

직접 분사식 디젤엔진에서 EGR이 배기배출물에 미치는 영향에 관한 연구

The Effect of EGR on Exhaust Emissions in a Direct Injection Diesel Engine

장 세 호

S. H. Jang

Key Words : Diesel Engine(디젤엔진), Exhaust Emissions(배기배출물), BSFC(제동연료소비율), EGR(배기 재순환), NOx(질소산화물)

Abstract : The direct injection diesel engine is one of the most efficient thermal engines. For this reason DI diesel engines are widely used for heavy-duty applications. But the world is faced with very serious problems related to the air pollution due to the exhaust emissions of diesel engine. So, that is air pollution related to exhaust gas resulted from explosive combustion should be improved. Exhaust Gas Recirculation(EGR) is a proven method to reduce NOx emissions. In this study, the experiments were performed at various engine loads while the EGR rates were set from 0% to 20%. The emissions trade-off and combustion of diesel engine are investigated. Hot and cooled EGR are achieved without cooling and with cooling respectively. 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 emissions. Also, the reduction rates of NOx emissions for hot and cooled EGR are similar at load 20%.

1. 서 론

디젤엔진은 열효율이 높고 내구성 및 신뢰성도 탁월할 뿐 아니라 지구 온난화 현상을 유발시키는 이산화탄소(CO₂)의 배출량이 가솔린 엔진에 비해 적지만, NOx나 PM(particulate Matters)의 배출이 과다하기 때문에 대기오염 측면에서 많은 문제를 일으키고 있다. 특히, 디젤엔진은 전체 차량에서 차지하는 비율이 적음에도 불구하고 대기오염의 상당 부분을 차지하고 있기 때문에 배출가스 배출규제도 점점 강화되고 있는 실정이다. 1980년대 이후 디젤엔진의 배출가스를 제어하는 기술은 상당한 발전을 해왔다. 특히 최근에는 커먼레일 연료분사시스템(common rail fuel injection system), 터보차지(turbo charger), 인터쿨러(intercooler), 배기 재순환장치(EGR: Exhaust Gas Recirculation) 등의 적용을 통해

디젤엔진의 대표적인 오염물질인 질소산화물(NOx)과 입자상물질(PM)의 배출을 많이 줄이고 있다.

NOx의 생성은 착화지연기간, 착화지연 기간동안에 분사된 연료의 양, 연소실내의 혼합기 형성 등에 따라 영향을 받는다. NOx의 생성을 억제시키는 방법으로는 분사시기의 지연, Intercooler에 의한 흡기의 냉각, 배기의 재순환 등으로 연소온도를 낮추는 것이 효과적이다. 하지만 일반적으로 NOx의 저감기술은 PM의 증가를 초래하고, 반대로 PM의 저감기술은 NOx의 증가를 유발시키기 때문에 두 배출성분을 동시에 줄일 수 있는 기술이 요구된다.

디젤엔진에서 EGR의 적용은 NOx 저감을 위한 가장 효과적인 방법 중의 하나이다. 주요원리는 배출가스가 흡기매니폴드로 재순환될 때 배출가스의 CO₂와 H₂O 등과 같은 불활성가스가 흡입공기의 일부로 치환되어 흡입산소량이 감소하는 희석효과(dilution effect)와 흡입공기보다 상대적으로 비열이 높은 CO₂와 H₂O의 공급으로 열용량이 증대되어 연소온도를 저감시키는 열효과(thermal effect)이다. 반면에 고온에서 CO₂의 해리는 산소원자를 제공하여

접수일 : 2003년 10월 30일
장세호(책임저자) : 강원전문대학 동력기계시스템과
E-mail : shjang@gangwon.ac.kr, Tel : 033-660-3412

Zeldovich 메카니즘을 통해 NO_x의 생성을 증가시키게 되며 고온의 배출가스 재순환으로 흡기온도가 증가되어 연소온도가 상승함으로 인해 회석효과와 열효과로 얻어지는 NO_x 저감효과가 상쇄되는 영향 등도 연구되어 왔다^{1~5)}. 근래에는 고온의 EGR 가스에 의한 충전효율 저하를 방지하기 위하여 EGR cooler를 장착한 cooled EGR 시스템에 관한 연구도 보고되고 있다⁶⁾.

따라서, 본 연구에서는 직접분사식 소형과급 디젤엔진에 cooled EGR 시스템을 적용하고, 운전조건과 EGR을 변화가 배기배출물에 미치는 영향에 대해서 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

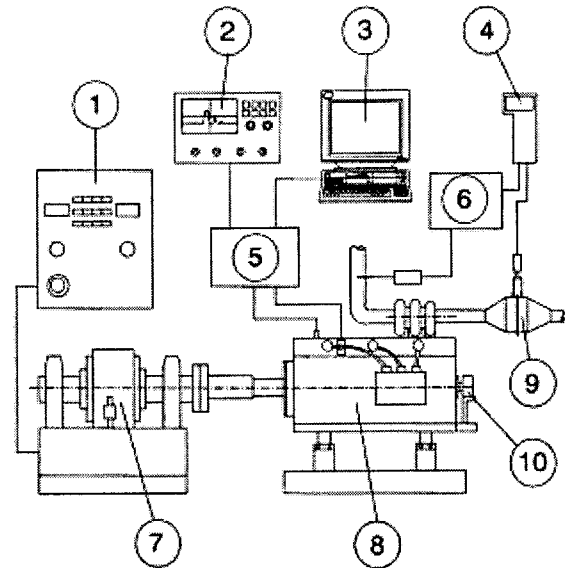
2.1 실험장치

Fig. 1은 본 실험에 사용된 실험장치의 전체 개략도를 나타낸 것이다. 실험에 사용된 엔진은 과급 3기통 4행정 직접분사식 디젤엔진으로 엔진 사양은 Table 1에 표시한 바와 같고, 실험장비는 와전류식 동력계(Eddy current type, Absorption capacity : 132kW), 정전위 전해법을 이용한 배기 분석기(Model : testo 350), 흡입 공기량을 측정하기 위한 층류 유량계(Laminar flow elements, model : 50MC2-6), 광투과방식을 이용한 디젤스모크 분석기(Smoke opacity analysis, BOSCH, RTM 430) 등으로 구성되어 있다. 그리고 층류유량계 입구 온도, 흡기 매니폴드 온도, 배기온도, EGR 온도, 냉각수 온도 등을 각각 측정하였다.

2.2 실험방법

실험은 엔진 운전상태를 일정하게 유지하기 위하여 냉각수 입구 온도를 50~60℃로 일정하게 유지하고, 시동 후 측정하고자 하는 운전조건에서 3분 이상 운전하여 운전상태가 안정된 후 실험을 행하였으며, 배출가스측정은 배기분석기에서 5초 간격으로 데이터를 연속 수집하였다. 실험조건은 엔진 회전수를 1800, 2600rpm, 부하를 20, 40, 60, 80, 100%로 각각 변화시켜 실험을 행하였다.

EGR 시스템은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 배기 매니폴드에서 흡기 매니폴드 쪽으로 배기를 재순환시키는 고압루프방식⁶⁾(High pressure loop method)을 채택하였다.



1. Dynamometer controller
2. Digital Oscilloscope
3. Computer
4. Exhaust gas hand-held instrument
5. Pressure sensor Amplifier
6. Exhaust gas analyser box
7. Dynamometer
8. Test engine
9. Laminar flow meter
10. Rotary encoder

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Specifications of the test engine

Item	Specification
Model	KUKJE 3D100T
Type	3-cylinder 4-stroke direct injection Diesel engine with exhaust T/C
Compression Ratio	18.4 : 1
Power	40kW at 2600rpm
Bore(mm)	100
Stroke(mm)	110
Piston speed(m/s)	9.53
Fuel injection time	BTDC 17±1
Fuel injection pressure	19.61MPa

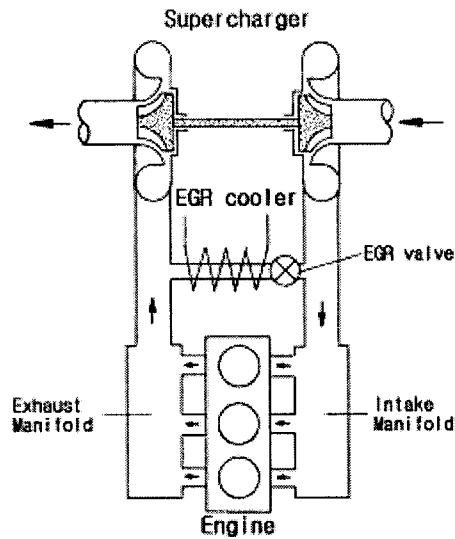


Fig. 2 Schematic diagram of EGR system

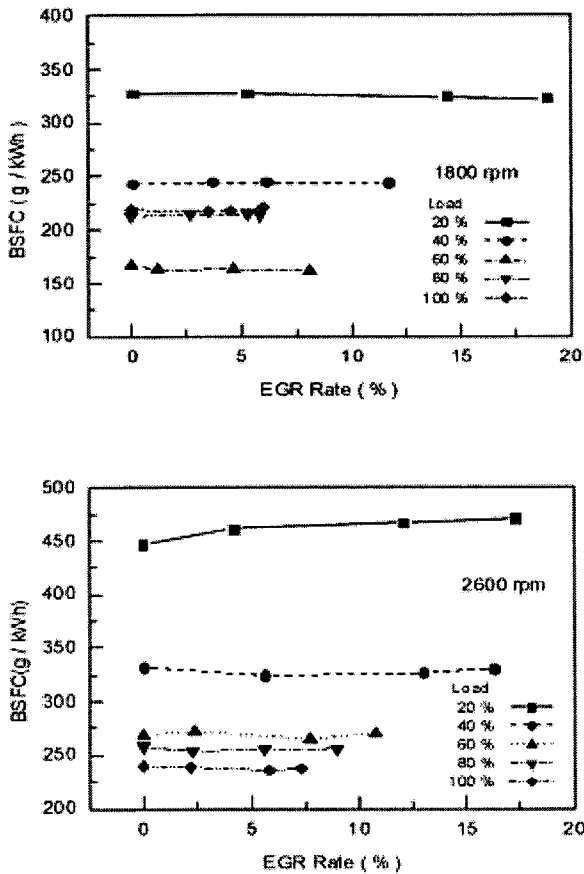


Fig. 3 Effect of cooled EGR on specific fuel consumption of load at each engine speed

EGR 가스 온도를 낮추기 위하여 수냉식 EGR cooler를 설치하였으며, EGR 시스템 중간에 조절밸브를 설치하여 EGR 량을 수동으로 조절하였다. 그리고 EGR 량은 다음 식에 의해 결정하였다.

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

여기서, q_a 는 EGR rate = 0인 상태의 흡입공기량 (kg/hr), q_e 는 배기 재순환시의 흡입공기량(kg/hr)이다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 엔진 회전수와 부하 그리고 EGR율의 변화가 연료소비율에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 1800rpm일 때 부하 20%에서 EGR율이 높아짐에 따라 연료소비율이 약간 개선되는 반면에 2600rpm일 때는 부하 20%에서 EGR율이 높아짐에 따라 오히려 연료소비율이 악화되는 경향을 나타내고 있으나, 그 이외의 부하영역에서는 EGR에 따른 연료소비율의 변화가 매우 작은 것을 알 수 있다. 따라서 본 실험 범위 내에서 EGR율이 출력에 미치는 영향은 크지 않음을 알 수 있다. 그리고 1800rpm에서는 연료소비율이 부하 60%에서 가장 작게 나타나는 반면에

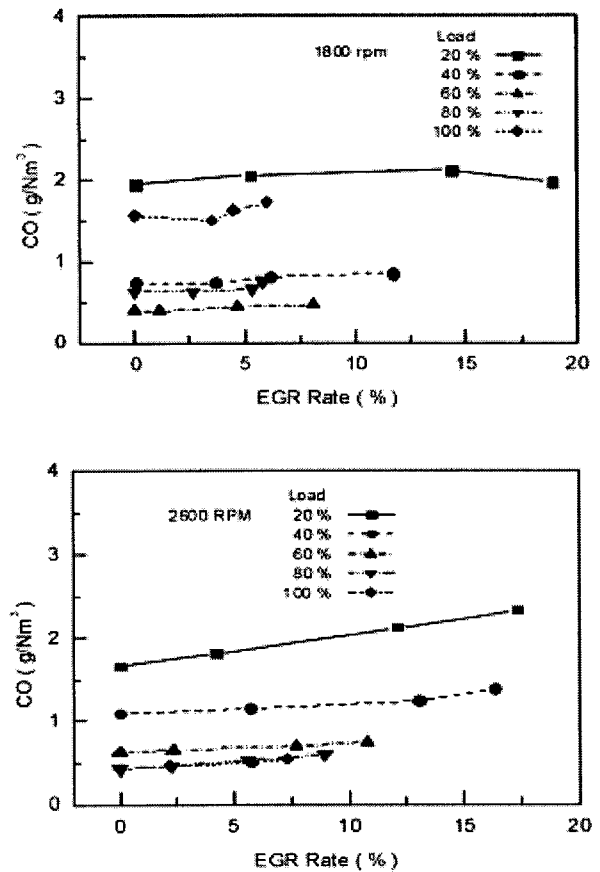


Fig. 4 Effect of cooled EGR on CO emission characteristics of each engine speed by various load rate

2600rpm에서는 부하 100%에서 가장 작게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 4는 엔진회전수와 EGR율 변화에 따른 일산화탄소(CO)의 배출농도를 나타낸 것이다. 1800rpm 일 때의 CO의 배출량을 살펴보면, 저부하(20%)와 고부하(100%)일 때 CO의 배출이 많으며, 40, 60, 80% 부하에서는 배출이 적게 나타나고, EGR율이 높아질수록 배출량이 약간 증가하고 있다. 이는 저부하와 고부하일 때 불완전연소가 많이 발생하며, 또한 EGR율이 높아질수록 산소량이 적어지기 때문이라 생각된다. 한편, 2600rpm에서는 부하가 증가할수록 CO의 배출량이 급격히 감소하며, EGR율이 높아질수록 CO의 배출량이 상당히 증가함을 알 수 있다. 이는 부하가 높아질수록 연소효율이 개선되기 때문에 CO의 배출량이 감소되며, EGR율이 높아질수록 CO의 배출량이 증가하는 것은 EGR에 따른 연소에 필요한 산소농도의 감소와 이전 사이클의 CO의 재순환량이 증가하기 때문이라 생각된다.

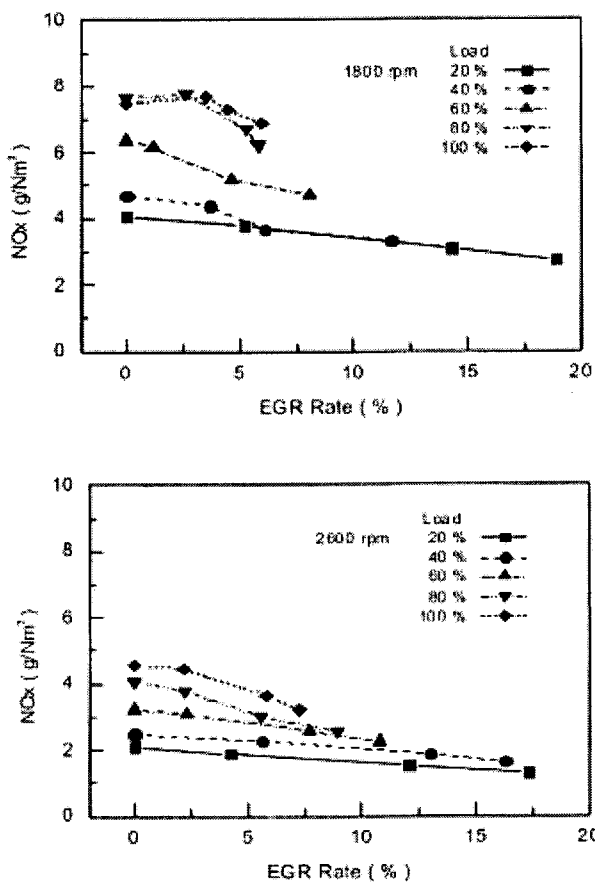


Fig. 5 Effect of cooled EGR on NOx emission characteristics of each engine speed by various load rate

Fig. 5는 엔진회전수와 부하별 EGR율의 변화에 따른 NOx의 배출량을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 NOx의 배출량은 엔진회전수와 관계없이 EGR율이 높아질수록 감소하고, 부하가 증가할수록 배출량이 많아짐을 알 수 있다. 그리고 부하가 높을수록 EGR율 증가에 따른 NOx의 배출량이 급격한 기울기로 감소됨을 알 수 있다. 이는 저부하 영역에서는 공기과잉율이 높고 연소온도가 낮기 때문에 EGR에 의한 영향을 적게 받는 반면에, 부하가 증가함에 따라 연소온도가 높아져 EGR에 의한 NOx 저감효과가 매우 크게 나타남을 알 수 있다. 그리고 고부하 영역에서 실험영역보다 더욱 EGR율을 높이면 NOx 감소율은 더욱 크게 나타나리라 예상된다.

Fig. 6은 엔진회전수와 부하별 EGR율의 변화에 따른 smoke의 배출농도를 나타낸 것이다. 엔진회전수에 관계없이 부하 20%에서는 EGR율의 변화에 거의 영향을 받지 않으나 부하와 EGR율이 높아질

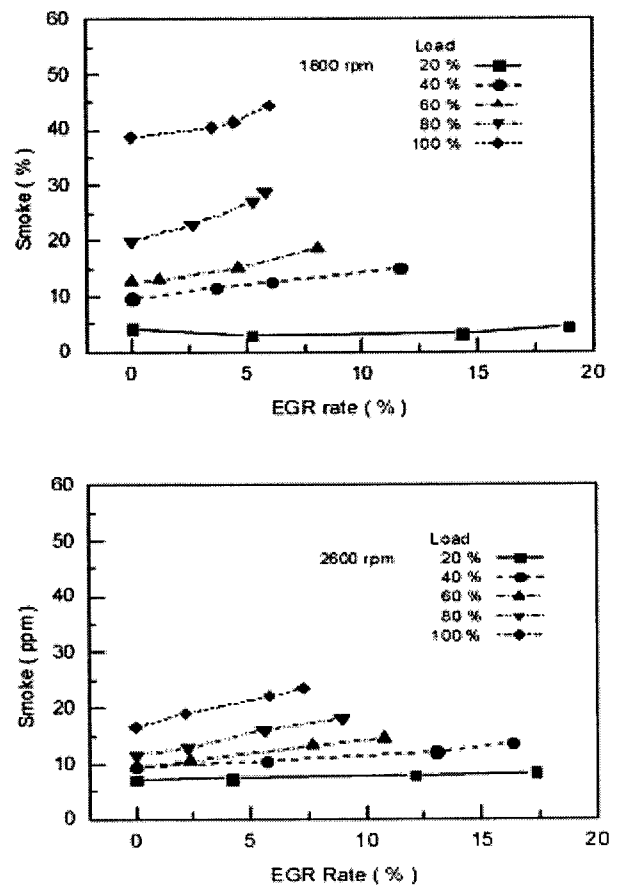


Fig. 6 Effect of cooled EGR on smoke emission characteristics of each engine speed by various load rate

수록 smoke의 배출농도는 더욱 증가함을 알 수 있다. 이는 부하 증가에 따른 공기과잉율 감소와 동시에 EGR에 따른 산소농도의 감소로 인한 불완전 연소에 의한 것이라고 생각된다.

Fig. 7은 엔진회전수 2600rpm에서 cooled EGR을 적용했을 때 NOx 배출량과 smoke 배출량의 trade

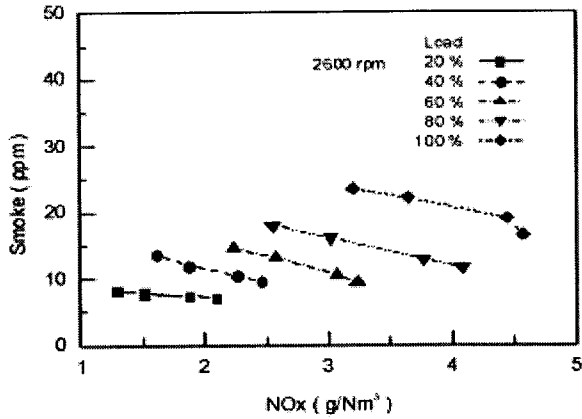


Fig. 7 Effect of EGR on NOx-Smoke trade-off at 2600rpm

-off 관계를 나타낸 것이다. 본 실험범위 내에서는 고부하 영역으로 갈수록 NOx가 증가함에 따라 smoke의 배출이 현저히 저감됨을 알 수 있다. 즉 고 부하 영역으로 갈수록 trade-off 관계가 심함을 알 수 있다.

Fig. 8과 9는 1800rpm에서 cooled EGR과 hot EGR을 각각 적용시켰을 때, NOx와 smoke의 배출 특성을 부하 20%, 80%에 대해서 각각 나타낸 것이다. Fig. 8에서 NOx의 배출량을 비교해보면, 부하 20%에서는 cooled EGR과 hot EGR에서의 배출량 차이는 별로 없는 반면에 부하 80%에서는 EGR율이 높아질수록 cooled EGR을 적용했을 때 NOx 배출량이 더욱 감소함을 알 수 있다. 이는 cooled EGR에서의 흡기온도가 hot EGR에서의 흡기온도보다 EGR율이 높아질수록 최대 15°C까지 더 낮게 되는데, 이로 인해 연소온도가 더욱 낮아지기 때문이라 생각된다. 그리고 Fig. 9에서 smoke의 배출량을 비교해보면, 부하 20%에서는 cooled EGR과 hot EGR의 차이가 별로 없으나, 부하 80%에서는 EGR율이 높아질수록 hot EGR 쪽이 cooled EGR 보다 오히려

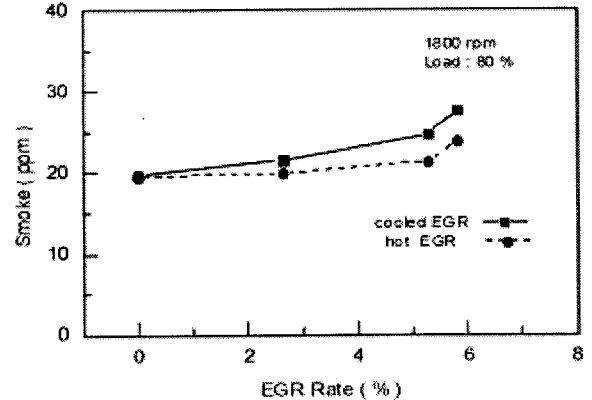
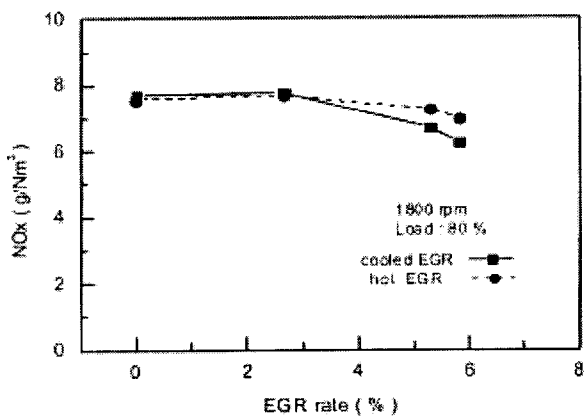
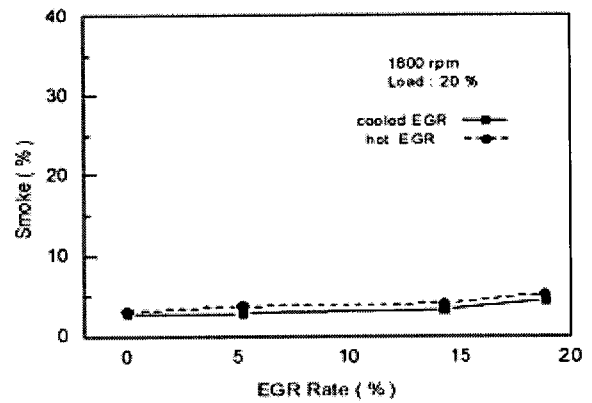
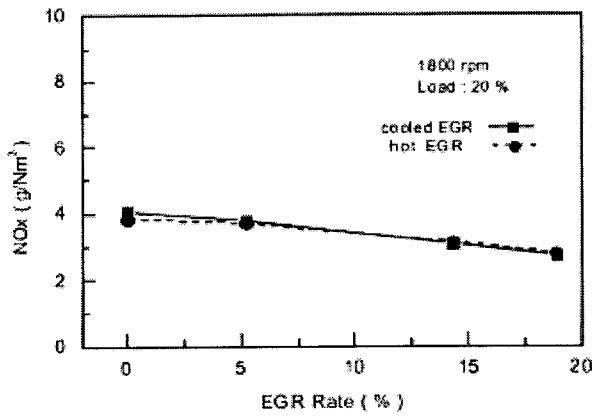


Fig. 8 Comparison of NOx between cooled and hot EGR at 1800rpm

Fig. 9 Comparison of smoke between cooled and hot EGR at 1800rpm

smoke의 배출량이 적게 나타남을 알 수 있다. 따라서 cooled EGR을 행하면 hot EGR보다 NO_x와 smoke의 trade-off 관계가 더욱 심하게 됨을 확인하였다.

4. 결 론

3기통 직접분사식 과급 디젤 엔진에서 엔진의 운전 조건과 EGR이 배기배출물에 미치는 영향에 대해서 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연료소비율은 EGR율이 증가함에 따라 증가 또는 감소하는 일부 영역이 있으나 전반적으로 연료소비율에 미치는 영향이 적음을 알 수 있었다.
2. CO의 배출은 엔진회전수가 낮은 경우는 EGR의 영향이 적은 반면에 고회전수에서는 EGR율이 높아질수록 배출량이 약간 증가하였다.
3. NO_x의 배출량은 EGR율이 높아질수록 급격히 감소하는 반면에 smoke 배출량은 저부하에서는 EGR의 영향을 별로 받지 않으나 부하가 증가할수록 급격히 증가하였다.
4. NO_x와 smoke 배출량의 trade-off 관계는 부하가 높을수록, hot EGR보다 cooled EGR을 적용할수록 심하게 되었다.

참고문헌

1. J. B. Heywood, 1988, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill, Inc. New York.
2. S. Ropke, 1995, "NO_x Formation in Diesel Engines for Various Fuels and Intake Gases", SAE 950213.
3. T. Chikahisa, 1995, "Analysis of NO Formation Characteristics and Control Concepts in Diesel Engines from NO Reaction-Kinetic Considerations", SAE 950215.
4. N. Ladonmatos, 1996, "The Effect of Exhaust Gas Recirculation on Combustion and NO_x Emissions in a High-Speed Direct-Injection Diesel Engine", SAE 960840.
5. N. Ladonmatos, 1996, "The Dilution, Chemical, and Thermal Effects of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Engine Emissions-Part 1 : Effect of reducing Inlet Charge Oxygen", SAE

- 961165.
6. Ulf Lundqvist, Gudmand Smedler and Per Stalhammar, 2001, "A Comparison between Different EGR Systems for HD Diesel Engines and Their Effect on Performance, Fuel Consumption and Emissions", SAE 2001-01-0226.
7. Y. Sato, A. Noda and T. Sakamoto, 1997, "Combustion and NO_x Emission Characteristics in a DI Methanol Engine Using Supercharging with EGR", SAE 971647.
8. 장세호, 고대권, 안수길, 2002, "직접분사식 소형 과급 디젤엔진의 운전조건이 배기배출물에 미치는 영향", 한국동력기계공학회지, 제6권, 제2호, pp. 12~17.
9. Naeim A. Henein, Ming-Chia Lai and I. Singh, 2001, "Emissions Trade-Off and Combustion Characteristics of a High-Speed Direct Injection Diesel Engine", SAE 2001-01-0197.