

디메틸에테르 연료를 사용하는 3.3리터 디젤기관의 배기성능 개선

표영덕¹⁾ · 이영재¹⁾ · 김문헌²⁾

한국에너지기술연구원 수송에너지연구센터¹⁾ · 숭실대학교 기계공학과²⁾

Improvement of Emission Performance in a 3.3 Liter DI Diesel Engine by Using Dimethyl Ether Fuel

Youngdug Pyo¹⁾ · Youngjae Lee¹⁾ · Munheon Kim^{*2)}

¹⁾Transportation Energy Research Center, KIER, 71-2 Jang-dong, Yusong-gu, Daejeon 305-343, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

(Received 2 January 2007 / Accepted 2 March 2007)

Abstract : A study is improvement of power and emission in a inline-pump DI diesel engine by using Dimethyl ether Fuel. Dimethyl ether (DME) is an oxygenated fuel with a cetane number higher than that of diesel oil. It meets the ULEV emission regulation and reduces the smoke to almost zero when used in a diesel engine. But NOx emission is almost same and CO, THC emissions are lower than that of diesel engine. The emissions aren't satisfied the stronger emission regulation in the further. Generally DOC (Diesel Oxidation Catalyst) is used to reduce CO & THC emissions and EGR (Exhaust Gas Recirculation) system is used to reduce NOx emission. Test results showed that the torque and the power with DME were almost same as those of pure diesel oil, but the brake thermal efficiency increased a little. also the BSEC (Brake Specific Energy Consumption) with DME was similar that of diesel. The test results showed that the DOC was the vary effective method to reduce the CO emission in case of Dimethyl Ether Fuel in diesel engine. But, THC emission is showed a little reduction rates. Also EGR system was the very effective method to reduce the NOx emission in case of Dimethyl Ether Fuel in diesel engine.

Key words : DME(Dimethyl ether, 디메틸에테르), DI diesel engine(직접분사식 디젤기관), Oxygenated fuel(함산소연료), Alternative diesel fuel(디젤 대체연료), DOC(Diesel Oxidation Catalyst, 디젤산화촉매), EGR(Exhaust Gas Recirculation, 배기가스재순환)

1. 서론

경유를 사용하는 압축착화 디젤기관은 가솔린기관에 비해 연료소비율, 열효율 및 내구성이 우수할 뿐만 아니라 환경적인 측면에서도 희박연소 조건에서 연소가 이루어지므로 유해 배출가스 배출이 적은 장점을 가지고 있으나, 인체에 유해한 입자상물질(Particulate Matter, 이하 PM으로 약칭)의 배출이 많다. 디젤기관에서 배출되는 PM 물질을 저감시키

기 위한 여러 연구들이 진행되고 있지만 현재로서는 매연여과장치로 PM을 포집하여 제거하는 방법 이외에는 별다른 조치가 없는 실정이다. 따라서 디젤기관에서의 PM 배출을 줄이기 위해서는 PM 배출이 적은 대체연료를 디젤기관에 적용할 수 있다면 최선의 방법이 될 것이다. 디메틸에테르(Dimethyl Ether, 이하 DME로 약칭)는 1개의 산소분자와 2개의 메탄기가 결합된 에테르(Ether) 화합물로서, 세탄가가 경유보다 높아 경유 대체연료로서 압축착화 디젤기관에 적용이 가능하고 연료 중에 산소를 함

*Corresponding author, E-mail: mhkim@ssu.ac.kr

유한 함산소연료이므로 디젤기관에서 문제시되고 있는 PM이 거의 배출되지 않는 장점을 가지고 있기 때문에 매연여과장치 없이 배기가스재순환(Exhaust Gas Recirculation, EGR) 및 디젤산화촉매(Diesel Oxidation Catalyst, DOC) 등에 직접 적용이 가능하여 질소산화물(NOx)을 비롯한 일산화탄소(CO) 및 THC도 대폭 저감할 수 있는 등 디젤기관의 대체연료로서 우수한 특성을 많이 가지고 있다.¹⁻⁴⁾

저자들은 이전 연구에서 인라인방식(Inline pump) 연료공급계를 사용하는 공냉식 시험용 단기통 직접분사 디젤기관을 대상으로 DME 연료의 적용 가능성과 EGR 적용에 의한 성능 및 배기특성에 대하여 검토한 바 있다.⁵⁾

이러한 연구결과를 바탕으로 DME 연료를 디젤기관에 적용시키기 위하여 DME 연료공급시스템을 제작하였으며, 또한 인라인 분사계 디젤기관의 연료공급계를 사용하는 3.3리터급 직접분사식 디젤기관에 DME 연료를 사용할 수 있도록 연료분사펌프 플런저의 유효 행정과 인젝터 노즐개변압력 등을 수정하여 경유와 동등한 전 부하 출력을 확보하고, DME 연료 사용에 의한 기관성과 배기가스 특성 등을 분석하였으며, 또 EGR 적용에 따른 기관성과 배기특성에 대해서 연구한 바 있다.⁶⁻⁸⁾

본 연구에서는 DME를 연료로 하는 3.3리터급 직접분사식 디젤기관에 EGR을 적용하고 디젤산화촉

매(DOC)를 병행하여 사용함으로써 DME 연료의 연소 특성을 파악하고 배기가스 중의 CO 및 THC, NOx 저감 효과를 분석하여 향후 압축착화 DME기관의 실용화 및 최적화하기 위한 문제점들을 개선하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

Fig. 1 및 Fig. 2에 디젤산화촉매(DOC) 및 EGR을 적용한 압축착화 DME기관의 성능실험을 위한 실험장치의 개략도 및 전경을 나타낸다.

실험기관은 배기량 3.3리터, 압축비 17, 인젝터 개변압력(Nozzle opening pressure) 22MPa의 4기통 직접분사식 디젤기관으로 그 제원은 Table 1과 같다.

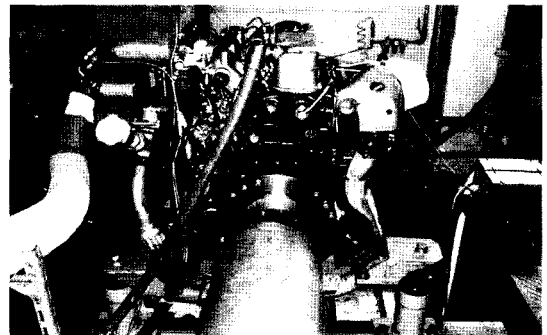


Fig. 2 Inline-pump direct injection DME test engine

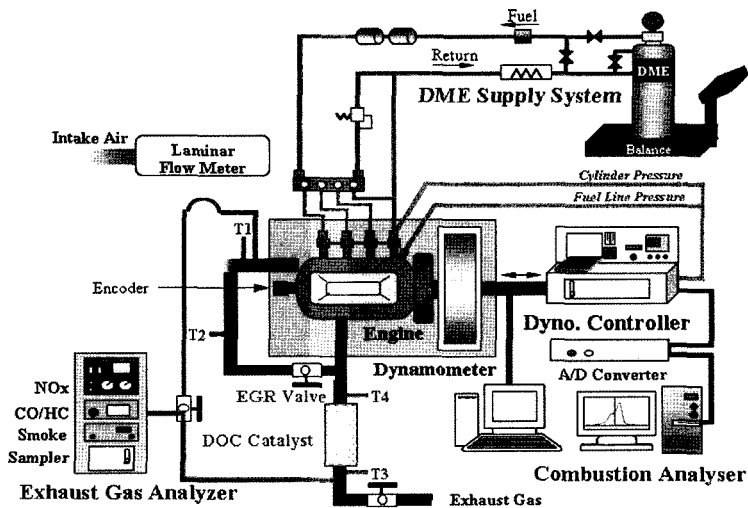


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Specification of test engine

| Item | Prototype DME engine |
|------------------------------|---------------------------|
| Cylinder number | 4 |
| Displacement(cc) | 3,298 |
| Maximum power(ps/rpm) | 120/3,400 |
| Compression ratio | 17:1 |
| Injection & nozzle type | Direct injection, 4 holes |
| Nozzle opening pressure(MPa) | 22 |
| Injection timing(°BTDC) | 15 |

기관성능 실험 장치는 크게 나누어 실험기관과 기관 동력계, DME 연료 공급시스템, 디젤산화촉매 및 EGR 장치, 주변기와 배기가스분석기 등으로 구성되며 각각의 센서에서 출력되는 신호는 데이터 분석 시스템에 의해 순시 값으로 샘플링되어 분석된다.

DME 연료공급을 위하여 Fig. 3과 같은 DME 연료공급시스템을 제작하여 사용하였다. DME 연료공급은 연료분사펌프 내에서의 온도상승에 의한 기화를 방지하고 액상으로 유지 공급하기 위하여 2개의 피드펌프를 사용하였으며, 이때 연료용기압력보다 약 1MPa 정도 높게 가압하여 연료분사펌프로 공급하였다. 또한 연료라인 내의 맥동을 방지하기 위하여 연료분사펌프 후단에 어큐뮬레이터(Accumulator)를 설치하고 일정한 연료압력 제어를 위하여 레귤레이터(Regulator)를 설치하였으며, 레귤레이

터를 거친 연료분사펌프의 리턴연료와 인젝터의 리턴연료는 체크밸브를 거쳐 연료용기로 순환되도록 하였다.

한편, DME 연료는 점도가 경유의 약 1/20 정도로 매우 낮기 때문에 윤활성 향상제를 소량 첨가하여 사용하였으며, 연료분사펌프(Inline type)를 개조하여 실링 부위는 NBR(Nitrile buta- diene rubber) 및 동재질로 교체하고 DME 연료를 가압한 후 분사펌프에 공급하기 위하여 연료공급배관을 스테인리스 재질로 교체하였다.

DME 연료 사용 시의 DOC 및 EGR 적용에 따른 배출특성을 파악하기 위하여 경유 사용 시와 동일하게 배기가스 중의 CO, CO₂ 및 THC는 비분산 적외선법(MEXA 554JK, Horiba), NO_x는 화학발광법(10AR, Thermo environment), O₂는 화학발광법(MEXA 720X, Horiba), 그리고 스모크는 여지반사식(AFT-2000, World environment)을 사용하여 측정하였다.

DME 연료의 연소 특성을 파악하기 위하여 압전식 압력변환기(Type 6125B & 6005, Kistler)를 사용하여 실린더 내의 연소압력 및 인젝터 연료공급압력 등을 측정하였다.

DOC 촉매는 현재 시판 중인 디젤 차량에 장착되어 사용하고 있는 동급 배기량의 DOC 촉매를 선정하여 소음기 앞쪽 위치에 설치하였으며 또한 EGR 장치를 제작 설치하였다.

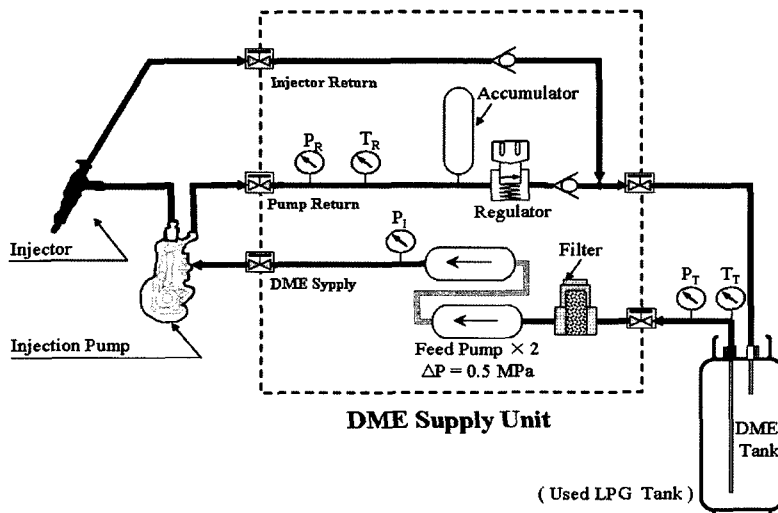


Fig. 3 Schematic diagram of DME fuel supply system

EGR 율은 CO₂ 계측을 통하여 아래의 식으로 계산하였다.

$$EGR\ Rate(\%) = \frac{[CO_2]_{EGR} - [CO_2]_{W/O\ EGR}}{[CO_2]_{EXH}} \times 100$$

여기서, [CO₂]_{EGR}은 EGR시 흡기의 CO₂ 농도, [CO₂]_{W/O EGR}은 EGR하지 않은 경우 흡기의 CO₂ 농도이고, [CO₂]_{EXH}는 EGR시의 배기관에서 측정되는 CO₂의 농도이다.

아울러 흡입공기량(Laminar flow meter, P7209, Cussions) 및 배기가스중의 산소농도(MEXA-720, Horiba)를 측정하여 검증하였다.

2.2 실험방법

기관 회전속도는 DME 및 경유 사용 시 모두 1,000rpm, 1,500rpm, 2,000rpm 및 2,500rpm으로 하였으며 기관 부하는 각 회전속도에 대하여 경유 사용 시의 최대 토크를 기준으로 20%, 40%, 60%, 80% 및 전 부하로 변화시켜 실험하였다.

EGR 율은 선행 연구결과를 바탕으로 기관 회전수가 2,500rpm이고 80% 부하조건에서는 EGR 율을 25%, 전부하에서는 15%로 설정하였으며, 그 외의 조건에서는 모두 EGR 율을 35%로 설정하였다. 이렇게 설정된 이유는 고회전, 고부하 영역에서 EGR 율 증가에 따른 기관 출력 감소와 DOC 전환효율이 악화되기 때문이다.⁹⁾

본 연구에서는 DME 연료 사용 시 경유와 동등한 전부하 출력의 연료분사량을 확보하기 위하여, 인젝터 개변압력(Nozzle opening pressure)을 기존 경유의 개변압력인 22MPa에서 10MPa로 낮추었으며, 연료분사펌프 플런저의 유효 행정을 증가시켜서 기관 성능실험을 실시하였다.

또한 인젝터 개변압력의 변화에 따른 인젝터의 분사 특성을 파악하기 위하여, 인젝터 바로 전단에 압전식 압력 트랜스미터(Kistler type 6005)를 설치하고 연료 라인 내의 압력을 측정하여 DME 연료 사용 시와 비교하였다.

기관의 연료분사시기는 경유 및 DME 연료 사용 시 모두 기존의 경유에 대한 최적 연료분사시기인 15°BTDC로 설정하여 실험하였다.^{6,7)}

본 실험에서 사용한 제동에너지소비율(Brake

Specific Energy Consumption, BSEC)은 제동연료소비율(Brake Specific Fuel Consumption, BSFC)에 연료의 발열량(Heating value)을 곱하여 나타낸 것으로, 경유와 DME 연료의 발열량이 서로 다르기 때문에 동일한 입열량 기준으로 성능을 비교하기 위하여 사용되었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 기관 성능 실험

Fig. 4는 기관 회전수 2,500rpm, 전부하 조건에서 DME 연료 사용 시 인젝터 개변압력 변화에 대한 연료라인 내의 압력 변화를 경유 사용 시와 대비하여 나타낸 것이다. 인젝터 개변압력 변화에 대한 영향을 자세히 파악하기 위하여 경유 사용 시는 개변압력을 22MPa 및 10MPa로, DME 연료 사용 시는 10MPa로 하여 실험하였다.

그림에서 보는 바와 같이 경유 사용 시는 연료 라인 내의 압력은 약 26°BTDC에서부터 상승하기 시작하여 인젝터 개변압력인 22MPa까지 도달하는 시점은 15°BTDC이며 바로 이 시점이 설정된 연료분사시기가 된다.

또한 경유 사용 시의 인젝터 개변압력을 22MPa에서 10MPa로 변경하여도 연료라인 최고압인 10MPa로 상승되는 시기는 15°BTDC로 점화시기는 변화되지 않고 있음을 알 수 있다.

그러나 DME 연료 사용 시는 경유 사용 시와 동일한 15°BTDC의 연료분사시기가 되도록 설정 하였음에도 불구하고 인젝터의 개변압력에 도달하는 시기는 경유 사용 시에 비해 15°정도 늦게 일어나고 있는

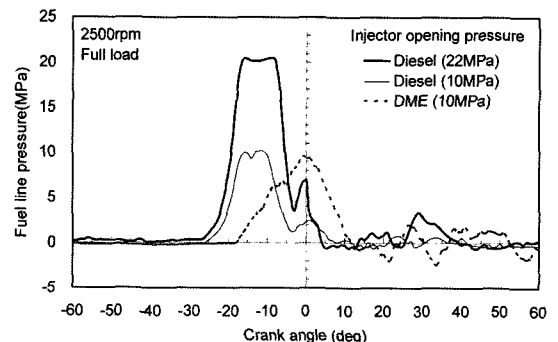


Fig. 4 Comparison of fuel line pressure

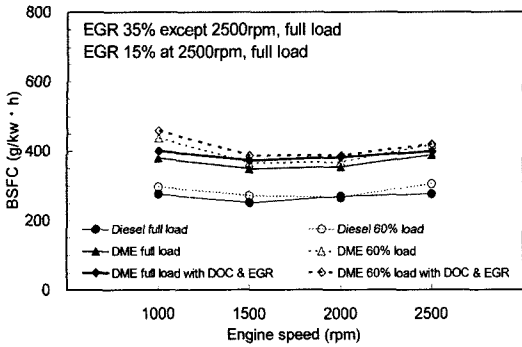


Fig. 5 Comparison of BSFC with various load

것을 알 수 있다. 이는 바로 DME 연료의 압축성에 기인된 것이다.

Fig. 5는 DME 연료 사용 시 기관 회전속도 변화에 대한 제동연료소비율(BSFC)과의 관계를 부하변화에 대하여 경유 사용 시와 비교하여 나타낸 것이다. 운전조건은 2500rpm, 전 부하에서의 EGR율은 15%, 80% 부하조건에서는 EGR율을 25%로 하였으며 그 이외의 기관 회전속도 변화에 대해서는 35%의 EGR율로 하여 실험하였다.

부하 변화에 대해서는 대표적으로 전 부하인 경우와 60% 부분 부하의 두 경우에 대해서만 나타내었다. DME 연료 사용 시는 DOC와 EGR 장치를 적용하지 않은 경우와 장착한 경우에 대하여 비교하였다.

그림에서 보는 바와 같이 DME 연료의 경우는 낮은 발열량으로 인해 제동연료소비율은 경유와 비교하여 기관 회전속도 변화 전 영역에서 증가하고 있으며, DME 연료를 사용하여 DOC 및 EGR을 적용하는 경우 이들을 적용하지 않은 경우에 비해 제동연료소비율이 약간 증가하는 경향을 나타내었다.

부분 부하에 대한 제동연료소비율을 비교하여 보면 60% 부분 부하의 경우가 전부하인 경우 보다 DME 연료 사용 시나 경유 사용 시 모두 제동연료소비율은 약간 증가되고 있다.

Fig. 6 및 Fig. 7은 Fig. 5의 운전조건에서 제동에너지소비율(BSEC) 및 제동열효율(BTE)을 나타낸 것이다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 제동에너지소비율로 비교하여 보면 DME 연료를 사용하는 경우나 경유를 사용하는 경우 모두 제동에너지소비율은 큰 차

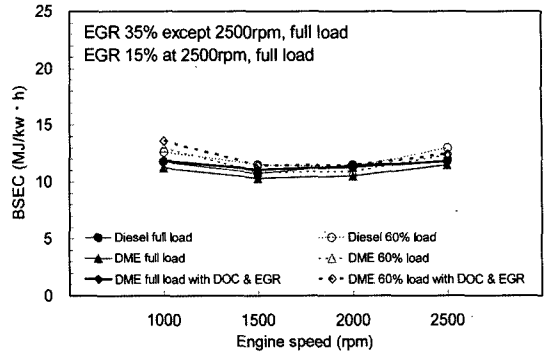


Fig. 6 Comparison of BSEC with various load

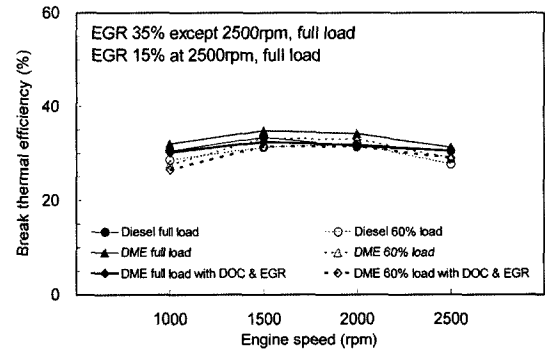


Fig. 7 Comparison of BTE with various load

이 없이 전 운전범위에서 비슷한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

또한 Fig. 7에서 보는 바와 같이 제동열효율의 변화 양상도 이와 같은 경향을 나타내고 있다.

이상의 실험결과로부터 실험방법에서 언급된 바와 같이 DME 연료 사용 시 인젝터의 개변압력을 변화시키고 플런저의 유효행정을 증가시킴으로서 경유 사용 시 동등한 출력을 얻기 위한 연료 분사량이 확보된 것으로 판단되며 따라서 DME 연료를 직접 분사식 디젤기관에 쉽게 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 8은 기관 회전수 1,500rpm, 전부하 조건에서 DME 연료 사용 시의 연소압력변화를 경유 연료와 비교하여 나타낸 것이며 또한 DME 연료 사용 시 DOC 및 EGR의 적용에 따른 전부하 조건에서의 연소압력변화와 60% 부분 부하에 대한 결과를 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이 DME 연료의 경우 연료 자체의 특성인 압축성으로 인해 연료 분사시기가

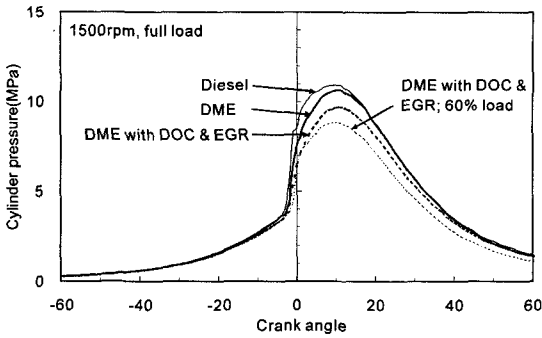


Fig. 8 Comparison of cylinder pressure

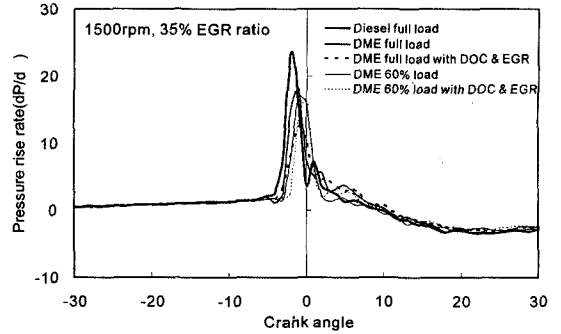


Fig. 10 Comparison of pressure rise rates

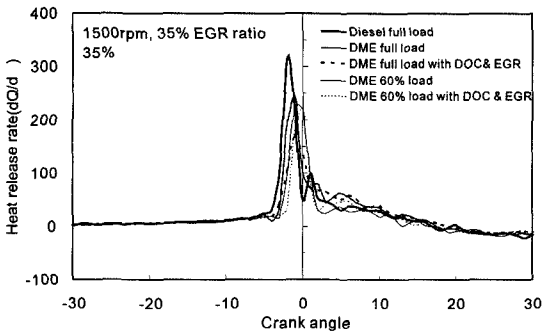


Fig. 9 Comparison of heat release rates

늦어져 연소 최고압력의 발생 시기가 다소 늦어지고 있으며 연소 최고압력의 크기도 감소되고 있다. 또한 DME 연료 사용 시 DOC 및 EGR을 적용하는 경우에도 연소 최고압력의 크기가 감소되고 있는데 이는 EGR에 따른 연소실로 유입되는 공기 중 불활성가스분이 증가되어 연소가스의 온도가 낮아짐으로서 연소 최고압력은 감소되는 것으로 판단된다.

Fig. 9는 1,500rpm, EGR을 35%의 경우 전 부하 조건에서 DME 연료 사용 시와 DME 연료 사용 시 DOC 및 EGR을 적용하였을 경우 열발생율의 변화를 경유 사용 시와 비교하여 나타낸 것이며, 또한 DME 연료 사용 시 60% 부분 부하 운전조건인 경우도 함께 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이 DME 연료의 경우가 경유에 비하여 최고 열발생율의 크기는 작게 나타나지만 전체 열발생량은 서로 동일하게 발생되고 있다. 이는 전술한 바와 같이 동등한 출력을 얻기 위한 연료 분사량이 확보되었기 때문일 것이다. DOC 및 EGR을 적용하였을 경우 및 부분 부하 시 최고 열발생율의 크기는 작다.

Fig. 10은 Fig. 9의 운전 조건에서 압력상승율의 변화 경향을 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 최고 압력상승율 크기의 변화 경향은 Fig. 9에서의 열발생을 변화 경향과 유사하게 나타나고 있다.

3.2 배출가스 성능 실험

Fig. 11부터 Fig. 14까지는 기관회전수 2,000 rpm 및 1,500rpm, 전 부하 조건에서 DME 연료 사용 시와 DOC를 장착하고 EGR을 수행하는 경우 매연 및 NO_x, CO, THC 배출농도와의 관계를 부하 변화에 대하여 나타낸 것으로 경유 사용 시와 대비하여 나타내었다. 이 때 EGR 율은 Fig. 5에서와 동일한 조건으로 하였다.

Fig. 11의 매연 배출 경향을 살펴보면 경유 사용 시는 부하의 증가에 따라 매연 배출은 크게 증가되고 있으며, 전 부하의 경우는 부분 부하 20%에 비해 4배 이상의 매연이 배출되고 있다.

그러나 DME 연료를 사용하는 경우는 모든 운전 조건에서 매연이 거의 배출되지 않는 것을 알 수 있으며, 또한 DOC 및 EGR을 적용하는 경우에도 매연이 거의 배출되지 않고 있다.

Fig. 12는 NO_x의 배출농도를 나타낸 것이다. DME 연료를 사용하는 경우나 경유를 사용하는 경우 모두 기관 부하 증가에 따라 NO_x의 배출농도는 증가하고 있는데 이는 고부하일수록 연소가스의 온도가 상승되기 때문 일 것이며 경유 사용 시의 NO_x의 배출농도는 DME 연료를 사용하는 경우에 비해 2배 이상에 달하고 있다. 한편 기관 회전수 1,500rpm에 비해 2,500rpm의 경우 고부하 쪽에서 NO_x의 배출농

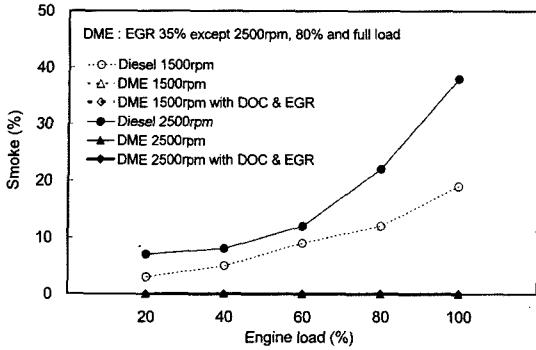


Fig. 11 Comparison of Smoke with various load

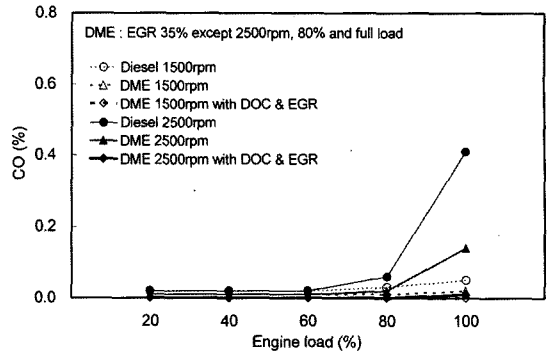


Fig. 13 Comparison of CO with various load

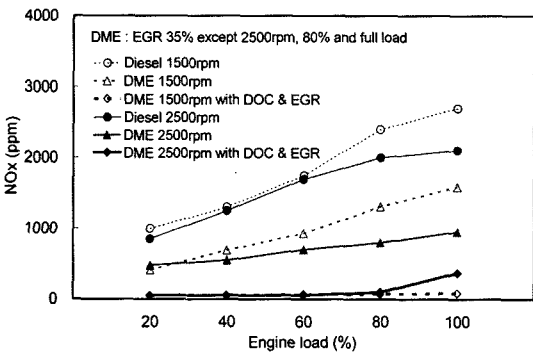


Fig. 12 Comparison of NOx with various load

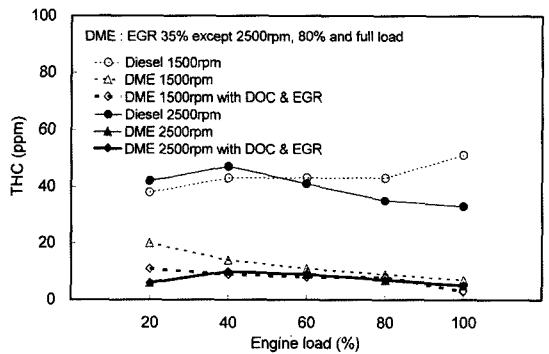


Fig. 14 Comparison of THC with various load

도는 오히려 감소되고 있다. 이러한 결과는 기관 회전수 2,500rpm의 경우 보다 최대토크가 발생되는 1,500rpm의 경우가 연소가스의 온도가 높게 나타나기 때문일 것이다.⁷⁾

한편 DME 연료 사용 시 DOC를 장착하고 EGR을 수행하는 경우 모든 운전조건에서 NOx 배출농도는 크게 감소되어 특히 중 부하 이하의 운전 시는 거의 배출되지 않고 있다.

Fig. 13은 CO의 배출농도를 나타낸 것이다. 디젤 기관은 과잉공기로 운전되기 때문에 CO의 배출농도는 가솔린기관에 비할 수 없을 정도로 적게 배출되어 전 부하시 경유의 경우는 약 0.4% 내외, DME 연료의 경우는 0.2% 정도이다. 특히 DME 연료 사용 시 DOC를 장착하고 EGR을 수행하는 경우에는 부하영역 전반에서 0.05% 이하로 CO의 발생량은 거의 없는 것으로 나타났다.

Fig. 14는 THC의 배출농도를 나타낸 것으로 그림에서 보는 바와 같이 부하 변화에 크게 영향을 받고 있지 않는 것으로 판단되며, DME 연료 사용 시 경

유연료와 비교하여 보면 부하영역 전반에 걸쳐 THC의 발생량이 절반 이하로 나타나고 있다.

한편 DME 연료 사용 시 DOC를 적용할 경우의 THC의 배출농도는 저 부하시 저감효과가 뚜렷하게 나타나고 있으나 고부하일 수록 저감효과는 둔해지고 있다. 이것은 실험에 사용된 DOC가 기존 경유 차량에 장착되는 것으로 DME에 대하여 최적화되지 않았기 때문일 것이다.

또한 일반적인 DOC의 CO 및 THC의 전환효율을 온도 변화에 대하여 고려할 때, 저온에서의 THC의 전환효율은 CO의 전환효율보다 낮게 나타나고 있다. 따라서 DME 연료를 사용하는 경우는 배기가스 온도가 경유에 비해 다소 낮아져 THC의 저감 효과는 크게 나타나지 않는 것으로 판단된다.

4. 결론

3.3리터급 압축착화 직접분사 DME 기관의 배기 성능 개선을 위하여 수행한 실험을 통하여 아래의 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) DME 연료를 직접분사식 디젤기관에 적용하여 배기성능을 개선시키기 위해 인젝터의 개변압력을 변화시키고 연료분사펌프 플런저의 유효행정을 증가시킴으로서 경우 사용 시와 동등한 출력을 얻을 수 있었으며, DOC를 장착하고 EGR을 수행하는 경우에도 제동에너지소비율은 경우 사용 시와 동일하게 나타났다.
- 2) 인젝터 개변 압력을 10MPa로 낮추어 DME를분사한 결과, DME의 압축성으로 인하여 경유에 비해 동일한 분사시기에서 분사지연이 발생되고 최고 열발생율의 크기는 작게 나타나지만 전체 열발생량은 경유와 동일하게 나타나고 있다.
- 3) DME 연료를 사용할 경우 매연발생은 거의 없으며 DOC 및 EGR을 적용함으로써 CO 및 NOx의 배출량을 큰 폭으로 낮출 수 있었으며 또한 THC의 저감효과도 기대된다.

따라서 DME 연료를 사용하여 직접분사식 디젤기관에 적용하는 경우 매연의 배출이 없기 때문에, 매연 여과장치 없이 DOC를 장착하여 EGR을 수행할 수 있으므로 출력의 손실 없이 CO 및 THC, NOx 등의 유해배출가스를 모두 저감할 수 있는 가능성을 확인하였다.

References

- 1) Y. Sato, A. Noda, T. Sakamoto and Y. Goto, "Performance and Emission Characteristics of a DI Diesel Engine Operated on Dimethyl Ether Applying EGR with Supercharging," SAE 2000-01-1809, 2000.
- 2) D. Gill, H. Ofner, E. Sturman, J. Carpenter and M. A. Wolverton, "Production Feasible DME Technology for Direct Injection CI Engines," SAE 2001-01-2015, 2001.
- 3) T. Tsuchiya and Y. Sato, "Development of DME Engine for Heavy-duty Truck," SAE 2006-01-0052, 2006.
- 4) H. C. Kim, W. Kang, B. C. Na and M. H. Kim, "A Numerical Study on Combustion Characteristics of Single Cylinder Engine Fueled with DME," Transactions of KSAE, Vol.14, No.4, pp.39-48, 2006.
- 5) Y. D. Pyo, Y. J. Lee, G. C. Kim and M. H. Kim, "A Study on Performance and Exhaust Emissions of DI Diesel Engine Operated with Neat DME and DME Blended Fuels," Transactions of KSAE, Vol.11, No.2, pp.75-82, 2003.
- 6) Y. D. Pyo, M. H. Kim, J. K. Oh, G. C. Kim and Y. J. Lee, "Engine Performance and Exhaust Characteristics of Inline-pump DI Diesel Engine by Using Dimethyl Ether Fuel(1)," Spring Conference Proceedings, KSAE, Vol.I, pp.326-331, 2004.
- 7) Y. D. Pyo, M. H. Kim, J. K. Oh, J. H. Bang, G. C. Kim and Y. J. Lee, "Engine Performance and Exhaust Characteristics of Inline-pump DI Diesel Engine by Using Dimethyl Ether Fuel(2)," Fall Conference Proceedings, KSAE, Vol.I, pp.334-339, 2004.
- 8) T. H. Joo, Y. D. Pyo, M. H. Kim, J. K. Oh, J. H. Bang, G. C. Kim and Y. J. Lee, "Improvement of NOx Emission for EGR in a Inline-pump DI Diesel Engine by Using Dimethyl Ether Fuel," Spring Conference Proceedings, Vol.I, KSAE, pp.172-177, 2005.
- 9) Y. D. Pyo, Y. J. Lee, G. C. Kim and M. H. Kim, "Engine Performance and Exhaust Emissions Characteristics of DI Diesel Engine with Neat Dimethyl Ether," KSME, B, Vol.27, No.5, pp.589-595, 2003.