

희박연소 및 EGR 엔진에서 초기 화염핵 생성 및 성장에 관한 연구

A Study on the Kernel Formation & Development for Lean Burn and EGR Engine

송정훈*, 선우명호**
Jeonghoon Song, Myoungho Sunwoo

ABSTRACT

This paper investigates the effects of the variations of engine operation condition on the flame kernel formation and development. A model for calculating the initial kernel development in spark ignition engines is formulated. It considers input of electrical energy, combustion energy release and heat transfers to the spark plug, cylinder head, and unburned mixture. The model also takes into accounts strain rate of initial kernel and residual gas fraction.

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 turbulent flame expansion. Flame kernel development is also influenced by engine operating conditions, for example, EGR rate, air-fuel ratio and intake manifold pressure.

주요기술용어 : Flame Kernel (화염핵), Breakdown(절연파괴), Lean Burn(희박연소), EGR(배기가스 재순환), Ignition Energy(점화 에너지)

Nomenclature

A_b : 화염핵의 표면적 (m^2)
 $A_{cont}(t)$: 화염과 전극 혹은 실린더 헤드 면
과의 접촉면적 (m^2)
 B : 실린더 내경 (mm)

c_p : 정압비열 (J/kg/K)
 d : 점화 플러그 전극의 간극 (m)
 d_i : 플라즈마의 지름 (m)
 D_m : 질량확산 계수
 D_v : valve inner seat diameter (mm)
 E_b : 절연파괴 에너지 (J)
 h_{heat} : 열전달 계수 ($W/m^2/K$)
 $I(t)$: 점화 플러그에서의 전류 (A)
 k : 열전도 계수 (W/m/K)
 Le : Lewis Number ($= \alpha/D_m$)

* 정회원, 한양대학교 대학원

** 정회원, 한양대학교 기계공학부

$L_{v,max}$: 최대 밸브 리프트 (mm)
 m : 질량 (kg)
 m_e : 화염핵으로 흡입된 혼합기의 질량 (kg)
 N : 엔진 회전수 (rpm)
 p : 압력 (Pa)
 p_i : 흡기계 압력 (bar)
 p_e : 배기계 압력 (bar)
 p_0 : 점화시기에서의 압력 (Pa)
 r_c : 압축비
 S_{diff} : 열확산 속도 (m/sec)
 S_{comb} : 연소속도 (m/sec)
 T_{act} : Activation Temperature (Eact/R)
 T_{ad} : 단열 연소 온도 (K)
 T_{bd} : 절연과파 방전시 화염핵 온도 (K)
 T_{ele} : 점화 플러그 전극의 온도 (K)
 T_i : 도전로 내의 온도 (K)
 T_0 : 점화시기에서의 연소실 내 온도 (K)
 $V(t)$: 점화 플러그에서의 전압 (V)
 V : 가스 체적 (m^3)
 x_r : 잔류 가스 량 (%)
 OF : overlap factor
 $= 1.45 (107 + 7.8 \Delta \theta + \Delta \theta^2) \times (L_{v,max} \times D_v) / B^3$
 α : 열확산 계수 (m^2/sec)
 δP : 예열 구간 두께 = $k / (cpSL)$ (m)
 δL : 선형화염 두께 (m)
 $\Delta \theta$: 밸브 오버랩 각도 (degree)
 κ : 비열비
 ρ_{pl} : 플라즈마 밀도 (kg/m^3)
 η : 전기 에너지 효율

Subscripts

b : burn
 u : unburn

1. 서론

스파크 점화는 ECU에 의해 결정되어진 시기에 전기 에너지를 점화 플러그의 전극에 방전하는 것으로 전기적·화학적 반응을 포함한 질량 및 열확산의 과정이다^{1),2)}. 이 과정을 모델링하기 위해서는 절연과파 방전 기간 동안의 점화 에너지 량, 점화 시스템 또는 점화 플러그에 의한 방

전과정의 변화, 화염핵의 성장기간 동안 난류에 의해 발생하는 화염의 변형을, 희박연소에서 여분의 공기가 미치는 영향, 잔류가스 또는 EGR 량에 의한 성장 지연 등 화염핵의 성장에 지배적인 영향을 미치는 모든 인자들을 고려하여야 하며 이러한 연구는 부족한 실정이다.

Herweg 등³⁾은 초기 화염핵의 성장에 대해 비교적 자세한 모델링을 하였으나 잔류가스 및 화염핵이 성장함에 따른 열손실 및 온도변화에 대한 고려가 부족하다. 또한 난류 강도 및 integral length scale을 상수로 처리하여 모델링의 정확성에 다소의 문제점이 있다고 고려된다. Dai 등^{4),5)}은 화염의 표면이 지도상의 지형과 비슷하다고 하여 다소 복잡한 peninsula-fractal 연소 모델을 개발하기도 하였다. 하지만 이 모델에 의해 계산된 결과값은 기존의 모델에 의한 값 보다 크게 향상되지 않았으며 두 개의 실험계수가 필요하다는 단점이 존재한다. 한편 Pischinger^{6),7)} 및 그의 모델링을 개선한 Shen 등⁸⁾의 연구에서는 열전달 계수의 값에 대한 계산이 다소 부정확하며 엔진 운전조건의 변화에 따른 초기 화염핵의 성장의 변화에 대한 연구 결과가 부족하다.

따라서 이 연구에서는 초기 화염핵의 생성 및 성장에 영향을 미치는 모든 인자들을 고려한 모델링을 하였다. 또한 희박 연소 또는 EGR 운전시 화염핵의 성장 속도 변화나 엔진 회전 속도 및 부하의 변화가 화염핵의 전파속도에 미치는 영향에 대해 고찰하였다. 이 연구의 목적은 전기 에너지의 방전으로부터 시작한 화염핵이 화염으로 성장해 나가는 과정을 분석함으로써 희박연소 및 EGR 운전시, 보다 안정적인 초기 연소를 가능하게 하는데 있다.

2. 가솔린 기관의 초기 화염핵 생성 및 성장에 대한 모델링

일반적인 J 형태의 점화 플러그를 사용하여 점화를 하는 경우, 방전은 절연과파, 아크, 글로우

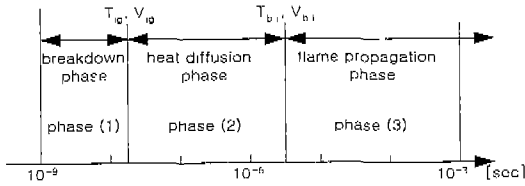


Fig. 1 The period of flame kernel formation and development

방전의 순서로 진행된다. 절연파괴에 의해 생성된 플라즈마는 고온 및 고압의 상태이므로 (phase (1) in Fig. 1) 이 기간이 끝난 후에도 열확산을 통하여 화염핵의 성장에 영향을 미치게 된다 (phase (2)). 아크 및 글로우 방전은 절연파괴 방전에 뒤따라 발생되며 이 기간 동안 화염핵은 연소를 시작하여 수십 μsec ~ 수백 μsec 이후부터는 본격적인 화염으로 성장하게 된다 (phase (3)). Fig. 1는 이 과정을 나타낸 것이다.

2.1 절연파괴 방전에 의한 화염핵의 생성 및 성장

절연파괴 방전의 경우 아주 짧은 순간에 발생하지만 (수 ~ 수십 nsec) 이때 발생한 열 에너지는 다소 긴 시간동안 (최대 1msec) 지속적인 영향을 미친다. 따라서 절연파괴가 발생하고 있는 기간 (phase (1))과 절연파괴에 의해 발생한 도전로의 확산이 화염핵의 성장에 지배적으로 영향을 미치는 기간 (phase (2))으로 나누어서 생각하여야 한다.

절연파괴 방전 기간 동안은 플라즈마 내의 압력 (200bar)과 미연가스의 압력 (수bar) 차이로 인하여 발생하는 압력파에 의해 화염핵은 초음속으로 팽창한다 (phase (1)). 절연파괴 방전 기간이 종료되면 이 기간 동안 생성된 열에 의해 아음속의 열확산이 일어나게 된다 (phase (2)). 절연파괴 기간 동안 일률 (power)은 열확산 기간의 일률보다 100~1000배의 크기를 가지나 이때 생성된 blast wave는 급격히 감소하여 acoustic wave로 바뀌게 되며 이때 감속속도는 방전되는 전기에너지의 특성과 주변조건에 의해 결정된다

3),9)

절연파괴 방전은 매우 순간적으로 일어나기 때문에 지금까지의 연구결과는 주로 이 기간동안 생성된 값의 결과치를 열확산이 발생하는 기간의 초기 값으로 사용하고 있다. 절연파괴 방전 기간 동안 생성된 플라즈마는 다음과 같은 지름과 온도를 가지게 된다¹⁰⁾.

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

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

위와 같은 식에 의해 계산되어진 초기 화염핵은 열확산을 하게 된다.

이 연구에서는 열확산이 모든 방향으로 동일하게 일어나며 화염핵은 원통형이라고 가정하면 다음과 같은 식으로 표현되어 질 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{n}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\eta V(t) I(t)}{\rho_p c_p \pi (d_i/2)^2 d} \quad (3)$$

이 된다. 열확산에 의한 화염핵의 팽창 속도는 먼저 화염핵의 반지름을 결정한 후 시간에 따른 반지름의 변화를 계산하면 된다. 이 연구에서는 단열연소온도 (adiabatic flame temperature) 보다 높은 온도를 가지는 구간을 화염핵의 내부로 정의한다.

2.2 스파크 방전에 의한 화염핵의 성장

아크 및 글로우 방전은 절연파괴 방전에 비해 방전 특징이 유사하므로 스파크 방전 기간으로 통합하여 모델링하는 것이 일반적이다. 이 기간 동안은 절연파괴 방전시기에 발생한 화염핵이 열확산을 통하여 성장을 계속하며 (phase (2) in Fig. 1) 지속적으로 공급되는 전기 에너지의 도움을 받으며 완전한 화염으로 성장하게 된다

(phase (3)).

2.2.1 질량연소 모델

화염핵의 성장 모델링에 있어 가장 중요한 부분 중의 하나이며 많은 연구자들이 여러 가지 수식을 사용하여 질량연소율에 대한 모델링을 실시하였다. 이 연구에서는 다음과 같은 질량연소 방정식을 사용하였다.

$$\frac{dm_b}{dt} = C_1 \rho_u A_b S + C_2 \frac{m_e - m_b}{\tau_b} \quad (4)$$

여기에서 우변의 첫 번째 항은 전기 에너지의 방전으로 시작된 연소에 의한 화염핵의 팽창을, 두 번째 항은 화염핵으로의 미연가스의 흡입을 나타낸다.

실제 엔진의 연소에서 미연가스가 화염핵으로 흡입되는 것은 열확산이 화염핵의 성장에 지배적인 영향을 미치는 기간에 주로 일어나며 본격적인 화염전파기간에서는 그 양은 매우 적다⁹⁾. 따라서 다음과 같은 간단한 질량연소 방정식을 사용하기로 한다.

$$\frac{dm_b}{dt} = \rho_u A_b (S_{diff} + S_{comb}) \quad (5)$$

질량연소 방정식은 다음과 같은 수식에 포함되어 화염의 팽창속도에 영향을 미치게 된다. 즉, $d(\rho V) = \rho dV + V d\rho$ 이며 이 식을 시간에 대한 미분식으로 나타내고 이상기체 방정식을 대입하면

$$\begin{aligned} \frac{dV_b}{dt} &= \frac{1}{\rho_b} \frac{d(\rho_b V_b)}{dt} - \frac{V_b}{\rho_b} \frac{d\rho_b}{dt} \\ &= \frac{1}{\rho_b} \frac{dm_b}{dt} + V_b \left[\frac{1}{T_b} \frac{dT_b}{dt} - \frac{1}{p} \frac{dp}{dt} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

이 된다. (6) 식에 (5) 식을 대입하고 양변을 화염 표면적으로 나누면 다음과 같은 화염팽창속도를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dr_b}{dt} &= \frac{\rho_u}{\rho_b} (S_{diff} + S_{comb}) \\ &+ \frac{V_b}{A_b} \left[\frac{1}{T_b} \frac{dT_b}{dt} - \frac{1}{p} \frac{dp}{dt} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

와 같은 식을 구할 수 있다.

2.2.2 난류연소속도

난류화염의 팽창은 운동량, 질량 및 에너지 전달이 혼합되어진 물리적, 화학적 변환 과정이다. 점성은 운동량의 전달과 밀접한 관련을 맺고 있으며 확산은 질량 전달, 그리고 대류는 에너지의 전달에 관련되어 있다. 일반적으로 난류의 흐름은 열 및 질량 전달에 의해 영향을 받지만 운동량의 전달이 가장 중요한 역할을 하게 된다. 하지만 가스 유동의 경우, 점성이 작기 때문에 영향을 미칠 수 있는 범위는 작은 크기의 와류(eddy)에 한정된다.

이 연구에서 integral length scale은 연소실 체적의 1/3승에 비례하며 난류강도 u' 는 피스톤의 속도에 비례한다고 가정하여 모델링을 실시하였다. 이러한 가정은 선행 연구자들에 의해 확인된다¹¹⁾.

한편 화염 변형률(flame strain rate)은 초기 화염의 성장에 특히 중요한 영향을 미치게 된다. 난류 유동에 의해 화염핵은 형태가 변화되어 미연가스와 보다 많이 접촉할 수 있게 된다. 이러한 현상은 다음과 같이 설명할 수도 있다. 화염핵의 표면에서 열확산과 질량확산이 동일하게 일어난다면, 즉 Lewis 수가 1 ($L_e = 1$)이라면, 화염은 점화 플러그 전극과 실린더 헤드 면을 제외한 모든 방향에서 같은 속도로 팽창할 것이다. 만약 질량확산이 보다 많이 일어나게 되면 $L_e < 1$ 이 되고 화염핵의 단위 표면적 당 혼합기의 연소율이 커져 변형률이 증가되어 높은 난류연소속도를 가지게 된다. 반대로 $L_e > 1$ 이면 난류연소속도는 감소하게 된다. 따라서 초기 화염핵이 소멸(quenching)되어 실화 또는 부분 연소가 발

생활 때는 $Le \gg 1$ 이 된다. 따라서 초기 화염의 변형률을 계산할 때 Lewis 수로 표현되는 질량 및 열확산에 의한 영향을 반드시 고려하여야 하며 이 연구에서는 변형률을 다음과 같은 식을 사용하여 계산한다.

$$I_0 = 1 - \left[\left(\frac{\delta_L}{15L} \right)^{0.5} \left(\frac{u'}{S_L} \right)^{1.5} \left(\frac{S_L \delta_L}{\nu} \right)^{0.5} + 2 \frac{\delta_L}{I_b} \frac{\rho_u}{\rho_b} \right] \psi \quad (8)$$

$$\psi = \frac{1}{Le} + \left(\frac{1}{Le} - 1 \right) \left(\frac{T_{act}}{2T_{ad}} \right)$$

일반적으로 선형화염 두께는 동점성 계수와 선형화염 속도의 비로 계산된다. 하지만 희박연소나 EGR 운전 조건 등과 같은 열확산에 비해 상대적으로 높은 질량 확산을 가지며 낮은 화염전파 속도를 보이는 조건에서는 질량확산과 선형화염 속도의 비로 계산하여야 한다. 즉 다음과 같이 표현되어진다.

$$\delta_L = \frac{D_m}{S_L} \quad (9)$$

그리고 잔류 가스 및 재순환된 배기 가스량을 포함한 실린더 내 존재하는 전체 배기가스량을 나타내는 f_D 는 다음과 같이 나타낼 수 있다

$$f_D = x_r + EGR \quad (10)$$

한편 잔류가스의 양은 흡, 배기관에서의 압력, 최대 밸브 리프트, 밸브 오버랩, 밸브 직경 등을 고려한 아래와 같은 식으로 표현되어 질 수 있다¹²⁾.

$$x_r = 1.266 \frac{OF}{N} \left(\frac{P_i}{P_c} \right)^{-0.87} \sqrt{|P_e - P_i|} + 0.632 \left(\frac{P_i}{P_e} \right)^{-0.74} \frac{\Phi}{r_c} \quad (11)$$

마지막으로 선형화염속도는 Rhodes¹³⁾ 등에

의해 제안되어진 식을 사용하였다. 여기에서 초기 화염의 성장기간 동안은 전기 에너지의 지속적인 공급과 전극으로의 열손실 등에 의해 화염 온도는 단열연소온도의 값에서 벗어나게 된다. 따라서 선형화염속도를 계산할 때는 위의 사항이 반드시 고려되어야 한다.

2.2.3 화염핵의 열손실

화염핵이 성장함에 따라 주위의 혼합기 또는 점화 플러그나 실린더 헤드 면으로의 열손실이 발생하게 된다. 스파크 방전기간 동안의 복사에 의한 열손실은 매우 적으므로 무시하면 점화 플러그와 실린더 헤드 면으로의 열전달은 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$\frac{dQ_{ele}}{dt} = h_{heat} A_{cont}(t) (T_b - T_{ele}) \quad (12)$$

여기서 열전달 계수의 값과 점화 플러그 혹은 실린더 헤드 면의 온도 변화는 화염핵의 온도 변화에 비하면 매우 작으므로 상수로 취급한다. 따라서 점화 플러그 혹은 실린더 헤드 면으로의 열전달량은 접촉면적 $A_{cont}(t)$ 에 의해 주로 결정되어진다.

이 연구에서는 접촉면적 $A_{cont}(t)$ 를 구하기 위해 다음과 같은 가정 하에 계산을 수행하였다.

- 1) 계산의 편의를 위하여 점화 플러그의 중심 전극 (central electrode)은 원통, 접지전극 (ground electrode)은 직각으로 구부러진 직사각형의 금속막대로 가정한다.
- 2) 점화 플러그 전극 자체는 화염의 성장에 영향을 미치지 않는다.
- 3) 점화 플러그 헤드 면은 평평하다고 가정한다.
- 4) 화염에 접하는 점화 플러그 표면, 헤드 면 그리고 실린더 벽면은 동일한 열전달 계수를 가지는 것으로 가정한다.

Fig. 2는 Pischinger 등^{6),7)}의 실험 결과값과 이 연구에서의 시뮬레이션 결과값을 비교한 것이

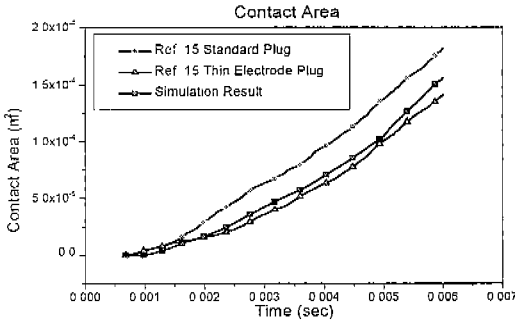


Fig. 2 Contact area between spark plug and flame kernel

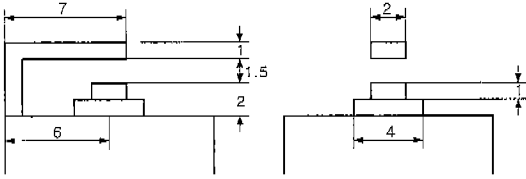


Fig. 3 Configuration of Spark Plug (unit : mm)

다. 이 시뮬레이션에서 사용되어진 점화 플러그의 형태는 Fig. 3에 나타내었다.

또 화염핵에서 미연가스의 순간적인 열손실이 발생하며 그 양은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dQ_{ub}}{dt} = \frac{k(A - A_{cont}(t))(T_b - T_w)}{\delta_p} \quad (13)$$

따라서 화염핵으로부터의 전체 열손실량은 다음과 같이 표현되어 진다.

$$\frac{dQ_{loss}}{dt} = \frac{dQ_{ele}}{dt} + \frac{dQ_{ub}}{dt} \quad (14)$$

2.2.4 점화 전압 및 전류

이 연구에서 사용되어진 점화 시스템은 일반적으로 사용되어지는 유도성 방전 점화 (Inductive Discharge Ignition, IDI) 시스템을 개량하여 방전 전압 및 전류를 높였으며 방전 기간을 증가시킨 것이다. 즉, IDI 시스템의 이차 회로 구성을 변화시키면 전압 및 전류는 Fig. 4에 나타낸 것과 같은 방전 특성을 가지게 된다. 각 회로

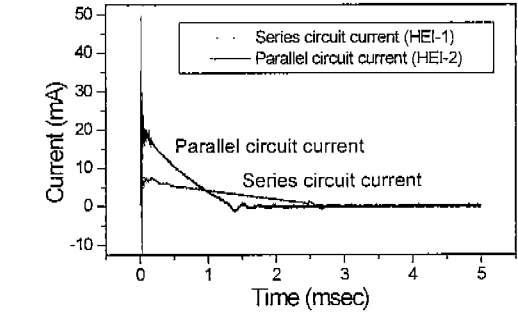
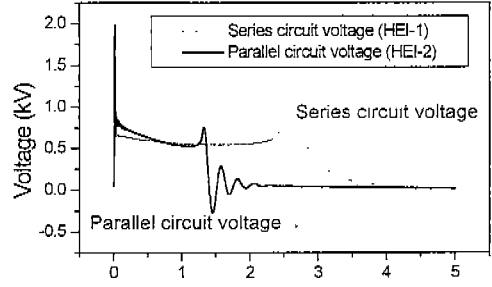


Fig. 4 The comparisons of current and voltage between HEI-1 and HEI-2

(HEI-1, HEI-2)의 구성은 참고 문헌 (14)과 (15)에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 이차측을 병렬로 연결하였을 때 (HEI-2) 전압 및 전류의 값이 보다 높게 나타남을 알 수 있다. 실제 시뮬레이션에서는 HEI-2의 실험값을 채택하여 입력 데이터로 사용하였다.

3. 엔진의 운전 조건에 따른 화염핵의 생성 및 성장 모델링 결과 및 고찰

지금까지 기술한 초기 화염의 생성 및 성장에 대한 모델링을 실제 엔진의 값을 대입하여 실시하여 보았다. 이 연구에서 사용되어진 엔진의 주요 형상은 Table 1에 나타내었다.

아래의 각 운전조건에서 점화시기는 BTDC 10° 로 하였으며 점화 플러그 전극의 간극은 1.5mm, 실린더 벽면의 온도는 420K로 설정하였다. 또, 절연파괴 방전이 시작한 후 3msec까지만 화염의 크기와 팽창속도를 모델링 하였으며

Table 2 Engine specifications

Type		In line SOHC
Cylinder number		4
Bore (mm)		75.5
Stroke (mm)		83.5
Compress Ratio		10
Displacement volume (cc)		1495
Intake valve	Open	BTDC 12°
	Close	ABDC 52°
Exhaust valve	Open	BBDC 52°
	Close	ATDC 12°

이는 이 연구의 목적인 초기 화염의 생성과 성장에 대해 보다 자세한 정보를 얻기 위해서이다.

3.1 엔진 회전속도에 의한 영향

흡기 밸브의 형태에 따라 달라지나 일반적으로 사용되어지는 poppet 밸브를 채용한 엔진의 경우, 회전속도가 증가함에 따라 난류강도(u')는 비례하여 커지게 된다. 따라서 난류연소속도는 증

가하여 화염핵의 팽창속도는 증가하게 된다. 또한 일반적으로 질량연소율이 0~10%로 정의되어지는 초기 화염핵의 성장지연시간 역시 난류강도의 증가에 따라 급격히 적어지게 된다. 이러한 급속연소에 의해 실린더 벽면으로의 열손실 역시 감소하게 되며 이에 따라 최고 연소 압력이 증가하게 된다.

3.2 흡기관 압력에 의한 영향

스로틀 밸브 (throttle valve)의 개도에 의해 주로 결정되어지는 흡기관 압력은 개략적으로 엔진의 부하를 나타내게 된다. 흡기관의 압력이 낮아짐에 따라 점화시 압력 및 온도는 낮아지고 질연과피방전으로 생성되는 화염핵의 지름 및 온도는 작아지게 된다. 또, 흡입되는 혼합기의 양이 적어짐에 따라 분사되는 연료의 량 역시 줄어들게 되며 잔류가스량이 증가하게 되어 연소속도는 감소하게 된다.

3.3 공연비에 의한 영향

이 연구에서는 공연비를 나타내는 인자로써 ϕ 를 사용하였다. ϕ 는 실제 연공비(fuel/air)에 대한 이론 연공비의 비를 나타내며 그 값이 작아질수록 희박 혼합기임을 의미한다. 혼합기가 희박해 짐에 따라 연소 가스의 온도는 낮아지며 따

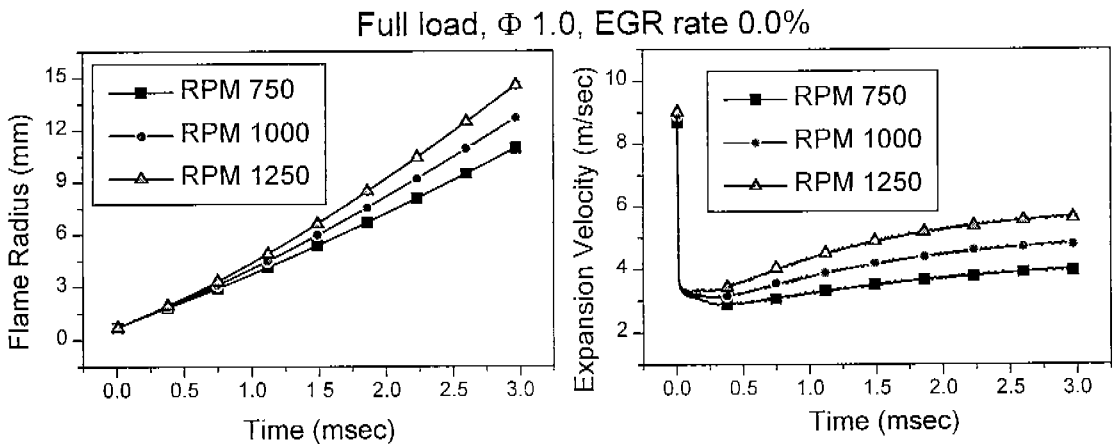


Fig. 5 Flame kernel radius and expansion velocity at different engine RPMs

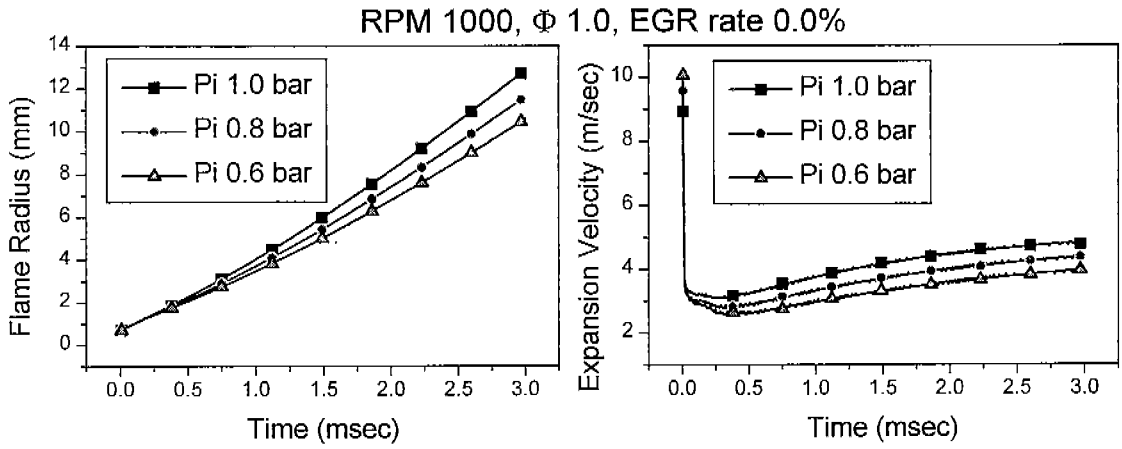


Fig. 6 Flame kernel radius and expansion velocity at different manifold pressures

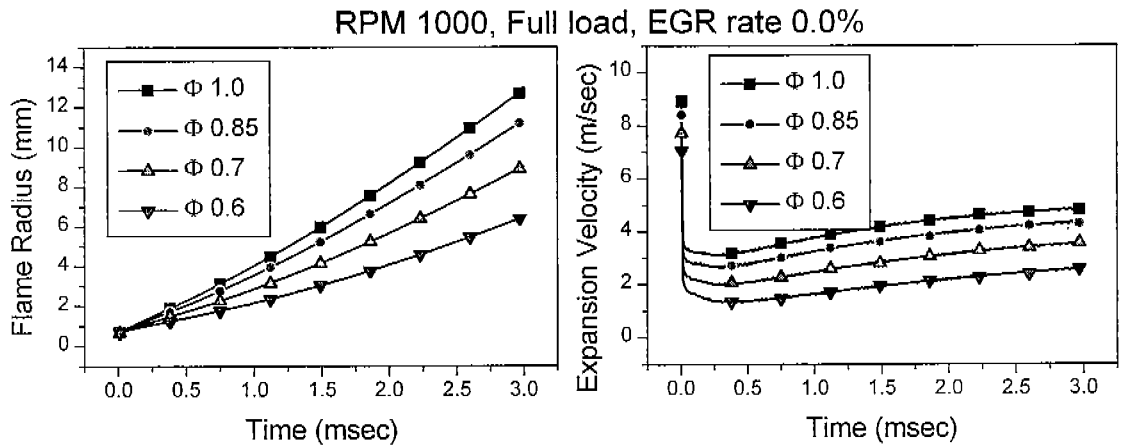


Fig. 7 Flame kernel radius and expansion velocity at different air-fuel ratios

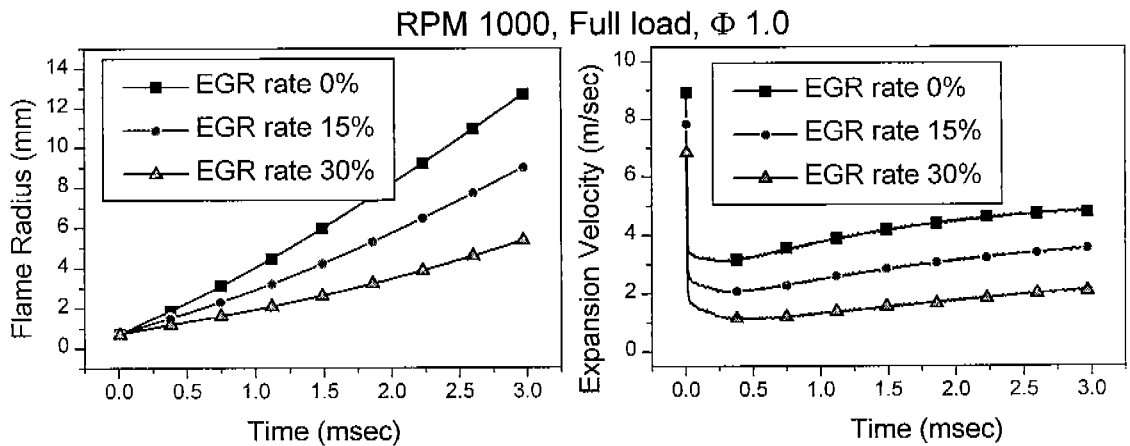


Fig. 8 Flame kernel radius and expansion velocity at different EGR rates

라서 선형화염 연소속도는 낮아지게 된다. 질량확산 역시 감소하게 되며 난류화염 연소속도 역시 Lewis 수의 증가로 낮아지게 된다.

3.4 잔류가스량에 의한 영향

잔류가스량은 엔진의 형상과 운전조건에 의해 결정되어진다. 배기가스의 재순환 되는 양 및 잔류가스량이 증가됨에 따라 선형화염 속도는 감소하게 되며 선형화염 두께는 증가한다. 마찬가지로 선형화염 두께의 증가에 따라 변형률은 감소하여 미연가스가 화염에 접할 수 있는 면적 역시 감소하게 된다. 질량확산 역시 줄어들어 연소속도를 더욱 감소시키게 된다. 그리고 점화시기에서의 실린더 내 온도에 많은 영향을 미치게 되어 초기 화염핵의 생성 및 성장 속도를 결정하게 된다.

4. 결 론

이 연구는 엔진의 다양한 운전 조건 들, 즉, 엔진 회전속도, 부하, 공연비 및 잔류가스와 재순환된 연소가스 량의 변화가 초기화염 생성과 성장에 어떤 영향을 미치는지 알아보기 위해 실시되었다. 이를 위해 방전기간을 절연과피 방전기간과 스파크 방전기간으로 나누었으며 화염의 성장기간을 절연과피, 열확산, 화염 팽창 기간으로 나누어서 분석하였다.

절연과피 방전기간 동안의 변화량을 그 후에 발생하는 열확산 기간의 초기값으로 이용하였으며 열확산 기간동안 화염핵은 구형의 형태를 가지며 모든 방향으로 동일하게 확산이 일어난다고 가정하였다. 화염 팽창 기간동안의 화염핵 성장은 연속 방정식, 에너지 보존의 법칙 등을 이용하여 모델링 하였다. 이때 난류화염 팽창속도를 계산하기 위해 integral length scale은 연소실 제적의 1/3승에 비례하며 난류강도는 피스톤의 속

도에 비례한다고 가정하였다. 또 희박연소 및 EGR 운전조건에서의 선형화염 두께는 질량확산과 선형연소속도의 비로서 표현하였다.

한편 EGR 또는 잔류 가스 량의 변화에 따른 화염핵의 팽창속도 변화를 계산하였으며 점화 플러그 전극이나 실린더 벽면, 그리고 미연 가스를 통한 화염핵의 열손실을 모델링 과정에 추가하였다. 그리고 공급되는 점화 에너지의 양은 IDI 점화 장치에서 얻어진 실험값을 사용하였다.

이러한 모델링을 통하여 엔진 내 초기연소에 관한 다음과 같은 사실들을 알게 되었다.

1) 초기 화염핵의 생성은 절연과피 방전에 의해 일어나며 그 크기는 절연과피 방전 에너지, 플라즈마 온도, 연소실 내 온도 및 압력과 점화 플러그 전극의 간극 등에 의해 결정되어진다.

2) 화염핵은 열확산 기간을 통하여 어느 정도 성장한 후, 본격적인 연소를 시작하며 절연과피 방전기간 후 약 1msec까지 화염의 성장에 영향을 미친다. 열확산에 의한 팽창은 절연과피 방전기간 동안 생성된 화염핵의 크기, 온도, 공급되어지는 전기 에너지 및 점화 플러그의 형상 등에 영향을 받게 된다.

3) 화염핵의 팽창속도는 질량 연소율, 선형 및 난류연소속도, 전극 및 주위 혼합기로의 열손실 그리고 공급되어지는 전기 에너지 등에 의해 결정되어진다. 질량 연소율과 난류연소속도는 밀접히 관련되어 있으며 초기 화염핵의 경우 특히 변형률이 화염의 성장에 큰 영향을 미치게 된다. 화염핵의 열손실은 점화 플러그의 형태에 많은 영향을 받으며 이는 화염의 성장 속도를 지연시키는 역할을 한다.

4) 초기 화염핵의 성장은 엔진의 회전속도가 증가함에 따라, 부하가 증가함에 따라, 혼합기가 이론 공연비에 접근함에 따라, 그리고 잔류가스 량 및 EGR의 양이 감소함에 따라 증가함을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. 송정훈, 선우명호, "SI 기관에서 초기화염의 생성 및 성장에 대한 모델링", 대한기계학회 논문집 B권, 제23권, 제2호, pp. 288~298, 1999.
2. Ko, Y., Arpaci, V. S., and Anderson, R. W., "Spark Ignition of Propane-Air Mixtures Near the Maximum Ignition Energy: Part II. A Model Development", *Combustion and Flame* 83, pp88-105, 1991.
3. Herweg, R., and Maty, R. R., A Fundamental Model for Flame Kernel Formation in S.I. Engines, SAE paper 922243, SAE Trans, 1992.
4. Dai, W., Davis, G. C., Hall, M. J., and Mathews, R. D., "Diluents and Lean Mixture Combustion Modeling for SI Engine with a Quasi-Dimensional Model", SAE 952382 SAE Trans., 1995.
5. Matthews, R. D., Hall, M. J., Dai, W., and Davis, G. C., "Combustion Modeling in SI Engines with a Peninsula-Fractal Combustion Model", SAE 960072, SAE Trans. 1996.
6. Pischinger, S., "Effects of Spark Plug Design Parameters on Ignition and Flame Development in an SI-Engine", Ph. D. thesis, M.I.T., 1989.
7. 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.
8. 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 Variation", SAE paper 942049, SAE Trans 1994.
9. 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.
10. Refael, S., and Sher, E., "A Theoretical Study of the Ignition of a Reactive Medium by Means of an Electrical Discharge", *Combustion and Flame*, 59, pp 17-30, 1985.
11. Davis, C. G., Tabaczynski, R.J. and Betsire, R. C., "The effect of Intake Valve Lift on Turbulence Intensity and Burn Rate in S. I. Engines - Model Versus Experiment", SAE paper 840030, SAE Trans, 1984.
12. Fox, J. W., Cheng, W. K., and Heywood, J. B., "A Model for Predicting Residual Gas Fraction in Spark-Ignition Engines", SAE 931025, SAE Trans., 1993.
13. 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.
14. 송정훈, "고점화 에너지가 희박연소기관의 성능에 미치는 영향", 한양대학교 대학원 석사졸업논문, 1995.
15. 한만배, 송정훈, 선우명호, "점화 에너지가 희박연소기관에 미치는 영향에 관한 연구 (1)", 한양대학교 기계기술 연구소, 제2권 2호, 1996.