

기판 종류에 따른 물 윤활 특성 및 나노 입자의 영향

김혜균¹ · 김태형¹ · 김종국² · 장영준² · 강용진² · 김대은^{1,*}

¹연세대학교 대학원 기계공학과, 무한내마모연구단

²재료연구소 실용화사업단 표면공정연구실

Water Lubrication Characteristics and Effect of Nano Particles based on the Substrate

Hye-Gyun Kim¹, Tae-Hyung Kim¹, Jongkuk Kim², Young-Jun Jang², Yong-Jin Kang² and Dae-Eun Kim^{1,*}

¹Center for Nano-Wear, Graduate School, Dept. of Mechanical Engineering, Yonsei University

²Surface Engineering Department, Implementation Research Division, Korea Institute of Materials Science (KIMS)

(Received September 16, 2017; Revised November 2, 2017; Accepted November 5, 2017)

Abstract – In this work, we examine pure water and water with nanoparticles to investigate water lubrication characteristics and the effect of nanoparticles as lubricant additives for different substrates. We test carbon-based coatings and metals such as high-speed steel and stainless steel in pure deionized (DI) water and DI water with nanoparticles. We investigate water lubrication characteristics and the effect of nanoparticles based on the friction coefficient and wear rate for different substrates. The investigation reveals that nanoparticles enhance the friction and wear properties of high-speed steel and stainless steel. The friction coefficient and wear rate of both high-speed steel and stainless steel decreases in DI water with nanoparticles compared with the results in pure DI water. The presence of nanoparticles in water show good lubricating effect at the contact area for both high-speed steel and stainless steel. However, for carbon-based coatings, nanoparticles do not improve friction and wear properties. Rather, the friction coefficient and wear rate increases with an increase in the concentration of nanoparticles in case of water lubrication. Because carbon-based coatings already have good tribological properties in a water environment, nanoparticles in water do not contribute toward improving the friction and wear properties of carbon-based coatings.

Keywords – carbon-based coating(탄소막 코팅), friction(마찰), nanoparticle(나노 입자), water lubrication(수중 윤활), wear(마모)

1. 서 론

윤활유는 접촉면의 마찰과 마모를 줄이고, 냉각과 마모입자 제거 등의 역할을 수행하여 기계 부품의 내구성을 증가시키고, 동력전달 효율을 높인다[1]. 하지만 사용된 윤활유는 내부의 화학성분으로 인해 환경을 오염시키고, 윤활유의 화학성분과 금속 입자가 결합하여 쉽게 처리할 수 없는 문제가 있다. 때문에 폐 윤활유를

정제하기 위해서는 많은 비용과 시간이 요구된다[2]. 이러한 폐 윤활유에 의한 환경오염을 줄이기 위해 최근 친환경 윤활제에 대한 관심이 높아지고 있으며, 특히 물을 이용한 친환경 윤활제에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[3]. 물은 윤활유에 비해 저렴하고, 사용 후에도 환경을 오염시키지 않는다는 장점이 있다. 그럼에도 불구하고 물이 윤활제로서 상용화되지 않은 이유는 윤활유에 비해 낮은 점도로 윤활성이 낮고 금속 표면을 산화시키기 때문이다. 최근 물의 낮은 윤활성을 향상시키기 위해 다양한 연구가 진행되었다. 이 중 물에 나노 입자를 첨가시켜 윤활제로 사용할 경우, 나노 입

*Corresponding author : kimde@yonsei.ac.kr
Tel.: +82-2-2123-2822, Fax.: +82-2-365-0491

자 특유의 형태 혹은 고체 윤활제로서의 특성으로 물 윤활 효과가 향상됨이 많은 연구를 통해 확인되었다[4,5].

그러나 대부분의 금속 표면이 물에 의해 쉽게 부식되기 때문에 물의 윤활성을 향상시켜도 물에 의한 금속의 표면 부식을 막지 못하면 실제 기계부품 등 상용화하는 것이 불가능하다. 최근 내식성이 뛰어난 표면 코팅을 금속 표면에 증착하여 물에 의한 부식을 방지할 뿐만 아니라, 물 속에서 우수한 저마찰 및 저마모 특성을 보이는 코팅에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 금속 표면에 탄소막 코팅을 사용할 경우, 금속의 부식 방지 및 탄소막 코팅 고유의 저마찰 및 저마모 특성에 의해 금속보다 물의 윤활 효과가 향상됨이 검증되었다[6-14].

본 연구에서는 물 윤활과 나노 입자가 다양한 기판에 대하여 어떠한 윤활 효과를 보이는지 분석하고자 하였다. 이를 위해 다양한 나노 입자 중, SWCNT(Single Wall Carbon Nano Tube)를 선정하여 물에 첨가시켜 탄소막 코팅과 금속 소재 기판에 대하여 윤활 효과를 평가하였다.

서로 다른 기판에 따른 물과 나노 입자의 윤활효과를 확인하기 위한 실험에는 왕복운동형 마찰 시험기가 사용되었다. SWCNT가 첨가되지 않은 DI water와 SWCNT가 첨가된 DI water를 윤활제로 이용하여 탄소막 코팅과 금속 기판의 마찰 및 마모 특성을 분석하였다. 기판에 발생한 마모의 분석에는 3D 공초점 레이저 현미경을 이용하였다. 실험을 통해 얻은 마찰 특성과 마모 특성을 비교 분석하여 물과 나노 입자의 윤활 효과가 다양한 기판에 대하여 어떻게 나타나는지 비교하였다.

2. 연구방법 및 내용

2-1. 시편 준비

본 연구에서는 DI water와 나노 입자가 기판의 종류에 따라 어떠한 윤활 효과를 보이는지 확인하고자 하였다. 이를 위하여 일반적으로 많이 사용되는 금속 기판과 탄소막 코팅을 실험 기판으로 준비하였다. 금속 기판으로는 물에 의해 쉽게 부식이 발생하는 고속도강(HSS)과, 물에 대한 우수한 내식성을 갖춘 스테인리스 스틸(SUS 304)을 준비하였다. 두 금속 모두 실제 산업에서 많이 사용되는 금속이며 우수한 기계적 특성을 갖고 있다.

탄소막 코팅은 우수한 저마찰, 저마모 특성으로 인

해 다양한 분야에서 마찰 감소 및 내구성 향상을 위해 적용되고 있다. 뿐만 아니라 탄소막 코팅은 뛰어난 내식성을 갖고 있기 때문에 물 윤활 조건에서도 쉽게 부식이 되지 않으며, 저마찰 및 저마모 특성을 물 속에서도 유지한다. 본 연구에서 사용된 탄소막 코팅은 재료연구소(KIMS)를 통해 공급받았으며, 재료연구소의 FCVA(Filterd Cathodic Vacuum Arc) 장비를 이용하여 고속도강 위에 증착되었다. 탄소막 코팅은 약 600 nm 두께로 증착되었으며, 고속도강과 탄소막 코팅 사이의 결합력을 높이기 위해 Cr층이 약 300 nm 두께로 증착되었다.

2-2. 윤활제 준비

본 연구에서는 나노 입자가 첨가되지 않은 순수 DI water와 나노 입자가 첨가된 DI water 수용액을 이용하였다. 나노 입자는 물의 부족한 윤활성을 향상시키기 위한 목적으로 첨가되었으며, 다양한 나노 입자 중 본 연구에서는 SWCNT를 물의 윤활성을 향상시킬 나노 입자로 선정하였다. SWCNT가 0.1 wt% 첨가된 DI water용액을 (주)나노솔루션을 통해 구매하였으며, 구매한 0.1 wt% SWCNT 수용액에 DI water를 추가한 후 magnetic stir를 이용하여 12시간동안 섞어주었다. 이를 통해 기존 SWCNT 수용액보다 농도를 낮춘 0.05 wt% SWCNT 수용액을 제작하였다.

본 연구에서는 탄소막 코팅에 대하여 DI water, 0.05 wt% SWCNT 수용액 그리고 0.1 wt% SWCNT 수용액의 다양한 기판에서의 윤활 효과를 확인하였다. 그리고 고속도강과 스테인리스 스틸에 대해서는 DI water와 0.1 wt% SWCNT 수용액의 윤활 효과를 확인하였다.

2-3. 마찰 실험 준비

기판과 SWCNT의 유무에 따른 DI water를 이용한 윤활 조건에서 마찰 및 마모 실험은 ball-on-plate 왕복운동형 마찰시험기를 이용하여 진행하였다. 본 연구에서 사용한 왕복운동형 마찰시험기는 윤활제와 시편을 넣을 수 있는 컨테이너가 장착되어 있으며, 컨테이너에 윤활제를 채운 상태에서 마찰 실험을 진행하였다. 마찰계수는 마찰시험기 상단의 수직 하중 센서와 마찰력 센서를 이용하여 계산하였다. 실험 장치의 구성은 Fig. 1과 같다.

본 연구에서 사용된 탄소막 코팅은 높은 경도는본 연구실의 나노 인텐터를 통해 측정하였으며, 약 70

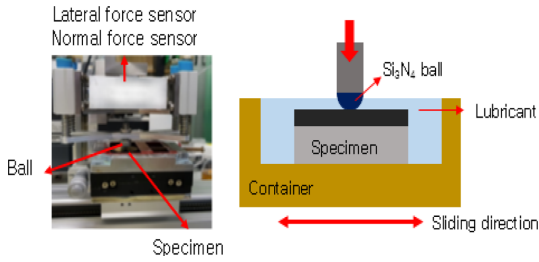


Fig. 1. Reciprocating type tribotester.

Table 1. Friction test conditions

	Carbon-based coating	High-speed steel	Stainless steel
Normal load	10 N	10 N	10 N
Sliding speed	10 mm/s	20 mm/s	20 mm/s
Sliding stroke	2 mm	2 mm	2 mm
Sliding cycles	100,000	5,000	5,000
Repeating	1 time	3 times	3 times
Lubricant	DI water 0.05 wt% SWCNT 0.10 wt% SWCNT	DI water 0.10wt% SWCNT	
Temperature	22°C		
Humidity	45%		

GPa의 고경도 코팅인 것을 확인하였다. 때문에 일반적인 금속 상대면을 사용할 경우 상대면에서만 심한 마모가 발생할 수 있었다. 본 연구의 상대면으로는 지름 5 mm의 고경도 Si₃N₄ 세라믹 볼을 사용하였다. 수직 하중은 10 N이 주어졌다. 코팅의 마모 특성을 파악하기 위하여, 마모가 쉽게 발생하지 않은 탄소막 코팅은 100,000사이클 동안 실험을 진행하였다. 반대로 마모가 쉽게 발생한 고속도강과 스테인리스 스틸은 5,000 사이클 동안 실험을 진행하였다. 자세한 실험 조건은 Table 1에 명시하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 마찰계수 측정 결과

3-1-1. 탄소막 코팅의 마찰계수

Fig. 2는 탄소막 코팅의 DI water와 SWCNT 수용액을 이용한 윤활에 따른 마찰계수 측정 결과이다. 탄소막 코팅의 경우, 나노 입자가 첨가되지 않은 DI

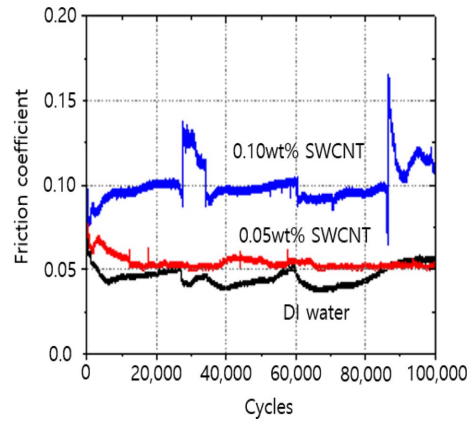


Fig. 2. Friction coefficient for carbon-based coating.

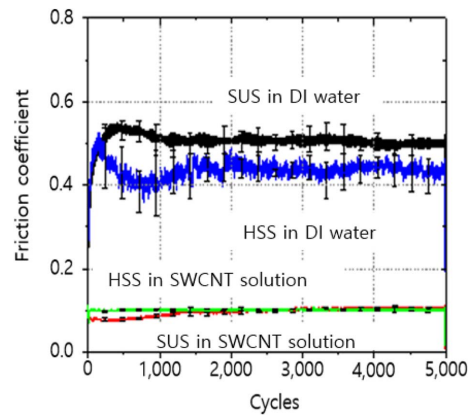


Fig. 3. Friction coefficient for high-speed steel and stainless steel.

water에서 0.046의 가장 낮은 마찰계수가 측정되었다. 0.05 wt% SWCNT 윤활제의 경우 탄소막 코팅의 평균 마찰계수는 0.053로 DI water보다 약 15% 증가하였고, 0.10 wt% SWCNT 윤활제의 경우 탄소막 코팅의 평균 마찰계수는 0.102로 DI water보다 약 2배 증가하였다. 탄소막 코팅은 DI water를 이용한 윤활을 통해 우수한 마찰 감소 효과를 보이지만, DI water에 SWCNT가 가 첨가될 경우 마찰 감소 효과가 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.

3-1-2. 금속의 마찰계수

Fig. 3는 고속도강과 스테인리스 스틸의 DI water와 SWCNT 수용액을 이용한 윤활에 따른 마찰계수 측정 결과이다. 두 가지 금속 모두 DI water에 SWCNT를 첨가시킴으로써 마찰계수가 크게 감소하는 것을 확인할

수 있었다. 고속도강의 경우, DI water를 이용한 윤활에서의 평균 마찰계수는 0.437로 측정되었다. 0.1 wt%의 SWCNT 수용액을 이용한 윤활 조건에서, 고속도강의 평균 마찰계수는 0.102로 순수한 DI water조건에서의 평균 마찰계수보다 77% 감소하였다. 스테인리스 스틸의 경우, DI water를 이용한 윤활에서의 평균 마찰계수는 0.503으로 측정되었다. 0.1 wt%의 SWCNT 수용액을 이용한 윤활 조건에서, 스테인리스 스틸의 평균 마찰계수는 0.101로 순수한 DI water 조건에서의 평균 마찰계수보다 80% 감소되는 효과를 얻을 수 있었다. 단순히 SWCNT를 DI water에 첨가시킴으로써, 평균 마찰계수가 감소할 뿐 만 아니라 마찰계수의 값이 안정적으로 측정됨을 확인하였다. 이를 통해 SWCNT가 금속 표면에서는 DI water의 윤활성을 크게 향상시키는 것을 확인할 수 있었다.

3-2. 마모율 측정 결과

3-2-1. 탄소막 코팅의 마모율

Fig. 4는 다양한 기판에 대하여 DI water와 SWCNT 수용액을 이용한 윤활 실험 후 기판의 마모율을 분석한 결과이다. 마모율의 경우, 마모 단면적과 이동 거리, 가해진 수직하중을 이용하여 계산하였다. 탄소막 코팅의 경우, 나노 입자가 첨가되지 않은 DI water에서 가장 낮은 마모율이 측정되었다. 하지만 SWCNT수용액 내 나노 입자의 양이 증가될수록 탄소막 코팅의 마모율이 증가하는 경향을 보였다. DI water 윤활 시 탄소막 코팅의 마모율은 $1.16 \times 10^{-12} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{mm}$ 이었던

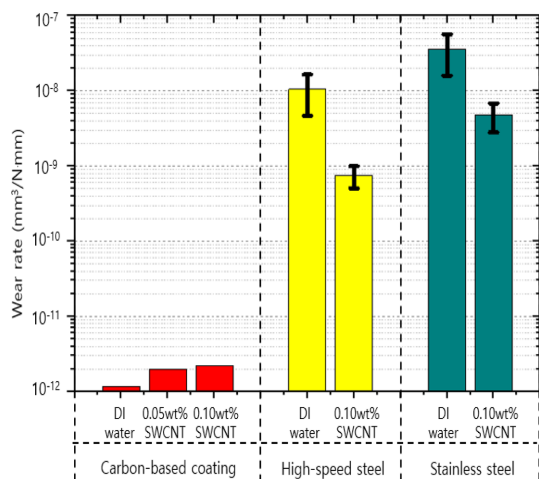


Fig. 4. Wear rate based on nano-particle dispersed water for various substrates.

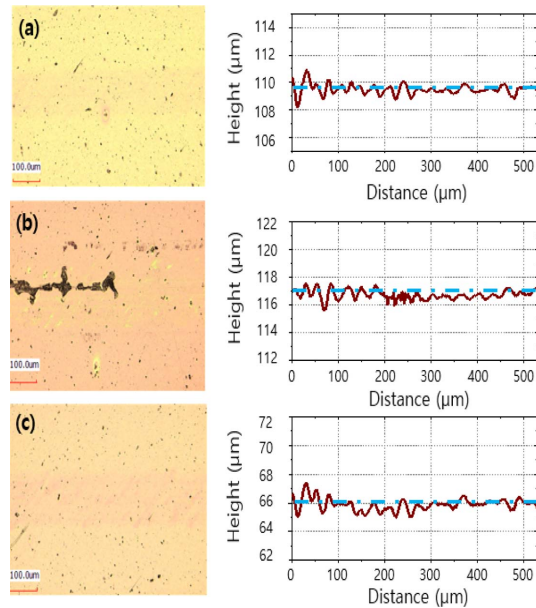


Fig. 5. Cross section images of wear tracks for carbon-based coatings.

- (a) DI water lubrication
- (b) 0.05 wt% SWCNT solution lubrication
- (c) 0.10 wt% SWCNT solution lubrication

으며, 나노 입자가 첨가된 0.05 wt% SWCNT 수용액의 경우 탄소막 코팅의 마모율은 $2.02 \times 10^{-12} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{mm}$, 0.10 wt% SWCNT 수용액의 경우 탄소막 코팅의 마모율은 $2.22 \times 10^{-12} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{mm}$ 로 SWCNT가 0.10 wt% 첨가됨에 따라 코팅의 마모율이 약 2배 증가한 것으로 나타났다. 이를 통해 저마찰, 저마모의 탄소막 코팅에 대해서, SWCNT는 마모 감소 효과를 내지 못하며, 오히려 마모를 악화시키는 것이 확인되었다. Fig. 5는 탄소막 코팅의 윤활 조건에 따른 마모 트랙 단면적 형상을 보여준다.

3-2-2. 금속의 마모율

SWCNT가 첨가되지 않은 DI water를 이용한 윤활 실험에서, 고속도강의 평균 마모율은 $1.05 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{mm}$, 스테인리스 스틸의 평균 마모율은 $3.62 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{mm}$ 로 탄소막 코팅에 비해 높은 마모율이 측정되었다. 하지만 0.10 wt% SWCNT 수용액에서의 평균 마모율을 측정된 결과, 고속도강의 평균 마모율은 $7.49 \times 10^{-10} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{mm}$, 스테인리스 스틸의 평균 마모율은 $4.82 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{mm}$ 로 크게 감소한 것이 확

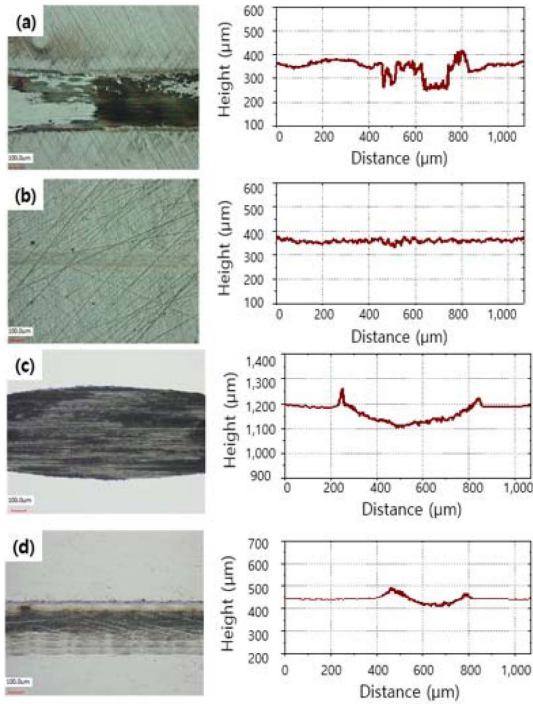


Fig. 6. Cross section images of wear tracks for metals. (a) DI water lubrication for high-speed steel. (b) 0.10 wt% SWCNT solution lubrication for high-speed steel (c) DI water lubrication for stainless steel (d) 0.10 wt% SWCNT solution lubrication for stainless steel

인되었다. 금속의 DI water를 이용한 윤활 조건에서의 평균 마모율과 비교하였을 때, 금속의 경우 SWCNT 첨가를 통해 물의 윤활성이 크게 향상됨을 확인하였다. 하지만 절대적인 마모율 자체는 저마찰, 저마모의 탄소막 코팅의 모든 윤활 조건에 비해 높은 마모율을 보였다. Fig. 6은 두 가지 금속 기관의 물 윤활제와 나노 입자가 첨가된 물 윤활제에 대한 대표 마모 트랙 이미지이다.

4. 고찰

본 연구에서는 DI water와 SWCNT가 첨가된 DI water를 이용한 윤활 조건에서 금속과 탄소막 기관의 마찰 및 마모 특성이 어떠한 차이를 나타내는지 확인하고자 하였다. 탄소막 코팅의 경우 DI water에 첨가된 SWCNT가 코팅의 마찰 및 마모를 줄이는데 영향을 미치지 못하였음을 확인하였다. 오히려 SWCNT를

첨가시킴으로써 마찰계수와 마모율이 모두 증가하는 결과를 얻었다. 특히 첨가된 SWCNT의 양이 증가할수록 탄소막 코팅의 마찰 및 마모 특성이 악화되는 정도가 심해지는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과는 탄소막 코팅의 경우, 이미 DI water 윤활 시 트라이볼로지 특성이 우수한 코팅으로, 첨가된 SWCNT가 오히려 탄소막 코팅과 물 윤활제 사이의 윤활 효과를 악화하는 역할을 하였다고 판단된다. 마찰계수의 경우, 나노 입자의 양이 증가할수록 마찰계수가 상승하는 것이 확인되었다. 하지만 마모율의 경우, SWCNT의 양이 증가하여도 마찰계수에 비해 마모가 악화되는 정도는 심하지 않았다. 이는 탄소막 코팅의 높은 경도에 의해 SWCNT에 의한 마모 악화 현상이 일부 약화된 것으로 판단된다.

이와 반대로 금속의 경우 SWCNT를 DI water에 첨가시킴으로써 마찰 및 마모 감소 효과가 극대화됨을 확인할 수 있었다. 고속도강과 스테인리스 스틸 모두 SWCNT 나노 입자가 첨가된 DI water 윤활 조건에서 마찰계수가 낮고 안정적으로 측정되었으며, 마모율도 크게 감소한 것이 확인되었다. 금속의 경우 탄소막 코팅과 다르게 순수한 DI water에서는 좋은 윤활 효과를 나타내지 못하였다. 하지만 SWCNT가 DI water에 첨가됨으로써 윤활 효과가 급격히 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 향상된 윤활 효과로 인해 측정된 금속의 마찰계수와 마모율은 탄소막 코팅의 마찰계수와 마모율에 비교하여 높은 값을 나타냈으며, 이로 인해 SWCNT가 없는 순수한 DI water를 윤활제로 이용한 탄소막 코팅에서 가장 우수한 마찰 및 마모 특성이 나타남을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 여러가지 종류의 기관에 대하여 DI water와 SWCNT의 윤활 효과 비교를 위한 실험을 진행하였으며, 다음의 결론을 얻었다.

1. 일반 금속의 경우, DI water에 첨가된 SWCNT는 마찰계수를 약 80% 감소시키고, 마모율을 약 90% 감소시켜 윤활 효과를 향상시킨다.
2. 탄소막 코팅의 경우, DI water에 첨가된 SWCNT가 코팅의 마찰 및 마모를 줄이는데 영향을 미치지 못하며 0.1 wt%의 SWCNT 수용액의 경우 마찰계수와 마모율이 약 2배 증가하였다.
3. 본 연구의 결과 순수한 DI water를 이용한 탄소

막 코팅의 윤활에서 가장 우수한 저마찰 및 저마모 특성을 얻을 수 있었다.

본 연구를 통해 얻은 결과는 금속과 탄소막 코팅을 이용한 친환경 물 윤활과 관련된 연구에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgements

이 논문은 2017년도 정부 (과학기술정보통신부) 의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2010-0018289).

References

- [1] Yoo, S. S., Kim, D. E., "Minimum lubrication technique using silicone oil for friction reduction of stainless steel", *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 14, No. 6, pp. 875-880, 2013.
- [2] Boyde, S., "Green lubricants. environmental benefits and impacts of lubrication", *Green Chem.*, Vol. 4, pp. 293-307, 2002.
- [3] Nagendramma, P., Kaul, S., "Development of eco-friendly/biodegradable lubricants: An overview", *Renew. Sust. Energ. Rev.*, Vol. 16, No. 1, pp. 764-774, 2012.
- [4] Peng, Y., Hu, Y., Wang, H., "Tribological behaviors of surfactant-functionalized carbon nanotubes as lubricant additive in water", *Tribol. Lett.*, Vol. 25, No. 3, pp. 247-253, 2007.
- [5] Eloma, O., Singh, V. K., Iyer, A., Hakala, T. J., Koskinen, J., "Graphene oxide in water lubrication on diamond-like carbon vs. stainless steel high-load contacts", *Diam. Relat. Mat.*, Vol. 52, pp. 43-48, 2015.
- [6] Persson, K., Gåhlin, R., "Tribological performance of a DLC coating in combination with water-based lubricants", *Tribol. Int.*, Vol. 36, No. 11, pp. 851-855, 2003.
- [7] Suzuki, M., Tanaka, A., Ohana, T., Zhang, W., "Frictional behavior of DLC films in a water environment", *Diam. Relat. Mat.*, Vol. 13, No. 4-8, pp. 1464-1468, 2006.
- [8] Tanaka, A., Suzuki, M., Ohana, T., "Friction and wear of various DLC films in water and air environments", *Tribol. Lett.*, Vol. 17, No. 4, pp. 917-924, 2004.
- [9] Uchidate, M., Liu, H., Iwabuchi, A., Yamamoto, K., "Effects of water environment on tribological properties of DLC rubbed against brass", *Wear*, Vol. 267, No. 9-10, pp. 1589-1594, 2009.
- [10] Ronkainen, H., Varjus, S., Holmberg, K., "Friction and wear properties in Dry, Water- and Oil-lubricated DLC against alumina and DLC against steel contacts", *Wear*, Vol. 222, No. 2, pp. 120-128, 1998.
- [11] Zhao, F., Li, H. X., Mo, Y. F., Quan, W. L., Du, W., Zhou, H. D., Chen, J. M., "Superlow friction behavior of si-doped hydrogenated amorphous carbon film in water environment", *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 203, No. 8, pp. 981-985, 2009.
- [12] Wang, Q., Zhou, F., Zhou, Z., Yang, Y., Yan, C., Wang, C., Zhang, W., Li, L. K. Y., Bello, I., Lee, S. T., "Influence of Ti Content on the Structure and Tribological Properties of Ti-DLC Coatings in Water Lubrication", *Diam. Relat. Mat.*, Vol. 25, pp. 163-175, 2012.
- [13] Stallard, J., Mercks, D., Jarratt, M., Teer, D. G., Shipway, P. H., "A study of the tribological behaviour of three carbon-based coatings, tested in air, water and oil environments at high loads", *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 177-178, pp. 545-551, 2004.
- [14] Kim, H. J., Shin, D. G., Kim, D. E., "Frictional behavior between silicon and steel coated with graphene oxide in dry sliding and water lubrication conditions", *Int. J. Precis. Eng. Manuf. -Green Tech.*, Vol. 3, No. 1, pp. 91-97, 2016.