

Cooled-EGR 대형디젤기관의 성능 및 배기가스에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Performance and Exhaust Gas in a Heavy-Duty Diesel Engine with Cooled-EGR

한영출*, 오용석**, 오상기**
Youngchool Han, Yongsuk Oh, Sangki Oh

ABSTRACT

It is a present situation that the control on automobile emission is getting more restrictive and also the regulations for emission are changing greatly up to level of those advanced foreign countries. Specially, it has been many years that exhaust gases from gasoline automobile rather than from diesel is the major object concerned by Korea and other countries, and it is strongly required on the reduction techniques on harmful NOx and PM among those compositions.

Thus, this research focused on the Exhaust Gas Recirculation (EGR) and the target for this research is heavy-duty turbo-diesel engine with Cooled EGR.

Furthermore, this research has been made efforts to accomplish the regulation on emission for heavy duty diesel engine.

주요기술용어 : Cooled-EGR(쿨드배기가스재순환), Turbo-diesel engine(터보디젤엔진), Regulation(규제), D-13mode(D-13모드), NOx(질소산화물), PM(입자상물질)

1. 서론

차량에서 배출되는 주요 대기 오염원은 각종 연소기관에서 배출되는 유해성분 물질들이고, 특히 가솔린기관에서 배출되는 유해성분들보다 디젤기관에서 배출되는 유해성분들이 종류가 많다. 그 저감기술로 비교하여 보아도 디젤기관의 유해성분 저감기술개발은 아직까지 가솔린기관의 유해성분 저감기술개발보다 뒤쳐져

있는 것이 사실이다.¹⁾ 디젤자동차의 유해배기가스에는 일산화탄소(CO), 탄화수소(HC), 질소산화물(NOx), 스모크(Smoke) 및 입자상물질(PM) 등이 있으며,²⁾ 이 중에서 일산화탄소와 탄화수소의 배출비율은 가솔린기관에 비해 크지 않아 큰 문제시되고 있지 않는다. 따라서 현재의 배기가스에 관한 연구는 그 밖의 물질인 질소산화물과 스모크 및 입자상물질 저감에 그 초점이 맞추어지고 있는 실정이다. 그 중 본 연구에서는 질소산화물의 저감에 탁월한 성능이 있는 것으로 알려져 있는 배기가스재순환(EGR) 방법³⁾

* 회원, 국민대학교 기계·자동차공학부

** 회원, 국민대학교 자동차기술연구소

에 대하여 다룰 것이다. 근래에는 고온의 EGR 가스에 의한 충전효율 저하 방지차원과 더불어 낮은 흡기온도로 재순환시켜 동일한 압력차를 가진 상태에서 조금 더 나은 EGR율을 확보하기 위해서 기존의 EGR시스템보다 인터쿨러를 장착한 Cooled-EGR시스템에 관한 연구가 진행 중이다. Paul Zelenka et al.⁴⁾에 의하면 앞으로 보다 효과적인 대형디젤기관의 중요기술 중의 하나로 Cooled-EGR기술 적용을 언급하였으며, 또한 M Lapuerta et al.⁵⁾에 의하면 동일 기관 작동조건에서 기존의 EGR과 Cooled-EGR실험의 결과, 흡기 온도를 낮게 함에 따라 EGR율 증가에 의한 NOx 저감효과가 커지는 것을 보고하였다.

따라서, 본 논문은 대형터보디젤기관에 Cooled-EGR시스템 장착에 따른 기관의 성능 및 배출물 특성 연구에 관한 논문으로서, 기관작동조건(회전수, 부하, 재순환량)별로 실제 실험하여 EGR이 기관 성능 및 배출가스에 미치는 일반적인 영향을 고찰하고자 하였다.

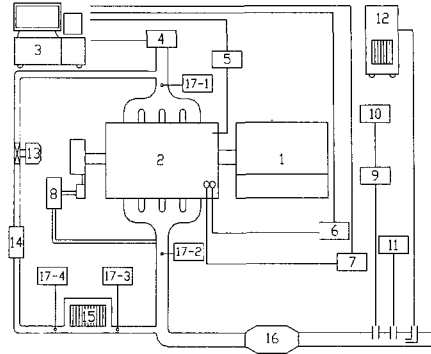
2. 실험장치 및 방법

실험기관은 국내에서 생산되어 8,000cc급의 Turbo-charged 대형기관을 대상으로 하였으며, 주요제원을 Table 1에 나타내었다.

측정장비로 사용된 630kW의 AC동력계(오스

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 / 2200rpm
Max.torque	696Nm / 1200rpm



1. Dynamometer (AC, 630kW)
2. Heavy-duty diesel engine
3. Dynamometer control desk
4. Intake air flow meter
5. Throttle actuator
6. Fuel temperature controller
7. Oil temperature controller
8. Air pump analyzer
9. Exhaust analyzer
10. Pen recorder
11. Smoke meter
12. Mini dilution tunnel
13. EGR valve
14. Blower
15. EGR cooler
16. Muffler
17. -1,2,3,4. Thermocouple

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

트리아 AVL사, APA DYNO), 배출가스 측정장치(Horiba사, MEXA-9100D) 및 EGR 시스템의 구성도를 Fig. 1에 나타내었다.

EGR 시스템은 터보차저 터빈출구에서 컴프레서 입구로 배기가스를 재순환시키는 저압루트⁴⁾ 시스템으로, EGR가스 온도 강하를 위해서 배기관 측에 수냉식 EGR 쿨러와 흡기관 측에는 EGR 가스량 확보를 위한 블로어, EGR량을 조절하는 밸브를 장치하였다. EGR량은 수동으로 제어하였으며, EGR율은 다음 식과 같이, 배이스상태의 신기 흡기량에 대한 EGR에 의한 신기량 감소율로 결정하였다.

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

여기서, q_o 는 베이스 상태의 흡입공기량(kg/hr), q_a 는 배기가스 재순환시의 흡입공기량(kg/hr)이다. 기관 운전조건으로는 기관회전수를 1000 rpm에서부터 2200rpm까지 400rpm씩 변화시키면서, 부하 25%, 50%, 75% 및 100% 조건에서 3분 동안 안정시킨 상태에서 30초 동안 데이터

를 수집, 산술평균 하였다. EGR율은 0%, 10%, 20%로 각각의 회전수 및 부하조건에 따라 측정하여 베이스 결과와 비교 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기관 성능 특성

3.1.1 기관 출력

Fig. 2는 대형디젤기관에 Cooled-EGR시스템 장착에 따른 기관 출력의 영향을 알아보기 위해서 기관회전수별, EGR율별로 전 부하조건에서의 출력 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 기관 베이스상태와 비교하여 EGR율이 20%증가함에 따라 1000rpm의 경우 8%, 1400rpm의 경우 4%, 1800rpm의 경우 1% 및 2200rpm에서 0.1%정도의 출력 감소 경향이 있음을 알 수 있었다. 이는 배기가스재순환으로 연소에 필요한 산소량이 부족하기 때문으로 판단된다. 전체적으로 본 대상기관의 경우는 20%의 EGR을 상승에 따른 출력감소는 최고 1000 rpm에서 8%정도로 20% EGR율이 출력에 미치는 영향은 크지 않음을 알 수 있었다.

3.1.2 연료소비율

Fig. 3은 각 기관 회전수(1000, 1400, 1800 및 2200rpm)에서 부하 및 EGR율에 따른 연료소비율에 미치는 영향을 나타낸 실험 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 각 기관 회전수에서

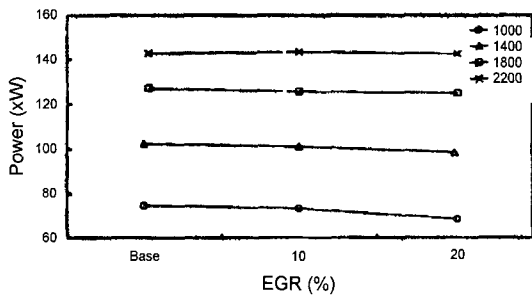
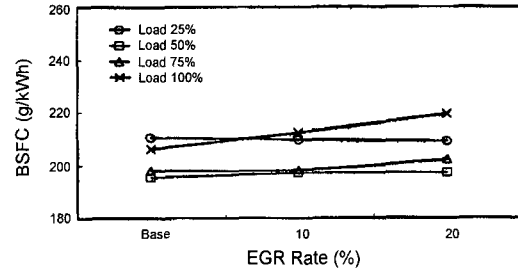
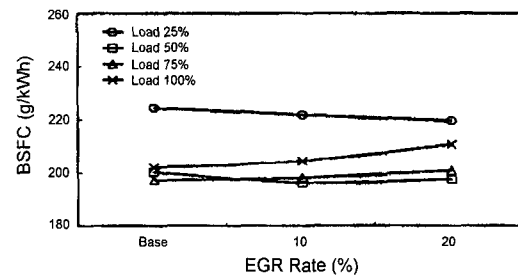


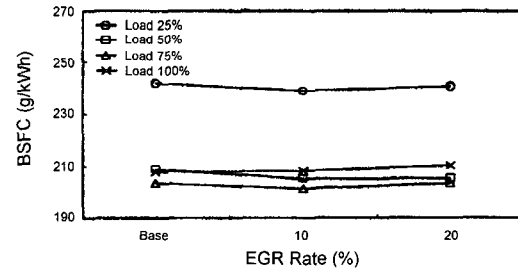
Fig. 2 Effects of cooled-EGR on brake power of engine speed at full load



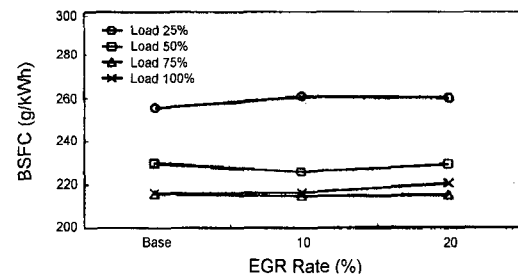
(a) 1000rpm



(b) 1400rpm



(c) 1800rpm



(d) 2200rpm

Fig. 3 Effects of cooled-EGR on specific fuel consumption of load at each engine speed

EGR율이 0%에서 20%로 상승함에 따라 저부하 영역에서는 약간의 연료소비율 향상을 보이고 고부하 영역에서는 약간의 연료소비율 악화 경

향이 나타남을 볼 수 있다. 이는 저부하에서 재순환가스에 의한 흡기 온도 상승이 출력상승의 요인이 되어 연료소비율 감소의 요인이 되지만, 고부하에서는 재순환가스에 의한 흡기 온도 상승보다는 연소율의 악화 및 급기의 산소농도 감소에 의한 점화지연기간 연장요인이 저부하시의 요인보다 상대적으로 높아져 연소실내 최고 압력과 온도를 감소시킴에 따라 출력저하를 초래하게 되고 그 출력 감소분에 해당하는 공급연료량의 증가가 연료소비율 악화의 주 요인이라고 판단된다. 하지만 전체적으로 보면 그 증감 정도는 매우 미소하며 따라서 본 실험기관을 대상으로 한 20%까지의 EGR을 변화에 따른 기관의 성능에 미치는 영향은 미미하다고 볼 수 있다.

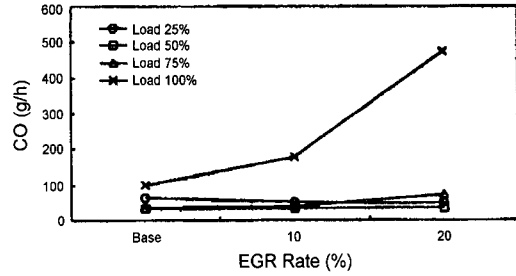
3.2 배기가스 특성

3.2.1 일산화탄소

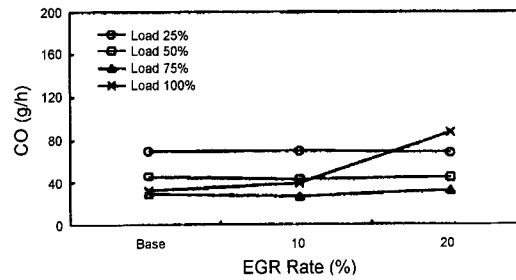
Fig. 4는 EGR을 증가에 따른 기관회전수와 부하별 일산화탄소의 변화를 나타낸 것이다. 직접분사식 대형디젤기관에서 CO는 기관회전수 변화에는 큰 영향을 받지 않으며 부하율에 따라 큰 차이가 있어 저부하와 고부하에서 주로 배출되며 50% 및 75% 부하율에서는 낮은 배출 특성을 보여주며, 각 기관회전수를 기준으로 EGR을 적용에 따른 CO 증감현황을 살펴 보면 EGR율이 증가함에 따라 CO배출량은 증가하지만 25%와 100% 부하시에는 급격히 증가하고 50% 및 75% 부하시에는 그 증가율이 큰 차이를 보이지 않는 경향을 보여주고 있다. 이러한 경향은 매연이나 입자상물질의 측정결과와도 매우 비슷한 경향을 결과를 보여주고 있음을 알 수 있었다.

3.2.2 탄화수소

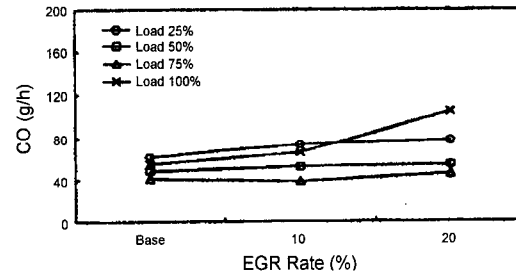
Fig. 5는 기관회전수별, 부하별 및 EGR을 적용에 따른 THC 배출특성을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 직접분사식 대형디젤기관에서 기관회전수에 THC는 기관회전수에 관



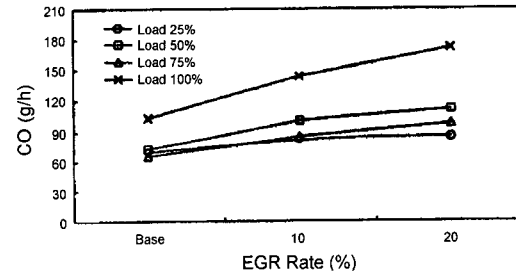
(a) 1000rpm



(b) 1400rpm



(c) 1800rpm



(d) 2200rpm

Fig. 4 Effects of cooled-EGR on CO emission characteristics of each engine speed by various load rate

계없이 비교적 모든 기관회전수에서 비슷하게 배출되고 동일한 기관회전수에서는 비교적 고부하조건에서 많이 배출됨을 알 수 있다. 또한

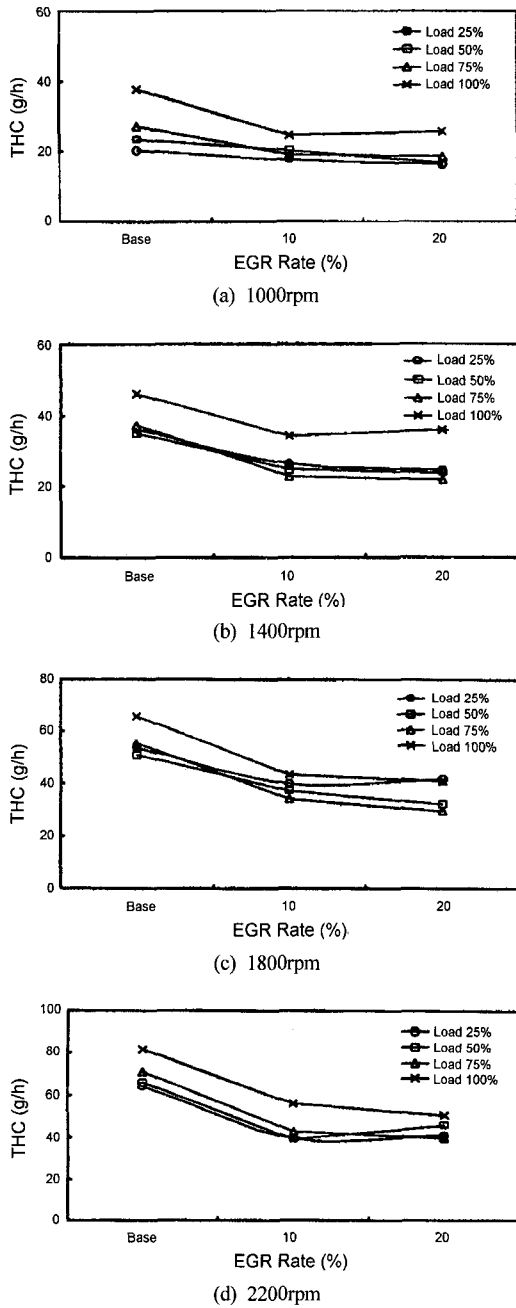


Fig. 5 Effects of cooled-EGR on THC emission characteristics of each engine speed by various load rate

배기가스를 EGR시켰을 때, THC는 대체적으로 EGR율이 높아질수록 다소 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보이고 이는 THC가 흡기온도변

화에 민감하여, EGR율이 증가할수록 전체산소 농도가 낮아지므로 국부적인 산소결핍 영역이 증가하여 불완전연소 인한 미연 HC 연료분자가 증가하는 영향보다 상대적으로 EGR에 따른 흡기온도의 변화에 더 민감한 영향을 받기 때문으로 생각한다.

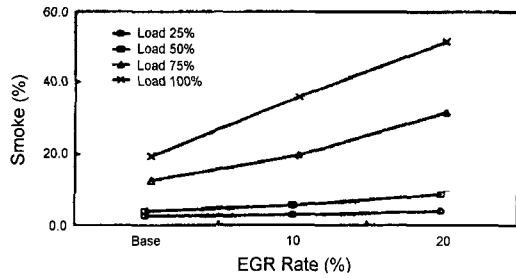
3.2.3 질소산화물

Fig. 6은 기관회전수를 1000, 1400, 1800, 및 2200rpm으로 고정한 상태에서 각 기관회전수마다 부하율은 25, 50, 75 및 100%로 변화시켜가면서 EGR율에 따른 NOx의 변화를 나타낸 결과 그래프이다. Fig. 6(a)의 경우 각 부하마다 베이스기관상태를 기준으로 하여 EGR율을 20%로 상승시킴에 따라 부하율 25%에서는 39.3%, 50%에서는 59.8%, 75%에서는 72.1%, 100%에서는 73.1%정도의 저감경향을, (b)의 경우 부하율 25%에서는 40.9%, 50%에서는 51.5%, 75%에서는 66.9%, 100%에서는 76%정도의 저감경향을, (c)의 경우 부하율 25%에서는 32.5%, 50%에서는 48.2%, 75%에서는 57.3%, 100%에서는 60.9%정도의 저감경향을, (d)의 경우 부하율 25%에서는 44.3%, 50%에서는 56.3%, 75%에서는 62.9%, 100%에서는 70.4%정도의 저감경향을 보여준다. Fig. 6의 (a)~(d)에서 알 수 있듯이 전체적으로 저부하 조건에서 NOx의 저감효과는 크지 않았고, NOx의 저감 정도는 각 기관회전수에서 부하율이 증가할수록 EGR율이 증가할수록 급격히 커지는 것을 알 수 있었다.

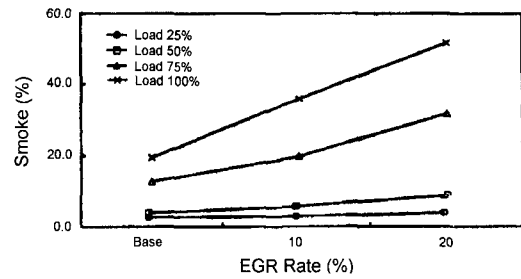
이는 저부하운전조건이 원래 공기과잉상태에서 EGR에 의한 영향을 적게 받기 때문이며, 반면 고부하에서는 비교적 공연비가 농후한 상태이므로 EGR에 의한 높은 NOx 저감효과를 얻을 수 있었던 것으로 판단된다.

3.2.4 스모크

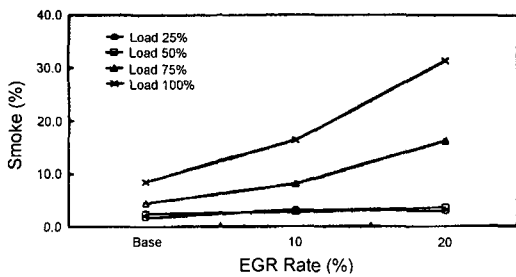
Fig. 7은 기관회전수를 1000, 1400, 1800, 및 200rpm으로 고정한 상태에서 각 기관회전수마다 부하율은 25, 50, 75 및 100%로 변화시켜가



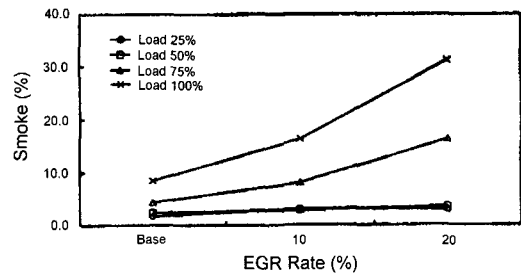
(a) 1000rpm



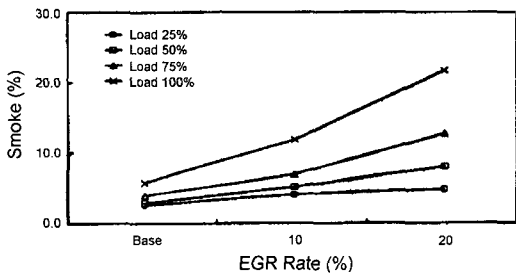
(a) 1000rpm



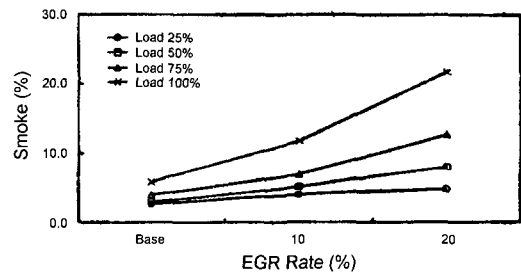
(b) 1400rpm



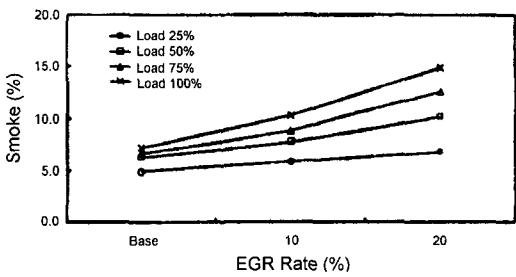
(b) 1400rpm



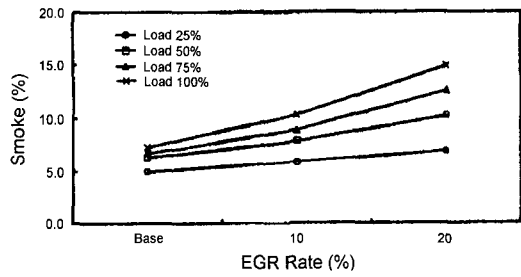
(c) 1800rpm



(c) 1800rpm



(d) 2200rpm



(d) 2200rpm

Fig. 6 Effects of cooled-EGR on NO_x emission characteristics of each engine speed by various load rate

Fig. 7 Effects of cooled-EGR on smoke emission characteristics of each engine speed by various load rate

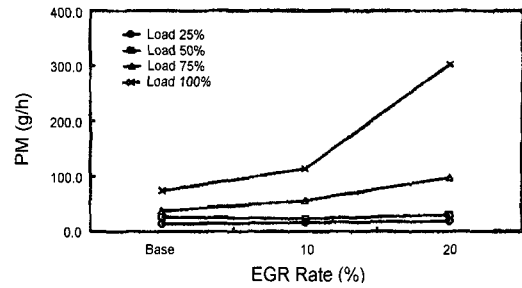
면서 EGR율에 따른 Smoke의 변화를 나타낸 결과 그래프이다. Fig. 7(a)의 경우 각 부하마다 베이스기관상태를 기준으로 하여 EGR율을 20

%로 상승시킴에 따라 부하율 25 %에서는 50%, 50%에서는 123%, 75%에서는 150%, 100%에서는 165.9%정도의 증가경향을, (b)의 경우 부하

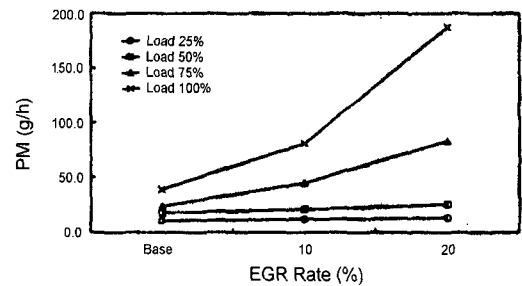
을 25%에서는 70%, 50%에서는 80%, 75%에서는 268.1%, 100%에서는 268.2% 정도의 증가경향을, (c)의 경우 부하율 25%에서는 84.6%, 50%에서는 172.4%, 75%에서는 220%, 100%에서는 274.1% 정도의 증가경향을, (d)의 경우 부하율 25%에서는 46.4%, 50%에서는 60.3%, 75%에서는 86.5%, 100%에서는 104.1% 정도의 증가경향을 보여주며, Fig. 7에서 Smoke는 주로 100% 운전 조건에서 다량 배출되며 기관회전수가 낮을수록 높게 배출됨을 알 수 있다. 이는 비교적 저회전수일 경우 연료분사펌프의 회전수를 낮게 하여 높은 분사압력을 얻지 못한 결과로서 생각된다. 또한 동일회전수에서는 EGR율이 증가할수록 Smoke가 증가하며, 특히 100% 부하에서 급격한 증가를 보이며 그 이유는 연료가 산소와 불완전한 혼합에 의해 전체적인 연소율의 저하가 원인으로 판단된다.

3.2.5 입자상물질

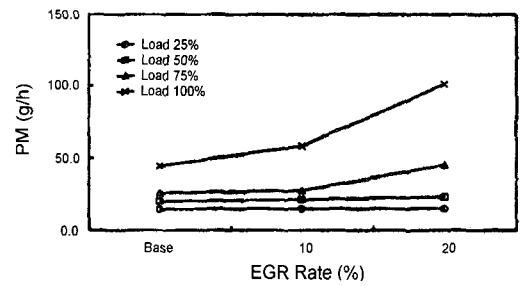
Fig. 8은 기관회전수를 1000, 1400, 1800, 및 2200rpm으로 고정된 상태에서 각 기관회전수마다 부하율은 25, 50, 75 및 100%로 변화시켜가면서 EGR율에 따른 PM의 변화를 나타낸 결과 그래프이다. Fig. 8(a)의 경우 각 부하마다 베이스기관상태를 기준으로 하여 EGR율을 20%로 상승시킴에 따라 부하율 25%, 50%에서는 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 75%에서는 161.6%, 100%에서는 310.7% 정도의 증가경향을, (b)의 경우 부하율 25%, 50%에서는 거의 변화가 없으며, 75%에서는 249%, 100%에서는 381.7% 정도의 증가경향을, (c)의 경우 부하율 25%, 50%에서는 거의 변화가 없으며, 75%에서는 76.3%, 100%에서는 127.3% 정도의 증가경향을 (d)의 경우 부하율 25%에서는 거의 변화가 없으며, 50%에서는 74.9%, 75%에서는 114.9%, 100%에서는 120% 정도의 증가경향을 보여준다. Fig. 8에서 PM은 기관회전수별 부하별로 Smoke과 동일한 배출특성을 보여주며, 동일한 기관회전수에서 PM은 저부하보다는 고부하에서 다량 배



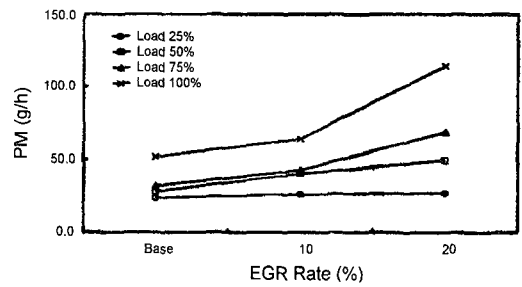
(a) 1000rpm



(b) 1400rpm



(c) 1800rpm



(d) 2200rpm

Fig. 8 Effects of cooled-EGR on PM emission characteristics of each engine speed by various load rate

출되며, 동일한 부하율에서는 2200rpm이 가장 높은 PM 배출량을 보여주었다.

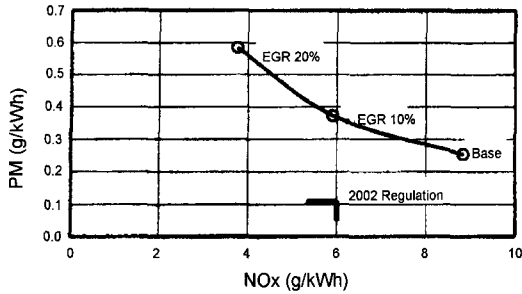


Fig. 9 Emissions result at D-13 mode driving conditions

한편, Cooled-EGR 적용에 따른 PM은 EGR율이 증가할수록 증가하는 것을 알 수 있었으며 이는 Smoke 결과의 원인과 동일한 이유로 판단된다.

3.3 EGR율에 의한 NOx와 규제치의 관계

본 연구에서 EGR율에 의한 NOx와 2002년 국내 규제치와의 관계를 알아보기 위해 국내의 대형차량의 배출 허용기준인 D-13모드로 실험한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 NOx는 EGR율이 10%일 경우 규제치인 6.0(g/kWh)을, 20%일 경우는 해당 규제치의 약 65~70%(3.9~4.2g/kWh)까지 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 PM을 동시 만족하기 위해서는 고압분사나 DPF시스템과 같은 부가적 장치들이 병행되어야 할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구는 8,000cc급의 대형터보디젤기관에서 Cooled-EGR 시스템 적용에 따른 기관 성능 및

배출물 특성에 관하여 KIVA-3코드를 이용하여 수치해석하고 실험을 통하여 얻은 결과를 비교·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) EGR율이 증가함에 따라 출력, 연료소비율은 다소 떨어지나 EGR율 20%까지는 기관성능에 미치는 영향이 적은 것으로 나타났다.
- 2) 저부하 조건(0%~50%)에서 NOx의 저감 효과는 크지 않았으나, 각 기관회전수에서 부하율이 증가할수록, EGR율이 증가할수록 NOx 저감율이 급격히 증가되는 것을 알 수 있었다.
- 3) 본 연구에서 EGR율에 따른 2002년 NOx 규제치만을 비교한 결과, EGR율이 10%일 경우 규제치인 6.0(g/kWh)을 20%일 경우는 해당 규제치의 약 65~70%(3.9~4.2g/kWh)까지 만족할 수 있음을 알 수 있었다.

참고 문헌

- 1) 한영출, 엄명도, 류정호, 오용석, 양규창, “대형디젤기관에서 EGR장착에 의한 성능 및 배출가스의 특성에 관한 연구”, pp.236-241, KSAE2000-03-2036, 2000.
- 2) 한영출 외 1인, “신편내연기관”, pp.1-10, 1998.
- 3) 日本自動車研究所, “自動車のNOx低減策に関する調査研究報告書”, pp.32-59, 1996.
- 4) P. Zelenka, H. Aufinger, W. Reczek and W. Cartellieri, “Cooled EGR - A Key Technology for Future Efficient HD Diesels”, SAE 980190, 1998.
- 5) M. Lapuerta, J. J. Hernandez and F Gimenez, “Evaluation of Exhaust Gas Recirculation as a Technique for Reducing Diesel Engine NOx Emissions”, IME D05698, 2000.