

## 대형엔진용 액상분사식 LPG 연료공급방식에 대한 기초연구 (2)

### The Fundamental Study on Liquid Phase LPG Injection System for Heavy-Duty Engine (II)

김창엽\*, 오승묵\*, 강건용\*  
Changup Kim, Seungmook Oh, Kemyong Kang

#### ABSTRACT

Recently, several LPG engines for heavy-duty vehicles have been developed, which can replace some diesel engines that are one of a main source for air pollution in urban area. As a preliminary study on the liquid phase LPG injection (hereafter LPLI) system applicable to a heavy duty LPG engine, the engine output and combustion performance were investigated with various combustion chambers and fuel compositions using a single cylinder engine equipped. Experimental results revealed that ellipse, double ellipse and nebula type combustion chamber made a more advantage in breaking swirl flow into small turbulence scale than bathtub type. Especially, performance of nebula type showed most highest efficiency and engine output under lean mixture conditions. An investigation for various LPG fuel compositions was also carried out, and revealed that the case with 40% propane and 60% butane shows the lowest efficiency at stoichiometry, however, as the mixture became leaner its efficiency increased and became even higher for 100% propane case.

주요기술용어 : Liquid phase LPG injection(LPLI, LPG 액상분사), Oil spot method(유점법), Combustion chamber(연소실), Fuel composition(연료조성)

#### 1. 서론

액화석유가스(LPG) 연료는 청정연료로 이미 오래 전부터 소개되어 왔으며, 많은 연구와 상용화가 이루어지고 있다. 일반적으로 LPG 엔진의 가장 중요한 장치 중에 하나인 연료공급장치는 대부분의 국가에서 지금까지 믹서를 이용한 방식을 주로 많이 이용하고 있다. 우리 나라의 경우도 LPG 차량수는 이미 세계적인 수준이지만, 소비 기술 측면에서는 초기 수준을 갖 벗어난 폐회로 제어의 기체 믹서(mixer)를 사용하고 있는

상황이다.<sup>1)</sup> 그러나 최근에는 이러한 종래 방식에 비해서 여러 가지 장점을 갖는 최신의 폐회로(closed-loop) 제어 액상 분사방식에 대한 연구가 활발해 지고 있다.<sup>2)</sup> 특히, 유럽이나 선진 여러 국가에서는 이미 액상분사 시스템의 개발을 완료하고 이미 일부 국가는 실용화에 들어가 있다.<sup>3-7)</sup> 따라서 우리 나라도 주요 도시지역의 대기 오염의 주원인인 대형 디젤기관의 대체엔진으로 이러한 시스템의 적극적인 도입과 연구를 활발히 진행해야 할 필요성이 매우 절실한 것이다.

아직까지 우리 나라에 도입되지 않은 LPLI방식의 적용을 위하여 기초연구의 두 번째로 대형

\* 회원, 한국기계연구원 LP가스엔진연구사업단

엔진에서의 원활한 연소를 위하여 단기통 엔진을 이용하여 기초연구(1)에서 최적화된 선회강도하에서 연소실 형상이 연소성능에 미치는 특성과약을 하고자 하였다. 또한 일반적으로 사용 지역과 계절에 따라 연료조성에 차이가 발생하는 혼합연료인 LPG의 변화에 따라 엔진성능의 특성과약과 아울러 대형엔진에 적합한 LPG 연료의 선정에 대한 기초자료를 제공하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구의 실험엔진은 양산 6기통 11리터급 디젤엔진을 LPG용으로 개조하여 사용하였으며, LPG용으로 개조된 사양을 Table 1에 나타내었다. 실험엔진을 LPG 엔진으로 개조하기 위해서 점화플러그 어댑터를 설치하여 점화플러그를 장착할 수 있도록 하였으며 압축비는 기존의 16.5에서 10으로 낮추어 사용하였다. 실험엔진을 본 연구에 적합하도록 단기통 연소엔진으로 사용하기 위하여 기존의 6기통 양산엔진의 5기통을 강철 평판으로 막은 후 1번 실린더만을 사용하였다. 동력계는 직류형(DC) 150kW급을 사용하였으며 동력계를 엔진과 직결하여 사용하였다. 공기유량측정은 층류 유량계(Meriam 50MY15)를 이용하였고, 액상 LPG의 유량은 전자저울(balance)을 이용하여 측정하였다. 압력 데이터의 처리를 위해서 AVL사의 Indiset 620 장치를 사용하여 실시간 데이터 획득 및 처리를 하였고, 압력센

서는 S/P(spark plug)형 압력센서(AVL, GUI2S)를 사용하였다. 전체적인 실험 장치도를 Fig. 1에 나타내었다.

LPG의 액상분사를 위한 인젝터는 지멘스사의 하부연료공급(bottom feed)형의 Deka-II 인젝터를 사용하였고 이의 제어와 점화시기 조절은 IC5460 장비를 이용하였다.

### 2.2 실험방법

주요변수들의 실험은 1500rpm의 일정 엔진회전수 조건과 80°C의 냉각수 출구조건을 일정하게 유지시켰다. 압력해석은 각 조건에서 300사이클을 취득하여 해석하였고, 노킹(knocking)현상을 좀 더 자세하게 파악하기 위해서 가속도계센서를 엔진에 설치하여 동시에 측정, 해석하였다. LPG의 액상유지를 위해서 연료공급라인을 질소가스를 이용해서 LPG의 액화에 필요한 압력 이상으로(15bar) 가압하여 공급하였고, 연료의 액상여부를 연료라인의 압력과 온도 측정을 통해 모니터링 하였다.

연소실 형상은 SI엔진의 연소에서 선회 등의 흡입유동을 피스톤의 형상과 피스톤과 엔진헤드 면에서 발생하는 스퀴시(squish) 유동에 의해서 압축말기에 깨뜨림으로써 급속연소에 필요한 충분한 난류강도의 확보하는 역할을 한다. 이러한 연소실 형상의 최적화 작업을 위해서 기존의 디젤형 피스톤을 압축비를 10으로 낮추면서 형상을 원형-육조형(bathtub), 타원형(ellipse), 더블 타원형(double ellipse) 및 네블라(nebula)형의 여러 가지 연소실 형상을 제작하여 이를 비교 실험하였다.

이들 형상들은 가장 기본적인 원형에서부터 여러 가지 논문 등에서 고 난류강도의 생성 등으로 급속연소에 적합한 형태들로 보고된 형태들이다.<sup>8-10)</sup> Fig. 2에는 이러한 제작된 연소실 형상을 간단히 나타내었다.

LPG연료는 일반적으로 프로판과 부탄이 주 성분으로 되어있으나 각 국가마다 혼합비율이 모두 다르다. 즉, LPG 연료는 유럽의 경우 프로

Table 1 Specifications of test engine

항목	사양
엔진형식	Inline 6기통 (1기통)
배기량	11.149 L (1858cc)
보어-행정	130 -140 (mm)
압축비	10
연료공급방식	액상분사방식

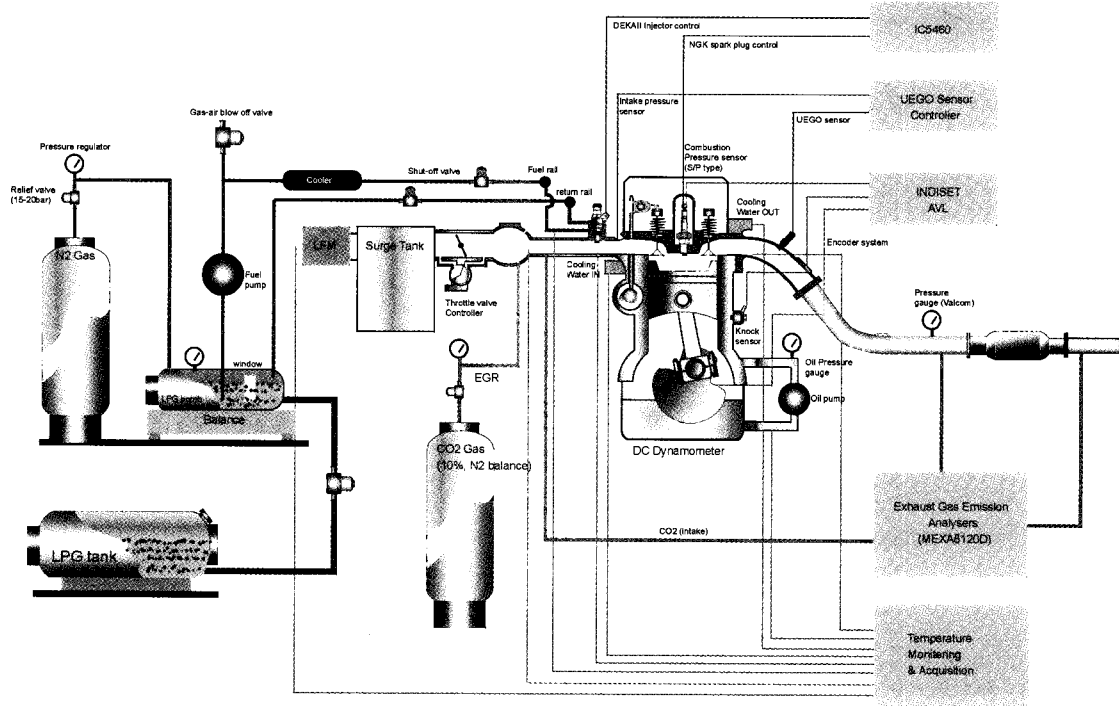


Fig. 1 Experimental apparatus



Fig. 2 Test combustion chambers

판과 부탄의 비율은 60 : 40이며, 미국의 경우는 프로판 100%를, 우리나라나 일본의 경우 수송용 LPG연료는 대부분 부탄 성분을 의미한다.

프로판은 부탄에 비해서 옥탄가가 높기 때문에 엔진의 압축비를 높여서 연소성능을 올릴 수 있는 가능성이 크다. 하지만 단위부피당 발생하는 열량은 상대적으로 부탄에 비해서 적기 때문에 엔진에 적용할 때 에너지 밀도는 부탄연료가 높다. 이처럼 연료조성변화에 따라서 엔진의 성능이 변하며, 아직 대형 LPG 엔진에 적합한 연료의 조성에 대한 정보가 부족한 상황에서 연료 조성에 따른 엔진의 성능특성과악이 필요한 것이다. 이를 알아보기 위하여 본 연구에서는 대형

단기통 엔진을 이용해서 LPG 연료의 프로판과 부탄성분의 비율을 100 : 0, 80 : 20, 60 : 40, 40 : 60으로 바꾸어 가며 실험을 진행하였다.

Table 2에는 실험에 사용한 LPG 연료의 연료 조성을 나타내었다. 연료조성을 알아보기 위하여 가스 크로마토그래피법(gas chromatography, HP5890A)을 이용하였고, 칼럼(column)은 PLOT/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 모세관 칼럼(30m\*0.53mm\*0.15 μm)을 사용하였으며 검출법은 FID(flame ionization detector)를 이용해서 성분을 분석하였다.

Table 2 Test fuel compositions

	C3 : C4			
	100 : 0	80 : 20	60 : 40	40 : 60
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1.01	1.77	0.84	1.23
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	97.83	83.45	59.42	43.70
i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.90	10.08	28.17	40.46
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.26	4.70	11.10	14.61

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 연소실 형상변화에 따른 비교

앞서 제작된 연소실에 따른 엔진연소실험에 앞서 연소실 형상변화가 압축말기의 난류생성에 어떠한 영향을 미치는가를 정성적으로 파악하기 위하여 유점법(oil spot method)을 적용하였다.

유점법은 엔진에서 일어나는 평균적인 흡-배기 유동흐름을 가시화 하는 방법으로 물체표면 근방의 유체흐름을 알아보는데 유리한 방법이다. 일반적으로 엔진에 적용시, 고온, 고압의 TDC(top dead center)부근의 유체흐름을 모사할 수 있다.<sup>9,10)</sup> 사용된 시약은 유동 파라핀(liquid paraffin), 이산화 티탄(titanium dioxide) 및 올레인산(oleic acid)으로 이를 혼합하여 피스톤 상단에 일정간격으로 도포한 후 엔진을 800rpm 정도로 일정시간 운전한다. 다시 엔진을 분해하여 피스톤 상부의 도포된 시약의 움직임을 일정 위치에서 촬영하였다. 이때 흡입 선회비는 2.3으로 일정하게 하였으며 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3에서 나타나 있듯이, 일반적인 육조형의 경우, 원형의 연소실에서 선회유동을 깨뜨릴 만한 기하학적인 구조의 부재로 일반적인 스퀴시 유동만에 의해서 선회유동이 깨지며 난류가 생성되게 된다. 따라서 압축말기에도 강한 선회유동이 남아 있는 모습을 볼 수 있다. 이에 비해서 타원, 더블타원 및 네블라형은 스퀴시 유동 이외에도 형상이 갖은 기하학적인 특징으로 유동이 비교적 잘 깨짐을 볼 수 있다. 즉, 타원형과 더블타원형은 연소실을 중심으로 연소실 형상대로의 선회유동이 발생하며 원형 연소실에 비해서 비교적 잘 깨어진 선회유동을 관찰할 수 있다. 특히, 네블라형은 대칭적인 선회유동의 충돌로 초기유입의 선회유동과는 완전히 다른 형태의 유동형태가 발생하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4에는 단기통 엔진을 이용해서 압축비 10, 선회비 2.3, 1500rpm, WOT의 같은 조건하에서 피스톤 형상을 원형, 타원형, 더블타원형, 네블라형으로 바꾸어가며 실험한 결과를 보여주

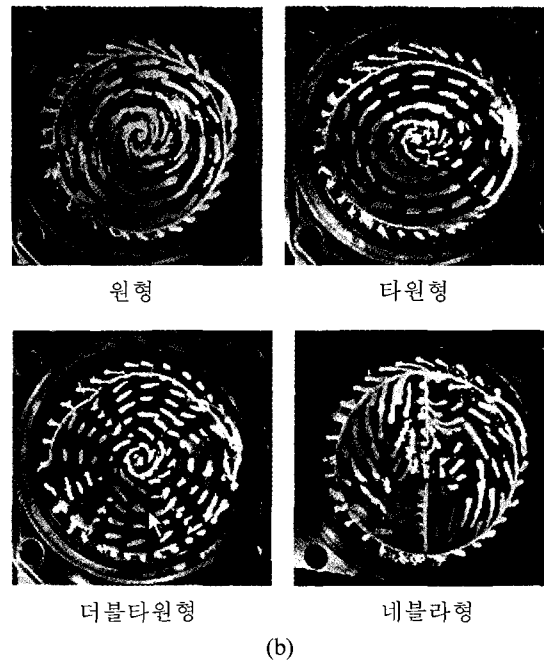
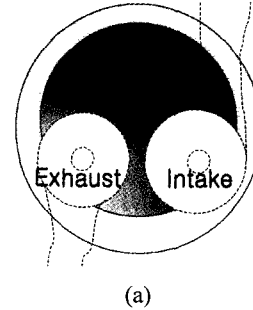
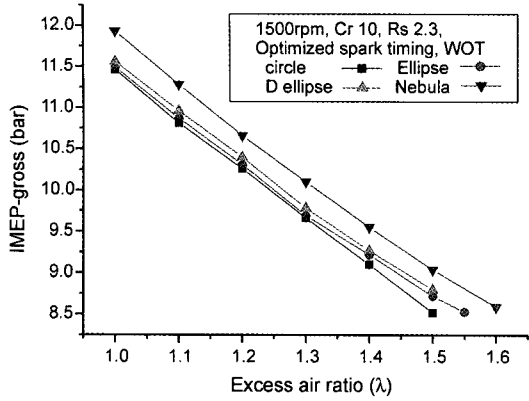
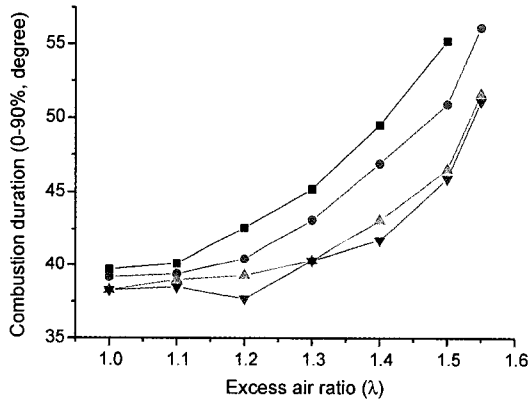


Fig. 3 Configuration of piston (a) and the result of oil spot method (b) with various combustion chambers

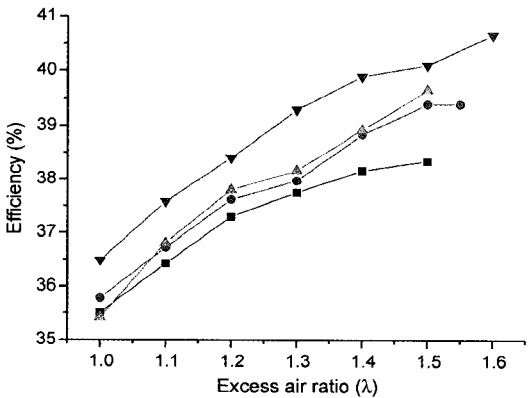
고 있다. Fig. 4(a)에서 기본형인 원형이 가장 낮은 엔진 출력값을, 타원, 더블타원, 네블라형 순으로 높은 출력값을 나타내었다. 특히, 네블라형은 다른 형태에 비해서 월등히 높은 출력성능을 보여주었으며 이 같은 결과는 희박연소 조건에서도 동일하게 나타났다. 이는 네블라형이 난류강도의 생성에 가장 유리한 연소실 형상을 가지고 있기 때문으로 판단된다. Fig. 4(b)의 연소기간선도에서도 연소실 형태에 따른 매우 뚜렷한 차이를 볼 수 있으며 네블라형의 급속연소현상이 잘 나타나 있다. Fig. 4(c)는 연소실 형상에 따



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 Engine outputs(a), combustion durations(b) and efficiencies(c) with various combustion chambers

른 효율선도를 나타내었다. 기본의 원형 연소실이 가장 낮은 효율을 보이며 타원과 더불어타원이

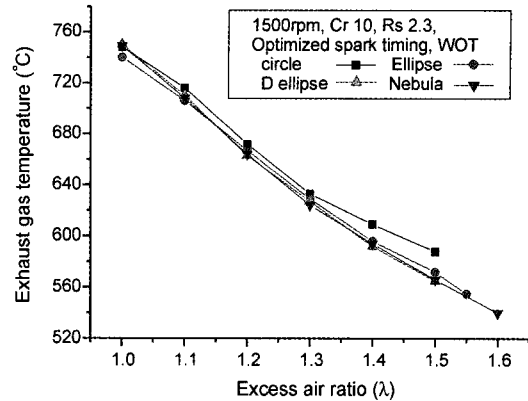


Fig. 5 Exhaust gas temperatures with various combustion chambers

이 보다 높은 효율을, 네블라형이 가장 월등한 효율 값을 보이고 있다.

이로써 선회유동을 잘 깨뜨리는 형태의 연소실이 급속연소에 필요한 난류강도의 생성에 유리하며 연소에서도 가장 높은 연소효율을 보인다는 것을 알 수 있다. 또 연소실 형태의 변화로 인한 난류강도의 증가가 희박운전한계를 연장시키는 결과를 나타냈으며, 특히 네블라형은  $\lambda = 1.6$ 에서도 안정적인 연소를 보여주었다. 각 형상에 따른 효율의 차이는 역시 이론공연비보다는 연소가 불안한 희박영역조건으로 갈수록 더욱 커졌다.

연소실 형태변화에 따른 배기온도의 변화도 알아보았으며 이를 Fig. 5에 나타내었다. 배기가스선도에서도 효율이 좋은 네블라형이 가장 낮은 배기가스온도를 가져왔으나 연소실 형태에 따른 차이는 그리 크지 않았다.

### 3.2 LPG 연료조성변화에 따른 비교

본 대형실험엔진의 경우, 최저 압축비가 제한되었기 때문에 부탄성분이 대부분인 일반적인 LPG연료의 경우, 노킹의 증가로 정상적인 운전이 불가능하다고 판단되었기 때문에 본 연구에서는 부탄비율이 60%까지만 실험을 실시하였다. 추후 가능하다면 그 이상의 연료에 대해서 자료를 보충하는 것이 필요하리라 본다.

연료조성에 따른 엔진의 성능을 비교하기 위하여 압축비 10, 선회비 2.3, 1500rpm, WOT 조건에서 연료의 조성을 바꾸어 가며 실험을 하였고,

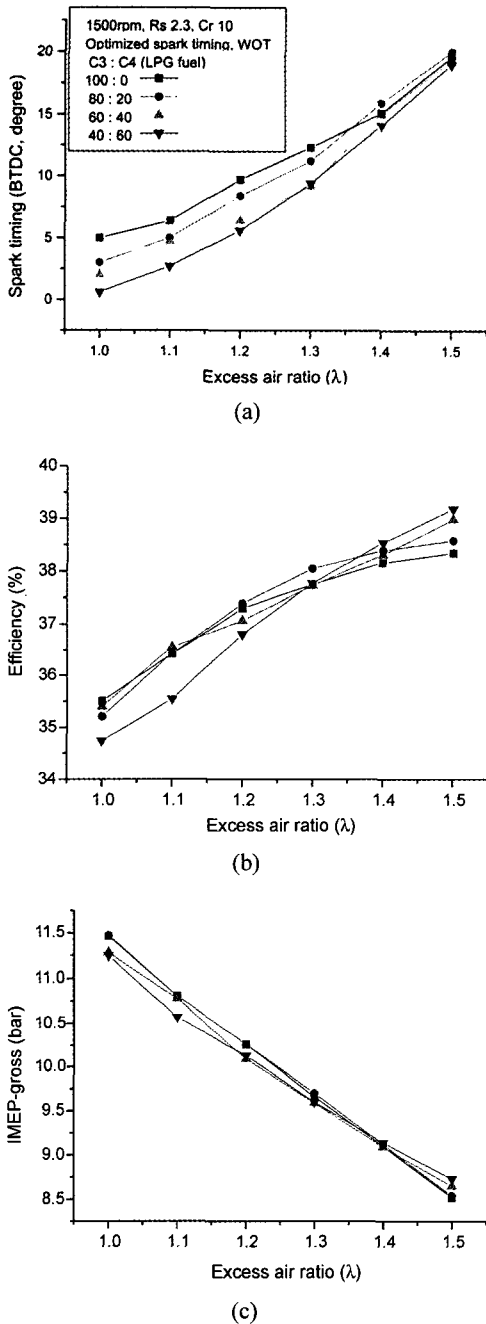


Fig. 6 Optimized spark timing (a), efficiency (b) and engine output (c) with various fuel compositions

Fig. 6에 노킹이 일어나지 않는 최대진각 점화시기, 효율 및 출력값을 나타내었다. Fig. 6(a)의 압축비 10의 조건에서는 이론공연비 조건에서 프로판 100%의 경우도 노킹으로 인하여 MBT 점화시기를 적용하지 못하고 BTDC 5도를 사용하였다. 또 연료 중의 부탄 성분이 늘어나면, 옥탄가가 낮아지므로 노킹현상이 증가하여 점화시기가 점점 지각되게 된다. 부탄 60%의 경우는 점화시기가 거의 TDC까지 물러남을 확인할 수 있다. 이처럼 지각되는 점화시기는 희박연소에 따라서 점차 회복이 되는데,  $\lambda=1.3-4$ 의 조건에서는 노킹현상의 영향을 완전히 벗어나 60%, 부탄에서도 MBT 점화시기를 적용할 수 있으며 연료조성간 차이가 없어졌다. 이는 희박연소기법의 적용에 의한 노킹현상의 감소결과 때문으로 판단된다.

Fig. 6(b)의 효율선도를 보면, 이론공연비 조건에서는 연료조성변화에 따른 점화시기가 최적화 되지 못하기 때문에 효율이 차이를 보이는데, 프로판 100%의 연료에 비해서 프로판 40%, 부탄 60% 연료는 2.8% 정도의 효율감소가 나타났다. 그러나 이 역시  $\lambda=1.3-4$  부근의 희박영역에서 점화시기가 최적화됨에 따라 회복되는 것을 볼 수 있으며,  $\lambda=1.5$  영역에서는 오히려 역전되는 현상도 볼 수 있다. 이는 부탄의 단위부피당 열량이 프로판보다 크기 때문으로 판단된다. Fig. 6(c)의 엔진의 출력선도에서도 같은 경향을 확인할 수 있다.

종합적으로 100% 프로판 연료와 선진 유럽의 액상분사식의 연료로 사용되는 프로판 60%, 부탄 40%의 연료의 성능을 비교한다면, 이론공연비 영역에서 점화시기 3도 정도의 차이가 발생하지만 이로 인한 효율 및 출력의 변화는 거의 나타나지 않았다.

#### 4. 결론

대형 액상분사식 LPG엔진의 기초연구로서 단기통엔진을 이용한 실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) Bathhtub형 연소실이 가장 낮은 연소성능을 보이며 타원이나 더블타원, 네블라 등 기하학적으로 선회유동을 난류강도로 전환하는데 유리한 방식이 엔진의 연소성능의 향상에도 유리하였다.

2) 특히, 네블라 형태는 선회유동의 충돌로 인해서 난류강도의 생성이 유리하며 이에 따라 원형에 비해서 효율 약 3%, 출력 약 4% 증가가 나타났다.

3) LPG 연료 중 부탄성분의 증가에 의한 엔진 성능의 감소현상은 노킹이 억제되는 공연비  $\lambda = 1.3$ 에서 1.4 부근의 희박영역에서 거의 없어짐을 확인하였다.

4) 100% 프로판 연료와 유럽수준의 프로판 60%, 부탄 40%의 연료를 비교하면, 이론공연비 영역에서는 점화시기 3도 정도의 차이가 발생하지만 효율의 차이는 거의 나타나지 않았다.

## 후 기

본 연구사업은 LPG 자동차 보급협의회(LG가스, SK가스)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

- 1) World LP Gas Association, "Automotive LP gas - Today's Fuel for a Cleaner Tomorrow," 3rd Edition, 1998.
- 2) M. van der Steen, "Gaseous Fuels: Past Experiences and Future Expectations," TNO-paper

- VM9608, 1996.
- 3) B. Hollemans, L. Conti, P. de Kok, "Propane the 'Clean' Fuel as the Next Century for Light and Heavy Duty Vehicles," TNO-Paper VM9504, 1995.
- 4) M. van der Steen, J. de Rijke, J. J. Seppen, "Stoichiometric and Lean Burn Heavy-Duty Gas Engines - A Dilemma between Exhaust Emissions and Fuel Consumption?," TNO-paper VM9605, 1996.
- 5) B. Hollemans, M. de Roos, L. Conti, G. Margaria, "Regulated and Non Regulated Emissions of a Commercially Attractive LPG Vehicle," TNO-paper VM9502, 1995.
- 6) B. R. Lutz, R. H. Stanglmaier, R. D. Matthews, J. Cohen, R. Wicker, "The Effects of Fuel Composition, System Design and Operating Conditions on In-System Vaporization and Hot Start of a Liquid-Phase LPG Injection System," SAE 981388, 1998.
- 7) J. A. Caton, M. McDermott, R. Chona, "Development of a Dedicated LPG-Fueled Spark Ignition Engine and Vehicle for the 1996 Propane Vehicle Challenge," SAE 972692, 1997.
- 8) B. Johanson, K. Olsson, "Combustion Chamber for Natural Gas SI Engine Part 1 : Fluid Flow and Combustion," SAE 950469, 1995.
- 9) T. Sakurai, M. Iko, K. Okamoto, F. Shoji "Basic Research on Combustion Chambers for Lean Burn Gas Engines," SAE 932710, 1993.
- 10) S. Goto, D. Lee, J. Shakal, N. Harayama, F. Honjyo, H. Veno, "Performance and Emissions of an LPG Lean-Burn Engine for Heavy-Duty Vehicles," SAE 1999-01-1513, 1999.