

밀폐용기내 메탄-공기 예혼합기의 연소특성(II)

김봉석 · 이영재 · 고창조 · 권철홍

한국에너지기술연구소 수송기술연구팀

Combustion Characteristics of Methane-Air Pre-mixture in a Closed Vessel(II)

Bong Seock Kim, Young Jae Lee, Chang Jo Koh and Chul Hong Kwon

Transportation Research Team, Korea Institute of Energy Research

요 약

본 연구에서는 최근 차량용 대체연료로서 주목받고 있는 천연가스의 연소특성을 규명하기 위해 밀폐된 정적연소실을 이용, 당량비, 초기압력 및 점화위치 변화에 따른 연소실험을 행하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 메탄-공기 예혼합기의 화염전파과정은 이론혼합기 부근에서 구면형으로 진행되는 데 반해, 과농 또는 과박 혼합기 그리고 점화위치가 연소실 벽면에 가까울수록 타원형으로 진행되며, 초기압력이 증가함에 따라 화염전파는 느려진다. 화염전파속도와 연소 속도는 초기압력이 낮고 점화위치가 연소실 중심에 가까울수록 빠르며, 당량비 1.0~1.1 사이에서 최대치를 보인다.

Abstract—The present study was investigated combustion characteristics of natural gas as alternative fuels for automotive vehicles with various equivalence ratios, initial pressures and ignition positions in a closed vessel. As a result of this study, we verified that the combustion characteristics such as flame propagation processes, flame propagation speed, and burning velocity are mainly influenced by the equivalence ratio and ignition positions of mixture. The main results obtained from this study can be summarized as follows. Flame propagation processes in near stoichiometric mixture of premixed methane-air are propagated with a spherical shape, but in excess rich or lean mixtures and ignition position closed wall of combustion chamber are propagated with a elliptical shape. Also, flame is sluggishly propagated as increased initial pressure in combustion chamber. In the case of low initial pressure and center ignition position, flame propagation speed and burning velocity are the fastest. And, maximum flame propagation speed and burning velocity are acquired at equivalence ratio of 1.0~1.1.

1. 서 론

최근 인구의 증가와 문명의 발달로 가속화된 석유계 연료의 고갈과 이에 따른 대기오염, 지구온난화, 오존층 파괴 등과 같은 지구환경문제에 대응하기 위해 석유 대체 에너지원에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 우리나라의 경우, '80년대에 접어들면서부터 급속한 경제성장과 소득수준의 향상으로 수송부문의 에너지 소비량이 급격히 증가하고 있으며, 자가용 승용차의 대중화에 따른 자동차의 급속한 증가로 도심지역의 대기

오염에서 자동차 배기가스가 차지하는 비중이 날로 증가하는 추세에 있어 에너지 절약형 저공해 대체연료의 개발은 필요불가결하다.

이에 세계각국의 정부, 자동차 관련 연구기관, 자동차메이커 등에서는 각종 규제법안의 제정과 전기, 메탄올, 에탄올, 수소, 압축천연가스(CNG) 등을 이용한 차세대 고효율 저공해 내연기관의 개발에 많은 노력을 기울이고 있는 실정이다¹⁻⁵⁾. 내연기관용 대체연료로서 상술한 에너지는 각각 일장일단의 특징을 가지고 있지만, 메탄올 주성분으로 하는 천연가스는 타연료에 비해

풍부한 매장량, 저렴한 가격, 고옥탄가, 저공해성이라는 장점이 있어 각국에서 천연가스의 차량이용 기술에 대하여 기초 및 실용화 연구를 계속하고 있다⁶⁻⁹⁾.

본 연구에서는 연소압력, 연소시간, 열발생율, 화염 온도, 질소산화물농도 등의 연소특성을 고찰한 전보⁶⁾에 이어 메탄-공기 예혼합기의 당량비, 충전압력 및 점화 위치 등의 초기조건이 화염전파과정, 이온전류파형, 화염발광량신호, 화염전파속도 및 연소속도 등의 연소특성에 미치는 영향을 규명함으로써, 천연가스기관의 연구개발시 기초자료로 활용하고자 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2-1. 실험장치

Fig. 1은 본 실험장치의 개략도로서 정적연소실(내경 80 mm, 폭 45.6 mm), 점화장치, 혼합기 제조장치, 쉐리렌사진 촬영장치, 압력측정장치, 이온 및 화염발광량신호 측정장치, 온도측정장치, NOx 측정장치, 데이터 수집 및 해석장치로 구성되어 있다. 이들에 대한 사항은 전보⁶⁾에 상세하게 기술하였기 때문에 생략하고 여기서는 쉐리렌사진 촬영장치, 이온 및 화염발광량신호 측정장치에 대해서만 간략하게 설명하기로 한다.

연소실내의 화염전파과정은 Xenon pulse type의 Light source(Cordin사 Model 359, maximum energy : 1, 100 mJ), Schlieren concave mirror(초점거리 1.5 m, 유효직경 250 mm) 등으로 구성된 광학시스템으로 가시화하였고, 쉐리렌사진 촬영에는 드럼형의 16 mm 고속도 카메라(Cordin사 Model 350F, maximum framing rate :

35,000FPS)와 ASA 100의 Kodak제 Tri Plus-X film을 사용하였다.

이온신호를 측정하기 위해 Fig. 2의 (b)와 같이 아크릴판에 제작한 간극 1 mm, 직경 0.2 mm인 환상의 피아노강선제의 Ion probe를 ①~⑤의 위치(Fig. 2의 (a) 참조)에 설치하였다.

화염발광량신호는 Fig. 2의 (c)와 같이 연소실내 光幅 1.0 mm만의 국소적인 발광을 잡기위해 Ion probe 대향면 위치에 설치된 Photo-transistor(FPT 100)로 측정하였으며, Photo-transistor의 최대감도파장은 0.8 μm 부근이다⁸⁾. 이들 신호는 압력신호와 같이 Interface board(NI사 model AT-MIO-16L, maximum sampling rate : 100 kHz)를 거쳐 컴퓨터로 입력시켜 해석하였다.

2-2. 실험방법

실험은 혼합기 제조장치에 의해 만들어진 메탄-공기 예혼합기를 미리 진공상태로 소기된 연소실내에 압력 레귤레이터를 통하여 필요한 초기압력으로 균일하게 충전하고, 유동이 완전히 정지된 3분후에 시작하였다. 쉐리렌사진 촬영시에는 고속도카메라의 드럼속도가 원하는 속도에 이르게 되면 컴퓨터로부터 발생된 트리거 신호에 의해 고속도카메라의 셔터가 열리게 되며, 이 Shutter open signal에 의해 CDI와 Light source가 동작하여 연소실내 혼합기의 점화와 쉐리렌사진 촬영이 행해진다. 쉐리렌사진 촬영을 하지 않을 경우에는 컴퓨터의 트리거신호를 동기신호로 사용하였다. Table 1은 전체적인 실험조건을 나타낸 것이다.

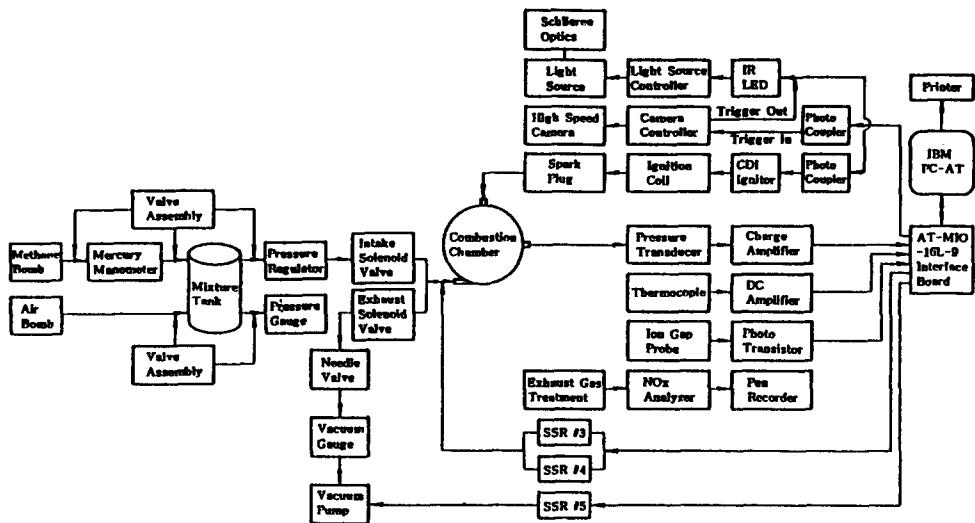


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

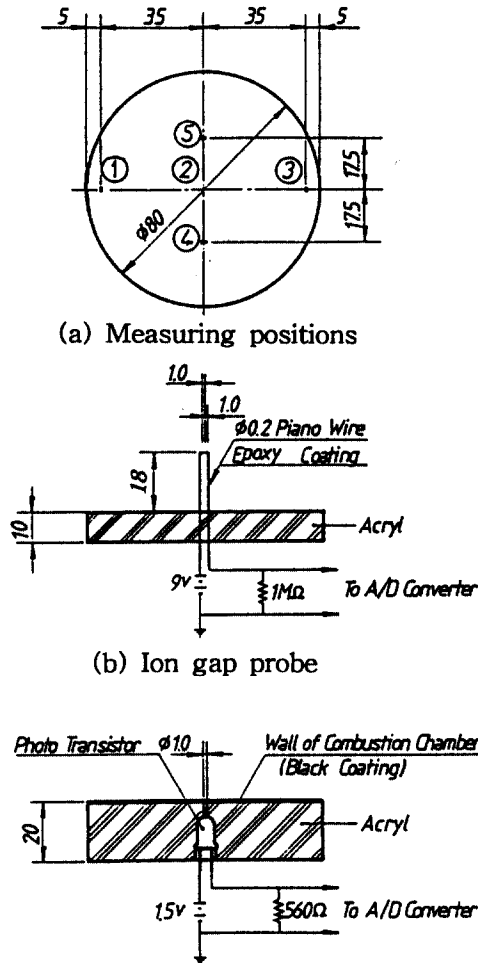


Fig. 2. Schematic diagram of the ion gap probe and photo transistor.

3. 연소속도의 계산방법

연소속도는 예혼합연소를 기술하는데 있어서 중요한 파라메타중의 하나이지만, 밀폐용기내 전파화염의 경우에는 화염이 전파하는 동안 압력이 증가하기 때문에 그 값을 정확하게 측정하는 것은 쉽지 않다. 현재까지 주로 쓰이는 연소속도의 계산법으로는 화염전파속도와 화염전파방향의 미연가스유속 차로부터 구하는 방법¹⁰⁾과 화염사진촬영과 압력데이터를 이용하여 구하는 방법^{11,12)} 등이 있다. 본 연구에서는 실리렌사진 촬영에 의한 화염전파사진과 연소압력 데이터를 이용하여 층류연소속도를 구하였다.

3-1. 화염전파속도의 측정방법

Table 1. Experimental conditions.

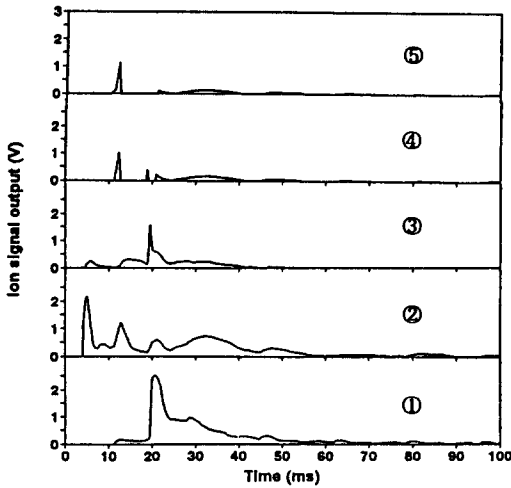
Combustion chamber volume, V(cc)	229.3
Fuel/Oxidizer	Gaseous, Premixed methane/air
Equivalence ratio, ϕ	0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3
Initial pressure, P_i (kg/cm ²)	1.5, 2.0, 2.5
Ignition position	Side, 0.5R, Center
Initial temperature, T_i	Ambient
Ignition energy, E(mJ)	80

층류화염의 경우에는 난류화염의 경우와 달리 화염 전파방향을 미리 예측할 수 있으므로, 화염 전파방향에 수직으로 설치한 Ion gap probe와 Photo transistor 및 화염전파사진을 각각 이용하여 화염전파속도를 측정할 수 있다.

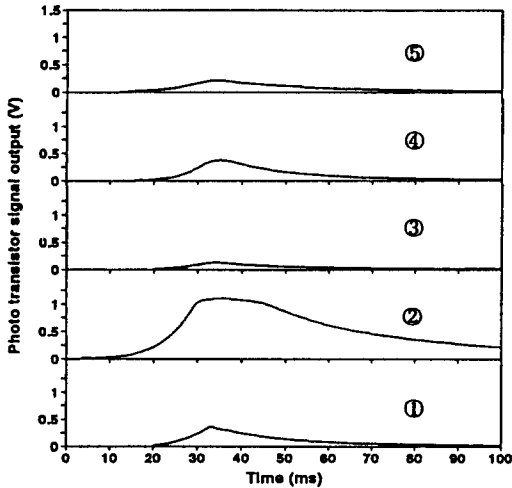
Fig. 3의 (a)는 Ion gap probe에 의한 화염전파속도 측정의 일례로써 $\phi=1.0$, $P_i=1.5$ kg/cm², Center 점화일 경우에 있어서 각 Ion gap probe에서 검출된 신호를 나타낸 것이다. 일반적으로 화염면이 Probe의 탐침부를 통과 할때, 이온신호는 급격히 증대되고 최대치를 지나 급격히 감소하기 때문에 이들 Probe에서 감지된 이온 신호가 최대치에 도달한 시기에 화염면이 Probe의 탐침부를 통과한다고 생각할 수 있다. 그림으로부터도 알 수 있듯이 Center 점화일 경우에는 화염면이 점화플러그를 중심으로 거의 구면형으로 전파되기 때문에 각 Ion gap probe에서 검출된 이온신호의 절대값은 다를지라도, ①과 ③번 위치, ④와 ⑤번 위치에서 검출된 이온 신호의 최대치까지의 시간은 각각 20.6 ms와 12.2 ms로 거의 동일하게 나타나고 있다. 따라서 이들 이온신호의 최대치에 도달하는 시간으로 각 Ion gap probe 사이의 거리를 나뉘줌으로써 화염전파속도를 얻을 수 있다. 일례로 Probe ④와 ①번 위치에서 측정된 화염전파속도는 각각 2.43 m/s와 2.08 m/s였다.

Fig. 3의 (b)는 Fig. 3의 (a)와 동일조건 일때 Ion gap probe 대향면에 설치된 각 Photo Tr.에서 검출된 신호를 나타낸 것으로, 이 경우에 있어서도 ①과 ③번 위치, ④와 ⑤번 위치에서 최초로 검출된 신호까지의 시간은 각각 20 ms와 12 ms로 거의 같게 나타나고 있으며, ②번 위치에서 감지된 신호의 절대값이 다른 위치의 그것들에 비해 높게 나타나고 있다. 이는 화염의 발광량 즉, 휘도가 화염온도에 비례한다고 생각할 때 연소실 중심부분의 온도가 다른 부분의 온도에 비해 높다는 것을 의미한다.

Photo Tr.에 의한 화염전파속도의 계산방법은 Ion



(a) Signals of ion gap probe



(b) Signals of photo transistor

Fig. 3. Signals of ion gap probe and photo transistor ($\phi = 1.0$, $P_1 = 1.5 \text{ kg/cm}^2$, Center ignition).

gap probe의 경우에서와 같으나, Photo Tr.에서의 시간은 점화 후 최초로 검출된 시간을 이용하는 점이 다르다. 일례로 Photo Tr.에 의해 ④와 ①번 위치에서 측정된 화염전파속도는 각각 2.01 m/s와 2.24 m/s였다.

화염전파사진에 의한 화염전파속도의 계산은 쉐리렌 사진 촬영으로부터 얻은 필름을 Film-video processor (Tomron사 model FOTOVIX II-X, 최대배율 : 6), Image processing board(Data translation사 model DT-2853), Monitor 등으로 구성된 화상처리장치(Image processing

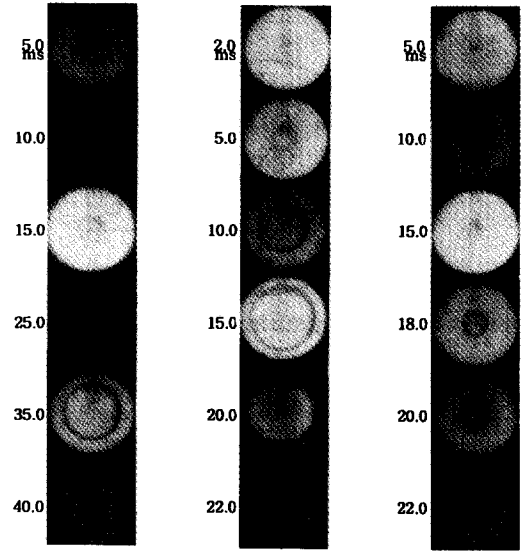


Photo 1. Schlieren photographs of flames propagating at various equivalence ratios ($P_1 = 1.5 \text{ kg/cm}^2$, Center ignition).

system)를 이용하여 측정된 화염반경을 그때의 시간으로 나눠줌으로써 행하였다.

한편, 상기 세가지 방법에 의한 화염전파속도 측정에 있어서 ④번 위치, 즉 연소실 중심으로부터 35 mm에 설치된 Ion gap probe와 Photo Tr.에서 감지된 신호는 각각 20.6 ms와 20 ms였고, 이 위치를 지날때의 화염반경은 20 ms 일때 37 mm로 나타나 세가지 방법에 의한 화염전파속도 측정은 다소 차이가 있어도 밀폐용기내 메탄-공기 예혼합기의 평균적인 화염전파속도 측정은 가능하다고 사료된다.

3-2. 연소속도의 계산방법¹³⁾

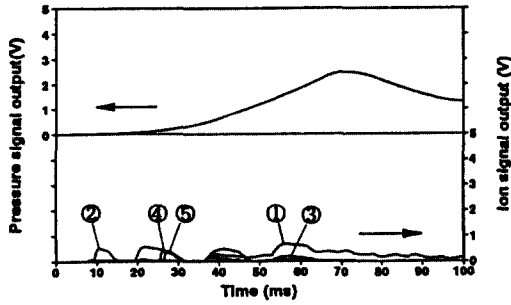
화염면에 대한 미연혼합기의 상대 유입속도로서 정의되는 연소속도 S_L 은 미소시간에 있어서 화염내 미연혼합기의 질량보존식으로부터 다음식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_L = \frac{(\partial M_b / \partial t)}{A_f \rho_u} \quad (1)$$

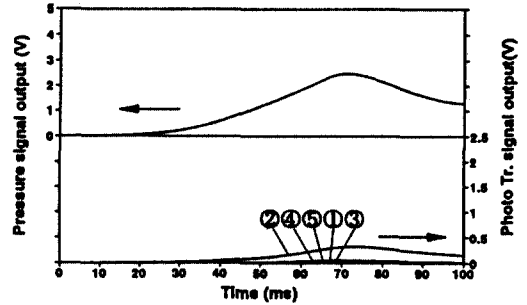
여기서 $\partial M_b / \partial t$ 는 질량연소율, A_f 는 화염면적, ρ_u 는 미연혼합기의 밀도이다.

식 (1)로부터 연소속도 S_L 을 구하기 위해 다음과 같이 가정을 한다^{11,12)}.

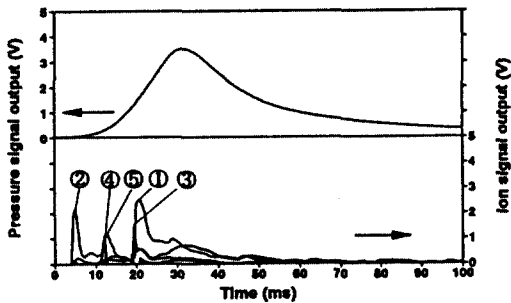
- 1) 연소부분과 미연부분은 무시할 수 있을 정도의



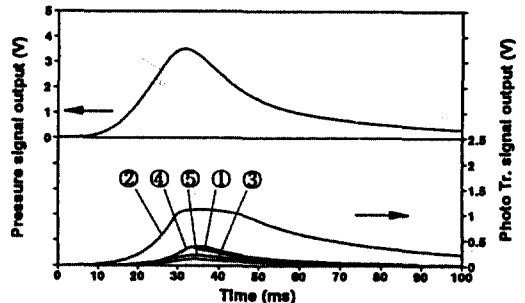
(a) $\phi = 0.7$



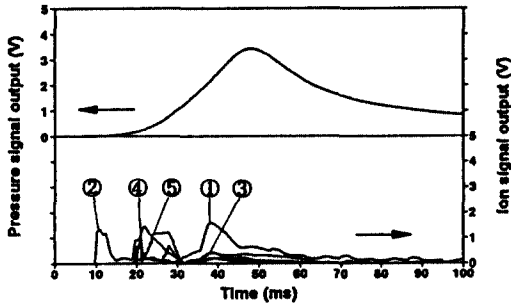
(a) $\phi = 0.7$



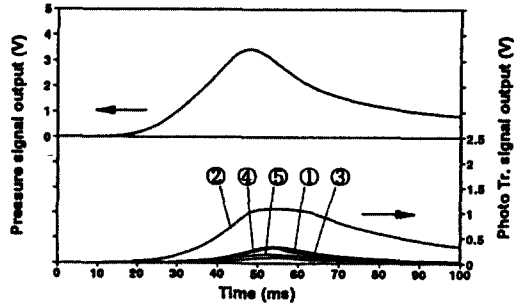
(b) $\phi = 1.0$



(b) $\phi = 1.0$



(c) $\phi = 1.3$



(c) $\phi = 1.3$

Fig. 4. Effect of equivalence ratio on ion signals ($P_i=1.5 \text{ kg/cm}^2$, Center ignition).

Fig. 5. Effect of equivalence ratio on photo transistor signals ($P_i=1.5 \text{ kg/cm}^2$, Center ignition).

얇은 화염면에 의해 구분된다.

2) 시간 t 에서 연소부분과 미연부분의 압력은 공간적으로 동일하다.

3) 연소부분과 미연부분은 열역학적 평행상태이다.

4) 화염성장과 더불어 미연혼합기는 단열압축된다.

이 경우, 연소가스의 질량과 체적은 다음과 같다.

$$M_b = M_t - M_u \quad (2)$$

$$V_b = V_t - V_u \quad (3)$$

여기서 M_t 는 혼합기의 전 질량, M_u 는 미연혼합기의

질량, V_t 는 연소실의 체적, V_u 는 미연 혼합기의 체적이다.

또, 가정 4)에 의해 미연혼합기는 화염이 성장함에 따라 단열압축되므로 미연가스의 밀도와 연소압력의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho_u}{\rho_u} = \frac{\partial P}{\kappa_u P} \quad (4)$$

여기서 κ_u 는 미연혼합기의 비열비, P 는 연소압력이다. 식 (1)에 식 (2), (3)과 식 (4)를 대입하면, 연소속도 S_L 은 다음식으로 나타낼 수 있다.

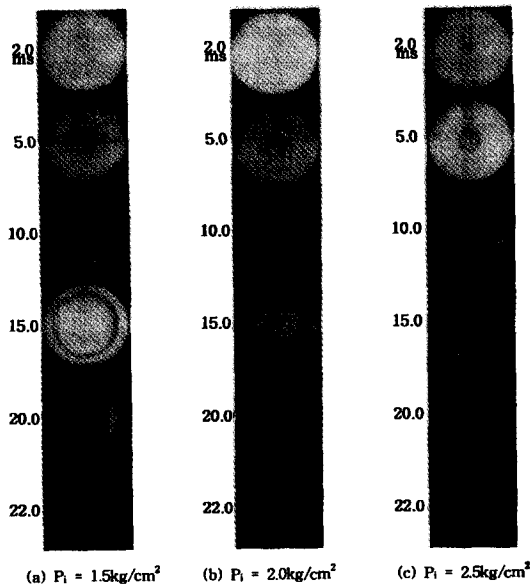


Photo 2. Schlieren photographs of flames propagating at various initial pressures ($\phi=1.0$, Center ignition).

$$S_L = \frac{1}{A_f} \frac{\partial V_b}{\partial t} - \frac{(V_f - V_b)}{A_f \alpha_u P} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (5)$$

따라서, 식 (5)에 각각의 실험조건에서 측정된 연소 압력 P 와 Image processing system을 이용하여 쉐리 렌사진으로부터 구한 화염체적 V_b 및 화염면적 A_f 를 대입함으로써 연소속도 S_L 을 구할 수 있다.

4. 실험결과 및 고찰

4-1. 화염전파과정

Photo. 1의 (a), (b) 및 (c)는 $P_i=1.5 \text{ kg/cm}^2$, Center 점화 일때 과농혼합기($\phi=0.7$), 이론혼합기($\phi=1.0$) 및 과농혼합기($\phi=1.3$)에 대한 화염전파과정을 각각 나타낸 것이다. 어느경우에 있어서나 점화 직후의 화염의 형태는 점화플러그의 냉각효과로 인해 화염의 중앙부위가 약간 오목하게 들어간 형태를 취하고 있다. 또 이론혼합기에서는 화염의 초기성장이 빠르고 거의 구면형으로 진행되는 데 반해, 과농 또는 과박 혼합기에서는 화염의 초기성장도 느리고 타원형으로 진행되는 것을 볼 수 있다. 이는 과농 또는 과박 혼합기측의 화염전파속도가 이론혼합기에서의 화염전파 속도에 비해 상대적으로 느리기 때문이다(후술할 화염전파속도 내용 참조). 한편, $\phi=1.3$ 에서 15.0 ms 이후 화염면에 주름살 모양의 형태가 발생하는 것은 Bunner 화염에서 볼 수 있는 화

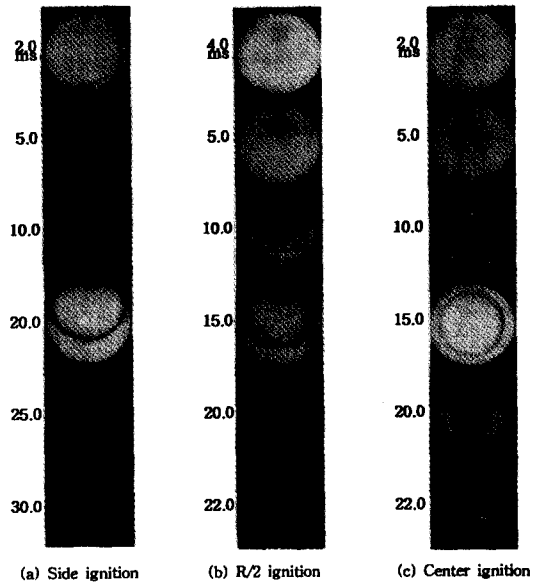


Photo 3. Schlieren photographs of flames propagating at various ignition positions ($\phi=1.0$, $P_i=1.5 \text{ kg/cm}^2$).

염면의 불안정현상과 유사한 것으로써, 점화플러그에 의한 초기 화염면의 요철이 연료와 산소분자의 확산속도의 차이에 의해서 조장되기 때문인 것으로 알려져 있다¹⁴⁾.

Fig. 4는 상기 Photo. 1의 화염전파과정에 있어서 전파화염의 상황과 이온신호와의 관계를 보기 위한 것으로, (a), (b) 및 (c)는 각각 $\phi=0.7$, $\phi=1.0$, $\phi=1.3$ 일때 각 Ion gap probe에서 감지한 신호를 나타낸 것이다. 그림으로부터 볼 수 있는 바와 같이 어느경우에 있어서나 화염면이 통과한 사실을 나타내는 이온신호의 최대가 보이고 있으며, 각 Ion gap probe에서 최대 이온신호가 발생하는 시기 및 최대 이온신호의 절대값은 $\phi=1.0$, $\phi=1.3$, $\phi=0.7$ 순으로 작아지고 있다.

또, Fig. 5는 상기 Photo. 1의 화염전파과정에 있어서 전파화염의 상황과 화염발광량과의 관계를 보기 위한 것으로, (a), (b) 및 (c)는 각각 $\phi=0.7$, $\phi=1.0$, $\phi=1.3$ 일때 각 Photo Tr.에서 감지한 신호이다. 화염발광량의 경우에 있어서도 최대신호는 $\phi=1.0$ 일때 나타나고 있으며, $\phi=0.7$ 일때는 상대적으로 낮은 값을 보여주고 있어 이론혼합기 부근이 화염의 휘도가 밝다는 것을 알 수 있다. 또, 당량비의 변화에 관계없이 연소실 중심에 설치된 ②번의 Photo Tr. 신호가 가장 큰 값으로 나타나고 있으며, 화염면의 통과를 의미하는 화염발광량의 초기신호도 $\phi=1.0$, $\phi=1.3$, $\phi=0.7$ 순으로 나타나고 있다.

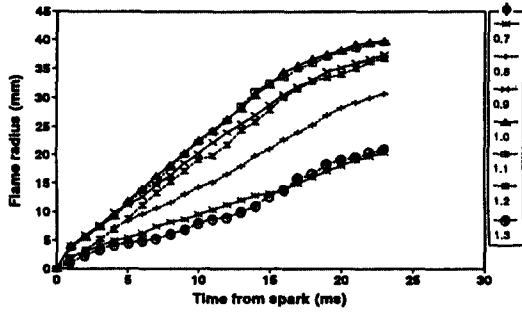


Fig. 6. Effect of equivalence ratio on flame radius ($P_1=1.5 \text{ kg/cm}^2$, Center ignition).

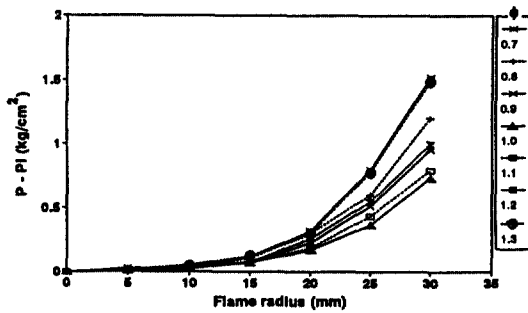


Fig. 7. Increase of flame radius versus pressure ($P_1=1.5 \text{ kg/cm}^2$, Center ignition).

Photo. 2의 (a), (b) 및 (c)는 $\phi=1.0$, Center 점화일 경우에 있어서 초기압력변화에 따른 화염 전파과정을 나타낸 것이다. 초기압력변화에 따른 화염전파형태에는 큰 차이가 없으나 초기압력이 증가할 수록 질량연소율 (Mass burned rate)과 화염전파속도가 저하하기 때문¹⁵⁾에 전 연소시간은 길어지고 있다.

Photo. 3의 (a), (b) 및 (c)는 $\phi=1.0$, $P_1=1.5 \text{ kg/cm}^2$ 일때 Side 점화, 0.5R 점화 및 Center 점화에 대한 화염전파과정의 일례를 나타낸 것이다. 초기의 화염은 점화위치에 관계없이 점화플러그를 중심으로 구면형으로 전파해 가지만, 화염전면이 연소실 벽면에 접한 이후에는 점화위치에 따라 그 형태를 달리해 가고 있다. 벽면 가까이 위치한 Side 점화의 경우 화염전면이 일직 (5.0 ms) 연소실 벽면에 접하기 때문에 이후에 전파하는 화염의 열손실은 크고 화염전파거리도 길어 전 연소 시간(47.4 ms)은 다른 점화위치에 비해 상대적으로 길게 되며, 화염형태도 타원형으로 전파되어 가고 있다. 이에 반해 점화위치가 중심으로 이동하게 되면 화염전파거리와 화염이 벽면에 접하여 진행되는 시간이 단축되므로 전 연소시간은 짧고 화염형태도 거의 구면형으로 전파되고 있다. 이러한 경향은 당량비가 바뀌어도 대체로

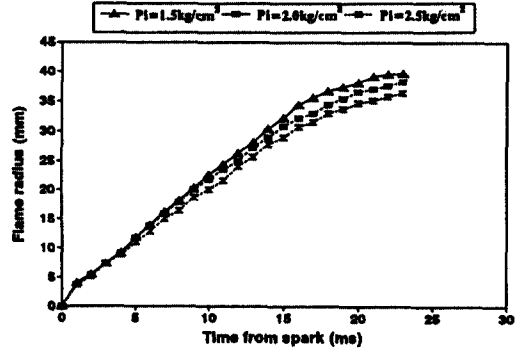


Fig. 8. Effect of initial pressure on flame radius ($\phi=1.0$, Center ignition).

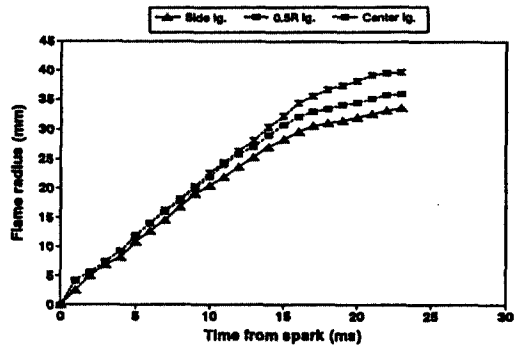


Fig. 9. Effect of ignition positions on flame radius ($\phi=1.0$, $P_1=1.5 \text{ kg/cm}^2$).

비슷하게 나타나지만, 전술한 바와 같이 과농 또는 과박 혼합기에서는 화염의 초기성장과 화염전파속도가 이론 혼합기에 비해 더욱 느리기 때문에 화염 형태는 점차 타원형으로 변화되었다.

4-2. 화염반경의 시간적변화

Fig. 6은 점화 후 시간에 대한 화염반경의 변화를 고찰하기 위한 것으로 이때의 조건은 $P_1=1.5 \text{ kg/cm}^2$, Center 점화이다. 이론혼합기 부근에서의 화염반경은 메탄-공기 예혼합기의 연소속도가 당량비 1.0~1.1의 범위에서 가장 빠르기 때문에(후술할 연소속도 내용 참조) 화염전파의 초기와 중기에 있어서 빠르게 증대되나, 말기(20 ms 이후)에 이르러서는 다소 저하하고 있다. 또, 과농 또는 과박혼합기 측에서의 화염반경은 느린 연소 속도로 인해 당량비 1.0과 1.1에 비해 매우 느리게 증대되고 있다. 일례로 점화 후 20 ms에 있어서 화염반경은 $\phi=1.0$ 의 경우 37 mm 정도이나 $\phi=1.3$ 과 $\phi=0.7$ 의 경우 18.3 mm와 17.5 mm에 지나지 않는다.

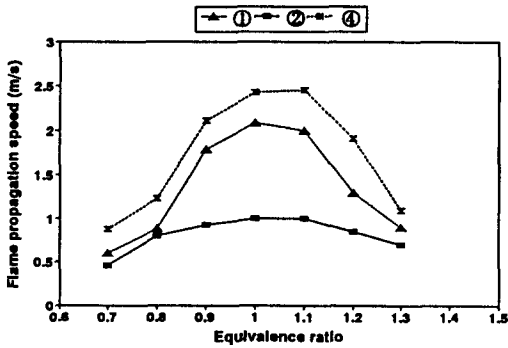


Fig. 10. Effect of equivalence ratio on flame propagation speed ($P_i=1.5 \text{ kg/cm}^2$, Center ignition).

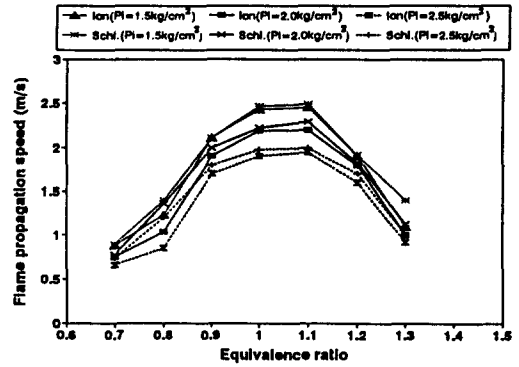


Fig. 12. Effect of equivalence ratio and initial pressure on flame propagation speed (Center ignition).

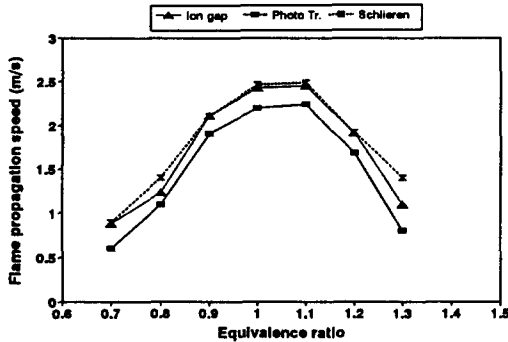


Fig. 11. Comparison of flame propagation speed by measuring methods ($\phi=0.7-1.3$ $P_i=1.5 \text{ kg/cm}^2$, Center ignition).

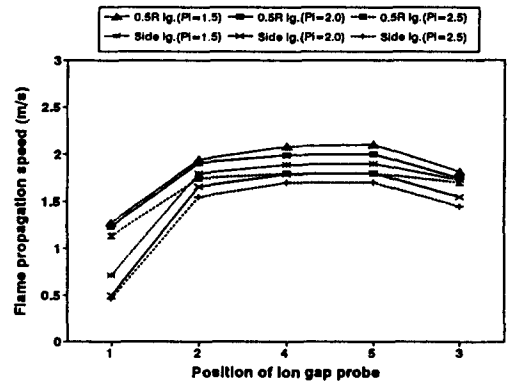


Fig. 13. Effect of initial pressure and ignition positions on flame propagation speed ($\phi=1.0$).

한편, 화염반경의 증대에 따른 압력증가의 경향을 살펴보기 위해 나타낸 Fig. 7로부터 볼 수 있듯이, 연소압력증가분 ($P(t)-P_i$)는 당량비의 변화에 관계없이 연소실 반경의 1/4(10 mm)까지 화염반경이 증대되어도 큰 변화가 없다. 그 후, 당량비 변화에 따라 화염반경과 압력증가분의 차이가 각각 다르게 나타나고 있다. 일례로 화염반경이 30 mm 일때 $\phi=1.0$ 과 $\phi=0.7$ 의 경우에 있어서의 압력증가분을 비교하여 보면, 연소속도가 빠른 $\phi=1.0$ 의 경우에는 연소압력의 증가는 0.73 kg/cm^2 에 지나지 않으나 과박혼합기인 $\phi=0.7$ 의 경우에는 연소압력의 증가는 1.17 kg/cm^2 로 크게 나타나고 있다. 이와같은 경향은 초기압력을 증가시켜도 거의 비슷하게 나타나고 있으며, 단지 초기압력 증가에 따른 연소속도의 감소로 화염반경의 증대가 저하하고 있다.

Fig. 8은 $\phi=1.0$, Center 점화인 경우에 있어서 초기압력에 대한 화염반경의 변화를 나타낸 것이다. 초기압력이 증대됨에 따라 질량연소율과 화염전파속도가 저하하기 때문에 화염반경의 증가경향은 점차 저하하고

있다.

Fig. 9는 $\phi=1.0$, $P_i=1.5 \text{ kg/cm}^2$ 인 경우에 있어서 점화위치에 따른 화염반경의 변화를 나타낸 것이다. 화염전파과정에서도 언급한 바와 같이 화염전면이 연소실 벽면에 접하기 전까지의 화염 반경의 증대는 동일하나 그후의 화염반경의 증대는 연소실 벽면에 가까운 점화위치 일 수록 느려지고 있으며, 15ms 이후의 점화위치에 따른 화염반경 차이는 점차 커지고 있다. 이는 전술한 바와 같이 연소실의 벽면 연소실과 화염전파거리 증대에 기인하기 때문으로 사료된다.

4-3. 화염전파속도

Fig. 10은 $P_i=1.5 \text{ kg/cm}^2$, Center 점화인 경우에 있어서 당량비가 변화할 때 Ion gap probe에 의해 측정된 화염전파속도를 비교하여 나타낸 것으로 각 Probe 위치에서의 화염전파속도는 당량비 1.0~1.1 사이에서 최대치를 보이고 있다. 또 그 최대치를 보이는 순서는 ④,

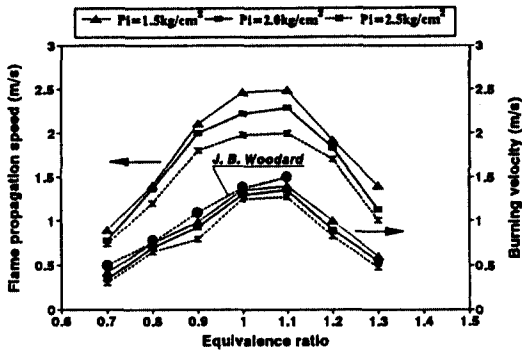


Fig. 14. Comparison of flame propagation speed and burning velocity with equivalence ratio and initial pressure (Center ignition).

①, ②번 Probe 위치로 나타나고 있어 점화플러그를 중심으로 성장하는 화염의 전파속도가 연소초기(②)와 연소 말기(①)에 느린 반면, 화염이 연소실의 관찰창에 부딪히기 직전(④)에 가장 빠르다는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 Fig. 10과 동일조건시 최대 화염전파속도를 보이는 ④번 Probe 위치에서 Ion gap probe, Photo Tr. 그리고 쉐리렌사진에 의해 측정된 화염전파속도를 각각 비교하여 나타낸 것이다. 그림으로부터 보는바와 같이 전 당량비 범위에 걸쳐서 쉐리렌사진에 의해 측정된 화염전파 속도는 Ion gap probe에 의해 측정된 화염 전파속도에 비해 약간 높거나 같게 나타나고 있으나, Photo Tr.에 의해 측정된 화염전파속도는 이들에 비해 약간 낮은 값을 보이고 있다. 이는 Center 점화의 경우, 점화플러그와 동일위치에 설치된 ②번 Probe의 신호 검출시간에 따른 차이 즉, Ion gap probe의 경우에는 Probe의 탐침부를 화염면이 통과해야 신호가 감지되나 Photo Tr.의 경우에는 점화 직후 화염발광신호가 감지 되기 때문에 ④번 Probe 위치에서 ②번 Probe 까지의 실제 감지시간은 다소 더 길게 나타난다. 따라서 이하의 화염전파속도의 고찰은 주로 이온신호와 쉐리렌사진에 의한 측정결과를 중심으로 한다.

Fig. 12는 Center 점화이고 당량비와 초기압력이 변화할 때 Ion gap probe와 쉐리렌사진에 의해 측정된 최대 화염전파속도를 비교하여 나타낸 것이다. 상술한 바와 같이 화염전파속도는 당량비 1.0~1.1 사이에서 최대치를 보이고 있으며, Ion gap probe에 의해 측정된 값이 쉐리렌사진에 의해 측정된 값에 비해 같거나 약간 낮게 나타나고 있다. 이는 화염면이 Ion gap probe를 통과할 때의 냉각효과에 의하여 화염전파속도가 다소 저하하기 때문인 것으로 알려져 있다¹⁶⁾. 또 초기 압력이 증가할 수록 질량연소율이 감소되기 때문에 화염전파

속도는 점차 저하하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 13은 0.5R 점화와 Side 점화의 경우에 있어서 당량비가 1.0으로 일정 할때, 5개 위치에 설치된 Ion gap probe에 의해 측정된 화염전파속도를 초기압력의 변화에 대해 나타낸 것이다. Fig. 12에서와 같이 0.5R 점화와 Side 점화 모두 화염전파속도는 ④·⑤→②→③→①번 Probe 순서로 작게 나타나고 있으며, 초기압력이 증가할 수록 그리고 점화위치가 Side 점화 일 수록 저하하는 경향을 보이고 있다. 이는 점화플러그가 연소실 중심이 아닌 벽면 가까이에 설치되어 있어 벽면 열손실과 화염전파거리의 영향을 크게 받기 때문이다.

4-4. 연소속도

Fig. 14에 식 (5)에 의해 구한 연소속도와 쉐리렌사진으로부터 측정된 화염전파속도를 각각 비교하여 나타냈다. 이때의 조건은 Center 점화이고 당량비와 초기압력을 변화시킨 경우이다. 전술한 바와 같이 화염 전파속도는 당량비 1.0~1.1 사이에서 그리고 초기압력이 낮을 수록 높게 나타나고 있으며, 연소속도 또한 이와 동일한 경향을 보이고 있다. 일례로 $P_i=1.5 \text{ kg/cm}^2$ 인 경우, 화염전파속도는 약 0.89 m/s~2.49 m/s이고 최대치는 이혼혼합기보다 약간 농후한 $\phi=1.1$ 에서 2.49 m/s이다. 그리고 연소속도는 $P_i=1.5 \text{ kg/cm}^2$ 인 경우, 약 0.41 m/s~1.4 m/s이고 $\phi=1.1$ 에서 최대치인 1.4 m/s를 나타냈다.

한편, Fig. 14의 ●표시는 Woodard¹⁷⁾ 등이 사각단면형의 정적연소실을 이용하여 계산한 메탄-공기 예혼합기의 연소속도로서 본 연구에서 구한 $P_i=1.5 \text{ kg/cm}^2$ 인 경우의 연소속도에 비해 약간 높게 나타나고 있는데, 이는 Woodard 등의 실험이 대기압하의 조건이고 본 연구는 대기압보다 약간 높은 1.5 kg/cm²의 조건이기 때문으로 사료된다.

이상 압력측정장치, 쉐리렌사진 촬영장치, 화상처리장치, 이온 및 화염발광량신호 측정장치를 이용하여 밀폐된 정적연소실내를 전파하는 메탄-공기 예혼합 증류화염의 화염전파속도를 구해본 결과, 화염발광량신호 측정장치는 신호검출시간에 따른 차이로 인해 이온신호 측정장치와 쉐리렌사진 촬영장치에 의해 구한 값과 다소 차이가 있었지만, 이들 장치를 이용함으로써 밀폐용기내 메탄-공기 예혼합기의 평균적인 화염전파속도 측정은 가능하다고 판단되었다. 또한, 쉐리렌사진 촬영에 의한 화염전파사진과 연소압력 데이터를 이용하여 증류연소속도를 계산할 수 있었다.

5. 결 론

밀폐된 정적연소실내를 전파하는 메탄-공기 예혼합

층류화염의 화염전파과정, 이온전류파형, 화염발광량신호, 화염전파속도 및 연소속도 등과 같은 연소특성을 규명하기 위해 정적연소실을 이용, 당량비, 초기압력 및 점화위치 변화에 따른 연소특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 메탄-공기 예혼합기의 화염전파과정은 이혼합기 부근에서 구면형으로 진행되는데 반해, 과농 또는 과박 혼합기 그리고 점화위치가 연소실 벽면에 가까울 수록 타원형으로 진행되며, 초기압력이 증가함에 따라 화염전파는 느려진다. 또, 화염전파속도와 연소속도는 초기압력이 낮고 점화위치가 연소실 중심에 가까울 수록 빠르며, $\phi=1.0\sim 1.1$ 사이에서 최대치를 보인다.

참고문헌

1. 吸野眞人, 入江南海雄: "電氣自動車の現状と將來展望", 自動車技術, 第45卷, 第8號, pp.35-41 (1991).
2. T.S. Suga and Y. Hamazaki: "Development of Honda Flexible Fuel Vehicle", SAE Paper 922276.
3. C.E. Wyman et al: "Ethanol: Fundamentals of Production from Renewable Feedstocks and Use of a Transportation Fuel", Appl. Biochem. & Biotech., 24/25, pp.735-753 (1990).
4. 兵純: "水素燃料のエンジンへの利用", 日本機械學會講演會, No.920-48, pp.44-48 (1992).
5. G.J. Waldon and R.G. Allen: "Natural Gas for Vehicles(NGV)", SAE Paper 912558.
6. 김봉석, 권철홍: "밀폐용기내 메탄-공기 예혼합기의 연소특성(I)", 한국에너지공학회지, 제3권, 제2호, pp.193-200 (1994).
7. 김봉석, 권철홍, 류정인: "부실식 정적연소실내 연소특성에 관한 연구(I)-연락공의 기하학적 형상이 연소에 미치는 영향-", 한국자동차공학회논문집, 제1권, 제1호, pp.66-79 (1993).
8. 김봉석, 권철홍, 류정인: "부실식 정적연소실내 연소특성에 관한 연구(II)-입계연락공의 형상 변화에 따른 연소촉진효과-", 대한기계학회논문집, 제17권, 제10호, pp.2611-2623 (1993).
9. 中園徹: "稀薄ガス機關に關する研究(副室式稀薄燃焼における主室形狀の影響)", 日本機械學會論文集(B編), 第58卷, 第550號, pp.1943-1948 (1992).
10. G.E. Andrews and D. Bradley: "The Burning Velocity of Methane-Air Mixtures", Combustion and Flame, Vol.19, pp.275-288 (1972).
11. J.B. Woodard et al: "Wall Heat Transfer and Flame Propagation in a Constant-Volume Duct", Western States Section/The Combustion Institute Paper No.81-51 and LBL Report No.LBL-13021 (1981).
12. W. Steinert et al: "Influence of Chamber Length and Equivalence Ratio on Flame Propagation in a Constant-Volume Duct", Western States Section/The Combustion Institute Paper No.82-72 and LBL Report No.LBL-14965 (1982).
13. 李種泰: "容器内の非定常吸入旋回流動が燃焼に及ぼす影響", 日本大學博士論文 (1986).
14. 飯沼一男 外 2人: "燃焼容器内における亂流火焰傳ば(第3報)", 法政大學工學部研究集報, 第13卷, pp. 35-49 (1977).
15. B. Lewis and G. von Elbe: Combustion Flames and Explosions of Gases, 2nd Edition, New York, Academic Press (1961).
16. 鄭仁碩: "프로판-空氣混合氣의 過渡的 傳播火焰에 關한 研究", 서울大學校博士論文 (1982).