

저농도 바이오알코올 혼합연료의 엔진 성능평가 연구

김현준^{1,2} · 이호길^{1,†} · 김재곤^{3,†} · 오영규² · 박성욱^{4,†}

¹자동차부품연구원, ²한양대학교 융합기계공학과, ³한국석유관리원 석유기술연구소, ⁴한양대학교 기계공학부

A Study on the Engine Performance of Low Level Bio-alcohol Fuels

HYUN-JUN KIM^{1,2}, HO-KIL LEE^{1,†}, JAE-KON KIM^{3,†}, YOUNG-KYU OH², SUNG-WOOK PARK^{4,†}

¹Korea automotive Technology Institute, 303 Pungse-ro, Pungse-myeon, Dongnam-gu, Cheonan 31214, Korea

²Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 04763, Korea

³Korea Petroleum Quality and Distribution Authority, 33 Yangcheong 3-gil, Ochang-eup, Cheongwon-gu, Cheongju 28115, Korea

⁴Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 04763, Korea

†Corresponding author :

hkleee@katech.re.kr

jkim@kpetro.or.kr,

parks@hanyang.ac.kr

Received 20 October, 2017

Revised 4 December, 2017

Accepted 29 December, 2017

Abstract >> An experimental study on engine performance and emission characteristics for bio-alcohol fuels considered as RFS fuel. The Bio-alcohol fuel were mixed ethanol and butanol and used in a 1.8 liter mpi engine. The efficiency of the BSFC is excellent in the maximum torque operation condition and the part load operation condition. As the bio-alcohol mixing ratio increased, the lambda <1 and ignition timing advanced 5° CA. As the mixing concentration increased, NOx emission increase and CO₂ emission decreased.

Key words : Ethanol(에탄올), Butanol(부탄올), Alcohol(알코올), Gasoline(가솔린), SI engine(가솔린기관), Bio fuel(바이오연료), Fuel properties(연료물성), Engine performance(엔진성능), Exhaust gas(배기가스)

1. 서론

최근 에너지 사용증가로 전 세계적으로 대기 환경오염문제가 대두되고 있으며, 한정된 화석연료의 고갈문제를 대비하기 위하여 각 나라에서 에너지 안보차원으로 에너지원 다양화를 위한 정책을 추진하고 있다. 특히 석유 연료계에 큰 영향을 초래하는 자동차부문에서는 기존 사용하고 있는 가솔린과 디젤에 비해 오염물질 배출량이 적은 청정연료 및 대체연료를 사용하는 저공해연료

자동차의 개발과 보급에 관심이 증대되고 있어 저공해연료자동차의 기술개발 여부가 향후 자동차 산업 및 에너지 산업에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 우리나라에서는 「신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법」을 발표하였으며, 현재 국내 수송부문에 상용화된 바이오에너지는 바이오디젤과 바이오가스가 있다^{1,2)}.

신재생연료의무혼합제도(renewable fuels standard; RFS)에 의해 상용화된 바이오디젤은 대두유, 유채유, 팜유 및 폐식용유와 같은 식물성유·동물

성유를 사용하여 제조한 연료이며, 현재 2.5%까지 디젤연료와 혼합하여 공급 및 사용 중이며, 2018년부터는 3.0%까지 상향하여 사용될 전망이다³⁻⁸⁾.

가솔린의 RFS 연료로는 에탄올과 혼합하여 국외(브라질/미국)에서 사용하고 있으며, 국내에서도 알코올 혼합연료에 대한 법령 도입을 위한 연구가 진행 중이다. 에탄올 연료는 사탕수수나 옥수수 등의 바이오메스 원료로 생산하고 있으며, 식물생장과정에서 자동차 배기가스 중의 CO₂를 흡수하기 때문에 각 나라에서 사용을 권장하고 있다⁹⁾.

가솔린 차량의 일산화탄소 배출량 저감을 위해 가솔린에 함산소 물질을 첨가하고 있으며, 함산소 물질로는 methyl ter-butyl ether (MTBE), ethyl ter-butyl ether (ETBE)가 있다. 각 물질의 물성치는 아래 Table 1과 같다. MTBE는 메탄올과 이소프렌의 합성반응에 의해 생산된 연료로 제조단가가 에탄올과 이소프렌의 합성연료인 ETBE보다 낮고 가솔린의 옥탄가 향상, 배기가스 감소 및 가솔린 연료와 상분리 되지 않는 장점이 있지만, 연료수송 및 저장 과정에서 누출이 되면 지하수 오염을 야기하기 때문에 ETBE 또는 에탄올 사용하고 있다.

에탄올은 가솔린 연소성 향상 및 옥탄가를 향상 등 함산소 연료로서 우수한 특성을 가지고 있다. 하지만 금속, 고무·수지를 부식 및 열화현상이 발생하여 수송용 연료로 사용할 경우 알코올 연료가 대응 가능한 fuel flexible vehicle (FFV)만 사용 가능하고 일반 가솔린 차량은 에탄올 농도

(30 미만)를 제한하고 있다.

에탄올은 가솔린과 혼합시 상분리가 되는 문제점이 있어 에탄올과 유사한 알코올계 연료인 부탄올도 함께 혼합하여 사용하는 연구가 현재 진행 중이다.

본 연구에서는 30% 미만 저농도 바이오알코올 혼합연료특성을 분석하고, FFV 기술이 적용되지 않은 엔진에 혼합연료를 적용하여 엔진 동력성능 및 배출가스 배출특성을 분석을 통하여 향후 가솔린 RFS 연료 도입을 위한 기초자료 확보 및 수송용 대체연료로서 바이오알코올의 효용성을 검증하고자 한다.

2. 실험

2.1 바이오알코올 혼합연료

실험에서 사용된 바이오알코올 혼합연료는 가솔린, 바이오에탄올, 바이오부탄올을 이용하여 체적비율로 혼합하였으며, 이때 사용한 가솔린은 MTBE 및 ETBE와 같은 옥탄가 향상제(함산소제)가 포함되지 않은 가솔린을 이용하였다.

가솔린에 혼합된 바이오알코올은 수분이 포함되지 않은 무수에탄올과 노말 부탄올을 이용하여 에탄올 70%, 부탄올 30%로 바이오알코올을 혼합하였으며, 알코올 함유비율에 따라 가솔린과 체적비율로 A0, A3, A6, A10, A20, A30으로 바이오알코올 혼합연료를 제조하였다.

바이오알코올 혼합연료의 엔진적용에 대한 동력성능 및 배출가스 배출성능을 분석하기 위하여 사용연료 물성치 특성을 분석 의뢰하였으며, 위 Table 2와 같다.

옥탄가는 바이오알코올 혼합하기 전 90으로 분석되었으며, 바이오알코올 함유량이 높아질수록 최대 104.4 (A30)로 분석되었다. 알코올의 함산소 연료 특성에 따라 알코올 함유량에 따라 연료의 산소함유량이 증가하였다.

연료의 고위발열량(high heating value, HHV)과

Table 1. Property of oxygenates⁽¹⁰⁾

Item	Ethanol	MTBE	ETBE	Gasoline
Density (kg/m ³)	796	746	747	710-780
Oxygen concentration (wt %)	34.8	18.2	15.7	0
Heating value (MJ/kg)	26.7	35.8	37.8	43.9
Octane	RON	111	117	93
	MON	92	101	87

Table 2. Property of bio-alcohol mix fuel

Item	Unit	A0 (E70:B30)	A3 (E70:B30)	A6 (E70:B30)	A10 (E70:B30)	A20 (E70:B30)	A30 (E70:B30)
Octane	-	90.0	91.0	91.8	93.4	96.6	104.4
Oxygen content	(wegiht, %)	52.7	57.8	57.3	57.0	65.5	63.3
Ethanol content	(volume, %)	-	1.2	2.2	3.9	8.1	11.3
Butanol content	(volume, %)	-	2.3	4.6	8.1	16.7	23.83
High heating value	(MJ/kg)	46.57	45.82	45.63	44.9	42.58	31.93
Low heating value	(MJ/kg)	43.31	42.62	42.44	41.78	39.62	28.80
Water	(wegiht, %)	0	0.05	0.03	0.04	0.1	0.1
Density (15°C)	(g/cm ³)	0.729	0.730	0.731	0.734	0.736	0.744

저위발열량(low heating value, LHV)은 알코올 함유량에 따라 감소하는 경향을 확인하였으며, 혼합연료별 밀도는 각 2% 이내로 유사한 것을 확인하였다.

혼합연료성분분석 데이터를 이용하여 엔진 성능 및 배출가스 배출특성 분석에 사용하였다.

2.2 엔진운전조건 선정 및 실험 방법

바이오알코올 혼합연료별 엔진성능 및 배출가스 특성 실험에 사용된 엔진은 Table 3과 같다.

엔진실험 운전조건 선정은 Fig. 1과 같이 차량

Table 3. Specifications of experiment engine

	Specification
Engine type	MPI, 4-line
Displacement (cc)	1,796
Max power (kW/rpm)	103 / 6,300
Max torque (Nm/rpm)	170 / 3,800



Fig. 1. Vehicle test environment

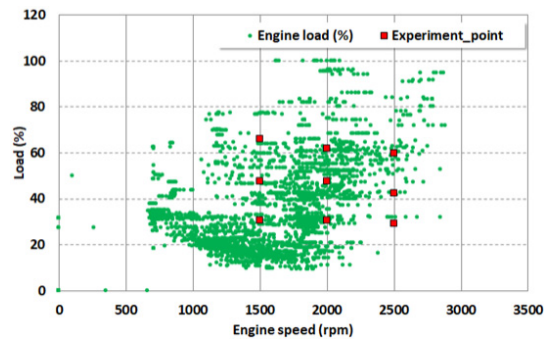


Fig. 2. Engine test operation condition (FTP-75mode)

공인연비 측정시 운행하는 FTP-75모드 주행 패턴을 분석하여 빈번히 사용되는 운전조건을 분석하여 선정하였다.

Fig. 2는 실험엔진이 탑재된 차량의 FTP-75모드 주행데이터를 도식화하였으며, 주행데이터 분석 결과 엔진회전수 2,000 rpm 이하, 엔진 부하율 30% 미만에서 운전 비율이 많은 것을 확인하였다. 이 운전조건은 차량 아이들링 상태와 차량속도 감속시 발생하는 퓨얼컷 구간에서 발생하는 조건으로 이 조건을 제외한 영역기준으로 9개의 엔진실험 운전조건을 선정하였다.

엔진동력계에서 엔진실험 운전조건을 Fig. 3에 나타내었으며, 엔진 회전수 및 토크 Table 4와 같다. 이외 단위 출력당 연료소비율(BSFC)을 측정하였으며, 삼원촉매 전단의 배기가스 배출수준을 측정 및 각 연료별로 비교하였다. 또한 배기가스 분석기를 이용하여 삼원촉매 전단의 배기가스 배출수준을 측정 및 각 연료별로 비교하였다.

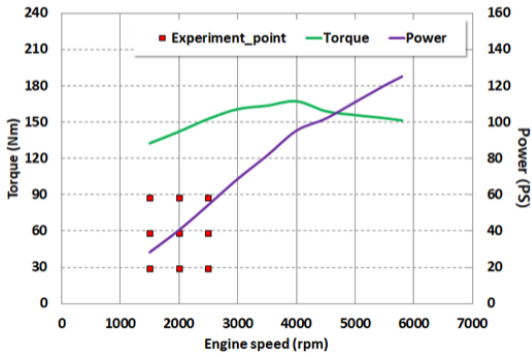


Fig. 3. Engine test operation condition (engine dynamometer)

Table 4. Experiment operation condition

Engine speed	Load
1,500 rpm	29 Nm, 58 Nm, 88 Nm
2,000 rpm	29 Nm, 58 Nm, 88 Nm
2,500 rpm	29 Nm, 58 Nm, 88 Nm
1,500-5,800 rpm	WOT

3. 결과 및 고찰

3.1 엔진최대성능 실험 결과

바이오알코올 연료 함유량에 따른 토크 및 램다 값 비교를 위해, 1,500-5,800 rpm까지 측정된 토크와 램다값을 평균 산출하여 Fig. 4에 나타내었다.

가솔린 연료에 알코올을 3% 혼합한 A3연료에서 가장 낮은 토크수준을 확인하였으며, 알코올 혼합비율이 높아질수록 토크가 상승하는 경향을 확인하였다. 이 때 램다값을 비교한 결과 A3연료가 0.94로 혼합연료 중 가장 희박한 연소를 하였으며, 알코올 혼합비율이 높을수록 농후해지는 경향을 확인하였다(이론공연비 14.7).

Fig. 5에서 각 연료별 WOT 운전조건에서 BSFC 향상률을 비교한 결과 가솔린 대비 6.7%로 A3연료에서 가장 높은 BSFC 향상률을 확인하였으며, 알코올 혼합농도가 높아질수록 BSFC 향상률은 감소하는 경향을 확인하였다.

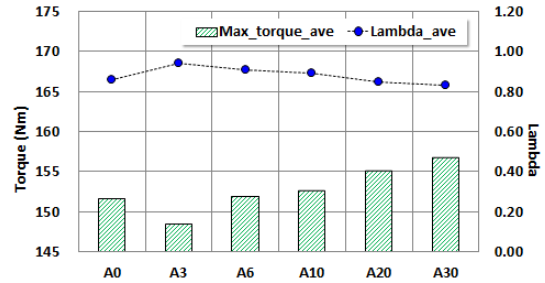


Fig. 4. Result of torque and lambda measurement

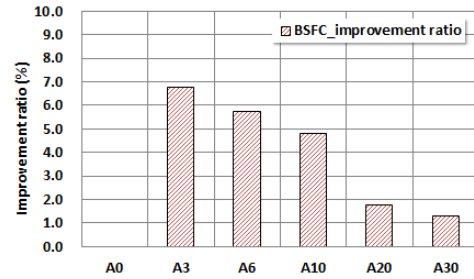


Fig. 5. Analysis of BSFC improvement ratio

이는 알코올 함유로 가솔린 대비 LHV가 감소하는 수준보다 옥탄가의 향상이 엔진 연소성능 측면에서 효율적으로 작용하여 WOT 운전조건에서 BSFC가 향상된 것으로 판단된다.

3.2 부분부하 엔진성능 및 배출가스 특성 결과

9개의 부분부하 운전조건에 대하여 각 혼합연료별 엔진성능(bsfc, 램다, 점화시기)을 산술평균 방법으로 정리하여 Figs. 6 and 7에 도식화하였다.

BSFC 분석 결과 A3연료에서 157.2 g/kWh 가장 높은 효율의 연료소비율성능을 확인하였으며, 바이오알코올 비율이 높아질수록 BSFC가 나빠지는 경향을 확인하였다. 이는 WOT 운전조건에서의 경향과 유사하였다.

램다의 경우 가솔린 이론공연비 14.7 기준으로 A3까지 1.00으로 이론공연비 영역에서 제어되는 것을 확인하였으며, 그 이상 혼합비율이 높아질수록 최대 0.88 (A30) 농후해지는 현상을 확인하였다.

점화시기는 가솔린의 경우 BTDC 32.6 °CA을

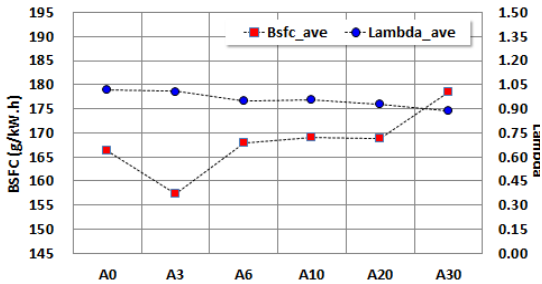


Fig. 6. Result of torque and lambda measurement

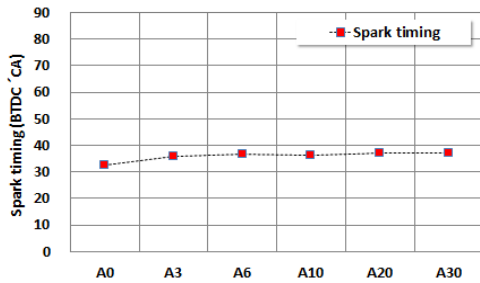


Fig. 7. Result of spark timing measurement

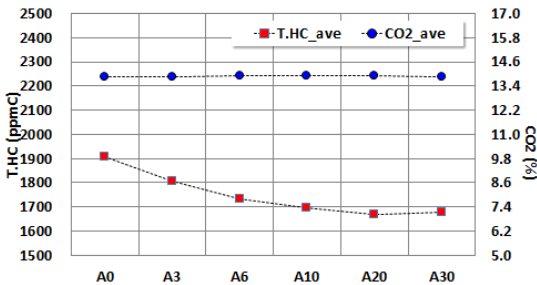


Fig. 8. Result of T.HC, CO₂ emission measurement

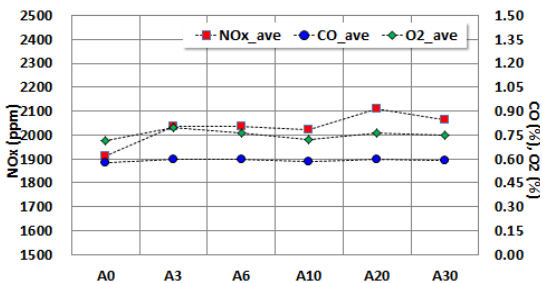


Fig. 9. Result of NO_x, CO, O₂ emission measurement

확인하였으며, 바이오알코올 연료가 혼합된 A3 혼합연료부터 BTDC 35.8 °CA으로 진각된 것을 확인하였다. 이는 연료의 옥탄가가 향상되면서

엔진 ECU가 배기가스의 램다값을 피드백받아 진각된 것으로 판단되며, BTDC 3°CA가 ECU 알고리즘 내에 최대의 진각률인 것으로 판단된다.

9개 부분부하 운전조건에서 측정된 배출가스 (T.HC, CO₂, NO_x, CO, O₂)를 산술평균 방법으로 정리하여 Figs. 8 and 9에 도식화하였다.

각 혼합연료별 CO₂ 분석 결과 평균 13.8% (±3% 이내) 이내로 바이오알코올 함유량에 따라 배출경향은 동일한 것으로 확인되었으며, T.HC의 경우 바이오알코올 혼합비율이 증가함에 따라 배출량이 감소하는 것을 확인하였다.

NO_x의 배출경향은 바이오알코올 함유량이 증가할수록 1,911 ppm (A0)에서 최대 2,107 ppm (A20)까지 증가하는 경향을 확인하였다.

이외 O₂와 CO의 배출경향은 바이오알코올 혼합비율 증가에 따라 O₂는 0.75% (±2% 이내), CO는 0.59% (±1% 이내)로 유사한 배출가스 경향을 확인하였다.

NO_x와 T.HC는 바이오알코올 혼합비율에 따라 배출가스의 경향이 달리 측정되었으며, 이는 혼합연료에 옥탄가 및 발열량에 의하여 엔진 ECU에서 램다값을 제어한 것으로 판단되며, 램다값 변화에 의하여 이론공연비보다 농후 및 희박하게 운전되어 NO_x와 T.HC의 배출수준이 달라진 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 가솔린 RFS 연료도입을 위하여 30% 미만의 바이오알코올(에탄올, 부탄올, 가솔린) 혼합연료에 대한 엔진성능 및 배출가스 배출특성에 대한 실험적 연구를 진행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 바이오알코올 혼합비율에 따라 엔진 최대 토크 및 BSFC에 대하여 실험 및 분석한 결과 가솔린 대비 A3연료에서 최대토크가 감소하여 혼합비율이 증감함에 따라 토크가 증가하는 경향을 확인하였으나, BSFC를 분석한 결과 단위출력당 연료

소비량은 A3연료에서 높은 효율을 확인하였다.

2) 차량연비측정모드에서 선정된 9개의 운전조건에서 각 혼합비율별 엔진성능을 분석한 결과 A3연료에서 BSFC가 효율이 높은 것을 확인하였고, 바이오알코올 함유량에 따라 엔진 ECU가 점화시기를 최대 BTDC 5°CA 진각한 것을 확인하였다.

3) 바이오알코올 함유량이 높을수록 LHV이 낮아짐에 따라 동일 운전조건에서 이론공연비 대비 농후하게 연소되는 현상을 확인하였으며, 이는 배출가스 T.HC와 NO_x의 배출경향에 영향을 미쳤다.

이상의 결과로 바이오알코올 혼합비율에 대한 엔진성능 및 배출가스 배출수준을 확인할 수 있었으며, A10 이상의 연료에서 별도의 점화시기 제어를 통한 배출가스 수준 최적화 연구 진행이 필요하다.

후 기

본 연구는 2016년 산업통상자원부 에너지기술개발사업의 재원으로 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다(‘E3 급 수송용 바이오연료의 국내 적용성 향상을 위한 최적화 기술개발’, NO. 20163010092160).

References

1. “The 4th Basic New and Renewable Energy Plan”, 2014, Ministry of Trade, Industry & Energy.
2. “The 2nd Basic Energy Plan”, 2014, Ministry of Trade, Industry & Energy.
3. D. D. Bala, K. de Souza, M. Misra, and D. Chidambaram, “Conversion of a variety of high free acid containing feed stock to biodiesel using solid acid supported catalyst”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 104, 2015, pp. 273-281.
4. D. L. Manuale, G. C. Torres, C. R. Vera, and J. C. Yori, “Study of an energy-integrated biodiesel production process using supercritical methanol and low-cost feedstock”, *Fuel Processing Technology*, Vol. 140, 2015, pp. 252-261.
5. G. Baskar, and R. Aiswarya, “Trends in catalytic production of biodiesel from various feedstocks”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 57, 2016, pp. 496-504.
6. J. Y. Park, J. K. Kim, and C. K. Park, “A review of Biofuels Production Technologies from Microalgae”, *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 27. No. 4, 2016, pp. 386-403.
7. J. K. Poppe, R. Fernandez-Lafuente, R. C. Rodrigues, and M. A. Z. Ayub, “Enzyme reactors for biodiesel synthesis: Present status and future prospects”, *Biotechnology Advances*, Vol. 33, 2015, pp. 511-525.
8. A. Canet, K. Bonet-Ragel, M. D. Benaiges, and F. Valero, “Lipase-catalysed transesterification: Viewpoint of the mechanism and influence of free fatty acids”, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 85, 2016, pp. 94-99.
9. C. S. Jung, “Quality property of bioethanol blends & counterplan of infrastructure”, *the korean society for new and renewable energy*, Vol. 2, No. 4, 2006, pp. 102-105.
10. K. Owen, T. Coley, “Automotive Fuel Reference Book”, SAE Inc., 1995, pp.261-278.