Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 11, No. 2, pp.75-82 (2003)

# 순수 DME 및 DME 혼합연료의 직접분사식 디젤기관의 성능 및 배기가스 특성에 관한 연구

표 영 덕[*1] · 김 강 출[1] · 이 영 재[1] · 김 문 헌[2]

한국에너지기술연구원 수송에너지연구팀[1] · 숭실대학교 기계공학과[2]

# A Study on Performance and Exhaust Emissions of DI Diesel Engine Operated with Neat DME and DME Blended Fuels

Youngdug Pyo[*1] · Gangchul Kim[1] · Youngjae Lee[1] · Munheon Kim[2]

[1]*Transportation Energy Research Team, KIER, 71-2 Jang-dong, Yusung-gu, Daejeon 305-343, Korea*

[2]*Department of Mechanical Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea*

***(Received 7 October 2002 / Accepted 3 January 2003)***

**Abstract** : DME is a good alternative fuel to reduce the smoke remarkably when used in a diesel engine, while problems concerned with low lubricity and high compressibility exist. In the present study, single cylinder DI diesel engine was operated with neat DME and DME blended fuels which are DME-diesel blended fuel and DME-propane blended fuel. The results showed that the power of the neat DME and DME blended fuels was the same as that of pure diesel oil, and the specific energy consumption slightly increased. In addition, smoke emission was considerably reduced with the increase of DME content up to zero level, but NOx emission was slightly increased.

**Key words** : DME(디메틸에테르), Diesel engine(디젤기관), Exhaust emissions(배기가스), Low emissions alternative fuelled engine(저공해 대체연료엔진)

## 1. 서 론

디젤기관은 가솔린기관보다 열효율이 높고 온실가스인 이산화탄소의 배출량이 적은 장점이 있는 반면에 PM과 $NO_x$의 배출농도가 높은 단점이 있다.

이에 따라서 엔진 개량, 배기 후처리장치의 개발 등 디젤기관의 고효율을 손상시키지 않으면서도 배기 배출물을 대폭 저감하려는 연구가 지속적으로 진행되고 있으며, 아울러 기존 석유계 연료에 대신한 저공해 대체연료의 적용 연구도 활발히 추진되고 있다.

현재 디젤기관의 대체연료로 가장 활발히 검토되고 있는 천연가스와 액화석유가스는 저공해 대체연료로서 디젤기관의 PM 등을 대폭 저감할 수 있으나 세탄가가 아주 낮아서 디젤사이클 운전이 불가능하여 가솔린기관으로 전환해야하기 때문에 기관의 열효율이 저하하는 단점이 있다.

DME(Dimethyl Ether)는 세탄가가 높고 자발착화 온도가 낮기 때문에 압축착화에 의한 디젤사이클 운전이 가능하여 디젤기관과 같은 수준의 높은 열효율과 이산화탄소 배출량을 얻을 수 있고, 연료 중에 산소가 함유된 함산소연료이기 때문에 PM을 거의 배출하지 않는 등 디젤 대체연료로서 우수한 특성을 많이 가지고 있으며,[1,2] 특히 최근에 낮은 가격

* To whom correspondence should be addressed.
ydpyo@kier.re.kr

으로 DME를 제조할 수 있는 직접 합성반응기술이 개발됨에 따라서 차세대의 유망한 저공해 대체연료로서 연구개발이 활발히 추진되고 있다.[3,4]

DME를 압축착화 디젤기관에 적용시키기 위한 기존의 연구들을 살펴보면 연구 초기인 1991년에는 Karpuk 등[5]이 메탄올의 높은 자착화 온도를 개선하기 위한 수단으로 압축착화 메탄올 기관의 착화 향상제로 DME를 첨가하였으며 1995년부터 DME 신제조공정기술 개발과 함께 순수 DME의 엔진 적용 연구가 시작되었다.

Sorenson 등[6,7]은 기존의 연료공급시스템에 순수 DME를 적용하여 실험한 연구에서 DME의 압축성 때문에 분사압력이 낮아지고 연료라인내의 잔류압력도 높아지는 것을 알았으며 배출가스 실험에서는 매연의 발생이 거의 없고 EGR적용으로 $NO_x$가 크게 감소하는 것으로 보고하고 있다.

Kajitani 등[8,9]은 DME를 적용한 기존 디젤기관의 기관성능과 배출가스 특성 등을 실험한 연구에서 연료펌프의 플런져 등에서의 마모특성을 밝히고 윤활성 향상제를 사용하였으며 DME의 낮은 착화온도와 높은 세탄가에 기인하여 경유사용시 보다 열발생율의 발생시기는 빠르고 그 최고치는 낮아지는 것으로 보고하고 있다.

또한, DME의 낮은 매연 발생과 높은 세탄가의 이점을 살리기 위하여 수행한 DME-Propane 혼합연료의 직접분사식 디젤기관 적용을 위한 연구에서는 프로판 함량이 증가할수록 점화가 지연되고 자발화가 둔화되어 결과적으로 열발생이 지연되며 배출특성 중에서는 매연은 무시할 정도이고 $NO_x$는 일반적으로 순수 DME 보다 낮은 것으로 보고하고 있다.

Gill 등[10]은 직접분사식 디젤기관의 DME 실용화 가능기술 연구를 통해 동일한 연료공급장치를 사용하여 세가지 방식의 연료분사시스템(inline pump system, common rail system 및 digital hydraulic operating system)에 각각 적용하였으며, 여기서 전통적인 기계식 인라인펌프 시스템도 DME 특유의 특성에 대처함으로써 적용이 가능한 것으로 보고하고 있다.

국내의 연구로는 DME의 디젤기관 적용을 위한 연구가 최근에 일부 수행되고 있다.[11]

본 연구에서는 기존 디젤기관 및 연료공급계에 순수 DME를 적용하여 기관성능과 배출가스 특성 등을 분석함으로써 DME의 적용 가능성과 아울러 문제점을 파악하고자 하였으며 또한, 기존 석유계 연료 및 DME의 단점을 상호 보완하여 DME의 보급을 활성화한다는 측면에서 DME -경유 혼합연료 및 DME-LPG 혼합연료에 대해서도 실험 연구를 실시하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1에 실험장치의 개략도를 나타낸다. 엔진동력계는 직류방식으로서(Plint, Model TE 46), 최대흡수동력은 11kW이고 최고 회전속도는 5000rpm이다. 실험기관은 배기량 304cc의 공냉식 단기통 4사이클 직접분사식 디젤기관으로서 기관의 제원은 Table 1에서와 같다.

기관의 연료분사펌프는 인라인방식(Jerk type)으로서 크랭크축에 직결되어 작동되며 공급된 연료는 원형(hole type)의 인젝터(4 hole)를 통하여 실린더내로 분사된다.

순수 DME와 DME 혼합연료(DME-경유 및 DME-LPG)는 액상으로 고압용기에 충전한 후 고압의 질소가스로 가압(약 3MPa)하여 기관의 연료분사펌프에 공급하였다.

DME는 기존 디젤기관의 연료인 경유보다 낮은 점성과 윤활성으로 인하여 연료분사 시스템에서 누설과 마모를 유발할 우려가 있기 때문에, 순수 DME 및 DME-LPG 혼합연료 사용시에는 윤활성 향상제로서 R655(Imfineum Co.)를 약 300ppm 첨가하여 사용하였다. 연료소비량은 경유의 경우에는 체적법으로, 순수 DME 및 DME 혼합연료의 경우에는 정밀저울을 이용한 중량법으로 측정하였다.

실린더내의 연소압력과 인젝터 연료라인내의 압력은 압전식 압력변환기(Kistler, Type 6123 및 6005)를 사용하여 측정하였으며 이들 압력센서에서 출력되는 신호는 차지앰프를 통하여 크랭크각 1도당 연소해석기에 입력되어 분석되었다.

배기가스 중에서 CO와 THC는 비분산적외선법(Horiba, MEXA 324JK)에 의해 측정하였고 $NO_x$는

화학발광법(Thermo Environment, 10 AR)에 의해 측정하였으며 매연은 여지반사식(World Environment, AFT- 2000)을 사용하여 측정하였다.

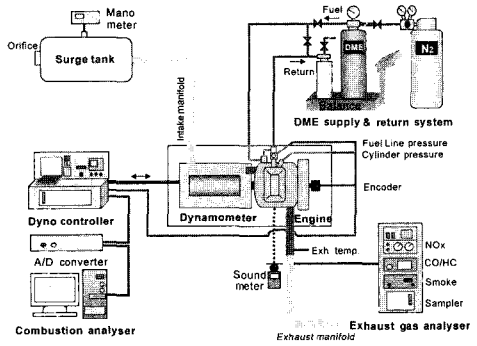


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Specifications of test enginec

| Item | Lister-Petter AC1001 diesel engine |
|---|---|
| Number of cylinder | 1(Air-cooled 4 cycle) |
| Bore × Stroke | 76.2 × 66.68(mm) |
| Displacement | 304(cc) |
| Maximum power | 6.5/3500(kW/rpm) |
| Compression ratio | 17:1 |
| Injection type | Direct injection |
| Nozzle opening pressure | 20(MPa) |

### 2.2 실험방법

실험에는 4종의 연료(경유, 순수DME, DME-경유 및 DME-LPG 혼합연료)를 사용하였으며 이중에 혼합연료는 체적비로 각각 50 : 50으로 혼합하여 사용하였다. Table 2에 실험에 사용한 경유와 DME 및 LPG의 주성분인 프로판의 연료특성을 나타낸다.

Table 2 Major properties of test fuels

| Characteristic | Diesel | DME | Propane |
|---|---|---|---|
| Chemical formula | - | $CH_3OCH_3$ | $C_3H_8$ |
| LHV(MJ/kg) | 42.5 | 27.6 | 46.4 |
| Liquid density(kg/㎥) | 831 | 667 | 500.5 |
| Cetane number | 38~53 | 55~60 | 5 |
| Stoich. A/F ratio(kg/kg) | 14.6 | 9.0 | 15.7 |
| Auto ignition temp.(℃) | 250 | 235 | 470 |
| Boiling point(℃) | 180/370 | -24.9 | -42 |
| Heat of vaporization(kJ/kg) | 250 | 460 | 372 |
| Ignition limits(% Gas/Air) | 0.6~6.5 | 3.4~18.6 | 2.0~9.5 |
| Oxygen(% wt) | 0 | 34.8 | 0 |

기관 회전속도는 이들 4종의 연료 사용시 모두 2,000rpm의 조건으로서 기관 부하는 경유 사용시의 최대토크를 기준으로 25%, 50%, 75% 및 전부하로 변화시켜 실험하였다. 1,000rpm, 1,500rpm 및 2,500 rpm에서도 위와 동일한 실험을 실시하였으나 실험결과의 경향이 비슷하여 본 논문에서는 논의하지 않는다.

예비실험을 통하여 DME는 경유보다 압축성이 크기 때문에 연료라인내에서 압력저하가 발생하여 원하는 분사압력과 분사량을 얻을 수 없음을 확인하였다. 따라서 순수경유 이외의 다른 연료 사용시에는 기존 디젤기관의 연료분사펌프를 고압 고용량화하여 사용하였으며 또한 인젝터의 개변압력도 DME 및 DME-LPG 혼합연료의 사용시에는 기존의 20MPa에서 13MPa로 낮추어 실험하였다. 이에 따라서 경유 사용시와 동일한 발열량 기준의 연료분사량을 얻을 수 있었으며 모든 기관 회전속도 조건에서 경유 사용시와 거의 동일한 전부하 출력을 얻을 수 있었다.

기관의 연료분사시기는 경유 사용시에는 기존 기관의 분사시기인 18° BTDC이며 DME 및 DME 혼합연료 사용시에는 예비실험을 거쳐 5° 지각한 13° BTDC를 사용하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 기관 성능특성

Fig. 2에 순수 DME, DME-경유 및 DME- LPG 혼합연료에 대한 연료라인압력, 연소압력, 열발생율 및 압력상승율을 경유 사용시와 대비하여 나타낸다. 이때 기관 운전조건은 2,000rpm 전부하의 경우이다.

그림에서 보는바와 같이 순수 DME와 DME 혼합연료의 경우에는 연료 분사시기를 경유보다 5° 지연시킴으로 인하여 연료라인내의 압력 상승시점과 최고압력 발생시점이 경유에 비해 지연되며 또한 연료의 압축성 차이에 기인하여 DME-경유 혼합연료가 순수 DME 및 DME- LPG 혼합연료 보다 압력상승시점이 다소 빨리 나타남을 볼 수 있다. 순수 DME와 DME-LPG 혼합연료의 경우에 연료라인내 최고압력이 낮은 것은 전술한 바와 같이 노즐 개변

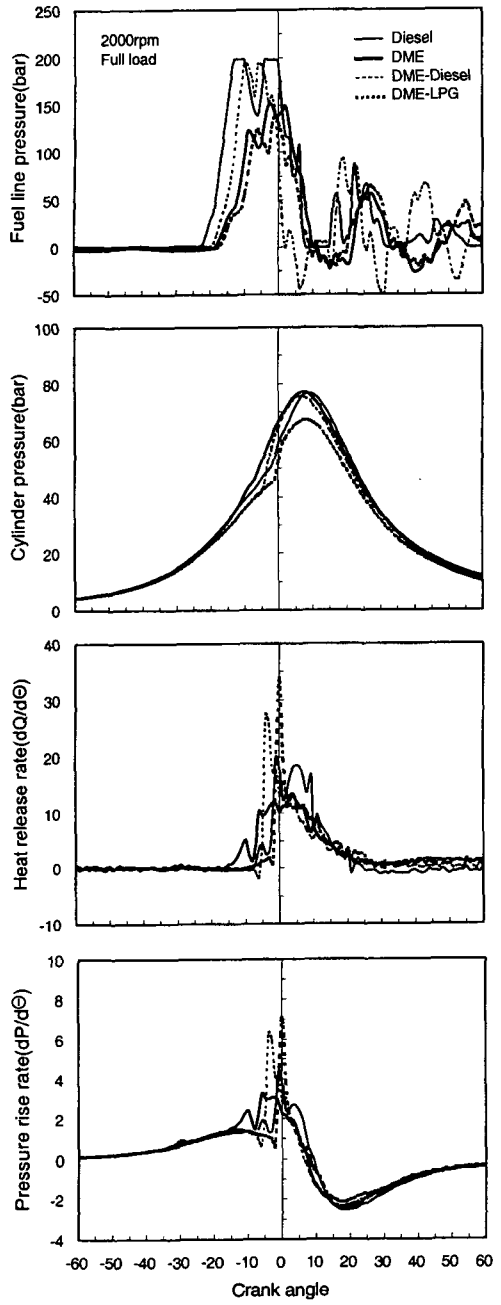


Fig. 2 Performance characteristics of neat DME and DME blended fuels

압력을 20MPa에서 13MPa로 낮추었음에 기인하는 것이다.

연료 분사기간을 살펴보면 순수 DME와 DME 혼합연료의 경우가 경유를 사용했을 경우보다 짧음을 볼 수 있으며 이는 연료 분사펌프의 고압 · 고용량화와 DME 혼합연료 사용시의 낮은 노즐 개변압력에 기인한 것이다. 그러나 순수 DME 사용시에 연료분사펌프에는 수정을 가하지 않고 개변압력만을 낮추어 실험한 외국의 예[8]에서는 DME의 압축성에 기인하여 분사기간이 경유 사용시보다 길어지는 것으로 보고하고 있다.

연료분사 종료 후의 연료라인내 압력을 살펴보면 경유, 순수 DME 및 DME 혼합연료 모두 분사 후에 맥동 현상이 발생되나 경유와 비교하면 순수 DME와 DME 혼합연료의 맥동 폭이 크고 오랫동안 지속됨을 볼 수 있다.

이러한 맥동 현상은 짧은 기간에 고압 연료분사가 이루어져 연료분사 직후에 연료라인 내에 잔류된 에너지에 의해 발생하는 충격파에 기인하는 것으로서 경유는 본래 압축성 낮은 유체로 잔류에너지가 작기 때문에 맥동이 빨리 감쇠하는 반면에 순수 DME나 DME 혼합연료의 경우에는 압축성이 커지기 때문에 연료의 압축과 팽창이 심하게 이루어져서 맥동 폭이 크고 맥동 현상도 오랫동안 지속되는 것으로 생각된다.

한편, DME-경유 혼합연료의 경우가 순수 DME 또는 DME-LPG 혼합연료 보다 맥동 폭이 더욱 큰 이유는 전자는 경유 사용시와 동일한 20MPa의 노즐 개변압력을 사용하였음에 대하여 후자들은 13MPa로 낮추었음에 기인하는 것으로 생각된다.

이상과 같이 순수 DME, DME-경유 및 DME-LPG 혼합연료의 경우에는 분사시기를 지연시킴으로 인하여 연료라인내의 압력 상승시점과 최고압력 발생시기가 경유의 경우에 비해 늦게 나타남에도 불구하고 연소압력선도를 살펴보면 순수 DME와 DME-경유 혼합연료의 경우는 경유 사용시 보다 연소 최고압력이 나타나는 시기가 빨라져서 보다 급격한 연소가 이루어졌음을 알 수 있다. 그러나 DME-LPG 혼합연료의 경우에는 이들 연료에 비해 연소 최고압력이 나타나는 시기가 지연되어 경유의 경우와 유사하게 나타나고있는 것을 볼 수 있다.

이는 순수 DME 및 DME-경유 혼합연료의 경우에는 DME가 자발화온도가 낮고 세탄가가 높으며 아울러 연료 내에 포함된 다량의 산소성분에 기인하

여 연소가 보다 촉진되어 경유에 비하여 급격한 연소가 이루어진 것으로 생각된다.

반면에, DME-LPG 혼합연료의 경우에는 경유에 비해 LPG가 자발화온도가 높고 세탄가가 낮은 것에 기인하여 상술한 DME의 특성에 의한 급속한 연소효과가 상쇄되어 경유와 비슷한 시기에 연소최고압력이 나타나는 것으로 생각된다.

이것은 열발생율 선도 및 압력상승률 선도에서 보는바와 같이 DME 및 DME-경유 혼합연료의 경우가 타 연료에 비하여 열발생율 및 압력상승율의 상승시기가 빨리 나타나고있는 것을 보아서도 확인할 수 있다.

Fig. 3에는 기관 회전속도 2,000rpm 조건에서 부하변화에 대한 순수 DME, DME-경유 및 DME-LPG 혼합연료의 연료소비율과 에너지소비율을 경유와 대비하여 나타낸다.

그림에서 보는 바와 같이 DME의 낮은 발열량 때문에 DME, DME-경유 및 DME-LPG 혼합연료의 연료소비율은 경유 사용시에 비하여 증가하고 있다. 그러나 에너지소비율로 비교하는 경우에는 순수 DME와 DME-LPG 혼합연료의 전부하 조건을 제외하고는 모든 부하조건에서 순수 DME나 DME 혼합연료의 에너지소비율이 양호함을 볼 수 있으며 이는 DME에 포함된 산소에 의해 연소가 보다 촉진되어 연소효율이 증가하여 열효율이 증가하였기 때문인 것으로 생각된다.

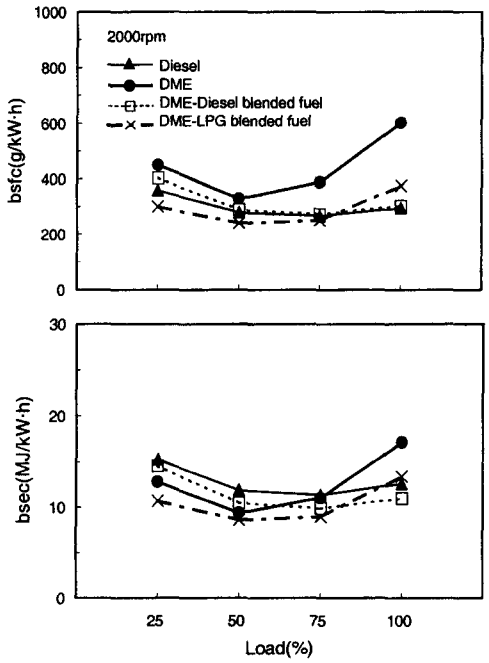


Fig. 3 Variation of bsfc and bsec with load

Fig. 4에 Fig. 2 및 Fig. 3과 동일한 기관운전조건에서 이들 4종류 연료의 배기가스 온도를 나타낸다. 그림에서와 같이 경유가 가장 낮은 배기가스 온도를 보이고 있으며 다음으로 DME-경유 혼합연료, DME- LPG 혼합연료, 순수 DME의 순으로 배기가스 온도가 높아짐을 볼 수 있다.

이는 DME에 포함된 다량의 산소에 기인하여 연소가 보다 촉진되어 연소온도가 상승되었음을 뒷받침하는 것으로 생각된다.

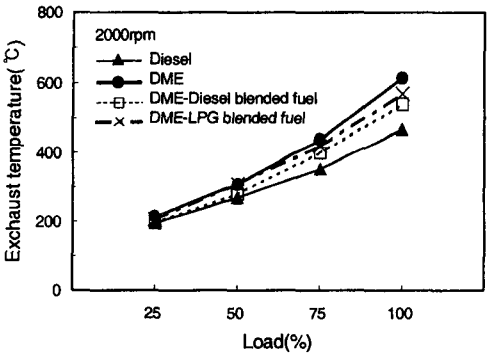


Fig. 4 Variation of exhaust temperature with load

### 3.2 배기가스 배출특성

Fig. 5에 Fig. 3과 동일한 기관 운전조건에서 순수 DME, DME-경유 및 DME-LPG 혼합연료를 사용하여 기관을 운전하였을 때의 매연농도, $NO_x$, CO 및 THC를 경유와 대비하여 나타낸다.

매연 배출농도를 살펴보면 경유의 경우에는 부하의 증가에 따라서 크게 증가하나 순수 DME의 경우에는 모든 시험조건에서 거의 발생하지 않았고, DME-LPG 또는 DME-경유 혼합연료의 경우에도 부분부하에서는 거의 발생하지 않고 전부하에서만 발생량이 증가하나 경유 사용시에 비하면 크게 감소된 값을 나타내고있는 것으로 보아 DME의 우수한 매연저감효과를 확인할 수 있다.

$NO_x$ 배출농도를 살펴보면 모든 운전조건에서

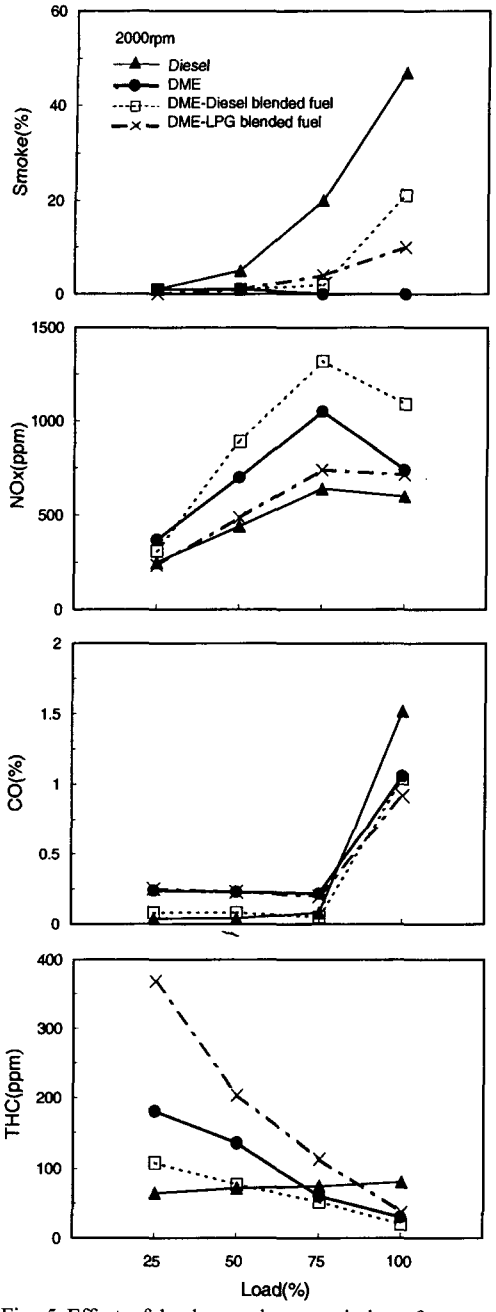


Fig. 5 Effect of load on exhaust emissions for neat DME and DME blended Fuels

DME 및 DME-경유 혼합연료가 경유 사용시보다 배출농도가 높게 나타났다. 일반적으로 디젤기관에서의 Thermal $NO_x$는 주로 예혼합 연소기간에 고온에서 공기중의 질소와 산소가 반응하여 생성되므로 예혼합 연소기간의 화염영역 온도 및 산소농도에 크게 영향을 받는다. 또한, 연료분사시기가 빠르고 고온화염에서의 연소기간이 길어지면 증가한다. 따라서 Fig. 2의 연소압력에서 보는 바와 같이 DME 및 DME-경유 혼합연료의 경우는 DME연료가 함산소연료이므로 연료에 함유된 산소성분이 연소를 촉진시켜 보다 급격한 연소형태를 이루며 연소기간에 화염온도를 상승시켜 $NO_x$의 배출량을 전체적으로 증가시킨 것으로 생각된다. 그리고 열발생율에서 보는바와 같이 DME 및 DME-경유 혼합연료의 경우 DME의 낮은 착화온도와 짧은 착화지연으로 열발생시기가 빠르고 DME의 분무 운동량이 경유보다 작아 연소기간이 길어진 것도 $NO_x$ 배출량을 증가시킨 하나의 요인으로 생각된다.

아울러 함산소연료가 단열화염온도는 낮지만 연료의 열분해 영역에 산소를 공급함에 따라서 아주 효과적인 열복사물질인 입자상 물질이 저감되므로 복사열전달의 손실 때문에 화염온도가 증가하여 $NO_x$배출이 증가되기도 하는 것으로 보고하고 있다.[12]

그러나 전술한 바와 같이 순수 DME 또는 DME 혼합연료 사용시에는 매연의 배출농도가 크게 감소하기 때문에 이러한 $NO_x$의 증가는 배기가스재순환(EGR)의 적용에 의해 큰 폭으로 낮출 수 있을 것으로 생각된다.[6]

CO 배출농도를 살펴보면 부분부하 조건에서는 순수 DME 및 DME 혼합연료의 경우가 경유 사용시에 비해 다소 높으나 전 부하 조건에서는 경유에 비해 감소함을 볼 수 있다.

한편, THC 배출농도는 순수 DME와 DME 혼합연료의 경우에는 부하의 증가에 따라서 크게 감소하는 경향을 나타내는 반면에 경유의 경우에는 약간 증가하는 경향을 나타내고 있다. 그리고 저부하 조건에서는 경유가 가장 낮으며 DME-경유 혼합연료, 순수 DME, DME-LPG 혼합연료 순으로 크게 증가하나 고부하 조건에서는 순수 DME 및 DME 혼합연료 모두 경유에 비해 매우 낮은 것을 볼 수 있다.

디젤기관의 경우 저부하 운전조건에서는 근본적으로 산소가 풍부한 공기과잉조건 하에서 연소가 이루어지기 때문에 DME의 함산소 특성이 그다지

영향을 미치지 않으나 상대적으로 공기량이 부족한 고부하로 갈수록 DME에 포함된 다량의 산소성분이 미연 THC의 연소를 촉진하여 THC의 배출농도를 대폭 저감하는 것으로 생각되며 이로 인하여 상술한 바와 같이 전부하에서의 CO배출농도도 경유 사용시에 비해 크게 저감된 것으로 생각된다.

## 4. 결 론

인라인방식 연료공급계를 사용하는 디젤기관에 순수 DME 및 DME 혼합연료를 적용하기 위하여 그의 가능성과 아울러 문제점을 파악하고자 수행한 단기통 직접분사식 디젤기관의 성능실험에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 순수 DME, DME-경유 또는 DME-LPG 혼합연료는 DME의 높은 압축성 때문에 기존 디젤기관의 연료분사펌프를 그대로 사용하는 경우 원하는 분사압력과 분사량을 확보할 수 없었다. 따라서 기존 디젤기관 연료분사펌프를 고압 고용량화하고 노즐 개변압력을 낮춤으로서(순수 DME와 DME-LPG 혼합연료의 경우) 이러한 문제를 해결하고 경유 사용시와 동일한 최대출력을 확보할 수 있었다.

2) DME 또는 DME 혼합연료 사용시에는 연료 분사시기를 경유 사용시보다 늦추었음에도 불구하고 경유의 경우에 비하여 연소압력의 상승이 빠르고 최고압력이 나타나는 시기도 빨라서 보다 급격한 연소가 이루어졌음을 알 수 있었으며, 이는 DME의 낮은 착화온도와 높은 세탄가에 기인하는 것으로 생각되었다. 그러나 DME-LPG 혼합연료의 경우에는 LPG의 높은 착화온도와 낮은 세탄가에 기인하여 이러한 현상은 인지할 수 없었다.

3) DME의 낮은 발열량으로 인하여 DME 또는 DME-경유 혼합연료의 경우에는 연료소비율이 다소 증가하였으나 에너지소비율로 비교하는 경우에는 대부분의 부하조건에서 경유 사용시보다 다소 향상되었다.

4) 순수 DME 사용시에는 모든 기관 운전조건에서 매연은 거의 발생하지 않았으며 DME-경유 또는 DME-LPG 혼합연료의 경우에도 부분부하에서는 거의 배출되지 않았고 전부하 조건에서도 경유 사용시에 비해 크게 감소하였다. 그러나 DME 또는 DME-경유 혼합연료의 경우에는 경유에 비해 $NO_x$ 배출량이 증가하여 배기가스재순환 등의 대책이 필요함을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 에너지절약기술개발사업의 연구비 지원에 의해 수행된 결과의 일부이며 관계자 여러분께 감사드린다. 본 연구에 있어서, 연료분사계와 관련해서는 두원정공 기술연구소, 윤활성향상제와 관련해서는 Infineum Korea, DME-LPG 혼합연료와 관련해서는 (주) SK 대덕기술원의 협력을 얻었으며, 관계자 여러분께 감사드린다.

## References

1) Y. J. Lee, "Dimethyl Ether as Alternative Diesel Fuel," Journal of KSAE, Vol.23, No.2, pp.43-49, 2001.
2) T. Seko, "Recent Research and Development of Dimethyl Ether as an Automotive Fuel," Japan Automotive Research, Vol.20, No.2, pp.13-20, 1998.
3) J. B. Hansen, B. Voss, F. Joensen, I. D. Siguroardottir, "Large Scale Manu Facture of Dimethyl Ether-a New Alternative Diesel Fuel from Natural Gas," SAE 950063, 1995.
4) Y. Ohno, T. Ogawa, M. Ono, H. Hayashi, K. Okuyama, S. Aoki, K. Tomura, "Development of Dimethyl Ether Synthesis Technology and Its Diesel Engine Test," ICE Vol.34-3, 2000 Spring Technical Conference, ASME 2000-ICE-288, pp.1-6, 2000.
5) M. E. Karpuk, J. D. Wright, J. L. Dippo, D. E. Jantzen, "Dimethyl Ether as an Ignition Enhancer for Methanol-Fueled Diesel Engines," SAE 912420, 1991.
6) R. Christensen, S. C. Sorenson, M. G. Jensen, K. F. Hansen, "Engine Operation and Dimethyl Ether in a Naturally Aspirated, DI Diesel Engine," SAE 971665, 1997.
7) S. C. Sorenson, M. Glensvig, D. L. Abata, "Dimethyl Ether in Diesel Fuel Injection Systems," SAE 981159, 1998.

8) S. Kajitani, Z. L. Chen, M. Konno, K. T. Rhee, "Engine Performance and Exhaust Characteristics of Direct Injection Diesel Engine Operated with DME," SAE 972973, 1997.
9) S. Kajitani, C. L. Chen, M. Oguma, M. Alam, K. T. Rhee, "Direct Injection Diesel Engine Operated with Propane-DME Blend Fuel," SAE 982536, 1998.
10) D. Gill, H. Ofner, E. Sturman, J. Carpenter, M. A. Wolverton, "Production Feasible DME Technology for Direct Injection CI Engines," SAE 2001-01-2015, 2001.
11) Y. D. Pyo, Y. J. Lee, G. C. Kim, M. H. Kim, "Engine Performance and Exhaust Emissions Characteristics of DI Diesel Engine Operated with Dimethyl Ether," Autumn Conference of KSAE, Vol.I, pp.356-361, 2001.
12) S. Y. No, "Reduction in Exhaust Material of Diesel Engine by Oxygenate Fuel," Journal of KSAE, Vol.21, No.2, pp.16-19, 1999.