

대형디젤기관의 EGR에 의한 배기가스변화에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Exhaust Gas Change of a Heavy-Duty Diesel Engine by EGR

오 용 석*, 문 병 철**, 한 영 출***
YongSuk Oh, ByungChul Moon, YoungChool Han

ABSTRACT

The effects of EGR on emissions were investigated by using a six-cylinder, 8 litre, turbo-charged, heavy-duty diesel engine with a low pressure route EGR system. The experiments were performed at various engine loads while the EGR rates were set from 0% to 30%. Hot and cooled EGR are achieved without cooling and with cooling respectively. To verify the possibility of EGR technology for the applications, test were performed with steady state test cycle. It was found that the exhaust emissions with the EGR system resulted in a very large reduction in oxides of nitrogen at the expense of higher smoke and PM emissions. Increasing the EGR rate leads to deteriorating specific fuel consumption and power at lower speed and higher load. Also, the reduction rates of NOx emissions for hot and cooled EGR are similar.

주요기술용어 : EGR(배기가스재순환), Turbo-charged(터보과급), Low pressure route(저압루트), D-13mode test(D-13모드 테스트), NOx(질소산화물), PM(입자상물질)

1. 서 론

앞으로 더욱 심각해질 것으로 예상되는 대기환경문제로 인해 강화되고 있는 NOx 규제치를 만족시키기 위해서는 분사시기 지각 또는 그 외 방법을 이용하는 것은 한계 수준에 달하였으며, 장래에는 배기가스재순환(EGR; exhaust gas recirculation)과 같은 방법이 주로 사용될 것으로 보고 있다.¹⁾ 근래들어 국책사업의 일환으로 대형터보디젤기관의 NOx저감책으로 EGR연구가 진행중이며, 그 실험적 연

구결과 8000cc이상의 대형기관에서 EGR을 20%초과 적용시 전체적으로 기존 출력에 영향을 미치기 시작하며 또한 터보기관일 경우 EGR을 20%이상을 전 기관작동조건에서 적용시키는 것은 다소 어려움이 있음이 이미 언급된 바 있다.²⁾ 또한 현재 국내 대형디젤기관의 규제모드인 D-13모드로 측정된 NOx의 배출결과는 2002년도 규제치에 겨우 만족하는 것으로 나타났으며,³⁾ 앞으로 더욱 엄격해져가는 규제치의 만족을 위해서는 EGR을 20%보다 더 높은 EGR율의 적용도 필요할 것이다. 따라서 본 연구는 디젤기관의 NOx 저감방법 중에서 EGR 시스템을 이용한 실험적 연구로서,

* 회원, 거창기능대학 자동차과

** 회원, 서울정수기능대학 카일렉트로닉스과

*** 회원, 국민대학교 기계자동차공학부

점차적으로 규제도가 높아지는 대형터보디젤 기관의 저NOx화와 정밀한 제어를 위해 전자 제어식 EGR을 변화 조절에 맞는 ECU의 개발 시 부분별 자료화를 위하여 EGR율의 변화를 30%까지 높여서 실험하고자 하였으며, 우선적으로 기존 EGR시스템에 큰 변형을 주지 않고 30%까지 증가시켜도 실험이 가능한 저회전수영역인 1000rpm 영역에서만 실험하였으며, 또한 연소온도에 민감한 NOx 생성의 영향을 살펴보고자 EGR cooler를 장착하여 실험하였다.

2. 실험장치 및 방법

실험기관의 주요 제원은 Table 1과 같다.

본 연구에서는 저압루트⁴⁾ 시스템을 사용하였으며, 조금이나마 연소실 온도에 변화를 주기위해 재순환되는 가스 온도를 낮추고자 배기관 측에 수냉식 EGR 쿨러를, EGR 가스량 확보를 위해서 흡기관 측에 블로어를 장착하였다.

본 연구의 EGR 시스템의 구성도는 Fig. 1에 나타내었다. 측정장비로 사용된 630kW의 AC 동력계(오스트리아 AVL사, APA DYNO), 배출가스 측정장치(Horiba사, MEXA-9100D)를 사용하였으며, 측정방법은 EGR량은 수동으로 제어하였으며, EGR율은 다음 식과 같이 결정하였다.

$$\text{EGR rate} = \frac{q_o - q_a}{q_o}$$

q_o 는 베이스 상태의 흡입공기량(kg/hr), q_a 는 배기가스 재순환시의 흡입공기량(kg/hr)이다. 운전조건으로는 기관회전수 1000rpm, 부하 25%, 50%, 75% 및 100%에서 EGR율 10%, 20% 및 30%로 조정하여, 실험한 측정치를 베이스 결과와 비교 분석하였다.

Table 1 Specifications of test engine

Model	DAEWOO D1146T
Type	in-line, 6 cylinders
Fuel injection	Direct injection
Aspiration	Turbo-charged
Bore & stroke	111mm×139mm
Compression ratio	16.7 : 1
Displacement	8,071 cc
Rated power	132kW / 2,200rpm
Max. torque	696N · m / 1,200rpm

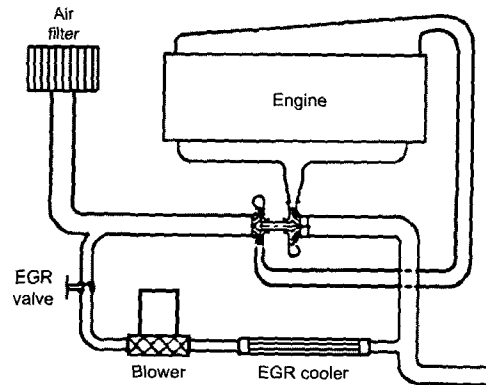


Fig. 1 Schematic diagram of EGR system

3. 결과 및 고찰

3.1 EGR이 배기가스에 미치는 영향

Fig. 2는 기관 회전수 1000rpm에서 EGR율과 부하변화에 따른 NOx 배출량을 나타낸 것이다. 고부하일수록 EGR율이 증가함에 따라 NOx 저감효과가 현저하게 나타났다. 부하 100%, EGR율 30%부근에서 최고 약 91%의 저감율을 보이고 있다. 저부하운전조건에서는 공기과잉상태이고, 연소에 의해 소모되는 산소량이 적으며, 배기가스내 CO₂ 및 H₂O량이 상대적으로 낮아 EGR량에 의한 영향을 적게 받는 반면, 고부하에서는 연소에 의해 많은 양의 산소가 소모되며, 연소생성물을 포함한 배기가스가 급기중 산

소 농도를 크게 감소시켜, 높은 NOx 저감효과를 얻을 수 있는 것으로 보고되고 있다.⁵⁾ 재순환가스에 의한 급기의 열용량 증가도 연소실 최고온도의 감소 요인으로 작용하여 질소와 산소의 고온반응이 억제되는 것으로 생각된다.

Fig. 3과 Fig. 4는 EGR을 증가에 따른 부하별, 매연과 PM 배출 특성을 보이고 있다. EGR을 증가에 따라 매연과 PM은 25%, 50% 부하를 제외하고 부하증가에 따라 전반적인 증가를 보이며, 특히 고부하영역에서 EGR의 영향이 큰 것으로 나타났다. EGR을 30%에서 PM과 매연 각각, 베이스상태에 비하여 최고 8배, 4배로 증가하였다. 이러한 현저한 증가는 산소농도 감소에 의한 연소환경의 악화에 의한 것으로 설명할 수 있을 것이다.

Fig. 5는 EGR을 증가에 따른 기관회전수 1000rpm에서 부하별 일산화탄소의 배출 특성을

나타낸 것이다. 저·중부하 영역에서 EGR을 30%까지는 CO 배출이 상대적으로 낮으나, 부하 100%에서는 그 증가율이 급격해지는 것으로 나타났다, 이러한 경향은 EGR에 의한 농후한 혼합기 형성과 이전 사이클의 CO 재순환량이 증가하기 때문이다. 디젤기관은 전 운전 범위에서 공기과잉상태로 운전되므로 배출량은 극히 작으며, 대형 직분식 디젤기관에서 CO는 저부하와 고부하에서 주로 배출되며 기관회전수 변화보다는 부하에 큰 영향을 받는다.³⁾ 저부하 영역에서 CO 배출량이 감소하는 경향은 매연의 측정결과와도 유사한 경향을 보여, 이들 물질간의 생성반응 특성을 고려한 상관관계가 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 EGR에 따른 HC 배출특성을 나타낸 것으로 모든 부하조건에서 EGR율이 높아질수록 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보였다. 이는 EGR에 의해 흡기온도 상승이 HC를 감소시키

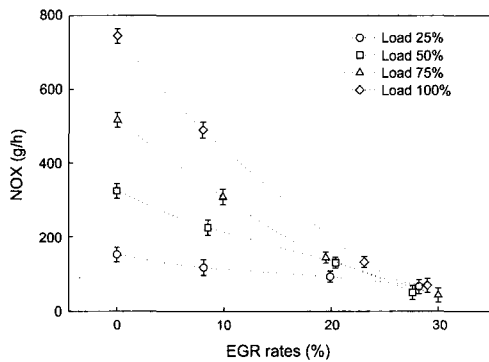


Fig. 2 Effects of EGR on NOx emission at 1000rpm

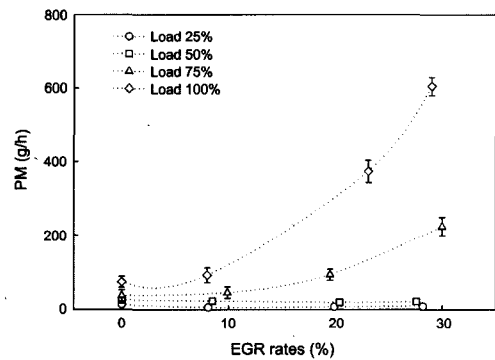


Fig. 4 Effects of EGR on PM emission at 1000rpm

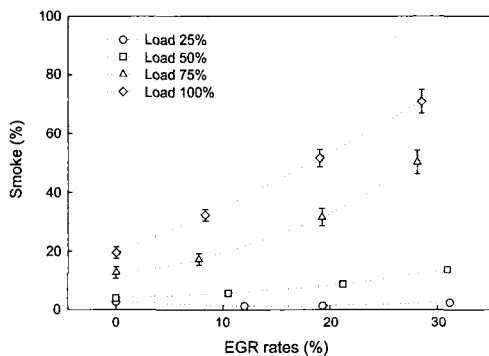


Fig. 3 Effects of EGR on smoke emission at 1000rpm

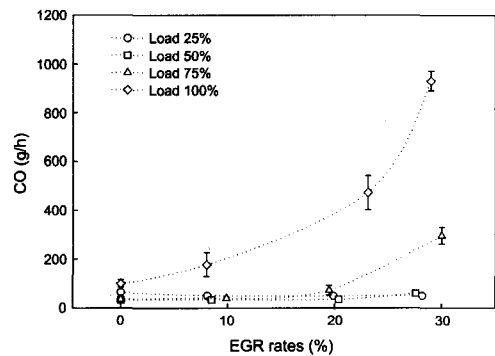


Fig. 5 Effects of EGR on CO emission at 1000rpm

는 요인으로 보이며, 고부하의 경우 높은 EGR율에서는 그 기여도가 낮아지는 것으로 생각된다. Durmholz⁶⁾의 연구에서도 EGR에 대하여 흡기온도 상승에 의해 미연 HC가 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 EGR율이 높을 때는 연소효율이 낮아져 HC 배출이 증가하게 된다. 이러한 연소상태의 악화는 흡기 산소농도의 감소에 인한 것으로 보여진다.

Fig. 7과 Fig. 8은 EGR을 적용했을 때 NOx 배출과 PM 및 매연 배출의 trade-off 관계를 나타내고 있다. 고부하로 갈수록 NOx가 저감됨에 따라 PM과 매연 배출이 현저하게 증가함을 볼 수 있다. Fig. 9는 NOx 저감에 따른 부하율 50%이하의 저부하조건에서는 오히려 다소 연료소비율의 향상경향을 확인할 수 있으며, 75%이상의 고부하에서는 BSFC의 증가 경향을 보이고 있다. EGR율을 제한하는 것이 PM 및 연료소비율의 악

화에 가장 중요한 인자가 되며, 과도 운전상태에 EGR이 적용되는 경우, 매연의 과다 증가로 정적 운전상태와 동일한 EGR을 적용은 불가능하며, 이에 따라 NOx 저감율도 낮아지게 된다.

3.2 Hot EGR과 Cooled EGR 비교

Fig. 10과 Fig. 11은 기관회전수 1000rpm에서 cooled와 hot EGR간의 NOx 배출 특성을 부하 25%와 100%에 대하여 나타낸 것이며, 두 가지 경우에서 배출 특성에는 큰 차이는 없는 것으로 나타났다. NOx 생성이 온도에 매우 민감하므로, EGR 가스를 냉각하는 경우의 흡기온도가 낮기 때문에 NOx 배출량이 낮을 것으로 예상했었으나, 저부하 조건에서는 냉각하는 경우가 NOx 배출량이 더 높았으며 고부하 조건에서는 더 낮게 나타났다.

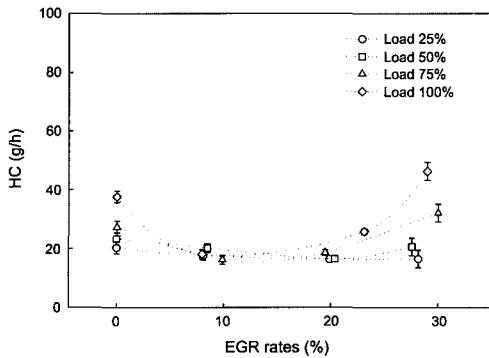


Fig. 6 Effects of EGR on HC emission at 1000rpm

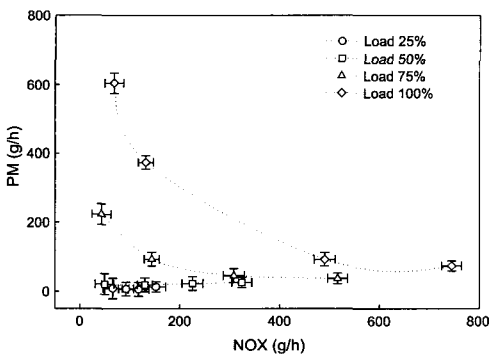


Fig. 7 Effects of EGR on NOx-PM trade-off at 1000rpm

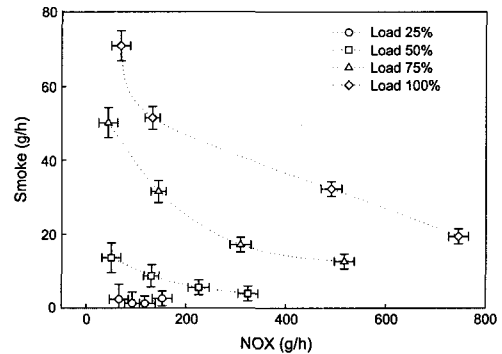


Fig. 8 Effects of EGR on NOx-Smoke trade-off at 1000rpm

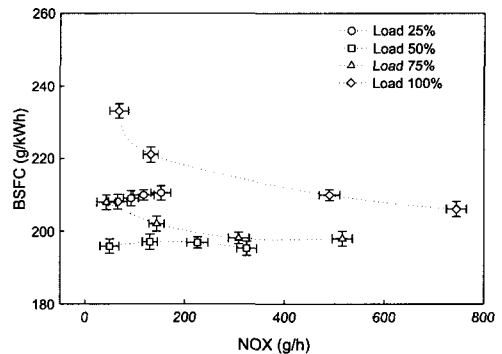


Fig. 9 Effect of EGR on NOx-BSFC trade-off at 1000rpm

이는 전체 급기 온도의 변화가 흡기 중 O₂와 CO₂의 분압이나 성분에 영향을 미치는 것으로 설명할 수 있다. 즉, 전체 흡기온도가 높을 경우에 O₂ 농도는 낮아지고 CO₂ 농도는 높아져, NO_x는 흡기온도가 낮은 경우보다 낮게 배출되는 것으로 생각되며, Lapuerta⁷⁾의 결과와 일치한다. 이들은 흡기온도가 일정할 때 NO_x 농도의 감소는 주로 O₂ 농도 감소에 의한 단열화염온도 강하가 원인임을 발견하였다. Durholz⁶⁾도 흡기온도가 NO_x 배출에는 상대적으로 적은 영향을 미치는 것을 발견하였다. 흡기온도 상승에 따라 평균가스온도의 상승이 NO_x 농도 증가를 초래하더라도 EGR에 의한 흡입 공기량 감소 효과와 상쇄되므로 총 NO_x 농도는 흡기온도에 관계없이 대략적으로 동일한 수준이 된다고 주장하였다.

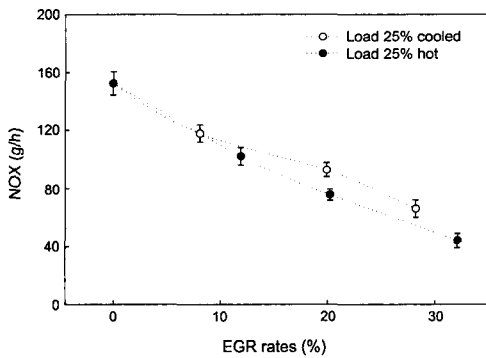


Fig. 10 Comparison of NO_x between cooled and hot EGR at 1000rpm and load 25%

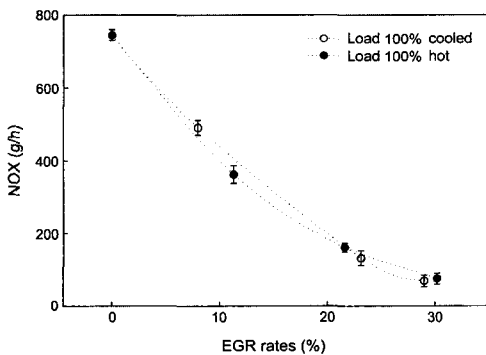


Fig. 11 Comparison of NO_x between cooled and hot EGR at 1000rpm and load 100%

Fig. 12는 부하 75%에서 EGR을 증가에 따른 매연 배출 특성을 비교한 것이다. 큰 차이는 없으나, cooled EGR에 비해 hot EGR의 경우가 매연이 높게 배출되었다. 이는 hot EGR의 경우 흡기 중 산소농도 감소가 현저하여, 화염온도를 더 낮추게 되므로 cooled EGR보다 더 많은 매연을 배출하게 된다. Fig. 13은 부하 75%에서 EGR을 증가에 따른 CO 배출 특성을 비교한 것이다. EGR을 20%까지는 두 가지 조건 모두 CO 배출이 상대적으로 낮으나, 고 EGR율에서는 모두 현저하게 증가했다. 이러한 경향은 EGR에 의한 공연비의 감소 즉, 농후한 혼합기 형성과 이전 사이클의 CO 재순환량이 증가하기 때문이다.

hot EGR 경우가 흡기중 산소농도가 더 낮아 cooled EGR에 비해 CO가 더 높게 나타났다. 이는

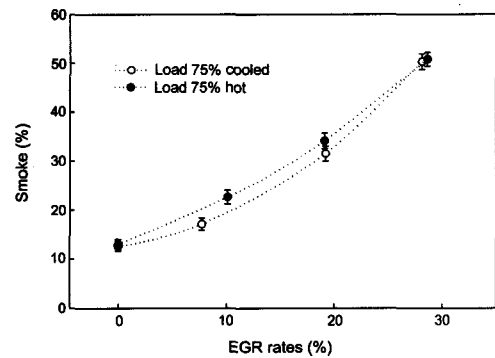


Fig. 12 Comparison of Smoke between cooled and hot EGR

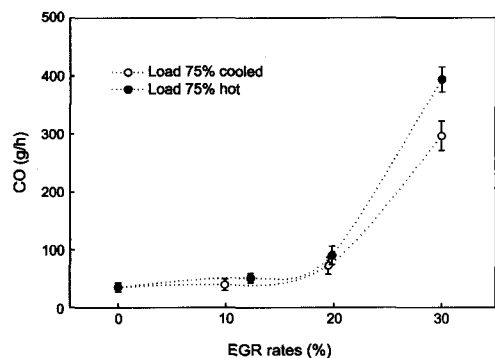


Fig. 13 Comparison of CO between cooled and hot EGR

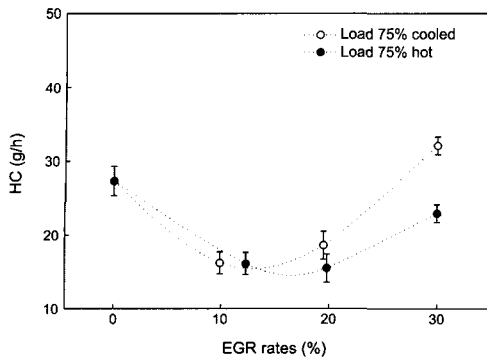


Fig. 14 Comparison of HC between cooled and hot EGR

매연 배출 결과와 유사하게 나타났다.

Fig. 14에 나타난 HC 배출 특성으로 판단해 보면, 두 가지 경우 모두 EGR 증가에 따라 HC가 감소하다 증가하는 것으로 나타났다.

EGR을 10%까지는 비교적 동일한 결과를 보였으며, 그 이상부터는 cooled EGR 보다 hot EGR 경우의 연소 효율이 양호하여 배출량이 더 낮은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 hot EGR 경우가 급기 온도가 더 높아 이에 대한 영향이 큰 것으로 생각되며, EGR율이 높을 때는 흡기중 O₂ 농도의 감소로 인해 연소효율이 낮아져 HC 배출이 증가하게 된다.

4. 결론

본 연구에서는 EGR cooler가 장착된 대형디젤기관의 저회전수영역에서 30%의 고EGR을 적용하여 배출가스를 측정·분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) EGR을 증가에 따라 NO_x 배출량이 현저하게 감소하고, 상대적으로 PM 및 매연은 큰 폭으로 증가하는 경향을 볼 수 있으며, CO와 HC는 고부하의 경우 고EGR율에서 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

2) EGR 적용시, BSFC는 전반적으로 NO_x의 저감과 상반되지만 오히려 부하가 50%이하의 경우는 다소 향상되는 경향을 볼 수 있었다.

3) EGR cooler를 통과하여 저온화된 cooled EGR 가스의 경우와 냉각하지 않은 hot EGR 가스의 경우에 배기가스 배출 특성에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

참고 문헌

- 1) M. K. Admir, H. J. John, D. G. Linda, T. B. Susan, G. L. David, "A Study of the Effects of Exhaust Gas Recirculation on Heavy-Duty Diesel Engine Emissions," SAE 981422, 1998.
- 2) Y. C. Han, D. S. Baik, Y. S. Oh, "The Effects of Cooled-EGR Applied to a Heavy-Duty Diesel Engine," JSAE 20015364, pp.9-12, 2001.
- 3) 한영출, 엄명도, 류정호, 오용석, 양규창, "대형디젤기관에서 EGR장착에 의한 성능 및 배출가스의 특성에 관한 연구," KSAE 2000-03-2036, pp.236-241, 2000.
- 4) K. Susumu, M. Kazutoshi, S. Kenji, H. Takazoh, "EGR Technologies for a Turbo-charged and Intercooled Heavy-Duty Diesel Engine," SAE 970340, 1997.
- 5) N. Ladommatos, S. M. Abdelhalim, H. Zho, Z. Hu, "The Dilution, Chemical, and Thermal Effects of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Engine Emissions-Parts 1," SAE 961165, 1996.
- 6) M. Durnholz, G. Eifler, H. Endres, "Exhaust Gas Recirculation - A Measure to Reduce Exhaust Emissions of DI Diesel Engines," SAE 920725, 1992.
- 7) M. Lapuerta, J. M. Salavert, C. Domenech, "Modelling and Experimental Study about the Effect of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Engine Combustion and Emissions," SAE 950216, 1995.