

## 정적연소기내 H<sub>2</sub>-LPG 연료의 혼합 비율에 따른 연소 및 배출가스 특성에 관한 실험적 연구

이성욱<sup>1†</sup> · 김기종<sup>2</sup> · 고동균<sup>2</sup> · 윤여빈<sup>2</sup> · 조용석<sup>1</sup>

<sup>1</sup>국민대학교 자동차공학과, <sup>2</sup>국민대학교 자동차공학전문대학원

### An Experimental Study on the Combustion and Emission Characteristics of Hydrogen Enriched LPG Fuel in a Constant Volume Chamber

SEANGWOCK LEE<sup>1†</sup>, KIJONG KIM<sup>2</sup>, DONGKYUN KO<sup>2</sup>, YUBIN YOON<sup>2</sup>, YONGSEOK CHO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Prof. Department of Automotive Engineering, Kookmin University, 861-1 Jeongneung-dong Songbuk-gu, Seoul 136-702, Korea

<sup>2</sup>Graduate School of Automotive Engineering, Kookmin University, 861-1 Jeongneung-dong Songbuk-gu, Seoul 136-702, Korea

**Abstract** >> Finding an alternative fuel and reducing environmental pollution are the main goals for future internal combustion engines. The purpose of this study is to obtain low-emission and high-efficiency by hydrogen enriched LPG fuel in constant volume chamber. An experimental study was carried out to obtain fundamental data for the combustion and emission characteristics of pre-mixed hydrogen and LPG in a constant volume chamber (CVC) with various fractions of hydrogen-LPG blends. To maintain equal heating value of fuel blend, the amount of LPG was decreased as hydrogen was gradually added. Exhaust emissions were measured using a HORIBA exhaust gas analyzer for various fractions of hydrogen-LPG blends. The results showed that the rapid combustion duration was shortened, and the rate of heat release elevated as the hydrogen fraction in the fuel blend was increased. Moreover, the maximum rate of pressure rise also increased. These phenomena were attributed to the burning velocity which increased exponentially with the increased hydrogen fraction in the H<sub>2</sub>-LPG fuel blend. Exhaust HC and CO<sub>2</sub> concentrations decreased, while NOX emission increased with an increase in the hydrogen fraction in the fuel blend. Our results could facilitate the application of hydrogen and LPG as a fuel in the current fossil hydrocarbon-based economy and the strict emission regulations in internal combustion engines.

**Key words** : LPG(liquefied petroleum gas, 액화석유가스), Hydrogen(수소), Constant volume chamber(정적연소기), Combustion(연소), Emission(배출가스), HLPG(H<sub>2</sub>-LPG혼소 연료)

#### Nomenclature

A : area, m<sup>2</sup>

c<sub>p</sub> : specific heat, J/Kg K

#### Subscripts

0 : initial condition

m : mass equation

H<sub>2</sub> : hydrogen

<sup>†</sup>Corresponding author : hcju@inha.ac.kr

[ 접수일 : 2012.5.29 수정일 : 2012.6.18 게재확정일 : 2012.6.22 ]

## 1. 서 론

수송용 자동차의 유해배출가스로 인해 도심 대기 오염이 날로 증가하고, 각국의 자동차 배기가스규제는 점차 강화되고 있는 현 시점에 청정 및 대체에너지 개발에 대한 사회적 국가적 관심과 요구가 증대되고 있다. 이러한 사회적 분위기에 힘입어 청정연료로 각광 받고 있는 LPG(liquefied petroleum gas)연료의 수요가 날로 증가하고 있으며, 국내에서는 LPG 차량의 비중이 16% 이상으로 상당히 높은 수준이고 LPG 관련 연구가 활발히 진행됨에 따라 관련 기술력도 선진국 수준에 도달해 있다.

현재 국내 LPG 자동차는 기관성능 및 연료소비율을 개선시키고 유해배출가스의 저감 등을 도모하기 위하여 개발된 LPLi(liquified petroleum liquid injection) 시스템이 적용되어 가장 보편적으로 상용 되고 있다<sup>1)</sup>.

가솔린에 비해 LPG는 탄소와 수소 비율이 낮고 황화합물이나 이산화화합물 등 공해요소가 적지만, 탄화수소계 연료로써 CO<sub>2</sub>, CO 및 HC 배출은 불가피하다. 또한 점차 강화되고 있는 배기가스규제 앞에선 더 이상 청정연료로써의 입지를 유지하기 어려울 것으로 예상됨에 따라, 환경오염이 적고 에너지 효율을 향상시킬 수 있는 신개념 LPG 연소기술의 필요성이 대두되고 있다.

CNG(compressed natural gas) 차량의 경우 CNG에 수소를 첨가함으로써 연소속도 증대와 유해배출가스가 감소하는 결과를 보였으며, 이는 선행되어진 많은 실험적 연구로부터 입증 되었다<sup>2)</sup>.

수소는 단위 질량 당 발열량이 크고, 연소 후 생성물이 수증기가 대부분인 청정연료이며, 높은 반응성으로 인해 연소속도가 빠른 특성을 가지고 있다. 이러한 수소를 LPG 연료와 혼합하여 사용한다면 상대적으로 연소속도가 느린 LPG 연료의 연소속도는 증대 될 것이며, 이로 인한 연소 및 배기특성이 개선될 것으로 예상된다<sup>10)</sup>. 또한 수소의 넓은 가연범위 특성으로 인해 안정된 희박연소가 가능하여 탄소세 대비를 위한 CO<sub>2</sub> 저감도 도모할 수 있을 것으로 기대된다.

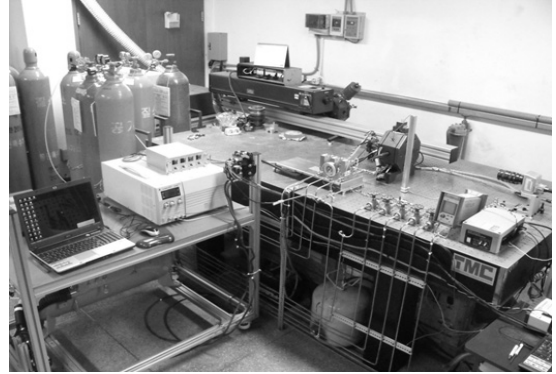


Fig. 1 Photo. of experimental apparatus

따라서 본 연구는 정적연소기(constant volume chamber. 이하 C.V.C)를 제작하고 당량비와 다양한 수소-LPG 혼합 비율을 변수로 설정하여 C.V.C 내 연소를 통해 H<sub>2</sub>-LPG 연료의 연소 및 배출가스특성을 파악하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

다양한 수소 비율에 따른 H<sub>2</sub>-LPG 연료의 연소 및 배출가스 특성을 파악하기 위해 본 연구에서 제작하고 사용한 정적연소 실험장치를 Fig. 1에서 보여주고 있으며, 그 개략도를 Fig. 2에 도시하였다.

C.V.C는 보어 86mm, 폭 39mm로 기존 2.0 LPLi 엔진과 유사한 연소실 형상으로 모사하여 제작하였다.

흡·배기 밸브를 설치하여 흡기 밸브로 공기, 질소 및 수소가스를 MFC(mass flow controller)를 통해 연소실 내로 유입 시켰고, 연소 후 생성된 배기가스를 배기 밸브를 통해 배출시켰다.

LPG 연료탱크, 레귤레이터 유닛, 인젝터를 바탕으로 LPLi 차량과 동일한 연료 공급시스템<sup>1)</sup>을 제작하였으며, PFI(port fuel injection) 방식을 모사 적용하기 위해 흡기관에 LPLi 인젝터를 설치하여 유입되는 공기와 함께 LPG 연료를 분사하였다.

연소압력 측정을 위해 piezo type 압력센서를 연소

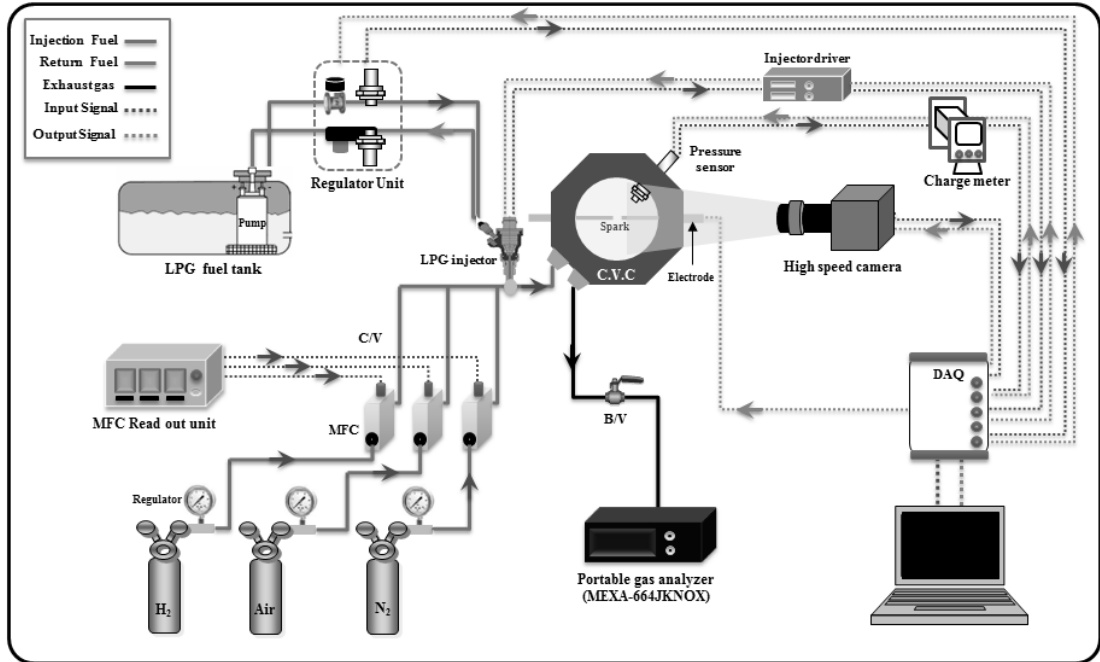


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

실 내 설치하였고, 점화를 위한 스파크 플러그를 연소실 중앙에 위치하도록 설치하였다. 연소 가시화 촬영을 위해 정적연소기 앞면에 직경 120mm, 두께 25mm의 강화유리를 설치하였고, 고속카메라를 통해 연소 과정을 촬영하였다.

2.2 실험방법

Table 1은 본 연구에서 진행한 H<sub>2</sub>-LPG 연료 정적 연소실험 조건을 보여주고 있다. LPG 연료의 조성은 butane 70%+propane 30% 이며, 본 논문에서 언급하

는 H LPG(H<sub>2</sub>+LPG) 연료는 각각의 당량비 조건에서 LPG 100%의 발열량을 기준으로 수소비율에 따른 LPG와 수소의 혼합 연료로 정의하며, 편의상 각각을 H LPG 10%, 20%, 30%, 40%로 표기하였다. 또한 연소실 내 분위기 온도는 모든 실험 조건에서 353K으로 일정하게 유지하였다.

실험변수는 당량비( $\phi$ ) 및 수소첨가율(%)이며, LPG 연료에 대한 수소첨가율은 식 (1)로 정의하였다<sup>3)</sup>.

$$H_2(\%) = \frac{\dot{m}_{H_2} \times Q_{LHV(H_2)}}{\dot{m}_{C_4H_{10}, C_3H_8} \times Q_{LHV(C_4H_{10}, C_3H_8)} + \dot{m}_{H_2} \times Q_{LHV(H_2)}} \quad (1)$$

Table 1 Experiment conditions

Bore × Width	86.2 mm × 39 mm
Displacement	228 cm <sup>3</sup>
Ambient temperature	353K (80℃)
Ignition position	The center of C.V.C
Fuel	LPG 100% H LPG 10%, 20%, 30%, 40%
Equivalence ratio	0.6, 0.8, 1.0

Piezo 압력센서와 charge meter를 이용하여 연소실 내 압력변화를 측정하였으며, national instruments사의 DAQ(data acquisition: DAQ-NI USB-6251)와 Labview 8.5로 programing 된 제어 로직을 통해 연소 압력 데이터를 확보하였다. 또한 연소압력 데이터를 바탕으로 열 발생률을 산정하여 H LPG 연료의 연소 특성을 파악하였다.

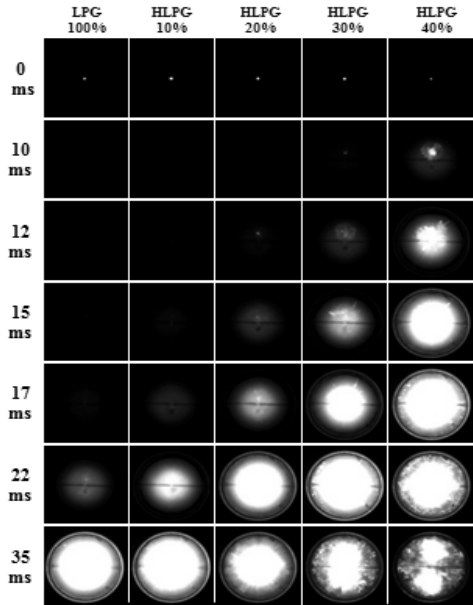


Fig. 3 Sequence of photographs from high-speed movies taken in special visualization C.V.C;  $\phi=1.0$

점화시기, high speed camera trigger, LPLi 인젝터 분사기간(duration) 또한 Labview 8.5로 programing 된 제어 로직을 통해 제어하였으며, LPG 연료는 분사압력 7 bar로 일정하게 유지하고 분사기간의 변화에 따라 분사량을 조정하였다.

주요한 연소 후 생성물인 CO<sub>2</sub>, CO, THC 및 NO<sub>x</sub> 는 HORIBA MEXA-554 JKNOX 분석기를 통해 각 발생 조건에서의 배출농도를 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 H LPG 연료 연소가시화

실험 조건에 따른 H LPG 연료의 연소특성을 파악하기 위해 고속카메라를 이용하여 연소과정을 촬영하였으며, 그 결과를 Fig. 3에서 Fig. 5까지에 나타내었다.

연소과정을 촬영한 결과 모든 당량비 조건( $\phi=1.0\sim 0.6$ )에서 수소첨가율이 증가함에 따라 화염전파속도가 빨라지는 것을 확인하였다. 이 결과는 수소의 난

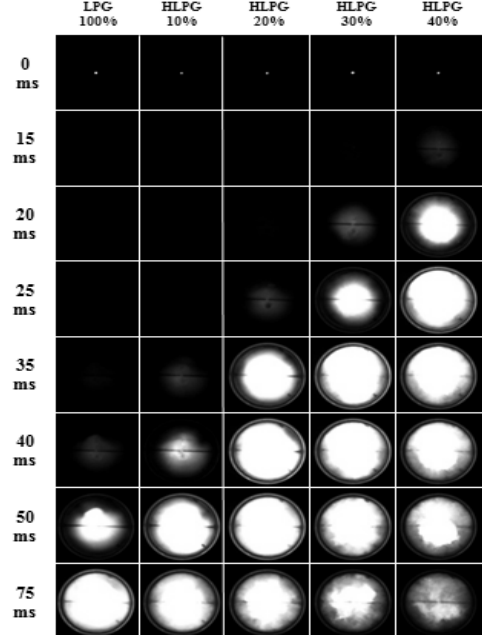


Fig. 4 Sequence of photographs from high-speed movies taken in special visualization C.V.C;  $\phi=0.8$

류연소속도(1.7m/s)와 LPG(butane)의 난류연소속도(0.4m/s)의 차이에 의한 것으로 판단된다<sup>8,9)</sup>.

당량비( $\phi$ ) = 0.6, LPG 100%의 조건의 경우 연소

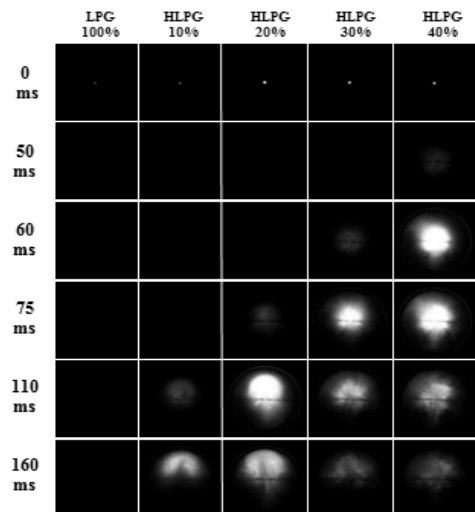


Fig. 5 Sequence of photographs from high-speed movies taken in special visualization C.V.C;  $\phi=0.6$

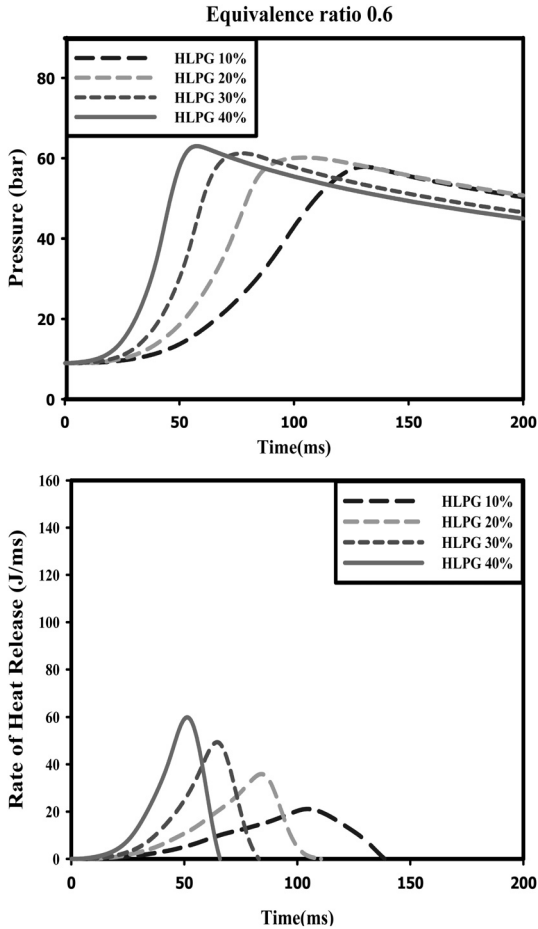


Fig. 6 Measured pressure and calculated heat-release rate in C.V.C operating at  $\phi=0.6$ , ambient temperature=363K

가 이루어지지 않았지만 HPLG 10% 조건부터는 연소가 일어나는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 수소의 넓은 가연범위(flammable limits)로 인해 희박한계가 확장된 것으로 판단되며, 수소를 첨가함으로써 희박한 조건에서도 안정된 화염이 생성되고 성장하는 것을 확인하였다.

### 3.2 HPLG 연료 연소압력 및 열 발생률

Fig. 6에서 Fig. 8까지는 각각의 당량비 조건( $\phi = 0.6, 0.8, 1.0$ )에서 수소첨가율에 따른 HPLG 연료의 연소압력 및 열 발생률을 나타내고 있다. 당량비 조

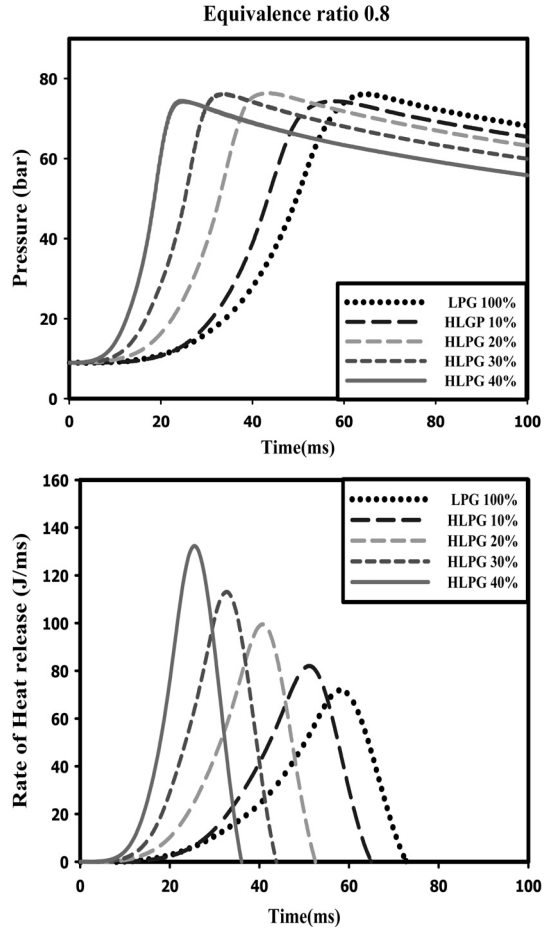


Fig. 7 Measured pressure and calculated heat-release rate in C.V.C operating at  $\phi=0.8$ , ambient temperature=364K

건이 농후해질수록 연료량의 증가로 인해 최대압력 및 최대 열 발생률이 상승하였으며, 각각의 당량비 조건에서 수소첨가율이 증가할수록 연소압력 및 열 발생률이 더 급격하게 상승하는 경향을 보이고 있다.

당량비( $\phi$ ) = 0.6, LPG 100% 조건에서 연소가 일어나지 않았으며, HPLG 10% 조건에서는 거의 실화에 가까운 연소가 발생되었고, 이 후 수소첨가율이 증가하는 조건일수록 더 급격한 압력상승과 열 발생률을 보였다. 또한 수소를 첨가하면 희박한 조건에서 안정된 연소가 가능하다는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 수소의 낮은 최소점화에너지와 빠른 화염전파특성으로 인한 화염의 생성 및 성장의 가속화로, 점화지연기

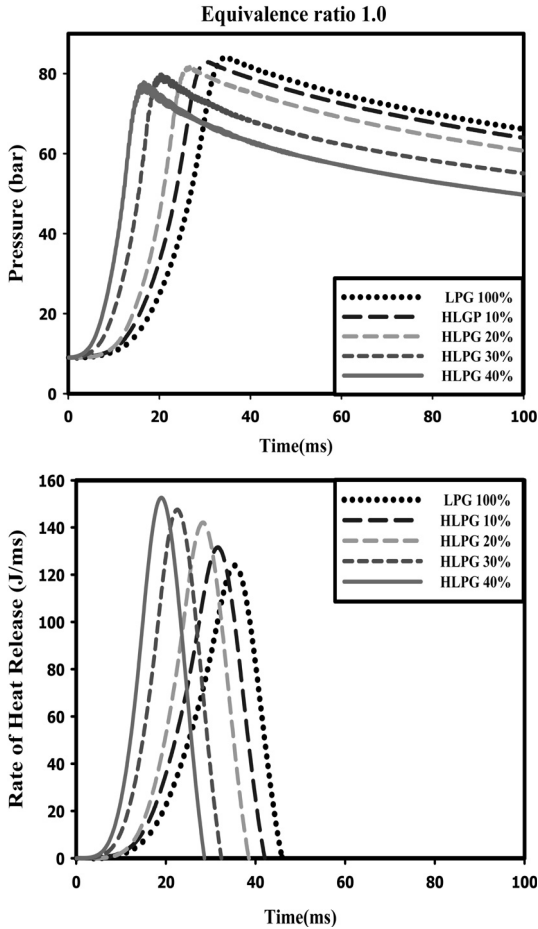


Fig. 8 Measured pressure and calculated heat-release rate in C.V.C operating at  $\phi=1.0$ , ambient temperature=364K

간이 감소하고 연소속도가 증가한 결과로 보여 진다.

당량비( $\phi$ ) = 1.0 조건에서는 수소첨가율이 증가 할수록 최대압력이 약간씩 낮아지는 경향을 보였다. Fig. 10에서 당량비( $\phi$ ) = 1.0 조건의 CO 배출농도 결과를 보면, 수소첨가율이 증가하여 H LPG 연료의 H/C 비율이 증가함에도 불구하고 거의 동일한 CO 배출농도를 나타내고 있다. 이는 수소첨가율이 증가할수록 불완전연소 또한 증가하여 최대압력이 낮아진 것으로 판단된다.

### 3.3 H LPG 연료 배출가스 특성

Fig. 9는 당량비 및 수소첨가율에 따른 H LPG 연

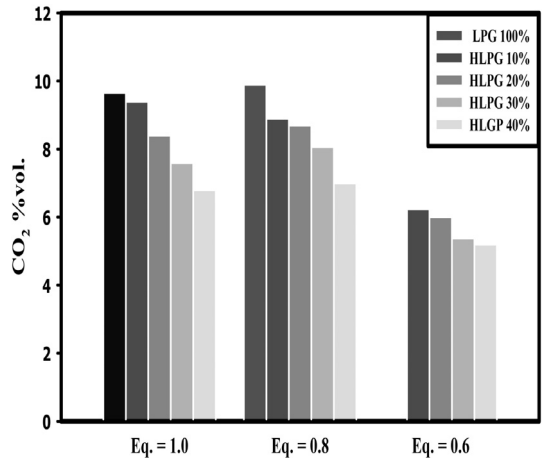


Fig. 9 CO<sub>2</sub> emission for equivalence ratios and various fraction of Hydrogen-LPG blends

료의 CO<sub>2</sub> 배출농도를 보여주고 있다. 각각의 당량비 조건에서 수소첨가율이 증가 할수록 H LPG 연료의 H/C 비율 증가로 인해 CO<sub>2</sub> 배출농도가 감소하는 것으로 판단된다.

Fig. 10은 당량비 및 수소첨가율에 따른 H LPG 연료의 CO 배출농도를 보여주고 있다. 희박한 조건( $\phi$  = 0.8, 0.6)에서는 높은 산소농도로 인해 CO는 거의 배출되지 않았으며, 이론공연비( $\phi$  = 1.0) 조건에서 수소 비율이 증가하여 H/C 비율이 증가함에도 불구

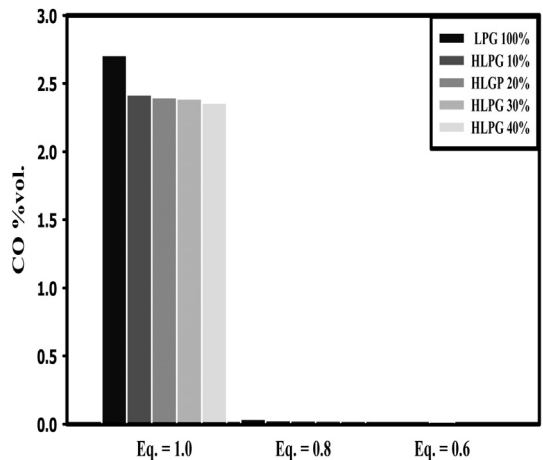


Fig. 10 CO emission for equivalence ratios and various fraction of Hydrogen-LPG blends

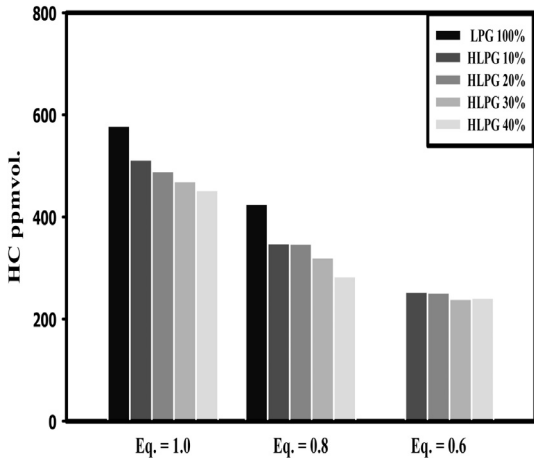


Fig. 11 HC emission for equivalence ratios and various fraction of Hydrogen-LPG blends

하고 CO 배출농도는 거의 동일한 수준을 보이고 있다. 이는 HPLPG 20%, HPLPG 30%, HPLPG 40% 일 때 전체 연료체적 중 수소는 각각 68%, 78%, 84% 체적 비율을 차지하기 때문에 체적 대비 상당한 질량의 LPG연료가 국부적으로 농후한 영역을 형성하였을 것으로 예상되며, 이러한 영역에서 발생된 불완전연소의 결과로 보여 진다. 또한, 이 결과는 Fig. 9에서 당량비( $\phi$ ) = 1.0, 0.8 조건의 CO<sub>2</sub> 배출농도가 비슷한 수준을 보이는 원인인 것으로 판단된다.

Fig. 11은 당량비 및 수소첨가율에 따른 HPLPG 연료의 HC 배출농도를 보여주고 있다.

화염이 연소실 벽에 접근함에 따라 상대적으로 저온의 연소실 벽면에 열을 빼앗겨 화염이 꺼지게 되는데, 이 때 생성되는 소염층(quench layer)에는 많은 미연탄화수소 성분이 포함되어 있는 것으로 알려져 있다. 또한 희박혼합기에서는 연소온도가 낮고 화염 전파가 느려 소염층의 두께가 두껍게 되어 다량의 HC가 배출된다<sup>5)</sup>.

각각의 당량비 조건에서 수소첨가율이 증가 할수록 HC 배출농도는 감소하는 경향을 보인다. 이는 수소첨가율이 증가할수록 HPLPG 연료의 동일 발열량 조건에 의해 LPG 연료가 감소하기 때문에 탄화수소계 연료에서만 배출되는 HC의 배출농도가 감소하는 것으로 판단된다. 부가적으로 화염전파속도가 증대

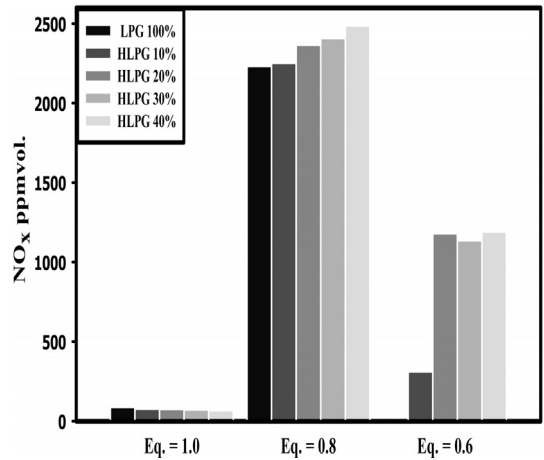


Fig. 12 NO<sub>x</sub> emission for equivalence ratios and various fraction of Hydrogen-LPG blends

하여 얇은 두께의 소염층이 형성된 것도 HC 배출농도 감소에 영향을 미친 것으로 판단된다.

또한 당량비 조건이 희박해질수록 HC 배출농도가 감소하는 경향을 보이는데, 이는 연료량의 감소와 더불어 수소의 넓은 가연한계로 인해 희박혼합기에서도 안정된 연소가 발생한 결과로 보여 진다.

Fig. 12는 당량비 및 수소첨가율에 따른 HPLPG 연료의 NO<sub>x</sub> 배출농도를 보여주고 있다.

일반적으로 탄화수소계 연료의 NO<sub>x</sub> 생성은 고온의 화염과 농후한 산소농도가 주된 원인이며, 부수적으로 열해리 등의 복잡한 상호작용에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다<sup>4,6)</sup>.

당량비( $\phi$ ) = 1.0 조건은 상대적으로 희박한 산소농도와 불완전연소로 인해 화염온도가 약간 낮아져 전반적으로 상당히 낮은 수준의 NO<sub>x</sub> 배출농도를 보이는 것으로 판단된다.

당량비( $\phi$ ) = 0.8 조건에서 가장 높은 수준의 NO<sub>x</sub> 배출농도를 보이고 있는데, 이는 약간 희박한 조건에서 연소효율 증대에 따른 고온의 화염과 농후한 산소농도로 인한 결과로 판단된다. 또한 수소첨가율이 증가할수록 NO<sub>x</sub> 배출농도가 증가하는 경향을 보이는데 이는 수소의 높은 단열화염온도(약 2400°C)로부터 발생된 thermal NO<sub>x</sub> 생성 효과로 보여 진다<sup>7)</sup>.

당량비( $\phi$ ) = 0.6 조건에서 산소농도는 더 농후해졌

지만, 연료량의 감소로 화염온도가 상당히 낮아져 당량비( $\phi$ ) = 0.8 조건 보다 NO<sub>x</sub> 배출농도가 감소한 것으로 판단된다. 또한 H LPG 10% 조건에서는 거의 실화에 가까운 연소로 인해 연소온도가 상당히 낮아 NO<sub>x</sub> 배출농도가 낮은 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

다양한 H<sub>2</sub>-LPG 혼소 비율에 따른 H LPG 연료의 연소 및 배출가스 특성을 파악하기 위해 수소첨가율(%)과 당량비( $\phi$ )를 변수로 설정하고 정적연소기 내 연소를 통해 연소가시화, 연소압력 및 배출가스농도를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 수소첨가율이 증가할수록 연소 압력 및 열 발생률이 급격히 상승하고, 수소의 낮은 최소점화에너지와 빠른 화염전파특성으로 인한 화염의 생성 및 성장의 가속화로 인해 점화지연기간이 감소하고 연소속도가 증대하는 것을 확인 할 수 있었다.
- 2) 수소연료의 높은 반응성과 빠른 화염전파속도로 인해 H LPG 연료는 기존의 LPG 연료 보다 희박한계가 확장되어 희박한 영역( $\phi$  = 0.8, 0.6)에서도 안정된 연소가 가능함을 확인할 수 있었다.
- 3) 당량비( $\phi$ ) = 0.6 조건에서는 수소첨가율 20% 이상부터 연소가 이루어졌으며, 특히 수소첨가율이 30% 일 때 안정된 연소와 더불어 가장 낮은 수준의 배출가스(CO<sub>2</sub>, CO, HC, NO<sub>x</sub>)농도를 보임으로써 최적의 수소비율임을 확인 할 수 있었다.
- 4) 각각의 당량비 조건에서 수소첨가율이 증가할수록 연소특성이 개선되었으며, H/C 비율 증가로 인해 탄화수소계 연료에서 배출되는 CO<sub>2</sub>, CO 및 HC 배출농도가 감소하는 것을 확인 할 수 있었다.
- 5) H LPG 연료의 수소비율이 증가할수록 수소의 높은 단열화염온도로 인해 NO<sub>x</sub> 배출농도가 증가하였지만, 수소의 넓은 가연한계특성으로 인해 안정된 희박연소가 가능한 조건에서 NO<sub>x</sub>를 저감 할 수 있음을 확인하였다.

#### 후 기

본 연구는 환경부 Global-Top Project 친환경자동차기술개발사업단의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. Woojik Lee, Intak Kim, Seungwook Yang "Development of HMC Mono LPG Injection System", Journal of KSAE, 2004, pp. 159-167.
2. Dongkyun Ko, Hanseung Lee, Sulki Choi, Yunsung Lim, Yongseok Cho, Seangwock Lee, "A Study on the combustion and Emission Characteristics of HCNG for Vehicle application", 2010, KSAE10-A0122.
3. Gyeung Ho Choi, Jae Cheon Lee, Yon Jong Chung, Jerald Caton and Sung Bin Han, "Effect of Hydrogen Enriched LPG Fuelled engine with Converted from a Diesel Engine", Journal of Energy Engineering, Vol. 15, No. 3, 2006, pp. 139-145.
4. Thomas Wallner, "Efficiency and Emissions Potential of Hydrogen Internal combustion engine vehicles", SAE paper 2011-26-0003.
5. J. B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", New York: McGraw Hill, 1988.
6. EunSeong Cho, SukHo Chung, and HyungMo Kim, "Characteristics of Lean Premix Combustion Improvement and NO<sub>x</sub> Reduction with Hydrogen Addition", Journal of KOSCO, 2005.
7. Jonghyun Kim, JaePark Lee, CheolHong Hwang and ChangEon Lee, "NO<sub>x</sub> Formation characteristics with Strain rate in H<sub>2</sub>/Air Non-premixed Flames", Journal of KOSCO, 2008.
8. Ryuichi Yamaguchi, Alira Iijima, Hideo Shoji, and Koji Yoshida, "The Effects of Electric Fields on Flame Propagation of Homogeneous Hydrogen-Air Mixture", SAE paper 2011-32-0577.
9. Norifumin Mizushima, Toshiro Yamamoto, Jin Kusaka, and Sumsumu Sato, "Study on burning Velocity of LPG Fuel in an Constant Volume Chamber and SI Engine", SAE paper 2010-01-0614.



10. Juheyeong Cho, Junghong Park, Choonghwan Jeon, Kookyong Ahn, Hanseok Kim “Syngas-Oxygen Combustion Characteristics of a Swirl-Stabilized Premixed Flame”, Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, 2010, Vol. 21, No. 6, pp. 561-569