

충돌벽면이 직분식 LPG의 분무 및 연소 특성에 미치는 영향에 관한 실험 연구

A Experimental Study on the Effects of the Impingement-wall on the Spray and Combustion Characteristics of Direct-Injection LPG

황성일* · 정성식**† · 염정국***

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

(Received 07 January 2015, Revision received 17 February 2015, Accepted 24 February 2015)

Abstract: As an alternative fuel that can be used in SI engine, LPG is one of clean fuels with larger H/C ratio compared to gasoline, low CO₂ emission, and small amount of pollutants such as sulfur compounds. When LPG is used in spark ignition engine, volumetric efficiency of the engine can be improved and pumping loss can be reduced by performing direct injection into the combustion chamber instead of port fuel injection. LPG-DI engine allows for lean combustion and stratified combustion under low load. In case of stratified combustion, air fuel ratio can be greatly increased compared to theoretic mixture ratio combustion. Improved thermal efficiency of the engine and reduced pumping loss can be expected from stratified combustion. Accordingly in this study, an experimental apparatus for visualization was designed and manufactured to study the combustion process of LPG after injection and ignition, intended to examine ignition probability and combustion characteristics of spark ignition direct injection(SIDI) LPG fuel. Ambient pressure, ambient temperature and fuel injection pressure were found as important variables that affect ignition probability and flame propagation characteristics of LPG-air mixture. Also, it was verified that the injected LPG fuel can be directly ignited by spark plug under appropriate ambient conditions.

Key Words : Spark-ignited direct-injection, Liquefied petroleum gas direct injection, Impingement-wall, Visualization system

1. 서 론

본 연구의 대상인 스파크 점화 직분식(SIDI)

LPG 엔진은 SI 엔진에 DI(Direct injection) 기술을 채택한 엔진의 한 종류이며, 연료는 액화석유가스(LPG)를 사용하였다. 이와 관련하여 스파크점화엔

**† 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, DongA University.

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

*Seong-Il Hwang : Graduate School, DongA University.

***Jeong-Kuk Yeom : Department of Mechanical Engineering, DongA University

진 관련 연구 분야의 하나로 연소실에 연료를 직접 분사(DI)하는 방식의 연구가 주목받고 있다. 이는 연료가 기화될 때 발생하는 증발잠열이 흡입 공기를 냉각시켜 엔진의 체적 효율이 증가한다. 이때, 부하에 맞는 연료의 분사량과 분사시기를 조정하여 균일혼합과 성층혼합 연소가 이루어지며, 이를 통해 초회박 연소를 이룰 수 있고, 펌프 손실을 저감하여 저공해, 저연비를 이룰 수 있다.¹⁻³⁾ 현재 액상 연료 분사(LPi; Liquid Phase injection)를 통해 액상 LPG 연료의 증발잠열을 이용하여 흡입체적효율을 상승시키고 출력을 향상시키는 방식이 적용되고 있지만, 아직까지 연소실에 LPG를 직접 분사하는 방식이 적용된 예는 극히 적다. LPG 연료는 포화 증기압이 높아 대기압에서도 쉽게 기화하므로 공기유동이 적더라도 혼합기 형성이 유리하고, 미연탄화수소의 발생 원인이 되는 벽면적심현상을 줄일 수 있다. 또한, 가솔린 연료보다 동일발열량 대비 CO₂ 발생이 상대적으로 적어 저탄소 연료로서의 장점도 가지고 있다.⁴⁾

따라서 본 연구에서는 LPG 연료를 직접분사방식의 엔진에 적용하기 위하여 가솔린직접분사 엔진을 기반으로 구성된 LPG-DI 엔진의 연소실을 묘사한 모델연소기를 제작하고, 연소실 내에 세 종류의 충돌벽면을 설계하여 최적화된 연소조건을 실현하기 위한 인자들을 실험적 방법을 통하여 규명하고자 ICCD 카메라를 이용하여 연소실 내의 연소화염을 가시화하고 이를 통한 실험 연구 결과를 LPG-DI 엔진 개발에 필요한 기초자료로 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 연소실 내의 분무와 화염을 가시화하기 위하여 사용한 실험장치의 개략도이며 연소실, 연료공급시스템, 급기시스템, 전자제어장치, 광학장치 등의 주요 부분으로 구성된다.

Fig. 2는 LPG 분사시작 후의 분무-벽면충돌 과정과 점화성, 화염전파 과정을 조사하기 위하여 설계 및 제작한 원형, 사각형, 평평한 세 종류의

충돌벽면을 보여준다.

Fig. 3은 원형 충돌벽면이 설치된 연소실을 나타낸다. 연소실의 길이 300 mm, 너비 180 mm, 높이 180 mm, 부피는 2,355 cm³이다. 연소실의 재질은 알루미늄을 선택하였다. 압력계이지, 점화플러그, GDI 인젝터, 열전대를 연소실에 설치하였으며 스파크방전 위치는 연소실 중앙이다. 성층급기를 위해 “L”형 Nozzle을 GDI 인젝터에 부착하여 Nozzle의 출구를 연소실 중앙까지 연장시켰다.

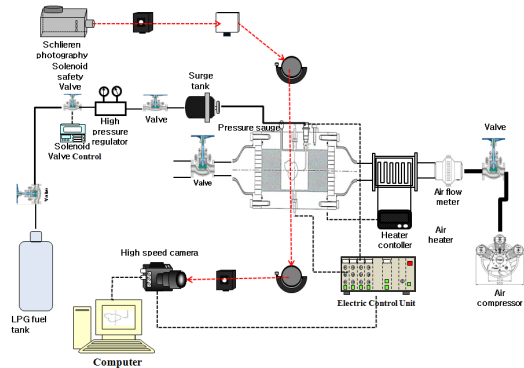


Fig. 1 Schematic apparatus of visualization experiment

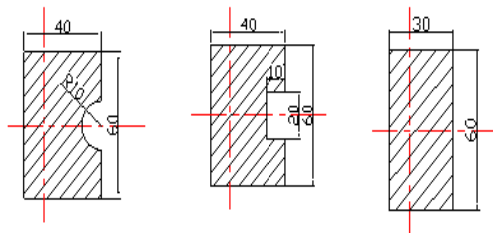


Fig. 2 Structure of impingement-wall

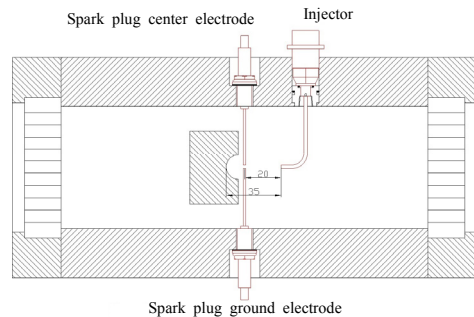


Fig. 3 Combustion chamber with impingement-wall

본 실험을 통하여 실시된 실험 조건을 요약하면 Table 1과 같고, LPG 연료특성과 품질규격⁵⁾은 Table 2와 Table 3에 나타내었다.

Table 1 Experimental conditions

Spark plug position	20 mm from the L-shaped nozzle exit
Impingement-wall type	Circle-shaped, square-shaped, flat
Injection pressure (MPa)	0.5, 0.6, 0.7
Ambient pressure (MPa)	0.1, 0.12, 0.14, 0.16, 0.18
Spark timing (ms)	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
Ambient temperature (K)	300
Spark plug gap (mm)	0.5
Injection duration (ms)	5
L-shaped nozzle inner diameter (mm)	2

Table 2 Material properties of LPG

		LPG			
		Propane	Propylene	n-Butane	i-Butane
Molecular formula		C ₃ H ₈	C ₃ H ₆	n-C ₄ H ₁₀	i-C ₄ H ₁₀
specific gravity	Liquid (water=1 atm, 20°C)	0.501	0.914	0.579	0.557
	Gas (air=1 atm, 15°C)	1.522	1.452	2.006	2.006
Boiling point (°C)		-42.1	-47.7	-0.5	-11.7
Heat of vaporization (kcal/kg)		101.8	104.6	92.1	87.6
Vapor pressure (kg/cm ² , 20°C)		8.35	10.30	2.10	3.10
Heating value	(kcal/kg)	12,030	11,690	11,840	11,810
	(kcal/ℓ)	6,110	-	6,910	-
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 3 The quality standard of LPG

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

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 충돌벽면이 없을 때의 분무과정

Fig. 4는 분사압력이 0.6 MPa이고 분위기 압력이 0.1 MPa일 경우, 충돌벽면이 없을 때 LPG의 전형적인 분무 과정을 나타내고 있다.

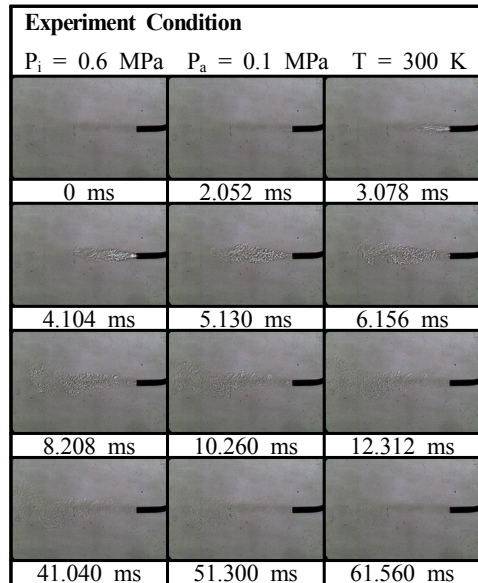


Fig. 4 Spray process without any impingement-wall

3.2 충돌벽면이 있을 때 분무-벽면충돌 과정

Fig. 5, 6, 7은 동일한 실험조건 하에서 충돌벽면이 있을 때의 실험과정을 나타내고 있다.

Fig. 5는 원형 충돌벽이 있는 조건에서 LPG가 분무-충돌되는 과정을 보여준다. 분사된 연료는 분사 시작으로부터 약 4 ms 후에 충돌벽면까지 관통하여

벽면에 충돌하였다. 충돌이 일어난 후, 연료 분무는 원형 벽면을 따라 이동하였다. 이때 분무 중심선 양 옆에서 서로 반대방향으로 회전하는 두 개의 큰 와류가 원형 캐비티에 생성된다는 것이 관찰되었다.

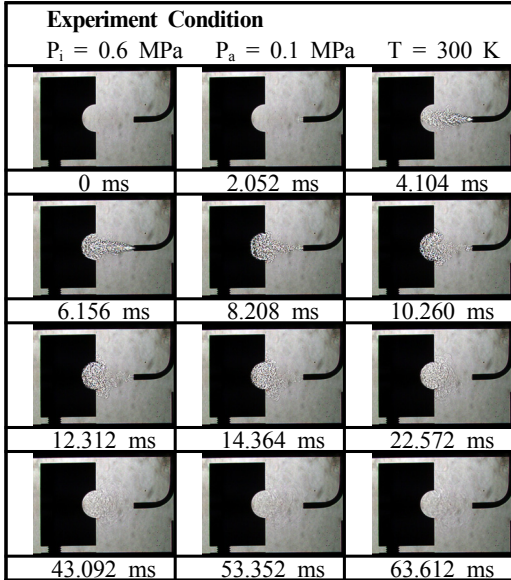


Fig. 5 Spray-wall impingement process with a circle-shaped impingement-wall

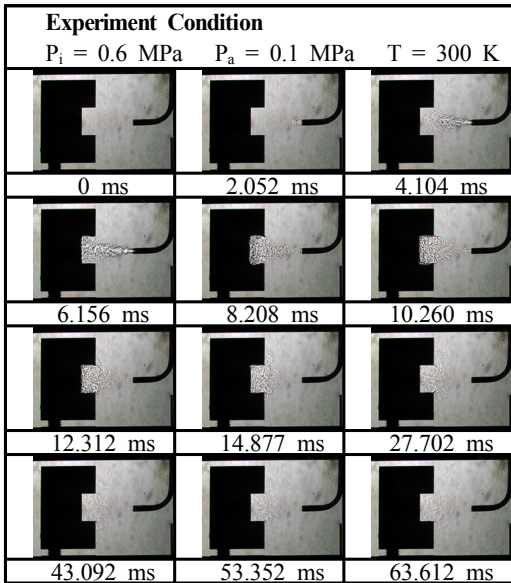


Fig. 6 Spray-wall impingement process with a square-shaped impingement-wall

분무-벽면충돌로부터 약 2 ms 후, 분무는 원형 벽면을 벗어나기 시작하였다. 이 원형 벽면 가장 자리에서 LPG 분무의 재유입 흐름이 발생하여, LPG 분무는 불꽃방전 위치 주변의 난류 방향으로 흘러들었다. LPG 분무의 재유입 흐름이 공기 유입을 증가시켜 LPG-공기 혼합비가 향상됨을 확인하였다. 분사 개시 10 ms 후, 분무는 원형 캐비티에서 빠져나와 상류 방향으로 확산하였다.

Fig. 6은 사각형 충돌벽이 있는 조건에서 LPG가 분무되고 충돌되는 과정을 보여준다. 사각형 충돌벽면에서의 분무-벽면충돌 과정은 원형 충돌벽면 조건과 유사하다는 것이 관찰되었다.

사각형 캐비티 안에 두 개의 큰 와류가 존재하여 스파크방전 위치 주위로 재유입 흐름이 발생하였다. 그러나 원형 벽면과는 달리, 작은 와동과 같은 몇몇 특이한 유동 패턴이 사각형 벽면 모서리에서 형성되었다. 작은 와동은 유동장을 좀 더 난류로 만들 수 있으므로, LPG-공기 혼합비율에 좋을 것이라고 판단된다. 이는 분사된 연료가 스파크방전 위치로 모이는 성층화 효과로 점화플러그 주변의 연료를 농후하게 하여 화염형성에 유리한 조건이 될 것이라 판단된다.

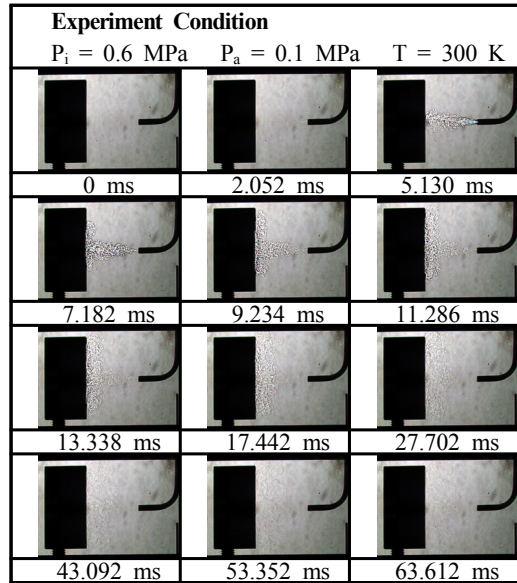


Fig. 7 Spray-wall impingement process with a flat impingement-wall

Fig. 7은 평평한 층돌벽면에서의 LPG 분무-벽면충돌 과정을 나타낸다. 층돌거리는 35 mm이다. 충돌 후 대부분의 분무는 평평한 벽면을 따라 움직이기 때문에, 스파크방전 위치로 향하는 축 방향에서 상류로 확산될 수 없었다.

LPG 분무 농도가 높은 곳은 평평한 벽면과 가까운 곳에 나타났다. LPG 분무가 관통하면서, 연료 분무는 상류로 확산되기 시작하여 스파크방전 위치 가까운 곳으로 이동하였다.

3.3 층돌벽면이 있을 때의 연소과정

Fig. 8은 층돌벽면이 없을 때의 화염전과 과정을 나타내고 있다. 분사시간(ID)은 5 ms이며, 점화 시기(ST)는 분사시작 후 5 ms로 설정하였다.

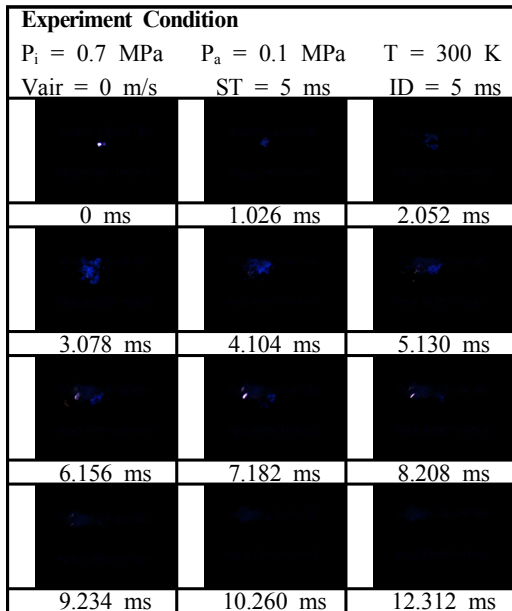


Fig. 8 Flame propagation process without impingement-wall

Fig. 9, 10, 11은 원형, 사각형, 평면 층돌벽면이 있을 때의 화염전과 과정을 각각 나타내고 있으며 실험 조건은 동일하다.

Fig. 9와 10은 원형과 사각형 층돌벽면이 있는 조건에서 화염이 전파되는 과정을 보여준다. 원형 층돌벽면이 있을 때의 화염전과 과정은 사각형 층돌벽면이 있을 때와 유사하다. 스파크방전과 함

께 화염핵이 형성되고 나면, 이 화염핵은 성장하면서 난류 유동장과 함께 상호작용하였다.

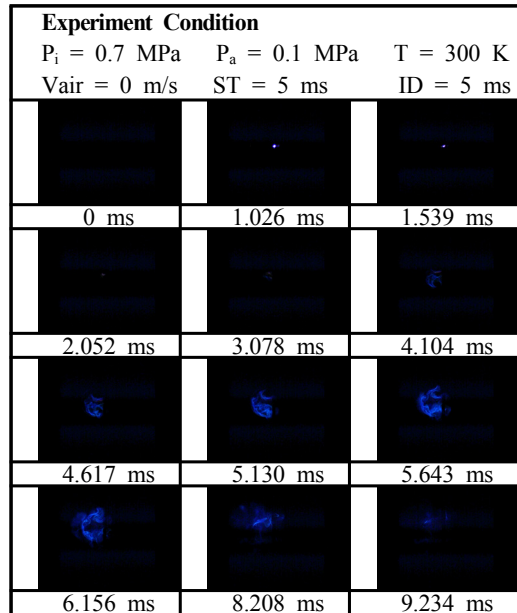


Fig. 9 Flame propagation process with a circle-shaped impingement-wall

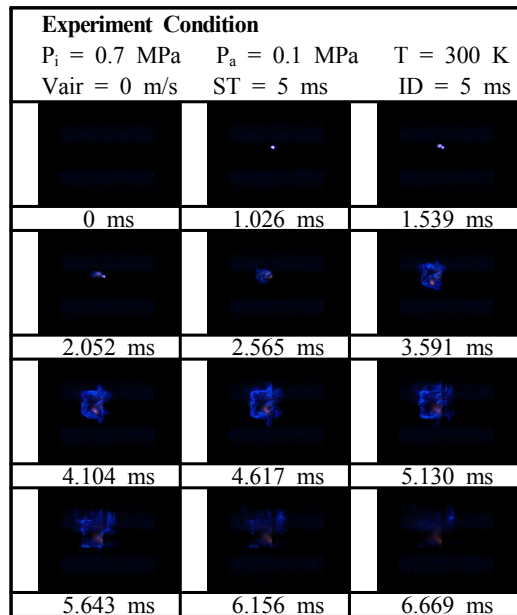


Fig. 10 Flame propagation process with a square-shaped impingement-wall

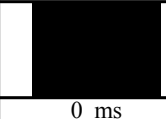
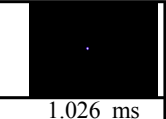
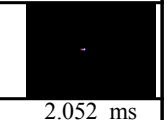
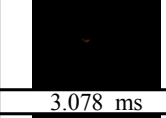
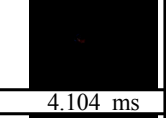
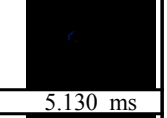
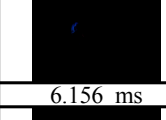
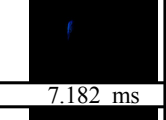
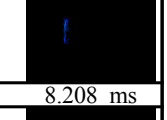
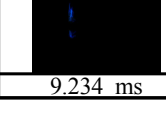
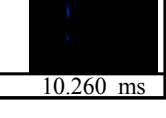
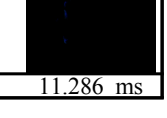
Experiment Condition		
$P_i = 0.7 \text{ MPa}$	$P_a = 0.1 \text{ MPa}$	$T = 300 \text{ K}$
$V_{air} = 0 \text{ m/s}$	$ST = 5 \text{ ms}$	$ID = 5 \text{ ms}$
		
0 ms	1.026 ms	2.052 ms
		
3.078 ms	4.104 ms	5.130 ms
		
6.156 ms	7.182 ms	8.208 ms
		
9.234 ms	10.260 ms	11.286 ms

Fig. 11 Flame propagation process with a flat impingement-wall

Fig. 11은 평평한 충돌벽면이 있을 때의 화염전파 과정을 나타내고 있다. 평평한 충돌벽면이 있을 때는 분무 농도가 평평한 충돌벽면 가까이 집중되는 것이 LPG가 분무되고 충돌하는 과정으로부터 관찰되었다.

스파크방전 위치 주변의 분무 농도는 상대적으로 보다 낮아서, 평평한 충돌벽면이 있을 때는 점화에 성공하기가 어려웠다. 또한, 평평한 충돌벽면이 있을 때의 연소기간은 다른 종류의 충돌벽면의 조건과 비교할 때 상당히 짧은 것으로 관찰되었다. 이러한 결과는 분사된 LPG의 오직 작은 일부만이 연소되었다는 점을 시사한다.

3.4 충돌벽면이 있을 때의 점화성

본 연구에서 언급해온 성공적인 점화란 화염핵이 형성되는 것을 말한다. 이때 화염핵은 스파크방전의 결과로 형성되며, 안정된 화염을 이끌어내는 화염전파가 뒤따라야 한다.⁶⁾

Fig. 12, 13, 14는 충돌벽면이 없을 때와 세 종류의 충돌벽면이 있는 LPG 분무의 점화성을 나타내고 있다.

Fig. 12는 분사압력 0.5 MPa 일 때, 점화시기 1 ms~3 ms, 분위기 압력 0.1~0.12 MPa 범위에서 LPG-공기 혼합기가 쉽게 점화될 수 있다는 확신을 나타내고 있다. 또 높은 분위기 압력은 분사된 연료의 분무 속도를 제어하고 분무 농도를 향상시킨다. 따라서 상대적으로 더 높은 분위기 압력 하에서 혼합기는 더욱 쉽게 점화될 수 있었다. 하지만 분사압력 대비 상대적으로 높은 분위기 압력에서는 분무 농도가 희석되어 점화성이 낮아지는 것을 확인하였다. 이 영향에 의하여 분위기 압력 0.14 MPa 이상에서 점화성은 낮아지기 시작하였다. 알려져 있다시피, 스파크방전 위치에서의 분무속도 순간값과 분무농도는 점화의 성공을 결정하는 데 중요한 역할을 한다.

본 실험에서 점화시기(Spark Timing)는 분사 개시에 따라 점화가 일어나게 되는 시간이다. 점화시기는 성공적인 점화에 있어 중요한 매개변수이다. 특이사항으로 충돌벽면이 없을 때의 분위기 압력 0.1 MPa, 점화시기 6 ms 범위에서 점화성이 높게 나타났다. 이 조건에서의 점화는 연소실에 분무된 LPG-공기 혼합기의 분무후미에서 스파크 점화되어 분사 진행방향으로 화염이 전파되는 것이 확인되었다.

Fig. 13은 분사압력 0.6 MPa 일 때, 분위기 압력 0.1 MPa~0.14 MPa, 점화시기 0 ms~6 ms 범위에서 점화성이 높았다.

Fig. 12와 Fig. 13을 비교해 보면, 분사압력 0.5 MPa 일 때 보다 0.6 MPa 일 때의 여러 조건에서 점화성이 높게 나온 것으로 확인된다.

특이사항으로는 충돌벽면이 있을 때 분위기 압력 0.12 MPa와 0.14 MPa에서 LPG 분사개시와 동시에 점화가 이루어졌다.

Fig. 14는 분사압력 0.7 MPa 일 때의 점화성을 나타내고 있다. 원형 충돌벽면이 있을 때의 점화와 사각형 충돌벽면이 있을 때의 점화 양쪽 모두에서 분사압력의 증가에 따라 점화성이 증가하였다. 그러나 0.7 MPa 보다 더 이상의 높은 분사압력은 높은 분무속도로 이어지며, 따라서 충돌벽면이 없는 점화에서는 높은 분무속도로 인해 화염핵이 소멸하기 때문에 점화에 성공하기가 어렵다.

그러나 충돌벽면이 있을 때에는 분무-벽면충돌 과정이 운동에너지의 손실을 야기하기 때문에 분무속도가 감소하여 화염핵의 소멸이 더 이상 중요하지 않게 되는 것을 확인하였다.

원형 충돌벽면이 있을 때의 점화성은 사각형 충돌벽면에서와 대부분 동일한 것으로 드러났다. 그러나 사각형 충돌벽면에서의 점화성이 약간 더 좋았다. 앞에서 논의했던 바, 사각형 벽면의 모서리에는 작은 와동과 같은 몇몇 특이한 유동 패턴이 형성되며 이 작은 와동은 유동장을 더욱 난류로 만들 수 있었다. 이것이 사각형 충돌벽면이 더 좋은 이유이다.

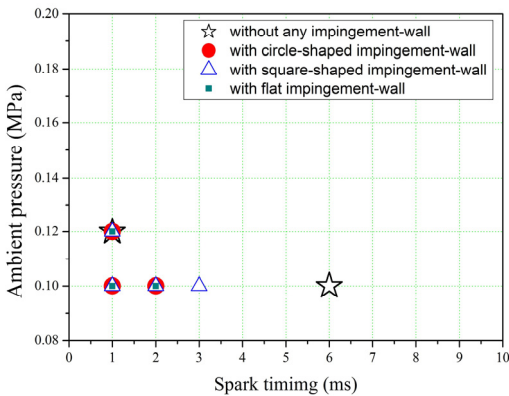


Fig. 12 Ignition probability comparison with 0.5 MPa injection pressure

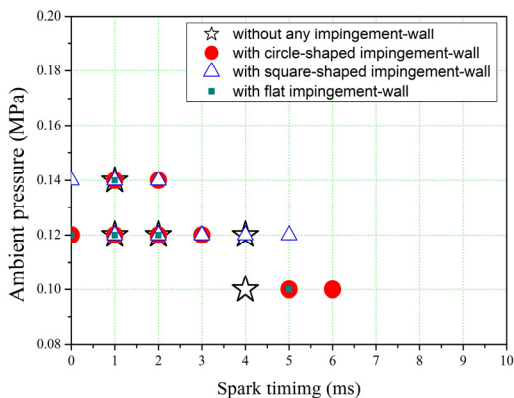


Fig. 13 Ignition probability comparison with 0.6 MPa injection pressure

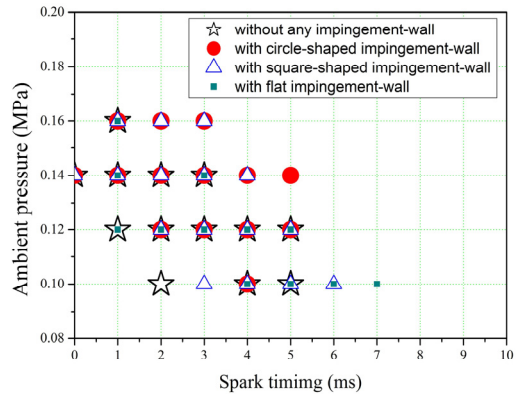


Fig. 14 Ignition probability comparison with 0.7 MPa injection pressure

4. 결 론

본 연구에서는 세 종류의 충돌벽면을 설계하여 이들이 LPG-DI 분무-벽면충돌 과정 및 화염전과 과정과 점화성에 미치는 영향을 조사하였다. 충돌벽면이 없을 때와 충돌벽면이 있을 때의 점화성을 비교를 통하여 다음과 같은 결론들을 얻었다.

1. 원형 충돌벽면이 있을 때, 충돌 후에는 원형 캐비티가 서로 반대방향으로 회전하는 두 개의 큰 와류로 채워졌고, LPG 분무의 재유입 흐름이 스파크 방전 위치 주변으로 발생하였다.

2. 사각형 충돌벽면이 있을 때의 분무-벽면충돌 과정은 원형 충돌벽면과 유사한 것으로 관찰되었다. 그리고 LPG-공기 혼합비율에 좋을 것으로 생각되는 몇 개의 작은 와류가 사각형 벽면의 모서리에서 관찰되었다.

3. 평평한 충돌벽면이 있을 때는 충돌 이후 대부분의 LPG 분무가 평평한 벽을 따라서 이동하였고, 분무 농도가 높은 곳은 평평한 벽면 주변이었다.

4. 원형 충돌벽면과 사각형 충돌벽면에서 서로 유사한 화염전과 과정이 관찰되었으며, 스파크 방전으로 화염핵을 형성하였다. 캐비티 안의 난류 유동장은 연소화염이 대단히 주름 잡히도록 만들었다. 점화가 일어난 후 연소화염은 하류로 전파되면서 충돌벽면과 충돌하였다.

5. 평평한 충돌벽면이 있는 화염전파 과정에서는 분무 농도가 높은 곳이 충돌벽면 주변이었기 때문에, 원형과 사각형 충돌벽면보다 점화를 달성하기 어려웠다.

6. 분사 압력이 높으면 분무 속도가 높아져 화염핵이 소멸된다. 그러나 충돌벽면이 있을 경우 분사압력이 높아도 점화성이 높은 것을 확인하였다. 왜냐하면 분사압력이 높으면 연소실에 LPG가 더 많이 분사되어 스파크 방전 위치 주변의 분무 농도가 개선될 수 있기 때문이다. 이뿐만 아니라 분무속도는 분무-벽면충돌 과정에 의해 상당히 줄어들 수 있다. 그러나 과도하게 높은 분위기 압력은 분무농도를 희석시켜 점화성을 낮추었다.

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.

후 기

이 연구는 동아대학교 연구기금의 지원을 받았다.

References

1. U. Spicher, J. Reissing, J. M. Kech and J. Gindele, 1999, "Gasoline Direct Injection (GDI) Engine-development Potentialities," SAE 1999-01-2938.
2. Y. Iwamoto, K. Noma, O. Nakayama, T. Ya-mauchi and H. Ando, 1977, "Development of Gasoline Direct Injection Engine," SAE 970541.
3. F. Zhao and M. C. L. Harrington, 1999, "Automotive Spark-ignited Direct-injection Gasoline Engines," Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 25, No. 5, pp. 437-562.
4. S. H. Lee, S. M. Oh, K. Y. Kang, J. H. Cho, K. O. Cha, 2011, "Particulate Emissions from a Direct Injection Spark-ignition Engine Fuelled with Gasoline and LPG", The Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 19, No. 3, pp. 65-72.
5. Green Word With Korea LPG Association (www.klpg.or.kr).
6. Y. Liu, S. I. Hwang, J. K. Yeom and S. S.