

나노 CuO입자로 충전된 PTFE 나노복합소재의 저속 및 하중 조건에서의 트라이볼로지 특성에 관한 연구

조민행^{1*} · 김정환²

¹중앙대학교 기계공학부 교수

²중앙대학교 대학원 기계공학과 석사과정생

A Study on the Tribological Characteristics of PTFE Composites-filled with Nano CuO Particles Under a Slow Sliding Speed and Low Load Condition

Minhaeng Cho^{1*} and Junghwan Kim²

¹Professor, School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

²Graduate Student, Dept. of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

(Received June 28, 2023; Revised June 30, 2023 ; Accepted June 30, 2023)

Abstract – This paper presents an experimental investigation of the tribological characteristics of PTFE composites filled with nano CuO particles under low sliding speed and load. All the specimens were prepared by sintering. Before sintering, the mixture of PTFE powder and CuO particles were mixed by a high-speed mixer using CuO volume fractions of 0.2 vol. % and 5 vol. %. Each mixture was sintered at 350 °C for 30 min on the steel disk. We conducted ball-on-disk sliding test an hour using a steel ball against PTFE composites, including pure PTFE. The load and sliding speed used was 2 N and 0.01 m/s, respectively. Adding nano CuO particles increases the friction coefficient because of the abrasiveness of hard nano CuO particles. The highest coefficient of frictions was obtained from 5 vol. % CuO. Conversely, the lowest wear of the composites was obtained from the 5 vol. % CuO nanocomposite. This study reveals that the addition of nano CuO particles can lower the wear of PTFE, despite an increase in the coefficient of friction. However, the coefficient friction is still moderate compared to other engineering polymers. In addition, the amount of CuO nano particles has to be optimized to reduce friction and wear at the same time.



© Korean Tribology Society 2023. 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 – PTFE(테플론), Nanocomposite(나노복합재료), Nano particles(나노 입자), Nano CuO filler(나노 산화구리 충전제), Sintering(소결)

1. 서 론

고분자 및 고분자 복합재료는 그 활용 범위와 대상이 확대될 뿐만 아니라 적용 수준을 점점 높여가고 있다. 특히, 운송 수단의 경우 경량화와 더불어 절연 및 하드 코

*Corresponding author: Minhaeng Cho
Tel: +82-02-820-5277, Fax: +82-02-823-5333
E-mail: mhcho87@cau.ac.kr
<https://orcid.org/0009-0007-5919-6254>

팅 대체재로서 고분자 복합소재의 중요성은 더 해졌다.

다양한 종류의 고분자 소재가 개발 활용되고 있으나 기어, 베어링과 같은 주요 기계요소에는 PA66 (polyamide 66), POM (polyoxymethylene), nylon, PEEK (polyetheretherketone) 등과 같이 경도, 강도 등의 기계적 물성뿐만 아니라 열적 특성 또한 우수한 엔지니어링 고분자가 제한적으로 사용되고 있다. 하지만 그럼에도 불구하고 특히 금속과의 접촉 기구에서는 순수 고분자 자체만으로 높은 접촉 하중을 지지할 정도의 충분한 강도와 경도를 얻을 수 없는 경우가 일반적이다. 그러므로 대부분의 경우 마이크로 혹은 나노 입자 형태의 충전재 (filler) 또는 섬유소재 (fiber)를 함께 사용하여 강도와 경도를 높인 복합재료 형태로 사용하는 것이 일반적이다.

마찰을 낮추기 위한 가장 일반적인 방법은 윤활유와 그리이스를 사용하는 것이다. 하지만 환경적 제한과 윤활유 공급과 교체가 용이하지 못한 경우 이를 극복하기 위한 방안으로 MoS₂, graphite, PTFE(Polytetrafluoroethylene)와 같은 고체윤활제가 대체재로서 널리 활용된다. 이와 같은 고체윤활제는 주로 모재에 일정량 첨가되어 모재가 갖고 있지 않은 저마찰 특성을 보완하는 기능을 주로 한다. 이 중에서도 PTFE는 매우 낮은 마찰 속성으로 인해 이를 이용한 다양한 기계 요소의 마찰/마모 거동에 대한 폭 넓은 연구가 이루어져 왔다.

PTFE와 그 복합재료의 미끄럼 마모 메커니즘에 대한 초기 연구[1] 이후 PTFE와 충전재 합성을 통한 복합재료 연구는 수 많은 연구자에 의해 수행되었다. Lankaster [2]는 특히 세장비가 크고 강한 내마모성 입자들이 복합재료 내부에서 하중을 지지하고 그 결과 PTFE의 마모를 낮춘다는 마모 메커니즘을 제안하였다. 이후 나노 입자를 이용한 nano composites 연구가 활발히 수행되었으며 그 중 대표적으로 Li[3] 등은 나노 입자인 ZnO를 이용한 나노복합재료를 제작하고 실험을 수행한 결과 복합재료의 마찰계수는 낮게 유지되며 그 때 최적의 충전재 분율이 15 wt%라는 것을 발견하였다. 또한, Sawyer [4] 등은 38 nm 직경의 Al₂O₃를 충전재로 이용한 나노복합재료를 제작, 마찰/마모를 실험 연구한 결과 20 wt% 분량에서 약 60배 정도의 마모 감소 효과를 얻었다고 보고하였다. PTFE파우더의 사이즈 효과에 대한 연구에서 마모는 상대 소재의 전이로 인해 크게 감소한 반면 마찰은 파우더 입자 크기에 독립적인 것으로 나타났다[5].

이와 같이 마이크로 및 나노 사이즈의 다양한 충전재 연구가 진행된 것과 달리 나노 CuO 입자를 PTFE에 단독 적용한 연구는 보고된 바가 없다. 물론, 나노 CuO 입자는 대표적으로 PPS (polyphenylene sulfide)에 충전

재로 사용되어 마모율을 크게 낮춘 것으로 잘 알려져 있다[6].

PTFE는 분자 사슬 구조가 매우 부드러운 형태를 갖고 있어 낮은 마찰 속성을 나타낸다. 하지만 이러한 저마찰 내부 구조는 마모에 취약할 수 있으며 특히 PTFE의 마찰/마모는 미끄럼 속도와 온도에 크게 의존하는 것으로 알려져 있다. 이처럼 PTFE의 상대적으로 높은 마모율은 충전재를 효과적으로 사용함으로써 크게 낮출 수 있다. 이 때 충전재의 역할은 PTFE 내부에 존재하는 균열의 성장을 방해하거나 균열 성장 방향을 우회하도록 하여 결과적으로 마모를 낮추는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 PTFE의 저마찰 속성을 최대한 유지하면서 마모를 줄이기 위한 하나의 방법으로 나노 CuO 입자를 충전재로 사용하고 나노 CuO 입자가 PTFE의 마찰과 마모 거동에 어떤 영향을 미치는지 알아보았다. 특히 본 연구에서는 매우 느린 미끄럼 속도 0.01 m/s를 유지하였다. 이는 높은 미끄럼 속도로 인한 마찰열 발생과 단열 효과로 인한 PTFE 모재의 연화 (softening) 현상을 최소화 함으로써 나노 CuO 입자가 마찰과 마모에 어떤 영향을 미치는지 알아보기 위한 알맞은 조건이기 때문이다.

2. 실험방법 및 내용

2-1. 시편 재료

PTFE (Chemours-Mitsui Fluoroproducts Co. Ltd., Japan)는 파우더 형태로 제공되었으며 입자의 크기는 약 30 μm로 구입 후 추가 후처리 없이 그대로 혼합에 사용하였다. PTFE의 대표적 물성은 Table 1과 같다.

나노 CuO 입자 (Alfa Aesar, MA, USA)는 직경 23-37 nm를 가지며 밀도 6.31 g/cm³, 녹는점 약 1,200°C의 검은 분말 형태를 갖고 있다.

2-2. 시편 제작

나노 CuO 입자를 함유한 PTFE 복합소재를 제작하기 앞서 나노 CuO 입자의 첨가량을 결정하였다. 우선 비교 평가 목적으로 충전재가 포함되지 않은 순수 PTFE, 적은 양의 0.2 vol. %, 그리고 높은 비율인 5 vol. %로 정하였다. 마이크로 입자 대비 나노 입자의 체적에 대한 표면적의 비인 비면적 (specific area)이 상당히 높기 때문에 PTFE 기지 내에서 적은 양의 나노 입자 사용으로도 매우 넓은 계면을 형성할 수 있다. 이는 앞에서 언급된 바와 같이 균열의 성장과 이동을 효과적으로 방해할 수 있어 마모를 낮출 수 있고 동시에 생성 마모 입자의 크

기를 낮추는 효과를 갖게 된다.

혼합물에서 가장 중요한 점은 나노 입자의 효과적인 분산이기 때문에 혼합 시 높은 전단이 필요하며 이를 위해 고속 믹서인 Hauschild high speed mixer를 이용하여 PTFE와 CuO 나노 입자를 최대한 효과적으로 혼합하였다.

혼합물은 내부 직경이 30 mm이고 높이가 40 mm인 원통 금형을 사용하여 프리폼 (preform)을 제작하였다. 이 금형 바닥에는 직경 30 mm, 높이 10 mm 인 강 디스크가 삽입되었고 그 위로 혼합물이 채워진다. 강 디스크는 소결 과정 중 혼합물의 접착을 돕기 위해 혼합물을 채우기 전 에틸 알코올로 degreasing 작업을 수행하였다. 이후 길이 50 mm 직경 30 mm plunger에 강한 유압을 가해 프리폼을 성형하였다.

프리폼은 350°C에서 30분간 소결 과정을 거쳐 디스크형상의 최종 시편을 얻었다. 제작된 시편은 마찰/마모 평가 전 표면 연마와 세정 등 기초 전처리 작업을 마친 후 마찰 실험에 사용하였다. 일부 시편의 경우 소결 과정에서 생긴 내부 기공 등으로 인해 접촉 시 압력에 의해 표면이 가라 앉거나 혹은 넓은 표면에 걸쳐 심한 파형 (waviness)이 발견되었으며 이러한 시편은 폐기 후 새롭게 시편을 제작, 실험에 사용하였다.

2-3. 미끄럼 마찰 실험

Ball-on-disk 방식의 미끄럼 마찰실험을 위해 다목적 마찰/마모 시험기 (MPW110, NEOPLUS, Korea)가 사용되었으며 미끄럼 조건은 수직 하중 2 N, 미끄럼 속도 0.01 m/s, 그리고 평가 시간은 1시간이 적용되었다.

하중은 PTFE의 낮은 압축 항복 강도 (Table 1)를 고려하여 그 이상의 응력을 갖지 않도록 비교적 저하중 값인 2 N을 적용하였다. 2 N에 대한 Hertz 접촉 압력은 볼-평면 관계식 (1)을 이용하여 계산한 결과 최대 접촉 압력 P_0 는 14.26 MPa로 나타났다.

$$P_0 = \frac{3F}{2\pi a^2}, a = \left(\frac{3FR}{4E}\right)^{1/3}, \frac{1}{E} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (1)$$

여기서 F는 수직 하중, a는 접촉 반경, E와 ν 는 PTFE와 강구 각각의 탄성계수와 프와송 비를 의미한다; 강구 E = 207 GPa, $\nu=0.33$. 아울러 이론적인 접촉 반경 a는 초기 약 0.26 mm이며 이 값은 마찰 실험 후 측정된 각 시편의 마모 트랙의 폭과 비교 분석되었다.

아울러 위에서 계산된 응력은 순수 PTFE의 압축 항복강도를 크게 넘어서지 않은 결과로써 이는 볼의 압축에 의한 소성 변형이 최대한 억제된 계산 결과로 볼 수

Table 1. Mechanical and physical properties of PTFE [7]

Material properties	Value
Young's modulus (MPa)	400
Poisson's ratio	0.46
Compressive yield strength (MPa)	< 28.6
Ultimate tensile strength (MPa)	460

있다. 즉, 과도한 소성변형이 억제된 조건에서만 나노 CuO입자의 점착 및 변형에 대한 영향을 올바르게 측정할 수 있다.

3. 실험 결과 및 고찰

3-1. 마찰 실험 결과

Fig. 1은 각각 순수 PTFE 및 5 vol.% nano CuO나노 복합소재의 미끄럼 시간에 따른 마찰 계수의 변화를 나타낸다.

그래프에 잘 나타나 있듯이 두 경우 모두 미끄럼 시작과 동시에 급격한 마찰 상승이 발생하고 이러한 상승은 일정 구간 유지되었다. 이와 같은 초기 접촉 과정 동안 시편 처리단계 생성된 표면의 거칠기는 마모 트랙을 따라 급격히 감소하며 run-in wear 또한 빠르게 진행된 것으로 볼 수 있다. 이 과정에서 볼과 시편 표면간의 접촉 면적이 상승하게 되며 그 결과 마찰은 일정 구간 상승을 지속하게 된다. 이후 마찰은 다시 감소하며 동마찰 구간으로 진입하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 마찰의 감소 폭과 동마찰 유지 구간과 형태 등을 포함한 마찰계수의 변화는 나노 CuO 입자의 양과 그 영향에 의해 서로 다르게 나타났으며 반복 실험 과정에서도 유사한 경향을 계속해서 볼 수 있었다.

Fig. 2는 나노복합재료의 마찰 계수 평균 값을 보여주고 있다. 이 결과는 각 시편에 대해 최소 5회 실험 후 최대 및 최소, 그리고 outlier를 배제한 마찰계수의 평균과 표준편차이다. 특히 평균 값은 모든 마찰 그래프에서 정상상태 구간을 결정하고 그 구간에서의 평균 값을 이용하였다. 결과에서 볼 수 있듯이 적은 양의 나노 CuO 입자에서는 마찰 상승이 크지 않았으나 5 vol. %에서 약 배 정도의 상승을 나타냈다.

충진재의 사용으로 인한 마찰 계수의 상승은 어느 정도 예상된 결과이다. 즉, 나노 입자들이 PTFE 기지 내에서 균열의 성장이나 이동을 방해하여 마모 감소에는 큰 기여를 할 수 있으나 부드러운 금속 구 표면과 접촉 시 매우 강한 CuO입자는 상대적으로 높은 연마 거동을 보이고 그리고 이에 의한 마찰의 상승을 가져올 수 있기

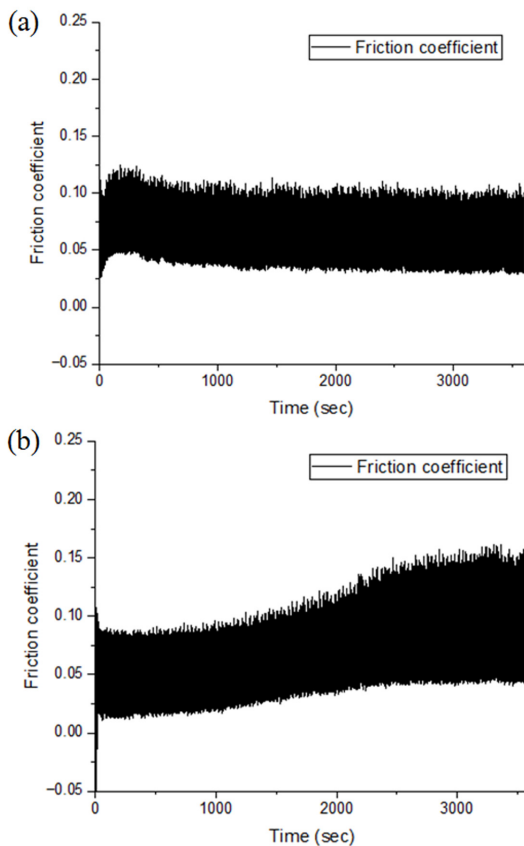


Fig. 1. Variation of friction coefficient as a function of sliding time: (a) Pure PTFE, (b) PTFE + 5 vol. % CuO. Sliding conditions: load 2N, speed 0.01m/s, duration 1 hr.

때문이다. 특히, 나노 입자의 양이 증가할수록 이러한 경향은 더욱 두드러질 수 있다. 왜냐하면 매우 적은 체적의 증가라 할지라도 이는 급격한 비면적의 증가로 이어지기 때문이다.

3-2. 마모 트랙 분석 결과

Fig. 3은 마찰 실험 후 시편 표면에 생성된 마모 트랙의 폭을 측정 비교한 결과이다. 각 샘플마다 마모 트랙 원주를 따라 5곳에서 폭을 측정한 후 그 평균 값을 나타내었다. 결과에서 볼 수 있듯이 나노 CuO 입자의 함량이 증가할수록 적게나마 마모 폭이 감소하는 것을 볼 수 있다. 하지만 이러한 비교는 실험 시간이 길고 마모가 심하게 발생하였을 경우 변별력이 확보될 수 있겠으나 본 연구에서와 같은 비교적 짧은 미끄럼 거리로부터는 변별력이 부족할 것으로 판단되기 때문에 보다 정확한 비교 분석을 위해 마모 트랙 단면에 대한 3차원 형상 분석

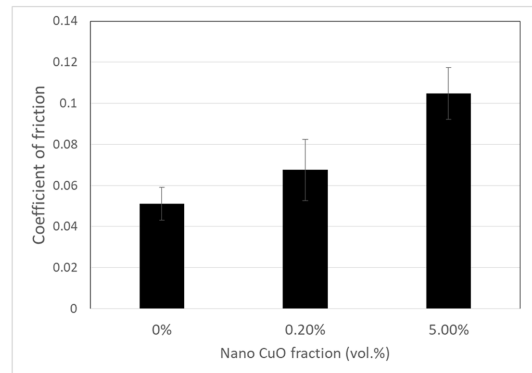


Fig. 2. Variation of the coefficients of friction as a function of nano CuO in the nanocomposites. The average out of at least 5 measurements is reported.

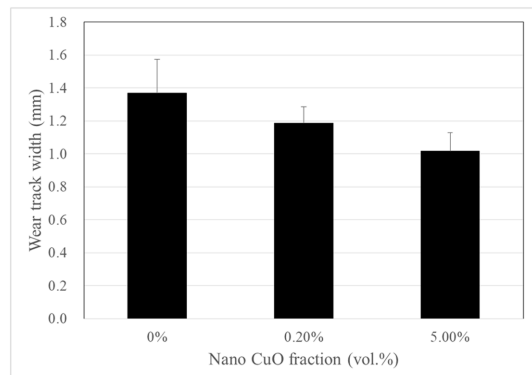


Fig. 3. Comparison of wear track width using an optical microscope. 5 measurements at least were made for each specimen.

을 수행하였다.

Fig. 4는 마모 트랙 단면의 폭과 깊이에 대한 측정 결과를 나타내고 있다. 순수 PTFE와 가장 높은 나노 CuO 입자를 함유한 시편 간 단면 비교를 통해 CuO 함량이 증가함에 따라 마모 깊이가 약 1/3정도로 크게 감소했음을 알 수 있다. 반면 마모 트랙의 폭은 약간 감소한 것으로 나타났는데 이는 Fig. 3의 마모 폭 비교와 거의 유사한 경향으로 볼 수 있다.

또한 단면 형상의 마모 트랙 가장자리 부분이 불룩하게 솟아 있음을 볼 수 있다. 이는 볼의 접촉 응력과 마모에 의한 전단 흐름 (shear flow) 거동 때문으로 이와 같은 현상은 낮은 강도와 점탄성 특성을 갖는 고분자에서 공통적으로 나타나며 측정에 사용된 모든 시편에서 이와 유사한 형태가 관찰되었다.

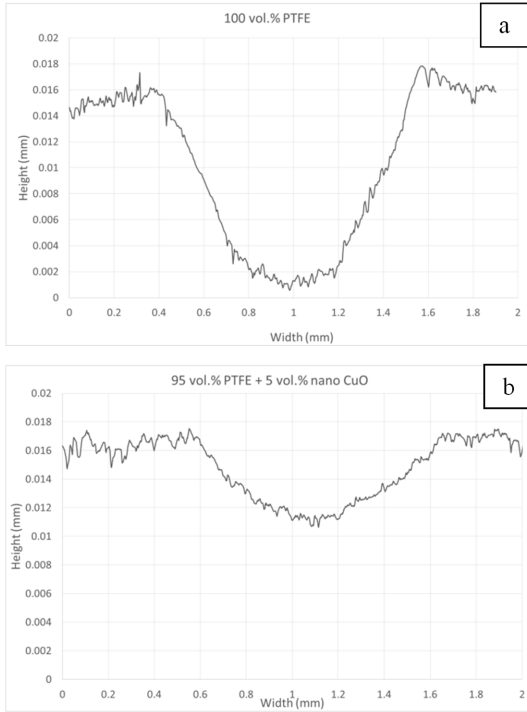


Fig. 4. Cross section profiles of the wear track of (a) pure PTFE, (b) PTFE + 5 vol. % CuO.

위와 같은 단면 분석 결과를 바탕으로 마모율 k 를 계산하였다. 우선 마모 단면으로부터 솟아오른 부분을 고려한 상태에서 원래의 시편 표면을 결정하고, 다음 그 아래 면적을 계산함으로써 마모 단면적을 계산하였다. 그리고 강구 중심까지의 반경을 이용한 원주를 위 단면적에 곱함으로써 개략적인 마모 체적을 유추했다. 물론 원주를 따라 마모 단면 형상이 동일하지 않기 때문에 단순 비교에는 큰 제한이 존재할 것으로 판단하며 되도록 다수의 지점에서 단면 형상을 측정하는 것이 신뢰도 상승에 보다 적합할 것이다. 하지만 비교 목적을 위해 본 연구에서는 대책 점에 있는 두 곳의 단면을 측정한 결과를 사용하였으며 마모율 결과는 Table 2와 같다. 결과에서 볼 수 있듯이 나노 CuO 입자 양의 증가로 인해 마모율이 크게 감소하였음을 알 수 있다.

하지만 다수의 시편에서 마모율의 변화가 일정하지 않은 결과를 얻을 수 있었다. 비록 정량화를 할 수는 없지만 시편 내부에 존재하는 다양한 결함들이 마모를 불균일하게 일으켰기 때문으로 볼 수 있다. 이와 같은 예상치 못한 현상은 실험 후 마모 트랙 분석을 통해 확인할 수 있었다. Fig. 5는 마모 트랙을 따라 매우 많은 수의

Table 2. Wear rates of the specimen

Specimen, CuO vol.%	K [mm^3/Nm]
Unfilled PTFE	8.867×10^{-3}
0.2	7.729×10^{-3}
5.0	3.007×10^{-3}

다양한 크기를 가진 홀들이 존재함을 잘 보여주고 있다. 물론 이 홀들이 사전에 존재하고 있는 것인지 혹은 접촉 과정에서 생성된 파손일지는 명확하지는 않다. 일반적으로 고분자의 마모를 낮추기 위해서는 생성된 마모 입자들이 계면 사이에 머무르며 상대 강구 표면에 전이막을 형성하던가 혹은 시편 표면에 다시 압착되어 추가적인 마모가 억제되어야 하나 이와 같은 홀 들은 마모 입자들을 가두는 역할을 하고 그 결과 추가적인 마모를 유발시키는 것으로 볼 수 있다. 이러한 결함들의 대부분은 시편 제작 소결 과정에서 생성된 것으로 볼 수 있고 마모에 매우 큰 영향을 미쳤을 것이 확실하기 때문에 반드시 제거 혹은 최소화 되어야 할 내부 결함이다.

아울러 순수 PTFE와 5 vol.% CuO 시편의 접촉 반경 비교 결과 Hertz 접촉 식으로부터 구한 접촉 반경 $a = 0.26 \text{ mm}$ 에 비해 약 3배 정도 더 큰 것으로 나타났다. 이는 미끄럼 전 정적 접촉 반경이 지속적인 미끄럼 운동 과정 동안 마모에 의해 그 크기가 증가했음을 잘 나타내는 것이다. 비교적 짧은 미끄럼 거리를 이동했음에도 불구하고 접촉 반경의 빠른 성장은 앞에서 언급된 바와 같이 내부 결함이 상당부분 기여를 했을 것으로 예상되며 그 결과 대체적으로 높은 마모율 값을 나타냈었다.

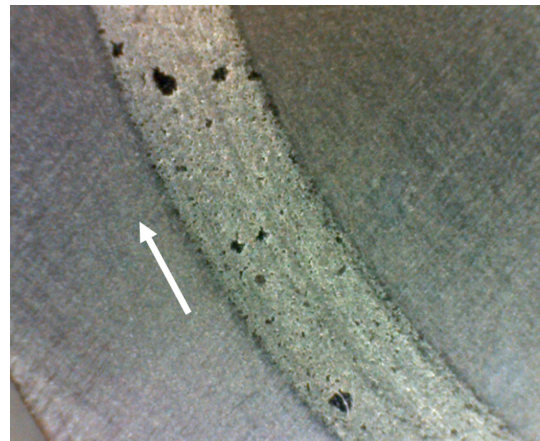


Fig. 5. Pores and cracks formed along the wear track of a nanocomposite specimen. The arrow indicates sliding direction.

3-3. 마모 표면 FE-SEM 분석 결과

Fig. 6은 순수 PTFE 시편의 마모 면을 관찰한 FE-SEM 표면 형상이다. 화살표 미끄럼 방향을 따라 얇은 골 형상들이 형성되었음을 잘 나타내고 있다. 이는 상대 금속 구의 강한 돌기에 의한 연마성 형상이라기 보다는 PTFE 입자들이 계면에 계속 남아 반복적으로 PTFE 표면을 압착함으로써 생성된 형상으로 볼 수 있다. 마모 표면의 골 등의 위치에 생성된 좁고 길이 방향으로 압착된 판상형 입자들이 이러한 형상을 뒷받침한다.

나노 CuO 입자가 소량 (0.2 vol. %) 첨가됨에 따라 마모 트랙의 표면 형상이 Fig. 7과 같이 변화하였다. 순수 PTFE에서 보였던 미끄럼 방향으로의 골 형상과 마모 입자들은 감소되거나 사라졌고 대신 불규칙한 패치 형상의 마모 입자들이 표면에 압착되어 있음을 볼 수 있다.

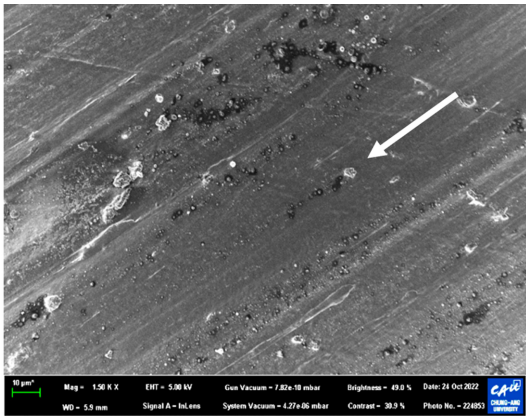


Fig. 6. Wear track of unfilled pure PTFE taken at X 1,500. The arrow indicates sliding direction.



Fig. 7. Wear track of 0.2 vol. % filled PTFE taken at X 1,000. The arrow indicates sliding direction.

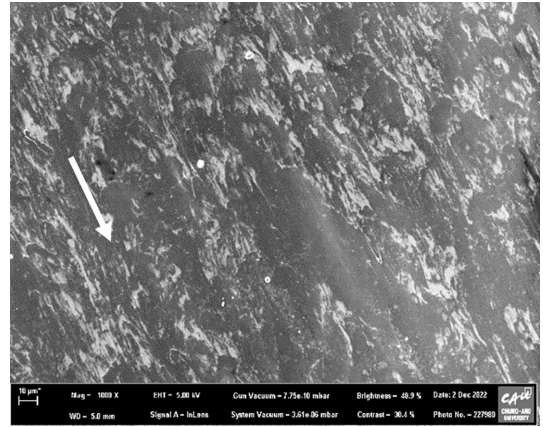


Fig. 8. Wear track of the 5 vol. % CuO filled PTFE taken at X 1,000. The arrow indicates sliding direction.

나노 CuO 입자가 가장 많이 포함된 시편의 마모 트랙은 Fig. 8과 같다. 충전재 함량이 증가함에 따라 순수 PTFE와 0.2 vol. %에서 관찰된 미끄럼 방향을 따라 생성된 스크래치 형상들이 더 이상 관찰되지 않았다. 이러한 특징은 나노 입자가 첨가될 경우 이 입자들이 마모 입자의 크기를 감소시키고 그 결과 마모를 줄인다는 기존 연구 결과들과 일치하는 부분이다. 또한 전체적으로 부드러운 마모 표면이 생성되었다는 점은 나노 충전재의 영향으로도 볼 수 있다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 좁고 긴 스크래치 대신 미끄럼 방향과 수직 방향으로 물결 모양의 waviness 패턴이 형성되었다. 마모 면에서 보이는 밝은 부분의 분포도 0.2 vol. %에 비해 보다 균질해진 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 PTFE의 저마찰 특성 유지와 동시에 마모를 개선하기 위한 방안으로 나노 충전재 중 하나인 CuO 입자를 사용하여 나노복합재료를 제작하였고 이를 이용한 마찰 마모 평가를 수행한 결과 몇 가지 의미 있는 결과를 얻었다.

마찰 계수는 순수 PTFE 대비 나노 CuO 입자 양의 증가에 따라 상승하는 것으로 나타났으며 최대 마찰계수는 5%에서 얻었다. 이는 PTFE 대비 높은 강도를 가진 나노 입자와 강구와의 상호 작용이 나노 입자량 증가와 함께 증가했기 때문으로 볼 수 있다. 하지만 짧은 미끄럼 거리로 인해 강구 표면의 마모는 일부 스크래치가 생성된 정도로 측정 비교 수준은 아닌 것으로 나타났다.

나노복합재료의 마모는 충전재 함량 증가에 따라 감

소할 것으로 예상하였으나 일부 시편에서 마모의 감소가 나타나지 않았다. 그 이유는 시편 제작 과정에서 발생한 내부 결함인 것으로 밝혀졌으며 이를 통해 마모 감소를 위해서는 표면뿐만 아니라 표면 아래에서의 초기 균열이나 공동 등이 반드시 제거되어야 함을 의미한다.

본 연구를 통해 나노 CuO 입자를 이용하여 PTFE의 마모를 낮출 수 있다는 긍정적인 결과를 얻을 수 있었으며 이는 기존 나노 입자의 충전재로서의 기능을 기초로 한 유사한 결과라 할 수 있다. 하지만 마찰 계수의 상승은 해결되어야 문제로 나노 CuO입자량의 최적화를 통해 이루어 질 수 있을 것으로 기대된다. 즉, 5% 이하의 충전재 양에서 마찰의 증가가 억제된 상태에서 마모 감소가 가장 큰 구간이 존재할 것으로 예상되기 때문에 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

References

- [1] Blanchet, T., Kennedy, F., "Sliding wear mechanism of polytetrafluoroethylene (PTFE) and PTFE composite", *Wear*, Vol.153(1), pp.229-243, 1992.
- [2] Lankaster, J. K., "Polymer-based bearing materials - role of fillers and fiber reinforcement in wear", *Wear*, Vol.22(3), p.412, 1972.
- [3] Li, F., Hu, K., Li, J., Zhao, B., "The friction and wear characteristics of nanometer ZnO filled polytetrafluoroethylene", *Wear*, Vol.249(10-11), pp1877-882, 2001.
- [4] Sawyer, W. G., Freudenberg, K., Bhimaraj, P., Schadler, L. S., "A study on the friction and wear behavior of PTFE filled with alumina nanoparticles", *Wear*, Vol.254(5-6), pp.573-580, 2003.
- [5] Lee, Han-young, "A study of sliding friction and wear of PTFE layer coated on steel", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol.24, No.2, pp.96-103, 2008, <https://doi.org/10.9725/kstle.2008.24.2.096>
- [6] Cho, M. H., S. Bahadur, Study of the tribological synergistic effects in nano CuO-filled and fiber-reinforced polyphenylene sulfide composites, *Wear*, Vol.258(5-6), pp.835-845, 2005.
- [7] Overview of materials for Polytetrafluoroethylene (PTFE), Molded, <https://www.matweb.com>

[1] Blanchet, T., Kennedy, F., "Sliding wear mechanism of polytetrafluoroethylene (PTFE) and PTFE com-