

DOI <http://dx.doi.org/10.9725/kstle.2014.30.5.291>

## 나노다이아몬드가 첨가된 윤활제의 마모 특성 연구

김승택<sup>1</sup> · 김승목<sup>1</sup> · 박태희<sup>2</sup> · 이정석<sup>2</sup> · 이영제<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>성균관대학교 기계공학과, <sup>2</sup>주네오엔비즈

### Study on Wear Characteristics of Lubricants with Nano-diamond Additives

Seung Taek Kim<sup>1</sup>, Seung Mok Kim<sup>1</sup>, Tae Hee Park<sup>2</sup>, JungSeok Lee<sup>2</sup> and YoungZe Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, SungKyunKwan University

<sup>2</sup>Neoebiz Corporation

(Received July 9, 2014 ; Revised August 29, 2014 ; Accepted September 6, 2014)

**Abstract** – Multiple additives can help improve the performance of generally used lubricants. These additives include MoS<sub>2</sub>, cadmium, chloride, indium, sulfide, and phosphide, which are harmful to both humans and the environment. Thus, researchers in this industry have been trying to reduce the use of these additives by finding alternatives. Nanodiamonds are one of these candidates. Nanodiamond particles are very hard, chemically stable, and highly heat-conductive. This research involved uniformly dispersing nanodiamond particles in marine engine oils via a matrix synthesis method at various concentrations (0, 0.1, 0.3, 0.5, and 1.0 wt). Friction and wear tests involved constant loads on ball-on-disk specimens, where the ball was AISI 51200 steel, the disk was AISI 1020 steel, and the sliding speed was 0.217 m/s. The lowest wear occurred at a suitable concentration of nanodiamonds (0.3 wt). However, excessive amounts of nanodiamonds caused them to act as abrasive debris because of their hardness, which increased the wear amount. The friction coefficient decreased as the nanodiamond concentration increased because their octagonal, almost spherical shape caused them to act as rolling contact elements between two surfaces.

**Keywords** – nanodiamond (나노다이아몬드), wear amount (마모량), friction coefficient (마찰계수)

### 1. 서 론

상대운동을 하는 기계들의 중요한 요소가 바로 마찰이다. 이러한 기계들이 원활하게 상대운동을 하지 못하고 마찰이 심하게 일어난다면 마찰 부위의 온도가 급격하게 상승하여 표면과피 현상의 일종인 스킨핑이 발생할 것이고[1], 이로 인해 기계가 손상되어 비용 손실이 발생할 것이다. 기계의 원활한 움직임을 위해서 윤활유가 쓰여지는데, 이러한 윤활유에는 성능 향상을 위해 다양한 첨가제들이 들어가고 있다. 하지

만 이러한 첨가제들은 MoS<sub>2</sub>, cadmium chloride, indium, sulfide, phosphide와 같은 중금속 계열의 물질로 자연과 인체에 유해하므로 각국에서는 이러한 물질들의 첨가제의 사용을 줄여가고 있는 추세이다[2]. 따라서 친환경적인 첨가제에 대한 관심이 늘고 있는데, 친환경적인 첨가제로는 탄소나노튜브, 그래파이트, 풀러린, 나노다이아몬드, 구리입자 등 금속, 유/무기 재료와 같은 물리적 기반의 첨가제들이 주를 이루고 있으며, 이에 대한 연구 또한 활발하다[3-7]. 이러한 나노 입자에 의한 윤활 메커니즘으로 콜로이드 효과, 구름 효과, 보호막 생성 등 다양한 이론이 주장되고 있다. 이에 대해서 나노다이아몬드 입자를 실제 사용되고 있는 윤활제에 분산 시켰을 때, 윤활 메커니즘

\*Corresponding author : yzlee@skku.edu  
Tel: +82-31-290-7444, Fax: +82-31-290-5276

에 어떤 효과가 나타나는지에 대해 마찰 마모 실험 및 표면 분석을 연구를 하였다.

## 2. 실험

### 2-1. 나노다이아몬드 분산

(주)네오엔비즈는 매트릭스 합성법을 이용하여 나노다이아몬드 입자(ITC, USA)를 윤활유에 분산시켰다. 나노다이아몬드의 입자는 구형에 가까운 형태이며, Fig. 1은 TEM을 이용하여 촬영한 사진이다. 매트릭스 합성법은 (주)네오엔비즈의 독자적인 기술로 뭉침 현상 억제, 고른 분산도, 저비용 대량 생산이 가능한 장점이 있다 [8]. 이와 같은 방법으로 나노다이아몬드를 분산시킨 윤활유는 Fig. 2과 같이 Turbiscan을 이용하여 측정할 결과 상온에서 6개월 이상 보관하여도 침전 현상이 발

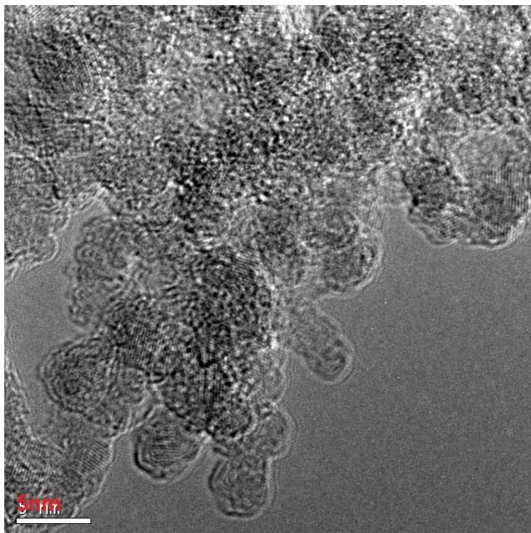


Fig. 1. T.E.M image of nanodiamond powder.

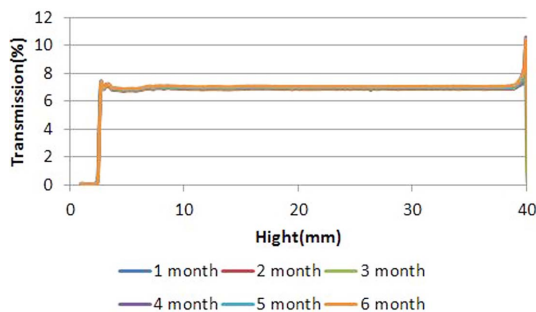


Fig. 2. The dispersion stability measurement results by Turbiscan.

생하지 않았다. 실험에 사용된 오일은 Oil 1(SK Supermar 13TP)와 Oil 2(CALSL-13506)이고, 나노다이아몬드 입자를 각각 0, 0.1, 0.3, 0.5, 1.0 wt.%의 농도로 오일에 분산 시켰다.

### 2-2. 미끄럼 마찰/마모

마찰 및 마모 특성을 평가하기 위해 미끄럼 마찰 실험을 수행 하였다. 실험 방법은 ASTM G 99 방법을 사용하였으며, 실험 조건은 Table 1과 같다.

시편으로는 AISI1020 steel과, AISI52100 bearing steel ball을 사용하였다. 시편의 경도는 각각 190 HV와 745 HV이다. 본 연구에 사용한 미끄럼 마모 시험기의 개략도는 Fig. 3과 같다. 마모 실험은 30 kg의 고정하중에서 10분동안 실험을 진행한다. 미끄럼 속도

Table 1. Experiment detail

Ball specimen	AISI52100(745 HV)
Disk specimen	AISI1020(190 HV)
Lubricant 1, 2(wt.%)	0, 0.1, 0.3, 0.5, 1.0
Static load (kg)	30
Duration (min)	10
Sliding speed (m/s)	0.217
Sliding distance/cycle (mm)	100

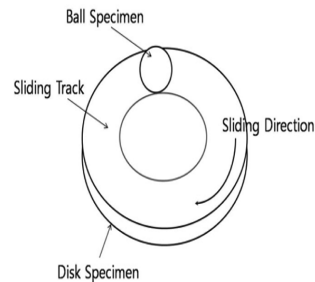


Fig. 3. Schematic of sliding wear tester.

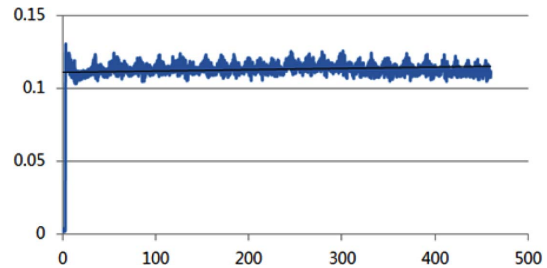


Fig. 4. Friction coefficient measurement.

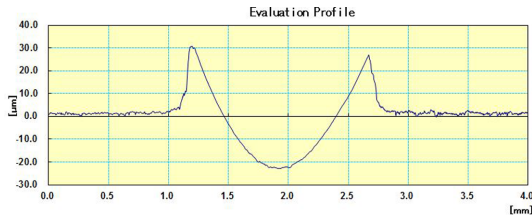


Fig. 5. Measurement wear track by roughness tester.

는 0.217 m/s이고, 한 cycle당 미끄럼 거리는 100 mm로 조정하였다. 10분동안 Fig. 4과 같이 미끄럼 마찰 실험 기기의 로드셀로부터 받은 마찰력과 하중 신호로 프로그램을 통해 평균 마찰계수를 구하였다. 실험 후 디스크 시편으로 Fig. 5와 같이 조도계로 마모흔을 측정 후 넓이를 구한 후 원주를 곱하여 마모량을 구하였다. 신뢰성을 높이기 위하여 시편 마모흔의 임의의 지점 4곳을 측정하였으며, 마찰, 마모 실험은 총 3번 실험을 진행하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 마찰계수 측정 실험

마찰계수 측정 결과, Fig. 6와 같이, 나노다이아몬드가 첨가된 농도가 증가할수록 마찰계수가 감소하는 것을 확인하였다. 이는 나노다이아몬드가 구형에 가까운 형태로 구름효과 및 마찰하는 두 표면간의 접촉면적을 감소시키는 것으로 볼 수 있다[9].

#### 3-2. 정하중 마모 실험

조도계를 이용하여 마모량을 측정한 결과, Fig. 7와 같이 두 오일에 동일하게 0.3 wt.% 농도에서 마모량이 가장 낮게 측정되었다. 마찰계수가 낮아지는 0.5, 1.0 wt.%에서는 오히려 마모량이 증가하는 결과값이 나왔다.

이에 대한 원인 분석을 위해 S.E.M(전자주사현미경)을 이용하여 표면분석을 하였다. Fig. 8가 각각 마모흔을 S.E.M을 이용하여 표면을 찍은 사진인데, 윤활제에 첨가된 나노다이아몬드의 농도가 높아 질수록 연삭마모의 흔적이 관찰된다. 이는 나노다이아몬드의 농도가 0.1 wt.%와 0.3 wt.%의 구간에서는 구름효과로서의 역할만을 수행하였다면, 그 이상의 농도에서는 자체 경도 값이 높아 농도가 높아 질수록 연삭 입자로서의 작용한다는 것을 확인하였다[10].

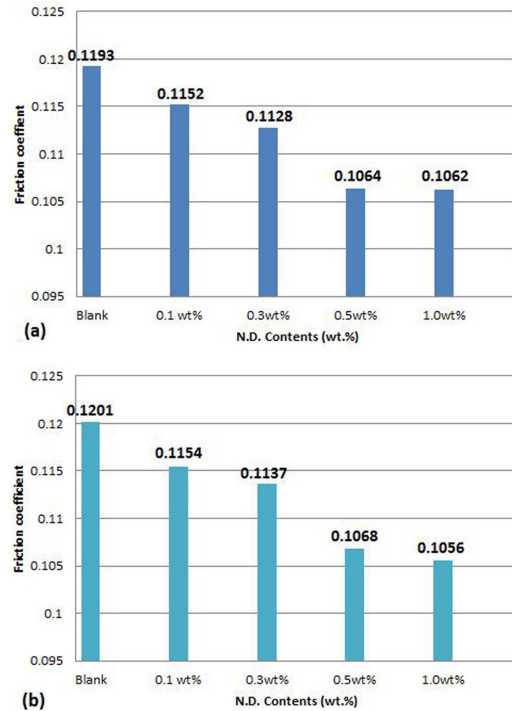


Fig. 6. Result of average friction coefficient (a) Oil 1, (b) Oil 2.

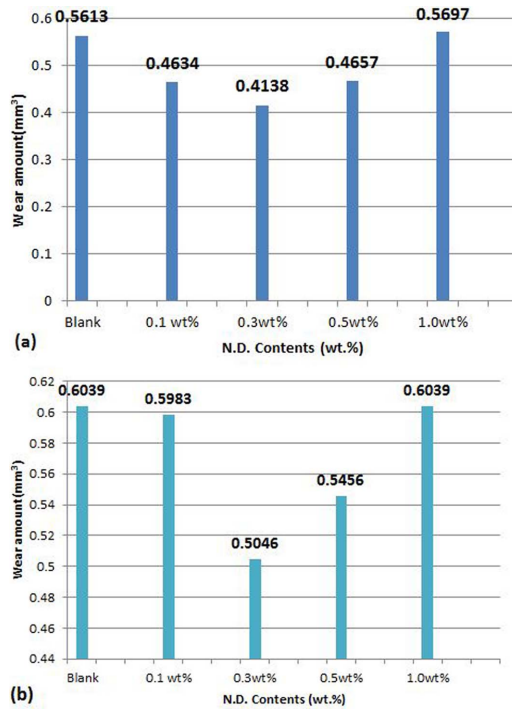


Fig. 7. Result of average wear amount(a) Oil 1, (b) Oil 2.

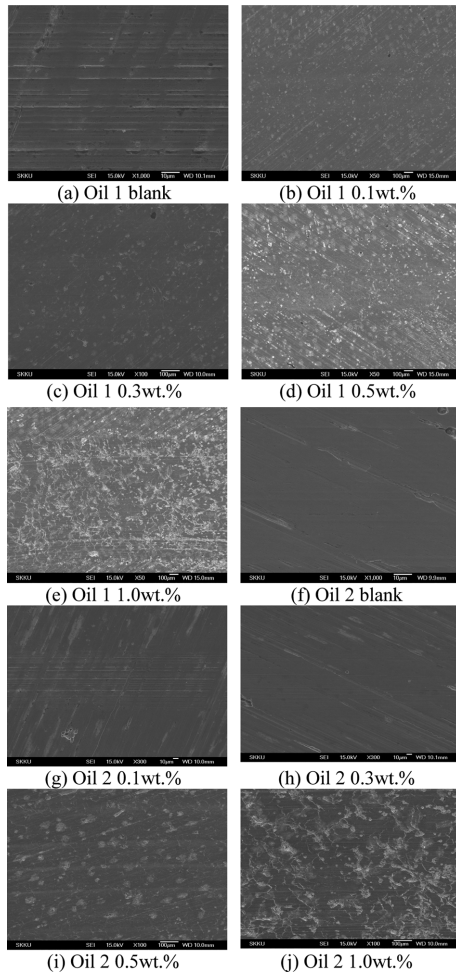


Fig. 8. SEM micrograph of wear track.

#### 4. 결 론

나노다이아몬드 첨가된 윤활제로 마찰/마모 시험을 진행하였고, 본 논문의 결론은 다음과 같다.

1. 나노다이아몬드의 첨가 농도가 높아질수록 마찰 계수가 감소하였다. 이는 나노다이아몬드의 구름 효과로 인한 것으로 보이며, 두 표면 간의 접촉면적을 감소 또한 마찰계수를 감소시킨다.

2. 마모량의 경우 나노다이아몬드를 첨가함에 따라 0.3 wt.% 농도까지는 구름 효과로 인하여 감소하였다. 하지만 그 이상의 농도에서는 나노다이아몬드의 자체 경도가 높아 오히려 연삭입자로 작용한다.

본 연구의 결론과 같이 나노다이아몬드의 농도와 표면의 경도에 따라 마찰/마모에 대해서 연구가 더 진행

되어 명확한 이론이 확립될 필요가 있다.

#### Acknowledgement

이 논문은 2012년 국토교통부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(선박 내 연기관 내구성 및 연비 향상을 위한 나노다이아몬드 윤활첨가제 개발).

#### References

- [1] Ajayi, O. O., Hersberger, J. G., Zhang, J., Yoon, H., Fenske, G. R., "Microstructural evolution during scuffing of hardened 4340 steel-implication for scuffing mechanism", *Tribology International*, Vol. 38, pp. 277-282, 2005.
- [2] Mang, M. and Dresel, W., *Lubricants, Lubrication*, Chap. 6, pp. 107-113, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Germany, 2007.
- [3] Chinas-Castillo, F., Spikes, H. A., "Mechanism of action of colloidal solid dispersions", *Trans. ASME*, Vol. 125, pp. 552-557, 2003.
- [4] Zhou, J., Yang, J., Zhang, Z., Liu, W., Xue, Q., "Study on the structure and tribological properties of surface-modified Cu nanoparticles", *Mater. Res. Bull.*, Vol. 34, No. 9, pp. 1361-1367, 1999.
- [5] Chen, S., Liu, W., "Oleic acid capped PbS nanoparticles: synthesis, characterization and tribological properties", *Mater. Chem. Phys.*, Vol. 98, pp. 183-189, 2006.
- [6] Rapoport, L., Leshchinsky, V., Lapsker, I., Volovik, Y., Nepomnyashchy, O., Lvovsky, M., Biro, R.P., Feldman, Y., Tenne, R., "Tribological properties of WS<sub>2</sub> nanoparticles under mixed lubrication", *Wear*, Vol. 255, pp. 785-793, 2003.
- [7] Rapoport, L., Leshchinsky, V., Lvovsky, M., Lapsker, I., Volovik, Y., Feldman, Y., Biro, R. P., Tenne, R., "Superior tribological properties of powder materials with solid lubricant nanoparticles", *Wear*, Vol. 255, pp. 794-800, 2003.
- [8] Park, T. H., Lee, J. S., Lee, K. T. KR-A-10-2011-0093700, 2011.
- [9] Oskari Elomaa, Jussi Oksanen, Timo J. Hakala, Olga Shenderova, Jari Koskinen, "A comparison of tribological properties of evenly distributed and agglomerated diamond nanoparticles in lubricated high-load steel-steel contact", *Tribology International*, Vol. 71, pp. 62-68, 2014.
- [10] Lee, G. S., Kim, H. S., Lee, J. H., Park, T. H., Lee, J. S., Lee, Y. Z., "Tribological Characteristics of Paraffin Liquid Oil with Nanodiamond and Effects of Surface Hardness on Wear Properties", *Tribology Transactions*, Vol. 27, pp. 321-325, 2011.