

〈 논문 〉

연료성상 변화와 배기가스재순환 방법 적용에 의한 디젤기관의 성능 및 배기배출물 특성 연구

최 승 훈* · 오 영 택*

(2005년 12월 12일 접수, 2006년 2월 22일 심사완료)

A Study on Characteristics for Performance and Exhaust Emissions on Changes of Fuel Properties and Application of EGR Method in Diesel Engines

Seunghun Choi and Youngtaig Oh

Key Words: EGBE(Ethylene Glycol Mono Normal Butyl Ether), Oxygenated Fuel(함산소연료), EGR(배기가스 재순환), Alternative Fuel(대체연료), Smoke(매연), NOx(질소산화물)

Abstract

In this study, the effects of oxygenated fuel such as ethylene glycol mono-normal butyl ether(EGBE) was investigated both DI and IDI diesel engine. Because EGBE includes oxygen content approximately 27.1%, it is a kind of oxygenated fuel that the smoke emission of EGBE blending fuel is reduced remarkably compared with commercial diesel fuel. The focus of this study was to investigate the effects of the addition of oxygenated fuel to diesel fuel on the engine-out emissions and the performance. Smoke emissions of all EGBE blends were reduced substantially in comparison with conventional diesel fuel. This study showed that remarkable reduction of smoke with oxygenate blending fuels in diesel engines including DI and IDI combustion method. Besides, this study showed that simultaneous reduction of smoke and NOx emissions could be achieved by oxygenated fuel and EGR method that was applied to decrease NOx emissions increasing with smoke emissions reduction.

1. 서 론

디젤기관은 가솔린기관에 비해 여러 종류의 연료를 사용할 수 있고 높은 열효율, 고압축비 적용 및 희박연소 영역에서 운전되기 때문에 환경적 측면에서 주목받고 있다. 그러나, 광화학 스모그, 산성비, 오존층파괴 등의 주범인 NOx와 매연이 가솔린기관에 비해 다량 발생하는 문제를 가

지고 있다. 따라서, 이러한 디젤기관의 주요 대기 오염물질에 대한 배출허용 기준이 더욱 강화^(1~3)되고 있으며 디젤기관을 실생활에 적용하는데 있어 NOx와 매연의 저감은 해결해야 할 중요한 당면과제로 부각되고 있다. 이러한 측면에서 함산소연료에 대한 연구가 진행^(4~6)되고 있으나, 이와 같은 함산소연료가 직접분사식과 간접분사식을 포함한 디젤기관의 연소방식에 따른 기관성능 및 배기가스 배출특성에 미치는 영향을 비교한 연구는 매우 적다. 따라서 본 연구에서는 ethylene glycol mono-normal butyl ether(이하 EGBE)를 디젤기관의 상용연료인 경유에 혼합한 연료를 직접분사식 및 간접분사식 디젤기관에 사용하고, NOx를 저감시키기 위하여 Cooled EGR을 적용하여 매연과 NOx를 동시저감 시키고자 하였다.

† 책임저자, 회원, 전북대학교 기계공학부

E-mail : medr@chonbuk.ac.kr

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

* 회원, 전북대학교 기계공학과, 전북대학교 부설
공학연구원 공업기술연구소

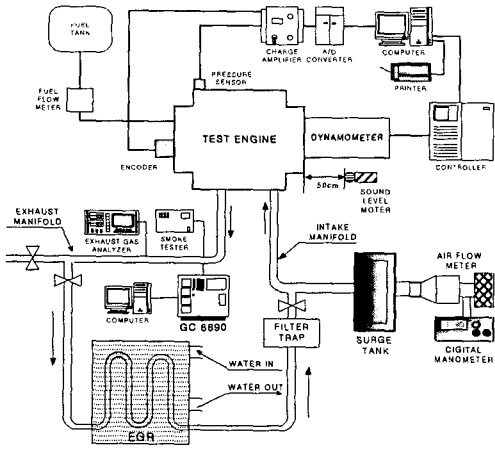


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

2. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 기관은 단기통, 4행정, 수냉식, 직접분사식(이하 DI) 디젤기관과 4기통, 4행정, 수냉식, 간접분사식(이하 IDI) 디젤기관으로서 Table 1에 각각의 기관사양을 나타내었으며, Table 2에 합산소연료인 EGBE의 특성을 경유와 비교하여 나타내었다.

본 실험은 상용 경유에 합산소연료인 EGBE를 체적비율로 각각 5, 10, 15, 20% 혼합한 연료를 사용하여 그에 따른 기관성능 및 배기가스 배출 특성을 비교·분석하고자 하였다.

Fig. 1은 사용된 실험장치의 개략도이며, 실험은 1000, 1500, 2000, 2500rpm의 기관 회전속도에서 실시하였다. 실험조건을 설정하기 위하여 각각의 회전속도를 일정하게 유지한 상태에서 기관의 부하 변화는 인제션펌프의 랙을 완전히 당겼을 경우를 전부하로 하며 이때의 토크 값을 일정 비율(0, 25, 50, 75, 90, 100%)로 나누어 실험 조건을 설정하였고, 각각의 조건에서 기관이 정상상태로 운전되도록 충분히 구동한 후 데이터를 취득하였다. 매연 농도의 측정에는 매연측정장치(Hesbon; Korea)를 사용하여 기관으로부터 300mm 하류에서 일정량의 배기가스를 흡입한 후, 여과지에 흡착된 매연의 농도를 측정하였으며, NOx농도는 배기매니폴드로부터 약 400mm 하류의 배기관에 흡입관을 연결하여 배기가스분석기(GreenLine MK2; Italy)에 일정량의 배기가스를 지속적으로 흡입시켜 측정하였다.

Table 1 Specification of test engines

Item	Specification	
Engine model	ND 130	D4BA
Number of cylinder	1	4
Bore × Stroke	95×95(mm)	91.1×95(mm)
Displacement	673(cm ³)	2476(cm ³)
Compression ratio	18	21
Combustion chamber	Toroidal	Swirl chamber
Coolant temp.	80±2°C	80±2°C
Injection type	direct	In-direct

Table 2 Properties of test fuels

	Diesel fuel	EGBE
Molecular formula	C ₁₂ H ₂₆	CH ₃ (CH ₂) ₃ O(CH ₂) ₂ OH
Density[kg/m ³](at 15°C)	0.8309	0.9000~0.9004
Molecular weight	170	130
LHV[MJ/kg]	43.12	31.12
Oxygen[wt-%]	-	27.1

또한 EGR율은 EGR을 실시함에 따라 새로운 흡입공기량의 감소율로서 식 (1)을 이용하였다. 여기에서, V_0 는 EGR을 수행하지 않았을 경우의 흡입공기량(m³/h), V_a 는 EGR을 수행했을 경우의 새로운 흡입공기량이다. 또한 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 기관성능 및 배기배출 특성 비교

Fig. 2는 EGBE의 혼합을 변화에 따른 각 기관에서의 에너지소비율(BSEC)의 변화를 나타낸 것이다. Table 2에 나타난 바와 같이 발열량의 차이가 경유 및 EGBE 혼합연료 사이에서 나타났지만, BSEC는 경유와 비슷하게 나타나는 특성을 보였다. 본 실험에서 최대 혼합율을 EGBE 20%를 혼합하여 사용한 경우 발열량의 차이는 6% 정도이지만, 2500rpm, 전부하시 DI 디젤기관에서 BSEC의 차이는 1% 미만이며, IDI 디젤기관에서

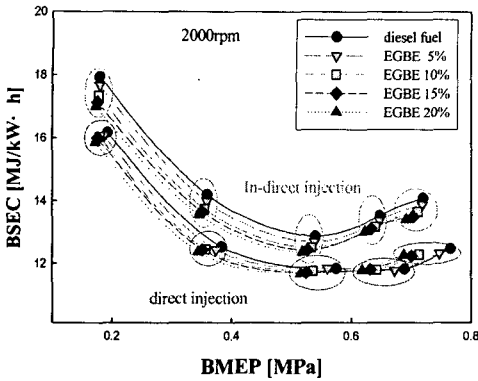


Fig. 2 BSEC versus BMEP for different oxygenated fuel contents at 2000rpm

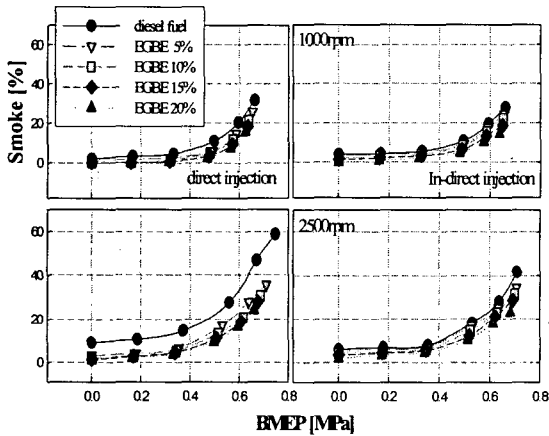


Fig. 3 Comparison of smoke for different oxygenated fuel contents under various BMEP and engine speeds

는 4% 미만의 차이를 보였다. 이는 EGBE 내에 포함된 산소성분의 영향으로 인하여 기관내 연소시 연소효율이 향상되었기 때문으로 사료된다. 또한 두 기관 모두 비슷한 경향을 보였으며, 전체적인 에너지소비율은 DI 디젤기관이 더욱 우수한 것으로 나타났다.

Fig. 3은 각 기관에서 EGBE 혼합연료를 연료로 사용한 경우, 저회전속도와 고회전속도에서 BMEP 변화에 따른 매연의 배출특성을 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, DI 디젤기관에 비하여 IDI 디젤기관의 경우가 매연 배출량이 적었으며, 또한 EGBE 혼합연료를 사용한 경우가 전체적으로 경유에 비해 매연이 저감되었으며 혼합율이 증가할수록 유사한 경향으로 매연

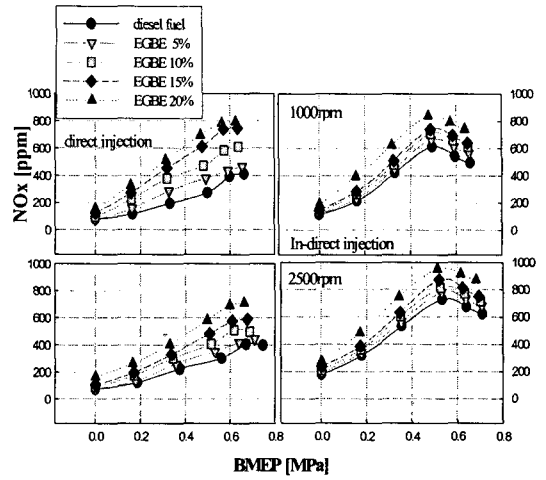


Fig. 4 Comparison of NOx for different oxygenated fuel contents under various BMEP and engine speeds

배출농도가 감소하였다. 또한 공기 이용률이 충분한 저부하, 저회전 영역에서는 경유와 EGBE 혼합연료의 매연배출농도 차이가 적었으나 체적효율이 저감되고 과농혼합기가 증가하는 고회전, 고부하 영역으로 진행할수록 현저한 매연배출농도 차이를 확인할 수 있었다. 그리고 DI 디젤기관의 경우 매연이 최대 59% 감소되었고, IDI 디젤기관의 경우는 최대 44% 정도 감소를 보였다. 또한 DI 디젤기관에서는 EGBE 5%의 혼합율을 적용하여도 경유에 비하여 매연저감이 뚜렷하였으나, IDI 디젤기관에서는 매연저감이 적었다. 이는 DI 디젤기관의 경우는 연소실내의 혼합기 형성이 IDI 디젤기관에 비하여 미흡하여 소량의 합산소연료로도 연소촉진에 의한 매연저감효과가 큰 것으로 생각된다.

Fig. 4는 Fig. 3과 동일한 조건에서 NOx의 배출특성을 나타낸 그림이다. 전체적으로 EGBE 혼합연료를 사용한 경우가 경유만을 연료로 사용했을 때보다 NOx 배출량이 증가되며 EGBE 혼합율이 증가할수록 NOx의 배출농도가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 합산소연료내에 포함된 산소성분이 연소가 활발해지는 후연소기간에 화염온도를 상승시켜 NOx의 배출량을 증가시킨 것⁷⁾으로 생각된다. DI 디젤기관의 경우 NOx가 최대 50% 증가하였고, IDI 디젤기관의 경우 최대 33%의 증가를 보였다.

Fig. 5는 Fig. 3과 4의 배기배출물 특성을 명확히

하기 위하여 DI 디젤기관과 IDI 디젤기관의 중부하 및 전부하 운전조건에서 EGBE 함유량에 따른 매연과 NOx의 변화율을 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 기관회전속도 변화에 크게 관계없이 매연과 NOx의 전형적인 trade-off 관계를 확인할 수 있다. 또한 EGBE의 함유량의 증가, 즉 연료내의 산소량이 증가함에 따라 매연의 감소율과 NOx의 증가율은 상승하며, 회전속도 증가에 따른 매연저감율과 NOx증가율 변화량이 DI 디젤기관이 더 큰 것을 알 수 있으며, 이는 연료내에 포함된 산소성분이 연소를 개선시켜 연소온도 상승의 지배적 인자로 작용하기 때문으로 생각된다. 또한 DI 디젤기관의 배기배출물 변화율이 IDI 디젤기관에 비하여 더욱 큰 것을 알 수 있다.

전체적인 기관실험결과 매연 감소량은 DI 디젤기관에서는 EGBE 20%, IDI 디젤기관에서는 EGBE 10~15%에서 현저하게 감소하였으며, NOx의 증가율은 DI 디젤기관은 EGBE 15~20%, IDI 디젤기관은 10~15%에서 증가율이 감소됨을 알 수 있었다. 따라서 DI 디젤기관에 대한 EGBE의 최적혼합율은 20%, IDI 디젤기관에 대한 최적 혼합

율은 10%로 설정하여 추후의 실험을 수행하였다.

3.2 EGR방법 적용에 따른 배기배출물의 배출특성 비교

이상의 실험결과에서와 같이 경유에 함산소연료인 EGBE를 혼합하여 사용할 때 매연은 현저히 감소하며, 에너지소비율도 경유와 유사한 경향을 나타내지만, 디젤기관의 주요 규제 대상으로 부각되는 NOx의 배출농도는 EGBE의 혼합율이 증가함에 따라 지속적으로 증가되는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 디젤기관에서 NOx 저감방법의 하나로 알려진 EGR방법을 병행하여 사용하였으며, 특히 체적효율의 증대를 위하여 Oh 등⁽⁸⁾이 동일한 목적으로 제안한 Cooled EGR 방법을 적용하였다

Fig. 6은 각 기관의 최적의 EGBE 혼합연료를 적용할 경우 저회전속도와 고회전속도 영역에서 EGR율과 BMEP 변화에 따른 매연 배출량을 비교한 그래프이다. 양 기관모두 고부하 영역에서 EGR 20% 이상 적용 하였을 때 경유보다 매연이 많이 배출되는 특성을 보였으며, 특히 고부하영역에서 DI 디젤기관의 경우가 IDI 디젤기관보다 EGR율 증가에 따른 매연배출량이 더 크게 나타났다.

Fig. 7은 Fig. 6과 동일한 조건에서 각 기관의 최적의 EGBE 혼합연료를 적용할 경우 EGR율과 BMEP 변화에 따른 NOx 배출량을 경유대비 농도 비로 비교한 그림이다. DI 디젤기관은 EGR율 15%, IDI 디젤기관은 EGR율 10% 이상 적용시

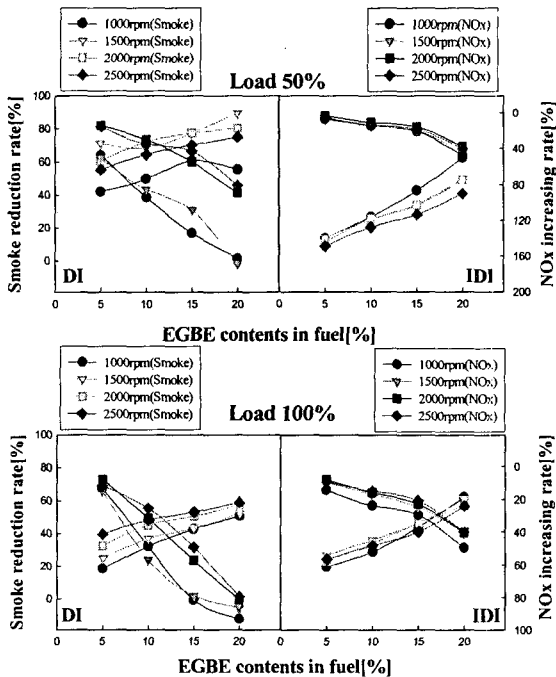


Fig. 5 Comparison of Smoke and NOx variation rates with various EGBE contents

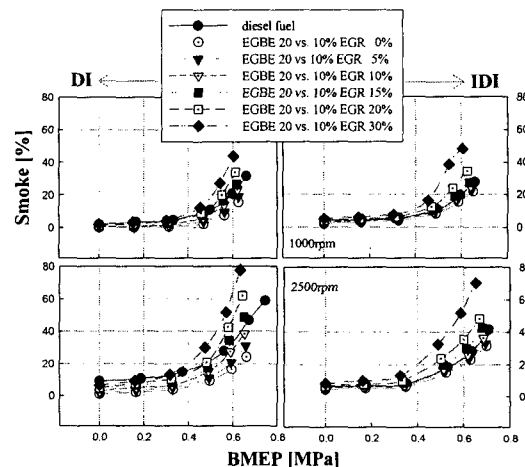


Fig. 6 Comparison of smoke under various EGR rates in DI and IDI diesel engines

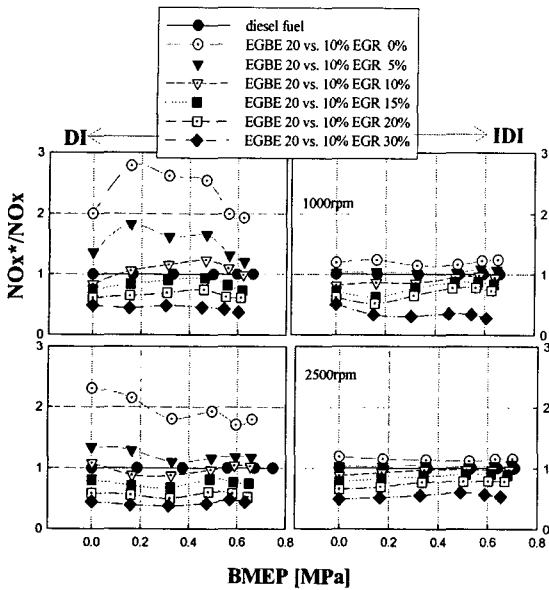


Fig. 7 Comparison of NOx under various EGR rates in DI and IDI diesel engines

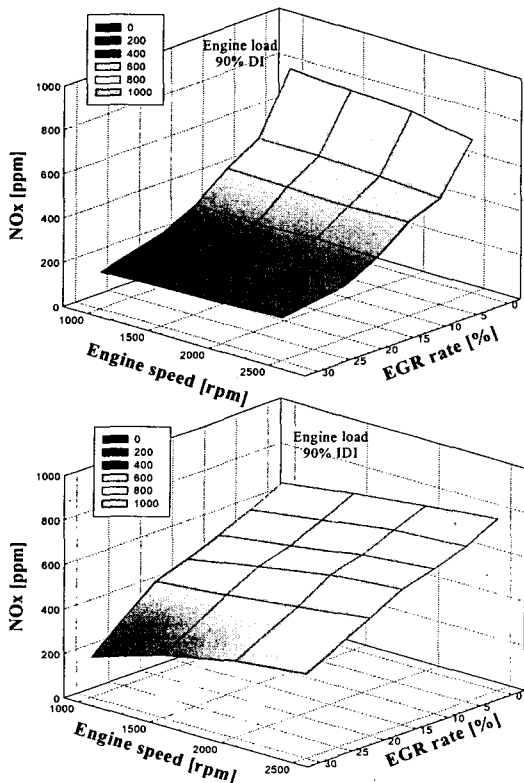


Fig. 8 Comparison of NOx reduction rate in DI and IDI diesel engines at load 90%

NOx가 경유보다 적게 배출되는 경향을 보였고 DI 디젤기관이 IDI 디젤기관보다 EGR에 대한 NOx의 변화량이 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 7에서 나타난 EGBE 혼합연료 적용시 EGR에 대한 NOx의 변화추이를 살펴보기 위하여 90%의 고부하 상태에서 NOx의 변화량을 각 기관별로 기관회전속도 변화에 따라 나타낸 것이다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 EGR율이 증가함에 따라서 NOx의 배출량은 급격하게 저감됨을 알 수 있으며, DI 디젤기관의 NOx 저감율이 IDI 디젤기관보다 더욱 현저함을 알 수 있다.

Fig. 9는 각 기관에 최적의 EGBE 혼합연료를 적용할 경우 기관회전속도 2000rpm에서 EGR율과 부하 변화에 따른 매연과 NOx의 배출특성을 비교하여 나타낸 것이다. 합산소연료를 사용하고 EGR을 적용한 경우에 고부하로 진행할수록 매연과 NOx의 변화량이 증가되는 것을 알 수 있다. 또한 중부하 이하에서는 NOx의 증가율이 크고

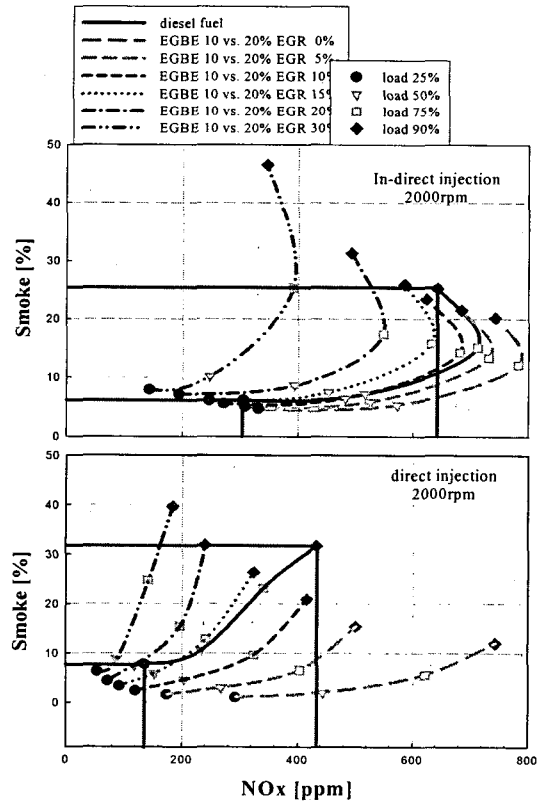


Fig. 9 Comparison of smoke and NOx under various EGR rates in DI and IDI diesel engines

고부하 영역으로 갈수록 매연의 증가율이 커지는 것을 알 수 있다. EGR율이 증가함에 따라 고부하 영역에서 매연증가율이 급격해지는 것을 볼 수 있는데 이는 높은 EGR율에서 급기중의 산소농도가 급격히 감소하여 불완전연소가 증가하기 때문으로 생각된다. 경유만을 사용한 경우와 비교하여 최적의 EGBE 혼합유를 사용한 경우에는 연소실형상에 따라 살펴보면 DI 디젤기관의 경우 저부하는 EGR을 10~15%, 중부하는 10%, 고부하는 10%에서 매연과 NOx가 동시에 저감하였고, IDI 디젤기관의 경우 저부하는 EGR을 10~30%, 중부하는 10~20%, 고부하는 10~15%에서 매연과 NOx가 동시저감 되는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

다량의 산소성분을 함유하고 있는 합산소연료인 EGBE를 상용경유에 체적비율로 혼합하여 DI 디젤기관과 IDI 디젤기관에 사용함으로써 EGBE 혼합율에 따른 기관성능 및 배기배출물 특성을 조사하고, 합산소연료 사용으로 인해 증가하는 NOx를 저감시키기 위하여 Cooled EGR 방법을 적용함으로써 합산소연료 내의 산소성분이 연소실형상변화와 EGR을 적용에 미치는 영향에 대하여 실험한 결과, 다음과 같은 결론에 도달하였다.

(1) 각기 다른 연소방식의 디젤기관에서도 합산소연료인 EGBE의 혼합율이 증가함에 따라 매연은 거의 선형적으로 현저하게 저감되는 경향을 나타내었다.

(2) EGBE의 혼합연료 적용시 IDI 디젤기관보다는 DI 디젤기관에서 매연의 저감율이 더욱 현저하였으며, DI 디젤기관은 최대 59%, IDI 디젤기관은 최대 44%의 현저한 매연저감 효과를 확인할 수 있었다.

(3) 매연의 저감과 NOx의 증가측면에서 EGBE의 최적혼합율은 DI 디젤기관에서는 20%, IDI 디젤기관에서는 10%로 나타났다.

(4) EGBE 혼합연료 적용시 매연과 NOx를 동시저감하는 EGR율은 기관부하에 따라 약간의 차

이는 있지만, DI 디젤기관에서는 15% 내외, IDI 디젤기관에서는 10~15%임을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Akasaka, Y. and Sakurai, Y., 1994, "Effects of Oxygenated Fuel and Cetane Improver on Exhaust Emissions from Heavy-duty DI Diesel Engines," *SAE paper* 942023.
- (2) Liotta, F. J. and Jr., Montalvo, D. M., 1993, "The Effect of Oxygenated Fuels on Emissions from a Modern Heavy-Duty Diesel Engine," *SAE paper* 932734.
- (3) Stoner, M. and Litzinger, T., 1999, "Effects of Structure and Boiling Point of Oxygenated Blending Compounds in Reducing Diesel Emissions," *SAE paper* 1999-01-1475.
- (4) Oh, Y. T. and Choi, S. H., 2003, "An Experimental Study on Simultaneous Reduction of Smoke and NOx in a Agricultural Diesel Engine," *Transaction of KSAE*, Vol. 11, No. 3, pp. 85~91.
- (5) Vertin, K. D., 1999, "Methylal and Methylal-Diesel Blended Fuels For Use In Compression Ignition Engines," *SAE paper* 1999-01-1508.
- (6) Sirman, M., Owens, E. and Whitney, K., 1998, "Emissions Comparison of Alternative Fuels in an Advanced Automotive Diesel Engine," *Southwest Research Institute Report for DOE and US Army TARDEC*, Interim Report TFLRF No. 338.
- (7) Oh, Y. T. and Choi, S. H., 2002, "An Experimental Study on Exhaust Emission Characteristics by Various Oxygenated Additives in Diesel Engine," *Transaction of KSAE*, Vol. 10, No. 3, pp. 101~110.
- (8) Oh, Y. T. and Choi, S. H., 2002, "An Experimental Study on Analyses and Exhaust Emission Characteristics with EGBE Addition in D.I. Diesel Engine," *Transaction of the KSME(B)*, Vol. 26, No. 3, pp. 498~506.