

## 가시화를 이용한 정적연소기에서 점화장치가 화염전파에 미치는 영향에 관한 연구

송 정 훈\* · 선우 명호\*\*  
(2000년 5월 10일 접수)

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

Jeonghoon Song and Myoungho Sunwoo

**Key Words:** Flame Propagation(화염전파), Ignition System(점화장치), Schlieren Method(술리렌 방법), Constant Volume Combustion Chamber(정적연소기)

#### Abstract

A visualization study using the schlieren method is adopted in an optically-accessible, cylindrical constant volume combustion chamber to identify the mechanism of ignition energy and ignition system interaction in spark ignited, lean gasoline-air mixture. In order to research the effects of ignition system on flame propagation, two kinds of ignition system are designed, and several kinds of spark plugs are tested and evaluated. To control the discharge energy, the dwell time is varied. The initial flame development is quantified in terms of 2-D images which provides information about the projected flame area and development velocity as a function of ignition system and discharge energy. The results show that high ignition energy and extended spark plug gap can shorten the combustion duration in lean mixtures. The material, diameter and configuration of electrodes influence the flame development by changing the transfer efficiency from electrical energy to chemical energy and discharge energy. However, these factors do not affect on flame development as much as ignition energy or extended gap does.

#### 1. 서 론

최근 고성능, 고효율 엔진에 관한 연구가 진행됨에 따라 실린더 내부의 유동 및 화염에 대한 측정 필요성이 점차 증가하고 있다.

엔진 가시화의 초기에는 열선유속계를 실린더 내에 삽입하여 국부적 유동속도를 측정하는 방법<sup>(1)</sup>이나 연소실 벽면에 이온 갭 프로브를 설치하여 화염이 도달하는 것을 감지하는 방법 등이 사용되었다.

한편, 최근 레이저를 이용한 유동 및 연소진단 기술의 발달 및 카메라 기술의 발달로 엔진에 광학적인 접근이 가능해짐에 따라 유동 및 연소의 관찰이 용이하여 졌다. 즉, 레이저 도플러 유속계를 이용하여 유동에 방해가 주지 않고 유속을 측정할 수 있으며<sup>(2)</sup> Rayleigh 산란, Mie 산란, 레이저 유도 형광법 등<sup>(3,4)</sup>을 이용하여 실린더 내의 연료의 분포 또는 화염전파 형태 등을 관찰할 수 있게 되었다.<sup>(5)</sup>

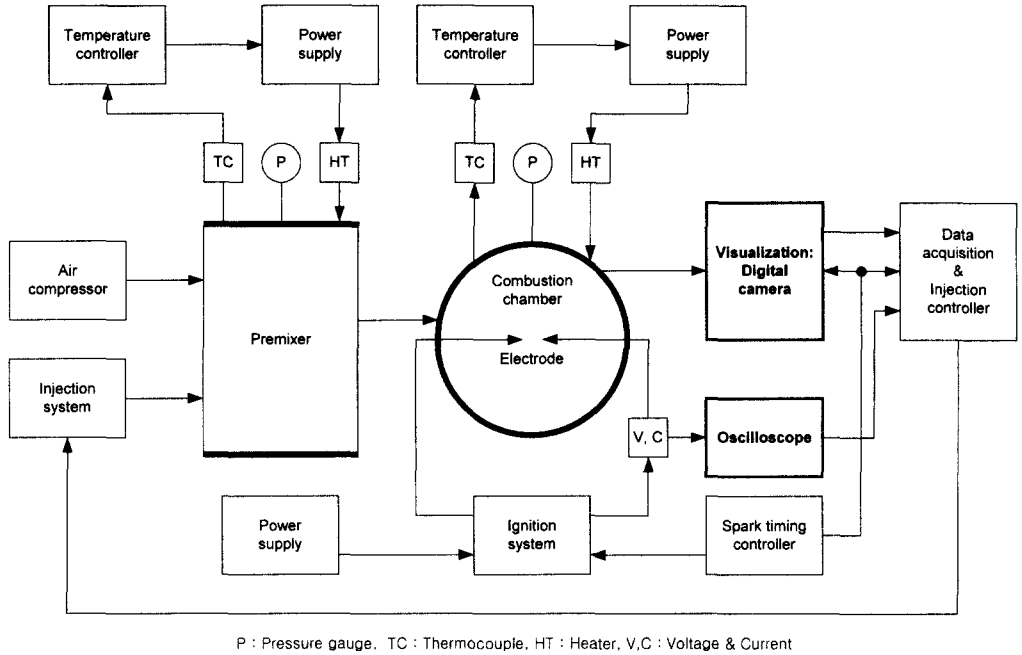
하지만 이러한 방법들은 엔진 내부에서 발생하는 난류나 혼합기의 불균일한 분포에 의한 매 사이클마다의 연소 변화의 영향으로 점화장치나 점화에너지의 변화에 의한 화염성장의 차이를 정확히 측정하기는 매우 힘들다. 이러한 단점을 극복하기 위해서는 난류화염을 유도하는 성분을 제

\* 한양대학교 대학원

\*\* 회원, 한양대학교

E-mail : msunwoo@email.hanyang.ac.kr

TEL : (02)2290-0453 FAX : (02)2297-5495



P : Pressure gauge, TC : Thermocouple, HT : Heater, V.C : Voltage & Current

Fig. 1 Experimental apparatus

거하여 층류화염 만을 발생시켜 점화장치 또는 점화에너지에 의한 화염전파 특성을 관찰하여야 한다. 이를 위해 주로 정적연소기를 사용하여 실험하며, 이러한 실험은 연소과정에 영향을 미치는 인자들을 독립적으로 분리하여 연구할 수 있다는 장점을 가진다. 또, 열 및 유동의 상태량 조절이 쉬우며 가시화가 용이하다는 장점이 있다.<sup>(5)</sup> 특히 정적연소기를 사용한 실험은 초기화염핵의 성장과정을 관찰하는데 유용하게 사용될 수 있다.

따라서 이 연구에서는 슐리렌 방법 (schlieren method)과 Kodak 사의 motion coder analyzer라는 고속 디지털 카메라를 사용하여 정적연소기에서의 점화에너지와 점화장치의 변화에 따른 초기화염핵의 성장변화를 가시적으로 관찰하였다. 이를 위해 두 종류의 점화장치가 설계, 제작되었으며 전극의 형태를 변화시킨 점화플러그를 제작하였다. 한편 점화시기 제어신호 발생기를 이용하여 충전시간을 변화시켜 점화에너지를 조절하였으며 화염 측정 시작 시간과 점화시기를 동기화시켰다.

2. 실험장치 및 실험방법

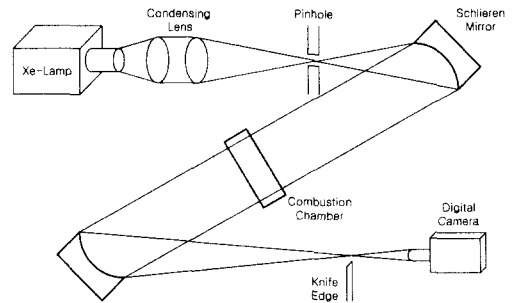


Fig. 2 Visualization system using schlieren method

2.1 고속 디지털 카메라를 이용한 화염전파 속도 측정

Fig. 1은 이 실험에서 사용된 정적연소기와 점화장치 등의 실험장치를 나타낸 개략도이다. 한편, 화염전파의 가시화를 위하여 Fig. 2에 나타낸 것과 같은 슐리렌 방법을 이용하였다.

슐리렌 방법은 유체의 밀도구배에 따라 선형적으로 변하는 빛의 굴절률의 구배를 이용하며 유체 내에 아무런 물리적, 화학적 영향을 주지 않고 열, 압력, 밀도 분포 등을 광학적으로 가시화하는 비접촉성 유체 가시화 방법이다.

슐리렌 시스템은 크게 광원부와 수광부로 되어

있으며 광원은 최대 300mW의 크세논 램프(VIX4)를 사용하였다. 광원에서 발생된 빛은 편광을 거쳐서 양단의 슬리렌 렌즈 사이에 위치한 연소실에 집광된 후, 나이프 에지(knife edge)에서 상이 맺힌다. 이때 굴절되지 않은 광선은 나이프 에지로 차단하므로써 굴절된 광선만을 고속 디지털 카메라를 이용하여 3000fps의 속도로 촬영한다.

한편 촬영된 실험의 결과는 Matrox inspector 라는 프로그램을 이용하여 형상처리(image processing) 한 후, 화염 크기를 측정한다.

## 2.2 정적연소기

정적연소기는 예혼합실과 정적연소실로 이루어져 있다.

예혼합실은 이 실험에서 사용된 연료인 가솔린의 완전한 기화와 공연비의 조절을 위하여 제작되었다. 재질은 급속한 가열을 위해서 열 전도성이 좋은 동으로 만들었으며 예혼합실 양 측면에 400W 및 600W의 판 히터를 설치하였다.

예혼합실의 체적은  $2650 \times 10^{-6} \text{m}^3$ 이며 압력 및 온도는 6bar, 150°C로 하여 가솔린이 기체 상태를 유지하여 공기와 잘 혼합되도록 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 듀랄루민으로 제작하였다. 역시 150°C를 유지시켜 기화된 가솔린이 응결되는 것을 방지하였다. 한편 점화는 정적연소실에 혼합기를 흡입시키고 3분 후에 실시하여 흡입시 발생되는 난류를 가능한 제거하였다.

## 2.3 점화장치 및 점화플러그

점화장치에 의한 화염전파특성의 변화를 살펴보기 위해 이 연구에서는 두 종류의 점화장치가 설계, 제작되었다. 즉, 현재 일반적으로 자동차에 많이 사용되어지는 점화장치이며, 하나의 점화코일로 두 개의 점화플러그를 구동하는 직접점화장치(DIS : Direct Ignition System)와 DIS의 일차 및 이차회로를 변형하여 점화에너지 및 방전시간을 증가시킨 고에너지점화장치(HEI : High Energy Ignition)이다. 이 장치는 두 개의

Table 1 Experimental variables and conditions

Experimental variables	Conditions
Dwell time	1.5, 2.5, 3.5 (msec)
Ignition system	DIS, HEI
Electrode gap	0.8, 1.2, 2.0 (mm)
Electrode material	Tungsten, Nickel, Copper
Electrode diameter	1.2, 2.0, 2.8 (mm)
Electrode shape	sharp, flat

점화코일이 두 개의 점화플러그를 구동하는 구조이다. 보다 자세한 회로도는 참고문헌(6)을 참고하기 바란다.

한편, 점화플러그 전극의 변화에 의한 화염전파특성의 변화를 살펴보기 위해 몇 가지 종류의 점화플러그를 제작하였다. 즉, 점화플러그 전극의 간극, 재료, 지름 그리고 형상을 변화시켰다. 또 충전시간(dwell time)을 변화시켜 방전되는 에너지의 양을 조절하였다. Table 1은 제작되어진 점화플러그의 종류와 충전시간 및 공연비 등의 실험조건을 나타낸 것이다.

## 3. 실험결과 및 고찰



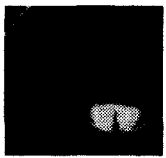
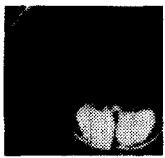

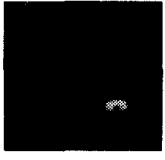
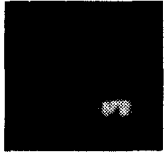
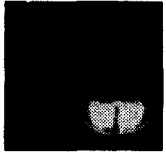
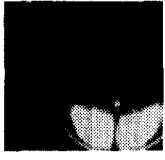

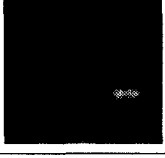
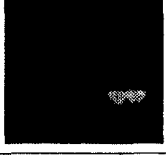
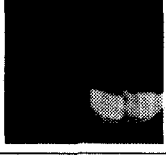
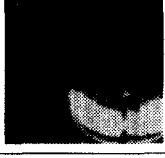
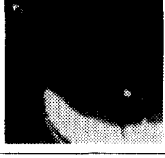
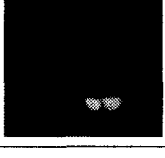
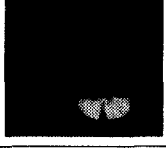
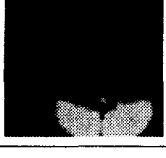
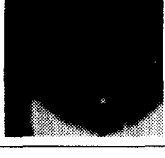
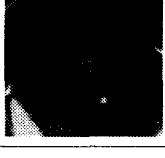
하나의 조건에서 실험은 약 3회 이루어 졌으며 이들의 평균값을 각 실험에서의 결과값으로 나타내었다. 모든 실험에서 당량비( $\Phi$ )는 0.8로 고정하였다. 충전시간은 3.5msec, 점화플러그 전극의 간극은 1.2mm, 전극의 재료는 텅스텐, 지름은 2.0mm 그리고 전극의 형태는 뾰족한 전극을 사용한 실험을 기준으로 하였으며 각 실험에서 이 변수들을 변화시키며 실험하였다. 각 실험에서의 화염 형태는 Table 2~6에 나타내었으며 측정된 화염팽창속도의 평균값은 Appendix에 나타내었다.

한편 전류 및 전압 프로브(Tektronix A6303, Tektronix P6015) 그리고 오실로스코프(LeCroy 9354A)를 이용하여 방전에너지를 측정하였다.

### 3.1 충전시간의 변화가 화염전파에 미치는 영향

Table 2는 충전시간이 1.5msec에서 3.5msec로

Table 2 Effects of dwell times on initial flame propagation

	Dwell	3msec	5msec	10msec	15msec	20msec
DIS	1.5 msec					
	3.5 msec					
HEI	1.5 msec					
	3.5 msec					

증가함에 따른 화염전파 속도의 차이를 나타내고 있다.

그림에서 나타난 것처럼 초기 화염핵의 경우, 전극의 영향으로 인하여 타원형의 형태를 가지나 화염이 성장함에 따라 점차 원의 형태로 변화한다. 이때 점화에너지가 증가하면 화염은 보다 빨리 원형으로 변화하여 큰 부피를 가진다.

일반적으로 충전시간이 길어지면 1차 회로에 저장되는 에너지가 증가하여 방전에너지는 증가하게 된다. 즉, 충전시간이 1.5msec에서 3.5msec로 증가하면, DIS의 경우, 9.6mJ에서 15.8mJ로 방전에너지가 증가하며, HEI의 경우는 17.6mJ에서 29.1mJ로 증가한다. 방전에너지가 증가하면 초기화염핵의 성장은 빨라지고 이러한 차이는 연소가 끝날 때까지 지속된다.

또한 HEI의 경우, 보다 많은 방전에너지를 공급하므로써 DIS를 사용한 조건보다 빨리 화염핵이 성장하는 것을 관찰할 수 있다.

Appendix의 Fig. A1은 충전시간이 변화함에 따른 화염핵의 성장속도를 나타낸 것이다. 절연 파괴방전으로 생성된 고온 (40000K~60000K), 고



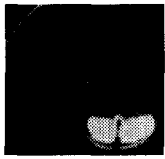







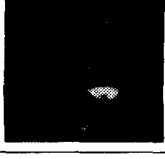
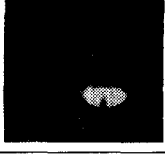
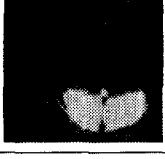
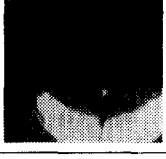

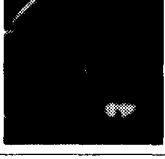
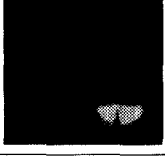
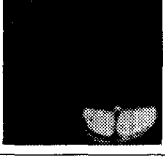

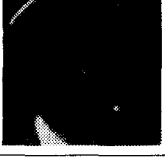
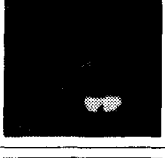
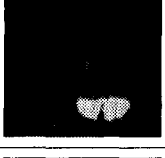
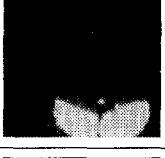
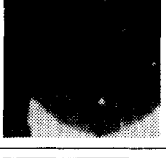

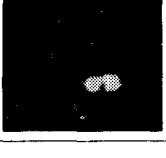
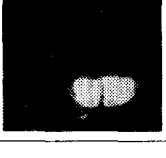
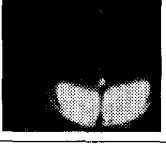


압 (약 200bar)의 플라즈마는 주로 전도에 의해 화염핵으로 성장하며 열확산이 진행됨에 따라 급속히 팽창속도가 감소하게 된다.<sup>(7)</sup> 이후 연소에 의하여 화염핵은 화염으로 성장하게 된다.

실험에서는 점화 후, 약 4~5msec가 경과한 뒤 본격적인 연소가 시작하나 실제 엔진에서 발생하는 약 1~3msec에서 연소가 시작되는 것<sup>(7,8)</sup>에 비하여 느린 값을 알 수 있다. 이는 정적연소기 내에서는 혼합기의 유동이 거의 없어, 화염핵으로 미연가스의 공급이 적어져 화염으로의 성장이 느려지는 것으로 주된 원인으로 사료된다. 또 엔진의 경우, 화염핵이 화염으로 성장한 후, 연소 속도는 난류화염에 의해 점차 빨라지나 정적연소기 내에서는 연소가 진행됨에 따라 연소압력이 증가하여 연소속도는 증가하지 못하고 일정한 값을 가지거나 오히려 감소하는 경향을 가짐을 알 수 있다.

3.2 점화플러그 전극의 간극 변화가 화염전파에 미치는 영향

Table 3은 점화플러그 전극의 간극 변화가 화염

**Table 3** Effects of spark plug gaps on initial flame propagation

	Gap	3msec	5msec	10msec	15msec	20msec
DIS	0.8 mm					
	1.2 mm					
	2.0 mm					
HEI	0.8 mm					
	1.2 mm					
	2.0 mm					

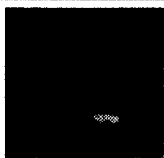

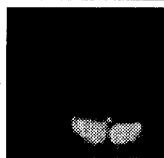
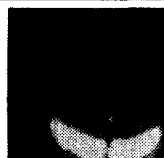
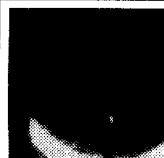


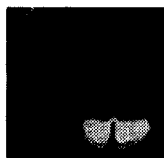







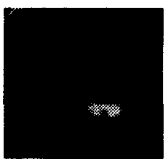

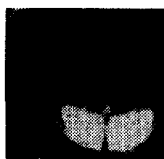








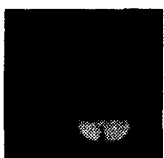
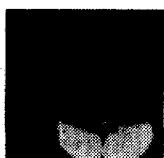

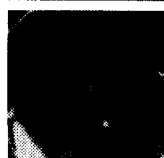
전파에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 앞의 실험에서 나타난 화염의 형태와 비슷하게 초기화염은 전극의 영향을 받아 타원의 형태를 가지나 화염이 성장함에 따라 원형으로 변해간다.

DIS의 경우, 간극이 0.8mm에서 2.0mm로 커짐에 따라 방전에너지는 11.8mJ에서 20.5mJ로 커지며 HEI의 경우, 20.3mJ에서 39.2mJ로 간극과 거의 비례하여 증가한다. 이러한 경향은 간극이 증가하면 방전에 의해 생성되는 플라즈마의 부피는 커지며, 보다 큰 부피의 플라즈마를 생성시키고 유지시키기 위해서는 보다 많은 량의 방전에

너지가 필요하기 때문이다.

특히, 간극이 커지면 절연파괴 방전에너지는 거의 비례하여 커진다.<sup>(9)</sup> 그 결과, 절연파괴 방전에 의하여 생성되는 플라즈마의 지름 및 길이는 절연파괴 방전에너지에 비례하여 커지게 된다.<sup>(7,8)</sup> 이에 플라즈마에서 성장한 초기 화염핵은 보다 큰 부피를 가지며, 미연가스와 접촉할 수 있는 표면적이 넓어져 빨리 성장하게 된다. 이러한 경향은 Appendix의 Fig. A2에서도 확인할 수 있다. 즉,  $\phi=0.8$ 의 조건에서, 간극이 0.8mm에서 2.0mm로 커짐에 따라, 점화 후 2msec일 때, 화

**Table 4** Effects of electrode materials on initial flame propagation

	Mat.	3msec	5msec	10msec	15msec	20msec
DIS	Cu					
	Ni					
	W					
HEI	Cu					
	Ni					
	W					

염핵의 성장속도는 DIS의 경우, 약 20% 정도, HEI는 약 13% 정도 증가함을 알 수 있다.

**3.3 전극 재료의 변화가 화염전파에 미치는 영향**

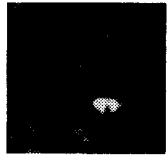
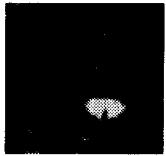



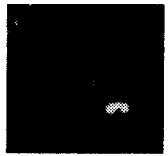
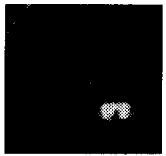
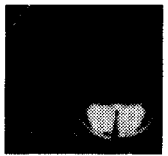


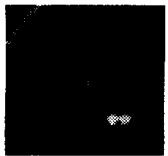
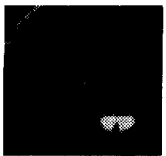



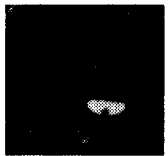
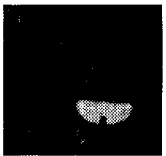



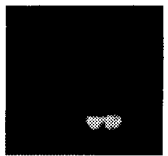
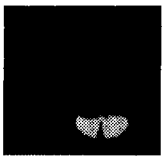





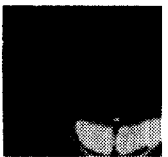


Table 4와 Fig. A3는 전극 재료가 변화함에 따른 화염전파 속도의 변화를 나타낸 것이다. 전극 재료가 변화하면 화염전파속도 역시 변화하게 된다. 이는 재료가 달라지면 전극의 용융점이 변화하며, 용융점이 낮을수록 방전에너지가 증가하고 방전에너지의 전달효율도 높아지기 때문이다. 또한 초기 화염핵의 성장기간 동안 전극으로의 전도에 의한 열손실량이

변화하여 화염전파 특성에 영향을 미치게 된다.

실험에 사용된 전극은 구리, 니켈, 텅스텐이며 이들의 용융점은 각각 1358K, 1728K 그리고 3660K이며 열 전도계수는 423K에서 약 391 W/(mK), 79W/(mK) 그리고 157W/(mK)이다.<sup>(10)</sup> 방전에너지는 DIS의 경우, 각각 17.3mJ, 16.3mJ 그리고 15.8mJ이며 HEI의 경우, 30.8mJ, 29.1mJ 그리고 27.1mJ로 변화하여 방전에너지와 전극의 용융점은 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

한편 방전에너지의 전달효율은 재료가 변화함에 따라 글로우 방전 기간동안 음극에서 방출되

Table 5 The effect of electrode diameters on initial flame propagation

	Dia.	3msec	5msec	10msec	15msec	20msec
DIS	1.2 mm					
	2.0 mm					
	2.8 mm					
HEI	1.2 mm					
	2.0 mm					
	2.8 mm					

는 전자의 양이 달라져 변화하게 된다. 즉 용융점이 낮을수록 방출되는 전하의 수는 많아져, 보다 많은 전류가 방전되어 아크 방전으로 변화하려는 경향을 가지게 된다. 만약 글로우 방전에서 아크 방전으로 변화하면 방전에너지의 전달효율은 약 30%에서 50%로 증가하게 된다.<sup>(11)</sup>


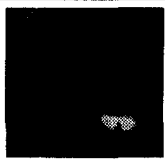
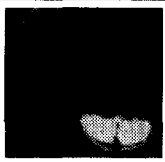


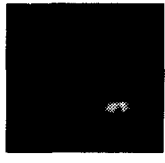
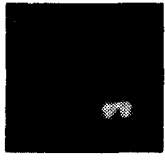
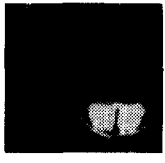



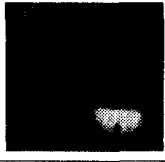
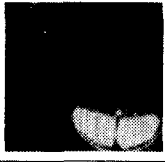




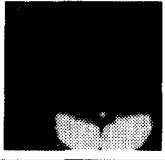


이와 같은 원인으로 인하여 화염핵의 성장속도는 전극의 재료에 의하여 영향을 받으며 Fig. A3에서 확인할 수 있다. 하지만 초기 화염핵의 성장은 앞의 두 실험에 비하여 크게 영향을 받지 않는다. 즉  $\phi=0.8$ 의 조건에서, DIS와 HEI, 두

점화장치 모두에서 전극이 텅스텐에서 구리로 바뀌에 따라, 방전시작 후 2msec에서 화염전파속도는 약 7~8% 정도 빨라짐을 관찰할 수 있다.

### 3.4 점화플러그 전극 지름의 변화가 화염전파에 미치는 영향

Table 5와 Fig. A4는 점화플러그 전극의 지름이 화염전파에 미치는 영향을 나타내고 있다. 전극 지름 변화 역시 화염전파속도에 영향을 미치나 충전시간과 전극의 간극이 같아 큰 영향을 미치지 못한다.

Table 6 The effect of electrode shapes on initial flame propagation

	Shape	3msec	5msec	10msec	15msec	20msec
DIS	Flat					
	Sharp					
HEI	Flat					
	Sharp					

전극 지름이 2.8mm, 2.0mm 그리고 1.2mm로 작아지면 방전에너지는 DIS의 경우, 15.1mJ, 15.8mJ 그리고 16.7mJ로 증가하며 HEI의 경우 역시 27.1mJ, 29.1mJ 그리고 30.8mJ로 증가하여 방전되는 에너지의 량이 변화함을 알 수 있다.

하지만 이러한 방전에너지의 증가는 전극의 간극이 동일하기 때문에 주로 아크 및 글로우 방전에서 에너지 증가이며 절연과피 방전에너지의 량은 크게 달라지지 않는다. 따라서 절연과피에 의하여 생성되는 초기 화염핵의 크기는 크게 변화하지 않으며 비슷한 값을 보인다 (Table 5).

한편 이 실험에서는 정적연소기 내의 유동이 존재하지 않아 절연과피 방전에너지가 아크나 글로우 방전에 비하여 화염 성장에 큰 영향을 미친다. 따라서 실제 엔진 실험의 경우, 전극의 지름이 달라지면 화염의 성장은 보다 큰 차이를 나타낼 것으로 사료된다.

3.5 점화플러그 전극 형태의 변화가 화염전파에 미치는 영향

실험에서 사용된 전극의 형태를 Fig. 3에 나타

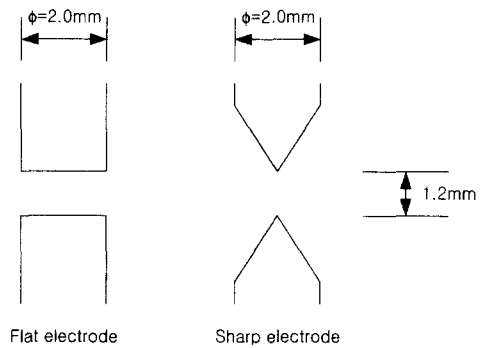


Fig. 3 The configuration of electrodes

내었다. 전극의 형태가 변화하면 방전형태가 달라지며 방전에너지의 전달효율은 변화한다. 즉, 전극의 형태가 변화하여도 글로우 방전 기간동안 비슷한 량의 전하가 방출된다고 가정하면, 전극의 끝이 뾰족해 질수록 방출되는 전하의 밀도는 높아지게 된다. 따라서 방전전류밀도가 높아지게 되어 에너지의 전달효율이 보다 높은 아크 방전으로 변화하게 된다.



또 방전에너지는 전극의 끝이 뾰족해 질수록 증가하는 경향을 나타내었으며 DIS의 경우, 14.8mJ에서 15.8mJ로 증가하며 HEI는 26.7mJ에서 29.1mJ로 증가한 것을 확인할 수 있다.

Table 6과 Fig. A5는 이러한 이유들로 인한 화염 전파속도의 증가를 나타내고 있다.

#### 4. 결론

이 연구는 화염 가시화 장치를 이용하여 점화 에너지 및 점화장치가 화염전파특성에 미치는 영향을 살펴보았다. 이를 위하여 솔리덴 방법을 이용하였으며 고속 디지털 카메라를 사용하였다. 연소 실험은 정적연소실에서 실시되었으며 점화장치는 직접점화장치 (DIS)와 고에너지 점화장치 (HEI)가 사용되었다. 각 점화장치의 충전시간을 변화시켜 발생하는 방전에너지의 양을 조절하였으며 점화플러그 전극의 간극, 재료, 지름 그리고 형태를 변화시켜 전극이 화염전파에 미치는 영향을 조사하였다. 이 화염 가시화 실험을 통하여 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) 충전시간이 1.5msec에서 3.5msec로 증가하면 방전에너지는 두 점화장치 모두에서 약 65% 증가하였다. 방전에너지가 증가하면 연소속도 역시 빨라졌으며 이러한 경향은 이 연구에서 실시된 모든 실험에서 동일하게 나타났다.

(2) 점화플러그의 간극이 0.8mm에서 2.0mm로 커지면 방전에너지는 DIS의 경우, 약 74%, 그리고 HEI의 경우, 약 93% 증가하였다.

간극이 커지면 절연과피 방전에너지는 거의 비례하여 증가하며 초기화염핵의 급속한 성장을 유도한다. 즉, 간극이 0.8mm에서 2.0mm로 커지면, 절연과피방전 후 2msec에서의 화염핵의 전파속도는 약 17%~23% 정도 빨라짐을 알 수 있다.

(3) 점화플러그 전극의 재료가 변화하면 방전에너지의 량 및 방전에너지의 전달효율이 변화하며, 초기 화염의 성장에 큰 영향을 미치는 열전도 계수가 변화하여 화염전파의 특성에 영향을 미치게 된다. 실험에 사용된 재료 중 용융점이 가장 낮은 구리의 경우, 용융점이 가장 높은 텅스텐에 비하여 방전에너지는 약 7%~10% 정도 증가하였다. 이에 따라 화염전파속도 역시 증가하여 점화플러그의 전극을 구성하는 재료가 초기 화염의 성장에 영향을 미침을 알 수 있다.

(4) 점화플러그 전극의 지름은 작아질수록 방전에너지는 증가하여 화염의 성장에 영향을 미침을 확인할 수 있었다. 즉, 지름이 2.8mm에서 1.2mm로 작아지면 방전에너지는 두 점화장치에서 약 11~14% 정도 증가하는 경향을 가짐을 알 수 있었다. 하지만 증가된 방전에너지는 아크 또는 글로우 방전에서의 증가치이며 절연과피 방전에너지의 량은 비슷하므로 화염핵의 성장속도는 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

(5) 점화플러그 전극의 끝이 뾰족해 질수록 방전에너지의 량은 증가하며, 방전에너지의 전달효율이 높아져 보다 빠른 초기화염핵의 성장을 유도한다.

#### 참고문헌

- (1) Hassan, H. and Dent, J. C., 1971, "The Measurement of Air Velocity in a Motored Internal Combustion Engine Using a Hot-Wire Anemometer." *Proceeding I Mech E*, Vol. 185, pp. 583~591.
- (2) Yoo, S., Lee, K., Novak, M., Schock, H. and Keller, P., 1995, "3-D LDV Measurement of In-Cylinder Air Flow in a 3.5L Four-Valve SI Engine," SAE Paper 950648.
- (3) Fansler, T. D., French, D. T. and Drake, M. C., 1995, "Fuel Distributions in a Firing Direct Injection Spark Ignition Engine Using Laser Induced Fluorescence Imaging," SAE Paper 950110.
- (4) Johansson, B., Neij, H., Juhlin, G. and Alden, M., 1995, "Residual Gas Visualization with Laser Induced Fluorescence," SAE Paper 952463.
- (5) 배충식, 1996, "가시화엔진을 이용한 내연기관 내 유동 및 연소의 연구," 자동차공학회지, Vol. 18, No. 1.
- (6) 송정훈, 선우명호, 김우태, 1999, "회박연소기관에서 고점화 에너지에 의한 기관 성능 향상에 관한 연구," 자동차공학회논문집, 제7권, 제2호.
- (7) 송정훈, 선우명호, 1999, "회박연소 및 EGR 엔진에서 초기 화염핵 생성 및 성장에 관한 연구," 자동차공학회 논문집, 제7권, 제8호.
- (8) 송정훈, 선우명호, 1999 "SI 기관에서 초기 화염의 생성 및 성장에 대한 모델링," 대한기계학회 논문집 B권, 제23권, 제2호, pp. 288~298.

- (9) Arcoumanis, C., and Bae, C., 1992, "Correlation between Spark Ignition Characteristics and Flame Development in a Constant-Volume Combustion Chamber," SAE paper 920413, SAE Trans.
- (10) Cengel, Y. A., 1997, *Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer*, McGraw-Hill.
- (11) Ziegler, G., Wagner, E., and Maly, R., 1984, "Ignition of Lean Methane-air Mixtures by High Pressure Glow and Arc Discharges," *20th Symposium (International) on Combustion*.

부 록

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

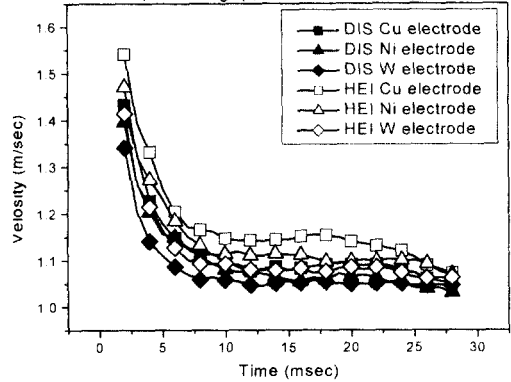


Fig. A3 Effects of electrode materials on the flame development velocity

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

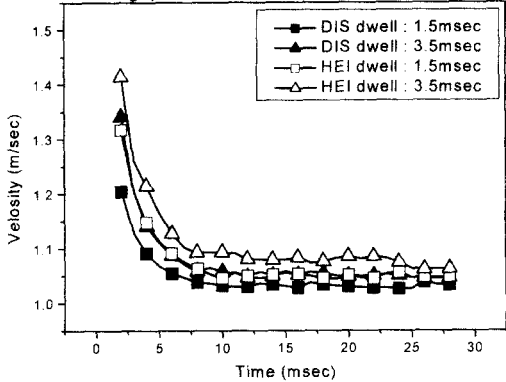


Fig. A1 Effects of dwell times on the flame development velocity

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

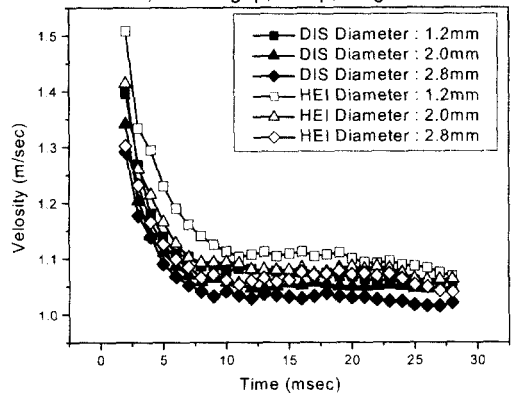


Fig. A4 Effects of electrode diameters on the flame development velocity

dwll 3.5msec, 2.0mm dia., sharp, tungsten electrode

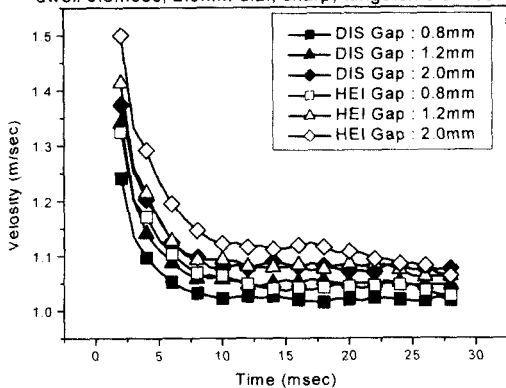


Fig. A2 Effects of spark plug gaps on the flame development velocity

dwll 3.5msec, 1.2mm gap, 2.0mm dia., tungsten electrode

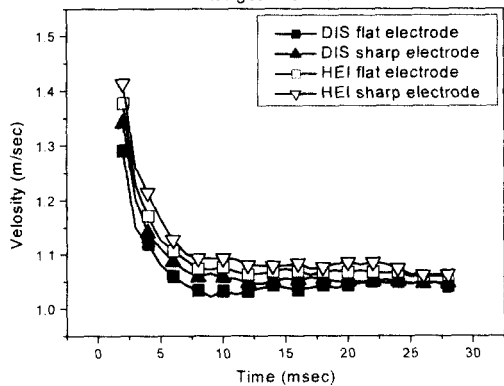


Fig. A5 Effects of electrode shapes on the flame development velocity