

## 순수 DME의 직접분사식 디젤기관의 성능 및 배기가스 특성

표영덕\* · 이영재\* · 김강출\* · 김문헌\*\*  
(2002년 9월 27일 접수, 2003년 1월 25일 심사완료)

### Engine Performance and Exhaust Emissions Characteristics of DI Diesel Engine Operated with Neat Dimethyl Ether

Youngdug Pyo, Youngjae Lee, Gangchul Kim and Munheon Kim

**Key Words:** Dimethyl Ether(DME, 디메틸에테르), DI Diesel Engine(직접분사식 디젤엔진), Oxygenated Fuel(함산소연료), Alternative Diesel Fuel(디젤 대체연료)

#### Abstract

DME(Dimethyl ether) 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. In the present study, engine performance and exhaust emissions were investigated with a conventional DI diesel engine which has a jerk type injection pump. Test results showed that the power with DME were almost same as that of pure diesel oil, and the brake thermal efficiency increased a little. Also, smoke index from DME engine showed nearly zero level, but NO<sub>x</sub> was increased compare to diesel oil.

#### 1. 서론

디젤기관은 가솔린기관에 비해 효율이 높고 이산화탄소의 배출이 적은 장점이 있으나 PM(입상 물질)과 NO<sub>x</sub>가 다량 배출되는 단점이 있다. 이들의 저감책으로서 연료분사장치의 고압화와 전자제어화 및 배기 후처리기술의 적용 등이 추진되는 한편 천연가스나 LPG 등 저공해 대체연료 적용도 추진되고 있다. 그러나 천연가스나 LPG는 세탄가가 낮기 때문에 디젤기관의 사용연료로 부적합하며 오토사이클 기관으로 개조해야 하기 때문에 효율이 대폭 저하하는 단점이 있다.

한편 DME(dimethyl ether)는 세탄가가 높기 때

문에 압축착화에 의한 디젤사이클 운전이 가능하여 디젤기관과 동일한 수준의 열효율과 이산화탄소 배출량을 얻을 수 있고, 함산소연료이기 때문에 PM을 거의 배출하지 않는 커다란 장점을 가지고 있다.<sup>(1~3)</sup> 특히 최근에 직접합성법에 의한 저가 제조기술이 개발됨에 따라서 앞으로 디젤기관의 저공해 대체연료로서 유망시되고 있다.<sup>(4,5)</sup>

DME의 압축착화 디젤기관에 대한 적용 예를 살펴보면, S. C. Sorenson 등은 Jerk type 연료공급 시스템에 순수 DME를 적용하여 DME의 압축성이 연료분사계에 미치는 영향을 파악하였고, 동시에 매연의 대폭적인 저감과 EGR에 따른 NO<sub>x</sub>의 저감 가능성을 보고하고 있다.<sup>(6,7)</sup>

S. Kajitani 등은 기존 디젤기관에 DME를 적용한 실험연구를 통하여 DME 사용시에는 연료펌프 플런저 등에서의 마모 때문에 윤활성 향상제의 사용이 불가피하고 DME의 낮은 착화온도와 높은 세탄가에 기인하여 경유를 사용할 때 보다 열발생률의 발생시기는 빠르고 그의 최고치는 낮음을 보고하고 있다.<sup>(8)</sup>

† 책임저자, 회원, 한국에너지기술연구원

E-mail : ydpyo@kier.re.kr

TEL : (042)860-3332 FAX : (042)860-3102

\* 한국에너지기술연구원

\*\* 숭실대학교 기계공학과

Table 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>
LHV(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	-
Stoich. A/F ratio(kg/kg)	9.0	14.6	6.5	17.2
Auto ignition temp.(°C)	235	250	450	650
% wt. Oxygen	34.8	0	50.0	0

본 연구에서는 기존의 디젤 연료공급계를 채용한 직접분사식 디젤기관에 순수 DME를 적용하여 기관성능과 배기가스 특성 등을 분석함으로써 그의 적용가능성과 문제점을 파악하여 보았다.<sup>(9)</sup>

## 2. DME의 특성 개요

DME는 1개의 산소분자와 2개의 메탄기가 결합된 에테르(Ether) 화합물로서 그 특성은 Table 1과 같다.

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 슬립부의 마모 증대가 예기되는 등 기존의 경유와는 물성 차이가 크기 때문에 디젤기관에 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

Fig. 1에 실험장치의 개략도를 나타내며, Table 2에 실험기관의 제원을 나타낸다. 실험기관은 배기량 304cc의 자연흡기방식의 단기통 4사이클 직접분사식 디젤기관이다. 엔진동력계는 직류동력계(Plint사, TE 46)로서 최대 흡수동력은 11kW이고 최고회전속도는 5,000rpm이다. 기관의 연료분

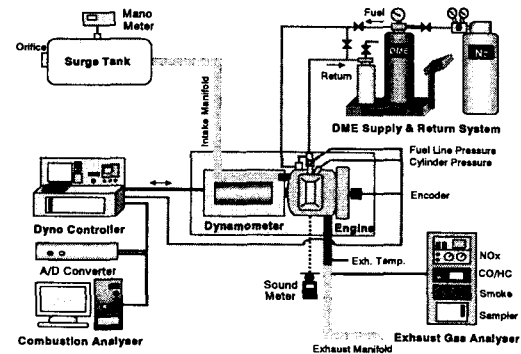


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 2 Specification of test engine

ITEM	Lister-Petter AC1001 diesel engine
Cylinder number	1(Air-cooled 4 cycle)
Displacement(Bore×Stroke,cc)	304(76.2×66.68)
Output(kW/rpm)	6.5/3500
Compression ratio	17:1
Injection type & Nozzle	Direct Injection, 4 hole
Nozzle open pressure(bar)	200

사펌프는 인라인방식(Jerk type)으로서 크랭크축에 직결되어 작동되며 공급된 연료는 원형(hole type)의 인젝터(4 hole)를 통하여 실린더 내로 분사된다.

순수 DME연료는 액상으로 충전된 DME용기에 30bar의 질소가스를 가압하여 기관의 연료분사펌프에 공급하는 방식을 사용하였다.

한편 DME는 경유보다 점도가 약 1/20 정도로 낮기 때문에 윤활성 향상제로서 R655(Imfineum Co.)를 300ppm 첨가하여 사용하였다.

연료소모량의 측정은 경유의 경우에는 체적법으로 DME의 경우에는 정밀저울을 이용한 중량법으로 측정하였다.

실린더내의 연소압력과 연료라인내 연료공급압력의 측정은 Kistler사의 압전식 압력변환기(Type 6123 및 Type 6005)와 차지앰프(Type 5041B)를 사용하였다.

배출가스의 경우에는 CO와 THC는 비분산 적

외선법(Horiba사, MEXA 324JK), NO<sub>x</sub>는 화학발광법(Thermo Environmental Instruments사, 10AR), Smoke는 여지반사식(월드환경사, AFT-2000)으로 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 2,500rpm에서도 위와 동일한 실험을 실시하였으나 실험결과와 경향이 유사하므로 본 논문에는 기재하지 않는다.

예비실험의 결과에서 전술한 DME의 높은 압축성에 기인하여 연료라인내의 압력저하가 발생하였으며 이에 따라서 원하는 분사압력과 분사량을 확보할 수 없음을 확인하였다. 따라서 DME 사용시에는 디젤기관 연료분사펌프를 고압 고용량화하고 인젝터 개변압력을 기존의 200bar에서 130bar로 낮추어 실험하였다.

이와 같이함으로써 경유 사용시와 동일한 발열량 기준의 연료분사량을 확보할 수 있었으며 모든 기관 회전속도에서 경유 사용시와 거의 동등한 전부하 출력을 얻을 수 있었다.

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

4. 실험결과 및 고찰

4.1 DME의 분사시기 설정

Fig. 2에 기관 회전속도 2,000rpm, 연료분사시기 23°, 18°(기준) 및 13° BTDC로 변화시킨 각각의 경우에 대하여 순수 DME 사용시의 부하 변화에 따른 연료소비율을 비교하여 나타낸다.

그림에서 보는바와 같이 분사시기를 앞당긴 23° BTDC의 경우에는 기존 분사시기(18° BTDC)에 비해 고부하에서 연료소비율이 악화하였으나, 분사시기를 늦춘 13° BTDC에서는 모든 부하변화 영역에서 기존 분사시기와 연료소비율에 거의 변화가 없음을 볼 수 있다.

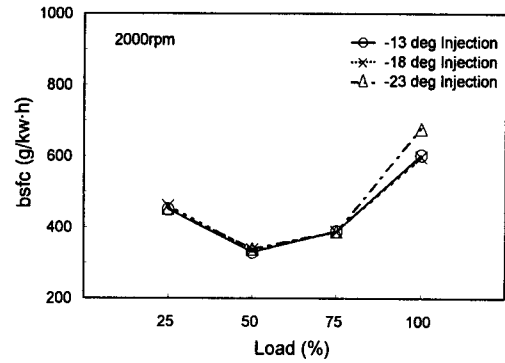


Fig. 2 The effect of injection timing on bsfc

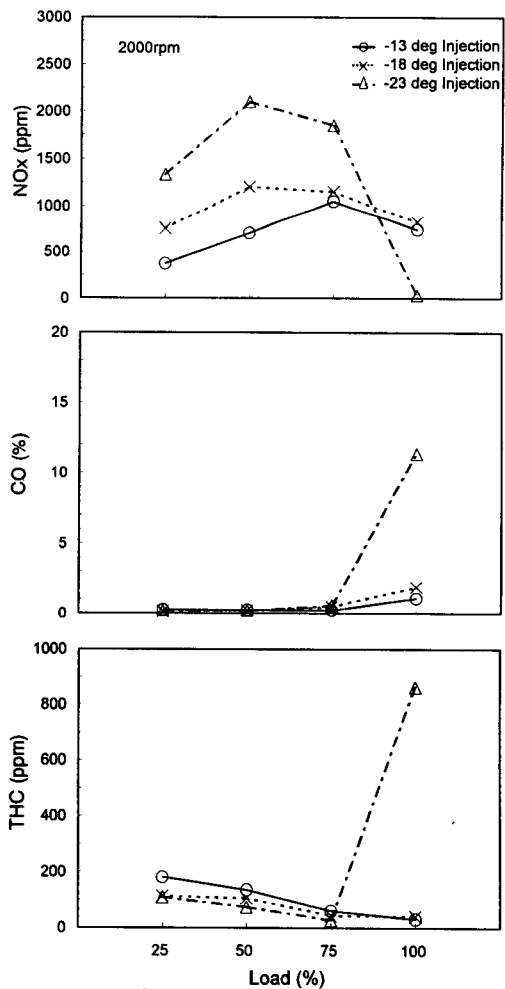


Fig. 3 The effect of injection timing

Fig. 3은 위와 동일한 운전조건에서  $\text{NO}_x$ , CO 및 THC의 배출농도를 비교한 것이다. 모든 운전 조건에서 매연은 배출되지 않았기 때문에 이에 대한 그림은 생략한다.

$\text{NO}_x$  배출농도를 살펴보면 기존 분사시기인  $13^\circ$  BTDC의 경우가 가장 낮고, 점화시기를 앞당김에 따라서 증가하는 경향을 나타내고 있다. 그러나  $23^\circ$  BTDC의 전부하 조건에서는  $\text{NO}_x$  배출농도가 급격히 감소하고 있는데 이는 불완전연소에 따른 연소온도의 저하에 기인하는 것으로 생각되며, 이것은 같은 조건에서 CO 및 THC의 배출농도가 급격히 증가한 것에서 확인할 수 있다.

CO의 배출농도는  $13^\circ$  및  $18^\circ$  BTDC의 경우에는 유사한 값을 나타내나,  $23^\circ$  BTDC의 경우에는 고부하에서 급격히 증가함을 볼 수 있다.

THC의 배출농도 역시  $13^\circ$  및  $18^\circ$  BTDC의 경우에는 거의 유사한 값을 나타내고 있지만  $23^\circ$  BTDC의 경우에는 고부하에서 급격히 증가함을 볼 수 있다.

이러한 실험결과로부터 DME 사용시에는 기존 분사시기( $18^\circ$  BTDC)에서  $5^\circ$  지각한  $13^\circ$  BTDC가 적합한 것으로 판단되어 이를 시험 분사시기로 채택하였다.

#### 4.2 경유 대비 DME의 성능특성

Fig. 4에 기관 회전속도 1,500rpm인 조건에서 부하를 1/2과 전부하로 변화시킨 경우에 대하여 DME와 경유 사용시의 연료라인압력, 연소압력 및 열발생률을 대비하여 나타낸다.

기관 부하는 DME와 경유 모두 경유 사용시의 최대토크를 기준으로 설정한 것이며 연료분사시기는 경유의 경우에는 기존 분사시기인  $18^\circ$  BTDC, DME의 경우에는  $13^\circ$  BTDC이다.

그림에서 보는바와 같이 DME의 경우에는 연료분사시기를 경유보다 약  $5^\circ$  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.

연료 분사기간을 살펴보면 순수 DME를 사용했을 때 경유와 비슷함을 볼 수 있으며, 이는 경유 사용시와 동일한 발열량 기준의 연료분사량을 확보하기 위하여 DME 사용시에는 연료분사펌프를 고압 고용량화하고 낮은 인젝터 개변압력을

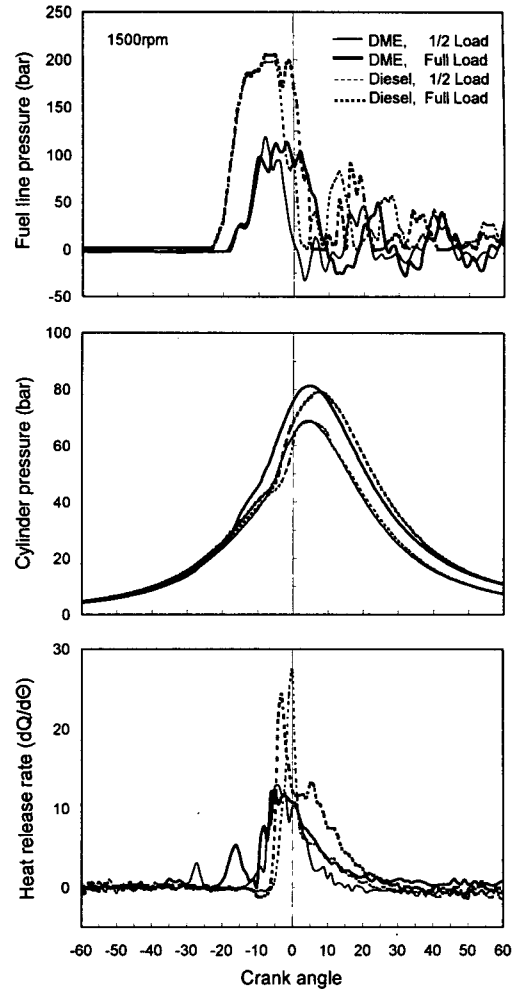


Fig. 4 Comparison of Fuel line pressures, Cylinder pressures, Heat release rates with various load

채택한 것에 기인한다. 그러나 순수 DME 사용시에 연료분사펌프에는 수정을 가하지 않고 개변압력만을 낮추어 실험한 외국의 예<sup>(8)</sup>에서는 DME의 분사기간이 경유 사용시보다 길어지는 것으로 보고하고 있다.

연료분사 종료 이후의 연료라인내 압력을 살펴보면 DME와 경유 모두 맥동 현상이 발생하나 DME의 경우가 경유에 비하여 맥동이 오래동안 지속됨을 볼 수 있다.

이러한 맥동현상은 고압분사 직후에 연료라인내에 잔류된 에너지에 의해 발생하는 충격파에

기인하는 것으로서 경유는 압축성이 낮아 저장에너지가 적기 때문에 맥동이 빨리 감쇠하는 반면에 DME는 높은 압축성에 기인하여 저장에너지가 크기 때문에 연료의 압축과 팽창이 심하게 이루어져 맥동 현상이 오래 지속되는 것으로 생각된다.<sup>(10)</sup>

한편, 순수 DME의 경우는 분사시기의 지연에 따라 연료라인내 최고압력이 나타나는 시기가 경유의 경우보다 늦게 나타남에도 불구하고 그림의 연소압력선도에 의하면 순수 DME의 경우가 연소압력 상승시기가 빠르고 연소최고압력이 나타나는 시기도 빠름을 볼 수 있다.

이는 DME가 경유에 비해 착화온도가 낮은 것과 연료 내에 다량의 산소성분이 포함되어있음에 기인하여 경유보다 급속한 연소가 이루어진 것으로 생각되며 이는 경유보다 최고 열발생률 발생시기가 빠르게 나타나는 열발생률 선도에 의해서도 확인할 수 있다. 한편 DME의 열발생률 최고치는 경유보다 낮게 나타나고있는데 이는 착화지연기간 동안에 연료의 축적이 적었기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 5에 기관 회전속도 1,500rpm 및 2,000 rpm의 조건에서 DME와 경유 사용시의 부하 변화에 따른 연료소비율, 에너지소비율 및 열효율을 비교하여 나타낸다.

그림에서 보는바와 같이 DME는 발열량이 낮기 때문에 DME 사용시의 연료소비율은 경유 사용시보다 크게 증가하나, 에너지소비율로 비교하는 경우에는 75% 부하조건 이하에서는 향상됨을 볼 수 있으며 이는 DME에 포함된 산소에 의해 연소가 보다 촉진되어 연소효율이 증가하여 열효율이 증가하였기 때문으로 생각된다. 그러나 전 부하 조건에서는 DME의 연료소비율 및 에너지소비율이 경유 사용시보다 높게 나타났으며 이는 시험기관이 DME 연소를 위해 최적화되지 않았기 때문으로 생각된다.

#### 4.3 경유 대비 DME의 배기가스 특성

Fig. 6은 Fig. 5와 동일한 기관 회전속도 및 부하 조건에서 DME와 경유 사용시의 매연농도, NO<sub>x</sub>, CO 및 THC를 비교하여 나타낸다.

매연 배출농도는 그림에서와 같이 경유 사용시에는 부하의 증가에 따라 크게 증가하고 있으나 순수 DME의 경우에는 모든 시험조건에서 거의

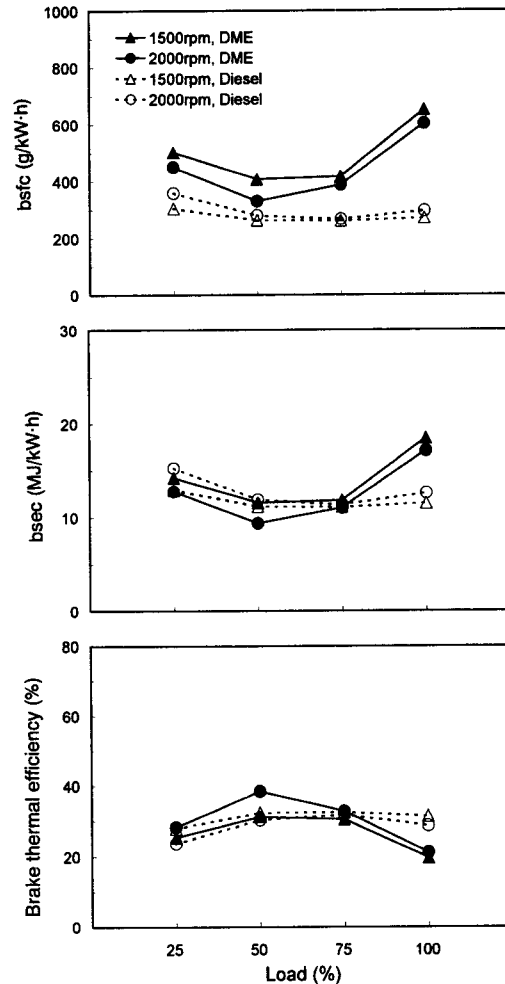


Fig. 5 Comparison of bsfc, bsec and brake thermal efficiency

발생하지 않는 것으로 나타나 DME의 우수한 매연 저감효과를 확인할 수 있었다.

NO<sub>x</sub> 배출농도를 살펴보면 모든 운전조건에서 순수 DME가 경유 사용시보다 배출농도가 증가하며 이는 연료내에 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 기대되며 이에 대한 후

속 연구를 추진하고 있다.

CO와 THC의 배출농도를 살펴보면 DME의 경우가 경유 사용시에 비하여 대체적으로 증가하는 경향을 보여주고 있다.

디젤기관에서 배출되는 CO 및 THC는 가솔린 기관에 비해 근본적으로 낮기 때문에 이러한 CO와 THC의 증가는 크게 문제시되지 않을 것으로 생각되나 이들의 저감이 요구되는 경우에는 산화 촉매의 사용을 검토해야 할 것으로 생각된다.

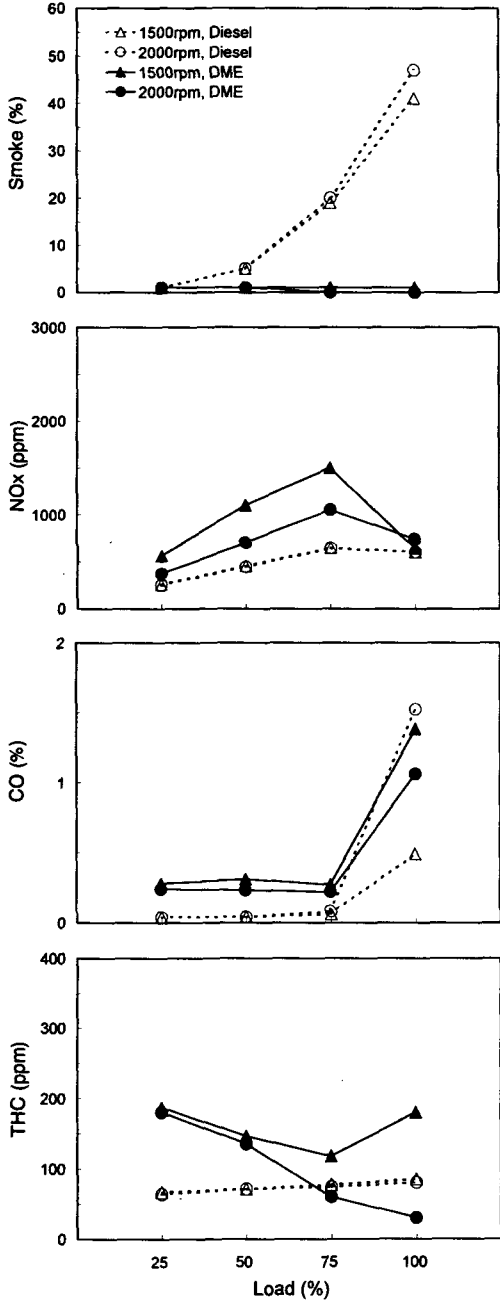


Fig. 6 Comparison of Exhaust emissions

### 5. 결론

인라인방식 연료공급계를 사용하는 직접분사식 디젤기관에 순수 DME를 적용하기 위하여 그의 가능성과 아울러 문제점을 파악하고자 수행한 단기동 직접분사식 디젤기관의 성능실험에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) DME의 높은 압축성에 기인하여 기존 디젤기관의 연료분사펌프를 그대로 사용하는 경우에는 요구 분사압력과 분사량을 확보할 수 없었다. 따라서 연료분사펌프를 고압 고용량화하고 노즐 개변압력을 낮춤으로써 이들 문제를 해결하고 경유 사용시와 유사한 최대출력을 확보할 수 있었다.

(2) 순수 DME 사용시의 연료 분사시기는 경유 사용시보다 다소 지연시키는 것이 바람직하며, 연료분사시기를 지연시키에도 불구하고 DME에 포함된 산소성분에 의한 연소촉진에 기인하여 경유 사용시보다 연소 최고압력이 발생하는 시기는 앞당겨지는 것으로 나타났다.

(3) DME의 낮은 발열량에 기인하여 순수 DME 사용시에는 연료소비율이 다소 증가하였으나 에너지소비율로 비교하는 경우에는 중저부하에서 약간 향상되었다.

(4) 순수 DME 사용시에는 모든 운전조건에서 배기 매연이 배출되고있지 않지만 NOx는 경유 사용시보다 다소 높게 배출되는 것으로 나타나 배기가스 재순환 등의 대책이 필요한 것으로 판단되었다.

### 후 기

본 연구는 산업자원부 에너지절약기술개발사업의 연구비 지원에 의해 수행된 결과의 일부이며 관계자 여러분께 감사드립니다.

연료분사계와 관련해서는 두원정공 기술연구소, 윤희성 향상제와 관련해서는 Infineum Korea의 협력을 얻었다. 이에 양사의 관계자 여러분께

감사드린다.

### 참고문헌

- (1) Lee, Y. J., 2001, "Dimethyl Ether as Alternative Diesel Fuel," JKSAE, Vol. 23, No. 2, pp. 43~49.
- (2) Seko, Toshiyuki., 1998, "Recent Research and Development of Dimethyl Ether as an Automotive Fuel," Japan Automotive Research, Vol. 20, No. 2, pp. 13~20.
- (3) Gill, D. and Ofner, H., 1999, "Dimethyl Ether - A Clean Fuel for transportation," SAE paper 990959.
- (4) Hansen, J. B., Voss, B., Joensen, F. and Siguroardottir, I. D., 1995, "Large Scale Manufacture of Dimethyl Ether - a New Alternative Diesel Fuel from Natural Gas," SAE paper 950063.
- (5) Ohno, Y., Ogawa, T., Ono, M., Hayashi, H., Okuyama, K., Aoki, S. and Tomura, K., 2000, "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.
- (6) Christensen, R., Sorenson, S. C., Jensen, M. G. and Hansen, K. F., 1997, "Engine Operation and Dimethyl Ether in a Naturally Aspirated, DI Diesel Fuel," SAE paper 971665.
- (7) Sato, Y., Noda, A., sakamoto, T. and Goto, Y., 2000, "Performance and Emission Characteristics of a DI Diesel Engine Operated on Dimethyl Ether Applying EGR with Supercharging," SAE paper 2000-01-1809.
- (8) Kajitani, S., Chen, Z., Konno, M. and Rhee, K. T., 1997, "Engine Performance and Exhaust Characteristics of Direct Injection Diesel Engine Operated with DME," SAE paper 972973.
- (9) Pyo, Y. D., Lee, Y. J., Kim, G. C. and Kim, M. H., 2001, "Engine Performance and Exhaust Emissions Characteristics of DI Diesel Engine Operated with Dimethyl Ether," Autumn Conference Proceeding, KSAE, Vol. I, pp. 356~361.
- (10) Sorenson, S. C., Glensvig, M. and Abata, D. L., 1998, "Dimethyl Ether in Diesel Fuel Injection Systems," SAE paper 981159.