

# 액상분사식 LPG 소형 SI엔진에서 DME-LPG 혼합연료 사용에 따른 성능 및 배출가스 특성에 관한 연구

김성우 · 이민호 · 박종배 · 김정환 · 김기호 · 박천규 · 김재권 · 정충섭  
한국석유관리원

## 1. 서 론

최근 석유자원의 고갈우려와 석유자원 보유국의 생산량 조절에 따른 국제 원유가의 급등이 지속되고 있으며, 대기질 오염과 지구온난화의 가속화에 대응하고자 국제적인 환경규제가 강화되고 있다. 세계 각국은 이 두 가지 문제의 해결방안을 찾고자 노력하고 있으며 그 일환으로 신재생에너지의 발굴, 개발 및 보급에 힘쓰고 있다.

국내에서는 청정연료의 하나인 LPG(Liquefied Petroleum Gas) 연료의 저가정책에 힘입어 LPG차량의 보급대수가 상당량에 이르지만 초기 연료공급 방식(Mixer Type)으로는 강화되는 환경규제에 대응하기 어렵기 때문에 다양한 연료 공급방식(LPLi:Liquid Phase LPG injection, LPGi:LPG Gaseous injection) 개발을 통하여 저공해자동차를 양산 및 보급하고 있다<sup>1,2)</sup>.

DME(Dimethyl ether)는 인체에 무독하고, LPG의 성상과 유사하며, 우수한 세탄가와 연소특성을 가지고 있어 청정디젤엔진연료 등 가정용, 상업용, 자동차용 연료로 사용되고 있는 LPG의 대체연료로서 적용이 가능할 것으로 예상된다<sup>3,4,5)</sup>.

이러한 장점을 이용하고자 친환경연료인 DME의 상용화 및 국내보급에 대한 연구 및 평가 등이 활발하게 이루어지고 있으며 DME연료의 보급 중간단계로써 DME-LPG 혼합연료에 대한 실증평가가 이루어졌다<sup>6)</sup>.

본 연구는 기존인프라를 이용한 DME-LPG 혼합연료 보급을 위한 품질 및 실증평가의 일환으로 LPG와 DME의 혼합율에 따른 소형 LPLi엔진의 성능과 배출가스 특성을 파악하여 적정 혼합율 선정에 대한 자료로 활용하고자 한다.

## 2. 시험장치 및 방법

## 2-1 시험용 엔진 및 측정장비

### 2-1-1 시험용 엔진

<Table 1. Specifications of test engine>

Model / Type	L4LA-14 / 4cylinder 4stroke DOHC	Max. Power	141 ps / 6000 rpm
Fuel supply type	LPLi	Max. Torque	19.0 kg.m / 4250 rpm
Bore × Stroke (Displacement)	86.0 mm × 86.0 mm (1,998cc)	Ignition Timing	1-3-4-2
Compression ratio	10.5:1	Idle revolution	750 ± 25 rpm

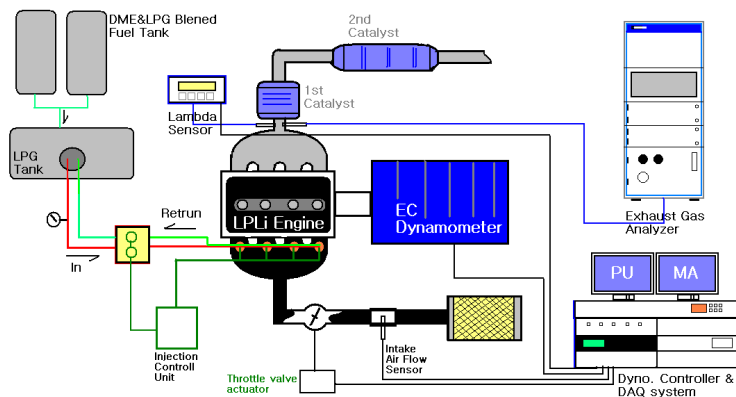
시험용 엔진의 제원은 Table 1.에 나타낸바와 같다. 국내에서 상용화된 다점 액상분사식 전기점화엔진이다.

### 2-1-2 엔진 동력계 및 시험방법

시험에 사용된 엔진동력계는 160kW의 EC동력계(AVL, 오스트리아)를 사용하여 시험용 엔진과 직결하였으며, 냉각수 온도조절장치를 통하여 85±5℃, 공조시설을 통하여 실내온도 25±5℃를 유지하도록 하였다. 본 EC동력계의 콘트롤 S/W를 통하여 엔진의 속도와 부하에 따른 부분부하모드를 자동으로 제어하였으며, 부분부하모드를 3회 반복하여 각 모드(2분)에서 출력, 토크 및 배출가스 등의 데이터를 마지막 30초간 측정하였다. 시험장비 개략도를 <Figure 1.>에 나타내었다.

### 2-1-3 배출가스 분석기

시험에 사용된 배출가스 분석기는 HORIBA社의 MAXA-7100DEGR 모델로 THC는 열식불꽃이온화검출기법(HFID, Heated Flame Ionization Detector) NOx는 화학발광법(CLD, Chemiluminescence Detector), CO 및 CO<sub>2</sub>는 비분산적외선 분석법(NDIR, Nondispersive Infrared)으로 배기관에서 직접 샘플링된 배출가스를 이용하여 분석하였다.



<Figure 1. Experimental apparatus of engine test>

## 2-2 DME-LPG 유량측정

### 2-2-1 람다센서

DME-LPG 혼합연료의 유량측정은 Lambda Sensor(ETAS社 LA4)를 통하여 간접 측정하였다. Lambda Sensor에서 획득된 A/F 측정값과 흡입공기유량센서의 공기량을 통하여 연료의 유량을 계산하였다.

### 2-2-2 혼합연료의 H/C, O/C ratio 계산

Lambda Sensor에서 정확한 A/F값을 측정하기 위하여 Sensor 제작사에서 제공하는 다음과 같은 계산식을 이용하여 H/C, O/C ratio를 구하고, 그 값을 Sensor에 입력하였다.

$$H/C[mol/mol] = (H_{tot}/H_{mw}) / (C_{tot}/C_{mw})$$

$$O/C[mol/mol] = (O_{tot}/O_{mw}) / (C_{tot}/C_{mw})$$

$C_{mw}$ =Carbon molecular weight,  $C_{tot}$ =Carbon total weight by volume

$O_{mw}$ =Oxygen molecular weight,  $O_{tot}$ =Oxygen total weight by volume

$H_{mw}$ =Hydrogen molecular weight,  $H_{tot}$ =Hydrogen total weight by volume

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1 시험용연료

<Table 2. Composition of tested fuels and H/C, O/C ratio>

Fuel Type	Resources	H/C ratio	O/C ratio
DME 0	N-butane 100%	2.500	-
DME 1	N-butane 99%+DME 1%	2.503	0.003
DME 3	N-butane 97%+DME 3%	2.510	0.010
DME 5	N-butane 95%+DME 5%	2.516	0.016
DME 10	N-butane 90%+DME 10%	2.533	0.033

시험에 사용된 연료는 <Table 2.>에 나타내었다. 선행되어진 연구결과에 따르면 Butane-DME 혼합연료는 10%이상의 DME가 혼합되었을 경우 저속-고부하 영역에서 노킹이 발생되고, 혼합율이 높아질수록 저부하-고회전 영역으로 노킹현상이 확대되었으며, 전부하 조건에서 공연비조정을 통하여 노킹에 따른 성능저하를 다소 극복할 수 있었다<sup>7,8)</sup>. 상용자동차는 LPG 100% 연료에 맞는 공연비가 엔진 컨트롤유닛에 맵핑되어있으며, 이를 임의적으로 변경할 수 없으므로 성능저하를 막을 수 없다고 판단된다. 또한 겨울철 시동성 향상을 위하여 LPG(Butane 100%)에 Propane이 혼합된 연료와 DME의 혼합연료는 Propane의 높은 옥탄가

에 기인하여 100% 부탄연료와 DME혼합연료 보다 노킹영역이 줄어든다는 연구 결과<sup>8)</sup>에 따라서 본 연구는 10%이하의 DME가 Butane 100% LPG에 혼합된 연료유형을 사용하였다.

### 3-2 엔진성능

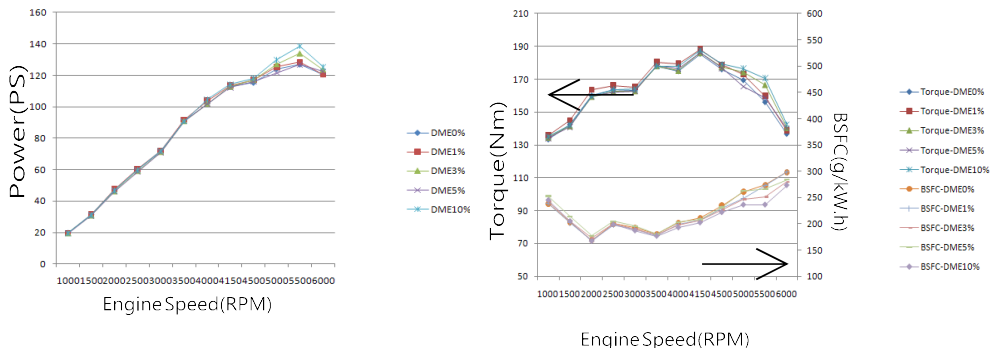
#### 3-2-1 출력

WOT상태에서 각 혼합연료는 공연비와 관계없이 엔진컨트롤유닛에 맵핑된 값에 맞추어 분사하게 되므로 DME의 혼합율에 상관없이 그 양은 일정하다. Figure 2. 을 보면 저속에서는 모든 혼합연료에서 동일한 출력을 나타내고 있으며 중속에서는 혼합율의 상승에 따라 미미한 출력감소가 나타나며, 고속구간에서는 혼합율 증가에 따라 출력이 다소 상승됨을 확인할 수 있다.

이론적으로 분사량이 일정하므로 에너지밀도가 낮은 DME연료의 혼합율이 높을 수록 출력이 낮아지는 것이 예상되었으나, 고속영역에서는 출력이 상승되었다.

#### 3-2-2 토크

부분부하 상태에서 일정한 성능(토크)을 구현하기 위하여 모든 엔진속도구간-중·저 부하구간에서 연료의 소모량은 큰 차이를 보이지 않으나 고속구간에서 그 차이가 뚜렷하게 나타났다. 또한 WOT구간에서는 고속구간에서 출력과 마찬가지로 DME함량이 증가함에 따라 토크가 상승하는 경향이 나타났다.

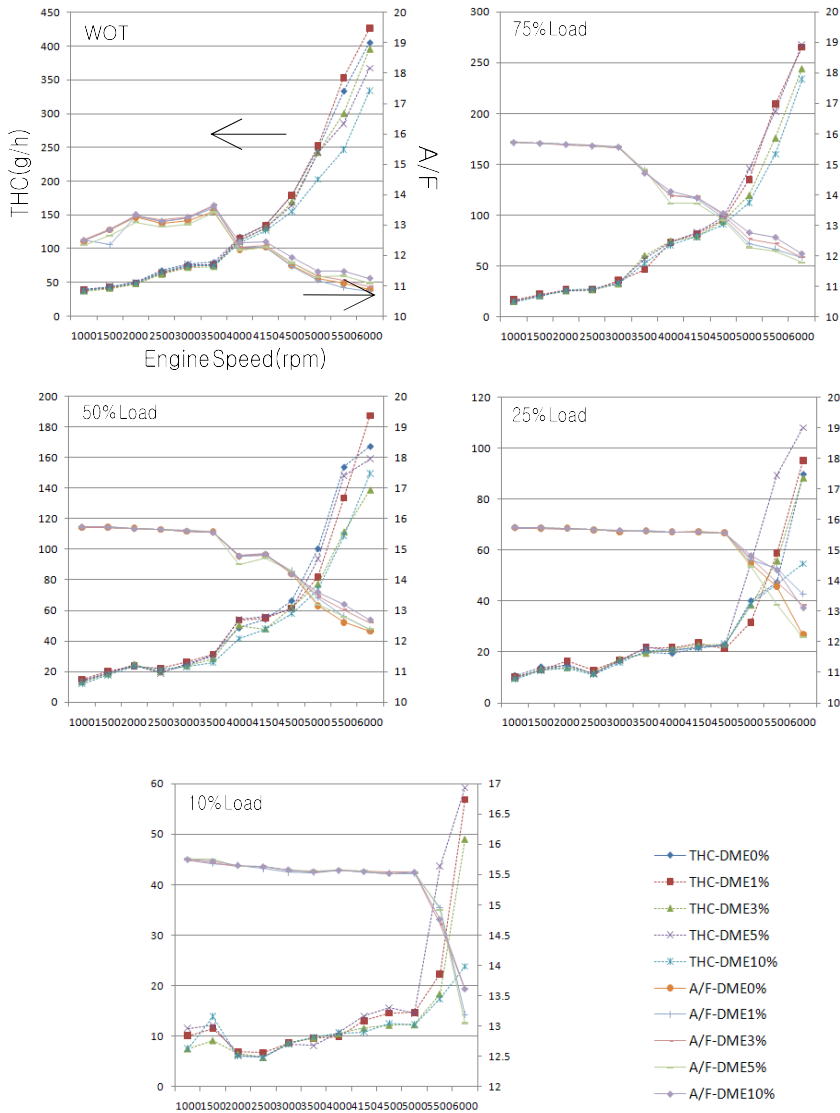


<Figure 2. Engine Performance according to tested fuels at WOT>

### 3-3 배출가스특성

#### 3-3-1 THC 배출특성

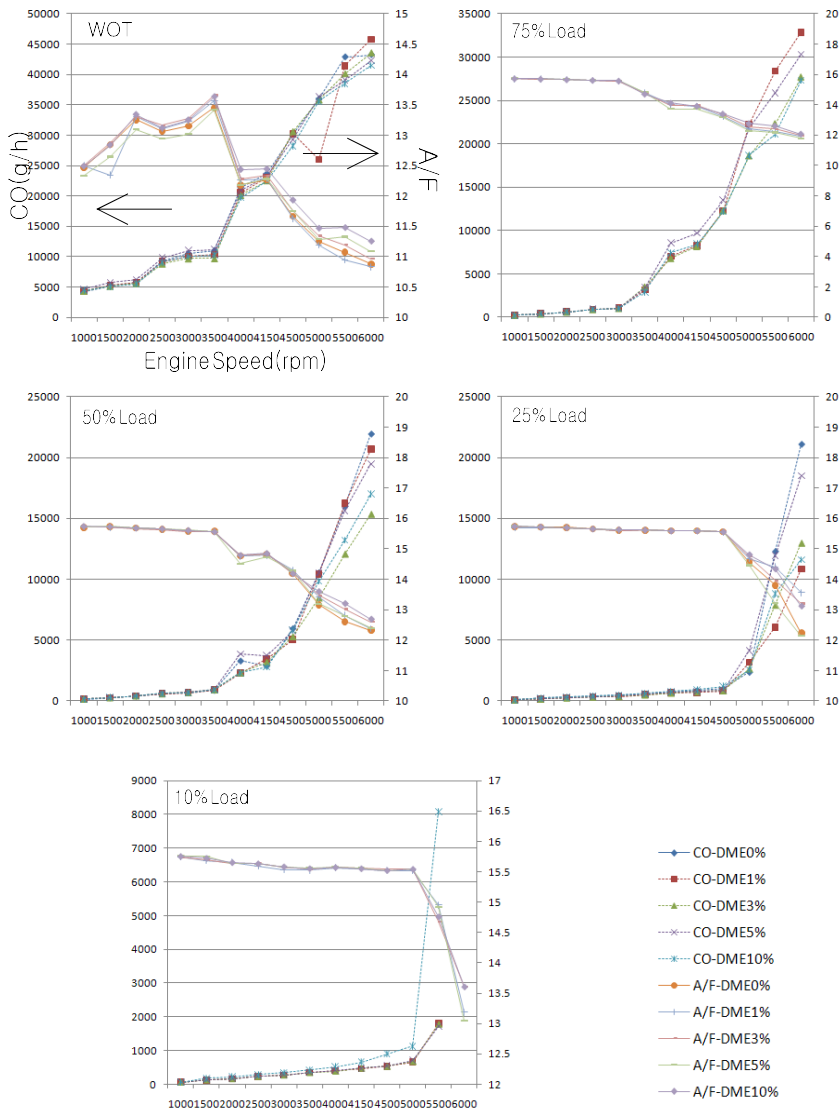
저·중속의 모든 부하조건에서 각 연료의 THC의 배출량의 차이는 미미하며 고속의 모든 부하조건에서 차이가 크게 나타났다. 혼합율에 따라 THC배출량은 고속-고·중부하에서 감소하는 경향이 나타났으며, 각 연료의 THC 배출량과 A/F는 반비례 경향이 있는 것으로 나타났고, 고속-저부하에 가까울수록 차이와 경향성은 확인할 수 없었다.



<Figure 3. Engine THC-A/F according to tested fuels>

### 3-3-2 CO 배출특성

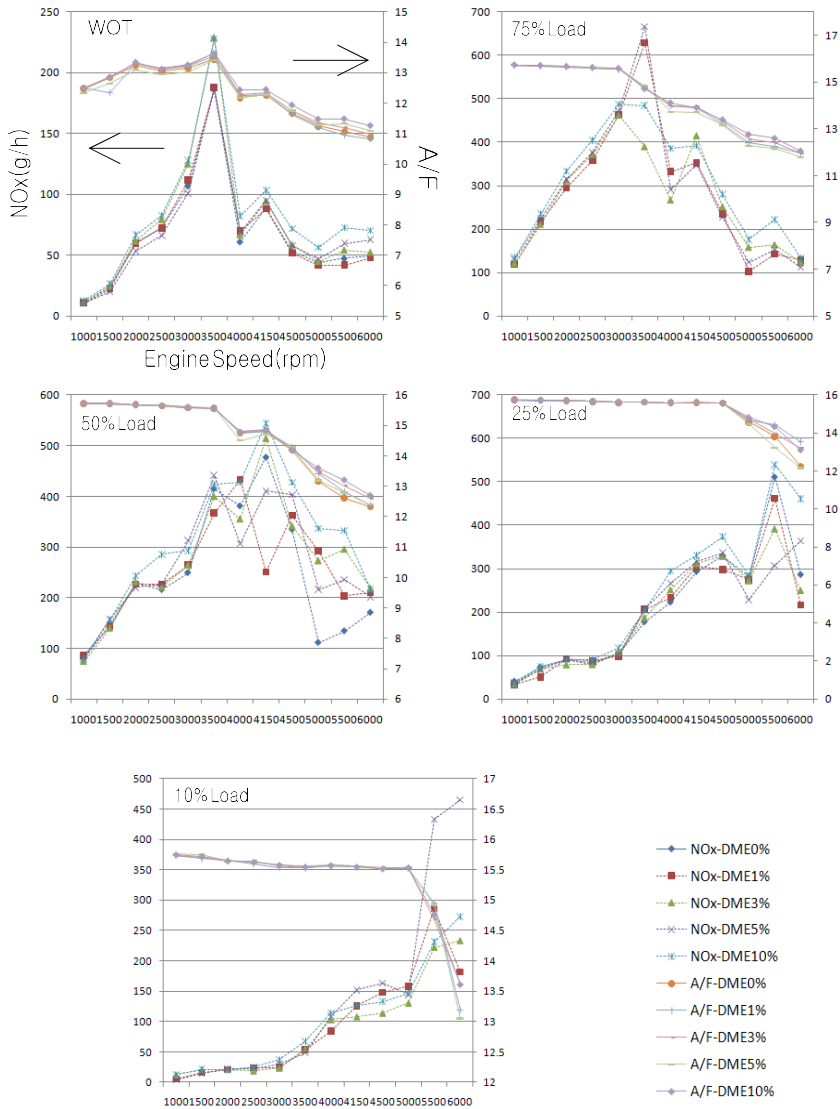
저·중속의 모든 부하조건에서 CO의 배출량의 차이는 미미하며 고속의 모든 부하조건에서 CO배출량의 차이가 크게 나타났다. 고속-중·고부하 영역에서 DME 혼합연료가 LPG보다 CO의 배출이 낮은 것으로 나타났으며, 각 연료에 따른 CO의 배출특성과 A/F는 반비례 경향을 가졌다.



<Figure 4. Engine CO-A/F according to tested fuels>

### 3-3-3 NO<sub>x</sub> 배출특성

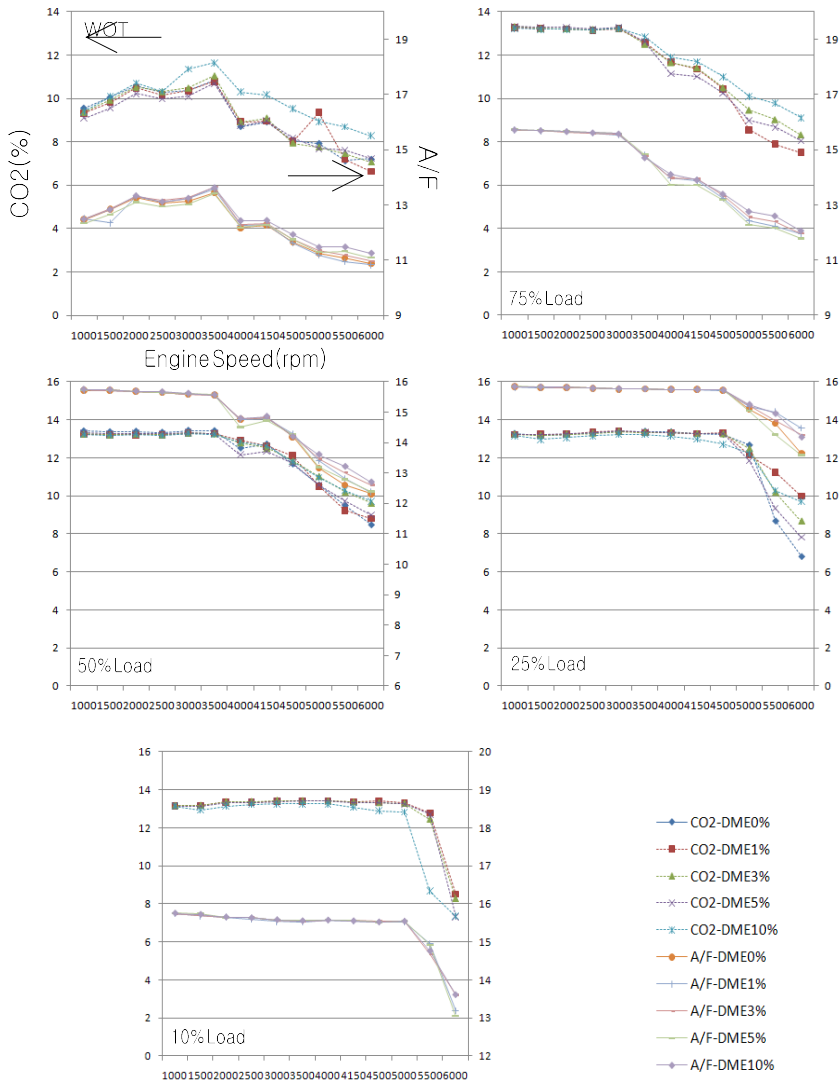
NO<sub>x</sub>의 배출특성은 저속의 모든 부하조건에서 그 차이가 미미하나, 중속이상부터 배출특성 차이가 나타나기 시작한다. 중속에서는 모든 DME혼합연료 및 LPG연료의 A/F가 차이가 없으나 NO<sub>x</sub>의 배출량의 차이가 나타났으며, 고속영역에서 A/F와 NO<sub>x</sub> 배출량의 차이가 나타났다. 중·고속-중·고부하 영역에서 DME혼합연료의 NO<sub>x</sub>배출량은 증가하는 경향을 나타내었다.



<Figure 5. Engine NOx-A/F according to tested fuels>

### 3-3-4 CO<sub>2</sub> 배출특성

CO<sub>2</sub>는 중·저속 모든 부하에서 그 차이가 미미하나 모든 속도 모든 부하에서 A/F의 경향성과 비례한 배출특성이 나타났으며, 특히 고속·중·고부하 영역에서 그 특성이 뚜렷이 나타났다. 고속영역에서 혼합연료의 CO<sub>2</sub> 배출량은 증가하는 경향을 나타내었다.



<Figure 6. Engine CO<sub>2</sub>-A/F according to tested fuels>

#### 4. 결론

DME-LPG 혼합연료(1~10%)를 소형 LPLi 엔진에 적용하여 혼합연료에 따른 엔진성능 및 배출가스 특성 등을 측정하였으며, 결론은 다음과 같다.

1. DME 혼합율에 따른 WOT 운전 영역의 출력 및 토크는 저속에서 차이가 없었으며 중속에서 출력이 미미하게 낮았고 고속영역에서 다소 증가하는 경향을 나타내었다.



2. DME 혼합율에 따른 THC와 CO의 배출량은 중·저속-저부하에서 차이가 미미하였으며, 고속-중·고부하에서 A/F와 반비례로 배출량이 감소하는 경향을 보였다.
3. DME 혼합율에 따른 NO<sub>x</sub>의 배출량은 저속-저부하에서 차이가 미미하였으며, 중·고속-중·고부하에서 배출량이 증가하는 경향을 보였다.
4. DME 혼합율에 따른 CO<sub>2</sub>의 배출량은 중·저속-모든 부하 영역에서 차이가 미미하였으며, 고속-모든 부하에서 A/F와 비례관계로 증가하는 경향을 보였다.

본 연구에서 나타난 10% 미만의 DME 혼합 LPG연료가 가지는 중·고속영역의 차이는 A/F와 연계성으로 판단할 때, LPLi 엔진 연료분사 로직과 관련되어 있다고 판단되며 이에 대한 추가적 연구가 필요하다고 사료된다.

## 5. 후기

본 연구는 지식경제부 “에너지·자원기술개발사업”중 한국석유관리원에서 주관하는 “DME-LPG 혼합연료 실증평가연구”의 연구비로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

## 참 고 문 헌

1. D. K. Kim, "A Patent Trend of Liquid Phase LPG Injection Engine," Auto Journal, Vol.27, No.1, pp.97-107(2005)
2. D. R. Kim and J. N. Park, "LPG LPI(Liquified Petroleum Injection) System," Auto Journal, Vol.27, No.3, pp.14-18(2005)
3. S. K. An, M.Y. Kim, S. H. Yoon, J. H. Lee and C. S. Lee, "Combustion and Exhaust Emission Characteristics of DME in a Common-Rail Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.15, No.2, pp.74-82(2007).
4. F. Maroteaux, G Descombes and F. Sauton, "Performance and Exhaust Emissions of a Diesel Engine Running with DME," 2001 ICE Spring Technical Conference, Vol.1, pp.73-81(2001).
5. Japan DME Forum, "DME hand book", pp2-3(2007).
6. 지식경제부 "DME-LPG 혼합연료 품질 및 실증평가 연구"(2009.9)
7. S. H. Lee et al., "Performance and Emissions of a SI Engine Operated with LPG-DME Blended Fuel," Transactions of KSAE, Vol.16, No.2, pp.175-182(2008)
8. S. H. Lee et al., "The Effect of N-butane and Propane on Performance and Emission of a SI Engine Operated with LPG-DME Blended Fuel," Transactions of KSAE, Vol. 17, No. 1, pp.35-42(2009)