

## 디젤 대체연료로서의 DME 성능 및 배기특성

표영덕, 남상훈\*, 김강출, 이영재  
 한국에너지기술연구원 수송에너지연구팀, 전남대학교 대학원\*

### Performance and Exhaust Emissions of DME Fuel for Diesel alternate fuel

Young-dug Pyo, Sang-hoon Nam\*, Gang-chul Kim, Young-jae Lee  
 Transportation Energy Research Team, Korea Institute of Energy Research, Chonnam University\*

#### 1. 서론

배기가스의 규제가 전 세계적으로 강화되고 있는 가운데, 경유사용 디젤기관은 가솔린기관보다 열효율이 높고 온실가스인 CO<sub>2</sub> 배출량이 적은 장점이 있으나, PM(입자상 물질)과 NO<sub>x</sub>가 다량 배출되는 단점이 있다. 이들의 저감책으로서, 엔진개량, 연료분사장치의 고압화와 전자제어화, 배기 후처리기술의 적용 등 디젤기관의 고효율성을 손상시키지 않으면서, 배기공해를 대폭 저감하려는 연구가 활발히 추진되고 있으며, 한편으로는 디젤기관의 대체연료에 대한 연구가 활발히 추진되고 있다. 그 중에서 천연가스 차량이 상용화 되어있으나, 디젤엔진을 오토사이클 엔진으로 개조해야 하기 때문에 효율이 대폭 저하하는 단점이 있고, 또한 연료를 고압으로 압축 저장하여 사용하는 방식(CNG방식)을 주로 채용하므로써 에너지 저장밀도가 현저히 낮아지는 단점이 있다.

이러한 단점을 해결하고 ULEV 배출가스 규제를 만족할 수 있는 디젤기관 대체연료로서, 최근에 DME(Dimethyl Ether)가 주목을 받고 있다. DME는, 세탄가가 높기 때문에 압축착화에 의한 운전이 가능하여 디젤기관과 같은 수준의 열효율과 이산화탄소 배출량을 얻을 수 있고, 합산소연료로서 디젤 엔진에서 문제시되고 있는 PM(입자상물질)이 거의 배출되지 않을 뿐만 아니라 이로 인하여 EGR 등을 적용하여 NO<sub>x</sub>도 대폭 저감할 수 있는 등 디젤 대체연료로서 우수한 특성을 많이 가지고 있다. 특히, 최근에 천연가스나 석탄 등으로부터 직접합성법에 의한 저가 제조기술이 개발됨에 따라서 값싸게 제조 가능할 것으로 평가되고 있는 연료로서, 앞으로 디젤엔진의 저공해 대체연료로서 유망시되고 있다.

본 연구에서는 시험용 단기통 직접분사식 디젤엔진에 순수 DME를 적용하여, DME의 엔진성능 및 배기가스 특성 등을 분석함으로써, 디젤 대체연료로서 DME의 우수성과 적용시 문제점을 파악하여 보았다.

#### 2. DME의 특성 개요

DME는 1개의 산소분자와 2개의 메탄기가 결합된 에테르(Ether) 화합물이다(<표 1> 참조).

<표 1> Properties of DME and other fuels

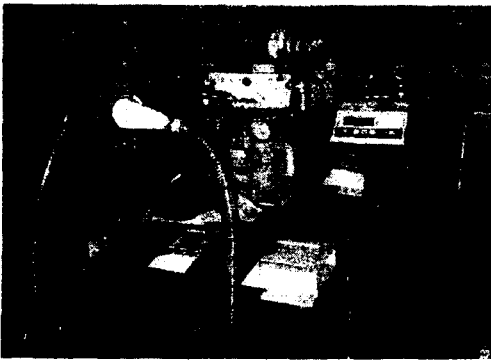
Characteristic	DME	Diesel	Methanol	LNG
Chemical formula	CH <sub>3</sub> -O-CH <sub>3</sub>	-	CH <sub>3</sub> -OH	CH <sub>4</sub>
Lower heating value (MJ/kg)	27.6	42.5	19.5	50.0
Liquid Density(kg/m <sup>3</sup> )	667	831	795	-
Cetane number	>55	40~55	5	-
Auto ignition temp.(°C)	235	250	450	650
% wt. Oxygen	34.8	0	50.0	0

DME는 경유 대체연료로서 앞서 언급한 여러 장점을 갖고 있는 반면에, 경유에 비해 탄성계수가 작고 압축성이 높아서 요구되는 연료분사량의 확보가 어려운 단점이 있고, 점도가 크게 낮아서 연료공급계에서의 연료 누수와 아울러, 윤활성 저하에 따른 습동부의 마모 증대가 예기되는 등, 기존의 경유와는 물성 차이가 크기 때문에, 디젤엔진에 DME를 적용하기 위해서는 연료공급계의 수정과 아울러, 성능 최적화를 위한 연소계의 수정 등 검토되어야 할 여러 분야가 남아 있다.

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험장치

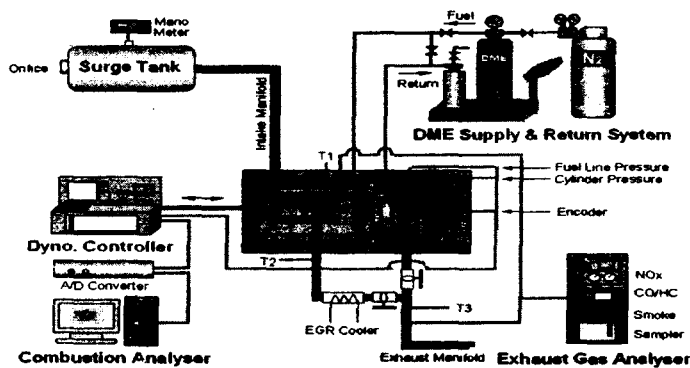
[그림 1] 및 [그림 2]에 엔진 시험시스템의 전경 및 실험장치의 개략도를 나타낸다. 실험엔진은 배기량 304cc의 공냉식 단기통 4사이클 직접분사식 디젤엔진으로서 그의 체원은 <표 2>에서와 같다. 엔진 동력계는 영국 Pint社의 직류동력계(모델 TE 46)로서, 최대 흡수동력은 11kW이고, 최고회전속도는 5000rpm이다. 기관의 연료분사펌프는 열형(Inline-pump)타입으로서, 크랭크축과 직결되어 작동되며 공급된 연료는 hole type의 인젝터(4 hole)를 통해 분사된다.



[그림 1] Engine Test System

<표 2> Specifications of test engine

ITEM	Lister-Petter AC1001 diesel engine
Cylinder number	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 open pressure	200kg/cm <sup>2</sup>



[그림 2] Schematic diagram of experimental apparatus

순수 DME 연료는 액상으로 충전된 DME용기에 30bar의 질소가스를 가압하여 엔진의 연료분사펌프에 공급하는 방식을 사용하였다. 한편, DME는 경유보다 점도가 약 1/20 정도로 낮아서 엔진의 마모가 발생할 우려가 있기 때문에 윤활성 향상제로서 R655(Imfineum Co.)를 300ppm 첨가하여 사용하였다. 연료소모량의 측정은 경유는 체적법으로, DME는 정밀저울을 이용한 중량법으로 측정하였다.

배출가스 중에서, CO, CO<sub>2</sub> 및 THC는 비분산적외선법(Horiba, MEXA 324JK)에 의해 측정하였고, NO<sub>x</sub>는 화학발광법(Thermo Environmental Instruments, 10AR)에 의해 측정하였으며, 매연(Smoke)은 여지반사식(World Environment, AFT- 2000)을 사용하여 측정하였다.

### 3.2 실험방법

기관 회전속도는 경유와 DME 사용시 모두 1,500rpm 및 2,000rpm으로 설정하였으며, 기관의 부하는 각 회전속도에 대하여 경유 사용시의 최대토크를 기준으로 25%, 50%, 75% 및 전부하로 변화시켜 실험하였다. 참고로, 1,000rpm과 2,500 rpm에서도 위와 동일한 실험을 실시하였으나, 실험결과와 경향이 비슷하여 본 논문에서는 논의하지 않는다.

예비실험을 통하여, DME는 경유보다 압축성이 크기 때문에 연료라인내에서 압력저하가 발생하여 원하는 분사압력과 분사량을 얻을 수 없음을 확인하였다. 이에, DME 사용시에는 디젤엔진 연료분사 펌프를 고압 고용량화하고, 인젝터 개변압력을 기존의 200bar에서 130bar로 낮추어 실험하였다. 그 결과, 경유 사용시와 동일한 발열량 기준 연료분사량을 확보할 수 있었으며, 모든 기관 회전속도에서 경유 사용시와 거의 동등한 전부하 출력을 얻을 수 있었다.

기관의 연료분사시기는 경유 사용시에는 기존의 분사시기인 18° BTDC를 그대로 사용하였고, DME 사용시에는 최적 연료분사시기 설정을 위하여 23°, 18° 및 13° BTDC로 변화시켜 실험하였다.

EGR율은 CO<sub>2</sub> 계측[13]을 통하여 다음의 식으로 계산하였다.

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

여기서, [CO<sub>2</sub>]<sub>EGR</sub>은 EGR시 흡기의 CO<sub>2</sub> 농도, [CO<sub>2</sub>]<sub>w/o EGR</sub>은 EGR하지 않은 경우 흡기의 CO<sub>2</sub> 농도이고, [CO<sub>2</sub>]<sub>EXH</sub>는 EGR시의 배기되는 CO<sub>2</sub>의 농도이다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 DME의 엔진 성능특성

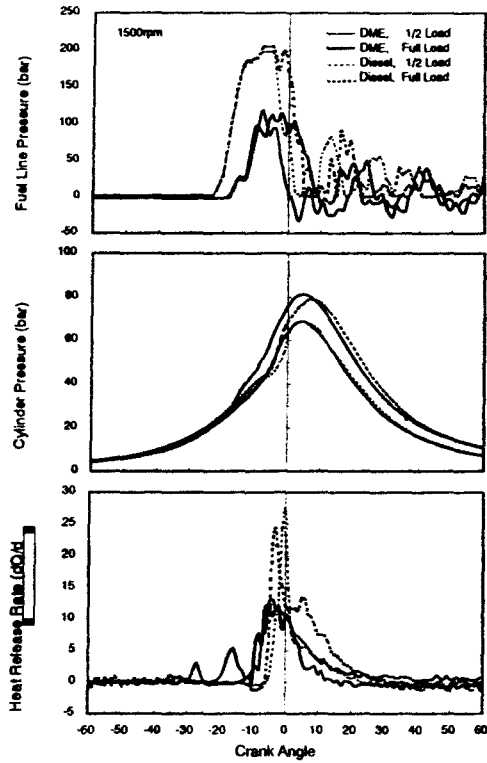
[그림 3]에 기관 회전속도 1,500rpm인 조건에서 부하를 1/2과 전부하로 변화시킨 경우에 대하여, DME와 경유 사용시의 연료라인압력, 연소압력 및 열발생율을 대비하여 나타낸 것으로, 이때 기관 부하는 DME와 경유 모두 경유 사용시의 최대토크를 기준으로 설정한 것이다.

그림에서와 같이, DME의 경우에는 연료분사시기를 경유보다 약 5° 지연시킴에 기인하여, 연료라인 최고압력이 나타나는 시기가 경유보다 지연되며, 전술한 바와 같이 노즐 개변압력을 130bar로 낮추어 설정하였기 때문에 최고압력도 경유 사용시에 비해 낮음을 볼 수 있다.

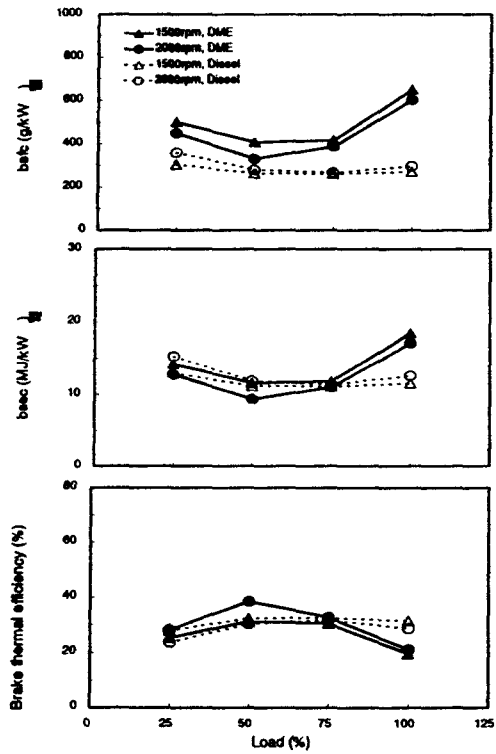
분사종료 이후의 연료라인 압력을 살펴보면, DME와 경유 모두 고압분사 직후에 연료라인 내에 잔류된 에너지에 의해 발생하는 충격파에 기인하여 맥동 현상이 발생하며, 특히 DME는 높은 압축성에 기인하여 저장에너지가 크기 때문에 경유에 비하여 맥동이 오래동안 지속됨을 볼 수 있다.

한편, 순수 DME 사용시에 분사시기의 지연에 따라 연료라인내 최고압력이 나타나는 시기가 경유의 경우보다 늦게 나타남에도 불구하고, 연소압력선도에 의하면 DME가 경유에 비해 착화온도가 낮고 합산 소연료인 것에 기인하여 급속한 연소로 인한 연소압력 상승시기가 빠르고 연소최고압력이 나타나는 시기도 빠름을 볼 수 있으며, 이는 최고 열발생을 발생시기가 빠르게 나타나는 열발생율 선도에 의해서도 확인할 수 있다.

[그림 4]에 기관 회전속도 1,500rpm 및 2,000 rpm의 조건에서 DME와 경유 사용시의 부하 변화에 따른 연료소비율, 에너지소비율 및 열효율을 비교하여 나타낸다. 그림에 의하면 DME의 낮은 발열량에 기인하여 DME 사용시의 연료소비율은 경유 사용시보다 크게 증가하나, 에너지소비율로 비교하는 경우에는 75% 부하 이하에서 열효율의 증가로 인해 향상됨을 볼 수 있다.



[그림 3] Comparison of Fuel line pressures, Cylinder pressures, Heat release rates



[그림 4] Comparison of bsfc, bsec and brake thermal efficiency

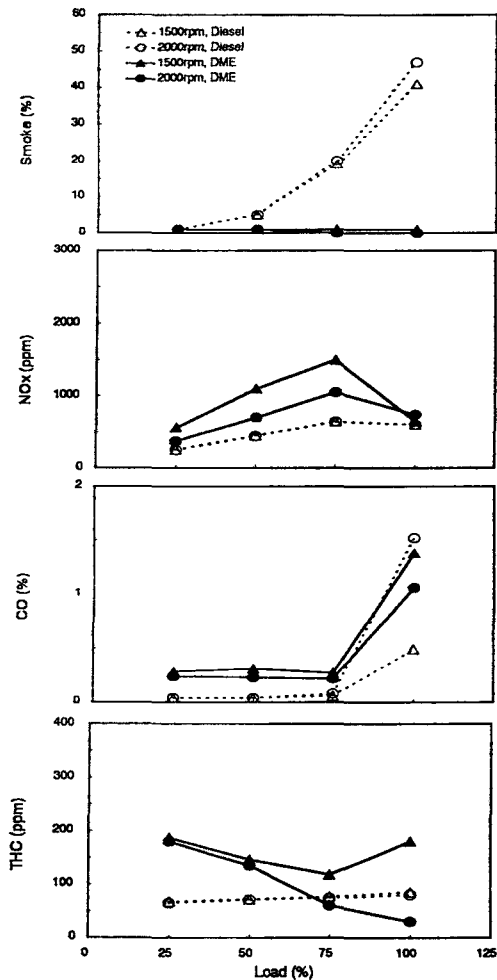
## 4.2 DME의 배기가스 특성

[그림 5]은 DME와 경유 사용시의 매연농도, NO<sub>x</sub>, CO 및 THC를 비교하여 나타낸다.

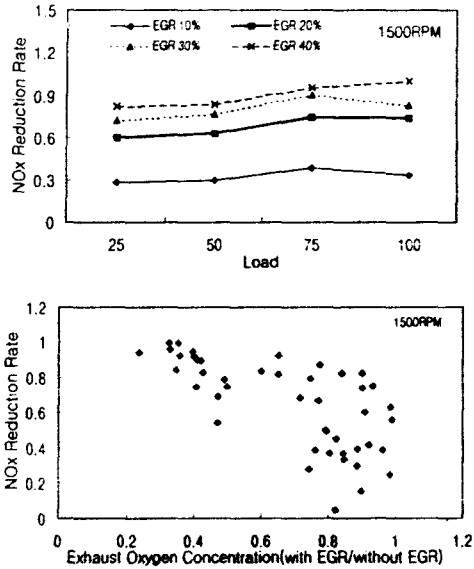
매연 배출농도는 그림에서와 같이 경유 사용시에는 부하의 증가에 따라 크게 증가하나, 순수 DME의 경우에는 모든 시험조건에서 거의 발생하지 않아서, DME의 우수한 매연 저감효과를 확인할 수 있다.

NO<sub>x</sub> 배출농도는 순수 DME가 경유보다 배출농도가 증가하며, 이는 연료에 포함된 산소성분이 예혼합 연소기간에 연소를 촉진시켜 화염온도를 상승시킨 것에 기인하는 것으로 생각된다. 이러한 NO<sub>x</sub>의 증가는 합산소연료 사용시에 나타나는 일반적인 특성이나, 전술한 바와 같이 순수 DME 사용시에는 매연의 배출이 거의 없기 때문에, EGR(배기가스재순환)을 적용하여 큰 폭으로 낮출 수 있을 것으로 기대된다.

[그림 6]에 EGR율과 NO<sub>x</sub>의 관계 및 배기가스 중의 산소농도와 NO<sub>x</sub>의 관계를 보여주고 있다. EGR 0%를 기준으로 하여 NO<sub>x</sub>의 감소량을 표시한 그림에서 NO<sub>x</sub>의 저감율은 전부하 전까지의 부하 증가와 EGR율의 증가에 따라 감소하는 일반적인 경향을 따르고 있음을 보여준다. 전부하에서 NO<sub>x</sub>의 저감율이 일부 감소한 이유는 DME 전부하에서의 NO<sub>x</sub> 발생량이 중부하에서의 발생량보다 적기 때문에 상대적으로 저감율이 낮게 나타난다. EGR적용시와 비적용시의 배기가스 중의 산소농도비와 NO<sub>x</sub>의 감소량을 표시한 그림에서도 EGR율 증가에 의한 NO<sub>x</sub> 감소율의 상관관계가 있음을 확인할 수 있다.



[그림 5] Comparison of Exhaust emissions



[그림 6] Correlation between NO<sub>x</sub> reduction rate and EGR rate

## 5. 결 론

1) DME의 높은 압축성에 기인하여, 기존 디젤엔진의 연료분사펌프를 그대로 사용하는 경우에는 요구 분사압력과 분사량을 확보할 수 없었다. 이에, 연료분사펌프를 고압 고용량화하고 노즐 개변압력을 낮춤에 의해, 이들 문제를 해결하고 경유 사용시와 유사한 최대출력을 확보할 수 있었다.

2) DME의 낮은 발열량에 기인하여 순수DME 사용시에는 연료소비율이 다소 증가하였으나, 에너지소비율로 비교하는 경우에는 중저부하에서 약간 향상되었다.

3) 순수DME 사용시에는 모든 운전조건에서, 배기 매연이 배출되지 않았으나, NO<sub>x</sub>는 경유 사용시보다 다소 높게 배출되는 것으로 나타나 배기가스 재순환(EGR) 등의 대책이 필요한 것으로 판단되었다. 따라서 순수DME 사용시에 EGR 적용으로 NO<sub>x</sub> 배출량을 저감시킬 수 있었으며, EGR율이 증가할수록 NO<sub>x</sub> 저감율이 커지는 것으로 나타났다.

## 참 고 문 헌

1. 이영재, "디젤엔진 대체연료로서의 디메틸에테르", 한국자동차공학회지, 제23권, 제2호, 2001.
2. D. Gill and H. Ofner, "Dimethyl Ether - A Clean Fuel for transportation", SAE paper 990959, 1999.
3. NKK's Bench Plant for DME Synthesis Research, "NKK Tests Low-Emission Vehicle Fueled by Dimethyl Ether", NKK News Vol. 38, No. 7, September 1998.
4. S. Kajitani, Z. Chen, M. Konno and K. T. Rhee, "Engine Performance and Exhaust Characteristics of Direct Injection Diesel Engine Operated with DME", SAE paper 972973, 1997.
5. D. Gill, H. Ofner, E. Sturman, J. Carpenter and M. A. Wolverton, "Production Feasible DME Technology for Direct Injection CI Engines", SAE paper 2001-01-2015, 2001.
6. 표영덕 외, "DME의 직접분사식 디젤기관의 성능 및 배기가스 특성" 한국자동차공학회 추계학술대 회논문집, 2001.