

대기압/진공 조건의 트라이보 시험기를 이용한 박막 코팅의 마찰/마모 특성 비교

김해진¹ · 김대은² · 김창래^{3*}

¹경상대학교 기계항공공학부 조교수

²연세대학교 기계공학과 교수

³조선대학교 기계공학과 조교수

Comparison of Friction and Wear Characteristics of Thin Film Coatings Using Tribotesters at Atmospheric/Vacuum Conditions

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

¹Assistant Professor, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University

²Professor, Dept. of Mechanical Engineering, Yonsei University

³Assistant Professor, Dept. of Mechanical Engineering, Chosun University

(Received November 18, 2019 ; Revised December 7, 2019 ; Accepted December 7, 2019)

Abstract – In various industries, thin film coatings are used to improve friction and wear characteristics. Various types of tribotesters are used to evaluate the friction and wear characteristics of such thin film coatings. In this study, we fabricated a micro-tribotester and Tribo-scanning electron microscopy (SEM) to compare the friction and wear characteristics of copper (Cu) coatings under an atmospheric pressure and a vacuum condition, respectively. The reliability of the different types of tribotesters was evaluated by performing calibrations for the sensor to measure the friction forces and normal loads. Using the two different types of devices, the friction and wear tests are conducted at the same experimental conditions excluding environment conditions such as the atmospheric pressure and vacuum condition. The friction coefficient at the vacuum condition is lower than at the atmospheric pressure. This difference in friction characteristics is due to the fact that wear phenomena occur differently according to the atmospheric pressure and vacuum condition. At the atmospheric pressure, the abrasive wear is the main wear mechanism. At the vacuum condition, the adhesive wear is the main wear mechanism. The reason for the difference in the wear mechanism of the Cu coating at the atmospheric pressure and the vacuum condition is that the oxidation phenomenon, which does not appear at the vacuum condition, occurs at the atmospheric pressure; therefore, the characteristics of the Cu coating change accordingly.



© Korean Tribology Society 2019. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License(CC BY, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction of the work in any medium, provided the original authors and source are properly cited.

Keywords –atmospheric pressure(대기압), coating(코팅), friction(마찰), vacuum(진공), wear(마모)

Nomenclature

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

F_N : Normal load (mN) (수직하중)
 F_F : Friction force (mN) (마찰력)
 d : Vertical displacement (μm) (수직방향 변위)

- V : Voltage value (mV) (전압 값)
 k : Stiffness (mN/ μ m) (강성)
 k' : Friction-voltage calibration value (mN/mV)
 (마찰력-전압 calibration 값)

1. 서 론

다양한 기계 장치 및 시스템의 접촉 부위에서 발생하는 마모를 방지하기 위해 박막 코팅이 이용되고 있다. 주로 내마모성이 우수한 재료의 코팅이나 윤활 특성이 우수하여 마찰력을 줄여줄 수 있는 소재들이 활용된다[1,2]. 이처럼, 금속, 합금, 세라믹 및 나노 기능성 소재 등 다양한 소재들을 이용한 표면 보호에 관한 연구들이 많이 진행되고 있다[3-5].

코팅의 마찰/마모 특성을 평가하는 실험 방법은 각 적용 분야에 맞게 특수 장비를 이용하기도 하지만, 보통 상대 팁과 접촉 후에 일정 하중을 가해준 다음, 왕복 또는 회전운동 방식의 상대 미끄럼운동을 유발시키는 tribotester를 이용한다[6,7]. 즉, 상대 미끄럼운동에 의해 발생하는 마찰력을 측정하고, 코팅 표면에 형성된 마모의 정도를 분석한다. 주로, 마찰력은 실험이 진행되는 동안 실시간으로 측정을 하고, 마모량과 마모형상에 대한 분석은 실험이 종료된 후에 진행이 된다. 이에 따라, 마찰력의 변화 경향에 대한 분석과 최종 마모 형상을 통한 마모 메커니즘의 분석에는 한계가 있다.

코팅의 마찰/마모 특성 분석의 문제를 해결하기 위해 다양한 방법들이 시도되었다. 먼저, 일정 주기로 마찰/마모 실험을 중단하며 마모량과 마모형상을 분석한 뒤, 연속해서 같은 조건에서 실험을 계속 진행하는 방법이 활용되었다. 이러한 방법으로는 마모의 진행 과정을 부분적으로 관찰할 수 있지만, 마찰력 변화와 마모 경향의 연관성을 분석하기에는 한계가 있다. 특히, 실험을 멈추고, 마모 형상을 관찰하는 과정에서 시편이 오염되거나 상대 팁과 시편의 접촉 지점이 달라지기 때문에 마찰/마모 특성에 영향을 주게 된다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 tribotester를 현미경 내에 설치하여 실시간으로 마찰/마모 경향을 분석한 연구들이 진행되었다[8-10]. 광학현미경(Optical Microscopy)을 이용하여 실시간으로 마찰력을 측정하고 마모의 형상을 관찰할 수 있다[8]. 하지만, 미세 마모 입자나 국부적인 마모 스크래치를 관찰하기 어렵고, 투명하거나 반사도가 높은 코팅은 측정이 불가능하다. 따라서, 전자빔 주사방식으로 표면 형상을 관찰할 수 있는 주사전자현미경(Scanning Electron Microscopy, SEM) 내에 tribotester

(Tribo-SEM)를 설치하여 미세 마찰/마모 현상을 분석한 연구들이 보고되었다[9-12]. 실시간으로 마찰력이 변화하는 순간의 마모 특성을 가시화할 수 있고, 마이크로 스케일의 마모입자와 스크래치들을 관찰할 수 있다.

이처럼, Tribo-SEM을 이용하여 마이크로 스케일의 마찰/마모 현상을 실시간으로 가시화할 수 있고, 그 연관성을 분석할 수 있는 실험방법이 개발되었지만, 진공상태인 SEM 내부 환경조건에 관하여 고찰한 결과는 상대적으로 미흡한 실정이다. 트라이볼로지 현상들은 접촉압력, 미끄럼 속도, 재질 및 표면상태 등 실험조건뿐만 아니라 주변 온도, 습도 및 압력 등 환경적인 요인에 의해 영향을 받는다[13-15]. 주변 환경 요인 중 압력 조건은 대기압 및 진공 상태로 크게 분류할 수 있다. 대부분의 연구들은 대기압 상태에서 진행이 되고, 일반 산업분야에 그대로 적용시킬 수 있다. 하지만, 우주, 항공 및 진공이 필요한 산업 분야에서는 해당 분야의 진공 조건에 맞춰 실험이 이루어져야 한다. 이에 따라, 진공상태인 Tribo-SEM을 이용하는 것은 우주, 항공 및 특수 진공 상태의 응용분야에 맞춰진 실험 조건인 것이다.

진공 상태는 대기압 상태보다 압력이 낮을 뿐만 아니라 산소 및 수분 정도도 매우 미미하다. 대기압/진공 조건에서 압력의 차이로 인해 주변에 존재하는 산소 및 수분의 정도에 큰 차이가 발생한다. 즉, 대기압 환경에서는 공기 중에 산소 및 수분이 존재하지만, 진공 환경에서는 존재하지 않거나 매우 미미한 정도를 유지한다. 이와 같이 대기압/진공 조건에 따른 산소 및 수분의 차이가 코팅 재료의 특성에 영향을 미치게 된다. 이와 같이, 주변 환경(압력, 산소 및 수분)에 따른 코팅의 마찰/마모 특성을 이해하여 관련 분야에 적절하게 응용되어야 할 것이다. 따라서, 본 연구에서는 산소 및 수분에 반응이 잘 되는 구리(copper, Cu) 코팅에 대하여 대기압/진공 조건에 따른 마찰/마모 특성을 평가하였다.

2. 연구방법 및 내용

2-1. 실험장치

Fig. 1은 3축 마이크로 스테이지, 하중센서 및 회전 스테이지 등을 이용하여 설계된 회전운동 방식의 Micro-Tribotester를 보여준다. 3축 마이크로 스테이지의 x-y축은 tip과 시편의 접촉지점을 조절하고, z축은 상하 수직 방향으로 움직이며 수직하중을 조절한다. 마이크로 스테이지 z축에 마찰력을 측정할 수 있는 하중센서가 장착되어 있고, 센서의 cantilever에는 suspension-tip이 부착되어 있다. Tip끝단은 다이아몬드 재질이며 직경이 6 μ m

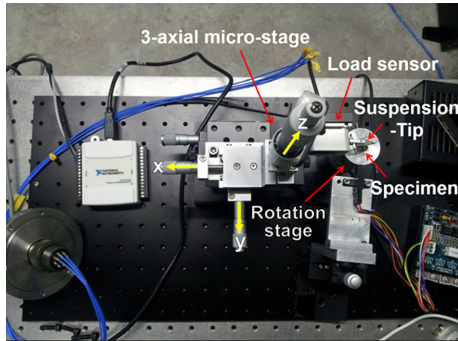


Fig. 1. Micro-Tribotester for friction/wear testing at atmospheric pressure condition.

이다. 센서부는 고정되어 있고, 시편이 놓이는 원형 지그가 모터에 연결되어 회전하도록 설치되었다. 센서의 신호는 데이터 수집 장치(Data Acquisition, DAQ board)를 통해 컴퓨터로 연결이 되어 실시간으로 마찰력 데이터를 저장할 수 있고, 회전 운동의 속도를 조절할 수 있는 컨트롤러가 모터에 연결되어 실험 조건을 설정할 수 있도록 하였다.

Fig. 2는 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM) 내부에 설치된 Tribo-SEM을 나타낸다. 본 연구를 위해 제작한 Micro-Tribotester와 같은 하중센서와 tip을 사용하였다. Fig. 2(a)는 SEM chamber 내부에 설치된 tribotester와 amplifier 및 SEM 장치 전체 모습을 보여준다. SEM chamber 외부 오른쪽에는 외부로 전선을 연결할 수 있는 vacuum plug가 설치되어 있다. 이 vacuum plug는 SEM 내/외부의 센서와 amplifier를 연결시켜주는 역할을 한다. SEM 내부는 작동 중에 진공상태이기 때문에 SEM 내부에서 측정되는 마찰력 데이터 신호를 외부로 전달하기 위해서는 이와 같은 별도의 vacuum plug가 필요하다. 이 vacuum plug는 전선 연결부가 vacuum sealing되어 있어, SEM 내부의 진공도를 유지하면서 SEM 내/외부의 전기장치를 연결시켜준다. Fig. 2(b)는 SEM에서 분리된 상태의 vacuum plug를 나타낸다. SEM chamber 내부에는 Fig. 2(c)와 같이 수직방향으로 이동이 가능한 스테이지에 하중센서와 suspension-tip이 연결되어 있고, SEM 장치에 장착된 회전 스테이지에 시편을 올려놓을 원형 지그가 설치되어 있다. Fig. 2(d)는 실험에 사용된 tip의 SEM 사진이다.

2-2. 수직하중 calibration

Fig. 3은 수직하중을 인가해 주는 방법과 calibration 결과를 나타낸다. Fig. 3(a)와 같이 1gf 이하의 미세한 하

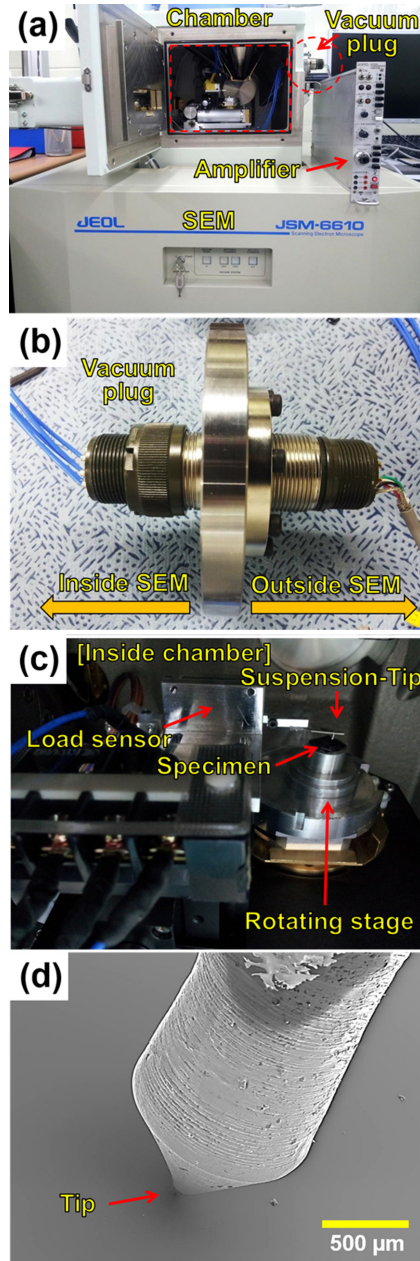


Fig. 2. Tribo-SEM for friction/wear testing at vacuum condition. (a) Outside SEM chamber and amplifier, (b) Vacuum plug, (c) Inside chamber: load sensor, suspension-tip, specimen and rotating stage, (d) SEM image of a tip.

중을 측정할 수 있는 전자 저울(electronic scale) 위에 suspension-tip을 접촉시킨 후, 마이크로 스테이지를 이용하여 수직방향으로 suspension-tip을 이동시킨다. Fig. 3(b)와 같이, 이동시킨 수직방향 변위에 따른 전자 저울

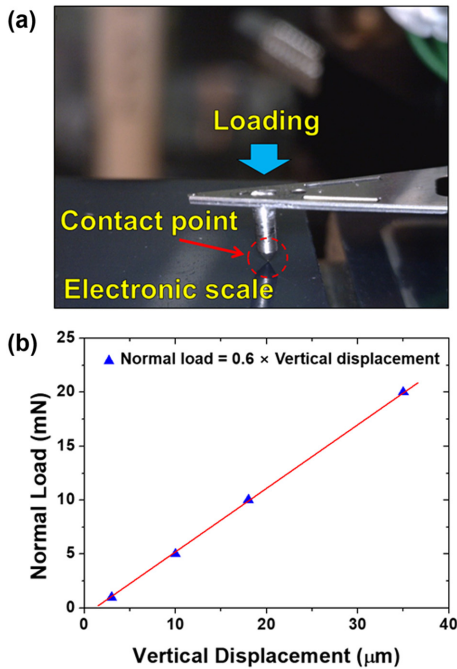


Fig. 3. Calibration of normal load according to vertical displacement. (a) Loading on an electronic scale with suspension-tip, (b) Relation between normal load and vertical displacement: The resulting equation obtained by the electronic scale is (Normal load = 0.6 × Vertical displacement).

에 표시되는 수직하중의 변화를 확인할 수 있다. 수직하중과 수직방향 변위의 관계는 아래의 수식으로 정리된다. 여기서, F_N 은 수직하중(Normal load), d 는 수직방향 변위(Vertical displacement)를 나타낸다. 이 수식에서 k 는 그래프의 기울기에 해당하며 suspension의 강성(stiffness)을 의미한다. 본 실험에 사용된 suspension-tip의 강성은 0.6 mN/ μ m임을 알 수 있다.

$$F_N = k \times d \tag{1}$$

수직하중-수직방향 변위의 관계가 비례하는 결과로부터 하중-변위 calibration에 문제가 없음을 확인하였다.

2-3. 마찰력 calibration

마찰력을 측정할 하중센서에 대한 calibration을 진행하였다. Fig. 4와 같이 하중센서의 측정 방향으로 힘이 작용하도록 suspension-tip 사이에 무게 추를 매달고, 이때 측정되는 전압 값(voltage value)을 기록하였다. 여러 무게의 추들을 순차적으로 매달면서 각각의 추에 대한

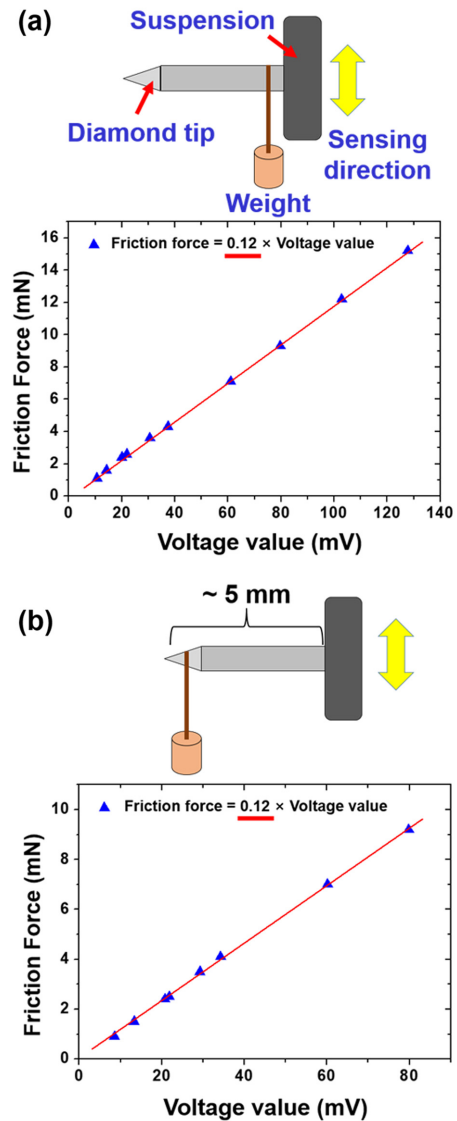


Fig. 4. Calibration of friction force according to the voltage value. (a) Hanging the weight near the suspension, (b) Hanging the weight at the end of the tip: The resulting equation obtained by the load sensor is (Friction force = 0.12 × Voltage value).

전압 값의 변화를 측정하였다. Suspension-tip에 매달리는 추의 위치에 따라 전압 값이 달라지는지를 확인하기 위해, Fig. 4(a)와 같이 무게 추를 suspension 가까운 부분에 매달은 경우와 Fig. 4(b)와 같이 tip의 끝단에 매달은 경우로 구분하여 calibration을 진행하였다. Tip 부분의 길이가 5 mm로써, 매달리는 추의 위치 차이는 5 mm 이내인 것으로 사료된다. 각각의 사용된 추의 무게는 마

찰 실험에서 측정되는 마찰력의 크기를 의미한다. 따라서, calibration을 통해 측정된 전압 값에 따른 마찰력 값의 관계를 알 수 있다. Fig. 4(a)와 (b)의 그래프에서 볼 수 있듯이, 무게 추가 매달리는 위치에 관계없이 마찰력-전압의 관계는 모두 선형적으로 나타났으며 일정한 기울기를 나타낸다. 이와 같은 마찰력 calibration 과정을 통해 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$F_f = k' \times V \quad (2)$$

여기서, F_f 는 마찰력(Friction force), V 는 센서를 통해 측정되는 전압 값(Voltage value), k' 는 그래프의 기울기에 해당하며 마찰력-voltage calibration 값을 의미한다. 본 실험에 사용된 하중센서의 calibration 값은 0.12 mN/mV임을 알 수 있다. 이 값을 마찰실험에서 하중센서를 통해 측정되는 전압 값에 곱해주면 힘의 단위인 마찰력을 구할 수 있는 것이다.

2-4. 실험 조건

스퍼터(Sputter) 장비를 이용하여 표면이 매끈한 실리콘(Si) 웨이퍼에 수 십 μm 두께의 구리(Cu) 코팅을 형성하였다. Cu 코팅 시편의 표면에 지름이 6 μm 인 다이아몬드 재질의 tip을 접촉한 후, 19.6 mN의 수직하중을 가하면, 약 19 GPa의 Hertzian contact pressure가 발생한다[16-18]. 이러한 접촉 조건에서 1 mm/s의 속도로 회전 미끄럼 운동을 60회 진행하였다. 이와 같은 실험 조건에서 대기압 상태는 Micro-Tribotester를, 진공(10~270 Pa) 상태는 Tribo-SEM을 이용하여 각각 실험을 진행하였다. 즉, 주변 압력상태 조건만 달리하고, 다른 실험조건들은 동일하게 유지하였다. 또한, 실험 종료 후 마모된 표면을 SEM으로 분석하였다. 같은 조건에서 3번 이상 반복 실험을 진행하였다. 마찰계수 데이터는 초당 100개를 수집하여 데이터 정리(data reduction)를 통해 최적선(line of best fit)으로 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 5는 회전 미끄럼 운동의 횟수에 따른 마찰계수의 변화를 나타낸다. 모든 실험에서 유사한 마찰계수의 변화를 나타내었으며, SEM 내부에 설치된 Tribo-SEM 장치를 통해 측정된 마찰계수가 SEM 외부에서 Micro-Tribotester를 이용해 측정된 마찰계수보다 낮은 값을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 미끄럼 운동 초기에는 두 가지 압력 조건에서 유사한 마찰계수를 유지하지만, 미

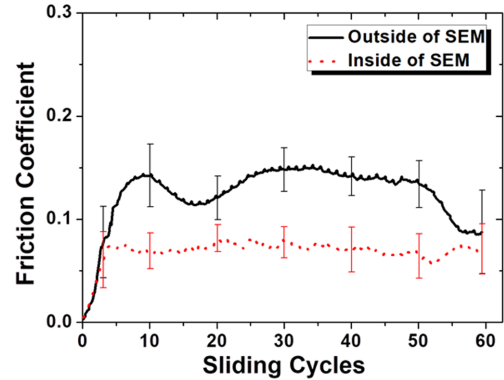


Fig. 5. Variation of friction coefficients under atmospheric pressure [black solid line] and vacuum [red dotted line] conditions according to sliding cycles.

끄럼 횟수가 증가함에 따라 마찰계수의 값에 차이가 생겼다. 전체 미끄럼 횟수에 대한 마찰계수의 값은 약 2배 정도 차이가 난다. 다른 실험조건들을 모두 같게 하였기 때문에 마찰 특성의 차이는 대기압/진공 조건에 의한 것으로 판단된다. Tribo-SEM 장치를 통해 진공 환경에서 실시한 실험에서는 5 cycles 이후에 마찰계수가 더 이상 크게 증가하지 않고 일정한 값을 유지하며 작은 진폭으로 오르내리는 것을 볼 수 있다. 반면, 대기압 환경에서 Micro-Tribotester를 이용한 경우에는 10 cycles 정도까지만 계속 마찰계수가 증가하다가 상대적으로 큰 폭으로 오르내리는 변화를 나타내었다. 회전 미끄럼 운동 횟수가 적을 때는 Cu 코팅의 마모 정도가 작기 때문에 유사한 마찰계수를 나타내지만, 회전 미끄럼 운동 횟수가 많아짐에 따라 마모가 크게 발생하면서 마찰계수의 차이를 유발시킨 것으로 사료된다. 또한, Micro-Tribotester를 이용하여 회전 미끄럼 운동을 60 cycles 정도 반복했을 때, 마찰계수의 값이 소폭 감소하는 경향을 나타낸다. 이러한 결과는 Cu 코팅이 파손되고 마모 입자들이 많이 발생했기 때문인 것으로 예상된다. 즉, 코팅이 벗겨지면서 tip이 Si wafer 표면과 부분적으로 접촉하기 시작하며, 마모 입자들의 양이 증가하면서 구름운동이 발생하여 마찰계수가 감소했을 것으로 추측된다. 이 부분에 대한 명확한 증명을 위해서는 추가적인 실험과 고찰이 필요할 것으로 사료된다. Fig. 6은 회전 미끄럼 운동에 의한 마찰 실험 후 Cu 표면에 형성된 마모 트랙의 SEM 분석 결과를 나타낸다. 대기압/진공 환경에 따라 매우 다른 형태의 마모 흔적이 발생되었으며, 각각의 조건에서 실시한 모든 실험에서 유사한 형태의 마모 형상을 나타내었다. Fig. 6(a)는 대기압 환경에서 진행된 마찰 실험의 결과로

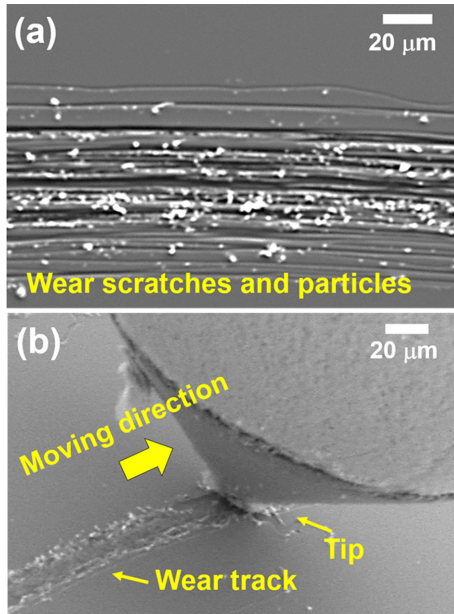


Fig. 6. SEM images of wear tracks generated under (a) atmospheric pressure and (b) vacuum conditions.

생긴 마모 트랙을 나타낸다. 마모 트랙의 내부에는 미세하게 굽힌 흔적(scratch)들이 보이며 마모 트랙 위에는 수많은 마모입자(wear particle)들이 발생되어 남아있다. 즉, tip과 코팅 사이에서 cutting 또는 fragmentation 현상에 의해 마모입자들이 발생하였고, 이것은 연삭 마모(abrasive wear) 메커니즘을 의미한다[19]. 마모입자의 크기는 미세하게 굽힌 흔적의 폭과 유사함을 알 수 있다. 즉, 마모 트랙 내의 굽힌 흔적은 plowing 마모 현상과 같이 마모 입자들에 의해 굽힌 것으로 사료된다[20]. Fig. 6(b)는 진공 환경에서 진행된 마찰 실험 후 생긴 마모 트랙의 SEM 분석 결과이다. 대기압 환경에서의 결과와 달리, 진공 환경에서는 마모 트랙 내부에 미세하게 굽힌 흔적과 마모입자들이 보이지 않는다. 이처럼 다른 실험 조건들은 모두 같은 상황에서 주변 압력 상태 조건만을 달리하여 수행한 마찰 실험들의 마모 결과에 큰 차이가 있음을 확인하였다. 이와 같이 대기압/진공 조건에 따른 마모 특성의 차이로부터 마찰 특성의 차이를 설명할 수 있다.

대기압 조건에서의 마찰 실험 결과로 많은 마모 입자들이 발생하였고, 이러한 마모입자들이 Cu 표면을 긁으면서 마찰계수의 증가를 유발한 것이다. 이와 달리, 진공 조건에서는 마모 입자들로 인해 Cu 표면을 긁어 내는 plowing 마모 현상이 발생하지 않았기 때문에 상대적으로 낮은 마찰계수를 나타낸 것이다. 이처럼, Cu 코팅 표면에 발생한 마모 특성의 차이로 인해, 마찰 특성의 차

이점을 설명할 수 있지만, 근본적으로 대기압/진공 조건에 따라 마모 특성에 차이가 나는 원인을 파악할 필요가 있다. 특히, 마모 입자의 발생 여부가 달라진 이유에 대한 고찰이 필요하다. Cu 코팅의 표면 상부가 초기 접촉에 의해 파손되면서 표면 하부의 순수 Cu 부분이 노출되게 된다. 이 때, 대기압 환경에서 진행된 실험의 경우, 노출된 순수 Cu 부분이 공기 중의 산소 및 수분들과 반응하여 산화가 진행된다. 산화된 Cu 부분은 취성(brittleness)이 강해지기 때문에 tip과의 미끄럼 접촉에 의해 작은 입자들을 유발시키는 것으로 사료된다. 이에 반해, 진공 환경에서는 산소와 수분이 차단되어 노출된 Cu 부분이 산화되지 않고 연성(ductility) 특성을 유지하여 미세한 마모 입자들이 발생하지 않고, 짓눌린 마모 흔적과 뜯겨진 마모 흔적이 나타나는 것이다. 즉, 응착 마모(adhesive wear) 현상을 의미한다[21]. 이와 같이, 대기압/진공 조건에 따라 Cu 코팅의 마찰/마모 특성에 차이가 발생하는 이유는 산화 현상의 유무인 것이다. 즉, 표면이 마모되어 드러나는 내부의 순수 Cu 부분이 대기압 조건에서는 산소 및 수분과 접촉하여 산화되고, 진공 조건에서는 산소 및 수분이 차단되어 산화되지 않기 때문에, 이후 발생하는 마모의 메커니즘이 달라지는 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 대기압/진공 환경에 따른 Cu 코팅의 마찰 및 마모 특성을 비교하기 위하여 트라이보 시험기를 제작하였다. 대기압 조건에서의 마찰/마모 특성 평가를 위한 Micro-Tribotester와 진공 조건에서의 실험을 위한 Tribo-SEM 장치를 제작하고 calibration을 수행하여 실험 장치의 신뢰성을 평가하였다. 두 가지 장치들을 이용하여 Cu 코팅의 마찰/마모 실험을 수행하였다. 대기압 조건보다 진공 조건에서 실시한 경우의 마찰계수가 2배 정도 낮게 측정이 되었다. 두 조건에서의 마찰 특성의 차이는 마모 현상으로부터 기인한다. 대기압 조건에서는 Cu 코팅 표면이 손상되는 초기 마모 순간부터 산화가 진행되어 취성 특성이 생기며, 대표적인 마모 메커니즘은 연삭 마모와 plowing 마모 현상이 발생했다. 진공 조건에서는 Cu가 산화되지 않아 본연의 연성 특성을 유지하여 응착 마모 현상이 주요 마모 메커니즘으로 나타났다. 이러한 마모 메커니즘의 차이로 인해 마찰 특성에 차이가 발생한 것으로 판단된다. 본 연구의 결과는 주변 압력 환경 조건에 따라 박막 코팅의 마찰/마모 특성이 달라진다는 것을 규명했다는 점에서 관련 산업 분야에 도움이 될 것이다.

Acknowledgements

이 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2018R1C1B5085931과 No. 2019R1C1C1004104).

References

- [1] Bae, S. M., Khadem, M., Seo, K. J., Kim, D. E., "Evaluation of Tribological Characteristics of Diamond-Like Carbon (DLC) Coated Plastic Gear", *Tribol. Lubr.*, Vol.35, No.1, pp.1-8, 2019.
- [2] Zhang, J., Li, S., Lu, C., Sun, C., Pu, S., Xue, Q., Lin, Y., Huang, M., "Anti-Wear Titanium Carbide Coating on Low-Carbon Steel by Thermo-Reactive Diffusion", *Surf. Coat. Technol.*, Vol.364, pp.265-272, 2019.
- [3] Dhandapani, V. S., Kang, K. M., Seo, K. J., Kim, C. L., Kim, D. E., "Enhancement of Tribological Properties of DLC by Incorporation of Amorphous Titanium Using Magnetron Sputtering Process", *Ceram. Int.*, Vol.45, No.9, pp.11971-11981, 2019.
- [4] 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, pp.559 - 602, 2011.
- [5] Choe, S. Y., Nemati, N., Kim, D. E., "A Study on Wear Properties of Alloys in High Temperature Condition", *Tribol. Lubr.*, Vol.35, No.1, pp.24-29, 2019.
- [6] Kato, S., Sasaki, S., "Effects of Hydraulic Oil and Lubricant Additives on Dynamic Friction Properties Under Various Reciprocating Sliding Conditions", *Friction*, 2019, <https://doi.org/10.1007/s40544-019-0296-0>.
- [7] Kennedy, F. E., Lu, Y., Baker, I., "Contact Temperatures and Their Influence on Wear During Pin-on-disk Tribotesting", *Tribol. Int.*, Vol.82, Part B, pp.534-542, 2019.
- [8] 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.
- [9] Kim, H. J., Kim, D. E., Kim, C. L., "Real Time Analysis of Friction/Wear Characteristics of Metal Coatings with a Tribo-tester Installed in an SEM", *Tribol. Lubr.*, Vol.34, No.6, pp.318-324, 2018.
- [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] Heinrichs, J., Olsson, M., Jenei, I. Z., Jacobson, S., "Transfer of Titanium in Sliding Contacts-New Discoveries and Insights Revealed by in Situ Studies in the SEM", *Wear*, Vol.315, No.1, pp.87-94, 2014.
- [12] Ovaert, T. C., Ramachandra, T. C., McQuay, G. N., "Friction Studies of Coated and Uncoated Cemented Carbide in Controlled Environment", *Tribol. Lubr.*, Vol.11, No.5, pp.66-70, 1995.
- [13] Ding, H. H., He, C. G., Ma, L., Guo, J., Liu, Q. Y., Wang, W. J., "Wear Mapping and Transitions in Wheel and Rail Materials Under Different Contact Pressure and Sliding Velocity Conditions", *Wear*, Vol.352-353, pp.1-8, 2016.
- [14] Shabani M., Abreu C. S., Gomes J. R., Silva R. F., Oliveira F. J., "Effect of Relative Humidity and Temperature on the Tribology of Multilayer Micro/Nanocrystalline CVD Diamond Coatings", *Diam. Relat. Mat.*, Vol.73, pp.190-198, 2017.
- [15] Song, F., Yang, Z., Zhao, G., Wang, Q., Zhang, X., Wang, T., "Tribological Performance of Filled PTFE-Based Friction Material for Ultrasonic Motor Under Different Temperature and Vacuum Degrees", *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol.134, No.39, pp.45358, 2017, <https://doi.org/10.1002/app.45358>
- [16] Zhao, J. H., Du, Y., Morgen, M., Ho, P. S., "Simultaneous Measurement of Young's Modulus, Poisson Ratio, and Coefficient of Thermal Expansion of Thin Films on Substrates", *J. Appl. Phys.*, Vol.87, No.3, pp.1575-1577, 2000.
- [17] Field, J. E., "The Mechanical and Strength Properties of Diamond", *Rep. Prog. Phys.*, Vol.75, No.12, pp.126505, 2012.
- [18] Afferrante, L., Carbone, G., Demelio, G., "Interacting and Coalescing Hertzian Asperities: A New Multiasperity Contact Model", *Wear*, Vol.278-279, pp.28-33, 2012.
- [19] Tjong, S. C., Lau, K. C., "Abrasive Wear Behavior of TiB₂ Particle-Reinforced Copper Matrix Composites", *Mater. Sci. Eng. A-Struct. Mater. Prop. Microstruct. Process.*, Vol.282, No.1-2, pp.183-186, 2000.
- [20] Bhushan, B., Nosonovsky, M., "Comprehensive Model for Scale Effects in Friction Due to Adhesion and Two- and Three-Body Deformation (Plowing)", *Acta Mater.*, Vol.52, No.8, pp.2461-2474, 2004.
- [21] Tang, Y., Liu, H., Zhao, H., Liu, L., Wu, Y., "Friction and Wear Properties of Copper Matrix Composites Reinforced with Short Carbon Fibers", *Mater. Des.*, Vol.29, No.1, pp.257-261, 2008.