

정적연소기에서 점화에너지와 점화장치가 화염전파속도에 미치는 영향에 관한 연구

A Study on the Effects of Ignition Energy and Systems on the Flame Propagation in a Constant Volume Combustion Chamber

송정훈*, 서영호**, 선우명호***
Jeonghoon Song, Youngho Seo, Myoungcho Sunwoo

ABSTRACT

A constant volume combustion chamber is employed to investigate the initial flame kernel development and flame propagation of gasoline-air mixtures with various ignition systems, ignition energy and spark plug electrodes. To do this research, four ignition systems are designed and manufactured, and the ignition energy is controlled by varying the dwell time. Several kinds of spark plugs are also made to analyze the effects of electrodes on flame kernel development.

The velocity of flame propagation is measured by the laser deflection method. The output laser beam from He-Ne laser is divided into three parallel beams by a beam splitter. The splitted beams pass through the combustion chamber. They are deflected when contacted with flame front, and the voltage signals from photodiodes change due to deflection.

The results show that higher ignition energy raises the flame propagation speed especially under the fuel lean operation. The wider electrode gap, smaller electrode diameter and sharper electrode tip make the speed of the initial flame propagation faster. The speed of the initial flame propagation is affected by electrode material as well. Electrode material with lower melting temperature help the initial flame propagation.

주요기술용어 : Flame propagation(화염전파), Ignition system(점화장치), Laser deflection method(레이저 굴절법), Constant volume combustion chamber (정적연소기)

1. 서론

- * 회원, 한양대학교 대학원
- ** 회원, 자동차부품연구원
- *** 회원, 한양대학교

연비 및 유해 배출가스를 감소시키기 위한 시도들 중의 하나인 희박연소기관에 대한 연구는 여러 연구자들에 의하여 연구되고 있다. 희박연소기관의 경우, 연소의 안정화와 연소속도를 증가시키기 위해 스웰이나 텀블 등을 이용하여 점화시기 또는 초기화염핵의 성장기간 동안 혼합기

의 유동을 강화시키게 된다. 이러한 조건에서 안정적인 점화를 이루기 위해서는 현재 상용화 된 점화장치보다 높은 점화에너지를 발생시키거나 희박연소에 알맞은 점화플러그를 사용하여야 한다.

이에 따라 점화장치 또는 점화플러그와 초기화염핵의 생성과의 상관관계를 밝히기 위해 많은 연구가 이루어졌다. 즉, Ziegler 등¹⁾은 점화플러그 전극의 재료 변화가 각 방전상태 -아크 및 글로우 방전-에 미치는 영향을 조사하였으며 Pischinger 등²⁾은 여러 가지 종류의 점화플러그 형상들이 초기화염성장에 미치는 영향에 대해 실험 및 분석을 하였다.

하지만 엔진 실린더 내의 화염 형상은 난류 및 혼합기의 불균일한 분포에 의한 영향 때문에 복잡한 형태를 가진다. 즉 난류화염에 의한 영향을 제거한, 점화장치의 변화에 의한 화염형상의 변화를 관찰하기는 어려우며 화염의 직접적인 측정 및 가시화 역시 매우 힘들다. 따라서 이 연구는

정적연소기를 사용하여 난류화염에 의한 영향을 제거함으로써 점화장치에 의하여 발생하는 화염 전파의 특성을 보다 정확하게 관찰하기 위하여 실시되었다.

이를 위해 네 종류의 점화장치가 설계, 제작되었으며 점화시기 제어신호 발생기 (spark timing controller)를 이용하여 충전시간을 변화시켜 각 점화장치에서 발생하는 점화에너지를 조절하였다. 또한 점화플러그 전극의 형상 및 재료의 변화가 화염 성장에 미치는 영향을 살펴보기 위해 다양한 점화플러그가 제작되었다. 즉, 전극의 간극, 재료, 지름, 그리고 형태를 바꾸어 점화플러그를 제작하였으며 각 점화플러그에서 발생하는 에너지 및 이에 따른 화염전파속도를 측정하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험 장치

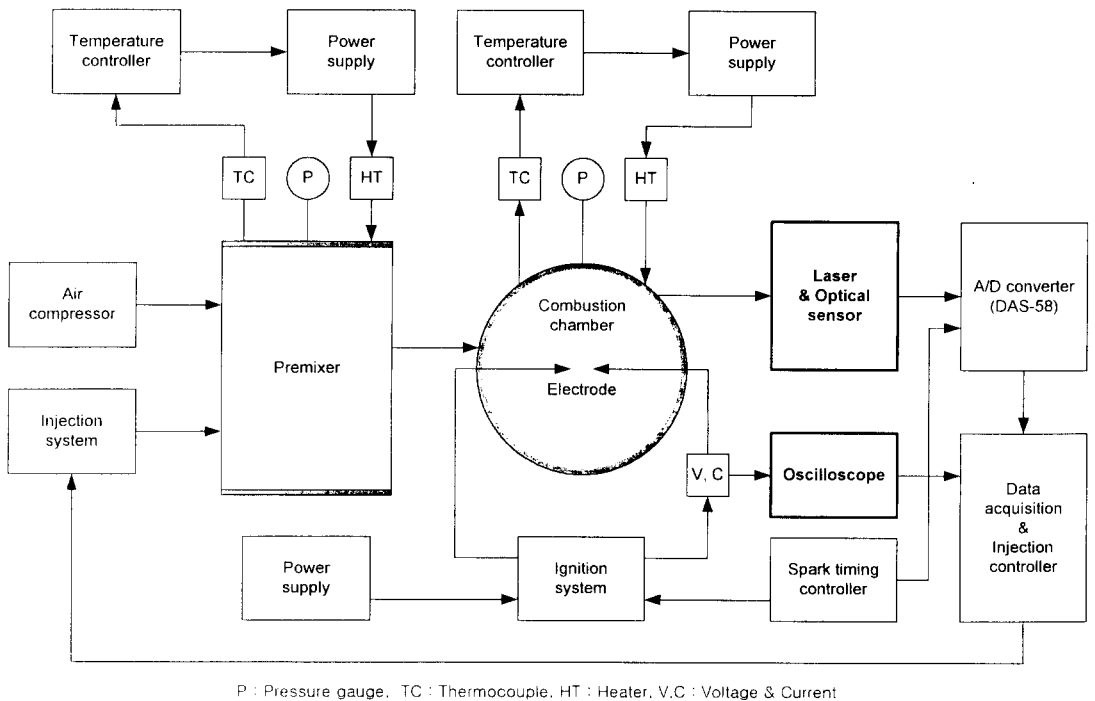


Fig. 1 Experimental apparatus

이 실험을 위해 제작·구성된 점화장치의 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 실험에 사용된 연료는 가솔린이며 공기 압축기와 연료 공급장치를 이용하여 적절한 양의 공기와 연료를 예혼합실에 공급한다. 예혼합실에서 충분히 가열된 혼합기는 정적연소실로 보내어지며 이때 흡입과정에서 발생한 난류를 제거하기 위해 3분이 지난 후 점화를 시키게 된다.

2.1.1 화염전파속도 측정 장치

화염 전파속도를 측정하기 위해서는 고속카메라를 이용하여 화염의 크기를 직접 측정하는 방법과 레이저를 이용한 레이저 굴절법 (laser deflection method) 등이 있다. 이 실험에서는 보다 간편하며 경제적인 레이저 굴절법을 이용하

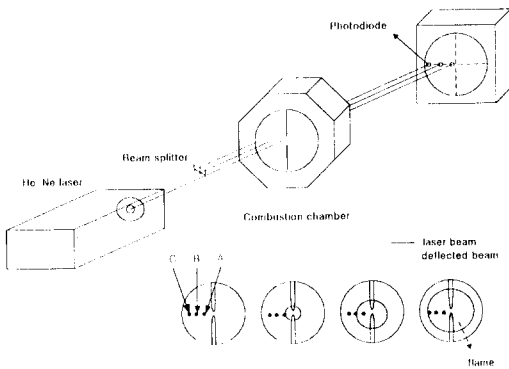


Fig. 2 Schematic diagram of laser deflection method

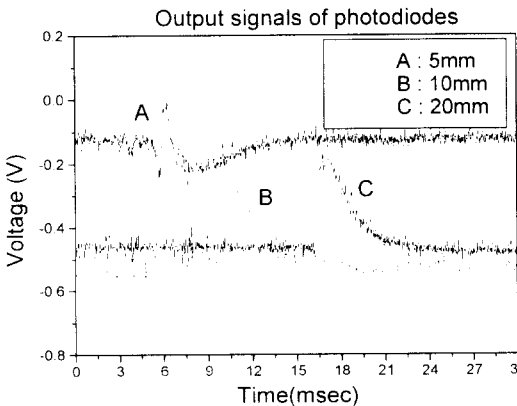


Fig. 3 Output signals of photodiodes

였다.

레이저 굴절법이란 레이저에서 발생된 빔이 화염면을 통과할 때, 화염면에 존재하는 밀도의 구배로 인해 레이저가 굴절하게 된다. 따라서 수광부에서는 도달하는 레이저의 광도가 변화하게 되며 이를 이용하여 화염면의 도달신호를 획득하는 방법이다. (Fig. 2)³⁾ 즉 레이저 발생기에서 발생된 레이저가 beam splitter를 거쳐 세 가닥의 평행한 레이저로 나누어지며 이 레이저들은 정적연소실을 거쳐 포토다이오드 (photodiode)에 도달하게 된다. 이때, 포토다이오드는 화염의 도달신호를 출력하게 되며 이 신호는 A/D 변환기를 거쳐 PC에서 계산, 처리된다. 이 실험에서 사용된 레이저는 50mW의 출력을 발생하고, 632.8nm의 파장을 가지는 He-Ne 레이저이다.

화염이 측정되는 위치는 점화장치에 의하여 보다 많은 영향을 받는 초기화염의 전파속도 측정에 중점을 두어 설정하였다. 이를 위하여 전극에서 각각 5mm (A), 10mm (B) 그리고 20mm (C) 떨어진 지점으로 결정하였다. Fig. 3은 각 지점에 위치한 포토다이오드에서 발생된 신호의 예를 나타낸 것이다. 각 신호가 최대 전압을 나타내는 시점을 화염이 도달하는 시간으로 정의하였다.

2.1.2 정적연소기

정적연소기는 예혼합실과 정적연소실로 이루어져 있다.

예혼합실은 가솔린의 완전한 기화와 공연비의 조절을 위해 제작되었다. 재질은 급속한 가열을 위해 열 전도성이 좋은 동으로 제작되었으며 양측면에 400W 및 600W의 판 히터를 설치하였다. 예혼합실의 체적은 $2650 \times 10^{-6} \text{m}^3$ 이며 온도 및 압력은 6bar, 150 °C로 유지하여 공기와 혼합된 가솔린이 기체 상태를 유지하도록 하였다.

정적연소실은 가시화를 위하여 양측면에 두께 30mm의 석영유리를 설치하였다. 또한 초기화염의 전파특성 연구에 적합하도록 점화플러그 전극의 위치가 연소실 중앙에 오도록 위치시켰다.

이 장치의 내경과 폭은 각각 100mm와 30mm이며 재질은 두랄루민이다.

2.1.3 점화장치

이 실험에 사용되어진 점화장치는 유도성 방전 점화 장치 (Inductive Discharge Ignition system) 로서 직접점화장치 (DIS, Direct Ignition System), 직렬고에너지점화장치 (HEIS, High Energy Ignition-Series connected), 병렬고에너지점화장치 (HEIP, High Energy Ignition-Parallel connected), 그리고 I-DIS (IGBT based DIS) 이다. 각 장치의 회로도도 참고문헌 (5)을 참조하기 바란다.

DIS는 현재 일반적으로 많이 사용되고 있는 점화장치이며 하나의 점화코일로 두 개의 점화플러그를 구동하는 장치이다. HEIS 및 HEIP는 DIS의 일차 및 이차회로를 변형하여 점화에너지 및 방전시간을 증가시킨 것이다. 이 장치들은 두 개의 점화코일이 두 개의 점화플러그를 구동하는 형태이다. HEIS의 경우, 이차측이 직렬로 연결되어 병렬로 연결된 HEIP 보다 긴 방전시간을 가진다. 이 연구에서는 I-DIS 역시 점화 성능의 비교를 위해 사용되었다. IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)는 점화시기 및 저장되는 점화에너지의 양을 조절하는데 일반적으로 사용되는 BJT (Bipolar Junction Transistor)에 비해 빠른 스위칭 성능을 가진다. 또 동작 중에 손실되는 에너지의 양이 적으며 on-off의 변화에 따른 에너지 손실이 적다는 특징이 있다. 그리고 전압으로 구동되기 때문에 전류로 구동되는 BJT 보다 쉽게 제어할 수 있는 장점이 있다⁴⁾.

점화에너지를 계산하기 위해 점화 전류 및 점화 전압을 각각 전류 프로브 (Tektronix A6303) 및 전압 프로브 (Tektronix P6015)를 이용하여 측정하였다. 전류 프로브에서 얻어지는 전류값은 매우 작기 때문에 전류 증폭기 (Tektronix TM502A, current probe amplifier)를 거쳐 오실로스코프 (LeCroy 9354A)로 입력시킨다. 점화에너지는 오실로스코프로 입력된 전압과 전류

Table 1 Experimental variables and conditions

Experimental variables	Conditions
Dwell time	1.5, 2.5, 3.5 (msec)
Ignition system	DIS, HEIS, HEIP, I-DIS
Electrode gap	0.8, 1.2, 2.0 (mm)
Electrode material	Tungsten, Nickel, Copper
Electrode diameter	1.2, 2.0, 2.8 (mm)
Electrode configuration	sharp, flat
Equivalence ratio (ϕ)	0.8, 1.0

값을 이용하여 구할 수 있다.

2.2 실험 방법

이 실험의 기준 조건은 예혼합실 및 정적연소실 내의 압력과 온도를 6bar, 150 °C로 유지하며 충전시간은 3.5msec, 점화플러그 전극의 간극은 1.2mm, 지름은 2.0mm, 재료는 텅스텐을 사용한 송곳형태의 전극을 가진 점화플러그를 사용한 조건이다. 이 기준 조건에서 초기 온도와 압력을 제외한 나머지 변수들을 변화시켰으며 모든 실험 조건에서 당량비를 0.8과 1.0으로 변화시켜 공연비의 변화에 대한 화염전파속도의 변화를 살펴보았다. Table 1은 각 실험의 조건과 변수들을 나타낸 것이다.

실험은 하나의 조건에서 20회 실시되었으며 이들의 평균을 결과값으로 하였다.

2.2.1 공연비 제어

공연비를 조절하기 위하여 예혼합실이 제작되었으며 다음과 같은 방식으로 예혼합실로 흡입되는 공기 및 분사되는 연료의 양을 조절하였다.

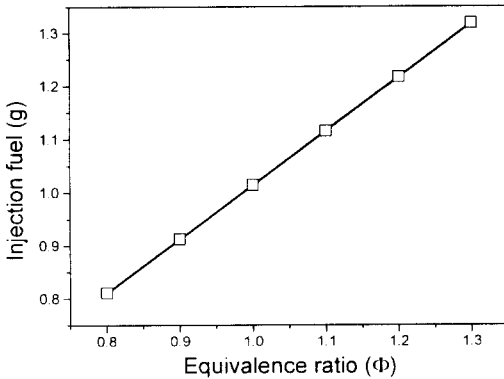


Fig. 4 Injection fuel with equivalence ratio

흡입되는 공기의 양은 이상기체 방정식에서

$$m_a = \frac{PV}{R_a T} \quad (1)$$

로 계산될 수 있으며, 기체상수는 $R_a=0.287$ (J/kg/K)라고 가정하고 예혼합실의 부피는 $265 \times 10^{-5} \text{m}^3$ 이므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_a = \frac{P \times 10^5 \times 265 \times 10^{-5} \times 1000}{0.287 \times 10^3 \times (T + 273)} \text{ (g)} \quad (2)$$

또 분사되는 가솔린의 양은 당량비의 정의식에서

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{(F/A)_{act}}{(F/A)_{stoich}} = \frac{(F/A)_{act}}{14.7^{-1}} \\ &= \frac{m_f/m_a}{6.803 \times 10^{-2}} \end{aligned} \quad (3)$$

이다. 따라서

$$\begin{aligned} m_f &= \phi \times m_a \times 6.803 \times 10^{-2} \\ &= \phi \times \frac{P \times 922.7}{(T + 273)} \times 6.803 \times 10^{-2} \end{aligned} \quad (4)$$

이므로 위의 (2) 및 (4) 식을 이용하여 공연비를 조절하였다. Fig. 4는 각 공연비에 따라 분사되는 연료량을 나타낸다.

2.2.2 점화시기 제어신호 발생기

충전시간의 조절 및 데이터의 획득시기와 점화시기를 동기화 시키기 위해 점화시기 제어신호 발생기를 제작하였다. 이를 이용하여 점화시기와 데이터 획득 시기를 동기화시키게 된다. 또, 충전시간 (dwell time)을 조절하여 점화장치에 저장되는 방전에너지의 양을 제어하게 된다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 충전시간 변화에 따른 점화 에너지 및 화염전파특성의 변화

Fig. 5는 충전시간이 1.5msec에서 3.5msec로 증가함에 따른 각 점화장치의 방전에너지 변화를 나타낸 것이다. 충전시간이란 점화장치의 일차 회로가 통전되어 점화에너지가 점화코일 (coil) 혹은 커패시터 (capacitor)에 저장되는 기간을 말하며 충전시간이 길어질수록 방전되는 점화에너지는 증가하게 된다. 이러한 경향은 포화 (saturation) 현상이 발생할 때까지 나타나며 점화에너지가 포화되면 충전시간을 증가시키더라도 방전에너지는 증가하지 않는다.

Fig. 5에 나타낸 것처럼 DIS와 HEIS, HEIP의 경우, 충전시간이 1.5msec에서 2.5msec까지 증가하면 방전에너지는 증가하나 2.5msec를 넘게 되면 점화에너지는 더 이상 증가하지 않는 현상이 나타나게 된다. I-DIS의 경우, 충전시간을 3.5msec까지 증가시켜도 포화현상이 발생되지 않아 충전시간을 늘리게 되면 보다 더 많은 점화 에너지를 방전시킬 수 있다.

한편 이 실험에서 충전시간이 1.5msec에서 3.5msec로 증가함에 따라 DIS, HEIS, HEIP 그리고 I-DIS의 방전에너지는 각각 약 65%, 60%, 47% 그리고 113% 씩 증가함을 알 수 있다.

Fig. 6은 증가된 방전에너지에 따른 화염전파속도의 변화를 나타낸 것이다. 정적연소실에서 발생하는 화염은 층류화염 (laminar flame)으로 볼 수 있으며 층류화염은 압력이 증가할수록 속도가 떨어진다.⁶⁾ 연소가 진행될수록 연소압력에

1.2mm gap, 2.0mm dia., sharp, tungsten electrode

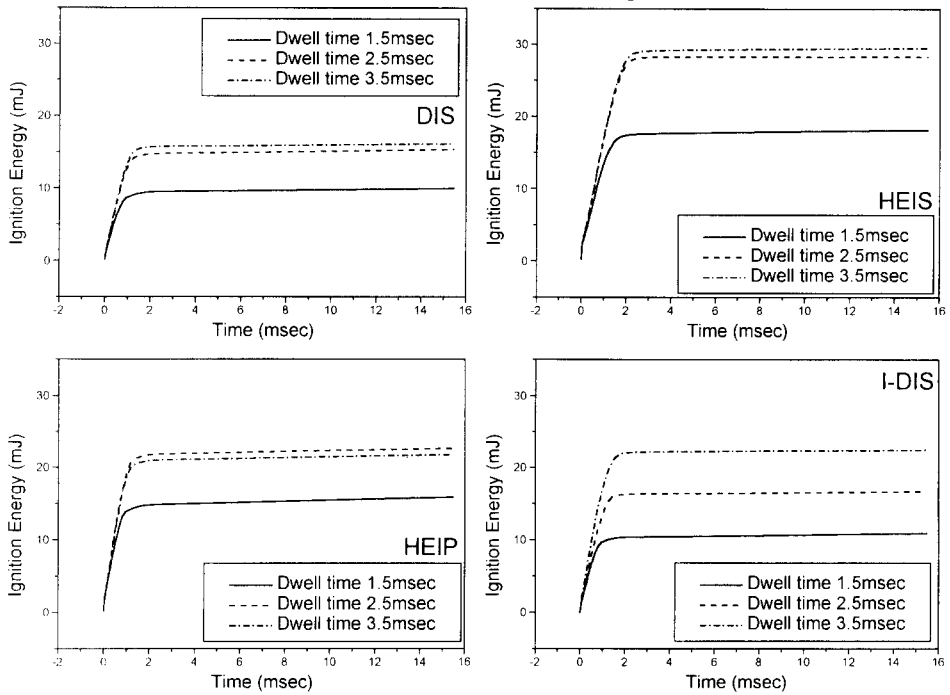


Fig. 5 Effects of dwell times on ignition energy with four ignition systems

1.2mm gap, 2.0mm dia., sharp, tungsten electrode

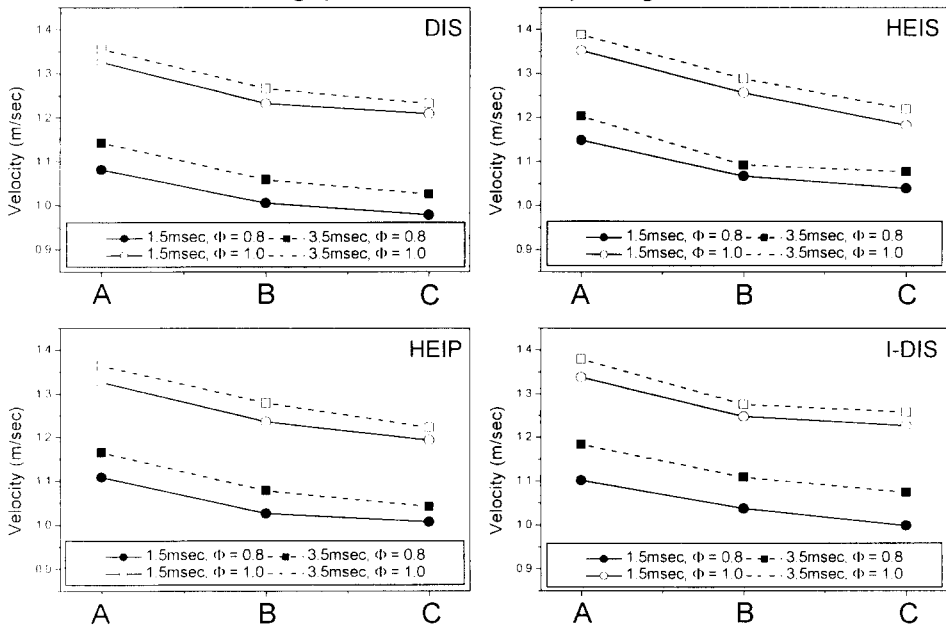


Fig. 6 Effects of dwell times and air fuel ratios on flame kernel development

의해 정적연소실 내의 압력은 증가하게 되어 A 지점보다 C 지점에서 연소속도는 감소하게 된다.

실험 결과를 살펴보면 충전시간이 증가하면 방전에너지는 증가하여 모든 점화장치에서 연소 속도는 증가하는 경향을 보여주고 있다. 특히 점화 에너지에 많은 영향을 받게 되는 A 지점에서의 연소 속도 차이는 더 커지며 회박연소 조건인 $\phi=0.8$ 에서 그 차이는 더욱 더 커지게 된다. DIS의 경우, $\phi=1.0$ 에서 충전시간이 1.5msec에서 3.5msec로 증가하게 되면 A, B, C 각 지점에서 연소속도는 약 2% 증가하였으나 $\phi=0.8$ 에서는 6%, 5%, 4% 증가한 것을 관찰할 수 있다.

3.2 간극 변화에 따른 점화에너지 및 화염전파 특성의 변화

Fig. 7은 점화플러그 간극이 변화함에 따른 점화에너지 변화를 나타낸 것이다. 실험에 사용된 모든 점화장치에서 간극이 커짐에 따

라 방전에너지는 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 방전에 의하여 생성된 플라즈마의 체적당 에너지가 일정하다면 보다 큰 부피의 플라즈마를 유지시키기 위해서는 보다 많은 양의 점화에너지가 요구되기 때문이다^{1),7)}. Fig. 7에서 나타낸 것처럼 간극이 0.8mm에서 2.0mm로 증가하게 될 경우, 방전 후 3msec의 시점에서의 DIS, HEIS, HEIP 그리고 I-DIS의 방전에너지는 각각 77%, 61%, 67% 그리고 115% 증가하게 된다.

화염전파속도 역시 간극이 넓어질수록 빨라지며 이러한 경향은 Fig. 8에서 확인할 수 있다. 즉 간극이 0.8mm에서 2.0mm으로 커지면 A점에서 전파속도는 $\phi=0.8$ 인 조건에서 각 점화장치에 따라 5~7% 증가하였음을 알 수 있다.

이와 같은 속도의 증가는 주로 증가된 방전에너지 때문이다. 또 플라즈마의 부피가 증가하면 플라즈마와 접촉할 수 있는 미연가스의 양이 많

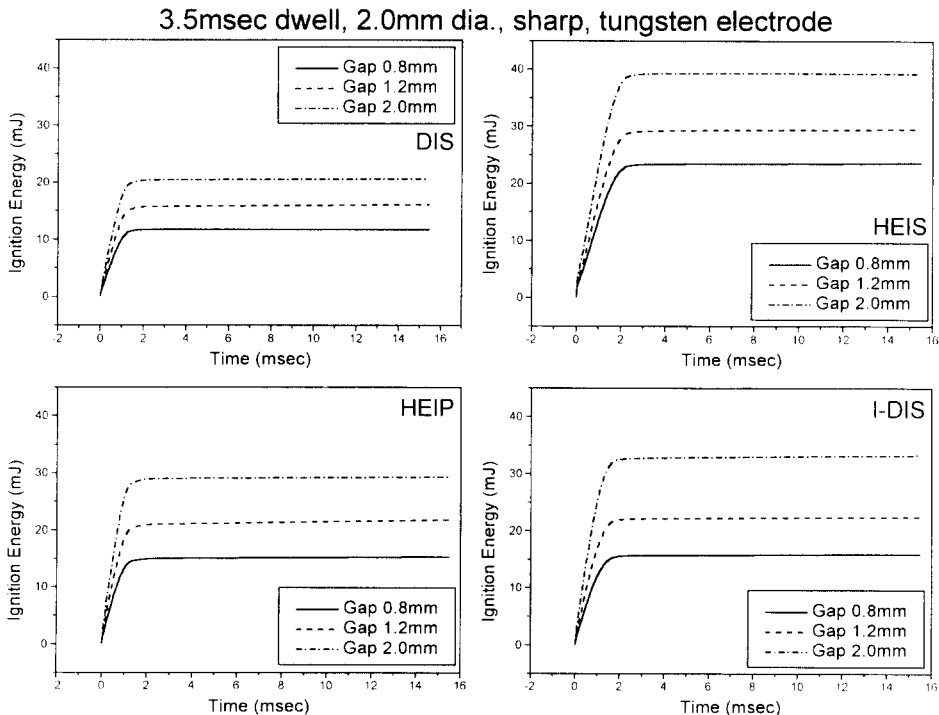


Fig. 7 Effects of spark plug gaps on ignition energy with four ignition systems

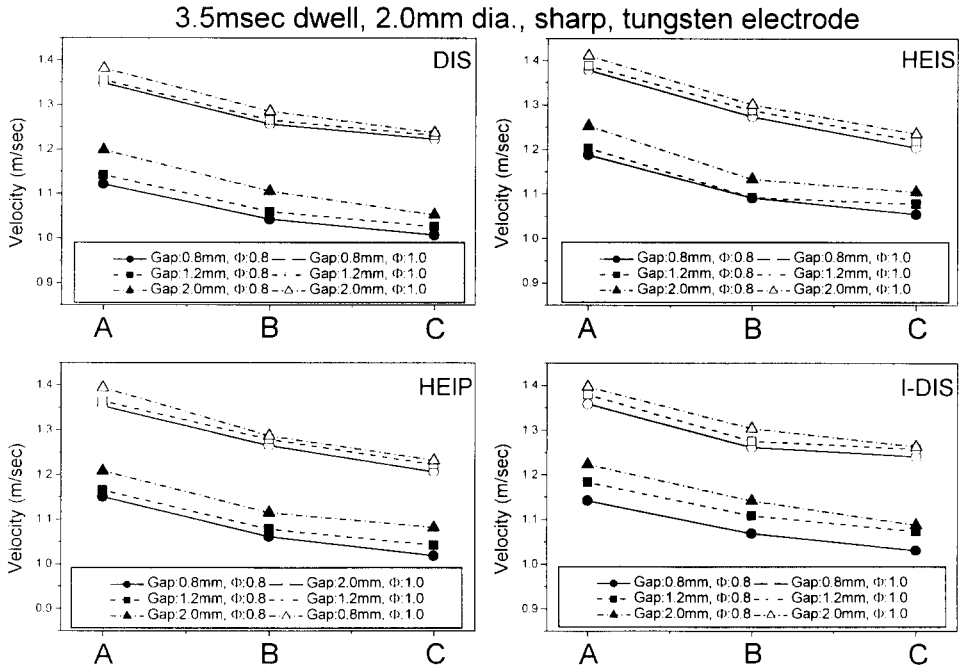


Fig. 8 Effects of spark plug gaps and air fuel ratios on flame kernel development

아져 초기 화염핵의 성장속도가 빨라지기 때문이다.

화에너지가 증가하기 때문이다.¹⁾

3.3 전극 재료의 변화에 따른 점화 에너지 및 화염전파특성의 변화

전극의 재료가 변화함에 따른 점화에너지 및 화염전파 속도의 변화를 살펴보기 위하여 실험을 실시하였다. Fig. 9는 이 실험의 결과를 나타내고 있다. 점화플러그의 전극은 텅스텐, 니켈, 구리로 만들어졌으며 텅스텐의 용융 온도는 3660K, 니켈은 1728K, 그리고 구리는 1358K이다. 그림에서 알 수 있듯이 용융 온도가 높을수록 방전에너지가 작아지는 경향이 있다.

Fig. 10은 전극 재료 변화에 의한 화염전파속도의 변화를 나타낸 것이다. 앞의 두 실험 결과에 비하여 속도차이는 크지 않으나 구리, 니켈, 텅스텐 전극의 순서로 속도가 떨어지는 것을 알 수 있다. 이는 전극을 구성하는 물질의 용융점이 낮을수록 점화에너지의 전달효율이 증가하며 점

3.4 전극 지름 변화에 따른 점화 에너지 및 화염전파특성의 변화

Fig. 11은 전극의 지름이 변화함에 따른 점화에너지의 변화를 나타낸 것이다. 전극의 지름이 변화하더라도 전극의 간극이 동일하고 형태가 비슷하기 때문에 점화에너지는 큰 차이를 보이지 못하고 있다. 마찬가지로 화염전파속도 역시 크게 차이를 보이지 못한다.(Fig. 12) 하지만 전극의 지름이 작아지면 방전되는 전기에너지의 양은 증가하는 경향을 보인다. 이는 전자를 방출하는 캐소드 (cathode)의 면적이 좁아지면 전류의 밀도가 높아져 전기에너지의 전달효율이 높은 아크 방전으로 방전하려는 경향을 가지기 때문이다.^{2,8)}

Fig. 12는 전극 지름의 변화에 따른 DIS 및 HEIS에서의 화염전파 속도의 변화를 나타내고 있다. 전극의 지름이 작아지면 모든 운전조건에서 화염전파속도가 증가하는 경향을 관찰할 수

3.5msec dwell, 1.2mm gap, 2.0mm dia., sharp electrode

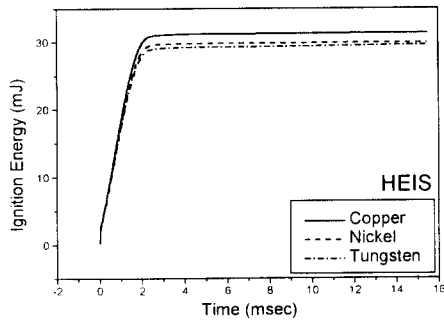
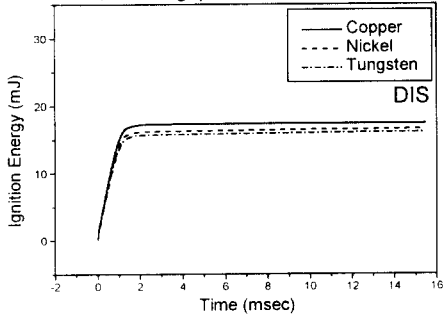


Fig. 9 Effects of electrode materials on ignition energy with four ignition systems

3.5msec dwell, 1.2mm gap, 2.0mm dia., sharp electrode

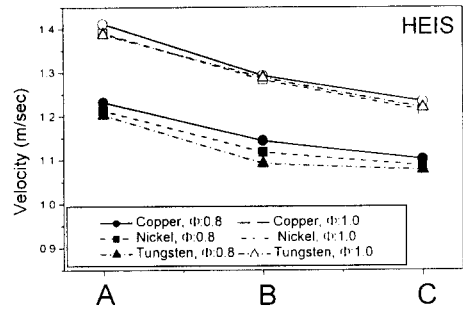
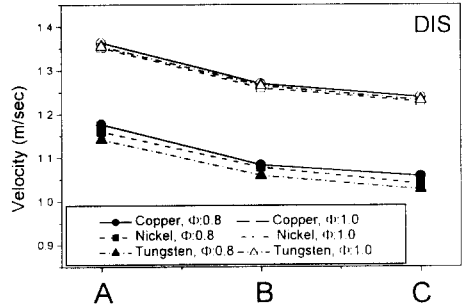


Fig. 10 Effects of electrode materials and air fuel ratios on flame kernel development

3.5msec dwell, 1.2mm gap, sharp, tungsten electrode

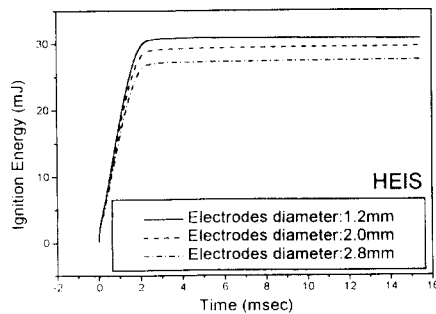
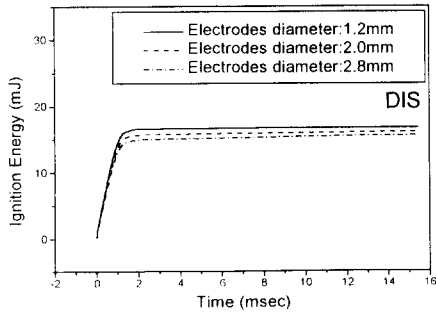


Fig. 11 Effects of electrode diameters on ignition energy with four ignition systems

3.5msec dwell, 1.2mm gap, sharp, tungsten electrode

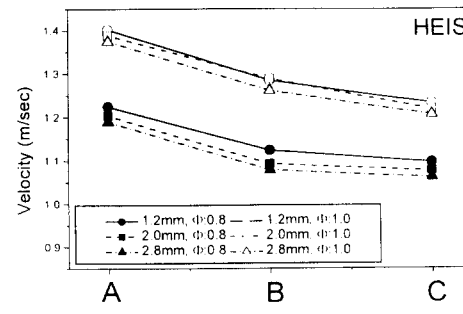
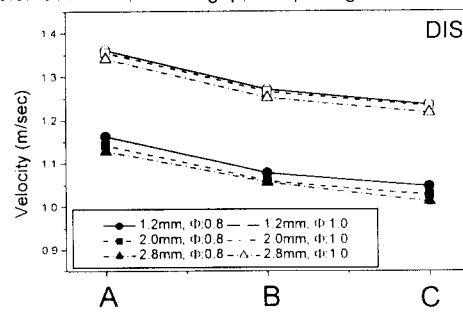


Fig. 12 Effects of electrode diameters and air fuel ratios on flame kernel development

있다. 이러한 경향은 점화에너지의 증가와 전달 효율의 증가 그리고 초기화염핵의 열손실 감소 등에 의한 것이다.

3.5 전극 형태의 변화에 따른 점화 에너지 및 화염전파 특성의 변화

이 실험에서는 전극 형태의 변화에 따른 점화 에너지 및 화염전파 속도의 변화를 살펴보았다.

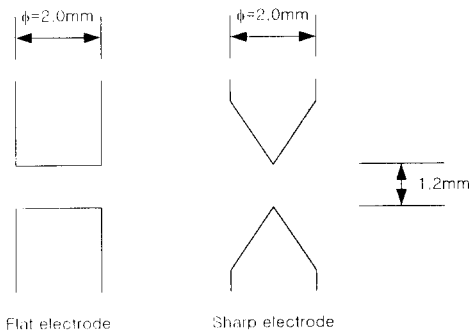


Fig. 13 The configuration of electrodes

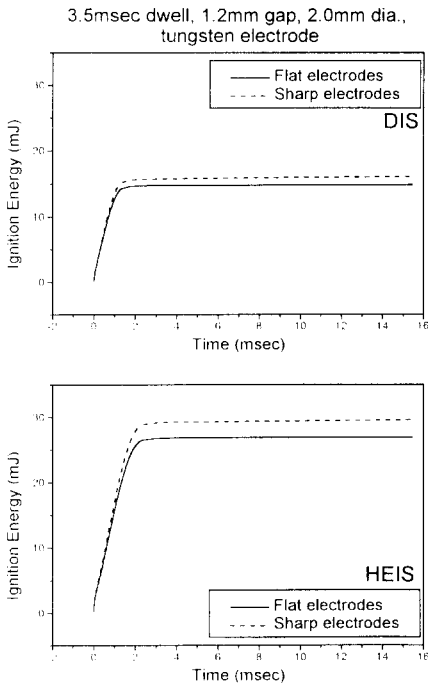


Fig. 14 Effects of electrode shapes on ignition energy with four ignition systems

이를 위해 Fig. 13와 같이 전극의 형태를 평평한 것과 뾰족한 것의 플러그를 제작하였다.

Fig. 14 및 Fig. 15에서 알 수 있듯이 전극의 끝이 뾰족해 짐에 따라 방전은 보다 높은 전류밀도를 가지는 아크방전으로 이루어진다. 이에 따라 보다 높은 점화에너지를 방전하며 에너지의 전달효율도 높아져 화염의 전파속도를 증가시키는 것을 알 수 있다. 하지만 두 전극사이의 거리가 같고 충전시간이 같아 점화에너지 및 화염전파속도의 차이는 크게 나지 않는 것을 알 수 있다.

4. 결론

이 연구는 점화장치, 점화에너지 및 점화플러그 전극의 형태가 초기화염생성 및 그 이후의 화염전파특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 실시되었다. 이를 위하여 DIS, HEIS, HEIP, 그리고 I-DIS 점화장치가 설계, 제작되었으며 방전에

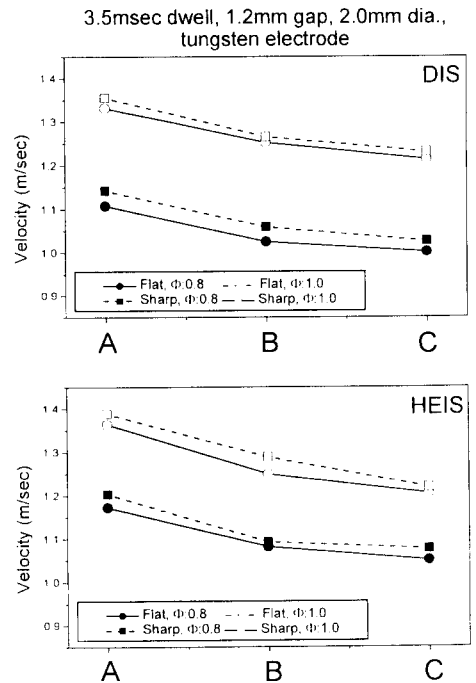


Fig. 15 Effects of electrode shapes and air fuel ratios on flame kernel development

너지를 변화시키기 위하여 충전시간을 조절하였다. 또한 점화플러그 전극의 지름과 형태 그리고 재료를 변화시켜 제작하였으며 정적연소기 내의 화염 성장 속도를 측정하기 위해 레이저 굴절법을 사용하였다.

이 실험을 통하여 얻어진 결과들을 정리하면 다음과 같다.

1) 실험에 사용된 유도성 방전 점화 장치는 충전시간이 길어지면 방전에너지는 커진다. 그리고 증가된 방전에너지는 초기 화염핵의 성장 및 그 이후의 화염전파속도를 증가시키는데 많은 역할을 하게 된다.

방전시간이 1.5msec에서 3.5msec로 증가함에 따라 방전시작 후 3msec에서 DIS는 10mJ에서 16mJ로, HEIS는 18mJ에서 29mJ로, HEIP는 15mJ에서 21mJ로 그리고 I-DIS는 10mJ에서 22mJ로 증가하였다. 하지만 DIS, HEIS, HEIP의 경우, 충전시간이 2.5msec 이상이 되면 포화현상이 발생하게 되어 충전시간이 길어지더라도 이상 점화에너지의 증가는 발생하지 않았다.

화염의 전파속도는 점화에너지가 증가함에 따라 빨라졌으며 $\phi=0.8$ 인 경우, A 지점에서 점화장치에 따라 약 5~7% 정도 증가하였음을 알 수 있었다.

2) 점화플러그 전극의 간극이 커지면 보다 큰 부피의 플라즈마를 발생 및 유지시켜야 하며 이를 위하여 보다 많은 양의 점화에너지가 요구된다. 따라서 방전에너지의 양은 증가하며 화염핵의 성장속도는 빨라진다. 또한 미연가스가 접할 수 있는 플라즈마의 부피 역시 증가되어 초기 화염전파속도가 증가하게 된다.

전극의 간극이 0.8mm에서 2.0mm까지 증가하게 되면 각 점화장치의 방전에너지는 약 70%~110% 정도 증가함을 알 수 있다. 그리고 화염전파속도는 $\phi=0.8$ 일 때, A 지점에서 점화장치에 따라 5~7% 씩 증가하는 것을 관찰할 수 있었다.

3) 점화플러그 전극의 재료의 변화에 의하여 점화에너지 및 화염전파속도는 달라지며 이는 주

로 전극을 구성하는 재료의 용융 온도와 밀접한 관계가 있다. 즉, 용융 온도가 낮아질수록 전기 에너지의 전달효율은 높아지고 방전에너지도 증가하기 때문이다.

실험에 사용된 재료 중 용융점이 가장 낮은 구리가 가장 높은 텅스텐 보다 DIS의 경우, 점화에너지는 약 16% 정도 증가하였으며, 화염전파속도는 회박연소일 때, A 지점에서의 속도는 약 3% 정도 증가하였다. 그리고 HEIS의 경우, 점화에너지는 약 7%, 연소속도는 약 2% 정도 증가하여 화염의 성장속도에 점화플러그 전극의 재료가 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

4) 점화플러그 전극의 지름 또한 점화에너지 및 화염전파속도에 영향을 주며 지름이 작아질수록 점화에너지 및 화염전파속도는 증가하는 경향을 가진다.

점화에너지의 경우, 전극의 지름이 1.2mm일 때, 지름이 2.0mm의 경우보다 DIS를 이용한 실험에서는 약 10%, HEIS의 실험에서는 약 15% 정도 증가함을 알 수 있었다. 화염전파속도는 $\phi=0.8$ 의 경우, A 지점에서 DIS 및 HEIS 두 장치 모두에서 약 3% 씩 증가함을 알 수 있다.

5) 점화플러그 전극 형태 변화는 점화에너지 및 화염전파속도에 영향을 미치며 뾰족한 형태의 전극이 평평한 형태의 전극보다 점화에너지의 증가에 도움이 되는 것을 알 수 있었다. 이는 전극의 끝이 뾰족해지면 캐소드에서 방출되는 전자의 밀도가 높아져 전류밀도가 높아지기 때문이다. 따라서, 뾰족한 전극을 가진 점화플러그를 사용하였을 경우, 평평한 전극의 점화플러그 보다 점화에너지는 7~9% 증가함을 알 수 있었다.

화염전파속도 또한 증가하였으며 회박연소 조건의 초기화염전파속도는 A 지점에서 2~3% 정도 증가함을 관찰할 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) G. Ziegler, E. Wagner and R. Maly, "Ignition of Lean Methane-air Mixtures

- by High Pressure Glow and Arc Discharges”, 20th Symposium (International) on Combustion, 1984.
- 2) S. Pischinger and J. B. Heywood “How Heat Losses to the Spark Plug Electrodes Affect Flame Kernel Development in an SI-Engine”, SAE 900021, pp. 53-73, 1990.
 - 3) 이창연, 이창식, 이기형, 강우, “레이저 굴절법을 이용한 LPG와 가솔린의 연소 및 화염전파특성분석”, 대한기계학회 추계학술대회, 1998.
 - 4) N. Mohan, T. Undeland and W. Kobbins, “Power Electronics”, John Willy & Sons, chap 26, pp. 626-640, 1995.
 - 5) 송정훈, 선우명호, 김우태, “희박연소기관에서 고점화 에너지에 의한 기관 성능향상에 관한 연구”, 자동차공학회논문집, 제7권, 제2호, pp. 31-40, 1999.
 - 6) D. B. Rhodes and J. C. Keck “Laminar Burning Speed Measurements of Indolene-Air-Diluent Mixture at High Pressure and Temperature”, SAE 850047.
 - 7) C. Arcoumanis and C. Bae, “Correlation between Spark Ignition Characteristics and Flame Development in a Constant-Volume Combustion Chamber”, SAE 920413, pp. 556-570, 1992.
 - 8) R. Maly and M. Vogel “Initiation and Propagation on Flame Fronts in Lean CH₄-Air Mixtures by the three modes of the Ignition Spark”, 17th symposium (International) on Combustion Institute, pp. 821-831, 1978.