

# SI 기관에서 초기 화염의 생성 및 성장에 대한 모델링

송 정 훈\* · 선우명호\*\*  
(1998년 10월 7일 접수)

## A Modeling of Flame Initiation and Its Development in SI Engines

Jeonghoon Song and Myoungho Sunwoo

**Key Words:** Ignition System(점화장치), Spark Plug(점화 플러그), Ignition Energy(점화 에너지), Flame Kernel(화염핵)

### Abstract

In spark ignited engines, the electrical spark not only sets the time for the onset of combustion but also is able to greatly influence the character of the initial flame growth and the subsequent combustion, and thereby can influence engine performance. The relative importance of the ignition energy is particularly high under lean or high residual gas or exhaust gas recirculation (EGR).

In this study, a modeling of flame initiation and its development is proposed. Submodels consist in representing of cylinder pressure and temperature, heat transfer to cylinder wall, and flame kernel heat transfer to ambient air and to spark plug electrodes.

The breakdown process and the subsequent electrical power input initially control the kernel growth while intermediate growth is mainly dominated by diffusion or conduction. Then, the flame propagates by the chemical energy, and laminar and turbulent flame velocity.

### 기호설명

$A_{cont}$ : 화염과 점화 플러그 혹은 실린더 헤드 면과의 접촉면적 ( $m^2$ )	$p$ : 실린더 내 압력 (bar)
$d$ : 점화 플러그 전극간의 길이 (m)	$\rho_{pl}$ : 플라즈마 내의 평균 밀도 ( $kg/m^3$ )
$d_i$ : 도전로의 지름 (m)	$p_0$ : 점화시기의 연소실 내 압력 (Pa)
$E_b$ : 절연과피 방전 에너지 (J)	$Q_{ch}$ : 화학적 에너지 (J)
$E_{el}$ : 전기 에너지 (J)	$Q_{loss}$ : 열손실 (J)
$f_D$ : 잔류가스 비	$S_{diff}$ : 열확산 속도 (m/sec)
$h_{heat}$ : 열전달 계수 ( $W/m^2K$ )	$S_{comb}$ : 연소 속도 (m/sec)
$h$ : 비엔탈피 (J/kg)	$T_{ad}$ : 단열화염온도 (K)
$h_{ch}$ : 화학적 엔탈피 (J/kg)	$T_{bd}$ : 절연과피 방전시의 온도(K)
$I(t)$ : 점화 플러그에서의 전류 (A)	$T_{ele}$ : 점화 플러그 혹은 실린더 헤드면의 온도 (K)
$L$ : integral length scale (m)	$T_i$ : 도전로 내의 온도 (K)
$l$ : laminar flame front thickness (m)	$T_q$ : 소염온도 (quenching temperature, K)
$m$ : 실린더 내 질량 (kg)	$T_0$ : 점화시기의 연소실 내 온도 (K)
	$u$ : 단위 질량당 내부에너지 (J/kg)
	$V$ : 연소실 체적 ( $m^3$ )
	$V(t)$ : 점화 플러그에서의 전압 (V)
	$\alpha$ : 열확산 계수
	$\theta$ : 크랭크 각 (rad)
	$\kappa$ : 비열비

\* 회원, 한양대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 한양대학교 기계공학과

- $\psi$  : 당량비 (equivalence ratio)  
 $\omega$  : 각 속도 (rad/sec)

아래첨자

- b : 연소가스  
 u : 미연가스

## 1. 서론

자동차에 사용되는 엔진에서 매 사이클마다의 변화량 (cycle-by-cycle variation)을 최소화시키는 것은 현재 개발되고 있는 희박연소기관이나 가솔린 직접 분사 기관 (gasoline direct injection engine)의 핵심적인 과제 중의 하나이다. 매 사이클마다의 변화량은 초기 화염핵 (kernel)의 생성시기부터 결정되어지는 경우가 대부분이다<sup>1)</sup>. 따라서 이러한 변화량을 최소로 하기 위해서는 초기 화염핵의 생성 및 성장에 대하여 보다 체계적인 지식이 필요하게 된다. 하지만 화염핵의 성장은 매우 급격하며 좁은 범위에서만 발생하고 전기적, 화학적, 물리적인 현상들이 복합적으로 작용하므로 그 과정을 전부 밝히는 것은 매우 어려운 일이다.

이러한 매 사이클마다의 변화량을 줄이기 위해서 여러가지 시도가 행하여지고 있으나 궁극적으로는 급속연소 (fast burn)를 통하여 이 값을 줄이고자 하는 것이 대부분이다<sup>2)</sup>. 급속연소를 이루기 위한 시도들 중의 하나로 점화 시스템의 개선 및 초기 화염의 생성과 성장 메커니즘을 이해함으로써 급속연소에 보다 유리한 환경을 제공하는 방법이 제시되고 있다<sup>3),4),5)</sup>. 즉 효과적으로 급속연소를 이루기 위해서는 전체 연소기간의 45~50%를 차지하는 초기 연소기간 -절연파괴가 발생한 순간부터 연소에 의한 압력 상승을 확연히 관찰할 수 있을 수 있을 때까지의 기간 -을 단축시켜야 하며 이는 점화 시스템의 개선 또는 화염핵의 성장에 보다 유리한 환경의 제공 등을 통하여 실현되어질 수 있다. Bianco 등<sup>6)</sup>은 초기 화염의 성장은 평균 화염 팽창속도  $S_g$ 와 대류속도  $V_c$  즉 화염핵 (flame kernel)의 움직임에 주로 좌우된다고 설명하고 있다.

초기의 수msec 간의  $S_g$ 는 다음과 같은 네 가지의 요소에 의해 좌우된다.

- ① 방전에 의해 전달된 점화 에너지,

- ② 점화 플러그의 전극으로 빼앗기는 화염핵의 열손실.

- ③ 층류화염 (laminar flame)의 속도.

- ④ 실린더 내의 유체 유동.

또, 대류속도  $V_c$ 는 점화 플러그 부근의 국소 유동에 의해 많은 영향을 받으며 이에 따라 초기 화염과 전극과의 거리 및 접촉 면적을 결정하게 되어 화염의 열손실 양을 변화시킨다. 그리고 초기 화염이 실린더 벽쪽으로 전파하느냐 혹은 연소실의 중심부로 전파하느냐에 따라 그 후의 화염 성장에 큰 영향을 미치게 된다.

위와 같이 매 사이클마다의 변화량을 감소시키기 위해서는 초기 화염의 안정적이고 빠른 연소가 필수적으로 이루어져야 한다. 또 이를 위해서는 점화장치의 특징 및 점화시 또는 점화 직후 점화 플러그 부근의 물리적, 화학적 상태 및 변화를 정확히 파악하는 것이 무엇보다 중요하게 된다.

따라서 이 연구에서는 위에서 설명한 점화 및 초기 화염전파에 영향을 미치는 모든 인자들에 의한 영향을 고려한 모델링을 소개하며 운전 조건 변화에 따른 화염핵의 성장속도 변화를 조사하였다.

## 2. 초기화염 전파 모델링

스파크 점화 엔진의 점화 플러그에서 발생하는 전기방전은 절연파괴 (breakdown) 방전, 아크 (arc) 방전, 글로우 (glow) 방전의 순으로 진행된다. 첫번째 과정인 절연파괴는 매우 짧은 시간 내 (110nsec)에 발생하며 전극사이의 전위차는 혼합기에 방전이 발생할 때까지 증가한다. 방전이 시작되면 먼저 두 전극 사이에 이온의 흐름이 발생하며 이 흐름이 반대편 전극에 닿는 순간 전극사이의 임피던스 (impedance)는 급격히 감소하게 된다. 이때 이동되는 이온은 주로 음 (-) 이온이며 이것에 의해 전극사이의 전류는 빠르게 상승하게 된다. 또한 순간적으로 아주 높은 온도 (40000~60000K) 및 높은 압력 (200bar)이 생성되어 충격파 (shock wave)를 만들게 됨으로써 점화 및 화염의 전파에 매우 유리한 조건이 만들어지게 된다. 절연파괴 방전에 이어 아크 방전이 뒤따라 발생하게 된다. 아크 방전은 높은 전류를 가지며 흡열성의 화학반응이 발생한 후 발열성의

화학반응이 일어난다는 특징을 가지고 있다. 아크 방전시 주로 전도에 의한 열전달과 질량확산에 의한 화염의 팽창이 일어나기 때문에 종 모양의 온도 분포를 보이게 된다. 마지막으로 글로우 방전이 일어나게 된다. 총 에너지 손실은 아크 방전시 보다 많으며, 화염핵의 온도는 약 3,000K 정도가 되며 확산의 크기도 작아진다. 이때 화염의 팽창은 거의 일정한 속도로 이루어지며 화염면의 두께는 증가하나 그 증가 속도는 점점 작아져 결국에는 일정한 값을 유지하게 된다. 전극의 마모는 무시할 만큼 작으나 다른 특성들은 아크 방전시와 매우 비슷하다<sup>7,8,9</sup>.

절연파피 방전의 경우 아주 짧은 순간에 발생하지만 이때 발생한 열 에너지는 다소 긴 시간동안 (1msec) 지속적인 영향을 미친다. 이러한 점 때문에 몇몇 논문들은 절연파피에 의해 영향을 받는 기간을 두 기간으로 나누었다<sup>9,12,13,14</sup>. 즉 화염핵의 성장을 열기구학적 (thermomechanical)인 압력파 (wave)에 의해 초음속으로 팽창하는 기간 (초기 20nsec, blast wave phase)과 아음속의 열확산 (thermal diffusion)으로 인해 팽창하는 기간 (diffusion phase)<sup>12,13</sup>, 혹은 정적 상태 (constant volume phase)와 급속 팽창 상태 (sudden expansion phase)<sup>9,14</sup>로 나누었다. 전자인 팽창속도의 구분에 의한 각 기간의 특징으로는 초음속 팽창시는 blast wave에 의한 화염의 생성 모델링으로 전파속도가 결정되며 아음속 팽창 기간 동안은 화염핵이 가지고 있는 열 에너지에 의해 열확산이 발생하며 이에 따라 팽창속도가 결정되어 진다는 점이다. 또한 blast wave의 생성 및 팽창시의 일률 (power)은 열확산시의 일률보다 약 100~1000 배 정도 큰 값을 가지는 특징을 가진다. 하지만 blast wave는 급격하게 감쇠하여 acoustic wave로 바뀌게 되며 이때 감쇠속도는 방전되는 전기에너지의 특성과 주변조건에 의해 결정된다. 정적 상태와 급속 팽창 상태의 구분은 앞의 구분과 비슷하며 정적 상태의 경우 초음속으로 화염핵이 팽창하더라도 아주 짧은 시간동안 (< 10nsec)이므로 체적의 변화는 작으며 급속 팽창 상태의 경우, 충격파 (shock wave)에 의해 화염이 팽창된다고 설명하고 있다.

한편 아크 및 글로우 방전 시기동안은 절연파피 방전시기에 발생된 화염핵이 계속적으로 공급되는 전기 에너지의 도움을 받으며 화염으로 성

장을 하게 된다. 특히 이 기간동안은 점화 시스템의 특징 -최고 전압 및 전류, 방전시간 등-과 점화 플러그의 형상 -전극의 간극 및 형태- 그리고 실린더 내 혼합기의 유동 등에 많은 영향을 받게 되며 이러한 각 인자들에 의한 영향은 모델링을 실시하는데 반드시 고려되어야 할 사항들이다.

이 연구에서는 위와 같은 방전특성에 따라 절연파피 방전 시기와 아크 및 글로우 방전 기간인 스파크 방전 시기로 나누어서 이론적인 접근을 하였다. 이러한 방식의 구분은 몇몇 선행 연구자들에 의해서도 행하여 졌다<sup>10,11</sup>.

## 2.1 초기조건

점화가 시작되는 시점에서 엔진 내의 온도와 압력은 절연파피에 의해 생성되는 플라즈마 (plasma)의 크기를 결정하는 주요한 인자일 뿐 아니라 그 후 화염의 팽창에 중요한 영향을 미친다<sup>9,14</sup>. 하지만 이 시기에는 연소에 의한 압력 및 온도의 증가가 포함되지 않는 모터링 시의 압력이므로 계산이 크게 어렵지 않으며 에너지 보존 법칙과 이상기체 방정식 등을 사용하여 근사값을 계산할 수 있다.

이 연구에서는 보다 정확한 계산을 위하여 압축행정시의 블로바이 가스 (blowby gas)에 의한 질량 손실까지 고려한 다음의 식을 사용하여 계산하였다.

$$m \frac{du}{d\theta} + u \frac{dm}{d\theta} = \frac{dQ}{d\theta} - p \frac{dV}{d\theta} - \frac{\dot{m}_1 \dot{h}_1}{\omega} \quad (1)$$

이 식의 유도 및 해석은 Ferguson<sup>15</sup>을 참조하였다. 한편 압축 행정 시 실린더 벽면으로의 열전달은 Woschni<sup>16</sup>에 의해 제안된 식을 사용하여 절연파피가 시작되는 순간의 연소실 내 온도를 보다 정확하게 계산하였다.

## 2.2 절연파피 방전 기간

절연파피 방전은 매우 순간적으로 일어나며 고온, 고압에서 발생하므로 이 순간의 전기 에너지에 의한 화학적 변화를 밝히는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 지금까지의 연구결과는 주로 이 기간동안 변화된 값의 결과치를 스파크 기간의

초기값으로 사용하는 정도에 머물고 있다  
9), 12), 13), 14), 18), 22)

이 연구에서는 절연파괴 방전 기간동안 전기 에너지에 의해 생성된 도전로 내의 온도를 다음의 식으로 계산하였다<sup>14), 23)</sup>.

$$T_i = \left[ \frac{1}{x} \left( \frac{T_{ad}}{T_0} - 1 \right) + 1 \right] T_0 \quad (2)$$

그리고 도전로의 지름은 다음과 같은 식에 의해 결정되어진다.

$$d_i = 2 \left[ \frac{x-1}{x} \frac{E_b}{p_0 \pi d (1-T_0/T_i)} \right] \quad (3)$$

절연파괴 방전 직후, 화염핵은 매우 높은 온도를 가지므로 열확산 상태에서 전도에 의해 성장이 주로 결정되는 짧은 시기를 가진다. 이 기간을 거쳐 본격적인 연소에 의해 화염의 팽창이 진행된다.

따라서 열확산에 의한 화염핵의 팽창속도를 구하기 위해서는 위의 (2)와 (3) 식에서 계산되어진 온도와 지름을 초기값으로 하여 다음과 같은 미분방정식을 계산하여야 한다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{n}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\eta V(t) I(t)}{\rho_{pl} c_p \pi (d_i/2) d} \quad (4)$$

초기조건은

$$T(0,r) = T_{ig} \quad 0 < r < d_i/2$$

$$T(0,r) = T_\infty \quad d_i/2 < r < \infty$$

이고 경계조건은

$$T(t, T_\infty) = T_\infty$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (T(t,r))_{r=0} = 0$$

이다. 화염핵의 팽창 속도는 먼저 화염핵의 반지름을 결정 한 후 시간에 따른 반지름의 변화를 계산하면 된다. 이 연구에서는 단열연소온도

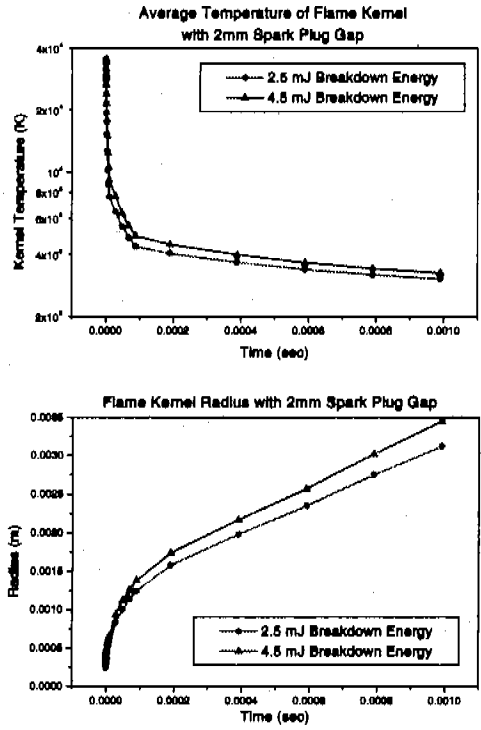


Fig. 1 Initial flame kernel temperature and radius.

(adiabatic flame temperature) 보다 높은 온도를 가지는 구간을 화염핵의 내부로 정의한다. 그리고 화염핵 내부의 평균 온도는 다음 식으로 계산한다<sup>22)</sup>.

$$\overline{T}_k = \frac{\int_0^{r_k} \rho c_p r T dr}{\int_0^{r_k} \rho c_p r dr} \quad (5)$$

Fig. 1은 이 식에 의해 계산되어진 화염핵의 평균온도와 반경을 절연파괴 에너지의 함수로 나타낸 것이다. 화염핵은 초기 고온 플라즈마의 열확산에 의해 급격히 성장하나, 화염핵의 온도가 일정해 짐에 따라 성장속도 역시 일정해 짐을 알 수 있다.

한편 절연파괴 에너지가 두 배 가까이 증가하여도 화염핵 내의 온도차는 50~80K 정도로 초기 화염핵의 온도에 비하면 크게 차이가 나지 않고 있다. 하지만 반경의 경우, 15~20% 정도 더 빨리 성장하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 절연파괴 방전 에너지를 증가시키면 도전로 내의

온도가 증가하는 것이 아니라 지름이 커져 초기 화염핵의 부피를 증가시킨다는 Maly 등<sup>7)</sup>이 설명한 점연파괴 방전 현상과 잘 일치하고 있다.

### 2.3 스파크 방전 기간

점연파괴 방전으로 발생한 blast wave에 의해 시작된 화염핵은 열확산을 시작하는 순간, 구형에 가까운 모습을 가지게 된다. 한편, 화염핵 내로 유입되는 소량의 미연가스를 고려하면 초기 화염이 팽창함에 따른 연소가스의 질량변화는 다음 식으로 표현되어 질 수 있다.

$$\frac{dm_b}{dt} = \frac{d}{dt}(\rho_b V_b) = \rho_u A_b S + C \rho_u V_{in} \quad (6)$$

이 식에서 가장 우변 첫째항의 S는 열확산에 의한 팽창속도인  $S_{diff}$ 과 화학 반응인 연소에 의한 팽창속도인  $S_{comb}$  두 가지로 나누어 계산할 수 있다. 그리고 가장 우변 두번째 항의 C는 실험에 의해 결정되어지는 계수이다. 이러한 사실을 정리하여 수식으로 나타내면

$$\frac{dm_b}{dt} = \rho_u A_b (S_{diff} + S_{comb}) + C \rho_u V_{in} \quad (7)$$

가 된다. 한편 Lim 등<sup>12)</sup>의 연구를 참고하면 위 식 우변 마지막 항의 C 값은 0에 가까운  $0.8 \times 10^{-7}$ 의 값을 가진다. 따라서 이 연구에서는 계산의 편의를 위해 마지막 항은 무시하기로 한다.

한편  $d(\rho V) = \rho dV + V d\rho$ 이므로 이 식을 시간에 대한 미분식으로 나타내고 이상기체 방정식을 대입하면

$$\begin{aligned} \frac{dV_b}{dt} &= \frac{1}{\rho_b} \frac{d(\rho_b V_b)}{dt} - \frac{V_b}{\rho_b} \frac{d\rho_b}{dt} \\ &= \frac{1}{\rho_b} \frac{dm_b}{dt} \\ &+ V_b \left[ \frac{1}{T_b} \frac{dT_b}{dt} - \frac{1}{p} \frac{dp}{dt} \right] \quad (8) \end{aligned}$$

가 된다<sup>17)</sup>. 가장 우변의 첫째 항에 식 (7)을 대입하면 다음과 같은 화염의 시간당 체적 변화량을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dV_b}{dt} &= \frac{\rho_u}{\rho_b} A_b (S_{diff} + S_{comb}) \\ &+ V_b \left[ \frac{1}{T_b} \frac{dT_b}{dt} - \frac{1}{p} \frac{dp}{dt} \right] \quad (9) \end{aligned}$$

(9) 식의 양변을 화염의 표면적으로 나누어주면 화염의 팽창 속도에 관한 식을 얻을 수 있다. 즉

$$\begin{aligned} \frac{dr}{dt} &= \frac{\rho_u}{\rho_b} (S_{diff} + S_{comb}) \\ &+ \frac{V_b}{A_b} \left[ \frac{1}{T_b} \frac{dT_b}{dt} - \frac{1}{p} \frac{dp}{dt} \right] \quad (10) \end{aligned}$$

이다. 이 식이 초기 화염의 팽창 속도를 결정하게 되며 이 연구에서 구하고자 하는 값을 나타내게 된다. (10) 식을 계산하기 위해서는 우변의 각 항에 대한 값을 계산하여야 하며 이에 대한 자세한 설명은 다음과 같다.

#### 2.3.1 화염핵의 열확산 속도 ( $S_{diff}$ )

초기 화염핵의 열확산 속도는 앞장에서 설명한 식 (4)를 시간에 대해 적분하면 계산할 수 있다. 즉 Fig. 1의 위쪽 그림이 그 결과를 나타내고 있으며 앞에서 설명한 것처럼 열확산은 점연파괴가 발생하고 난 후 수십 nsec 이후부터 시작하며 약 1 msec 정도까지 영향을 미친다.

#### 2.3.2 화염의 팽창 속도 ( $S_{comb}$ )

내연기관에서 화염의 팽창속도는 난류화염속도에 의해 주로 결정되어진다. 특히 초기 화염 성장기간 동안 난류화염속도 ( $S_t$ )는 변형률 (strain,  $I_0$ ), 선형화염속도 ( $S_l$ ), 평균유체유동속도 ( $U$ ), 난류강도 ( $u'$ ), 그리고 특성길이 (characteristic length) 등에 의해 결정된다. 이 논문에서는 Herweg 등<sup>18)</sup>의 논문을 참조하여 다음의 식을 사용하였다.

$$\begin{aligned} \frac{S_t}{S_l} &= I_0 + I_0^{1/2} \left( \frac{[U^2 + u'^2]^{1/2}}{[U^2 + u'^2]^{1/2} + S_l} \right)^{1/2} \\ &\left( 1 - \exp\left(-\frac{r}{L}\right) \right)^{1/2} \end{aligned}$$

$$\left[ 1 - \exp\left(-\frac{[\overline{U^2 + u'^2}]^{1/2} + S_1 t}{L}\right) \right]^{1/2} \left(\frac{u'}{S_1}\right)^{5/6} \quad (11)$$

여기서 변형률  $I_0$ 는 다음과 같이 표현되어 질 수 있다.

$$I_0 = 1 - \left(\frac{\delta_1}{15L}\right)^{1/2} \left(\frac{u'}{S_1}\right)^{3/2} - 2\frac{\delta_1}{r} \frac{\rho_u}{\rho_b} \quad (12)$$

한편, 선형화염속도에 관한 연구는 여러 논문<sup>19)~21)</sup>에서 행하여 졌으나 여기서는 Rhodes 등<sup>21)</sup>에 의해 제안되어진 다음의 식을 사용하였다.

$$S_u = S_{u0} \left(\frac{T_b}{T_0}\right)^\alpha \left(\frac{p}{p_0}\right)^\beta (1 - 2.06f_b^{0.733}) \quad (13)$$

여기서  $S_{u0} = 30.5 - 54.9(\psi - 1.21)^2$   
 $\alpha = 2.4 - 0.271\psi^{3.51}$   
 $\beta = -0.357 + 0.14\psi^{2.77}$

이다. 그러나 이 식에서 얻어진 값은 단열연소 온도에서의 선형화염 연소속도이다. 초기 화염의 성장기간 동안은 전기 에너지의 지속적인 공급과 전극으로의 열손실 등에 의해 화염 온도는 단열연소온도의 값에서 벗어나게 된다. 따라서 위의 식에서 구하여진 선형화염속도는 다음과 같은 식에 의해 수정되어야 한다<sup>22)</sup>.

$$S_1 = S_u \frac{T_b - T_a}{T_{ad} - T_a} \quad (14)$$

이 논문에서는 위와 같은 방법으로 구하여진 난류화염속도를 화염의 팽창속도로 하여 계산하였다.

2.3.3 화염의 온도변화율 (dT<sub>b</sub>/dt)

절연파괴에 의해 시작된 초기 화염핵은 임계 반지름 (critical radius)에 도달할 때까지 지속적으로 전기 에너지를 공급받아야 한다<sup>13)</sup>. 임계 반지름이란 화염핵이 더 이상 전기 에너지의 도움을 받지 않고 스스로 성장할 수 있는 반지름을 말하며 이때의 화염핵 온도를 소염 온도

(quenching temperature)라고 한다<sup>22)</sup>. 대부분의 점화 시스템은 예외적인 몇 개의 경우를 제외하고 화염핵이 임계 반지름 이상까지 자랄 수 있는 충분한 량의 전기 에너지를 공급하며 여분의 전기 에너지 및 혼합기 내의 화학 에너지는 열 에너지로 변환하게 된다. 그리고 전극으로 열손실이 화염의 온도를 변화시킨다. 이러한 초기화염의 온도 변화율 구하기 위해서는 다음과 같은 식을 유도하여야 한다. 먼저 열역학 제 1법칙은

$$\frac{dH_b}{dt} = \frac{dU_b}{dt} + \frac{dW}{dt} \quad (15)$$

이다. 각 항들의 값은 다음과 같다.

$$\frac{dH_b}{dt} = m_b \frac{dH_b}{dt} + h_b \frac{dm_b}{dt} \quad (16)$$

이고

$$\begin{aligned} \frac{dU_b}{dt} &= \frac{dQ_{in}}{dt} - \frac{dQ_{out}}{dt} - \frac{pdV}{dt} \\ &= \frac{dE_{el}}{dt} + \frac{dQ_{ch}}{dt} - \frac{dQ_{loss}}{dt} - \frac{pdV}{dt} \end{aligned} \quad (17)$$

이다. 여기서 다시

$$\frac{dQ_{ch}}{dt} = h_{ch} \frac{dm_{ch}}{dt} + m_{ch} \frac{dh_{ch}}{dt} \quad (18)$$

가 된다. 화학적 엔탈피  $h_{ch}$ 의 값은 일정한 온도 및 압력에서는 상수로 취급되므로 우변의 두번째 항은 0이 된다. 그리고  $m_{ch}$ 는 연소에 참여한 질량을 나타내므로 위의 식은 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$\frac{dQ_{ch}}{dt} = h_{ch} \frac{dm_b}{dt} \quad (19)$$

그리고

$$\frac{dW}{dt} = -p \frac{dV}{dt} + V \frac{dp}{dt} \quad (20)$$

이다. 지금까지 설명한 (16), (17), (19), (20) 식을 (15)식에 대입하여 정리하면 다음의 식이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{dh_b}{dt} = & \frac{1}{m_b} \left[ \frac{dE_{el}}{dt} + \frac{dQ_{ch}}{dt} \right. \\ & \left. - \frac{dQ_{loss}}{dt} + V_b \frac{dp}{dt} \right] - \frac{h_b}{m_b} \frac{dm_b}{dt} \\ & - \frac{[h_{ch} - h_b]}{\rho_b V_b} \rho_u A_b (S_{diff} + S_{comb}) \\ & + \frac{1}{\rho_u V_b} \left[ \frac{dE_{el}}{dt} - \frac{dQ_{loss}}{dt} \right] + \frac{1}{\rho_b} \frac{dp}{dt} \end{aligned} \quad (21)$$

이 식에서 양변을 정압 비열인  $c_p$ 로 나누어 주게 되면 시간의 변화에 따른 화염 온도의 변화에 대한 식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dT_b}{dt} = & \frac{[h_{ch} - h_b]}{c_p \rho_b V_b} \rho_u A_b (S_{diff} + S_{comb}) \\ & + \frac{1}{c_p \rho_u V_b} \left[ \frac{dE_{el}}{dt} - \frac{dQ_{loss}}{dt} \right] \\ & + \frac{1}{c_p \rho_b} \frac{dp}{dt} \end{aligned} \quad (22)$$

여기서 (22) 식을 풀기 위해 시간의 변화에 따른 열손실의 변화량과 공급되는 전기 에너지 항들의 시간에 대한 변화값을 살펴보아야 한다.

**열손실의 변화량 ( $dQ_{loss}/dt$ )**

화염핵의 초기성장 기간 (약 3msec) 동안 점화 플러그 전극이나 점화 플러그 혹은 실린더 벽면으로의 열손실은 화염핵의 성장에 많은 영향을 미치게 된다. 일반적으로 복사에 의한 열손실을 무시하면 전도와 대류에 의한 열전달은 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$\frac{dQ_{loss}}{dt} = h_{heat} A_{cont} (T_b - T_{ele})$$

열전달 계수의 값을  $150 \sim 200 \text{ W/m}^2\text{K}$ 라고 가정하면 점화 플러그가 단열연소온도에 가까운 2000K에 3msec 정도 노출되었을 경우, 전극의

온도 변화는  $25 \sim 75\text{K}$ 이다. 이 값은 화염의 온도 변화에 비하면 무시할 수 있을 정도로 작을 값이므로 상수로 취급할 수 있다<sup>24),25)</sup>. 따라서 시간의 변화에 따른 열손실의 값은 화염과 점화 플러그 혹은 실린더 헤드면과의 접촉면적에 의해 주로 결정되어진다.

이 연구에서는 화염과의 접촉면적을 구하기 위하여 다음과 같은 가정하에서 계산을 실시하였다.

- 1) 계산의 편의를 위하여 점화 플러그의 중심전극 (central electrode)은 원통, 접지전극 (ground electrode)은 직각으로 구부러진 직사각형의 급속막대로 가정한다.
- 2) 점화 플러그 전극 자체는 화염의 성장에 영향을 미치지 않는다.
- 3) 점화 플러그 헤드면은 평평하다고 가정한다.
- 4) 화염에 접하는 점화 플러그 표면 및 헤드면은 동일한 열전달 계수를 가지는 것으로 가정한다.

Fig. 2는 Pischinger 등<sup>17),25)</sup>의 실험 결과값과 이 논문에서 소개된 모델을 이용한 시뮬레이션의 결과값을 비교한 것이다.

이 시뮬레이션에서 점화플러그의 중심전극의 지름은 2mm, 높이는 2mm, 접지전극의 두께는 1mm, 넓이는 2mm로 하였으며 전극의 간극은 2mm로 하여 계산하였다. 이 값들은 전체적으로 Pischinger의 실험에 사용된 standard spark plug 보다는 작고 thin electrode spark plug의 값보다는 큰 값이다.

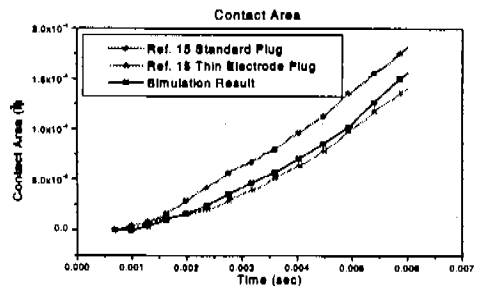


Fig. 2 Contact area between spark plug and flame kernel.

**공급되는 전기에너지의 변화량 ( $dE_{el}/dt$ )**

시간의 변화에 따른 공급되는 전기에너지의 변화량 ( $dE_{el}/dt$ )는 참고 논문 3)과 4)의 고 에너지

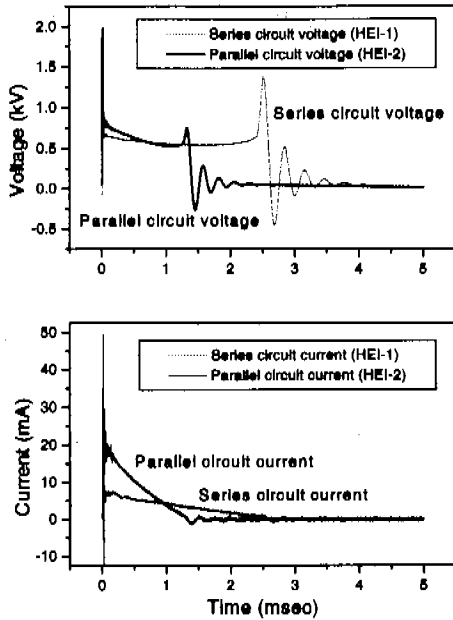


Fig. 3 The comparisons of voltage and current between HEI-1 and HEI-2.

점화장치를 정적연소실에 장착하여 실험한 결과 값을 사용하였다. 특히 점화 에너지의 방전특성에 따른 화염핵의 성장 변화를 계산하기 위해 점화 시스템의 2차 회로를 직렬로 연결한 것(HEI-1)과 병렬로 연결한 것(HEI-2) 두 가지를 사용하여 실험한 결과값을 입력하였으며 이것을 그림으로 나타낸 것이 Fig. 3이다. HEI-1의 경우, 최고전압이나 전류는 HEI-2보다 작지만 방전 시간이 긴 특징이 있다.

2.3.4 연소실 내의 압력 변화율 (dp/dt)

이 값은 앞절의 식 (1)로 계산할 수 있다. 여기서 화염핵의 부피가 작으므로 연소에 의한 연소실 내의 압력상승은 무시할 수 있다고 가정한다. 또한 (1) 식의 크랭크 각도의 변화에 따른 물성치의 변화량을 시간의 변화에 따른 변화량으로 바꾸어 주면 계산이 가능하다.

3. 운전조건에 따른 시뮬레이션 결과

지금까지 2.3 절에서 설명한 각 식들을 앞의

식 (10)에 대입하여 계산하였다. 이 화염핵의 성장에 대한 모델의 시뮬레이션을 엔진의 운전조건을 바꾸면서 실시하였다.

3.1 방전특성 변화에 따른 화염핵의 팽창속도

위의 Fig. 3에 나타낸 것처럼 HEI-1 과 HEI-2 의 각기 다른 두 점화 시스템을 사용하여 얻은 전압 값과 전류 값을 입력하여 계산한 결과 두 시스템에 의한 팽창속도의 차는 크게 나타나지 않았다. 이 결과는 Fig. 1에 나타난 결과와는 다소 상반되는 것처럼 보인다. 하지만 Fig. 1에 나타낸 결과는 절연과피 방전 에너지의 크기 변화에 의한 화염핵의 성장 변화이며 여기서의 HEI-1과 HEI-2의 경우, 방전시간과 방전전력 (Watt = current × voltage)의 차이는 있으나 절연과피 방전 에너지의 차이는 거의 없으므로 화염핵의 성장에는 별다른 차이를 나타내지 않고 있다. 따라서 화염핵의 생성과 성장에는 아크 방전이나 글로우 방전의 방전시간이나 전력의 차이보다는 절연과피 방전의 크기가 더 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 한편 점화 플러그 부근의 유동이나 흡배기계에 의해 생성되는 난류를 보다 정밀한 수식으로 모델링 하고 유체유동에 의한 도전로의 확장 또는 방전 에너지 전달효율의 향상까지 고려하게 되면 두 시스템의 성능 비교가 보다 정확해 질 것으로 판단된다.

3.2 공연비의 변화에 따른 화염핵의 팽창속도

Fig. 4는 공연비 변화에 따른 화염핵의 반지름 및 팽창속도의 변화를 나타내고 있다. 당량비 (equivalence ratio)를 나타내는  $\phi$ 는 실제 연공비에 대한 이론 연공비의 비를 나타내며 그 값이 작아질수록 희박 혼합기임을 의미한다.

이론 공연비의 값에 가까워질수록 화염핵은 초기의 성장시기부터 보다 큰 화염을 만들게 되며 팽창 속도를 결정하는 주요인자가 열확산에서 연소에 의한 팽창으로 빨리 바뀌어 가는 것을 알 수 있다.

한편, 일반적으로 선형화염속도는 당량비가 1.15~1.2에서 최고점을 가지며 이 값보다 작거나 커지면 급격히 감소하게 된다.<sup>19)~21)</sup> 따라서 희박 연소의 경우, 선형화염속도의 감소에 의해 연소 속도는 많은 영향을 받음을 알 수 있다.



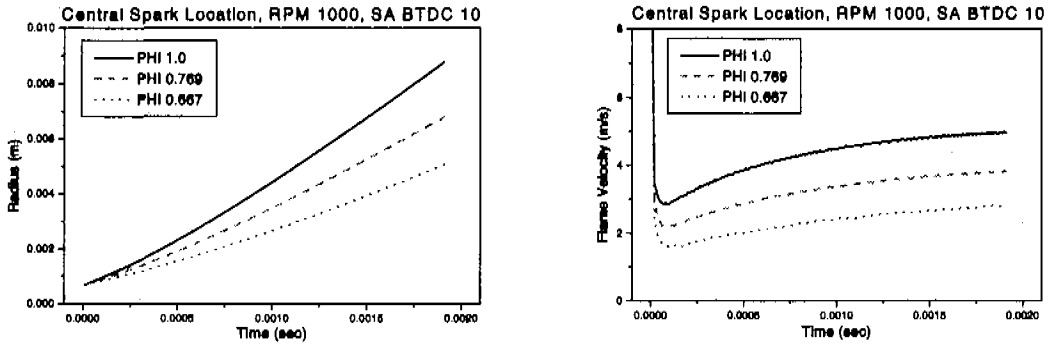


Fig. 4 Flame kernel radius and expansion velocity with various A/F ratio.

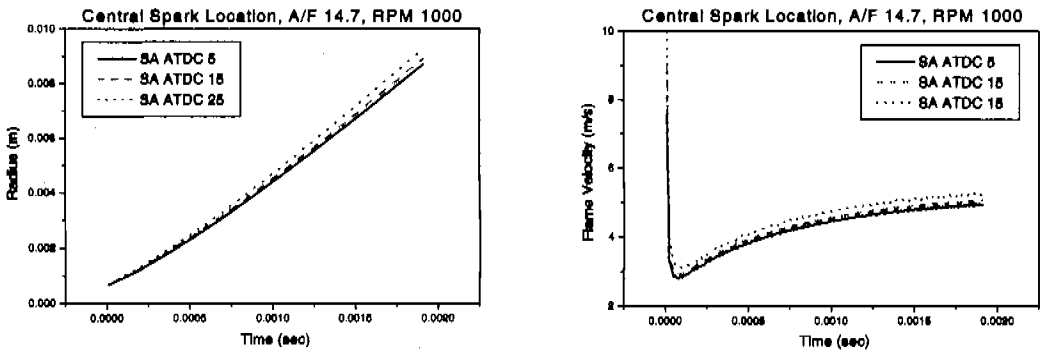


Fig. 5 Flame kernel radius and expansion velocity with various spark timing.

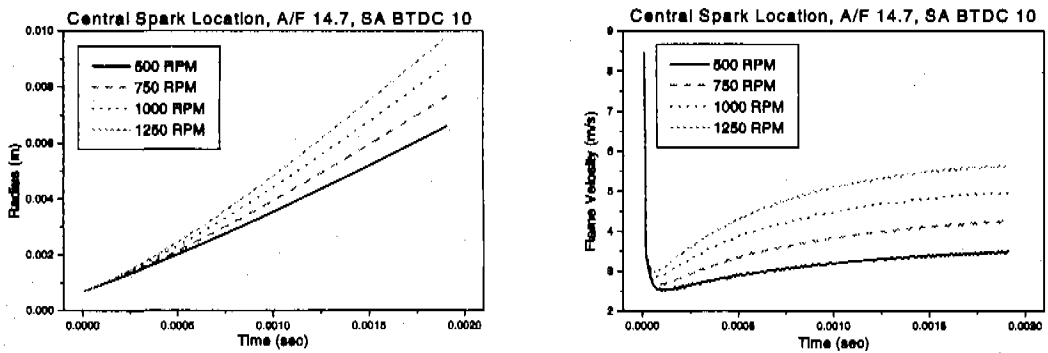


Fig. 6 Flame kernel radius and expansion velocity with various engine speed.

3.3 점화시기 변화에 따른 화염핵의 팽창속도 점화시기 직후의 초기 화염핵은 엔진 내의 난류에 영향을 받을 만큼 충분히 성장하지 않았기 때문에 주로 주위 온도나 압력에 의해 크기가 결정된다. 따라서 점화시기의 변화는 초기 화염핵의 성장에 주로 초기조건외 변화로써 영향을 미치게 되며 공연비나 엔진 회전속도의 변화와 같

이 화염의 성장에 지속적으로 큰 영향을 미치지 못한다.

Fig. 5에 나타나 있듯이 화염의 팽창속도는 공연비나 엔진의 회전속도 변화에 비해 점화시기의 변화에는 그렇게 많은 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

### 3.4 엔진 회전속도 변화에 따른 화염핵의 팽창 속도

엔진의 회전속도가 높아질수록 기관 내 난류강도 및 유체의 유동속도는 커지게 되며 따라서 초기 화염핵의 성장에 보다 유리한 조건이 만들어진다. 특히 난류강도는 엔진의 회전속도에 비례하여 커지게 되어 난류화염속도의 증가에 도움을 주게 된다.

Fig. 6은 이러한 결과를 나타내고 있다.

## 4. 결 론

에너지 보존의 법칙과 이상기체 방정식 등을 이용하여 초기 화염핵의 성장 및 팽창을 시뮬레이션 해 보았다. 이 시뮬레이션을 통하여 점화시기 부근에서의 엔진 내 초기연소에 대해 다음과 같은 몇 가지 사실들을 알게 되었다.

(1) 점연파의 방전에 의한 플라즈마에 의해 생성된 화염핵은 초기에는 열확산에 의해, 그리고 시간이 지남에 따라 엔진내의 층류 또는 난류에 의해 팽창을 하게 된다.

(2) 공연비가 희박해 질수록, 점화시기가 퇴각될수록 그리고 엔진회전속도가 줄어들수록 화염핵의 성장은 늦어지게 된다.

(3) 화염핵의 생성 및 성장은 점연파의 방전 에너지의 크기에 많은 영향을 받으며 아크나 글로우 방전시의 방전시간이나 전력에는 큰 영향을 받지 않는다.

(4) 화염핵의 팽창은 엔진내의 온도와 압력, 방전 에너지, 선형 및 난류 화염속도, 화염핵과 점화플러그 또는 실린더와의 접촉면적 등 화학적, 전기적 그리고 물리적인 요소들에 의해 복합적으로 영향을 받는다.

## 참고문헌

(1) Young, M. B. : "Cyclic Dispersion in the Homogeneous-Charge Spark-Ignition Engine A Literature Survey", SAE paper 810020, SAE Trans, 1981  
 (2) Mattavi, J. N. : "The Attributes of Fast Burning Rates in Engines", SAE paper 800920. SAE Trans 1980.

(3) 송 정훈 : "고점화 에너지가 희박연소기관의 성능에 미치는 영향", 한양대학교 대학원 석사 졸업논문, 1995  
 (4) 한 단배, 송 정훈, 선우 명호 : "점화 에너지가 희박연소기관에 미치는 영향에 관한 연구 (1)", 한양대학교 기계기술 연구소, 제2권2호, 1996  
 (5) 이 상준, 나 성오, 한 성빈, 이 용균, 이 종태 : "희박혼합기에 대한 다점점화의 점화능력 및 연소특성", 대한기계학회논문집, 제19권, 제10호, pp. 2607~2616, 1995  
 (6) Bianco, Y., Cheng, W. K., and Heywood, J. B. : "The Effects of Initial Flame Kernel Conditions on Flame Development in SI Engine", SAE paper 912402, SAE Trans 1991  
 (7) Maly, R. R. and Vogel, M. : "Initiation and Propagation of flame fronts in Lean CH<sub>4</sub>-Air Mixtures by the Three Modes of the Ignition Spark", 17th Symposium (International) on Combustion, pp. 821831, 1978  
 (8) Ziegler, G. F. W., Wagner, E. P., and Maly, R. R. : "Ignition of Lean Methane-Air Mixtures by High Pressure Glow and Arc Discharges", 20th Symposium (International) on Combustion,  
 (9) Sher, E. and Keck, J. C., : "Spark Ignition of Combustible Gas Mixture", Combustion and Flame 66, 17-25, 1986  
 (10) Kalghatgi, G. T. : "Spark Ignition, Early Flame Development and Cyclic Variation in IC Engine", SAE paper 870163, SAE Trans, 1987  
 (11) Ward, M. A. V. : "A New Spark Ignition System for Lean Mixtures Based on a New Approach to Spark Ignition", SAE paper 890475, SAE Trans, 1989  
 (12) Lim, M. T., Anderson, R. W. and Arpaci, V. S. : "Prediction of Spark Kernel Development in Constant Volume Combustion", Combustion and flame 69, 303-316, 1987  
 (13) Ko, Y., Arpaci, V. S., and Anderson R. W. : "Spark Ignition of Propane-Air Mixture Near the Minimum Ignition Energy : Part II.

- A Model Development", *Combustion and Flame* 83, 88-105, 1991
- (14) Sher, E., Ben-Yaish, J. and Kravchik, T. : "On the Birth of Spark Channels", *Combustion and Flame* 89, 186-194, 1992
- (15) Ferguson, C. R., : "Internal Combustion Engines", Willy & Sons Press, 1986
- (16) Woschni, G. : "A Universally Applicable Equation for Instantaneous Heat Transfer Coefficient in the Internal Combustion Engine", *SAE Transactions*, Vol. 76, pp. 1-46, 1987
- (17) Pischinger, S. : "Effects of Spark Plug Design Parameters on Ignition and Flame Development in an SI-Engine", Ph. D. thesis, M.I.T., 1989
- (18) Herweg, R. and Maly, R. R. : "A Fundamental Model for Flame Kernel Formation in S.I. Engines", *SAE paper* 922243, *SAE Trans*, 1992
- (19) Metghalchi, M. and Keck, J. C. : "Burning Velocities of Air with Methanol, Isooctane, and Indolene at High Pressure and Temperature", *Combustion and Flame* 48, 191-210, 1982
- (20) Gulder, O. L. : "Correlation of Laminar Combustion Data for Alternative S.I. Engine Fuels", *SAE paper* 841000, *SAE Trans*, 1984
- (21) Rhodes, D. B. and Keck, J. C. : "Laminar Burning Speed Measurements of Indolene-Air-Diluent Mixture at High Pressure and Temperature", *SAE paper* 850047, *SAE Trans*, 1985
- (22) Shen, H., Hinze, P. C. and Heywood, J. B., : "A model for Flame Initiation and Early Development in SI Engine and its Application to Cycle-to-Cycle Variations", *SEA Paper* 942049, *SAE Trans*, 1994
- (23) Rafael, S. and Sher, E. : "A Theoretical Study of the Ignition of a Reactive Medium by Means of an Electrical Discharge", *Combustion & Flame* 59: 17-30, (1985)
- (24) Ko, Y., and Anderson R. W. : "Electrode Heat Transfer During Spark Ignition", *SAE paper* 892083, *SAE Trans*, 1989
- (25) Pischinger, S. and Heywood, J. B. : "How Heat Losses to the Spark Plug Electrodes Affect Flame Kernel Development in an SI-Engine", *SAE paper* 900021, *SAE Trans*, 1990