

# 정적연소기에서 점화장치가 열발생률과 질량연소율에 미치는 영향에 관한 연구

송정훈\* · 이기형\*\* · 선우명호\*\*\*  
(2000년 4월 18일 접수)

## A Study on the Effects of Ignition Systems on the Heat Release Rate and Mass Fraction Burnt at a Constant Volume Combustion Chamber

Jeonghoon Song, Kihyung Lee and Myoung-ho Sunwoo

**Key Words:** Flame Propagation(화염전파), Ignition Energy(점화 에너지), Heat Release Rate(열발생률), Mass Fraction Burnt(질량연소율)

### Abstract

The initial flame kernel development and flame propagation in a constant volume combustion chamber is analyzed by the heat release rate and the mass fraction burnt. The combustion pressure is measured with a piezoelectric type pressure sensor. In order to evaluate the effects of ignition system and ignition energy on the flame propagation, four different ignition systems are designed and tested, and the ignition energy is varied by the dwell time. Several different spark plugs are also tested and examined to analyse the effects of electrodes on flame kernel development. The results show that when the dwell time is increased, and when the spark plug gap is extended, heat release rate and the mass burnt fraction are increased. The materials and shapes of electrodes affect the flame development, because they change the energy transfer efficiency from electrical energy to chemical energy. The diameter of electrodes influences not only the heat release rate but also the mass burnt fraction as well.

### 기호설명

$c_v$  : 정적 비열 (kJ/kg · K)  
 $m_a$  : 공기의 질량 (g)  
 $m_f$  : 연료의 질량 (g)  
 $M_b(t)$  : 질량연소율

$p$  : 압력 (N/m<sup>2</sup>)  
 $p_{ini}$  : 초기 압력 (N/m<sup>2</sup>)  
 $p_{max}$  : 최고 압력 (N/m<sup>2</sup>)  
 $q$  : 단위 질량 당 화학적 에너지 (J/kg)  
 $q_{loss}$  : 단위 질량 당 열손실 (J/kg)  
 $T$  : 온도 (K)  
 $u$  : 단위 질량 당 내부에너지 (J/kg)  
 $v$  : 단위 질량 당 체적 (m<sup>3</sup>/kg)

\* 한양대학교 대학원

\*\* 회원, 한양대학교

\*\*\* 회원, 한양대학교

E-mail : msunwoo@email.hanyang.ac.kr  
TEL : (02)2290-0453 FAX : (02)2297-5495

### 1. 서론

스파크 점화 엔진에서 연비를 개선하며 동시에

배기가스를 감소시키려는 여러가지 방법들 중 희박연소기법이 많은 연구자들에 의해 연구되어지고 있다. 하지만 희박연소기관의 경우, 연소속도가 감소하여 미연가스의 발생량이 증가하며 초기 화염성장이 불안정해져 각 사이클간의 불균형 (cycle-by-cycle)이 발생하여 안정적인 연소를 실현시키기 힘들게 된다.

이러한 화염성장의 불안정성은 연소속도가 빨라지면 감소하며 안정성을 증가시키기 위해 분사 연료의 미립화, 실린더 내의 유동개선 방법 등이 연구되고 있다. 이러한 방법들은 주로 점화시기에 점화플러그 부근의 혼합기 상태를 초기화염의 성장에 보다 유리한 조건으로 조성하기 위한 방법이다. 한편 혼합기를 효과적으로 착화시켜주는 것도 운전안정성을 증가시키는 중요한 요소가 되며 사이클간의 불균형을 연소의 시작시기부터 효과적으로 개선할 수 있게 된다.

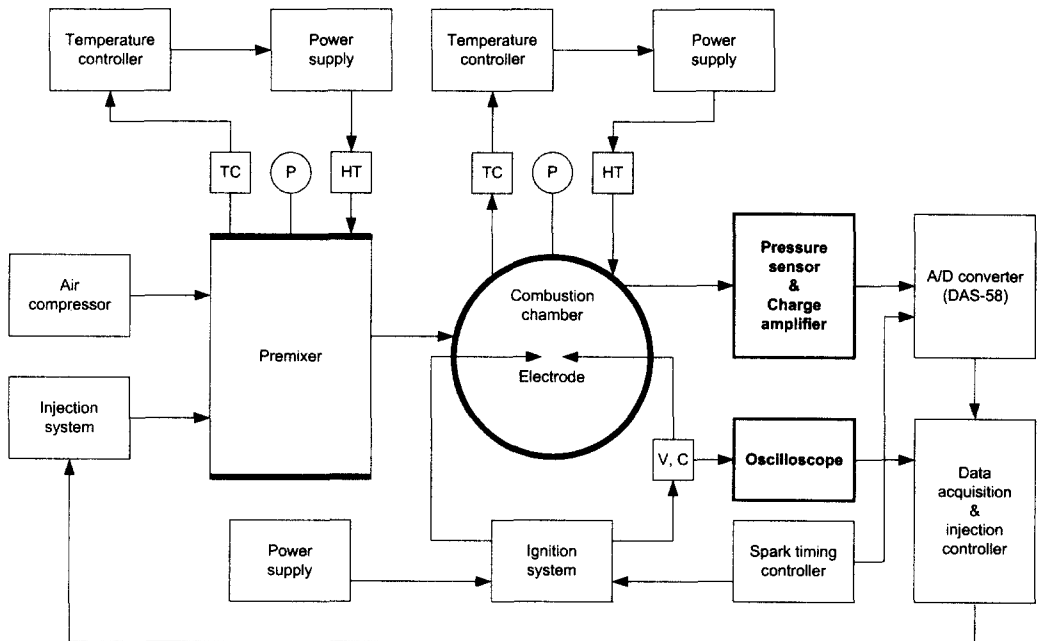
따라서 희박연소에서 연소의 안정성을 증가시키기 위해서는 점화에서 시작된 초기화염의 안정적인 생성 및 성장이 매우 중요하다.<sup>(1)</sup> 초기화염의 생성 및 성장은 점화장치, 점화에너지 그리고 점화플러그 형태 등에 의해 영향을 받게 되며 이에 대해 여러가지 연구 결과가 발표되었다.

Kalghatgi<sup>(2)</sup>는 문헌적인 조사를 통하여 점화장치를 개선시키는 것은 궁극적으로 초기화염핵의 성장기간동안 보다 효율적으로 전기에너지를 공급하기 위한 시도이며 이를 통하여 매 사이클 마다의 변화를 감소시킬수 있다는 결론을 이끌어내었다.

Nakamura 등<sup>(3)</sup>의 연구결과에 따르면 전극의 지름이 작아짐에 따라 아이들 (idle) 시의 운전안정성은 증가하나 점화플러그의 수명이 짧아지는 단점이 발생하게 된다. 이를 해결하기 위하여 중심 전극 (central electrode) 및 접지 전극 (ground electrode)에 플라티늄을 부착함으로써 점화플러그의 수명을 증가시킬 수 있으며 운전안정성 역시 증가시킬 수 있음을 실험적으로 증명하였다.

Arcoumanis 등<sup>(4)</sup>은 정적연소기 내의 유동속도를 측정하고 이를 바탕으로 유동에 의한 초기화염성장을 관찰하였다. 그들은 초기압력과 온도, 공연비, 점화장치 등을 변화시키며 점화에너지, 점화성능 그리고 질량연소율 등을 계산하였으며 화염의 성장을 가시화 하였다.

Fujimoto 등<sup>(5)</sup>은 정적연소기에 혼합기를 두 번에 걸쳐 충전시킴으로써 혼합기의 유동 및 분포



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

Fig. 1 Experimental apparatus

에 의한 화염전파특성을 관찰하였다.

위와 같은 연구들은 엔진 또는 정적연소기에서 난류유동 또는 혼합기의 불균일한 분포의 영향까지 포함하는 화염전파특성에 대한 연구이다. 하지만 이러한 실험조건에서는 점화장치 또는 점화에너지 만에 의한 영향을 구별하기는 힘들게 된다.

따라서 이 연구에서는 난류화염에 의한 영향을 없애기 위해 정적연소기를 이용하였다. 특히 정적연소기에 혼합기를 흡입시킨 후 3분 뒤 점화를 시켜 흡기시 발생된 혼합기 유동의 영향을 가능한 제거시켜 오직 점화장치 및 점화에너지에 의한 층류화염전파특성에 대해 관찰하였다.

그 외 다양한 점화장치와 점화플러그를 설계, 제작하였으며 연소압력을 이용하여 점화성능 및 화염전파특성을 관찰하였다. 발생된 압력은 압력센서를 사용하여 측정하였으며 측정되어진 압력 데이터를 이용하여 열발생률과 질량연소율을 계산하였다.

## 2. 실험 장치 및 실험 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 이 연구에서 사용되어진 실험장치들의 개략도이다.

공기 압축기를 이용하여 예혼합실에 공기를 공급하며 연료분사장치로 공연비를 조절한다. 예혼합실에서 만들어진 혼합기는 정적연소실로 흡입되어 연소가 이루어진다. Piezoelectric 타입의 압력센서(Kistler 6121)로 연소압을 측정하며 측정 데이터는 증폭기를 거쳐 A/D 변환 처리된 후, 자료획득장치에 입력된다. 점화에너지의 충전시간 및 점화시기는 점화시기 제어신호 발생기(spark timing controller)를 이용하여 조절하게 된다.

#### 2.1.1 예혼합실 및 정적연소실

이 연구에서 사용되어진 연료는 가솔린이며 이를 완전히 기화시키며 공연비를 조절하기 위하여 예혼합실이 제작되었다. 급속한 가열을 위하여 동으로 제작되었으며 체적은  $2650 \times 10^6 \text{ m}^3$ 이다.

실험에 사용된 정적연소실의 개략도는 Fig. 2에 나타내었다. 정적연소실은 듀랄미늄으로 제작되었으며 가시화를 위해 양 면에 석영유리를

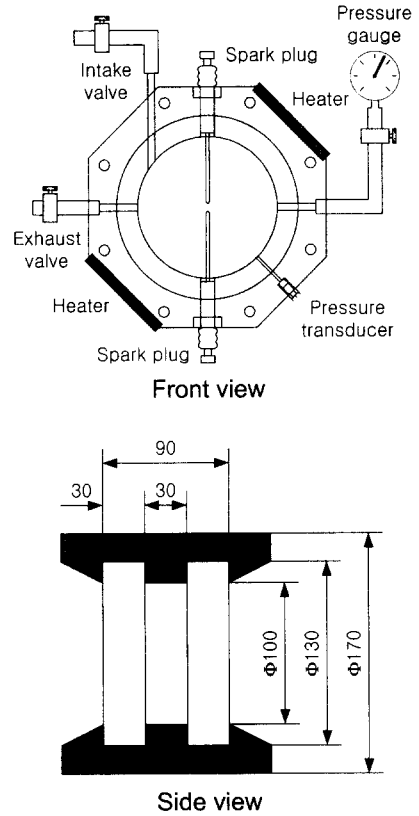


Fig. 2 A schematic diagram of constant volume combustion chamber

설치하였다. 그리고 두 개의 판 히터를 설치하여 온도조절을 가능하게 하였으며 압력 측정기를 설치하여 초기 압력을 조절하였다. 예혼합실 및 정적연소실은 6bar, 150 °C로 일정하게 유지시켜 가솔린이 완전히 기화될 수 있도록 하였다.

#### 2.1.2 점화장치

점화장치에 의한 화염전파특성의 변화를 살펴보기 위해 이 연구에서는 직접점화장치(DIS, Direct Ignition System), 직렬고점화장치(HEIS, High Energy Ignition-Series connected), 병렬고점화장치(HEIP, High Energy Ignition- Parallel connected) 그리고 I-DIS(IGBT based DIS) 등 네 종류의 점화장치가 설계, 제작되었다.

DIS는 현재 일반적으로 많이 사용되어지는 점화장치이며 하나의 점화코일로 두 개의 점화플러그를 구동하는 점화장치이다. HEIS 및 HEIP는 DIS의 일차 및 이차회로를 변경하여 점화에너지

및 방전시간을 증가시킨 것이다. 이 장치들은 두 개의 점화코일이 두 개의 점화플러그를 구동하는 형태로 구성되어 있다. HEIS의 경우, 이차축이 직렬로 연결되어 병렬로 연결된 HEIP 보다 긴 방전시간을 가진다. 또한, DIS의 점화에너지 저장과 점화시기를 결정하는데 사용되어진 BJT (Bipolar Junction Transistor) 대신 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)를 사용한 점화장치(I-DIS)를 제작하였다. IGBT는 BJT에 비해 빠른 스위칭 성능을 가지며 동작 중에 손실되는 에너지의 양이 적고 on-off의 변화에 따른 에너지 손실이 적다는 특징이 있다. 그리고 전압으로 구동되어지기 때문에 전류로 구동되어지는 BJT 보다 쉽게 제어할 수 있는 장점이 있다.<sup>(6)</sup>

각 장치의 보다 자세한 회로도는 참고문헌 (7)을 참조하기 바란다.

2.1.3 점화플러그

앞서 설명한 네 가지 종류의 점화장치뿐만 아니라 점화플러그 전극의 변화에 의한 화염전파특성의 변화를 살펴보기 위해 몇 가지 종류의 점화플러그를 제작하였다. 즉, 점화플러그 전극의 간극, 재료, 지름 그리고 형상을 변화시켰다. Table 1은 제작되어진 점화플러그의 종류와 충전시간 및 공연비 등이 연구에서 실시된 실험조건들을 나타낸 것이다.

2.1.4 공연비 제어

흡입되는 공기의 양은 이상기체 방정식에서

$$m_a = \frac{PV}{R_a T} \tag{1}$$

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

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

또 분사되어지는 가솔린의 양은 당량비 정의식에서

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

이다. 따라서

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

이므로 위의 (2) 및 (4) 식을 이용하여 공연비를 조절하였다.

2.2 압력 데이터의 해석

정적연소기에서의 연소압력은 혼합기의 유동과 불균일한 분포에 의한 난류화염에 대한 영향이 제거된 정보이므로 점화장치와 점화에너지의 방전에 의해 발생된 초기화염 및 그 이후의 화염성장에 관한 보다 뚜렷한 정보를 포함하게 된다.

압력 데이터를 이용하여 화염전파특성을 분석하는 방법으로는 여러 가지 있으나 이 연구에서는 열발생물과 질량연소율을 이용하여 해석하였다. 이 두 가지 방법의 해석은 상반되는 가정을 바탕으로 이루어진다. 즉, 열발생물의 해석은 압력변화와 연소된 질량과는 크게 관련이 없다는 가정하에 실시되며 반면에, 질량연소율의 해석은 압력변화와 연소된 질량과는 매우 밀접한 관련이 있다는 가정하에서 이루어진다.

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 shape              | sharp, flat              |
| Equivalence ratio ( $\phi$ ) | 0.8, 1.0                 |

2.2.1 열발생률(dq/dt)의 해석

열발생률의 해석은 연소실 내부를 단일 영역 (single zone)으로 취급하며 열역학 제 1법칙을 이용하여 압력변화로부터 쉽게 유도해 낼 수 있는 장점이 있다.

이 연구에서는 다음과 같은 수식을 이용하여 열발생률을 계산하였다.

먼저 열역학 제 1법칙으로부터

$$\delta q = pdv + du + \delta q_{loss} \tag{5}$$

이며 여기서 체적의 변화는 0 이므로, 위식을 정리하면

$$\delta q = c_v dT + \delta q_{loss} \tag{6}$$

또 이상기체 방정식으로부터

$$\frac{dp}{p} + \frac{dv}{v} = \frac{dT}{T} \tag{7}$$

를 유도할 수 있으므로 식 (7)을 식 (6)에 대입하고 정리하면 다음의 식을 유도할 수 있다.

$$dq = c_v \frac{T}{P} dp + dq_{loss} \tag{8}$$

이 식에 다시 이상기체 방정식을 대입하고 시간에 대한 미분식으로 나타내게 되면 열발생률은

$$\frac{dq}{dt} = v \frac{c_v}{R} \frac{dp}{dt} + \frac{dq_{loss}}{dt} \tag{9}$$

과 같이 구할 수 있다.

여기서, v, c<sub>v</sub>와 R은 Ferguson (8)에 나타나 있는 식을 이용하여 계산하였다.

2.2.2 질량연소율의 해석

질량연소율은 연소된 질량이 압력변화와 직접적인 관련이 있다는 가정하에 구하여 진다.<sup>(5)</sup> 이 가정을 이용하면 다음과 같이 최고 압력 및 초기 압력을 이용하여 계산될 수 있다.

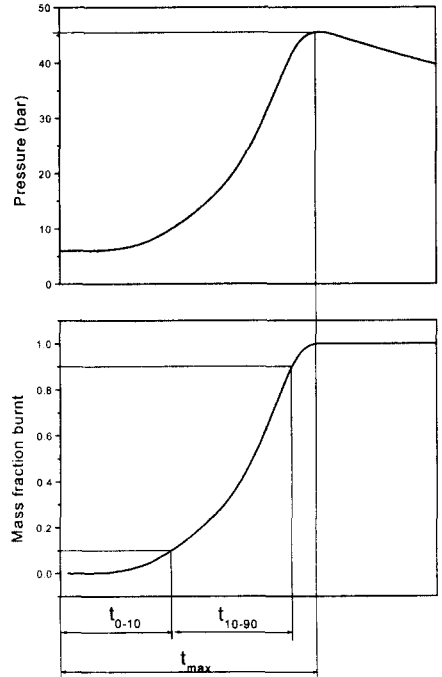


Fig. 3 Definition of mass fraction burnt and combustion duration ( $t_{0-10}$ ,  $t_{10-90}$  and  $t_{max}$ )

$$M_b(t) = \frac{p(t) - p_{int}}{p_{max} - p_{int}} \tag{10}$$

Fig. 3은 식 (6)에 의해 계산되어진 질량연소율을 나타낸 것이다. 그림에서의  $t_{0-10}$ 는 0~10%의 질량이 연소하는데 걸리는 시간을 나타내며  $t_{10-90}$ 은 10~90%의 질량이 연소하는데 걸리는 시간을 표시한다. 그리고  $t_{max}$ 는 정적연소실 내에 있는 모든 혼합기가 연소된 시간을 나타내며 이때 압력은 최고가 된다.

3. 실험결과 및 고찰

각 점화장치 및 점화에너지 그리고 점화플러그의 점화성능 및 화염전파특성을 살펴보기 위한 변수로써  $t_{0-10}$ ,  $t_{10-90}$ , 그리고  $t_{max}$ 를 이용하였다. 그리고 각 운전조건에 따른 열발생률의 변화를 살펴보았다. 즉, 열발생률은 그래프를 이용하여 나타내었으며 질량연소율은 표를 이용하여 표시하였다.

질량연소율을 표시한 각각의 표에서 짙은 색의

조건이 각 점화장치에서의 기준조건이다. 이 연구에서는 기준조건을 다음과 같이 정의하였다. 즉, 충전시간은 3.5mm, 전극의 간극은 1.2mm, 재료는 텅스텐, 지름은 2.0mm 그리고 뾰족한 형태의 전극을 사용하였을 때의 실험 조건이다.

3.1 충전시간의 변화가 질량연소율 및 열발생률에 미치는 영향

충전시간이란 각 점화장치의 점화코일(coil), 커패시터(capacitor) 등에 전기에너지를 충전시키는 기간을 뜻한다. 일반적으로 충전시간이 끝남과 동시에 방전이 시작되며 충전시간이 증가함에 따라 방전에너지는 증가한다. 증가된 방전에너지에 의하여 화염전파속도는 증가하며 열발생률 및 질량연소율 또한 커지며 빨라진다. Fig. 4는 열발생률을, Table 2는 당량비( $\phi$ )가 0.8일 때의 질량연소율이 0~10%, 10~90% 그리고 100% 연소가 될 때까지 걸리는 시간을 나타낸 것이다.

Table 2를 살펴보면 충전시간이 3.5msec일 때, 점화에너지가 가장 큰 HEIS의 경우,  $t_{0-10}$ 의 값이 가장 작음을 알 수 있다. 이와 같이 점화에너지가 증가함에 따라 0~10%의 질량연소율의

기간이 단축되는 경향은 모든 점화장치에서 관찰할 수 있다. 하지만 본격적인 화염전파기간을 나타내는  $t_{10-90}$ 의 경우, 거의 일정한 값을 가져 점화장치나 방전에너지에 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

Table 3 Ignition energy (mJ) and burn duration of 0~10%, 10~90% and 0~100% mass fraction burnt (msec) with various ignition systems and dwell times (msec) at  $\phi = 0.8$

|       | Dwell | Energy | $t_{0-10}$ | $t_{10-90}$ | $t_{max}$ |
|-------|-------|--------|------------|-------------|-----------|
| DIS   | 1.5   | 9.6    | 32         | 33          | 72        |
|       | 3.5   | 15.8   | 30         | 32          | 69        |
| HEIS  | 1.5   | 17.6   | 28         | 34          | 68        |
|       | 3.5   | 29.1   | 26         | 33          | 66        |
| HEIP  | 1.5   | 14.9   | 29         | 33          | 70        |
|       | 3.5   | 21.0   | 27         | 33          | 68        |
| I-DIS | 1.5   | 10.4   | 31         | 33          | 72        |
|       | 3.5   | 22.1   | 28         | 33          | 68        |

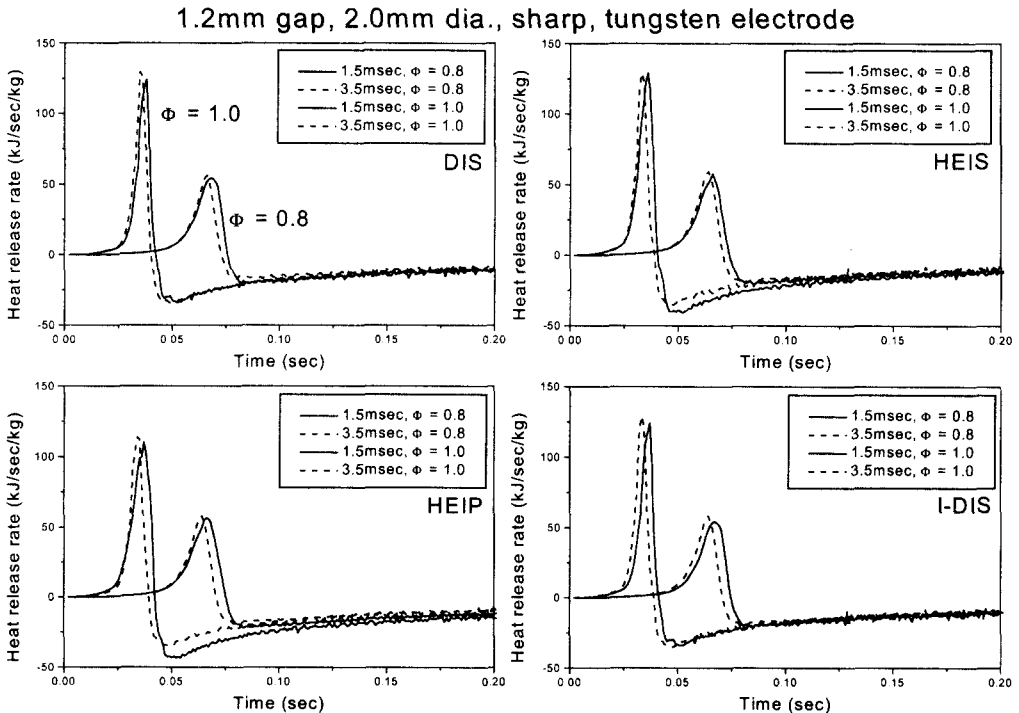


Fig. 4 Effects of dwell times and air fuel ratios on heat release rate

**Table 2** Ignition energy (mJ) and burn duration of 0~10%, 10~90%, and 0~100% mass fraction burnt (msec) with various ignition systems and spark plug gaps (mm) at  $\phi = 0.8$

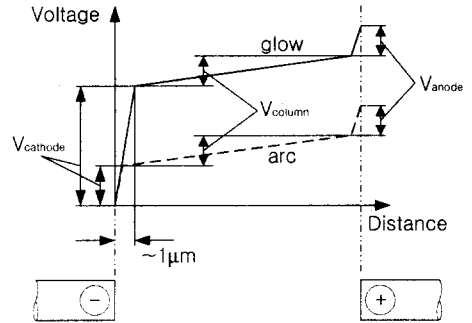
|       | Gap | Energy | $t_{0-10}$ | $t_{10-90}$ | $t_{max}$ |
|-------|-----|--------|------------|-------------|-----------|
| DIS   | 0.8 | 11.8   | 32         | 33          | 72        |
|       | 1.2 | 15.8   | 30         | 32          | 69        |
|       | 2.0 | 20.5   | 28         | 33          | 67        |
| HEIS  | 0.8 | 20.3   | 28         | 33          | 68        |
|       | 1.2 | 29.1   | 26         | 33          | 66        |
|       | 2.0 | 39.2   | 24         | 33          | 64        |
| HEIP  | 0.8 | 15.1   | 30         | 33          | 69        |
|       | 1.2 | 21     | 27         | 33          | 68        |
|       | 2.0 | 29.1   | 25         | 33          | 65        |
| I-DIS | 0.8 | 15.7   | 30         | 33          | 70        |
|       | 1.2 | 22.1   | 28         | 33          | 68        |
|       | 2.0 | 32.8   | 25         | 33          | 66        |

Fig. 4는 방전에너지가 증가하면 열발생물의 최대값이 증가하며 최대값의 발생 시점이 빨라짐을 나타낸다. 즉,  $\phi=0.8$ 에서 충전시간이 1.5msec의 경우, DIS, HEIS, HEIP 그리고 I-DIS의 최대 열발생물은 각각 54.5, 57.6, 56.8, 54.5kJ/sec/kg이며 그 발생시점은 68, 66, 67, 67msec이다. 하지만 충전시간이 3.5msec로 증가하면, 최대 열발생물은 56.4, 59.4, 59.1, 58.6kJ/sec/kg으로 증가하며 최대 열발생물의 발생시점도 66, 64, 64, 64msec로 빨라진다.

이와 같이 최고 열발생물이 커지며 빨라지는 것은 전체 연소 기간의 38~47%를 차지하는 초기화염핵 성장기간인  $t_{0-10}$ 의 기간이 짧아졌기 때문이다. 따라서 점화에너지가 증가하게 되면 초기화염핵의 성장기간을 단축시킴으로써 급속연소에 유리한 조건을 만들게 됨을 알 수 있었다.

**3.2 점화플러그 간극의 변화가 질량연소를 및 열발생물에 미치는 영향**

Table 3은  $\phi=0.8$ 에서 점화플러그 전극의 간극이 변화함에 따른 점화에너지의 변화 및 질량연소의 각 구간에서 걸리는 시간을 나타낸 것이다. 모든



**Fig. 5** The axial voltage distribution for glow and arc discharge phase

점화장치에서 간극이 커지면 점화에너지 및 초기 화염핵의 성장속도가 커지는 것을 알 수 있다.

간극이 커지면 방전에 의해 생성되는 플라즈마 부피도 커지며 보다 큰 부피의 플라즈마를 생성 및 유지시키기 위해서는 보다 많은 량의 점화에너지가 요구된다.<sup>(9)</sup> 따라서 방전에너지가 증가하여 연소속도가 빨라진다. 그리고 플라즈마의 부피가 커지면 미연가스가 접할 수 있는 부피도 증가하여 화염핵의 성장속도는 빨라진다.<sup>(10)</sup>

한편, 방전은 절연과외, 아크, 글로우 방전으로 나눌 수 있으며 대부분의 방전에너지는 아크 또는 글로우 방전에 의하여 방전된다. Fig. 5는 아크 및 글로우 방전 시의 방전 전압을 나타낸 것이다.<sup>(10)</sup> 두 방전 과정에서  $V_{cathode}$  및  $V_{anode}$ 는 점화에 영향을 미치지 못하는 전압강하(voltage fall) 구간이며  $V_{column}$  만이 점화에 참여하게 된다. 글로우 방전의 경우, 아크 방전에 비해 매우 높은  $V_{cathode}$ 를 가지는 특징이 있으며<sup>(9)</sup> 따라서 전기에너지의 전달효율은 아크 방전에 비해 떨어지게 된다. 여기서  $V_{cathode}$  및  $V_{anode}$ 가 발생하는 구간은 전극의 간극이 변화하더라도 거의 일정하므로 간극이 커지면 증가되는 전체 방전에너지중, 손실되는 에너지의 백분율은 작아져 방전에너지의 전달효율은 증가한다.

즉, 전극의 간극이 커지면 점화에너지 및 방전에너지의 전달효율이 증가되어 연소속도를 증가시킨다. 이는 열발생물을 나타낸 Fig. 6에서도 확인할 수 있다.  $\phi=0.8$ 에서 간극이 0.8에서 2.0mm로 증가하면 최고 열발생물이 발생하는 시

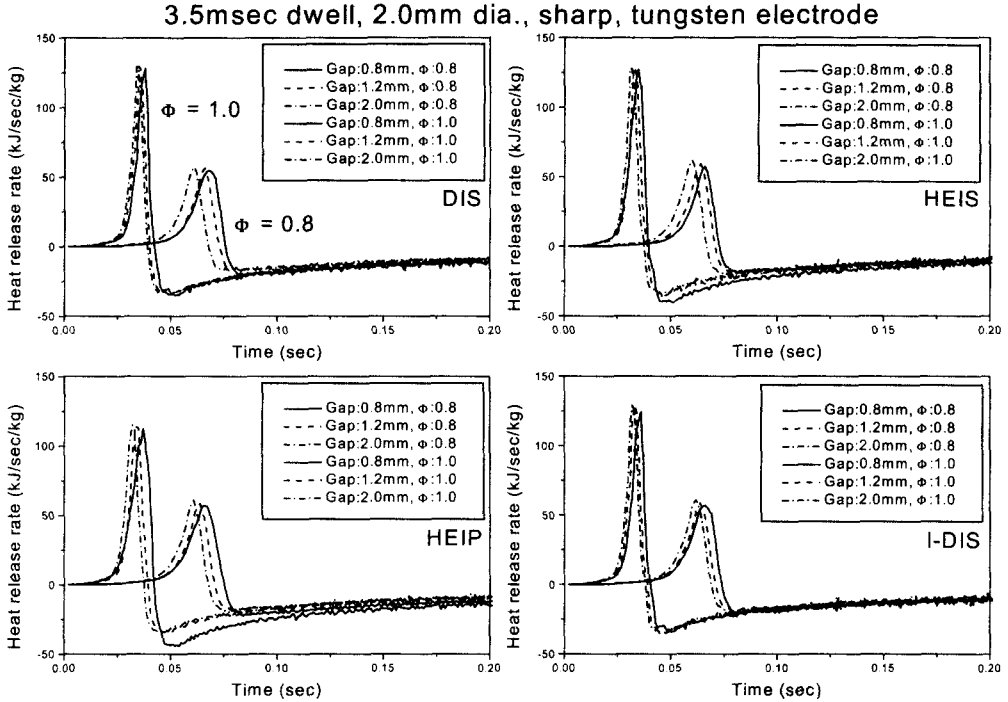


Fig. 6 Effects of spark plug gaps and air fuel ratios on heat release rate

점은 DIS의 경우, 68에서 62msec로 빨라졌으며 HEIS의 경우도 66에서 60msec로 빨라지는 등 모든 점화장치에서 간극이 커지면 연소속도가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

**3.3 점화플러그 전극 재료의 변화가 질량연소율 및 열발생률에 미치는 영향**

Fig. 7과 Table 4는 점화플러그 전극의 재료가 변화함에 따른 열발생률과 연소속도의 변화를 나타낸 것이다. 전극의 재료가 달라지면 열발생률 및 연소속도가 변화함을 알 수 있다. 이는 방전되는 점화에너지의 양이 변화하며 점화에너지의 전달효율도 달라지기 때문이다.

이런 현상은 전극의 용융점이 낮은 재료의 경우, 글로우 방전시 전자를 쉽게 방출하며 전류 밀도가 높아져 아크 방전으로 방전하려는 경향이 발생하기 때문이다. 만약 글로우 방전에서 아크 방전으로 천이되면  $V_{cathode}$ 는 작아져 전기에너지의 전달효율이 30%에서 50%로 개선된다.

이와 같은 영향으로 열발생률은 변화한다.  $\phi = 0.8$ 에서 DIS를 사용한 경우, 전극의 재료가 구리, 니켈, 텅스텐으로 바뀌면 최고 열발생률이 발

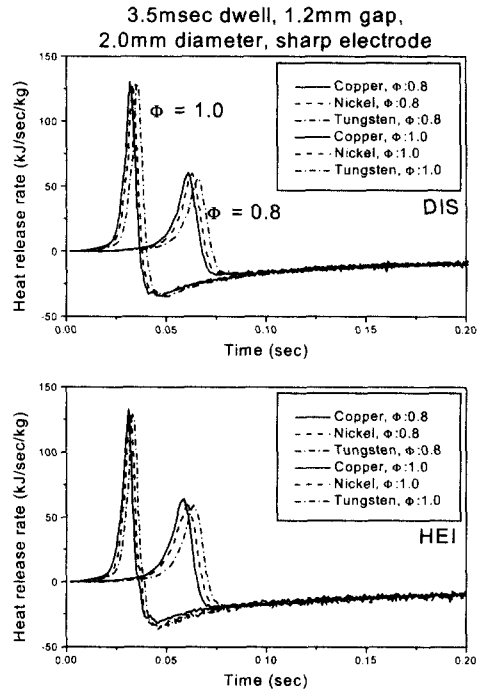


Fig. 7 Effects of electrode materials and air fuel ratios on heat release rate

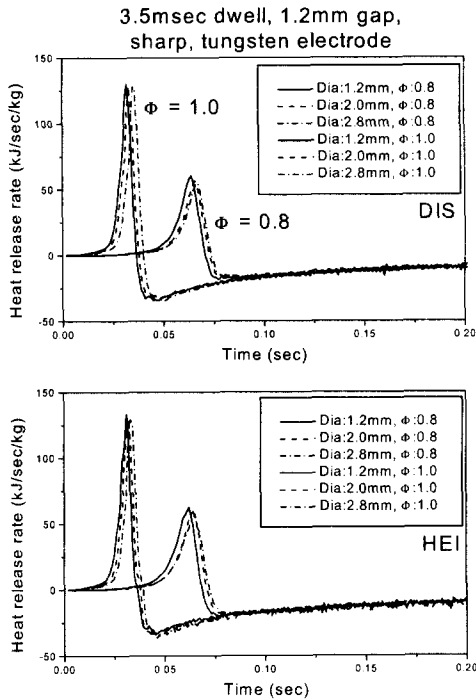


**Table 4** Ignition energy (mJ) and burn duration of 0~10%, 10~90%, and 0~100% mass fraction burnt (msec) with various ignition systems and electrodes materials at  $\phi = 0.8$

|      | Mat. | Energy | $t_{0-10}$ | $t_{10-90}$ | $t_{max}$ |
|------|------|--------|------------|-------------|-----------|
| DIS  | Cu   | 17.3   | 28         | 33          | 68        |
|      | Ni   | 16.3   | 29         | 33          | 68        |
|      | T    | 15.8   | 30         | 32          | 69        |
| HEIS | Cu   | 31.1   | 25         | 32          | 65        |
|      | Ni   | 29.7   | 25         | 33          | 65        |
|      | T    | 29.1   | 26         | 33          | 66        |

**Table 5** Ignition energy (mJ) and burn duration of 0~10% 10~90%, and 0~100% mass fraction burnt (msec) with various ignition systems and electrodes diameters (mm) at  $\phi = 0.8$

|      | Dia. | Energy | $t_{0-10}$ | $t_{10-90}$ | $t_{max}$ |
|------|------|--------|------------|-------------|-----------|
| DIS  | 1.2  | 16.7   | 29         | 32          | 68        |
|      | 2.0  | 15.8   | 30         | 32          | 69        |
|      | 2.8  | 15.1   | 31         | 33          | 70        |
| HEIS | 1.2  | 30.8   | 25         | 33          | 66        |
|      | 2.0  | 29.1   | 26         | 33          | 66        |
|      | 2.8  | 27.1   | 26         | 34          | 68        |

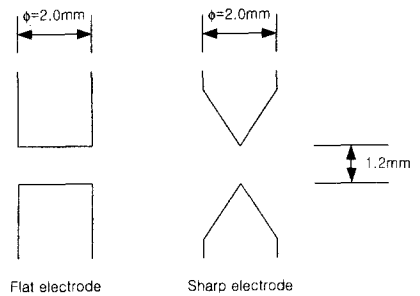


**Fig. 8** Effects of electrode diameters and air fuel ratios on heat release rate

생되는 지점은 61, 63, 그리고 66msec로 느려지며 HEIS의 경우, 60, 61 그리고 64msec로 변화하였다.

3.4 점화플러그 전극 지름의 변화가 질량연소를 및 열발생률에 미치는 영향

Fig. 8과 Table 5는 점화플러그 전극의 지름이



**Fig. 9** Tip shape of electrodes

화염진파에 미치는 영향을 나타내고 있다.

전극의 지름 변화 역시 질량연소를 및 열발생률에 영향을 미치나 충전시간과 전극의 간극이 같아 큰 영향을 미치지 못한다. 하지만 지름이 작아지면 방전에너지가 커지며 질량연소 및 열발생률은 빨라짐을 알 수 있다.

열발생률의 경우,  $\phi=0.8$ 에서 지름이 2.8mm에서 1.2mm로 작아지면 최고 열발생률이 발생하는 시점은 DIS 및 HEIS 모두 약 4msec 씩 빨라짐을 확인할 수 있다.

3.5 점화플러그 전극 형태의 변화가 질량연소 및 열발생률에 미치는 영향

점화플러그 전극 형태의 변화는 방전상태에 영향을 미쳐 점화에너지의 전달효율을 변화시키게 된다. Fig. 9는 이 실험에서 사용된 전극의 형태를 나타낸 것이다.

글로우 방전시 전극의 형태가 변화하더라도 방

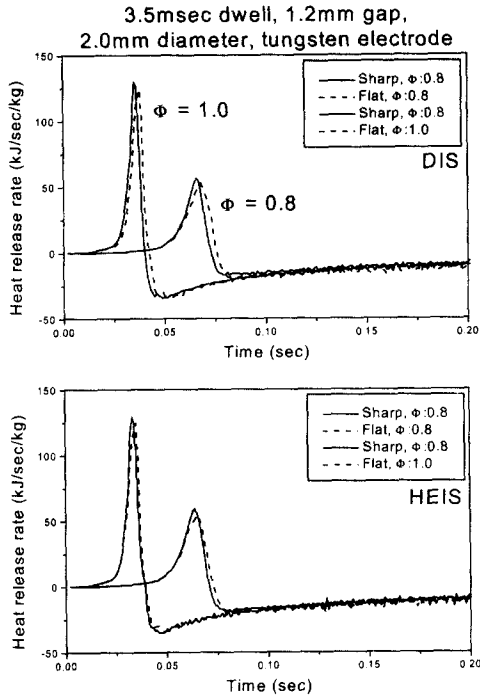


Fig. 10 Effects of electrode shapes and air fuel ratios on heat release rate

Table 6 Ignition energy (mJ) and burn duration of 0~10% 10~90%, and 0~100% mass fraction burnt (msec) with various ignition systems and shape of electrodes at  $\phi = 0.8$

|      | Shape | Energy | $t_{0-10}$ | $t_{10-90}$ | $t_{max}$ |
|------|-------|--------|------------|-------------|-----------|
| DIS  | flat  | 14.8   | 31         | 34          | 72        |
|      | sharp | 15.8   | 30         | 32          | 69        |
| HEIS | flat  | 26.7   | 27         | 33          | 68        |
|      | sharp | 29.1   | 26         | 33          | 66        |

출되는 전하량은 비슷하다고 하면 전극의 끝이 뾰족해 짐에 따라 방전전류밀도는 높아지게 된다. 따라서 글로우 방전은 보다 효율이 높은 아크 방전으로 천이하며 점화에너지의 전달효율은 높아진다. 그리고 점화에너지 역시 7~8% 증가하여 질량연소율 및 열발생률이 증가한다.

특히 열발생률의 경우,  $\phi = 0.8$ 에서 뾰족한 전극을 사용하였을 때, 평평한 전극을 사용하였을 때 보다 최고 열발생률이 발생하는 시점은 DIS의 경

우, 66msec에서 3msec 감소하였으며 HEIS의 경우는 64msec에서 2msec 빨라진다 (Fig. 10, Table 6).

#### 4. 결론

이 연구는 점화에너지 및 점화장치가 화염전파 특성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 실시되었다. 이를 위하여 연소압력을 이용하여 열발생률 및 질량연소율을 계산하였으며 연소실험은 정적연소기를 이용하여 실시되었다.

이 실험을 통하여 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) DIS, HEIS, HEIP 그리고 I-DIS의 네 가지 종류의 점화장치가 실험에 사용되었다. 이 네 종류의 점화장치 중 HEIS가 가장 많은 점화에너지를 방전하였으며 전극의 형태나 재료 등이 변화하더라도 가장 우수한 점화 성능을 발휘하였다.

(2) 충전시간이 1.5msec에서 3.5msec로 증가하면 방전에너지는 약 40~113% 증가하였다. 방전 에너지가 증가하면 연소속도 역시 빨라졌으며 이러한 경향은 이 연구에서 실시된 모든 실험에서 동일하게 나타났다.

실험에 사용된 모든 점화장치에서 충전시간이 길어지면 초기화염핵의 성장기간인  $t_{0-10}$ 이 7~11% 단축되며, 최대압력에 도달하는 시점은 3~6% 빨라짐을 확인할 수 있었다. 하지만 본격적으로 화염이 전파되는 시기인  $t_{10-90}$ 은 점화장치나 방전 에너지에 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있었다. 한편 열발생률의 경우, 최고 열발생률이 발생하는 시점은 3~5% 씩 빨라졌으며 최고 열발생률도 3~7% 씩 증가함을 관찰할 수 있었다.

(3) 점화플러그의 간극이 0.8mm에서 2.0mm로 커짐에 의해 방전에너지는 74~110% 증가하게 된다. 이는 방전시 생성되는 플라즈마가 간극이 커질수록 보다 큰 부피를 가지며 이러한 플라즈마를 유지하기 위해서는 보다 많은 에너지가 요구되기 때문이다. 그리고 보다 큰 부피의 플라즈마는 미연가스와 보다 많이 접촉할 수 있어 초기화염핵의 성장에 도움을 주게 된다.

$\phi = 0.8$ 에서 간극이 커질수록 초기화염핵의 성장기간인  $t_{0-10}$ 은 각 점화장치에 따라 14~20% 씩 단축된다. 최고 열발생률이 발생하는 시점은 간극이 0.8mm에서 2.0mm로 커질 때 DIS의 경우, 약 10%, HEIS 및 HEIP는 약 9% I-DIS의 경우, 약

35% 정도 빨라짐을 알 수 있다.

(4) 점화플러그 전극의 재료가 변화하면 글로우 방전에서 전류의 크기가 달라져 점화에너지의 전달효율이 변화한다.

실험에 사용된 재료 중 용융점이 가장 낮은 구리의 경우, 용융점이 가장 높은 텅스텐에 비해  $t_{0-10}$ 가 DIS의 경우, 약 7%, HEIS의 경우, 약 4% 단축되어 전극 재료에 의한 영향을 확인할 수 있었다. 그리고 열발생률 또한 빨라지며 최고 열발생률이 발생하는 시점은 DIS의 경우, 약 8%, 그리고 HEIS의 경우, 약 9% 단축됨을 확인할 수 있었다.

(5) 점화플러그 전극의 지름은 작아질수록 방전에너지는 증가하여 화염의 성장에 영향을 미침을 확인할 수 있었다. 즉, 지름이 2.8mm에서 1.2mm로 작아지면 방전에너지는 DIS는 15.1mJ에서 1.6mJ 그리고 HEIS는 27.1mJ에서 3.7mJ 증가한다. 따라서  $\phi=0.8$ 인 경우, DIS 및 HEIS에서  $t_{0-10}$ 은 31msec와 27msec에서 2msec, 1msec, 그리고 최고 열발생률이 발생하는 시점은 각각 64msec와 63msec에서 3msec 씩 빨라짐을 관찰할 수 있었다.

(6) 점화플러그 전극의 끝이 뾰족해질수록 점화에너지의 양은 증가하며 글로우 방전시 전류 밀도는 높아진다. 방전 전류의 밀도가 높아지면 전기에너지의 전달효율은 높아져 초기화염핵의 성장을 촉진하게 된다.

실험 결과를 살펴보면  $\phi=0.8$ 에서 뾰족한 전극을 사용하였을 때, 평평한 전극을 사용하였을 때 보다  $t_{0-10}$ 의 경우, DIS는 약 3% HEIS는 약 4% 빨라졌으며 최대 열발생률이 발생하는 지점도 2~3% 정도 빨라진다.

## 참고문헌

- (1) 송정훈, 선우명호, 1999, "SI 기관에서 초기 화염의 생성 및 성장에 대한 모델링," 대한기계학회 논문집 B권, 제23권, 제2호, pp. 288~298.
- (2) Kalghatgi, G. T., 1987, "Spark Ignition, Early Flame Development and Cyclic Variation in I.C Engine," SAE paper 870163, SAE Trans.
- (3) Nakamura, N., Kobayashi, T., Hanaoka, M., and Tagaki, N., 1983, "A New Platinum Tipped Spark Plug Extends the Lean Limit and Useful Life," SAE paper 830480 SAE Trans.
- (4) 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.
- (5) Fujimoto, M., Nishida, K. Hyroyasu, H., and Tabata, M., 1995, "Influence of Mixture Stratification Pattern on Combustion Characteristics in a Constant-Volume Combustion Chamber," SAE paper 952412, SAE Trans.
- (6) Mohan, N., Undeland, T., and Kobbins, W., 1995, "Power Electronics," John Willy & Sons, chap 26, pp. 626~640.
- (7) 송정훈, 선우명호, 김우태, 1999, "희박연소기 관에서 고점화 에너지에 의한 기관 성능 향상에 관한 연구," 자동차공학회논문집, 제7권, 제2호.
- (8) Ferguson, C., 1986, "Internal Combustion Engines," John Willy & Sons, chap 3, pp. 103~148
- (9) 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
- (10) Pischinger, S., and Heywood J. B., 1990, "How Heat Losses to the Spark Plug Electrodes Affect Flame Kernel Development in an SI-Engine," SAE paper 900021, SAE Trans.

(1) 송정훈, 선우명호, 1999, "SI 기관에서 초기