

LPG/DTBP 혼합연료를 사용하는 압축착화 엔진의 부분부하 성능 및 배기특성에 관한 연구

이 석 환* · 오 승 묵 · 최 영 · 강 건 용

한국기계연구원

Performance and Emission Characteristics of a Compression Ignition Engine Operated with LPG and Cetane Enhancing Additives

Seokhwan Lee* · Seungmook Oh · Young Choi · Kernyong Kang

Engine R&D Team, KIMM, 171 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-338, Korea

(Received 19 February 2010 / Accepted 29 March 2010)

Abstract : In this study, a feasibility test of liquid petroleum gas (LPG) compression ignition (CI) engine has been carried out to study the effectiveness of cetane enhancing additive: Di-tertiary-butyl peroxide (DTBP). Performance and emissions characteristics of a CI engine fuelled with DTBP blended LPG fuel were examined. Also, the effect of EGR (exhaust gas recirculation) on the combustion and emissions characteristics has been investigated. Results showed that stable engine operation over a wide range of the engine loads was possible. Exhaust emissions measurements showed that hydrocarbon were decreased with the blended fuel at enhancing cetane number. Furthermore, the combustion stability of LPG with a cetane number improver was equivalent to that of commercial Diesel fuel. Increasing the EGR rate leads to deteriorate the IMEP (indicated mean effective pressure) and increase the ignition delay. It was found that the exhaust emissions with the EGR resulted in a very large reduction in nitrogen oxides at the expense of higher THC and CO emissions. Considering the results of engine performance and exhaust emissions, LPG blended fuel of enhancing cetane number could be used as an alternative fuel for diesel in a CI engine.

Key words : LPG(액화석유가스), Cetane number(세탄가), Compression ignition(압축착화), Combustion stability(연소안정성), Alternative fuel(대체연료), DTBP(Di-Tertiary-Butyl-Peroxide)

1. 서 론

자동차에서 배출되는 유해 배출물에 의한 심각한 대기 환경오염과 CO₂ 배출량 증가에 의한 지구 온난화의 문제를 해결하기 위한 하나의 방법으로 기존의 엔진보다 우수한 연료 소모율과 적은 양의 배출물 특성을 갖는 엔진 개발이 진행되어 왔다. 이러한 추세에서 가솔린 엔진보다 효율이 높고 CO₂ 배출이 적은 디젤 엔진이 친환경적인 엔진으로 고려되었다.^{1,2)} 하지만 디젤 엔진은 연소 특성상 배출물

에 NO_x(Nitrogen oxides)와 PM(Particulate matters)과 같은 유해 배출물을 다량으로 포함하고 있으므로 강화된 규제를 만족시키기 어렵다. 유해 배출물을 저감시키기 위하여 후처리 시스템, 엔진 연소 시스템 개선, 대체 연료에 대한 연구들이 활발하게 진행되어 왔으며, 대체연료로는 Methanol, GTL(Gas to Liquid), DME(Dimethyl ether), LPG(Liquid Petroleum Gas), CNG(Compressed Natural Gas)등이 널리 사용되고 있다.^{3,4)} LPG는 낮은 세탄가 때문에 CI 엔진보다 SI 엔진에 널리 사용되고 있으나, CI 엔진의 높은 열효율을 이용하기 위하여 LPG를 CI 엔진에 적용

*Corresponding author, E-mail: shlee@kimm.re.kr

하는 시도가 있었다.⁵⁾ LPG 연료를 CI 엔진의 연료로 사용하기 위해서는 세탄 향상제를 첨가하여 자발화 성능을 향상시켜야 한다. 세탄가를 높인 LPG 혼합 연료는 가스의 낮은 분자량과 높은 증기압으로 연소실 내부에서 공기와 쉽게 혼합되므로 연소 안정성이 좋으며, 디젤연료를 사용하는 경우와 비교하여 LPG 가스연료를 디젤엔진에 적용하면 soot와 CO₂ 배출량이 감소되는 경향이 있다.⁶⁻⁹⁾

따라서 본 연구는 세탄 향상제인 DTBP를 첨가하여 세탄가를 높인 LPG 연료의 CI 엔진 적용 가능성을 알아보기 위한 실험을 수행하였으며, Diesel 연료로 구동한 엔진의 성능 및 배기 배출물 특성과 비교 분석하였다. Table 1은 실험에 사용된 LPG(n-Butane)와 DTBP, Diesel의 연료 특성을 나타내었다. LPG에 DTBP를 질량기준으로 5,10,15% 첨가한 혼합연료와 Diesel 연료를 사용하는 압축착화엔진의 성능 및 주요 배출가스의 배출특성을 살펴봄으로써

Table 1 Characteristics of LPG (Butane), Diesel and DTBP fuels

Chemical name	Butane	Diesel	DTBP
Chemical structure	C ₄ H ₁₀	C _n H _{1.87n}	C ₈ H ₁₈ O ₂
Liquid density (kg/m ³)	579	831	790
Molecular weight (g/mol)	58.12	170	146.22
Stoichiometric A/F	15.46	14.6	10.83
Boiling point (°C)	-0.5	180/370	111
LHV (MJ/kg)	45.72	42.7	34.1

혼합연료의 CI 엔진 적용가능성을 파악하고자 하였다. 또한 세탄가를 높인 LPG 혼합연료를 사용하는 CI 엔진에서 EGR을 적용하는 경우 엔진의 성능 및 배기 배출물 특성을 디젤연료를 사용하는 경우와 비교분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험엔진

본 연구에서 사용된 엔진 시스템의 제원을 Table 2에 나타내었다. 엔진 연소실 체적은 498cc, 압축비 18.4인 압축착화 엔진을 사용하였다. 분사시스템으로는 가스 상태의 연료 공급을 위하여 에어구동형의 가스부스터 펌프를 이용하여 혼합연료를 250 bar로 가압하였고 디젤의 경우는 고압 디젤 펌프를 사용하여 1500 bar로 가압하였다. Fig. 1은 실험장치 개략도를 나타내고 있는데, 엔진속도 및 부하를 제어할 수 있는 직류모터식 동력계(DC dynamometer)를 엔진의 크랭크축에 연결하였으며, 연료분사시기와 연료량제어를 위하여 Injector driver(TEMS, TDA-3200H)와 Pulse generator(Stanford Research Systems, DG535)를 이용하였다. 연소실 압력측정을 위하여 Glow-plug를 제거하고 압전형 압력센서(Kistler, 6065B)를 설치하였으며, 압력신호는 연소해석기(AVL; Indimeter 619)를 통하여 분석하였다. 연료 조성 변화에 따른 엔진의 공연비를 측정하기 위하여

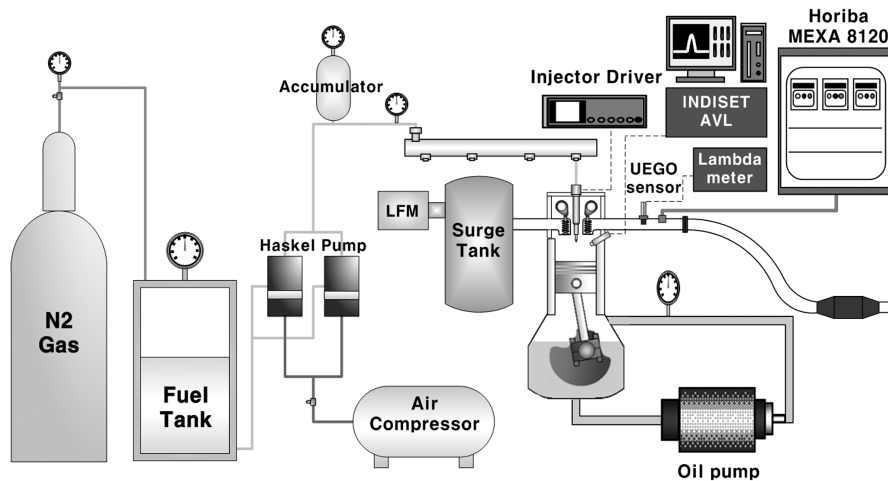


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 2 Specifications of engine

Items		Specifications
General	Displacement volume	498 cc
	Bore (mm)	83
	Stroke (mm)	92
	Connection 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/DTBP blended fuel	250 bar
	Diesel	1500 bar

산소센서를 배기관에 장착하였다. 질소산화물, 미연탄화수소, 일산화탄소, 이산화탄소는 배출가스 분석장치(Horiba, MEXA8120)를 사용하여 분석하였으며 검댕의 경우 광투과식 매연측정기(Opacimeter, AVL)를 사용하여 측정하였다.

2.2 실험방법

실험은 엔진회전수 1500 rpm조건에서 수행하였으며, 도시평균유효압력(IMEP; Indicated Mean Effective Pressure) 1~9 bar의 범위로 부하를 변화시켰다. 연료의 혼합비율은 LPG 질량 대비 DTBP 5~15 %까지 5% 간격으로 변화시키면서 엔진의 성능과 배기 배출물 특성을 디젤 연료와 비교 분석하였다.

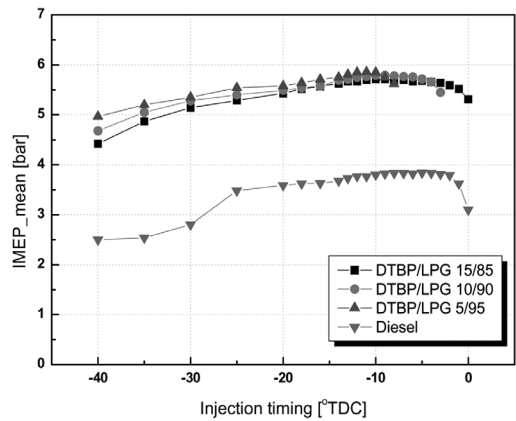
EGR율은 전자제어식 EGR 밸브에서 Duty 값을 제어하여 변화를 주었다. EGR율은 배출가스 분석장치로 측정된 흡·배기 매니폴드에서의 CO₂ 농도를 이용하여 다음의 식으로부터 구하였다.

$$EGR(\%) = \frac{[CO_2]_{intake} - [CO_2]_{ambient}}{[CO_2]_{exhaust} - [CO_2]_{ambient}} \times 100$$

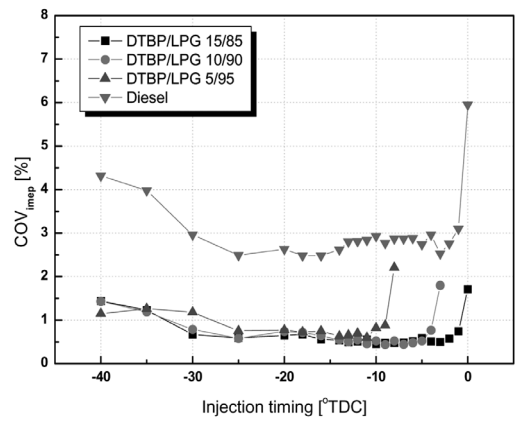
3. 실험결과 및 고찰

3.1 DTBP 혼합비율에 따른 연소 특성

LPG 연료(Butane 100%)에 DTBP를 질량대비 5, 10, 15% 혼합하는 경우 혼합비에 따른 엔진 성능을 디젤 연료를 사용하는 경우와 비교하였다. Fig. 2는 각 연료의 최적 분사시기를 찾기 위하여 연료 분사량을 혼합연료는 12 mg/inj, 디젤연료는 8 mg/inj으



(a) IMEP_mean



(b) COV_{imep}

Fig. 2 Comparisons of injection timing sweep for IMEP_{mean} and COV_{imep}

로 고정하였을 때 분사시기에 따른 출력과 도시평균유효압력 변동계수(Coefficient Of Variation in indicated mean effective pressure)를 측정할 결과이다. DTBP-LPG 혼합연료와 디젤연료의 분사시기는 BTDC 12°, BTDC 9° 조건일 때 높은 출력과 안정적인 연소가 발생하였으며, 이전의 분사시기 영역에서는 출력이 점차 감소하고, 도시평균유효압력 변동계수는 증가하는 경향이 나타났다. 향후 실험에서는 최적의 분사시기로 DTBP-LPG 혼합연료는 BTDC 12°, 디젤연료는 BTDC 9°로 정하였다.

Fig. 3, 4, 5에서는 DTBP 혼합율에 따른 엔진부하별 ISFC(Indicated Specific Fuel Consumption)와 도시평균유효압력 변동계수, 공기과잉률을 나타내었다. 저 부하 영역에서 DTBP 5wt%를 혼합한 경우 세탄

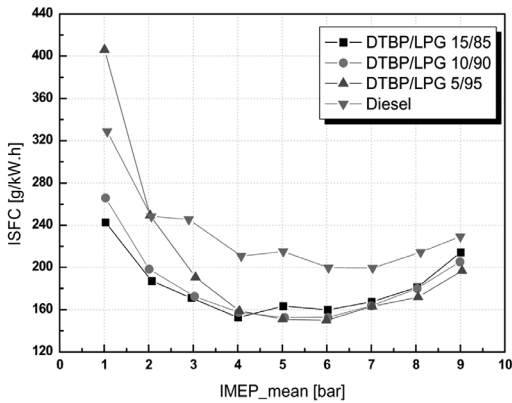


Fig. 3 Comparison of ISFC according to engine load

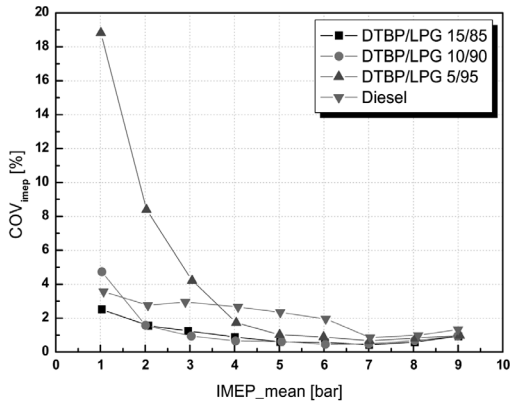


Fig. 4 Comparison of coefficient of variance in indicated mean effective pressure according to engine load

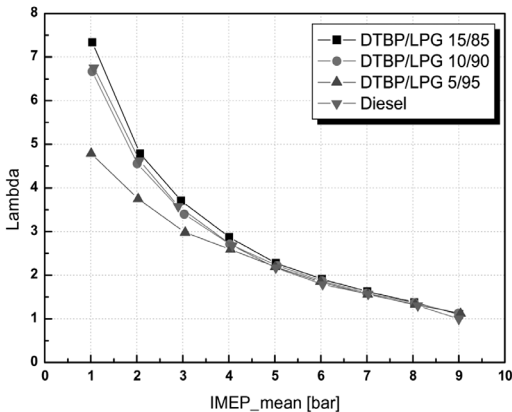


Fig. 5 Comparison of lambda value according to engine load

가가 낮아서 연료의 자발화 성능이 저하되며 이로 인하여 연소효율이 저하되므로 COV_{imep} 값이 매우 높았다. 자발화 성능의 저하로 혼합비율이 낮은 혼

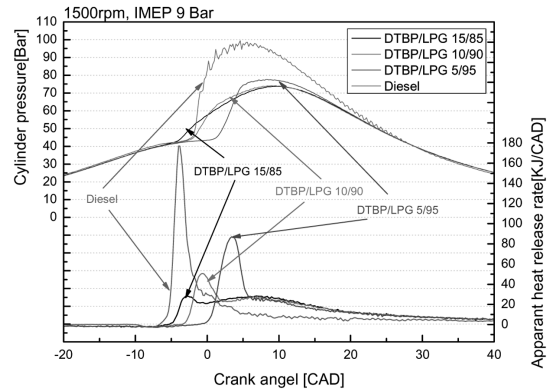


Fig. 6 The characteristic of cylinder pressure and heat release rate for Diesel and LPG-DTBP blends

합연료가 동일한 출력을 얻기 위해 더 많은 연료가 필요하기 때문에 저 부하에서 연료소모율도 높았다. 그러나 부하가 증가하면 연소실 온도와 압력이 증가하여 자발화가 쉽게 발생할 수 있는 조건이 형성되어 연소가 안정되므로 COV_{imep} 의 값이 감소하며, 혼합연료의 경우 연료가 연소실에서 쉽게 증발하므로 연소안정성이 좋으므로 디젤에 비해서 연료소모율도 낮았다.

Fig. 6에서는 디젤 연료와 LPG-DTBP 혼합연료의 분사시기를 각각 BTDC 9°, BTDC 12°로 고정하였을 때 IMEP 9 bar의 부하조건에서 연소실압력과 열방출률을 나타내었다. DTBP의 혼합비율에 상관없이 연소압의 최대값은 거의 동일하였으며 디젤의 경우 연소압의 최대값이 혼합연료에 비해서 매우 높았다. 이로 인하여 엔진의 소음이 심해지며 질소산화물이 많이 배출되게 된다. DTBP의 혼합비율이 증가할수록 혼합연료의 세탄가가 높아져서 자발화 성능이 향상되기 때문에 동일한 분사시기에서 착화 지연시간이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 디젤 연소의 경우 예혼합연소영역(Premixed combustion phase)에서 대부분의 연소가 발생하고 있으며 혼합연료의 경우 DTBP의 혼합율이 낮은 경우 예혼합연소영역에서 많은 연소가 일어나고 있다.

3.2 배기 배출물 특성

Fig. 7~9에서는 엔진회전수 1500 rpm 조건에서 디젤 연료와 DTBP-LPG 혼합연료의 연소 시 발생하는 유해 배출가스인 미연탄화수소(THC), 일산화탄소

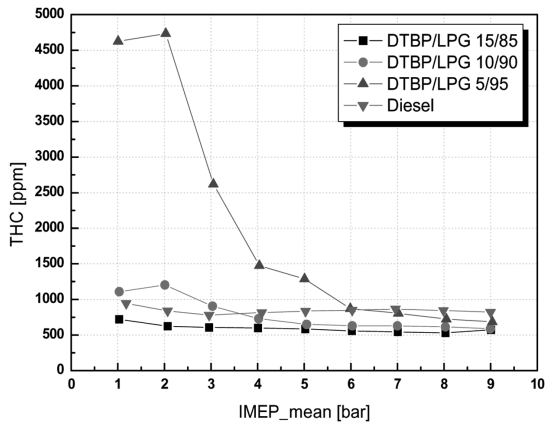


Fig. 7 Comparison of engine out THC emission according to engine load

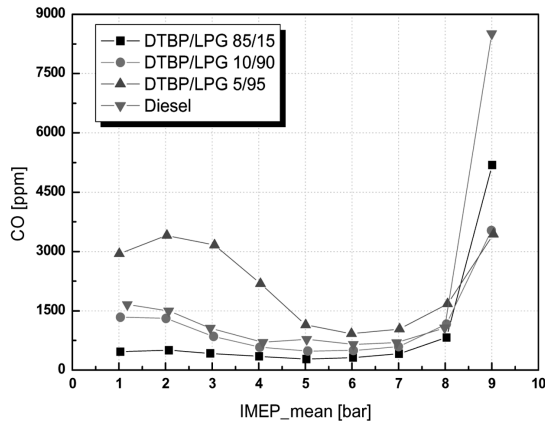


Fig. 8 Comparison of engine out CO emission according to engine load

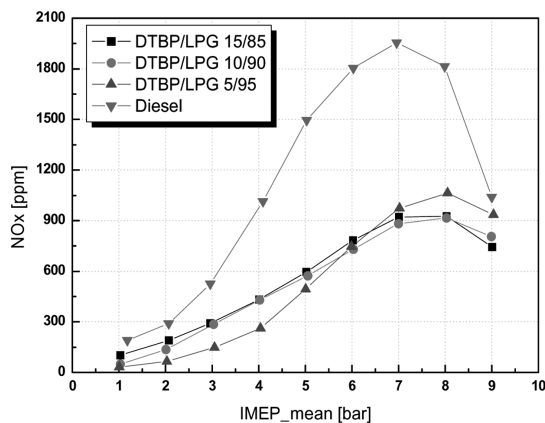


Fig. 9 Comparison of engine out NOx emission according to engine load

(CO), 질소산화물(NOx)의 배출량을 나타내었다. THC의 배출은 DTBP 혼합율의 증가에 따라 감소하는 경향을 보여주고 있는데 DTBP 5 wt% 혼합연료로 운전하는 경우 저부하에서 THC 배출량이 급증하였다. 이는 DTBP 혼합율과 부하가 낮은 경우 자발화 특성이 저하되어 연소지연기간이 길어져서 연소실 가장자리에 존재하는 LPG연료들이 완전 연소되지 않고 미연탄화수소로 배출되기 때문이다. IMEP 6 Bar 이후의 영역에서는 높은 실린더 압력과 온도로 인하여 자발화 성능이 향상되어 디젤연료보다 DTBP-LPG 혼합연료의 THC 배출량이 낮게 배출되었다. 이는 혼합연료의 첨가제인 DTBP가 약 22%의 산소를 함유하고 있는 합산소 연료로 연료의 완전 연소를 도와주기 때문으로 판단된다. CO의 경우도 THC의 경향과 비슷하게 낮은 부하조건에서는 혼합율이 증가할수록 배출량은 증가하며, 중 부하 조건에서 모든 연료의 CO배출량은 감소한다. 고 부하 조건에서는 연료량의 증가로 연소실이 농후해지기 때문에 CO의 배출량은 급증하는 경향을 보인다.

NOx의 경우 부하가 증가함에 따라 배출량도 증가하다 IMEP 8 bar 이상의 조건에서 약간 감소하는 경향을 보인다. 이것은 연소실의 온도와 압력이 증가하여 열발생율이 증가하고 착화지연 시간도 짧아져서 배출량이 증가하다가 고 부하 조건에서 연소실 조건이 농후해지면서 연소실 온도가 낮아지기 때문이다. DTBP의 혼합비율이 낮은 경우 저 부하 조건에서는 배출량이 낮다가 고 부하 조건에서는 증가한다. 이는 저 부하에서 혼합비율이 낮은 경우에 혼합영역에서 방출되는 열방출량이 감소하므로 NOx의 배출량이 적으며, 고 부하에서는 예혼합연소영역에서 방출되는 열방출량이 커졌으며 착화지연 시간의 증가로 인한 배출가스 온도의 증가로 열적 NOx의 배출량이 증가하므로 전체적인 NOx의 배출량은 증가한다. 디젤의 경우 연소압의 최대값도 상대적으로 매우 높으며 예혼합영역에서의 열방출량도 매우 크므로 전 영역에서 혼합연료에 비해 NOx의 배출량이 높았다.

3.3 EGR 적용에 따른 엔진 성능 측정결과

이전의 실험에서 LPG-DTBP 혼합연료와 디젤연

료의 분사시기는 각각 BTDC 12°, BTDC 9°일 때 높은 출력과 안정된 연소가 발생하는 것을 확인하였다. EGR양의 증가에 따라서 착화지연시간이 증가하므로 IMEP 값은 감소하며 도시평균유효압력변동계수는 증가하여 연소가 불안정하게 된다. 따라서 EGR 적용시 분사시기를 진각 시키게 되면 착화시기도 진각 되어서 안정적인 연소가 가능하다. Fig. 10은 각각의 연료조건에서 EGR률에 따른 최적의 분사시기를 나타내고 있다. DTBP의 혼합율이 낮은 경우 연료의 세탄가가 낮으므로 분사시기를 더 많이 진각시켜야 하며 EGR률이 높을 경우 분사시기를 아무리 진각시켜도 실화(Misfire)가 발생하여 최대 적용 가능한 EGR률의 제한이 있었다.

Fig. 11~13에서는 각각의 연료조건에서 연료량을 EGR을 적용하지 않았을 때 기준으로 IMEP 5 bar 부하 조건으로 고정한 후 EGR율에 따른 엔진의 출력

과 도시평균유효압력변동계수, 공기과잉율을 나타내었다. EGR을 적용하게 되면 착화지연 시간이 증가하므로 각각의 EGR율에 따른 최적의 분사시기를 적용하였다. EGR율의 증가에 따라 모든 연료의 IMEP는 감소하였으며 COV_imep 값은 증가하였다. 이는 EGR율이 증가하면 흡기 중의 산소 농도가 낮기 때문에 연소속도가 감소하게 되어 출력이 감소하며 연소안정성은 나빠지는 것이다. 반면에 공기과잉율은 EGR율 증가에 따라 새로운 공기가 적어지기 때문에 감소하며 1.0보다 낮은 조건에서는 엔진 출력의 저하가 크다.

Fig. 14는 EGR율에 따른 도시연료소비율(ISFC)을 나타내고 있다. 이는 단위출력당 연료소모율을 나타내는 지표인데 EGR율의 증가에 따라 출력이 감소하므로 ISFC는 약간 증가하는 경향을 나타내고 있다.

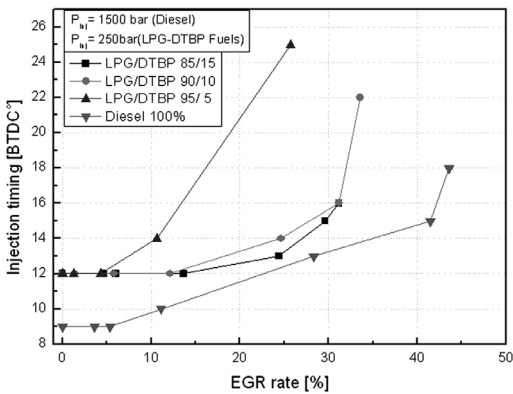


Fig. 10 Optimal injection timing according to EGR rate

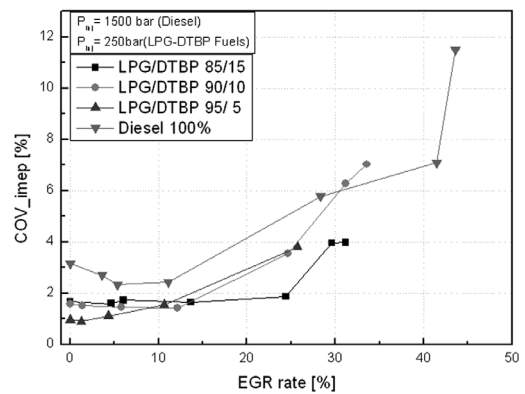


Fig. 12 Comparisons of COV_imep according to EGR rate

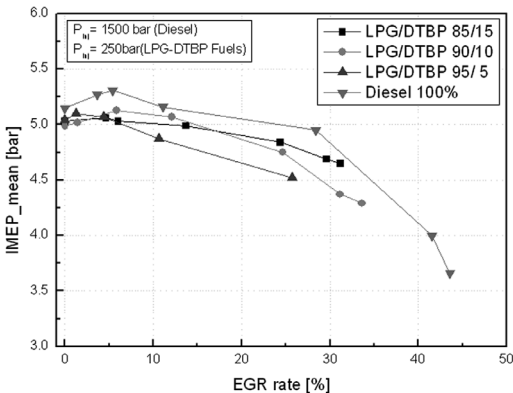


Fig. 11 Comparisons of IMEP_mean according to EGR rate

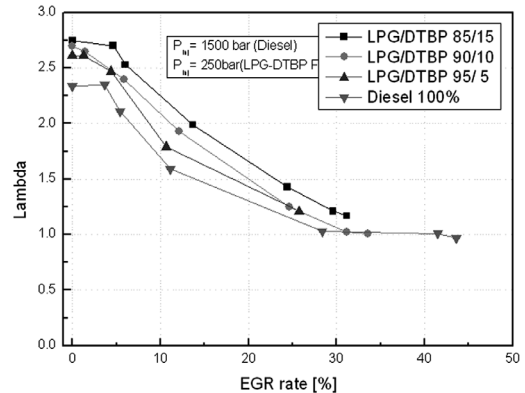


Fig. 13 Comparisons of lambda value according to EGR rate

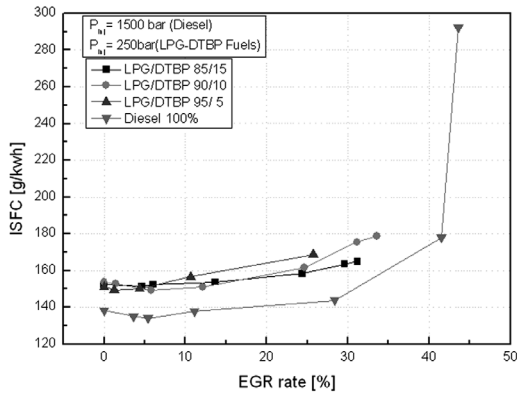


Fig. 14 Comparisons of lambda value according to EGR rate

3.4 EGR 적용에 따른 연소실 압력 및 열방출율 측정결과

Fig. 15에서는 EGR율 0, 25% 조건에서 분사시기가 최적인 경우 연소실의 압력과 열방출율을 나타내고 있다. 두 조건 모두 LPG-DTBP 연료는 DTBP의 혼합율이 감소함에 따라 착화 지연 시간이 증가하는 경향을 나타낸다. EGR율이 증가하게 되면 연소실에 분무된 연료와 새로운 공기 사이에 EGR 가스가 존재하게 되어 혼합기의 산소농도가 감소하여 연소를 방해하고, 압축과정에서 얻게 되는 열을 EGR 가스가 흡수하여 착화 지연 시기가 증가하게 된다. EGR을 적용하게 되면 연소실 압력의 최대값도 감소하며 예혼합영역에서의 열방출율도 줄어들어 질소산화물이 저감된다.

3.5 EGR 적용에 따른 배출가스 측정결과

Fig. 16에서는 EGR율에 따른 미연탄화수소 배출량을 나타내었다. EGR율이 증가할 때 THC의 배출량이 증가하는 것은 연소실로 흡입되는 공기의 산소농도가 EGR에 의하여 감소되어 연소실 압력과 온도가 낮아지게 되어 연소효율이 감소하기 때문이다. 그리고 연소실 온도가 낮아지면서 연소실 벽의 온도가 낮아지고 연소실 벽에서는 소염 현상이 발생하여 THC의 배출량이 증가하는 것이다. EGR이 최대일 경우 THC 배출은 최대 19배까지 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 17에서는 EGR율에 따른 CO의 배출량을 나타내었다. CO의 배출 특성도 THC와 동일하게 EGR

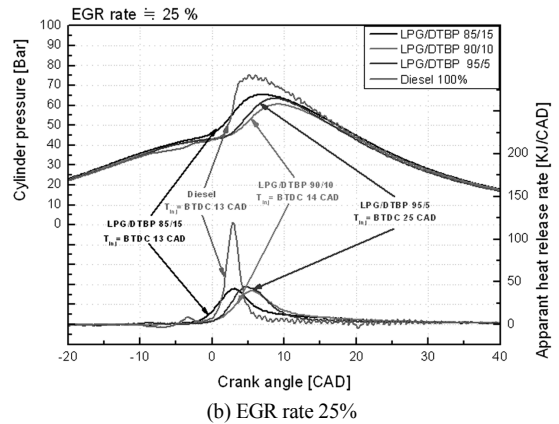
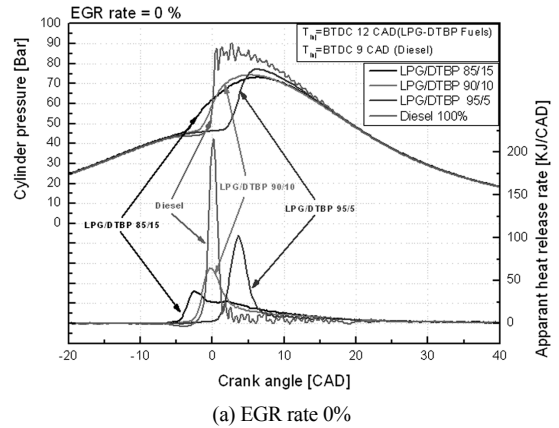


Fig. 15 The characteristics of cylinder pressure and heat release rate for Diesel and DTBP-LPG blended fuels

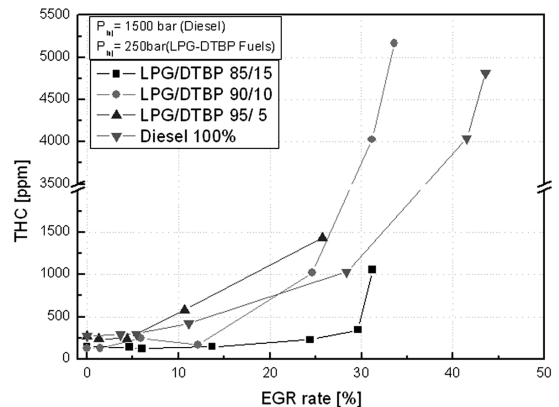


Fig. 16 Comparisons of THC emission according to EGR rate

을 증가에 따라 큰 폭으로 증가하였다. 이는 EGR 적용으로 신기의 유입이 감소하여 연소효율이 저하되며 공연비가 농후해지기 때문이다.

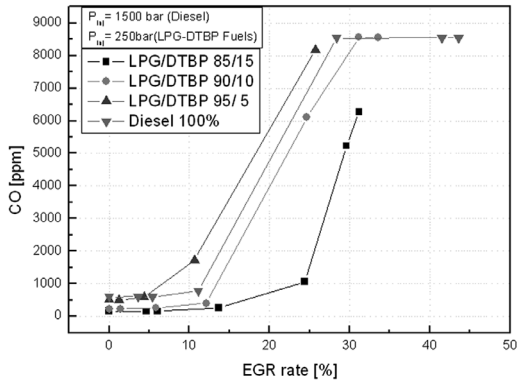


Fig. 17 Comparisons of CO emission according to EGR rate

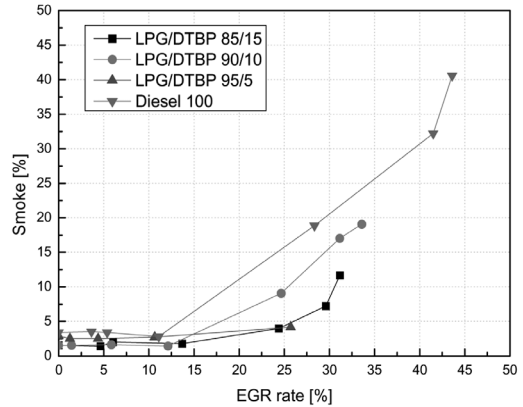


Fig. 19 Comparisons of smoke according to EGR rate

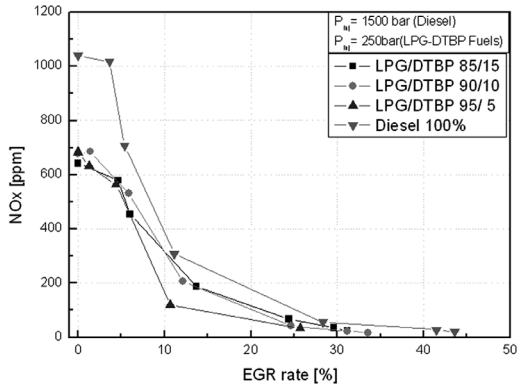


Fig. 18 Comparisons of NOx emission according to EGR rate

Fig. 18에서는 EGR율에 따른 질소산화물(NOx)의 배출량을 나타내었다. EGR은 연소실의 산소농도를 감소시키고 연소실 내부의 압력 및 온도도 감소시키기 때문에 EGR율이 증가하면 NOx의 배출량은 감소한다. EGR율이 최대인 조건에서 NOx 배출량은 90% 이상 저감할 수 있다. 하지만 엔진의 출력 및 연료소모율이 저하되며 THC와 CO의 배출량이 큰 폭으로 증가하기 때문에 적절한 수준에서 EGR을 적용하여야 할 것으로 사료된다.

Fig. 19는 광투과식 매연측정기를 사용하여 측정된 EGR율에 따른 각각의 연료에서의 smoke 배출량을 측정된 결과이다. EGR율이 높아지게 되면 유입 산소의 부족으로 연소실 내부에서 국부적으로 농후한 영역이 생기게 되므로 smoke의 배출량이 증가하는 경향이 있다. 특히 디젤의 경우는 연료의 기화특성이 가스연료보다 좋지 않으므로 국부적으로 농후한 영역이 더 많이 존재하게 되므로 smoke의 배출량

이 급증하게 된다. 따라서 EGR의 적용으로 NOx는 저감할 수 있지만 smoke의 증가라는 문제점이 발생하지만 혼합연료의 경우 EGR을 높게 적용하더라도 smoke의 발생량은 디젤의 경우보다 훨씬 낮았다.

4. 결론

LPG에 DTBP를 질량기준으로 5, 10, 15% 혼합하는 경우 압축착화기관에서 혼합율에 따른 엔진의 성능과 배기가스 배출물을 측정하였으며, 이를 디젤의 경우와 비교하여 다음의 결론들을 얻을 수 있었다.

- 1) 엔진의 부하가 증가하고, LPG 연료에 혼합되는 DTBP의 비율이 증가할수록 COV_{imep}는 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 DTBP 혼합율의 증가 따라 세탄가가 증가하여 자발화 성능이 향상되기 때문이다. 이 경우 착화 지연 시간이 짧아지게 되며 화염전파속도는 증가하여 열발생율이 증가하고 실린더의 압력 및 온도가 증가한다.
- 2) THC 배출은 엔진부하증가에 따라 감소하며, 고 부하 조건에서 혼합연료가 디젤과 비교하여 낮은 THC 배출량을 나타낸다. 이는 DTBP가 분자 내 22%의 산소를 함유하고 있기 때문으로 판단된다.
- 3) CO 배출은 고 부하 조건일 경우 많은 양의 연료가 연소실에 분사가 되어 농후한 연소 조건을 만들어 CO 배출량은 증가한다.
- 4) NOx의 경우 DTBP 혼합율의 증가에 따라 세탄가

향상으로 자발화 성능이 향상되어 연소상이 진각되므로 NO_x 발생영역이 증가하여서 배출량이 증가한다. 세탄가가 낮을 경우 고 부하영역에서는 예혼합영역에서의 열방출을 증가로 NO_x 배출량이 높아진다.

- 5) EGR율을 증가시키면 실린더의 최고 압력이 감소하고 착화지연은 증가한다. 이 경우 연소실로 유입되는 신기가 감소하여 출력과 공기과잉률은 감소하였으며, 연소안정성은 저하되었다.
- 6) EGR율이 증가하면 불안정 연소가 증가하여 THC와 CO의 배출량은 증가하였으나. 연소실의 흡입산소농도가 감소하여 NO_x의 배출량은 감소하였다. EGR의 적용으로 smoke의 배출량이 증가하는 경향이 있지만 혼합연료의 경우 디젤에 비하여 증가율이 낮았다.

후 기

본 연구는 지식경제부 산하 에너지관리공단에서 지원되는 “중소형 LPG 상용차 개발사업” 및 한국기계연구원의 일반사업인 “미활용 에너지 청정 고밀도화 기계기술 기반구축”의 연구비로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

References

- 1) Y. Han, “Automobile Fuels and Pollution for the 21th Century,” Auto Journal, KSAE, Vol.24, No.5, pp.74-80, 2002.
- 2) S. Kajitani, C. L. Chen, M. Oguma, M. Alam, M. and K. T. Rhee, “Direct Injection Diesel Engine Operated with Propane-DME Blended Fuel,” SAE 982536, 1998.
- 3) S. Goto, J. Shakai, N. Harayama, F. Honjyo and H. Ueno, “Performance and Emissions of an LPG Lean-burn Engine for Heavy Duty Vehicles,” SAE 1999-01-1513, 1999.
- 4) S. Goto, D. Lee, Y. Wakao, H. Honma, M. Mori, Y. Akasaka, K. Hashimoto, M. Motohashi and M. Konno, “Development of an LPG DI Diesel Engine Using Cetane Number Enhancing Additives,” SAE 1999-01-3602, 1999.
- 5) M. Alam, S. Goto, K. Sugiyama, M. Kajiwara, M. Mori, M. Konno, M. Motohashi and K. Oyama, “Performance and Emissions of a DI Diesel Engine Operated with LPG and Ignition Improving,” SAE2001-01-3680, 2001.
- 6) K. Sugiyama, M. Kajiwara, M. Iwama, M. Mori, M. Oguma, K. Kinoshita and S. Goto, “Performance and Emissions of a DI Diesel Engine Operated with LPG and Cetane Enhancing Additives,” SAE 2003-01-1920, 2003.
- 7) S. Goto, D. Lee, N. Harayama, F. Honjo, H. Ueno, H. Honma, Y. Wakao and M. Mori, “Development of LPG SI and CI Engine for Heavy Duty Vehicles,” Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress, pp.394-403, 2000.
- 8) K. Kitano, R. Nishiumi, Y. Tsukasaki, T. Tanaka, M. Morinaga, “Effects of Fuel Properties on Premixed Charge Compression Ignition Combustion in a Direct Injection Diesel Engine,” SAE 2003-01-1815, 2003.
- 9) S. Lee, S. Oh, Y. Choi, J. Cho and K. Cha, “Performance and Emission Characteristics of a DI Diesel Engine Operated with LPG/DME Blended Fuel,” Transactions of KSAE, Vol.17, No.5, pp.53-60, 2009.