

# 직접분사식 LPG의 분무 및 연소 특성에 관한 연구

## A Study on the Spray and Combustion Characteristics of Direct-injection LPG

황성일\* · 정성식\*\*† · 염정국\*\*\*

Seong-Ill Hwang\*, Sung-Sik Chung\*\*† and Jeong-Kuk Yeom\*\*\*

(Received 06 January 2015, Revision received 01 March 2015, Accepted 02 March 2015)

**Abstract:** As advantages of LPG-DI engine, LPG is directly injected into combustion chamber during compression stroke to reduce compression temperature, prevent knock and spontaneous combustion, and adjust engine output using the amount of directly injected fuel, thereby reducing pumping loss caused by throttle valve. Stratified charge can be supplied nearby spark plugs to allow for overall lean combustion, which improves thermal efficiency and can cope with problems regarding emission regulations. In addition, it is characterized by free designing of intake manifold. Despite the fact that LPG-DI has many advantages as described above, there is lack of detailed investigation and study on spray characteristics, combustion flame characteristics, and ignition probability. In this study, a visualization experiment system that consists of visualization combustion chamber, air supply control system, emission control system, LPG fuel supply system, electronic control system and image data acquisition system was designed and manufactured. For supply of stratified charge in the combustion chamber, alignment of injector and spark plugs was made linear.

**Key Words :** LPG-DI(Liquefied Petroleum Gas-Direct Injection), Spark-Ignited(SI), Visualization System, Ignition Probability, Flame Propagation

### 1. 서 론

배출가스 규제에 따라 최근 자동차산업에서는 효율적인 대체에너지에 대한 관심이 집중되고 있다. 압축천연가스(CNG) 분사식 스파크점화엔진에 대한 연구<sup>1)</sup>도 활발히 진행되고 있으나, 대체연료 중엔 탄소의 함량이 적은 LPG를 액상 연료 분사

방식인 LPI(Liquid Phase injection)에 많이 적용하고 있다. 최근에는 저연비, 고효율 가스엔진과 같은 새로운 기술이 요구되는 상황에서 에너지원의 다변화와 청정연료로서의 가스연료 엔진에 대한 관심이 높아지고 있다.<sup>2)</sup>

가솔린기관에서 연료를 연소실에 직접 분사하는 방식은 연료소비율을 개선할 수 있는 주요 기

\*\*† 정성식(교신저자) : 동아대학교 기계공학과

E-mail : sschung@dau.ac.kr, Tel : 051-200-7654

\*황성일 : 동아대학교 기계공학과 대학원

\*\*\*염정국 : 동아대학교 기계공학과

\*\*† Sung-Sik Chung(corresponding author) : Department of Mechanical Engineering, Dong-A University.

E-mail : sschung@dau.ac.kr, Tel : 051-200-7654

\*Seong-Ill Hwang : Graduate School, Dong-A University.

\*\*\*Jeong-Kuk Yeom : Department of Mechanical Engineering, Dong-A University

술 중의 하나로 여겨지고 있으며,<sup>3)</sup> LPG-DI 엔진은 연소실에 연료를 직접 분사하는 방식으로 LPG를 직분식(DI: Direct injection)엔진에 적용하면 연료의 포화 증기압이 높아 대기압에서도 쉽게 기화하므로 공기유동이 적더라도 혼합기 형성이 유리하고,<sup>4)</sup> 연료 제어의 정확성으로 LPG 연료 정확도가 개선된다.

LPG-DI 혼합기 형성에서는 점화 플러그 부근에 성층급기 공급으로 희박연소에 도달할 수 있어 효율적인 연소가 가능하다. 또한 희박 연소는 낮은 펌프손실과 열손실을 낮추어 높은 열효율을 만든다.<sup>5)</sup> LPG 연료를 연소실에 직접 분사하는 방식이 적용된 신기술 예는 극히 적다. LPG-DI 엔진 개발에 있어 연소실 유동장에서 발생될 수 있는 연료분무 발달과정, 분무선단 관통거리 및 점화성에 대한 세부적인 연구의 필요성이 대두된다.

따라서 본 연구는 가시화 시스템을 LPG 연료 직분사 연소기에 적용하여 연소실 내의 분무 발달과정, 화염 발달과정, 점화성, LPG 연료의 성층화 특성 등을 다양한 조건에서 고찰하였다. 본 연구의 목적은 향후 실용화되는 4세대 LPG 직분사방식 엔진 연구에 기초자료를 제공하고자 함에 있다.

LPG 연료특성과 품질규격<sup>6)</sup>은 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Material properties of LPG

		LPG			
		Propane	Propylene	n-Butane	i-Butane
Molecular formula		C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>
specific gravity	Liquid (water=0.1MPa, 294K)	0.501	0.914	0.579	0.557
	Gas (air=0.1MPa, 289K)	1.522	1.452	2.006	2.006
Boiling point (K)		231.9	226.3	273.5	262.3
Heat of vaporization (KJ/kg)		407.2	439.32	386.82	367.92
Vapor pressure (MPa, 294K)		0.835	1.030	0.210	0.310
Heating value	(KJ/kg)	505,26	49,098	49,728	49,602
	(KJ/m <sup>3</sup> )	25,662,000	-	29,022,000	-
Combustion range (in air, vol%)		2.10~9.50	2.00~10.00	1.80~8.40	1.80~8.44
complete combustion air content (kg/kg)		15.71	14.80	15.49	15.49
Octane number		125	85	91	99

Table 2 The quality standard of LPG

		Standard
Component (Mol. %)	C <sub>3</sub>	more than 90
	Butadiene	less than 0.5
Sulfur(ppm)		less than 100
Vapor pressure(40℃, MPa)		less than 1.53
active sulfur-copper strip corrosion (40℃, 1h)		less than 1
Residual material(ml, 100ml)		less than 0.05

## 2. 실험장치 및 방법

LPG 분무 및 연소특성을 조사하기 위해 가시화 연소실, 공기공급 제어시스템, 배출가스 제어시스템, 흡입온도 제어장치, 연료공급시스템, 전자 제어장치, 영상자료 취득 장치, 광학계 등의 주요 구성품으로 이루어진 가시화 실험 장치를 설계 및 제작하였다. Fig. 1은 가시화 실험의 전체 장치도이며, 실험조건은 Table 3과 같다.

Table 3 Experimental conditions

Item	Conditions
Spark plug position	20 mm from the L-shaped nozzle exit
Injection pressure (MPa)	0.6, 0.7, 0.8, 0.9
Ambient pressure (MPa)	0~0.3
Ambient temperature (K)	300, 350
Spark plug gap (mm)	0.5
Spark timing (ms)	6
Injection duration (ms)	10
L-shaped nozzle inner diameter (mm)	2

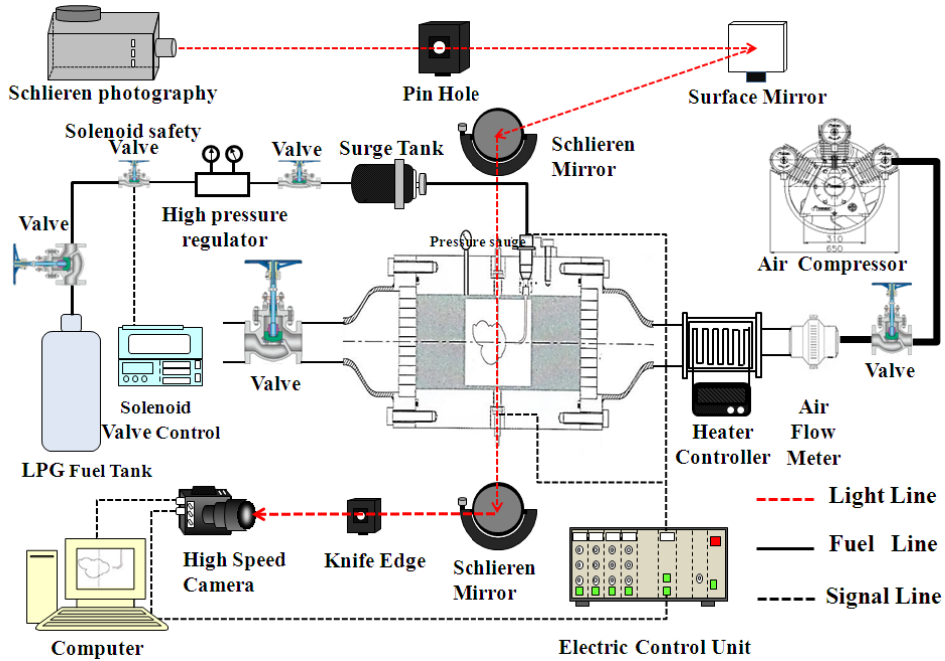


Fig. 1 Schematic apparatus of visualization experiment

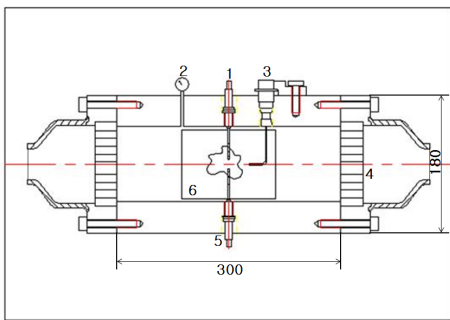


Fig. 2 Cross-sectional view of the combustion chamber

1. Spark plug center electrode
2. Pressure gauge
3. GDI injector
4. Honeycomb-shaped plate
5. Spark plug ground electrode
6. Window

## 2.1 연소실

본 연구의 시각화 실험을 위해 특별히 고안된 연소실을 설계하였다. Fig. 2는 연소실의 단면도이다. 연소실의 길이 300 mm, 너비 180 mm, 높이

180 mm, 부피는 2,355 cm<sup>3</sup>이며 압력계이지, 점화플러그, GDI 인젝터, 열전대를 연소실에 설치하였고, 연소실의 재질은 알루미늄을 선택하였다.

성층급기를 위해 “L”형 Nozzle을 GDI 인젝터에 부착하여 Nozzle의 출구를 연소실 중앙까지 연장시켰다. LPG 분사와 연소 과정을 연소실 내부의 다양한 분위기 조건 하에서 고찰하였으며, 2개의 석영유리는 광학 장치가 LPG 분무와 연소의 이미지를 얻을 수 있도록 관찰 창으로 설치하였다.

## 2.2 급기시스템

본 실험에서 급기시스템은 압축기, 필터, 공기 탱크, 공기유량계, 2개의 제어 밸브, 2개의 히터로 구성하였다. 2개의 히터는 급기시스템과 연결되어 흡기온도에 필요한 열을 공급한다. K-타입 열전대와 히터 컨트롤러는 분위기 온도를 조절하기 위해 함께 작동하며, 두 개의 밸브는 공기유속과 분위기 압력을 조절하기 위해 사용하였다.

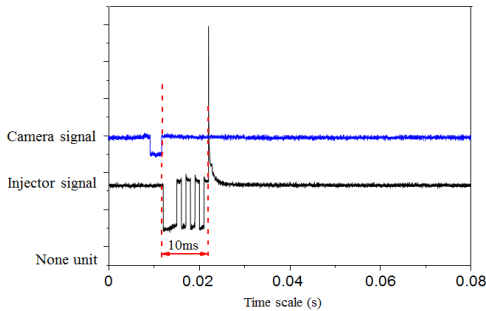
## 2.3 연료공급 시스템

LPG 연료공급시스템은 GDI 인젝터, LPG 탱크,

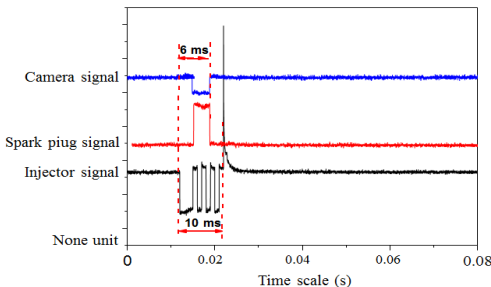
압력 레귤레이터, 서지탱크, 연료 압력계, 솔레노이드 안전밸브로 구성하였다.

GDI 인젝터와 “L”형 Nozzle은 LPG를 연소실 내에 분사하여 성층화를 돕는다. 인젝터의 분사압력은 압력 조절기를 사용하여 조절하였으며, LPG 딜리버리 파이프라인과 서지탱크의 온도는 냉각수 공급 장치를 통해 균일한 값으로 유지하였다.

## 2.4 전자제어장치



(a) Electronic control signals for taking injection process



(b) Electronic control signals for taking combustion process

Fig. 3 Electronic control signals

전자제어장치(ECU)는 분사시기, 분사기간, 점화시기, CCD 카메라 시기 등 제어 신호를 발생시키기 위해 사용하였으며, 전자제어장치를 내장한 Micom (PIC16C74, Microchip Technology, China)을 채택하였다. 인젝터 펄스 폭은 ECU로부터 입력되는 신호에 달려 있으며, 분사기간을 나타낸다.

Fig. 3(a)는 LPG 분무 과정을 기록하기 위해 사용되는 제어 신호를 보여주며, 분사기간은 10 ms

로 설정하였다. ICCD 카메라의 외부 트리거는 분사가 시작되면서 활성화된다.

Fig. 3(b)는 LPG 연소과정을 기록하기 위해 사용되는 제어 신호를 보여준다.

본 실험에서 점화시기는 분사가 시작된 후 불꽃이 발생하게 되는 시점을 가리킨다. 이 점화시기는 ECU로 쉽게 조절할 수 있으며, 본 실험에서는 점화시기를 6 ms로 설정하였다. 영상 촬영을 위해 점화시점에 ICCD 카메라가 작동하도록 설정하였다.

## 2.5 가시화 과정

LPG의 분사와 연소과정은 8비트 해상도에서 800×600 픽셀 이미지를 제공하는 ICCD 카메라 (Phantom Miro eX4, KOMI, Korea)를 이용하여 디지털 방식으로 기록하였다. 이 카메라는 이미지 그래버(grabber)를 통해 PC와 연결되었다. 솔리렌 사진 시스템은 LPG 분사 이미지를 얻기 위하여 유동밀도 분포의 변화를 활용하였다.

## 3. 결과 및 논의

### 3.1 분무 발달 과정

Fig. 4는 가시화 실험 장치에서 촬영한 전형적인 분무발달 과정이다. 실험조건은 분사압력 0.6 MPa, 분위기 온도 300 K, 분위기 압력 0.12 MPa이며, 연소실 내부의 Vair=0 m/s로 설정하였다.

LPG 분무 과정은 2단계로 이루어졌다. 1단계에서는 GDI 인젝터에서 “L”형 Nozzle 출구까지 통과하는 기간으로 3 ms가 소요되었다. 2단계는 LPG가 “L”형 Nozzle을 통과하여 연소실 중앙으로 난류유동과 상호작용을 하면서 통과할 때 일어나는데 이 기간에 LPG 분무가 발달하였다.

Fig. 5는 시간이 흐름에 따라 증가하는 LPG 분무선단 관통거리와 분무각을 나타낸다. LPG 분무선단 관통거리는 “LPG 분무선단으로부터 L형 Nozzle의 출구까지의 거리”로 정의된다. 분무각은 “LPG 분무가 반경방향으로 확산되는 각”이다.

분무가 Nozzle의 출구로부터 멀어지게 되면 분무 속의 공기량이 증가하기 때문에 분무속도는

감소하고 분무각은 증가했다. 그러나 약 6 ms 지점 이후부터는 분무는 천천히 계속 관통했고 분무 각은 거의 일정하게 되었다.

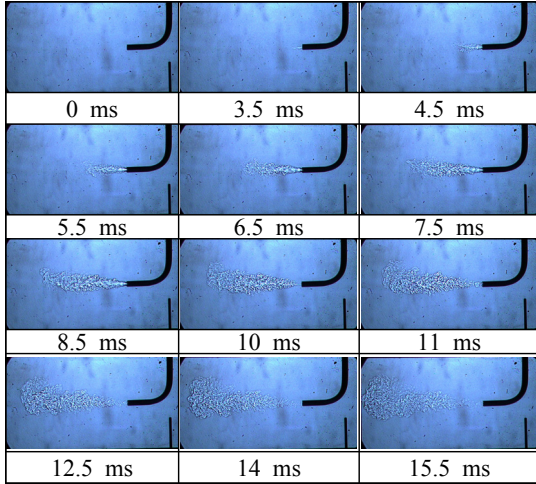


Fig. 4 Spray process without any impingement-wall

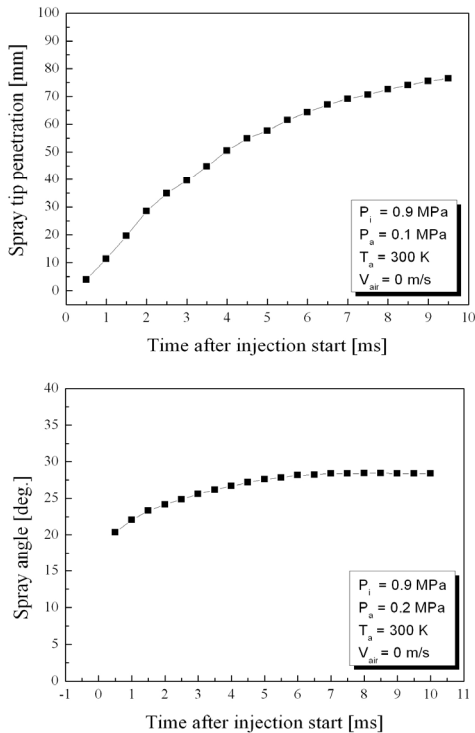


Fig. 5 Spray tip penetration and spray angle increased with time

### 3.1.1 분무 선단 관통거리

본 연구에서는 분사압력과 분위기 압력 등의 분위기 조건이 분무선단 관통거리에 미치는 영향을 고찰하였다. 분무선단 관통거리는 분사개시 후의 시간(t)과 분사압력(P<sub>i</sub>), 분위기 압력(P<sub>a</sub>)의 함수로 간주될 수 있다. 확보된 실험 데이터에 근거해, 연소실을 가로지르는 분사된 LPG에 대한 분무선단 관통거리 S의 예측함수를 도출했다.

Fig. 6은 분무선단 관통거리를 분사개시 후의 시간의 함수로 나타낸다. 데이터는 분무선단 관통거리가  $t^{0.55406}$ 으로 증가한다는 것을 나타낸다.

Hiroyasu 등은<sup>7)</sup> 다음과 같이 시간 대비 분무 선단 관통거리 S에 대하여 자신들의 데이터를 서로 관련시켰다

$$t < t_{break} \quad s = 0.39 \left( \frac{2\Delta p}{\rho_1} \right)^{\frac{1}{2}} t \quad (1)$$

$$t > t_{break} \quad s = 2.95 \left( \frac{\Delta p}{\rho_g} \right)^{\frac{1}{4}} (d_n t)^{1/2} \quad (2)$$

여기서, t<sub>break</sub>는 아래와 같다

$$t_{break} = \frac{29\rho_t d_n}{(\rho_g \Delta p)^{1/2}}$$

이들의 데이터에 따르면 분무선단 관통거리는 초기에는 시간 t에 따라 선형적으로 증가하고, 제트 분열이 일어난 후에는  $\sqrt{t}$ 로 증가한다. 본 연구의 결과에 따르면 분무선단 관통거리는  $t^{0.55406}$ 으로 증가하며, 이는 Hiroyasu 등이 제트 분열 이후로 관련시킨 결과와 매우 유사하다. 이는 또한 분무선단 관통거리가 초기 운동에서는 기상연료일 때보다 액상연료일 때 시간에 따라 더욱 빠르게 증가한다는 것을 의미한다. Fig. 7은 분무선단 관통거리를 분위기 압력의 함수로 나타낸다. 데이터에 따르면 분무선단 관통거리는  $P_a^{0.31253}$ 로 감소한다. Fig. 8은 분무선단 관통거리를 분사압력의 함수로 나타낸다. 데이터에 따르면 분무선단 관통거리는  $P_i^{0.25723}$ 로 증가한다. 이상과 같이 분무선단 관통거리는 다음과 같은 함수로 예측될 수 있다는 결론을 얻었다.

$$s = -100.77 * t^{0.55406} * P_i^{0.25723} * (P_a^{0.31253} - 0.812) \quad (3)$$

Dent<sup>8)</sup>가 전개한 평가식과 비교하고, 분무에 대한 가스 제트 혼합 모델에 기초할 때,

$$S = 3.07 \left( \frac{\Delta P}{\rho_g} \right)^{1/4} (td_n)^{1/2} \left( \frac{294}{T_g} \right)^{1/4} \quad (4)$$

본 실험에서는  $\Delta P = P_i - P_a$ 이다 ( $P_i \gg P_a$ ). 따라서  $\Delta P \approx P_i$ 이다. 그러므로 Dent가 얻은 데이터는 분무선단 관통거리가  $P_i^{1/4}$ 와  $t^{1/2}$ 로 증가한다는 것을 보여준다. 따라서 본 실험에서 얻은 데이터에 기초한 상관함수는 그 유사한 지수적 차수 때문에 분무선단 관통거리를 타당하게 예측한다고 간주될 수 있다.

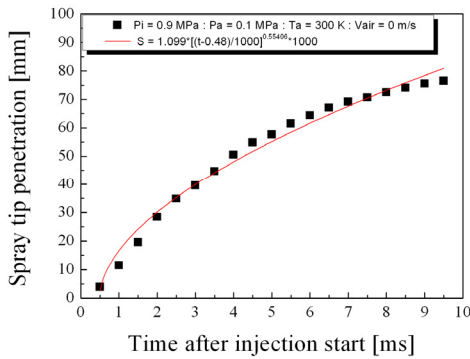


Fig. 6 Spray tip penetration as a function of time after injection start

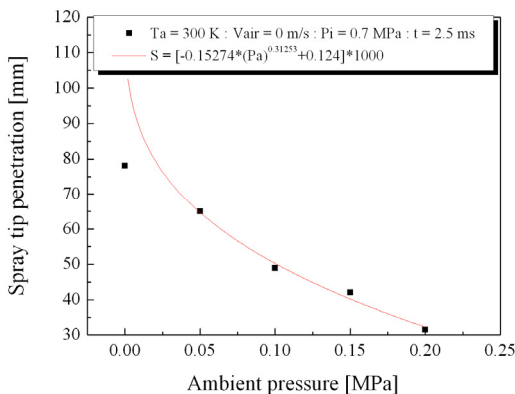


Fig. 7 Spray tip penetration as a function of ambient pressure

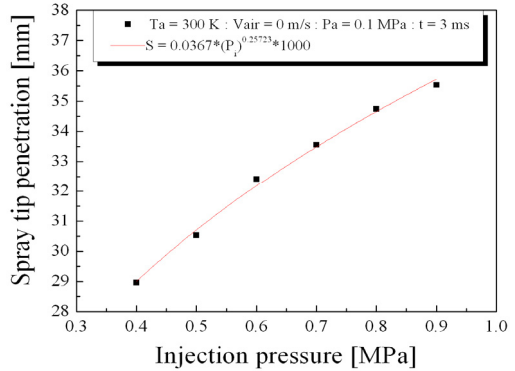


Fig. 8 Spray tip penetration as a function of injection pressure

### 3.2 화염 전파 과정

Fig. 9는 전형적인 화염전파 과정을 나타내고 있다. 그림과 같이 분사압력 0.7 MPa, 분위기 온도 및 압력 각각 300 K와 0.16 MPa, 분사시간 10 ms로 설정한 조건에서 실험하였으며, 연소실 내부의  $V_{air} = 0$  m/s, 점화시기는 분사개시 후 6 ms로 설정하였다. 스파크방전 위치는 L형 Nozzle 출구로부터 20 mm 떨어진 지점에 설치하였다.

스파크방전이 발생한 후 전기 아크가 전극들 사이로 확산되었으며, 이 아크는 밝은 백색을 띠는 하나의 점으로 관찰되었다. 화염핵은 스파크방전으로 형성되었고 전극 가까이에서 나타났다. 연소화염은 청염으로 관찰되었으며, 발달하는 화염은 난류 유동장과 상호작용에 의해 불규칙한 형태의 모양으로 발달하다가 일정시간이 지나면서 타원형으로 발달하였고, 화염핵의 외부 경계는 거의 매끄러운 구형이었다. 스파크 방전 시 점화 플러그 주변 혼합기의 운동과 조성이 초기 화염의 발달을 상당 부분 좌우하였다.

높은 난류의 결과로 화염면은 불규칙한 형태로 나타나며, 연소화염의 색상은 청염으로 둘러싸인 황백색으로 나타났다. 연소실을 가로질러 전파하던 화염은 청염이 황염으로 변환하여 주름현상과 같이 전파를 계속하다가 소멸하였다.

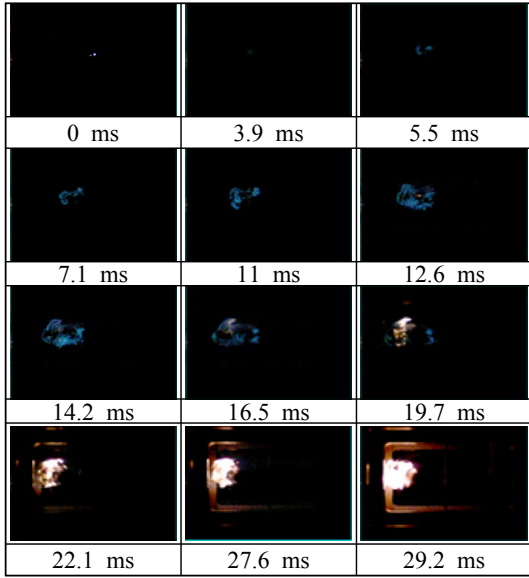


Fig. 9 A typical combustion flame propagation processes

### 3.2.1 화염의 기하학적 특징

화염전파 과정의 세부사항은 엔진의 연소와 배출에 상당한 영향을 미친다. 본 연구에서는 화염전파 과정의 이미지에 기초하여 화염면 위치나 화염 면적과 같은 화염의 몇몇 기하학적 특징을 측정하였다. 화염면 위치는 “스파크방전 위치의 축방향에서 화염면으로부터의 수평거리”로 정의하였다. 화염 면적은 “분무 중심선을 통과하는 수직면의 화염전파 면적”이다.<sup>9)</sup>

Fig. 10은 시간에 따라 증가한 화염면 위치와 화염면적을 보여준다. 화염면 위치에서는 6 ms에서 16 ms까지 화염전파 속도의 작용으로 급격한 기울기를 보이지만 화염 말기에 접어들면서 화염전파 속도와 함께 완만해지며, 말기에서는 화염면이 상류로 되돌아오는 특징이 관찰되었다.

화염면적에서는 면적의 크기가 선형적인 증가를 보이고 있는 것을 확인하였으며, 화염면 위치의 변동은 5 mm 이내로 불꽃 방전 후 약 4 ms가 지난 시점에 일어났다. 화염발달과 그에 따른 전파는 사이클에 따라 변동한다. 따라서 화염전파 특성의 변동, 즉 사이클 변화는 주로 화염소멸 단계에 주로 나타난다고 할 수 있다.

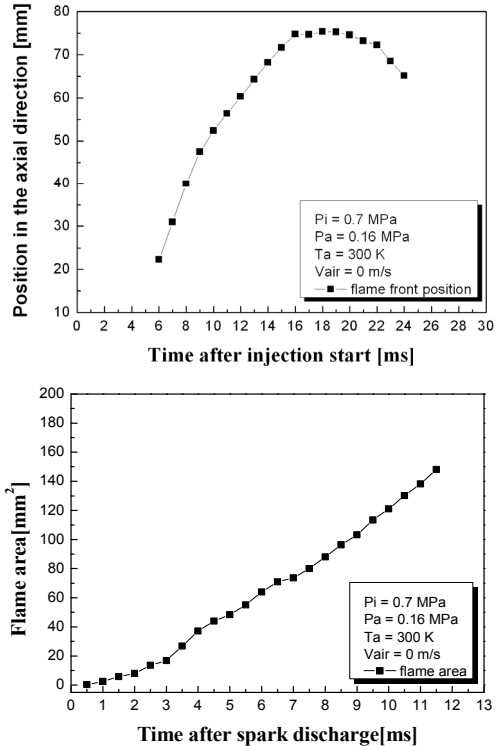


Fig. 10 Flame front position and flame area increased with time

### 3.3 점화성

스파크점화 기관에서 점화는 스파크방전 위치에서의 혼합기의 가연성 및 핵을 소멸시킬 수도 있는 국부적 분무속도에 좌우되는 확률적 성격을 띤다. 본 실험에서는 일정한 점화시기에 점화플러그 주변에는 국부적으로 농후한 혼합기를 공급하여 형성된 강력한 초기 화염에 의해 나머지 희박 혼합기도 완전 연소되도록 성층화 현상을 유도하였다.

본 실험에서 성공적인 점화란 “화염핵이 스파크의 결과로 형성되어 화염의 형성과 함께 안정된 화염으로 전파될 때 일어나는 것”<sup>9)</sup>으로 정의하였다.

#### 3.3.1 분위기 조건에 따른 점화성

Fig. 11은 분위기 압력 조건하에서 분사압력의 변화에 따른 점화성을 고찰한 결과이다. 분사압력 0.7 MPa, 0.8 MPa, 0.9 MPa 조건에서 분위기 압력

0.1 MPa~0.3 MPa까지 0.02 MPa 단계로 변화를 주었다.

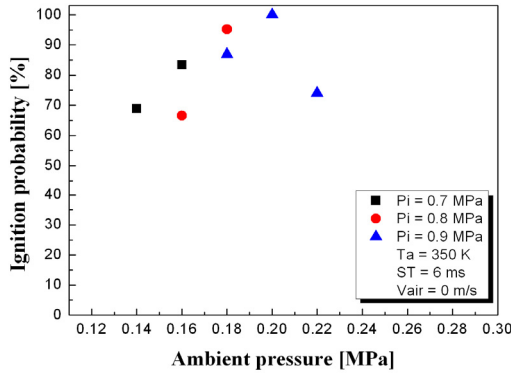


Fig. 11 Ignition probability along the injection pressure

높은 분사압력은 LPG 분무관통 속도가 높아 점화핵을 소멸시키기 때문에 L형 Nozzle의 출구 주변 스파크 위치에서의 점화성을 상당히 감소시켰다. 그러나 높은 분사압력은 분위기 압력이 높은 조건에서는 점화성이 양호한 결과가 관찰되었다. 낮은 분사압력에서는 낮은 분위기 압력조건에서 일부 점화는 가능했으나 과도하게 낮은 분사압력에서는 분무관통 속도가 느려 점화플러그의 점화원 발생 후 소멸 시까지 혼합기의 미 도달로 화염을 형성하지 못했다.

분위기 압력이 과도하게 높은 조건에서는 분무관통 속도가 느려 점화성이 낮았다. 그러나 일정한 구간의 분위기 압력에서 점화성이 높은 것은 분위기 압력이 분무관통 속도에 영향을 주어 적절한 시점에 점화원을 통과하는 시간적 차이에 의해 점화될 수 있었기 때문이다.

적절한 LPG-공기 혼합기만이 점화될 수 있었으며, 그에 반해 과농하거나 또는 과희박한 혼합기는 점화되지 못했다. 점화시기 또한 점화성에 상당한 영향을 미치는 것을 확인하였다.

#### 4. 결 론

액화석유가스 직분식(LPG-DI)의 분무 및 연소

특성에 대한 주요 연구결과는 다음과 같다.

1. 연소실을 가로지르는 분사된 LPG에 대하여 분무선단관통거리 S의 예측함수를 도출했다.
2. 분무발달과정의 고찰에서 분무선단 관통거리는 분사압력에 비례하고, 분위기 압력에 반비례하였다.
3. 점화성 고찰에서는 분사압력이 1 MPa이상 높으면 분무관통속도가 빨라 화염핵을 소멸시켜 점화성이 현저히 낮아졌고, 분사압력이 0.6 MPa 이하의 낮은 압력에서는 점화 원까지 도달시간이 길어져 화염핵이 소멸이후 관통하여 화염형성을 하지 못하였다. 그러나 높은 분사압력은 분위기 압력이 높은 조건에서는 점화성이 양호한 결과가 관찰되었으나 분위기 압력이 과도하게 높은 조건에서는 분무 관통 속도가 느려 점화성이 낮았다.
4. 본 실험에서는 점화시기 6 ms, 분사압력 0.7~0.9 MPa 범위일 때, 혼합기는 점화가 가능하였으며 분위기 압력이 0.14~0.22 MPa 일 때, 양호한 점화성 결과를 도출하였다.

#### 후 기

이 연구는 동아대학교 연구기금의 지원을 받았다.

#### References

1. D. H. Ha, J. M. Jin, S. I. Hwang, J. K. Yeom and S. S. Chung, 2012, "Diagnosis of the Combustion Characteristics of Spark Ignition Engine with Compressed Natural Gas(CNG) Injection Type", KSPSE, Vol. 16, No. 5, pp. 5-12.
2. Y. S. Park, C. W. Park, S. M. Oh, T. Y. Kim, Y. Choi, and Y. G. Lee, 2013, "Study of Combustion Characteristics with Variations of Combustion Parameter in Ultra-Lean LPG Direct Injection Engine", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 37, No. 6, pp. 607-614.
3. S. S. Kim, 2012, "The Spray Measurements of Gasoline, M85, E85, and LPG by a GDI injector



- in a Constant Volume Chamber”, KSPSE, Vol. 16, No. 6, pp. 5-10.
4. S. H. Lee, S. M. Oh, H. S. Kim, J. H. Cho, K. O. Cha, 2010, “Particulate Emissions from a Direct Injection Spark-Ignition Engine Fuelled with Gasoline and LPG”, The Korean Society of Automotive Engineers Annual Conference (KSAE10-B0018), 103-108.
  5. Y. H. Kim, M. Y. Kim, H. S. Jeon, C. S. Lee, 2004, “A study on the Characteristics of spray in a LPG direct injection engine”, The Korean Society of Automotive Engineers Annual Conference(KSAE04-S0028), Vol. I, pp. 174-179.
  6. Green Word With Korea LPG Association ([www.klpg.or.kr](http://www.klpg.or.kr)).
  7. H. Hiroyasu, T. Kadota and M. Arai, 1980, “Supplementary Comments: Fuel Spray Characterization in Diesel Engines”, Combustion Modelling in Reciprocating Engines, pp. 369-408.
  8. J. C. Dent, 1971, “Basis for the Compare of Various Experimental Methods for Studying Spray Penetration”, SAE paper, 710571, Vol. 80.
  9. Y. Liu, S. I. Hwang, J. K. Yeom and S.S. Chung, 2014, “Experimental study on the spray and combustion characteristics of SIDI CNG”, International journal of automotive technology, Vol. 15, No. 3, pp. 353-359.