

나노금속분말 윤활제를 적용한 산업용 디젤엔진의 성능

박권하* · 최재성† · 김대현** · 김영남***

(원고접수일 : 2008년 4월 15일, 심사완료일 : 2008년 7월 16일)

The Performance of a Diesel Engine Using Lubricant Containing Nano-metal Powder

Kweon-Ha Park* · Jae-Sung Choi† · Dae-Hyun Kim** · Young-Nam Kim***

Abstract : A diesel engine requires a high performance of lubrication because of the extreme conditions such as high temperature and pressure during combustion process in a cylinder. Many researches to improve the lubrication performance on the extreme condition have been executed. The lubricant oil suspended with nano-metal particles is the one of the measure. In this study, the nano-lubricant oil is applied on a commercial diesel engine, and the engine performance is tested. The results show the increase of maximum torque and the decrease of cylinder pressure, exhaust gas temperature, CO emission.

Key words : Nano-metal powder(나노금속분말), Lubricant oil(윤활유), Diesel engine(디젤기관)

1. 서 론

디젤기관은 가혹한 조건에서 작동하는 많은 운동부를 갖고 있다. 충격운동을 동반하는 밸브계, 고온의 연소에 노출되는 피스톤계 등은 특히 마찰손실이 심한부위로 특별한 윤활성능이 요구된다. 충격부분의 높은 마찰압력 혹은 피스톤의 정지속도는 더 이상 유체윤활 상태를 유지할 수 없게 만들어 요철간의 금속접촉이 시작되는 경계윤활상태로 접어든다^[1]. 또한 고온고압의 연소실에서는 높은 열에 노출되어 있어, 일부는 연료와 같이 연소를 하

게 된다. 그러므로 피스톤 부위에 있어서 윤활은 배기배출물을 최소화하기 위하여, 가급적 적은 양의 윤활유로 얇은 유막을 형성하면서도 윤활성이 뛰어나고, 연소실의 고압가스의 누출을 막는 높은 밀봉작용이 요구된다.

Hardy 등^[2]은 상대운동을 하는 두 금속면이 윤활막에 의하여 분리될 때 마찰은 미끄럼면과 윤활막 사이에서의 물리, 화학적인 작용 때문에 감소된다는 경계윤활 메커니즘을 제시하였고, Bowden and Tabor^[3]는 윤활상태의 금속을 접촉시키면서 하중을 가하면 압력이 최고가 되는 부분에서 국부적인

† 교신저자(한국해양대학교, E-mail: jschoi@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4262)

* 한국해양대학교 교수

** 한국해양대학교 대학원

*** (주)엔파씨 대표이사

파단 및 금속의 용착이 일어나는데, 이런 경계윤활의 경우 윤활유 분자구조와 윤활막의 물리적 성질이 마찰에 중요한 영향을 미친다는 것을 보여 주었다. 이러한 윤활면 사이에서 미세하게 일어나는 물리적 특성을 향상하기 위하여 고체윤활제에 대한 연구가 진행되고 있다. 고체윤활제로는 광유에 MoS₂를 분산시키는 방법⁽⁴⁾과, PTFE(polytetrafluoro ethylene)를 분산시키는 방법⁽⁵⁾, 흑연과 몰리브덴을 분산시키는 방법⁽⁶⁾ 등이 있는데 이와 같은 고체윤활제 첨가제들은 경계윤활상태의 접촉부의 소재 표면에 윤활성 피막을 형성하여 마모를 감소시키고, 유막파괴시에도 용착을 막아주거나 지연시키는 것으로 나타났다. 그러나 MoS₂, 흑연, PTFE등의 고체윤활제는 고온에서 사용시 산화되어, 윤활성을 상실하게 되므로, 고온의 상태인 기관의 실린더내부 사용시에는 그 효과를 발휘할 수 없게 된다. 따라서 온도와 환경의 제한을 극복할 수 있는 새로운 첨가제의 개발이 요구되었는데, 적합한 대상으로 구리와 같이 윤활성이 높은 금속의 미세분말이나 합금류와 이것의 산화물, 염과 같은 화합물을 들 수 있다. 구리 미세분말이나 구리화합물을 첨가하여 4구시험을 실시한 결과 극압하중과 용착하중이 구리의 조성화학적 구조에 관계없이 크게 상승하였으며⁽⁷⁾, CuOI(copper oleate)을 올레익산과 혼합한 첨가제를 4구시험한 결과 높은 온도에서 이것이 첨가되지 않은 오일보다 마찰계수 및 마모도가 감소하는 효과가 나타났으며⁽⁸⁾, 구리염이 함유된 첨가제 사용시에는 형성된 표면막이 윤활유의 산화를 방지하고, 재료의 부식도 방지하는 효과가 나타났다⁽⁹⁾. 그리고 Shpenkov에 의하면 니켈도 구리와 같이 접촉면에 연한 금속층을 형성하여 마찰저감 및 내마모효과가 있다고 보고되었으며⁽¹⁰⁾, 니켈입자가 윤활유에 함유되었을 경우에 대한 연구로는 ZDDP(zinc dialkyldithiophosphates)가 함유된 첨가제에 미세한 니켈입자가 추가되었을 때, ZDDP와 연계해 흡착 및 촉매작용을 하고, 인-금속피막을 형성하여 마찰과 마모를 감소시키는 효과가 있다고 보고하였다⁽¹¹⁾. 안 등⁽¹²⁾은 구리와 니켈합금의 미세분말 윤활제를 시험한 결과 왕복동 시험에서 구리합금입자에 의해 형성된 화학적 유기

금속피막에 의해 무첨가 윤활유의 경우에 비해 마찰계수가 감소하고, 마모직경도 감소하는 효과를 확인하였고, 기어시험에서는 마모에 의해 발생한 접촉면의 요철부위를 도금하고 깊게 손상된 부위를 치료하는 효과가 있음을 확인하였다. 나노금속윤활제의 엔진적용연구는 박 등⁽¹³⁾의 연구를 들 수 있는데 모터로 엔진을 역 구동하면서 엔진에서의 윤활특성을 분석하였다. 그러나 고체윤활제를 실엔진에 적용하여 성능을 분석한 자료는 많지 않다.

본 연구에서는 박 등⁽¹³⁾의 엔진윤활성평가의 2 단계연구로 구리합금나노입자를 첨가한 윤활유를 산업용 디젤엔진에 적용하여 엔진의 성능 및 배기 배출물의 변화를 분석한 것이다.

2. 실험장치 및 조건

실험엔진의 사양은 Table 1과 같다. 최대출력 115PS, 배기량 3.298cc, 압축비 16인 산업용 디젤엔진이다.

Table 1 Specification of test engine

Type	Turbo diesel engine(D4AK-C)
Cooling method	Water cooler
No. of Cyl. & arrangement	4-IN line
Valve mechanism	Overhead valve
Combustion chamber type	Direct injection
Bore × Stroke	100mm × 105mm
Total piston displacement	3.298cc
Compression ratio	16:1
Rated output(KSR 1004)	80/2400(ps/RPM)
Peak torque(KSR 1004)	25.5/1800(kg.m/RPM)
NO-Load minimum speed	700~750 RPM
NO-Load maximum speed	2640±20 RPM
Firing order	1-3-4-2
Injection timing	16°±1°BTDC

Fig. 1은 실험장치도를 나타낸다. 윤활제 성능 파악을 위하여 실린더 압력, 배기가스 온도, 소기 온도, 연료소비율, 배기배출물 등을 측정하였는데, 실린더내의 압력변화는 1번 실린더에 압력센서를 부착하여 검출된 mV신호를 증폭기로 증폭하여 컴퓨터에 저장하였으며, 동시에 크랭크축의 끝단에 엔코더(Z pulse, B pulse)를 설치하여 TDC(Z pulse)를 시작으로 1회전당 360(B pulse)개의 트리거(Trigger)신호를 저장하였다. 배기가스와 급기온도를 계측하기 위해, 3번 실린더의 배기관과 급기다기관에 온도계를 설치하였으며, 연료소비량 계측을 위하여 200ml의 유리관으로된 계이저를 3개 설치하여 일정량의 연료를 소모시키는데 걸리는 시간을 측정하였다. 배기가스 배출물을 계측하기 위하여, 배기 배출구에 스모크 측정기 및 배기가스 분석기(testo 350)를 연결하여 데이터를 수집하였다. 배기가스농도는 노트북 컴퓨터를 이용하여 30초 단위로 수집하였다. 성능시험에 사용된 동력계는 200마력 6000RPM의 수동력계이다.

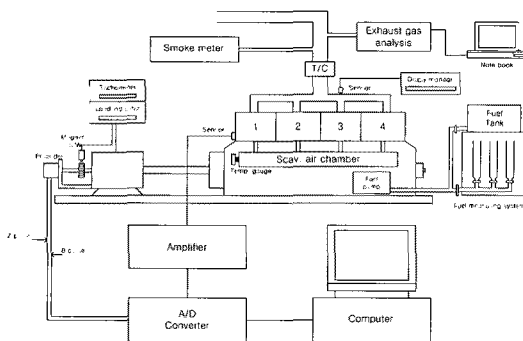


Fig. 1 Experimental setup

Fig. 2는 토크와 엔진속도를 25개로 구분한 실험조건을 나타낸다. 5개의 구간으로 나눈 엔진속도에서 최대 토크선도를 구한 다음 토크구간을 0%, 25%, 50%, 75%, 100%의 5구간으로 나누어 총 25개의 운전조건을 설정하였다. 나노윤활제를 첨가하기 전에 각 조건에서 초기 데이터를 수집하였으며, 윤활제 첨가후의 데이터의 수집은 윤활제 첨가직후와 20시간 간격으로 운전한 후에 데이터를 수집하는 방법으로 6회에 걸쳐 수행되었다.

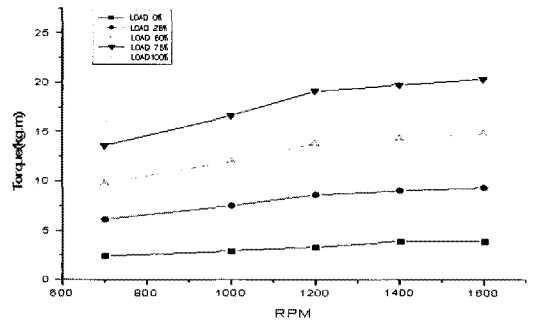


Fig. 2 Test condition

3. 결과 및 고찰

일정한 RPM에서의 나노윤활제 첨가 이후 운전 시간에 따른 각 RPM에서의 최대토크 변화는 Fig. 3과 같이 나타났다. X축의 -20은 윤활유 나노윤활제 첨가 전의 기준데이터를 나타내며 0은 첨가 직후를 나타내고 그 이후는 각각의 운전시간을 나타낸다. 전반적으로 각 RPM에서의 최대토크는 첨가제를 첨가한 이후 운전시간이 지남에 따라 모두 증가하였고 특히 저속에서는 그 증가폭이 고속일 때 보다 커짐을 알 수 있다. 100시간 운전후 총 증가량은 첨가제 첨가 전에 비해 700RPM에서 13.9%, 1000RPM에서, 9.9%, 1200RPM에서 13.6%, 1400RPM에서 8.2%.

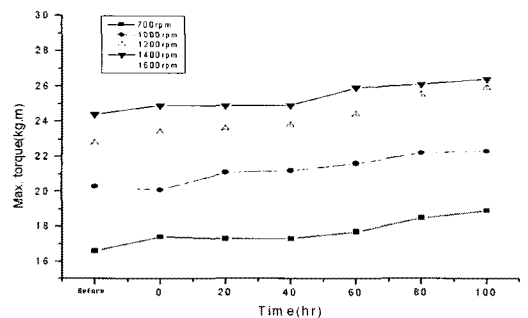


Fig. 3 Variations of max. torques according to Eng. speed(rpm)

1600RPM에서 8.3%가 상승한 것으로 나타났고 이것은 동일 RPM에서 엔진이 낼 수 있는 출력이 증가했음을 말해 준다. 그래프에서 나타난 것처럼

럼 각 RPM에서 최대토크 증가폭은 첨가제를 투입한 직후에 가장 높게 나타났다.

이는 다음 두가지의 영향으로 판단된다. 첫째는 안효석과 이성철의 왕복동시험에서¹³⁾ 마찰이 감소함을 보여준 것처럼 마찰손실의 감소에 의한 영향이며, 두 번째는 밀봉작용의 증가로 연소실 압력이 증가된 영향이다.

Fig. 4는 700RPM, 토크 2.4kg.m에서 수집된 실린더내 압력선도를 나타내며 Fig. 5는 동일한 방법으로 측정된 압력선도에서 도출한 최대압력을 운전시간과 함께 나타낸 그래프이다. 동일한 출력, 즉 동일한 토크와 RPM에서 측정된 Fig. 4의 압력변화선도는 윤활제 첨가전의 최대압력이 첨가후에 급격히 감소함을 나타내는데, 이는 동일출력조건이기 때문에 마찰저감에 의하여 기계적손실이 감소되었다는 것을 말한다. 이는 Fig. 5에서 보여주는 것처럼 첨가제 첨가 직후에 가장 크게 나타나며 운전시간이 증가하면서 감소폭이 줄어든다.

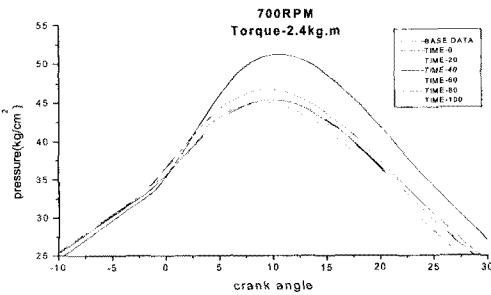


Fig. 4 Cylinder pressure curves at the torque 2.4kg.m and 700RPM

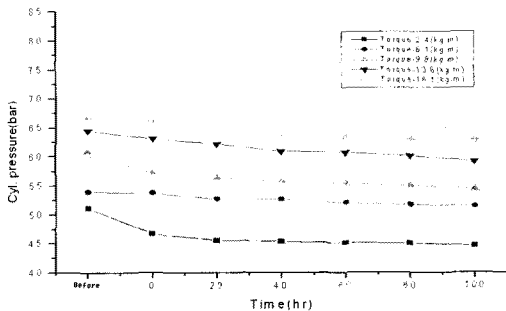


Fig. 5 Maximum pressure variation at 700RPM

Fig. 6은 연료소비율의 변화를 나타낸다. 연료 소비율은 윤활제를 첨가한 직후에 가장 컸으며 그 이후의 운전시간에서는 큰 변화가 없었다.

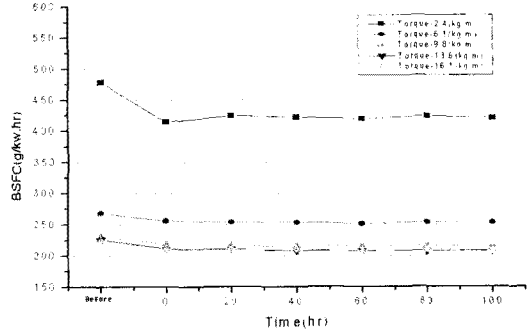


Fig. 6 BSFC variation at 700RPM

100시간의 총 운전 시간동안 RPM 및 토크별 연료소비율의 감소비는 Table. 2와 같다. 저속 저부하에서 높은 감소율을 나타내며 고속 고부하에서 낮은 감소율을 나타낸다.

Table 2 Comparison of BSFC reduction percents

Torque \ RPM	0%	25%	50%	75%	100%
700	12.0%	5.5%	6.2%	8.3%	6.9%
1000	8.5%	3.6%	6.2%	5.5%	8.2%
1200	4.3%	4.7%	6.1%	5.6%	8.6%
1400	3.4%	4.0%	4.1%	6.5%	6.2%
1600	4.0%	4.7%	4.8%	5.9%	6.2%

Fig. 7은 배기가스온도의 변화를 나타낸다. 그림에서와 같이 배기가스온도도 연료소비율의 변화 추세와 비슷하게 윤활유 첨가제를 투입한 직후에 가장 크게 나타났다. 이것은 동일한 RPM과 토크의 조건에서 연료소비율이 낮아져 최고폭발압력이 감소하였고 그로 인해 배기가스 온도가 낮아짐을 알 수 있다.

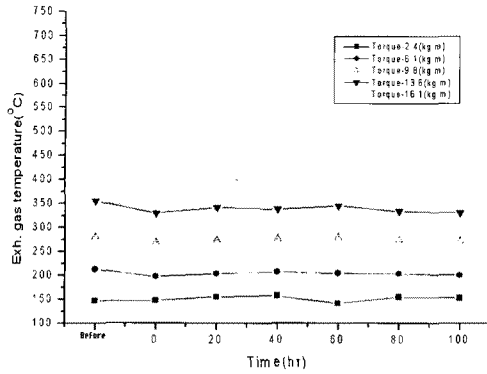


Fig. 7 Exh. gas temperature at 700RPM

Fig. 8은 NOx배출농도의 변화를 나타낸다. NOx배출농도는 나노윤활제를 첨가한 이후에 전반적으로 증가하고 있다. 저부하에서는 큰 변화가 없지만 고부하에서는 많은 증가를 나타낸다. 이러한 현상은 윤활유의 밀봉작용에 의한 연소실압력상승이 연소실의 평균온도를 증가시켜 질소산화물의 배출농도를 증가시키는 것으로 판단된다.

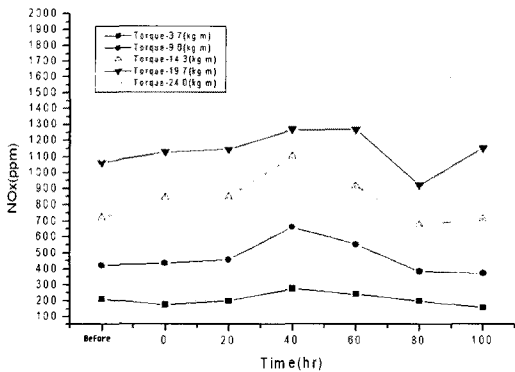


Fig. 8 Variations of NOx emission at 1400RPM

Fig. 9는 1400RPM에서 토크별 운전시간에 따른 엔진의 CO배출농도의 변화를 나타낸다. CO배출농도는 낮은 토크에서는 큰 변화가 없지만 토크가 높은 경우에는 운전시간이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 100시간 운전후의 RPM 및 토크별 CO배출농도의 감소비는 Table 3과 같다. 부하가 증가할수록 엔진속도가 증가할수록 저감률이 증가된다. 이는 밀봉작용의 증가에 의한 연소실내의 연소활성화에 기인한 것으로 판단된다.

Table 3 Comparison of CO percent reductions

torque \ RPM	0%	25%	50%	75%	100%
700	26.7%	6.7%	19.8%	60.1%	74.6%
1000	27.8%	25.3%	51.5%	69.1%	83.2%
1200	36.1%	22.5%	50.3%	13.3%	67.2%
1400	22.9%	5.6%	55.3%	79.1%	65.2%
1600	14.0%	13.7%	48.9%	64.6%	69.8%

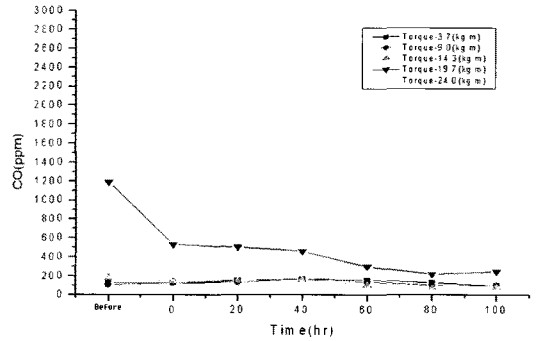


Fig. 9 Variations of CO concentrations at 1400RPM

Fig. 10은 1400RPM에서 토크별 운전시간에 따른 엔진의 스모크의 배출 변화를 나타낸다. 일산화탄소 배출과 유사하게 저부하에서는 큰 변화가 없지만 고부하 영역에서는 윤활제 첨가후에 저감되는 것을 알 수 있다.

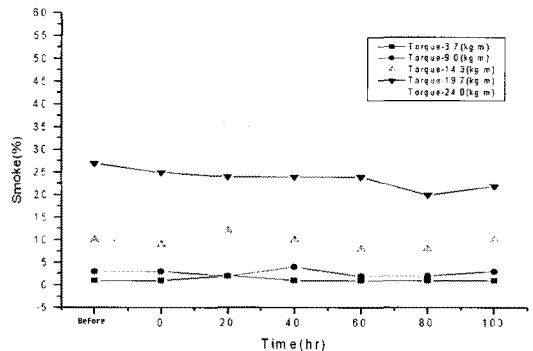


Fig. 10 Smoke emissions at 1400RPM

4. 결 론

이상에서와 같이 나노구리합금첨가 윤활제가 기

관성능에 미치는 효과를 파악하기 위하여 산업용 디젤기관에 대하여 일정한 부하와 회전속도에서 운전 시간에 따른 엔진성능 및 배기배출물의 변화를 실험 계속하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 엔진의 최대제동토크가 운전시간의 증가와 함께 연속적으로 증가되었다.

(2) 동일한 제동토크 및 엔진속도에서는 연소실 최고압력이 감소하였는데, 이는 윤활성 향상에 의한 기계적손실의 저감에 따른 것으로 판단된다.

(3) 모든 RPM 및 토크 영역에서 연료소비율, 배기가스온도 및 일산화탄소의 배출농도는 감소하였으나, 질소산화물의 배출농도는 일정시간동안 증가되었다.

참고문헌

[1] Bhushan, B. and Gupta, B. K., *Handbook of Tribology*, McGraw Hill, 1991.

[2] Hardy, w. b. and Doubleday, I., "Boundary Lubrication-The Paraaffin Series." *Proc. Roy. Soc. A*, Vol. 102, pp.550-547, 1922.

[3] Bowden, F. P. and Tabor, D., *The Friction and Lubrication of Solids*, Clarendon Press, pp.176-199, 1958.

[4] W.J. Bartz, J. Oppelt, "Lubricating Effectiveness of Oil-Soluble Additives and Molibdenum Disulfide Dispersed in Mineral Oil," *Lubr. Eng.*, Vol.36, pp579-585, 1980.

[5] G. F. Reick, "Energy-Saving Lubricants Containing Colloidal PTFE," *Lubr. Eng.*, Vol.38, pp.635-65, 1982.

[6] C. Cusano and H. E. Sliney, "Dynamics of Solid Dispersions in Oil During the Lubrication of point Contacts, part I- Graphite," *ASLE Trans.*, Vol.25, No.2, pp.183-189, 1982.

[7] A. S. Kuzharov and O. V. Fisenko,

"Copper-containing Additives and Tribological Behavior of Chiatim-201 Grease," *Soviet Jr. of Friction and Wear*, Vol.13, No.2, pp.73-77, 1992.

[8] T. I. Nazarenko, N. N. Lozentsova, G. G. Shchegolev and Yu. P. Toporov, "On Lubricating Properties of Oil with Copper-Containing Additives," *Soviet Jr. of Friction and Wear*, Vol.13, No.2, pp.78-81, 1992.

[9] S. Gunsel and F. Lockwood, "The Influence of Copper-Containing Additives on Oil Oxidation and Corrosion," *Tribology Trans.(STLE)*, Vol.38, No.3, pp.485-496,1995.

[10] G. P. Shpenkov, *Physical Chemistry of Friction*, Minsk, 1991.

[11] M. V. Astakhov and V. A. Mouratov, "Nickel Fine Particle's Adsorptive-Catalytic Mechanism," *Wear*, Vol. 176, pp.61-65, 1994.

[12] 안효석, 이성철, "첨가제에 함유된 미세한 구리합금입자의 마찰 및 마모 특성," *한국윤활학회지*, 제12권 제2호, pp.32-40, 1996.

저 자 소 개



박권하(朴權夏)

1995년 UMIST(맨체스터대학) 대학원 기계공학과 졸업(박사), 1995-1998년 한국기계연구원 엔진환경연구부 선임연구원, 1998-현재 한국해양대학교 부교수, 내연기관 연구



김영남(金永南)

2005년 한국해양대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사), 현재 (주)엔피씨 대표이사

**최재성(崔在星)**

1974년 한국해양대학교 기관시스템공학부 졸업, 1986. 3. 일본 Kyoto Univ. 대학원 졸업 (공학박사), 2008. 현재 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수