

엔진실린더 모형 연소실내의 메탄-공기 예혼합기의 화염전파속도 특성

전 충 환*

Propagation Speed Characteristics of Premixed Methane-Air Flame in a Combustion Chamber with Model of Engine Cylinder

C. H. Jeon

Key words : Flame propagation speed(화염 전파속도), Burning velocity(연소속도), Ion probe(이온프로브), Equivalence ratio(당량비)

Abstract

Flame propagation speed characteristics of methane-air mixtures were experimentally investigated in combustion chamber modelled engine. Flame propagation process was known as a function of equivalence ratio, initial pressure and initial temperature. Ion probe and schlieren photograph were applied to measure the local flame speed and flame radius in quiescent mixtures. Pressure was also measured to make sure of the reproducibility and to apply combustion analysis. Burning velocity was calculated from the flame propagation speed and combustion analysis. Flames were developed faster with higher initial pressure and initial temperature but showed maximum propagation speed at equivalence ratio 1.1 regardless of initial pressure and temperature. Local flame speed was maximum values at near midpoint between center and wall.

1. 서 론

예혼합기의 연소과정 특히, 엔진모형연소실의 연소과정의 가시화는 화염전파과정의 이해뿐 아니라 엔진연소실 형상모델의 비교를 위한 수단으로 가장 효과적이다. 연소실의 연소조건에 따른

화염전파특성은 기관의 열효율, 출력, 배기배출물 성분 등에 크게 영향을 미친다. 그러나 이들의 상호관계를 구명하기 위해서는 유동장을 단순화시킨 정적연소실을 이용한 층류화염전파 및 연소 라디칼의 특성에 관한 연구가 필요하다. 층류연소속도는 주어진 온도, 압력하에서 혼합기의 특성을

* 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소 (원고접수일 : 97년 3월)

결정하는 고유한 값인 반면 화염전파속도는 연소기의 형태에 따라 달라질 수 있다. 연소속도는 화염대 표면이 미연혼합기에 진행되는 수직속도성분으로 정의하며 이 값은 기연혼합기의 화염안정성이나 열방출률을 결정하는 특성치이다. 정적연소실에서의 화염전파과정을 통하여 기연가스가 미연혼합기를 압축하면서 미연혼합기의 온도 및 압력이 상승하여 화염전파속도가 시간에 따라 변하게 된다. 아울러 한점에서 점화된 화염은 연소실 벽면의 영향을 받아 시간적으로 뿐만 아니라 공간적으로도 그 화염전파속도가 변하게 된다. 화염의 속도는 화염온도, 기체의 점성계수, 확산계수 등의 영향을 받으며 열역학적인 성질로서 압력, 온도, 혼합기의 농도 등의 함수로 표현될 수 있다¹⁻³⁾.

본 연구에서는 스파크점화기관의 효율향상 및 유해 배기배출물의 저감을 위한 새로운 가스엔진의 개발과 설계에 필요한 기초자료를 얻기 위한 목적으로 엔진연소실을 모방한 정적연소실에서 메탄-공기 혼합기의 화염전파과정을 솔리렌사진과 이온프로브로 측정하여 연소속도를 계산하였다. 또한 연소실압력을 동시에 측정하여 화염전파에 따른 연소특성을 조사하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 엔진모형 정적연소실

Fig. 1은 본 실험에 사용한 내경 70 mm, 길이 34 mm, 연소실 체적 130 cm³인 두랄루민계 원판형 연소기를 나타낸다. 연소실의 전후면에는 솔리렌 사진촬영을 위해 두께 20 mm의 광학 코팅된 FS 창(Fused silica windows)을 설치하였다. 사용한 점화 플러그는 시판되는 자동차용 점화 플러그의 중심에 직경 2 mm의 구멍을 뚫고 피아노선을 끼워 맞춘 후 연소실의 중심까지 향하도록 길게 연장하여 양측에 설치하였다. 점화전극간의 간극은 1.5 mm로 고정하고, 방전면은 30°의 경사를 가진 원추면으로 만들었다. 연료는 순도가 99.9%인 메탄을 사용하고, 원하는 메탄-공기 혼합기를 충전시키기 위하여 예혼합기 제조장치를 구성하였다. 메탄과

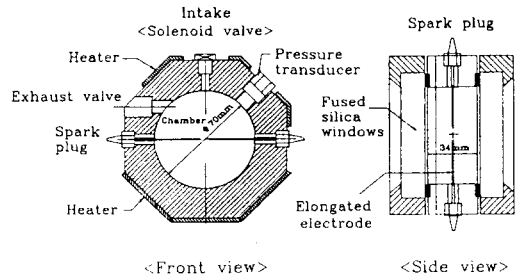


Fig. 1 Schematic of a constant-volume combustion chamber

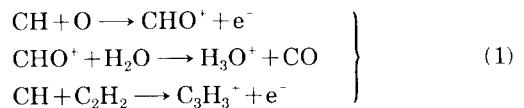
공기에 연결된 각각의 압력조절기에 나타나는 분압에 의하여 일정 체적의 혼합탱크를 채우는 혼합기의 혼합비를 계산하였다. 혼합기 온도를 변화시키기 위해 온도 조절기와 결합된 세개의 판히터를 연소실 벽의 상하면에 부착하였다. Table 1은 본 실험의 조건을 나타낸다.

Table 1 Experimental conditions

Parameter	Condition
Pressure, P ₁ (MPa)	0.18, 0.34, 0.50
Equivalence Ratio, φ	0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2
Temperature, T (K)	313.2, 353.2, 403.2

2.2 실험방법 및 연소해석

충류화염의 연소화학반응이 주로 이루어지는 반응대에서는 여기된 상태의 화학종이 급격한 연소반응과 이에 따른 열방출에 의해 화염면의 이온화가 자연히 이루어진다. 이와 같은 이온화는 화염면에서만 발생하므로 지금까지 많은 연구자들이 이온프로브를 설치하여 화염전파속도, 충류화염면의 두께 등의 정보를 얻고 있다^{4,5)}. 탄화수소에 혼합기의 화염에 있어서 주된 이온반응은 다음과 같다.



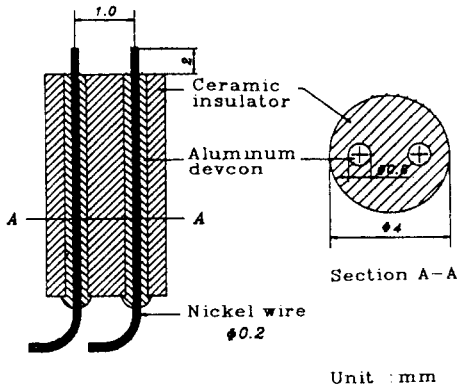


Fig. 2 Configuration of ion gap probe

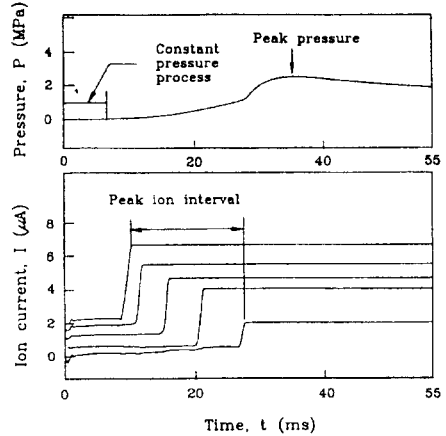
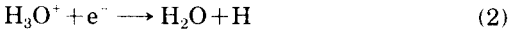


Fig. 3 Typical history of overall signal output



식(1)에 이온화 반응의 주요한 1차이온은 CHO^+ , H_3O^+ 및 $C_3H_3^+$ 이고⁶⁾, 그후 식(2)와 같이 재결합하여 급속히 소멸하므로 이온농도가 높은 영역은 화염면의 반응대에 한정되어 있음을 알 수 있다⁷⁾. Fig. 2는 사용한 이온프로브의 세부 형상을 표시하며, 연소실 중심으로부터 벽면까지 양방향으로 5지점씩 설치했다. 첫번째 이온 프로브를 연소실 중심에 위치하도록 설치하고, 첫번째 프로브에 화염면이 도달하는 시각과 각 이온 프로브(중심에서 $r=10, 17.5, 25, 32$ mm의 위치)에 화염면이 도달하는 시간차를 측정하였다. 이온전류가 극대치에 도달한 시간간격을 각 프로브 사이의 거리로 나눔으로써 국소화염전파속도를 계산하고 국소화염전파속도를 평균한 것을 평균화염전파속도로 정의하였다.

Fig. 3은 측정된 연소실압력과 이온전류의 대표적인 예를 나타내었다. 압력으로부터 Lewis와 Von Elbe 결과⁸⁾를 이용하여 연소질량분율(Mass Fraction Burned, MFB)을 계산하고 각 질량분율에 대한 연소기간을 구하였다.

화염의 전파형태 및 연소속도를 측정하기 위하여 고속도 솔리렌촬영을 수행하였다. 본 실험에 사용한 촬영속도는 7,000 frames/sec로서 10 ms 이내의 초기 연소기간에 화염핵의 성장과정을 가

시화하고, 확대투영기를 이용하여 화염 반경의 궤적을 계산하였다. 연소속도를 계산하기 위해 초기 연소기간동안 화염면전후의 압력차는 무시할 수 있고, 화염전파과정이 정상상태이며 화염온도는 단일화염온도이고 상태변화는 정압변화라고 가정한다. 그리고 미연혼합기의 압력, 체적, 온도, 밀도, 연소속도를 각각 $P_0, V_0, T_0, \rho_0, S_b$ 로 두고 기연가스의 압력, 체적, 온도, 밀도, 화염전파속도를 각각 $P_f, V_f, T_f, \rho_f, S_f$ 으로 두어 정상상태의 연속방정식으로부터 다음의 식으로 연소속도 S_b 를 계산하였다^{9,10)}.

$$\rho_0 S_b = \rho_f S_f \quad (3)$$

정압변화라고 가정하였으므로

$$\begin{aligned} V_f/V_0 &= T_f/T_0 \\ \rho_0 V_0 &= M_0, \rho_f V_f = M_f \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 M_0 는 반응물질의 분자량, M_f 는 생성물질의 분자량이다. 식(3)과 (4)로부터 연소속도는 아래와 같이 주어진다.

$$S_b = S_f \frac{T_0 M_f}{T_f M_0} \quad (5)$$

당량비와 초기온도의 변화에 따른 분자량비, 단일화염온도의 계산결과를 Table 2에 표시하였다.

Table 2 Thermodynamic properties and adiabatic flame temperature of methane - air premixture

Equivalence ratio	Molecular weight reactants, M_R	Molecular weight products, M_R	Adiabatic flame temperature, T_f (K)
0.8	27.8603	27.8501	2219.69
0.9	27.7471	27.7146	2329.31
1.0	27.6362	27.3686	2352.52
1.1	27.5273	26.9148	2335.10
1.2	27.4204	26.4097	2298.15

3. 실험결과 및 고찰

3.1 연소질량분율 및 화염전파기간 특성

Fig. 4는 메탄-공기 예혼합기의 당량비가 0.75~1.2 일때의 연소질량분율을 나타낸다. 당량비 0.8 이하의 당량비 1.2~0.9 와 비교할때 연소상태가 구분되는 연소특성을 나타내는데, 이것은 혼합기가 희박해질수록 화염전파속도의 급격한 감소로 인한 연소기간이 상당히 증가함을 보여준다. 또한 당량비가 1.1 이상으로 갈수록 오히려 최대 질량연소율의 크기는 감소되며 시간은 길어지는 경향을 보인다. 본 실험의 범위내에서 최대의 질량연소율이 초기압력 및 온도에 관계없이 당량비 1.1에 존재하여 이론당량비 보다 조금 높은 곳에서 최적의 연소상태를 나타내었다.

일반적인 엔진연소과정을 화염성장 단계로 나

눌 때 초기 화염발달기간을 나타내는 t_{10} 은 10% 질량이 연소될때까지의 기간을 의미하고, 총합연소기간을 의미하는 t_{90} 은 90% 질량이 연소될때까지의 기간을 의미한다. Fig. 5는 연소질량분율로 얻어진 화염성장기간(t_{90} , t_{10})에 미치는 혼합기 당량비의 영향을 나타낸 것이다. 당량비가 증가함에 따라 초기화염 성장기간뿐만 아니라, 전체화염 전파시간이 감소하고 있다. 또한 당량비가 0.8 이하로 희박해지면, 이로 인해 100% 연소될 때 까지의 시간이 40 ms 이상 걸리고 있음을 보여주고 있다. 특히 당량비가 0.9에서 0.8로 0.1감소 했을때 연소기간은 21 ms정도 길어졌으나, 0.8에서 0.75로 0.05감소 했을때 당량비 0.1감소시 보다 더 긴 약 25 ms나 되었다. 이와 같은 희박연소시 연소기간의 증가는 기관의 사이클변동 및 출력 저하의 원인이 되고 있다.

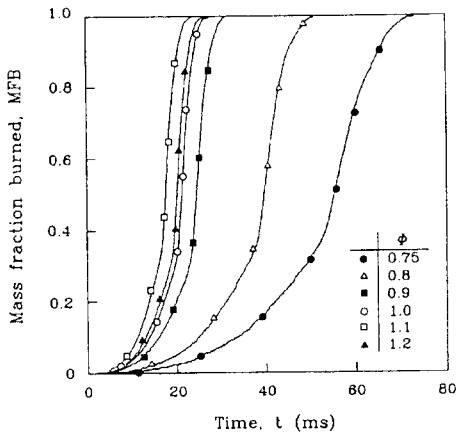


Fig. 4 Effect of equivalence ratio on mass fraction burned ($P_1=0.34$ MPa, $T_1=403.2$ K)

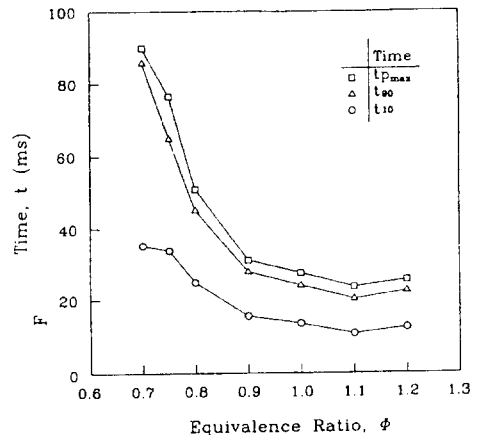


Fig. 5 Effect of equivalence ratio on flame propagation time ($P_1=0.34$ MPa, $T_1=403.2$ K)

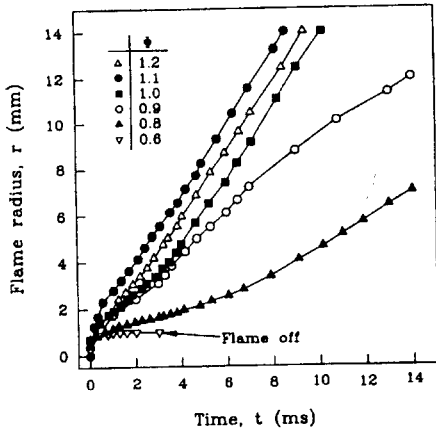


Fig. 6 Effect of equivalence ratio on flame propagation radius ($P_1=0.34$ MPa, $T_1=313.2$ K)

3.2 화염전파속도 특성

Fig. 6은 점화후 당량비에 따른 화염반경을 시간 경과에 따라 나타낸 것이다. 화염의 전파과정은 연소초기에 전극의 냉각작용의 영향을 많이 받으므로 전극의 직각방향으로 팽창하는 화염면의 크기를 측정하였으며 부력의 영향을 고려하여 화염전파직경을 측정하여 그 반을 화염전파 반경으로 취하였다. 전체적으로 당량비 1.0 이상에서는 3 ms 이후에 거의 같은 기울기의 빠른 성장률을 나타내고 있으나, 당량비 0.8 이하의 희박혼합기에서는 대단히 완만한 기울기를 보였다. 또한 화염 성장이 2 ms이내의 초기에 변곡점을 보인후 일정한 속도로 전파되어 초기의 화염속도가 대단히 중요함을 알 수 있다. 이는 희박혼합기의 경우에는 연소 초기부터 화염전파속도가 매우 느리기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 7은 슈리렌고속사진에 의해 측정된 초기연소기간의 화염전파속도를 당량비, 초기온도 및 초기압력에 따라 표시하였다. 여기서 초기연소기간은 측정의 편의상 화염면반경이 8~10 mm까지 전파한 시간으로 정의하였으며 이에 의하여 측정된 초기연소기간은 대략 5 ms~10 ms정도이다. 그리고 초기연소기간에 미치는 혼합기 초기온도 및 초기압력의 효과는 희박혼합기가 과농혼합기보다 영향이 더 크다는 것을 알 수 있으며 초기온

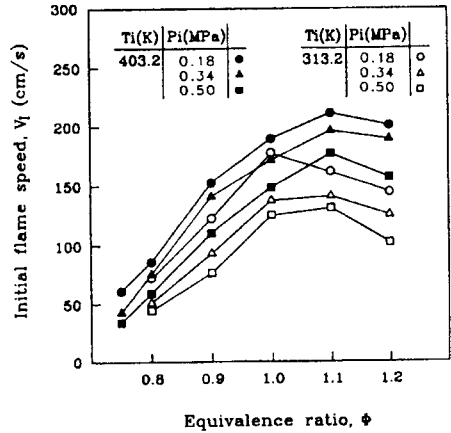


Fig. 7 Initial flame propagation speed by schlieren photograph

도가 높을수록 과농쪽으로 속도상승 효과가 증가한다. 즉 초기온도가 313.2 K 일때는 초기압 0.34와 0.50 MPa과의 화염전파속도의 차가 적고, 초기온도가 403.2 K로 되면 도리어 0.18과 0.34 MPa과의 속도차가 적음을 알 수 있다. 또한 최소 초기연소기간은 이론혼합비보다 약간 높은 당량비 1.1~1.2 부근에서 나타났다.

Fig. 8은 이온프로브에 의해 측정된 화염전파속도로 초기온도, 초기압력 및 당량비가 평균 화염전파속도에 미치는 영향을 나타낸다. 전체적으로

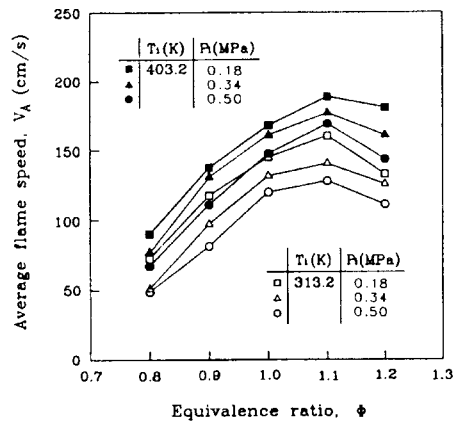


Fig. 8 Effect of equivalence ratio on average flame speed

당량비 1.1에서 최대 화염전파속도가 나타났다. 초기온도가 403.2 K 일때 초기압에 따른 평균화염전파속도의 차는 25.5 cm/s 이고, 초기온도 313.2 K 일때는 27.6 cm/s로서 당량비에 관계없이 초기압력에 따른 평균화염전파속도는 거의 같은 차를 나타내고 있다. 이것은 Hijima와 Takeno의 실험을 통해 얻은 연소속도식⁽¹¹⁾의 의미와 잘 일치한다.

Fig. 7과 8에 나타낸 솔리덴에 의한 초기 화염전파속도와 이온프로브에 의한 평균화염속도를 비교해 보면 전체적으로는 같은 경향을 나타내고 있다. 그러나 동일한 온도에서 압력변화에 대해 초기화염전파속도의 차는 67.7 cm/s이지만, 평균화염전파속도의 차는 26.6 cm/s로서 60 %정도 감소되었다. 이것은 초기온도 및 압력조건이 화염전파과정의 초기에 상대적으로 큰 영향을 주며, 그로 인한 변동이 화염이 성장되어 가면서 차츰 감소되는 것으로 생각된다.

Fig. 9는 혼합기의 당량비 변화가 이온프로브에 의한 국소 화염전파속도에 미치는 영향을 나타낸다. 국소 화염전파속도는 연소실중심으로부터 속도가 증가하여 중심에서 약 17.5 mm 떨어진 지점에서 최대가 된후 벽면으로 갈수록 급격히 감소한다. 중심에서 $r = 17.5$ mm까지는 점화후 화염전파속도가 증가하는 구간이며 이 구간을 지나면서 미연혼합기의 압력상승과 벽면에 의한 냉각효과

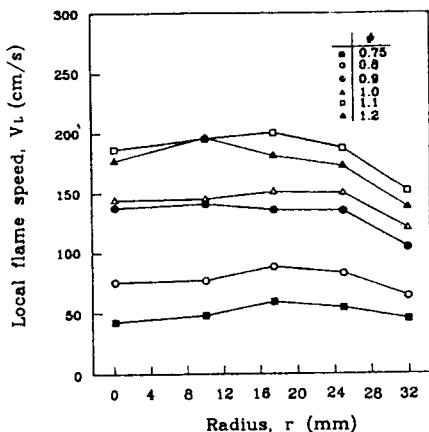


Fig. 9 Effect of equivalence ratio on local flame speed ($P_i=0.34$ MPa, $T_i=403.2$ K)

로 감소한다고 생각된다. 또한 당량비가 낮을수록 이와 같은 가속구간의 구별없이 국소 화염전파속도는 전 연소장에 걸쳐 비슷하게 나타난다. 즉, 당량비 1.1일 때 국소 화염전파속도차는 약 50 cm/s 이지만 당량비 0.8인 경우 15.63 cm/s로 약 30 % 이상 균일하게 된다. 희박혼합기의 경우 연소에 의한 압력상승이 완만하고 솔리덴 결과에서 화염전파속도 궤적의 변곡점이 당량비가 낮을수록 없어지는 경향과 일치한다.

3.3 연소속도 특성

Fig. 10은 화염전파속도 측정치와 이를 근거로 계산된 연소속도를 당량비의 변화에 대해 나타낸 그림이다. 솔리덴사진에 의해 초기의 정압과정에서 화염전파속도를 측정하여 계산된 연소속도의 결과를 당량비에 대해 나타낸 것이다. 연소속도 계산에 포함된 가정인 단일조건, 화염온도 및 화염면두께에 대한 영향과 정압과정동안 미소한 압력변화 등의 측정오차가 포함되지만 대략 9 % 이하임이 밝혀져 있으므로 무시하였다⁽⁹⁾. 초기온도가 403.2 K일때 연소실내에서의 화염전파속도는 약 50 ~ 210 cm/s 정도이고 최대치는 이론연소 혼합비보다 약간 과농한 당량비 1.1에서 나타났으며 그 값은 약 210.54 cm/s 이었다. 그리고 연소속도의 최대치는 당량비 1.1에서 약 35 cm/s 를 나타내었다. 동일한 조건에서 다른 연구자의 결과와

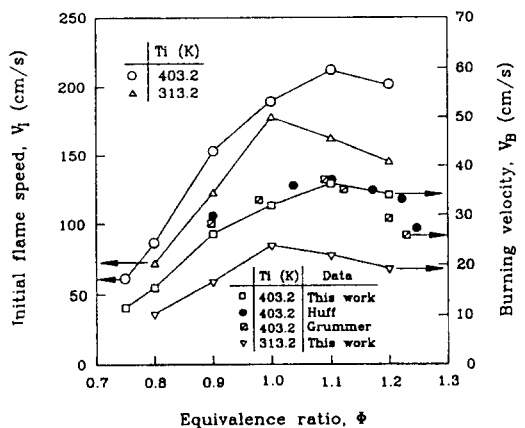


Fig.10 Burning velocity for premixture methane-air flame

비교해 보면 당량비 1.1에서는 거의 일치하지만, 이 조건을 벗어나면 차이를 보이고 있다. 연소속도는 화염전파속도 및 초기온도와 단일화염온도의 비의 곱에 비례하므로 초기온도 403.2 K일 때 당량비에 따른 화염전파속도의 차는 150 cm/s이지만 연소속도의 차는 화염전파속도의 17%인 25 cm/s 정도이다. 그러나 초기온도가 313.2 K로 낮아지면 화염전파속도의 차는 105 cm/s이고 연소속도의 차는 11%인 12 cm/s로 줄어든다. 따라서 초기온도 및 당량비에 대한 연소속도의 전체적인 경향은 화염전파속도와 동일함을 알았다.

4. 결 론

엔진모형 정적연소실에서 메탄-공기 예혼합기의 화염전파속도 특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 실험의 당량비 범위내에서 최적의 연소조건은 당량비 1.1 이었다. 이때 연소질량분율은 가장 높고 연소기간은 가장 짧으며, 이 범위를 벗어나수록 감소되었다.

(2) 이온프로브와 슐리렌촬영에서 얻은 층류화염 전파속도는 초기 혼합기 압력이 낮을수록, 온도가 높을수록 빠르게 나타났다.

(3) 국소 화염전파속도는 연소실의 중간 ($r = 12 \sim 17$ mm)에서 최대값을 나타낸 후 벽면으로 갈수록 감소된다.

(4) 초기 화염전파속도와 평균화염속도를 비교해 보면 초기온도 및 압력조건이 화염전파과정의 초기에 상대적으로 큰 영향을 주며, 그로 인한 변동은 화염이 성장되어 가면서 약 60%정도 감소된다.

(5) 초기화염 전파기간(5 ms)에 층류화염 연소속도를 계측하였는데, 같은 조건의 다른 연구자의 결과와 비교해 보면 당량비 1.1에서는 거의 일치한다.

참고문헌

- (1) M. Metghalchi and J. C. Keck, "Laminar Burning Velocity of Propane - Air Mixtures at High Temperature and Pressure," *Combustion and Flame*, Vol. 38, pp. 143 - 154, 1980.
- (2) M. Metghalchi and J. C. Keck, "Burning Velocity of Mixtures of Air with Methanol, Isooctane and Indolene at High Temperature and Pressure, *Combustion and Flame*," Vol. 48, pp. 191 - 210, 1982.
- (3) G. E. Andrews and D. Bradley, "Determination of Burning Velocity by Double Ignition in a Closed Vessel," *Combustion and Flame*, Vol. 20, pp. 77 - 89, 1973.
- (4) D. M. Zallen, E. D. Hirleman and S. L. Witting, "Ion Precursors, Chemi - Ion Formation and Electron Densities in Shock - Induced Methane Combustion," 15th Sym. (Int.) on Combustion, pp. 1013 - 1021, 1976.
- (5) W. J. Miller, "Ions in Flames : Evaluation and Prognosis," 13th Sym. (Int.) on Combustion, pp. 307 - 320, 1974.
- (6) M. Namazian, S. Hansen, E. Lyford, J. Sanchez, J. Heywood and J. Rife, "Schlieren Visualization of the Flow and Density Fields in the Cylinder of a Spark - Ignition Engine," SAE paper 800044, 1980.
- (7) H. F. Calcote, *Ionization in high - temperature gases*, Academic Press, 1963.
- (8) B. L. Lewis and G. von Elbe, *Combustion, Flames and Explosions of Gases*, Academic Press, 1961.
- (9) 정인석, 프로판-공기 예혼합기의 과도적 전파화염에 관한 연구, 서울대학교, 박사학위논문, 1982.
- (10) G. E. Andrews and D. Bradley, "Determination of Burning Velocity: A Critical Review, *Combustion and Flame*," Vol. 18, pp. 133 - 153, 1972.
- (11) T. Hijima and T. Takeno, " Effects of Temperature and Pressure on Burning Velocity," *Combustion and Flame*, Vol. 65, pp. 35 - 43, 1986.