

LPG/DME 혼합연료를 사용하는 전기점화 기관에서 LPG 성분이 엔진 성능 및 배기특성에 미치는 영향

이 석 환^{*1)} · 오 승 목¹⁾ · 최 영¹⁾ · 강 건 용¹⁾ · 최 원 학²⁾ · 차 경 옥²⁾

한국기계연구원¹⁾ · 명지대학교 기계공학과²⁾

The Effect of N-butane and Propane on Performance and Emissions of a SI Engine Operated with LPG/DME Blended Fuel

Seokhwan Lee^{*1)} · Seungmook Oh¹⁾ · Young Choi¹⁾ · Kernyong Kang¹⁾ · Wonhak Choi²⁾ · Kyoungok Cha²⁾

¹⁾Engine Research Center, KIMM, 171 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-338, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Myongji University, Gyeonggi 449-728, Korea

(Received 13 February 2008 / Accepted 26 April 2008)

Abstract : In this study, a spark ignition engine operated with LPG and DME blended fuel was studied experimentally. The effect of n-butane and propane on performance and emissions of a SI engine fuelled by LPG/DME blended fuel were examined. Stable engine operation was achieved for a wide range of engine loads with propane containing LPG/DME blended fuel compare to butane containing LPG/DME blended fuel since octane number of propane was much higher than that of butane. Also, engine output operated with propane containing blended fuel was comparable to pure LPG fuel operation. Engine output power was decreased and break specific fuel consumption (BSFC) was increased with the blended fuel since the energy content of DME was much lower than that of LPG. Considering the results of engine output power, bsfc, and exhaust emissions, the propane containing LPG/DME blended fuel could be used as an alternative fuel for LPG.

Key words : DME(디메틸에테르), N-butane(노멀 부탄), Propane(프로판), Blended fuel(혼합연료), SI(전기점화), Alternative fuel(대체연료)

1. 서 론

DME(Dimethyl ether) 연료는 인체와 환경(오존층)에 대한 안전성이 높아서 스프레이의 추진제로 이용되고 있으며, 비점이 낮아서 메탄올을 연료로 사용하는 SI 엔진의 시동보조연료로도 이용되었고,¹⁾ 최근에는 휘발유나 경유를 대체할 수 있는 새로운 자동차용 연료 및 LPG를 대신할 가정용 또는 발전용 연료로서 주목받고 있다. 또한, 높은 세탄가, 낮은 착화온도, 연소실로 분사되었을 때의 빠른 증

발 특성 등으로 디젤엔진의 대체 연료로 고려되고 있으며,^{2,3)} 최근에 저가 제조기술이 개발되고 청정 연료로 인식되면서 관련 연구가 활발하게 이루어지고 있다.^{4,5)} DME 연료는 산소함유율이 34.8%로 높고 상온상압에서 무색투명한 기체이며 LPG와 유사한 기압에서 액화된다. Table 1은 DME, N-butane, Propane 연료의 특성을 비교한 표로써, 이들은 비슷한 특성을 지녔지만 LPG 계열이 DME에 비해 저위 발위량 (Lower heating value)이 37%나 높음을 알 수 있다. DME를 디젤 엔진에 적용하는 경우 낮은 저위 발위량으로 인하여 같은 출력을 얻기 위하여 매우

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

Table 1 Characteristics of DME and LPG (N-butane and Propane) fuels

	DME	N-butane	Propane
Chemical Structure	(CH ₃) ₂ O	C ₄ H ₁₀	C ₃ H ₈
Liquid Density(kg/m ³)	667	579	490
Molecular Weight(g/mol)	46.07	58.12	44.10
Stoichiometric A/F	9.00	15.46	15.60
Vapor pressure(kPa)	539	210	930
Boiling point(°C)	-25.0	-0.5	-42.0
Octane number	-	92	105
Cetane number	55	-	-
LHV(MJ/kg)	28.80	45.72	46.30

많은 연료를 분사하여야 하므로 DME에 LPG를 첨가하여 연료의 에너지 밀도를 높이는 경우도 있다.⁶⁾ LPG와 DME의 혼합연료는 기존의 LPG 인프라의 적용이 가능하므로 중국, 일본 등지에서 가정용 및 수송용 연료로 적용 가능성 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 20%의 DME를 LPG에 혼합한 연료는 가정용 연료로 사용하는 경우 연소 성능이 우수하다는 결과도 보이고 있다.⁷⁾ 하지만 혼합연료를 전기점화 기관에 이용하는 경우 DME 연료가 가지는 자발화성으로 인하여 노킹 현상이 빈번하게 일어나게 되며 이로 인해 엔진 성능이 저하된다.⁸⁾ 따라서 DME 연료를 LPG와 혼합하는 경우 부탄성분보다는 옥탄가가 높은 프로판 성분과 혼합하는 것이 엔진 연소 측면에서 바람직하다. 본 연구에서는 LPG/DME 혼합연료를 전기점화 기관에 적용함에

있어서 부탄, 프로판 성분이 전기점화 기관의 성능 및 주요 배출가스의 배출특성에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 대상엔진

실험에 사용된 엔진 시스템의 제원을 Table 2에 나타내었다. 엔진은 배기량 2,656 cc, 압축비 10.4인 전기점화 엔진을 사용하였으며, 분사 시스템은 별도의 기화기를 사용하지 않고 분사기를 통해 액상 상태로 LPG 연료를 분사하는 LPG 액상분사 시스템이 장착되어 있다. Fig. 1은 실험장치의 개략도를 보여 주고 있다. 동력계(dynamometer)는 6기통 엔진의 구동을 위해 엔진의 크랭크축에 연결되고 엔진회전 속도와 부하를 임의적으로 제어 하였다. 연료 분사 시기와 분사량은 엔진 구동 조건에 따라서 Calibration ECU를 사용하여 제어하였으며, 연료 조성 변화에 따른 엔진의 공연비를 측정하기 위하여 광역산소센서(wide band O₂ sensor)를 배기계에 장착하였다. 질소산화물(NO_x), 미연탄화수소(THC), 일산화탄소(CO)는 배출가스 분석장치(HORIBA MEXA 7100)를 사용하여 분석하였으며, 제동연료소모율(BSFC)은 LPG 연료통의 무게 변화를 저울을 사용하여 측정된 뒤 계산하였다.

실험은 1200~5200 rpm의 엔진회전속도 조건에서 수행되었으며, 저부하 조건에서 전부하 조건(WOT;

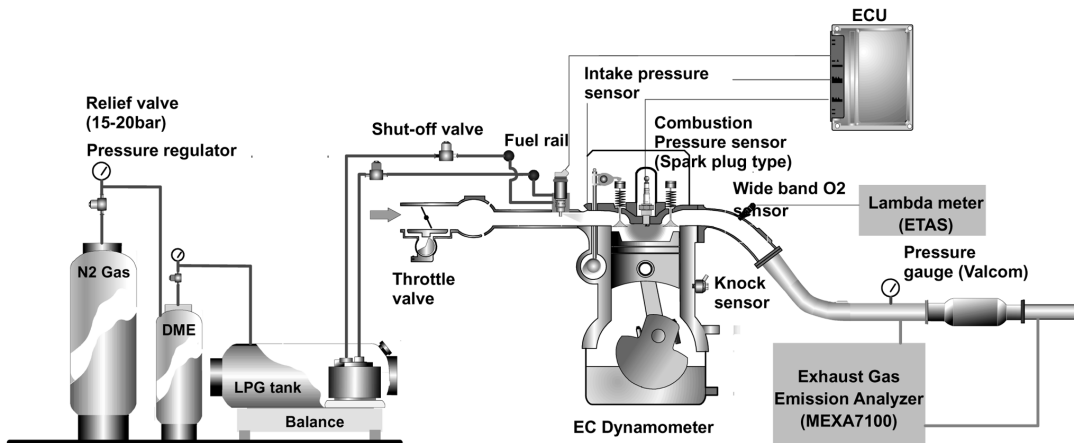


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 2 Specifications of V6 DOHC LPi engine

Specifications	Resources
Engine type	V6 DOHC LPi
Bore×Stroke (mm)	86.7×75
Compression ratio	10.4
Displacement (cc)	2,656
Maximum power (ps)	165@5,400rpm
Maximum torque (N·m)	250@4,000rpm

Table 3 Composition of fuels tested in this study

Fuel type	Resources	LHV(MJ/kg)
Fuel A	N-butane 100 wt %	45.72
Fuel B	N-butane 80 wt % + DME 20 wt %	42.34
Fuel C	N-butane 70 wt % + Propane 30 wt %	45.89
Fuel D	N-butane 56 wt % + Propane 24 wt % + DME 20 wt %	42.48

wide open throttle)의 범위로 부하를 변화시켰다. Table 3은 본 연구에 사용된 4가지 연료의 성분비율과 저위발위량을 나타내었다. 부탄, 프로판, DME의 혼합비율이 각기 다른 4종류의 연료를 사용하여 엔진의 성능, 연료소모율 및 배출가스의 배출경향을 파악하였다.

3. 실험결과

3.1 시험연료별 엔진성능 측정결과

Fig. 2는 부탄, 프로판, DME 연료의 혼합율이 각각 다른 4가지 종류의 연료에 대해서 엔진 토크값을 측정한 결과이다. 1200~5200 rpm의 엔진회전속도 조건에서 전부하 조건 상태에서의 토크값을 측정하였다. 옥탄가와 저위발위량이 높은 프로판 연료가 첨가된 연료 C의 출력이 가장 높게 나타났으며 부탄 연료에 DME를 첨가한 연료 B는 노킹 현상으로 인하여 연료 C에 비해 토크값이 최대 9% 감소하였다. DME와 옥탄가가 높은 프로판 연료가 함께 첨가되어 있는 연료 D의 경우는 순수 LPG를 사용하는 경우와 비교하여 토크값이 약간 감소하지만 거의 동등한 수준이다. 본 실험에서는 기존 ECU에 매핑되어 있는 연료량을 그대로 사용하므로 연료의 조성이 바뀌더라도 전부하 조건에서의 분사량은 일정하다. Table 1에서 보면 LPG(N-butane)와 DME 연료의 저위발위량은 각각 45.72(26.5 MJ/ℓ), 28.8(19.2

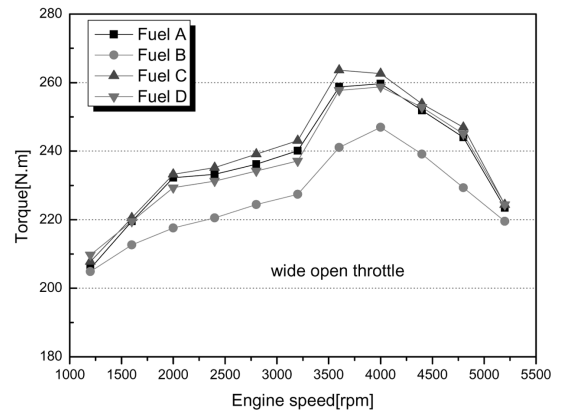


Fig. 2 Engine torque according to tested fuels at WOT

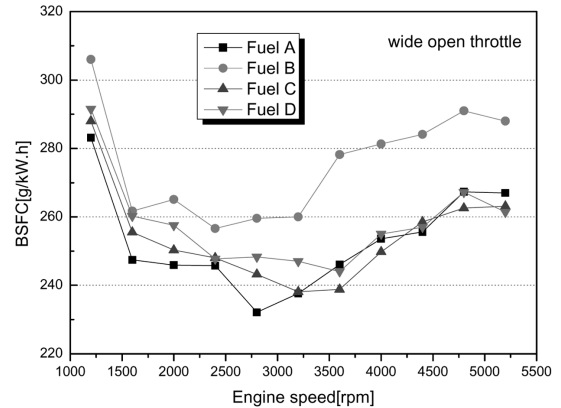


Fig. 3 Break specific fuel consumption according to tested fuels at WOT

MJ/ℓ) MJ/kg으로서 그 차이가 상당히 크므로 같은 양의 연료를 분사하더라도 DME를 첨가한 연료를 사용하면 엔진 출력이 감소하는 것이다. 또한, 고회전 영역에서는 DME 연료가 가지는 자발화성에 의해서 노킹현상이 심해지고 이를 보정하기 위해서 분사시기가 지각(retard)되면서 출력은 추가적으로 감소하게 되는데 연료 D의 경우는 프로판의 첨가로 인하여 노킹현상이 줄어들어서 연료 B에 비해 출력이 높은 것이다. Fig. 3은 시험연료별 제동연료소비율(Break specific fuel consumption)을 비교한 그래프이다. DME를 첨가한 연료 B와 연료 D의 경우 같은 출력을 내기 위하여 더 많은 연료가 필요하므로 연료소비율은 높아지는 경향을 보이는데 연료 D의 경우는 순수 LPG를 사용하는 경우와 큰 차이가 없지만 연료 B의 경우는 노킹현상에 의한 출력 감소로

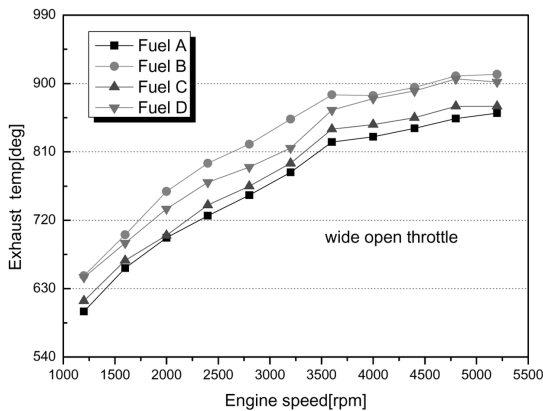


Fig. 4 Exhaust gas temperature according to tested fuels at WOT

인하여 제동연료소비율은 12% 까지 차이가 났다. Fig. 4에서는 시험연료별 배출가스 온도 변화를 나타내었다. DME의 첨가에 따라서 배출가스 온도도 증가하는데 이는 DME 연료 자체가 합산소 연료이며 LPG에 비해 이론공연비 값이 낮기 때문에 기존 LPG 연료를 기준으로 ECU에 매핑된 연료량을 사용하면 공기과잉률(λ)이 증가하게 되면서 증발잠열에 의한 엔진냉각 효과가 감소하기 때문이다. 또한, 고부하 운전영역에서는 노킹 발생에 의하여 분사시기가 지각되므로 배출가스 온도는 더욱 상승한다.

3.2 시험연료별 노킹현상 특성

DME 연료는 자발화 특성이 매우 강한 연료이므로 LPG 연료와 혼합하여 전기점화 기관에서 연소하면 노킹현상이 발생할 확률이 매우 높아진다. 보통 엔진에서 노킹이 일어나는 경우 ECU는 분사시기를 최대 15 °C 지각시키는 로직을 발생시켜 엔진을 보호하게 된다. Fig. 5에서는 엔진운전 전영역에서 시험연료별 노킹발생 여부를 나타내었다. 각각의 조건을 나타내는 선 이상의 부하영역에서는 노킹현상이 발생하고 있다. 노킹현상은 저속 엔진회전속도, 고부하에서 발생 빈도가 높은 경향을 보였는데, 부탄과 프로판을 사용하는 연료 A와 연료 C의 경우는 2000 rpm 이하의 저속 엔진회전속도, 고부하 조건에서만 노킹이 발생하였다. 부탄과 DME를 혼합한 연료 B의 경우 전 엔진회전속도 영역에서 최고 부하에 이르기 전에 노킹현상이 발생하였다. 옥

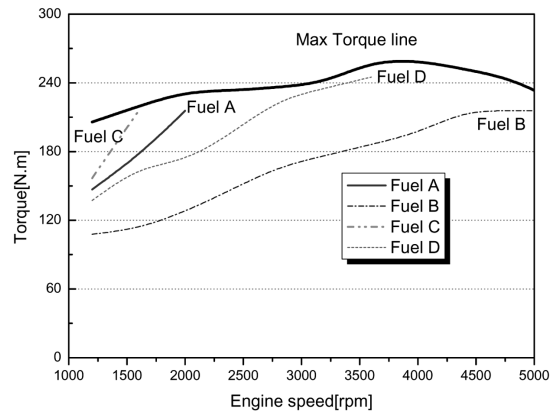


Fig. 5 Knock limit according to tested fuels

탄가가 높은 프로판 연료가 함유된 연료 D의 경우는 동일한 함량의 DME가 포함되어 있지만 연료 B에 비해서 노킹 발생영역은 큰 폭으로 줄어들었다.

3.3 엔진회전속도 1800 rpm에서 부하에 따른 배출가스 배출특성

Fig. 6 ~ 9에서는 엔진회전속도 1800 rpm 조건에서 시험연료별 유해 배출가스인 미연탄화수소(THC), 일산화탄소(CO), 질소산화물(NOx)과 이산화탄소(CO₂)의 배출량을 살펴보았다. THC는 DME를 첨가한 연료 B와 연료 D에서 약간 감소하는 경향이 있었으나 전체적인 배출량은 1000 ppm 미만으로 연료별로 큰 차이가 없었다. CO의 경우도 각 연료별로 배출량의 변화가 거의 없었다. NOx는 각 연료별로 배출량의 차이는 없으며 부하증가에 따라서 연소온도도 증가하므로 NOx의 배출량도 증가하는 경향을 보인다. 하지만 연료 B의 경우 120 N · m 이상의 부하조건에서는 NOx 발생량이 감소한다. 이는 DME 연료가 세탄가가 55이상으로 자발화 성질이 매우 강한 연료이므로 DME 연료의 혼합율이 증가하게 되면 전기점화기관에서의 자발화 현상인 노킹현상이 생길 확률이 높아진다. 이때 엔진의 ECU는 점화시기를 지각시켜서 노킹현상을 제거하고자 하는 로직을 발동하게 되고 갑자기 지각된 점화시기로 인하여 NOx의 배출량은 급감하게 된다. 160 N · m 이상의 부하조건에서는 모든 연료의 경우에서 NOx 배출량이 감소하였다. 이산화탄소의 경우도 각 연료별로 배출량의 차이가 없었다. 저속엔진회

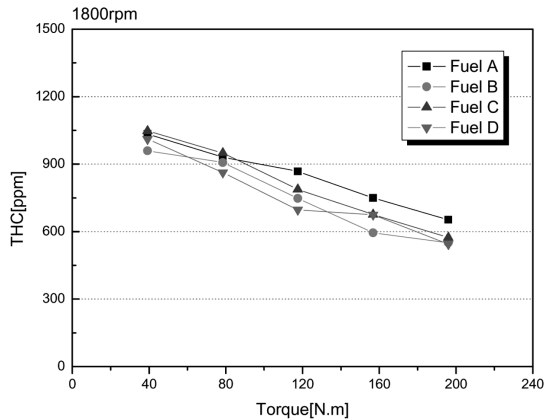


Fig. 6 Engine-out hydrocarbon emission according tested fuels at 1800 rpm

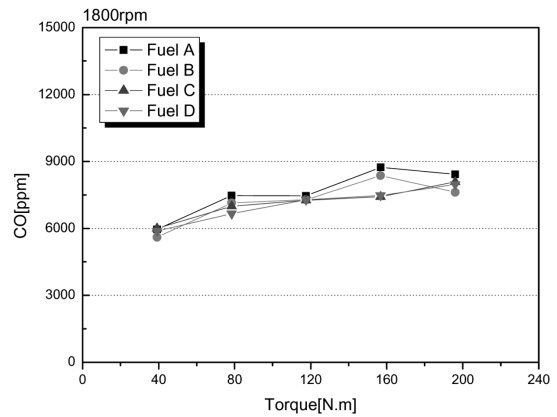


Fig. 7 Engine-out CO emission according to tested fuels at 1800 rpm

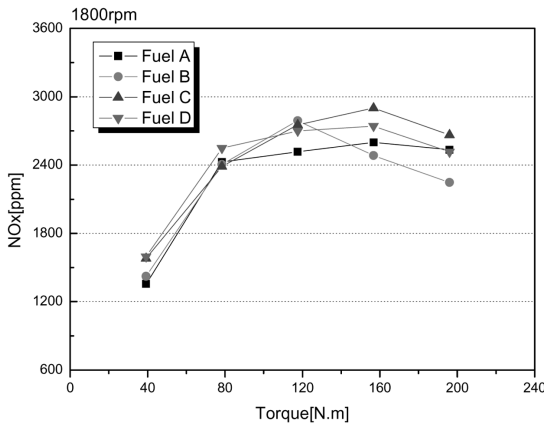


Fig. 8 Engine-out NOx emission according to tested fuels at 1800 rpm

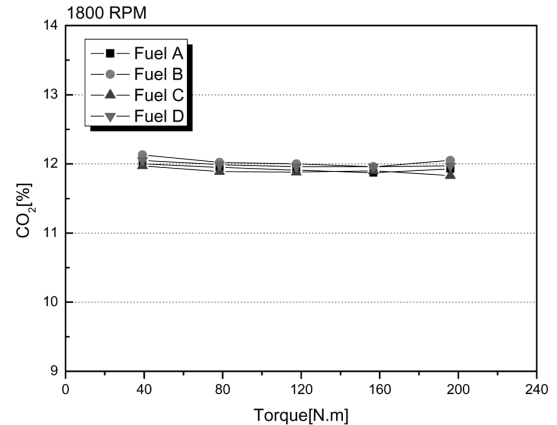


Fig. 9 Engine-out CO₂ according to tested fuels at 1800 rpm

전속도 조건에서는 각 연료별 조건이 배출가스 배출특성에 별다른 영향을 미치지 않았다.

3.4 엔진회전속도 3600 rpm에서 부하에 따른 배출가스 배출특성

Fig. 10 ~ 13에서는 엔진회전속도 3600 rpm 조건에서 각 연료별로 미연탄화수소(THC), 일산화탄소(CO), 질소산화물(NOx), 이산화탄소(CO₂)의 배출량을 살펴보았다. THC는 부하가 증가하는 경우 DME가 첨가된 연료 B와 연료 D에서 배출량이 약간 감소하는 경향이 있는데 이는 DME 연료의 합산소 효과에 의한 것으로 판단된다. CO의 경우 배출량이 연료의 종류에 상관없이 비슷한 배출량을

나타내었다.

NOx 발생량은 연료 B의 경우 나머지 연료에 비해 증가하는 경향이 있었는데 이는 Fig. 4의 결과에서 알 수 있듯이 DME가 혼합된 연료의 배출가스 온도가 더 높은 것으로 보아 연소온도도 더 높아서 NOx의 발생량이 증가한 것으로 판단된다. 모든 연료 조건에서 160 N.m 이상의 부하 조건에서는 ECU에서 노킹 방지를 위하여 점화시기를 지각함으로써 NOx의 발생량이 줄어드는 것을 알 수 있다. CO₂의 경우도 각 연료별로 배출량이 큰 차이가 없다. 저속 엔진회전속도 조건과 마찬가지로 고속엔진회전속도 조건에서도 4가지 연료 조건에 따른 배출가스 배출특성은 별다른 차이가 없었다.

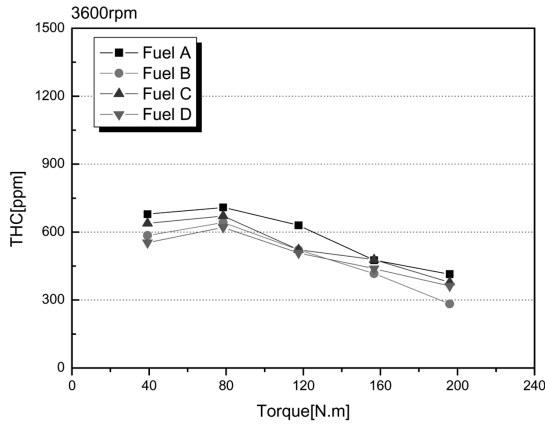


Fig. 10 Engine-out hydrocarbon emission according to tested fuels at 3600 rpm

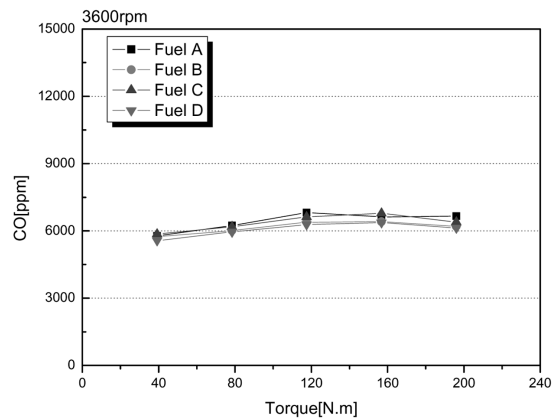


Fig. 11 Engine-out CO emission according to tested fuels at 3600 rpm

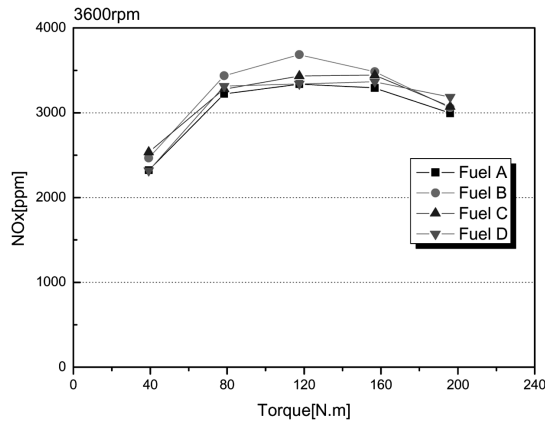


Fig. 12 Engine-out NOx emission according to tested fuels at 3600 rpm

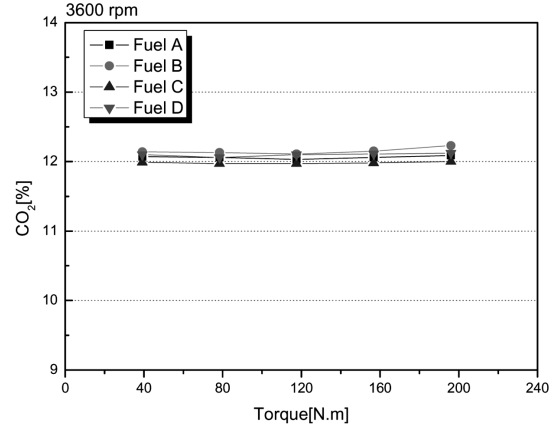


Fig. 13 Engine-out CO₂ according to tested fuels at 3600 rpm

3.5 혼합연료에서 전부하 조건시 공연비 조절에 따른 엔진 성능 평가

전부하 조건에서 엔진은 공연비 제어를 통한 이론공연비 영역에서 운전되지 않고 최대 출력을 가지면서 고온의 환경으로부터 촉매를 보호하기 위한 공기과잉률 0.90 이하의 상당히 농후한 영역에서 운전된다. 순수 LPG 기준으로 ECU에 매핑된 연료량 값을 DME가 첨가된 혼합연료에 사용하게 되면 이론공연비 차이로 인하여 상대적으로 희박한 환경에서 엔진이 운전된다. Fig. 14는 전부하 조건에서 각각의 연료에 대한 공기과잉률 값을 나타내었다. 연료 A의 경우는 0.86~0.90 정도의 농후한 영역에서 운전되는데 비해 DME 연료가 포함된 연료 B는

0.92~0.97, 연료 D의 경우는 0.93~1.00의 상대적으로 희박한 영역에서 운전되므로 엔진의 출력이 감소하며 촉매 보호를 위한 배출가스 냉각 효과가 미비해진다. 이를 보완하기 위하여 인위적으로 연료를 추가 분사하여서 연료 B는 연료 A와 동일하게 연료 D는 연료 C와 동일하게 공기과잉률 값을 맞추었다. Fig. 15와 Fig. 16에서는 연료 B의 공기과잉률 값을 변경하였을 때의 토크값과 제동연료소비율의 변화를 나타내었다. 연료 B의 경우 연료 A에 비해서 토크값이 최대 7% 정도 감소하였는데 공기과잉률을 변경하여도 토크값이 1% 정도 밖에 상승하지 않았다. 반면 전엔진회전속도 조건에서 평균한 제동연료소비율은 공기과잉률값의 변경으로 5% 정도 증

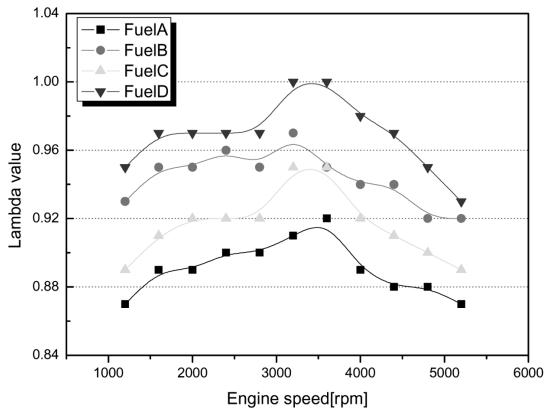


Fig. 14 Lambda value according to tested fuels at WOT

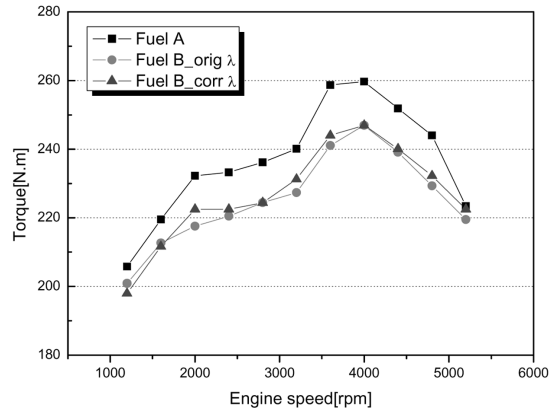


Fig. 15 Effect of lambda modification on engine torque change at WOT (Fuel B)

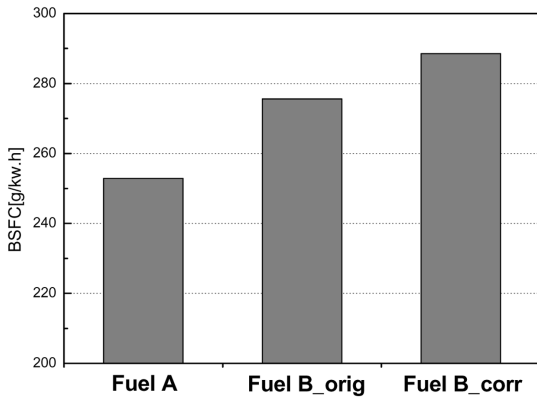


Fig. 16 Effect of lambda modification on BSFC change at WOT (Fuel B)

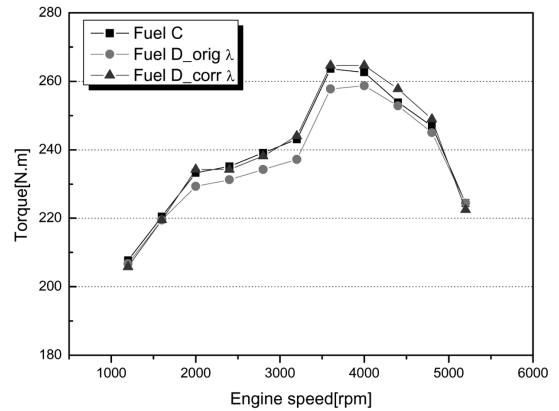


Fig. 17 Effect of lambda modification on engine torque change at WOT (Fuel D)

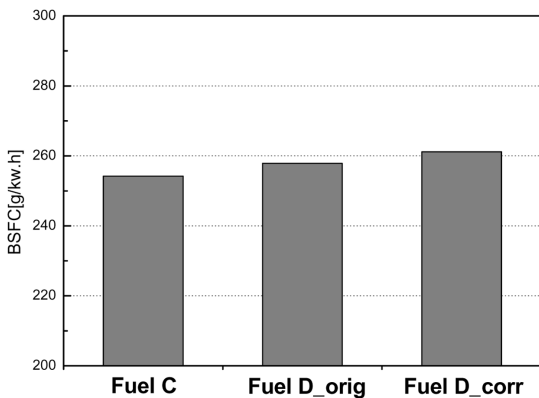


Fig. 18 Effect of lambda modification on BSFC change at WOT (Fuel D)

가하였다. Fig. 17과 Fig. 18에서는 연료 D의 공기과잉률을 연료 C에 맞춘 경우의 토크값과 제동연료소비율의 변화를 나타내었다. 연료 D의 경우에는 연료 C에 비해서 3%의 토크값 감소가 있었지만 공기과잉률 변경을 통하여 연료 C와 동일한 수준의 토크값을 얻을 수 있었다. 전엔진회전속도 조건에서 평균한 제동연료소비율은 약 1.5% 증가하였다. 프로판이 함유된 혼합연료에서는 추가적으로 연료를 분사하여 공기과잉률 값을 순수 LPG 연료 기준으로 동일하게 맞추는 경우 제동연료소비율의 큰 증가 없이 출력증가를 얻을 수 있다.

4. 결론

LPG/DME 혼합연료를 사용하는 전기점화 기관에서 LPG 구성 성분인 부탄과 프로판의 함량에 따른 엔진의 출력과 연료소비율, 배출가스 배출량을 측정하였으며, 엔진 실험을 통하여 다음의 결론들을 얻을 수 있었다.

- 1) 옥탄가와 저위발위량이 높은 프로판 연료가 첨가된 연료 C의 출력이 가장 높게 나타났으며 부탄 연료에 DME를 첨가한 연료 B는 노킹 현상으로 인하여 연료 C에 비해 토크값이 최대 9% 감소하였다. DME와 옥탄가가 높은 프로판 연료가 함께 첨가되어 있는 연료 D의 경우는 순수 LPG를 사용하는 경우와 비교하여 토크값이 약간 감소하지만 거의 동등한 수준이다.
- 2) DME가 첨가된 연료는 같은 출력을 가지기 위하여 더 많은 연료가 필요하므로 제동연료소비율은 높아지는 경향을 보인다.
- 3) DME 연료의 첨가에 따라서 배출가스 온도는 증가하는데 이는 DME 연료 자체가 합산소 연료이며 LPG에 비해 이론공연비 값이 낮으므로 기존 ECU 매핑 상태에서는 희박연소를 하기 때문이다.
- 4) 1800rpm과 3600rpm의 엔진회전속도 조건에서 배출가스의 배출량을 측정한 결과 4가지 연료조건에 따라서 배출가스의 차이는 없었다.
- 5) 프로판이 함유된 혼합연료에서는 추가적으로 연료를 분사하여 공기과잉률 값을 순수 LPG 연료 기준으로 동일하게 맞추는 경우 제동연료소비율의 큰 증가 없이 출력증가를 얻을 수 있다.

후 기

본 연구는 산업자원부 산하 에너지관리공단에서 지원되는 “중소형 LPG 상용차 개발사업”의 연구비로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

References

- 1) T. Murayama, N. Miyamoto, T. Yamada, J. Kawashima and K. Itow, “A Method to Improve the Solubility and Combustion Characteristics of Alcohol-Diesel Fuel Blends,” SAE 821113, 1982.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) P. Kapus and H. Ofner, “Development of Fuel Injection Equipment and Combustion System for DI Diesels Operated on Dimethyl Ether,” SAE 950062, 1995.
- 5) B. I. An, Y. Sato, S. W. Lee and T. Takayanagi, “Effects of Injection Pressure of Combustion of a Heavy Duty Diesel Engine with Common Rail DME Injectio System,” SAE 2004-01-1864, 2004.
- 6) S. Kajitani, C. L. Chen, M. Oguma, M. Alam and K. T. Rhee, “Direct Injection Diesel Engine Operated with Propane-DME Blended Fuel,” SAE 982536, 1998.
- 7) N. Weidou, T. Lijian and F. Dewei, “Rational Cognition of DME Market in China,” 3rd Asian DME Conference Proceeding, pp.21-38, 2006.
- 8) S. H. Lee, S. M. Oh, K. Y. Kang, W. H. Choi and K. O. Cha, “Performance and Emissions of a SI Engine Operated with LPG-DME Blended Fuel,” Transactions of KSAE, Vol.16, No.2, pp.175-182, 2008.