

DOI <https://doi.org/10.9725/kstle.2017.33.6.275>

다공성 산화알루미늄의 표면코팅에 따른 트라이볼로지적 특성연구

김영진 · 김현준[†]

경북대학교 과학기술대학 정밀기계공학과

Study on Tribological Behavior of Porous Anodic Aluminum Oxide with respect to Surface Coating

Young-Jin Kim and Hyun-Joon Kim[†]

Dept. of Precision Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Korea
(Received August 31, 2017; Revised October 28, 2017; Accepted October 31, 2017)

Abstract – In this work, we have fabricated anodic aluminum oxide (AAO) with ordered nanoscale porosity through an anodization process. We deposited gold and nano-organic thin films on the porous AAO surface to protect its structure and reduce friction. We investigated the tribological characteristics of the porous AAO with respect to the protective surface coatings using tribometers. While investigating the frictional characteristics of the samples by applying normal forces of the order of micro-Newton, we observed that AAO without a protective coating exhibits the highest friction coefficient. In the presence of protective surface coatings, the friction coefficient decreases significantly. We applied normal forces of the order of milli-Newton during the tribotests to investigate the wear characteristics of AAO, and observed that AAO without protective surface coatings experiences severe damage due to the brittle nature of the oxide layer. We observed the presence of several pieces of fractured particles in the wear track; these fractured particles lead to an increase in the friction. However, by using surface coatings such as gold thin films and nano-organic thin films, we confirmed that the thin films with nanoscale thickness protect the AAO surface without exhibiting significant wear tracks and maintain a stable friction coefficient for the duration of the tribotests.

Keywords – anodic aluminum oxide(양극산화 알루미늄), coating(코팅), friction(마찰), wear(마모)

1. 서 론

알루미늄 표면에 자연적인 산화막보다 두꺼운 산화 피막을 전기-화학적 방법인 양극산화 공정을 통하여 형성하는 기술은 산업 전반에 걸쳐 오랜 기간 동안 연구 및 응용되어 왔다[1]. 양극산화 기법은 금속재료에 양극전기를 인가했을 때 발생하는 전기화학적 반응을 이용해 재료의 표면에 얇은 산화막을 생성하는 공정이며, 이 공정을 통하여 표면에 나노스케일의 규칙적인

기공을 형성할 수 있는데, 이러한 구조를 갖는 양극산화 알루미늄(Anodic aluminum oxide : AAO)은 일정한 형태와 크기의 나노구조를 제작하기 위한 템플릿이나, 센서, 정보저장을 위한 구조로서의 가치를 인정받아 많은 연구가 이루어지고 있다[1-4].

뿐만 아니라 AAO 표면의 나노기공이 갖는 정렬성을 활용하여 친/소수성을 제어하거나, 기공을 고체윤활제의 공급을 위한 일종의 보관소처럼 활용하여 자기윤활 특성을 갖는 표면을 만들고자 하는 연구 또한 진행되어 왔다[3, 5-7]. 이와 같은 응용분야에 다공성 AAO를 활용하기 위해서는 기계적 특성에 대한 명확한 이해가 요구되며, 특히 다공성 표면의 트라이볼로지적 특성은

[†]Corresponding author : hjoonkim@knu.ac.kr
Tel: +82-54-530-1273, Fax: +82-54-530-1278

AAO 표면의 기능성 및 내구성에 직접적인 영향을 미치는 요소이므로 심도깊은 연구가 요구된다.

그러나 다공성 AAO의 트라이볼로지적 특성에 대한 연구는 충분히 이루어지지 않은 상태이며 소수의 연구만이 발표된 바 있다. Tsyntsar은 서로 다른 양극산화 용액과 공정으로 형성되는 다공성 구조의 경도, 탄성 계수, 마찰계수 등을 시험하였고, 대체로 0.9~1.2 수준의 높은 마찰계수값을 가진다는 것을 확인한 바 있다. 이러한 높은 마찰계수는 상대운동과정에서 발생하는 마모입자가 변형하여 표면에 두꺼운 코팅층을 형성하면서 응착력을 증가시키기 때문으로 추정하였다. 또한 황산을 이용하여 양극산화를 수행할 경우, 공극의 지름이 30 nm 이하로 형성되나, 옥살산을 이용할 경우에는 30~75 nm의 지름이 나타나며 황산을 이용하여 생성한 다공성 AAO 구조가 옥살산을 사용하여 제작한 경우에 비하여 마찰계수가 상대적으로 더 낮게 나타난다는 사실을 규명하였다[6]. Hu는 다공성 AAO의 기공 크기를 다르게 제작하고 C₆₀ 용액에 담가 기공에 C₆₀이 침투하도록 한 뒤, 다공성 AAO의 마찰특성을 시험하였다. 이 연구에서는 C₆₀가 포함되지 않은 다공성 AAO의 마찰계수는 대체로 0.4~1.0 수준으로 발표하였고, 기공 크기가 증가할수록 마찰 및 마모특성의 열화가 나타남을 보였다[8].

이러한 기존의 연구만으로는 다공성 AAO의 트라이볼로지적 특성을 이해하기에 부족하며, 따라서 본 연구에서는 다공성 AAO의 트라이볼로지적 특성에 대한 이해를 증진하기 위하여 표면보호 코팅에 따른 마찰 및 마모특성에 대하여 알아보려고 하였다.

2. 실험방법

2-1. 양극산화 조건 및 시편준비과정

일반적으로 양극산화공정을 통하여 육각형의 나노스케일 기공을 형성하는 경우에는 나노미터 스케일의 잘 정렬된 구조를 형성해야 하므로 가급적 고순도(99.99% 이상)의 알루미늄을 사용하는 경우가 많으나, 높은 비용이 발생하는 단점이 있으며 고순도 알루미늄을 생산하는 공정상의 어려움이 있다[9]. 본 연구에서는 이러한 문제점을 회피하기 위하여 대상 물질로 99.5%의 순도를 갖는 알루미늄 합금(Al 1050)을 선택하였다.

공정을 수행하기에 앞서 0.5 mm 두께의 알루미늄 합금을 20 × 20 mm의 크기로 절단하였으며, 내부 잔류응력을 제거하기 위하여 약 500 °C에서 3시간 가량

Table 1. Electrolytic polishing condition.

Condition	Value
Time	3 min
Voltage	20 V
Temperature	10 °C
Solution ratio (HClO ₄ : C ₂ H ₅ OH)	1 : 4

열처리를 하였다. 열처리 공정을 진행한 뒤, 알루미늄 표면의 가공흔적 및 흡집을 제거하고, 표면거칠기를 저감하기 위하여 Table 1에 나타나는 것과 같은 조건에서 전해연마 공정을 수행하였다[10, 11].

표면정도가 향상된 알루미늄에 우수한 정렬성을 갖는 나노스케일의 기공을 형성하기 위하여 양극산화 공정을 두 차례에 걸쳐 진행하였다[9]. 양극산화는 황산, 옥살산, 인산 등의 산성 용액을 주로 이용하는데 본 연구에서는 황산을 이용하여 공정을 진행하였다[12]. 일반적으로 두 차례의 양극산화 공정을 통하여 균질한 다공성 AAO를 제작하게 되는데, 이는 1회의 공정으로는 충분한 수준의 균일성을 획득할 수 없기 때문이다[13].

본 연구에서도 양호한 정렬성을 갖는 나노구조를 획득하기 위하여 두 차례에 걸친 공정을 수행하였다. 높은 온도에서 양극산화를 진행할 경우 급격한 화학적 반응으로 인하여 표면에 다량의 크랙이 발생하므로 다공성 AAO의 품질을 향상시키기 위하여 두 차례의 공정을 진행하는 동안 용액의 온도를 5 °C 이하로 유지하였다.

1차 및 2차의 양극산화 공정은 Table 2에 나타나 있는 조건을 적용하여 진행하였다. 1 L의 초순수에 황산을 0.16 mol 섞은 용액을 이용하여 공정을 수행하였으며, 1차 공정을 마친 뒤 알루미늄 플레이트를 크롬산 (1.8 wt%)과 인산(6 wt%)을 혼합한 60 °C의 용

Table 2. Condition of two step anodizing process

Condition	1st	2nd
Time	16 hour	30 min
Voltage	35 V	35 V
Temperature	0~5 °C	0~5 °C
Sulfuric acid Concentration	0.16 mol/L	0.16 mol/L

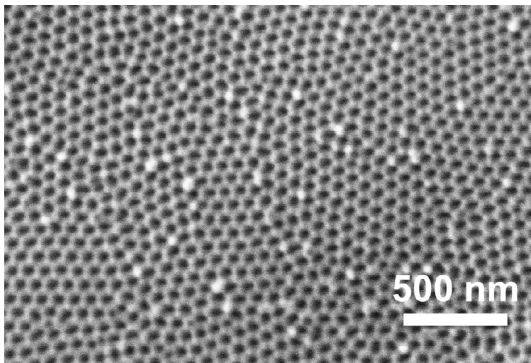


Fig. 1. SEM image of AAO surface with aligned hexagonal nano-structure.

액에 2시간 동안 노출시킴으로써 1차 양극산화 공정을 통해 생성된 산화피막을 제거하였다. 이어서 1차 공정과 동일한 전압, 온도 및 용액조건에서 30분간 2차 공정을 수행하였다.

양극산화 공정을 수행한 뒤 표면에 남아있는 오염물질을 제거하기 위하여 아세톤, 에탄올 및 증류수를 이용하여 3단계에 걸쳐 초음파 세척을 진행한 뒤, 알루미늄 표면에 육각형의 나노구조가 균일하게 생성되었는지 확인하기 위하여 전자현미경으로 관찰하였다. 그 결과 Fig. 1에서 나타나는 것과 같이 비교적 균일한 형상과 분포의 다공성 표면이 제작되었음을 확인할 수 있었다. 측정 결과 기공의 지름은 약 50~60 nm인 것으로 확인되었다.

이렇게 형성된 다공성 AAO의 내구성을 향상시키고 마찰을 저감하기 위하여 나노미터 두께를 갖는 두 종류의 박막을 코팅하였다. 박막 소재로는 낮은 전단강도를 가지고 있어 고체윤활제로 사용 가능한 금 (Au) 과 하드디스크와 같은 정밀 기계시스템의 표면보호용으로 흔히 사용되는 나노유기재료인 Perfluoropolyether (PFPE)를 선정하였다. 금 박막의 경우 스퍼터링을 통하여 약 5 nm, 그리고 30 nm의 두 가지 두께로 다공성 AAO 표면에 코팅하였고 PFPE 박막의 형성은 딥코팅 기법을 활용하였다. PFPE와 알루미늄 표면 사이의 결합력을 증대시키기 위하여 딥코팅 후에는 약 100 °C에서 1시간 가량 열처리를 수행하였고, 이어서 용매인 Vertrel-XF에 담가 표면에 물리적으로 흡착되어 있는 PFPE를 제거하였다.

2-2. 트라이볼로지 특성 실험조건

나노미터 두께의 코팅을 적용한 다공성 AAO의 트

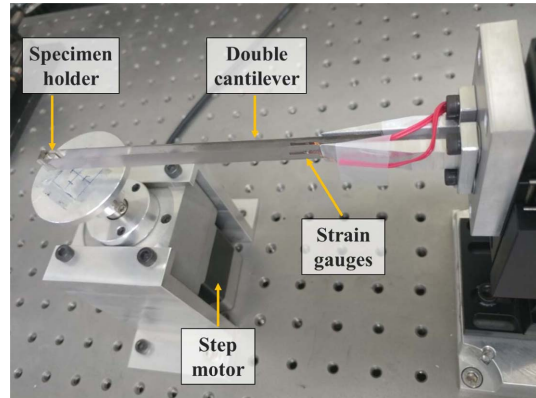


Fig. 2. Pin-on-disk type tribometer with double cantilever to measure micro-Newton scale.

라이볼로지적 특성을 규명하기 위하여 마찰실험을 진행하였다. 산화알루미늄은 취성이 높으며, 다공성 표면 구조를 갖고 있기 때문에 높은 접촉압력이 발생하고, 그에 따라 쉽게 파손될 우려가 있다. 따라서 본 연구에서는 다공성 AAO의 마찰 및 마모 특성을 모두 확인하기 위하여 두 가지 서로 다른 조건에서 마찰실험을 진행하였다. 다공성 AAO의 마찰특성을 규명하기 위하여 매우 작은 수직하중 조건에서 마찰실험을 진행하였다. 낮은 수직하중을 인가함으로써 접촉압력을 낮출 수 있어 다공성 구조가 파괴되거나 변형하는 상황을 최소화 하고자 하였다. 한편, 다공성 AAO의 내구성 및 마모특성 평가를 위해서는 상대적으로 높은 하중을 인가하여 마찰실험을 수행하였다. 수직하중을 높임으로써 빠르게 다공성 AAO구조가 마모되도록 하였다.

저하중 조건에서 시험을 수행하기 위하여 Fig. 2에 도시한 것과 같은 pin-on-disk 타입의 시험장치를 사용하였다. 이 장치는 이중 캔틸레버 구조에 스트레인 게이지가 부착되어 있는 형태로 두 캔틸레버 사이에 연결판을 부착하여 캔틸레버의 진동을 감쇄시키는 한편, 마찰력 측정의 신뢰성을 높이도록 설계되었다. 안정적인 거동을 유지하기 위하여 비교적 저속인 6 rpm의 속도로 모터를 회전시켰으며 200 μN의 수직하중을 인가하여 5분간 마찰실험을 진행하였다. 다공성 AAO표면과 접촉하는 상대면으로는 지름 1 mm의 지르코니아 볼 3개를 사용하였다. 3개의 볼이 균일하게 접촉하는 조건을 가정하여 Hertz 접촉압력을 계산한 결과 금 박막이 형성되지 않은 조건에서 약 100 MPa의 압력이 가해지는 것으로 나타났다.

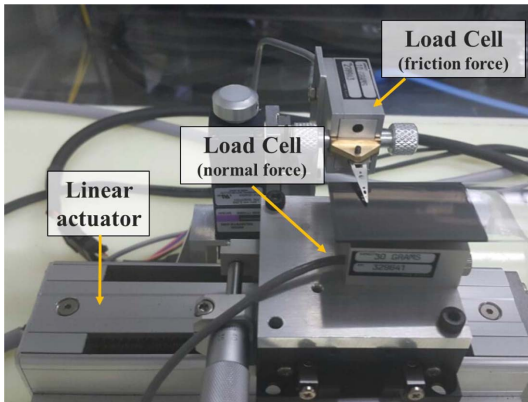


Fig. 3. Pin-on-reciprocating type tribometer to examine durability of anodic aluminum oxide specimen.

내구성 시험을 위해서는 보다 높은 하중 및 접촉압력 조건에서 마찰시험이 진행될 필요가 있으므로 Fig. 3과 같은 pin-on-reciprocating 타입의 시험장치를 이용하였다. 약 20 mN의 수직하중을 인가하여 4 mm/s의 왕복운동 속도로 5분, 10분, 20분으로 시험시간을 달리하여 마찰시험을 수행하였다. 핀 역할을 하는 상대면으로는 지름 1 mm의 지르코니아 볼 1개를 사용하였다. 이 경우 Hertz 접촉압력은 앞서 언급한 경우와 비교하여 상대적으로 높은 약 680 MPa로 계산되었다. 두 시험 모두 상온(약 22~24 °C)에서 진행되었고 시험이 진행되는 동안 측정된 상대습도는 약 40% 수준이었다.

3. 실험결과 및 분석

3-1. 다공성 AAO의 코팅에 따른 마찰실험 결과

다공성 AAO 표면과 내구성 향상을 위한 금박막 및 나노유기박막의 마찰특성을 확인하기 위하여 저하중 마찰시험을 수행한 결과, Fig. 4와 같이 300초 동안의 실험과정 동안 마찰신호에 큰 변동이 없음을 확인할 수 있었다. 이는 저하중 조건에서 단시간 실험을 진행하여 마모가 거의 일어나지 않았기 때문이며 저하중 마찰시험의 취지인 시편의 초기상태에서의 마찰특성 규명에도 부합하는 조건이라고 할 수 있다.

동일한 조건에서 각기 다른 시편에 마찰시험을 한 결과가 Fig. 5와 같이 나타났다. 각 시편에 대한 시험은 신뢰성을 위하여 3~5회 반복하여 시행하였다. X축은 시편의 종류를 나타내며, Y축은 마찰계수를 나타낸

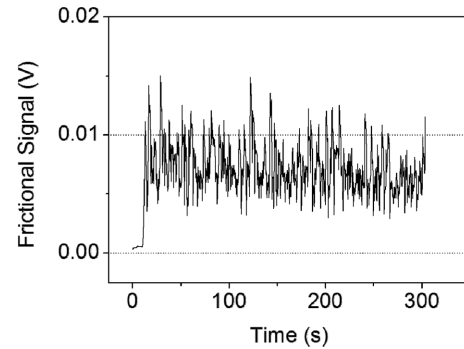


Fig. 4. An example of frictional signal of aluminum oxide surface coated with PFPE obtained during 5 minutes of tribotest under normal force of 200 μ N.

다. X축의 'AAO'는 코팅하지 않은 다공성 AAO를 의미하며, 'Gold_Thick'는 다공성 AAO표면에 금을 30 nm 코팅한 시편을 의미한다. 'Gold_Thin'은 금을 5 nm 코팅한 시편, 마지막으로 'PFPE'는 표면에 PFPE를 코팅한 시편을 의미한다. 마찰계수를 살펴보면 코팅을 적용하지 않은 AAO의 마찰계수가 2.0에 가까우며 코팅을 한 경우에는 그 수치가 0.9까지 낮아지지만, 일반적인 경우의 마찰계수와 비교해 볼 때 매우 높은 값이라는 점을 알 수 있다. 이와 같은 높은 마찰계수는 수직하중이 매우 낮은 조건에서 흔히 나타나며, 넓은 접촉면적에서 발생하는 응착력이 마찰력을 증가시키기 때문으로 알려져 있다[14]. 본 연구에서는 비교적 큰 크기의 지르코니아 볼을 3개 사용하였기 때문에 큰 접촉면을 형성하여 높은 응착력이 발생하였을 것으로 추정된다. 큰 접촉면에서 나타나는 응착력에 의한 효과로 인하여 마찰력이 상승하고, 마찰계수 계산과정에서 분모에 해당하는 수직하중이 매우 낮으므로 결과적으로 1 이상의 높은 마찰계수값이 측정된 것으로 판단된다.

Fig. 5의 결과를 살펴보면 금박막 혹은 나노유기박막을 적용한 경우, 아무것도 코팅하지 않은 다공성 AAO에 비하여 마찰계수를 크게 저감시킬 수 있다는 사실을 확인할 수 있다. 특히, 흥미로운 점은 금 박막의 두께를 달리 하여 코팅할 경우 마찰계수 값이 크게 달라진다는 점이다. 금 박막의 두께가 두꺼울 경우 마찰계수는 약 1.6 수준으로 마찰저감효과가 크지 않지만, 얇은 금 박막을 사용할 경우에는 마찰계수가 약 0.8로 감소하여 효과적으로 마찰이 감소되었음을 확인할 수 있었다. PFPE를 코팅한 경우에는 마찰계수가

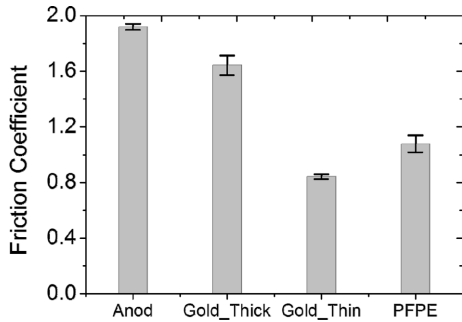


Fig. 5. Friction coefficient with respect to surface coating examined under normal force of 200 μN.

약 1.1 정도로 나타났다. 두꺼운 금 박막을 코팅한 경우에 높은 마찰계수가 나타난 것은 금 박막이 상대적으로 산화알루미늄에 비하여 낮은 탄성계수를 갖고 있어 쉽게 변형하기 때문으로 판단된다. 산화알루미늄의 경우 약 380 GPa, 금의 경우 약 80 GPa의 탄성계수를 나타내는 것으로 알려져 있다[15, 16]. 금 박막의 두께가 불과 5~30 nm 이므로, 모재인 산화알루미늄의 영향에 의하여 얇은 금 박막의 경우 두꺼운 금 박막에 비하여 변형량이 적게 나타나게 될 것임을 추정할 수 있다. 따라서 변형량이 더 많을 것으로 추정되는 두꺼운 금 박막의 경우, 변형에 의한 접촉면적이 상대적으로 커지게 되며 그에 따라 응착력과 마찰력이 증가하였다고 판단할 수 있다. Oh는 마이크로 볼 베어링의 내구성을 향상시키기

위하여 수십~수백 nm 두께의 은 박막을 사용하였는데, 해당 연구에서도 두꺼운 은 박막을 적용하였을 때 높은 마찰계수를 도출하였다고 설명하고 있으며, 원인은 은 박막의 변형량의 차이를 제시한 바 있다[17].

다공성 AAO의 마모특성을 알아보기 위하여 20 mN의 비교적 높은 하중에서 마찰시험을 수행한 결과 Fig. 6과 같은 결과를 확인할 수 있었다. 마찰시험 시간을 5분으로 설정하여 시험한 결과 세 종류의 시편의 마찰계수가 0.1~0.2 수준으로 나타났다. 코팅되지 않은 AAO의 마찰계수는 약 0.18로 가장 높은 값을 나타내었고, PFPE를 코팅한 경우에는 약 0.14 수준으로 가장 낮은 값을 나타내었다. Fig. 5의 경우와 비교하여 현저하게 낮은 수준의 마찰계수값이 획득된 것은 수직 하중이 증가하여 응착력에 의한 효과가 감소되었기 때문으로 판단된다. 마찰시험 시간을 10분으로 늘릴 경우 코팅되지 않은 AAO표면은 마찰계수가 0.7로 급격하게 증가하였고, 금 박막이 코팅된 경우에도 약간의

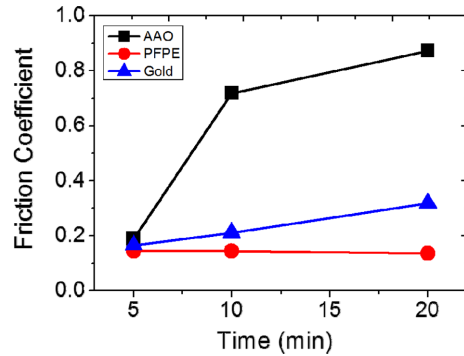


Fig. 6. Friction coefficient with respect to surface coating examined under normal force of 20 mN.

증가가 있음이 확인되었으나 PFPE가 코팅된 경우에는 거의 변화가 없었다. 마찰시험 시간을 20분으로 늘렸을 경우 코팅되지 않은 AAO 표면의 마찰계수는 0.9 가량으로 증가하였고 금박막이 코팅된 시편의 경우에도 약 0.3 정도로 증가한 것이 확인되었다. PFPE가 코팅된 시편은 마찰계수가 미세하게 감소한 것으로 나타났다는데 이는 시편 사이의 오차로 인한 것으로 추정되며 마찰계수의 차이는 거의 없는 것으로 판단된다.

3-2. AAO의 코팅에 따른 마모실험 결과

다공성 AAO 표면에 적용한 코팅에 따라 마찰계수가 달라지는 현상의 원인을 파악하기 위하여 20분간 마찰시험을 한 시편의 표면을 전자현미경을 이용하여 관찰한 결과 Fig. 7과 같은 표면 상태를 확인할 수 있었다. 코팅되지 않은 AAO 표면의 경우 Fig. 7(a)와 같이 마찰면 전체에 선명한 마모흔적이 발생하였다. 마멸 흔적을 확대해 보면 비정형의 수많은 마모입자들이 존재하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 표면의 다공성 산화층이 높은 취성을 가지고 있어 상대운동에 의해 쉽게 파괴되어 나타난 결과로 판단된다. 또한 마모입자의 형태를 살펴보면 연삭마모에 의하여 발생한 것으로 추정할 수 있다. 마모입자를 살펴보면 제각기 크기와 형태가 다름을 알 수 있다. 일부 연구에 따르면 마모입자의 형상이 구형에 가까운 경우 마모가 저감되는 현상이 발견된 바 있다[18]. 그러나 본 연구에서 나타나는 마모입자는 불특정한 형상을 지니고 있으며 알루미늄 산화층이 마모되었으므로 비교적 경도가 높을 것으로 추정된다. 따라서 Fig. 7(a)에 나타나는 마모입자들은 두 접촉면 사이에서 접촉압력을 증가시키는 한편, 마모를 가속시키는 역할을 하였을 것으로 판단된다

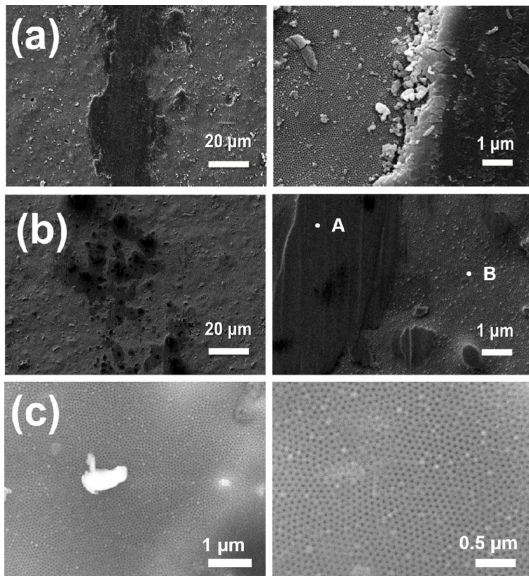


Fig. 7. Scanning electron microscope images of (a) porous AAO without coating, (b) AAO with gold thin film and (c) AAO with PFPE coating.

[19]. 또한 이 과정에서 마모입자와의 상호작용에 의하여 ploughing 현상이 증가하여 마찰계수 또한 증가한 것으로 보인다.

그에 비하여 금 박막을 코팅한 경우에는 Fig. 7(b)와 같이 상대적으로 적은 양의 마모흔적만이 관찰되며 이 부분을 확대할 경우 금 박막이 상대운동 방향을 따라 얇게 퍼지듯 다공성 나노구조위에 코팅되어 더 이상 다공성 구조가 확인되지 않는 모습이 발견되었다. 이러한 결과는 금의 전단강도가 낮아 마찰력에 의해 전단되며 소성변형 하였기 때문으로 추정되며 EDS (energy dispersive X-ray spectroscopy)를 이용하여 측정 한 결과로도 마모흔적 부위의 금 박막이 마모가 일어나지 않은 부위에 비하여 두껍게 코팅되어 있는 것이 확인되었다. Fig. 7(b)의 우측 사진에 알파벳 A와 B로 표기된 두 부분에 대해 EDS를 측정한 결과 A 지점의 경우 알루미늄이 검출되지 않았고, B 지점의 경우 알루미늄과 금이 함께 검출되었다. 금 박막이 다공성 AAO위에 두껍게 형성된 A 지점에서 만일 다공성 AAO 표면이 마모되어 마모입자가 생성되었다면 알루미늄 및 산소가 해당 지점의 표면에서 검출되었어야 하지만, 분석 결과 표면에는 금이 대부분인 것으로 검출 되었으므로 AAO가 마모된 것이 아닌 금 박막이 비교적 두껍게 AAO 표면 위에 코팅되어 있는 상태라

고 판단할 수 있었다.

한편 PFPE를 코팅한 시편의 경우에는 Fig. 7(c)에 나타나듯 마모흔적이 전자현미경으로 검출되지 않았다. 이러한 경향은 PFPE를 코팅한 경우 20분간의 마찰시험동안 마찰계수가 거의 변화가 없다는 측정결과와 일맥상통 하는 것으로 PFPE가 충분한 표면보호 및 마찰저감 효과를 가지고 있는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

양극산화 기법을 통해 알루미늄 표면에 잘 정렬된 나노스케일의 육각형 기공을 가지는 산화피막을 생성하여 트라이볼로지적 특성을 알아보았다. 코팅을 적용하지 않은 AAO의 경우 높은 마찰계수를 나타내며 짧은 시간의 마찰시험으로도 쉽게 마모가 발생하는 현상을 확인할 수 있었다.

금 박막과 PFPE를 다공성 AAO 표면에 적용한 경우 마찰계수가 크게 저감됨을 확인하였으며, 마모현상 역시 코팅이 없는 경우에 비하여 억제되고 있음을 알 수 있었다. 특히 PFPE를 적용한 경우에는 표면 구조의 손상 없이 지속적으로 낮은 마찰계수 값이 측정되어 금 박막에 비하여 상대적으로 우수한 표면 보호효과를 발휘함을 알 수 있었다.

이와 같은 실험 및 분석결과는 다공성 AAO가 적용되는 다양한 응용분야에서 신뢰성 및 내구성을 향상시키기 위한 기초지식으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgements

이 논문은 2015년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2015R1C1A1A01053416).

References

- [1] Preston, C. K., Moskovits, M., "Optical characterization of anodic aluminum oxide films containing electrochemically deposited metal Particles. 1. gold in phosphoric acid anodic aluminum oxide films", *J. Phys. Chem.*, Vol. 97, pp. 8495-8503, 1993.
- [2] Li, F., Zhang, L., Metzger, R. B., "On the growth of highly ordered pores in anodized aluminum oxide", *Chem. Mater.*, Vol. 10, pp. 2470-2480, 1998.
- [3] Brevnov, D., A., Barela, M. J., Brooks, M. J., Lopez, G.

- P., Atanassov, P. B., "Fabrication of anisotropic super hydrophobic/hydrophilic nanoporous membranes by plasma polymerization of C_4F_8 on anodic aluminum oxide", *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 151, pp. B484-B489, 2004.
- [4] Rumiche, F., Wang, H. H., Hu, W. S., Indacochea, J. E., Wang, M. L., "Anodized Aluminum Oxide (AAO) nanowell sensors for hydrogen detection", *Sens. Actuator B-Chem.*, Vol. 134, pp. 869-877, 2008.
- [5] Ye, J., Yin, Q., Zhou, Y., "Superhydrophilicity of anodic aluminum oxide films: From "honeycomb" to "bird's nest", *Thin Solid Films*, Vol. 517, pp. 6012-6015, 2009.
- [6] Tsyntsar, N., Kavas, B., Sort, J., Urgen, M., Celis, J.-P., "Mechanical and frictional behaviour of nanoporous anodised aluminium", *Mater. Chem. Phys.*, Vol. 148, pp. 887-895, 2014.
- [7] Jeong, J., Cho, M., "Tribological characteristics of anodized Al 6061 under deionized water lubricated reciprocating condition", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 33, pp. 59-64, 2017.
- [8] Hu, N., Ge, S., Fang, L., "Tribological properties of nano-porous anodic aluminum oxide template", *J. Cent. South Univ. Technol.*, Vol. 18, pp. 1004-1008, 2011.
- [9] Michalska-Domańska, M., Norek, M., Stepniowski, W. J., Bunder, B., "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, pp. 424-432, 2013.
- [10] Sulka, G. D., Parkoła, K. G., "Temperature influence on well-ordered nanopore structures grown by anodization of aluminium in sulphuric acid", *Electrochim. Acta*, Vol. 52, pp. 1880-1888, 2007.
- [11] Sulka, G. D., Parkoła, K. G., "Anodising potential influence on well-ordered nanostructures formed by anodisation of aluminium in sulphuric acid", *Thin Solid Films*, Vol. 515, pp. 338-345, 2006.
- [12] Schwirn, K., Lee, W., Hillebrand, R., Steinhart, M., Nielsch, K., Gosele, U., "Self-Ordered Anodic Aluminum Oxide Formed by H_2SO_4 Hard Anodization", *ACS Nano*, Vol. 2, pp. 302-310, 2008.
- [13] Wang, X., Wang, X., Huang, W., Sebastian, P. J., Gamboa, S., "Sol-gel template synthesis of highly ordered MnO_2 nanowire arrays", *J. Power Sources*, Vol. 140, pp. 211-215, 2005.
- [14] Kim, H.-J., Kim, D.-E., "Frictional behavior of Ag nanodot-pattern fabricated by thermal dewetting", *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 215, pp. 234-240, 2013.
- [15] Wong, C. P., Bollampally, R. S., "Thermal conductivity, elastic modulus, and coefficient of thermal expansion of polymer composites filled with ceramic particles for electronic packaging", *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol. 74, pp. 3396-3403, 1999.
- [16] Wu, B., Heidelberg, A., Boland, J. J., "Mechanical properties of ultrahigh-strength gold nanowires", *Nat. Mater.*, Vol. 4, pp. 525-529, 2005.
- [17] Oh, D.-S., Kang, K.-H., Kim, H.-J., Kim, J.-K., Won, M.-S., Kim, D.-E., "Tribological characteristics of micro-ball bearing with V-shaped grooves coated with ultra-thin protective layers", *Tribol. Int.*, Vol. 119, pp. 481-490, 2018.
- [18] Tipper, J. L., Firkins, P. J., Ingham, E., Fisher, J., Stone, M. H., Farrar, R., "Quantitative analysis of the wear and wear debris from low and high carbon content cobalt chrome alloys used in metal on metal total hip replacements", *J. Mater. Sci. Mater. Med.*, Vol. 10, pp. 353-362, 1999.
- [19] Suh, N. P., "The delamination theory of wear", *Wear*, Vol. 25, pp. 111-124, 1973.