

농용 디젤기관에서 매연과 NO_x의 동시저감에 관한 실험적 연구

최 승 훈¹⁾ · 오 영 택²⁾

전북대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 전북대학교 기계공학과²⁾

An Experimental Study on Simultaneous Reduction of Smoke and NO_x in a Agricultural Diesel Engine

Seunghun Choi¹⁾ · Youngtaig Oh^{*2)}

¹⁾Graduate School of Mechanical Engineering, Chonbuk National University, Chonbuk 561-756, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Chonbuk National University, The Research Institute of Industrial Technology, Chonbuk 561-756, Korea

(Received 9 December 2002 / Accepted 5 March 2003)

Abstract : In this study, the potential possibility of oxygenated fuel such as Methyl tertiary butyl ether (MTBE) was investigated for the sake of exhausted smoke reduction from diesel engine. MTBE has been used as a fuel additive blended into unleaded gasoline to improve octane number, but the study of application for diesel engine was incomplete. Because MTBE includes oxygen content approximately 18%, it is a kind of oxygenated fuel that the smoke emission of MTBE is reduced remarkably compared with commercial diesel fuel. But, the NO_x emission of MTBE blended fuel is increased compared with commercial diesel fuel. And, it was tried to analyze not only total hydrocarbon but individual hydrocarbon components from C₁ to C₆ in exhaust gas using gas chromatography to seek the reason for remarkable reduction of smoke emission. Individual hydrocarbons(C₁ ~ C₆) as well as total hydrocarbon of oxygenated fuel are reduced remarkably compared with diesel fuel. And, the effects of exhaust gas recirculation(EGR) on the characteristics of NO_x emission has been investigated, too. It was found that simultaneous reduction of smoke and NO_x was achieved with oxygenated fuel and cooled EGR method.

Key words : Diesel engine(디젤 기관), Oxygenated fuel(합산소연료), Exhaust gas recirculation(배기가스 재순환), Methyl tertiary butyl ether (MTBE), Analysis(분석)

1. 서론

디젤기관에 관한 연구는 고출력과 저연비 실현에 관한 연구와 배출가스 저감에 관한 연구로 크게 나눌 수가 있으며, 전자는 CO₂배출량의 저감을 가져오고, 후자는 NO_x와 입자상물질의 저감을 주요 목표로 하고 있다.¹⁾

배출가스 저감을 위한 방법으로는 엔진설계변경

기술과 연료의 성상 등에 변화를 주어 연료가 연소실내에서 연소하여 배출되기 전에 배출가스를 저감시키기 위한 전처리 방법과 연료가 연소한 후에 연소실 밖에서 촉매장치나 배출가스 재순환(EGR; exhaust gas recirculation) 방법 등을 사용하여 배출가스를 처리하는 후처리 방법으로 나눌 수가 있다.

전처리 방법은 합산소연료를 상용 경유와 혼합하는 방법, 개질연료를 사용하는 방법 등이 제시되고 있다. 합산소연료를 이용한 기존의 연구로 Liotta 등²⁾

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

은 글리콜 에테르, 방향족 알콜, 지방족 알콜, 폴리 에테르 폴리올 등을 이용한 연구에서 글리콜 에테 르가 매연과 알데히드, 케톤, 포름알데히드 등을 저 감시키는데 매우 유용함을 밝혔다. Murayama 등³⁾ 은 합산소연료와 EGR 방법을 병용한 연구에서 매 연과 NOx를 동시에 저감할 수 있는 가능성을 입증 하였다. 이러한 합산소연료의 일종인 MTBE에 대한 연구에서, Kajitani 등⁴⁾은 예연소실식 디젤기관에서 5, 10, 15vol-%의 혼합연료로 실험한 결과 NOx와 검댕(soot)를 동시에 저감하였다는 보고가 있으나, 타 합산소연료에 비하여 MTBE를 디젤기관에 응용한 연구는 거의 없는 실정이다. 또한, 대부분의 배출가 스 저감에 관한 연구는 통상적인 배출가스 분석기 에 의한 PM이나 THC(total hydrocarbon)의 배출량 측정으로 각 구성성분에 대한 정확한 정량적인 정 보를 주지 못하기 때문에 성분조성을 면밀하게 파악할 수가 없었다.

따라서, 본 연구에서는 직접분사식, 농용 디젤기 관에 합산소연료의 일종인 MTBE를 각 체적비율로 혼합사용한 경우 합산소성분과 산소량이 배출가스 배출특성에 미치는 영향을 조사하고, 가스 크로마 토그래피를 사용한 분석을 통하여 배출가스 중의 매연 배출량과 각 미연탄화수소성분과의 관계를 규 명하고자 하였다. 그리고, 합산소연료를 사용할 경 우 증가되는 NOx를 저감시키기 위하여 EGR방법을 적용하여 최적의 EGR율을 구하여 매연과 NOx의 동시저감을 이루고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 기관의 사양은 Table 1에, 사용된 연료의 특성은 Table 2에 각각 나타내었으며, 실험 장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 본 실험은 일반적인 상용 경유와 에테르게 합산소연료인 MTBE를 체적 비율로 2.5, 5, 10, 15vol-%를 경유에 혼합한 4가지의 연료를 이용하여 기관의 각 회전속도에서 무부하, 25%, 50%, 75%, 90% 및 전부하의 경우에 기관 성능 과 배출가스를 측정하였다. 본 실험에서의 부하변 화는 기관 회전속도를 일정하게 유지한 상태에서 인젝션 펌프의 랙을 완전히 당긴 상태를 전부하로 설정하고, 이 토크값을 일정 비율(%)로 변화시키면

서 실험하였습니다.

매연 농도의 측정은 매연 측정장치(Hesbon; HBN-1500)를 사용하여 기관으로부터 300mm 하류 에서 일정량의 배출가스를 흡입한 후, 여과지에 흡 착된 매연의 농도를 측정하였으며, 매연 농도는 동 일 조건에서 각각 3회 측정하여 평균값을 취하였다. NOx의 측정은 배기 매니폴드로부터 약 400mm 하 류에서 화학루미네스스 방식의 분석기(Motor branch; Mod. 588)로 일정량의 배출가스를 흡입하도 록 하여 배출가스 샘플링 농도의 오차를 줄였다.

가스 크로마토그래피를 이용한 각 탄화수소류의 분석 실험은 매연저감 측면에서 상당한 효과가 있 으면서 질소산화물은 경유와 유사하게 배출한

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
Injection timing	BTDC 23°C A

Table 2 Properties of test fuels

	Diesel fuel	MTBE
Molecular formula	C ₁₆ H ₃₄	C ₅ H ₁₂ O
Stoichiometric air fuel ratio	1 : 14.9	12.6 : 1
Heating value[MJ/kg]	43.12	32.1
Oxygen content(%)	0	18.16

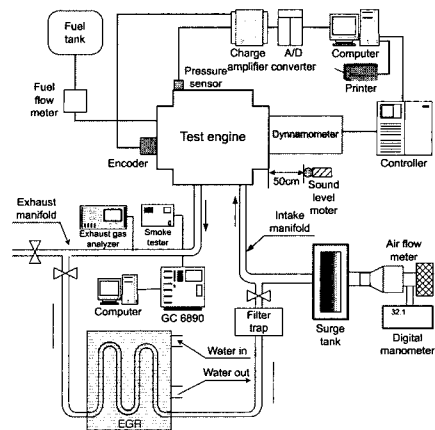


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

MTBE 10vol-%를 경유에 혼합한 경우를 최적의 혼합물로 설정하여 분석, 비교하였다. 배출가스 성분 측정을 위한 가스 크로마토그래피의 사양은 Table 3에 표시하였으며, 각 실험조건에서 가스 크로마토그래피를 통하여 나타난 크로마토그램의 피크 면적을 비교하여 탄화수소가 매연농도에 미치는 영향을 조사하였다. 또한, EGR율을 구하기 위하여 전체 연소실 흡기량에 대한 EGR된 양, 즉 새로운 흡입공기량의 감소율로서 (1)식⁵⁾을 이용하였다.

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

여기에서 V_0 는 EGR을 수행하지 않았을 경우의 흡입 공기량(m^3/h), V_a 는 EGR을 수행했을 경우의 새로운 흡입공기량이다. 또한, 각 기관 부하에서 45~140℃까지 변화하는 EGR 되는 가스의 온도는 냉각 시스템을 거쳐 20℃ 정도로 유지하였다.

Table 3 Measurement conditions of GC

GC	Hewlett Packard 6890GC
Column	HP-PLOT/Al ₂ O ₃ 30m × 0.53mm × 15.0 μm 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 MTBE 혼합물에 따른 배출물 특성

Fig. 2는 경유와 경유에 MTBE를 각 체적비율로 혼합하여 사용한 경우 각 회전속도에서 부하변화에 따른 매연 배출특성을 나타낸 것이다. 디젤기관의 특성상 공기이용율이 충분한 저회전속도, 저부하에서는 MTBE를 혼합한 경우 매연 배출량의 차이는 미소하지만, 기관의 회전속도가 증가함에 따라 체적효율이 저감되는 고속영역과 공급 연료량이 많아지는 고부하영역에서는 매연 배출량의 현저한 차이를 나타내며, MTBE 10vol-%를 혼합한 경우 경유만을 연료로 사용한 경우에 비하여 최대 약 43%의 저감효과가 있었다. 이와 같은 매연 저감효과는 고부하, 고회전속도로 진행할수록 현격하게 차이가 날 수 있다. 이러한 매연은 연소실내에 공기가 부

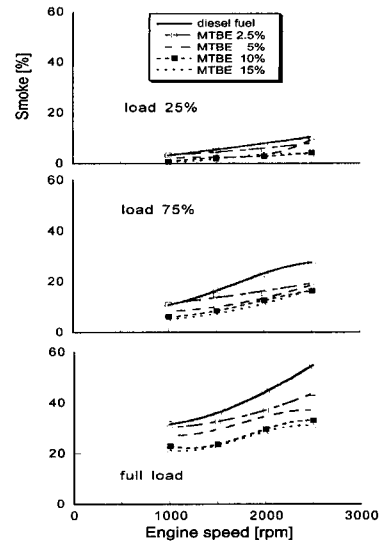


Fig. 2 Comparison of smoke density for difference of oxygenated fuel content under varying load and engine speed

족한 분위기에서 연료의 열분해과정을 거친 후, 축·중합과정과 탈수소 반응을 거치면서 성장과정과 산화과정을 마친 후 산화되지 못한 부분이 배기과정 중에 대기 중으로 배출되는 것¹⁾이다. 즉, MTBE를 사용한 경우에는 저부하에 비해 상대적으로 연소실내의 공기가 부족한 고부하, 고회전속도 분위기에서 연소실내에 국부적으로 부족한 산소성분을 MTBE내의 산소성분이 충당하여 산화과정을 촉진시켜 매연이 현저히 저감된 것으로 생각된다.

Fig. 3은 기관의 속도변화에 따른 NOx의 배출특

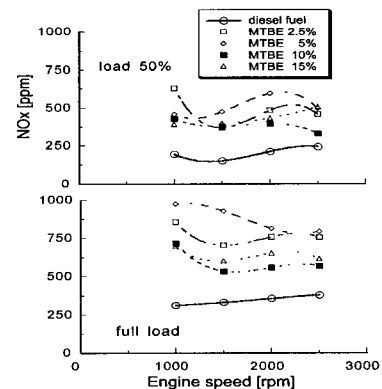


Fig. 3 Comparison of NOx concentration for difference of oxygenated fuel content under varying load and engine speed

성을 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이 합산소연료인 MTBE를 첨가한 경우, 전체적으로 경유보다 NOx의 배출량이 증가하는 경향을 보이고 있으며, 저부하영역에서의 차이보다 고부하영역에서의 배출량의 차이가 상당히 증가하였고, 2.5vol-%의 MTBE를 첨가한 경우에는 소량의 혼합량임에도 불구하고 NOx배출량이 급격하게 증가하며, MTBE 10vol-%를 첨가한 경우에는 다른 혼합율에 비하여 NOx가 상대적으로 적게 배출됨을 알 수 있다. 이는 MTBE 2.5vol-%를 혼합한 경우에는 연소 개선 효과에 의한 연소실내의 온도상승을 유도하여 연소실내의 온도가 높아진 때문으로 생각되며, MTBE 10vol-%를 혼합한 경우에는 합산소성분에 기인하여 연소효율이 높아지기는 하지만, 발열량의 저하로 연소온도가 낮아져 NOx의 배출량이 약간 저하된 것으로 생각된다. 전체적인 NOx배출의 증가원인은 MTBE내에 포함된 산소성분이 연소가 활발해지는 후연소기간에 화염온도를 상승시켜 NOx의 배출량을 증가시킨 것⁶⁾으로 생각된다.

Fig. 4는 중부하인 load 50%와 전부하에서의 에너지소비율을 비교한 것이다. 합산소연료인 MTBE는 경유에 비하여 발열량이 약 74% 정도로 MTBE를 최대 혼합한 15%의 경우에 발열량의 차이는 4.1%이지만, 에너지소비율의 차이는 2500rpm, 전부하의 경우에 있어서는 약 3.2%의 차이만이 나타나 오히려, 발열량 저감율에 비해 에너지 소비율이 개선된 것으로 나타났다.

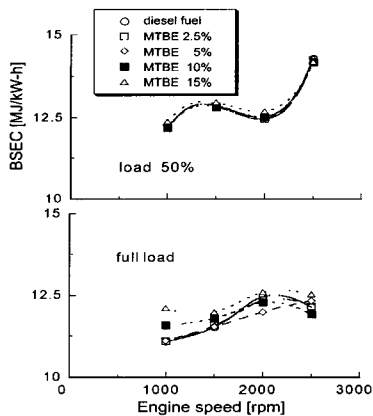


Fig. 4 Comparison of BSEC for difference of oxygenated fuel content under varying load and engine speed

Fig. 5는 전부하와 무부하 상태에서 매연의 배출 특성을 연료내에 함유된 산소량과의 관계로 나타낸 것이다. 즉, 연료내의 MTBE함유율이 증가함에 따라 연료내의 산소량도 증가된다. 무부하에서는 전회전속도범위에 걸쳐서 연료속의 산소농도가 2 wt-%정도만 되어도 매연의 배출량이 2.3%이하로서 거의 배출되지 않으며, 2500 rpm, 전부하의 경우에도 매연농도가 33%이하로 매연 저감효과가 크다. 이는 연소에 필요한 산소량이 부족한 고부하영역에서 연료내의 산소성분이 연소촉진제로 작용하여 매연을 현저하게 저감시킨 것으로 생각된다. 즉, 매연 생성은 연료내의 산소농도에 의하여 강하게 좌우됨을 알 수 있다.⁷⁾

Fig. 6은 전부하상태에서 기관회전속도가 변화할 때 경유의 매연 배출량을 기준으로 MTBE의 혼합율에 따른 매연 저감의 비율을 나타낸 것이다. MTBE의 함유율이 증가할수록 매연의 저감폭은 증가하지만, 10vol-%이상 혼합한 경우에는 특히 2000rpm이하에서는 매연의 저감폭이 둔화됨을 알 수 있었다.

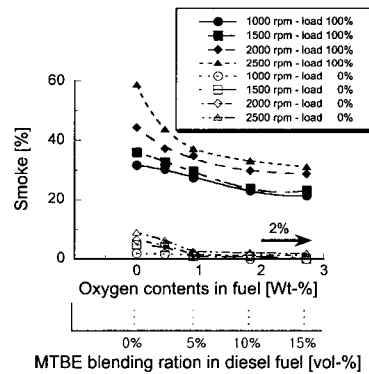


Fig. 5 Comparison of smoke density of load 0% vs. full load with various oxygen contents

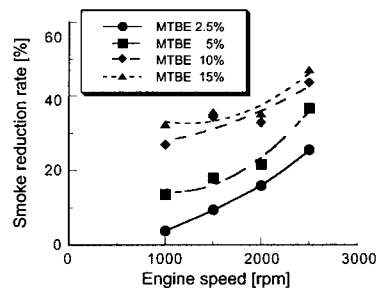


Fig. 6 Rate of smoke reduction vs. engine speed at full load

이상의 기관실험에서 매연과 NOx 배출량 및 에너지소비율의 관계를 검토한 결과, 경유와 유사한 에너지소비율을 유지하면서 현저한 매연저감효과를 나타내고 있는 MTBE 10vol-%를 경유 90vol-%와 혼합한 경우가 최적의 상태로 판단되었다. 따라서, 이 경우에 매연의 저감원인을 조사하기 위하여 가스 크로마토그래피를 이용한 전체적인 미연탄화수소 및 C₁~C₆까지의 개별탄화수소를 비교·분석하였으며, 동시에 EGR 방법을 적용하였다.

3.2 각 미연탄화수소 분석

본 실험에서는 탄소수가 4이하인 경우를 저비등점 탄화수소로, 5이상인 경우를 고비등점 탄화수소¹⁾로 하여 정리하였다.

Fig. 7은 각 개별탄화수소의 농도와 크로마토그램상에 나타난 피크 면적과의 관계를 나타낸 것으로 표준가스를 사용하여 검량선을 산출한 것이다.

Fig. 8은 1000, 1500, 2000, 2500rpm의 기관회전속도에서 부하변화에 따라 경유를 사용한 경우와

MTBE를 10%혼합하여 사용한 경우에 미연탄화수소 분석결과로서 크로마토그램상에 나타난 각각의 피크면적을 나타내고 있다. 양 연료 공회 고회전속도와 고부하로 갈수록 탄화수소의 배출농도는 현저히 증가하며, 증가폭은 경유가 더욱 급격함을 알 수 있다. 이는 중부하 이하인 경우에는 경유를 연료로 사용한 경우에도 공기이용률이 충분하기 때문에 합산소연료인 MTBE의 산소성분이 미연탄화수소 생성에 큰 영향을 미치지 않았으나, 고부하와 고회전속도로 갈수록 MTBE에 포함된 산소성분에 기인하여 연료 입자의 산화를 더욱 촉진시켜 매연생성에 영향을 미치는 미연탄화수소량이 크게 저감되었기 때문으로 생각된다.

Fig. 9는 전부하 상태의 경우 개별 탄화수소를 분석한 경우로서, C₁을 제외한 모든 경우에 MTBE를 사용한 경우가 미연탄화수소가 대폭 저감되었음을 나타내고 있다. 연소과정에서 필연적으로 발생하는 열분해는 탄화수소 연료를 분해하여 매연성분의 핵

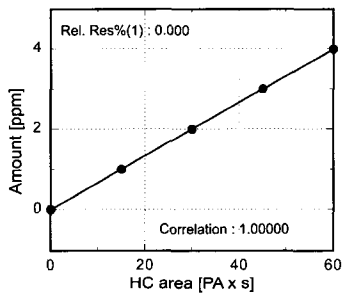


Fig. 7 Calibration curve for standard gas

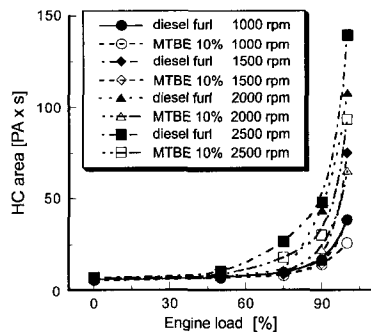


Fig. 8 Total area of unburned hydrocarbon of two fuels on chromatogram analysis under varying engine speeds and loads

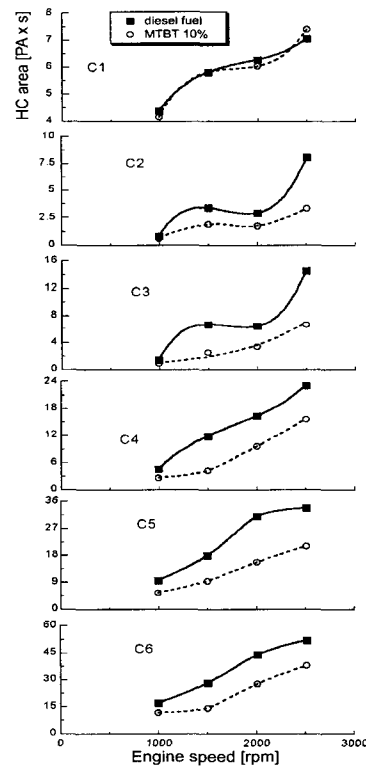


Fig. 9 Area of each hydrocarbon on chromatogram analysis under varying engine speed at full load

을 형성시키게 되는 것으로 알려져 있다.¹⁾ 이때 발생하는 미연 탄화수소의 성분 중에서 저비등점 탄화수소는 산화가 용이하여 매연 생성에 큰 영향을 미치지 못하지만, 고비등점 탄화수소는 산화가 용이하지 못하여 매연 생성에 커다란 영향을 미치는 것으로 생각된다.

3.3 합산소연료(MTBE)와 EGR의 동시 사용

합산소연료를 첨가함으로써 배기가스 중의 매연의 저감은 현저하였으나, 기관의 부하가 증가함에 따라 NOx의 배출농도는 증가되는 문제가 발생하였다. 이는 합산소연료의 사용에 따른 연소실내의 온도상승이 원인이라 생각되며, 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 NOx 저감방법의 일환으로 알려진 cooled EGR방법⁸⁾을 병행하여 사용하였다.

Fig. 10은 각 회전속도와 EGR율의 경우 기관 부하가 변화함에 따라 매연의 배출특성을 나타낸 것이다. 그림에서 EGR율이 증가함에 따라 매연이 증가되나, MTBE가 혼합된 경우에는 경유의 경우보다 낮은 배출농도를 알 수 있다. 그러나, 20%이상의 EGR율이 적용된 경우에는 중부하 및 고부하 영역에서 경유를 사용했을 때보다 매연이 더 많이 배출

되는 것을 알 수 있다. 이는 재순환되는 배기가스가 연소실내로 흡입되는 새로운 공기 중의 산소량을 감소시켜 연소에 충분한 산소의 공급이 어렵기 때문으로 생각된다.

Fig. 11은 Fig. 10과 동일한 조건에서 NOx의 배출특성을 나타낸 것이다. NOx는 EGR율의 증가에 따라 현저하게 저감됨을 알 수 있으며, 고부하 영역에서 더욱 저감폭이 현저해지는 것을 알 수 있다. EGR을 기관에 적용하면 연소실에 들어가는 흡입공기 일부가 불활성 가스인 배기가스로 치환되어 연소온도가 낮아지고, 연소속도가 늦어져 NOx 배출량이 현저하게 감소된다. 따라서, EGR율이 증가함에 따라 NOx배출량은 급격히 감소한다. 또한 고부하로 갈수록 NOx농도의 저감율은 증가하나, 산소량의 감소현상으로 인하여 Fig. 10과 같이 매연배출량은 현저하게 증가함을 알 수 있다.

Fig. 12는 2500rpm의 전부하 상태에서 경유를 연료로 사용하고 cooled EGR을 적용한 경우와 MTBE 10vol-%혼합유(+경유90vol-%)를 연료로 하고 EGR을 적용한 경우의 매연과 NOx의 배출특성을 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, EGR율이 증가할수록 합산소연료를 사용한 경우에도 매

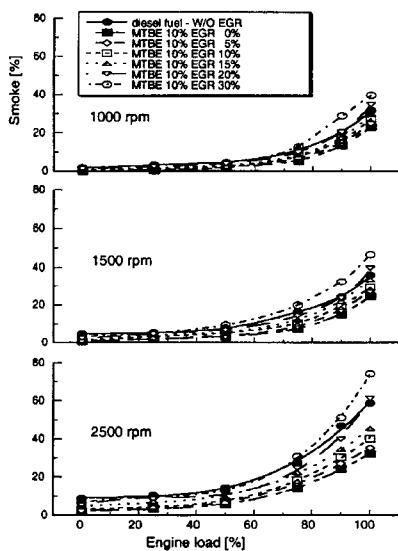


Fig. 10 Comparison of smoke density of diesel fuel vs. oxygenated fuel on EGR rate under varying engine loads and speeds

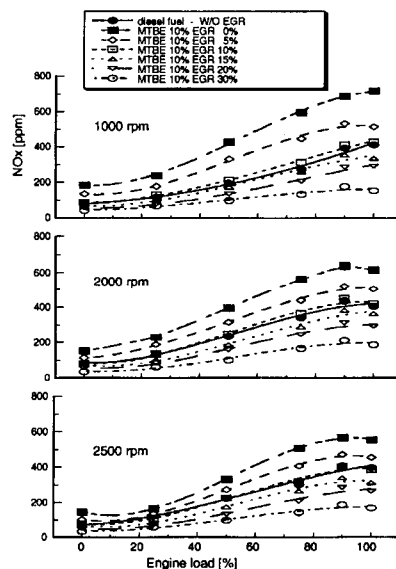


Fig. 11 Comparison of NOx concentration of diesel fuel vs. oxygenated fuel on EGR rate under varying engine loads and speeds

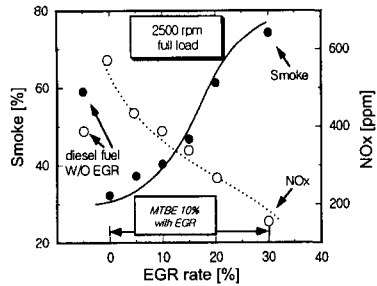


Fig. 12. Characteristics of smoke vs. NOx emission with diesel fuel and oxygenated blended fuel on EGR rates

연은 증가하며, NOx는 저감되고 있다. 또한, 합산소 연료를 사용한 경우에도 EGR율이 20%를 초과하면 경유단을 사용한 경우보다 매연이 더 많이 배출되는 것을 알 수 있으며, 5%미만의 EGR율을 적용한 경우에는 NOx 배출 특성이 경유를 사용했을 때와 유사함을 알 수 있다. 따라서, MTBE 혼합유 (10vol-%)를 사용할 경우, 매연과 NOx를 동시에 저감시키기 위한 최적의 EGR율은 15%임을 알 수 있었다.

4. 결론

수냉식, 4행정, 직접분사식, 농용, 디젤기관의 연료로서 경유와 가솔린연료의 옥탄가 향상제로 사용되는 MTBE를 혼합한 연료가 기관 성능 및 배기 배출물에 미치는 영향을 조사하고, 가스 크로마토그래피를 사용하여 미연탄화수소의 분석을 수행하였으며, cooled EGR방법을 이용하여 NOx저감을 시도한 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

1) 가솔린기관의 옥탄가 향상제인 MTBE를 디젤 기관에 적용한 경우 고부하와 고회전 속도영역에서 최대 43% 정도의 현저한 매연저감이 되었으나, NOx는 증가하였다.

2) MTBE와 같은 합산소연료는 고부하와 고회전

영역에서 고비등점 탄화수소의 산화를 촉진시켜 매연배출을 현저하게 억제시키는 것을 확인하였다.

3) 합산소연료인 MTBE를 10vol-% 경유에 혼합하고 15%의 배기가스 재순환을 동시에 기관에 적용할 경우 매연과 NOx의 동시저감을 이룰 수 있었다.

References

- 1) Y. T. Oh, S. H. Choi, "The Experimental Study on Emission Reduction by Oxygenate Additive in D.I. Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.10, No.4, pp.33-42, 2002.
- 2) F. J. Liotta, Jr., D. M. Montalvo, "The Effect of Oxygenated Fuels on Emissions from a Modern Heavy-Duty Diesel Engine," SAE 932734, 1993.
- 3) T. Murayama, T. Chikahisa, Y. T. Oh, M. Zheng, Y. Fujiwara, S. Tosaka, M. Yamashita, H. Yoshitake, "Simultaneous Reductions of Smoke and NOx from a DI Diesel Engine with EGR and Dimethyl Carbonate," SAE 952518, 1995.
- 4) S. Kajitani, H. Usisaki, E. Clasen, S. Campbell, K. T. Rhee, "MTBE for Improved Diesel Combustion and Emissions?," SAE 941688, 1994.
- 5) 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.
- 6) Y. T. Oh, "A Study on the Usability of Used Vegetable Oil as a Diesel Substitute in Diesel Engine," Transactions of the KSME, B, Vol.22, No.4, pp.481-488, 1998.
- 7) Y. Akasaka, Y. Sakurai, "Effects of Oxygenated Fuel and Cetane Improver on Exhaust Emission from Heavy-Duty D.I. Diesel Engines," SAE 942023, 1994.
- 8) Y. H. Ham, K. M. Chun, "Engine Cycle Simulation for the Effects of EGR on Combustion and Emissions in a DI Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.10, No.4, pp.51-59, 2002.