

나노 다이아몬드 입자를 첨가한 엔진 오일의 알루미늄 6061 합금에 대한 마모 특성

황성완*[#]

*한국폴리텍대학 부산캠퍼스 자동차과

Wear Characteristics of Lubricant with Nano-diamond Particles on Al-6061 Aluminum Alloy

Sung-Wan Hwang*[#]

*Department of Automotive Engineering, Busan Campus of Korea Polytechnics
(Received 23 September 2021; received in revised form 18 October 2021; accepted 19 October 2021)

ABSTRACT

Pin-to-disc wear testing experiments were conducted to investigate the wear characteristics of commercial oil (5W-40) with nano-diamond particles. The upper specimen was a SUJ-2 high-carbon chromium steel ball with a diameter of 4 mm, and the lower specimen was made of the Al-6061 alloy. The applied load was 5 N, and the sliding speed was 0.25 m/s. The wear tests were conducted at a sliding distance of 500 m. The friction coefficients and wear rates of the Al-6061 specimens were tested using commercial oil with different nano-diamond concentrations ranging from 0 to 0.02 wt.%. The addition of nano-diamond particles to commercial oil reduced both the wear rate and coefficient of friction of the Al-6061 alloy. The use of nano-diamond particles as a solid additive in oil lubricants was found to improve the tribological behavior of the Al-6061 alloy. For the Al-6061 alloy, the optimal concentration was found to be 0.005 wt.% in view of the friction coefficient and wear rate. Further investigation is needed to determine the optimal concentration of nano-diamond particles for various loadings, sliding speeds, oil temperatures, and sliding distances.

Keywords: Nano-diamond(나노다이아몬드), Commercial Oil(상용 오일), Al-6061 Alloy(Al-6061 합금), Tribology (마찰공학), Friction Coefficient(마찰계수)

1. 서 론

윤활유의 기능은 윤활작용(Lubricating), 냉각작용(Cooling), 밀봉작용(Sealing), 세정작용(Cleaning), 방청작용(Anti-corrosion), 응력분산작용(Stress distribution), 소음감쇠작용(Noise damping) 등이 있

다.^[1] 윤활유의 성능을 개선하기 위하여 가장 많이 적용되는 방법은 윤활유 조성물에서 첨가제를 혼합하는 것이다. 이 첨가제 중에는 MoS₂, Cd 등 주로 중금속물질로 환경에 유해한 물질이 있어 최근에는 전 세계적으로 이러한 첨가제를 줄여가고 있으며, 이에 대한 대응방안으로 나노 다이아몬드(Nano-diamond, ND)가 대안으로 떠오르고 있다.^[2] ND는 친환경 탄소 소재로서 내마모성, 굽힘 방지성이 우수하며 높은 경도 값을 가지고 있다. 또한

Corresponding Author : jaebeol@naver.com

Tel: +82-51-330-7816, Fax: +0504-488-3930

내부식성, 내산성, 내염기성도 우수하여 화학적으로 안정성을 가지고 있다. 또한, ND는 매우 안정적인 관계로 미소량을 엔진오일에 첨가하여도 오일의 점도를 포함한 기본적인 물성치에 변화가 거의 없는 엔진오일 첨가물이다.

윤활유에 소량의 ND를 첨가하여 실험한 결과 마찰계수 감소, 마모량 감소, 스커핑 수명증가 등의 효과가 있다고 보고 되었다.^[3-9] 예로 Chu 등은 SKD11과 SKD61 합금강을 시험편으로 적용하여 다양한 분율의 ND를 첨가한 오일의 스커핑 저항 물성치를 평가하였다.^[3] 평가결과 3%의 ND를 첨가한 오일이 마모율 저감 측면에서 가장 우수한 것으로 보고하였다. Chou와 Lee는 중탄소강과 저탄소강에 대하여 크롬 탄소강 볼을 적용하여 ND를 첨가한 오일의 트라이볼로지 물성치를 평가하였다.^[4] 평가결과 탄소강의 경우 ND 입자를 첨가한 오일의 경우 마찰력과 마모율을 감소시킨다고 보고하였다. Lin 등은 ND 입자를 첨가한 윤활유에 대하여 SKD11 공구강을 접촉재료로 다양한 속도와 하중 조건에서 트라이볼로지 특성과 스커핑 저항을 평가하여 ND를 첨가함으로써 내스커핑 효과와 마찰감소에 효과가 있음을 증명하였다.^[5] Joly-Pottuz 등은 어닐링(Annealing)한 ND를 미세한 양과형태의 탄소 덩어리로 합성하여 윤활유에 첨가한 결과 1GPa 이상의 접촉압력에서 마찰이 매우 낮은 것으로 보고하였다.^[6] Lee 등은 윤활유에 ND를 첨가하여 마찰 및 마모 실험을 수행하였다.^[7] 경도가 높은 열처리 강 시험편의 경우, ND 입자들이 표면 돌기 사이의 스페이서(Spacer) 역할을 하여 구름접촉을 일으킴으로써 마멸을 감소시키는 것으로 보고하였다. 반대로 비열 처리된 저탄소강 시험편의 경우 ND 입자에 의하여 연삭 마멸이 발생하여 ND 첨가 시 마멸되는 양이 증가함을 보고하였다. 지금까지 ND 첨가 윤활유의 효과에 대한 실험은 주로 철강을 대상으로 실험을 진행해 왔으며, 알루미늄 합금에 관한 연구는 미비하다.

본 연구에서는 ND가 첨가된 상용 엔진오일(SW-40)을 사용하여 Al-6061 T6합금 디스크와 고탄소 크롬강 SUJ-2 베어링 볼을 적용하여 마찰·마모 실험을 수행하였으며 마모시험 중의 마찰계수를 측정하였다. 0~0.02 wt.%의 ND 첨가 시 변화에 따

른 마모 특성 시험을 통하여 알루미늄 합금으로 이루어진 부품에 ND를 첨가한 오일의 적용 가능성과 적합성을 파악하고자 한다. 최대 ND 함량은 유사연구^[3]를 참조하여 결정하였다.

2. 시험편 및 실험 방법

본 연구에서는 미끄럼 마찰·마모 시험을 위하여 Fig. 1과 같은 ball-on-disk 접촉방식의 마찰·마모시험 방법을 적용하여 실험하였다. ball-on-disk 방식의 경우, 왕복운동을 하는 엔진 방식과 다소 상이하나, 본 연구에서는 ND를 첨가한 오일의 알루미늄 합금의 적용성 여부를 평가하기 위하여 내마모 실험에 일반적으로 많이 적용하는 방법의 하나인 본 실험방법을 적용하였다. 실험 시스템은 Fig. 2와 같이 시험편에 수직 하중을 전달하는 하중 전달 시스템(Load train system), 시험편을 회전시키는 회전 운동 시스템, 시험편 회전을 위한 모터 제어 시스템, 회전하는 시험편에 접촉 하중을 가하는 볼에 의한 접선 하중을 측정하는 하중 측정 시스템 등으로 구성되어 있다. Fig. 3은 시험편이 장착된 상태의 시험기이다. ①은 LM 가이드, ②는 weight stay, ③은 ball chuck, ④는 포토센서, ⑤는 시험편 홀더, ⑥은 턴 테이블, ⑦은 턴 테이블 고정구, ⑧은 벨트 풀리, ⑨는 모터이다.

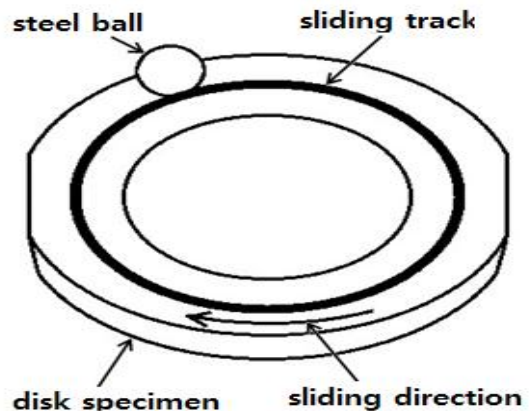


Fig. 1 Ball on disk wear test in the nanodiamond oil bath

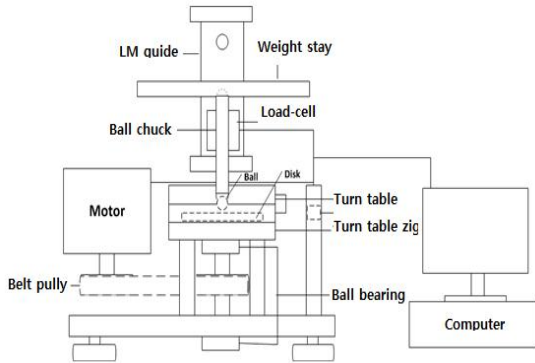


Fig. 2 Schematics of the ball on disk type wear testing machine system

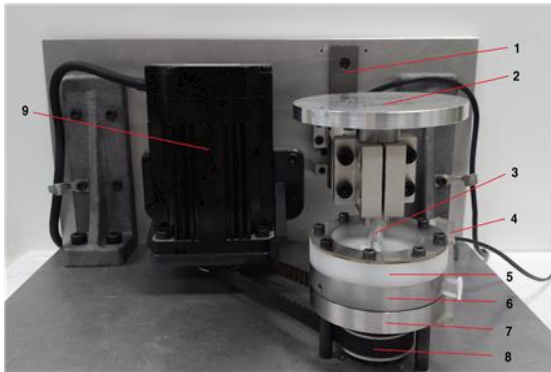


Fig. 3 Assembled the wear testing machine

본 연구에 사용된 시편은 대표적인 알루미늄 합금의 하나인 Al-6061 합금(경도 204.8 Hv)으로 내경 24mm, 외경 40mm, 두께 5mm의 디스크 형태로 제작하여 사용하였다. 접촉 하중을 가하는 볼의 재질은 경도 511.4 Hv 고탄소 크롬강인 SUJ-2로 직경 4mm의 볼을 사용하여 마찰-마모 시험을 수행하였다. 마찰-마모 시험은 경계윤활 조건에서 볼 접촉 하중을 5N, 미끄럼 거리 500m, 미끄럼 속도 0.25m/s로 수행하였다. 각 시험편 당 6회 실험을 통하여 평균값으로 평가하였다. 시험 중에 초당 1회 마찰계수를 측정하였으며, 마모시험 후에 표면 거칠기 시험기를 통하여 표면 상태를 관찰하였다. 각 시험편은 실험 전에 동일한 조건으로 최종적으로 0.05 μ m 알루미나 연마제를 사용하여 표면을 연마하여 마찰-마모 실험을 수행하였다. 시험편 표면의 평균 거칠기(Ra)는 연마제

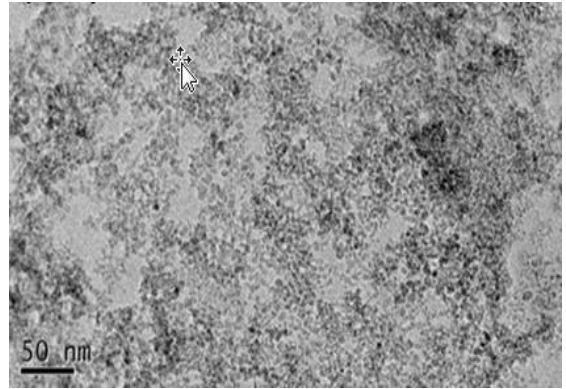


Fig. 4 TEM of nanodiamond powders in the oil

의 거칠기와 동일한 0.05 μ m로 확인하였다. 실험에 사용된 윤활유는 일반 자동차용 엔진오일(5W-40)로 이 오일에 0.005 wt.% ~ 0.02 wt.%의 ND를 첨가하여 제조된 첨가제 함량이 다른 5종과 첨가하지 않은 오일 총 6종의 오일을 사용하였다. ND가 첨가된 윤활유는 Fig. 4와 같이 정제 표면 처리를 하여 입자 크기가 4~6 nm인 ND 입자들이 다양한 크기로 균집하며 높은 분산 안정성을 갖는 오일로 (주)대화알로이테크에서 제조하여 공급받았다.

마찰-마모시험 시의 볼의 접촉압력을 Hertz 탄성 접촉 이론을 바탕으로 최대 접촉압력과 접촉반경을 도출할 수 있다. 볼과 디스크 사이에 접촉하중 P가 작용하는 탄성 접촉으로 발생하는 최대접촉압력 p_{max} 을 아래의 식으로 도출할 수 있다.

$$a = \sqrt[3]{\frac{3\pi}{4} \frac{P(k_1+k_2)R_1R_2}{R_1+R_2}} = \sqrt[3]{\frac{3\pi}{4} \frac{P(k_1+k_2)R_2}{1+R_2/R_1}} \quad (1)$$

여기서 R_1 , R_2 는 각각 알루미늄 판재 평판의 반경, 철강 볼의 반경에 해당하여 $R_1=\infty$, $R_2=2\text{mm}$ 이다.

또한 $k_1 = \frac{1-\nu_1^2}{\pi E_1}$, $k_2 = \frac{1-\nu_2^2}{\pi E_2}$ 이다.

알루미늄과 철강의 포와송비 $\nu_1 = \nu_2 = 0.3$ 이며, $E_1 = 70\text{GPa}$, $E_2 = 210\text{GPa}$ 로 가정할 경우 $k_1 = 0.0000041 \text{ mm}^2/\text{N}$, $k_2 = 0.00000138 \text{ mm}^2/\text{N}$ 이다. 접촉면에 가해지는 힘, P(= 5N)를 식 (1)에 적용하면, $a = 50.5\mu\text{m}$ 이다.

$$a = \sqrt[3]{\frac{3\pi}{4} \frac{P(k_1+k_2)R_2}{1+R_2/R_1}} = \sqrt[3]{\frac{3\pi}{4} \frac{P(k_1+k_2)R_2}{1}} \quad (2)$$

$$= \sqrt[3]{\frac{3\pi}{4} \frac{5(0.0000041+0.00000138)2}{1}}$$

$$= 0.0505mm = 50.5\mu m$$

이때 최대 접촉압력은 식 (3)을 적용하여 다음과 같이 $p_{max} = 936.6 MPa$ 로 계산된다.

$$p_{max} = \frac{3P}{2\pi a^2} = \frac{3 \times 5N}{2\pi (0.0505mm)^2} = 936.6 MPa \quad (3)$$

이 접촉압력은 본 실험에 사용한 디스크 재료 (Al-6061 T6)의 항복강도(= 275 MPa)를 훨씬 초과한 응력으로 볼 접촉 시 소성변형이 발생할 것으로 판단된다.

3. 실험결과 및 고찰

나노 다이아몬드의 함유량에 따라 시험편의 마모율, 마찰계수 변화, 표면 조도 측정 및 표면 관찰 등을 통하여 엔진오일에 있어서 ND 첨가에 의한 마찰·마모 변화 거동을 고찰하였다.

3.1 마모율 및 마찰계수

마모시험 전과 후의 시험편 무게를 측정할 경우 마모량이 매우 적어서 측정 시 어려움이 예상된다. 따라서 표면 거칠기 실험 결과를 통하여 마모율을 결정하였다. 마모율은 기준면 하단의 마모된 면적에 시험편의 마모된 궤적의 평균 원주를 곱하여 마모 부피를 계산하였다. 이를 작용 하중과 전체 이동 거리(= 500m)로 나누어 마모율을 결정하였다. Table 1은 다양한 함량의 나노 다이아몬드가 첨가된 윤활유의 마모율과 평균 마찰계수를 요약한 결과이다. Fig. 5는 다양한 나노 다이아몬드가 첨가된 윤활유의 마모율을 나타낸 그래프이다. Fig. 5를 통하여 500m의 마모 실험 후 0 ~ 0.02 wt.% 중 0.005 wt.% ND를 첨가한 오일이 가장 마모율이 적으며 ND를 첨가하지 않은 오일에 비하여 마모량이 25% 감소한 것으로 나타났다.

Table 1 Wear rate and average friction coefficient of the specimens with different ND concentration oils after 500m wear test

Nano-diamond concentration (wt.%)	Friction coefficient	Wear rate (mm ³ /N-m)
0	0.117	6.64 x10 ⁻⁷
0.005	0.115	5.00 x10 ⁻⁷
0.0075	0.117	5.72 x10 ⁻⁷
0.010	0.117	6.48 x10 ⁻⁷
0.015	0.119	7.56 x10 ⁻⁷
0.020	0.121	6.92 x10 ⁻⁷

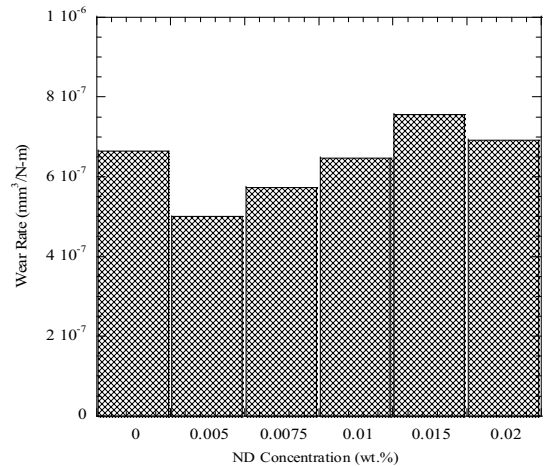


Fig. 5 Wear rate of disk after 500m wear test [10]

이와 같은 결과는 ND 첨가 윤활유 관련 선행 연구결과⁴⁾들과 비교하였을 때, ND 입자들이 시험편의 표면 돌기 사이에 끼어 일종의 구름 베어링 역할을 하여 마멸을 감소시켰을 것으로 사료된다.

그러나 ND 함량이 증가할수록 전반적으로 마모량이 지속해서 증가하여 0.015% 첨가할 경우 최대임을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 ND 첨가 윤활유 관련 선행 연구결과⁴⁾들과 비교하였을 때, 일정 이상의 ND 첨가로 인하여 ND가 일종의 연삭제 역할을 하는 것으로 판단된다. 즉, Al-6061합금의 경우 경도가 낮으므로 일정 이상의 ND 첨가로 인하여 연삭 마멸 효과가 발생하는 것으로 판

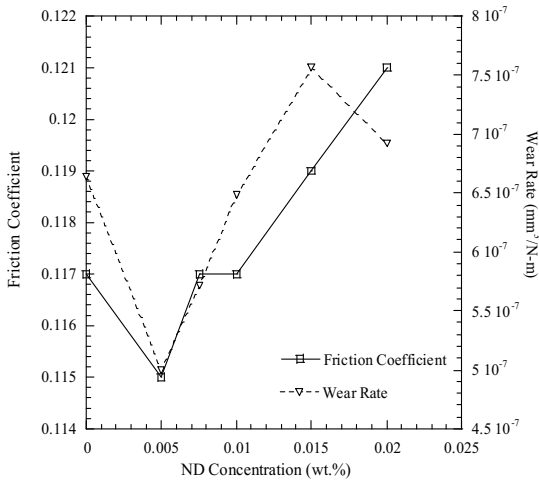


Fig. 6 Relation between wear rate and average friction coefficient with different ND concentration oils^[10]

단된다.

본 연구결과는 통상적으로 낮은 경도의 철강과는 상반되는 결과이다. 철강의 경우 경도가 낮으면 ND가 일종의 연삭제 역할을 하여 마모율을 증가시키는 것으로 알려져 있다.⁷⁾ 그러나, 경도가 비교적 낮은 Al-6061 합금의 경우 ND 첨가량이 0.005%인 경우 ND가 일종의 마이크로 베어링 역할을 하여 마찰 및 마모율 개선에 이바지하는 것으로 나타남을 확인하였다.

ND 함유량별 마모시험 중의 평균 마찰계수는 0.115에서 0.121의 범위에 해당한다. ND 함유량별 마모시험 중의 평균 마찰계수와 마모율과의 상관관계는 Fig. 6과 같다. 이 그래프를 통하여 ND가 첨가된 오일의 경우 마찰계수가 마모율과 마찬가지로 0.005 wt.%가 가장 낮은 것으로 나타났다. 또한 ND 함유량별 마모시험 중의 평균 마찰계수와 마모율은 거의 비례함을 알 수 있다. 이는 마찰계수가 마모율을 주도하는 것으로 판단된다.

3.2 표면 거칠기 분석

500m의 마모시험 후에 시험편의 표면 거칠기를 측정하기 위하여 Fig. 7과 같이 마모가 발생한 시험편의 거칠기를 관찰하고 측정하였다. 통상적으

로 마찰이 발생하는 두 재료의 경도가 다를 경우 경도가 낮은 쪽이 대부분 마모가 발생한다. 본 시험편의 경우 볼의 경도가 디스크 시험편보다 상대적으로 매우 높은 관계로 디스크에 상대적으로 많은 마모가 발생하였다. 500 m의 마찰시험 후 디스크의 표면 거칠기 측정결과는 Fig. 8과 같다.

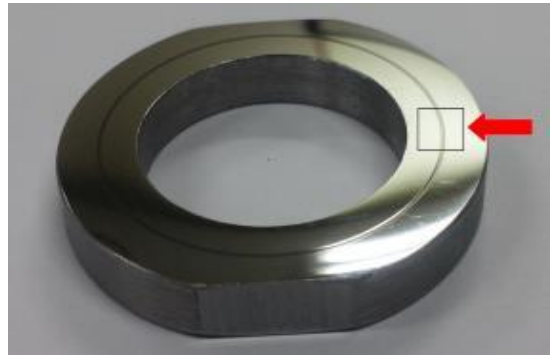
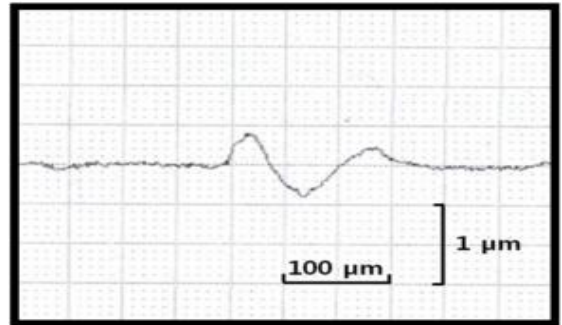
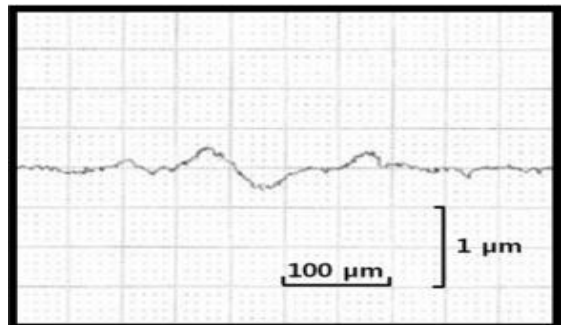


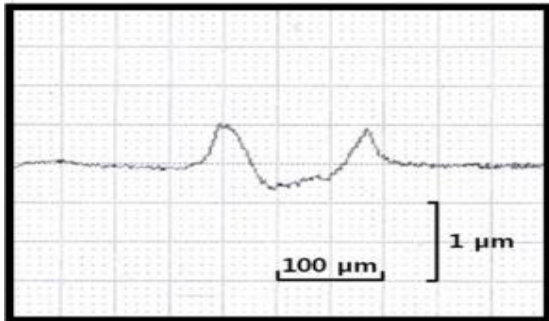
Fig. 7 Specimen location to measure surface profile after wear



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Surface profiles of the specimens with different ND concentrations (a) 0%, (b) 0.005% and (c) 0.02%

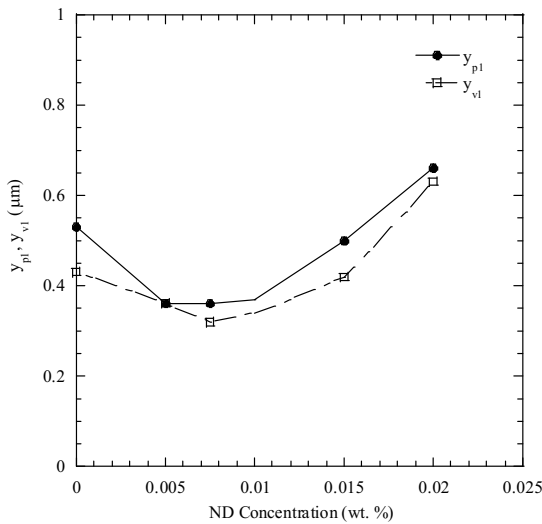


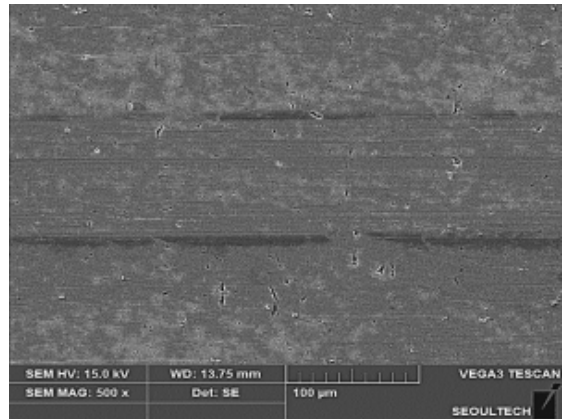
Fig. 9 Surface roughness parameters as a function of nano-diamond concentration

마모 시 시험편에 용기(File-up)가 발생하여 이 최고 높이를 y_{p1} , 가장 많이 마모된 깊이를 y_{v1} 으로 결정하여 측정하였다. 또한 용기된 산의 폭을 w , 기준면과 동일한 수준에서의 마모 폭을 δ 를 측정하였다. 한편 기준면 이하의 마모면적을 마모 폭 δ 로 나누어 평균 마모 깊이 h_{ave} 를 결정하였다. 측정결과 최대 마모 깊이 y_{v1} 의 경우 0.075wt. %가 $0.32\mu\text{m}$ 로 가장 작으며 0.02%가 $0.63\mu\text{m}$ 로 가장 큰 것으로 나타났다. 한편 ND 함유량별로 측정 파라

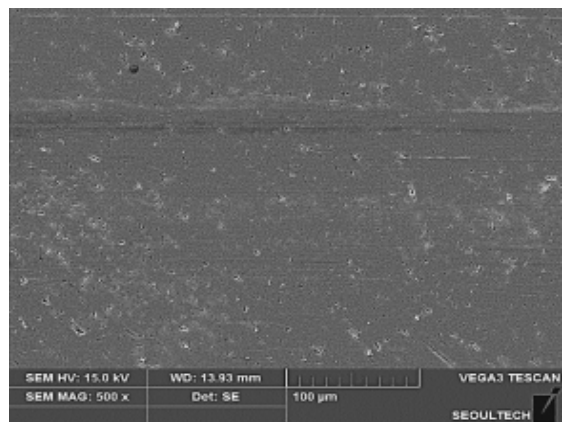
미터인 y_{p1} 과 y_{v1} 에 대하여 Fig. 9에 도시하였다.

그래프에서 보듯이 두 파라미터 모두 동일한 경향으로 0.005% 근처에서 가장 작은 값으로 0.02%가 가장 큰 값으로 나타났다. 이는 Fig. 8의 마모율의 결과와 매우 유사하다.

표면 조도는 측정결과와 디스크 시험편의 마찰 손상 면의 비교를 위해 동일한 마모손상 부분에 대하여 주사형 전자현미경을 사용하여 촬영하였다. 나노 다이아몬드가 0wt.%에서부터 0.02wt.%의 경우에 대하여 주사형 전자현미경을 통하여 마찰 손상 면을 관찰하였다.



(a)



(b)

Fig. 10 SEM micrographs of wear track after friction test using engine oil with (a) 0 wt.% and (b) 0.005 wt.% nano-diamond

Fig. 10(a)와 (b)는 각각 나노 다이아몬드가 0% 및 0.005 wt.% 일 때 마찰 면의 형상이다. 두 사진을 통하여 마모율 측면에서 최적의 함유율인 0.005wt.%의 경우 0%에 비하여 손상 면이 좀 더 매끄러움을 확인하였다. 6종류의 오일에 대한 마찰·마모 시험결과 마모 및 마찰저항 측면에서는 0.005 wt.% ND를 첨가한 오일이 가장 우수하였다. 그러나 본 연구는 일정한 하중 조건에서 수행한 연구로 결과의 현장 적용에는 제한적이다. 따라서 추후 다양한 하중, 미끄럼 속도, 미끄럼 거리 조건을 고려한 최적의 나노 다이아몬드 함량에 관한 연구가 요구된다. 또한 ND를 첨가한 오일의 현장 적용을 위해서는 현장에서 적용할 접촉하는 재료에 대한 다양한 마모 조건에서의 최적의 ND 함량에 관한 연구가 요구된다.

4. 결 론

디젤 차량용 엔진오일(5W-40)에 나노 다이아몬드를 첨가하여 마찰·마모 실험을 통하여 윤활 성능에 대한 나노 다이아몬드의 영향을 평가하였다. 나노 다이아몬드가 첨가되지 않은 오일을 비롯하여 나노 다이아몬드가 각각 0.005, 0.0075, 0.01, 0.015, 0.02wt.% 첨가된 오일에 대하여 각각 실험을 수행하였다. 볼 접촉 하중을 5N 가한 상태에서 알루미늄 Al-6061 T6 합금 디스크와 SUJ-2 고탄소 크롬강 베어링 볼이 미끄럼 거리 500m까지 마찰·마모 실험을 수행하였으며 실험 결과는 다음과 같다.

1. 500m의 마모 실험 후 0.005% ND를 함유한 오일이 가장 마모율이 낮으며 첨가하지 않은 오일에 비하여 마모량이 최대 25% 이상 감소한 것으로 나타났다. 이는 ND 입자들이 시험편의 표면 돌기 사이에 끼어 일종의 구름 베어링 역할을 하여 마멸을 감소시킨다. 그러나 첨가량이 그 이상으로 증가 시 0.015%인 경우 마모율이 가장 높다. 이는 Al-6061합금의 경우 경도가 낮으므로 일정 이상의 ND 첨가로 인하여 연삭 마멸 효과가 발생하는 것으로 판단된다.
2. ND 함유량별 마모시험 중의 평균마찰계수는

0.115에서 0.120의 범위에 해당하며 평균적으로 0.118이다. ND 함유량별 마모시험 중의 평균마찰계수와 마모율은 거의 비례하였다. 마찰계수도 0.005 wt.%가 가장 낮은 것으로 나타났다.

3. 500m의 마모시험 후 시험편이 최대 용기 높이 y_{pi} , 최대 마모된 깊이 y_{vi} , 기준면과 같은 수준에서의 마모 폭 δ 에 대하여 측정된 결과 마모 y_{pi} , y_{vi} , δ 는 마모율과 관계가 있는 매개변수로 판단된다. y_{vi} 의 경우 0.075wt.%가 $0.32\mu\text{m}$ 로 가장 작으며 0.02%가 $0.63\mu\text{m}$ 로 가장 큰 것으로 나타났다.
4. 총 6종류의 오일에 대한 마찰·마모 시험결과 ND의 함량에 따라 마찰 마모 특성이 달라지는 경향을 보이므로 추후 다양한 하중, 미끄럼 거리 등을 고려한 최적의 나노 다이아몬드 함량 비에 관한 연구가 요구된다.

REFERENCES

1. Nicholls, M. A., Do T., Norton P. R., Kasrai M., Bancroft, G. M., "Review of the Lubrication of Surface by Zine Dialkyl-dithiophosphates," Tribology Int., Vol. 38, pp. 15-39. 2005.
2. Wu, Y. Y., Tsui, W. C., & Liu, T. C., "Experimental Analysis of Tribological Properties of Lubricating Oils with Nanoparticle Additives", Wear, Vol. 262, No. 7-8, pp. 819-825, 2007.
3. Chou, C. C., & Lee, S. H., "Tribological Behavior of Nanodiamond-dispersed Lubrication on Carbon Steels and Aluminum Alloy", Wear, Vol. 269, pp. 757-762, 2010.
4. Chou, C. C., & Lee, S. H., "Rheological Behavior and Tribological Performance of a Nanodiamond-dispersed Lubricant", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 201, No. 1-3, pp. 542-547, 2008.
5. Chu, H. Y., Hsu, W. C., Lin, J. F., "The Anti-scuffing Performance of Diamond Nano-particles as an Oil Additive", Wear, Vol. 268, pp. 960-967, 2010.
6. Joly-Pottuz, L., Matsumoto, N., Kinoshita, H.,

- Vacher, B., Belin, M., Montagnac, G., ... & Ohmae, N., "Diamond-derived Carbon Onions as Lubricant Additives", *Tribology International*, Vol. 41, pp. 69-78, 2008.
7. 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 and Lubricants*, Vol. 27, No. 6, pp. 321-325, 2011.
8. Kwon, S. H., "Evaluation of wear characteristics of lubricant with nano-diamond", Dept. of Automotive Engineering Graduate School of Industry and Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 2013.
9. Jun, S. H., Uhm, Y. R., & Rhee, C. K., "Tribology Properties of Nano-diamond Dispersed Engine Oil", *Journal of Korean Powder Metallurgy Institute*, Vol. 18, No. 5, pp. 417-422, 2011.
10. Hwang S. W., Kim, M. J., Kwak, J. K., Han, D. W., Kim, H. K., "Wear characteristics of lubricant with nano-diamond particles on an aluminum alloy", *The Korean Society of Tribologists And Lubrication Engineers*, Vol. 63, No. 10, pp. 107-108, 2016.