across HL)을 나누어서 측정하고 대표값으로서 자승평균거칠기 (RMS roughness)를 표시하였다. 수직방향의 거칠기와 평행방향 거칠기의 차이가 뚜렷하며 공정진행에 따라 같은 경향성을 보인다. 헤어라인 수직방향 거칠기는 초기에 0.68 μm에서 1차 양극산화를 진행후에 0.43 μm로 감소하였지만, 2차 양극산화 후에는 0.52 μm로 다시 증가하였다. 전해연마 전처리를 통한 평탄면의 경우 양극산화의 표면거칠기는 기공층의 성장으로 연마직후에 비해 증가하고 또한 2단계 양극산화의 과정에서는 2차 양극산화 표면은 1차 피막에 비해 거칠기가 증가한다고 보고되었다 [35]. 본 연구에서는 헤어라인에 의한 초기요철이 1차 양극산화 시 형성되는 배리어층과 기공층에 의해 완화되었으며 1차 피막에 비해 2차 피막의 거칠기가 증가하였다. 헤어라인 거칠기의 시지각적 효과는 2단계 양극산화 이후에도 거의 변화하지 않았다.

헤어라인 가공된 표면에서의 물방울 거동은 그림 4과 같이 방향성 있는 표면거칠기의 영향을 받아 접촉각이 이방성을 나타낸다. 헤어라인 방향으로의 접촉각 (WCA along HL)이 수직방향으로의 접촉각 (WCA across HL)보다 작다. 그림 5는 그림 1에 나타난 조건에 따른 1차, 2차 양극산화 피막 표면에서의 물방울의 사진과 방향별 접촉각의 평균값

Fig. 4. Water contact angle on hairline finished surface.

과 표준편차이다. 모든 조건에서 2단계 양극산화법에 의한 표면에서의 접촉각이 뚜렷하게 낮은 것을 볼 수 있다. 그림 5(b)에서 접촉각의 평균은 25 V, 1 °C 조건과 15 V, 25 °C 조건에서 유사하며 63 °~94 ° (1차 피막)에서 25 °~44 ° (2차 피막)로 절반 이하로 감소하였다. 15 V, 1 °C 조건에서도 2차 피막의 접촉각이 낮지만 다른 두 조건에 비하면 그 감소폭이 작다. 그림 2에서 분석한대로 25 V, 1 °C 조건은 정렬도가 높으며 기공직경과 간격이 크고,

15 V, 25 °C 조건에서는 정렬도가 낮지만 기공율이 가장 높았는데, 두 조건에 의한 양극산화 피막의 접촉각은 비슷하다.

나노기공의 영향을 고려해 볼 때, 양극산화처리하지 않은 #320 헤어라인 가공 표면의 자연피막의 접촉각을 측정한 결과 평균 91.8 °와 표준편차 6.9 °, 수직방향으로는 평균 124.7 °와 표준편차 5.9 °로 관측되었다. 2단계 양극산화를 수행하여 나노 기공이 확대될수록 접촉각이 작아진다. 이는 2단계 양극산화에 의한 피막에서 젖음성이 개선되어 인쇄나 염색에 다른 영향을 끼칠 것으로 예측할 수 있다.

3.2 전처리 가공에 의한 거칠기의 영향

그림 6은 경면 (mirror) 연마된 시편을 포함하여, 입도가 다른 패드를 이용하여 거칠기를 달리한 헤어라인 전처리 시편의 자승평균 표면거칠기와 2단계 양극산화하였을 때의 접촉각을 함께 나타낸 것이다. 입도에 따른 거칠기의 변화가 뚜렷하며, 접촉각은 거칠기에 강한 영향을 받아 거칠기가 감소할수록 접촉각도 작아지며, 경면 연마된 표면의 경우 접촉각이 5도 미만으로 초친수 표면의 특성이 나타

	Along HL	Across HL	Along HL	Across HL	Along HL	Across HL
1-step anodizing						
2-step anodizing						
	15 V, 1 °C		25 V, 1 °C		15 V, 25 °C	

(a) Images of water droplets

(b) water contact angle

Fig. 5. Water contact angle layers by 1-step and 2-step anodizing, according to three conditions of voltage and temperature.

Fig. 6. Surface roughness with different pre-treatment and corresponding water contact angle.

난다. 헤어라인 표면에서는 평행 방향과 수직 방향으로 접촉각이 다른데, 방향별 거칠기에 뚜렷이 영향을 받고 있다. 양극산화를 하지 않은 시편의 경우에는 #180, #240, #320, 경면의 순서대로 접촉각이 감소하였으며, 양극산화로 인한 나노 기공의 형성 이후 모두 접촉각이 감소하였다. 즉 실험조건의 범위내에서는 헤어라인에 의한 표면거칠기와 나노 기공이 접촉각에 미치는 영향은 서로 독립적이다.

3.3 공정조건의 영향

2단계 양극산화 과정에서 주요 인자로서 전압, 양극산화 조의 온도, 그리고 양극산화 시간을 달리하여 기공 특성과 접촉각 변화를 관측하였다. 인자의 영향을 관찰할 때 양극산화의 기본조건은 전압 15 V, 온도 25 °C이며 1차 양극산화 시간은 25 min, 2차 양극산화 시간은 45 min으로 하였다. 그림 7(a)는 인가전압의 영향으로서 정전압 15 V, 20 V, 25 V 3단계로 시험하고자 하였으나 25 V의 경우, 황산 전해액 기본 온도가 높아 정상적인 기공형 피막이 얻어지지 않았으므로 제외하였다. 15 V에서 20 V로 증가할 때, 기공율과 기공직경은 미미하게 증가하였고 접촉각은 두 방향 모두에서 평균 약 8도 정도 증가하였다.

그림 7(b)는 2차 양극산화 시 전해액 온도의 영향으로서, 1 °C에서 20 °C 증가할 때 변화가 없던 기공율과 기공의 크기는 25 °C에서 다소 크게 증가하며, 접촉각도 20 °C까지는 분명한 변화가 없고 표준편차가 크다. 그러나 25 °C에서는 평균과 표준편차의 분명한 감소를 보인다. 높은 온도에서 무질서도가 증가하지만 기공크기의 증가와 그로 인한 기공율의 증가의 영향이 접촉각 저하에 영향을 미친다.

다음, 양극산화 시간은 표면처리의 작업시간에 관련되므로 중요하다. 그림 7(c)에서는 1차 양극시간의 영향으로서 10 min 이상의 조건에 대해서 큰 변화가 없고, 그림 7(d)

(a) Effect of applied voltage

(b) Effect of temperature of electrolyte

(c) Effect of 1st anodizing time (2nd anodizing time: 45 min)

(d) Effect of 2nd anodizing time (1st anodizing time: 25 min)

Fig. 7. Effects of process parameters during 2-step anodizing on porosity, pore diameter, and water contact angle.

에서 2차 양극시간이 길어짐에 따라 기공율이 증가하고 접촉각이 감소하는 것을 볼 수 있다. 1차 양극산화 시간은 10분 수준만 행하더라도 2단계 양극산화에서 개선된 피막

을 형성하는데 문제가 없다. 또한 2차 양극산화 시간은 기공의 깊이 (피막두께)를 증가시키는 요인이지만 25 °C 조건에서는 기공 크기와 기공율도 다소 증가하는 것으로 나타난다. 전형적 2단계 양극산화에 대한 연구 보고에서는 정렬도를 극대화하고 기공의 결함 (defects)를 줄이기 위해 양극산화시간을 10 h 이상으로 행하였으나, 본 연구결과로 볼 때 1 h 미만의 짧은 시간으로도 특성변화가 뚜렷하다.

4. 결 론

본 논문에서는 Al1050 합금에 대해 표면처리 산업에서의 전처리법과 양극산화 조건을 적용하여 2단계 양극산화법을 실시하고, 이전의 1단 양극산화와 비교하여 생성된 나노 기공구조와 물의 접촉각을 측정하였다. 일반적인 양극산화처리를 통한 표면에 비해 2단계 양극산화 표면은 기공율, 기공직경, 기공간 간격 모두가 증가하였다. 전처리 가공으로서 헤어라인은 1차 양극산화 과정에서 미개구 기공 등 기공층의 결함을 유발할 수 있으며, 2단계 양극산화에 의해 결함이 줄어들고 기공층의 개선이 가능하였다.

양극산화처리는 이후에 이어지는 염색과 인쇄 등 착색공정과 함께 디자인 외관 제품 품질을 결정하는 중요한 공정으로서, 산화 피막의 젖음성과 그에 영향 요인의 파악이 필요하다. 2단계 양극산화 표면에서는 물 접촉각이 크게 감소하였는데, 이는 기공내부로의 물의 침투가 개선될 것을 의미한다. 이는 염색과 인쇄 공정에서 색상과 해상도의 조절, 환경에 대한 내구성에 영향을 줄 수 있다. 디자인 외관을 위한 헤어라인에 의한 마이크로 스케일의 표면거칠기는 알루미늄 표면의 접촉각을 증가시키는데, 입도가 높은 공구에 의해 헤어라인 표면거칠기 값이 작아질수록 접촉각이 감소하였다. 양극산화에 의한 나노 기공층은 헤어라인 표면거칠기와 관계없이 독립적으로 접촉각에 영향을 미치며, 2단계 양극산화에 의해 접촉각이 확연히 저하된다. 헤어라인이 없는 경면의 경우 2단계 양극산화에 의해 초친수 표면의 특성이 구현되었다. 일반적인 양극산화처리 공정에서의 전압, 온도, 시간 조건을 적용하여 2단계로 양극산화함으로써 종래의 1단 양극산화에 비해 개선된 젖음성 효과를 낼 수 있는데, 전압, 온도, 시간에 따라 패턴과 접촉각의 경향을 파악할 수 있으나 그 민감도는 높지 않은 편이다. 양극산화 시간은 전형적인 2단계 양극산화 연구에서와 달리, 짧은 시간안에 기공패턴이 개선된다.

2단계 양극산화법은 양극산화와 후처리로 착색, 인쇄, 접합 등이 적용되는 알루미늄 합금 제품의 표면처리 공정에서 다른 종류의 친수성 표면처리법을 적용하는 것에 비해

매우 효과적이고 효율적 방법이 되리라 기대할 수 있다.

또한 황산용액 기반의 저전력 양극산화 공정으로 대면적에 적용하기 용이하며 온도와 전류밀도 등을 효과적으로 관리한다면 복잡한 형상의 부품에서도 균일한 나노 기공층을 갖는 산화피막을 형성하기 용이할 것으로 기대되며, 이후 관련 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원 (No. NRF-2018R1D1A1B07050525) 및 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (P0008425, 2020년 산업전문인력역량강화사업 P0008458, 2020년 산업혁신인재성장지원사업).

REFERENCE

1. S. H. Bae, H. W. Lee, and I. Son, *J. Kor. Inst. Surf. Eng.* **52**, 30 (2019).
2. S. M. Moon, *J. Kor. Inst. Surf. Eng.* **51**, 1 (2018).
3. V. F. Henley, *Anodic Oxidation of Aluminium and Its Alloys.*, pp.6-10, Pergamon, Oxford (1982).
4. N. Cabrera and N. F. Mott, *Rep. Prog. Phys.* **12**, 163 (1949).
5. A. Rajendra, Biren J. Parmar, A. K. Sharma, H. Bhojraj, M. M. Nayak, and K. Rajanna, *A. Surf. Eng.* **21**, 193 (2005).
6. A. M. Md Jani, D. Losic, and N. H. Voelcker, *Prog. Mat. Sci.* **58**, 636 (2013).
7. Y. Liu, H. H. Wang, J. E. Indacochea, and M. L. Wang, *Sens. Actuators A* **160**, 1149 (2011).
8. S. W. Kim, J. S. Lee, S. W. Lee, B. H. Kang, J. B. Kwon, O. S. Kim, J. S. Kim, E. S. Kim, D. H. Kwon, and S. W. Kang, *Sensors* **17**, 856 (2017).
9. J. H. Lee, D. W. Kim, H. Jang, J. K. Choi, J. Geng, J. W. Jung, S. C. Yoon, and H. T. Jung, *Small* **5**, 2139 (2009).
10. J. Song, H. Oh, H. Kong, and J. Jang, *J. Hazard. Mater.* **187**, 311 (2011).
11. T. Kikuchi, O. Nishinaga, S. Natsui, and R. O. Suzuki, *Appl. Surf. Sci.* **341**, 19 (2015).
12. C. V. Manzano, D. Ramos, L. Petho, G. Burki, J. Michler, and L. Philippe, *J. Phys. Chem. C* **122**, 957 (2018).
13. J. C. Hulteen and R. Martin, *J. Mater. Chem. A* **7**, 1075 (1997).
14. T. S. Kim, E. W. Jung, C. I. Kim, W. I. Park, and Y. R. Cho, *Korean J. Met. Mater.* **53**, 294 (2015).

15. G. Cao and D. Liu, *Adv. Colloid Interface Sci.* **136**, 45 (2008).
16. H. Masuda and K. Fukuda, *Science* **268**, 1466 (1995).
17. H. Masuda, F. Hasegawa, and S. Ono, *J. Electrochem. Soc.* **144**, L127 (1997).
18. H. Masuda, H. Yamada, M. Satoh, and H. Asoh, *Appl. Phys. Lett.* **71**, 2770 (1997).
19. H. Masuda, H. Asoh, M. Watanabe, K. Nishio, and T. Tamamura, *Adv. Mater.* **13**, 18 (2001).
20. H. Masuda and M. Satoh, *Jpn. J. Appl. Phys.* **35**, L126 (1996).
21. W. Lee and S. J. Park, *Chem. Rev.* **114**, 7487 (2014).
22. H. Habazaki, T. Fujii, E. Tsuji, and Y. Aoki, *ECS Trans.* **50**, 217 (2013).
23. A. Nazari and S. Saedodin, *Surf. Eng.* **33**, 75 (2017).
24. A. Norek and A. Krasiński, *Surf. Coat. Tech.* **276**, 464 (2015).
25. H. Y. Park, B. J. Kang, D. Lee, and J. H. Oh, *Thin Solid Films* **546**, 162 (2013).
26. R. Wu, S. Liang, J. Liu, A. Pan, Y. Yu, and Y. Tang, *J. Nanosci. Nanotechnol.* **13**, 2362 (2013).
27. H. Zhang, L. Yin, L. Li, S. Shi, Y. Wang, and X. Liu, *RSC Adv.* **6**, 14034 (2016).
28. T. Darmanin and F. Guittard, *Prog. Polym. Sci.* **39**, 656 (2014).
29. Y. Kim, S. Lee, H. Cho, B. Park, D. Kim, and W. Hwang, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **4**, 5074 (2012).
30. R. Kondo, D. Nakajima, T. Kikuchi, S. Natsui, and R. O. Suzuki, *J. Alloys Compd.* **725**, 379 (2017).
31. D. Nakajima, T. Kikuchi, T. Yoshioka, and H. Matsushima, *Materials* **12**, 3497 (2019).
32. M. Song, Y. Liu, S. Cui, L. Liu, and M. Yang, *Appl. Surf. Sci.* **283**, 19 (2013).
33. G. D. Sulka, *Nanostructured Materials in Electrochemistry*, pp.1–116, John Wiley & Sons, (2008).
34. S. Kahng and J. H. Kim, *Korean J. Met. Mater.* **58**, 907 (2020).
35. F. Nasirpour and S. M. Peighambari, *Ionics* **19**, 535 (2013).