

## 직분식 소형 과급 디젤엔진에서 EGRI 배기배출물에 미치는 영향

장 세 호<sup>\*1)</sup> · 고 대 권<sup>2)</sup>

강원전문대학 동력기계시스템과<sup>1)</sup> · 부경대학교 기계공학부<sup>2)</sup>

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

Scho Jang<sup>\*1)</sup> · Daekwon Koh<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Power System Engineering, Gangwon Provincial University, Gangwon 210-802, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechanical Engineering, Pukyong University, Busan 608-739, Korea

(Received 12 May 2005 / 12 May 2005 Accepted 28 June 2005)

**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 30%. The emissions trade-off and combustion of diesel engine are investigated. The brake specific fuel consumption rate is very slightly fluctuated with EGR in the range of experimental conditions. The ignition delay increased with increasing EGR rate. The maximum value of premixed combustion for the rate of heat release is increased with increasing EGR rate. NOx emissions are decreased with increasing EGR rate at high load and high speed.

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.

**Key words** : Diesel engine(디젤엔진), Exhaust emissions(배기배출물), Exhaust gas recirculation(EGR:배기재순환), Rate of heat release(열발생율), BSFC(제동연료소비율), NOx(질소산화물)

### 1. 서 론

디젤엔진은 가솔린엔진에 비해 열효율이 더 높아 경제적이고, 내구성 및 신뢰성도 탁월할 뿐 아니라 출력에 비하여 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)의 배출량이 적기 때문에 연료절감과 지구온난화에 대한 대응 차원에서 유리하여 앞으로도 그 적용이 확대 되고 있다. 그러나 현재 국내에 보급된 디젤엔진 차량의 비율이 29%인데 비해 공해배출 비중은 전체자동차 공해의 52%를 차지하고 있다. 그 중에서 특히 NOx나 PM

(particulate Matters)의 배출이 과다하기 때문에 높은 열효율을 유지하면서 이러한 유해 배출물을 줄이는 것이 디젤엔진의 최대 과제이다.

점점 강화되고 있는 배출가스 배출규제에 대응하기 위한 대책으로는 엔진 본체의 개선, 연료 무화 및 연료 공급 개선, 연료제어 개선, 후처리 성능 개선 등이 있다. 그 중에서 주로 엔진본체의 개량에 의한 연소 개선에 의해 유해 배출물을 줄이고 있다. 즉, 커먼레일 연료분사시스템(common rail fuel injection system), 터보차저(turbo charger), 인터쿨러(intercooler), 배기 재순환장치(EGR; Exhaust Gas Recirculation)

\*To whom correspondence should be addressed.  
jangsh@gw.ac.kr

tion) 등의 적용을 통해 디젤엔진의 대표적인 오염물질인 질소산화물(NOX)과 입자상물질(PM)의 배출을 많이 줄이고 있다.<sup>1-6)</sup>

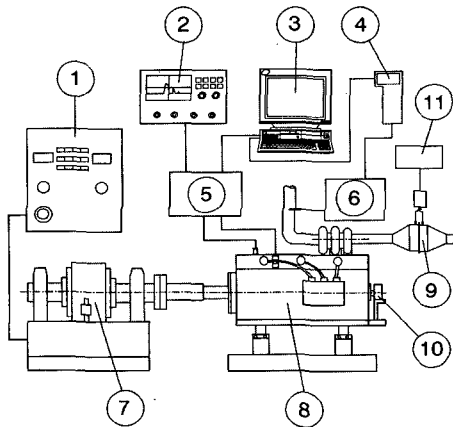
디젤엔진에서 EGR의 적용은 NOX 저감을 위한 가장 효과적인 방법 중의 하나인데 근래에 고온의 EGR 가스에 의한 충전효율 저하를 방지하기 위하여 EGR cooler를 장착한 cooled EGR 시스템에 관한 연구도 보고되고 있다.<sup>7)</sup>

따라서, 본 연구에서는 직접분사식 소형과급 디젤엔진에 수냉식 EGR 시스템과 Intercooler를 설치하여 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



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
11. Digital Manometer

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Specifications of the test engine

Item	Specification
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

Table 1에 표시한 바와 같고, 실험장비는 와전류식 동력계(Eddy current type, Absorption capacity : 132 kW), 정전위 전해법을 이용한 배기 분석기(Model : testo 350), 흡입 공기량을 측정하기 위한 층류 유량계(Laminar flow elements, model : 50MC2-6), 광투과 방식을 이용한 디젤스모크 분석기(Smoke opacity analysis, BOSCH, RTM 430) 등으로 구성되어 있다. 그리고 층류유량계 입구 온도, 흡기 매니폴드 온도, 배기온도, EGR 온도, 냉각수 온도와 연료소모량 등을 각각 측정하였다.

### 2.2 실험방법

실험은 엔진 운전상태를 일정하게 유지하기 위하여 냉각수 입구 온도를 50~60°C로 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 변화시키고, 각 부하마다 EGR율을 0에서 30%까지 5% 간격으로 변화시키면서 실험을 행하였다.

EGR 시스템은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 배기 매니폴드에서 나오는 배기를 흡기 매니폴드 쪽으로 재순환시키는 고압루프방식<sup>8)</sup>(High pressure loop method)을 채택하였다.

고온의 EGR 가스 온도를 낮추기 위하여 수냉식 EGR cooler를 설치하였으며, EGR cooler 출구측에 EGR valve를 설치하여 EGR 량을 수동으로 조절하였다. EGR valve를 통과한 가스는 T/C로 인해 흡입

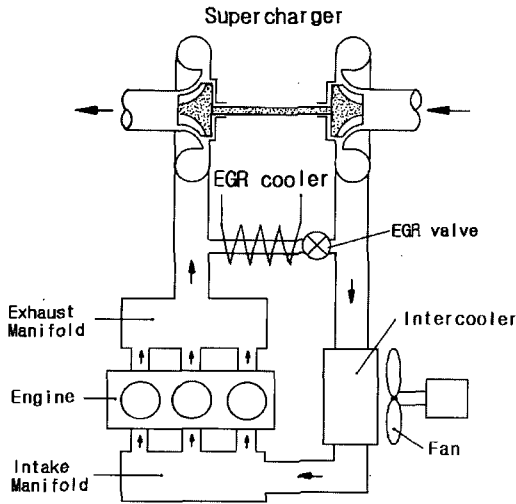


Fig. 2 Schematic diagram of EGR system

된 고온의 공기와 합쳐지게 한 후 Intercooler를 거쳐 흡기 매니폴드로 유입되도록 하였다. 그리고 EGR 가스의 량은 다음 식에 의해 결정하였다.

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

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

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 엔진 회전수와 부하 그리고 EGR율의 변화가 연료소비율에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 1800rpm과 2600rpm 모두 부하 20%에서 연료소비율이 매우 높은데, 이는 낮은 연소온도로 인한 불완전 연소 때문이라 생각되며, 부하가 증가할수록 연료 소비율이 점차적으로 낮게 나타나는 것은 부하가 증가할수록 연소온도가 높아지고 연소상태도 양호해지기 때문이라 생각된다. 그리고 1800rpm 동일 부하에서 EGR율의 증가에 따른 연료소비율 변화를 살펴보면 증가 및 감소의 경향이 불규칙적이고, 증가한 경우는 평균연료소비율의 최대 3.9%, 감소한 경우는 최대 3%정도 되었다. 2600rpm에서도 1800rpm과 동일하게 연료소비율의 증감이 불규칙적이며 전반적으로 EGR율이 높아질수록 약간 감소하는

경향을 나타내며, 그 변동폭은 감소가 평균연료소비율의 1.4~5.6%로 나타났다. 모든 실험조건에서 EGR율을 최대 30%까지 했을 때 연료소비율의 변화를 평균하면 연료소비율이 1.1% 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 본 실험 범위 내에서는 연소에 필요한 산소량이 부족하지 않기 때문에 연료소비율에는 EGR율이 별로 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

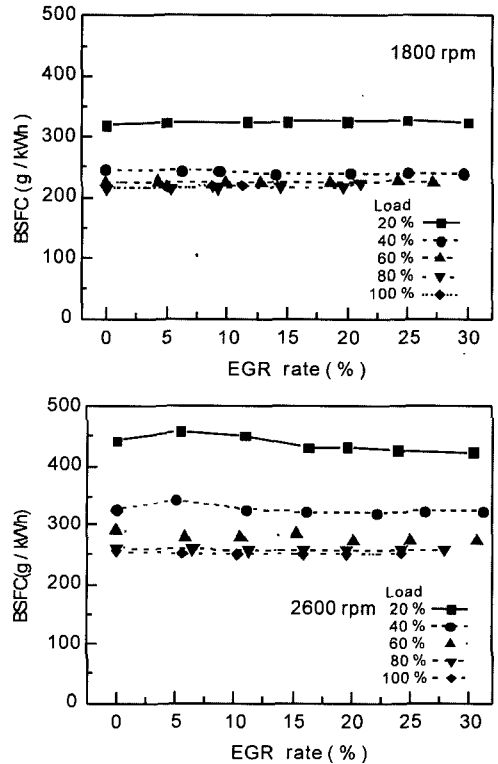


Fig. 3 Effect of cooled EGR on specific fuel consumption of load at each engine speed

EGR율의 변화가 연소특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 연소실내 압력을 측정하였고, 측정된 연소실압력을 이용하여 열발생율을 계산하였다. Fig. 4는 엔진회전수 2600rpm에서 부하와 EGR율 변화에 따른 열발생율 곡선을 나타낸 것이다. 부하 60%와 100% 모두 EGR율을 높일수록 착화지연이 길어지고, 착화지연이 길어짐으로 인해 예혼합연소량의 증가로 예혼합연소의 최고 열발생율이 높게 나타나는 반면에 확산연소는 감소되어 열발생율이 급격히 감소됨을 알 수 있다. 따라서 연소초기의 예

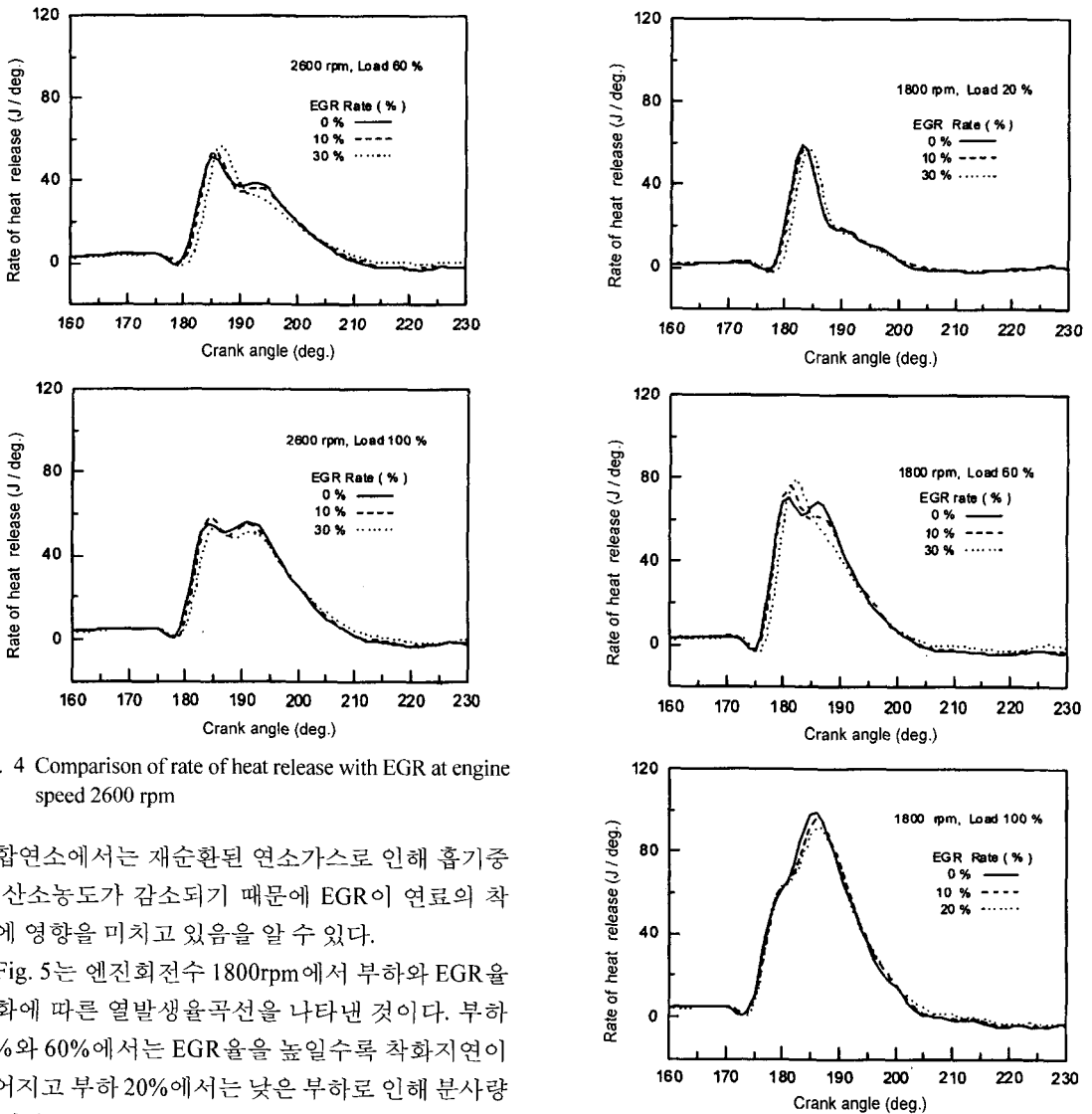


Fig. 4 Comparison of rate of heat release with EGR at engine speed 2600 rpm

혼합연소에서는 재순환된 연소가스로 인해 흡기중의 산소농도가 감소되기 때문에 EGR이 연료의 착화에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 엔진회전수 1800rpm에서 부하와 EGR을 변화에 따른 열발생율곡선을 나타낸 것이다. 부하 20%와 60%에서는 EGR율을 높일수록 착화지연이 길어지고 부하 20%에서는 낮은 부하로 인해 분사량이 적기 때문에 연소초기의 예혼합연소가 대부분이며 확산연소는 매우 적음을 알 수 있다. 그리고 부하 60%에서는 EGR율을 높일수록 예혼합연소량의 증가로 인해 최고 열발생율은 점차 높게 나타나며, 확산연소량은 적어짐을 알 수 있다. 그리고 부하 100%에서는 EGR율을 높여도 착화지연이 매우 작게 나타나고 있다. 높은 부하로 인해 연소실 온도가 매우 높기 때문이라 생각되며, 최고열발생율은 오히려 낮아짐을 알 수 있다. 이는 최고열발생율이 나타나는 시점이 확산연소기간 중인데 확산연소량이 감소하기 때문이라 생각된다. 따라서 엔진회전수와 부하에 관계없이 EGR율을 높이면 착화지연은 길어지

Fig. 5 Comparison of rate of heat release with EGR at engine speed 1800 rpm

고, 예혼합연소량이 증가하는 반면에 확산연소량은 줄어듦을 확인하였다. 그리고 엔진회전수 1800rpm 부하 60%에서는 EGR율을 높이면 연소실 최고압력이 높아지는 반면에 부하 100%에서는 확산연소의 감소로 오히려 연소실 최고압력이 낮아지는 것을 확인하였다.

Fig. 6은 엔진회전수와 EGR을 변화에 따른 일산화탄소(CO)의 배출농도를 나타낸 것이다. 1800 rpm 일 때의 CO의 배출량을 살펴보면, 저부하(20%)와

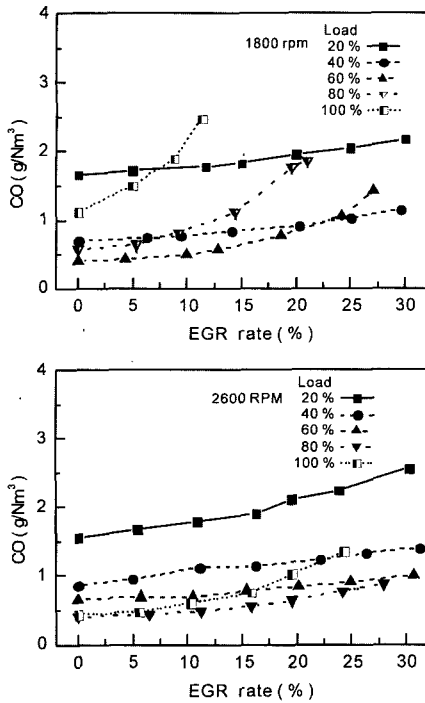


Fig. 6 Effect of cooled EGR on CO emission characteristics of each engine speed by various load rate

고부하(100%)에서 전반적으로 CO의 배출이 높게 나타나고 있으며, 이는 저부하와 고부하에서 불완전 연소가 많이 발생하기 때문이라 생각된다. 그리고 부하가 높을수록 EGR율이 높아짐에 따라 CO의 배출량이 증가하는 기울기가 급격히 커지고 있다. 이는 EGR에 따른 연소에 필요한 산소농도의 감소와 이전 사이클의 CO의 재순환량이 증가하기 때문이라 생각된다.

한편, 2600rpm에서는 부하가 증가할수록 CO의 배출량이 급격히 감소하며, EGR율 증가에 따른 CO의 배출량 증가 기울기를 1800rpm의 경우와 비교해보면 매우 완만히 증가함을 알 수 있다. 이는 부하가 높아질수록 연소효율이 개선되기 때문에 CO의 배출량이 감소되며, 동일한 부하에서 1800rpm보다 2600rpm일 때 노즐에서의 1회 연료분사량이 적기 때문에 연소상태가 더 양호하기 때문이라 생각된다.

Fig. 7은 엔진회전수와 부하별 EGR율의 변화에 따른 NOx의 배출량을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 NOx의 배출량은 엔진회전수와 관계없이 EGR율이 높아질수록 감소하고, 부하가

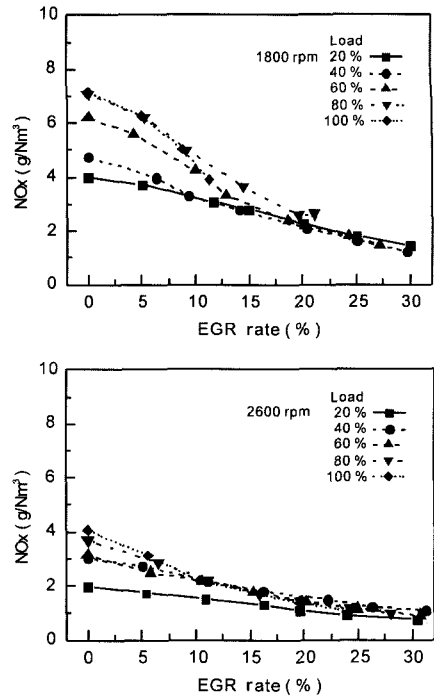


Fig. 7 Effect of cooled EGR on NOx emission characteristics of each engine speed by various load rate

증가할수록 배출량이 증가함을 알 수 있다. 그리고 엔진 회전수에 따른 배출량을 비교해보면 1800rpm에서에서의 배출량은 2600rpm에서의 배출량보다 약 2배정도 더 많이 배출되고 있음을 알 수 있다. 그리고 부하가 높을수록 EGR율 증가에 따른 NOx의 배출량이 급격한 기울기로 감소되다가 EGR율이 약 20%정도 되면 부하와 관계없이 배출량이 비슷하게 됨을 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.

Fig. 8은 엔진회전수와 부하별 EGR율의 변화에 따른 smoke의 배출농도를 나타낸 것이다. 엔진회전수와 관계없이 부하 20%에서는 EGR율의 변화에 거의 영향을 받지 않고 배출량이 비슷하지만, 부하가 높아질수록 EGR율에 따른 smoke의 배출농도는 매우 증가함을 알 수 있다.

이는 부하 증가에 따른 공기과잉율 감소와 동시에 EGR에 따른 산소농도의 감소로 불완전 연소에

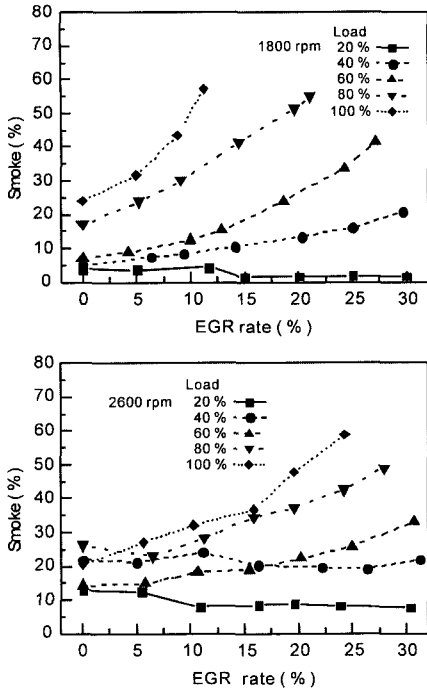


Fig. 8 Effect of cooled EGR on smoke emission characteristics of each engine speed by various load rate

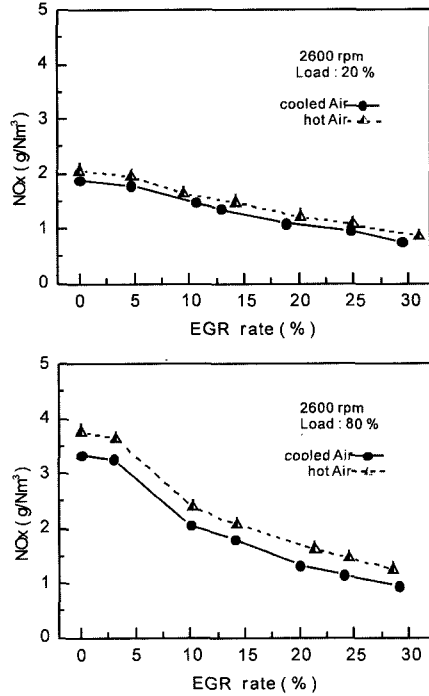


Fig. 10 Comparison of NOx between cooled and hot Air at 1800rpm

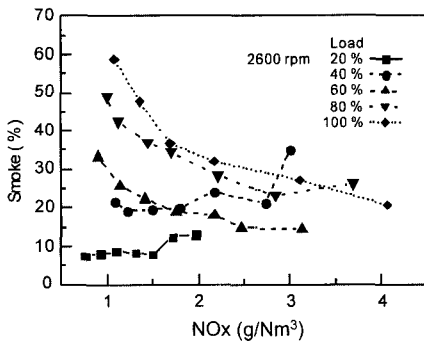


Fig. 9 Effect of EGR on NOx-Smoke trade-off at 2600rpm

의한 것이라고 생각된다.

Fig. 9는 엔진회전수 2600rpm에서 cooled EGR를 적용했을 때, NOx 배출량과 smoke 배출량의 trade-off 관계를 나타낸 것이다. 본 실험범위 내에서 부하 20%와 40%에서는 trade-off 관계가 나타나지 않지만, 고부하 영역으로 갈수록 NOx의 배출량이 증가함에 따라 smoke의 배출은 현저히 감소되는 trade-off 관계가 명확히 나타남을 알 수 있다.

Fig. 10과 11은 흡기 메니폴드에서의 흡기온도변

화가 NOx와 smoke 배출량에 미치는 영향을 부하 20%, 80%에 대해서 각각 나타낸 것이다. 흡기온도는 Intercooler Fan의 가동을 ON, OFF시켜 변화시켰으며, 온도차는 평균 12~14°C 정도이었고, 이를 cooled Air과 hot Air로 표현하였다.

Fig. 10에서 NOx의 배출량을 비교해보면, 부하 20%에서는 흡기온도변화에 따른 배출량 차이는 크지 않은 반면에 부하 80%에서는 cooled Air를 적용하면 NOx 배출량이 매우 감소됨을 알 수 있다. 이는 cooled Air에서의 흡기온도가 hot Air에서의 흡기온도보다 최대 14°C정도 낮음으로 인해 연소온도가 낮아지기 때문이라 생각된다. 그리고 Fig. 11에서 smoke의 배출량을 비교해 보면, 부하 20%에서는 cooled Air쪽이 약간 적게 배출되고 EGR율이 증가하여도 배출량은 거의 일정하지만, 부하 80%에서는 EGR율 약 10%까지는 cooled Air과 hot Air에 따른 차이가 없으며, 배출량도 일정하게 유지되다가 EGR율이 10%를 초과하면 smoke의 배출량은 모두 증가하며, 배출량은 오히려 hot Air 쪽이 적게 배출됨을 알 수 있다.

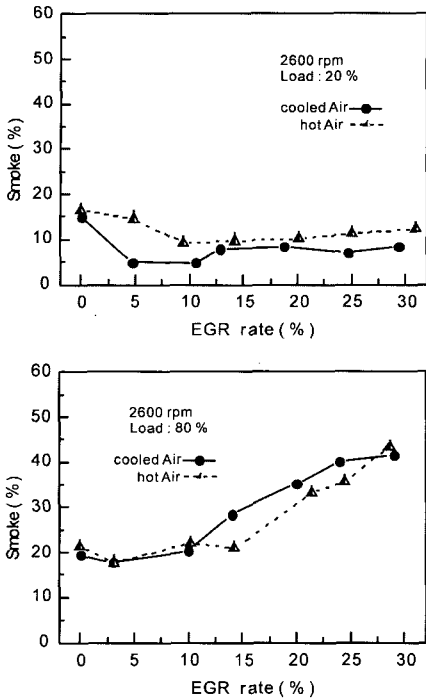


Fig. 11 Comparison of smoke between cooled and hot Air at 1800rpm

#### 4. 결론

3기통 직접분사식 과급 디젤 엔진에서 엔진의 운전 조건과 EGR율이 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) 열발생을 곡선에서 엔진회전수와 관계없이 EGR율을 높이면 착화지연은 길어지고 예혼합연소량은 증가하는 반면에 확산연소량은 감소하였다.
- 3) CO와 smoke의 배출량은 EGR율을 높일수록 증가하며, 동일한 부하에서는 엔진회전수를 높이면 배출량이 현저히 감소하였다.
- 4) NOx의 배출량은 EGR율을 높일수록 감소하며 동일한 부하에서는 엔진회전수를 높이면 배출량이 약 1/2로 감소하였으며, 흡기온도를 낮추면 더

욱 감소하였다.

- 5) 동일 부하에서는 엔진회전수를 높이면 CO와 NOx 및 smoke의 배출량이 현저히 감소하였다.

#### References

- 1) T. V. Johnson, "Diesel Emission Control in Review," SAE 2001-01-0184, 2001.
- 2) D. A. Kouremenos, D. T. Hountalas and K. B. Binder, "The Effect of EGR on the Performance and Pollutant Emissions of Heavy Duty Diesel Engines using Constant and Variable AFR," SAE 2001-01-0198, 2001.
- 3) N. A. Henein and M.-C. Lai, Inderpal Singh, Dahai Wang and Liang Liu, "Emissions Trade-Off and Combustion Characteristics of a High-Speed Direct Injection Diesel Engine," SAE 2001-01-0197, 2001.
- 4) D. A. Kouremenos and D. T. Hountalas, "Using Advanced Injection Timing and EGR to Improve DI Diesel Engine Efficiency at Acceptable NO and Soot Levels," SAE 2001-01-0199, 2001.
- 5) D. T. Montgomery and R. D. Reitz, "Effects of Multiple Injections and Flexible Control of Boost and EGR on Emissions and Fuel Consumption of a Heavy-Duty Diesel Engine," SAE 2001-01-0195, 2001.
- 6) Y. C. Han, Y. S. Oh and S. K. Oh, "An Experimental Study on Performance and Exhaust Gas in a Heavy-Duty Diesel Engine with Cooled-EGR," Transactions of KSAE, Vol.9, No.5, pp.1-8, 2001.
- 7) G. Graf, G. Hrauda and P. Bartsch, "Layout of a High Load EGR System for LD, MD and HD Truck Engines by Means of Simulation," SAE 2000-01-0225, 2000.
- 8) U. Lundqvist, G. Smedler and P. Stalhammar, "A Comparison between Different EGR Systems for HD Diesel Engines and Their Effect on Performance, Fuel Consumption and Emissions," SAE 2000-01-0226, 2000.