

# 알루미늄 단결정 집합조직이 AAO의 나노기공 구조에 미치는 영향

박병현<sup>1</sup> · 김인수<sup>1#</sup>

## Effect of Texture of Al Single Crystal on the Nanopore Structure of AAO

B.H. Park, I. Kim

(Received February 24, 2020 / Revised March 23, 2020 / Accepted March 26, 2020)

### Abstract

It is known that the difference of texture of the polycrystalline Al sheet is not a critical parameter for the formation of aligned nanopore arrays in anodic aluminum oxide (AAO). This will be related to the polycrystalline grain in the Al sheet. The texture of each grain in the polycrystalline Al sheet is different. The mixed textures of grains have the mixing effects on the nanopore structure of the AAO. Thus, the effect of Al texture on the nanopore structure of the AAO was investigated using three types of Al single crystals with (111), (200) and (220) textures in this paper. These three types of AAO layers were fabricated by the two-step anodizing method at 40 V and temperature of 0-5°C in oxalic acid solution. In the nanopores formed on the AAO, the average area of one nanopore and the average roundness of one nanopore were measured based on the SEM images. In the hexagon obtained by connecting nanopores on the AAO, the average standard deviation of one angle deviated from 120° was measured. In the AAO nanopores with texture of (111), (200) and (220) single crystal samples, the average area of one nanopore of (200) single crystal sample was the widest, followed by (111), (220) single crystals. The average circularity of one nanopore of (200) single crystal sample was the best, followed by (111), (220) single crystals. The average standard deviation of an angle from 120° of (220) single crystal sample was the largest, followed by (111) and (200) single crystals.

**Key Words:** Anodic Aluminum Oxide (AAO); Nanopore; Texture; Single Crystal; Circularity

## 1. 서론

양극산화알루미늄(Anodic Aluminum Oxide, AAO)은 특정 전해액 중에서 양극에 연결된 금속 알루미늄에 전류를 통하면 산화반응이 일어나고 육각형 다공성 나노기공(Nanopore) 배열(Array)을 갖는 알루미늄 산화피막을 말한다. 이 AAO는 1932년에 S. Setch 등[1]이 공정을 개발한 이래 부식방지와 장식용을 위한 코팅 용으로 널리 사용되어 오고 있다.

1995년에 H. Masuda 등[2]은 2 단계 공정으로 질서 정연한 육각형 다공성 나노기공 배열을 갖는 AAO를 얻는데 성공하였다. AAO에 생긴 다공성 나노기공은 미세 가공기술에 다양하게 응용하고 있다. 그 예로 나노 로드(Nanorod) 및 와이어(Wire) 배열의 주형(Mold)[3-5]으로 사용되었고, 바이오 센서[6], 마이크로 렌즈 어레이[7]와 같은 미세 제조 기술, 전자 장치[8] 및 각종 멤브레인(Membrane)[9,10] 등에 광범위하게 적용할 수 있다.

AAO의 다공성 나노기공 배열을 만드는 실험변수는 일반적으로 소재의 순도의 영향은 크지 않다고 알려져[11,12] 있으며, 그 외에 양극산화처리 전압,

1. 금오공과대학교 신소재공학부, 공학석사, #교수  
# Corresponding Author: School of Materials Science and Engineering,  
Kumoh National Institute of Technology, E-mail: iskim@kumoh.ac.kr,  
ORCID : 0000-0003-2783-2432

전류, 전해질의 종류와 농도, 온도[12-19] 등으로 알려져 있다. 이와 같은 각종 실험 변수를 조절하면 AAO에 형성된 다공성 나노기공 배열의 직경은 5 나노미터부터 수백 나노미터이며 길이는 수십 나노미터에서 수백 마이크로미터로 조절할 수 있다.

C.-S. Chi 등[20]은 다결정(Polycrystalline) AA1050 알루미늄을 어닐링 조건을 변경하여 기판 집합조직을 바꾸어 집합조직 변화가 양극산화 층에서 다공성 나노기공 구조에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과 알루미늄의 집합조직이 달라져도 AAO 층의 다공성 나노기공 배열에 현저한 차이는 관찰되지 않았으며, 알루미늄의 순도 및 열처리와 비교하여 중요한 변수가 아니라고 하였다. 여기서 사용한 알루미늄 다결정(Polycrystalline)시편은 실제로 각각의 결정립이 각각 다른 집합조직을 갖기 때문에 AAO 층의 다공성 나노기공 구조도 각각 다른 결정립의 집합조직에서 얻어진 결과를 분석한 것이다. 따라서 알루미늄의 집합조직 변화가 양극산화 층에서 다공성 나노기공 구조에 미치는 영향을 자세히 연구하여 나노 주형(mold), 미세 제조 및 각종 멤브레인(Membrane)의 정확도를 높이는데 적용해야 한다. 이를 위하여 혼합된 집합조직을 갖는 다결정 시편보다 단결정 시편을 이용할 필요가 있다.

본 연구에서는 단결정(Single crystal) 알루미늄의 집합조직 변화가 AAO 나노기공의 한 개의 평균 면적(Average area)(이하, 평균 면적) 및 나노기공 한 개의 평균 진원도(Average circularity)(이하, 평균 진원도)와 기공들을 연결한 후 만들어지는 육각형의 한 개의 내각이  $120^\circ$ 에서 벗어난 평균 표준편차 각도(Average standard deviation of angle( $^\circ$ , degree))의 절대값(이하, 평균 표준편차 각도)에 미치는 영향에 대하여 보다 자세히 알아보았다. 따라서 AAO 나노기공을 제작하는 실험변수 중에서 알루미늄 원소재의 순도, 표면상태, 양극산화 조건, 공정단계를 고정된 상태로 실험하였으며, 실험변수는 단지 결정방위(111), (200), (220)로 세가지 다른 집합조직을 갖는 Al 단결정 알루미늄을 사용하였다. 이와 같이 AAO 다공성 나노기공을 갖는 AAO template 를 제작하여 집합조직의 변화에 따른 AAO 나노기공의 한 개 기공의 평균 면적 및 한 개 기공의 평균 진원도와 기공들을 연결한 후 만들어지는 육각형의 한 개의 내각이  $120^\circ$ 에서 벗어난 평균 표준편차 각도에 미치는 변화를 관찰하여 비교하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에 사용한 시편은 독일의 MaTeck사에서 초코랄스키 법으로 만든 알루미늄 단결정이다. 알루미늄 단결정 시편의 성분은 99.9999 wt%이고, 크기는 직경 20mm 두께 2mm의 원형 판으로 만들었다. 초코랄스키 법으로 만든 원형 판 단결정 시편의 평행면의 면지수를 (111), (200), (220) 면으로 세가지로 만들었다.

이 단결정의 결정구조는 X-선 회절분석 장치를 이용하여 확인하였다. 알루미늄 단결정 판의 양극산화하기 전에 원형 판면의 표면은 2400번 사포로 연마한 후 Diamond paste를 이용하여 미세 연마하였다. 미세 연마한 시편 표면의 이물질은 아세톤 용액에서 초음파 세척과 초 순수 세척을 실시하여 제거하였다.

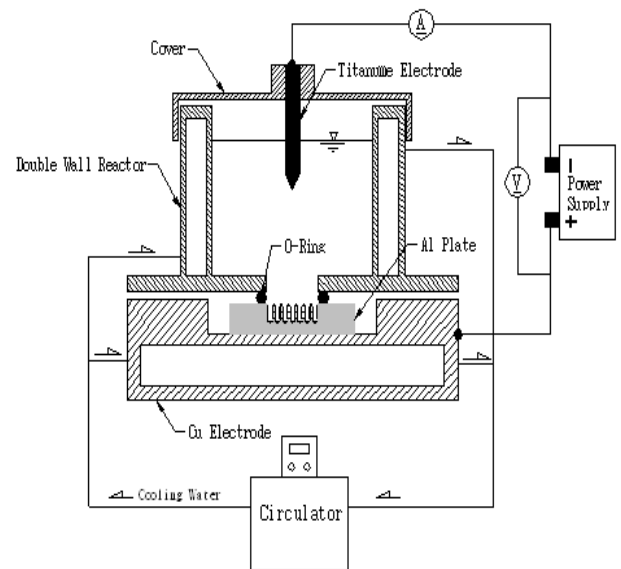


Fig. 1 Anodic aluminum oxidation fabrication system for anodizing experiment

Fig. 1은 알루미늄 단결정을 양극산화하여 AAO template를 만들기 위하여 본연구실에서 특수 제작한 양극산화 반응장치이다. Fig. 1의 양극산화 반응장치는 알루미늄 단결정 양극산화하기 위한 전해액을 담은 반응조, 전력 공급장치(power supply), 냉각수 순환장치(Circulator)로 되어 있고 양(+)극에 알루미늄 단결정 판(Aluminum plate)과 음(-)극에 Ti 막대

를 사용하였다. 여기서 전해액을 담은 양극산화 반응조는 이중 벽으로 만들었으며 외부에 설치된 항온 순환장치(Circulator)를 통하여 항온 냉각수를 순환하여 전해액 반응조와 알루미늄 단결정 판의 온도를 일정하게 유지하였다.

H. Masuda 등[2,21]은 AAO 층의 정교한 다공성 나노기공 배열구조를 얻기 위하여 Al 을 1 단계 양극산화한 후, 1 단계 양극산화 층 제거 및 2 단계로 다시 양극산화하는 공정을 제시하였다. 본 연구도 H. Masuda 등[2,21]의 양극산화 공정을 이용하였다.

AAO 다공성 나노기공 층 제작을 위한 양극산화 전해액으로는 0.3 mole% 옥살 산(Oxalic acid) 용액을 사용하였다. 양극산화 반응의 전압은 40V, 전해액 온도는 0~5°C, 산화 시간은 60 분간 1 단계 양극산화를 실시하였다. 1 단계에서 만들어진 AAO 다공성 나노기공 층은 6wt% H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> + 1.8wt% CrO<sub>3</sub> 용액에서 3 시간 동안 화학연마(Chemical polishing)로 제거하였다. 1 단계에서 만들어진 AAO 다공성 나노기공 층을 제거한 후 1 단계와 동일한 조건으로 5 분간 2 단계 양극산화 반응 공정을 실시하였다. 2 단계에서 만들어진 AAO 다공성 나노기공의 형태 관찰을 위해 주사전자현미경(SEM: JEOL-7000F)을 사용하였다. 또 AAO 다공성 나노기공 하나의 평균 면적과 평균 진원도를 각각 면적과 진원도를 측정하기 위하여 면적 측정장치와 진원도 측정장치를 이용하였다. AAO 다공성 나노기공의 진원도와 면적을 측정하기 위하여 45-49 개의 나노기공을 측정하여 평균 값을 이용하였다.

Fig. 2 는 알루미늄 각각의 단결정으로 제작한 양극산화 AAO 의 다공성 나노기공 한 개의 평균 면적, 평균 진원도 및 다공성 나노기공을 연결하여 나타나는 육각형에서 한 개의 내각( $\alpha$ )이 정확한 육각형의 한 개의 내각(120°)으로 부터 평균 표준편차 각도를 분석하는 방법을 보여준 것이다.

Fig. 2 에서 AAO 의 각 기공들을 구분하고 구분된 기공의 면적을 합산하고 평균하여 A. Belwalkar 나노기공 한 개의 평균 면적(Average area)과 나노기공 한 개의 평균 진원도(Average circularity) 를 구하였다. 또 다공성 나노기공의 중심점을 연결하여 나타나는 육각형에서 측정한 한 개의 내각( $\alpha$ )이 정확한 육각형의 한 개의 내각인 120°로 부터 벗어난 각도의 절

대 값을 평균하여 평균 표준편차 각도(Average standard deviation of angle)를 측정하였다.

이상과 같이 (111), (200), (220) 단결정의 이용하여 얻어진 AAO 를 이용하여 다공성 나노기공의 한 개의 평균 면적, 한 개의 평균 진원도 및 한 개의 평균 표준편차 각도를 서로 비교하여 보았다.

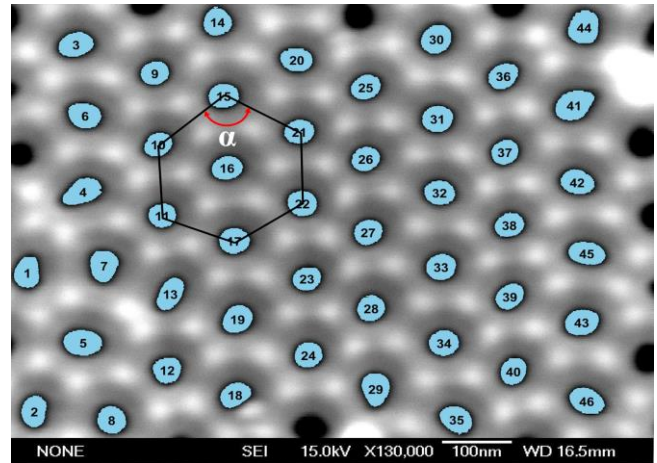


Fig. 2 Measurement method for average area of a nanopore, average circularity of a nanopore and average standard deviation of angle for an angle of hexagon shape on AAO nanopore template

### 3. 결과 및 토의

Fig. 3은 실험에 사용한 단결정 시편의 원판 면을 X-선 회절분석 장치로 2θ - 회절 강도(Intensity)를 측정한 결과이다.

그림 2의 (a), (b), (c)는 각각의 알루미늄 단결정에서 (111), (200), (220) 면지수 강도가 매우 높은 것을 확인하고 다른 면지수의 강도가 매우 낮은 값을 나타내고 있어 각각의 시편이 (111), (200), (220) 면이 잘 발달한 단결정임을 확인하였다.

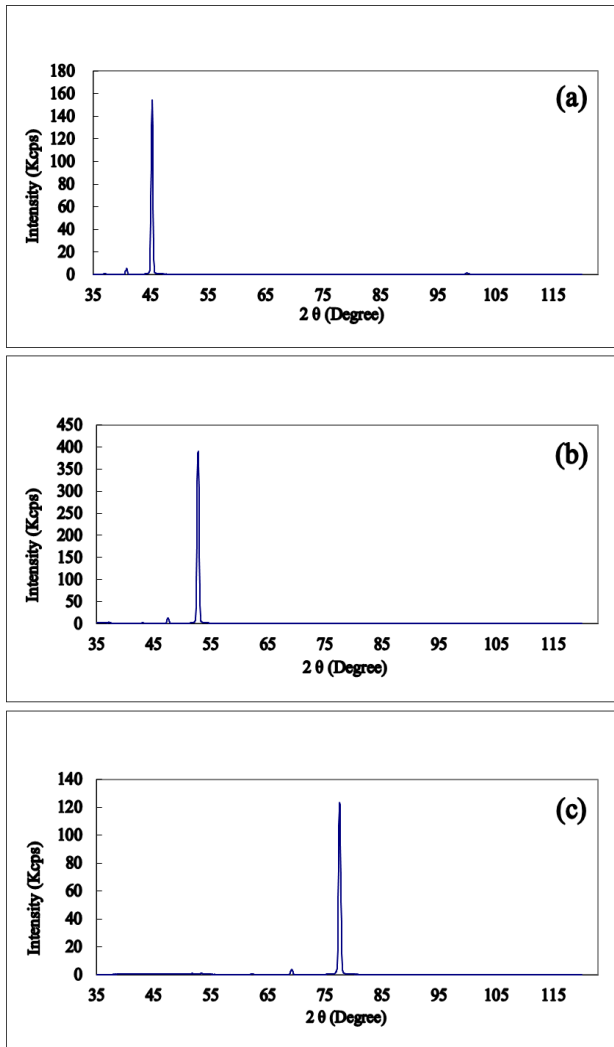


Fig. 3 XRD patterns of the Al single crystal: (a) (111), (b) (200) and (c) (220) Al single crystal

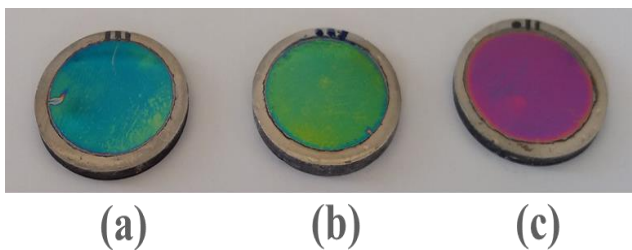


Fig. 4 Color changes of AAO nanopore template: (a) (111), (b) (200) and (c) (220) Al single crystal

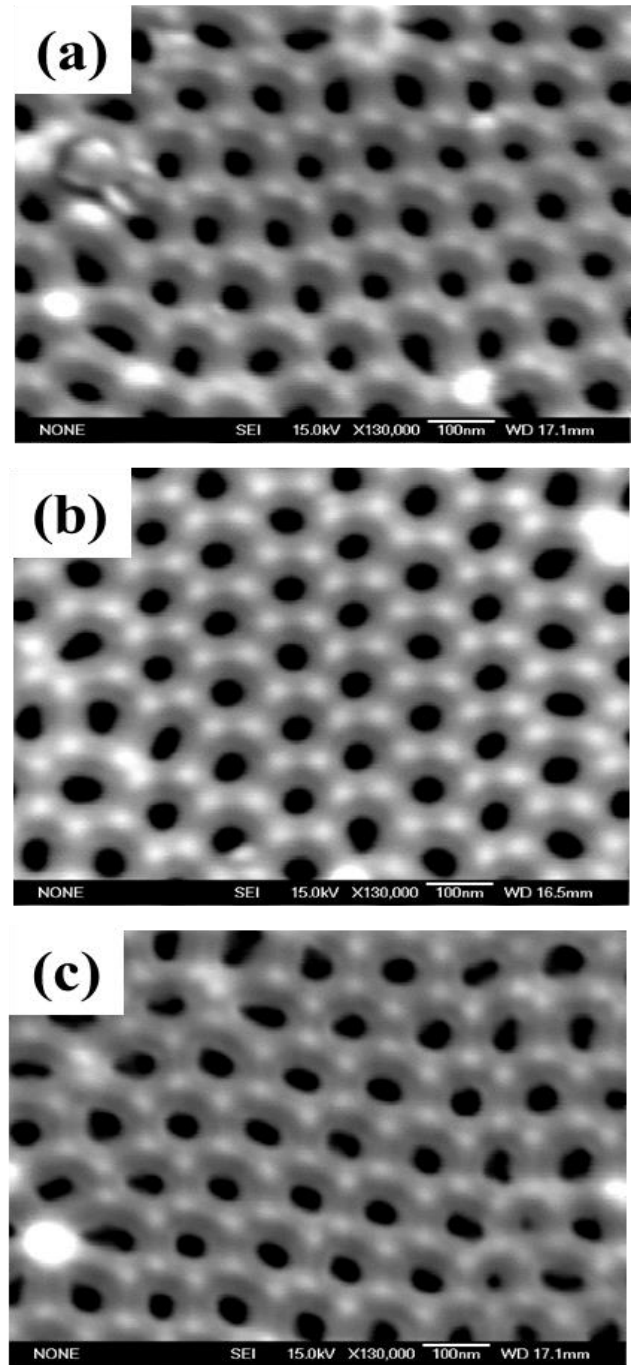
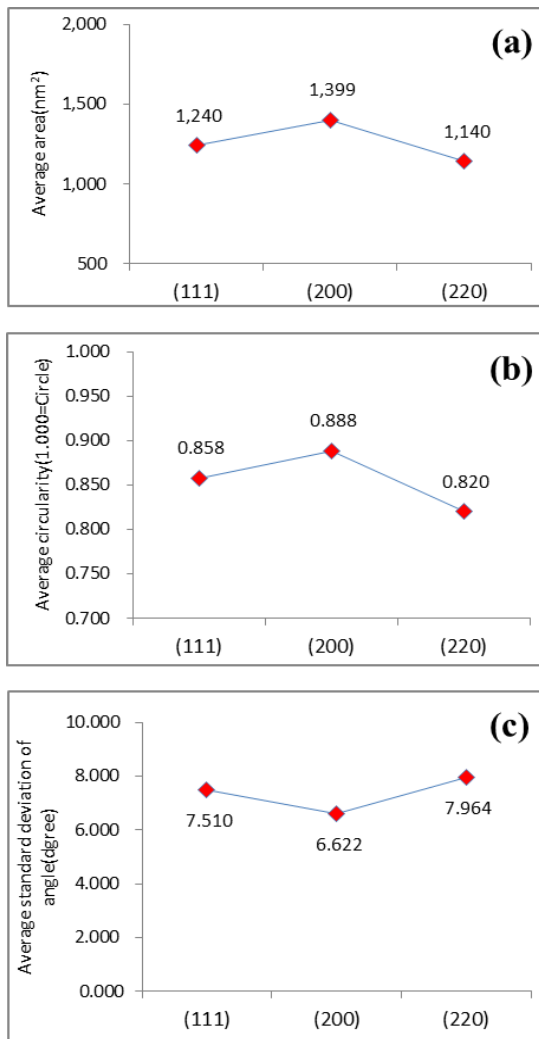


Fig. 5 SEM images of AAO nanopore template: (a) (111), (b) (200) and (c) (220) Al single crystal

**Table 1** Average area of a pore, average circularity of a pore and average standard deviation of angle for an angle of hexagon shape on AAO nanopore template: (a) (111), (b) (200) and (c) (220) Al single crystal

Single crystal plane	(111)	(200)	(220)
Average area of a pore(nm <sup>2</sup> )	1240	1399	1140
Average circularity of a pore	0.858	0.888	0.820
Average standard deviation of angle(°, degree)	7.51	6.62	7.96



**Fig. 6** Average area of a pore, average circularity of a pore and standard deviation of angle for an angle(120°) of hexagon on AAO nanopore template: (a) (111), (b) (200) and (c) (220) Al single crystal

Fig. 4는 (111), (200), (220) 단결정 알루미늄 시편의 AAO 다공성 나노기공 층의 위 면을 광학카메라 면과 50°기울기로 하여 촬영한 결과이다.

Fig. 4는 오로지 단결정의 집합조직이 다르고 다른 실험조건을 동일하게 하여 얻어진 AAO 다공성 나노기공 층의 위 면의 색깔인데 각각의 색깔이 다를 수 있다.

Fig. 5에는 이와 같은 (111), (200), (220) 단결정 알루미늄 시편의 AAO 다공성 나노기공 층의 위 면의 색깔이 다른 것을 분석하기 위하여 주사전자현미경 사진을 촬영한 결과를 정리하였다. Fig. 5에서 (111), (200), (220) 단결정 알루미늄 시편의 AAO 다공성 나노기공은 원소재의 집합조직이 달라짐에 따라 나노기공 하나의 평균 면적, 나노기공 하나의 평균 진원도 및 Fig. 2와 같이 기공들의 중심점을 연결하여 만들어진 육각형 모양 등이 서로 다를 수 있다.

Table 1과 Fig. 6에는 (111), (200), (220) 단결정 알루미늄 시편의 AAO 다공성 나노기공 층의 나노기공의 평균 면적, 나노기공의 평균 진원도를 비교한 결과이다. 또 Fig. 2와 같이 다공성 기공의 중심점을 연결하여 나타나는 육각형에서 측정한 한 개의 내각( $\alpha$ )이 정확한 육각형의 한 개의 내각인 120°로부터 벗어난 각도의 절대 값을 평균하여 한 개의 평균 표준편차 각도를 비교한 결과이다. Table 1과 Fig. 6에서 (200) 시편의 나노기공의 평균 면적은 1399 nm<sup>2</sup>으로 (220) 시편의 1240 nm<sup>2</sup>과 (111) 시편의 1140nm<sup>2</sup> 보다 크게 나타났다. 즉 AAO 다공성 나노기공의 평균 면적은 (200)>(111)>(220)의 크기로 변하였다. (200) 시편의 나노기공의 평균 진원도는 0.888로서 (220) 시편의 진원도 0.858과 (111) 시편의 진원도 0.820 보다 원형에 가까웠다. 즉 AAO 다공성 나노기공 평균 진원도는 (200)>(220)>(111)의 순서로 변하였다. 그리고 (200) 시편의 나노기공의 육각형 형태의 한 개의 내각이 120°에서 벗어난 평균 표준편차 각도는  $\pm 6.62^\circ$ 로서 (220) 시편의  $\pm 7.95^\circ$ 과 (111) 시편의  $\pm 7.51^\circ$ 보다 작게 나타났다. 즉 AAO 미세 다공성 미세공을 연결하여 나오는 육각형 형태의 한 개의 내각이 120°에서 벗어난 평균 표준편차 각도는 (220)>(111)>(200)의 크기로 변하였다.

이와 같이 (111), (200), (220) 집합조직을 갖는 단결정 알루미늄 시편으로 AAO 다공성 나노기공을

만든 결과, 나노기공의 평균 면적, 평균 진원도 및 평균 표준편차 각도를 측정한 결과 단결정의 집합 조직에 따라 서로 다르게 됨을 알 수 있다. Table 1 과 Fig. 6 의 결과는 작은 나노 크기의 차이 이지만 Fig. 4 의 AAO 의 색깔이 달라지게 하는 원인이 될 뿐만 아니라 AAO 나노기공을 응용하는데 중요함 요소임을 알아야 한다.

Table 1 과 Fig. 6 의 현상을 면심 입방정(FCC)에서 (111), (200), (220) 면의 면밀도(Planar density), 표면에너지(Surface energy), 탄성계수(Elastic modulus) 및 식각 속도(Etching rate) 등의 변수를 고려하여 분석해 보았다.

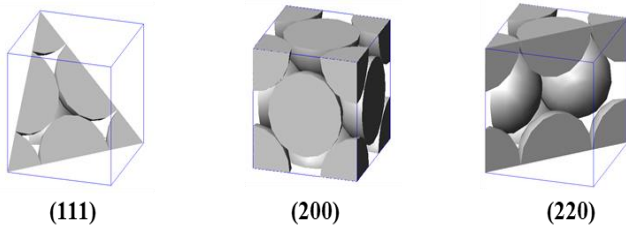


Fig. 7 (111), (200) and (220) plane in Al (FCC) structure

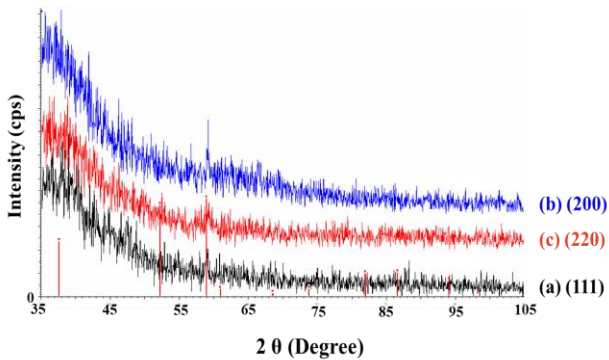


Fig. 8 XRD patterns of the AAO layers: (a) (111), (b) (200) and (c) (220) Al single crystal

Fig. 7 과 같이 각각 (111), (200), (220) 면의 면밀도는 (111)이 가장 크고 (200)이 중간, (220)이 가장 작아 지므로 (111)>(200)>(220) 순서로 변한다. 또한 표면에너지[22]는 (220)이 가장 크고 (200)이 중간, (111)이 가장 작아 (220)>(200)>(111) 순서로 변한다. 또 탄성계수[23,24]는 (111)이 가장 크고 (220)이 중간, (200)이 가장 작은 (111)>(220)>(200) 순서로 변하

며, 식각 속도[24,25]는 (200)이 가장 크고 (220)이 중간, (111)이 가장 작은 (200)>(220)>(111) 순서로 변한다.

이상에서 (111), (200), (220) 단결정 알루미늄 시편의 AAO 다공성 나노기공에서 나노기공의 평균 면적은 (200)>(111)>(220)의 크기로 변하며, 나노기공의 평균 진원도는 (200)>(220)>(111)의 순서로 변한다. AAO 다공성 나노기공을 연결하여 나타난 육각형 모양에서 한 개의 내각이 120°에서 벗어난 평균 표준편차 각도는 (220)>(111)>(200)의 크기로 변한다. 따라서 알루미늄의 (111), (200), (220) 면의 면밀도, 표면에너지, 탄성계수 및 식각 속도 등과 연결하여 설명하기가 어려움을 알 수 있다.

Fig. 8 은 Fig. 5 의 AAO 층을 X-선 회절분석 장치로 2θ - 회절 강도를 측정 결과이다. Fig. 8 에서 AAO 층의 면지수 회절 강도가 나타나지 않았다. 따라서 AAO 층의 Fig. 8 은 Fig. 3 의 알루미늄에서 나타난 결정의 회절 강도와 다르며 이것은 AAO 층이 비정질(Amorphous)임을 알 수 있다. 여기 Fig. 8 에서 강도는 세 가지 알루미늄 AAO 시편의 회절 강도의 모양이며 강도의 세기를 비교한 것이 아니다.

Fig. 5 에 보인 바와 같이 알루미늄 시편이 결정인 것과 다르게 AAO 층은 Fig. 8 과 같이 비정질(Amorphous)로 되기 때문에 나오는 특성을 비교할 때 결정의 특성과 서로의 연관성을 찾기 어렵다고 판단된다.

A. Belwalkar 등[26]은 AAO 층이 비정질이지만 공정변수에 따라 정도가 변하는 성질이 있다고 하였다. 따라서 본 연구에서 양극산화가 일어나는 면의 초기 집합조직(면의 밀도)이 다른 알루미늄으로부터 얻어지므로 이 때 비정질 AAO 층의 성질도 달라질 것이다. 따라서 초기 집합조직이 다른 알루미늄 시편으로부터 얻어진 AAO 층의 성질도 달라져서 나노기공 한개의 평균 면적, 나노기공 한개의 평균 진원도 및 평균 표준편차 각도 등이 달라질 수 있다고 생각된다.

앞으로 단결정 알루미늄의 AAO 다공성 나노기공을 갖는 AAO template 의 집합조직 변화에 따른 나노기공 한 개의 평균 면적, 나노기공 한 개의 평균 진원도 및 평균 표준편차 각도의 변화에 관한 연구를 좀 더 해야 할 필요가 있다고 판단된다.

## 4. 결론

(111), (200), (220) 집합조직을 갖는 단결정 알루미늄 시편을 동일한 조건으로 AAO 다공성 나노기공을 만들어 나노기공의 구조를 조사하고 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 단결정 AAO 다공성 나노기공 한 개의 평균 면적(Average area)은 (200)>(111)>(220)의 순서로 변하였다.

(2) 단결정 AAO 다공성 나노기공 한 개의 평균 진원도(Average circularity)는 (200)>(220)>(111)의 순서로 변하였다.

(3) 단결정 AAO 다공성 나노기공을 연결하여 육각형으로 만들어 한 개의 내각이 120°에서 벗어난 절대 각도의 평균 표준편차 각도(Average standard deviation of angle)는 (220)>(111)>(200)의 순서로 변하였다.

## 후 기

본 연구는 금오공과대학교의 학술연구비의 지원으로 이루어졌습니다. 이에 감사 드립니다.

## REFERENCES

- [1] S. Setch and A. Miyata, 1932, Sci. Pap. Inst. Phys. Chem. Res., Tokyo, Vol. 19, p. 237.
- [2] H. Masuda and K. Fukuda, 1995, Ordered Metal Nanohole Arrays Made by a Two-Step Replication of Honeycomb Structures of Anodic Alumina, Science, Vol. 268, No. 5216, pp. 1466~1468.
- [3] M. Saito, M. Kirihara, T. Taniguchi and M. Miyagi, 1989, Micropolarizer Made of the Anodized Alumina Film, Appl. Phys. Lett., Vol. 55, No. 7, pp. 607~609.
- [4] S. Z. Chu, S. Inoue, K. Wada and K. Kurashima, 2004, Fabrication and Structural Characteristics of Nanocrystalline Fe-Pt Thin Films and Fe-Pt Nanowire Arrays Embedded in Alumina Films on ITO/glass, J. Phys. Chem. B, Vol. 108, No. 18, pp. 5582~5587.
- [5] L. Zaraska, G. D. Sulka and M. Jaskula, 2012, Fabrication of Free-Standing Copper Foils Covered with Highly-Ordered Copper Nanowire Arrays, Appl. Sur. Sci., Vol. 258, No. 19, pp. 7781~7786.
- [6] A. Santos, T. Kumeria and D.Losic, 2013, Nanoporous Anodic Aluminum Oxide for Chemical Sensing and Biosensors, TrAC Trends Anal. Chem. Vol. 44, pp. 25~38.
- [7] T. Kikuchi, Y. Wachi, T. Takahashi, M. Sakairi and R. O. Suzuki, 2013, Fabrication of a Meniscus Microlens Array Made of Anodic Alumina by Laser Irradiation and Electrochemical Techniques, Electrochim. Acta, Vol. 94, pp. 269~276.
- [8] S. Zhang, L. Wang, C. Xu, A. Li, L. Chen and D. Yang, 2013, Fabrication of Ni-NiO-Cu Metal-Insulator-Metal Tunnel Diodes via Anodic Aluminum Oxide Templates, ECS Solid State Lett. Vol. 2, No. 1, pp. Q1~Q4.
- [9] A. Maghsodi, L. Adlnasab, M. Shabanian and M. Javanbakht, 2018, Optimization of Effective Parameters in the Synthesis of Nanopore Anodic Aluminum Oxide Membrane and Arsenic Removal by Prepared Magnetic Iron Oxide Nanoparticles in Anodic Aluminum Oxide Membrane via Ultrasonic-Hydrothermal Method, Ultrason. Sonochem., Vol. 48, Nov., pp. 441~452.
- [10] F.-Y. Wen, P.-S. Chen, T.-W. Liao and Y.-J. Juang, 2018, Microwell-Assisted Filtration with Anodic Aluminum Oxide Membrane for Raman Analysis of Algal Cells, Algal Res., Vol. 33, July, pp. 412~418.
- [11] L. Shen, M. Ali, Z. Gu, B. Min, D. Kim, and C. Park, 2013, Preparation of Anodic Aluminum Oxide (AAO) Nano-template on Silicon and Its Application to One-Dimensional Copper Nano-Pillar Array Formation, Kor. J. Chem. Eng., Vol. 30, No. 1, pp. 221~227.
- [12] M. M.- Domańska, M. Noreka, W. J. Stepniowski and B. Budner, 2013, Fabrication of High Quality Anodic Aluminum Oxide (AAO) on Low Purity Aluminum—A Comparative Study with the AAO Produced on High Purity Aluminum, Electrochim. Acta, Vol. 105, Aug. pp. 424~432.
- [13] A. P. Li, F. Muller, A. Briner, K. Nielsch and U. Gosele, 1998, Hexagonal Pore Arrays with a 50-420 nm Interpore Distance Formed by Self-Organization in Anodic Alumina, J. Appl. Phys., Vol. 84, Nov. pp.

- 6023~6026.
- [14] A. Belwalkar, E. Grasing, W. Van Geertruyden, Z. Huang, and W.Z. Misiolek, 2008, Effect of Processing Parameters on Pore Structure and Thickness of Anodic Aluminum Oxide (AAO) Tubular Membranes, *J. Membr. Sci.*, Vol. 319, No. 1-2, pp. 192~198.
- [15] J. Konieczny, L.A. Dobrzański, K. Labisz and J. Duszczyk, 2004, The Influence of Cast Method and Anodizing Parameters on Structure and Layer Thickness of Aluminum Alloys, *J. Mater. Proc. Tech.* Vol. 157/158, pp. 718~723.
- [16] L. Zaraska, G.D. Sulka, J. Szeremeta and M. Jaskuła, 2010, Porous Anodic Alumina Formed by Anodization of Aluminum Alloy(AA1050) and High Purity Aluminum, *Electro. Acta*, Vol. 55, No. 14, pp. 4377-4386.
- [17] M. Wu, U. Wen, Y. Lei, S. Ostendorp, K. Chen and G. Wild, 2010, Ultrathin Alumina Membranes for Surface Nanopatterning in Fabricating Quantum-Sized Nanodots, *Small*, Vol. 6, No. 5, pp. 695~699.
- [18] J. M. Montero-Moreno, M. Sarret and C. Muller, 2007, Some Considerations on the Influence of Voltage in Potentiostatic Two-Step Anodizing of AA1050, *J. Electro. Soc.* Vol. 154, No. 3, pp. 169~174.
- [19] T. Aerts, I. D. Graeve and H. Terryn, 2010, Anodizing of Aluminum under Applied Electrode Temperature: Process Evaluation and Elimination of Burning at High Current Densities, *Surf. Coat. Tech.* Vol. 204, No. 16-17, pp. 2754~2760.
- [20] C.-S. Chi, J.-H. Lee, I. Kim and H.-J. Oh, 2015, Effects of Microstructure of Aluminum Substrate on Ordered Nanopore Arrays in Anodic Alumina, *J. Mater. Sci. Tech.* Vol. 31, No. 7, pp. 751~758.
- [21] H. Masuda, H. Yamada, M. Satoh, H. Asoh, M. Nakao, and T. Tamamura, 1997, Highly Ordered Nanochannel-Array Architecture in Anodic Alumina, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 71, No. 19, pp. 2770~2772.
- [22] Y.-N. Wen and J.-M. Zhang, 2007, Surface Energy Calculation of the Fcc Metals by Using the MAEAM, *Sol. Stat. Comm.*, Vol. 144, No. 3-4, pp. 163~167.
- [23] L. Shan-Shan, W. Yu-Hua, and Z. Zi-Zhong, 2008, The Elastic Properties and Energy Characteristics of Au Nanowires: an Atomistic Simulation Study, *Chinese Phys. B*, Vol. 17, No. 7, pp. 2621~2626.
- [24] D. N. Lee and J. H. Seo, 2009, Orientation Dependent Directed Etching of Aluminum, *Corr. Sci. Tech.*, Vol. 8, No.3, pp.93~102.
- [25] R. Hull, 1999, Properties of Crystalline Silicon, INSPEC Publication, U.S.A., pp. 819~820.
- [26] A. Belwalkar, E. Grasing, W. V. Geertruyden, Z. Huang and W.Z. Misiolek, 2008, Effect of Processing Parameters on Pore Structure and Thickness of Anodic Aluminum Oxide (AAO) Tubular Membranes, *J. Membr. Sci.*, Vol. 319, No. 1-2, pp. 192-198.