

< 논문 >

LPLi엔진에서의 LPG 연료 조성비가 개별탄화수소 배출특성과 시동성에 미치는 영향에 대한 연구

최성원* · 곽호철* · 명차리** · 박심수†
(2006년 8월 25일 접수, 2007년 2월 12일 심사완료)

An Experimental Study on Individual HC Emission Characteristics and Startability for Various Composition Ratio of LPG Fuel on LPLi Engine

Seongwon Choi, Hochul Kwak, Cha-Lee Myung and Simsoo Park

Key Words: LPLi(LPG액상분사), THC(토탈 하이드로카본), GC(가스 크로마토그래피), NMOG(비메탄계 유기가스), CARB(캘리포니아 대기환경 보존국), EMS(엔진 메니지먼트 시스템)

Abstract

The regulations for hydrocarbon emission from vehicles have become much more stringent in recent years. These more stringent regulations request vehicle manufacturers to develop the advanced exhaust system for reducing exhaust emissions. The exhaust emissions has many sources in vehicle. In order to investigate the characteristics of hydrocarbon(HC) in the exhaust manifold, concentrations of individual HC species were measured in exhaust process. Using sampling valve, the light hydrocarbon emissions were captured in the exhaust manifold(catalyst before and after)and analyzed from LPLi engine exhaust manifold(catalyst before and after) using different fuel properties. Then exhaust samples were measured by gas chromatography(GC) and exhaust gas analyzer. Catalyst conversion efficiency for fuel properties of Butane 100% was better than Propane 100%. Start delay of LPLi engine was observed as increment of propane contents in LPG fuels.

기호설명

MIR : 최대증가반응성
RAF : 반응조정계수

1. 서론

자동차 배출물에 의한 광화학적 스모그, 온실 효과 등의 대기 오염이 심각해지면서, 세계 각국

에서는 배출물에 대한 규제가 강화되고 있으며 여러 연구기관에서는 엔진의 유해 배출물을 저감 시키려는 노력이 활발히 진행되어 왔다. 최근 규제되는 유해 배출물에는 NMOG, 일산화탄소(CO), 질소산화물(NO_x) 등이 있으며, 이중 NMOG는 메탄을 제외한 탄화수소(HC)와 케톤, 알데히드 등의 합산소 화합물(oxygenates)의 합으로서 휘발유 엔진의 경우 약 150가지 이상의 성분으로 구성된다. 배출가스 분석기와 FFID(Fast Flame Ionization Detector)를 이용한 고속의 샘플링 프루브를 연소실 벽이나 배기관에 설치하여 즉각적인 탄화수소 농도를 측정하는 연구가 많이 수행되어 왔다. 그러나 FFID는 발생하는 전체 탄화수소 농도만을 측정할 수 있다.⁽³⁾

LPG 자동차의 선도 기술을 가지고 있는 국내

† 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과
E-mail : spark@korea.ac.kr
TEL : (02)3290-3368 FAX : (02)3290-3869

* 고려대학교 대학원 기계공학과

** 고려대학교 기계공학과

자동차 제작사는 연료성상이 상이한 국외의 메커니즘도 고려할 때이다. 그러므로 전세계 연료성상에 따른 LPG엔진의 연소특성과 배기배출물 수준에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 배출가스 분석기(HORIBA MEXA-8120D)와 GC(Gas Chromatography)를 사용하여 LPG 연료 조성비와 공연비 변화에 따른 촉매 정화효율 및 배기배출물을 전체 / 개별적인 HC 배출특성으로 나누어 분석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

Fig. 1은 촉매 정화효율을 측정하기 위한 시스템을 개략적으로 나타낸 것이다. 실험에 사용한 엔진은 현재 양산중인 차량의 V6 2.7L급 LPLI엔진으로 인젝터 구동용 모듈이 내장된 전용 ECU를 장착하고 있다. 연료공급은 내장형(BLDC펌프) 연료펌프를 사용하고 있으며, 압력조절기에 의해 $\Delta p=5$ bar로 일정하게 연료가 공급된다.

촉매는 MCC(Manifold Catalytic Converter)와 UCC(Underfloor Catalytic Converter)가 장착이 되어 있으며 MCC의 전 / 후에서 GC와 배출가스 분석기로 촉매정화 효율 및 배기 배출물 특성, 압력센서에 의한 연소해석 등을 파악하였다.

Table 1은 본 연구에 사용된 엔진의 주요 제원을 나타낸 것이다. Table 2는 LPG연료내 프로판의 함유량을 국가별로 구분하여 나타낸 것이다. 유럽의 국가들과 미국의 경우 LPG연료의 대부분을 프로판으로 사용하고 있으며, 한국과 일본의 경우 프로판 함유량이 최대 35%, 30%인 LPG연

료를 사용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 시험용 LPG연료로서 부탄 100%, 프로판 23% + 부탄 76%, 프로판 50% + 부탄 50%, 프로판 100%의 각기 다른 조성비를 사용하여 LPG연료의 조성비에 따른 분사특성과 연소특성, 배출가스특성을 연구하였다.

배기가스 중 탄화수소의 종류와 각각의 농도를 측정하기 위하여 GC(모델 HP 5890 series II)를 사용하였다. 컬럼은 capillary 50m X 0.53mm X 15.0 μ m (HP-PLOT U), N₂로 작동되는 10-포트 기계 샘플링 밸브를 사용하였다. Table 3에 GC의 분석조건을 나타내었다.

Table 1 Specification of test engine

Power-train	2.7L, DOHC
Type / Displacement	V6 / 2,656cc
Compression ratio	10.0 : 1
Fuel control system	MPI with injector driver module
Valve timing	IVO/IVC, EVO/EVC (6/46, 44/8)

Table 2 Overview of LPG components for nations
(Source : Australian Government DEH)

Nation	% Propane in LPG market	Nation	% Propane in LPG market
Korea	max. 35%	Finland	min. 95%
Japan	max. 30%	UK	50% to 100%
U.S.A.	min. 95%	Italy	20% to 90%
Belgium	60%	France	45%
Germany	min. 95%	Portugal	min. 92%

Table 3 Details of GC specification method

GC model	HP 5890 series II with chemstation
Sampling valve	10-port valco valve
Column	50m x 0.53mm x 15.0 μ m
Carrier gas	Helium 5cc/min
Oven temperature	40 $^{\circ}$ C \rightarrow 70 $^{\circ}$ C \rightarrow 140 $^{\circ}$ C

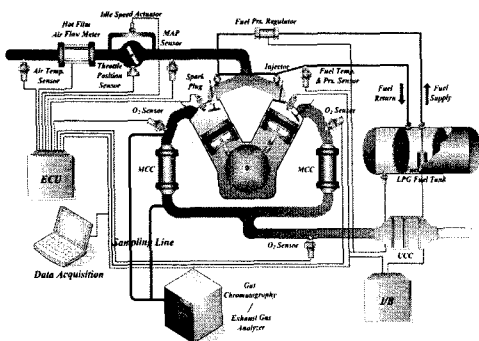


Fig. 1 Schematic diagram of catalytic converter conversion efficiency system

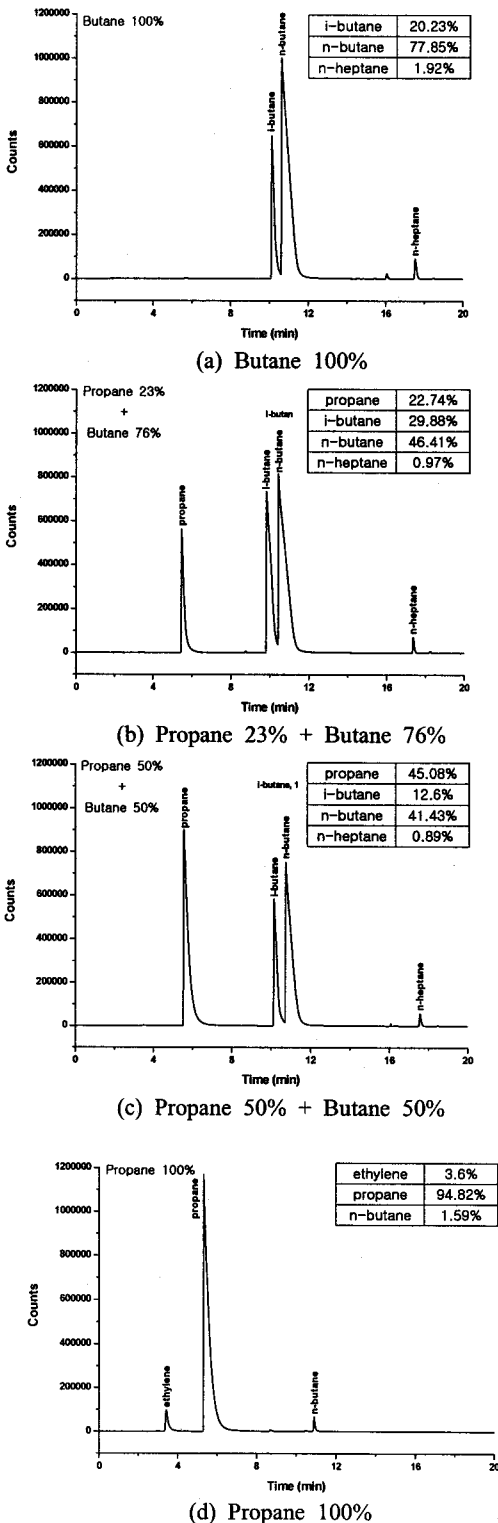


Fig. 2 Chromatogram of various LPG fuel

3. 실험 결과

3.1 연료조성비에 따른 성분 분석

Fig. 2는 가스 크로마토그래피로 분석한 연료 조성비에 따른 성분을 나타내었다. 여름철 연료와 유사한 부탄 100%에서는 이소부탄, 노멀부탄, 노멀헵탄 등이 검출되었으며, 겨울철 연료인 프로판 23% + 부탄 76% 그의 프로판 50% + 부탄 50%에서는 프로판, 이소부탄, 노멀부탄, 노멀헵탄, 프로판 100%는 에틸렌, 프로판, 노멀부탄 등이 검출되었다.

3.2 연료조성 별 엔진의 연소현상 분석

Fig. 3은 연료조성비에 따른 연소속도를 나타낸 것이다. 운전 조건은 2000 rpm, BMEP 2.0 bar 및 $\lambda=1.0$ 이고, 연소현상 해석을 위하여 점화플러그 타입의 압력센서를 실린더에 장착하고 연소해석기를 이용하여 분석하였다. 연소속도의 비교 시점은 0~90%가 연소되는데 걸리는 시간을 기준으로 비교하였다. Fig. 3에서는 연료조성에 따른 질량 연소분율(MFB: Mass Fraction Burned)을 10% / 50% / 90%의 수준으로 나타내었다.

점화시기를 EMS 전용 S/W인 SAM2000을 사용하여 40°CA BTDC로 고정된 상태에서 연료조성비에 따른 연소시간을 측정된 결과 MFB 10% 일 경우 부탄 100%의 연소시작시점이 12°CA BTDC이며 프로판의 함유량이 증가할수록 10, 8, 7°CA BTDC까지 연소시작시점이 늦어지며 MFB 90%의 경우 프로판 100%의 연소시작시점이 19°CA ATDC로 부탄 100%의 연소시작시점인 14°CA ATDC보다 다소 지연됨을 알 수 있다.

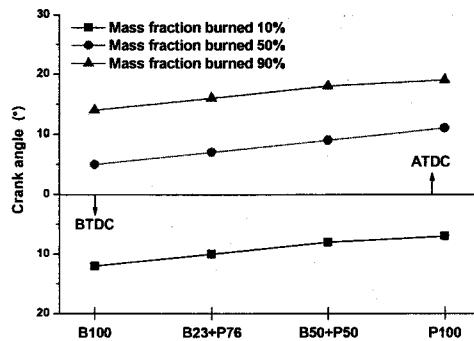


Fig. 3 Mass fraction burned with various Fuel composition

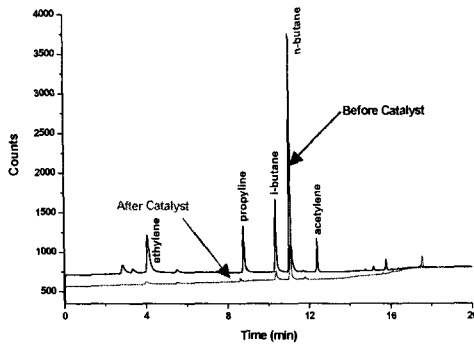


Fig. 4 Catalyst efficiency for butane 100%

Table 4 Catalyst efficiency of MCC for different fuel properties by GC (Unit : %)

	butane 100%	propane 23% + butane 76%	propane 50% + butane 50%	propane 100%
$\lambda=0.95$	63.4	27.0	49.0	43.6
$\lambda=1.0$	88.6	75.7	88.2	84.8
$\lambda=1.05$	90.7	80.5	92.4	86.8

3.3 연료조성비에 따른 촉매 정화 효율

Fig. 4는 부탄 100%, $\lambda=1.0$ 일때의 정화율을 GC를 사용하여 나타낸 것이며 엔진 운전 조건은 2000 rpm, BMEP 2.0 bar로 측정된 결과이다. 촉매 전의 에틸렌, 프로필렌, 이소부탄, 노멀부탄, 아세틸렌등의 성분이 촉매 후에는 감소하여 정화율이 88.6% 임을 확인 하였다.

Table 4는 연료 조성비에 따른 촉매 정화 효율을 GC를 사용하여 나타낸 것이다. MCC 전.후에 각각 샘플링 라인을 설치하여 연료의 조성이 바뀔때 따라 공기과잉률의 일정한 변화에 따른 촉매 정화효율을 확인하였다. 불완전 연소에 의해 공기과잉률이 감소한 구간에서의 정화율이 저조함을 알 수 있다.

Table 5는 연료조성별 성분에 따른 촉매 정화 효율을 나타낸 것이다. Fig. 4와 동일한 조건으로 측정된 한 것으로 부탄 100%의, 프로판 23%+부탄 76%, 프로판 50%+부탄 50%는 92%이상의 정화율을 보이며, 프로판 100%의 경우 프로판성분의 정화율이 85%로 가장 저조함을 나타낸다.

Table 5 Catalyst efficiency of individual hydrocarbon by GC (Unit : %)

	butane 100%	propane 23% + butane 76%	propane 50% + butane 50%	propane 100%
ethylene	96.67	94.48	92.91	90.04
propane		92.81	91.53	84.67
propylene	98.66	95.77	93.33	91.42
i-butane	96.52	97.87	97.26	
n-butane	92.6	94.99	92.34	89.39
acetylene	99.78	99.46	99.86	98.98

Table 6 MIR of carter[O₃(g)/NMOG(g)]

(Source : AutoEnv. org)

Properties	MIR	Properties	MIR
propane	0.48	ethylene	7.30
butane	1.02	propylene	9.41

프로판 100%의 정화율이 다른 연료에 비해 저조함을 나타내는데 이는 프로판의 연료특성상 동일조건에서 연료를 분사했을 때 연료조성별 특성이 상이하여 이와 같은 결과를 나타낸다.

3.4 LPG 연료의 특성

광화학반응이 사회적인 문제로 대두되면서 미국의 CARB(California Air Resources Board)에서는 가스성분에 따른 광화학반응에 미치는 영향을 계산하기 위해 MIR (Maximum Incremental Reactivities) 척도를 채용하고 있고 Table 6에 나타내었다.

식 (1)은 연료의 반응조정계수 RAF(Reactivity Adjustment Factor)로서 저공해자동차의 배출가스를 평가할 때 연료마다 배출가스 성분에 차이가 있어 이를 보정하기 위하여 사용한다.

$$RAF = \frac{\sum_i [NMOG_i \times MIR_i]}{[NMOG_t]} \quad (1)$$

Table 7 RAF of various LPG fuel

Fuel	RAF	Fuel	RAF
butane 100%	0.24	propane 50% + butane 50%	0.20
propane 23% + butane 76%	0.23	propane 100%	0.18

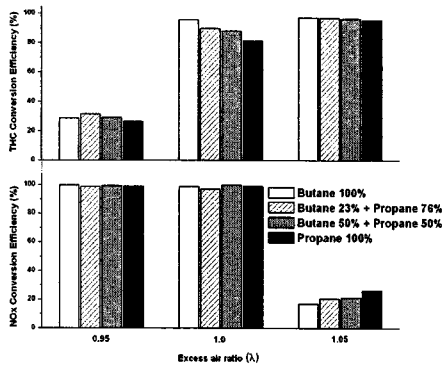


Fig. 5 Catalyst conversion efficiency

Table 7은 LPG 연료 조성별 RAF를 나타낸 것이다. 프로판, 에틸렌, 부탄, 프로필렌 성분의 MIR값으로 식 (1)을 이용하여 계산을 하였으며 부탄 0.24, 프로판 0.18 등으로 가솔린(RAF=0.94), CNG(RAF=0.43), M85(메탄올 85% + 가솔린 15%) (RAF=0.41) 등 광화학반응 정도에 기인하는 연료의 반응조절계수가 낮아 오존생성 물질을 저감할 수 있는 장점이 있다.

3.5 연료조성별 공연비에 따른 촉매정확율

Fig. 5는 실용운전 영역인 2000 rpm, BMEP 2.0 bar에서 MCC 전·후의 THC와 NOx 성분의 정화효율을 배출가스 분석기를 이용하여 나타낸 것이다. 성분별 정화효율은 이론공연비 영역인 λ=1 부근에서는 HC의 산화율이 높기 때문에 THC는 90% 수준의 높은 정화율이 나타난다.

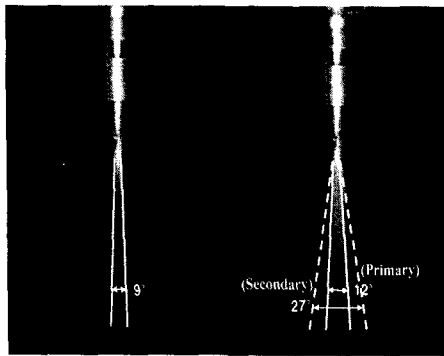
정화율은 이론공연비보다 농후하게 되면 불완전 연소로 인해 HC의 발생량이 급증하여 THC의 정화율이 감소하고, 반대로 희박하게 되면 산소 과잉으로 THC의 발생량은 작아진다. λ=1.0 영역

에서 부탄의 THC 정화율이 95.8%, 프로판의 정화율이 81.3%이며 프로판의 성분이 증가할수록 THC정화율이 저하됨을 알 수 있다. 이는 부탄에 비해 프로판의 탱크압력 및 분사압력이 높아 분사량이 증가하여 배출가스의 양 또한 증가함에 따라 촉매 정화율이 감소함을 알 수 있다. NOx의 정화율에는 연료 조성비에 따라 큰 변화가 없음을 알 수 있다.

3.6 연료조성 별 인젝터 분사 특성

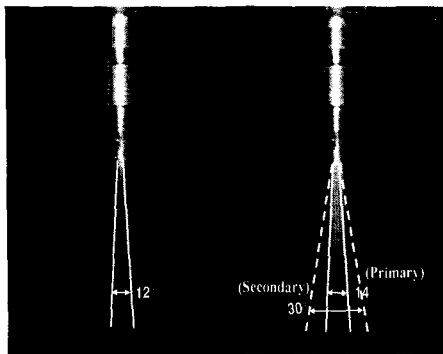
현 믹서방식의 LPG 차량은 겨울철 시동성 향상을 위해 동절기에 프로판의 함량을 증가하고 있다. 따라서 본 연구에서는 LPLi엔진의 시동성을 파악하기 위한 기초실험으로 부탄 100%, 프로판 100%를 사용하여 LPG연료의 분사특성을 파악하였다. 분사각도를 측정하기 위하여 별도의 인젝터 리그를 제작하여 실험 하였으며, 실험조건은 아이들 / 부분부하 / 전부하 등의 조건을 고려하여 엔진회전수와 분사시간을 800 rpm / 6 msec, 2000 rpm / 6 msec, 5000 rpm / 12 msec 등으로 분무 시험을 수행하였다.

Fig. 6은 인젝터 분사 가시화 실험을 통하여 분사각을 측정한 것으로 부탄 100%의 경우 각 조건에 따라 9°, 12°, 14°의 분사각으로 액상이 분사되며, 프로판 100%의 경우 액상(12°, 14°, 17°)과 기상(27°, 30°, 35°)이 같이 분사 된다. 액상(primary area) / 기상(second area)이 같이 존재하는 프로판 100%의 경우 분사각이 넓은을 알 수 있다. 액상 구간에서는 연료가 액상으로 분사가 되며 기상 구간에서는 연료가 미립화가 되어 분사됨을 확인 하였다. 이는 프로판의 연료 특성상 증기압이 높아 LPG탱크 내부압력 및 분사 압력이 높기 때문에 분사되면서 급격한 압력차이로 인해 상이 변하여 확산되면서 분사됨을 알 수 있다. 부탄과 프로판을 같은 조건에서 분사하면 프로판의 분사량이 많음을 알 수 있는데 이는 LPG 탱크의 내부압력이 부탄에 비해 높기 때문에 이와 같은 결과가 도출됨을 알 수 있다. 또한 프로판연료의 분사압력이 높아 분사되면서 확산 속도가 빠르고 분사량도 많기 때문에 적절한 EMS(Engine Management System)제어를 통해 프로판의 분사량을 제어 한다면 부탄에 비해 경제적 측면과 광화학반응 정도에 기인하는 반응조절계수 등을 고려할 때 우수한 연료라 생각된다.



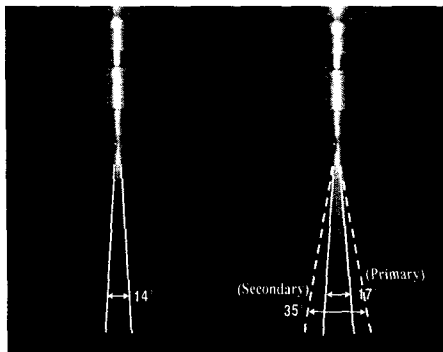
butane 100% propane 100%

(a) 800rpm / 6msec



butane 100% propane 100%

(b) 2000rpm / 6msec



butane 100% propane 100%

(c) 5000rpm / 12msec

Fig. 6 Injection characteristics to LPG fuel

각 연료에 따른 분사압력과 분사량을 Table 8에 나타내었다. 연료 탱크 압력에서 압력조절기를 통해 $\Delta p=5$ bar로 일정하게 유지하며 분사를 하였다. 부탄 100%의 아이들 / 부분부하 / 전부하 일때의 분사량을 보면 3.6 / 9.6 / 44.4 l/h로 리그에 장착된 펌프의 회전속도가 증가함에 따라 분

Table 8 Injection pressure / flow according to variable LPG composition

	Fuel composition	Injection pressure(bar)	Injection flow(l /h)
800rpm / 6msec	butane 100%	7.86	3.6
	propane 100%	14.48	4.2
2000rpm / 6msec	butane 100%	8.03	9.6
	propane 100%	14.48	10.8
5000rpm / 12msec	butane 100%	8.05	44.4
	propane 100%	14.12	45.6

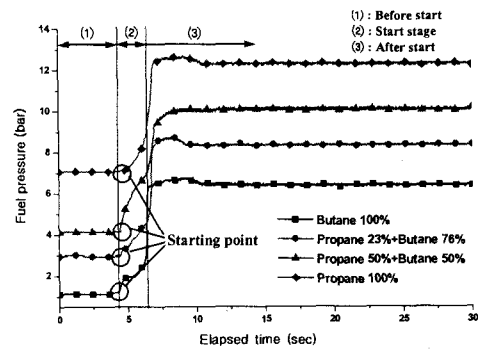


Fig. 7 LPG Fuel pressure according to LPG composition ratio

사시간이 증가하여 분사량이 증가함을 알 수 있다. 프로판 100%의 경우에도 분사량의 증가는 부탄 100%와 유사함을 확인하였다.

3.7 연료조성에 따른 시동지연

Fig. 7은 연료 조성별 연료탱크 내부압력 및 시동시 연료 분사압력을 나타낸다. 시동전 연료 탱크 압력이 부탄 100%는 약 1.2 bar, 프로판 100%인 경우 약 7.1 bar 수준이며 분사압력 또한 프로판 100%는 약 12.1 bar 수준으로 부탄 100%의 6.2 bar 보다 높음을 알 수 있다.

Fig. 8은 연료조성에 따른 시동지연 시간을 나타낸 것이다. 시동지연을 측정하기 위해 MAF (Mass Air Flow: 공기 질량 유량), 배터리 전압, 엔진의 회전속도, 연료 펌프의 압력 등을 측정하였다. 부탄 100% 연료의 시동지연 기간은 1.13 sec. / 프로판 100% 연료의 시동지연기간은 2.64 sec.임을 알 수 있다. Table 9는 연료 조성별 시동지연 시간을 나타내고 있다. 프로판의 함량이 증가할수록 시동지연 시간이 길어짐을 알 수 있다.

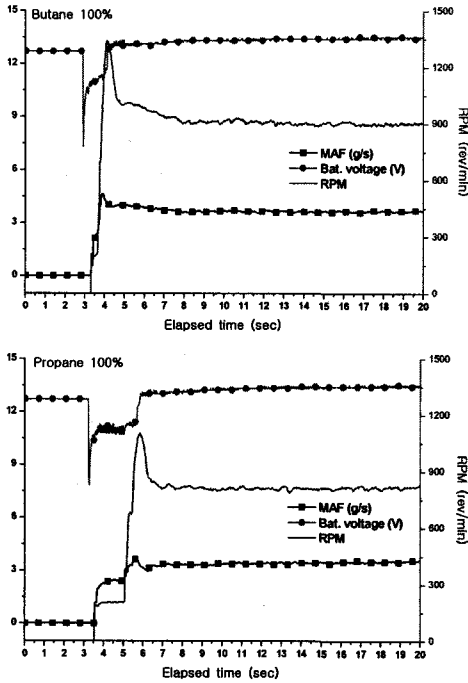


Fig. 8 Starting delay time according to LPG composition ratio

Table 9 Starting delay time according to LPG composition ratio

(Unit : sec.)

	butane 100%	propane 23% + butane 76%	propane 50% + butane 50%	propane 100%
Delay time	1.13	1.65	2.24	2.64

일반적으로 연료의 압력이 상승하면 분사량 또한 증가해야 하나 양산 EMS에서는 기준압력보다 높은 압력이 가해지면 연료 분사량을 감소시켜 기본 공연비를 맞추려 한다. 연료특성상 프로판이 부탄에 비해 가스밀도가 작고 분사압력이 높기 때문에 초기 시동시 분사량이 제어되고 기체상태로 분사가 되어 엔진 시동시간(크랭킹 시간 포함)이 지연됨을 알 수 있다. 프로판연료가 증기압 / 분사압력이 높기 때문에 인젝터의 허용 분사압력이 13~14 bar임을 감안하여 LPG연료 탱크의 온도와 압력을 측정하여 부탄 대비 적절한 보상계수와 제어로직을 적용하여 인젝터 연료 분

사량을 제어 한다면 시동성에 큰 무리 없이 적용 가능할 것으로 예상된다.

4. 결 론

본 연구에서는 배출가스 분석기와 GC 등을 사용하여 LPG 연료 조성비와 관련한 기초실험을 수행하였다. 또한 각 연료별 분사형상 / 연소현상 / 배기배출물에 대한 실험을 수행 하여 이상의 연구에서 얻은 결론을 종합하면 다음과 같다.

(1) 엔진 운전 조건은 2000 rpm, BMEP 2.0 bar로 일정하게 유지하며 연료조성비에 따른 개별탄화수소의 배출가스 특성을 가스크로마토그래피를 사용하여 측재정확화효율을 측정 하였을 경우 부탄의 함량이 증가할수록 정확화율이 높음을 알 수 있었다.

(2) 엔진의 연소속도는 MFB 90%의 경우 부탄 100%의 연소시간이 14°CA ATDC / 프로판 100%의 연소시간이 19°CA ATDC로 프로판의 함량이 증가할수록 부탄에 비해 연소속도가 다소 지연됨을 알 수 있다.

(3) 2000 rpm, BMEP 2.0 bar의 엔진 운전조건에서 배출가스 분석기를 통한 측재 전 / 후의 정확화율을 분석한 결과 프로판의 함량이 증가할수록 HC의 정확화율은 저조함을 확인하였고, NOx의 정확화율에는 큰 영향이 없음을 확인 하였다.

(4) 연료의 성분별 분사성상은 프로판의 연료 특성상 증기압이 높기 때문에 연료탱크 내부의 압력 및 분사압력이 높아 상이 변하여 액상과 기상이 동시에 분사됨을 알 수 있었다. 또한 부탄에 비해 프로판연료의 분사유량이 많음을 확인 하였다.

(5) 프로판 100%의 시동시간은 2.64 sec. / 부탄 100%의 시동시간은 1.13 sec.로 프로판의 함량이 증가하면 시동지연이 발생함을 확인하였다. 시동시 연료탱크 내부압력 또한 부탄 100%의 압력이 프로판 100% 대비 1/2수준임을 확인 하였다. 시동시간 지연은 연료 성상에 따른 보상된 제어로직의 적용으로 개선 가능할 것으로 예상된다.

프로판 연료 특성상 증기압이 높고 연료탱크 내부 압력이 높아 액상분사의 엔진에서 시동성 등 약간의 문제점을 나타내고 있으나 배출가스 측면에서는 프로판의 함량이 증가 할수록 연료의 반응조절계수를 고려할 때 배출가스 저감에는 유

리하다. 따라서 프로판의 분사유량이 부탄에 비해 많고 인젝터의 허용분사 압력을 감안하여 각 연료의 압력과 온도에 따른 적절한 EMS 조절을 통해 분사량을 제어 한다면 다양한 LPG 조성에 적용할 수 있는 LPG 차량의 개발이 가능할 것이라 판단된다.

참고문헌

- (1) Seongwon Choi, Muchang Lim, Hochul Kwak, Cha-Lee Myung and Simsoo Park, 2006, "An Experimental Study on Individual Hydrocarbon Exhaust Characteristic and Combustion Phenomena of LPLi Engine for Various LPG Fuel," *Spring Conference Proceeding of the KSAE*, Vol. 3, pp. 1916~1921.
- (2) Seongwon Choi, Hochul Kwak, Cha-Lee Myung and Simsoo Park, 2006, "Experimentation on Fuel Leakage Mechanism of LPLi Vehicle to Meet the ULEV Regulation," *FISITA 2006 World Automotive Congress*, F2006P356.
- (3) Yamaguchi, S., Ishii, M., Yasujawa, H., Tsusaka, S., Takigawa, B. and Tanuma, M., 2003, Research and Development of LPLi Liquid Fuel Injection System (3rd. Report) - "Fuel Composition and Exhaust Emission Performance of LPG Vehicle with Liquid Injection System," *JSAE Paper*, No. 20035038.
- (4) Jeongmin Lee and Nakwon Sung, 2002, "A Numerical Study on Flow Pattern in a LPG Engine and Liquid LPG Spray," *2002 Symposium of mechanical connection*, pp. 83~90.
- (5) Tanuma, M., Ishii, M., Kuzuma, T., Yamaguchi, S. and Iwasaki, M., "Research and Development of LPG Liquid Fuel Injection System(2nd. Report)-Development of LPG Liquid Fuel Injection and Control System," *JSAE Paper*, No. 20025035.
- (6) Kim, H. S., Min, K., Myung, C. L. and Simsoo Park, 2002, "A Combined Experimental and Computational Approach to Improve Catalyst Flow Uniformity and Light-Off Behaviour," *Proc Instn Mech Engrs.*, Vol. 216, *0Part D: J Automobile Engineering*.
- (7) David Kayes and Simone Hochgreb, 1996, "Development of a Time and Space Resolved Sampling Probe Diagnostic for Engine Exhaust Hydrocarbons," *SAE Paper*, No. 961002.
- (8) Jone B. Heywood, 1988, "Internal Combustion Engine Fundamentals," *McGraw-Hill*, pp. 596~619, 651~656.