

<논 문> SAE NO. 933736

구형 화염핵 발달과정의 예측

Prediction of Development Process of the Spherical Flame Kernel

한 성 빈*; 이 성 열**
S. B. Han, S. Y. Lee

ABSTRACT

In a spark ignition engine, in order to make research on flame propagation, attentive concentration should be paid on initial combustion stage about the formation and development of flame. In addition, the initial stage of combustion governs overall combustion period in a spark ignition engine. With the increase of the size of flame kernel, it could reach initial flame stage easily, and the mixture could proceed to the combustion of stabilized state.

Therefore, we must study the theoretical calculation of minimum flame kernel radius which effects on the formation and development of flame kernel. To calculate the minimum flame kernel radius, we must know the thermal conductivity, flame temperature, laminar burning velocity and etc. The thermal conductivity is derived from the molecular kinetic theory, the flame temperature from the chemical reaction equations and the laminar burning velocity from the D.K.Kuehl's formula.

In order to estimate the correctness of the theoretically calculated minimum flame kernel radius, the researcheres compared it with the R.Maly's experimental values.

주요기술용어 : Spherical Flame Kernel(구형 화염핵), Minimum Flame Kernel Radius(최소 화염핵 반경), Molecular Kinetic Theory(분자 운동론), Collision Cross Section(충돌단면적), Target Area(표적면적)

기 호 설 명		
a	: 연료과잉율	C_m : 분자열용량
B	: Boltzmann 상수	D_i : i번째 성분의 분자의 결합길이
C_p	: 정압비열	H : 이동열 에어지
C_v	: 정적비열	ΔH_F : 생성물 엔탈피 차
		K_1, K_2 : 평형상수
		ℓ : 평균자유경로

* 정회원, 인덕전문대학 기계과
** 정회원, 성균관대학교 기계공학과

M_i	: i 번째 성분의 분자질량
N	: 단위체적당 분자수
N_A	: 아보가드로 수
P_1	: 혼합기 초기압력
P_0	: 미연가스 압력
q	: 연료의 발열량
Q_c	: 단위압축행정시 발생열량
Q_F	: 혼합기 1kmol에 대한 열량
R	: 일반기체 상수
R_F	: 화염핵 반경
R_{min}	: 최소 화염핵 반경
S	: 층류연소속도
T_0	: 미연가스 온도
T_1	: 혼합기 초기온도
T_F	: 화염온도
u	: 내부에너지
V	: 화염체적
V_0	: 물체적
V_m	: 평균분자 속도
X	: 연료의 물분율
Y_i	: i 번째 성분의 물분율
α	: 열전도 계수
σ_i	: i 번째 성분의 충돌단면적
ρ_F	: 혼합기의 밀도

1. 서 론

스파크 점화기관의 연소변동은 배기가스중 HC, CO 등의 농도증대에 원인이 되며, 연료소비율을 증가 시킨다. 따라서, 스파크 점화기관의 연소변동을 줄이기 위해서는 안정된 화염핵을 짧은 시간에 형성하여 초기화염성장기간을 안정시키고, 단축시켜야 한다.¹⁾ 또한, 스파크 점화기관의 질량연소를 및 연소의 안정성을 향상시키고, 희박연소 영역에서의 심한 사이클 변동을 개선하기 위해서는 짧은 시간에 안정된 화염핵을 형성시켜 초기화염성장 속도를 증대시켜야 한다.²⁾

스파크 점화기관의 연소는 점화플러그에서 스파크가 형성된후 스파크 핵(spark kernel)과 혼합기의 경계부근에서 연소반응이 일어나 화염핵(flame kernel)이 형성되고, 핵은 점차 성장하여

초기화염(early flame)으로 성장된다. 초기화염이 완전히 발달된 화염(fully developed flame)까지 성장되면, 이 이후는 화염이 소화 될 수 없으며, 연소실내 전 혼합기가 안정되게 연소를 마친다.^{3,4)}

이와 같은 일련의 단계를 거치는 스파크 점화기관의 연소과정을 체계적으로 연구하기 위해서는 각 단계에서의 연소기구를 이해하는 것이 필요하다. 스파크 점화기관의 연소에 관한 종전의 연구에 의하면 이러한 일련의 각 단계는 서로 밀접한 관계를 갖고 있으며, 초기화염의 성장속도를 지배하는 화염핵 형성 단계가 전 연소기간의 연소 양상을 결정짓는 중요한 단계임이 밝혀졌다.⁵⁾

R. Maly등⁶⁾은 “화염핵은 반응대에서 생성되는 열량이 반응대 표면에서의 열손실량 보다 크면 화염은 발전한다”라는 열점화 모델을 설정하여 최소 점화반경에 관한 이론을 확립하였고, 이를 기초로 기존 엔진에서 피스톤 운동이 최소점화 임계반경에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였다. 또한 초기화염성장의 불안정은 가능한 한 큰 화염핵을 형성시켜 주므로써 극복되며, 화염핵의 에너지상태가 같을 경우는 핵의 체적을 증대시키는 것 보다 핵의 팽창속도를 증대시키는 것이 연소안정에 유리함을 밝혔다.

화염핵을 형성시키는 최소 화염핵 반경을 구하기 위하여, G.Ziegler⁷⁾ 등도 열점화 이론을 정립시켰으나, 그들은 이론적으로 구한 식의 미지수를 실험을 통하여 구했고, 사용 연료는 메탄, 프로판 등이며 낮은 압력과 온도의 정적연소실에서 수행하였다.

이와 같은 문제들은 스파크 플러그에서 스파크가 튀어서 부터 화염핵이 형성 발달되는 과정을 관찰할 수 있도록 가시화할 수 있으면 일련의 과정을 쉽게 이해할 수 있겠지만 화염핵 형성 및 발달과정은 극히 짧은 기간이므로 이들 과정을 밝힌다는 것은 매우 어려운 일이다.

그러므로, 점화플러그에서 점화에너지가 방출되어 화염핵이 형성 발달되는 과정에 대한 소상한 내용을 밝힐 수 있는 연구가 필요하며, 또한, 화염핵 형성 및 발달에 직접적인 영향을 주는 화염핵 반경, 점화에너지, 혼합기 농도 등의 변화에 따라 구할 수 있는 이론적인 연구가 필요하다.

2. 이론적 배경

안정된 화염핵을 형성하기 위한 열점화 모델은 스파크핵 표면으로 부터의 산화반응에 의하여 화염핵이 형성되며, 이 화염핵은 반응대에서 생성되는 열량이 반응대 표면에서의 열손실량 보다 크면 화염은 발전된다. 반응대에서 생성되는 열량 (ΔQ^V)과 반응대 표면에서의 열손실량(ΔQ^A)을 구하기 위하여 다음과 같은 가정을 둔다.⁸⁾

- 1) 반응영역은 미연과 기연으로 나눈다.
- 2) 연소실 내의 압력은 공간적으로 균일하다.
- 3) 화염면에서의 복사 열전달은 무시한다.
- 4) 화염은 구형화염으로 한다.
- 5) 온도구배는 Fig.1과 같이 단순화 시킨다.

이상과 같은 가정하에서 반응대에서 생성되는 열량(ΔQ^V)과 반응대 표면에서의 열손실량(ΔQ^A)을 구한다.

Fig.1에서 빗금친 체적내에서 생성되는 열량 (ΔQ^V)은 1)식과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta Q^V &= \frac{(Xq - \Delta H_F)}{V_0} 4\pi r^2 \Delta r \\ &= \frac{(Xq - \Delta H_F)P_0}{RT_0} 4\pi r^2 \Delta r \end{aligned} \quad (1)$$

또한, 반응대 표면에서의 열손실량(ΔQ^A)은 (2)식과 같다.

$$\Delta Q^A = \alpha \frac{(T_F - T_0)}{\Delta r} \Delta t 8\pi r \Delta r \quad (2)$$

여기서 분자의 Δr 은 화염핵 반경의 단위 시간당의 증가분이고, 분모의 Δr 는 화염두께를 표현한 것이다. (1), (2)식에서 화염이 발전되기 위해서는

$$\frac{(Xq - \Delta H_F)P_0}{RT_0} 4\pi r^2 \Delta r \leq \alpha \frac{(T_F - T_0)}{\Delta r} \Delta t 8\pi r \Delta r$$

을 만족해야 하고, 여기서 $\Delta r / \Delta t$ 를 층류연소속도 S로 놓을 수 있고 이를 r에 대하여 정리한

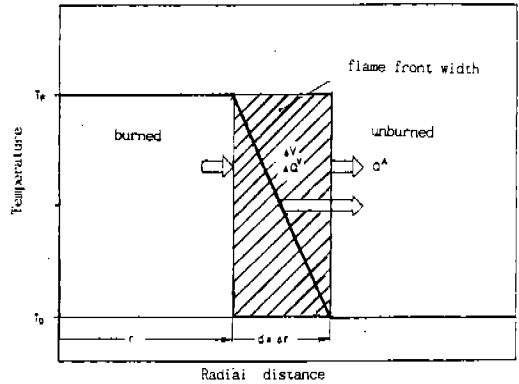


Fig.1 Simplified flame kernel model

임계값이 최소화염핵반경 R_{min} 일 것이며, 식(3)으로 정리된다.

$$R_{min} = \frac{2R\alpha T_0 (T_F - T_0)}{P_0 (Xq - \Delta H_F) S} \quad (3)$$

최소화염핵반경은 (3)식으로부터 이론적으로 구할 수 있는데 (3)식에서 열전도계수, 화염온도, 층류연소속도, 그리고 기타의 열역학적 상태량 등을 결정해야 한다.

3. 이론계산

3.1 열전도 계수 α 의 결정

화염핵의 화염대에 있어서의 열전달은 대류 열전달이나 복사 열전달은 고려하지 않아도 되며, 분자의 운동에 의한 열전달만 고려하면 되므로 분자운동에 의한 열전도 계수를 결정할 수 있다.^{9,10,11)}

기체의 열전도 계수는 유체점성을 구하는 방식으로 구할 수 있는데 기체 층이 온도기울기 dT/dy 로 변할 때 단위면적과 시간 당에 흐르는 열 H는 다음과 같다.

$$H = -\alpha \frac{dT}{dy} \quad (4)$$

분자적 관점에서 한 분자 몰의 운동에너지는 단순히 내부에너지 u 이며, $C_v T$ 와 같다. 따라서 한 분자의 평균운동에너지는 $C_v T$ 를 Avogadro수 N_A 로 나눈 값이고 분자열용량(molecular heat capacity) C_{vm} 를 $C_{vm} = C_v / N_A$ 로 정의하면 한 분자의 평균운동에너지는 $C_{vm} T$ 이다. 면을 통과하는 각 분자가 그면의 위 또는 아래의 $2/3$ 거리에서 마지막 충돌을 하고 그 때의 운동에너지가 그 거리에서의 온도에 대응한다고 가정하면 운동에너지는 다음과 같이 된다.

$$C_{vm} T = C_{vm} \left[T_0 - \frac{2}{3} \ell \frac{dT}{dy} \right] \quad (5)$$

단위면적과 단위시간에 윗방향으로 이동되는 에너지는 $C_{vm} \cdot T$ 와 분자속(molecular flux)의 곱으로 표현된다. 즉

$$H \uparrow = \frac{1}{4} N V_m C_{vm} \left[T_0 - \frac{2}{3} \ell \frac{dT}{dy} \right] \quad (6)$$

같은 방법으로 위에서 면을 통과하여 아래로 분자에 의해 이동되는 에너지는 다음과 같다.

$$H \downarrow = \frac{1}{4} N V_m C_{vm} \left[T_0 + \frac{2}{3} \ell \frac{dT}{dy} \right] \quad (7)$$

단위면적당 이동되는 플럭스는 이동 열 H 로 정의된다.

$$H = -\frac{1}{3} N V_m C_{vm} \ell \frac{dT}{dy} \quad (8)$$

(4)식과 (8)식을 정리하면, 열전도 계수 α 를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\alpha = \frac{1}{3} N V_m C_{vm} \ell \quad (9)$$

(9)식에서 평균분자속도 V_m 은

$$V_m = \sqrt{\frac{8BT_0}{\pi \sum (Y_i M_i)}} \quad (10)$$

이며, 평균자유경로 ℓ 은 분자가 Maxwell 속도분포를 가진다는 가정하에서 (11)과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$\ell = \frac{0.707}{N \sum (Y_i \sigma_i)} \quad (11)$$

(11)식의 충돌단면적(collision cross section, pm²) σ_i 는, 한 개 분자의 표적면적(target area)은 반지름 D 인 원의 면적이므로, (12)식으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_i = \pi D_i^2$$

그러므로 열전도 계수 α 는 (9)~(12)식을 정리하여 다음과 같은 식으로 나타낼 수도 있다.

$$\alpha = \frac{0.707 C_v}{3 N_A \sum (Y_i M_i)} \sqrt{\frac{8BT_0}{\pi \sum (Y_i M_i)}} \quad (13)$$

열전도 계수를 공기 연료비 변화에 대하여 계산한 결과가 Fig.2이다.

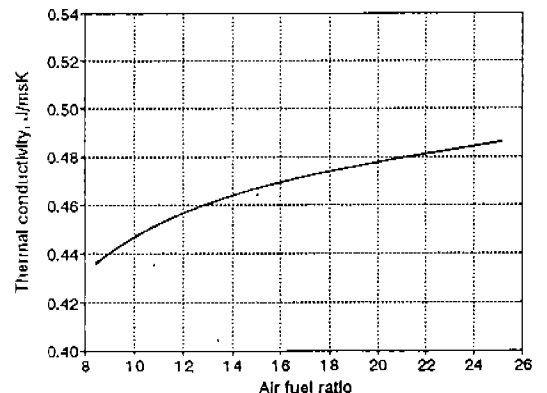


Fig.2 Thermal conductivity with air fuel ratio

3.2 화염온도 및 열역학적 상태량의 결정

화염온도 T_f 를 구하기 위한 flow chart가 Fig.3이며, 연료는 iso-octane을 대상으로 한다. 계산은 CO_2 , H_2O 에 대한 열해리를 고려하고, 생성물은 CO_2 , CO , H_2O , H_2 , O_2 , N_2 의 6종으로 하여 구한다.¹²⁾ 이를 이용하여 공기연료비 변화에 대하여 화염온도를 나타낸 것이 Fig.4이다.

Fig.4에서 화염온도는 공기연료비 13:1 근방에서 가장 높은 화염온도를 나타내고 있으며, 그때의 화염온도는 3000K 정도이다.

또한, 생성물들의 물분율은 Fig.5와 같고, 혼합기 미연가스 온도와 압력은 압축비 7.0을 대상으로 단열압축 과정으로 보고 구한다.

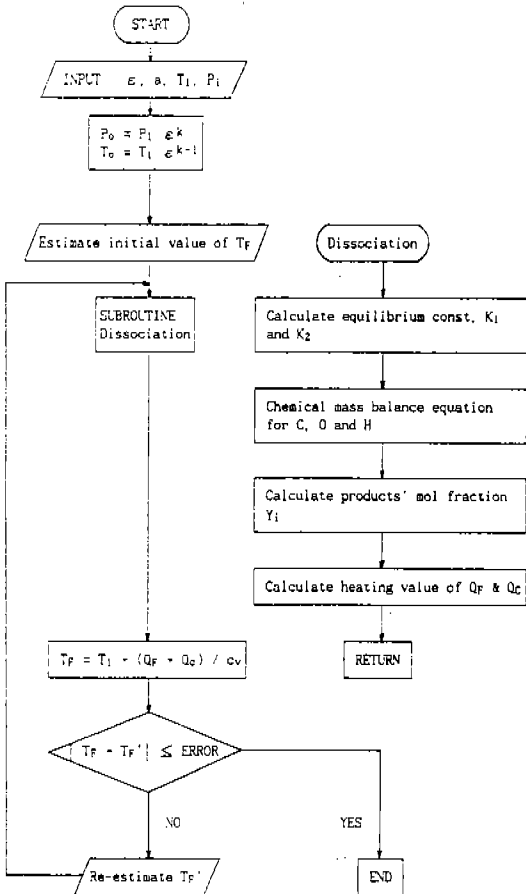


Fig.3 Flow chart for flame temperature

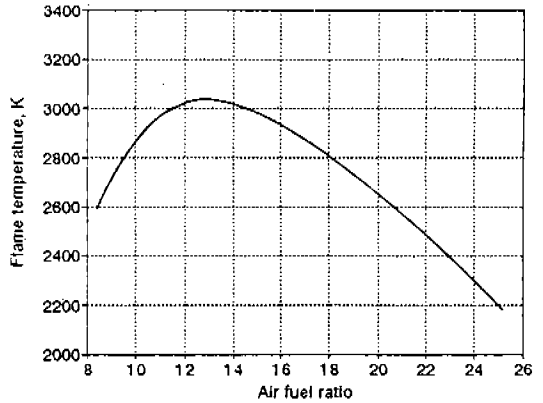


Fig.4 Flame temperature with air fuel ratio

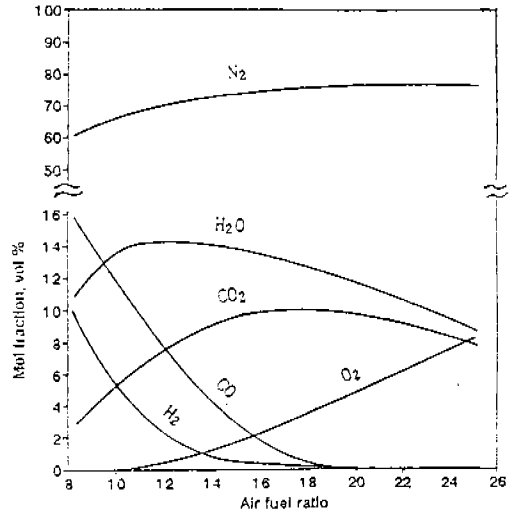


Fig.5 Mol fraction with air fuel ratio

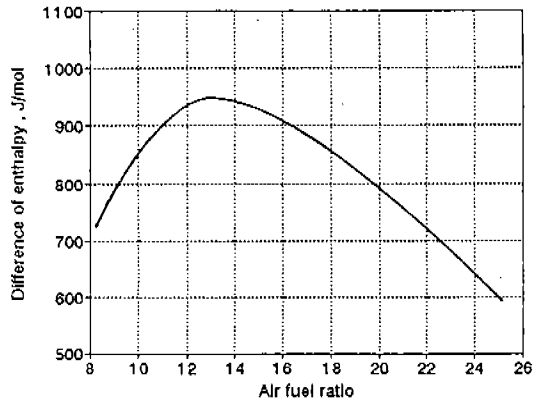


Fig.6 Enthalpy difference in chemical reaction with air fuel ratio

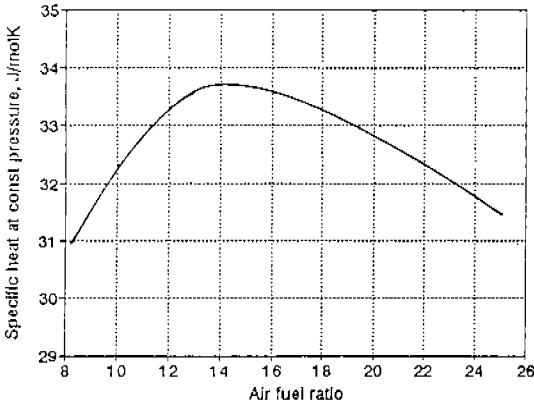


Fig.7 Specific heat at constant volume with air fuel ratio

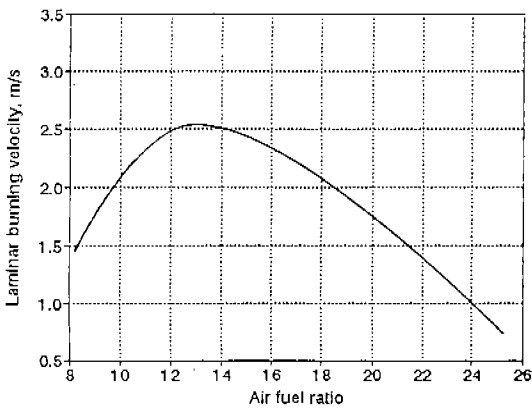


Fig.8 Laminar burning velocity with air fuel ratio

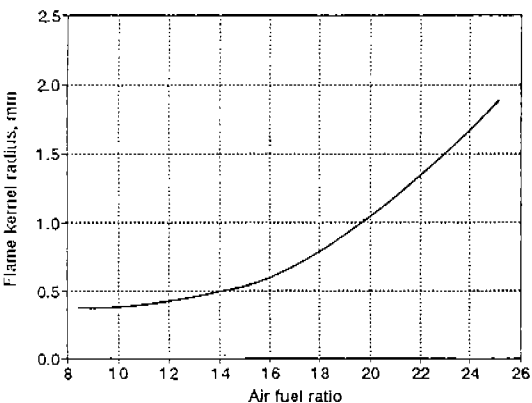


Fig.9 Minimum flame kernel radius with air fuel ratio

반응전후의 엔탈피차 ΔH_f 는 온도의 3차 식으로 되는 정압비열 방정식을 각각의 생성물에 대해 표준온도에서 화염온도까지를 적분하여 구한다.

Fig.6은 공기 연료비 변화에 대한 반응전후의 엔탈피차를 나타낸 것으로서 반응전후의 엔탈피차는 온도의 함수로써 화염온도가 증가하면 반응전후의 엔탈피 차도 증가하게 된다. 이는 Fig.4의 공기연료비 변화에 대한 화염온도와 같은 경향을 보이고 있다.

또한 최소화염해반경을 계산하기 위한 정적비열은 앞에서 구한 정압비열로부터 $C_v = \sum(Y_i C_p) - R$ 로 구한다.

Fig.7은 공기연료비 변화에 대한 정적비열을 나타낸 것으로서, 정적비열도 온도만의 함수로써, Fig.4의 화염온도와 같은 경향으로 13:1 근방에서 최대의 정적비열을 나타내고 13:1 보다 희박하거나 농후한 공기 연료비에 대해서는 감소하는 경향을 보이고 있다.

3.3 총류연소속도 결정

(3)식을 이용하여 최소화염해 반경을 구하기 위해서는 총류연소속도 S 를 결정하여야 하는데 많은 연구자들에 의하여 제시되어 왔다. 그러나 이들의 식은 각기 다른 형태로 총류연소속도를 표현하고 있어서 실제 기관의 총류연소속도를 알기 위해서는 정확한 식의 선정이 우선 되어야 한다.

D.K.Kuehl^{13,14)}이 제시한 (14)식은 실험에 의존한 식으로 알려져 왔고, 본 연구의 총류연소속도 결정에 사용한다.

$$S = \left[\frac{1.087 \times 10^6}{(10^4/T_f + 900/T_c)^{4.938}} \right] P_c^{-0.0987} \quad (14)$$

Fig.8은 공기연료비 변화에 대한 총류연소속도를 D.K.Kuehl식을 이용하여 계산한 것이다.

4. 고찰 및 결론

Fig.9는 앞에서 제시한 열점화 이론과 분자운동론을 기초로 하여, 공기연료비 변화에 대한

최소 화염핵 반경을 구한 결과이다. 화염핵 반경이 곡선의 윗부분에 해당되는 크기에서 화염은 발달할 수 있을 것으로 판단된다. 예를 들어, 공기 연료비 15 부근에서 최소 화염핵 크기는 약 0.9 mm로써 공기 연료비 15에서 화염핵이 발달하기 위해서는 0.9mm보다 커야만 화염이 발달 된다는 것을 이론적으로 보여 주는 결과가 된다.

이러한 계산 결과가 정량적으로 맞는 것인지는 실험을 통하여 확인되어야 하기 때문에 연료와 실험조건에 다소 차이가 있지만 R.Maly의 실험값⁸⁾과 비교하여 보았는데 Fig.9에서 제시한 값들이 차수상으로 타당한 값으로 생각된다.

실험에 의존하여 화염핵이 성장하는 과정을 구하지 않고, 이론적으로 열점화 이론에 근거하여, 열전도 계수, 화염온도, 층류연소속도, 그리고 기타의 열역학적 상태량을 알므로써 형성된 화염핵이 소화되지 않고 성장하기 위한 최소한의 점화반경인 최소 화염핵 반경을 구할 수 있었고, 이는 이론적으로는 타당한 값이라고 저자들은 생각되나 좀더 실험적인 뒷바침이 따라야 할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. J.A.Harrington, R.C.Shishu and J.R.Asik, "A study of ignition system effects on power, emissions, lean misfire limit, and EGR tolerance of a single cylinder engine-multiple spark versus conventional single spark ignition", SAE Paper No.740188, pp.837-845, 1974.
2. M.B.Young, "Cycle Dispersion in the Homogeneous-Charge Spark-Ignition Engine-a Literature Survey", SAE Paper No.810020, pp.49-73, 1981.
3. E.Richard and J.D.Patterson, "Mixture Turbulence-A Key to Cyclic Combustion Variation", SAE Paper No. 730086, 1973.
4. M.D.Swords, G.T.Alghatgi and A.J.Watts, "An Experimental Study of Ignition and Flame Development in a Spark Ignited Engine", SAE Paper No.821220, pp.1-12, 1982.
5. P.M.Boston, D.Dradley and etc., "Flame Initiation in Lean, Quiescent and Turbulent Mixtures with Various Igniters", Twentieth Symposium(International) on Combustion/the Combustion Institute, pp.141-149, 1984.
6. R.Maly, "Ignition Model for Spark Discharges and the Early Phase of Flame Front Growth", 8th Symposium(International) on combustion, Academic Press, p.1747, 1981.
7. R.Maly and G.Ziegler, "Thermal Combustion Modeling-Theoretical and Experimental Investigation of the Knocking Process", SAE Paper No. 820759, pp.2569-2602, 1982.
8. R.Maly, "Spark Ignition : Its Physics and Effect on the Internal Combustion Engine" in Fuel Economy in Road Vehicles by Spark Ignition Engines, J.C.Hilliard and G.S.Springer, eds., Plenum Press, pp.91-148, 1984.
9. F.W.Sears and G.L. Salinger, "Thermodynamics, Kinetic Theory, and Statistical Thermodynamics", Third Edition, Addison Wesley, pp. 276-286, 1975.
10. 한성빈, 이성열, "스파크 점화기관의 화염핵 발달에 요구되는 최소 화염핵 크기", 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집, pp85-90, 1989.
11. 오영일, "스파크 점화기관의 화염핵 형성에 관한 연구", 성균관대학교 박사학위 논문, 1988.
12. 長尾不二夫, 內燃機關講義, 第3次改著, 養賢堂, pp.168-173, 1974.
13. D.K.Kuehl, "Laminar Burning Velocities of Propane-Air Mixtures", 8th Symposium(International) on Combustion, Academic Press, pp. 510-521, 1962.
14. R.S.Benson and N.D.Whitehouse, "Internal combustion engines", Combined Edition, Pergamon Press, P.332, 1979.