



&lt;연구논문&gt;

ISSN 1225-8024(Print)  
ISSN 2288-8403(Online)

한국표면공학회지  
J. Korean Inst. Surf. Eng.  
Vol. 52, No. 5, 2019.

<https://doi.org/10.5695/JKISE.2019.52.5.275>

## 후열처리에 의한 알루미늄 산화층의 특성 향상

전윤남<sup>a</sup>, 김상준<sup>a,b</sup>, 박지현<sup>a</sup>, 정나겸<sup>a,b\*</sup>

<sup>a</sup>영광YKMC 기술연구소

<sup>b</sup>인하대학교 금속재료공정공학과

## Enhanced Properties of Aluminum Oxide Layers with Post Heat Treatment

Yoonnam Jeon<sup>a</sup>, Sangjun Kim<sup>a,b</sup>, Jihyun Park<sup>a</sup>, and Nagyeom Jeong<sup>a,b\*</sup>

<sup>a</sup>R&D center, YKMC Inc., 161 Asan Valley Joong Aang-ro, Asan, Chungnam 31409, Korea

<sup>b</sup>Program in Metals and Materials Process Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

(Received 28 October, 2019 ; revised 30 October, 2019 ; accepted 31 October, 2019)

### ABSTRACT

Anodization is widely used to enhance the properties of aluminum, such as hardness, electric resistance, abrasion resistance, corrosion resistance etc. But these properties can be enhanced with additional process. According to the partial crystallization of oxide layer with post heat treatment, enhanced hardness can be expected with partial crystallization. In this study, post heat treatments were applied to the anodized aluminum alloys of Al6061 to achieve the partial crystallization, and crystallizations were evaluated with the reduced breakdown voltages. Interestingly, remarkable enhanced hardness (21~29%), abrasion resistance (26~62%), and reduced breakdown voltage (24~44%) were observed for the sulfuric acid anodized samples when we annealed the anodized samples with 1hour post heat treatment at 360°C. For the Al5052 alloys, a lot of cracks were observed when we applied the post heat treatment.

*Keywords: Aluminum, Sulfuric acid anodizing, heat treatment*

### 1. 서 론

알루미늄 합금은 자동차, 항공, 건축, 선박, 반도체, 생활용품 등 다양한 분야에 사용되는 소재이다 [1-4]. 최근 자동차 배기가스 규제로 인하여 경량화 소재인 알루미늄 합금이 철강 제품의 대체 물질로 주목 받고 있는데, 낮은 밀도를 가지고 있으면서 향상 가공이 쉽기 때문이다 [5]. 하지만 알루미늄 합금은 부식성이나 내마모성 등의 성질이 철강 제품에 비해 현저하게 떨어지는 단점을 가지고 있다. 그럼에도 불구하고 철강 제품을 대체할 수 있는 소재로 알루미늄 합금이 주목 받는 이유는, 알루미늄 표

면에 산화층을 형성함으로써 높은 내식성과 경도, 내마모성과 같은 특성을 확보할 수 있기 때문이다. 산화층 형성 후에도 도금이나 봉공 처리와 같은 후처리를 통해 화학적, 기계적 특성을 더 높일 수도 있는 점이 특징이라 할 수 있다 [6,7]. 하지만 후처리를 위해 지금까지 많이 사용하던 크롬이나 니켈은 환경 문제를 유발하는 단점을 가지고 있어, 알루미늄 산화층의 화학적, 물리적, 기계적 특성 등을 높일 수 있는 새로운 친환경 후처리 방법을 필요로 하고 있다.

알루미늄 표면에 산화층을 형성하는 방법으로 많이 이용되는 것이 아노다이징 (양극산화) 이다. 사파이어와 동일한 성분인  $Al_2O_3$ , 알루미늄 산화층은 알루미늄 모재와 사파이어의 중간 특성들을 보여주고 있다. 단결정 구조인 사파이어와 달리, 알루미늄 산화층은 전체가 비정질(amorphous)이거나 또는 소

\*Corresponding Author: Nagyeom Jeong

R&D center, YKMC Inc.

Tel: +82-41-629-3925 ; Fax: +82-41-629-3915

E-mail: jng3925@ykmc.kr

량의  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (또는  $\gamma'$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 결정 구조를 함유한 비정질 구조를 가지고 있다 [8]. 여기에서 우리가 주목하는 부분은, 비정질 내의 결정구조 비율에 따른 특성 변화이다. 만약 알루미늄 산화층 내의 결정화 비율을 높일 수 있다면 알루미늄 산화층의 특성 향상도 함께 기대되기 때문이다. 알루미늄 산화층 내의 결정화 비율을 높일 수 있는 방법으로 PEO (Plasma Electrolytic Oxidation) 방법이 있는데, arc를 발생시켜  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 결정과  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 결정 구조를 만들 수 있는 것으로 알려져 있다 [9]. 알루미늄 산화층의 결정화는 PEO 방법 이외에도 봉공이나 열처리에 의해서 만들 수도 있는 것으로 알려져 있다 [8,10-12]. Sathyaseelan et al. 등에 따르면 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder는 600-875°C에서  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 결정상을 갖는 것을 보여주고 있지만 [13], Chang et al., 등은 알루미늄 산화층이 500°C 후열처리 30분으로  $\gamma'$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 결정이 형성되는 것을 관찰하였으며, 이때 산화층의 저항이 급격히 감소하는 것을 보여주었다 [10]. 후열처리에 따른 저항이 감소한 결과를 이용하여, 본 연구에서 우리는 후열처리를 통한 알루미늄 산화층의 결정화를 시도하고, 전기적 특성 변화에 따른 물성 변화를 관찰하였다.

본 연구에서 우리는 황산을 이용한 아노다이징 후 리튬염(Li) 봉공 처리를 하였는데, Li 봉공은 크롬산염이나 니켈염에 비해 친환경적인 장점을 가지고 있기 때문이다. 봉공 처리 후에는 후열처리를 진행하였다. 그 결과 Al5052 소재는 100°C 이상의 1시간 후열처리에 의해 균열(crack) 현상을 보여주는 반면, Al6061 소재는 360°C에서 1시간 후열처리 하였음에도 균열이 발생하지 않았다. 균열이 발생하지 않은 Al6061 소재에 대해 내전압을 측정한 결과, Al5052와 비슷하게 내전압이 감소하였다. 내전압의 감소 효과로부터 우리는 산화층의 부분 결정화가 이루어진 것으로 판단되기에, 이로 인한 특성 변화를 확인하고자 경도와 내마모를 측정한 결과 각각 21~29%, 26~62% 좋아지는 것을 확인할 수 있었다. 아노다이징 방법 후에 추가되는 후처리 방법으로 이룬 결과이기에 본 연구의 가치가 높다고 하겠다.

## 2. 실험방법

### 2.1 샘플 준비 및 전처리 (sample preparation and pre-treatment)

시편은 Al 5052와 Al 6061 T6 시편을 각각 100 mm × 100 mm × 5 mm의 크기로 제작 후, 내마모 측정을 위해 중앙에는 직경 10 mm의 홀 가공

을 하였다. 이때 표면 가공조도는 0.15±0.05  $\mu$ m이다. 전처리 과정은 크게 탈지(Degreasing), 에칭(Etching), 중화(Desmut)의 3단계를 상온에서 진행하였다 [2,3]. 본 연구에서 우리는 구연산을 주성분으로 하는 10% 수용액에서 탈지, 10% NaOH 수용액에서 에칭, 35% HNO<sub>3</sub> 수용액에서 중화하였는데, 각각의 공정 후에는 수세하여 시편을 세척하였다.

### 2.2 아노다이징 (Anodizing)

전처리 과정을 거친 시편은 15% 황산 전해조에서 아노다이징을 진행하였다. 황산 아노다이징은 -5°C의 500L polyethylene 전해조에서 SCR DC (주파수 80Hz) 정류기를 사용하였고, 음극으로는 Al1050 판재를 전해조 양면으로 사용하여 30  $\mu$ m와 43  $\mu$ m의 두 가지 다른 두께 산화층을 형성시켰다. 서로 다른 두께의 아노다이징 시편의 특성 변화 측정을 통해 신뢰성을 높이도록 하였다.

### 2.3 봉공 (sealing) 및 후열처리 (post heat treatment)

봉공제는 Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>을 기본 첨가물로 사용한 것으로, 본 회사에서 자체 개발한 제품을 사용하였다. 봉공은 아노다이징 된 시편을 80°C에서 20분 동안 침지하여 처리하였다. 봉공처리된 시편을 열처리 할 시에는 오븐에 넣어 설정 온도까지 가열하고 그 상태에서 1시간 온도를 유지한 이후, 열처리가 끝나면 상온에서 (약 20도/분) 자연 냉각시켰다. 본 연구에서 사용한 열처리 온도는 100, 200, 300, 360°C이다.

### 2.4 특성 측정 (Measurements of properties)

특성 측정은 내식성, 비커스 경도, 내전압, 마모량의 4가지 항목을 진행하였다. 내식성은 시편의 표면에 직경 20 mm, 길이 50 mm의 투명 아크릴 파이프를 부착 후, 5wt% HCl 수용액을 아크릴 파이프 안에 부어 시료 표면에서 기포 줄기 (bubble stream)가 발생하는 시간을 측정하였다. 비커스 경도는 미소경도 시험기 (AJR, HVS-1000Z)를 이용하여 0.1 kgf의 하중으로 표면을 눌러 피라미드 형태의 변형된 크기를 통해 측정하였다. 내전압은 내전압 시험기 (VITREK, 953i)를 이용하여 2 mA, 50 V/s의 조건으로 전압을 상승시키면서 측정하였다. 마모량은 테이버식 마모 시험기 (우창과학상사, 630)를 이용하여 70 rpm으로 1,000회 회전시켜 마모된 시편의 질량을 측정하였다. 모든 측정은 21±1°C의 온도와 50±5%의 습도에서 이루어졌다. 측정값에 제시되는 모든 오차는 같은 두께의 2개 샘플에

대한 샘플 오차와 반복된 측정으로 확인한 측정 오차가 함께 포함되었다. 균열(crack) 분석은 400배 현미경 이미지를 통해, 균열이 발생하는 곳의 광량 변화를 Image J 프로그램으로 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

대표적인 알루미늄 합금인 Al6061의 비커스 경도는 약 107HV로, STS 316에 비해 1/2배 가량 낮은 경도를 가지고 있다. 알루미늄의 경도 향상을 위한 방법으로 손쉽게 이용할 수 있는 것이 아노다이징 이기에 우리는 본 연구에서 먼저 아노다이징을 시도하였다. 하지만 아노다이징에 의한 특성 변화는 시편의 종류, 전처리 과정, 아노다이징 과정, 후처리 과정의 변화에 따라 크게 변화한다. 우리는 2가지 다른 알루미늄 합금 (alloy) 시편에 대해 산화층 특성을 비교하고자, 전처리부터 아노다이징과 후처리 공정을 모두 동일하게 적용시켰다. 가장 많이 사용되는 알루미늄 시편으로 꼽히는 Al5052와 Al6061 합금에 황산 아노다이징으로 30±2 μm 두께로 산화층을 형성시킨 이후 리튬염(Li) 봉공을 하여 그림 1과 같이 시편을 준비하였다.

그림 1에서 보는 바와 같이, 황산법으로 아노다이징 한 알루미늄 샘플은 회색 계열의 색상을 나타내지만 합금의 종류에 따라 명암이 다르게 나타남을 알 수 있다. Al5052와 Al6061의 표면 색상 차이는 모재의 성분이 다르기 때문에 피막층의 성분과 구조에도 차이가 생긴 것으로 판단된다. 이러한 차이가 경도와 내식성에도 영향을 미치기 때문에, Table 1에서 보는 바와 같이 Al5052의 경도와 내식성이 Al6061에 비해 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 5% 염산을 이용한 내식성 테스트 결과, 봉공하기 이전에는 10분 이내에 대부분 기포 줄기가 발생하였던 반면, Li 봉공 후에는 내식성이 80분(Al5052)과 30분(Al6061)으로 크게 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 측정되는 모든 경도 값들은 500HV 이하로 그 한계가 있기에 더 높은 경도를 위한 새로운 시도를 필요로 한다. 새로운 아노다이징 방법으로 경도를 높이는 방법도 좋겠지만, 아노다이징 된 샘플에 부가적인 공정을 통해 경도를 개선시키는 방법을 찾는 것은 모든 아노다이징 방법에 추가적으로 적용할 수 있기에 그 가치가 있다 하겠다. 우리는 본 연구에서 후열처리를 통해 아노다이징 샘플의 경도를 올리기 위한 시도를 하였다.

먼저 아노다이징 후 경도가 더 높게 나온 Al5052 황산법 샘플에 후열처리를 진행하였다. 그림 2a는 후열처리 공정도, 그림 2b~2e는 황산법으로 아노다

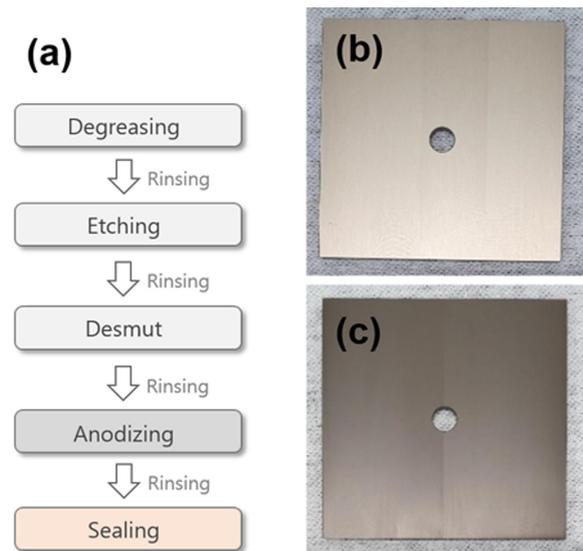


Fig. 1. Flow chart of process and camera images of sealed anodization samples. (a) Flow chart of process, (b) camera image of anodized Al5052 with sulfuric acid, (c) camera image of anodized Al6061 with sulfuric acid.

Table 1. Measured values of anodized samples after Li sealing

	Vickers hardness (HV)	Corrosion resistance (min.)
Al5052	483±17	80±3
Al6061	404±30	30±1

이징 한 Al5052 샘플의 후열처리에 따른 이미지가 다. 육안으로 관찰할 시에는 시편에 큰 변화가 느껴지지 않지만, 현미경을 통해 표면을 관찰하게 되면 삽입된 이미지에서 보는 바와 같이 100°C 이상의 열처리에 의해 균열이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 특히 높은 열처리 온도에서 균열이 더욱 선명해지고 많이 발생하는 것을 볼 수 있는데, 이를 명확히 하고자 위치에 따른 광량의 변화를 통해 균열의 폭이 열처리 온도에 따라 변화하는 것을 확인하였다. 그림 2f에서와 같이 균열의 방향에 수직 한 방향으로 광량의 변화를 확인해보면 균열이 발생하는 위치에서 광량이 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있는데, 그림 2g에서 보는 바와 같이 후열처리 온도가 증가함에 따라 균열(position~70 μm)의 폭이 넓어지는 것을 알 수 있다. 그래프의 FWHM (Full width half maximum)으로 측정된 균열의 폭은 100°C에서 5.0 μm, 200°C에서 5.6 μm, 300°C에서 7.2 μm이다.

균열이 발생하는 요인으로는 크게 2가지를 생각할 수 있는데, 첫번째는 모재와 산화층의 열팽창계수 차이, 두번째는 결정화에 따른 산화층의 부피 감

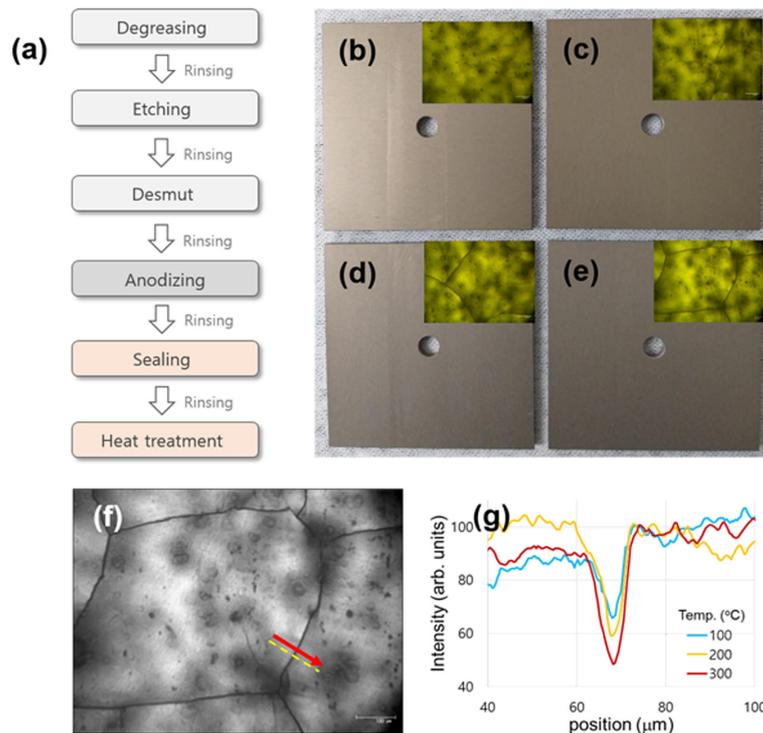


Fig. 2. Heat treated sample images of sulfuric acid anodized Al5052 varying heating temperatures, and crack analysis with light intensities. (a) Flow chart of heat treatment process, (b) sample without post heat treatment, (c) sample with 1hour heating at 100°C, (d) sample with 1hour heating at 200°C, (e) sample with 1hour heating at 300°C. Inset images are 400x magnified surface images taken by microscope. (f) Gray scale image of inset in fig. 2e. Red arrow represents the vertical direction of crack for the intensity analysis. (g) Plots of light intensity profiles along the vertical direction of crack for 3 different heating temperatures. Crack positions (~70 mm) and maximum intensities are normalized for each temperatures.

소를 생각할 수 있다. 열팽창에 따른 균열 뿐만 아니라 산화층의 결정화도 최근 많이 연구되고 있는 분야인데, 두 가지 현상이 후열처리를 통해 많이 발생하는 점이 특징이라 할 수 있다 [6,10-12]. 하지만 균열이 발생하면 내식성이나 다른 특성의 급격한 저하가 이루어 질 수 있기에 균열이 발생하지 않는 후열처리 공정을 필요로 한다. 경도를 더 높이는 목적으로 Al5052 시편에 후열처리를 진행하였지만 그림 2에서 보는 바와 같이 균열이 발생하였기에, 우리는 모재 성분이 다른 시편에 대해 후열처리를 진행하였다. 전처리 과정으로 5000계열 알루미늄은 열처리를 하지 않지만 6000계열은 열처리를 하는 점에 주목하여 우리는 Al6061 아노다이징 시편에 후열처리를 진행하여 그 결과를 Al5052와 비교하였다. 그림 3에서 보이는 바와 같이, 황산으로 형성시킨 Al5052 산화층은 360°C 1시간 후열처리에 의해 표면 균열이 선명하게 발생하지만 Al6061 산화층은 같은 조건의 후열처리에 소량의 작은 균열만 발생하는 것을 보여주었다. 흥미로운 점은, 그림 3의 표면 이미지에서 확인되는 바와 같이 표면에 발생하는 검은색 핏팅 (pitting)의 밀도

역시 차이는 것을 확인할 수 있다. 더욱이 표면 핏팅이 많이 발생하는 5000계열이 6000계열보다 균열이 더 빈번하고 뚜렷하게 발생 한다는 것이다. 표면의 핏팅이 균열의 출발점 역할을 하기 때문으로 추정된다. 5000계열과 6000계열의 후열처리에 따른 균열 차이점은 Goueffon et al.에 의한 관찰 내용과 잘 일치하는 것을 알 수 있다 [11].

Chang et al.의 결과에 따르면 후열처리로 인한 알루미늄 산화층의 결정화로 인해 저항이 급격하게 감소하기 때문에 [10], 산화층의 전기적 특성을 통해 결정화 정도를 판단 할 수 있다. 후열처리를 통한 결정화를 이루고 이를 통한 경도의 향상이 본 연구의 목적이기에, 먼저 결정화를 판단하기 위해 우리는 내전압을 측정하였다. Table 2에서 보이는 바와 같이, 후열처리로 인해 Al5052와 Al6061의 내전압이 각각 24, 44% 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 후열처리에 의해 산화층 내부의 부분 결정화로 저항이 감소하면 낮은 외부 전압에서도 절연층이 파괴되는 이유 때문에 내전압이 감소하는 것으로 이해된다. 하지만, 아노다이징 시편의 결정화를 위해 우리가 사용한 열처리 조건이 360°C 1

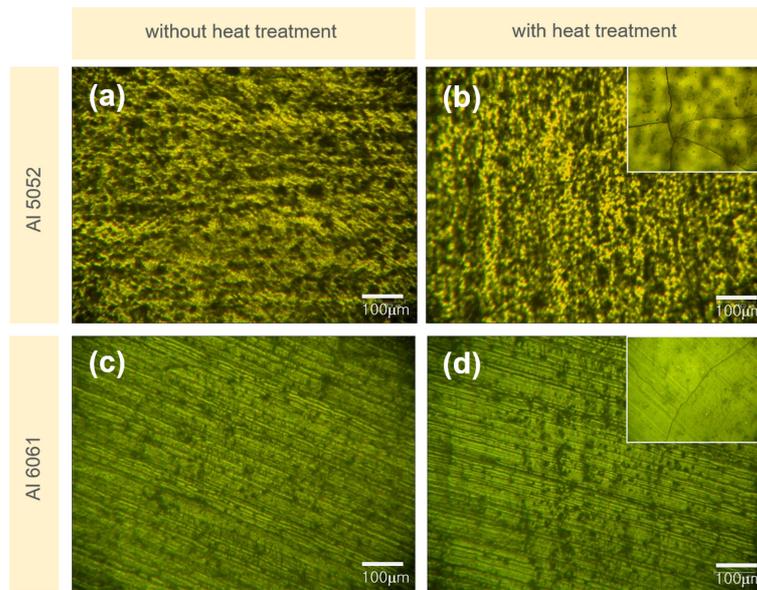


Fig. 3. Microscope images for 2 different aluminum alloys (Al5052 and Al6061), before and after the post heat (360°C 1h) treatments. Inset images are magnifications of the cracks.

Table 2. Measured values of breakdown voltage

	Heat treatment	Breakdown voltage (V)
Al5052	X	1080±123
	O	822±62
Al6061	X	1370±146
	O	768±54

시간인 반면, Chang et al.이 사용한 열처리 조건은 500°C 30분으로 상이하다. 이러한 열처리 조건 차이가 측정된 내전압의 감소량(24-44%)과 보고된 저항의 감소량(86%) 차이로 이어지는 것으로 이해된다. 낮은 온도의 열처리 조건에도 불구하고 아노다이징 시편의 부분 결정화가 이뤄진 것으로 추정되기에, 우리는 열처리에 따른 특성 변화를 파악하고

자 경도와 마모량을 측정 비교하였다. 결정화의 확인은 X-ray 산란을 통해 확인 할 수 있겠지만, 본 연구에서는 경도나 내마모와 같은 특성의 변화에 집중하였다.

알루미늄 산화층의 결정화가 잘 이루어지는 것으로 알려진 PEO 방법으로는 경도가 1000HV 이상으로 상승하는 것으로 알려져 있다 [9,14]. PEO 방법 대신 열처리를 통해  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 결정화를 이루기 위한 온도는 600-875°C,  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 결정화를 이루기 위해 필요한 온도는 900-1000°C 이다 [13]. 하지만 Chang et al.의 결과에 따르면 500°C 30분의 후열처리를 통해서  $\gamma$ '-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 결정화를 이룰 수 있고, 또한 결정화로 인해 산화층의 저항이 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있었다 [10]. 황산 아노다이징 시편을 360°C 1시간 후열처리 시 내전압이 확연하

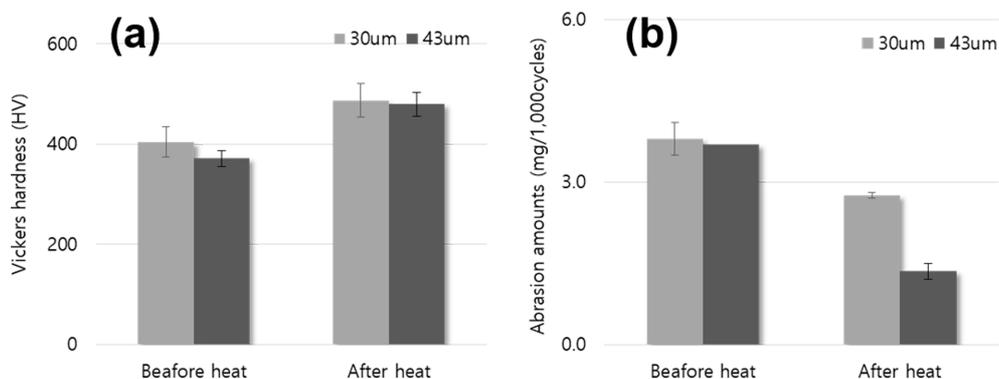


Fig. 4. Property changes by post heat treatment for the anodized Al6061. (a) Vickers hardness, (b) Abrasion amounts during 1,000 cycles.

Table 3. Measured values of hardness and abrasion amount

	heat treatment	Al6061 (Sulfuric acid)	
		t =30um	t =43um
Vickers hardness (HV)	X	404±30	371±16
	O	487±34	479±24
Abrasion amount (mg/1,000cycles)	X	3.8±0.3	3.7
	O	2.8±0.1	1.4±0.1

게 감소한 결과를 바탕으로 우리도 경도를 측정해 보았다. 그림 4a와 Table 3에서 보는 바와 같이 황산 아노다이징 한 시편의 경우 후열처리 시 경도가 21~29% 향상되는 경향성을 보여주었다. 비교를 위해 우리는 후열처리에 따른 수산 아노다이징 시편의 경도 변화를 측정하였는데, 수산 아노다이징 시편은 경도와 내전압 모두 큰 변화가 관찰되지 않았다. Sulka가 결정화에 대해 정리한 결과에 따르면, 황산<수산<인산<크롬산 아노다이징의 순으로 결정화 비율이 높기 때문에 [8], 열처리 이전에 수산 아노다이징 샘플은 이미 결정화 비율이 높아 후열처리 효과가 낮은 것으로 이해된다.

그림 4b는 Al6061 시편을 황산 아노다이징 후 봉공처리 하여, 후열처리 유무에 따른 마모량을 측정하여 비교한 그래프이다. 내마모성은 경도와 연관되어 있기에, 후열처리로 인하여 경도가 증가함에 따라 마모량이 감소하고 있는 것으로 이해된다. 하지만 마모량은 경도 뿐만 아니라 표면의 마찰계수와도 연관되어 있기에, 후열처리에 따른 마찰계수 변화도 생각해 볼 수 있다. Table 3에서 보이는 바와 같이, 서로 다른 두께의 시편에 대해 측정된 경도가 후열처리로 인해 각각 21, 29% 증가하였던 것에 비해, 감소한 마모량은 각각 26, 62%로 그 비율이 상이함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구를 통해 우리는 먼저 황산 아노다이징 한 Al5052 시편에 봉공처리 이후 100°C 이상의 온도로 1시간 후열처리를 진행시킨 결과 많은 균열이 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 반면, Al6061 시편을 황산 아노다이징과 봉공처리 이후 360°C에서 1시간 후열처리를 진행하였을 시 균열은 발생하지 않고 내전압이 확연하게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 내전압의 감소를 통해 우리는 후열처리에 따른 부분 결정화를 기대하게 되었다. 경도와 내마모성의 변화를 측정 한 결과, 후열처리로 인하여 그

특성들이 각각 21~29%, 26~62% 향상됨을 확인할 수 있었다.

확연하게 증가하는 경도와 내마모성, 그리고 내전압의 감소 등으로 아노다이징 피막의 부분 결정화가 추측되지만, 사실 우리가 본 연구에서 직접 확인하지는 않았다. 또한 보고되어 있는 열처리 조건과는 다른 조건으로 열처리를 하였기에 이에 대한 확인은 추후 더 필요할 것으로 판단된다. 경도나 내마모성 이외에도 아노다이징 피막의 중요한 특성 중 하나로 내식성을 들 수 있겠다. 하지만 5% HCl 수용액을 이용한 bubble 테스트 결과 열처리에 의한 특별한 변화는 관찰되지 않았다.

아노다이징 방법으로 특성을 높이는 방법도 좋지만, 부가적인 후공정 방법으로 특성을 높일 수 있다면 모든 아노다이징 시편에 옵션으로 사용할 수 있기에 본 연구의 가치가 높다 하겠다. 다만 5000 계열 아노다이징 시편은 균열이 발생하기에 후열처리를 적용하는 것이 좋은 것은 아니다.

#### Acknowledgment

본 연구는 2018년도 중소벤처기업부의 기술개발 사업 지원에 의한 연구[S2646132]이다.

#### 참고문헌

- [1] S. Wernick, R. Pinner, and P. G. Sheasby, The surface Treatment and Finishing of Aluminum and its Alloys, 5<sup>th</sup> Ed., Finishing Publications Ltd., (1987).
- [2] 정용수, 박영희, 장관섭, 문성모, 최진섭, 정윤미, 실용표면처리기술시리즈 제5권 양극산화, 화신문화(주), (2014).
- [3] Y. Tak, J. Kang, and J. Choi, Electrochemical Properties of Metal Aluminum and Its Application, J. Korean Ind. Eng. Chem. 17 (2006) 335-342.
- [4] C. Park, S. Moon, I. Cheong, and D. Yun, Effect of AC Current Density on the PEO Film Formation of Al6061 Alloy, J. Korean Inst. Surf. Eng. 52 (2019) 138-144.
- [5] M. Ardelean, S. Lascau, E. Ardelean, and A. Josan, Surface treatments for aluminum alloys, IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng. 294 (2018) 012042.
- [6] J. Lee, Y. Kim, H. Jang, U. Jung, and W. Chung, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Sealing of Anodized Aluminum Alloy by Heat Treatment, Procedia Eng. 10 (2011) 2803-2808.
- [7] S. Y. Kang, and D. W. Lee, Study on Improvement of Mechanical Properties after Heat Treatment of

- Hard Chromium Electrodeposits with Additives, *J. Kor. Inst. Surf. Eng.* 47 (2014) 116-120.
- [8] G. D. Sulka, Highly Ordered Anodic Porous Alumina Formation by Self-Organized Anodizing, *Nanostruct. Mat. Electrochem.* 1 (2008) 1-116.
- [9] J. Miao, R. Wu, K. Hao, Q. Chen, and X. Dong, Effects of alloying elements on structure of plasma electrolytic oxidation ceramic coatings on aluminum alloys, *Appl. Mechanics Mater.* 310 (2013) 85-89.
- [10] J. Chang, C. Lin, C. Liao, C. Chen, and W. Tsai, Effect of Heat-Treatment on Characteristics of Anodized Aluminum Oxide Formed in Ammonium Adipate Solution, *J. Electrochem. Soc.* 151 (2004) B188-B194.
- [11] Y. Goueffon, L. Arurault, C. Mabru, C. Tonon, and P. Guigue, Black anodic coatings for space applications: study of the process parameters characteristics and mechanical properties, *J. Mat. Processing Tech.* 209 (2009) 5145-5151.
- [12] D. Fang, Z. Luo, K. Huang, and D. C. Lagoudas, Effect of heat treatment on morphology, crystalline structure and photocatalysis properties of TiO<sub>2</sub> nanotubes on Ti substrate and freestanding membrane, *Appl. Surf. Sci.* 257 (2011) 6451-6461.
- [13] B. Sathyaseelan, I. Baskaran, and K. Sivakumar, Phase Transition Behavior of Nanocrystalline Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Powders, *Soft Nanosci. Lett.* 3 (2013) 69-74.
- [14] V. Dehnavi, B. L. Luan, X. Y. Liu, D. W. Shoesmith, and S. Rohani, Correlation between plasma electrolytic oxidation treatment stages and coating microstructure on aluminum under unipolar pulsed DC mode, *Surf. Coatings Tech.* 269 (2015) 91-99.