

대체에너지 DME를 사용하는 직접분사엔진의 배기특성에 미치는 Cooled EGR의 영향

표영덕*, 남상훈**, 김강출*, 김영길**, 이영재*

*한국에너지기술연구원, **전남대학교

Effects of Cooled EGR on Exhaust Emission Characteristics of DI DME Engine

Youngdug Pyo*, Sanghoon Nam**, Gangchul Kim*, Yongkil Kim**, Yongjae Lee*

*Korea Institute of Energy Research,

71-2 Jang-dong, Yusung-ku, Daejeon 305-343, Korea

**Department of Mechanical Engineering, Chonnam National University,

300 Youngbong-dong, Pukgu, Kwangju 500-757, Korea

ABSTRACT

There are high expectations for DME(Dimethyl Ether) as a new alternative fuel for diesel engine. Compared with the conventional diesel engine, nearly zero soot emission and high thermal efficiency have been reported from DME fuelled CI engines. However, higher NO_x emission is one of the disadvantages from DME Engines. In the present study, cooled EGR(Exhaust Gas Recirculation) was applied to DME engine modified from conventional DI diesel engine, and effects of EGR were examined under various EGR temperature. Finally, it was concluded that the cooled EGR is an effective solution to reduce NO_x emission from DME engine.

주요기술용어 : Dimethyl Ether(DME, 디메틸에테르), Thermal efficiency(열효율), Oxygenated Fuel(합산소연료), NO_x(질소산화물), Exhaust Gas Recirculation(EGR, 배기재순환)

1. 서 론

가솔린엔진과 비교해 열효율이 높으나 PM과 NO_x의 배출량이 많은 디젤엔진의 단점을 해결하기 위하여, 디메틸에테르(이하 DME)와 같은 저공해 대체연료의 적용 연구가 활발히 추진되고 있다.

DME는 세탄가가 높아서 디젤사이클 운전이 가능하고 CO₂의 배출량과 열효율이 디젤 엔진과 비슷하며, 연료 중에 산소를 34.8 w% 함유하고 있기 때문에 soot-free를 실현할 수 있다(Table 1). 선행 연구에 의하면 DME의 저위발열량은 경유의 70%에 불과하나, 연료계통을 일부 수정하면 경유 사용시와 동등한 출력을 얻을 수 있고 에너

지소비율도 경유와 동등 이상을 얻을 수 있음을 보여주고 있다⁽¹⁾.

그러나, 기존 디젤 엔진에 DME를 적용하기 위해서는 여러 문제점이 해결되어야 한다. 첫째로, DME는 점성이 낮아서 윤활성이 좋지 않기 때문에 엔진의 연료공급계통에 심각한 마모를 유발할 수 있다. 이를 위해서는 통상 윤활성 향상제를 연료에 첨가하여 대응하고 있다⁽²⁻⁴⁾. 둘째로, DME 엔진에서는 경유엔진에 비하여 NOx의 배출량이 많기 때문에 이에 대한 대책이 요구된다. NOx의 저감책으로서 통상 EGR이 많이 적용되고 있으나, 경유엔진에서는 매연이 다량 배출되기 때문에 그의 적용에 어려움이 있었다. 그러나, DME의 경우에는 매연을 배출하지 않기 때문에 EGR의 적용이 보다 용이하다^(2,4,5,7). 이를 확인하고자 DME를 연료로 사용하는 압축착화엔진에 Hot EGR을 적용하여 NOx의 저감 가능성을 검토한바있다⁽⁸⁾. 본 연구에서는 연료소비율을 저하시키지 않으면서, NOx 저감능력이 우수한 Cooled EGR을 적용하여 EGR율, EGR온도 및 부하 변화가 배출가스

에 미치는 영향을 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1에 Cooled EGR을 적용한 DME엔진 실험 시스템의 개략도를 나타낸다. 실험엔진은 배기량 304cc의 공냉식 단기통 4사이클 직접분사식 디젤 엔진으로서 그의 제원은 Table 1과 같다.

엔진 동력계는 영국 Plint사의 직류동력계(모델 TE46)로서, 최대 흡수동력은 11kW이고 최고 회전속도는 5,000rpm이다. 연료분사펌프는 인라인 펌프타입으로서 크랭크축과 직결되어 작동되며 공급된 연료는 hole type의 인젝터($\phi 0.26\text{mm} \times 4$ hole)를 통해 분사된다.

DME는 액상으로 고압용기에 충전한 후 고압의 질소가스로 가압하여 엔진의 연료분사펌프에 공급하였다.

DME는 점도가 경유보다 약 20배정도 낮아서 연료펌프 등에 마모가 유발할 수 있기 때문에

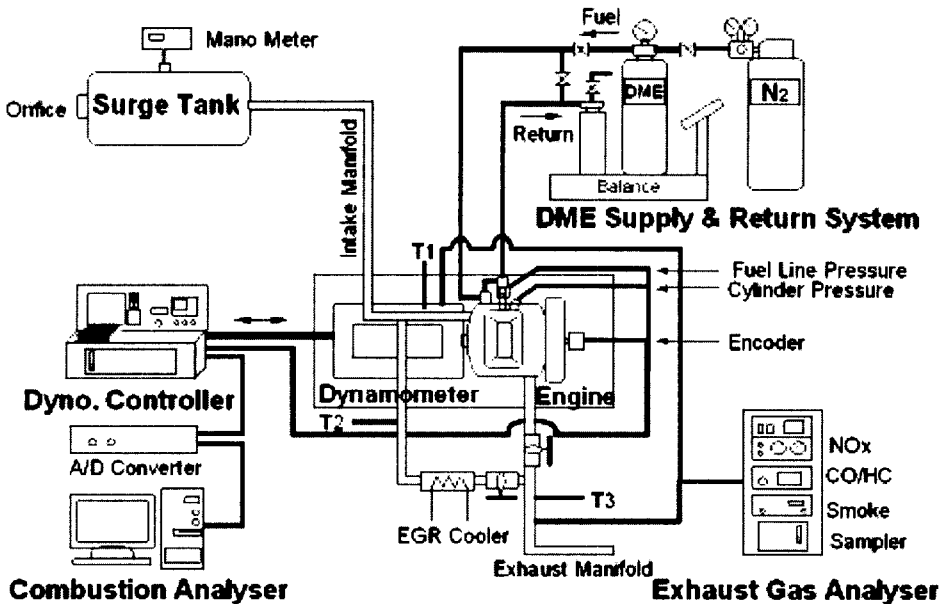


Fig. 1. Schematic Diagram of Experimental Apparatus.

Table 1. Specifications of Test Engine

ITEM	Lister-Petter AC1001 diesel engine
Cylinder number	1 (Air-cooled 4 cycle)
Bore×Stroke (mm)	76.2 × 66.68
Displacement (cc)	304
Maximum Power (kW/rpm)	6.5 / 3 500
Compression ratio	17 : 1
Injection type	Direct Injection
Nozzle open pressure	200kg/cm ²

DME로 운전하는 경우에는 윤활성 향상제 R655(Imfineum Co.)를 300ppm 첨가하여 사용하였다. 연료소모량은 정밀저울을 이용한 중량법으로 측정하였다.

배출가스 중에서 CO, CO₂와 THC는 비분산적 외선법, O₂와 NO_x는 화학발광법, smoke는 여지반사식으로 측정하였다. Table 2에 시험에 사용한 DME와 경유의 물성을 비교하여 나타낸다.

2.2 실험방법

기관의 회전속도는 1,200, 1,500 및 2,000rpm으로 변화시켰으며, 기관 부하는 각각의 회전속도에 대하여 경유 사용시의 최대토크를 기준으로 25, 50, 75 및 100%로 변화시켜 실험하였다. EGR율은 각각의 시험조건에 대하여 0, 10% 및 20%로 변화하여 실험하였다.

인젝터의 개변압력은 경유 사용시에는 기존의 200bar를 사용하였으나, 순수 DME 사용시에는 140bar로 낮추어 실험하였다. 기관의 연료분사시기는, 경유 사용시에는 기존 분사시기인 18°BTDC를 그대로 사용하였으나, DME 사용시에는 5°지각한 13°BTDC를 사용하였다.⁶⁾ 이와 같이, 개변압과 분사시기를 변경하므로써 DME사용시의 최대출력을 경유 사용시와 동일하게 확보할 수 있었다.

Table 2. Properties of DME & Diesel Fuel

Items	DME	Diesel
Self-ignition Tem. (°C)	235	250
Kinematic Viscosity (cSt)	<1	3
Cetane Number	>55	40~55
Liquid Density (kg/m ³)	667	831
LHV (kJ/kg)	28430	43200
C % (wt)	52.2	86
H % (wt)	13	14
O % (wt)	34.8	0
S % (wt)	0	0.14

여러 Cooled EGR 조건에서의 시험을 위하여 EGR 쿨러에 유입되는 냉각수온은 20, 50 및 80°C로 변화시켰으며, 각 시험시에는 흡입공기, 배기 가스 및 재순환가스의 온도를 측정하였다. 이때, EGR Cooler의 온도변화는 ±3°C로 유지하였고, EGR율의 변화 역시 ±3%로 유지하였다. 한편, 고부하의 경우에는 EGR율의 증가에 따라 약간의 출력 감소가 발생하였고, 일부 온도조건과 EGR율이 높은 조건에서는 급격한 토크 저하 및 진동에 기인하여 실험을 중지하였다. EGR율은 CO₂ 제측을 통하여 다음의 식으로 계산하였다¹⁷⁾.

$$EGR\ Rate(\%) =$$

$$\frac{[CO_2]_{EGR} - [CO_2]_{W/O\ EGR}}{[CO_2]_{EXH}} \times 100$$

여기서, [CO₂]_{EGR}은 EGR을 적용한 경우의 흡기중의 CO₂ 농도, [CO₂]_{W/O EGR}은 EGR을 적용하지 않은 경우 흡기중의 CO₂ 농도이고, [CO₂]_{EXH}는 EGR 적용시의 배기 CO₂의 농도이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 배출가스 특성

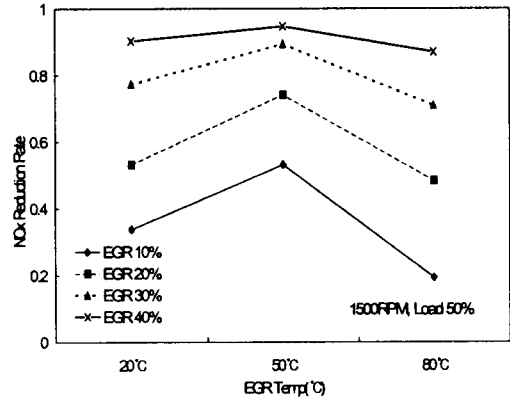
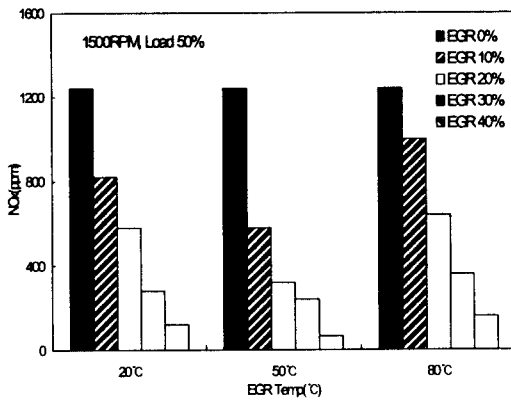
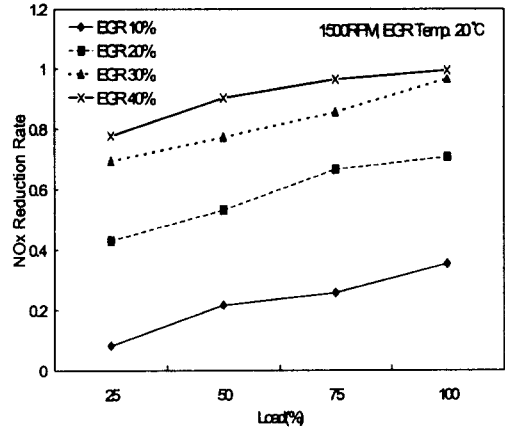
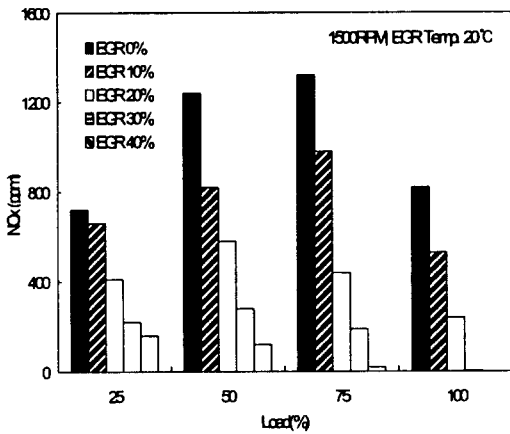


Fig. 2. Comparison of NOx Emissions.

Fig. 3. Correlation between EGR rate, Temperature, Load and NOx Reduction Rate.

이전 연구에서는 기관 회전속도 1,500rpm의 운전조건에서 부하를 변동시켰을 때 Hot EGR량의 증가에 따른 NOx 저감효과를 확인하였으며, 이때 배기 스모크에는 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었다⁽⁸⁾.

본 연구에서도 Cooled EGR량의 증가 여부에 관계없이 스모크는 제로레벨을 유지하여, DME의 우수한 스모크 저감능력을 확인할 수 있었다.

Fig. 2에 1,500rpm, EGR클러 냉각수온도 20°C의 운전조건에서 EGR량을 변화시켰을 때의 부하 변화에 따른 NOx 배출량을 나타내며, 또한 Fig. 3에는 EGR 0%를 기준으로 EGR율의 증가와 부하 변동에 따른 NOx 저감율로 정리하여 나타낸

다.

그림에서 보는바와 같이, EGR량이 증가함에 따라서 NOx 저감율이 증가하며, 또한 부하가 증가함에 따라서도 NOx 저감율이 더욱 증가함을 볼 수 있다. EGR 온도변화에 따른 영향을 살펴보면, 냉각수온 50°C의 경우가 NOx 저감율이 가장 높고, 20°C와 80°C의 경우에는 저감율이 낮음을 볼 수 있어서, 너무 낮은 EGR 온도는 NOx 저감에 효과적이지 않음을 알 수 있다.

Fig. 4에는 EGR온도 20°C의 조건에서 EGR율과 부하의 변화에 따른 흡기중의 산소농도와, 50% 부하의 조건에서 EGR율과 EGR온도의 변화에 따른 흡기중의 산소농도를 나타낸다. 그림에

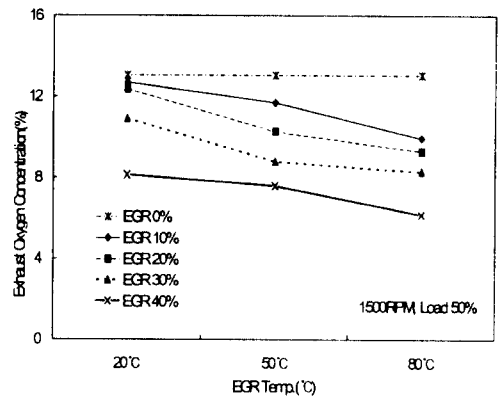
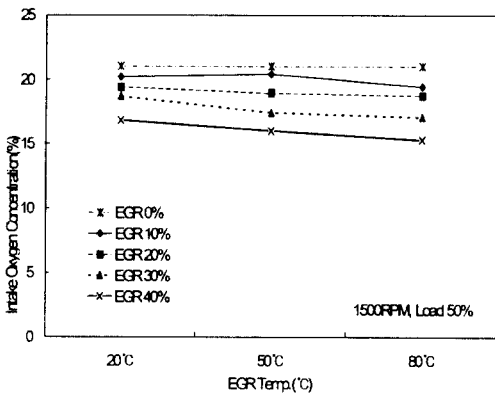
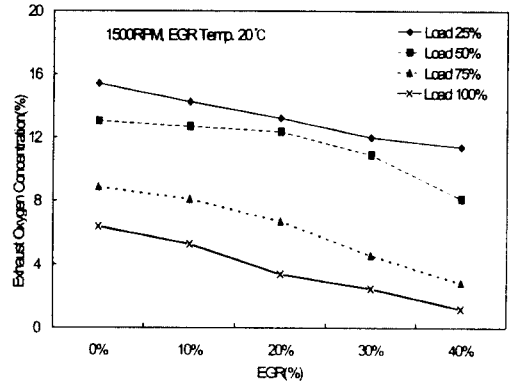
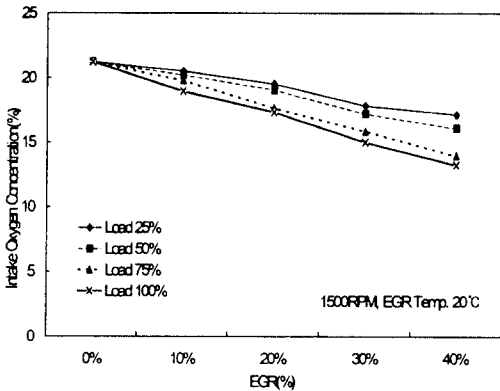


Fig. 4. Correlation between EGR Rate and Intake Oxygen Concentration.

Fig. 5. Correlation between EGR rate and exhaust oxygen concentration.

의하면, EGR율이 증가하면 흡기중의 산소농도가 증가하나, EGR온도의 변화에 따라서는 산소농도의 변화폭이 그다지 크지 않음을 볼 수 있다. EGR율이 증가하면 흡기중의 산소농도가 감소하는 이유는 흡기공기중의 일부를 EGR에 의한 배기가스중의 불활성가스가 대체함에 따른 것으로서 이것이 NOx의 저감에 크게 기여한다.

Fig. 5는 EGR율과 부하변화에 따른 배기가스내의 산소농도와, EGR율과 EGR온도의 변화에 따른 배기가스내의 산소농도를 나타낸다. EGR율과 부하가 증가하면 배기중의 산소농도가 감소하고, EGR온도가 증가하면 배기중의 산소농도가 감소함을 볼 수 있다.

Fig. 6은 EGR을 실시한 경우와 실시하지 않은 경우에 대하여 흡기 산소농도와 NOx저감율의 관

계로 정리하여 나타낸 것이다. 흡기 산소농도가 감소하면 NOx 저감율이 증가하며, 이는 EGR율의 증가에 기인한다.

Fig. 7은 배출가스 중의 산소 농도와 NOx 저감율과의 관계를 정리하여 나타낸 것이다. 배출 가스 내의 산소농도가 감소하면 NOx 저감율이 증가함을 볼 수 있으며, 이는 EGR량의 증가에 따른 흡기 산소농도의 감소에 기인하는 것으로 생각된다.

Fig. 8은 1,500rpm의 엔진 회전속도에서 EGR율과 부하를 변화시킨 경우의 CO 및 THC 배출농도, 50% 부하에서 EGR율과 EGR온도를 변화시킨 경우의 CO 및 THC 배출농도를 나타낸다. 그림에 의하면 EGR율이 증가하면 CO와 THC의 배출농도가 증가하나, EGR온도는 CO와 THC의

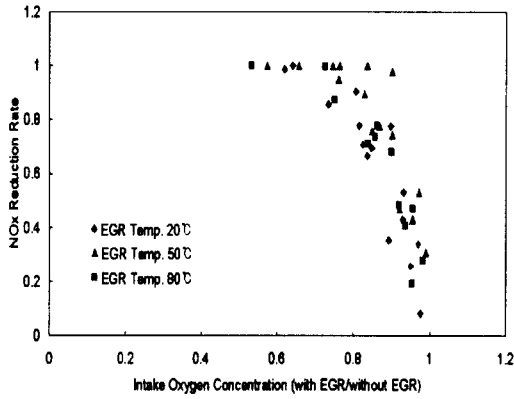


Fig. 6. Effect of Intake oxygen concentration (with EGR/without EGR) on NOx emissions.

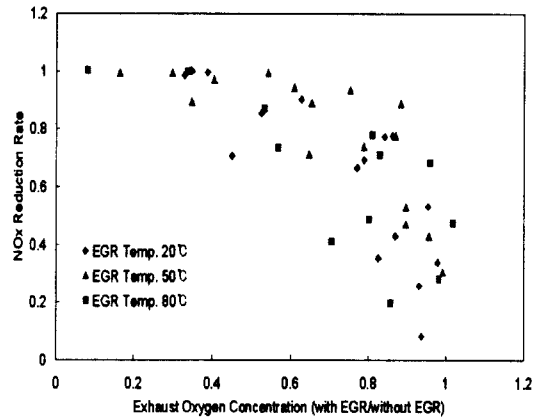


Fig. 7. Effect of exhaust oxygen concentration (with EGR/without EGR) on NOx Emissions.

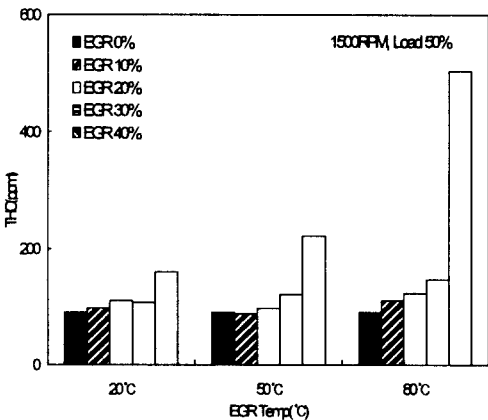
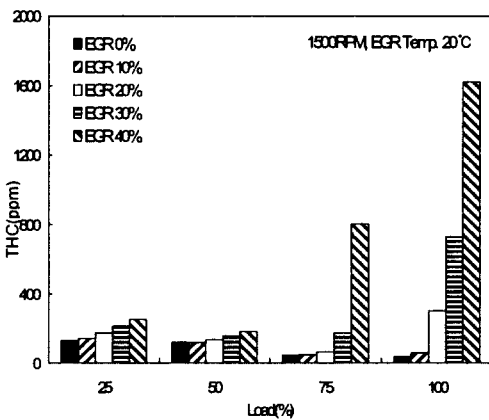
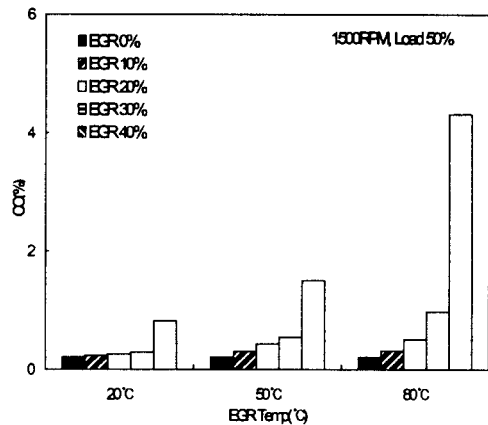
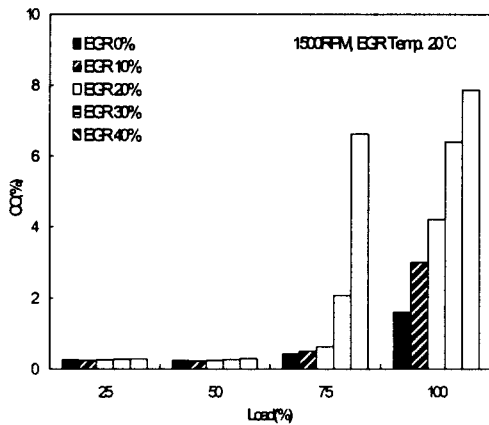


Fig. 8. Comparison of CO and THC emissions.

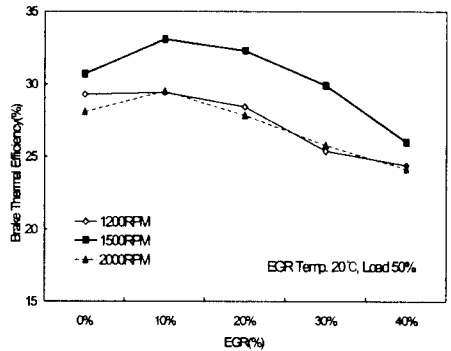
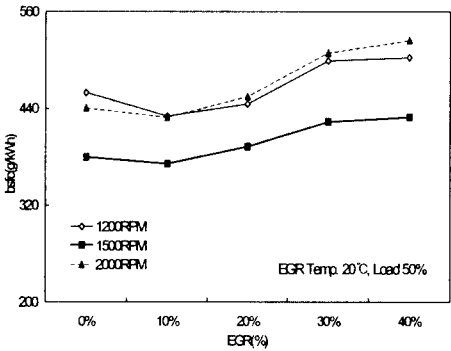
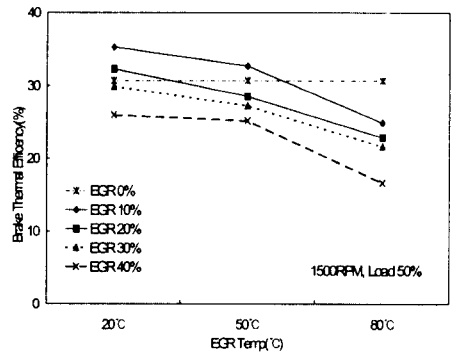
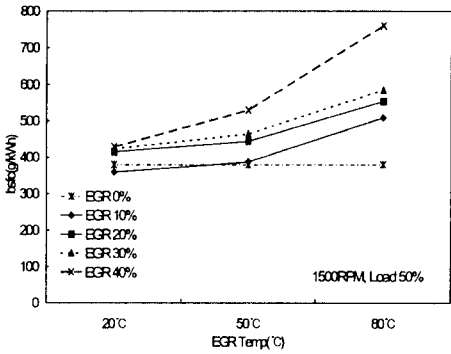
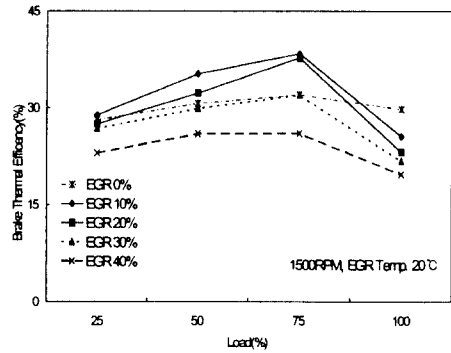
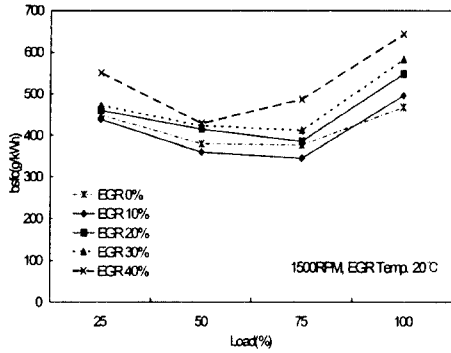


Fig. 9. Comparison of bsfc.

Fig. 10. Comparison of bte.

배출농도에 그다지 영향을 미치지 않음을 볼 수 있다.

3.2 엔진 특성

Fig. 9와 Fig. 10에 여러 엔진 회전속도 및 부하 조건에서 EGR율과 EGR 온도를 변화시켰을 때의 연료소비율과 열효율을 나타낸다.

그림에 의하면, 에너지소비율과 열효율은 EGR

율이 10%인 경우에 가장 양호하고 그보다 EGR 율이 증가하면 악화되는 경향을 보인다. 한편, EGR 온도 변화에 따른 영향을 살펴보면, 온도가 낮을수록 에너지소비율과 열효율이 개선되는 경향을 보인다.

4. 결 론

DME엔진에 높게 배출되는 NO_x를 저감하기 위하여 Cooled EGR을 적용하였다. 연구결과를 요약하면 아래와 같다.

- 1) DME엔진에서는 스모크가 거의 배출되지 않으며, Cooled EGR을 적용하는 경우에도 스모크의 배출농도에 대해서는 영향이 없었다.
- 2) DME 엔진에 Cooled EGR을 적용하면, NO_x의 배출량을 크게 저감할 수 있으며, EGR율이 증가됨에 따라서 그의 저감폭은 보다 커진다.
- 3) EGR율이 증가하면 CO와 THC의 배출농도가 증가하나, EGR 온도는 이들의 배출농도에 그다지 영향을 미치지 않는다.
- 4) 10% 정도의 EGR을 적용하는 경우에는 연료소비율과 열효율이 개선되나, 그보다 EGR율이 증가하면 오히려 악화하는 경향을 보인다.

참 고 문 헌

- 1) 이영재 외, "DME 및 DME 혼합연료의 DI 디젤엔진 성능 및 배기가스 특성", 제16회 에너지절약기술 워크샵 논문집, 한국에너지기술연구원, pp. 107~114, 2001.
- 2) S. Kajitani, Z. L. Chen, M. Konno and KT Rhee, "Engine Performance and Exhaust Characteristics of Direct-injection Diesel Engine Operated with DME", SAE Paper 972973, 1997.
- 3) Shuichi Kajitani and Mitsushige Nakayama, "DME를 이용한 디젤엔진의 가능성과 문제점", 자동차기술, 제52권, 제7호, pp. 49-55, 1998.
- 4) Rasmus Christensen and S. C. Sorenson, Michael G. Jensen and Ken Frils Hansen, "Engine Operation on Dimethyl Ether in a Naturally Aspirated, DI Diesel Engine", SAE 971665, 1997.
- 5) Yoshio Sato, Akira Noda, Takaha Sakamoto and Yuichi Goto, "Performance and Emission Characteristics of a DI Diesel Engine Operated on Dimethyl Ether Applying EGR with Supercharging", SAE 2000-01-1809, 2000.
- 6) 표영덕 외, "DME-경유 혼합연료의 기존 디젤엔진 성능 및 배기가스 특성", KSAE 추계학술대회논문집, Vol. 1, pp. 393~399, 2001.
- 7) 배명환 외, "디젤기관의 배기 배출물에 미치는 스크러버형 EGR 시스템 재순환 배기의 영향에 관한 연구", 대한기계공학회 논문집 B권, 제24권 제9호, pp.1247~1254, 2000.
- 8) 김영길 외, "EGR율이 DI DME엔진의 배기 특성에 미치는 영향", KSAE 추계학술대회 논문집, Vol. 1, pp. 435~440, 2002.