

## 나노다이아몬드 첨가 윤활제가 디젤엔진의 성능에 미치는 영향

손권<sup>1</sup> · 이정석<sup>2</sup> · 박태희<sup>3</sup> · 박권하<sup>†</sup>

(Received July 7, 2014 ; Revised August 4, 2014 ; Accepted August 28, 2014)

### The effect of lubricant containing diamond nano-powder on performance

Kwun Son<sup>1</sup> · Jung-Seok Lee<sup>2</sup> · Tae-hee Park<sup>3</sup> · Kweon-Ha Park<sup>†</sup>

**요약:** 가혹한 조건에서 작동하는 디젤엔진의 윤활성능을 향상시키기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 특수윤활제로 사용되고 있는 나노다이아몬드를 포함한 윤활제를 디젤엔진에 적용하여 엔진성능에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 매트릭스 합성분산법에 의하여 제조된 나노다이아몬드 윤활제를 농도별로 실험하여 기본윤활제와 비교하였다. 실험결과 마찰저감에 의한 효율의 향상과 일산화탄소, 스모크 등의 배기 저감의 효과를 확인하였다.

**주제어:** 엔진윤활, 다이아몬드 나노분말, 디젤 엔진

**Abstract:** Many research works have been conducted to improve a lubrication performance on diesel engines working in severe conditions. In this study the lubricant containing diamond nano-powder is applied on a diesel engine, and the engine performance is analyzed. The concentration of nano-diamond lubricant fabricated by the matrix synthesis dispersion method is varied. The test results with the nano lubricants are compared with the base oil. The result shows the improvement of efficiency with friction reduction and exhaust emissions reduction of CO, smoke and so on.

**Keywords:** Engine lubrication, Diamond nano-powder, Diesel engine

## 1. 서론

디젤엔진은 윤활조건이 매우 가혹한 상태에서 운전되기 때문에 고성능의 윤활유 개발에 많은 연구가 진행되고 있다[1][2]. 특히 극압윤활성을 개선하기 위하여 고체윤활제가 연구되었으나 초기에 사용되던 분말의 화학적 물성 및 입자 크기에 의한 뭉침 현상 등의 이유로 연소를 동반한 실기관에 적용하기에는 어려움이 있었다[3]-[5]. 특수윤활제로 사용되고 있는 나노다이아몬드를 혼합한 윤활제는 분산과 냉각성능이 우수하고, 실린더 내부의 밀봉성 향상에 의한 연소활성화 또한 기대할 수 있기 때문에 실기관에 적용하고자 하는 연구가 진행되고 있다[6]-[10].

나노사이즈의 다이아몬드 분말을 유체에 분산시킨 나노다이아몬드 유체는 일반유체보다 월등한 열전도성능을 나타내기 때문에 엔진실린더의 고온냉각에도 효과를 기대할 수 있다[11]-[16].

비교적 큰 입자크기로 인한 마찰 접촉면의 스킵핑 현상과 같은 문제점은, 나노사이즈의 분말이 분산된 경우에는 확인되지 않았으며 경우에 따라서 더욱 향상되는 결과

를 나타냈다[17].

본 연구에서는 나노다이아몬드 윤활제를 첨가한 윤활유를 디젤엔진에 적용하여 0, 0.1, 0.3, 0.5, 1 wt%의 다이아몬드 농도 조건에서 엔진속도와 부하 조건을 변화하면서 엔진실험을 실시하였으며, 이를 분석하여 나노다이아몬드 윤활제가 디젤엔진의 성능에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 실험장치 구성 및 방법

### 2.1 나노유체 제조 및 분산 안정도

나노다이아몬드 윤활제 첨가 윤활유의 제조는 낮은 제조비용, 높은 생산성, 높은 분산성의 특징을 가지는 매트릭스합성 분산법을 사용하여 기본유체에 각각 0.1, 0.3, 0.5, 1wt%로 분산하여 제조하였다[18]. Figure 1은 포물렉션 사의 터비스캔 장비를 이용하여 분산안정성을 측정된 그래프이다. 투명한 용기에 제조된 나노유체를 채운 후, 빛을 투과시켜 그 산란되는 패턴을 그래프화하고, 일정 주기마다 반복 측정하여 얻어진 그래프들과 비교하는 방식으로 분산안정성을 평가한다. 측정 결과 30일 이상 응집 및 침전현상이 관찰되지 않았다.

<sup>†</sup> Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9460-8399>): Division of Mechanical & Energy Systems Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Dongsam-dong, Yeongdo-gu, Busan, 606-791, Korea, E-mail: [khpark@kmou.ac.kr](mailto:khpark@kmou.ac.kr), Tel: 051-410-4367

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: [realsonkwun@naver.com](mailto:realsonkwun@naver.com), Tel: 051-410-4953

<sup>2</sup> Neoenbiz, Co, E-mail: [jslee@neoenbiz.com](mailto:jslee@neoenbiz.com), Tel: 032-684-9749

<sup>3</sup> Neoenbiz, Co, E-mail: [nanodiamond@neomond.com](mailto:nanodiamond@neomond.com), Tel: 032-684-9749

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

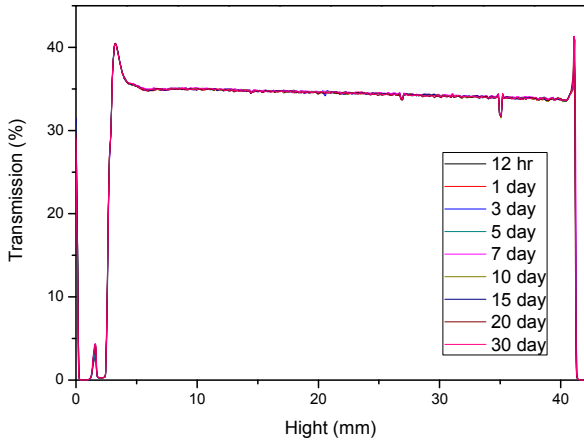


Figure 1: Result of stability test

### 2.2 실험장치 구성

Figure 2는 윤활제 첨가 윤활유를 적용한 디젤기관의 성능평가를 위해 구성된 실험장치의 개략도이다. 본 실험에 사용된 엔진은 3,298 cc의 배기량과 16:1의 압축비를 가지는 상용 디젤엔진(D4AK-C)으로서, 수동력계에 의해 부하가 조절된다. 이때의 실린더 압력은 엔진 연소실에 직접 체결된 압력센서(Kistler 6052C)에 의해 측정되고, 배기라인에 장착된 배기가스분석기(Greenline MK2), 스모크미터(DS-4000Q)에 의해 CO, 스모크가 측정된다.

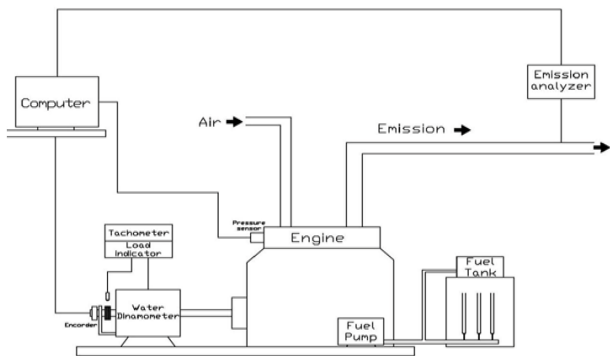


Figure 2: Schematic of experimental system

Figure 3은 기본유체를 엔진에 적용하여 설정한 실험조건을 나타낸다. 나노다이아몬드 윤활제를 0.1, 0.3, 0.5, 1wt%로 분산하여 제조된 윤활유를 상용 디젤기관에 적용하여 저속, 중속, 고속을 대표하는 700, 1300, 1900rpm 조건에서 idle, 50%, 75%, 100%부하를 주어 디젤기관의 성능변화를 평가하였다. 윤활제 첨가 시 윤활제가 제 성능을 발휘할 수 있도록, 50% 부하 조건에서 24시간 이상의 예비구동을 거친 후 실험을 수행하였고, 윤활유는 엔진 자체의 공급 방식에 따라 7.5L를 공급하였다.

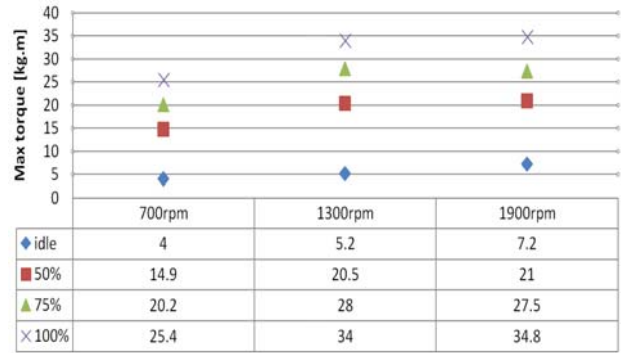


Figure 3: Test Conditions

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 최대토크

Figure 4는 나노다이아몬드 윤활제를 첨가한 윤활유를 사용한 디젤기관의 rpm증가에 따른 최대토크의 변화를 나타낸다. 엔진오일의 밀봉성 향상에 의한 결과로 사료되는 최대토크의 증가 경향이 모든 실험구간에서 확인되었는데, 특히 0.1, 0.3wt%조건에서 5%이상의 큰 최대토크 증가 경향을 확인하였다.

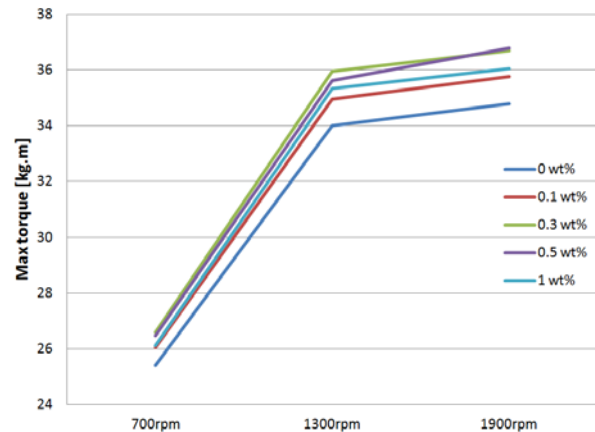


Figure 4: Variations of max torque according to engine speed

### 3.2 실린더 압력

Figure 5 (a), (b), (c), (d)는 나노다이아몬드 윤활제를 첨가한 윤활유를 사용한 디젤기관에서, 700rpm 일때 idle, 50%, 75%, 100% 부하조건에서의 실린더 압력을 나타낸다. 윤활제 첨가에 의한 마찰토크 감소의 영향으로, 동일한 제동토크 조건에서 최대 실린더 압력이 낮아지는 경향을 보였으며 1300, 1900rpm 에서도 유사한 경향을 보였다.

모든 rpm 조건에서 0.1, 0.3, 0.5, 1wt%로 첨가비가 증가함에 따라 실린더 최대압력은 각각 1.1, 2.8, 2.5, 1.6% 감소하였다.

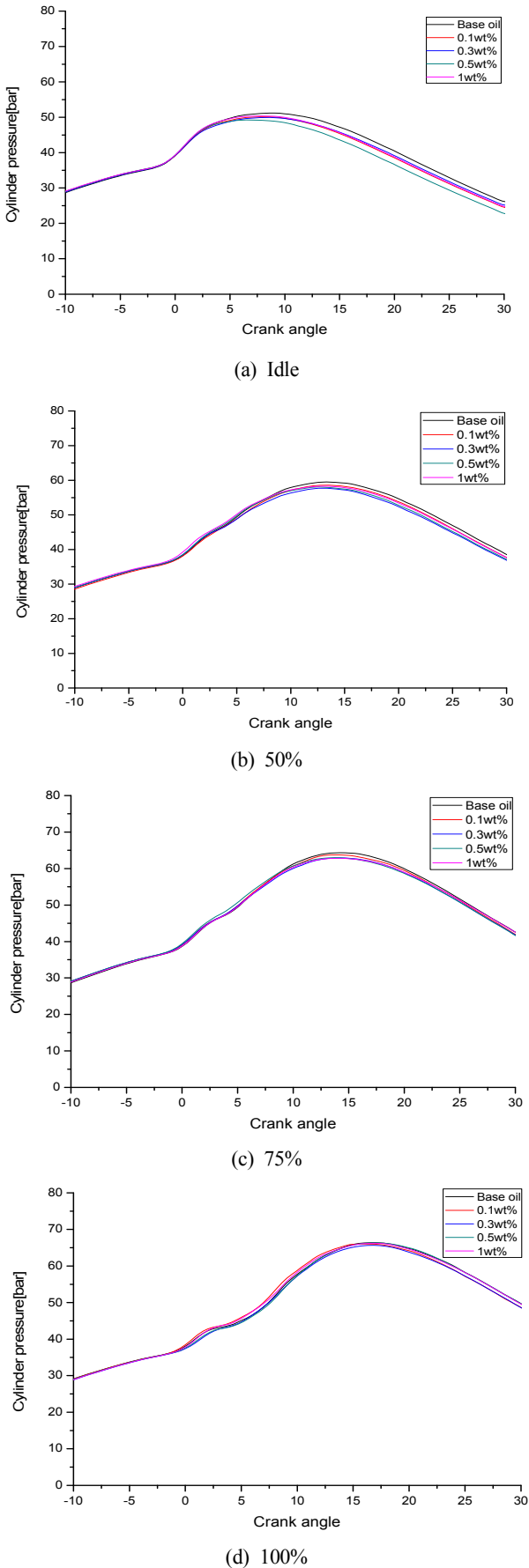


Figure 5: Variations of cylinder pressure at 700rpm

### 3.3 연료소모율

Figure 6은 700, 1300, 1500rpm 조건에서, 윤활제 첨가 wt%와 동력계 부하를 달리했을 때의 연료소모율 변화를 나타낸다. 기관윤활성 향상의 결과로 사료되는 연료소모율 향상 경향이 모든 실험구간에서 확인되었는데, 특히 0.3wt% 조건에서 큰 연료소모율 향상 경향을 보였고 첨가제 함량 증가에 따라 향상 정도는 작아졌다. 모든 rpm 조건에서 0.1, 0.3, 0.5, 1wt%로 첨가비가 증가함에 따른 연료소모율은 각각 5.9, 8.5, 9.1, 9.7% 향상되었다.

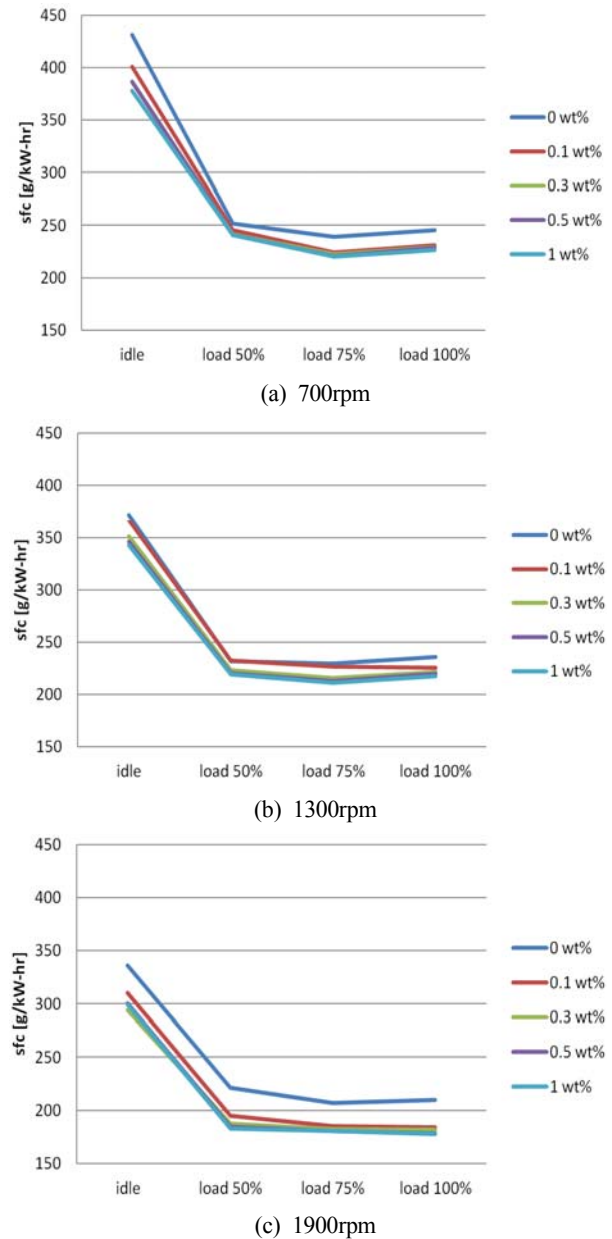


Figure 6: Variations of SFC at 700, 1300, 1900rpm

### 3.4 CO

Figure 7은 700, 1300, 1500rpm 조건에서, 윤활제 첨가

wt%와 동력계 부하를 달리했을 때의 CO 변화를 나타낸다. 마찬가지로 실험조건에서 CO가 감소하는 경향을 보였는데, 이는 윤활제 첨가에 따른 실린더 내부 밀봉성 향상에 의한 연소 활성화에 기인한 것으로 사료된다. 0.3, 0.5, 1wt%의 비교적 높은 wt%조건에서 큰 CO 감소폭을 보였는데 그 경향은 일정치 않았으며, 모든 rpm 조건에서 0.1, 0.3, 0.5, 1wt%로 첨가비가 증가함에 따라 각각 2.9, 1, 7, 5.4% 감소하였다.

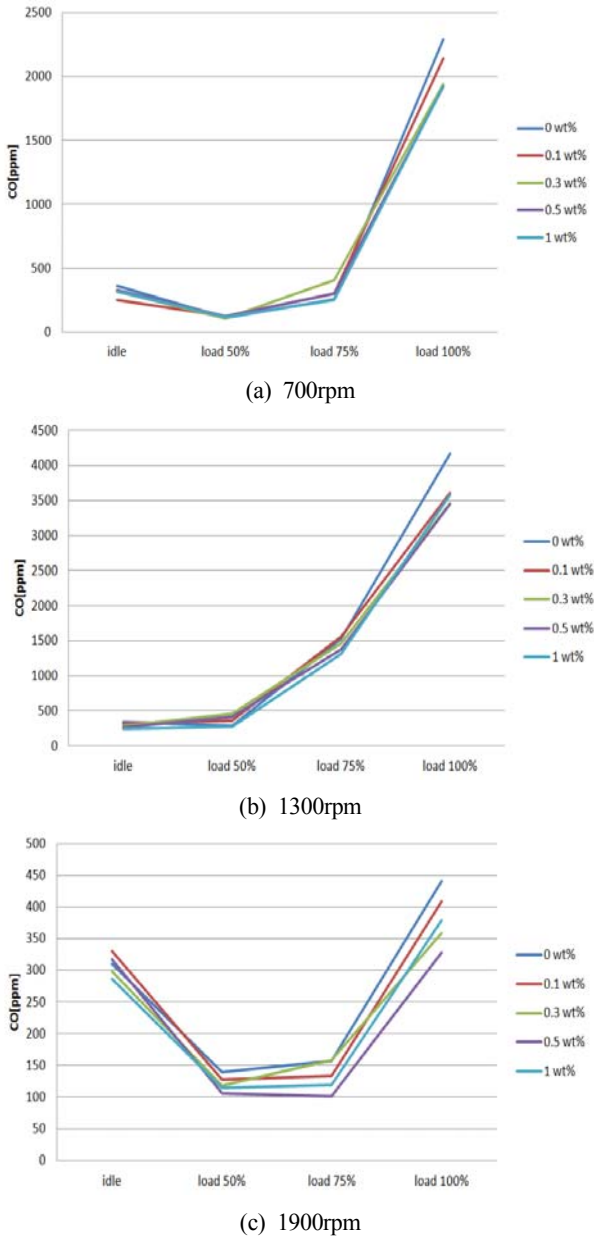


Figure 7: Variations of CO at 700, 1300, 1900rpm

### 3.5 Smoke

Figure 8은 700, 1300, 1500rpm 조건에서, 윤활제 첨가 wt%와 동력계 부하를 달리했을 때의 smoke 변화를 나타낸다. 역시 모든 조건에서 감소하였는데, 이는 CO의 감소경

향과 마찬가지로 연소활성화에 기인한 결과로 사료되며, 앞선 결과와 마찬가지로 0.3wt%에서 가장 큰 저감 경향을 보인 후 wt%증가에 따라 저감율이 소량 감소하는 경향을 확인하였다. 스모크 감소량은 모든 rpm 조건에서 0.1, 0.3, 0.5, 1wt%로 첨가비가 증가함에 따라 각각 23%, 29%, 29%, 30%로 큰 감소폭을 보였다.

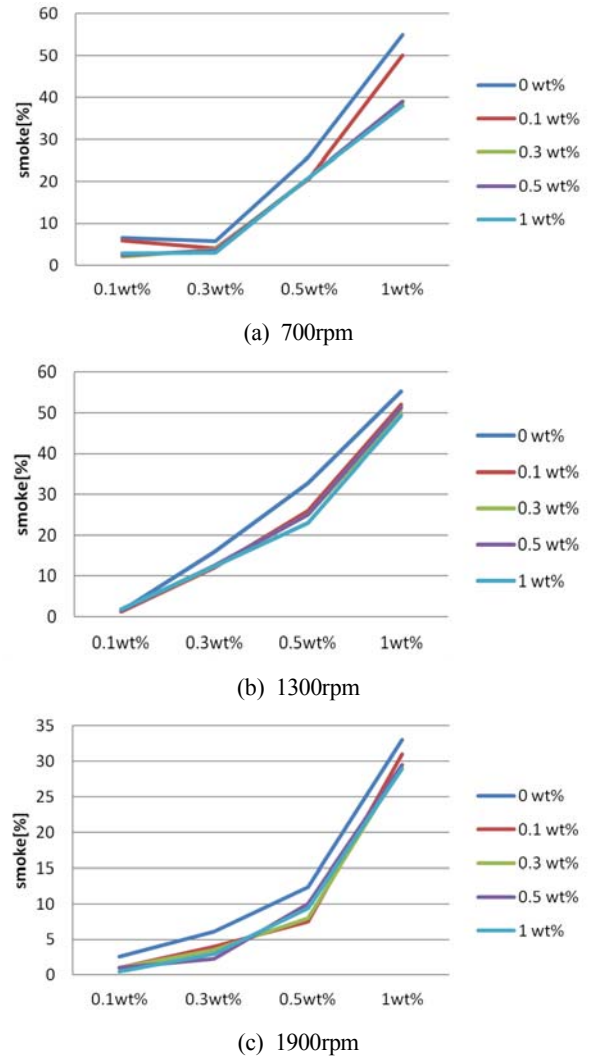


Figure 8: Variations of Smoke at 700, 1300, 1900rpm

## 4. 결론

본 연구에서는 나노다이아몬드 윤활제를 첨가한 윤활유를 연소를 동반한 실제 디젤엔진에 적용하여 0, 0.1, 0.3, 0.5, 1wt%의 질량비 조건에서 700, 1300, 1900rpm일 때, idle, 50%, 75%, 100%의 부하 조건에서 엔진에 미치는 영향을 연구하였고, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 첨가제 첨가에 의한 엔진오일의 밀봉성 향상의 결과로 사료되는 최대토크 증가 경향이 모든 조건에서 관찰되었는데, 특히 0.1, 0.3wt%조건에서 5%이상의 큰 최대토크 증가 경향을 확인하였다.

- 2) 첨가제 첨가에 의한 마찰토크 감소의 결과로 사료되는 동일 토크 조건에서의 최대 실린더 압력 감소 경향을 확인하였고, 모든 조건에서 2% 전후의 감소폭을 확인하였다.
- 3) 기관 윤활성 향상에 기인한 연료소모율 향상 경향을 확인하였는데, 0.3, 0.5, 1wt%의 비교적 높은 질량비 조건에서 9%전후의 향상율을 보였다.
- 4) 밀봉성 향상에 의한 연소 활성화에 기인한 CO 저감 경향이 모든 조건에서 관찰되었고, 앞서와 마찬가지로 0.5, 1wt%의 비교적 높은 질량비 조건에서 7%, 5.4% 감소하였다.
- 5) 연소활성화에 기인한 smoke 저감 경향 또한 확인하였는데, 모든 질량비 조건에서 25% 전후의 감소폭을 보였다.

이상의 결과를 종합하면, 나노다이아몬드 윤활제를 첨가한 윤활유는 연소를 동반한 디젤기관의 성능 향상에 종합적으로 기여하는 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 국토해양부 소관 미래해양산업기술개발사업(2012)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## References

- [1] K. H. Park, Y. N. Kim, and Y. I. Kim, "The effect of lubricant containing copper alloy nano-powder on shafting stability and torque of diesel engine", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 32, no. 4, pp. 514-521, 2008 (in Korean).
- [2] H. Sajjad, H. H. Masjuki, M. Varman, M. A. Kalam, M. I. Arbab, S. Imtenan, and S. M. Ashrafur Rahman, "Engine combustion, performance and emission characteristics of gas to liquid(GTL) fuels and its blends with diesel and bio-diesel", *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 30, pp. 961-986, 2014.
- [3] R. C. Rosenberg and W. E. Campbell, "The effect of mechanically dispersed solid powders on wear prevention by white oil at high load and low speed", *Journal of American Society of Lubrication Engineers*, vol. 24, pp. 92-98, 1968.
- [4] W. J. Bartz and J. Oppelt, "Lubricating effectiveness of oil-soluble additives and molibdenum disulfide dispersed in mineral oil", *Journal of American Society of Lubrication Engineers*, vol. 36, pp. 579-585, 1980.
- [5] C. M. Lin, Y. C. Chiou, and R. T. Lee, "Effect of MoS2 additive on electrical pitting mechanism of lubricated surface for Babbitt alloy/bearing steel pair under ac electric field", *Journal of Wear*, vol. 257, no. 7-8, pp. 833-842, 2004.
- [6] C. G. Lee, Y. J. Hwang, Y. M. Choi, J. K. Lee, C. Choi, and J. M. Oh, "A study on the tribological characteristics of graphite nano lubricants", *Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 10, no. 1, pp. 85-90, 2009.
- [7] C. C. Chou and S. H. Lee, "Tribological behavior of nanodiamond-dispersed lubricants on carbon steels and aluminum alloy", *Journal of Wear*, vol. 269, no. 11-12, pp. 757-762, 2010.
- [8] H. Y. Chu, W. C. Hsu, and J. F. Lin, "The anti-scuffing performance of diamond nano-particles as an oil additive", *Journal of Wear*, vol. 268, no. 7-8, pp. 960-967, 2010.
- [9] C. C. Chou and S. H. Lee, "Rheological behavior and tribological performance of a nanodiamond-dispersed lubricant", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 201, no. 1-3, pp. 542-547, 2008.
- [10] K. H. Park, J. S. Choi, D. H. Kim, and Y. N. Kim, "The performance of a diesel engine using lubricant containing nano-metal powder", *Journal of Korean Society of Marine Engineering*, vol. 32, no. 5, pp. 670-676, 2008 (in Korean).
- [11] L. S. Sundar, M. K. Singh, and A. C. M. Sousa, "Thermal conductivity of ethylene glycol and water mixture based Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluid", *Journal of International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 49, pp. 17-24, 2013.
- [12] I. Nkurikiyimfura, Y. Wang, and Z. Pan, "Effect of chain-like magnetite nanoparticle aggregates on thermal conductivity of magnetic nanofluid in magnetic field", vol. 44, pp. 607-612, 2013.
- [13] W. yu, D. M. France, J. L. Routbort, and S.U.S Choi, "Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancements", *Journal of Heat Transfer Engineering*, vol. 29, no. 5, pp. 432-460, 2008.
- [14] M. Hojjat, S. G. Etemad, R. Bagheri, and J. Thibault, "Laminar convective heat transfer of non-newtonian nanofluids with constant wall temperature", *Journal of Heat Mass Transfer*, vol. 47, pp. 203-209, 2011.
- [15] E. Etefaghi, H. Ahmadi, A. Rashidi, A. Nouralishahi, and S. S. Mohtasebi, "Preparation and thermal properties of oil-based nanofluid from multi-walled carbon nanotubes and engine oil as nano-lubricant" *Journal of International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 46, pp. 142-147, 2013.

- [16] K. Son, J. S. Lee, T. H. Park, and K. H. Park, “Convective heat transfer characteristics of diamond nanofluid produced by matrix synthetic method”, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 37, no. 1, pp. 9-15, 2013 (in Korean).
- [17] K. S. Lee, H. S. Kim, J. H. Lee, T. H. Park, J. S. Lee, and Y. Z. Lee, “Tribological characteristics of paraffin liquid oil with nanodiamond and effects of surface hardness on wear properties”, Journal of Korean Society of Tribologist and Lubrication Engineers, vol. 27, no. 6, pp. 321-325, 2011 (in Korean).
- [18] T. H. Park, K. T. Lee, and J. S. Lee, “Nano-diamond dispersion liquid and method of manufacturing the same”, Korea, Patent 1020110011931, February 10, 2011 (in Korean).