

< 논문 >

디젤기관에서 DMM 첨가와 EGR 방법 적용에 의한 기관성능 및 매연과 NOx의 동시저감 연구

최 승 훈[†] · 오 영 택^{*}

(2005년 7월 5일 접수, 2005년 11월 30일 심사완료)

A Study on Performance and Simultaneous Reduction of Smoke and NOx Emission by an DMM Addition and Application of EGR Method in a Diesel Engine

Seunghun Choi and Youngtaig Oh

Key Words: DMM(Dimethoxy Methane), Oxygenated Fuel(함산소연료), EGR(배기가스 재순환), Alternative Fuel(대체연료), Smoke(매연), NOx(질소산화물)

Abstract

Dimethoxy methane(CH₃-O-CH₂-O-CH₃), also known as methylal or DMM, is an oxygenated additive that contains 42.5% oxygen by weight and is soluble in diesel fuel. It is a colorless liquid and a gas-to-liquid chemical that has been evaluated for use as a diesel fuel component. Experiments were conducted by using the five blends with different volumetric percentage of DMM(2.5, 5, 7.5, 10, and 12.5%) in baseline diesel fuel. The test engine was single cylinder, four stroke, DI diesel engine unmodified. Also, data was collected for steady state operation at 24 engine speed-load conditions. 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 DMM blends were reduced substantially in comparison with conventional diesel fuel. These results indicate that DMM may be an effective blendstock for diesel fuel as an environment-friendly alternative fuel. 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

전세계적으로 환경오염과 에너지 문제에 대한 위기의식이 고조됨에 따라 자동차산업에 있어서 다양한 종류의 연료를 사용할 수 있고 높은 열효율과 고압축비를 적용할 수 있으며 희박 연소영역에서 운전되는 디젤기관은 연료 경제성과 환경

적 측면에서 주목받고 있으나 가솔린기관에 비해 입자상 물질(PM)과 질소산화물(NOx)이 더 많이 배출되는 문제를 가지고 있다. 일반적으로 PM을 감소시키기 위한 배기배출물조건을 맞추다보면 NOx가 증가되는 trade-off관계를 확인할 수 있는데 디젤기관에서 이러한 PM과 NOx를 줄이기 위한 대표적인 방법에는 다음과 같은 것들이 있다.

(1) 엔진설계 변경방법- 고압분사에 의한 연소 개선(HPI), 예혼합 압축착화 연소방식(HCCI), 분사시기조정, 배기가스재순환(EGR)

(2) 후처리장치의 사용- 입자상물질트랩, DPF, NOx 트랩, DeNOx 촉매

(3) 함산소연료 첨가제 및 바이오연료 사용

[†] 책임저자, 회원, 전북대학교 기계공학부

E-mail : medr@chonbuk.ac.kr

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

^{*} 회원, 전북대학교 기계공학과, 전북대학교 부설 공학연구원 공업기술연구센터

이 중 합산소연료를 적용한 연구는 최근에 식물유를 기초로 하여 시작되었으며 카보네이트, 에테르, 에스테르, 알콜 계열의 다양한 연료가 적용되었다. Akasaka 등⁽¹⁾은 입자상물질 에미션은 합산소연료의 분자구조에는 관계없이 연료자체의 산소함량에 의존한다고 보고하고 있으며, 반면에 Liotta 등⁽²⁾은 에테르계와 알콜계 연료를 사용한 연구에서 특정 형태의 합산소연료가 입자상물질 배출을 감소시키는데 더욱 효과적이라고 밝혔다. 또한, Matthew 등⁽³⁾은 합산소연료의 분자구조와 비등점이 soot와 NOx에 미치는 영향을 조사하기 위한 실험을 하기도 하였다. Oh 등⁽⁴⁾은 다종의 합산소연료를 이용한 연구에서 합산소연료에 포함된 산소성분이 고부하영역에서 디젤기관의 공기이용율을 향상시켜 준 결과 매연이 저감되었음을 보고하고 있다.

Dimethoxy methane(이하 DMM)은 화장품이나 약품에 사용되기도 하며 가정용이나 산업용 스프레이 용제로 이용되는 무색의 합산소연료로서 최근에 Sirman 등⁽⁵⁾은 EGR을 병행하여 DMM 15%혼합유를 이용하여 52%의 PM감소와 4% NOx저감을 이룰 수 있었는데 PM은 운전 전영역에 걸쳐 감소하는 반면 NOx는 EGR의 작동여하에 따라 증가되는 구간이 존재한다고 보고하고 있으나, 기관의 전체적인 운전구간에 걸친 연구는 거의 없다.

본 연구에서는 디에테르계 합산소연료인 DMM을 상용경유에 혼합, 디젤기관에 적용함으로써 기관성능 및 배기 배출 특성을 분석하여 합산소연료의 유용성을 확인하고자 하였으며, 증가하는 NOx를 저감시키기 위한 대책으로 cooled EGR을 병행하여 매연과 NOx의 동시저감을 이루고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 기관은 단기통, 4행정, 수냉식, 직접분사식 디젤기관으로서 Table 1에 기관 사양을 나타내었으며, Table 2에 합산소연료인 DMM의 특성을 경유와 비교하였다. 또한, Fig. 1에 실험장치의 개략도를 나타내었다.

본 실험은 상용 경유에 합산소연료인 DMM을 체적비율로 각각 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5% 혼합한 연료를 사용하여 그에 따른 기관 성능 및 배기 배출물 특성을 분석하였다. 또한, 합산소연료 사용으로 인해 증가되는 NOx를 저감시키기 위한 방법으로 EGR장치를 도입하였다. 흡기관과 배기관

에서 CO₂농도를 측정하여 EGR율을 구하기도 하지만,⁽⁶⁾ 본 연구에서는 EGR율을 계산할 때 전체 연소실 흡기량에 대한 EGR된 양, 즉 새로운 흡입공기량의 감소율로 식 (1)을 이용하였다.

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

여기에서 V₀는 EGR을 수행하지 않았을 경우의 흡입공기량(m³/h), V_a는 EGR을 수행했을 경우의 새로운 흡입공기량이다.

본 실험은 1000, 1500, 2000, 2500rpm의 기관회전속도에서 실험하였으며, 실험모드를 설정하기 위하여 기관의 부하변화는 각각의 회전속도를 일정하게 유지한 상태에서 인젝션 펌프의 랙을 완전히 당겼을 경우를 전부하로 하며 이때의 토크 값을 일정 비율(0, 25, 50, 75, 90, 100%)로 나눔으로써 24개의 테스트 모드를 설정하여 각각의 모드에서 기관이 정상상태로 운전되도록 충분히 구동한 후 데이터를 취득하였다. 매연 농도의 측정에는 매연측정장치(HBN-1500)를 사용하여 기관으로부터 300mm 하류에서 일정량의 배기가스를 흡입한 후, 여과지에 흡착된 매연의 농도를 측정하였으며, 매연 농도는 동일 조건에서 수회 측정한 후 유사한 3개의 값을 평균하여 취하였다. CO₂ 및 NOx 농도는 배기 매니폴드로부터 약 400mm 하류에서 배기관에 채취계를 연결하여 배기가스 분석기(Mod. 588)에 일정량의 배기가스를 지속적으로 흡입시킴으로써 측정하였으며 샘플링 튜브 중간에 필터를 장착하여 실험 조건의 변화에 따라 필터를 교체함으로써 측정값의 오차를 최대한 줄이고자 하였다.

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	DMM
Molecular formula	C ₁₂ H ₂₆	CH ₃ OCH ₂ OCH ₃
Density, kg/ℓ @15°C	0.8309	0.8668
Molecular weight	226	76.10
Heating value [MJ/kg]	43.12	23.26
Oxygen content(%)	0	42.5

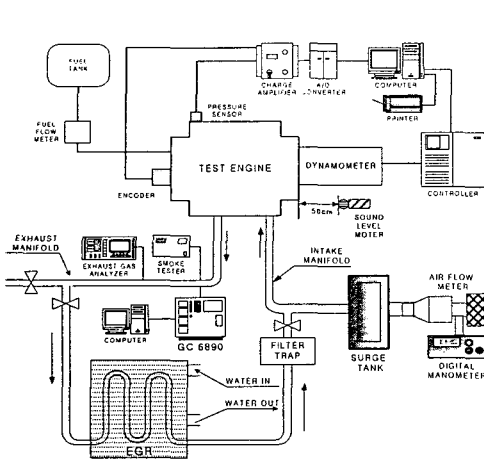


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

3. 실험결과 및 고찰

3.1 기관성능 및 배기배출 특성 비교

Fig. 2는 기관 회전속도 2000rpm에서 상용경유에 합산소연료인 DMM을 체적비율로 혼합한 연료를 사용하여 부하변화에 따른 기관 성능을 경유와 비교하여 나타낸 것이다. 기관의 출력성능을 나타내는 출력과 토크는 경유에 비해 고부하영역에서 국부적으로 약간 저하되는 경향이 있지만 이는 연료들 사이의 발열량의 차이로 인해 에너지밀도가 다르기 때문이며 이를 BSEC측면에서 보면 거의 유사한 경향을 나타냄을 알 수 있다. 이는 DMM의 발열량이 경유의 54% 정도에 불과하지만 혼합율이 12.5% 미만이고, 자체 내 함유된 산소성분으로 인해 연소가 개선되었기 때문으로 생각된다.

Fig. 3은 기관부하 90%에서 회전속도와 합산소 혼합율에 따른 매연과 NOx의 배출특성을 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 매연은 혼합율이 높고 기관 회전속도가 낮을수록 적게 배출되는데 반해, NOx는 증가하는 경향을 보이고 있다. 이로써 본 실험에서 매연과 NOx의 배기배출특성이 전체적으로 trade-off 관계를 가짐을 확인할 수 있었다.

Fig. 4는 DMM을 체적비율로 2.5%에서 12.5%까지 혼합한 경우에 기관부하변화에 따른 매연 농도비를 나타낸 것이다. DMM 혼합유들이 경유에 비해 전체적으로 매연이 적게 배출되는 것을

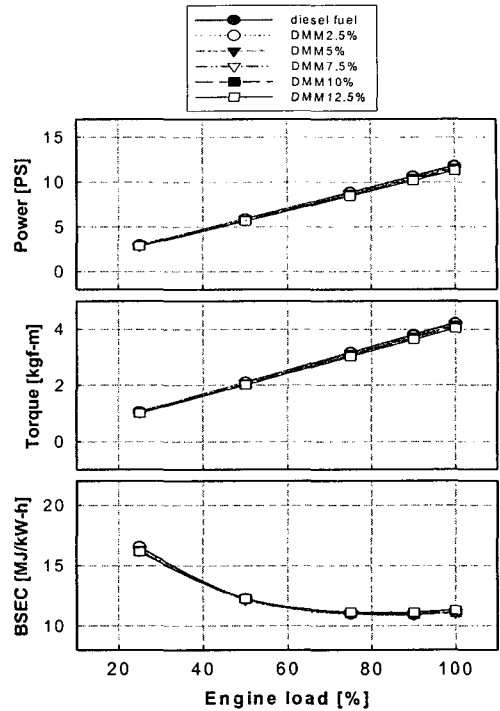


Fig. 2 Engine performance under various engine loads for different oxygenated fuel content at 2000rpm

알 수 있으며 혼합율이 증가함에 따라 경유에 대한 매연농도비가 더 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 합산소연료를 사용한 경우에 가연성 혼합기 내의 충분한 산소성분 때문에 매연의 생성자체를 연소과정 전반에 걸쳐 억제할 수 있기 때문으로 생각된다. 또한, 혼합율 5%이상을 적용할 때 경유에 비해 매연의 저감폭이 뚜렷해지는 것을 확인할 수 있었으며, 10%이상에서는 그 변화율이 감소함을 알 수 있었다.

Fig. 5는 Fig. 4와 동일한 조건하에서 기관부하 변화에 따른 NOx 농도비를 나타낸 것이다. 전체적으로 DMM 혼합연료들이 경유보다 NOx를 더 많이 배출하는 것을 알 수 있으며 혼합율이 증가함에 따라 농도비가 거의 유사하게 증가 되는 것을 볼 수 있다. 이는 합산소연료의 비율만큼 경유의 분사량이 줄어들어 산소농도가 증가하고, 이로 인하여 연소속도도 증가하며 초기에 급격한 연소가 발생해 연소온도와 압력이 상승함으로써 NOx가 증가되기 때문으로 생각된다. 또한, 혼합율 10%이상에서 NOx의 증가폭이 커지는 것을

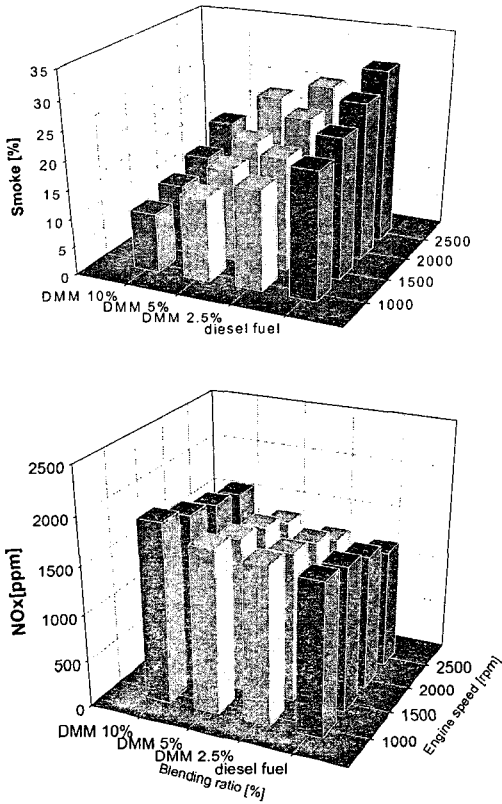


Fig. 3 Comparison of Smoke and NOx emission for different oxygenated fuel content under various engine speed at load 90%

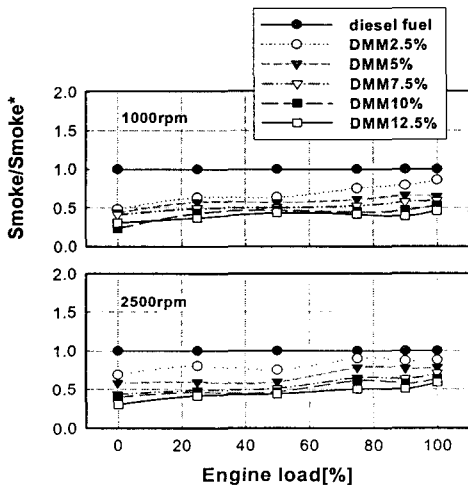


Fig. 4 Comparison of smoke on DMM contents under various load and engine speed

알 수 있는데 이를 Fig. 3에서의 매연배출 특성과 고려해 볼 때 본 실험에서 최적의 DMM 혼합율은 5~7.5%로 판단할 수 있다.

Fig. 6은 전부하에서 연료내의 산소함유량에 따른 매연의 저감율과 NOx의 증가율을 비교하여 나타낸 것이다. 전부하상태에서 매연은 산소함유량이 많아질수록 거의 선형적으로 비례하여 감소

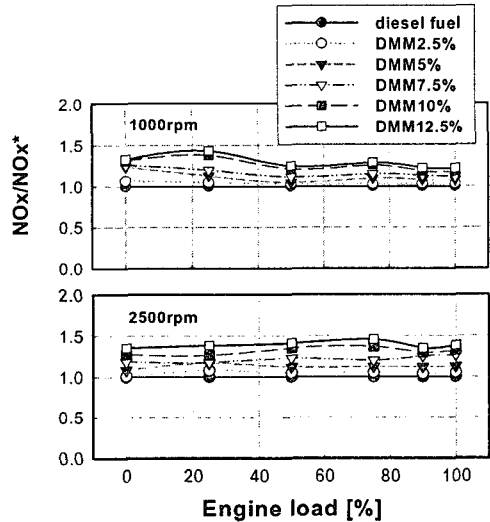


Fig. 5 Comparison of NOx emission for different oxygenated fuel content under various load and engine speed

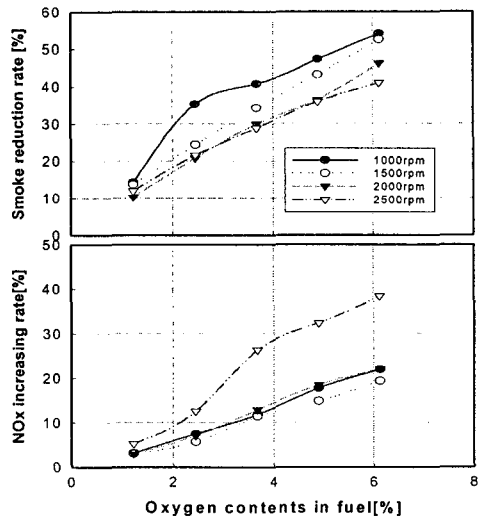


Fig. 6 Comparison of smoke and NOx emission of diesel fuel vs. oxygenated fuels on EGR rate under various engine loads at 2500rpm

되는 것을 알 수 있다. 또한 NOx측면에서도 전 회전속도 영역에서 산소함유량이 많아짐에 따라 NOx 배출농도가 거의 선형적으로 증가되는 것을 알 수 있는데, 이는 연료 내에 포함된 산소성분이 연소를 개선시켜 연소온도상승의 지배적 인자로 작용하기 때문으로 생각된다.⁽⁷⁾ 이로써 디젤기관의 주요 배기 배출물인 매연과 NOx의 배출량에 연료내의 산소성분이 직접적인 영향을 끼친다는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 EGR방법 적용에 따른 배기배출물의 배출 특성 비교

상용 경유에 합산소연료를 첨가함에 따라 배기가스 중의 매연은 선형적으로 감소하는 경향을 보였지만 합산소연료의 체적비율이 증가함에 따라 NOx의 배출농도가 증가되는 문제가 발생하였다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 NOx 저감 방법으로 알려진 cooled EGR방법을 사용하였다.

본 실험에서는 혼합실험결과 매연의 저감율과 NOx의 증가율에서 타 혼합율에 비하여 큰 변화를 나타내지 않은 DMM 5%와 7.5%에서 각각 cooled EGR방법을 적용하여 실험하였다.

Fig. 7은 DMM 5%를 적용한 경우에 50%의 중부하 영역에서 기관회전속도와 EGR을 변화에 따른 매연과 NOx의 배출특성을 나타낸 것이다. 기관회전속도가 증가하고 EGR율이 상승함에 따라 매연의 배출농도는 증가하고 NOx의 배출농도는 감소하는 상관관계를 형성함을 알 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 7과 동일한 조건의 50% 중부하 영역에서 기관회전속도와 EGR을 변화에 따른 매연과 NOx의 배출특성을 나타낸 것이다. 기관회전속도와 EGR율이 증가함에 따라 매연배출농도는 증대되며 NOx배출농도는 감소하는 것을 알 수 있다. 이로써 DMM 5% 혼합율과 마찬가지로 DMM 7.5% 혼합율을 사용하고 EGR방법을 적용하는 경우에도 매연과 NOx는 상관관계를 유지하

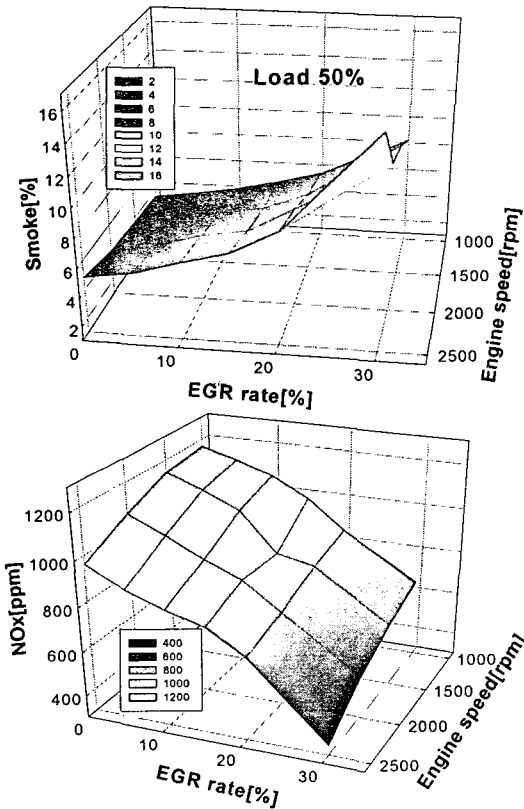


Fig. 7 Trade-off relation between smoke & NOx under various EGR rates with DMM 5%

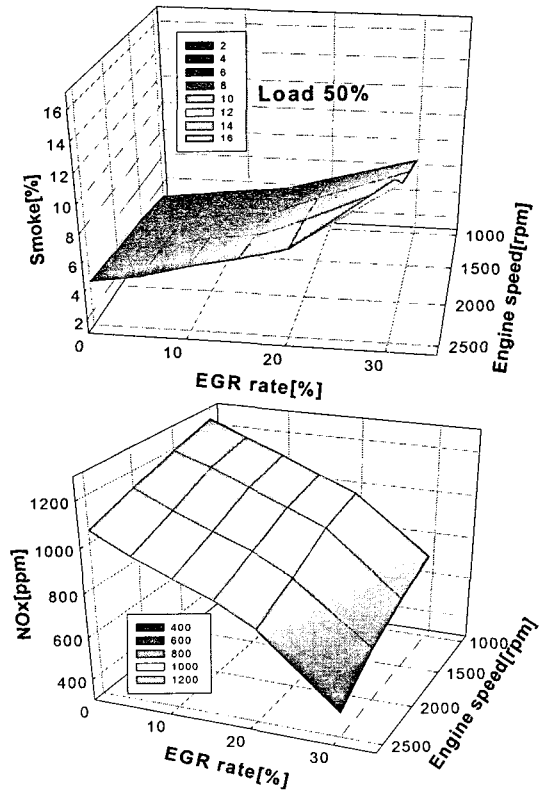


Fig. 8 Trade-off relation between smoke & NOx under various EGR rates with DMM 7.5%

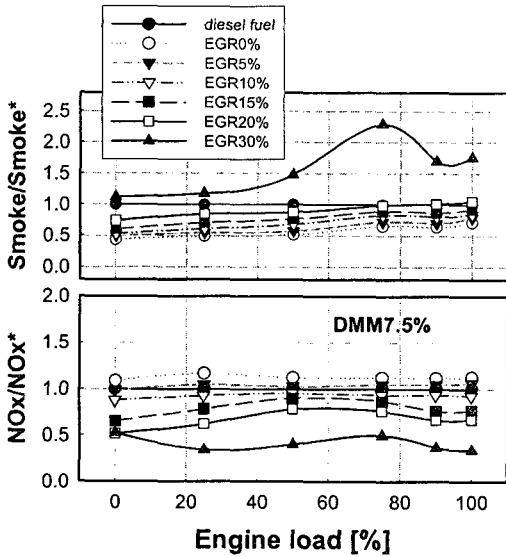


Fig. 9 Comparison of smoke and NOx emission of diesel fuel vs. oxygenated fuels on EGR rate under various engine loads at 2500rpm

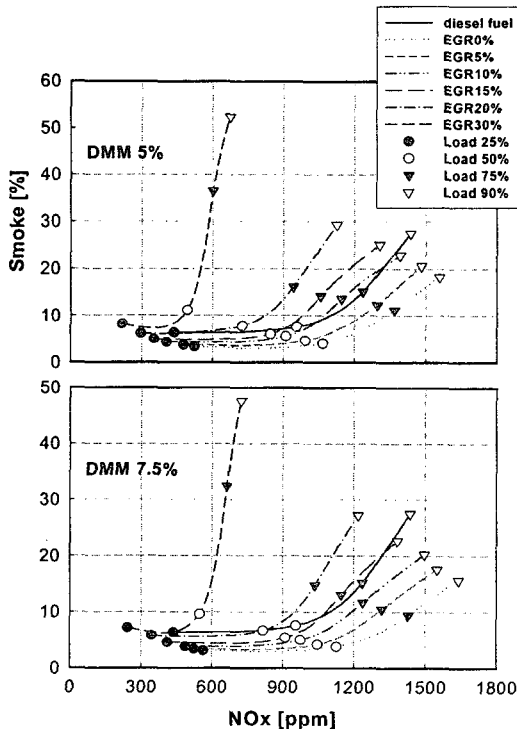


Fig. 10 Trade-off relations between smoke and NOx emissions for oxygenated blended fuels on EGR rates at full load

는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 9는 DMM 7.5% 혼합유에서 EGR을 변화에 따른 경유에 대한 매연과 NOx의 농도비를 나타낸 것이다. 30% EGR율을 적용한 경우에는 공급되는 산소량 부족으로 전체적으로 매연이 크게 증가되며 대부분 EGR율을 증가시킴에 따라 매연 배출량은 증가하고 NOx 배출량은 감소하는 경향을 보인다. 20% 이상의 EGR율을 적용하면 50% 이상의 고부하 영역에서 경유만을 사용했을 때보다 매연이 더 많이 배출되는 것을 볼 수 있는데, 이는 재순환되는 배기가스로 인해 연소실내로 흡입되는 공기 중의 산소량이 상대적으로 적어져 불완전연소가 형성되기 때문으로 생각된다. 또한 EGR율이 증가함에 따라 NOx가 현저하게 감소되는 것을 볼 수 있는데 이는 연소실내로 흡입되는 일부 흡기가 불활성가스인 배기가스로 치환되어 연소속도가 늦어지고 연소온도가 낮아져 NOx가 감소되는 것으로 생각된다.

Fig. 10은 DMM 7.5% 혼합유를 사용했을 경우의 매연과 NOx의 상반관계를 나타내고 있다. 경

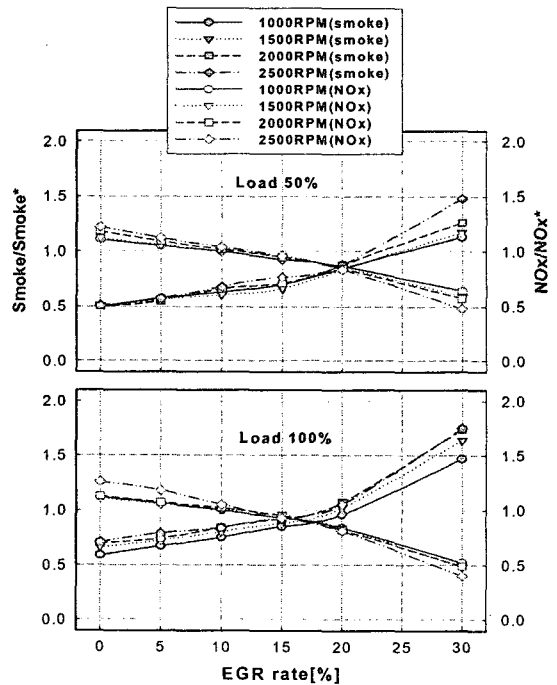


Fig. 11 Variation of Smoke & NOx for DMM 7.5% blend under various EGR rate at engine load 50% and 100%

유보다 NOx를 저감시키기 위해서 10% 이상의 EGR율을 적용해야 되며 EGR율 20% 이후에서 경유의 매연배출량을 초과하고 있다. 이는 합산소연료의 일종인 DMM을 혼합한 경우 혼합 연료내의 산소성분이 EGR 적용 시 부족한 급기 중의 산소를 보완하는 역할을 하고 있기 때문에 산소량이 많을 수록 매연저감효과가 증대되는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 EGR을 변화에 따른 매연과 NOx의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 매연과 NOx의 trade-off 관계를 확인할 수 있었다. 또한, 5%와 7.5% DMM 혼합연료를 적용하고, 10~15% 정도의 EGR을 디젤기관에 적용하였을 경우에 경유만을 적용한 경우와 비교하여 전체적인 매연과 NOx 배출물의 동시저감이 가능함을 알 수 있었다.

4. 결 론

직접분사식 디젤기관에 합산소연료인 DMM을 2.5~12.5vol-% 혼합하여 적용하고, 매연의 저감과 NOx의 증가율측면에서 급격한 변화를 나타내지 않은 DMM 5%와 DMM 7.5%를 최적의 혼합율로 설정하였으며, NOx의 저감방법으로서 EGR방법을 병행함으로써 그에 따른 기관성능 및 배기배출물 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

(1) DMM을 경유와 혼합하여 적용할 경우 최대 55% 정도의 현저한 매연저감효과를 확인할 수 있었다.

(2) 기관의 운전조건이나 DMM 혼합율에 따라 최적 EGR율은 유동적이긴 하지만, 본 실험에서 합산소연료와 EGR방법을 병행하여 상반관계에 있는 매연과 NOx를 동시저감할 수 있는 최적조건이 존재함을 확인할 수 있었다.

(3) 매연과 NOx를 동시저감하기 위한 최적의 조건은 DMM 혼합율 5~7.5%이며 EGR율은 10~15%임을 확인할 수 있었다. 또한, DMM 7.5%를 적용

하고 EGR율 15%를 적용한 경우 2500rpm, 90% 부하 상태에서 매연은 약 13%, NOx는 8%의 동시저감이 이루어짐을 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 No. 942023.
- (2) Liotta, Jr. F. J. and Montalvo, D. M., 1993, "The Effect of Oxygenated Fuels on Emissions from a Modern Heavy-Duty Diesel Engine," SAE Paper No. 932734.
- (3) Matthew, S. and Thomas, L., 1999, "Effects of Structure and Boiling Point of Oxygenated Blending Compounds in Reducing Diesel Emissions," SAE Paper No. 01-1475.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) Nakajima, Y., Sugihara, K. and Muranaka, S., 1981, "Effects of Exhaust Gas Recirculation on Fuel Consumption," *Proc. Instn. Mech. Engrs.* Vol. 195, pp. 369~376.
- (7) Choi, S. H. and Oh, Y. T., 2002, "The Experimental Study on Emission Reduction by Oxygenate Additive in D.I. Diesel Engine," *Transaction of KASE*, Vol. 10, No. 4, pp. 33~42.