



LPG/바이오디젤 혼합연료를 사용하는 직접분사식 디젤엔진의 성능 및 배기특성에 관한 연구

*이석환 · 오승묵 · 최영 · 강건용

한국기계연구원

(2009년 11월 5일 접수, 2010년 2월 24일 수정, 2010년 2월 24일 채택)

Study on the Performance and Emission Characteristics of a DI Diesel Engine Operated with LPG / Bio-diesel Blended Fuel

*Seok Hwan Lee · Seung Mook Oh · Young Choi · Kern Yong Kang

Korea Institute of Machinery and Materials, 171, Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-338, Korea

(Received 5. November. 2009, Revised 24. February. 2010, Accepted 24. February. 2010)

요 약

본 연구에서는 LPG/바이오디젤 혼합연료의 직접분사식 디젤엔진 적용성에 관한 실험을 수행하였다. 특히, 혼합연료를 엔진에 적용하는 경우 엔진성능, 배출가스(미연탄화수소, 일산화탄소, 질소산화물, 이산화탄소), 연소안정성에 대한 실험을 1,500 rpm의 엔진회전수 조건에서 수행하였다. 바이오디젤은 질량대비 20-60% 범위로 LPG에 혼합하였다. 바이오디젤을 40% 이상 혼합하는 경우 엔진은 모든 부하영역에서 매우 안정적으로 연소되었다. 바이오디젤의 혼합율이 증가할수록 혼합연료의 세탄가가 향상되어 연소시작 시점이 진각되었다. 혼합연료를 사용하면 저부하에서는 과혼합에 의한 부분연소로 인하여 THC와 CO의 배출량이 급증하였으며, NOx의 경우 저부하에서는 배출량이 디젤연료에 비해서 낮았으며 고부하에서는 더 많이 배출되었다.

Abstract - In this study, we experimentally investigated a compression ignition engine operated with Bio-diesel blended LPG fuel. In particular, the performance, emissions characteristics (including total hydrocarbon, carbon monoxide, nitrogen oxides, and carbon dioxides emissions), and combustion stability of a CI engine fueled with Bio-diesel blended LPG fuel were examined at 1500 rpm.

The percentage of Bio-diesel in the fuel blend ranged from 20-60%. The results showed that stable engine operation was possible for a wide range of engine loads up to 40% Bio-diesel by mass. When the Bio-diesel content was increased, leading to a decrease in the lower heating value of the blended fuel, the cetane value increased, resulting in an advanced start of heat release. Exhaust emission measurements showed that THC and CO emissions were increased when using the blended fuel at low engine speeds due to partial burn from over-mixing. NOx emission was emitted less at lower loads and more at higher loads.

Key words : Liquefied Petroleum Gas(LPG), bio-diesel, blended fuel, Compression Ignition(CI), combustion stability

1. 서론

최근 고유가가 계속되고 있고, 화석연료의 고갈

및 지구온난화 문제로 국제사회에서 국가별 CO₂ 배출량을 규제하려는 기후변화협약이 발효되어 자동차의 경우 효율향상을 위한 전략적 대책마련이 시급한 실정이다. 동일한 연료량에서 주행거리가 길며, CO₂의 배출량이 가솔린 엔진보다 적은 디젤

*주저자:shlee@kimm.re.kr

엔진이 근래에 각광받고 있다. 하지만 디젤엔진 특성상 질소산화물 배출량이 높으며 입자상 물질을 배출하므로 날로 강화되고 있는 배기규제에 대응하기 위해서 디젤연료를 대체할 수 있는 연료들에 대한 연구가 활발하게 진행 중이다[1]. 근래에 연구되는 대체연료들 중에서 특히 가스연료에 대한 연구 및 활용이 활발한데 대표적으로 LPG(Liquid Petroleum Gas), CNG(Compressed Natural Gas), DME(Dimethylether)가 널리 사용되고 있다. 이 중 LPG는 높은 옥탄가를 지닌 연료로 압축착화엔진보다 불꽃점화엔진에 주로 사용되었으나, 압축착화엔진의 높은 열효율을 이용하기 위하여 LPG를 압축착화엔진에 적용하고자 하는 시도가 있었다[2, 3]. LPG를 압축착화엔진의 연료로 사용하기 위해서는 연료의 세탄가를 높여서 자발화성능을 향상시켜야 한다. 세탄가를 높은 LPG 혼합 연료는 디젤에 비해 빠른 증발특성으로 인하여 매연이 배출되지 않으며 배기재순환 (EGR) 적용시 NOx를 저감시킬 수 있다[4,5]. 또한 LPG를 엔진실린더에 직접 분사하는 경우 흡입 공기량 및 공연비의 정밀 제어가 가능하며 연료의 증발잠열로 인하여 연소실 냉각효과로 인한 추가적인 출력 향상의 효과도 가질 수 있다[6]. 본 연구에서는 LPG 연료의 세탄가를 향상시키기 위하여 청정연료이며 세탄가가 높은 바이오디젤을 세탄향상제로 이용하였다. 바이오디젤은 이산화탄소 중립 사이클(CO₂ neutral cycle) 특성을 가지고 있기 때문에, 연료특성상 기본적으로 대표적 온실가스 (GHG; Greenhouse Gas)인 CO₂의 저감 효과를 가지고 있다. 하지만 장시간으로 바이오디젤 원유를 사용할 때, 인젝터 막힘 (injector coking), 링 소착 (ring sticking), 인젝터 퇴적물 (injector deposits) 등의 문제 때문에, 기존 디젤계 연료들과 바이오디젤 혼합연료의 적용에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있는 실정이다 [7].

본 연구에서는 LPG 대비 바이오디젤을 질량대비 20-60% 첨가한 혼합연료를 사용하는 경우 DME 연료를 사용하는 경우와 비교하여 직접분사식 디젤엔진의 성능과 배출가스 특성을 비교 분석하였다.

II. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 엔진 시스템의 제원을 Table 1에 나타내었다. 행정체적은 498cc이며 압축비가 18.4인 압축착화 엔진을 사용하였다. 분사시스템은 가스 상태의 연료를 고압으로 공급하기 위하여 에어구동형의 가스부스터 펌프를 이용하여 250bar로 가압하였다. Fig. 1은 본 연구에서 사용된 실험장치

의 개략도를 나타내고 있다. 엔진속도를 제어할 수 있는 직류모터식 동력계를 엔진의 크랭크축에 연결하였으며, 연료분사시기와 연료량제어를 위하여 Injector driver (TEMS, TDA-3200H)와 Delay generator (Stanford Research Systems, DG535)를 사용하였다. 연소실 압력측정을 위하여 Glow-plug를 제거하고 압전형 압력센서 (Kistler, 6065B)를 설치하였으며, 압력신호는 연소해석기 (AVL, 619 Indimeter)를 통하여 분석하였다. 연료 조성 변화에 따른 엔진의 공연비를 측정하기 위하여 광역산소센서를 배기관에 장착하였다. 질소산화물 (NOx), 미연탄화수소 (THC), 일산화탄소 (CO), 이산화탄소 (CO₂)는 배출가스 분석장치(Horiba, MEXA 8120)를 사용하여 분석하였다.

실험은 엔진회전수 1500 rpm조건에서 수행하였으며, 도시평균유효압력 (IMEP; Indicated Mean Effective Pressure) 기준 1~9 bar의 범위로 부하를

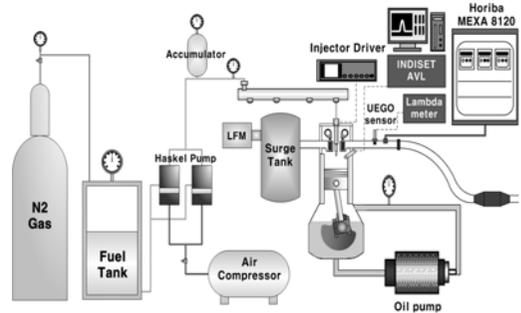


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

Table 1. Specifications of engine.

Items		Specifications	
General	Displacement volume	498 cc	
	Bore(mm)	83	
	Stroke(mm)	92	
	Connecting rod length(mm)	145.8	
	Compression ratio	18.4	
Valve Train	Valve Timing	Intake	7°/43°
		Exhaust	52°/6°
	Cam shaft	SOHC	
Injection pressure	LPG/Bio-diesel blended fuel, DME	250 bar	

Table 2. Characteristics of LPG(Butane), DME and Bio-diesel fuels.

Chemical Name	n-Butane	DME	Bio-diesel
Chemical structure	C ₄ H ₁₀	C ₂ H ₆ O	C ₁₇ H ₃₅ COOCH ₃
Liquid density (kg/m ³)	579	667	882
Molecular weight (g/mol)	58.12	46.07	298.5
Stoichiometric A/F	15.46	9.00	12.9
Boiling point (°C)	-0.5	-25.0	200-350
LHV (MJ/kg)	45.72	28.8	39.2
Cetane number	-	55-60	48-65

변화시켰다. 연료의 혼합비율은 LPG 대비 바이오디젤을 질량대비 20~60% 까지 변화시키면서 엔진의 성능과 유해 배출가스 특성을 DME연료를 사용한 경우와 비교 분석하였다. Table 2에서는 본 실험에 사용된 LPG (n-Butane), DME, 바이오디젤의 연료 특성을 나타내고 있다.

III. 실험결과

3.1. 바이오디젤 혼합율에 따른 최적분사시기

LPG 연료에 바이오디젤을 질량대비 20, 40, 60 wt% 혼합하는 경우 혼합비에 따른 엔진 성능을 DME 연료를 사용한 경우와 비교하였다. Fig. 2와 Fig. 3에서는 각각의 혼합연료 및 DME연료에서 엔진 최적 분사시기를 결정하기 위하여 12 mg/inj으로 연료의 분사량을 고정하였을 때 도시평균유효압력 (IMEP)과 도시평균유효압력 변동계수 (COV_{imep})를 분사시기에 따라서 측정한 결과이다. 바이오디젤을 LPG 연료에 질량대비 40, 60% 혼합한 경우와 DME연료를 사용하는 경우 분사시기가 BTDC (Before Top Dead Center) 12°일 때 높은 출력과 안정적인 연소가 일어나며, 바이오디젤이 20% 혼합되는 경우에는 분사시기가 전각된 BTDC 20°일 때 높은 출력과 안정적인 연소가 일어난다. 이는 바이오디젤의 첨가량이 높을수록 혼합연료의 세탄가가 증가하여 연소지연 시간이 감소하기 때문이다. 이보다 더 이른 시기에서 연료가 분사되는 경우 출력의 감소가 발생하는데 이는 압축행정 말기에 연소가 일어나야 하는데 압축과정 중에 연소가 발생하기 때문이다. 동일한 연료량에서 바이오디젤의 혼합

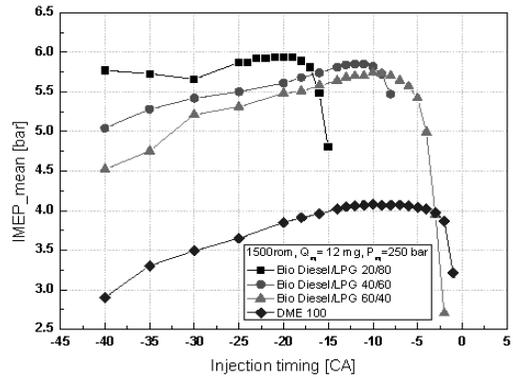


Fig. 2. Injection timing sweep test to find the maximum IMEP_{mean}.

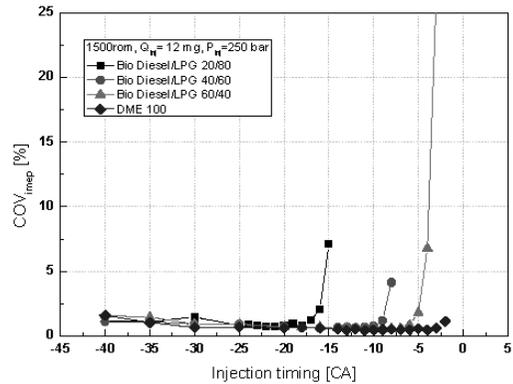


Fig. 3. Injection timing sweep test to find the minimum COV_{imep}.

비가 증가할수록 최대 출력은 약간 감소하는 경향을 보였는데 이는 바이오디젤의 저위발열량이 부탄보다 약 14% 정도 낮기 때문이다. 하지만 DME를 연료로 사용하는 경우에 비해서는 40% 이상의 출력 증가를 보였다.

3.2 바이오디젤 혼합율에 따른 연소특성

Figs. 4-7에서는 각각의 혼합연료 및 DME 연료에서 엔진부하에 따른 도시연료소비율 (ISFC; Indicated Specific Fuel Consumption)과 도시평균유효압력 변동계수, 공기과잉률, 배출가스의 온도를 나타내고 있다. 도시연료소비율은 동일한 출력을 발생하기 위하여 필요한 연료량을 나타내는데 보통 에너지 밀도가 낮을수록 도시평균연료소비율은 높다. 실험결과를 살펴보면 바이오디젤의 에너지밀도가

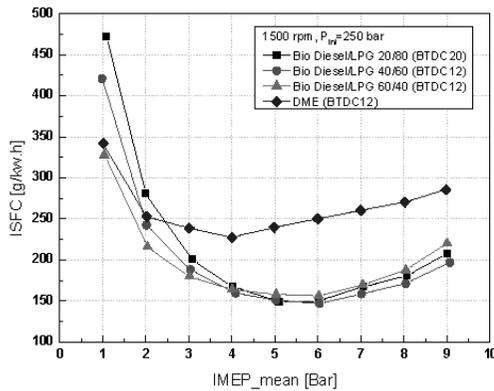


Fig. 4. Indicated specific fuel consumption at various engine loads.

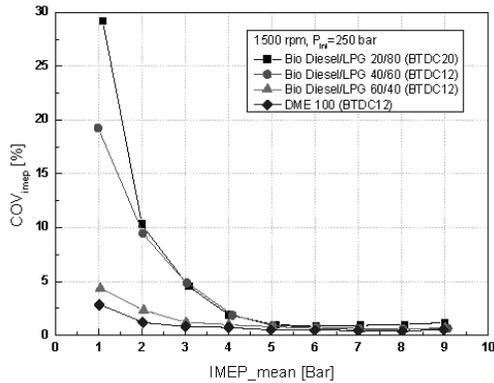


Fig. 5. Coefficient of variation of IMEP at various engine loads.

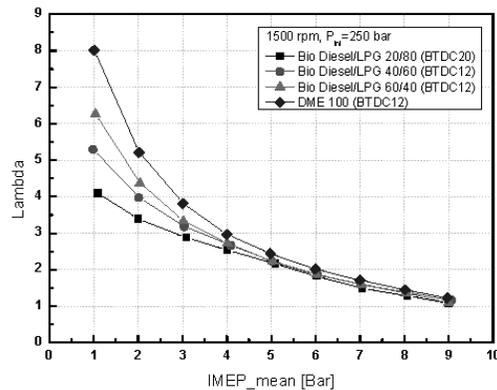


Fig. 6. Lambda value at various engine loads.

부탄보다 10% 이상 낮으므로 바이오디젤의 혼합율이 높을수록 연료소비율은 약간 높았다. 저부하 영역에서는 바이오디젤의 혼합율이 낮은 경우 연료의 세탄가가 자발화 성능이 감소하여 연소효율이 낮아지므로 연료소비율도 높게 측정이 되었다. 이 경우 Fig. 5에서와 같이 도시평균유효압력 변동계수의 값도 매우 높았다. 하지만 고부하영역일 경우 연소실 내의 높은 온도와 압력으로 충분한 자발화 연소 조건을 만족시켜 안정적인 연소로 인하여 바이오디젤의 혼합율이 낮은 경우에도 연료소비율과 변동계수 값이 낮아진다. DME의 경우 LPG에 비해서 에너지밀도가 40% 정도 낮기 때문에 연료소비율은 매우 높게 측정이 되었다. 하지만 저부하 영역에서는 DME의 높은 세탄가로 인하여 혼합연료에 비해서 연소효율이 높기 때문에 오히려 DME를 사용하는 경우 연료소비율이 낮았다.

Fig. 6에서는 바이오디젤의 혼합율에 따른 엔진의 공기과잉률을 나타낸 결과이다. 연소효율이 낮아지게 되면 동일한 출력을 얻기 위해 더 많은 연료가 필요하며 따라서 공기과잉률은 바이오디젤의 혼합비율이 낮을수록 낮게 측정되었다. 그러나 부하가 증가하면 연소실 온도와 압력이 증가하여 자발화가 쉽게 발생할 수 있는 조건이 형성되어 연소가 안정되면서 각 연료들의 공기과잉률 값의 차이는 거의 없다.

Fig. 7에서는 혼합율에 따른 배출가스 온도 변화를 나타내었는데 혼합율에 따른 배출가스 온도 차이가 크지는 않았지만 바이오디젤 혼합율이 낮은 경우 저부하 영역에서는 분사시기가 진각되어 있음에도 불구하고 세탄가가 낮아서 연소시작시점이 지연되므로 배출가스의 온도가 약간 높은 경향이 있었다.

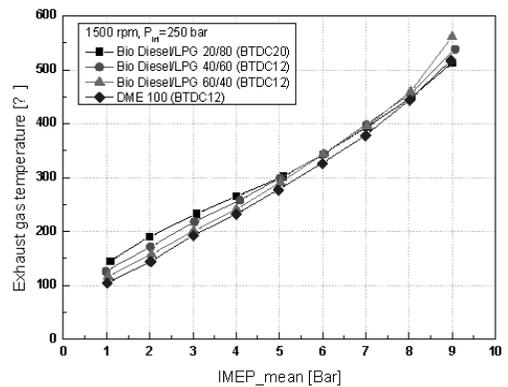


Fig. 7. Exhaust gas temperature at various engine loads.

3.3 바이오디젤 혼합물에 따른 엔진 연소 특성

Fig. 8, Fig. 9는 DME 연료와 LPG/바이오디젤 혼합연료에서 분사시기를 각각 BTDC 20° (바이오디젤 20% 함유), BTDC 12° (바이오디젤 40, 60%, DME 100%)로 고정하였을 때 IMEP 3, 9 bar 조건에서의 연소실압력과 열방출률을 나타내고 있다. IMEP 3 bar 조건에서 DME 100%와 바이오디젤 60% 혼합연료의 경우 실린더 압력의 크기는 거의 비슷한 수준을 나타내고 있지만 바이오디젤의 혼합율이 20, 40%인 경우 혼합연료의 세탄가가 낮으므로 점화지연시간이 매우 크며 예혼합연소 영역에서의 열방출율도 낮다. 고부하 영역인 IMEP 9

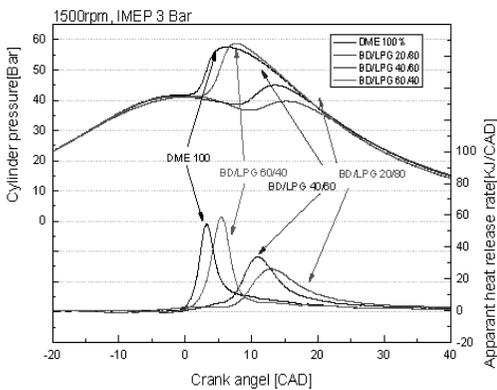


Fig. 8. The characteristics of cylinder pressure and heat release rate for DME and blends at 3 bar of IMEP.

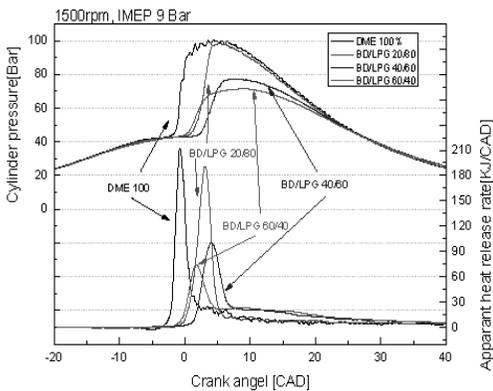


Fig. 9. The characteristics of cylinder pressure and heat release rate for DME and blends at 9 bar of IMEP.

bar 조건에서는 연소실의 온도와 압력이 상승하여 자발화가 쉽게 일어날 수 있는 분위기가 만들어지므로 바이오디젤의 혼합율이 낮은 경우라도 점화 지연 시기가 저부하 조건에 비해서 짧은 경향을 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 이 조건에서는 오히려 세탄가는 낮지만 에너지밀도가 높은 바이오디젤 20% 함유조건에서 점화지연 시기가 가장 짧으며 연소실 압력과 열방출율의 피크값이 최대이다. 이는 부하증가에 따라서 점화지연이 감소하고 세탄가는 낮지만 자발화가 쉽게 되는 연소분위기에서 바이오디젤에서 생긴 화염이 빠르게 전파되어 부탄의 연소까지 활발하게 해주기 때문이다. 따라서 발열량이 높은 부탄의 연소가 충분히 이루어져 예혼합 영역에서의 열방출률이 크게 증가한다.

DME의 경우는 높은 세탄가로 인하여 점화지연 시간이 매우 짧기 때문에 이른 시기에 연소가 일어나며 연소실 압력 상승률과 예혼합연소 영역에서 열방출율이 크다. IMEP 9bar의 조건에서는 DME 연소시 연소실 압력상승률이 매우 커서 이 경우 노킹 현상도 관찰되었다. 실린더 압력 상승률이 급격한 것으로 보아 질소산화물의 배출량도 높으리라 예상된다.

3.4 유해 배출가스 배출특성

Figs. 10~13에서는 엔진회전수 1500 rpm 조건에서 DME연료와 LPG/바이오디젤 혼합연료가 연소될 때 발생하는 유해 배출가스인 미연탄화수소, 일산화탄소, 질소산화물, 이산화탄소의 배출량을 나타내었다.

THC (Total hydrocarbon)는 모든 조건에서 높은 세탄가를 가지는 DME연료에서 배출량이 가장 낮

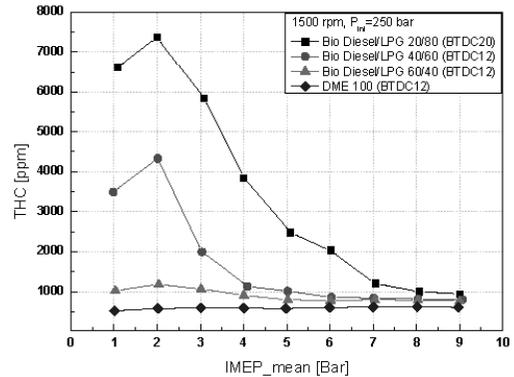


Fig. 10. Engine-out THC emission as a function of engine loads.

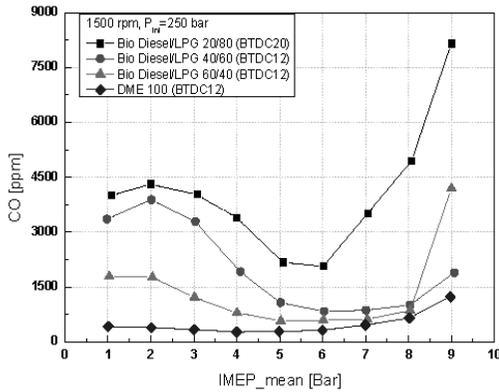


Fig. 11. Engine-out CO emission as a function of engine loads.

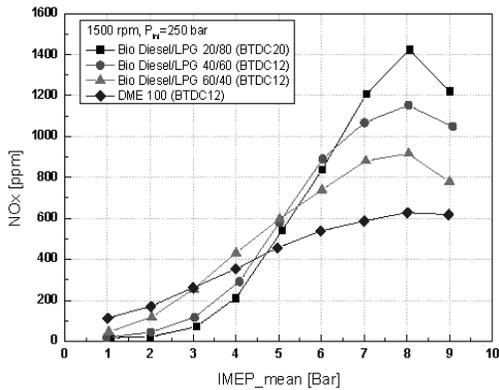


Fig. 12. Engine-out NOx emission as a function of engine loads.

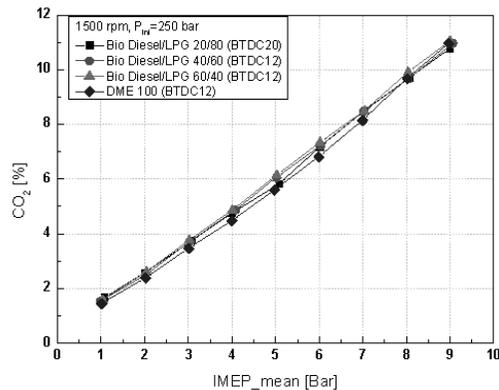


Fig. 13. Engine-out CO₂ emission as a function of engine loads.

다. 저부하 조건에서는 바이오디젤의 혼합비율이 낮을수록 많은 양이 배출되는 경향이 있는데 이는 혼합연료의 세탄가가 감소하여 자발화 성능이 저하되기 때문이다. 바이오디젤이 자발화하여 화염이 연소실 가장 자리에 있는 LPG연료까지 전파되어야 하는데 저부하 영역에서는 화염전파속도도 느리고 화염이 다발적으로 발생하지 않아서 미처 연소하지 못한 LPG연료들이 배출되어서 THC 배출량이 매우 높다. 고 부하 영역으로 갈수록 THC 배출은 감소하는데 이는 높은 연소온도와 압력으로 자발화 성능이 개선되기 때문이다.

CO의 경우 저부하 영역에서 낮은 연소온도로 산화되지 못한 CO의 배출량이 높게 나타나며 중부하 조건으로 갈수록 감소한다. 고부하 영역에서는 공급연료의 증가로 연소실 내 분위기가 농후해지므로 배출량이 증가한다.

열방출율 결과에서 저부하 영역에서는 DME연료와 바이오디젤의 혼합비율이 60%인 경우 예혼합연소 영역에서의 열방출율이 많았는데 이는 결국 NOx 배출량이 높다는 것을 의미한다. NOx 배출량을 측정된 결과 바이오디젤의 혼합비율이 높은 경우 저부하 영역에서는 점화지연 시간이 짧고 예혼합 영역에서의 열방출량이 커서 NOx의 배출량이 높지만 고부하 영역에서는 예혼합 영역에서의 열방출량이 감소하여 NOx의 배출량도 감소하였다.

CO₂의 경우는 바이오디젤의 혼합율에 따라서 배출량은 큰 차이를 보이지 않았다. DME연료를 사용하는 경우에는 혼합연료를 연소한 경우와 큰 차이는 없었지만 DME 자체가 저탄소 연료이므로 CO₂가 약간 적게 배출되었다.

VI. 결론

LPG에 바이오디젤을 질량기준으로 20, 40, 60% 혼합한 혼합연료와 DME연료를 압축착화기관에서 연소한 후 엔진의 성능과 배출가스를 측정하였으며, 이를 통하여 다음의 결론들을 얻을 수 있었다.

- 1) LPG/바이오디젤 혼합연료에서 바이오디젤이 질량대비 40, 60%가 함유된 경우와 DME 연료의 분사시기가 BTDC 12°인 조건일 때 높은 출력과 안정적인 연소가 발생하였다.
- 2) 엔진의 부하가 낮은 영역에서 LPG 연료의 혼합비가 증가하면 연료의 세탄가가 낮아져서 자발화 특성이 감소하므로 도시유효평균압력 변동계수는 증가하며 점화지연 시간 또한 증가하는 경향을 나타낸다.

3) THC의 배출은 엔진부하증가에 따라 감소하며, LPG 혼합비율이 높은 경우 미처 연소되지 못한 LPG연료의 배출로 인하여 THC가 다량 배출된다.

4) CO의 경우 저부하 영역에서는 낮은 연소온도로 인하여 증가하며 고부하 영역에서는 농후한 연소 조건이 되므로 배출량은 급증한다.

5) NOx의 경우 예혼합 영역에서의 열방출량 변화로 인해 저부하 영역에서는 바이오디젤 혼합율이 높은 경우, 고부하 영역에서는 바이오디젤 혼합율이 낮은 경우 배출량이 높았다.

6) DME연료를 사용하는 경우에는 혼합연료를 연소한 경우와 큰 차이는 없었지만 DME 자체가 저탄소 연료이므로 CO₂가 약간 적게 배출되는 경향을 보였다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 “중소형 LPG 상용차 개발사업” 및 한국기계연구원의 일반사업인 “미활용에너지 청정 고밀도화 기계기술 기반구축”의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

[1] 이석환, 오승묵, 최영, 강건용, 최원학, 차경욱, “LPG-DME 혼합연료를 사용하는 전기점화 기관의 연소특성 연구”, 한국가스학회지, (12(3)), 7-12, (2008)

[2] Kajitani S., Chen C. L., Oguma M., Alam M. and

Rhee K.T, “Direct injection diesel engine operated with propane-DME blended fuel”, SAE 982536, (1998)

[3] 이석환, 오승묵, 최영, 조준호, 차경욱, “LPG/DME 혼합연료를 사용하는 직접분사식 디젤 엔진의 부분부하 성능 및 배기특성에 관한 연구”, 한국자동차공학회 국문논문집, (17(5)), 53-60, (2009)

[4] Sugiyama K., Kajiwara M., Iwama M., Mori M., Oguma M., Kinoshita K., Goto S., “Performance and Emissions of a DI Diesel Engine Operated with LPG and Cetane Enhancing Additives”, SAE 2003-01-1920, (2003)

[5] Goto S., Lee D. Y., Harayama N., Honjo F., Ueno H., Honma H., Wakao Y., Mori M., “Development of LPG SI and CI Engine for Heavy Duty Vehicles”, Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress, 394-403, (2000)

[6] Kitano K., Nishiumi R., Tsukasaki Y., Tanaka T., Morinaga M., “Effects of Fuel Properties on Premixed charge Compression Ignition Combustion in a Direct Injection Diesel Engine”, SAE 2003-01-1815, (2003)

[7] 문건필, 이용규, 최교남, 정동수, “GTL/바이오디젤 혼합 연료의 연소 및 배기배출물 특성에 관한 실험적 연구”, 한국자동차공학회 국문논문집, (17(5)), 39-45, (2009)