

大形디젤機關의 劣化에 따른 排出가스 特性에 關한 研究

A Study on the Effects of Diesel Engine Deterioration on Exhaust Gas Emission

김기호* · 안군재 · 강금원 · 이태영 · 엄동섭 · 임윤성¹⁾
국민대학교 자동차전공대학원, ¹⁾국립환경과학원 교통환경연구소
(2005년 8월 13일 접수, 2005년 12월 19일 채택)

Kiho Kim*, GyunJae Ahn, GeumWon Gang, TaeYoung Lee,
DongSeop Eom and YunSung Lim¹⁾
Graduate School of Automotive Engineering, Kookmin University 861-1 Chongnung-dong,
Songbuk-gu, Seoul 136-702, Korea
¹⁾National Institute of Enviromental Research, Kyungseo-dong,
Seo-gu, Incheon 404-708, Korea

(Received 13 August 2005, accepted 19 December 2005)

Abstract

Nowadays it has been strongly required to control emissions from vehicles specially in diesel engines because of increasing number of vehicle in Korea. This research aims to provide with some of deterioration factors on vehicles for emissions characteristics and the test was done on an electronically controlled heavy-duty diesel engine under severe driving conditions such as 1200 driving hours, 220,000 km driving distance and a full load. Under various driving conditions, CO, HC, NOx, PM and Soots emissions were estimated under D-13 mode and D-3 mode respectively. CO emission was not changed until 500 running hours, and as engine aging is progressed THC was not changed until 500 running hours but it decreased to about 33%, NOx decreased constantly but on the other hand PM increased up to 6.9% during the aging process.

Key words : Deterioration factor, Full useful life, Heavy-duty diesel engine, Engine aging

1. 서 론

산업 발달과 함께 문명은 급속히 진보하였고 이에 따른 인구증가 및 경제성장은 급격한 차량 증가를 초래하게 되었다. 그중 디젤기관은 가솔린기관에 비

해서 압축비가 높고 열효율이 좋으며 적은 연료소비량과 높은 출력의 장점이 있어 트럭이나 버스 등 대형차량에 널리 사용되고 있다. 특히 이러한 장점과 더불어 우리나라에서는 예전부터 다른 나라와 달리 휘발유에 비해 경유연료가격이 저렴한 편이어서 경유차량의 보급비율을 높이는데 일조하였다. 이렇게 경유차량의 보유비율이 높아짐에 따라 디젤기관에서 배출되는 오염물질이 대기오염에 미치는 영향 또한

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-910-5033, E-mail : kkh2373@hanmail.net

점차 증가하여 가솔린차량과 디젤차량을 비교했을 때, 2002년의 경우 국내디젤 자동차의 보유비율이 약 33.4% 정도인 반면에 전체 오염물질 배출측면에서는 약 51%를 차지하고 있어 심각한 사회적 문제를 일으키고 있는 상태이다(국립환경과학원, 2004). 이러한 대기오염 개선방향의 일환으로 외국에서는 자동차에 대한 체계적인 관리 측면에서 기관이 유효수명기간(full useful life)까지 운행 할 경우의 배출가스 특성을 예측한 열화계수(deterioration factor)를 산정하여 적용함으로써 기관 노후화에 따른 자동차 유해 배출가스에 의한 대기오염물질배출량을 사전에 규제하고 있다(국립환경과학원, 2000). 이와 관련하여 국내에서도 기관 내구성 실험을 실시하여 기관 노후화에 따른 엔진성능 및 배출가스 특성에 관련된 연구가 꾸준히 이루어지고 있지만 수개월이 소요되는 실험 기간과 그에 상응하는 비용 등에 의한 과도한 예산문제로 인해 어려움이 많다.

이에 본 논문에서는 전자제어식 대형디젤기관에 대해 내구성 실험을 통하여 기관 열화에 따른 엔진성능 및 배출가스 변화 특성에 대해서 평가함으로써 향후 대형디젤기관의 대기오염물질 배출계수 및 기관열화실험에 필요한 기초 자료로 제공하고자 한다.

2. 디젤기관 열화에 영향을 미치는 인자

디젤기관은 그림 1과 같이 크게 6개의 기능그룹으로

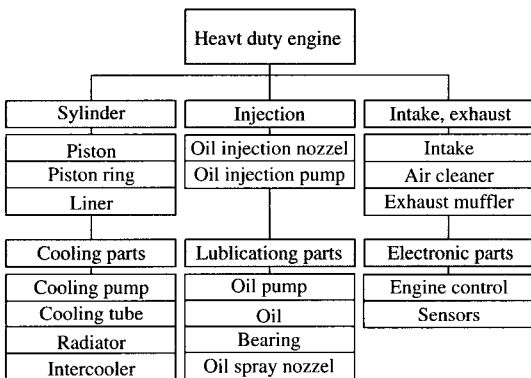


Fig. 1. The factors having an effect on the deterioration of the diesel engine.

로 분류될 수 있으며, 이 기능그룹 각각은 열화가 진행되면서 엔진성능 및 배출가스 특성에 영향을 미치고 있다.

2.1 연소실주변

피스톤, 피스톤링 및 실린더 라이너 등은 고온에서 고속의 왕복운동을 하는 연소실을 구성하는 가장 주요한 부품이다. 특히, 피스톤링과 라이너 사이를 통해 연소실로 유입되는 기관의 윤활유 성분은 입자상물질의 SOF 성분으로 배출되게 된다(조강래 등, 1997).

기관 최초 조립 직후에는 피스톤링과 라이너간의 표면조도 상태가 상대적으로 거칠어 윤활유 제어능력이 열악할 수 있어, 기관 초기운전기간 동안은 정상적인 길들이기 기간이 필요하다. 또한 기관열화에 의한 피스톤링의 마모는 블로우바이 가스의 배출량을 증가시키며 연소실내의 연소압력을 떨어뜨려 연소 효율을 저하 시키고 이에 따라 HC 및 CO의 배출량이 증가하게 된다.

2.2 연료분사계통

연료분사노즐은 연료분사펌프로부터 이송된 연료를 니들스프링으로 가압하여 분무입자로 전환시켜 일정량의 연료를 연소실에 분사하는 역할을 한다. 이는 연소실내 고온의 환경에서 동작하며 또한 수 마이크로 단위로 설계되고 가공된 연료분공의 미세한 오염에도 연료의 분무특성이 바뀔 수 있다. 연료분무특성은 연료와 공기의 혼합으로 연소에 영향을 미치므로 이 관련 부품들이 열화되는 경우 최적연소의 달성이 불가능하여 매연 및 입자상물질 등이 증가하게 되며, 반면에 NOx는 불완전연소에 의해서 감소하게 된다(Yashio et al., 1997).

2.3 흡배기계통

1사이클당의 발생열량은 공연비를 일정하게 하면 흡입공기질량에 비례하므로 도시평균유효압력은 체적효율에 비례한다. 따라서 고효율을 얻기 위해서는 고회전까지 높은 체적효율을 유지하는 것이 중요하다. 이와 같이 흡배기계통은 기관의 체적효율에 직접적인 영향을 미치며, 에어클리너의 오염은 흡입공기량을 감소시켜 연소상태를 악화시키게 되는데, 이는 연소실의 공연비를 농후하게 하여 NOx 및 입자상물질 증가에 유리한 고온 화염형성조건을 만들게 된다.

2.4 냉각계통

기관은 운전 중 연소가스의 온도가 2,000°C에 달한다. 이를 그대로 방치한다면 기관은 과열상태가 되어 실린더에 변형이 생기거나, 윤활이 불량하게 되어 결국에는 피스톤이 실린더에 달라붙게 된다. 반대로, 너무 냉각을 하면 연료의 기화가 불충분하게 되기 때문에 연소상태가 나빠지는 과냉각상태가 된다. 또한 기관의 냉각계에 공동현상(cavitation)이 발생하며, 냉각계통중 인터쿨러의 오염은 흡입공기의 온도를 높여 NOx 배출량을 증가시키며 반대로, 기관이 과냉되는 경우에는 THC의 배출량이 증가하게 된다.

2.5 윤활 계통

기계장치의 왕복운동이나 회전운동 등의 운동부분에는 접동부가 있어서 여기에 윤활유를 청정한 상태로 적정하게 공급하는 시스템이 윤활계이다. 윤활의 주된 목적은 접동부의 용착방지 및 마찰·마멸의 저감, 마찰열 및 고온부분의 냉각, 녹·부식의 발생방지 및 가스누출부분의 밀봉작용이고 기관의 신뢰성, 내구성에 있어서 중요한 역할을 한다(Heywood, 1988). 윤활계통의 열화 또는 불량시 기관은 구조적으로 심각한 문제를 일으키게 된다. 기관의 배출가스 특성에 영향을 미치는 윤활특성은 주로 스프레이 노즐에 의한 피스톤의 냉각특성이며, 이것이 불량할 경우 피스톤의 고온에 의해 NOx 배출량이 증가하게 된다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

실험에 사용된 기관은 국내에서 생산한 고속버스에 탑재되는 EUI(Electronic Unit Injector)가 장착된 전자제어식 터보차저 대형디젤기관을 대상으로 실험을 수행하였다. 장치구성의 개략도를 그림 2에 나타내었고, 그림 3과 4에는 본 실험에 사용된 엔진동력계 및 배출가스 측정장치의 사진을 각각 나타내었으며, 실험에 사용된 기관의 제원을 표 1에 나타내었다.

3.2 실험방법

본 실험에서 기관의 노후화를 측정하기 위해 사용한 실험방법은 국내 제작자동차 배출가스 인증시험

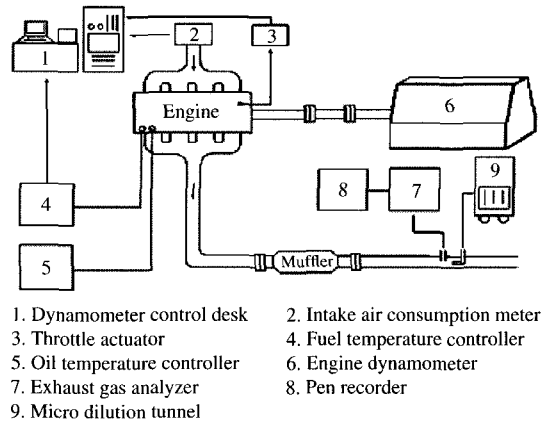


Fig. 2. Schematic diagram of emission measuring system.

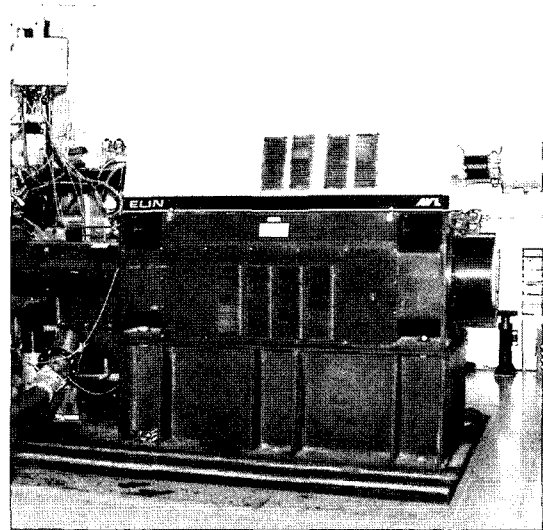


Fig. 3. View of heavy-duty diesel engine dynamometer.

방법인 대기환경보전법 환경부고시(환경부, 2005) 「제작자동차 인증방법 및 절차에 관한 규정」에 의해서 내구실험을 하였으며, 실험이 진행되는 동안 출력 및 배출가스 등을 측정하여 기관 열화에 따른 성능의 변화 특성을 파악하고자 하였다.

3.2.1 운전조건

운전조건은 환경부고시에 의해서 전부하 상태에서 1,200시간 동안 기관을 운전하였다. 전부하 운전조건은 단시간에 기관 각 부분의 열화를 급속히 진행시

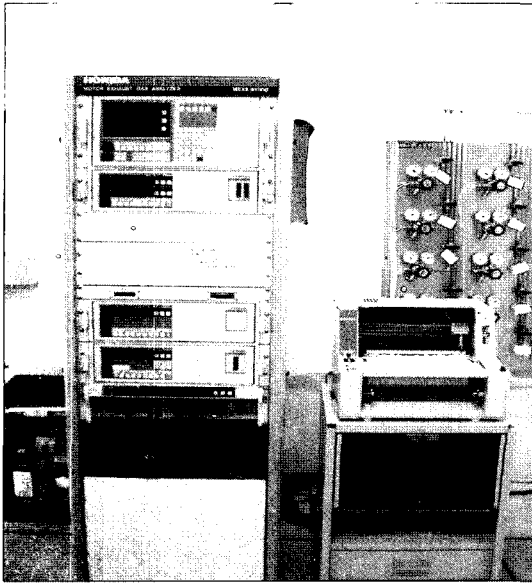


Fig. 4. View of exhaust gas analyzer and recorder.

Table 1. Specifications of test engine.

Items	Specifications
Model year	2001
Engine type	In-line 6
Displacement (cc)	12,920
Max.Power (PS/rpm)	410/1900
Max.Torque (kgf.m/rpm)	173/1500
Fuel injection type	EUI
Injection timing	BTDC 16° ~ ATDC 2°

킬 수 있는 가장 가혹한 조건의 내구시험 운전법으로 사용되어지고 있으며, 그림 5에 운전 패턴을 나타내었다.

3. 2. 2 기관성능 및 배출가스 평가

기관의 성능은 기관회전수를 1,000 rpm부터 최대 출력점인 1,900 rpm까지 200 rpm씩 변화시키면서 전 부하 상태에서 기관출력 및 연료소비율 등을 측정하였다.

배출가스 성능평가는 실험대상 기관의 제작년도를 기준으로 대기환경보전법 시험방법에 의하여, 3.5톤 이상 중량자동차 배출가스 규제시험모드인 D-13모드 하에서 CO, THC, NOx 및 PM을 측정하였으며, 매연은 D-3모드 하에서 측정을 하였다. 그림 6에

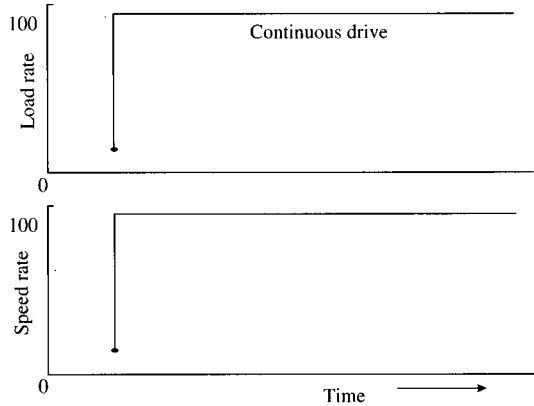


Fig. 5. Driving pattern for engines durability.

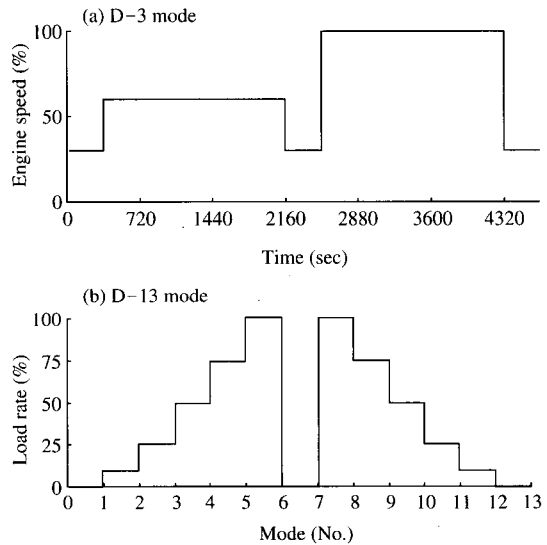


Fig. 6. Driving pattern for engine performance and emission test.

D-13모드 및 D-3모드의 운전패턴을 나타내었다.

내구시험이 진행되는 동안 기관성능 및 배출가스 성능평가 또한 「제작자동차 인증방법 및 절차에 관한 규정」에 의해서 0시간, 25시간, 75시간, 125시간, 250시간, 500시간, 1,000시간 및 1,200시간에서 측정하였다.

3. 2. 3 기관정비

내구시험 1,200시간이 진행되는 동안 기관의 정비

에 관련된 사항은 「제작자동차 인증방법 및 절차에 관한 규정」 및 기관정비 지침서에 따라서 연료분사 노즐 청소 및 정비, 연료필터 및 공기필터, 기관볼트 토크, 밸브간격, 기관 구동벨트 장력, 냉각시동 촉진 장치 등의 항목들을 정기적으로 정비·점검하였으며, 기관의 오일 및 오일필터, 공기필터는 매 100시간마다 교환하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 기관성능

그림 7은 기관을 전부하 운전 조건에서 1,200시간 운전하였을 때 출력 및 연료소비량의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 기관 출력의 경우 내구시험 시작 전 최초출력대비 약 3.7% 증가하였으며, 단위 출력 당 연료소비량은 1,200시간 운전 후 약 1.3% 감소하였다. 이처럼 1,200시간의 내구시험 운전 이후에도 출력 및 연비의 변화가 거의 없는 것은 정비지침서에 의한 정기적인 점검 및 기관의 운전조건에 따라 최적의 성능을 유지하도록 EUI에 의해 연료량 및 연료분사시기 등을 제어한 영향으로 사료된다.

4.2 기관열화에 따른 배출가스 특성

기관의 배출가스 내구성을 살펴보기위해 1,200시간동안 전부하 운전조건에서 기관을 운전시켰으며, 이때 부동 간격으로 중량자동차 배출가스규제시험방법으로 CO, THC, NOx, PM 및 매연 등을 측정하여 배출가스의 열화특성을 평가하였다.

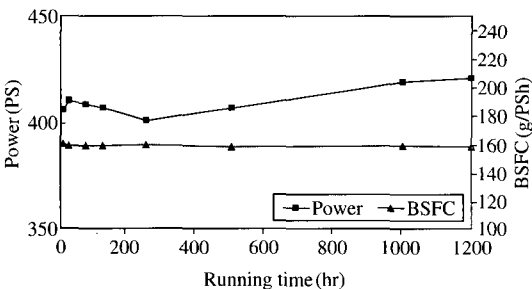


Fig. 7. Engine power and BSFC test results according to the engine aging.

4.2.1 일산화탄소

그림 8은 기관열화에 따른 일산화탄소의 배출경향을 나타낸 그림이다. 그림에서 보여주듯이 기관 운전 시간이 누적됨에 따라 약 500시간까지는 감소와 증가를 반복하며 큰 경향성을 나타내지 않았으나 그 이후부터 다소 증가하기 시작하여 1,200시간 내구시험이 완료되는 시점에서 초기 CO값에 비해 약 15% 증가한 결과를 나타내었다. 500시간까지의 경향은 기관의 초기 길들이기 과정으로 불규칙한 배출특성을 나타낸 것으로 사료되며, 이후부터는 관련부품의 기능저하로 인한 연료 효율악화로 CO가 다소 증가하는 경향을 보인 것으로 사료된다.

4.2.2 탄화수소

그림 9는 기관열화에 따른 탄화수소의 배출경향을 내구운전 시간에 따라 나타낸 그림이다. THC배출량은 내구운전 시간이 증가함에 따라 지속적으로 증가하거나 감소하는 경향을 보이는 것이 아니라, 감소

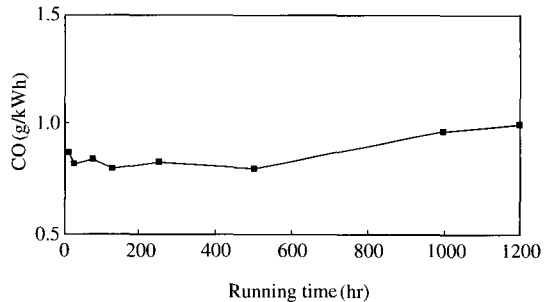


Fig. 8. CO emission deterioration characteristics during 1,200 hour.

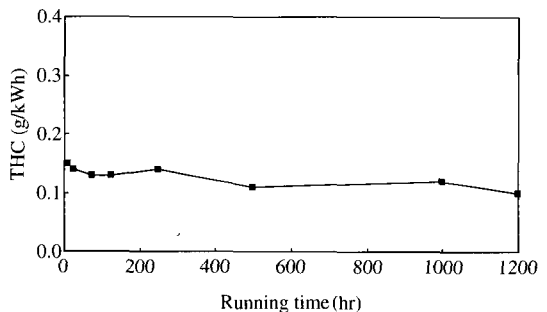


Fig. 9. THC emission deterioration characteristics during 1,200 hour.

또는 증가를 불규칙하게 나타내었다. 또한 CO 및 NOx 등 다른 배출물질 데이터들과 비교하여 불 때 배출가스 상호간에 비례하거나 반비례하는 연관성이 없다(Heywood, 1988). 이러한 관점에서 불 때 전체 운전시간중 기관에서 배출되는 THC의 농도가 보통 100 ppmC 이하임에도 불구하고 배출가스 측정 분석기의 THC 측정범위 (span range : 1,000 ppmC)가 높게 설정되어 실험오차에 의한 영향으로 보다 정확한 측정결과값을 얻지 못한 것으로 사료된다. 향후 실험에 있어서는 실험대상 기관에서 배출되는 배출량을 미리 파악하여 배출가스 분석기의 측정범위 설정 등 보다 정밀한 실험방법의 검토가 필요할 것으로 판단된다.

4. 2. 3 질소산화물

그림 10은 기관열화에 따른 질소산화물의 배출경향을 내구운전 시간에 따라 나타낸 그림이다. 그림에서 보여주듯이 내구시험이 진행됨에 따라 전 운전시

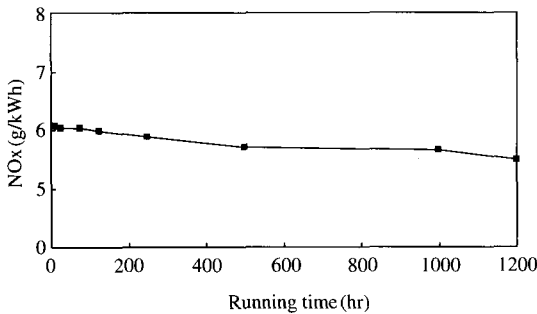


Fig. 10. NOx emission deterioration characteristics during 1,200 hour.

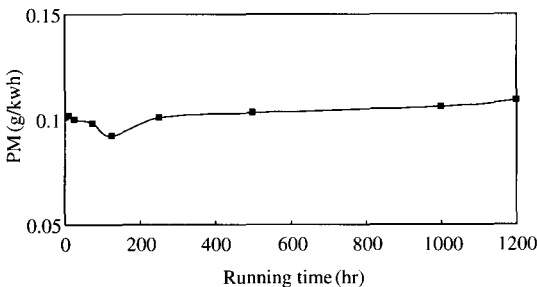


Fig. 11. PM emission deterioration characteristics during 1,200 hour.

간 영역에서 지속적인 감소경향을 나타내었으며, 시작점대비 1,200시간 후에는 9.6% 감소되었다. 이는 내구시간이 증가할수록 연소효율이 저하되어 온도가 낮아짐으로써 고온영역에서 다량 배출되는 NOx가 감소하는 것으로 사료된다.

4. 2. 4 입자상물질

그림 11은 기관열화에 따른 입자상물질의 배출특성을 나타낸 것으로 최초 150시간 이전에서의 경향은 피스톤링과 라이너간의 표면조도 상태가 거칠어 윤활유 제어능력이 상대적으로 열악한 상황에서 점차 자리를 잡아가는 과정으로서, 입자상물질의 매연 성분이 일정한 가운데 용해성유기분이 감소되므로 입자상물질의 배출량이 감소하는 것으로 사료된다. 150시간 이후부터는 입자상물질의 배출량이 소폭 증가하는 추세를 보이고 있는데 이는 기관 관련부품들의 기능저하로 연소효율이 다소 악화되어 미연소연료 및 윤활유가 입자상물질에 흡착되어 배출되기 때문이며, 본 실험에서는 초기값 대비 1,200시간 내구 시험 후 결과는 약 6.9% 증가한 경향을 보이고 있다.

4. 2. 5 매연

그림 12는 매연규제시험방법인 D-3모드에서 기관의 매연농도를 배출가스 규제시험 측정과 동일한 시점에서 측정한 결과이다. 그림에서 보여주듯이 매연 농도는 5% 미만으로 그 절대값이 매우 낮은 수치로서 측정 오차범위 이내여서 이러한 결과로서 열화 특성을 언급하기는 다소 어려움이 있다. 단지 미연탄소덩어리는 기관이 열화 되어도 전자제어식기관의 경우 매연농도가 확연하게 증가하지 않음을 알 수 있었다.

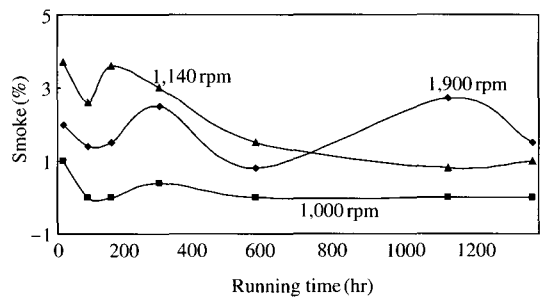


Fig. 12. Soot emission deterioration characteristics during 1,200 hour.

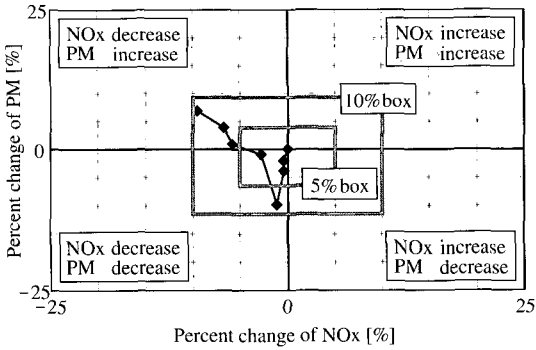


Fig. 13. Deterioration range of the NOx and PM.

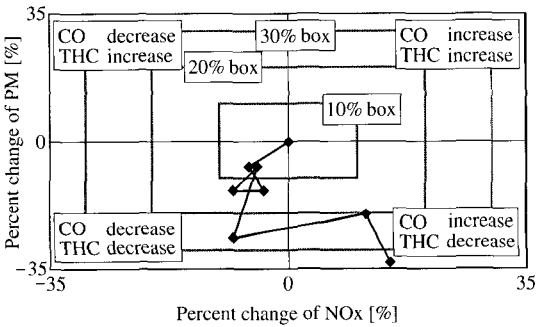


Fig. 14. Deterioration range of the CO and THC.

4. 3 오염물질별 열화성능

그림 13과 14는 전부하 상태로 1,200시간 운전하였을 때 본 연구에서 사용된 대형디젤기관의 규제대기오염물질별 열화정도를 나타낸 그림이다. 그림 13에서 보는 바와 같이 기관의 성능이 안정화가 이루어지는 250시간 이후부터는 PM과 NOx의 Trade off 관계가 잘 나타나고 있음을 알 수 있다.

CO와 THC는 국내 디젤기관의 배출규제수준을 고려할 경우 가솔린 기관에 비해 소량 배출되므로 큰 의미는 없을 것으로 생각되나, PM, NOx 경우에는 비록 1대의 실험결과로서 그 대표성을 언급하기에는 다소 무리가 따르지만 앞에서 언급하였듯이 현재의 전자제어식 디젤기관의 PM 및 NOx의 열화성능은 매우 낮은 것으로 생각된다

5. 결 론

전자제어식 대형디젤기관을 대상으로 기관 열화에 따른 배출가스 특성 평가를 위해 전부하상태에서 1,200시간동안 내구실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 기관의 성능에서 출력의 경우 최초출력대비 3.7% 증가하였으며, 단위 출력 당 연료소비율은 1.3% 감소하였다.

2) CO는 500시간부터 다소 증가하기 시작하여 최종결과대비 약 15% 증가하였고 연료분사계통 관련 부품의 기능저하로 인한 연소효율악화로 인해 CO가 증가하는 경향을 보이는 것으로 사료된다.

3) THC는 시간의 증가에 따라 불규칙적으로 증가하거나 감소하는 경향을 보이므로 엔진 열화와의 상관성을 규명하지 못하였다. 기관에서 배출되는 THC의 농도(100 ppmC 이하) 대비 적절한 배출가스 분석기의 측정범위 (span range : 1,000 ppmC) 설정이 이루어지지 못한 것으로 사료되며, 향후 실험에 있어서는 보다 정밀한 실험방법의 검토가 필요할 것으로 판단된다.

4) NOx는 시간증가에 따라 감소하는 경향을 나타내어, 최종결과대비 약 9.6% 감소하였으며 내구시간이 증가할수록 연소효율이 저하되고 온도감소를 나타내어 연소효율이 높을 때 배출되는 NOx가 감소하는 것으로 사료된다.

5) PM은 시간증가에 따라 증가하는 경향을 나타내었고, 최종결과대비 약 6.9% 증가하였다. 최초 150시간 이전에서의 경향은 운할 제어능력이 떨어지는 기관의 초기 길들이기 과정으로 입자상물질 중 용해성유기성분의 배출량 감소에 의한 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

국립환경과학원 (2004) 대기보전정책수립 지원시스템 4차년 보고서.
 국립환경과학원 (2000) 비도로이동오염원 오염물질 배출규제 방안에 관한 연구.
 조강래, 김희강 (1997) 산화촉매에 의한 대형디젤엔진의 배출가스 정화 특성, pp.6-8.
 환경부 (2005) 제작자동차 인증방법 및 절차에 관한 규정.

환경부 고시 제2004-205호

Heywood, J.B. (1988) Internal Combustion Engine Fundamentals, pp.620-623. Mc Graw Hill.

Yashio, S., N. Akira, and S. Takashi (1997) Combustion and

NOx Emission Characteristics in a DI Methanol Engine Using Supercharging with EGR, SAE 971647.