Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol.11, No.1, 2003

함산소연료(EGBE)와 Cooled EGR이 디젤기관의 성능과 배기배출물에 미치는 영향

최 승 훈[1] · 오 영 택[*2]

전북대학교 대학원 기계공학과[1] · 전북대학교 기계공학과[*2]

The Effect of Cooled EGR and Oxygenate Fuel(EGBE) on the Diesel Engine Performance and Emissions

Seunghun Choi[1] · Youngtaig Oh[*2]

[1]*Graduate School of Mechanical Engineering, Chonbuk National University, Jeollabuk-do 561-756, Korea*

[*2]*Department of Mechanical Engineering, Chonbuk National University, The Research Institute of Industrial Technology, Jeollabuk-do 561-756, Korea*

(Received 5 August 2002 / Accepted 19 November 2002)

Abstract : In this paper, the effect of oxygen component in fuel on the exhaust emissions has been investigated for 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 NOx 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 and unburned hydrocarbons of EGBE is reduced remarkably compared with commercial diesel fuel, that is, it can supply oxygen component sufficiently at higher loads and speeds in diesel engine. It was found that simultaneous reduction of smoke and NOx was achieved with oxygenated fuel and cooled EGR method.

Key words : Diesel engine(디젤 기관), Oxygenated fuel(함산소연료), Exhaust gas recirculation(배기가스 재순환), Ethylene glycol mono-n-butyl ether(EGBE)

1. 서 론

디젤기관은 공기 과잉상태로 운전되기 때문에 비열이 증대되어 열해리가 적고 열효율이 높으며, 또한 고압축비를 기관에 적용할 수 있어 가장 열효율 율이 높은 열기관[1]이다. 그러나, 동일한 행적체적에서 연소되는 연료량이 적기 때문에 출력이 낮은결점을 가지고 있으며, 고출력을 얻기 위하여 완전연소가 가능한 연료 이상을 공급하면 기관의 출력은 증대되지만 확산연소 영역에서의 국부적인 산소 부족으로 불완전연소되는 연료가 거의 대부분 매연으로 배출된다. 그러므로, 디젤기관의 최대출력의 한계는 배기배출물의 매연 농도에 따라 제한[2,3]될 수 밖에 없다. 이러한 디젤엔진의 배기배출물의 저감을 위한 방법으로는 엔진설계변경기술과 연료의 성상 등에 변화를 주어 연료가 연소실내에서 연소하여 배출되기 전에 배출가스를 저감시키기 위한 전처리 방법과 연료가 연소한 후에 연소

*To whom correspondence should be addressed.
ohyt@moak.chonbuk.ac.kr

실 밖에서 배출가스를 처리하는 후처리 방법으로 나눌 수가 있다. 이 중 후처리 방법은 배출가스의 생성을 근본적으로 억제할 수 있는 방법이 되지 못하기 때문에 많은 연구자들은 연료가 연소실내에서 연소하기 전이나, 연소 후 배기관으로 배출되기 전에 배출가스를 저감시키는 전처리 방법에 접근하여 문제를 해결하고자 하였으며, 여러 가지 전처리 방법 중에서연료자체의 성상변화, 즉, 함산소연료를 상용경유와 혼합하거나, 세탄가 개선제의 첨가 등과 같은 방법이 제시되고 있다.

이러한 전처리 방법으로서 함산소연료를 이용하여 디젤기관의 배기 배출물 저감 방법으로 사용한 이전의 연구들을 살펴보면, Akimoto 등[4]의 연구에서는 함산소연료의 일종인 di-ethylene glycol dimethyl ether와 산화촉매를 병용하여 매연을 저감했다는 보고를 하고 있으며, Bertoli 등[5]은 디에테르계열의 함산소연료를 사용하여 배기 배출물의 특성을 조사하였고, 오 등[6]은 함산소연료에 포함된 산소성분이 고부하영역에서 디젤기관의 공기이용율을 향상시켜 준 결과 매연이 현저하게 저감되었음을 보고하고 있다.

또한, 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 생각된다.

본 연구에서는 함산소성분 첨가방법의 일환으로서 모노에테르 계열의 함산소연료인 ethylene glycol mono-n-butyl ether(이하 EGBE)를 디젤기관의 상용연료인 경유와 최대 40vol-%까지 혼합하여 사용할 경우 기관의 각 회전속도와 부하에서 배기배출물의 특성을 조사함과 동시에 함산소성분이 매연생성에 미치는 영향을 분석하고자 가스 크로마토그래피(gas chromatography)를 이용하여 배출가스 성분에 함유되어 있는 C_1~C_6까지의 미연탄화수소의 정량적인 분석도 동시에 수행하였고, 함산소연료를 사용할 경우 증가하는 NOx의 유용한 저감방법으로 cooled EGR을 병행하여 매연과 NOx의 동시저감을 이루고자 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, 사용된 연료의 특성은 Table 2에 각각 나타내었으며, 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다.

실험은 상용 경유와 모노에테르계 함산소연료인 EGBE를 5~40vol-% 혼합한 연료를 사용하여 기관의 각 회전속도에서 무부하, 25%, 50%, 75%, 90% 및 전부하의 경우에 기관성능과 배기배출물을 측정하

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	$C_{16}H_{34}$	$C_6H_{14}O_2$
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

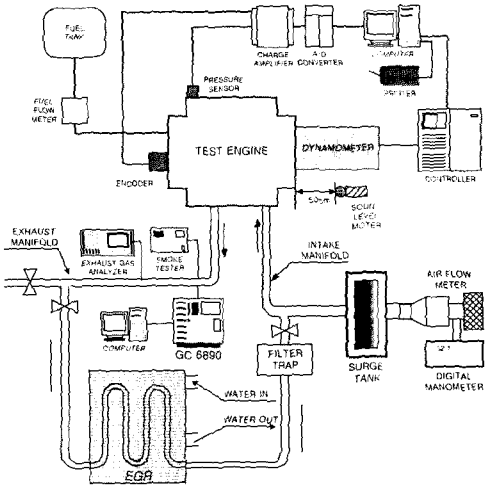

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

였다. 기관의 부하변화는 기관 회전속도를 일정하게 유지한 상태에서 인젝션 펌프의 랙을 완전히 당긴 상태를 전부하로 설정하고, 전부하의 토크값을 측정하여 이 토크값을 일정 비율(%)별로 변화시키면서 실험하였다. 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.

NOx의 측정은 배기 매니폴드로부터 약 400mm 하류에서 배기가스 분석기(Motor branch; Mod. 588)로 일정량의 배기가스를 흡입하여 샘플링 농도의 오차를 줄였으며, 기관이 일정량의 연료를 소모하는 시간을 측정하여 에너지소비율(MJ/kW·h)로 계산하였으며, 분사시기는 BTDC 23℃A로 고정하였다.

가스 크로마토그래피를 이용한 탄화수소류의 분석 실험은 매연 저감 측면에서 상당한 효과가 있으면서, 질소산화물은 타 혼합율에 비하여 경유와 유사하게 배출한 EGBE 20vol-%를 경유에 혼합한 경우를 최적의 혼합율로 설정하여 분석 · 비교하였다. 배기가스 성분측정을 위한 가스 크로마토그래피의 사양은 Table 3에 표시하였으며, 각 실험조건에서 가스 크로마토그래피를 통하여 나타난 크로마토그램의 피크 면적을 비교하여 각 미연탄화수소가 매연 농도에 미치는 영향을 조사하였다. 또한, EGR율을 구하기 위하여 전체 연소실 흡기량에 대한 EGR된 양, 즉 새로운 흡입공기량의 감소율로서 (1)식[7]을 이용하였다.

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

여기에서 V_0는 EGR을 수행하지 않았을 경우의 흡입공기량(m^3/h), V_a는 EGR을 수행했을 경우의 새로운 흡입공기량이다.

Table 3 Measurement conditions of GC

GC	Hewlett Packard 6890GC
Column	HP-PLOT/Al_2O_3 30m×0.53mm×15.0μm film thickness
Oven	30℃ for 7.5min, Programmed at 20℃/min to 180℃
Injector	Split (15:1), Inlet 250℃
Detector	FID, 250℃

3. 실험결과 및 고찰

3.1 EGBE 혼합율에 따른 배출물 특성

Fig. 2는 2500rpm의 회전속도에서 부하변화에 따른 배기 배출물의 배출특성 및 에너지소비율의 관계를 나타낸 그림이다.

경유를 사용한 경우에는 기관의 부하가 증가할수록 매연 배출의 증가폭은 커지고 있으나, EGBE를 혼합하여 사용한 경우 전체적으로 매연 배출량이 가장 많은 전부하상태에서도 매연 배출량이 36%미만으로써 경유의 경우와 비교하여 매연이 현저하게 저감되고 있으며, NOx는 함산소연료인 EGBE의 함유량이 증가함에 따라 함께 증가함을 알 수 있다. 또한, EGBE의 발열량이 경유보다 약 26%정도가 낮음에도 불구하고 에너지소비율은 경유와 EGBE를 혼합하여 사용한 경우가 거의 동일한 경향을 보이고 있다.

Fig. 3은 배기 배출물이 가장 많이 배출되는 전부하 상태에서 기관 회전속도에 따른 배기 배출물의 배출특성과 에너지소비율의 관계를 나타낸 그림이다. 연료내에 포함된 EGBE 양의 증가, 즉 함산소성분의 양이 증가할수록 매연이 현저하게 저감됨을 알 수 있으며, 25vol-%이상의 혼합율에서는 저감폭

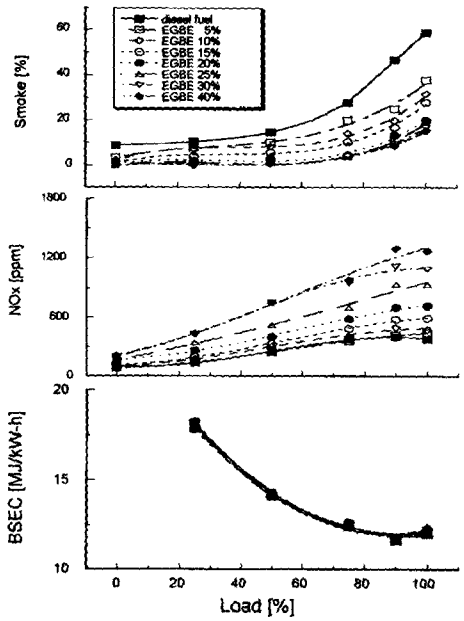

Fig. 2 Exhaust emissions vs. engine load for different EGBE contents at 2500rpm

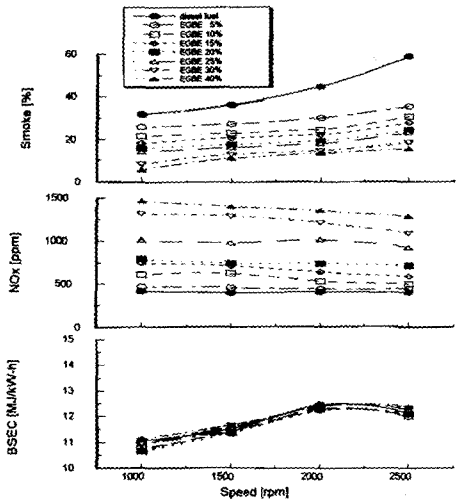

Fig. 3 Exhaust emissions vs. speed for different EGBE contents at load 100%

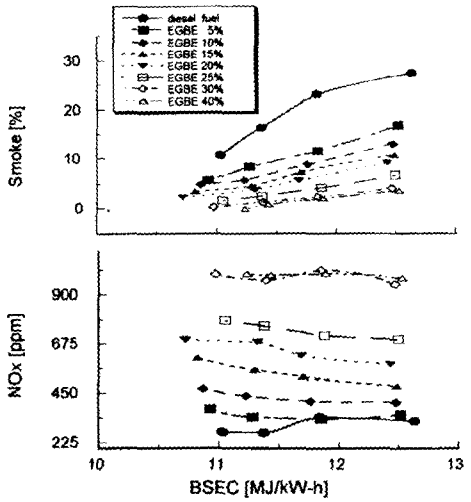

Fig. 4 Exhaust emissions vs. BSEC for different EGBE contents at load 75%

이 약간 둔화됨을 알 수 있다. NOx의 경우, 전체적으로 기관의 회전속도에는 큰 영향이 없으나, 연료속의 함산소성분이 증가할수록 NOx가 증가됨을 알 수 있으며 EGBE 25vol-% 이상의 함유율에서는 경유를 사용한 경우보다 2배이상의 배출량의 차이를 보이고 있어 경유에 혼합하여 사용하기에는 적절하지 않은 것으로 판단된다.

Fig. 2와 Fig. 3에서 디젤기관의 공기이용율이 비교적 충분한 저회전 영역에서는 피스톤의 운동속도가 상대적으로 저속이어서 경유의 경우에도 연소시간이 충분하고, 충분하게 산소를 이용할 수 있어 함산소연료를 혼합한 경우에도 중부하 이하에서는 커다란 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 그러나, 고부하영역에서는 매연 배출량의 큰 차이를 보이고 있으며, 기관 회전수가 증가함에 따라 체적효율이 저감되는 고속에서 함산소량에 따른 매연 배출량이 더욱 현저한 차이를 보이고 있다.

에너지소비율은 전체적인 운전조건에서 경유와 거의 비슷한 경향을 보이고 있으며, 이는 함산소연료가 경유보다 발열량이 적음에도 불구하고 연료속의 함산소성분에 기인한 연소효율의 개선효과 때문이라고 생각된다.

Fig. 4는 75%의 부하상태에서 매연 및 NOx와 에너지소비율과의 관계를 나타낸 것이다. 각 EGBE의 혼합율에 따라서 에너지소비율의 변화에 따른 NOx의 배출특성은 거의 일정하지만, 매연의 배출특성은 연료소비율이 증가할수록 증가하며, 증가폭은 EGBE의 함유율 즉 산소량이 증가할수록 둔화됨을 알 수 있다. 이는 함산소성분에 기인한 연료입자의 산화속도가 빠르게 향상되기 때문으로 생각된다. 또한, 함산소연료의 혼합율의 증가와 함께 NOx는 상당히 증가되며, 이는 빠른 산화속도에 기인한 연소실내의 온도상승 때문으로 생각된다. 특히, 25 vol-% 이상의 혼합율에서는 타 혼합율에 비하여 미미하나마 에너지소비율이 악화되고, 지나치게 과도한 NOx의 배출로 인해 EGBE를 경유에 혼합하여 사용할 경우에 최적의 혼합율은 현저한 매연 저감효과와 에너지소비율의 개선을 보이는 EGBE 20vol-% (+경유 80vol-%)가 될 것으로 생각된다.

3.2 GC를 이용한 탄화수소 분석

함산소연료를 사용한 경우에 매연의 저감원인을 조사하기 위하여 가스 크로마토그래피를 이용한 배출가스 중의 전체적인 미연탄화수소 및 C_1~C_6까지의 개별탄화수소를 비교 · 분석하였으며, 탄소수가 4이하인 경우를 저비등점 탄화수소로, 5이상인 경우를 고비등점 탄화수소[6]로 하여 정리하였다.

Fig. 5는 각 개별탄화수소의 농도와 크로마토그램상에 나타난 피크 면적과의 관계를 나타낸 것으로 표준가스를 사용하여 검량선을 산출한 것이다.

Fig. 6은 75% 이상의 고부하영역에서 각 기관 회전속도 변화에 따라서 경유를 사용한 경우와 EGBE를 20vol-% 혼합하여 사용한 경우에 미연탄화수소의 분석결과로서 크로마토그램상에 나타난 각각의 피크면적을 보여주고 있다. 그림에서와 같이 양 연료 모두 고회전속도와 고부하로 갈수록 탄화수소의 배출농도는 증가함을 알 수 있으며, 증가폭은 경유의 경우가 함산소연료인 EGBE 20vol-%의 경우보다 더욱 현저함을 알 수 있다.

이는 저회전속도에서는 경유를 연료로 사용한 경우에도 공기이용률이 충분하기 때문에 함산소연료인 EGBE의 산소성분이 연료의 주성분인 탄화수소의 산화에 큰 영향을 미치지 않았지만, 2000rpm과

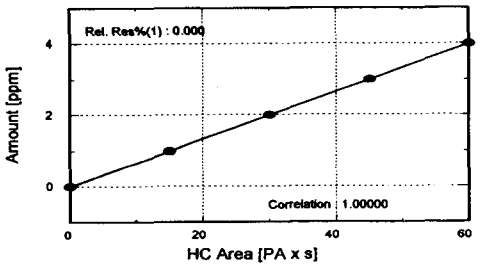

Fig. 5 Calibration curve for standard gas

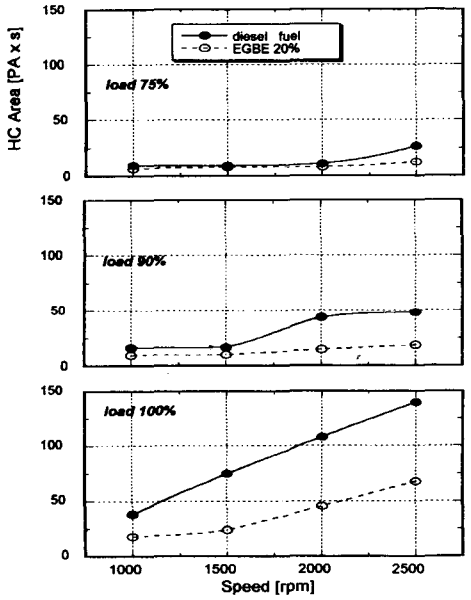

Fig. 6 Total area of hydrocarbon of each fuel from chromatogram analysis under varying engine speeds and loads

2500rpm의 고회전속도 영역에서는 피스톤의 회전속도가 증가함에 따라 체적효율의 저하와 연소기간 단축으로 인해 연소에 필요한 공기가 연소실내로 충분히 공급되지 못하여 EGBE를 혼합하여 사용한 경우에는 EGBE속에 포함된 산소성분이 연소에 필요한 부족분을 상당부분 공급하여 미연탄화수소의 생성 억제와 이미 생성된 미연탄화수소의 산화를 더욱 촉진시켰기 때문으로 생각된다.

Fig. 7은 기관 부하가 90%인 고부하 상태에서 매

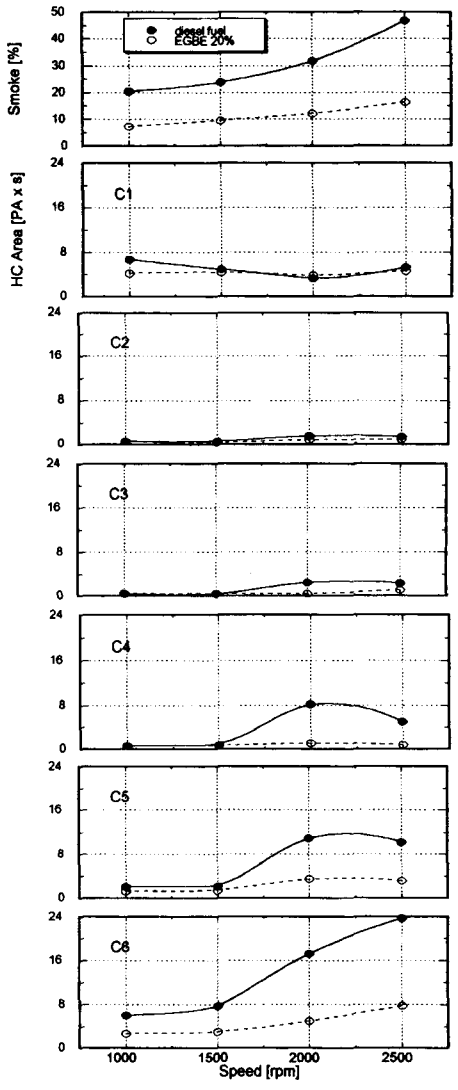

Fig. 7 Relationship of smoke, hydrocarbon of lower and higher boiling points under varying engine speeds at load 90%

연 배출 농도와 저비등점 탄화수소 및 고비등점 탄화수소의 배출 농도를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 매연의 배출특성과 고비등점 탄화수소의 배출특성을 비교해 볼 때 이 양자의 사이에는 상관관계가 있음을 알 수 있다. 즉, 기관 회전속도가 증가함에 따라 매연의 배출특성이 함산소연료인 EGBE를 20vol-% 혼합한 경우보다 경유를 사용한 경우가 급격함을 알 수 있으며, 고비등점 탄화수소인 C_5, C_6의 배출특성이 기관 회전속도가 증가함에 따라 큰 폭으로 증가하고 있다. 이와 같은 원인은 디젤기관의 특성상 공기이용율이 부족한 고부하 상태에서는 경유를 연료로 사용한 경우에 전 범위에 걸쳐서 연료의 주성분인 탄화수소 입자가 산화되지 못하고 그대로 배출되어 함산소연료를 사용한 경우에 비하여 훨씬 더 많은 매연을 생성·배출하는 것으로 생각된다. 즉, 저부하시에는 생성된 매연이 연소실내에 잔존해 있는 충분한 산소성분으로 말미암아 85%이상이 산화·소멸[8]되지만, 고부하시에는 매연의 생성이 비교적 늦게 일어나고 산소 농도 또한 낮기 때문에 충분한 산화속도에 도달하지 못하여 매연의 배출량이 증가하는 것으로 판단된다.

3.3 EGBE와 cooled EGR의 조합

앞에서 언급한바와 같이 함산소연료인 EGBE를 첨가함으로써 배출가스 중의 매연과 미연탄화수소의 저감은 현저하였으나, 기관부하와 함산소연료의 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. 8은 EGBE 최적 혼합율인 20%를 혼합·사용한 경우, 기관의 저회전속도인 1000rpm에서 각 기관부하와 EGR율에 따라 배기 배출물의 배출특성 및 에너지소비율을 나타낸 것이다. EGR율이 증가함에 따라서 함산소연료를 사용한 경우에도 매연의 증가폭이 커지는 것을 알 수 있다.

특히, 20%의 EGR율이 기관에 적용된 경우에는 고부하 영역에서 경유를 사용한 경우보다도 매연 배출이 증가됨을 알 수 있다. 이는 재순환되는 배출가스가 연소실내로 흡입되는 신기 중의 산소량을

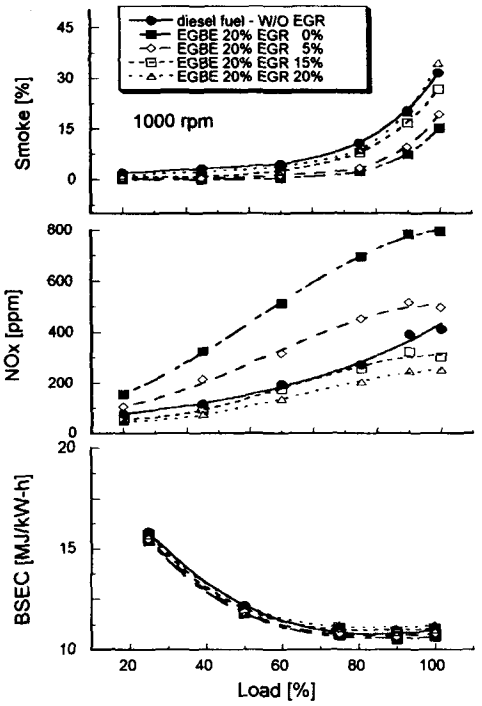

Fig. 8 Exhaust emissions and BSEC vs. load for different EGR rates at 1000rpm

감소시켜 연소에 충분한 산소의 공급이 어렵기 때문으로 생각한다.

NOx는 EGR율의 증가에 따라 현저하게 저감되고, 15%이상의 EGR을 적용한 경우에는 경유만을 사용한 경우보다도 더욱 저감됨을 알 수 있으며, 에너지소비율은 경유의 경우와 유사함을 알 수 있다.

에너지소비율은 상당히 불규칙적으로 나타나 있지만, 고부하와 고회전 영역에서 EGR율 20%이상의 경우에는 약 4%정도의 에너지 소비율의 악화가 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 직접분사식 디젤기관을 사용한 연구에서 흡입 산소량이 18%이상인 영역에서는 연료소비율이 흡입 산소량의 감소, 즉 EGR의 증가에 의해 약간 저하한다 할지라도 대폭적인 감소는 관찰되지 않는다는 연구결과[9]와 유사함을 알 수 있다.

Fig. 9는 기관의 고회전속도인 2500rpm에서 각 기관부하와 EGR율에 따라 배기 배출물의 배출특성을 나타낸 것이다.

Fig. 8과 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. 10은 EGBE 20%를 혼합·사용할 경우, 각 기관 회전속도의 전부하상태에서 EGR율 변화에 따른 NOx 변화율을 나타낸 것으로, 경유를 기초로 하여 각 EGR율에 따른 NOx의 증감폭을 나타내었다.

그림에서와 같이 EGR율이 증가함에 따라 NOx의 저감폭도 커짐을 알 수 있으며, EGBE 20%를 혼합·사용할 때, EGR 0%의 경우는 경유의 경우에 비하여

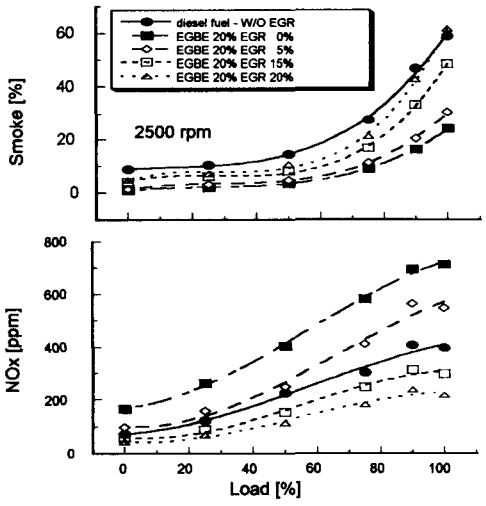

Fig. 9 Exhaust emissions and BSEC vs. load for different EGR rates at 2500rpm

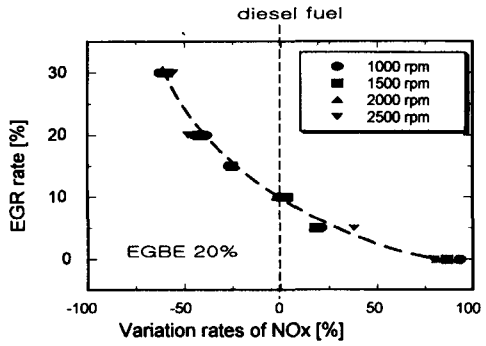

Fig. 10 Variation rate of NOx at 2500rpm, full load

90%정도 증가하지만, EGR 10%의 경우는 경유의 수준이며, EGR 20%의 경우 47%, EGR 30%의 경우에는 67%가 감소되나, Fig. 9에 나타난 바와 같이 20%이상의 EGR율을 적용한 경우에는 고부하영역에서 EGBE를 20vol-% 혼합하여 사용한 경우에도 매연이 경유만을 사용한 경우보다 다량 배출되므로 EGBE 20vol-%를 혼합할 경우 최적의 EGR율은 15%정도가 적당한 것으로 판단된다.

Fig. 11은 2000과 2500rpm의 전부하 상태에서 경유를 연료로 사용하고 EGR을 적용하지 않은 경우와, EGBE 20vol-%를 혼합한 연료와 EGR을 조합하여 적용한 경우의 매연과 NOx의 배출특성을 나타낸 그림이다.

그림에서와 같이 EGR율이 증가할수록 매연은 증가하며 NOx는 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 NOx저감폭을 보여 cooled EGR이 NOx배출에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 즉, 경유를 사용한 경우보다 EGBE를 첨가하여 사용할 경우에 매연과 NOx를 동시에 저감시키기 위해서는 기관의 연료로 EGBE 20vol-%를, 최적의 EGR율은 15%정도임을 알 수 있었다.

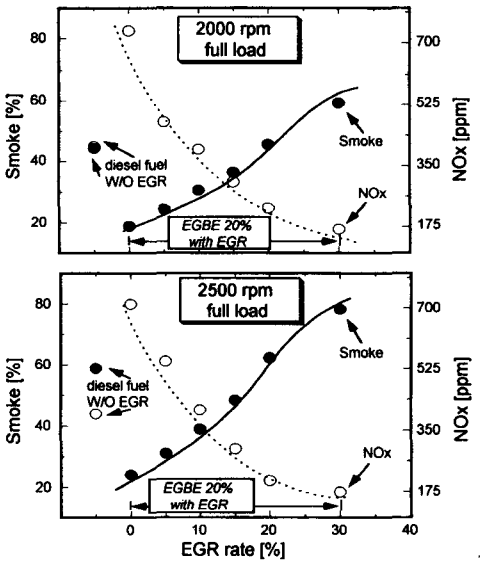

Fig. 11 Smoke and NOx emission vs. EGR rates

4. 결 론

수냉식, 4행정, 직접분사식 디젤기관의 연료로서 경유와 EGBE를 0~40vol-%까지 혼합하여 사용한 경우 기관성능 및 배기 배출물에 미치는 영향을 조사·분석한 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

1) 모노에테르 계열의 함산소연료인 EGBE를 디젤기관에 적용하여 전부하시에 고회전속도 영역에서 최대 74% 정도의 현저한 매연저감이 이루어졌다.

2) 매연과 NOx의 배출특성은 함산소연료 혼합율의 증가, 즉 연료내의 산소농도에 의하여 강하게 좌우되며, 산소량이 증가하면 할수록 매연 배출량의 저감과 NOx 증가에 직접적인 연관성을 가짐을 알 수 있었다.

3) 매연 배출은 고비등점 탄화수소의 생성 및 산화와 밀접한 관계가 있으며, EGBE와 같은 함산소연료는 고부하와 고회전 속도영역에서 고비등점 탄화수소의 산화를 촉진시켜 매연 배출을 현저하게 억제한 것으로 생각된다.

4) 함산소연료인 EGBE를 20vol-% 경유에 혼합하고 15%의 배기가스 재순환을 동시에 기관에 적용할 경우 매연과 NOx의 동시저감을 이룰 수 있었다.

References

1) S. Naoki, H. Hirokazu, N. Toshio, Y. katsuhiko, "A Study of Diesel Combustion Process Under the Condition of EGR and High-Pressure Fuel Injection with Gas Sanpling Method," SAE 960030, 1996.

2) Y. Koji, S. Hideo, T. Hidenori, "Study on Combustion and Exhaust Gas Emission Characteristics of Lean Gasoline-Air mixture Ignited by Diesel Fuel Injection," SAE 982482, 1998.

3) A. Taro, H. Yoshiaki, M. Junichi, S. Yasuo, "An Experimental Study on Premixed-Charge Compression Ignition Gasoline Engine," SAE 960081, 1996.

4) T. Akimoto, M. Tamanouchi, S. Aihara, H. Morihisa, "Effects of DGM and Oxidation Catalyst on Diesel Exhaust Emissions," SAE 1999-0-1137, 1999.

5) C. Bertoli, N. D. Giacomo, C. Beatrice, "Diesel Combustion Improvements by the Use of Oxygenated Synthetic Fuels," SAE 972972, 1997.

6) Y. T. Oh, S. H. Choi, "An Experimental Study on the Analysis of Exhaust Gas Concentration by Using DMC in Diesel Engine," Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol.8, No.2, pp.1-8, 2000.

7) S. L. Plee, T. Ahmad, J. P. Myers, "Flame Temperature Correlation for the Effects of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Particulate and NOx Emissions," SAE 811195, 1981.

8) D. V. Kittleson, M. J. Pipho, J. L. Ambs, L. Luo, "In-cylinder Measurement of Soot Production in a Direct Injection Diesel Engine," SAE 880344, 1988.

9) K. Narusawa, M. Odaka, N. Koike, K. Yoshida, Y. Tsukamoto, "An EGR Control Method for Heavy Duty Diesel Engines under Transient Operations," SAE 900444, 1990.