

간접분사식 디젤기관에서 Mono-Ether 계열 함산소연료
 (Ethylene Glycol Mono-n-Butyl Ether)의 적용에 관한 연구
 A Study on Application of Mono-Ether Group(Ethylene Glycol
 Mono-n-Butyl Ether) Oxygenated Fuel in an IDI Diesel Engine

최승훈 · 오영택

S. H. Choi and Y. T. Oh

Key Words : IDI diesel engine(간접분사식 디젤 기관), Oxygenated fuel(함산소연료), Exhaust gas recirculation (배기가스 재순환), Ethylene glycol mono n butyl ether(EGBE)

Abstract : In this paper, the effect of oxygen component in fuel on the exhaust emissions has been investigated for an indirect 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 four 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 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(10vol-%) and cooled EGR method(10%).

1. 서 론

디젤기관은 공기 과잉 상태로 운전되기 때문에 비열이 증대되어 열해리가 적고 열효율이 높으며, 또한 고압축비를 기관에 적용할 수 있는 열기관¹⁾이지만, 디젤기관의 최대 출력의 한계는 배기배출물의 매연 농도에 따라 제한^{2,3)}될 수밖에 없다. 이러한 디젤기관의 배기배출물의 저감을 위한 방법으로는 엔진설계변경기술과 연료의 정상 등에 변화를 주어 연료가 연소실내에서 연소하여 배출되기 전에 배출가스를 저감시키기 위한 전처리 방법과 연료가 연소한 후에 연소실 밖에서 촉매장치나 입자상물질 트랩, 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 문제를 해결하고자 하였으며, 여러 가지 전처리 방법 중에서 가격의 저렴함과 효과적인 결과를 얻는데 시간을 절약할 수 있다는 이점 때문에 엔진자체로의 접근 방법보다는 연료자체의 정상변화, 즉, 함산소연료를 상용경유와 혼합하거나, 세탄가 개선제의 첨가 등과 같은 방법이 제시되고 있다. 이러한 전처리 방법으로서 함산소연료를 이용한 디젤기관의 배기 배출물 저감 방법으로, Akimoto 등⁴⁾은 함산소연료의 일종인 di-ethylene glycol dimethyl ether와 산화촉매를 병용하여 매연을 저감했다는 보고를 하고 있으며, Bertoli 등⁵⁾은 디에테르 계열의 함산소연료를 사용하여 배기 배출물의 특성을 조사하였다.

본 연구에서는 디젤기관의 배기배출물 저감을 위한 전처리방법으로서 모노에테르 계열의 함산소연료인 ethylene glycol mono-n-butyl ether(이하 EGBE)를 디젤기관의 상용연료인 경유와 최대 20vol-%까지 혼합하여 사용할 경우 간접분사식 디젤기관의 각 회전속도와 부하 변화에 따른 배기배출물의 특성을 조사함과 동시에 함산소연료를 사용할 경우 증가하는 NOx의 유용한 저감방법으로 후

접수일 : 2004년 11월 27일
 최승훈(책임저자) : 전북대학교 기계공학부
 E-mail : medr@chonbuk.ac.kr Tel : 063-270-2323
 오영택 : 전북대학교 기계공학과, 자동차신기술연구소

처리방법의 일종인 cooled EGR을 병행하여 매연과 NOx의 동시저감을 이루고자 하였다. 특히, 디젤기관의 NOx 배출물에 미치는 EGR의 영향에 관한 연구로서 흡기로 재순환되는 배출가스 중 매연 미립자를 제거시키고, cooled EGR을 사용한다면 효과적으로 NOx 배출물을 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

2. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 기관은 4기통, 수냉식, 4행정, 간접분사식 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 5~20vol-% 혼합한 연료를 사용하여 기관의 각 회전속도에서 무부하, 25%, 50%, 75%, 90% 및 전부하의 경우에 기관성능과 배기배출물을 측정하였다. 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 ; Korea)를 사용하여 기관으로부터 300 mm 하류에서 일정량의 배출가스를 흡입한 후, 여과지에 흡착된 것을 측정하였으며, 동일 조건에서 각각 3회 측정하여 평균값을 취하였다.

Table 1 Specification of test engine

Item	Specification
Engine model	D4BA
Bore × Stroke	91.1 × 95 (mm)
Displacement	2476 (cc)
Compression ratio	21
Injection method	indirect injection

Table 2 Properties of test fuels

	Diesel fuel	EGBE
Molecular formula	C ₁₆ H ₃₄	C ₆ H 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

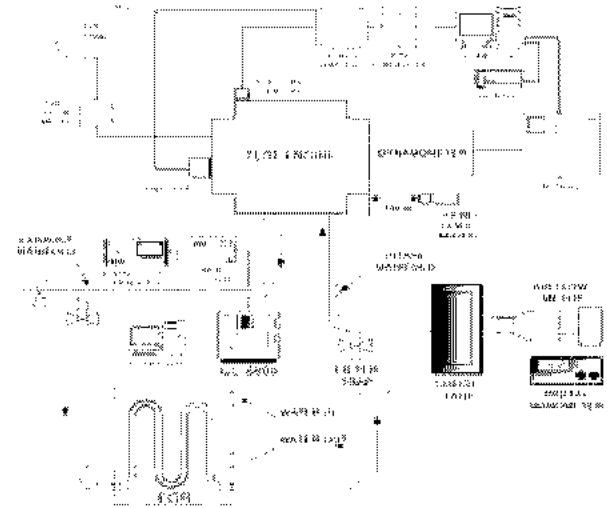


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

NOx의 측정은 배기 매니폴드로부터 약 400mm 하류에서 배기가스 분석기(Green line MK2; Italy)로 일정량의 배기가스를 흡입하여 측정함으로써 샘플링 농도의 오차를 줄였으며, 기관이 각 실험조건에서 일정량의 연료를 소모하는 시간을 측정하여 에너지소비율(MJ/kWh)로 계산하였으며, 정적분사기는 ATDC 4°C로 고정하였다.

또한, EGR율은 전체 연소실 흡기량에 대한 EGR된 양, 즉 새로운 흡입공기량의 감소율로서 식 (1)을 이용하였다. 여기에서, V_0 는 EGR을 수행하지 않았을 경우의 흡입공기량(m^3/h), V_a 는 EGR을 수행했을 경우의 새로운 흡입공기량이다. 더불어, 각 기관 부하에서 303-845K까지 변화하는 배기가스의 온도는 냉각순환시스템을 거쳐 297K 정도로 유지하였으며, 재순환되는 배기가스 중의 미립자를 제거하기 위하여 필터를 설치하였다.

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

3. 실험결과 및 고찰

3.1 연료성상에 따른 기관 및 배기배출물 특성

Fig. 2는 기존 연료인 경유와 EGBE를 5~20% 혼합한 연료를 사용한 경우, 2000rpm의 회전속도에서 부하변화에 따른 계동토크, 출력 및 에너지소비율의 관계를 나타낸 그림이다. 그림에 나타난 바와 같이 EGBE의 발열량이 경유보다 약 26%정도가 낮음에도 불구하고 계동토크와 출력면에서 경유와 EGBE를 혼합하여 사용한 경우 거의 동일한 경향을

보이고 있다. 특히, 제동에너지소비율은 EGBE의 함량 증가와 함께 약간 개선되는 경향을 보이고 있음을 알 수 있으며, 이는 기관의 체적효율이 저하되는 고회전속도 영역에서 EGBE에 포함된 합산소성분의 연소개선효과 때문으로 생각된다.

Fig. 2 Power, torque and BSEC vs. engine load for different EGBE contents at 2000rpm

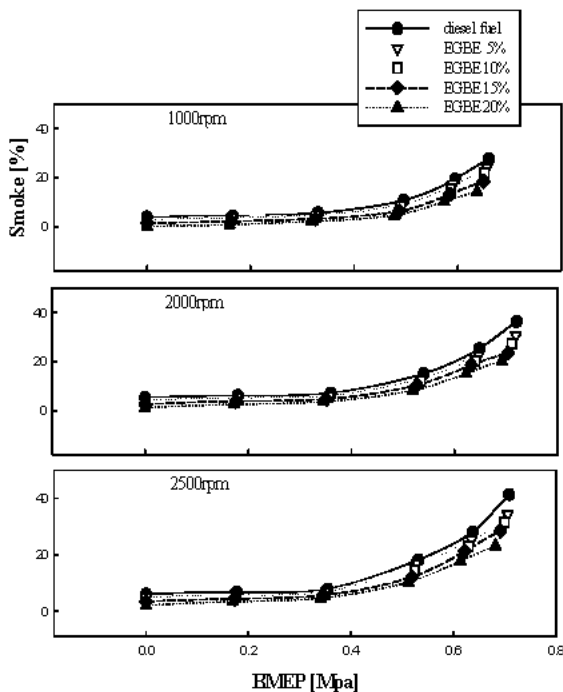


Fig. 3 Comparison of smoke for difference of EGBE contents under varying loads

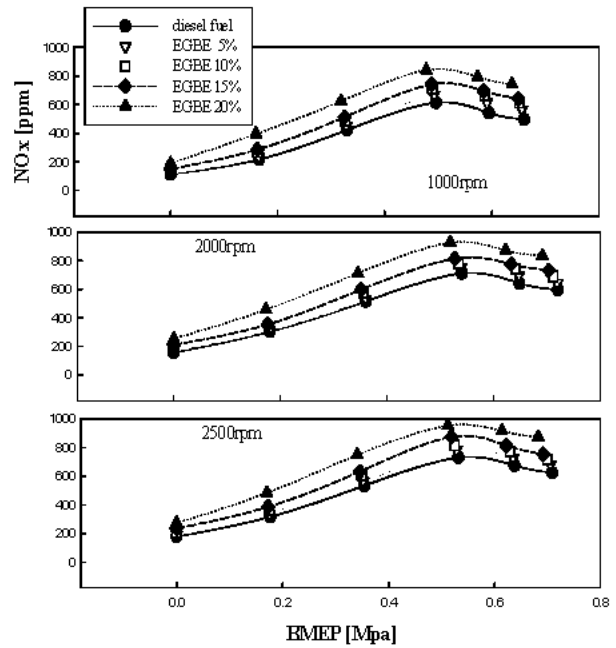


Fig. 4 Comparison of NOx for difference of EGBE contents under varying engine loads

Fig. 3은 Fig. 2와 동일한 조건에서 제동평균유효압력 변화에 따른 매연 배출특성을 나타낸 것이다. 디젤기관의 공기이용율이 충분한 저부하 영역에서는 높은 체적효율 때문에 합산소연료를 혼합한 경우에도 매연배출량의 저감은 작지만, 고회전의 경우 체적효율이 저감되는 고부하 영역에서는 매연배출량에 현저한 저감을 보이고 있으며, 혼합량이 증가할수록 매연의 저감은 증가되며, 15%이상의 혼합율(산소량 42wt.%)에서는 그 저감폭이 줄어드는 것을 알 수 있다. 합산소연료인 EGBE를 혼합하여 사용한 경우에는 연료내에 산소성분이 일정 부분 점유하고 있어, 연료자체내에 탄화수소 성분이 경유를 사용한 경우보다 적게 된다. 다시 말하면, 탄소가 주성분인 매연의 생성자체를 연소과정 전반에 걸쳐서 억제할 수 있는 것이며, 확산연소기간에서는 산소성분의 기여로 인해 빠른 연소, 즉 급격한 탄화수소의 산화를 유도하여 매연생성을 더욱 억제할 수 있는 것으로 생각⁶⁾된다.

Fig. 4는 Fig. 3과 동일한 실험조건에서 기관의 부하변화에 따른 NOx의 배출특성을 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이, 경유의 경우보다 경유에 합산소연료인 EGBE를 첨가한 경우가 전체적으로 NOx의 배출량이 증가하는 경향을 보이고 있다. 특히, 각 회전속도 공히 저부하영역에서의 배출량 차이보다 고부하영역에서의 배출량 차이가 현저히 증가하였고, EGBE의 혼합율이 15% 이상이면 NOx의 배

출량이 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 합산소연료의 공급비율만큼 경유의 분사량이 줄어들기 때문에 발열량의 차이로 인하여 prompt NOx의 생성이 줄어들고, 초기연소시 급격하게 연소가 일어남으로써 연소실의 압력 및 연소온도가 상승하게 되어 thermal NOx가 지배적인 상태가 된 것으로 생각된다.⁷⁾ 즉, 경유를 연료로 사용한 경우에는 합산소연료를 첨가한 경우보다 산소량이 상대적으로 감소하므로 초기의 급격한 연소의 감소로 thermal NOx의 생성이 둔화되며, 합산소연료를 사용한 경우에는 연료 자체내에포함된 산소성분에 의한 연소효율 개선으로 연소실 온도의 상승과 함께 전체적인 NOx의 증가가 발생하는 것으로 생각한다.

3.2 EGR율에 따른 기관 및 배기배출물 특성

Fig. 3에 나타난 바와 같이 EGBE를 첨가함으로써 매연 저감은 현저하였으나, 합산소연료의 혼합량이 증가함에 따라서 NOx의 배출농도도 함께 증가하는 것을 Fig. 4에서 알 수 있었다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 디젤기관에서 NOx 저감방법의 일환으로 알려진 cooled EGR방법을 병행하여 사용하였으며, 매연의 저감과 NOx의 증가율면에서 최적의 혼합율로 생각되는 EGBE 10%를 혼합한 경우와 경유만을 사용한 경우를 비교하였다.

Fig. 5에 나타난 바와 같이 EGR 방법을 적용한 경우, 30%의 높은 EGR율을 적용한 경우를 제외하고는 제동토크와 출력의 저하는 미미하였으며, 제동에너지소비율은 4%미만의 변화를 보여 큰 차이를 나타내지는 않았다.

Fig. 6은 경유만을 사용한 경우와 비교하여 EGBE 10%를 혼합하고 0~30%의 EGR율을 적용하여 기관의 각 회전속도와 각 기관부하에서 매연의 배출특성을 나타낸 것이다. 합산소연료인 EGBE를 혼합하여 사용한 경우에도 EGR율이 증가함에 따라서 매연의 증가폭이 커지는 것을 알 수 있다. 특히, 20%이상의 EGR율이 기관에 적용된 경우에는 경유만을 연료로 사용한 경우보다도 매연 배출이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 재순환되는 배출가스가 연소실내로 흡입되는 신기 중의 산소량을 감소시켜 연소에 충분한 산소 공급이 어렵기 때문으로 생각되며, 합산소연료 이용시의 매연저감 측면을 고려할 때 중·저부하영역에서는 15%이하의 EGR율을, 고부하영역에서는 10%이하의 EGR율이 적정함을 알 수 있다.

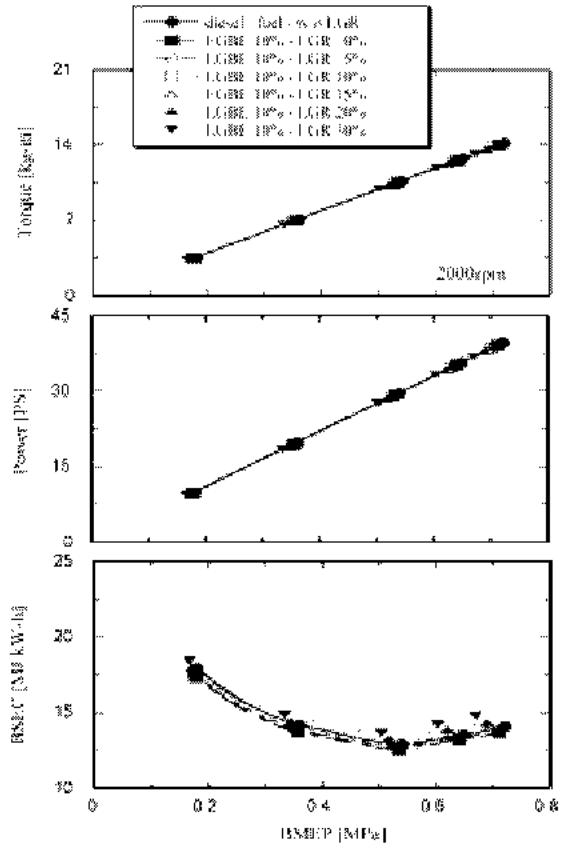


Fig. 5 Power, torque and BSEC vs. BMEP for varying EGR rates at 2000rpm

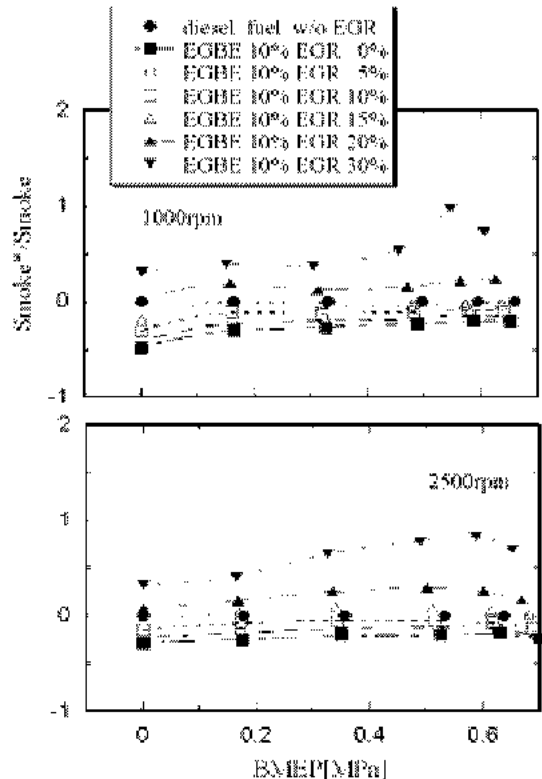


Fig. 6 Smoke vs. EGR rates on diesel fuel and EGBE blended fuels by varying engine loads

Fig. 7은 Fig. 6과 동일한 조건에서 EGR율의 변화에 따른 NOx의 변화량을 나타낸 것이다.

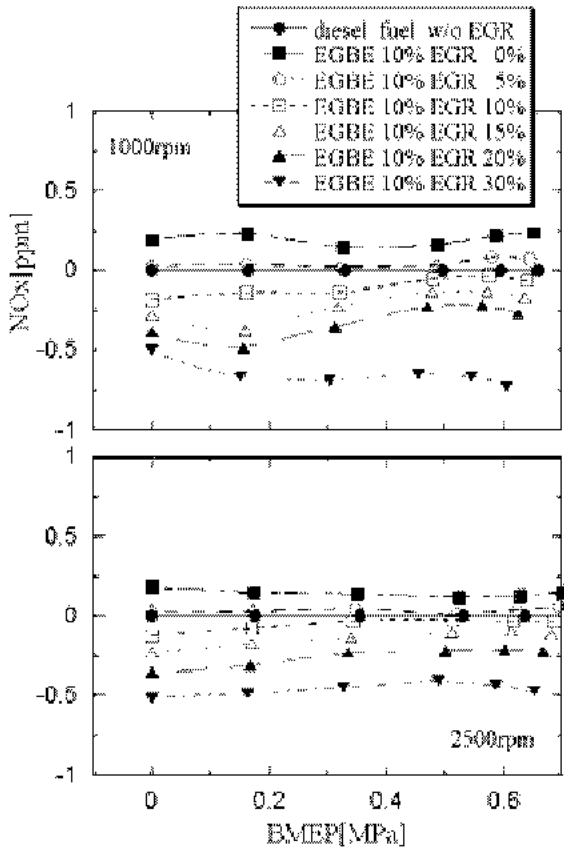


Fig. 7 NOx vs. EGR rates on diesel fuel and EGBE blended fuels by varying engine loads

그림에서와 같이, NOx는 EGR율의 증가에 따라 현저하게 저감되고, 10%의 EGR을 적용한 경우에도 경유만을 사용한 경우보다도 저감되며, 10%이상의 EGR율을 적용한 경우에는 경유를 사용한 경우보다 전체적으로 NOx가 저감됨을 알 수 있다. 전체적인 NOx 배출측면에서 보면, NOx는 EGR율의 증가에 따라 현저하게 저감되고 있다.

Fig. 8은 중부하영역에서 각 기관회전속도에서 경유를 연료로 사용하고 EGR을 적용하지 않은 경우와 EGBE 10vol-%혼합연료(+경유 90vol-%)를 연료로 하고 0~30%의 cooled EGR을 적용한 경우의 매연과 NOx의 배출특성을 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이, EGR율이 증가할수록 합산소연료를 사용한 경우에도 매연은 증가하며, NOx는 저감되고 있다. 또한, EGBE 혼합연료를 사용한 경우에도 EGR율이 15%를 초과하면 경유만을 사용한 경우보다 매연이 더 많이 배출되는 것을 알 수 있으며,

10%정도의 EGR율을 적용한 경우에는 NOx 배출 특성이 경유를 사용했을 때에 비하여 약간 저감됨을 알 수 있다. 따라서, EGBE 혼합연료(10vol-%)를 사용할 경우, 매연과 NOx를 동시에 저감시키기 위한 최적의 EGR율은 10% 정도임을 알 수 있었다.

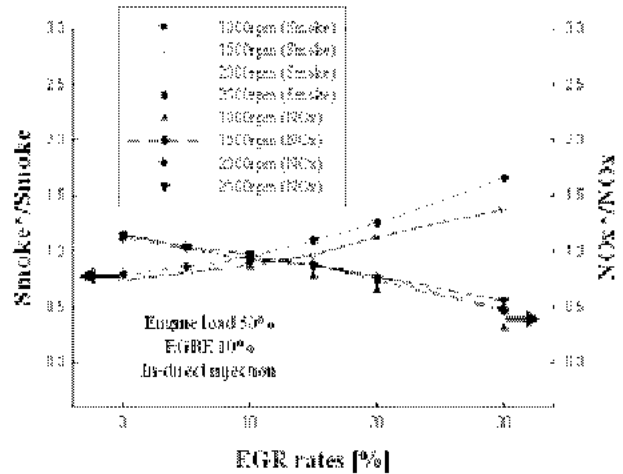


Fig. 8 Characteristics of smoke vs. NOx emission with diesel fuel and oxygenated blended fuel on various EGR rates at varying engine speed.

5. 결 론

수냉식, 4행정, 4기통, 간접분사식 디젤기관의 연료로서 경유와 EGBE를 0~20vol-%까지 혼합하여 사용한 경우 기관성능 및 배기 배출물에 미치는 영향을 분석하고, 합산소연료 사용시 증가되는 NOx의 저감을 위하여 cooled EGR 방법을 조합한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) EGBE의 최대 혼합율인 20vol-%에서 경유에 비하여 발열량의 차이는 약 5.4%가 낮지만, 기관출력에서의 차이는 최대 3.7%정도로 EGBE 혼합연료를 간접분사식 디젤기관의 연료로 적용할 경우 합산소성분에 기인한 연소개선효과를 확인할 수 있었다.
- 2) 합산소연료인 EGBE를 간접분사식 디젤기관에 적용하여 전부하, 고회전속도 영역에서 경유만을 연료로 사용한 경우보다 최대 40.8% 정도의 현저한 매연저감이 이루어짐을 확인하였다.
- 3) 합산소연료인 EGBE를 10vol-% 경유에 혼합하고 10% 내외의 배기가스 재순환을 동시에 기관에 적용할 경우 경유만을 사용한 경우와 비교하여 매연과 NOx의 동시저감이 가능하였다.

참고 문헌

1. Y. T. Oh, S. H. Choi, 2000, "An Experimental Study on the Analysis of Exhaust Gas Concentration by Using DMC in Diesel Engine," Trans. of KSAE, Vol.8, No.2, pp.1-8.
2. Y. Koji, S. Hideo, T. Hidenori, 1998, "Study on Combustion and Exhaust Gas Emission Characteristics of Lean Gasoline - Air mixture Ignited by Diesel Fuel Injection," SAE 982482.
3. A. Taro, H. Yoshiaki, M. Junichi, S. Yasuo, 1996, "An Experimental Study on premixed-Charge Compression Ignition Gasoline Engine," SAE 960081.
4. T. Akimoto, M. Tamanouchi, S. Aihara, H. Morihisa, 1999, "Effects of DGM and Oxidation Catalyst on Diesel Exhaust Emissions," SAE 1999-0-1137.
5. C. Bertoli, N. D. Giacomo, C. Beatrice, 1997, "Diesel Combustion Improvements by the Use of Oxygenated Synthetic Fuels," SAE 972972.
6. S. H. Choi, Y. T. Oh, 2003, "An Experimental Study on Simultaneous Reduction of Smoke and NOx in a Agricultural Diesel Engine," Trans. of KSAE, Vol. 11, No. 3, pp. 85-91.
7. S. H. Choi, Y. T. Oh, 2002, "The Experimental Study on Emission Reduction by Oxygenate Additive in D.I. Diesel Engine," Trans. of KSAE, Vol. 10, No. 4, pp. 33-42.