

〈논문〉 SAE NO. 2000-03-0064

후처리장치를 이용한 대형디젤기관에서의 배기성능에 관한 연구 Effects of Aftertreatments on Emission Performance in Heavy duty diesel

이 상 준*, 최 경 호**
Sangjun Lee, Gyeungho Choi

ABSTRACT

The purpose of this research was to investigate the effects of exhaust gas recirculation(EGR) with diesel particulate filter(DPF) on heavy duty diesel engine. The exhaust gas was recirculated to the intake manifold after the smoke was eliminated in the DPF. The major conclusions of this research are, i) at each engine speed, EGR ratio was able to 60% maximum, ii) the amount of NO_x emissions was decreased to 90% at high engine load, and to more than 60% at low engine load and iii) the amount of NO_x emissions was increased to five times according to the increase of engine load, but the effect of EGR is more effective at high engine load.

주요기술용어 : EGR(배기재순환), DPF(매연여과장치), NO_x(질소산화물), Smoke(매연)

1. 서 론

환경오염이 전세계적으로 중요한 사회문제로 대두되어감에 따라서 자동차 배기가스에 대한 관심도가 높아지고 있다. 특히 디젤기관에서 배출되는 입자상물질과 질소산화물은 대도시 대기 오염의 주범으로 인식되고 있는 가운데 주요 선

진국에서는 최근 들어 배기가스 규제를 단계적으로 계속 강화해오고 있는 추세이다. 이에 대응하기 위하여 디젤기관의 입자상물질과 질소산화물을 저감시키기 위한 다양한 기술들이 연구 개발되어져 오고 있다. 입자상물질과 질소산화물을 저감시키기 위한 기술개발은 주로 연소계 등의 엔진자체를 개선하는 방법, 연료에 금속물질첨가와 함산소 연료 등 연료를 개량하는 방법이 있다. 또한 매연여과장치(DPF)와 EGR^{1~6)}을 사용하는 후처리 방법 등 많은 연구들이 진행되어지고 있다. 그러나 입자상물질과 질소산화물

* 회원, 계명대학교 대학원

** 회원 계명대학교 자동차공학과

은 서로 상반관계가 있어 동시에 저감하는 것이 힘든 것으로 알려져 있다. 특히 연소과정에서 일어나는 화학반응을 제어하여 이들 유해물질을 동시에 줄이는 방법은 상당히 어려운 기술에 속한다. 따라서 본 연구에서는 비교적 개발이 용이하고 기존 차량에 장착이 가능하다고 생각되어지는 매연여과장치와 배기재순환장치를 사용하여 입자상물질과 질소산화물을 동시에 저감시키고자 하였다. 또한 기관의 운전조건에 따른 최적 EGR율을 파악함으로써 기존 엔진 성능을 유지하면서 입자상물질 및 질소산화물의 저감효과를 극대화 하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에 사용된 실험기관은 시내버스용 6기통, 자연흡입방식의 직접분사식 디젤기관인 현대 D6BR을 사용하였고, 부하조절을 위한 동력계는 Eddy Current 동력계를 사용하였다. 전체적인 실험장치의 개략도를 Fig.1에 나타내었다. 그림에서와 같이 실험장치는 기관에서 배출되는 입자상물질을 제거하기 위한 매연여과장치(DPF)와 배기가스를 순환시키기 위한 배기재순환(EGR)장치로 구성된다. 매연여과장치는 기관에서 배출되는 배기가스성분중의 입자상물질을 세라믹필터를 이용하여 제거시키는 장치이다. 매연여과장치는 기관의 배기관에 매연여과필터와 소음기가 장착되어있으며, 이것은 필터 전후의 압력센서와 온도센서의 신호를 받은 ECU에서 밸브를 작동함으로써 이루어진다. EGR장치는 기관의 배출가스의 일부분을 흡기관으로 재순환 시킴으로서 질소산화물을 저감하기 위한 장치이다. 재순환되는 배출가스 성분중 입자상물질은 기관의 마모에 많은 영향을 주는 요인중의 하나이므로 매연여과장치를 통하여 입자상물질을 제거한 다음 흡기관으로 재순환 시켰다. 재순환량은 배기관과 흡기관 사이에 설치된 니들 밸브의 열림량을 등간격으로 변화시킴으로서

재순환량을 조절하였으며, 재순환되는 배기가스에 의해 흡기 온도가 상승하여 질소산화물을 증가시킬 수 있기 때문에 재순환 가스가 흐르는 수로를 통과하도록 냉각장치를 설치하였다. 그 외에 연료량을 측정하기 위한 연료 소비율 측정장치, 흡입공기유량을 측정하기 위한 공기유량 측정장치, 배기가스 성분을 측정하기 위한 배기가스분석기와 검연기, 연소해석을 위한 연소해석장치 등으로 구성된다.

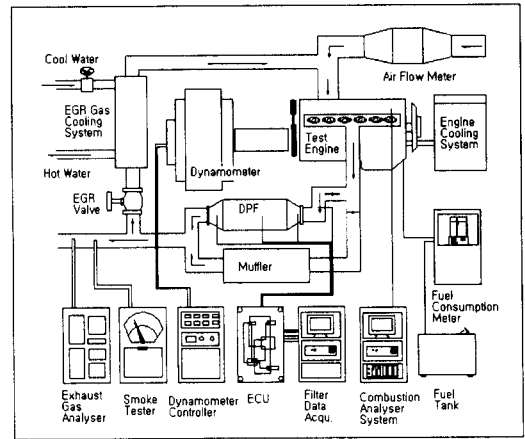


Fig. 1 Schematic diagram of an experimental setup

Table 1 Specifications of test engine

Item	Specifications
Model	Hyundai D6BR
Aspirate type	N/A
Cooling type	Water cooling
Cylinder/Cycle	6 / 4
Bore × Stroke	118 × 115 mm
Displacement	7545 cc
Compression ratio	17.5
Maximum power	188 ps/2900 rpm
Injection timing	BTDC 16°

2.2 실험방법

기관에서 배출되는 배기가스는 매연여과장치를 통과한 다음 배출되고 일부는 EGR 밸브를 통하여 흡기관으로 재순환된다. 재순환량은 EGR 밸브를 등간격으로 변화시킴으로서 조절하였다. EGR율은 순환되는 배기가스가 흡입공기를 대체하는 비율로 나타낸다. 그 식으로는 EGR밸브를 통하여 배기가스를 재순환 시켰을 때의 흡입 공기량을 배기 재순환 가스가 없을 때의 흡입 공기량으로 계산하였으며, 일정 운전 조건에서는 체적효율이 일정한 것으로 가정하였다.

$$\text{EGR율(\%)} = \frac{V_o - V_r}{V_o} \times 100$$

여기서 V_o 는 배기재순환 가스가 없을 때의 흡입공기량이고, V_r 은 EGR밸브를 통하여 배기 가스를 재순환 시킬 때의 흡입 공기량이다.

실험은 기관회전수를 1000rpm에서 2000rpm까지 100rpm 간격으로 변화시키면서, 무부하에서 전부하로 즉 토크를 0(부하 0%)에서 40kg-m(부하 100%)까지 5kg-m 간격으로 측정하였다. 이때 EGR율은 밸브의 전체회전각을 16등분하여 등간격으로 밸브를 회전시키면서 각각의 EGR율에 대한 기관의 출력, 흡입공기유량, 배기가스 성능을 측정하였다. 실험은 매연여과장치에 포집된 입자상물질에 의한 기관 출력 감소의 영향을 최소화하고, 필터의 재생영역을 피하기 위해 기관의 Idle시의 배압을 0-20mbar 이내에서 수행되었다. 배압이 이보다 높을 시는 실험을 중단하고 필터에 포집된 입자상물질을 수동 트로틀링(Throttling)으로 강제재생 시켰다. 즉 매연여과장치의 전단부에 장착된 트로틀링 밸브와 바이패스 밸브를 동시에 닫아 배기가스 온도가 입자상물질이 착화할 수 있는 온도까지 상승시켜 포집된 입자상물질을 연소함으로써 필터로 인한 배압을 낮추었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 EGR율에 의한 NO_x 배출결과

본 연구에서는 매연여과장치에 의하여 입자상 물질을 제거한 다음 배기재순환에 의해 질소산화물을 저감코자 하였다. 그 결과 매연여과장치에 의해 입자상물질은 완전히 제거가 가능하였고, 배기 재순환에 의한 질소산화물도 다소 차이가 있지만 대폭 저감되는 경향을 나타내었다. Fig.2와 3은 1200rpm일 때와 1600rpm일 때의 EGR율에 따른 NO_x의 배출량을 토크 변화에 따라서 나타내었다. 그림에서 범례의 NO_x-T5는 토크 5kg-m에 대한 NO_x의 배출량을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 1200rpm일 때 EGR율이 최고 60%까지 증가할 때 NO_x 배출량이 고부하에서는 최고 85%까지 감소하고, 저부하에서도 약 60%이상 감소하고 있음을 알 수 있다. 이것은 배기가스 재순환량이 늘어날수록 흡입 산소량이 감소하고, 비활성 가스량의 증가로 열용량이 증가했기 때문이라고 생각되어진다. 또한 기관의 부하가 증가할수록 NO_x 배출량이 늘어나지만 배기재순환에 의한 효과는 저부하 일 때보다 고부하 일 때가 더 큰 것을 알 수 있다. 또한 그림에서 기관 부하가 증가할수록 적용 가능한 EGR율이 낮아지고 있음을 알 수 있는데 이것은 기관부하가 증가함에 따라 농후한 연소를 하므로 배출되는 산소량이 줄어 최대 EGR율이 낮아지는 것이다. 그리고 Fig.2와 Fig.3을 비교하여 볼 때 기관회전수가 1600rpm일 때가 1200rpm일 때보다 NO_x의 배출량이 적은 것은 체적효율이 감소하여 산소량이 줄어들기 때문인 것으로 보아진다. 이를 더 자세히 알아보기 위하여 Fig.4에 1200rpm과 1600rpm에서의 체적효율을 나타내었다. 그림에서 보면 체적효율은 1200rpm일 때보다 1600rpm일 때가 약 10%정도 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig.5와 6은 EGR율과 기관회전수 변화에 따른 NO_x의 배출량을 토크 10과 30kg-m에 대해

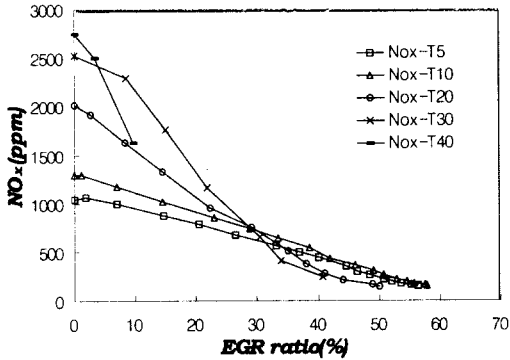


Fig. 2 NO_x concentrations as a function of EGR ratio at 1200rpm

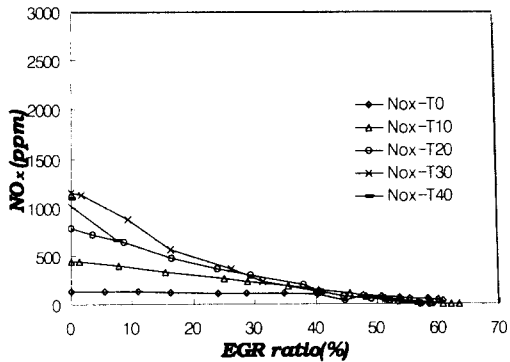


Fig. 3 NO_x concentrations as a function of EGR ratio at 1600rpm

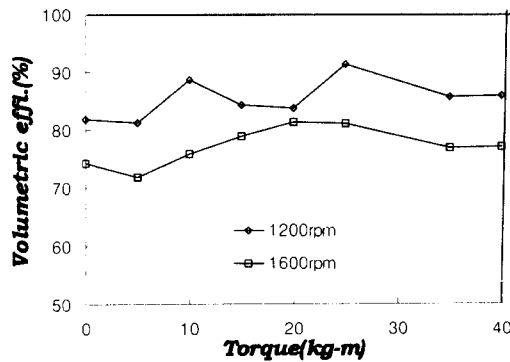


Fig. 4 Volumetric efficiency as a function of torque at 1200rpm and 1600rpm

서 나타내었다. Fig. 5와 6에서 볼 때 동일한 기관부하에서 기관회전수가 1000rpm에서 2000rpm으로 증가할수록 NO_x의 배출량은 60% 정도 감소하고 있는 것은 앞서 설명한 것처럼 체적효율의 감소에 의해 산소량이 줄어들기 때문이고, EGR율이 60% 까지 증가할수록 NO_x의 배출량이 최고 90%까지 감소하고 있는 것은 흡입 산소량의 감소와 비활성 기체의 증가로 연소 온도가 낮아져 NO_x의 배출량이 감소하는 것으로 보인다.

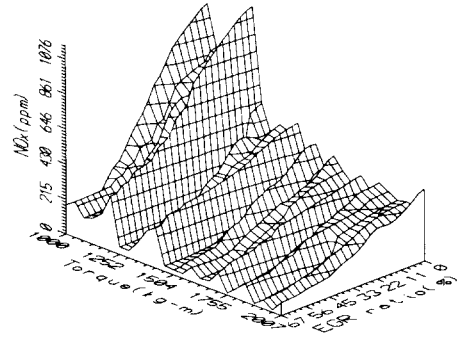


Fig. 5 NO_x concentrations as a function of the engine speed and EGR ratio at torque 10kg-m

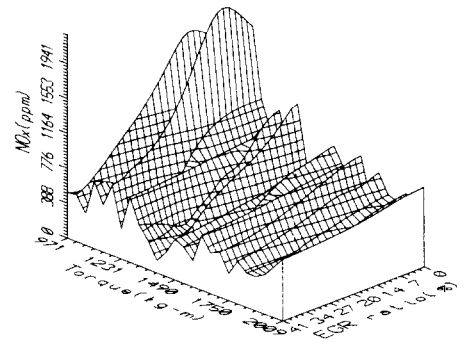


Fig. 6 NO_x concentrations as a function of the engine speed and EGR ratio at torque 30kg-m

Fig.7과 8은 1200rpm과 1600rpm에서의 EGR율과 기관부하의 변화에 따른 NO_x의 배출량을 나타내었다. Fig.7은 1200rpm에서 토크를 0에서 40kg-m로 변화시킬 때의 EGR율에 따른 NO_x 배출량을 나타내었다. 앞의 Fig.5와 6의 결과와 마찬가지로 EGR율이 60%까지 증가할수록 NO_x의 배출량은 90% 이상 감소하고 있고, 토크가 0에서 40kg-m까지 증가할수록 NO_x의 배출량은 최고 5배까지 증가하고 있지만 EGR율에 의한 효과는 기관부하가 높을수록 더 많은 것으로 나타나고 있다.

이와 같은 결과들로부터 각각의 기관회전수와 부하 조건에서 가능한 EGR율은 서로 다르더라도 NO_x의 저감효과는 최고 90% 내외로 탁월하다는 것을 알 수 있다. 또한 이때의 입자상물질 배출량은 모두 0으로 나타나 입자상물질과 질소산화물의 동시저감이 이루어지고 있음을 알 수 있다. 그러나 기관부하와 회전수에 따라 동일한 NO_x 저감에 따른 EGR율이 다르게 나타나고 있다. 그리고 EGR율의 증가로 NO_x의 배출량이 90% 내외로 감소하고 있으나 입자상물질이 급증하기 때문에 필터의 배압이 상승하여 재생빈도가 높아지게 된다. 그러므로 입자상물질의 배출량이 급증하는 영역에서 EGR율의 제한을 두어 필터의 재생빈도를 최소화하고 NO_x의 저감효과를 도모해야한다. 또한 필터의 재생은 필터의 배압과 필터입구온도 및 산소량에 많은 영향을 받고 있다.

3.2 EGR율에 의한 HC 및 O₂ 배출결과

배기가스 성분중 HC은 연료의 불완전 연소로 인한 배출물로 산소와 반응하여 매연의 핵으로 성장하게 되므로 HC의 배출량은 매연의 배출량을 가늠하여 볼 수 있다. Fig. 9와 10은 EGR율에 대한 HC의 배출량을 기관부하에 따라서 나타내었다. 그림에서 볼 때 1200rpm에서의 HC의 배출량은 EGR율이 증가함에 따라 10% 내외로 완만히 증가하다가 갑자기 200%이상 급상

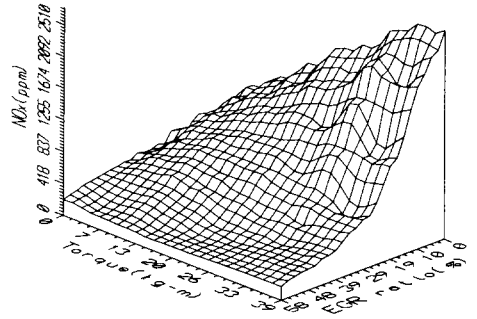


Fig. 7 NO_x concentrations as a function of torque and EGR ratio at 1200rpm

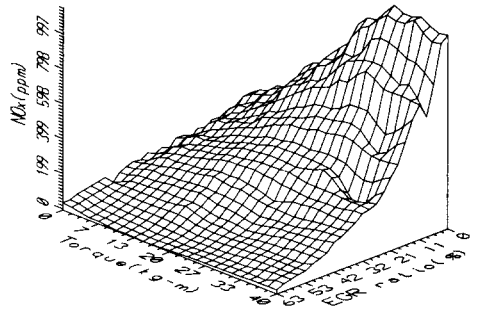


Fig. 8 NO_x concentrations as a function of torque and EGR ratio at 1600rpm

승하는 것으로 나타나고 있다. 이것은 디젤기관이 비교적 희박연소이므로 EGR에 의한 산소농도의 영향을 많이 받지 않다가 높은 EGR율에서 산소량이 급격히 감소하므로 불완전 연소하는 연료가 급증하게 되는 것으로 보인다. 불완전 연소량이 많아짐에 따라 입자상물질의 배출량이 증가하게 되어 필터의 배압이 상승하게되어 잦은 재생이 요구되어진다.

앞서 살펴본 HC의 배출량이 급증하는 원인으로서는 배기재순환에 의한 산소량 감소가 가장 큰 원인으로 작용되고 있다. Fig.11과 12는 동일한 기관회전수에서 EGR율에 따른 산소의 배출

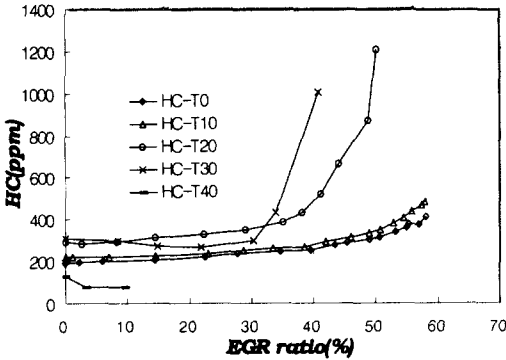


Fig. 9 HC concentrations as a function of EGR ratio at 1200rpm

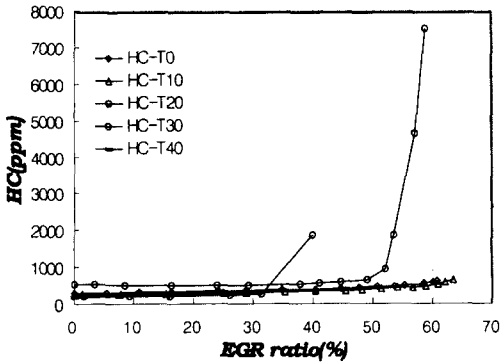


Fig. 10 HC concentrations as a function of EGR ratio at 1600rpm

량을 기관부하에 대해서 나타내었다. Fig. 11과 12는 1200rpm일 때와 1600rpm일 때 산소의 배출량을 나타내었다. 그림에서와 같이 EGR율이 60%까지 증가할수록 배출되는 산소량은 최고 산소농도 5%미만까지 감소하고 있으며, 기관부하가 증가할수록 배출산소량은 50%이상 감소한다. 또한 EGR율의 증가에 대해서 저부하 일 때 보다 고부하 일 때가 산소의 감소율이 크게 나타나고 있다. 각 조건에서 산소량이 감소하는 이유는 앞서 설명한 것과 마찬가지로 재순환되는 배기가스가 흡입 공기량을 대체함으로써 공급되는 산소량이 감소하기 때문이다. 각 조건에서의

최고 EGR율은 배출되는 산소량과 관계가 있다. 배출산소농도가 약 2-3% 정도이면 배기 재순환은 더 이상 가능하지 않는 것으로 나타나고 있다.

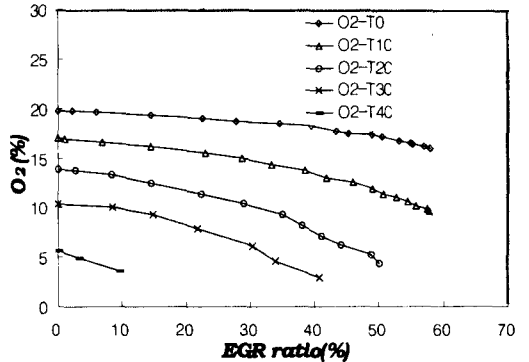


Fig. 11 O₂ concentrations as a function of EGR ratio at 1200rpm

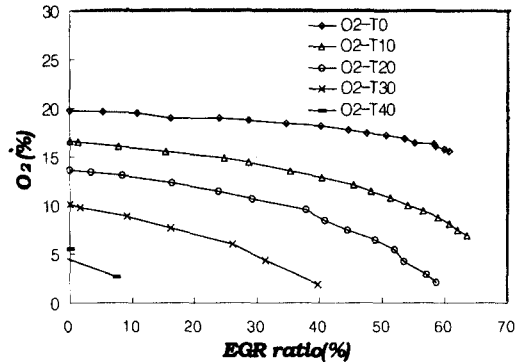


Fig. 12 O₂ concentrations as a function of EGR ratio at 1600rpm

3.3 최적 EGR율

여기서 앞의 HC의 배출량과 연관시켜 볼 때 HC의 배출량이 높은 EGR율에서 급증하는 것은 배출산소농도가 5% 미만일 때 HC의 배출량이 급증하고 있음을 알 수 있었다. 그러므로 산소의 배출농도가 5% 미만인 영역에서는 입자상물질이 급증하므로 EGR의 작동이 자제되어야 할 것

이다. 또한 매연여과장치에 포집되어진 입자상물질을 태우는 재생에 있어서 필요로 하는 최소의 산소량이 5%이상임을 감안할 때 EGR의 운용은 배출되어지는 산소량이 5%이상일 때 가능하다고 생각된다. Fig.13과 14는 각각의 기관회전수와 기관의 부하의 변화에 따른 가능한 최고 EGR율과 NO_x를 25%, 50%, 75%를 저감시키는 EGR율을 나타내었다. 또한 입자상물질의 배출량을 고려하기 위하여 HC의 배출한계와 산소의 의한 배출한계를 나타내었다. HC의 배출한계는 EGR율이 계속적으로 증가할 때 HC의 배출량이 급증하는 점을 나타낸 것으로 매연여과장치의 입자상물질 포집량을 줄여 재생의 빈도를 낮추기 위한 것이며, O₂한계는 필터의 재생에 필요한 최소한의 산소량을 확보하기 위한 것이다. 그러므로 이 두가지 한계점 이내에서 EGR율이 사용되어야 할 것이다. Fig.13에서 보면 최고 EGR율 아래에 점선으로 HC과 O₂의 한계점을 나타내었다. 여기서보면 O₂ 배출량에 의한 한계점보다 HC의 배출량에 의한 한계점이 낮게 나타나고 있다. 또한 HC의 배출량에 의한 EGR의 한계점은 NO_x의 75%저감보다도 낮게 나타나는 영역이 있는데 이것으로 보아 1200rpm에서는 토크가 15에서 35kg-m까지는 75%이상의 NO_x저감은 불가능하다는 결론이다. Fig.14는 기관회전수 1600rpm의 HC과 O₂의 배출량에 의한 EGR의 한계를 나타내었다. 여기서도 마찬가지로 HC과 O₂의 배출한계점 이내에서 EGR율이 작동되어야 할 것이다.

4. 결 론

대형 디젤기관에 매연여과장치와 배기재순환장치를 동시에 사용하여 해당 기관 운전 조건에 따른 최적 EGR율 및 배기가스 성능을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 운전조건에 따라 EGR율은 최대 60%까지 가능하였고, NO_x의 배출량은 부하조건에 따라 최대 90% 저감이 가능하였다.

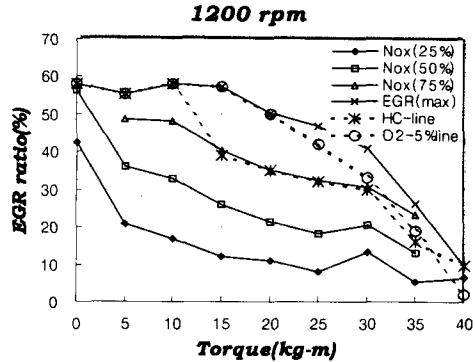


Fig. 13 EGR ratio as a function of torque according to the reduction ratio at 1200rpm

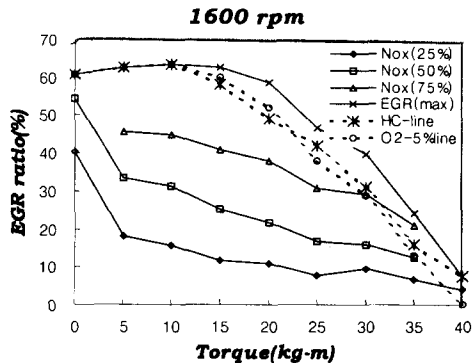


Fig. 14 EGR ratio as a function of torque according to the reduction ratio at 1600rpm

- 2) 부하조건에 따라 NO_x의 배출량은 최대 5배까지 차이가 났으며, 기관부하가 높을수록 EGR율에 의한 NO_x 저감 효과는 증가하였다.
- 3) 각 기관회전수에서 HC의 배출량은 EGR율이 증가함에 따라 10% 정도로 완만히 증가하다가 갑자기 200%이상 급증상하고, 산소의 배출량은 차츰 감소하여 농도 5% 이하까지 감소한다.
- 4) 매연여과장치와 EGR을 동시에 사용할 때 매연여과장치의 입자상물질 포집량을 줄여 재생의 빈도를 낮추고, 재생에 필요한 최소한의 산소량을 확보하기 위하여 HC이 급증하거나 산소농도

가 5%미만인 영역에서의 EGR장치의 작동은 피해야하며, 각각의 운전조건에 따른 EGR율이 제어장치에 의해 적절히 조정되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 1998년도 한국과학재단 지정 계명대학교 저공해자동차부품기술개발센터의 연구기금으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) M. Dümholz, G. Eifler, and H. Endres, "Exhaust-Gas Recirculation - A Measure to Reduce Exhaust Emission of DI Engines", SAE 920725, 1992.
- 2) Kazuyuki Narusawa, Matsuo Odaka, Noriyuki Koike, Yujiro Tsukamoto, and Koichi Yoshida, "An EGR Control Method for Heavy-Duty Diesel Engines under Transient Operations", SAE 930369, 1993.
- 3) D. A. Pierpont, D. T. Montgomery, and R. D. Reitz, "Reducing particulate and NO_x using multiple injections and EGR in a D.I. diesel.", SAE 950217, 1995.
- 4) C. Arcoumanis and A. Nagwaney, "Effect of EGR on spray development, combustion and emissions in a 1.9L direct-injection diesel engine." SAE 952356, 1995.
- 5) 이병호, 이상준, 김태권, 최경호, "연료첨가제와 EGR이 디젤 배기성능에 미치는 영향", 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집, 1998.