

# DI 디젤기관에서 함산소연료(EGBE)와 EGR의 유용성에 관한 실험적 연구

최승훈<sup>†</sup> · 황윤택<sup>\*</sup> · 김우상<sup>\*</sup> · 오영택<sup>\*\*</sup>

## An Experimental Study on Usability of Oxygenated Fuel(EGBE) and EGR in a DI Diesel Engine

Seunghun Choi, Yuntaig Hwang, Woosang Kim and Youngtaig Oh

**Key Words:** Oxygenated fuel(함산소연료), Smoke(매연), Exhaust gas recirculation(배기가스 재순환), Exhaust emission(배기배출물)

### Abstract

In this paper, the effect of oxygen component in fuel on the exhaust emissions has been investigated for a direct injection diesel engine. It was tested to estimate change of engine performance and exhaust emission characteristics for the commercial diesel fuel and oxygenated blended fuel which has seven kinds of mixed ratio. And, the effects of exhaust gas recirculation(EGR) on the characteristics of NO<sub>x</sub> emission have been investigated. Ethylene glycol mono-n-butyl ether(EGBE) contains oxygen component 27% in itself, and it is a kind of effective oxygenated fuel of mono-ether group that the smoke emission of EGBE blended fuel is reduced remarkably compared with commercial diesel fuel, that is, it can supply oxygen component sufficiently at higher loads and speeds in a diesel engine. It was found that simultaneous reduction of smoke and NO<sub>x</sub> was achieved with oxygenated fuel and cooled EGR method.

### 1. 서 론

디젤기관은 공기 과잉 상태로 운전되기 때문에 비열이 증대되어 열해리가 적고 열효율이 높으며, 또한 고압축비를 기관에 적용할 수 있는 열기관<sup>1)</sup>이다.

그러나, 동일한 행적체적에서 연소되는 연료량이 적기 때문에 출력이 낮은 결점을 가지고 있으며, 고출력을 얻기 위하여 완전연소가 가능한 연료 이상을 공급하면 기관의 출력은 증대되지만

확산연소 영역에서의 국부적인 산소 부족으로 불완전연소된 연료가 거의 대부분 매연으로 배출된다. 그러므로, 디젤기관의 최대 출력 한계는 배기배출물의 매연 농도에 따라 제한<sup>2)</sup>될 수 밖에 없다. 이러한 디젤기관의 배기배출물의 저감을 위한 방법으로는 엔진설계변경기술과 연료의 성상 등에 변화를 주어 연료가 연소실내에서 연소하여 배출되기 전에 배출가스를 저감시키기 위한 전처리 방법과 연료가 연소한 후에 연소실 밖에서 촉매장치나 입자상물질 트랩(diesel particulate trap), 배출가스 재순환(exhaust gas recirculation, 이하 EGR) 방법 등을 사용하여 배출가스를 처리하는 후처리 방법으로 나눌 수가 있다. 이 중 후처리 방법은 배출가스의 생성을 근본적으로 억제할 수 있는 방법이 되지 못하기 때문에 많은 연구자들은 연료가 연소 후 배기관으로 배출되기 전에 배출가스를 저감시키는 전처리 방법에 접근하여 문

<sup>†</sup> 전북대학교 대학원 기계공학과

E-mail : medoctor@hanmail.net

TEL : (063)270-2323 FAX : (063)270-2315

<sup>\*</sup> 전북대학교 대학원 기계공학과

<sup>\*\*</sup> 전북대학교 기계공학과

제를 해결하고자 하였으며, 여러 가지 전처리 방법 중에서, 가격의 저렴함과 효과적인 결과를 얻는데 시간을 절약할 수 있다는 이점 때문에 엔진 자체로의 접근 방법보다는 연료자체의 성상변화, 즉, 합산소연료를 상용경유와 혼합하거나, 세탄가 개선제의 첨가 등과 같은 방법이 제시되고 있다. 전처리 방법으로서 합산소연료를 이용한 연구들을 살펴보면, Akimoto 등<sup>3)</sup>의 연구에서는 합산소연료의 일종인 di-ethylene glycol dimethyl ether와 산화촉매를 병용하여 매연을 저감했다고 보고하고 있으며, Bertoli 등<sup>4)</sup>은 디에테르 계열의 합산소연료를 사용하여 배기 배출물의 특성을 조사하였다.

본 연구에서는 합산소성분 첨가방법의 일환으로서 모노에테르 계열의 합산소연료인 ethylene glycol mono-n-butyl ether(이하 EGBE)를 디젤기관의 상용연료인 경유와 최대 40vol-%까지 혼합하여 사용할 경우, 기관의 각 회전속도와 부하에서 배기배출물의 특성변화의 조사와 동시에 합산소연료를 사용할 경우 증가하는 NO<sub>x</sub>의 저감방법으로 cooled EGR을 병행하여 매연과 NO<sub>x</sub>의 동시저감을 이루고자 연구하였다.

## 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, 사용된 연료의 특성은 Table 2에 각각 나타내었으며, 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 실험은 상용 경유와 모노에테르계 합산소연료인 EGBE를 5~40vol-% 혼합한 연료를 사용하여 기관의 각 회전속도에서 무부하, 25%, 50%, 75%, 90% 및 전부하의 경우에 기관성능과 배기배출물을 측정하였다.

매연 농도의 측정은 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. NO<sub>x</sub>의 측정은 배기 매니폴드로부터 약 400mm 하류에서 배기가스 분석기(Motor branch; Mod. 588)로 일정량의 배기가스를 흡입하도록 하였다. 또한, 기관이 일

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

Table 2 Properties of test fuels

	Diesel fuel	EGBE
Molecular formula	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>
Stoichiometric air fuel ratio	1 : 14.9	1 : 9.82
Molecular weight	226	118.175
Heating value [MJ/kg]	43.12	32.4
Oxygen content(%)	0	27.1

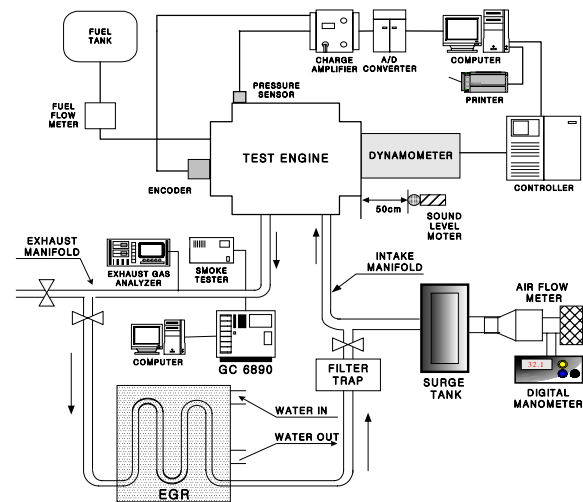


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

정량의 연료를 소모하는 시간을 측정하여 단위시간당의 에너지소비율(MJ/kW·h)로 계산하였으며, 분사시기는 실험조건에 관계없이 BTDC 23°C로 고정하였다.

본 연구에서는 EGR율을 계산할 때 전체 흡기량에 대한 EGR된 양, 즉 새로운 흡입공기량의 감소율로서 식(1)<sup>5)</sup>을 이용하였다.

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

여기서, V<sub>0</sub>는 EGR을 수행하지 않았을 경우

의 흡입공기량( $m^3/h$ ),  $V_a$ 는 EGR을 수행했을 경우의 새로운 흡입공기량이다. 또한, EGR중에서도 EGR의 효과가 더 뛰어난 cooled EGR<sup>6)</sup>을 적용하여 EGR되는 가스의 온도를 대기온도와 비슷한 20°C 정도로 유지하였으며, 매연 미립자 제거장치를 이용하여 흡기로 재순환되는 배출가스 중의 미립자를 제거한 후 실험하였다. 디젤기관의 NOx 배출물에 미치는 EGR의 영향에 관한 연구들은 매연 미립자의 제거장치를 이용하여 흡기로 재순환되는 배출가스 중의 미립자를 제거시키고, cooled EGR을 사용하여 EGR의 온도를 저감시킬 수만 있다면 효과적으로 NOx 배출물을 줄일 수 있을 것으로 생각되고 있다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 각 회전속도에서 부하변화에 의한 매연배출특성을 EGBE의 각 혼합율 변화에 따라 나타낸 것이다. 디젤기관의 공기이용율이 충분한 저회전 영역에서는 높은 충전효율 때문에 함산소연료를 혼합한 경우에도 매연배출량의 저감은 작

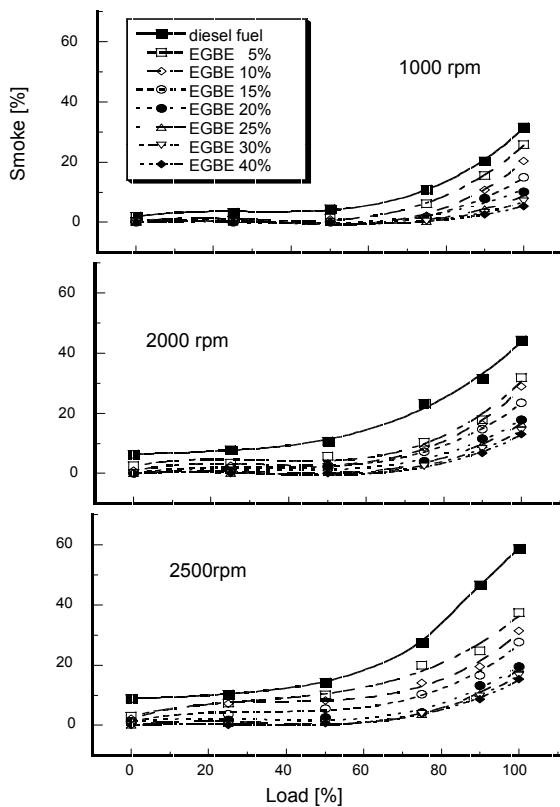


Fig. 2 Comparison of smoke density for difference of oxygenated fuel content under varying load

지만, 기관의 회전수가 증가함에 따라 충전효율이 저감되는 고속영역에서는 매연배출량에 상당한 차이를 보이고 있으며, 혼합량이 증가할수록 매연의 저감은 증가되지만, 20%이상의 혼합율에서는 그 저감폭이 줄어드는 것을 알 수 있다. 함산소연료를 사용한 경우에는 연료내에 산소성분이 일정부분 점유하는 부분이 있어, 연료자체내에 탄화수소 성분이 경유를 사용한 경우보다 적게 된다. 다시 말하면, 매연의 생성자체를 연소과정 전반에 걸쳐서 억제할 수 있는 것이다. 또한, 확산연소기간에 있어서는 산소성분의 기여로 인해 빠른 연소, 즉 급격한 탄화수소의 산화를 유도하여 매연생성을 더욱 억제할 수 있는 것으로 생각된다.

Fig. 3은 기관의 부하변화에 따른 NOx의 배출특성을 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이, 경유보다 함산소연료인 EGBE를 첨가한 경우 전체적으로 NOx의 배출량이 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 함산소연료내에 포함된 산소성분에 의해 연소가 활발해져 후연소기간에 화염온도를 상승시켜 NOx의 배출량을 증가시킨 것으로 생각된다.

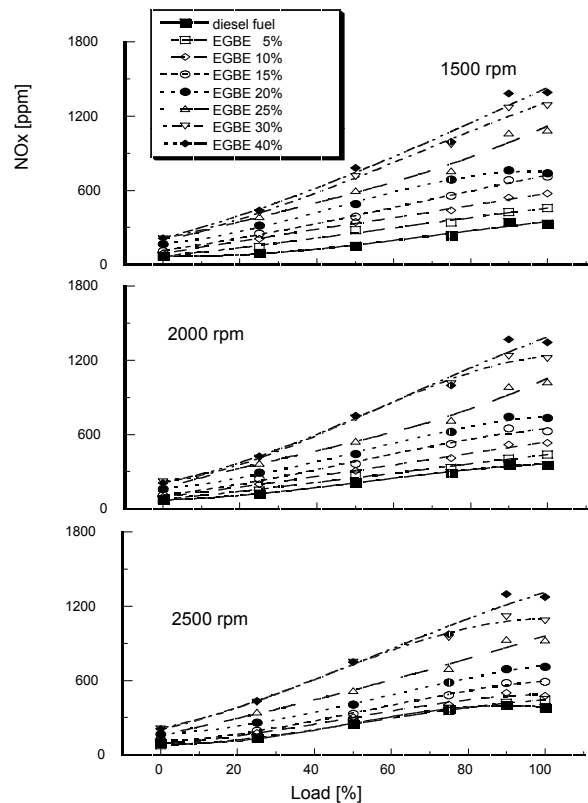


Fig. 3 Comparison of NOx concentration for difference of oxygenated fuel content under varying load

또한, 합산소연료인 EGBE의 연료내 함유량이 25vol-%이상이면 급격하게 NOx가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것을 매연배출량과 비교해 볼 때, 25vol-%이상의 합산소연료가 포함된 경우에는 매연의 저감폭이 줄어들며, NOx의 증가폭은 늘어나는 것으로 보아 경유에 EGBE를 혼합하여 사용할 경우에 최적의 혼합율은 20vol-% 정도로 생각된다.

Fig. 4는 각 회전수에서 에너지소비율을 비교한 것이다. 경유에 비하여 합산소연료인 EGBE는 발열량이 약 25%가 낮으면서도, 합산소연료에 포함된 산소성분에 의한 완전 연소에 의하여 연비 성향이 거의 비슷하게 나타나고 있다. 또한, 본 실험에서 최대의 혼합율인 EGBE 40vol-%의 경우에 발열량의 차이는 약 10%에 이르지만, 연소효율의 극대화로 인하여 에너지 소비율의 차이는 약 2.1%에 불과하였다.

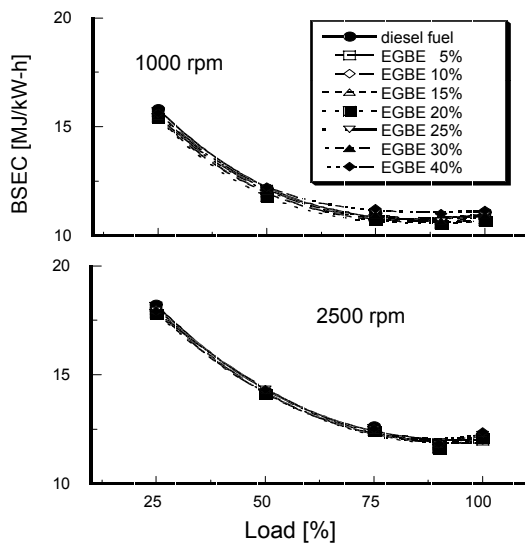


Fig. 4 Comparison of BSEC for difference of oxygenated fuel content under varying load

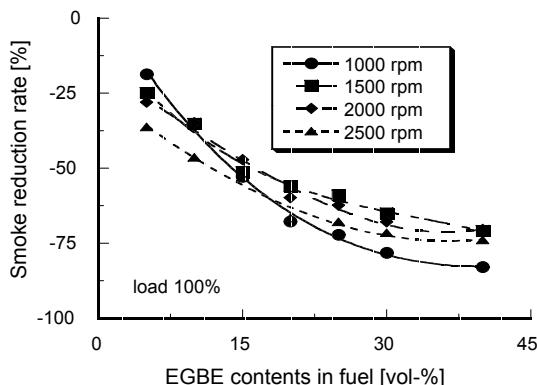


Fig. 5 smoke reduction vs. engine speed at full load

Fig. 5는 전부하에서 합산소연료의 함유량에 따른 매연저감율을 나타낸 것이다. 합산소연료 함유량이 증가할수록 매연의 저감폭이 증가하며, 25vol-%이상의 합산소연료를 경유와 혼합하여 사용한 경우에는 20vol-%이하의 함유량의 경우보다 매연의 저감폭이 줄어들음을 확인할 수 있었다. 또한, Fig. 4에 나타난 바와 같이 EGBE를 첨가함으로써 배출가스 중의 매연 저감은 현저하였으나, 기관부하와 합산소연료의 혼합량이 증가함에 따라서 NOx의 배출농도도 함께 증가하는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 디젤기관에서 NOx 저감방법의 일환으로 알려진 cooled EGR방법을 병행하여 사용하였다.

Fig. 6은 EGBE 최적 혼합율인 20vol-%를 혼합하여 사용한 경우, 기관의 저회전속도인 1000rpm에서 각 기관부하와 EGR율에 따라 배기 배출물의 배출특성을 나타낸 것이다. 합산소연료를 사용한 경우에도 EGR율이 증가함에 따라서 매연의 증가폭이 커지는 것을 알 수 있다. 특히, 20%의 EGR율이 기관에 적용된 경우에는 고부하 영역에서 경유를 사용한 경우보다도 매연 배출이 증가되었다. 이는 재순환되는 배출가스가 연소실내로 흡입되는 신기 중의 산소량을 감소시켜 연소에 충분한 산소의 공급이 어렵기 때문으로 생각한다. NOx는 EGR율의 증가에 따라 현저하게 저감되고, 15%이상의 EGR을 적용한 경우에는 경유만을 사용한 경우보다도 저감됨을 알 수 있다.

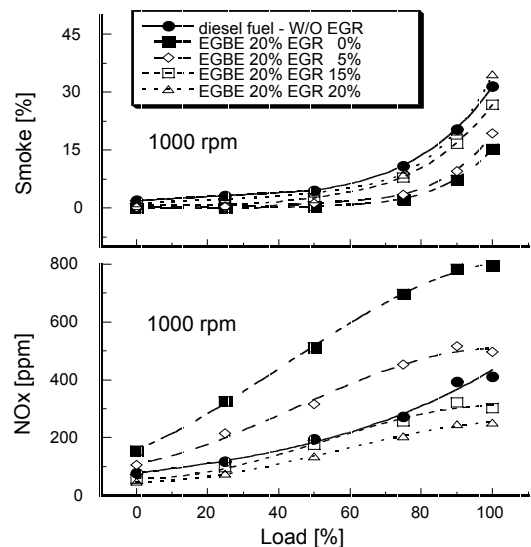


Fig. 6 Exhaust emissions and BSEC vs. EGR rates on diesel fuel and oxygenate blended fuels by varying engine loads at 1000rpm

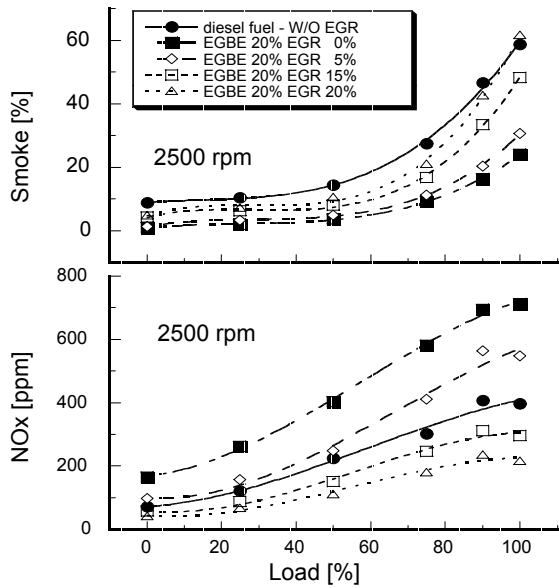


Fig. 7 Exhaust emissions vs. EGR rates on diesel fuel and oxygenate blended fuels by varying engine loads at 2500rpm

Fig. 7은 기관속도가 고속회전인 2500rpm에서 각 기관부하와 EGR율에 따라 배기 배출물의 배출특성을 나타낸 것이다. Fig. 6과 마찬가지로 EGR율이 증가함에 따라서 함산소연료를 사용한 경우에도 매연이 증가되는 것을 알 수 있으며 특히, 20%이상의 EGR율이 기관에 적용된 경우에는 90%이상의 고부하 영역에서 경유를 사용한 경우보다도 매연의 증가가 나타남을 알 수 있다. NOx는 EGR율의 증가에 따라 현저하게 저감되고 있으며, 고부하 영역에서 더욱 저감폭이 현저해지는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 6과 7에서 나타난 EGR의 효과를 정량적으로 나타낸 경우이며, EGBE 20vol-%를 혼합하여 사용한 경우에 90%의 부하에서 각 회전속도 변화에 따른 매연과 NOx의 배출특성을 경유만을 사용한 경우와 비교하여 나타낸 것이다. 2500rpm의 경우에 매연 배출량은 저회전속도에 비하여 많았지만, 변화율은 다소 저하되는 것으로 나타났다. NOx 변화율은 15%이상의 EGR을 적용한 경우에 경유만을 사용한 경우보다 최소 19%이상 저감되는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 2000rpm, 90%의 부하상태에서 EGBE 20vol-%를 혼합하여 사용한 경우와 경유만을 사용한 경우의 EGR율 변화에 따른 NOx와 매연과의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 EGR

율이 증가함에 따라 양 연료 모두 NOx는 저감되지만 EGBE 20vol-%의 경우 더욱 현저하게 저감됨을 알 수 있다. EGR율은 고부하의 경우 약 30%까지 가능하였으며, 배기가스 재순환에 따라서 NOx를 60%정도까지 저감할 수 있었다. 고부하영역의 경우 완전연소를 위하여 산소의 유효이용이 매우 중요하며 EGR율이 증가할수록 산소농도는 감소하므로 확산연소는 전반적으로 악화되어 EGR 20%이상에서는 경유의 경우보다 매연이 증가함을 알 수 있다. 그리고, EGBE 20vol-%를 혼합하여 사용하고 EGR을 적용한 경우는 배출특성이 상반된 NOx와 매연을 동시에 상당히 저감시킬 수 있었다.

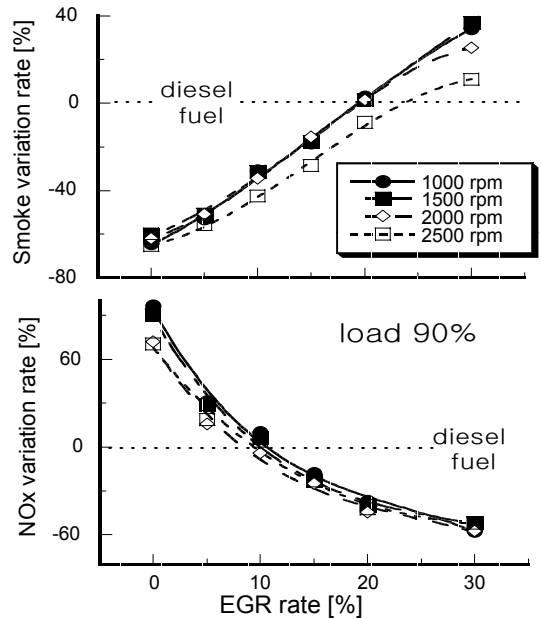


Fig. 8 Variation rate of smoke and NOx on EGR rate under varying speed at load 90%

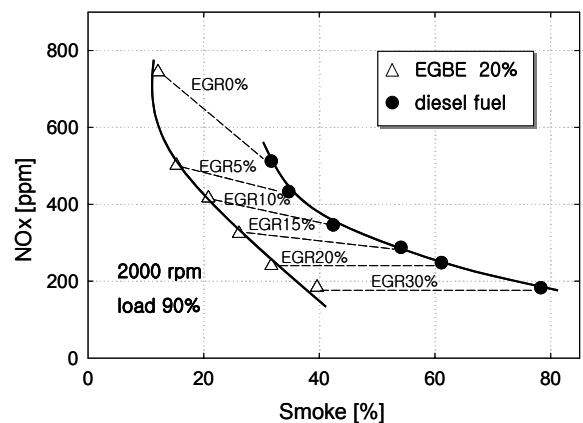


Fig. 9 The effect of combination of EGBE and EGR on smoke and NOx emission

즉, 합산소연료를 사용하므로써 얻을 수 있는 대폭적인 매연감소량을 EGR을 병행하므로써 매연감소폭이 약간 둔화된 반면 NO<sub>x</sub>량을 대폭 감소시킬 수 있어, 이 두 가지 배출가스를 동시에 저감시킬 수 있음을 확인하였다.

Fig. 10은 2500rpm의 전부하 상태에서 경유를 연료로 사용하고 EGR을 적용하지 않은 경우와, EGBE 20vol-%를 혼합한 연료와 EGR을 조합하여 적용한 경우의 매연과 NO<sub>x</sub>의 배출특성을 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이 EGR율이 증가할수록 매연은 증가하며 NO<sub>x</sub>는 저감되고 있으나, EGR율이 20%를 초과하는 경우에는 경유만을 사용한 경우보다 매연이 오히려 증가됨을 알 수 있다. 그러나, 5%의 EGR율만을 적용한 경우에도 EGR을 적용하지 않은 경우에 비하여 약 60%의 NO<sub>x</sub> 저감폭을 보여 cooled EGR이 NO<sub>x</sub>배출에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 즉, 경유를 사용한 경우보다 EGBE를 첨가하여 사용할 경우에 매연과 NO<sub>x</sub>를 동시에 저감시키기 위해서는 기관의 연료로 EGBE 20vol-%를, 최적의 EGR율은 15%정도임을 알 수 있었다.

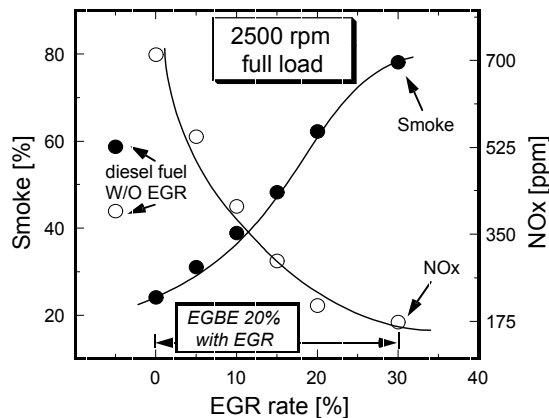


Fig. 10 Characteristics of smoke vs. NO<sub>x</sub> emission with diesel fuel and EGBE 20vol-% on EGR rates at full load

#### 4. 결론

수냉식, 4행정, 직접분사식 디젤기관의 연료로서 경유와 EGBE를 0~40vol-%까지 혼합하여 사용한 경우 기관성능 및 배기 배출물에 미치는 영향을 분석하고, 합산소연료 사용시 증가되는 NO<sub>x</sub>의 저감을 위하여 배기가스 재순환 방법을 조합한 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

1) 모노에테르 계열의 합산소연료인 EGBE를 디젤기관에 적용하여 전부하시에 고회전속도 영역에서 경유만을 연료로 사용한 경우와 비교하여 최대 74% 정도의 현저한 매연저감이 이루어짐을 확인하였다.

2) 합산소연료인 EGBE를 20vol-% 경유에 혼합하고 15%의 배기가스 재순환을 동시에 기관에 적용할 경우 매연과 NO<sub>x</sub>의 동시저감이 가능하였다.

#### 후기

본 연구는 전북대학교 자동차신기술연구소의 지원으로 이루어졌으며, 관계 제위께 깊이 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) S. Naoki, H. Hirokazu, N. Toshio, and Y. katsuhiko, 1996, "A Study of Diesel Combustion Process Under the Condition of EGR and High-Pressure Fuel Injection with Gas Sampling Method," SAE 960030.
- (2) Y. Koji, S. Hideo, and T. Hidenori, 1998, "Study on Combustion and Exhaust Gas Emission Characteristics of Lean Gasoline - Air mixture Ignited by Diesel Fuel Injection," SAE 982482.
- (3) T. Akimoto, M. Tamanouchi, S. Aihara, and H. Morihisa, 1999, "Effects of DGM and Oxidation Catalyst on Diesel Exhaust Emissions," SAE 1999-0-1137.
- (4) C. Bertoli, N. D. Giacomo, and C. Beatrice, 1997, "Diesel Combustion Improvements by the Use of Oxygenated Synthetic Fuels," SAE 972972.
- (5) S. L. Plee, T. Ahmad, and J. P. Myers, 1981, "Flame Temperature Correlation for the Effects of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Particulate and NO<sub>x</sub> Emissions," SAE 811195.
- (6) Y. H. Ham, K. M. Chun, 2002, "Engine Cycle Simulation for the Effects of EGR on Combustion and Emissions in a DI Diesel Engine," Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol.10, No.4, pp.51-59.