

## 저압방식을 적용한 대형과급기관의 배기가스에 관한 EGR 효과

오 용 석\*

### EGR Effects on Exhaust Gas of Heavy-Duty Turbo Charge Engine with Low Pressure Route System

Yong Suk Oh\*

**요 약** 본 연구는 기관의 성능과 배출가스의 EGR 효과에 대한 것으로 기관은 6실린더 11리터의 대형터보디젤기관이며 EGR 방식은 저압루트시스템을 적용하였다. EGR 작동방식은 기계식이며 터빈 출구로부터 압축기 입구로 재순환시키는 방식이다. 또한 실험은 기관회전수와 부하별로 변경시켰으며 EGR율은 4%와 8%로 고정하여 실험하였고 그 결과를 기존 기관의 성능 및 배출가스결과와 비교 분석하였다. 따라서 본 연구의 목적은 대형터보디젤기관에 폭넓은 작동범위에서 EGR에 의한 기관 및 배출가스 성능에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

**Abstract** The effects of EGR on performance and emissions were investigated in this study. The engine used for the tests was a six-cylinder, 11 liter, and turbo-charged, heavy-duty diesel engine with a low pressure route EGR system. The volume of recirculated gas was controlled by a manually operated valve which was installed between the turbine outlet and compressor inlet. The experiments were performed at various engine speeds and loads while the EGR rates were set at 4% and 8%. Exhaust emissions with EGR system were compared with the baseline emissions.

**Key Words :** Low pressure route, Exhaust gas recirculation, Heavy-duty diesel engine, EGR rate

#### 1. 서 론

전세계적으로 다양한 세 법규 및 규제 제정으로 디젤기관의 배출가스 중 특히, NO<sub>x</sub> 저감에 대한 대응책을 절실히 요구하게 되었다. Shiozaki et al.[1]은 디젤기관 제조업체는 NO<sub>x</sub> 저감을 위한 수단으로 즉, 분사시기 지각과 그 외 방법을 이용하는 것은 한계 수준에 달했으며, 장래에는 EGR과 같은 방법이 사용되어야 함을 시사하였다.

디젤기관에 적용한 EGR 방식은 가솔린기관에 적용한 것과는 근본적으로 상이하다[2, 3]. 디젤기관의 연소는 가솔린기관의 연소와는 달리, 압축행정말에 연료가 연소실내로 분사되어 공급됨으로써 공기와 연료가 충분히 혼합되기 전에 연소가 시작되며 따라서, 공연비 분포가 불균일하다. 전체적인 연소과정은 기연소가스와 공기, 희박하거나 농후한 미연소 공기-연료 혼합기의 복잡한 혼합과 연소가 동시에 진행된다[4].

디젤기관에서 생성되는 대부분의 NO<sub>x</sub>는 급속 연소 초기의 이론공연비에 가까운 혼합기의 고온 분위기에서 NO 형태의 성분이 주로 발생하며, 연소 시작후 20°C

내에 대부분의 NO 생성이 완료된다. Sibling과 Woschni[5]은 대부분의 NO<sub>x</sub> 생성은 실린더 최대 압력에 도달하기 전에 발생하는 연소 생성물에서 일어남을 설명하였다.

디젤기관에서 EGR에 의한 NO<sub>x</sub> 저감 메커니즘은 산소농도저감이 근본적인 원인이라는 연구와 이에 반론하여 화염온도 감소가 원인이라는 연구가 보고되었다. 현재로서는 어느 것이 옳은지에 대한 결론은 제시되지 않은 상태이다.

본 연구는 디젤기관의 NO<sub>x</sub> 저감방법 중에서 EGR 시스템을 이용한 실험 연구로써 실험용 기관은 11,000cc 급 터보차지 대형디젤기관으로, 폭넓은 기관 작동범위에서 EGR에 의한 기관 및 배출가스 성능의 일반적인 영향을 고찰하는 것이다. 본 연구의 EGR 시스템은 EGR이 고부하 영역까지 가능하도록 저압 루트 방식을 이용하였으며, EGR 장치로는 터빈출구와 컴프레서 위구 사이에 일반 배관용 밸브를 설치하여 밸브 개도량을 기계적으로 조절함으로써 흡입공기량 변화를 근거로 하여 EGR율을 결정하였다. 기관회전수 1,000 rpm~2,200 rpm 까지 매 400 rpm 마다 측정하였고, EGR율은 4%와 8%로 고정하여 기관성능, 연료소비율 및 배출가스의 측정결과를 베이스 기관의 실험 결과와 비교·분석하여

\*거창기능대학 자동차과  
Tel: 055-949-2244

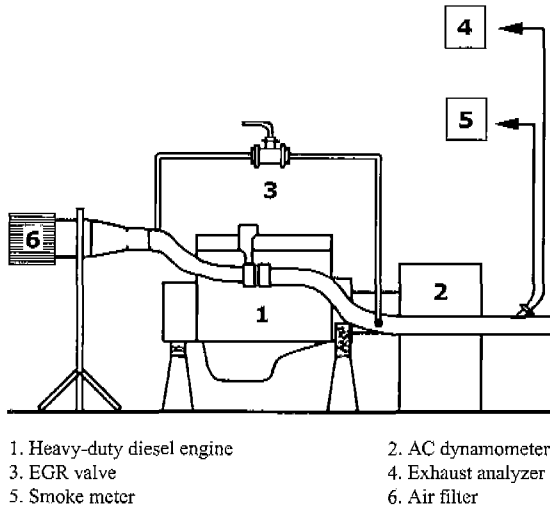


Figure 1. Schematic diagram of EGR system

EGR기술과 NOx의 상관관계를 정량적으로 나타내고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

기관동력계와 측정장치의 구성도를 그림 1에 나타내었다. EGR 시스템으로는 터빈 출구와 압축기 입구에 관을 연결하고, 그 사이에 일반 배관용 밸브를 설치하였다.

#### 2.1.1 실험기관

실험기관은 국내에서 제작되어 차량용, 산업용, 발전용으로 사용되는 모델로 시내버스 및 대형트럭에 탑재되는 기관을 이용하였으며 주요 제원은 Table 1과 같다.

#### 2.1.2 측정장치

대형기관동력계는 630 kW AC동력계(오스트리아 AVL사, APA DYNO)로서 동력계, 동력계 제어장치(engine controller), 연료온도 조절장치, 냉각수 온도 조절장치, 윤활유 온도조절장치, 흡입공기 유량계, 연료 유량계 등으로 구성되어 있고, 배출가스 측정장치(Horiba사, MEXA-9100D)는 디젤기관의 배출가스 중 CO, THC, NOx 및 CO<sub>2</sub>를 분석할 수 있다.

Table 1. Specifications of test engine

Items	Specifications
Type	Turbocharged
Displacement	11,051cc
Max. Power	220.5 kW / 2200 rpm
Max. Torque	1078 N · m / 1300 rpm
Compression ratio	17.1 : 1

## 2.2. 실험 방법

### 2.2.1 기관 성능실험

배기가스재순환(EGR)이 이루어질 때의 기관성능을 측정, 분석하여 기관의 출력 및 연료소비율의 변화를 파악하였다. 이때 운전조건은 기관회전수를 1,000 rpm에서부터 2,200 rpm까지 400 rpm씩 증가시키면서 각 기관회전수별 부하율은 25%, 50%, 75%, 100% 조건에서 각각 측정하였다. 기관성능시험은 먼저 EGR 장치를 부착하기 전 베이스상태에서 기관회전수를 증가시키면서 운전조건별 연료소비율, 기관출력, 배기가스온도, 흡기온도 등을 3분 동안 안정화시킨 후에 30초 동안 데이터를 수집, 산술평균 하였다. EGR장치를 부착한 후에 기관회전수 및 부하를 고정하고 제어 밸브를 통해 EGR율을 조정하여 동일한 방법으로 측정, 분석하였다. 흡기관과 배기관 사이의 압력차가 크지 않아 EGR율은 최고 8~9%가 가능하였으며, 데이터 중에서 EGR을 4%와 8%의 측정값을 취하였다.

### 2.2.2 배출가스 성능실험

배기가스재순환이 이루어지지 않을 때와 EGR이 이루어질 때 모두 NOx를 포함한 CO, THC, 스모크를 측정하였으며, 측정조건은 기관성능 시험과 동일한 운전 조건에서 측정하였다. EGR장치를 부착하기 전 기관의 베이스상태에서 기관회전수별, 부하별 CO, THC, NOx 그리고 스모크를 측정하고 EGR장치를 부착한 후에도 부착전과 동일한 방법으로 부하 25%, 50% 75%, 100%의 각 조건에서 실험하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 기관 성능실험

부하율을 100%에서 1,000 rpm에서부터 2,200 rpm까지 400 rpm씩 변화시켜가며 기관출력 및 토크와 연료소비율의 변화를 측정한 후 EGR 장착전과 장착후의 결과를 비교하여 Figure 2와 Figure 3에 나타내었다.

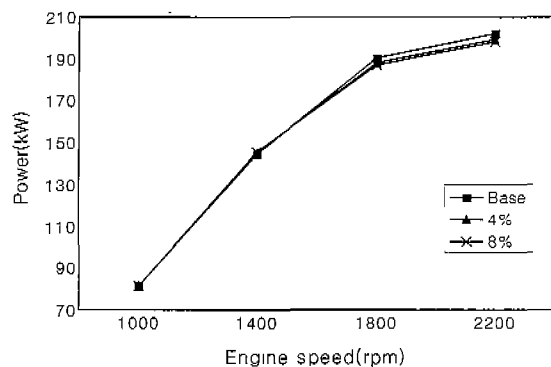


Figure 2. Effect of EGR on engine power at full load

저부하 영역에서의 EGR 장착 전·후의 차이는 매우 작았으며, 부하율 100%에서 기관출력은 저회전 범위에서 거의 변화가 없었고, 2,000 rpm에서 최고 2%까지 감소하였다. 연료소비율은 1,000~1,800 rpm 범위에서 1~2%, 2,200 rpm에서 최고 4% 이하로 증가하였다. 전반적으로 기관출력과 연료소비율 모두 그 변동폭이 작았으므로 배기가스를 재순환하여도 기관 성능에는 큰 영

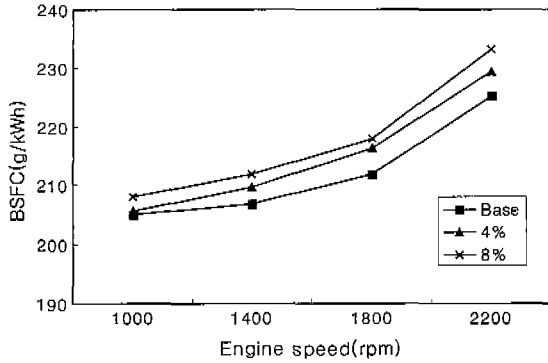
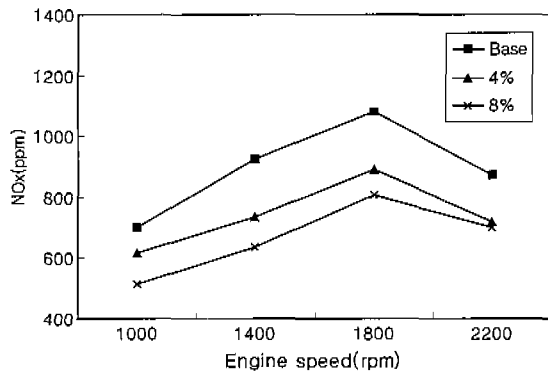
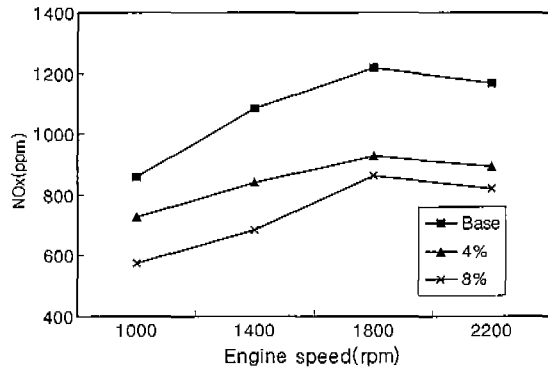


Figure 3. Effect of EGR on BSFC at full load



(a) 75%



(b) 100%

Figure 4. Effect of EGR on NOx emissions for 75 and 100% load

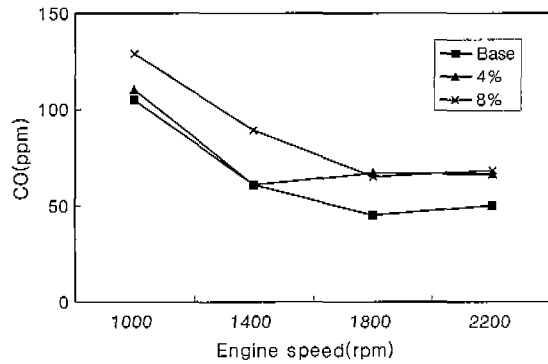
향이 없는 것으로 판단된다.

### 3.2 배출가스 성능실험

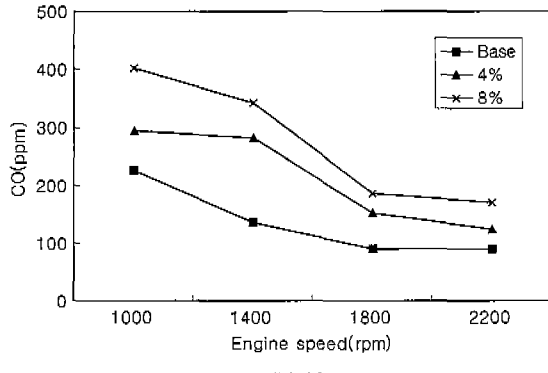
#### 3.2.1 질소산화물

Figure 4는 1,000 rpm에서부터 2,200 rpm까지 400 rpm씩 변화시켜가며 EGR 장착 전·후의 NOx 배출 변화를 부하율 75% 및 100%에 대하여 보이고 있다. 그림에서 보여주듯이 EGR을 적용하지 않았을 때 NOx발생량을 살펴보면 기관회전수를 높임에 따라 NOx는 1,800 rpm까지는 증가하다가 2,200 rpm까지는 다소 감소하는 경향을 보여주었으며, 동일 기관회전수에서는 부하율의 증가에 따라 급격히 증가함을 알 수 있다. EGR적용시 NOx 발생량을 살펴보면 저부하시에 EGR율의 증가에 따른 NOx 감소효과는 크지 않지만 부하가 증가할수록 그 효과는 증가하여 100% 부하에서 각 기관회전수 범위에서 EGR을 4%에서 NOx는 16~24%, EGR을 8%에서는 29~37%까지 감소하는 결과를 얻을 수 있었다.

이처럼 저부하운전조건을 제외한 전 운전영역에서 EGR이 증가됨에 따라 NOx 농도는 현저히 감소하였는

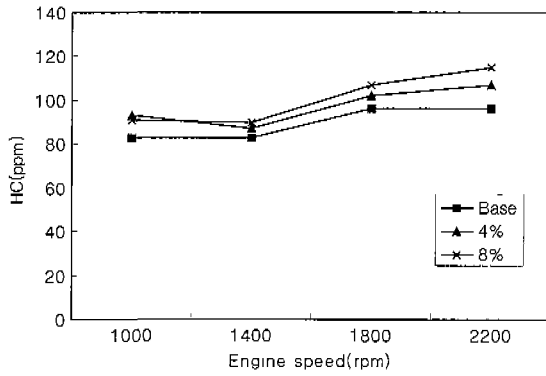


(a) 75%

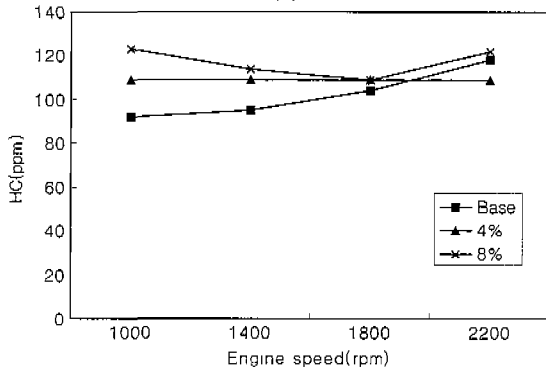


(b) 100%

Figure 5. Effect of EGR on CO emissions for 75 and 100% load

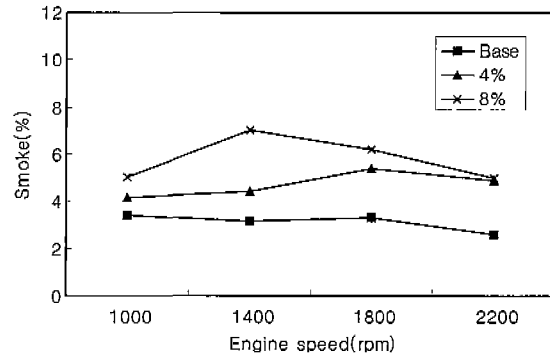


(a) 75%

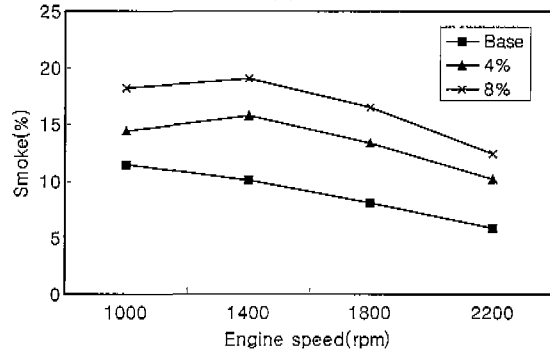


(b) 100%

Figure 6. Effect of EGR on THC emissions for 75 and 100 load



(a) 75%



(b) 100%

Figure 7. Effect of EGR on smoke emissions for 75 and 100% load

데 이는 저부하운전조건이 원래 공기과잉상태이므로 EGR에 의한 영향을 적게 받는 반면 고부하에서는 비교적 공연비가 농후한 상태이므로 EGR에 의한 높은 NOx 저감효과를 얻을 수 있는 것으로 생각된다. 또한, 고부하 영역에서는 실린더 내로 흡입되는 혼합가스의 열용량이 순수공기의 열용량보다 크게되는 효과에 의하여 연소실의 화염온도가 낮아져 질소와 산소의 고온반응이 억제되는 것으로 생각된다.

### 3.2.2 일산화탄소

Figure 5는 각 기관회전수 범위에서 75% 및 100% 부하별로 EGR 장착전과 장착후의 일산화탄소 배출특성을 보이고 있다. 저·중부하 및 부하율 75%까지의 영역에서는 EGR에 따라 CO 배출량 증가는 23~46%이며 그 배출량도 낮았으나, 부하율 100%에서는 배출량 증가가 78~150%로 나타났으며 그 증가율뿐만 아니라 배출량도 현저한 증가를 보이는 결과를 나타내었다. 그러나 극부적인 공기부족으로 인하여 CO가 생성되는 가솔린기관과는 달리, 디젤기관은 전 운전 범위에서 공기과잉상태로 운전되므로 배출량은 극히 작으며, 대형 직분사 디젤기관에서 CO는 저부하와 고부하에서 주로 배

출되며 기관회전수 변화보다는 부하에 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다. EGR에 따른 CO 배출량 증가가 다른 배출가스 측정결과에 비하여 비교적 높게 나타나기는 하나, 전체적인 배출량은 낮으며, 중부하 영역에서 CO 배출량이 감소하는 경향은 스모크의 측정결과와도 유사한 경향을 보여, 이들 물질간의 생성반응특성을 고려한 상관관계가 있음을 알 수 있다.

### 3.2.3 탄화수소

Figure 6은 EGR 장착후 기관회전수별, 부하별 탄화수소 배출특성을 보이고 있다. 그림에서 보여주듯이 THC는 기관회전수에 관계없이 비교적 모든 기관회전수 범위에서 유사한 수준으로 배출되고 EGR에 따른 증가는 부하율 75%에서는 10% 전·후로 나타났으며 부하율 100%, 저회전 영역에서 최고 40%로 증가하는 것으로 나타났다.

배기가스를 재순환시키면 THC는 대체적으로 증가하며, 특히, 저부하영역에서 증가율이 큰 것으로 나타나며 이는 부하가 작은 경우에 상대적으로 소량의 연료가 과잉공기내로 분사되어 공연비상의 가연상한계 이상의 영역이 연소실 안에 존재하게 되고, 또한 EGR율이 클수

록 전체산소농도가 낮아지므로 국부적인 산소결핍 영역이 증가하여, 미연 HC 연료분자가 많이 남기 때문인 것으로 생각된다.

### 3.2.4 스모크

Figure 7은 EGR적용에 따른 기관회전수별, 부하별 스모크 배출 특성을 보여주고 있다. EGR 장착전과 비교하면 스모크 배출량은 전반적인 증가를 보이며, 특히, 100%부하에서 EGR을 4%와 8%에 대하여 각각 47~125%, 60~114%의 현저한 증가를 보였다. 따라서 EGR을 증가에 따라 스모크 배출량은 증가하는 것으로 나타났다.

스모크는 공기부족에 따른 불완전연소시 급격한 증가를 보이며 연료소비율과 밀접한 관계가 있어 주로 급가속시나, 고부하 운전조건에서 다량으로 배출되며, 동일 부하에서 기관회전수가 낮을수록 높게 배출되는 특징을 가지고 있다. 이는 상대적으로 농후한 연료 공급과 급기내 산소농도 감소에 의한 연소환경의 악화에 의한 결과로 생각된다.

## 4. 결 론

대형디젤기관에 배기가스재순환 장치를 장착한 실험을 통하여, 기관 성능 및 배출가스에 미치는 영향을 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) EGR 장착에 따라 기관출력 및 연료소비율에는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.
- (2) NOx 감소는 부하가 증가할수록 EGR의 효과는 증가하는 것으로 나타났으며, EGR율이 높을수록 NOx 저감효과가 증가함을 재확인 하였다.
- (3) CO 및 THC는 EGR율이 증가함에 따라 대체적

으로 증가함을 확인하였다.

(4) 스모크는 EGR율이 높을수록 증가하였으며, 특히 고부하 영역에서 증가율이 현저하게 높은 것으로 나타났다.

(5) EGR은 대형디젤기관에 있어서 NOx를 저감하는데 효과적인 방법임을 확인하였으며, 더욱 NOx를 저감시키기 위해서는 높은 EGR율이 필요하며 EGR을 높이기 위해서는 다른 부수적인 장치가 필요할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- [1] Shiozaki, T., Nakyama, H., Kudo, Y., Miyashita, A. and Aoyagi, Y., "The Analysis of Combustion Flam Under EGR Conditions in a DI Diesel Engine", SAE Paper No. 960323, 1996.
- [2] Ladomatos, N., Abdelhalim, S.M., Zho, H. and Hu, Z., "The Dilution, Chmical, and Thermal Effects of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Engine Emissions-Parts 1", SAE Papers No. 961165, 1996.
- [3] Uchida, N., Daisho, Y., Saito, T., and Sugano, H., "Combined Effects of EGR and Supercharging on Diesel Combustion and Emission", SAE Paper No. 930601, 1993.
- [4] Heywood, J. B., "Internal Combustion Engine Fundamentals.", McGrrw Hill Publishing Co, New York, NY, 1988.
- [5] Sihling, K. and Woschni, G., 1979. "Experimental Investigation of the Instantaneous Heat Transfer in the Cylinder of a High Speed Diesel Engine", SAE Paper No. 790833, 1979.