

성층연소 직분식 엔진에서의 propane과 n-butane의 연소 및 배기특성 비교

주용준* · 정진영* · 배충식*

Comparison of Combustion and Emission Characteristics of Propane and n-butane in a Stratified DISI Engine

Yongjoon Joo*, Jinyoung Jung*, Choongsik Bae**

ABSTRACT

The combustion and emission characteristics of propane and n-butane which are the main components of LPG were compared with gasoline. The experiment was performed in a stratified DISI engine under lean combustion conditions. Mixtures of propane and n-butane were more homogeneous because propane and n-butane have better evaporation characteristics. As a result, combustion speeds of n-butane and propane were slower, and emission levels of NOx and PM were lower. However, in spite of better evaporation, PM from propane was higher.

Key Words : liquefied petroleum gas(액화석유가스), gasoline(가솔린), n-butane(노말부탄), propane(프로판), lean stratified combustion(희박성층연소)

화석연료 사용의 증가로 인한 환경오염물질 배출의 증가는 지구온난화 등의 환경문제를 발생시켰으며, 이에 따라 환경오염물질 배출에 대한 규제가 강화되고 있는 추세이다. 또한 석유자원의 고갈과 에너지 수요의 증가로 인해, 자동차 분야에서는 친환경 대체연료 적용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 상황 속에서 LPG(Liquefied Petroleum Gas, 액화석유가스)는 자동차 연료의 대체연료로서 큰 관심을 받게 되었고, 그 결과 전 세계적으로 널리 사용되어 가장 성공적인 대체연료로서 자리매김 하고 있다. LPG는 원유의 채굴 및 정제과정에서 생산되는 기체상의 탄화수소를 액화시킨 혼합물로서 주요 구성성분은 프로판(propane, C_3H_8)과 부탄(butane, C_4H_{10})이다. LPG는 상대적으로 높은 옥탄가를 갖고 있어 높은 압축비를 구현할 수 있고, 그 결과 가솔린과 비슷한 수준의 동력성능 및 연비를 구현할 수 있다. 또한 C/H 비율이 낮아 지구온난화의 원인이라고 지적되고 있는 이산화탄소의 배출을 줄일 수 있으며, LPG의 우수한 기화특성은 현재 가솔린 직분분사(GDI, Gasoline Direct Injection) 엔진의 단점으로 지적되고 있는 입자상 물질의 발생을 감소시킬 수 있다 [1~3]. 그러나 단위 부

피당 발열량이 낮고, 연료자체의 저점도성에 의해서 펌프의 내마모기술이 필요하며, 연료계통내 기화로 인한 제어성능의 저하 등의 단점이 지적되고 있다 [4]. 이러한 LPG는 지역 및 환경에 따라 프로판과 부탄의 비율이 다르게 되며, 그에 따라 연료의 특성 또한 변화하게 된다 [5]. 연료 특성의 변화는 엔진 성능에 영향을 주기 때문에 LPG의 조성비율에 따라 엔진의 운전전략을 다르게 해주어야 할 필요가 있다. Table 1은 프로판과 노말부탄의 연료특성을 나타내고 있다.

Table 1 Properties of n-butane and propane

		n-butane	propane
분자식		n- C_4H_{10}	C_3H_8
비중	액체 (물=1, 20°C)	0.579	0.501
	기체 (공기=1, 15°C)	2.006	1.522
비점(°C)		-0.5	-42.1
증발 잠열 (kcal/kg)		92.1	101.8
증기압 (kg/cm ² , 20°C)		2.10	8.35
발열량	(kJ/kg)	49,571	50,367
	(kJ/L)	28,930	25,581
옥탄가		91	125

* 한국과학기술원 기계공학과

† 연락저자, csbae@kaist.ac.kr

TEL : (042)350-3044 FAX : (042)-350-5044

본 연구에서는 희박 성층연소 직분식 전기점화 엔진을 대상으로 LPG의 주요 구성성분인 프로판과 노말부탄 그리고 SI엔진의 대표연료인 가솔린의 연소특성 및 배기특성을 비교해보고자 한다.

본 연구에 사용된 대상엔진은 연구용 단기통 엔진으로써, 배기량 0.5 L, 압축비 12:1인 분무유도식 전기점화 직접분사 엔진이다. Table 2는 단기통 엔진의 제원을 나타내고 있다. 인젝터는 피에조 방식의 외향개방형 인젝터를 사용하였으며, 연소 해석을 위해 연소실 측면에 piezo electric 방식의 압력센서(Kistler, 6052C)를 설치하여 0.2 CAD(Crank angle degree) 단위로 연소실 압력을 취득하였다. 실험은 조건별로 300 사이클 동안 진행되었으며, 데이터는 300 사이클 동안의 평균값을 사용하였다. 배기 배출물은 배기가스 분석장치(MEXA 1500d, HORIBA)를 이용하여 측정하였으며, 입자상 물질의 측정은 smoke-meter(416SG002, AVL)을 이용하여 측정하였다. Fig. 1은 가솔린과 LPG의 연료공급장치의 개략도이다. 가솔린의 경우 저압펌프를 이용하여 고압펌프로 연료를 공급하는 반면, LPG 연료는 질소를 통해 LPG 연료통을 가압하여 고압펌프로 연료를 공급하였다. 고압펌프 내 유량밸브와 커먼레일의 PCV(Pressure control valve)는 컨트롤러(ZPD-1100, Zenobalti)를 이용하여 연료의 압력을 4~20 MPa로 제어하였다.

Table 2 Engine specifications

Bore * Stroke (mm)	85 × 8
Compression ratio	12 : 1
Engine type	Spray guided DI, DOHC
Intake valve timing	11 ATDC ~ 202 ATDC
Exhaust valve timing	146 ATDC ~ 10 ATDC
Injector type	piezo outwardly opening
Injector mount	central

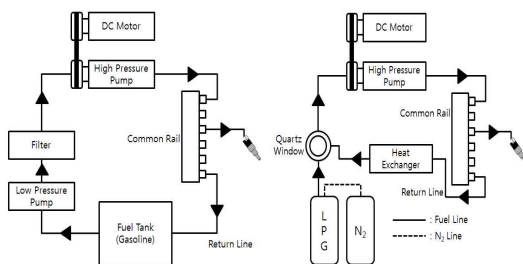


Fig. 1 Schematic diagram of fuel supply system (left : gasoline, right : LPG(n-butane, propane))

실험영역은 성층연소로 인한 연비저감 효과가 가장 우수하다고 알려진 저속, 저부하 조건으로 선정하였다. 저속, 저부하 조건을 맞추기 위해 엔진 속도는 1200 rpm, 연료량은 가솔린 기준 11 mg/cycle로 선정하였고, 그때의 발열량인 473.6 J에 맞추어 n-butane과 propane의 연료량도 선정하였다. 실험조건은 Table 3과 같다.

Table 3 Experiment conditions

Fuel	Gasoline n-butane 99.5% propane 99.5%
Fuel heating value [J]	473.6
Engine speed [rpm]	1200
Injection pressure [MPa]	10, 20
Injection timing [CAD BTDC]	28
Ignition timing	1 CAD sweep
Throttle	wide open

Fig. 2는 가솔린, 노말부탄, 그리고 프로판의 분사압력별 IMEP(Indicated mean effective pressure)와 IMEP의 변동계수(COV, Coefficient of variation)값을 나타낸다. 전기점화 직접분사 엔진의 경우 점화시기에 적절한 혼합기가 스파크 주위에 형성이 되어야만 안정적인 연소가 가능하다 [6]. 연료특성의 차이는 분무특성에 영향을 주어 스파크 주위에 형성되는 혼합기가 서로 다르게 되고, 그에 따라 연소안정성 및 성능에 차이가 발생하게 된다. 일반적으로 IMEP의 변동계수 값이 5 % 이상이 되면, 연소가 불안정하다 판단하여 운전영역에서 제외시키게 된다. 본 연구의 실험영역인 분사시기 28 CAD BTDC 조건에서는 가솔린의 경우 분사압력 10 MPa과 20 MPa 모두에서 안정적인 연소를 보이는 것을 확인할 수 있다. 그러나 노말부탄과 프로판의 경우 10 MPa에서는 가솔린보다 더 우수한 연소안정성을 보였지만, 20 MPa의 경우 IMEP의 변동계수 값이 5 %를 넘으며 연소가 불안정한 모습을 보였다. 이는 노말부탄과 프로판의 우수한 기화성이 높은 분사압력에서 국부적으로 과도혼합 현상을 일으켜 연소안정성이 떨어지는 것이라 예상된다. 또한 노말부탄과 프로판의 우수한 기화성으로 인해 상대적으로 균질한 혼합기를 형성하게 된다. 균질한 혼합기에 의해 연소속도가 느려지게 되어 가솔린에 비하여 낮은 IMEP를 보이는 것을 확인할 수 있다.

Fig.3은 가솔린, 노말부탄, 그리고 프로판의 열 방출률곡선과 실린더압력을 나타낸다. 가솔린의 경우 성층연소의 특징인 빠른 연소속도를 보이는

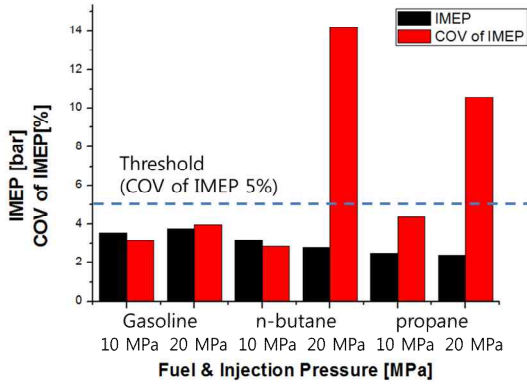


Fig.2 Operation Range of gasoline, n-butane, and propane

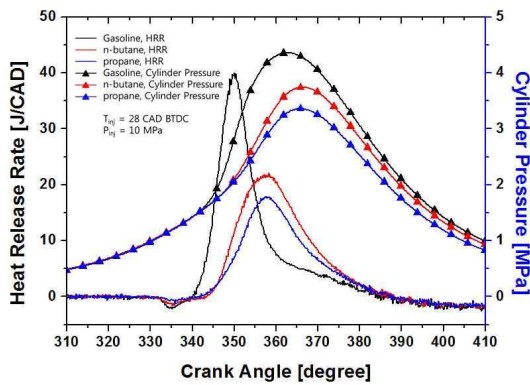


Fig.3 Heat release rate and in-cylinder pressure of gasoline, n-butane, and propane

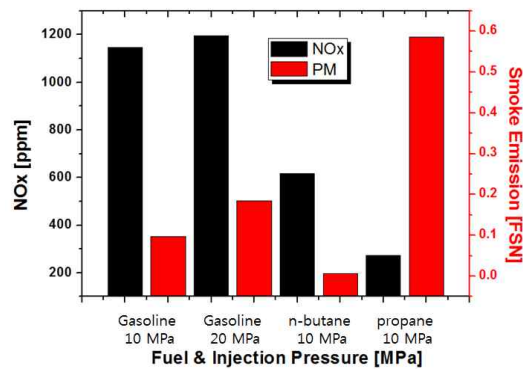


Fig.4 NOx and particle matter emission of gasoline, n-butane, and propane

것을 확인할 수 있으며, 그 결과 상대적으로 연소상이 진각되었음에도 불구하고 노말부탄과 프로판 대비 높은 IMEP를 보이는 것을 확인할 수 있다. 노말부탄과 프로판의 경우 우수한 기화성에 의해서 균질한 혼합기를 형성하게 되며, 그에 따라 점화시기를 지각시킬 수 있었다. 그 결과,

연소속도가 느리고 열방출률 역시 적은 모습을 보이지만 지각된 연소상에 의해서 피스톤에 대한 일을 줄여 IMEP 손실을 최소화 할 수 있었다.

Fig.4는 가솔린, 노말부탄, 그리고 프로판의 배기 배출물 결과를 나타내고 있다. 노말부탄의 경우 가솔린과 비교하여 NOx(Nitrogen oxides)와 입자상 물질(PM, Particulate matter)에 대한 배기특성이 우수한 것을 확인할 수 있으며, 프로판의 경우는 NOx의 배기 배출량은 적었지만, 입자상 물질에 대한 배기 배출량은 가솔린과 비교하여 더 많은 것을 확인할 수 있다. 이는 가솔린의 경우 노말부탄 및 프로판과 비교하여 높은 열방출률을 보이며, 연소상과 최대실린더 압력간의 시간간격이 길어 연소된 혼합기가 압축행정을 거쳐 더 높은 온도로 압축된 결과라 할 수 있겠다. 높은 온도에 의해서 NOx의 배출량이 증가하였으며, 상대적으로 기화성이 부족한 가솔린의 경우 국부적으로 농후한 혼합기를 형성함에 따라 입자상 물질의 배출량도 상대적으로 높은 모습을 보였다. 프로판은 우수한 기화성에 의해 균질한 혼합기를 형성하였음에도 불구하고, 낮은 열방출률로 인한 낮은 연소온도 때문에, 연료 후기에 입자상 물질의 산화가 잘 이루어지지 않아 입자상 물질의 배출량이 높은 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 “직분식 초회박 가스엔진 화염 및 분무 가시화”(NK182C)의 일환으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

[1] Seungmook Oh, Seokhwan Lee, Young Choi, Kern-Yong Kang, “Combustion and Emission Characteristics in a Direct Injection LPG/Gasoline Spark Ignition Engine”, SAE Technical Paper 2010-01-1461

[2] Cheolwoong Park, Yunseo Park, Seungmook Oh, Yonggyu Lee, Tae Young Kim, Hongsuk Kim, Young Choi, Kern-Yong Kang, “Emission Characteristics of Gasoline and LPG in a Spray-Guided-Type Direct Injection Engine”, SAE Technical Paper 2013-01-1323

[3] Cha-Lee Myung, Kwanhee Choi, Juwon Kim, Yunsung Lim, Jongtae Lee, Simsoo Park, “Comparative study of regulated and unregulated toxic emissions characteristics

from a spark ignition direct injection light-duty vehicle fueled with gasoline and liquid phase LPG(liquefied petroleum gas)", Energy 44 (2012) 189-196

[4] Yeon-Kwan Sung, Ju-Tae Song, Myunghwan Kim, "Technical trend and vitalization of LPG vehicle", 2012 KSAE Spring Conference, 2012.5, 393-399

[5] H. Miyamoto, T. Koshi, M. Uematsu, "The (p , ρ , T , x) properties for (propane + n-butane + isobutane) ternary mixtures over the temperature range from (280 to 440) K at pressures from (1 to 200) MPa, J. Chem. Thermodynamics 40 (2008) 558-566

[6] Katharina Schänzlin, Thomas Koch, Alexios P. Tzannis, Konstantinos Boulouchos, "Characterization of mixture formation in a direct injected spark ignition engine", SAE Technical Paper 2001-01-1909