

# 직접분사식 디젤기관에서 EGR 적용시의 배기배출특성에 관한 연구 A Study on the Exhaust Emission Characteristics with EGR Application in a DI Diesel Engine

최승훈 · 오영택 · 권규식

S. H. Choi, Y. T. Oh and K. S. Kwon

**Key Words** : Diesel Engine(디젤기관), Exhaust Emission(배기배출물), Exhaust Gas Recirculation (배기가스 재순환), Smoke(매연)

**Abstract** : The Effects of cooled and hot EGR(exhaust gas recirculation) on the characteristics of smoke and NOx emission have been investigated using a single cylinder, water-cooled, four cycle, DI diesel engine at several loads and speeds. In this study, a manually controlled EGR system was installed on a agricultural diesel engine which was operated at various operating system. And, the effects of hot EGR and cooled EGR on smoke and NOx emission were compared. The results showed that cooled EGR method was more effective than hot EGR method on smoke and NOx emission.

## 1. 서 론

자동차 배출가스에 의한 환경오염으로 인해 각종 배출가스에 대한 규제가 강화되고 있으며, 특히 디젤기관에서 배출되는 매연과 NOx의 배출을 최소화 하는 기술개발을 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 디젤기관은 높은 열효율과 고출력을 낼 수 있어 유럽을 중심으로 하여 가솔린 기관이 점유하던 승용차 부문에까지 그 수요가 증가되는 추세에 있다.<sup>1)</sup> 이러한 디젤기관의 최적연소와 관련된 여러 가지의 기술 중 배기가스 재순환(exhaust gas recirculation, 이하 EGR) 기술은 배기가스 중의 NOx를 줄이는 필수적인 요소로 고려되고 있지만, NOx와 trade-off 관계에 있는 매연의 증가와 기관 성능의 저하를 가져오고, 연료소비율의 악화까지 수반되는 것으로 알려져 있다<sup>2,3)</sup>. 즉, EGR 방법은 엔진의 NOx 제어에 가장 효과적이며 중요한 방법으로 배출가스 중의 일부를 배기관으로부터 흡기관으로 재순환시키는 것을 말한다.

재순환된 배기가스는 신기의 희석제로 신기중의 산소량을 감소시켜 연소 최고 온도를 낮추어 NOx

의 생성을 억제하고, EGR 양의 증가는 연소실내의 잔류가스와 함께 연소가스비를 증가시켜 NOx 생성을 낮게하여 NOx의 배출량을 감소시킨다. EGR은 촉매장치에서 NOx 환원반응의 부하를 대폭 줄여주는 역할을 하는 것<sup>4)</sup>으로 알려져 있으나, 연소지연의 원인이 되어 매연의 증가와 엔진 성능에 악영향을 미치므로 기관의 운전조건 변화에 따른 적합한 EGR양의 조절이 필수적이라고 할 수 있다. 또한, 매연미립자의 제거장치를 이용하여 흡기로 재순환되는 배출가스 중의 미립자를 제거시키면 기관과 윤활계통에 미치는 EGR의 영향을 최소화 할 수 있을 것으로 생각한다.

디젤기관의 NOx 배출물에 미치는 폭 넓은 연구들이 진행되어 왔으나, EGR이 배기배출물에 미치는 영향에 관한 과정이 아직도 만족스럽게 파악되지 않고 있는 이유는 순간적인 난류유동의 조건하에서 액체연료의 분무연소인 디젤 연소과정이 매우 복잡하기 때문으로 알려져 있다<sup>5)</sup>. 더불어, EGR을 디젤기관에 적용할 경우 EGR율의 증가에 따라 고부하영역에서는 연료소비율도 증가할 뿐만 아니라, 매연 미립자 및 SOx 배출물의 순환에 의한 기관내부의 마모나 침식이 발생할 수도 있고, 윤활유의 열화가 빠르기 때문에 디젤기관에 EGR만을 적용시켜 NOx 배출물을 저감시키기는 간단하지 않을 것으로 생각된다. 또한, EGR 되는 가스를 냉각시키는 cooled EGR과 냉각하지 않은 hot EGR의 배기배출

접수일 : 2004년 10월 13일  
최승훈(책임저자) : 전북대학교 기계공학부  
E-mail : medr@chonbuk.ac.kr Tel : 063-270-2323  
오영택 : 전북대학교 기계공학과, 공업기술연구센터  
권규식 : 전주대학교 생산디자인공학과

물의 특성 비교에 대하여 언급한 연구는 거의 없다. 본 연구에서는 직접분사식 디젤기관에 EGR을 적용시키며 cooled EGR과 hot EGR의 배기배출물 특성과 연료소비율의 관계를 고찰하고자 하였다.

### 2. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 기관은 단기통, 수냉식, 4행정, 직접분사식 디젤기관이며, 기관 부하와 회전속도는 기관 동력계에 의해 임의로 조정할 수 있도록 하였다. 실험에 사용된 기관의 사양은 Table 1에, 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 매연 농도의 측정은 BOSCH 타입의 매연 측정장치(Hesbon; HBN-1500)를 사용하여 기관으로부터 300mm 하류에서 일정량의 배출가스를 흡입한 후, 여과지에 흡착된 것을 측정하였으며, 동일 조건에서 각각 3회 측정하여 평균값을 취하였다. NOx의 측정은 배기 매니폴드로부터 약 400mm 하류에서 배기가스 분석기(Motor branch; Mod. 588)로 일정량의 배기가스를 흡입하도록 하였다. 또한, 기관이 일정량의 연료를 소모하는 시간을 측정하여 연료 소비율(g/PS·h)로 계산하였으며, 정적 분사시기는 실험조건에 관계없이 BTDC 23°C로 고정하였다.

본 연구에서는 EGR율을 계산할 때 전체 흡기량에 대한 EGR된 양, 즉 새로운 흡입공기량의 감소율로서 식(1)<sup>6)</sup>을 이용하였다.

$$EGR율(\%) = \frac{V_0 - V_a}{V_0} \times 100 \quad (1)$$

여기서,  $V_0$ 는 EGR을 수행하지 않았을 경우의 흡입공기량(m<sup>3</sup>/h),  $V_a$ 는 EGR을 수행했을 경우의 새로운 흡입공기량이다. 또한, EGR중에서도 EGR의 온도에 따른 영향을 고찰하기 위하여 cooled EGR과 hot EGR 방법을 적용하여 EGR되는 가스의 온도를 cooled EGR의 경우에는 대기온도와 비슷한 20°C 정도로 유지하였으며, hot EGR의 경우에는 30~400°C로 온도가 유지되었다. 매연 미립자 제거장치를 이용하여 흡기로 재순환되는 배출가스 중의 미립자를 제거한 후 실험하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 2000rpm, 전부하의 경우에 EGR율의 증가에 따라 실린더내로 흡입되는 산소의 농도를 나타낸 것으로, 흡기 산소농도는 EGR율에 증가함에 따라서 직선적으로 감소함을 알 수 있다. 이러한 정상적인 경향은 内田 등<sup>5)</sup>의 연구결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있으며, 따라서 본 연구결과에 의해서도 EGR율이 증가할수록 착화지연이 증가하여 NOx 배출물에 큰 영향을 미칠 것으로 생각한다.

Table 1 Specification of test engine

Item	Specification
Engine model	ND130
Bore × Stroke	95 × 95 (mm)
Displacement	673 (cc)
Compression ratio	18
Combustion chamber	Toroidal

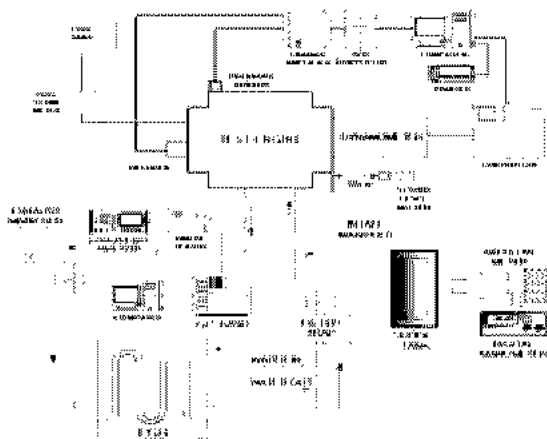


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

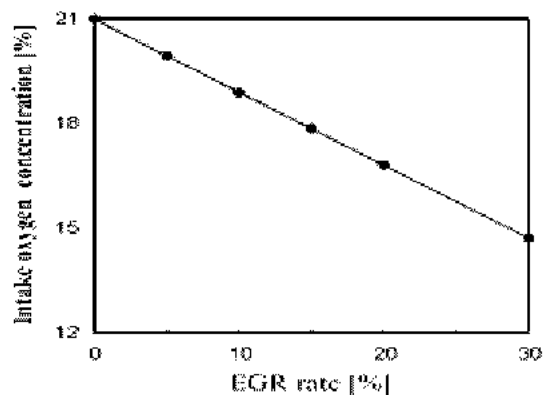


Fig. 2 Intake oxygen concentration vs. EGR rate at 2000rpm, full load

Fig. 3과 4는 전부하시 기관회전속도에 따른 토크의 변화를 저 EGR율(10%이하)과 고 EGR율(10%초과)로 나누어 각각 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 EGR율이 점점 증가함에 따라 토크가 감소됨을 알 수 있으며, 2000rpm의 회전속도에서 hot EGR을 사용한 경우 본 실험의 최대 EGR율인 EGR율 30%를 적용한 경우에는 EGR을 전혀 사용하지 않은 경우보다 최대 7%의 토크 저하

현상이 발생함을 알 수 있다. 이는 EGR율이 증가함에 따라 신기의 유입량이 적어지게 되어 연소과정 이 불완전하게 이루어지기 때문으로 생각된다.

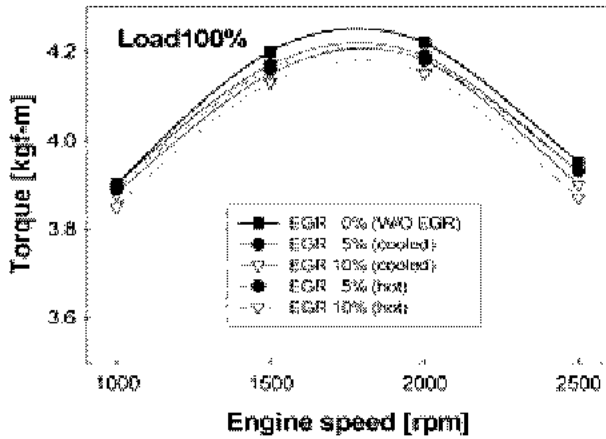


Fig. 3 Torque curve at lower EGR rate

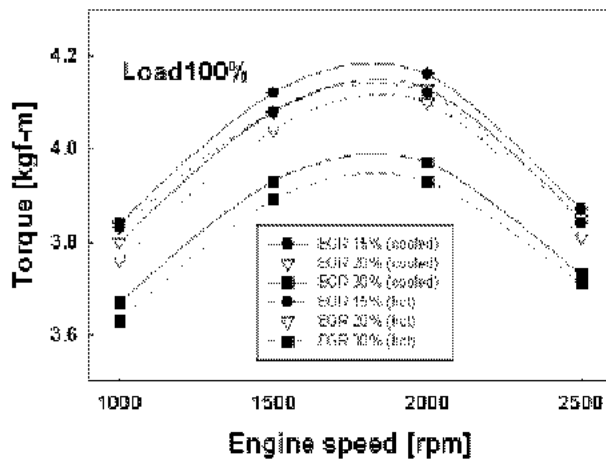


Fig. 4 Torque curve at higher EGR rate

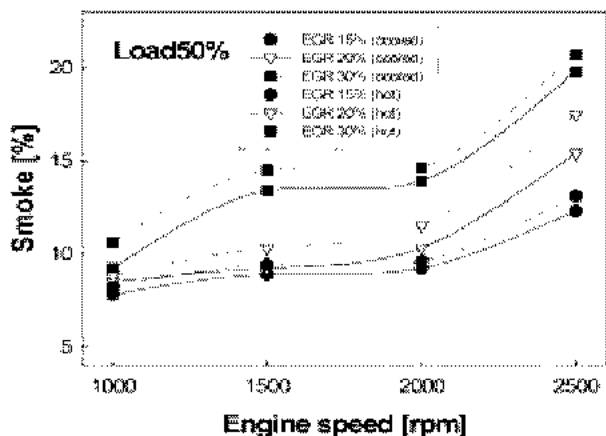


Fig. 5 Comparison of smoke emission at load 50% with various cooled vs. hot EGR rates

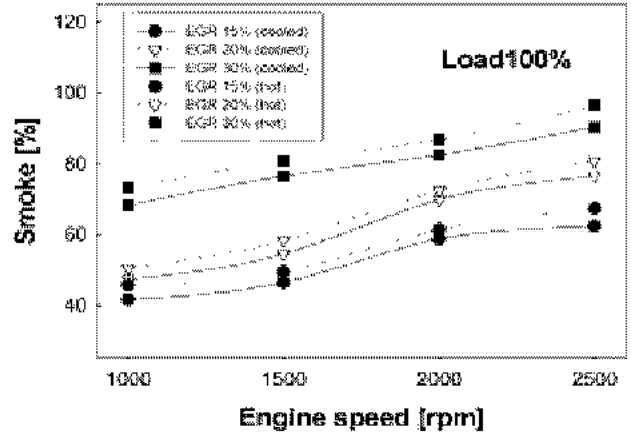


Fig. 6 Comparison of smoke emission at load 100% with various cooled vs. hot EGR rates

Fig. 5와 6은 50%와 100%의 부하에서 고 EGR율을 적용한 경우 기관의 회전속도에 따른 매연의 배출특성을 cooled EGR과 hot EGR율을 각각 적용한 경우를 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이 cooled EGR을 적용한 경우보다는 hot EGR을 적용한 경우의 매연이 증가되어 배출됨을 알 수 있다. 이는 hot EGR의 경우보다는 cooled EGR을 적용한 경우에 흡기 온도의 저감으로 인해 체적효율의 상승효과를 얻을 수 있기 때문으로 생각된다.

연소로부터의 매연 생성은 연소 중간단계의 연소 지속 기간에 주로 생성되며, 연소 마지막 단계에서는 매연이 산화되므로, 배출되는 매연은 배기가스 중의 산화되지 못한 탄화수소으로부터 형성된 잔유물로 생각된다. 특히, 디젤기관의 매연은 열분해 반응으로 생성되는 것<sup>7)</sup>으로 알려져 있지만, 이와 같은 매연 성분은 충분한 산소와 고온에서 산화하여 가스화 되어야 한다. 그러나, 디젤기관에 NOx의 저감 방법으로서 EGR을 적용한 경우에는 그림에서 나타난 바와 같이 매연은 고부하 및 20%이상의 고 EGR율에서는 급격한 증가를 보이고 있다. 즉, 매연 농도는 기관내로 흡입되는 산소농도의 영향에 의하여 동일한 회전속도에서는 부하가 적고 EGR을 이 적을수록 적게 배출되며, 부하가 크고 EGR율이 커질수록 커짐을 알 수 있다. 특히, hot EGR과 cooled EGR에 관계없이 20%이상의 EGR율에서는 급격하게 매연의 배출량이 증가됨을 알 수 있다.

Fig. 7과 8은 전부하상태에서 기관 회전속도에 따라 저 EGR율과 고 EGR율을 적용한 경우 NOx의 배출특성을 나타낸 것이다. hot EGR이나 cooled EGR 모두 EGR율이 증가함에 따라 NOx가 저감되어 배출됨을 알 수 있다. 그리고, hot EGR의 경우

보다 cooled EGR을 적용한 경우에 NOx가 더욱 저감됨을 알 수 있다. 이는 EGR을 적용한 경우에 신기의 흡입이 억제되고, 착화지연이 증가하여 NOx의 생성을 억제한 것으로 생각된다. 또한, cooled EGR을 적용한 경우가 NOx의 배출이 억제되는 이유는 hot EGR을 적용한 경우에는 연소실내의 연소 초기온도의 상승을 유발하여 cooled EGR의 경우보다 연소온도가 증가되었기 때문으로 생각된다.

Fig. 9는 연료소비율의 차이가 많이 발생할 것으로 예상된 고 EGR율을 적용한 경우 전부하상태에서의 연료소비율을 비교한 것이다. 전체적인 연료소비율의 변화를 살펴보면, EGR 가스의 온도에 관계없이 EGR율의 증가에 따른 연료소비율의 증가 및 감소경향은 불규칙적이며, 그 변동폭도 매우 작아 그 증가량은 20%의 고 EGR을 적용한 경우에서도 4%미만으로 나타났다. 이는 Mayer 등8)의 연구결과에서와 같이 EGR율이 연료소비율에 미치는 영향은 별로 크지 않다고 보고한 부분과 유사함을 알 수 있다.

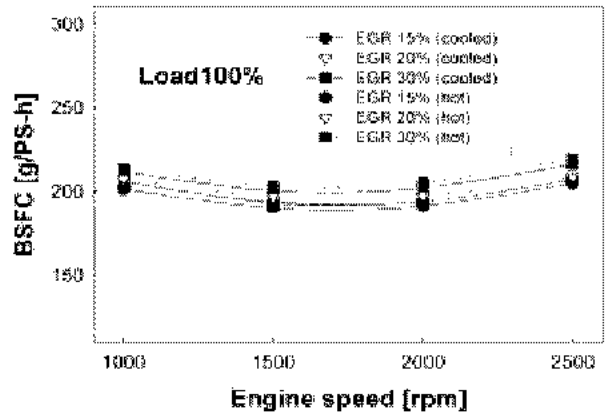


Fig. 9 Comparison of BSFC at load 100% with higher EGR rates

Fig. 10은 매연과 NOx의 상반관계를 고찰하여 보고, hot EGR과 cooled EGR의 배기배출물 특성을 알아보기 위하여 2500rpm의 기관회전속도에서 고부하영역인 90%의 부하에서 EGR율에 따른 매연과 NOx의 배출특성을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이, 매연과 NOx는 전형적인 상반관계임을 알 수 있다. 또한, Fig. 6과 8에서 언급한 바와 같이 cooled EGR을 적용한 경우가 hot EGR을 적용한 경우에 비하여 EGR율에 증가에 따른 매연의 증가량은 적으며, NOx의 저감량은 더욱 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 Fig. 10의 관계를 명확하게 알아보기 위하여 2000rpm의 기관회전속도에서 EGR율에 따른 매연과 NOx의 상반관계를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 EGR율이 증가함에 따라 매연은 증가되고 NOx는 감소됨을 알 수 있다. 즉, 매연과 NOx의 상반관계는 EGR율이 증가함에 따라서 더욱 뚜렷해짐을 알 수 있다. 또한, cooled EGR, 즉 재순환되는 배기가스의 온도를 낮추어 연소실에 공급하는 것이 hot EGR을 적용한 경우보다 더욱 효과적임을 알 수 있다.

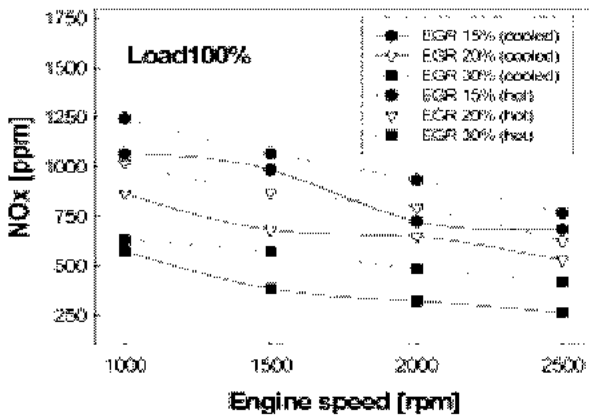


Fig. 7 Comparison of NOx emission at load 100% with lower EGR rates

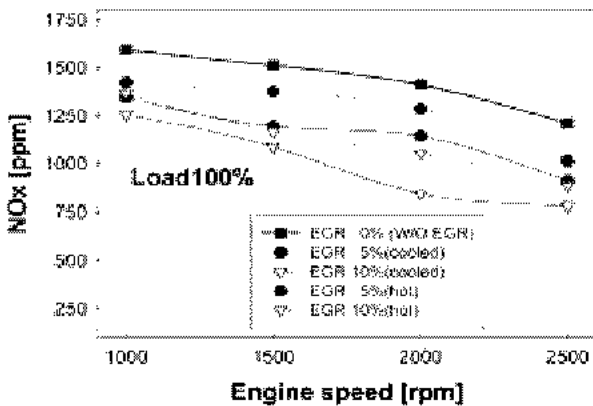


Fig. 8 Comparison of NOx emission at load 100% with higher EGR rates

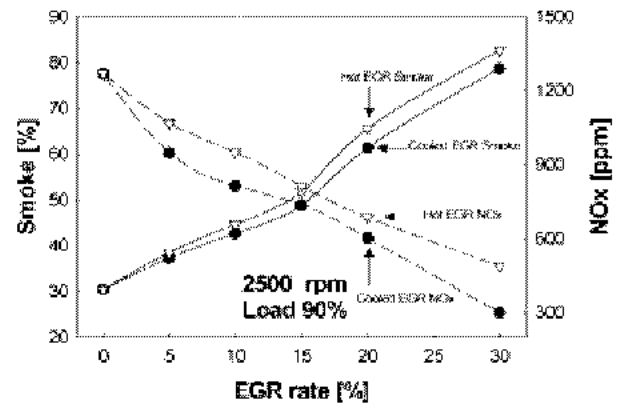


Fig. 10 The relationship of smoke vs. NOx at 2500rpm, load 90% with various EGR rates

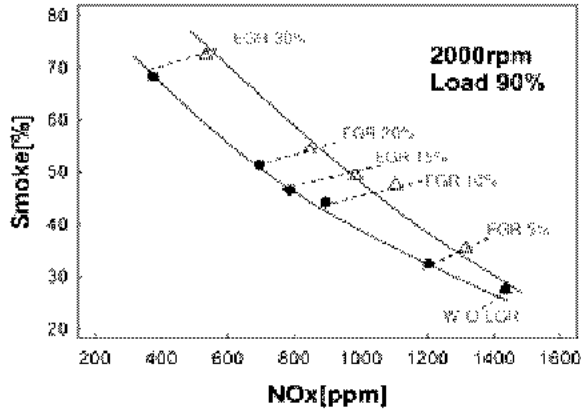


Fig. 11 The relationship of smoke vs. NOx at 2000rpm, load 90% with various EGR rates

#### 4. 결 론

수냉식, 단기통, 4행정, 직접분사식 디젤기관의 연료로서 경유를 사용한 경우, hot EGR과 cooled EGR을 적용하여, 이들 EGR율이 기관 성능과 배기 배출물에 미치는 영향을 고찰한 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

- (1) 디젤기관에 EGR을 적용한 경우 EGR율의 변화에 따라 매연과 NOx는 전형적인 상반관계가 성립됨을 확인하였다.
- (2) 매연과 NOx의 상반관계는 EGR율이 증가함에 따라서 더욱 뚜렷해짐을 알 수 있다.
- (3) 디젤기관에 같은 EGR율을 적용한 경우, hot EGR의 경우보다는 cooled EGR을 적용한 경우 매연은 적게 배출되고, NOx는 더욱 저감되어 cooled EGR 방법이 더욱 효과가 크다는 것을 알 수 있다.

#### 참고 문헌

1. 오영택, 최승훈, "디젤기관에서 합산소연료(DMC)와 Cooled EGR 방법에 의한 매연과 NOx의 동시저감" 한국동력기계공학회지, Vol.6, No.1, pp. 27~35, 2002.
2. Y. M. Kim, Y. D. Kwon, H. J. Kim, and S. W. Kim, "Numerical Study on Ignition and Combustion Process of a Diesel Spray in EGR Environment", SAE paper 960874, 1996.
3. Uchida, N., Daisho, Y., Saito, T., and Sugano, H., "Combined Effects of EGR and Supercharging on Diesel Combustion and Emissions", SAE paper 930601, 1993.
4. 김동성, 박현성, 성낙원, "배기가스 재순환 장치의 성능 평가기술", 한국자동차공학회지, Vol. 12, No.6, pp. 22~29, 1990.
5. 内田登, 菅野水昭, 大聖泰弘, "ディーゼル機関におけるEGRと過結の組み合わせによる排気特性の改善", 第10回内燃機関合同シンポジウム講演會, pp. 229~234, 1992.
6. S. L. Plee, T. Ahmad, and J. P. Myers, "Flame Temperature Correlation for the Effects of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Particulate and NOx Emissions," SAE paper 811195, 1981.
7. 오영택, "디젤기관의 미립자와 NOx 동시저감에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, Vol.22, No.9, pp.1238~1246, 1998.
8. Mayer, A. and Pauli, E., "Emissions Concept for Vehicle Diesel Engine Supercharged with COMPREEX", SAE 880008, 1988.