

SEM 내부에 설치된 트라이보 시험기를 통한 금속 코팅의 실시간 마찰/마모 특성 분석

김해진¹ · 김대은² · 김창래^{3,*}

¹경상대학교 기계항공공학부, ²연세대학교 기계공학과, ³조선대학교 기계공학과

Real Time Analysis of Friction/Wear Characteristics of Metal Coatings with a Tribo-tester Installed in an SEM

Hae-Jin Kim¹, Dae-Eun Kim² and Chang-Lae Kim^{3,*}

¹School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University, Korea

²Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, Korea

³Department of Mechanical Engineering, Chosun University, Korea

(Received October 6, 2018; Revised November 30, 2018; Accepted November 30, 2018)

Abstract – This study aims to visualize the friction and wear behaviors of metal coatings in real time. The main mechanism of wear is identified by observing all the processes in which wear occurs. The friction coefficients of the moments are monitored to confirm the relationship between the friction and wear characteristics of the coating. Thin Ag coatings, which are several hundred nanometers in thickness, are prepared by depositing Ag atoms on silicon substrates through a sputtering method. A pin-on-disk-type tribo-tester is installed inside a scanning electron microscope (SEM) to evaluate the friction and wear characteristics of the Ag coating. A fine diamond pin is brought into contact with the Ag coating surface, and a load of 20 mN is applied. The contact pressure is calculated to be approximately 15 GPa. The moments of wear caused by the sliding motion are visualized, and the changes in the friction characteristics according to each step of wear generation are monitored. The Ag coating can be confirmed to exhibit a wear phenomenon by gradually peeling off the surface of the coating on observing the friction and wear characteristics of the coating in real time inside the SEM. This can be explained by a typical plowing-type wear mechanism.

Keywords – friction(마찰), real time(실시간), silver coating(은코팅), visualization(가시화), wear(마모)

Nomenclature

a : Radius of contact area (mm) (접촉면적의 반지름)
 E : Elastic modulus (GPa) (탄성계수)
 F : Normal load (mN) (수직하중)
 P : Hertzian contact pressure (GPa) (헤르츠 접촉압력)
 r : Radius of curvature (곡률반경)

ν : Poisson's ratio (포아송 비)

1. 서 론

금속 코팅은 다양한 정밀 부품들의 표면을 보호하기 위해 널리 활용되고 있다[1, 2]. 특히, 윤활 특성이 우수한 금속 재료들은 접촉면에서의 마찰력을 줄여주어 부품들의 내구성을 크게 향상시킨다. 대표적으로, 은(Silver, Ag) 코팅은 고체 윤활제의 역할을 하며, 전기적 특성이 우수하고 열이나 화학적 반응에 안정적이기 때문에 다양한 전기적 장치들에 적용되고 있다[3-5]. 하지만, Ag 금

*Corresponding author: kimcl@chosun.ac.kr
Tel: +82-62-230-7048, Fax: +82-62-230-7048
<http://orcid.org/0000-0002-1983-0181>

© 2018, Korean Tribology Society

속은 기계적인 강도가 상대적으로 낮아 반복적인 접촉에 의하여 미세 마모가 쉽게 발생한다. 이에 장치 시스템의 성능과 효율을 떨어뜨리고, 심한 경우 파손을 유발하기도 한다. 이러한 점에서, Ag 코팅과 같이 낮은 강도를 가진 재료들의 내구성을 향상시키기 위해서는 마찰 및 마모 특성에 대한 이해가 필요하다.

대표적으로 Ag 코팅의 두께에 따른 마찰 및 마모 특성을 평가하여, 코팅의 두께와 내구성의 관계를 확인한 연구 결과가 보고되었다[6]. 또한, 접촉압력과 미끄럼 속도 등 실험 조건에 따라 Ag 코팅의 마찰 특성과 마모의 진행과정 및 메커니즘을 상세히 분석한 연구 결과도 보고되었다[7, 8]. 이와 같이, 금속 코팅의 마모 메커니즘을 규명함으로써, 실제 시스템에 적용된 코팅의 내구성을 향상시키고자 하였다. 이러한 연구들에서는 코팅 표면과 핀의 접촉 미끄럼 운동을 통해 마찰력을 측정 한 후, 코팅 표면에 생긴 스크래치 마모 흔적을 광학현미경(Optical Microscope, OM)이나 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)를 통해 분석하여 마모 메커니즘을 설명하였다. 하지만, 실험 후에 마모 흔적을 관찰하는 방법은 마모의 진행과정을 설명하기 어렵고, 특히 초기의 마모 현상을 분석할 수 없다. 무엇보다도 마모가 진행됨에 따른 마찰 특성의 변화를 추측에 의한 가설로 설명하는 경향이 있다. 또한, 현미경으로 관찰하기 위해 시편을 옮기는 과정에서 마모 입자들이 소실되거나 이물질이 유입될 가능성도 있다.

이에 따라, 현미경 장치에 트라이보 시험기(Tribo-tester)를 설치하여 실시간으로 마모가 발생하는 순간들을 직접 관찰하고, 그 순간의 마찰력의 변화를 추적하는 연구들이 진행되었다[9-12]. 기존의 연구들은 금속이나 세라믹 등 재료 자체의 표면에서 발생하는 마모의 형상을 관찰하였다. 이에 반해, 박막 형태의 얇은 코팅에 대한 마찰 및 마모 특성을 실시간으로 가시화한 연구는 상대적으로 미비한 편이다.

본 연구에서는 SEM 내부에 설치한 트라이보 시험기를 이용하여, 얇은 박막 형태인 Ag 코팅의 마찰 및 마모 특성을 가시화하였다. 팁과의 접촉 미끄럼 운동의 반복 횟수에 따른 마모 진행 과정을 모니터링하고, 초기 마모 거동의 주요 메커니즘을 규명하고자 하였다.

2. 연구방법 및 내용

2-1. 코팅 시편 준비

플라즈마 현상을 이용한 스퍼터링 방식(RF-magnetron

sputtering)으로 실리콘 웨이퍼(Si wafer) 위에 은(Silver, Ag) 원자들을 증착하여 얇은 박막 형태의 코팅 시편들을 준비하였다. 모재 표면의 거칠기에 의한 영향을 최소화하고 Ag 코팅만의 특성을 평가하기 위해, 표면거칠기가 매우 낮고, 표면이 균일한 실리콘 웨이퍼를 모재로 활용하였다. 코팅 시편들의 두께는 수 백 nm 수준으로 최대 1 mm 이내로 형성하였다.

2-2. 실험 장치 준비

Fig. 1(a)와 같이 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM) 내부에 마이크로 스케일의 pin-on-disk 방식의 트라이보 시험기(Tribo-tester)를 장착하였다. 3축 스테이지에 하중센서(Load sensor)를 장착하고, 서스펜션 지그를 통해 센서와 다이아몬드 핀을 연결하였다. Fig. 1(b)와 같이 SEM 분석을 통해 다이아몬드 핀의 형상과 크기를 확인할 수 있다. 다이아몬드 핀의 끝단은 콘 형태이며, 콘 선단의 곡률반경은 3 μm 이다(Table 1). 핀-지그-센서-3축 스테이지가 연결된 시스템은 SEM 내부에 움직이지 않게 고정되었다. 3축 스테이지를 통해, 핀과 코팅 시편의 접촉 지점을 조절하고, 수직하중(Normal load)을 인가할 수 있다. 코팅 시편은 SEM 장치에 본래 장착되어 있는 스테이지에 부착하여 시계 방향으로 회전시킬 수 있다. 시편이 장착된 스테이지가 회전함에 따라 핀과의 접촉 부분에서 상대 미끄럼 운동

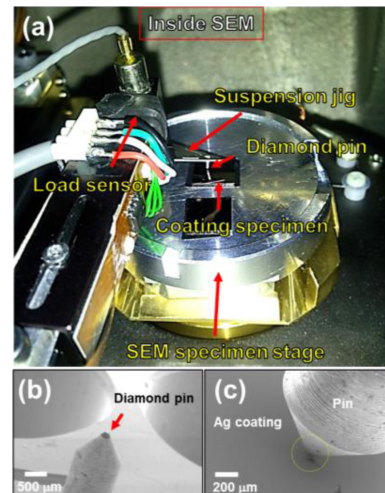


Fig. 1. Experimental set-up. (a) Photo image of Tribo-tester installed inside an SEM and (b,c) SEM images of (b) a diamond pin and (c) contact point between Ag coating and the pin.

Table 1. Material properties and experimental conditions[13-18]

Classification	Coating	Edge of Pin
Material	Silver	Diamond
Elastic modulus (E)	~80 GPa	~1,050 GPa
Poisson's ratio (ν)	0.37	0.1
Radius of curvature (r)	Plane	3 μm
Normal load (F)	20 mN	
Hertzian contact pressure [P]	15 GPa	
Radius of contact area [a]	1 μm	
Sliding speed (Rotating speed)	0.42 mm/s (2 rpm)	
Sliding (Rotating) cycle	5 cycles, 15 cycles	
Operating pressure of SEM	10~270 Pa	

을 유발시킨다. 핀과 코팅 사이에서 상대 미끄럼 운동에 의해 발생하는 마찰력을 센서를 통해 측정한다. 센서를 통해 측정된 데이터 신호를 외부로 전송하기 위한 전선들을 진공 실링 처리를 하여 SEM 내부의 저진공 수준(10~270 Pa)을 일반 작동 조건으로 맞출 수 있었다. SEM의 해상도, 명암, 밝기 등을 조절하고 적합한 비율로 확대하여 핀과 코팅의 접촉 부위를 가시화하였다(Fig. 1(c)).

2-3. 실험 조건

다이아몬드 핀을 Ag코팅 시편의 표면에 접촉시킨 후, 20 mN의 하중을 가하였다. 하중이 인가된 상태에서 시편이 장착된 스테이지를 2 rpm의 속도로 회전시켜 상대 미끄럼 운동을 유발시켰다. 이 때, 핀과 코팅의 접촉지점에서 스테이지 중심까지의 거리는 2 mm로써, 접촉지점에서의 선속도는 0.42 mm/s를 나타낸다. “Pin-on-disk 방식의 미끄럼 운동 동안 핀과 코팅 사이에서 발생하는 마찰력을 측정하면서 Ag코팅 표면에 형성되는 마모의 진행과정을 실시간으로 가시화하였다. 초기 5회 미끄럼 운동을 반복한 후, 접촉 지점을 이동하여 15회 미끄럼 운동을 진행하였다. 같은 실험조건 하에서 팁과 코팅표면 사이의 마모입자에 따른 마찰 및 마모 특성의 변화를 분석하고자 한다.

3. 결과 및 고찰

SEM 내부에 설치한 Tribo-tester의 다이아몬드 핀을 Ag 코팅 표면에 접촉시킨 상태에서 20 mN의 하중을 인

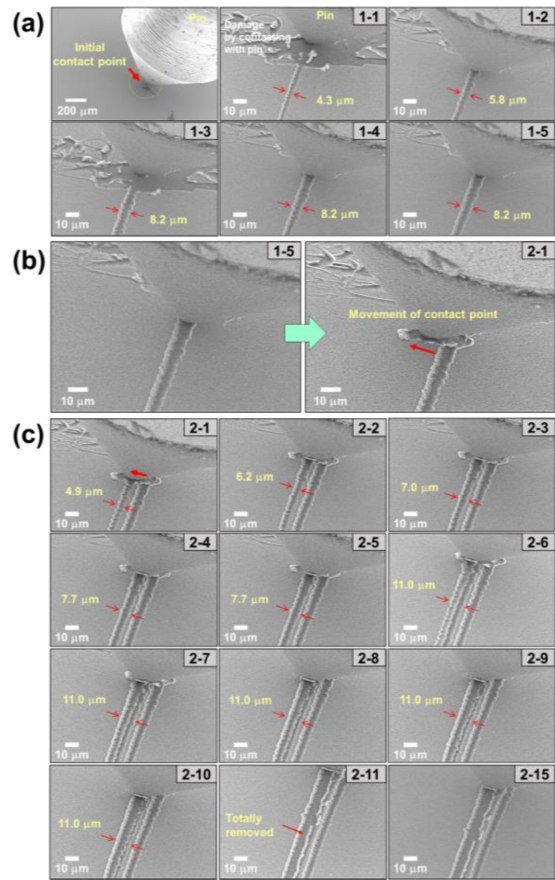


Fig. 2. SEM images of wear track according to the sliding cycles. (a) From an initial contact point to 5 cycles (1st step), (b) movement of contact point (1st step - 2nd step), (c) from 1 cycle to 15 cycles (2nd step) [Red arrows indicate the width of the wear track].

가하면, Hertzian contact theory에 의해 접촉압력은 15 GPa로 측정된다(Table 1)[13-18]. 이와 같이 접촉압력이 가해진 상태로 같은 접촉 지점에서 5회 회전 미끄럼 운동을 진행하였다(1단계). 이어서, 접촉 지점을 이동한 후 15회 회전 미끄럼 운동을 진행하였다(2단계). Fig. 2와 같이 서로 다른 접촉 지점에서 회전 미끄럼 운동 횟수를 달리하여 형성된 마모트랙을 SEM을 통해 분석하였다. 회전 미끄럼 운동의 반복 횟수를 1단계는 1-1, 1-2, 1-3, 1-4, 1-5로 표시하고, 2단계는 2-1, 2-2, 2-3, ... , 2-15로 표시하였다. 이와 같이, 미끄럼 운동 반복 횟수에 따른 마모 트랙의 형성 과정을 실시간으로 관찰하였다. Fig. 2(a)는 1단계 실험의 결과로써 Ag 코팅과 핀 사이의 접촉 상태와 5회 동안의 회전 미끄럼 운동에 의

한 마모 트랙을 가시화하였다.

초기 1회전 후 형성된 마모트랙(1-1)의 폭은 약 4.3 mm로 측정되었다. 2회전 후 형성된 마모트랙의 폭은 약 5.8 mm로 측정되어 35% 정도 증가하였다. 3회전 후 형성된 마모트랙의 폭은 약 8.2 mm로 약 41% 증가한 후, 이후에는 마모트랙의 폭이 더 이상 크게 증가하지 않고 비슷한 값을 유지하였다. 이와 같이, 회전 미끄럼 운동의 초기에 마모가 크게 발생한 이유는 핀과 코팅의 작은 접촉면적으로 인해 접촉압력이 크게 발생하기 때문인 것으로 판단된다. 미끄럼 운동 횟수가 증가함에 따라, 마모트랙의 크기가 커지고, 핀과 마모트랙의 접촉면적이 증가하면서 상대적으로 코팅 표면에서의 접촉압력이 줄어들어 마모 진행률이 저감되었을 것으로 예상된다. 또한, Ag 성분의 마모입자들의 윤회특성으로 인해 마모 진행 속도가 느려진 것으로 사료된다. 이어서, Fig. 2(b)와 같이, 핀을 이동시켜, 핀과 코팅의 접촉 지점을 변경하였다. 즉, 2단계 실험에서는 새로운 접촉 지점에서 미끄럼 운동을 총 15회 반복함으로써 코팅이 완전히 벗겨질 때까지 관찰하였다. 2-1에서 2-5까지 진행한 실험 결과, 마모트랙의 크기 변화는 급격히 증가하다가 정체되었다. 이 결과는 1단계 실험 결과와 매우 유사한 경향을 나타낸다. 2-6에서는 마모트랙의 폭이 다시 급격히 증가하였지만, 이후 2-10까지는 비슷한 크기를 유지하였다. 마모트랙의 크기에는 큰 변화가 없었지만, 2-11 이후에는 코팅이 완전히 벗겨진 것으로 판단된다. 2단계 실험을 통해, 본 연구에서 제작한 Ag코팅의 경우에는 11회 미끄럼 운동에 의해 완전히 파손되는 것을 확인하였다. 이처럼, Ag코팅은 핀에 의해 긁혀나가는 plowing-type 마모 메커니즘을 나타낸다[19]. 1단계 5회와 2단계 15회로 총 20회의 반복 미끄럼 운동 동안에 Ag 코팅이 마모됨에 따른 마찰계수의 변화를 Fig. 3과 같이 실시간으로 측정하였다. 전체적으로 0.1 이하의 낮은 값을 나타내었고, 미끄럼 운동 횟수에 따라 마찰계수의 값이 변화하는 것을 확인하였다. 각 미끄럼 운동 반복 횟수에 따라 증가와 감소를 반복하지만, 전체적으로는 감소하는 추세를 나타내고 있다.

Fig. 4와 같이 미끄럼 운동의 반복 횟수에 따라 마찰계수와 마모트랙의 SEM 분석 결과를 분류하여 마찰 및 마모 특성의 관계를 비교하였다. 먼저, Fig. 4(a)와 같이 1단계 미끄럼 운동인 1-1에서 1-5 사이의 마찰계수 변화를 보면, 초기 1-1과 1-2의 마찰계수가 상대적으로 높은 값을 나타낸다. 이것은 접촉 미끄럼 운동 초기에 높은 접촉압력에 의해 마모가 발생하면서 마찰계수가 크

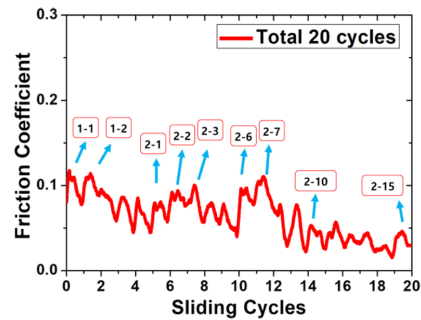


Fig. 3. Friction coefficient during the total sliding cycles [1st step : 1-1~1-5, 2nd Step : 2-1~2-15].

게 증가한 것으로 판단된다. 마모트랙이 형성된 이후에는 핀과의 접촉면적이 증가하여 코팅에 작용하는 접촉압력이 감소하기 때문에 마모의 발생 정도가 줄어들고 이에 따라 마찰력도 줄어든 것으로 예상된다. 또한, 코팅에서 마모되어 나오는 Ag입자들이 윤회작용을 함에 따라 마찰계수를 저감시키는 것으로 예상된다. 다음 2단계 미끄럼 운동에서는 핀과 코팅 표면의 접촉 지점이 이동했기 때문에 마모트랙이 아닌 새로운 코팅 표면에 핀이 접촉하여 다시 코팅에 작용하는 접촉압력이 증가하게 된다. Fig. 4(b)와 같이 2-1은 표면에 새로운 마모트랙이 생기면서 마찰계수가 증가하였다. 하지만, 1단계의 첫 미끄럼 운동인 1-1의 마찰계수보다 낮은 값을 나타낸다. 이것은 핀과 코팅 표면의 초기 접촉조건에 변화가 생겼기 때문이다. 즉, 1-1과는 달리, 2-1에서는 핀의 표면에 마모된 Ag입자들이 이착되었기 때문인 것으로 사료된다. Ag입자들이 윤회작용을 하여 초기 마찰계수가 상대적으로 낮아진 것이다. 1단계의 실험과 같은 조건에서 진행되었지만, 초기 접촉조건이 다르기 때문에 마찰 특성이 다르게 나타난 것을 확인하였다. 이것은 마이크로 가공공정에서 같은 팁으로 계속 작업을 할 경우, 마찰 특성이 변하기 때문에 정밀하게 가공을 하기 위해서는 팁의 클리닝 작업이 중요하다는 것을 의미한다. 다음으로 코팅의 마모가 진행됨에 따라 2-2에서는 마모트랙의 폭이 크게 증가(4.9 μm \rightarrow 6.2 μm)하고 마찰계수도 증가하였다. 또한, Fig. 4(c)와 같이 2-5와 2-6을 비교하면 마모트랙의 폭이 크게 증가함(7.7 μm \rightarrow 11.0 μm)에 따라 마찰계수도 역시 크게 증가한 것을 확인할 수 있다. 하지만, 2-7에서는 마모트랙의 폭에 큰 변화가 없고, 마찰계수가 감소하는 추세를 보인다. 이 역시, 마모로 인해 생겨난 Ag입자들이 윤회작용을 하여

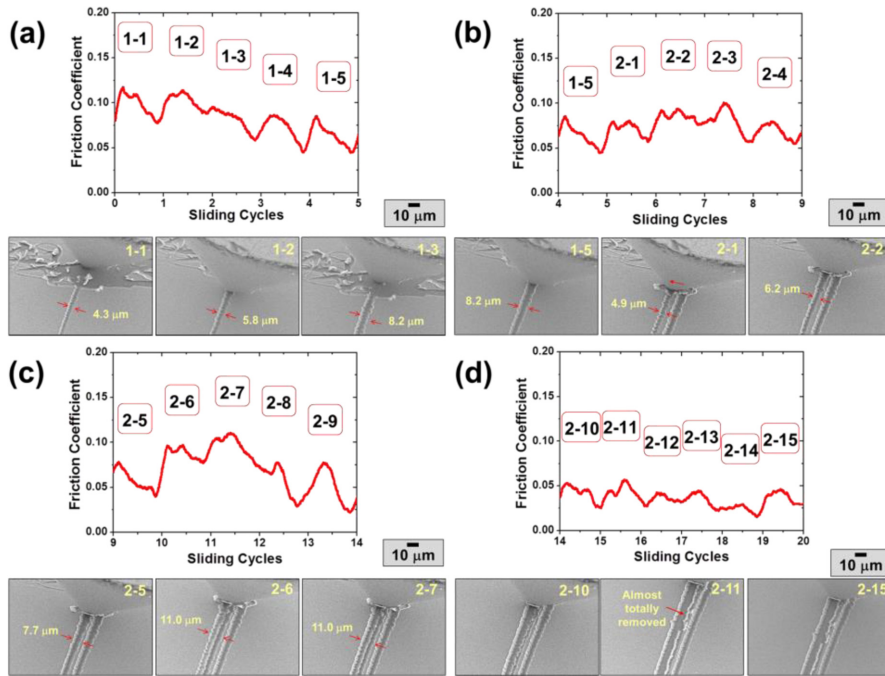


Fig. 4. Relationship between friction coefficient and wear track generation according to the sliding cycles. (a) From 1-1 to 1-5, (b) from 1-5 to 2-4, (c) from 2-5 to 2-9, (d) from 2-10 to 2-15 [Inset graph: friction coefficient of Si wafer during 3 cycles].

고, 넓어진 마모트랙으로 인해 접촉면적이 증가하여 접촉압력이 줄어들었기 때문인 것으로 사료된다. 마모트랙의 폭이 11.0 μm에서 더 이상 증가하지 않고, 마찰계수도 0.05 수준의 값으로 떨어진 이후에는 2-10에서 2-15까지 계속 비슷한 값을 유지하였다(Fig. 4(d)). 이와 같은 마찰계수는 코팅을 하지 않은 Si wafer 표면에 대해 같은 조건에서 미끄럼 운동을 진행했을 경우와 비슷한 값을 나타낸다. 이에 따라, Ag 코팅이 완전히 벗겨져서 모재로 사용한 Si wafer의 표면이 드러났을 것으로 예상된다. 이것은 Fig. 4(d)에서 2-11의 마모트랙을 보면 코팅이 완전히 벗겨진 것을 확인할 수 있다. Fig. 5는 2단계 2-15까지 미끄럼 운동을 진행한 후에 에너지분산형 분광분석법(Energy-dispersive X-ray spectroscopy, EDS)을 통해 마모트랙 내부를 분석한 결과를 나타낸다. 회전 미끄럼 운동에 의해 형성된 원형의 마모트랙에서 서로 반대인 두 지점에 대한 EDS 성분 분석 결과, 대부분 Si 원소가 검출되었고, 코팅 성분인 Ag 원소는 매우 소량 검출되었다. 이것은 SEM 이미지 분석에서 코팅이 완전히 벗겨졌다는 결과를 뒷받침해준다. 이와 같이, Ag 코팅에 대해 회전 미끄럼 운동을 진

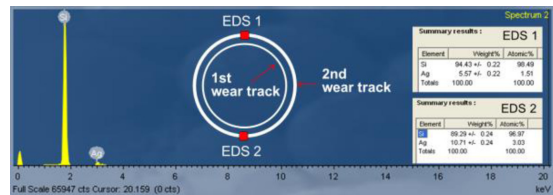


Fig. 5. EDS analysis of wear track after the total sliding cycles. Two parts(EDS 1 and EDS 2) of 2nd wear track were analyzed.

행하여 표면에서 발생하는 마모 거동을 실시간으로 가시화하고 그 순간의 마찰 특성을 비교하였다. Fig. 6과 같이 Ag 코팅의 마모 메커니즘을 간단한 모식도로 설명할 수 있다. 미끄럼 운동 초기에는 다이아몬드 핀이 Ag 코팅의 표면을 살짝 긁어낸 후, 반복적인 미끄럼 운동 동안에 점차적으로 코팅을 긁어내면서 코팅의 내부로 파고 들어간다. 이 과정에서 마찰력의 변화가 증가 추세를 보이다가 어느 지점부터는 감소 또는 정체되는 것을 확인하였다. 본 연구에서의 실험 조건에서는 콘 형태의 다이아몬드 핀과 Ag 코팅 사이에 수 mm² 정도의

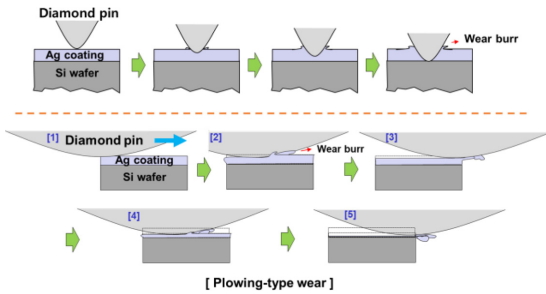


Fig. 6. Schematic design of wear mechanism of silver coating.

작은 접촉면적을 형성하며, 접촉된 상태에서 미끄럼 운동의 진행방향에 대해 핀의 앞부분에 마모입자들이 보이는 하지만, 전체적으로 주요 마모 메커니즘은 핀에 의해 코팅이 긁혀나가는 형태인 plowing-type 마모 현상으로 볼 수 있다[19]. 또한, 마모트랙의 주변에 솟아 오른 마모 흔적(wear burr)이 나타난 것을 확인할 수 있다. 이것은 Ag 코팅이 연성(ductile property)의 특성을 가지고 있기 때문에 나타날 수 있는 현상이다[15].

5. 결 론

본 연구에서는 금속 코팅의 마찰 및 마모 거동을 실시간으로 가시화하고 상관관계를 분석하였다. 금속 코팅은 스퍼터링 방식을 통해 Si wafer 위에 박막 형태로 Ag 코팅을 증착하였다. 실험은 SEM 장비 내부에 설치한 Tribo-tester를 이용하여 Ag 코팅 표면에 대해 다이아몬드 핀으로 회전 미끄럼 운동을 진행하였다. 1단계 5회 반복 미끄럼 운동에 대해, 초기에 마모트랙의 폭 증가율이 크고 마찰계수도 높게 측정되었지만, 후반부에는 마찰계수가 감소하고 마모트랙의 폭도 크게 늘어나지 않았다. 또한, 2단계에서 총 15회 반복 미끄럼 운동을 진행한 결과, 1단계와 비슷한 경향을 나타내었고, 10회 미끄럼 운동을 반복한 이후에 코팅이 완전히 벗겨지는 것을 확인하였다. 미끄럼 운동이 반복됨에 따라 코팅 표면에 마모트랙이 형성되고 마모가 진행됨에 따라 마찰계수가 변하는 것을 실시간으로 가시화 및 모니터링 할 수 있었다. 전체적으로 코팅이 점차적으로 긁혀나가는 마모 형태인 plowing-type 마모 메커니즘을 나타내었고, 소량의 마모입자와 wear burr가 발생한 것을 확인하였다. 본 연구의 결과는 박막 형태의 금속 코팅에 대한 마찰 및 마모 거동의 변화를 실시간으로 가시

화하고 그 상관관계를 설명했다는 점에서 관련 분야 연구에 유용하게 활용될 것이다.

Acknowledgements

이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2018R1C1B5085931과 No. 2010-0018289).

References

- [1] Zimmer, O., "Vacuum arc deposition by using a venetian blind particle filter", *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 200, No. 1-4, pp. 440-443, 2005.
- [2] Montemor, M. F., "Functional and smart coatings for corrosion protection: A review of recent advances", *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 258, pp. 17-37, 2014.
- [3] Grouchko, M., Kamyshny, A., Magdassi, S., "Formation of air-stable copper-silver core-shell nanoparticles for inkjet printing", *J. Mater. Chem.*, Vol. 19, No. 19, pp. 3057-3062, 2009.
- [4] Grouchko, M., Kamyshny, A., Magdassi, S., "Silver (Ag) as anode and cathode current collectors in high temperature planar solid oxide fuel cells", *Int. J. Hydrog. Energy*, Vol. 36, No. 1, pp. 779-786, 2011.
- [5] Sharma, M. K., Buchner, R. D., Scharmach, W. J., Papavassiliou, V., Swihart, M. T., "Creating conductive copper-silver bimetallic nanostructured coatings using a high temperature reducing jet aerosol reactor", *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 47, No. 8, pp. 858-866, 2013.
- [6] Song, J., Schinow, V., "Correlation between friction and wear properties and electrical performance of silver coated electrical connectors", *Wear*, Vol. 330-331, pp. 400-405, 2015.
- [7] Holmberg, K., Matthews, A., Ronkainen, H., "Coatings tribology-contact mechanisms and surface design", *Tribol. Int.*, Vol. 31, No. 1-3, pp.107-120, 1998.
- [8] Maillat, M., Chattopadhyay, A. K., Hintermann, H. E., "Preparation of silver coatings to obtain low friction in alternating sliding at 570?", *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 61, No. 1-3, pp. 25-29, 1993.
- [9] Penkov, O. V., Khadem, M., Nieto, A., Kim, T. H., Kim, D. E., "Design and construction of a micro-tribotester for precise in-situ wear measurements", *Micromachines*, Vol. 8, No. 4, pp. 103, 2017.
- [10] Kim, C. L., Penkov, O. V., Shin, D. G., Kim, D. E., "Investigation of micro-abrasion characteristics of thin metallic coatings by in-situ SEM scratch test", *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 17, No. 9, pp. 1139-1147, 2016.

- [11] Murarash, B., Varenberg, M., "Tribometer for in situ scanning electron microscopy of microstructured contacts", *Tribol. Lett.*, Vol. 41, No. 2, pp. 319-323, 2011.
- [12] Kato, K., "Micro-mechanisms of wear-wear modes", *Wear*, Vol. 153, No. 1, pp. 277-295, 1992.
- [13] Ghaednia, H., Pope, S. A., Jackson, R. L., Marghita, D. B., "A comprehensive study of the elasto-plastic contact of a sphere and a flat", *Tribol. Int.*, Vol. 93, pp. 78-90, 2016.
- [14] Afferrante, L., Carbone, G., and Demelio, G., "Interacting and coalescing Hertzian asperities: A new multiasperity contact model", *Wear*, Vol. 278-279, pp. 28-33, 2012.
- [15] Geng, X., Zhang, Z., Barthel, E., Dalmas, D., "Mechanical stability under sliding contact of thin silver film embedded in brittle multilayer", *Wear*, Vol. 276-277, pp. 111-120, 2012.
- [16] Greaves, G. N., Greer, A. L., Lakes, R. S., Rouxel, T., "Poisson's ratio and modern materials", *Nat. Mater.*, Vol. 10, No. 11, pp. 823-837, 2011.
- [17] Bayram, B., Akar, O., and Akin, T., "Plasma-activated direct bonding of diamond-on-insulator wafers to thermal oxide grown silicon wafers", *Diam. Relat. Mat.*, Vol. 19, No. 11, pp. 1431-1435, 2010.
- [18] Sakharova, N. A., Fernandes, J. V., Oliveira, M. C., Antunes, J. M., "Influence of ductile interlayers on mechanical behaviour of hard coatings under depth-sensing indentation: A numerical study on TiAlN", *J. Mater. Sci.*, Vol. 45, No. 14, pp. 3812-3823, 2010.
- [19] Kim, D. E., Kim, C. L., Kim, H. J., "A novel approach to wear reduction of micro-components by synthesis of carbon nanotube-silver composite coating", *CIRP Ann-Manuf. Technol.*, Vol. 60, No. 1, pp. 599-602, 2011.