
나노구리합금첨가 윤활제가 디젤엔진의 성능에 미치는 영향

김대현* · 박권하** · 최재성***

The Effect of Lubricant Containing Copper Alloy Nano-Powder
on a Diesel Engine

D. H. Kim · K. H. Park · J. S. Choi

Abstract

The characteristics of a lubricant is very important when it is used under severe running condition. Especially on diesel engines the better lubrication performance is required because of the extreme condition such as high temperature and pressure by combustion process in a cylinder. Many research works for improving a boundary lubrication performance have been executed by using solid lubricant but this general lubricant has not been applied to engine due to the extreme condition of high temperature and pressure in a cylinder.

Recently, the solid lubricant which contained a copper nickel alloy has been introduced and studied. In this study, the authors investigated the effects of lubricant which contains the copper nickel alloy nano-powder on a diesel engine performance. The results were manifested to show the increase of maximum torque, and the decrease of cylinder pressure, exhaust gas temperature, scavenging air temperature, CO emission according to running time elapse at various speed and torque on a diesel engine. It was assured that the lubricant which contains the copper nickel alloy nano-powder decreases friction and wear, and simultaneously increases the sealing effect in a cylinder on diesel engines.

Key Words : Boundary Lubrication(경계윤활)

Copper Nickel Alloy Nano-Powder(구리니켈합금 나노분말)

* 한국해양대학교 대학원 기관공학과
** 한국해양대학교 기계공학부 조교수
*** 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수

1. 서 론

기관은 많은 운동부를 가지고 있으며 각각의 운동부에서는 기계적 손실에 의한 효율저하, 마모, 소음, 진동이 발생된다. 이러한 문제들을 최소화하기 위하여 윤활부에서는 유체윤활 상태를 유지하는 것이 필요하다. 한편 내연기관의 효율향상을 위하여는 마모 및 마찰의 감소가 필요하며, 보다 뛰어난 고품질의 윤활특성을 지닌 윤활기술이 요구된다. 특히 고온 및 고압상태에서 윤활을 필요로 하는 피스톤 부위의 마찰특성은 일반적인 기기에서의 마찰특성과 매우 차이가 있으므로, 특별한 윤활특성이 요구된다.

상대운동의 속도를 낮게 하거나 또는 하중이 증가된다면, 더 이상 유체윤활 상태의 유지가 어렵게 되어, 고체면의 요철간에 금속접촉이 시작되는 경계윤활상태로 접어든다¹⁾. 그래서 피스톤의 운동 부위는 이와 같은 특성으로 유체윤활이 어려우며 특히 큰 하중을 받기 때문에 극압윤활상태에 도달하게 되고, 또한 윤활면이 연소실 내의 높은 열에 노출되어 있어, 일부는 연료와 같이 연소를 하게 된다. 그러므로 피스톤 부위에 있어서 윤활은 윤활유의 소비를 최소화하기 위하여, 가급적 적은 양의 윤활유로 얇은 유막을 형성하면서도 윤활성이 뛰어나고, 연소실의 고압가스의 누출을 막는 높은 밀봉작용이 요구된다.

Hardy 등²⁾은 상대운동을 하는 두 금속면이 윤활막에 의하여 분리될 때 마찰은 미끄럼면과 윤활막 사이에서의 물리, 화학적인 작용 때문에 감소된다는 경계윤활 메커니즘을 제시하였고, 이에 따라서 윤활유의 분자구조, 환경조건, 경계 온도 그리고 고체면에서 윤활유의 물리, 화학적 흡착을 지배하는 변수들에 대한 연구가 활발해졌다.

Bowden and Tabor³⁾의 윤활메커니즘에 의하면, 윤활상태의 금속을 접촉시키면서 하중을 가하면 접촉면은 작용하중에 의하여 소성변형을 일으키며, 이러한 변형 때문에 윤활막은 두 금속면 사이에서 큰 압력을 받게 되지만, 이 압력은 전 접촉영역에서 같지 않기 때문에 압력이 최고가 되는 부분에서 국부적인 파단 및 금속의 용착이 일어난다. 결국 경계윤활면 사이에서의 윤활유 분자구조와 윤활막의 물리적 성질이 마찰에 중요한 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

현재 경계윤활성의 향상을 위해 고체 윤활제에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 고체윤활제로는 광유에 MoS₂를 분산시키는 방법⁴⁾과, PTFE(polytetrafluoro ethylene)를 분산시키는 방법⁵⁾, 흑연(graphite)과 몰리브덴을 분산시키는 방법⁶⁾ 등이 있는데 이와 같은 고체윤활제 첨가제들은 경계윤활상태의 접촉부의 소재표면에 윤활성 피막을 형성하여 마모를 감소시키고, 유막과피시에도 용착을 막아주거나 지연시키는 것으로 나타났다. 그러나 MoS₂, 흑연, PTFE등의 고체윤활제는 고온에서 사용시 산화되어, 윤활성을 상실하게 되므로, 고온의 상태인 기관의 실린더내에 사용시에는 그 효과를 발휘할 수 없게 된다. 따라서 온도와 환경의 제한을 극복할 수 있는 새로운 첨가제의 개발이 요구되는데, 가장 적합한 대상으로 구리와 같이 윤활성이 높은 금속의 미세분말이나 합금류와 이것의 산화물, 염과 같은 화합물을 들 수 있다. 구리 미세분말이나 구리화합물을 첨가하여 4구시험(Four Ball Method)을 실시한 결과 극압하중(critical load)과 용착하중(welding load)이 구리의 조성 과 화학적 구조에 관계없이 크게 상승하였으며⁸⁾, CuOl(copper oleate)을 올레익산과 혼합한 첨가제를 4구시험한 결과 높은 온도에서 이것이 첨가되지 않은 오일보다 마찰계수 및 마모도가

감소하는 효과가 나타났으며⁹⁾, 구리염(copper naphthene)이 함유된 첨가제 사용시에는 형성된 표면막이 윤활유의 산화를 방지하고, 재료의 부식도 방지하는 효과가 나타났다¹⁰⁾. 그리고 Shpenkov에 의하면 니켈도 구리와 같이 접촉면에 연한 금속층을 형성하여, 마찰저감 및 내마모효과가 있다고 보고되었으며¹¹⁾ 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 보고하였다¹²⁾.

안효석과 이상철¹³⁾은 구리와 니켈합금의 미세분말 윤활제를 시험한 결과 왕복동시험에서 구리합금입자에 의해 형성된 화학적 유기 금속피막에 의해 무첨가 윤활유의 경우에 비해 마찰계수가 감소하고, 마모직경도 감소하는 효과를 확인하였고, 기어시험에서는 마모에 의해 발생한 접촉면

의 요철부위를 도금하고 깊게 손상된 부위를 메꾸어 치료하는 효과가 있음을 확인하였다.

본 연구에서는 구리합금나노입자를 첨가한 윤활유를 산업용 디젤엔진에 적용하여, 엔진의 성능 및 배기배출물의 변화를 운전 시간별로 실험하여 그 변화를 분석하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 각종 데이터를 수집하기 위해 제작된 실험장치도를 나타낸다. 본 실험에서는 윤활유 첨가제의 효과를 파악하기 위하여, 실린더내 최고폭발압력, 배기가스 온도, 소기온도, 연료소비율, 배기배출물 등을 각 운전조건에서 운전시간별로 측정하였다. 실린더내 최고폭발압력은 1번 실린더에 압력센서를 부착하여 나온 데이터를 증폭기로 증폭하여 측정하였으며, 축의 끝단에

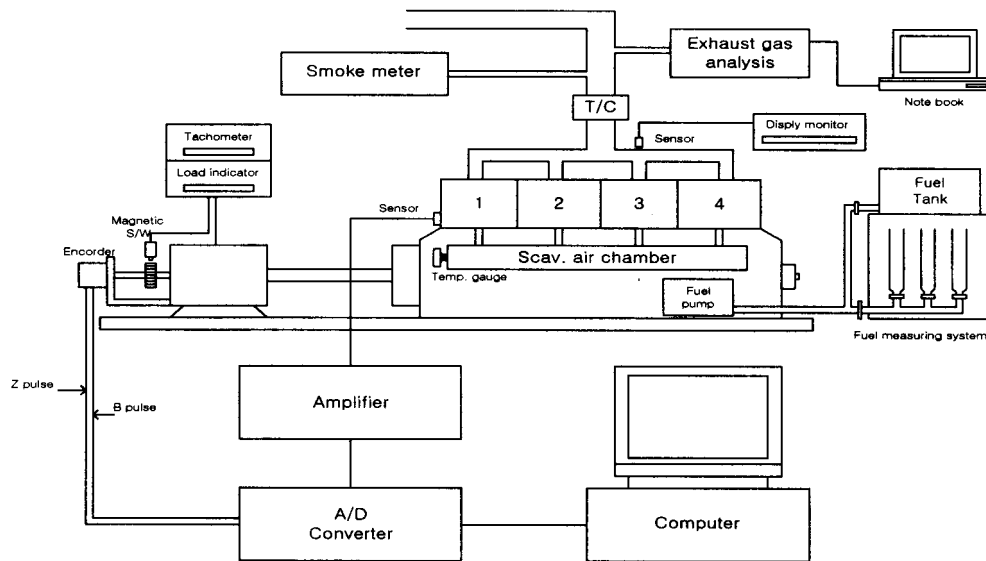


Fig. 1 Setup of Experimental apparatus

엔코더(Z pulse, B pulse)를 설치하여, AD컨버터에서 TDC(Z pulse)를 시작으로 1회전당 360(B pulse)개의 트리거(Trigger)신호에 의하여, 크랭크 각도당 실린더내 압력을 받아서, 컴퓨터에 저장하였다. 배기가스와 급기온도를 측정하기 위해, 3번 실린더의 배기관과 급기챔버(Chamber)에 온도계를 설치하였으며, 연료소비량 측정을 위하여 200ml의 유리관으로된 계지를 3개 설치하였으며, 스톱와치를 사용하여, 일정량의 연료를 소비시키는데 걸리는 시간을 측정하여 구하였다.

배기가스 배출물을 측정하기 위하여, T/C 출구 쪽에 스모크 측정기 및 배기가스 분석기를 연결하여, 데이터를 수집하였다. 배기가스 분석기는 노트북 컴퓨터를 이용하여 30초 단위로 계속적으로 수집하였다.

2.2 실험방법

Fig. 2는 본 실험에 사용된 윤활유 첨가제로

구리니켈합금 나노분말을 나타내며, 실험조건은 700, 1000, 1200, 1400, 1600RPM에서 각 RPM의 최대토크를 구한 다음 토크구간을 5구간으로 나누어 총 25개의 운전조건을 설정하였다. 데이터의 수집은 1000RPM에서 무부하 상태로 20시간 간격으로 운전한 후에 데이터를 수집하는 방법으로 총 100시간에 걸쳐 데이터를 수집하였으며, 첨가제를 첨가하기 전에 각각의 조건(25포인트)에서 2회에 걸쳐 기초데이터를 수집하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 최대토크

각 RPM에서의 나노윤활제 첨가 이후 운전 시간에 따른 최대토크 변화는 Fig. 3과 같이 나타났다. Fig. 3에서 X축의 -20은 윤활유 나노윤활제 첨가 전의 기초 데이터를 나타내며 0은 투여 직후를 나타내고 그 이후는 각각의 운전시간

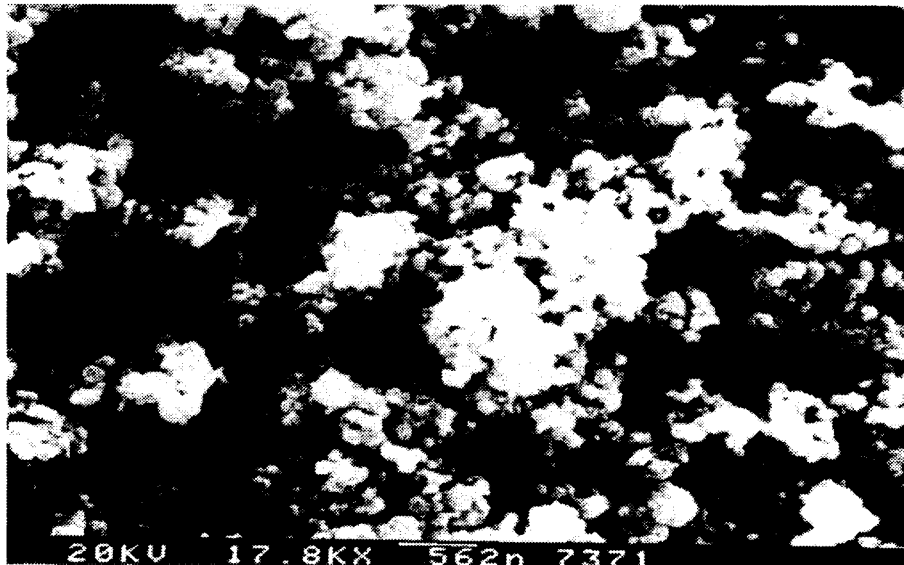


Fig. 2 SEM micrograph of NiCu fine particles

을 말한다. 전반적으로 각 RPM에서의 최대토크는 첨가제를 투입한 이후 운전시간이 지남에 따라 모두 증가하였고 특히 저속에서는 그 증가폭이 고속일 때 보다 커짐을 알 수 있다. 이것은 동일 RPM에서 엔진이 낼 수 있는 출력이 증가했음을 말해 준다. 그래프에서 나타난 것처럼 각 RPM에서 최대토크 증가폭은 첨가제를 투입한 직후에 가장 높게 나타났으며, 이는 다음 두 가지의 영향으로 판단된다. 첫째는 안효석과 이성철의 왕복동시험에서¹³⁾ 마찰이 감소함을 보여준 것처럼 마찰손실의 감소에 의한 영향이며, 두 번째는 밀봉작용의 증가로 연소실의 유효압력이 증가된 영향이다.

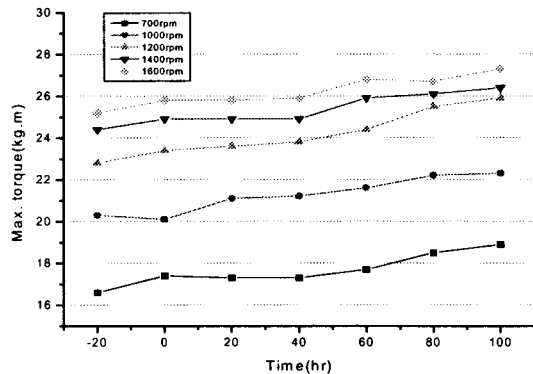


Fig. 3 Variations of max. torque versus run hours according to Eng. speed

3.2 실린더내 연소 최고압력

데이터 수집 및 분석방법은 크랭크 각도당 압력값을 수집하여 운전시간에 따른 최고압력값의 변화를 비교하였다. Fig. 4는 700RPM, 토크 2.4kg.m에서 수집된 실린더내 압력선도를 나타내며 다른 모든 데이터도 이와 같은 방법으로 계측하였다. 압력변화에서 알 수 있는 바와 같이 첨가제를 첨가함으로써 상사점 부근의 압력이 높게 나타나 있으며 최대폭발압력은 낮게 나

타난다. 이는 첨가제 사용으로 실린더내 가스의 밀봉작용이 향상된 것에 기인한다고 판단된다. 첨가제 사용후 운전시간이 경과함에 따라라도 밀봉작용이 향상됨을 알 수 있으나 그 효과는 첨가제 첨가직후에 비하여 크지 않음을 알 수 있다.

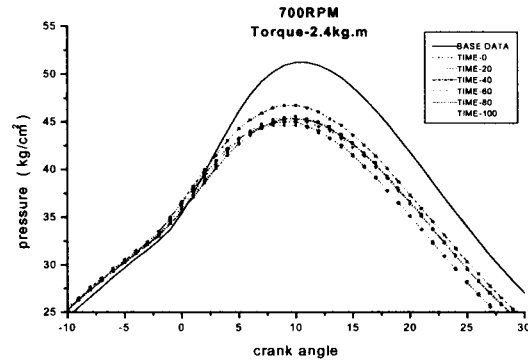
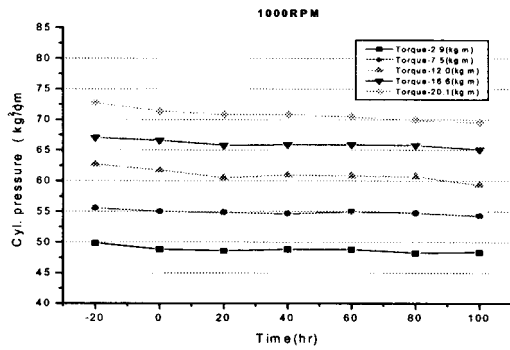


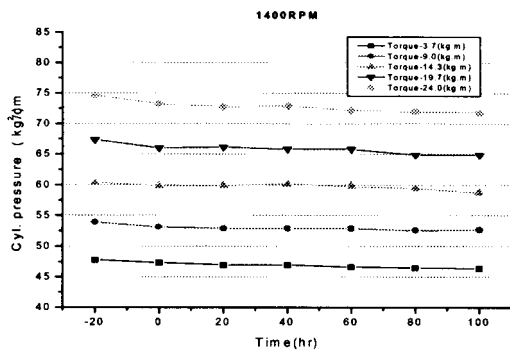
Fig. 4 Cylinder pressure curves at engine torque-2.4kg.m & 700rpm

Fig. 5는 각 RPM과 토크를 일정하게 유지한 조건에서의 운전시간에 따른 엔진의 최고폭발압력의 변화를 나타낸다. 각각의 RPM에 있어서 토크별 운전시간에 따른 엔진의 최고폭발압력은 운전시간이 지남에 따라 저하됨을 알 수 있고 그 저하폭은 첨가제를 투입한 직후에 가장 높게 나타났다. 700RPM에서 토크별 운전시간에 따른 엔진의 최고폭발압력은 운전시간이 지남에 따라, 계속 감소하였는데 RPM이 증가함에 따라 토크별 운전시간에 따른 엔진의 최고폭발압력은, 그 감소 폭이 점점 줄어들었고, 1600RPM에서는 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 즉 RPM과 토크가 낮을 때에는 운전 시간이 지남에 따라 최고폭발압력이 감소하였지만, RPM과 토크가 높아짐에 따라 최고폭발압력은 거의 변화가 없었다. 동일한 RPM과 토크에서 운전시간에 따라 폭발압력이 감소했다는 것은

공급연료량의 감소에 대응하는 것이며 이는 마찰손실의 감소에 의한 정미열효율의 증대를 뜻하고, 피스톤링의 밀봉작용이 향상된 것임을 알 수 있다. 높은 토크에서 최고폭발 압력의 변화가 거의 없는 것은 무침가시에도 비교적 양호한 윤활상태이었기 때문에 그 효과가 상대적으로 적게 된 것으로 추정된다.



(a) 1000RPM



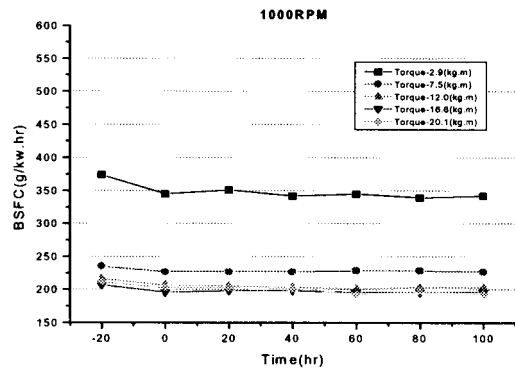
(b) 1400RPM

Fig. 5 Variations of maximum pressure versus run hours according to Eng. torque & speed

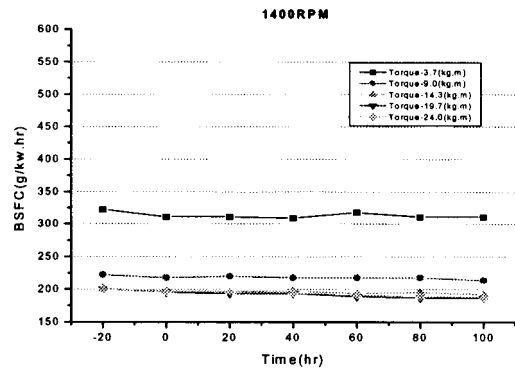
3.3 연료소비율

소비되는 연료량을 측정하기 위해서 연료탱크와 엔진 연료펌프 사이에 일정량(100cc, 200cc)이 표시된 유리관을 사용하여, 스톱와치로 연

료가 소비되는 시간을 측정함으로써, 연료소비율을 계산하였다. Fig. 6은 각 RPM에 있어서 토크별 운전시간에 따른 엔진의 연료소비율의 변화를 나타낸다. 그림에서와 같이 연료소비율은 모든 조건에서 감소하였고 이것은 앞에서 언급한 바와 같이 윤활제의 첨가로 인하여 윤활유 시스템상의 윤활부위의 마찰손실감소와 밀봉효과에 의한 것으로 판단되며 RPM과 토크가 증가할수록 감소율이 낮아짐을 알 수 있다. 특히 모든 조건에서 연료소비율의 감소율은 윤활유 첨가제를 투입한 직후에 가장 컸으며 그 이후의 운전시간에서는 변화가 없음을 알 수 있다.



(a) 1000RPM

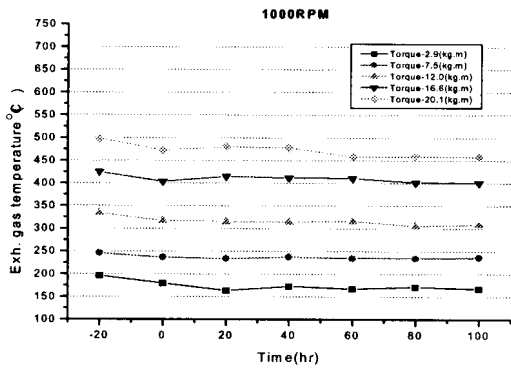


(b) 1400RPM

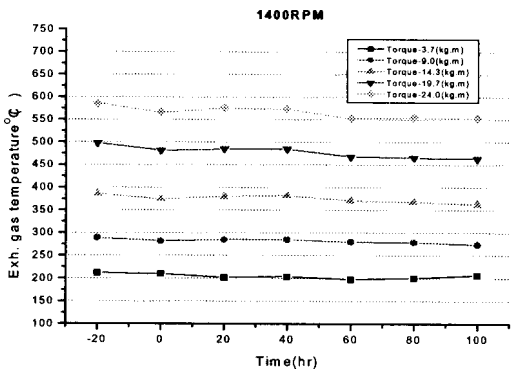
Fig. 6 Variations of BSFC versus run hours according to Eng. torque & speed

3.4 배기가스 온도

Fig.7은 각 RPM에 있어서 토크별 운전시간에 따른 엔진의 배기가스 온도의 변화를 나타낸다. 그림에서와 같이 배기가스 온도도 연료소비율의 변화추세와 비슷하게 모든 조건에서 감소하였고 특히 낮은 RPM과 토크에서는 변화가 거의 나타나지 않았으며 RPM과 토크를 증가시킬수록 온도의 감소율이 크게 나타났다. 특히 모든 조건에서 배기가스 온도의 감소율은 윤활유 첨가제를 투입한 직후에 가장 크게 나타났다. 이것은 동일한 RPM과 토크의 조건에서 연료소비율이 낮아져 최고폭발압력이 감소하였고 그로 인해 배기가스 온도가 낮아짐을 알 수 있다.



(a) 1000RPM



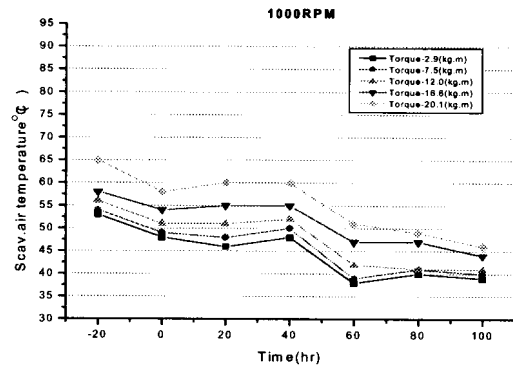
(b) 1400RPM

Fig. 7 Variations of Exh. gas temperature versus run hours according to Eng. torque & speed

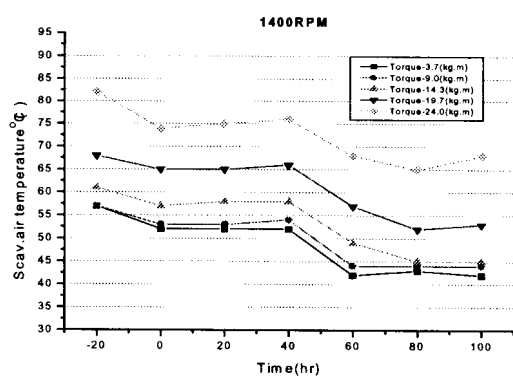
3.5 급기 온도

실험대상 기관은 과급기관이기 때문에 엔진 성능의 변화는 급기온도에도 영향을 미친다. 일반적으로 급기온도의 변화는 배기가스 온도의 변화에 비례한다.

Fig.8은 각 RPM에 있어서 토크별 운전시간에 따른 엔진의 급기온도의 변화를 나타낸다. 그림에서와 같이 급기온도도 모든 조건에서 감소하였고 특히 낮은 RPM과 토크에서는 운전시간에 따라 연속적으로 온도가 감소한 반면에 RPM과 토크를 증가시킬수록 온도가 감소하다가 100시간 근처에서는 거의 변화하지 않고 안정되는 것으로 나타났다. 급기온도 또한 모든 조건에서 감소율이 윤활유 첨가제를 투입한 직후에 가장 크게 나타났다.



(a) 1000RPM



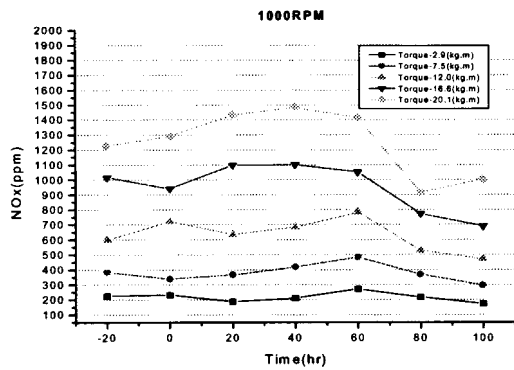
(b) 1400RPM

Fig. 8 Variations of Scav. air temperature versus run hours according to Eng. torque & speed

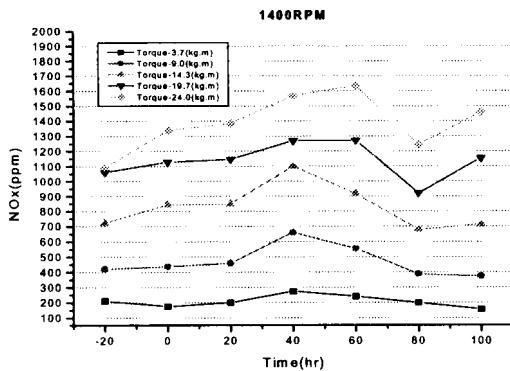
3.6 배기배출물

3.6.1 NOx의 배출농도

Fig.9는 각 RPM에 있어서 토크별 운전시간에 따른 엔진의 NOx배출농도의 변화를 나타낸다. NOx배출농도는 모든 조건에서 40~60시간 운전까지 지속적으로 상승하다가 그 이후에 감소하는 것을 볼 수 있으나 특히 높은 RPM과 토크에서는 80시간 운전 이후 다시 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같이 NOx배출농도가 일정 하지 않은 것은 다음과 같은 이유 때문이라고 생각된다. 즉, 연소에 있어서 NOx의 배출농도는 연소



(a) 1000RPM



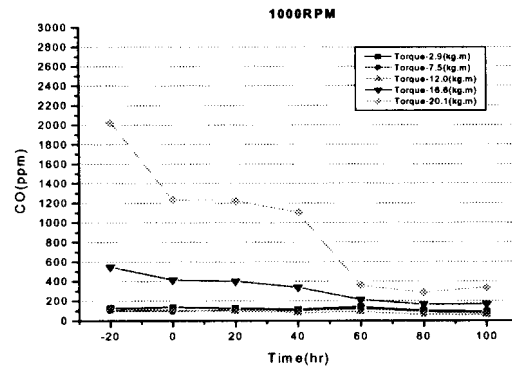
(b) 1400RPM

Fig. 9 Variations of NOx emission versus run hours according to Eng. torque & speed

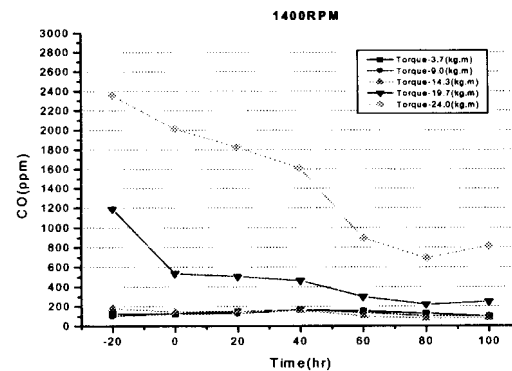
실의 잔류 O₂농도와 연소 최고온도에 영향을 받기 때문에 마찰손실의 감소로 연소실 부하가 감소하고 T/C에 의한 급기압력이 감소하므로, 이들의 복합적인 영향에 의한 것으로 생각된다.

3.6.2 CO의 배출농도

Fig.10은 각 RPM에 있어서 토크별 운전시간에 따른 엔진의 CO배출농도의 변화를 나타낸다. CO배출농도는 낮은 토크에서는 농도가 변화하지 않았으나 토크가 높은 경우에는 운전시간이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났으며 80시간을 전후로 안정화되는 모습을 보여 준다. 여기서도 CO배출농도의 감소율이 윤활유 첨가제를 투입한



(a) 1000RPM



(b) 1400RPM

Fig. 10 Variations of CO emission versus run hours according to Eng. torque & speed

직후에 가장 변화가 크게 변화하는 것으로 나타났다. CO배출농도 역시 연소실 부하와 급기압력의 복합적인 영향을 받는 것이지만 대체로 전자의 영향이 현저히 우세한 것으로 판단된다.

3.6.3 O₂의 농도

Fig.11은 각 RPM에 있어서 토크별 운전시간에 따른 엔진의 잔류 O₂농도의 변화를 나타낸다. O₂농도는 낮은 RPM과 토크에서는 거의 일정하였고 RPM과 토크를 높일수록 40시간을 전후로 감소하다가 다시 상승하였고 80시간을 전후로 다시 감소하였다. O₂의 농도는 과급기의 효율과 관련이 깊으므로 좀더 많은 검토가 필요하다고 판단된다.

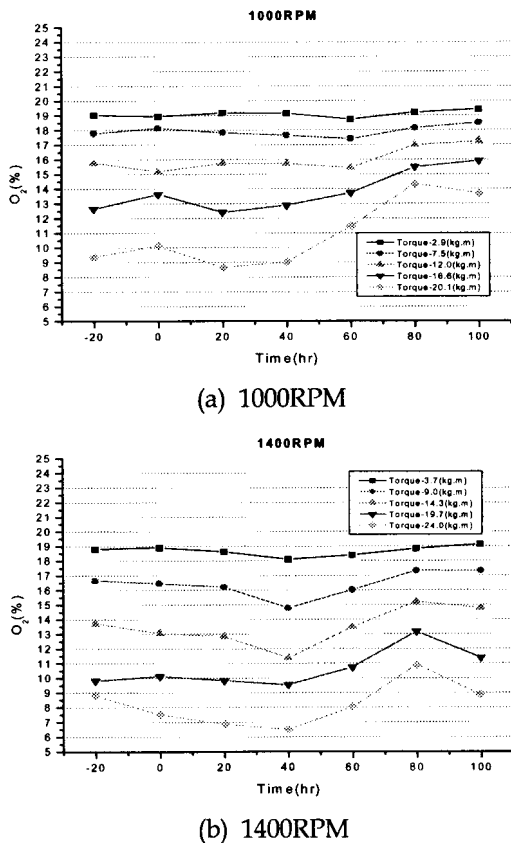


Fig. 11 Variations of O₂(%) versus run hours according to Eng. torque & speed

3.6.4 스모크의 배출농도

Fig.12는 각 RPM에 있어서 토크별 운전시간에 따른 엔진의 스모크의 발생 변화를 나타낸다. 스모크의 발생은 전운전 시간에 걸쳐 거의 변화가 없으나 대체적으로 감소하는 것으로 볼 때 윤활유 첨가제가 스모크 감소에도 영향을 미치고 있다고 판단된다.

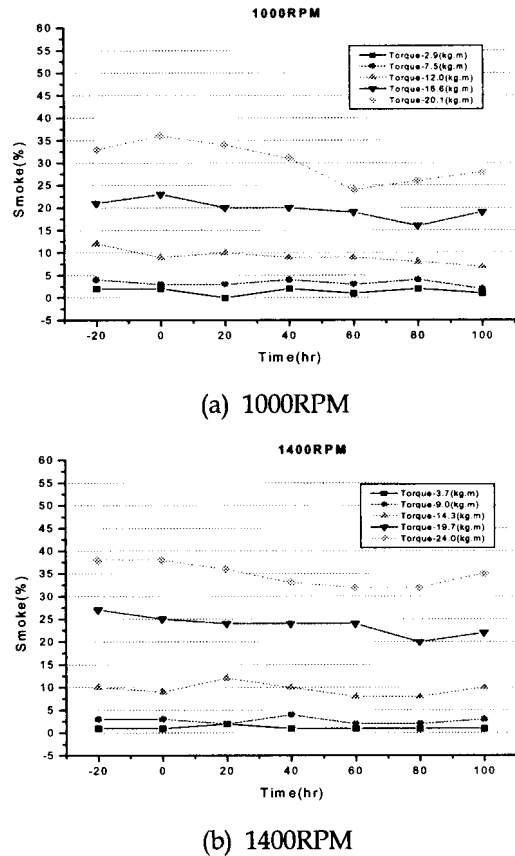


Fig. 12 Variations of Smoke(%) versus run hours according to Eng. torque & speed

제4장 결론

이상에서와 같이 나노구리합금첨가 윤활제가 기관성능에 미치는 효과를 파악하기 위하여 산

업용 디젤기관에 대하여 일정한 부하와 회전속도에서 운전시간에 따른 엔진성능 및 배기배출물의 변화를 실험계측하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 엔진의 최대토크가 첨가제사용 이후 증가하였다.
- (2) 각각의 RPM 및 토크에 있어서 실린더 폭발압력, 연료소비율, 배기가스온도, 급기온도는 첨가제의 사용 이후 감소하였고 그 변화율은 첨가제사용 직후에 가장 높게 나타났다.
- (3) 각각의 RPM 및 토크에 있어서 첨가제의 사용 이후 NOx배출 농도는 증가하였고, CO와 스모크의 배출농도는 감소하였으며 전반적으로 배기오염물질의 배출성능은 악화되지는 않았다. 그러나, 나노구리합금첨가 윤활제가 배기배출물에 미치는 영향에 관하여는 지속적인 검토가 필요하다고 판단된다.

실험결과를 종합하면, 나노구리합금첨가 윤활제를 디젤기관에 적용하면 최대토크가 증가하고 동일토크 및 RPM에서 연소실 압력이 감소하며 연료소비율이 감소하고 있는데, 이는 윤활성을 향상시켜 운동부에서의 마찰손실을 감소시키고, 동시에 피스톤부의 밀봉작용을 높인 결과로 생각된다.

참고문헌

- (1) Bhushan, B. and Gupta, B. K., *Handbook of Tribology*, McGraw Hill, 1991.
- (2) Hardy, w. b. and Doubleday, I., "Boundary Lubrication-The Paraffin 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 (7) H. E. Sliney, "Dynamics of Solid Dispersions in Oil During the Lubrication of point Contacts, partI-Graphite," *ASLE Trans.*, Vol.25, No.2, pp.183-189, 1982.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) G. P. Shpenkov, *Physical Chemistry of Friction*, Minsk, 1991.
- (12) M. V. Astakhov and V. A. Mouratov, "Nickel Fine Particle's Adsorptive-Catalytic

Mechanism," *Wear*, Vol. 176, pp.61-65,1994.
(13) 안효석, 이성철, "첨가제에 함유된 미세한

구리합금입자의 마찰 및 마모 특성," 한국
윤활학회지, 제12권 제2호, pp.32-40, 1996.

