

예연소실 점화플러그의 화염가시화와 화염전파특성

지명석[†] · 정인태^{*}

Flame Visualization and Flame Characteristics of Spark Plug with Pre-ignition Chamber

Myoung Seok Jie, In Tae Johng

Abstract New concept spark plug was developed to study its influence on the combustion characteristics of SI engine. It has pre-ignition chamber at the lower end of spark plug and flame hole, in which fresh mixture gas can be put in through the flame hole without any fuel supply system. This spark plug was tested in a single cylinder engine dynamometer for different air fuel ratio to measure the fuel consumption rate, emission gases, and MBT timing. And constant volume combustion chamber was made to understand flame characteristics of spark plug. New spark plug induced fast burn compared to the conventional spark plug and its effects were increased in lean air fuel ratio. Pre-ignition chamber spark plug with 5 holes which had adjusted size was more stable and effective in combustion performance than pre-ignition chamber spark plug with 1 hole. And its effects showed larger differences in lean air fuel ratio than stoichiometric condition. Flame kernel and flame growth process of conventional spark plug and pre-ignition chamber spark plug studied by flame visualization of schlieren method.

Key Words : Spark plug(스파크 플러그), Pre-ignition chamber(예연소실), Flame visualization(화염가시화), Flame characteristics(화염특성), Schlieren method(쉴리렌 방법)

Nomenclature

A/F : air fuel ratio PIC : pre-ignition chamber
LPG : liquid petroleum gas
MBT: Minimum Advance for Best Torque
fps : flame per second
 λ : air excess rate

[†] Department of Automobile Engineering,
Ajou Motor College
E-mail:jms@motor.ac.kr

^{*} Penta motors

1. 서론

환경과 에너지 문제는 전 세계적으로 중요한 관심사가 되고 있으며 모든 산업분야에서 이를 해결하기 위한 노력이 계속되고 있다. 최근에 개발되는 엔진들은 엔진성능향상을 위하여 높은 엔진회전수와 고압축비에서 연소가 이루어지고 있으며 배출가스를 줄이기 위하여 린번엔진(lean burn engine)과 가솔린 직접분사식(GDI, gasoline direct injection)엔진과 같은 희박연소 엔진을 도입하게 되었다. 엔진성능향상을 위한 압축비의 증가는 노

킹(knock)의 발생을 쉽게 함으로 그 한계점을 가지고 있으며 린번엔진이나 직접분사식엔진과 같은 희박연소엔진은 희박한 공연비로 인해 초기 점화의 불안정성과 희박공연비의 한계 및 연소속도 저하와 불완전 연소로 인한 사이클 변동의 문제 등이 있다.⁽¹⁾ 따라서 연소실의 높은 온도와 압력 및 희박 공연비 상태에서 엔진의 연소효율을 향상시키기 위해서는 강력한 불꽃을 발생시킬 수 있는 점화장치의 역할이 매우 중요하다.⁽²⁾ 그리고 자동차의 출력을 증대시키기 위하여 엔진회전수를 증가시키면서 연소시간은 짧아지게 되어 강력한 연소장치에 의한 급속연소(fast burn)가 필요하게 되었다. 자동차 엔진이 급속연소를 위해서는 연소실 내의 유동장 개선과 점화장치에 의한 초기의 화염 형성이 매우 중요하다.⁽³⁾ 지금까지는 주로 흡기포트에 의해 생성되는 선회(swirl)유동과 텀블(tumble)유동에 의해 연소실내 유동의 난류강도를 강화시킴으로써 급속연소를 이루려고 하였으나 급속연소와 출력향상 및 배출가스 저감에는 한계가 있었다.⁽⁴⁾ 따라서 본 연구에서는 초기 화염원의 세기를 크게 하고 급속연소를 유도할 수 있도록 일반 점화플러그와 형태를 달리하는 새로운 개념의 예연소실(pre-ignition chamber)을 갖는 점화플러그를 제작하였다.⁽⁵⁾ 그리고 예연소실 점화플러그에 의한 초기 화염의 성장과정을 분석하기 위하여 정적연소실에서 쉐리렌 방법(Schlieren method)을 이용하여 화염의 전과과정을 촬영하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 엔진제원

본 연구에서는 예연소실을 갖는 점화플러그가 연소에 미치는 영향을 분석하기 위하여 단기통엔진을 이용하여 성능실험을 하였으며 엔진의 제원은 Table 1과 같다.

Table 1. Specification of engine

Bore× Stroke	82mm × 85mm
Displacement	449 cc
No. of cylinder	1
No. of valve	Intake:2, Exhaust:2
Compression ratio	10:1
Ignition system	Direct ignition system

2.2 예연소실 점화플러그

점화플러그는 실린더헤드에 설치되어 점화코일의 2차 코일에서 발생한 고전압에 의해 중심전극과 접지전극 사이에서 전기불꽃을 발생시켜 실린더 내의 혼합기에 점화하는 일을 한다. 예연소실 점화플러그는 점화 시 예연소실(pre-ignition chamber)에서 초기 점화를 일으킨 후 화염이 좁은 화염공(flame hole)을 통해서 분출되므로 고난류 점화표면을 제공하게 되어 연소실내에 점화에너지를 넓게 공급하므로 엔진의 연소성능을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.⁽⁶⁾ 일반 점화플러그는 Fig. 1(a)와 같은 형상이며 예연소실 점화플러그 형상은 Fig.1(b)와 같이 점화플러그 하단부에 예연소실(pre-ignition chamber)이 있으며 예연소실에 장착된 중심전극과 예연소실 하단부에 일체로 형성된 한 쌍의 접지전극 및 화염을 분출할 수 있는 화염공으로 이루어진다. 예연소실 점화플러그는 화염공의 개수에 따라 PIC(Pre Ignition Chamber) 1 hole 점화플러그와 PIC 5 hole 점화플러그로 표시하였으며 Fig.1(c)와 같다. PIC 1 hole 점화플러그는 예연소실 하단 중심부에 1개의 화염공을 가지며 PIC 5 hole 점화플러그는 예연소실 하단중심부에 1개의 화염공과 예연소실 끝단에 원주 방향으로 4개의 화염공을 가지고 있다. 예연소실 점화플러그의 제원은 Table 2와 같다.

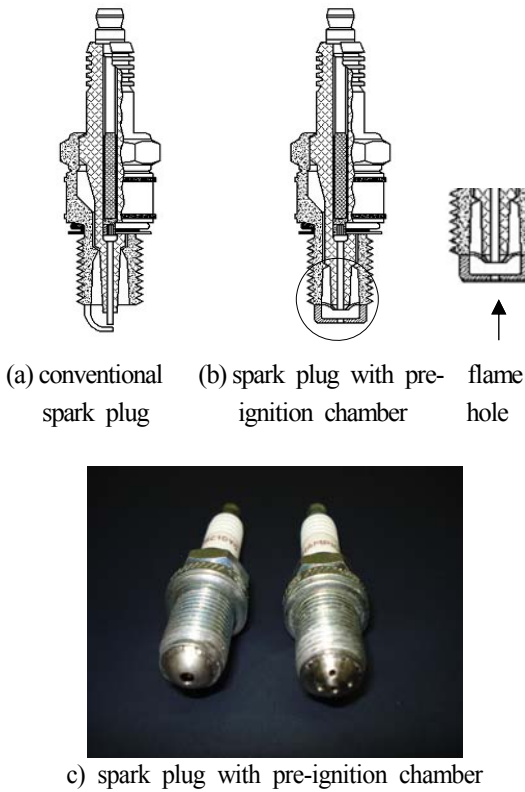


Figure 1. Configuration of spark plug

Table 2. Specification of spark plug with pre ignition chamber

Description	Number of flame hole	Dia. of flame hole (mm)
PIC 1 hole	1	Bottom \varnothing 2.5
PIC 5 hole	5	Bottom \varnothing 1.4 Side \varnothing 1.2

2.3 화염가시화

2.3.1 화염가시화 장치

본 실험에 사용된 정적연소실과 점화장치 등의 실험장치 들을 표시한 개략도는 Fig.2와 같다. 점화 장치는 점화시기 제어신호 발생기(Ignition timing controller, Micro electronics, ST901T)를 이용하였다. 그리고 정적연소실의 화염을 분석하기 위하여 쉐리렌 방법(Schlieren method)을 이용하였으며 실험

장치의 개략도는 Fig.3과 같다. 쉐리렌 방법은 유체의 밀도 구배에 따라 선형적으로 변하는 빛의 굴절률의 구배를 이용하며 유체 내에 아무런 물리적, 화학적 영향을 주지 않고 열, 압력, 밀도분포 등을 광학적으로 가시화하는 비접촉 유체가시화 방법이다. 쉐리렌 시스템은 광원부와 수광부로 되어있으며 광원은 최대 35W의 Xenon lamp(ReDLake)를 사용하였다.

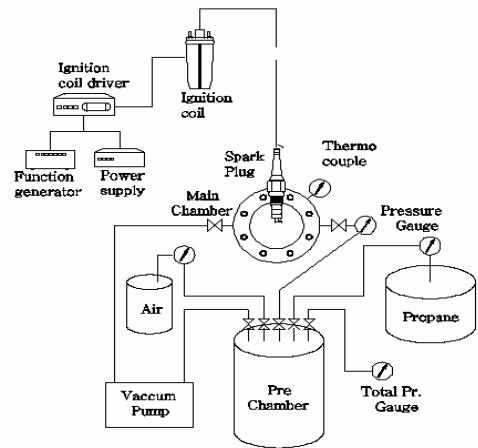


Figure 2. Schematic diagram for flame visualization

광원에서 발생된 빛은 핀 홀을 거쳐서 양단의 쉐리렌 렌즈 사이에 위치한 연소실에 집광된 뒤 나이프 에지(knife edge)에서 상이 맺힌다. 이때 굴절되지 않은 광선은 나이프 에지로 차단되므로 굴절된 광선만을 고속 디지털카메라(Motion scope, PCI 8000s)를 이용하여 5000fps의 속도로 촬영하였다.

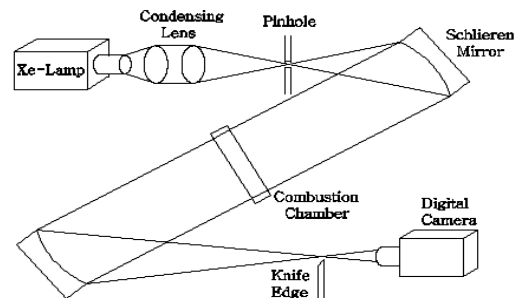


Figure 3. Visualization system using schlieren method

2.3.2 예혼합실과 정적연소실

정적연소실은 스파크플러그에 의해 점화가 되는 방식이며 온도와 압력을 측정할 수 있도록 열전대와 압력센서를 장착하였다. 그리고 정적연소실에 일정한 공연비를 갖는 혼합기를 공급할 수 있도록 예혼합실(Pre mixture chamber)을 설치하였다. 예혼합실은 정적연소실보다 부피가 크게 제작하여 같은 조성을 갖는 혼합가스를 여러 차례에 걸쳐 실험할 수 있도록 하였다. 본 실험에 사용된 예혼합실의 체적은 3500cm³이다. 본 실험에서는 실험기체로 LPG를 사용하였고 상온에서 프로판의 증기압이 9.4 bar이므로 예혼합실에 그 이상의 압력을 가하게 되면 LPG의 응축현상이 생기므로 원하는 공연비로 조절하기가 어렵다. 따라서 예혼합실을 가열하여 압력을 더 높일 수도 있으나 그러기 위해서는 히터 등 다른 장치들이 필요하므로 본 실험에서는 예혼합실의 압력을 6bar로 맞추어 실험하였다. 정적연소실은 Fig.4와 같이 원통형의 모양이며 기상의 연료와 공기가 혼합된 가스가 연소실에 4bar로 유입되도록 디지털 압력게이지를 설치하였다.

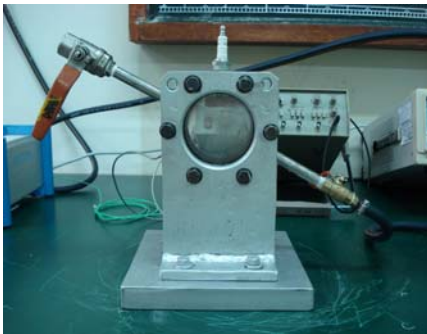


Figure 4. Picture of constant volume combustion chamber

정적 연소실의 제작도면은 Fig.5와 같다. 정적연소실은 스틸(Steel)로 제작하였으며 가시화를 위하여 양 측면에 폭이 30mm인 석영 유리를 설치하였다. 이 장치의 내경과 폭은 각각 80mm와 30mm이며 압력센서를 설치하여 정적연소실의 초기 압력을 조절하였다. 점화는 정적 연소실에 혼합기를 흡입시키고 1분 후에 실시하여 흡입 시 발생하는 난류를 가능한 제거하였다.

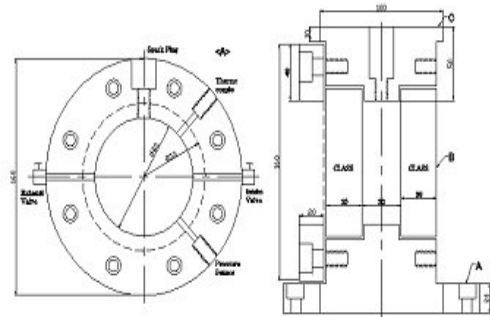


Figure 5. Schematic diagram of constant volume combustion chamber

2.3.3 공연비 변경

본 실험에서는 화염가시화 실험을 위해 LPG (C₃H₈:70%, C₄H₁₀:5%, C₃H₆:25%)를 사용하였으며 이론공연비, 즉 λ(공기과잉률)가 1.0일 때 일반 점화플러그와 예연소실 점화플러그를 사용하여 정적연소실내의 화염전파형태를 가시화 하였다. 예혼합 장치내의 공기와 연료의 혼합비는 온도를 고려한 분압비로 아래와 같이 계산하였다. 공기와 LPG가스를 이상기체라고 가정하고 공기는 A, LPG가스는 B로 표시하면 공기와 LPG는 이상기체 방정식을 이용하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 PV &= nRT \\
 P_A V &= n_A RT \\
 P_B V &= n_B RT
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

P_A : 공기의 분압, P_B : LPG의 분압, n : 몰수,
 V : 용기체적, R : 일반기체상수, T : 온도,
 P : 혼합기체압력

따라서

$$\begin{aligned}
 P_A &= \frac{n_A}{n} = k_A & k_A &: \text{공기 몰분율} \\
 P_B &= \frac{n_B}{n} = k_B & k_B &: \text{LPG 몰분율} \\
 P_A + P_B &= P
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

가 되므로 혼합기체의 압력 P는 각 성분 기체의 분압 P_A 와 P_B 의 합으로 생각할 수 있다. 따라서 위 식을 이용하여 몰(mole) 기준의 공연비를 구하면

$$\frac{A}{F} = \frac{n_A}{n_B} = \frac{\frac{m_A}{M_A}}{\frac{m_B}{M_B}} = \frac{P_A}{P_B}, \quad (3)$$

n: 몰수, m: 질량, M :몰질량

가 되므로 몰기준의 공연비는 압력비로 표시할 수 있다. 따라서 공기와 LPG가스를 이상기체로 가정하였을 때 기체의 몰 수비는 같은 온도 조건에서 압력의 비이므로 압력비를 이용하여 공연비를 조절할 수 있다. 그러므로 정적 연소실의 혼합기가 일정한 공연비를 유지할 수 있도록 예혼합실에 들어가는 LPG와 공기의 Table 3과 같이 조절하였다. 예혼합실의 공연비는 LPG를 먼저 주입하여 공연비에 해당하는 압력을 맞춘 후 컴프레서를 이용하여 정해진 압력의 공기를 주입함으로써 공연비를 조절하였다. 그리고 정적연소실의 압력은 예혼합실과 정적연소실 사이에 밸브를 설치하여 4bar가 되도록 하였다. LPG 가스의 공연비를 조절하기 위한 공기와 연료의 분압은 Table 3과 같다.

Table 3. Pressure ratio of propane gas and air

λ	A/F	$\overline{A/F}$	Pre mixture chamber pressure (bar)	Propane gas (bar)	Air (bar)
1.0	15.6	23.8	6	0.24	5.76

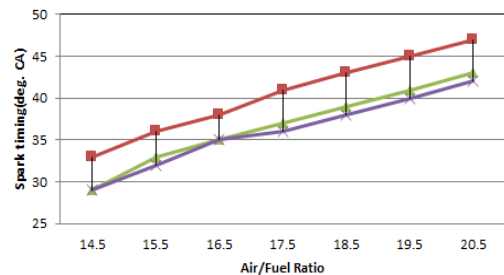
3. 실험결과 및 고찰

3.1 공연비 변경실험

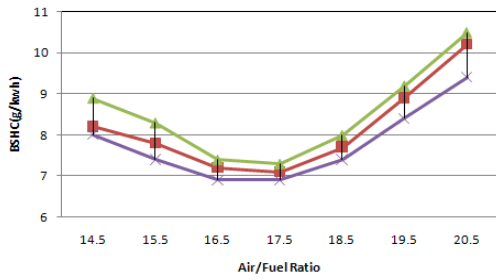
예연소실 점화플러그와 일반 점화플러그의 공연비 변화에 따른 연소특성을 비교하기 위하여 단기통엔진을 이용하여 1800rpm 2.0 bar BMEP에서 일반 점화플러그와 1개의 화염공을 갖는 PIC 1 hole 예연소실 점화플러그와 5개의 화염공을 갖는

PIC 5 hole 예연소실 점화플러그를 사용하여 공연비를 변경시키며 실험을 하였다. 최대토크가 발생하는 MBT timing은 Fig.6(a)에 표시하였다. 예연소실 점화플러그를 사용한 경우가 일반점화플러그를 사용한 경우보다 MBT timing은 이론공연비에서 4° CA 정도 지각되었고 공연비가 희박해지면서 점화시기는 진각되나 일반점화플러그를 사용한 경우보다 4°~5° CA 정도 더 지각이 되어 예연소실 점화플러그를 사용한 경우가 일반 점화플러그를 사용한 경우보다 연소가 빠르게 이루어지는 것을 알 수 있었다. 이것은 예연소실 점화플러그를 사용한 경우 화염이 예연소실에서 점화를 일으킨 후 좁은 화염공을 통과하며 연소실에 고난류 점화 표면을 제공하게 되어 연소실내에 점화 에너지를 넓게 공급하기 때문이라고 판단된다.

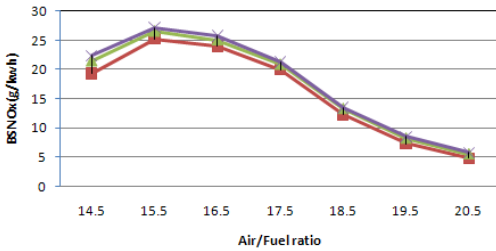
공연비 변경에 따른 BSHC(brake specific hydro carbon)는 Fig.6(b)에 표시하였다. BSHC는 공연비가 희박해지면서 감소하다가 공연비가 17.5 이후에는 연소가 불안전해지며 증가하였다. 이론공연비 부근에서 BSHC값은 PIC 5 hole 점화플러그를 사용할 때가 PIC 1 hole 점화플러그를 사용할 때보다 좋은 결과를 보인다. 이것은 PIC 5 hole 점화플러그는 화염이 밀면과 원주방향으로 화염이 넓게 분사되나 PIC 1 hole 점화플러그의 경우 화염이 예연소실 밀면으로만 화염이 분사되므로 점화플러그 주변의 혼합기를 충분히 연소시키지 못하기 때문으로 판단된다. PIC 5 hole 예연소실 점화플러그를 사용한 경우가 일반점화플러그와 PIC 1 점화플러그를 사용한 경우보다 BSHC는 최대 5.5~7.8% 정도 감소되었다. BSNOx는 Fig. 6(c)에 표시하였다.



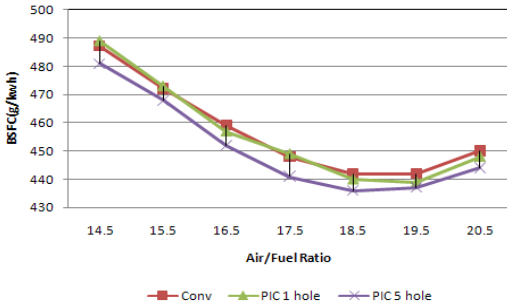
(a) MBT(Minimum advance for best torque) timing



(b) BSHC(Brake specific hydrocarbon)



(c) BSNOx(Brake specific NOx)



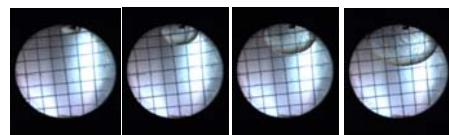
(d) BSFC(Brake specific fuel consumption)

Figure 6. Air/Fuel mixture response test at 1800 RPM 2.0 bar BMEP in 450cc DOHC single cylinder engine

BSNOx는 이론공연비에서 예연소실 점화플러그를 사용한 경우가 많이 나왔으며 공연비가 희박해지면서 차이가 감소하였다. 이것은 예연소실 점화플러그가 급속연소를 이루며 연소실의 온도가 상승하기 때문으로 사료된다. 연료소비율은 Fig. 6(d)에 표시하였다. 연료소비율은 이론공연비 부근에서 PIC 5 hole 점화플러그를 사용한 경우가 PIC 1 hole 점화플러그와 일반 점화플러그를 사용한 경우보다 1.2~1.3 % 정도 개선되었다.

3.2 화염가시화

일반 점화플러그와 PIC 1 hole 점화플러그 그리고 PIC 5 hole 점화플러그의 화염전과과정을 비교하기 위하여 정적연소실을 제작하여 쉐리렌 방법으로 화염가시화 실험을 하였다. Fig.7은 일반점화플러그와 예연소실을 갖는 점화플러그의 화염전과 특성을 보여준다. Fig.7(a)는 일반 점화플러그를 사용한 경우이며 Fig.7(b)는 예연소실에 1개의 화염공을 갖는 점화플러그(PIC 1 hole spark plug)를 사용한 경우이고 Fig.7(c)는 예연소실에 5개의 화염공을 갖는 점화플러그(PIC 5 holes spark plug)를 사용한 경우의 화염전과 모습이다. 일반 점화플러그를 사용한 경우 화염핵이 점화플러그 중심전극에서 생성된 후 화염이 균일한 크기의 반경을 가지며 성장되는 모습을 보여준다. 그러나 PIC 1 hole spark plug를 사용한 경우 화염이 예연소실 밀면 중앙의 화염공을 통하여 분출되므로 화염이 연소실 밀면으로 돌출되며 성장하는 모습을 보여주고 있다. 그리고 PIC 1 hole spark plug를 사용한 경우가 일반 점화플러그를 사용한 경우보다 연소면적이 빠르게 증가하는 모습을 보여준다. Fig.7(c)에서는 PIC 5 hole spark plug를 사용한 경우 5개의 화염공으로 인해 화염이 넓게 분출되는 모습을 볼 수 있다. PIC 5 hole spark plug를 사용한 경우 화염핵의 크기는 PIC 1 hole spark plug를 사용한 경우보다 크게 나타나고 있으며 연소면적도 빠르게 증가하는 모습을 보여준다.



(a) conventional spark plug



(b) PIC 1 hole spark plug

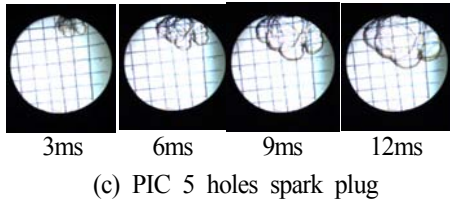


Figure 7. Comparison of combustion flame characteristics ignited by different type of spark plug at $\lambda=1.0$

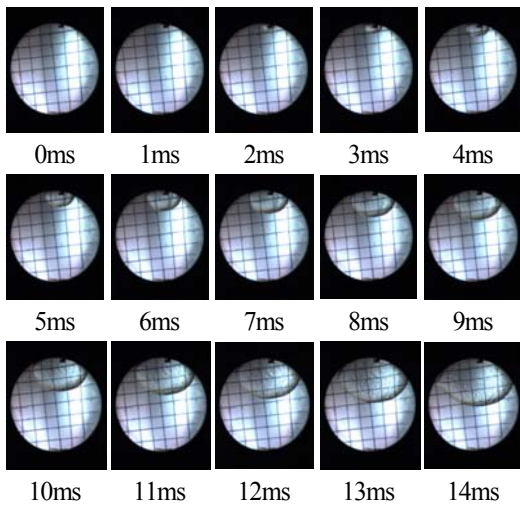


Figure 8. Shadow graph images of combustion flame ignited by conventional spark plug at $\lambda=1$

Fig.8~10 은 일반 점화플러그와 PIC 1 hole spark plug 그리고 PIC 5 hole spark plug를 사용하여 정적 연소실에서 점화를 시킨 후 연소되는 형태를 연속적으로 보여주는 사진이다. 앞에서 설명한 것처럼 일반 점화플러그와 예연소실 점화플러그의 화염 성장특성을 분명하게 보여주고 있다.

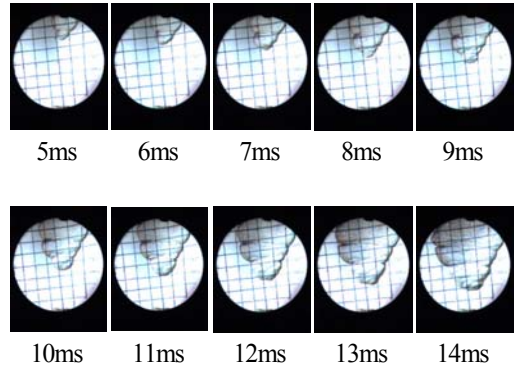
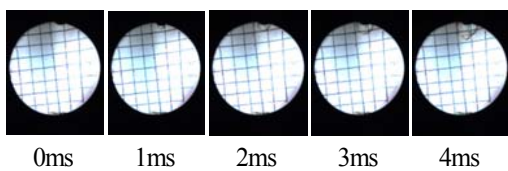


Figure 9. Shadow graph images of combustion flame ignited by PIC 1 hole spark plug at $\lambda=1$

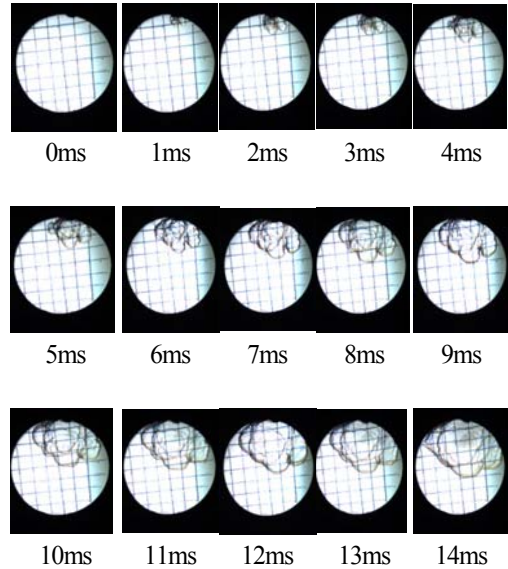


Figure 10. Shadow graph images of combustion flame ignited by PIC 5 hole spark plug at $\lambda=1$

4. 결론

일반 점화플러그와 예연소실 점화플러그의 제원을 변경하며 화염 가시화 실험을 하였으며 연소에 미치는 영향을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 예연소실 점화플러그를 사용하는 경우가 일반 점화플러그를 사용한 경우보다 MBT

timing은 지각되어 연소가 빠르게 진행됨을 알 수 있었다.

- (2) 화염공이 5개인 PIC 5 hole 예연소실 점화플러그의 경우 일반 점화플러그와 화염공이 1개인 PIC 1 hole 예연소실 점화플러그보다 BSHC는 감소되어 연소효과가 좋은 것으로 판단된다.
- (3) 일반 점화플러그를 사용하는 경우 화염의 성장은 화염 핵이 생성된 후 일정한 크기의 반경을가지며 화염이 성장하였으나 화염공이 1개인 예연소실 점화플러그는 예연소실 밑면의 화염공을통해 강력한 화염이 분출되므로 역 원추꼴의 형태로 화염이 성장하였고 화염공이 5개인 예연소실 점화플러그는 5개의 화염공을 통해 화염이 분출되므로 화염접촉 면적이 넓게 형성되는 것을 확인 할 수 있었다.
- (4) 예연소실 점화플러그를 사용한 경우가 일반 점화플러그를 사용한 경우보다 연소면적이 빠르게 증가하는 것을 확인할 수 있었다.
- (5) 예연소실 점화플러그를 사용하여 연소효율 향상의 가능성을 판단할 수 있었으며 향후 내구성과 주행안정성에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

REFERENCE

- 1) Lee, J. S., Kim, J. Y., Chung, S. S., Bae, C. S., 1998, "Effects of Mixture Flow and Ignition Characteristics on the Engine Performance," KSAE, Volume 6, No.5, pp.37-44.
- 2) Song, J. H., Sunwoo, M. H., Kim, W. T., 1999, "A Study on the Engine Performance Improvement of a Lean Burn Engine by high Energy Ignition," KSAE, Volume 7, No.2, pp.31-40.
- 3) Han, M. B., Song, J. H., Sunwoo, M. H., 1996, "A study of the Ignition Energy Effects of a Lean Burn Engine(1)," Hanyang Univ., Volume 2, No.2.
- 4) Jie, M. S., Kim, M. H., and Kim, W. T., 1993, "The Effect of Tumble Flow on Engine Performance and Flame Propagation," SAE 931946, 7th International Pacific Conference, Phoenix.
- 5) Jie, M. S., Kim, J. H., Yoo, S. Y., 2007, "A Study on the Combustion Characteristics of Spark Plug with Pre-ignition Chamber," KSME, Volume 31-B, No.8, pp.718-723.
- 6) Kim, M. H., Park, J. S., Ruy, H. W., 2000, "Combustion Characteristics of Plasma Jet Ignition for Cross Section Shape of Constant Volume Combustion Chamber," Journal of the Industrial Technology Research Institute, Soong Sil University, Vol. 30, pp.93-101.
- 7) Kim, J. S., Chon, M. S., Yun, J. E., 2000, "In-cylinder Flame Propagation Characteristics of SI Engine by using Optimal Thresh hold Method," KSAE, Volume 8, No.5, pp.96-104.