

# 직접 분사식 디젤기관에서 Dimethoxy Methane과 Cooled EGR방법을 이용한 Smoke와 NOx의 동시저감

최 승 훈<sup>\*1)</sup> · 오 영 택<sup>2)</sup> · 권 규 식<sup>3)</sup>

전북대학교 대학원 기계공학부<sup>1)</sup> · 전북대학교 기계공학과<sup>2)</sup> · 전주대학교 공학부<sup>3)</sup>

## Simultaneous Reduction of Smoke and NOx by Dimethoxy Methane and Cooled EGR Method in a DI Diesel Engine

Seunghun Choi<sup>\*1)</sup> · Youngtaig Oh<sup>2)</sup> · Kyusik Kwon<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Graduate School of Mechanical Engineering, Chonbuk National University, Jeonbuk 561-756, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechanical Engineering, Chonbuk National University, Jeonbuk 561-756, Korea

<sup>3)</sup>School of Engineering, Jeonju University, Jeonbuk 570-759, Korea

(Received 29 April 2004 / Accepted 28 July 2004)

**Abstract** : In this study, the effects of oxygen component in fuel and exhaust gas recirculation(EGR) method on the exhaust emissions has been investigated for a D.I. diesel engine. It was tested to estimate change of exhaust emission characteristics for the commercial diesel fuel and oxygenate blended fuel which has five kinds of blending ratio. Dimethoxy methane(DMM) contains oxygen component 42.5% in itself, and it is a kind of effective oxygenated fuel for reduction of smoke emission. It was affirmed that smoke emission was decreased with increasing of DMM blending ratio. But, NOx emission was increased compared with commercial diesel fuel. It was needed a NOx reduction counterplan that EGR method was used as a countermeasure for NOx reduction. It was found that simultaneous reduction of smoke and NOx emission was achieved with DMM blended fuel and cooled EGR method(1015%).

**Key words** : Diesel engine(디젤기관), Exhaust gas recirculation(배기가스 재순환), Dimethoxy methane(DMM), Simultaneous reduction(동시저감), Smoke(매연)

### 1. 서 론

대기오염의 주범으로 인식되고 있는 디젤기관의 배출가스 저감을 위한 방법으로는 엔진설계변경기술을 통한 스웰비의 조절, 분사시기의 조절 등과 연료의 성상 등에 변화를 주어 연료가 연소실내에서 연소하여 배출되기 전에 배출가스를 저감시키기 위한 전처리 방법과 연료가 연소한 후에 연소실 밖에서 촉매장치나 배출가스 재순환<sup>1)</sup>(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 등<sup>2)</sup>은 글리콜 에테르가 매연과 알데히드, 케톤, 포름알데히드 등을 저감시키는데 매우 유용함을 밝혔으며, Pyo 등<sup>3)</sup>은 저공해 대체연료인 dimethyl ether를 사용 가능성을 제시하였다. Murayama 등<sup>4)</sup>은 합산소연료와 EGR 방법을 병용한 연구에서 매연과 NOx를 동시에 저감할 수 있는 가능성을 입증하였

\*To whom correspondence should be addressed.  
medr@chonbuk.ac.kr

다. 또한, Kajitani 등<sup>5)</sup>은 예연소실식 디젤기관에서 합산소연료를 적용한 결과 NOx와 검댕(soot)을 동시에 저감하였다는 보고가 있으며, Sirman 등<sup>6)</sup>은 EGR을 병행하여 dimethoxy methane(이하 DMM) 15%혼합연료를 이용하여 52%의 PM감소와 4% NOx저감을 이룰 수 있었는데 PM은 운전 전영역에 걸쳐 감소하는 반면 NOx는 EGR의 작동여하에 따라 증가되는 구간이 존재한다고 보고하고 있으나, 디에테르 계열의 합산소연료 중 다량의 산소를 포함한 DMM을 사용하여 직접분사식 디젤기관의 전체적인 회전속도 및 부하영역에 걸친 폭넓은 연구는 거의 없다.

본 연구에서는 합산소성분 첨가방법의 일환으로서 디에테르계열의 합산소제인 DMM을 디젤기관의 상용연료인 경유와 최대 12.5vol-%까지 혼합하여 사용할 경우, 기관의 각 회전속도와 부하에서 배기배출물의 특성변화의 조사함과 동시에 합산소연료를 사용할 경우 증가하는 NOx의 저감방법으로서 cooled EGR을 병행하여 매연과 NOx의 동시저감을 이루고자 연구하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 기관은 단기통, 수냉식, 4행정, 직접분사식 디젤기관이며, 기관 부하와 회전속도는 기관 동력계에 의해 임의로 조절할 수 있도록 하였다. 실험에 사용된 기관의 사양은 Table 1에, 사용된 연료의 특성은 Table 2에 각각 나타내었으며, 실험 장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 실험은 경유와 합산소연료인 DMM을 2.5~12.5vol-% 혼합한 연료를 사용하여 기관의 각 회전속도에서 무부하, 25%, 50%, 75%, 90% 및 전부하의 경우에 기관성능과 매연 및 NOx를 측정하였다. 매연 농도의 측정에는 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 흡입하도록 하였다.

또한, 기관이 일정량의 연료를 소모하는 시간을

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 <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	CH <sub>3</sub> OCH <sub>2</sub> OCH <sub>3</sub>
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

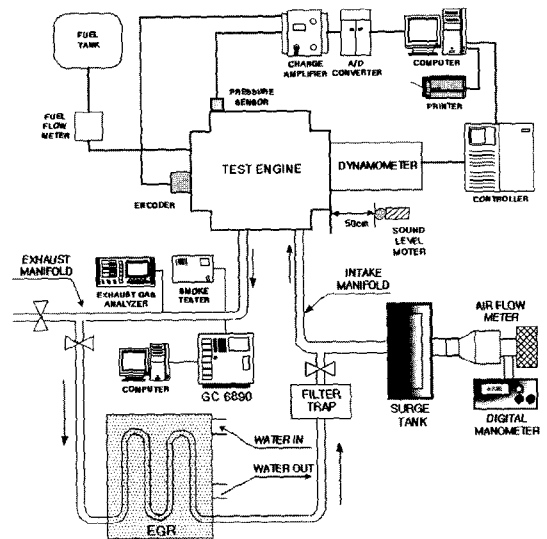


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

측정하여 단위시간출력당의 에너지소비율(MJ/kWh)로 계산하였으며, 분사시기는 실험조건에 관계없이 BTDC 23°C로 고정하였다.

본 연구에서는 EGR율을 계산할 때 전체 흡기량에 대한 EGR된 양, 즉 새로운 흡입공기량의 감소율로서 식 (1)을 이용하였다.

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

여기서,  $V_0$ 는 EGR을 수행하지 않았을 경우의 흡

입공기량( $m^3/h$ ),  $V_0$ 는 EGR을 수행했을 경우의 새로운 흡입공기량이다. 또한, EGR중에서도 EGR의 효과가 더 뛰어난 cooled EGR<sup>1)</sup>을 적용하여 EGR되는 가스의 온도를 대기온도와 비슷한 20°C 정도로 유지하였으며, 매연 미립자 제거장치를 이용하여 흡기로 재순환되는 배출가스 중의 미립자를 제거한 후 실험하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 DMM의 혼합율에 따른 배기배출물 특성

Fig. 2는 전부하시 기관 회전속도가 변화할 때 기관 출력특성의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이 DMM의 혼합율이 증가함에 따라서 기관 출력은 약간의 차이는 있지만, 모든 연료 공회전 회전범위에 걸쳐 기관 출력특성은 거의 유사한 특성을 보이고 있다. 이는 합산소연료가 혼합된 연료를 사용할 경우에, 본 연구의 최대 혼합율인 12.5%에서 경유에 비하여 발열량의 차이는 약 6%가 낮지만, 기관출력에서의 차이는 최대 3.5%에 불과하여 DMM을 혼합하여 사용할 경우 합산소성분에 기인한 연소효율 개선이 있음을 알 수 있었다.

Fig. 3은 각 회전수에서 에너지소비율(BSEC)을 비교한 것이다. 경유에 비하여 합산소연료인 DMM은 발열량이 약 41% 낮지만 최대 혼합율이 12.5%이하로서 크지 않았고, 전체적인 에너지소비율 성향이 거의 비슷하게 나타나고 있으며, Fig. 2에 나타난 바와 같이 극부적인 토크의 저하는 연료들 사이의 발열량의 차이로 인해 에너지밀도가 다르기 때문이며 이를 BSEC측면에서 보면 거의 유사한 경향을 나

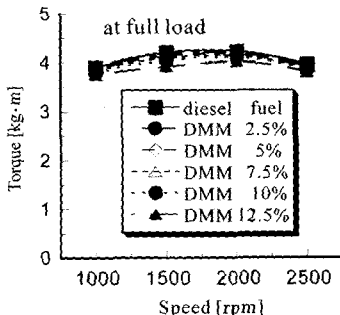


Fig. 2 Performance of torque at full load

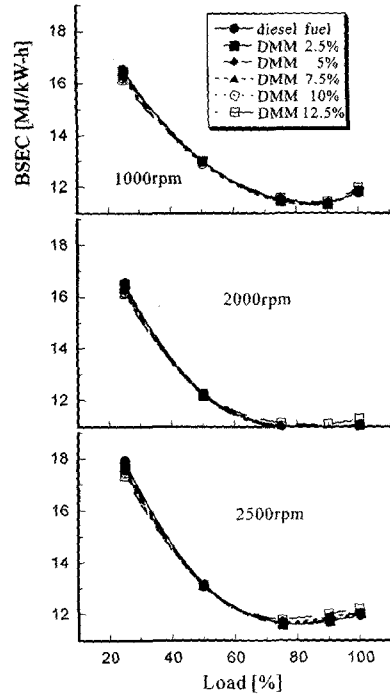


Fig. 3 Comparison of BSEC for difference of DMM contents under varying engine loads

타됨을 알 수 있다.

Fig. 4는 각 회전속도에서 부하변화에 의한 매연 배출특성을 DMM의 각 혼합율 변화 즉, 연료내의 산소량 변화에 따라 나타낸 것이다. 디젤기관의 공기이용율이 충분한 저부하 영역(기관부하50%이하)에서는 높은 충전효율 때문에 합산소연료를 혼합한 경우에도 매연배출량의 저감은 작지만, 고회전의 경우 충전효율이 저감되는 고부하 영역(기관부하 75%이상)에서는 매연배출량에 현저한 저감을 보이고 있으며, 혼합율이 증가할수록 매연의 저감은 증가되지만, 10%이상의 혼합율(산소량 4.25wt.%)에서는 그 저감폭이 줄어드는 것을 알 수 있다. 합산소연료인 DMM을 혼합하여 사용한 경우에는 연료내에 산소성분이 일정부분 점유하는 부분이 있어, 연료자체내에 탄화수소 성분이 경유를 사용한 경우보다 적게 된다. 다시 말하면, 탄소가 주성분인 매연의 생성자체를 연소과정 전반에 걸쳐서 억제할 수 있는 것이다. 또한, 확산연소기간에 있어서는 산소성분의 기여로 인해 빠른 연소, 즉 급격한 탄화수소의 산화를 유도하여 매연생성을 더욱 억제할 수 있는

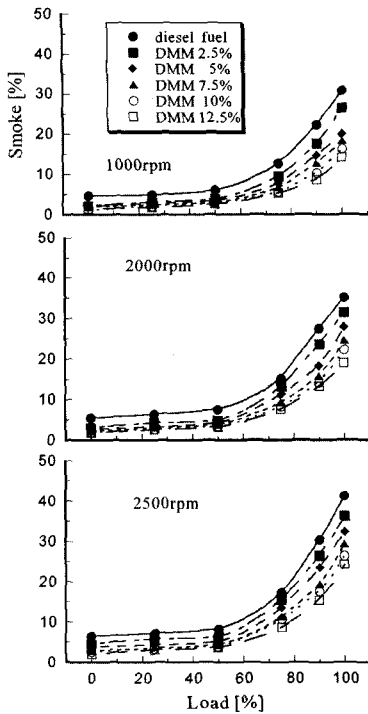


Fig. 4 Comparison of smoke for difference of DMM contents under varying engine loads

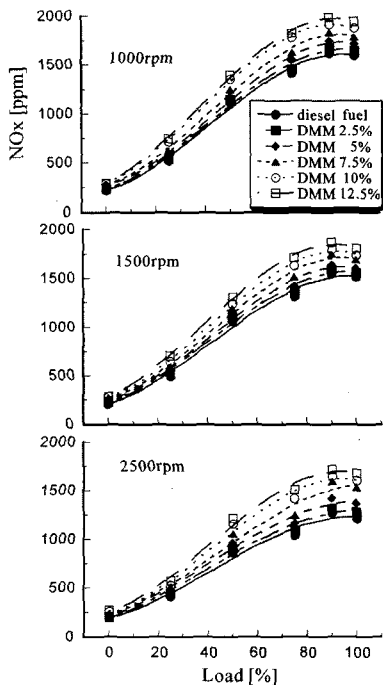


Fig. 5 Comparison of NOx for difference of DMM contents under varying engine loads

것으로 생각된다.<sup>7)</sup>

Fig. 5는 기관의 부하변화에 따른 NOx의 배출특성을 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이, 경유보다 합산소연료인 DMM을 첨가한 경우 전체적으로 NOx의 배출량이 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 합산소연료내에 포함된 산소성분에 의해 연소가 활발해져 후연소기간에 화염온도를 상승시켜 NOx의 배출량을 증가시킨 것으로 생각된다. 또한, 합산소연료인 DMM의 연료내 함유량이 5~7.5vol-% 정도이면 경유만을 사용한 경우와 비교하여 매연의 크게 저감되고, NOx의 증가범위도 다른 혼합율과 비교하여 크지 않았기 때문에 최적의 혼합율로 생각된다.

3.2 Cooled EGR 적용시의 배기배출물 특성

Fig. 4에 나타난 바와 같이 DMM을 첨가함으로써 매연 저감은 현저하였으나, 합산소연료의 혼합량이 증가함에 따라서 NOx의 배출농도도 함께 증가하는 것을 Fig. 5에서 알 수 있었다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 디젤기관에서 NOx 저감방법의 일환으로 알려진 cooled EGR방법을 병행하여 사용하였다. EGR 방법을 적용한 경우, 출력은 약간 저하되며, Fig. 6에 나타난 바와 같이 에너지소비율은 4% 미만의 변화를 보여 큰 차이를 나타내지는 않았다.

Fig. 7은 기관실험결과 과 매연 저감량면에서는 우수하면서도 NOx의 증가폭은 다른 혼합량과 비교하여 크지 않았기 때문에 본 연구에서 DMM의 최적 혼합율로 설정한 5vol-%를 혼합하여 사용한 경우, 5~30%의 EGR율을 적용하여 기관의 각 회전속도와 각 기관부하에서 매연의 배출특성을 나타낸 것

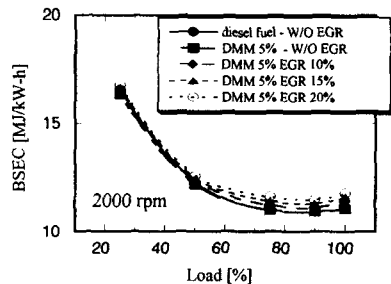


Fig. 6 BSEC vs. EGR rates on diesel fuel and DMM blended fuels by varying engine loads

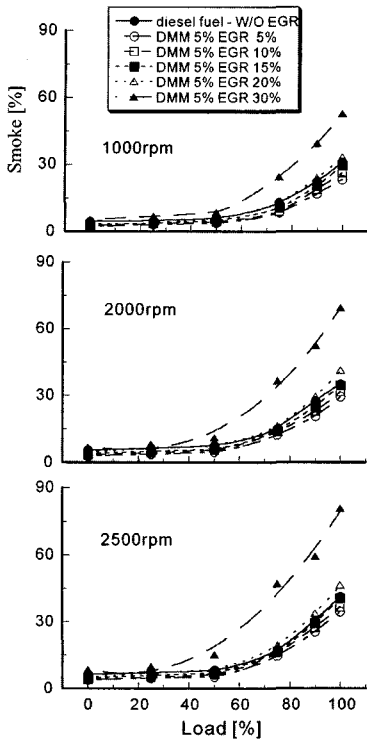


Fig. 7 Smoke vs. EGR rates on diesel fuel and DMM blended fuels by varying engine loads

이다. 합산소연료인 DMM을 혼합하여 사용한 경우에도 EGR율이 증가함에 따라서 매연의 증가하는 것을 알 수 있다. 특히, 20%의 EGR율이 기관에 적용된 경우에는 90%이상의 고부하 영역에서 경유만을 연료로 사용한 경우보다도 매연 배출이 증가되었으며, 30%의 EGR율을 적용한 경우에는 저부하영역에서도 경유만을 사용한 경우보다 매연배출량이 크게 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 20%이하의 EGR율을, 고부하영역에서는 15%이하의 EGR율을 적용해야 한다고 생각된다.

Fig. 8은 각 기관회전속도와 기관부하에서 EGR율의 변화에 따른 NOx의 배출량을 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이, NOx는 EGR율의 증가에 따라 현저하게 저감되고, 10%정도의 EGR을 적용한 경우에도 경유만을 사용한 경우보다 저감됨을

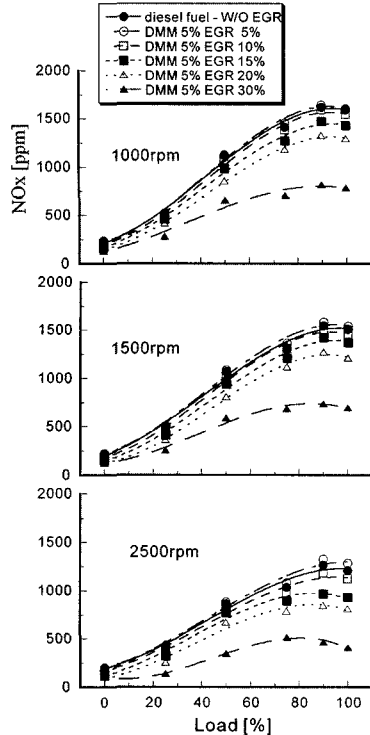


Fig. 8 NOx vs. EGR rates on diesel fuel and DMM blended fuels by varying engine loads

알 수 있으며, 10%이상의 EGR율을 적용한 경우에는 경유를 사용한 경우보다 전체적으로 NOx가 저감됨을 알 수 있다. 전체적인 NOx 배출측면에서 보면, NOx는 EGR율의 증가에 따라 현저하게 저감되고 있으며, 고부하 영역에서 더욱 저감폭이 현저해지는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 2500rpm의 전부하 상태에서 경유를 연료로 사용하고 EGR을 적용하지 않은 경우와 DMM 5vol-%혼합유(+경유 95vol-%)를 연료로 하고 0~20%의 cooled EGR을 적용한 경우의 매연과 NOx의 배출특성을 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, EGR율이 증가할수록 합산소연료를 사용한 경우에도 매연은 증가하며, NOx는 저감되고 있다. 또한, DMM 혼합연료를 사용한 경우에도 EGR율이 20%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, DMM 혼합연료(5vol-%)를 사용할

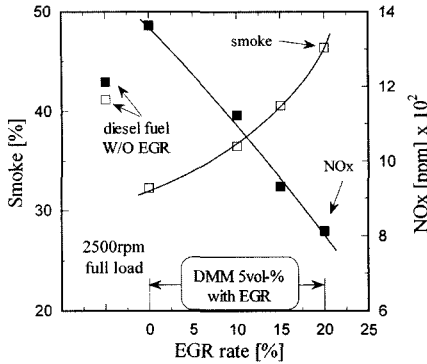


Fig. 9 Characteristics of smoke vs. NOx emission with diesel fuel and oxygenated blended fuel on various EGR rates at 2500rpm, full load

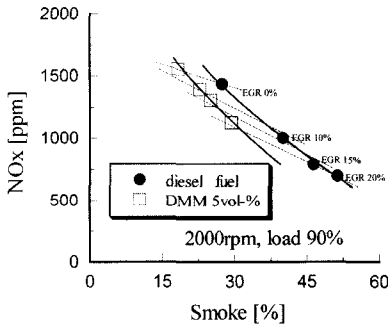


Fig. 10 The effect of combination of DMM and EGR on smoke and NOx emission

경우, 매연과 NOx를 동시에 저감시키기 위한 최적의 EGR율은 10~15%임을 알 수 있었다.

Fig. 10은 2000rpm, 90%의 부하상태에서 DMM 5vol-%를 혼합하여 사용한 경우와 경유만을 사용한 경우의 각각의 EGR율 변화에 따른 NOx와 매연과의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 EGR율이 증가함에 따라 양 연료 모두 NOx는 저감됨을 알 수 있다. EGR율은 고부하의 경우 약 30%까지 실험 하였으며, 배기가스 재순환양에 따라서 DMM 5%만을 적용한 경우와 비교하여 DMM 5%와 EGR 30%를 동시에 적용한 경우에 NOx를 69.8%정도까지 저감할 수 있었다. 고부하영역의 경우 완전연소를 위하여 산소의 유효이용이 매우 중요하며 EGR율이 증가할수록 산소농도는 감소하므로 확산연소는 전반적으로 악화되어 EGR 20%에서는 경유의 경우보다 매연이 증가함을 확인할 수 있다. 그리고, DMM

5vol-%를 혼합하여 사용하고 EGR을 적용한 경우는 배출특성이 상반된 NOx와 매연을 동시에 상당히 저감시킬 수 있었다.

#### 4. 결론

수냉식, 4행정, 직접분사식 디젤기관의 연료로서 경유와 DMM을 0~12.5vol-%까지 혼합하여 사용한 경우 기관성능 및 배기 배출물에 미치는 영향을 분석하고, 합산소연료 사용시 증가되는 NOx의 저감을 위하여 cooled EGR 방법을 조합한 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

- 1) 본 연구에서 DMM의 최대 혼합율인 12.5vol-%에서 경유에 비하여 발열량의 차이는 약 6%가 낮지만, 기관출력에서의 차이는 최대 3.5%에 불과하여 DMM을 혼합하여 디젤기관의 연료로 사용될 경우 합산소성분에 기인한 효과를 기대할 수 있었다.
- 2) 합산소연료인 DMM을 디젤기관에 적용하여 전 부하시에 고회전속도 영역에서 경유만을 연료로 사용한 경우와 비교하여 최대 42% 정도의 현저한 매연저감이 이루어짐을 확인하였다.
- 3) 합산소연료인 DMM을 5vol-% 경유에 혼합하고 10~15%의 배기가스 재순환을 동시에 기관에 적용할 경우 경유만을 사용한 경우와 비교하여 매연과 NOx의 동시저감이 가능하였다.

#### References

- 1) P. 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 the KSAE, Vol.10, No.4, pp.51-59, 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) Y. D. Pyo, G. C. Kim, Y. J. Lee, M. H. Kim, "A Study on Performance and Exhaust Emission of DI Diesel Engine Operated with Neat DME and DME blended Fuels," Transactions of the KSAE, Vol.11, No.2,

- pp.75-82, 2003.
- 4) T. Murayama, T. Chikahisa, Y. T. Oh, M. Zheng, Y. Fujiwara, S. Tosaka, M. Yamashita, H. Yoshitake, "Simultaneous Reductions of Smoke and NO<sub>x</sub> from a DI Diesel Engine with EGR and Dimethyl Carbonate," SAE 952518, 1995.
  - 5) S. Kajitani, H. Usisaki, E. Clasen, S. Campbell, K. T. Rhee, "MTBE for Improved Diesel Combustion and Emissions," SAE 941688, 1994.
  - 6) M. Sirman, E. Owens, K. Whitney, "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, 1998.
  - 7) Y. T. Oh, S. H. Choi, "Exhaust Emission Characteristics by Alteration of MTBE Contents in D.I. Diesel Engine," Trans. of KSME (B), Vol.26, No.5, pp.724-732, 2002.