

정적연소실 내 예혼합기의 화염전파 측정

김 정 민, 배 충 식 (충남대학교 항공우주공학과)

Flame Propagation Characteristics of Premixed Mixtures in Constant-Volume Combustion Chambers

Jung-Min Kim, Choong-Sik Bae
Chungnam National University

ABSTRACT

Flame propagation characteristics of propane-air mixtures were experimentally investigated in constant-volume combustion chambers. The propane-air combustible mixture was prepared by controlling partial pressures. Flame propagation process was observed as a function of mixture strength, initial mixture temperature and initial mixture pressure. A cylindrical combustion chamber and a spherical combustion chamber contain a pair of parallel windows through which optical access into the chamber can be provided. Laser two beam deflection method was adopted to measure the local flame propagation, which gave information on the flame size and flame propagation speed. Pressure development was also measured by a piezoelectric pressure transducer to characterize combustion in quiescent mixtures. Burning velocity was calculated from flame propagation and pressure measurements. Laser two beam method was found to be feasible in measuring flame propagation. Flame was observed to propagate faster with higher initial mixture temperature and lower initial pressure.

1. 서 론

정적연소실 내 정체혼합기의 화염대는 연소실 내부에서 미연가스 쪽으로 상대적인 진행을 한다. 이 과정에서 화염전파속도는 미연가스로 화염이 진행되는 속도인 층류연소속도와 기연가스가 팽창하면서 유기 되는 미연가스의 속도 합으로 표현할 수 있다. 화염전파과정에 관해서는 많은 연구가들에 의해 정립되어왔다 [1,2].

층류연소속도는 정해진 온도, 압력 하에서 혼합기의 특성을 결정하는 고유한 값인 반면 화염전파속도는 연소기의 형태에 따라 달라질 수 있다. 연소속도는 화염대 표면이 미연가스에 진행되는 수직속도 성분으로 정의하며 이 값은 기연 혼합기의 화염안정성이나 열방출율을 결정하는 특성치이다. 따라서 열역학적 조건이 정해지면 연소속도는 재현성 있는 값으로 정해진다.

고전적인 연소속도의 측정에서는 화염면에 수직한 속도성분을 쉽게 측정하기 위하여 연소기를 제작하는 것이 큰 문제가 되어 왔으나, 측정기술이 발달하면서 정확하게 연소속도를 측정하기 위한 여러 가지 방법이 고안되어 왔다[2-5]. 정적연소실에서의 화염전파과정을 통하여 기연가스가 미연가스를 압축하면서 미연가

스의 온도 및 압력이 상승하여 화염전파속도가 시간에 따라 변하게 된다. 아울러 한 점에서 점화되어 화염 전파가 이루어 질 때 화염은 구형이 된다. 구형의 화염은 연소실 벽면의 영향을 받아 시간적으로 뿐만 아니라 공간적으로도 그 화염전파속도가 변하게 된다[6]. 화염의 속도는 화염온도, 기체의 점성계수, 확산계수 등의 영향을 받으며 열역학적인 성질로서 압력, 온도, 혼합기 농도 등의 함수로 표현될 수 있다[5].

혼합기 농도의 영향은 곧 그 때의 화염온도의 경향과 같아서 이른혼합비 또는 당량비 1.05 부근의 혼합기가 최대의 연소속도를 보인다. 온도는 화학반응속도에 직접 영향을 미치므로 이에 따라 높은 온도에서 연소속도가 빠른 값을 보인다[7]. 한편, 압력의 영향은 혼합기에 따라 다른 양상을 보이며 연소속도가 빠르지 않은 혼합기의 경우 압력의 증가에 따라 연소속도가 약간 감소한다고 알려져 있다[8].

본 연구에서는 원통형 및 구형 정적연소실에서 프로판-공기 혼합기의 화염전파과정을 실험적으로 살펴 보았다. 프로판과 공기의 분압을 제어하여 정밀한 혼합기를 제작하고 혼합비 및 초기온도, 압력에 따른 화염 전파과정을 측정하였다. 원통형 및 구형의 정적연소실은 광학적 측정이 가능하도록 광학창을 장착하여 레이저 2선 굴절법(laser two beam deflection method)을 이용하여 화염의 크기 및 화염전파속도를 측정할 수 있도록 하였다. 이와 동시에 연소압력을 압전식 압력계로 측정하고, 화염전파속도 및 압력 값으로부터 연소속도를 산출하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 정적연소실

본 연구에 사용된 원통형 정적연소실 및 구형 정적연소실을 Fig. 1 에 도시하였다.

원통형 정적연소실은 지름 50 mm, 깊이 30 mm 로 59 cc 의 체적을 갖는다. 이 연소실은 11 mm 두께의 스파이어 광학창 한 쌍을 장착하여 화염전파과정을 광학적으로 관찰할 수 있다. 연소실 몸체에는 가열용 히터를 달고 이를 바이메탈식 스위치에 연결하여 보통 150℃로 연소실 온도가 유지되게 하여 연소가스가 연소실 벽에 이르러 응축되는 것을 방지하도록 하였다. 온도의 영향을 살펴볼 때에는 온도를 다르게 조절하였다. 혼합기의 흡입구는 연소실 벽면에 접선방향으로 만들어 와류 유동장을 만들 수 있도록 하였으며, 유동이 없는 정체시의 점화 및 연소실험을 수행할 때에는 혼합기의 흡입 후 충분한 시간을 두어 혼합기의 유동이 정체에 이른 후 연소실 벽에 설치된 점화플러그로 점화하였다.

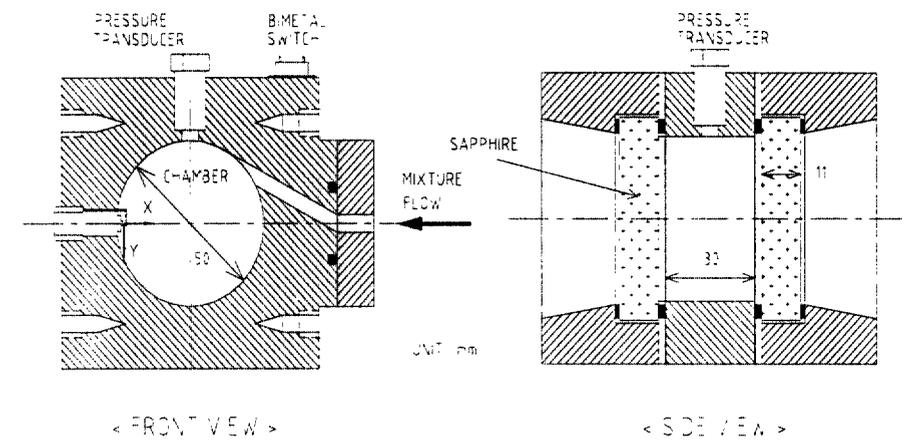
구형 정적연소실은 직경 120 mm 로서 288 cc의 체적을 갖는다. 연소실 전후면으로는 직경 70 mm 두께 20 mm의 광학창을 설치하였다. 점화간극 간격을 연소실 중앙부에 두어 중앙으로부터 화염면이 구형으로 전파되도록 하였다.

2.2 연소실험 및 해석

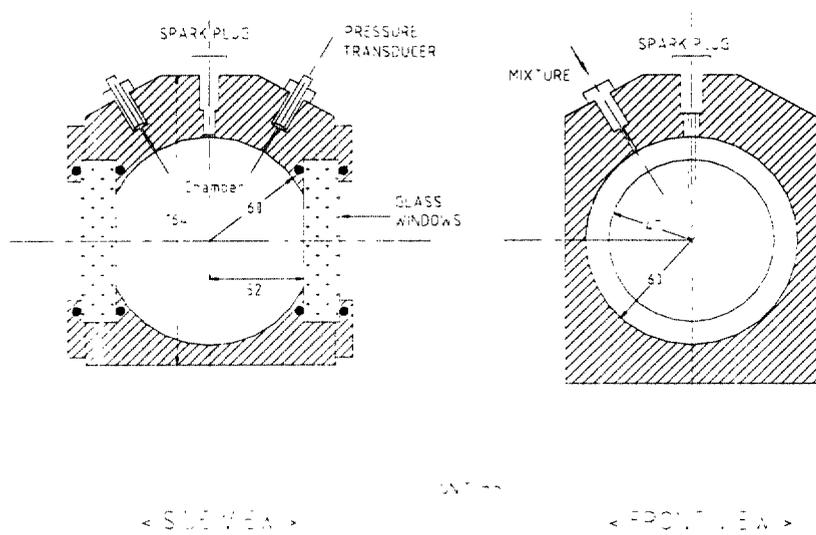
화염전파과정은 레이저 2선 굴절법으로 관찰되었다. 5 mW He-Ne 레이저 빔을 빔분리기 (beam splitter) 로 두 개로 나눈 후 연소실 광학창을 통해 수직으로 주시하게 하고 점화플러그로부터 가로축 방향으로 4 mm의 간격을 갖고 투과하도록 하였다. 이 두 레이저 빔은 포토다이오드에 멩히게 하여 그 신호를 데이터 획득장치(NI Lab PC+)를 통해 PC에 저장하도록 하였다. 화염면이 레이저 빔을 지나가게 되면 화염면에 존재하

는 밀도구배면으로 인하여 굴절되어 포토다이오드에 멩혀 있던 레이저가 벗어나서 그 신호로부터 레이저 빔의 위치에 화염이 도달한 것을 감지할 수 있다는 것이 레이저 빔 굴절법의 원리이다[9,10]. 두 개의 레이저 빔을 연소실 내부로 투과하여 각 빔을 지나가는 화염의 통과시각을 기록하여 두 빔 사이의 화염전파속도를 측정하는 것으로 기존의 고속 사진법을 대체할 수 있는 저렴한 방법이다. 이 방법은 빔을 지나가는 모든 밀도

변화를 감지하므로 불규칙한 모양의 화염에 대해서는 측정오차를 유발할 수 있으나 정체 상태의 혼합기의 경우 두 정적연소실에서 화염전파가 층류의 형태를 보였으므로[10,11] 문제없이 적용될 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 1 Constant-volume combustion chambers
 (a) a cylindrical constant-volume combustion chamber
 (b) a spherical constant-volume combustion chamber

이 실험에서 화염전파속도값은 위치오차 0.5 %, 시각 오차 1 %로 인하여 1.1 %의 오차를 갖는다.

연소시 순간압력은 압전식 압력계(piezoelectric pressure transducer ; Kistler 6121)로 측정하고 이 신호는 증폭기를 거쳐 역시 데이터 획득장치를 통해 PC에 저장한다. Fig. 2에 측정장치의 구성 개념을 보인다. 측정된 압력과 레이저 2선 굴절법을 이용해 화염 통과시의 포토다이오드 출력신호의 전형적인 예를 Fig. 3에 도시하였다.

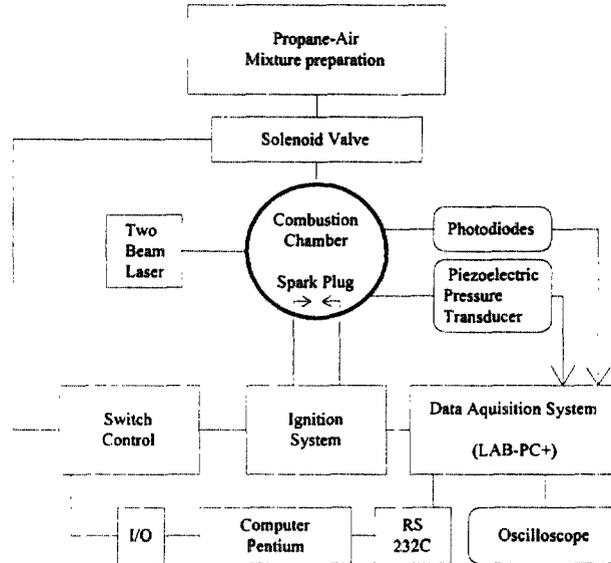


Fig. 2 Measurement systems

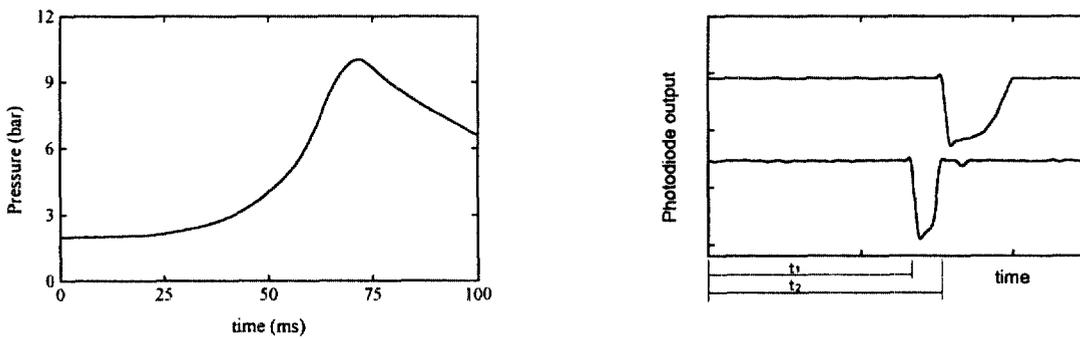


Fig. 3 Typical pressure and photodiode signals

측정된 압력으로부터 최고압력에 이르는 시간(t_{Pmax})을 찾고, Lewis 와 von Elbe[2]의 모델을 이용해 연소 질량분율을 계산하여 각 질량분율을 이루는 연소시간(combustion duration)을 계산하였다. 또한 측정된 압력과 화염전파속도로부터 다음의 식을 사용하여 연소속도를 계산하였다[11,12].

$$S_u = \frac{P}{P_e \left(\frac{P}{P_0}\right)} \frac{1}{\gamma_u} \left\{ \frac{dr_b}{dt} + \frac{r_b}{3\gamma_b P} \cdot \frac{dP}{dt} \right\} \quad (1)$$

S_u : 연소속도
 P_0 : 초기압력
 r_b : 화염반경
 γ_b : 기연가스의 비열비
 P : t 에서의 측정압력값
 P_e : 연소종료압력
 γ_u : 미연가스의 비열비

원하는 혼합비를 갖는 프로판-공기 예혼합비는 프로판과 공기 각각의 분압을 정확히 조절하여 제작하였다. Fig. 4에 혼합기를 제작하는 유로의 구성도를 보인다.

혼합기는 당량비(ϕ) 0.8 에서 1.2 사이의 값으로 제작하여 화염전파에 미치는 혼합기의 영향을 살펴보았다. 한편 회박 혼합기의 화염전파특성을 알아보기 위해 원통형 연소실에서 당량비 0.8 이하의 초회박 혼합기를 이용한 실험을 수행하였다. 혼합기는 대개의 경우 12 bar 로 제작하여 혼합기 탱크에 저장하였다가 압력조절 밸브를 통해 원하는 압력으로 연소실에 공급하였다.

화염전파에 미치는 압력의 영향을 알아보기 위하여 원통형 연소실 실험에서 초기압력(P_i)은 3 bar에서 9 bar까지 변화시켰으며, 구형 연소실의 경우에는 초기압력 2 bar일 때 연소속도 측정을 수행하였다. 연소실로 공급된 혼합기는 30초동안 정체시켜 화염전파가 충류상태로 진행하도록 하였다. 연소에 미치는 온도의 영향을 알아보기 위하여 원통형 연소실의 온도(T)를 22℃, 82℃, 150℃로 변화시켜가며 실험하였으며, 구형 연소실 실험의 경우 30℃를 유지하였다. 원통형 연소실의 경우 상용 왕복기관용 점화플러그를 사용하였으며, 구형 연소실에서는 1 mm 지름의 피아노선으로 전극을 만들어 전극간격이 연소실의 중심에 위치하도록 하였다. 실험의 일관성을 확보하기 위하여 전극간격은 1 mm로 유지하였으며 점화는 TCI (Transistorized coil ignition system)으로 행하였다.

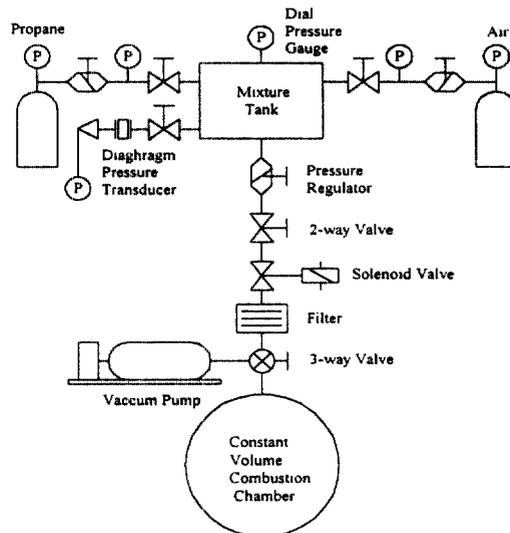


Fig. 4 Mixtures preparation system

3. 결과 및 고찰

3. 1 화염전파속도 측정

레이저 2선 굴절법을 이용하여 원통형 연소실에서 화염전파속도를 측정함으로써 혼합기의 초기압력, 초기 온도 및 혼합기의 영향을 살펴보았으며 그 결과가 Fig. 5~7 에 도시되었다. 점화전극을 지나는 연소실 중심선을 따라 측정된 화염도달 시간은 적어도 다섯 번 이상 측정된 값의 평균값을 나타내며 분산 정도는 2 % 이내인 것으로 밝혀졌다. 화염전파속도 역시 두 레이저 빔 사이의 평균 화염전파속도를 나타낸다. 모든 경우에 화염전파속도는 위치에 따라 1~2 % 범위 내의 변화를 보이며 이는 정적연소실 실험에서 화염전파속도가 연소실의 기하학적 모양과 혼합기의 물리량에 따라 달라지는 양상을 보인 경향과 일치한다[6,13]. 점화 당시의 혼합기의 압력, 온도, 혼합비 등은 화학반응에 영향을 미치고 이것은 곧 층류연소속도에 반영되어 이로 인해 화염전파속도가 달라지는 결과를 낳는다.

Fig. 5는 여러 혼합비의 혼합기에 대해 초기 혼합기 압력이 화염전파속도에 미치는 영향을 나타낸다. 화염전파속도는 압력 증가에 따라 감소하는 경향을 보인다. 연소속도는 압력에 의해 다음과 같은 간단한 지수 함수 형태로 영향을 받는다.

$$S_u \sim P^x \quad (2)$$

이 식에서 지수 x 는 연소가 느린 혼합기에 대해서는 0~-0.5의 값을 갖는 것으로 알려져 있다[8]. 이러한 경향이 화염전파속도에 그대로 반영된 것으로 보인다. 초기압력 3 bar의 경우 화염전파속도는 초기화염으로부터 증가하여 10~20 mm 반경에서 최대값을 보이고 감소해 나간다. 초기압력이 높아질수록 위치에 따른 화염전파속도의 변화는 작아져서 초기압력 9 bar의 경우 화염전파속도가 반경 15 mm 까지는 거의 일정하다가 이후 서서히 감소한다. 이러한 경향은 압력측정을 통해 계산한 연소시간의 결과에도 당연히 똑같이 나타난다(Fig. 5 (c)). 화염의 진행은 10 % 질량이 연소되는데 걸린 시간 t_{10} , 90 % 질량이 연소되는데 걸린 시간 t_{90} 및 최고압력에 도달하는데 걸린 시간 t_{pmax} 로 표현되었다. 초기압력이 높아지면 화염전파속도가 낮아지고 그로 인해 연소시간이 늘어나는 것으로 확인되었다.

초기혼합기의 온도가 화염전파속도에 미치는 영향이 Fig. 6 에 도시되었다. 온도가 증가하면 화염전파속도가 큰 폭으로 증가하고 이것은 연소시간 측정결과에도 일관성 있게 보인다. 이 역시 기본적으로 온도가 화학반응속도에 긍정적인 영향을 미쳐서 연소속도가 증가하게 되는 경향을 보인다. Dugger와 Heimeil [7]의 실험을 통해 다음과 같이 프로판-공기 혼합기의 연소속도는 온도의 제곱에 비례한다는 사실이 밝혀진 바 있다.

$$S_u = 0.10 + 3.42 \times 10^{-6} T^{2.0} \quad (3)$$

메탄-공기 혼합기의 경우에도 연소속도는 혼합기 온도의 제곱에 비례한다고 알려져 있다[14]. 이를 통해 연소기에서 화염전파속도를 증가시키는 방법으로 온도제어가 효과가 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 7에는 혼합기의 농도에 따른 화염전파특성이 보여지고 있다. 당량비 0.8~1.2에 이르는 화염전파속도 결과를 보면 혼합기가 희박해질수록 화염전파속도의 위치별 변화경향이 약해진다. 화염전파속도는 이혼합비나 약간 농후한 혼합기의 경우($\phi = 1.0 \sim 1.1$)에 최대값을 갖는 것으로 보이며 이는 연소시간 계산결과에도 나타나 있는데, 문헌 [3,4]에 따르면 $\phi = 1.05 \sim 1.10$ 사이에서 최대값을 갖는다는 사실을 반증한다. Fig. 7에 보이듯 대부분의 경우 초기화염 발달기간으로 볼 수 있는 10 % 질량분을 연소시간은 전체 연소시간의 35 % 정도를 차지하는데, 희박가연한계에 가까운 초희박 혼합비에서는 이 값이 45 % 까지 증가하는

것이 밝혀졌다. Fig. 8은 이러한 경향을 보여주는 그림으로서 회박한계근방에서 연소시간을 측정 한 결과이다. 초회박조건에서는 연소시간이 크게 증가하고 아울러 초기화염발달 시간이 차지하는 비율이 크므로 회박 연소의 안정성증진을 위해서는 초기 화염형성 및 발달을 증진시켜야 한다는 사실을 시사한다.

3.2 연소속도 측정

구형 정적연소실에서 초기압력 2 bar인 프로판-공기 혼합기에서 여러 당량비에 대하여 레이저 2선법으로 화염전파속도를 측정하고 측정 압력값을 이용하여 (1) 식을 이용하여 연소속도를 산출하였다. Fig. 9의 기호들은 측정, 계산된 연소속도를 보이고 있으며, 이 값들은 Metghalchi와 Keck [3,4] 의 다음 실험식과 비교되었다.

$$S_u = S_{u,0} \left(\frac{T}{T_0} \right)^a \left(\frac{P}{P_0} \right)^b \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서 } T_0 &= 298 \text{ K}, & P_0 &= 1 \text{ atm} \\ a &= 2.18 - 0.8(\varphi - 1), & b &= -0.16 + 0.22(\varphi - 1) \\ S_{u,0} &= B_m + B_\varphi(\varphi - \varphi_m)^2, & \varphi_m &= 1.08 \\ B_m &= 34.2 \text{ (cm/s)}, & B_\varphi &= -138.7 \text{ (cm/s)} \end{aligned}$$

(4)식은 많은 실험자료로 검증된 식으로서 일반화된 것으로 완벽한 식이라고는 볼 수는 없으나 일반적인 탄화수소계 연료의 공기혼합기에 대한 식으로서 타당성을 가지고 있으므로 비교자료로 삼았다. Fig. 9에 보이다시피 본 연구에서 측정된 연소속도 값은 타당성을 보이고 있어서, 레이저 2선법을 이용한 화염전파 측정법은 기존의 화염사진법을 대체하는 간편하고도 저렴한 방법으로 확인되었다. 그러나 레이저 2선법은 화염면이 굴곡되지 않은 층류면에 대해서만 주로 응용될 수 있다는 한계를 지니고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 광학창을 장착한 원통형 및 구형 정적연소실에서 프로판-공기 혼합기의 화염전파과정을 실험적으로 관찰하였다. 레이저 2선 굴절법을 이용하여 화염의 크기 및 화염전파속도를 측정하는 한편 측정 연소압력을 이용하여 연소속도를 측정하였다. 이러한 실험적 연구를 통해 얻은 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 레이저 2선법을 이용하여 화염전파속도를 재현성 있게 얻을 수 있었으며 정적연소실 내의 화염전파는 시간, 공간에 따라 속도가 변하는 양상을 보였다.
2. 초기 혼합기 압력이 낮을수록, 온도가 높을수록 화염전파속도가 빠르게 나타났다.
3. 이론혼합비나 약간 농후한 혼합기에서 화염전파속도가 최대값을 보였다. 한편 회박가연한계 부근의 초회박 혼합기의 경우 연소시간이 급격히 증가하였으며, 초기 화염발달 시간의 비중이 커졌다.
4. 측정압력 및 화염전파속도로부터 구한 연소속도값은 타당한 값을 보였다. 따라서 레이저 2선법이 화염가시화법을 대체할 수 있는 유용한 방법으로 확인되었다.

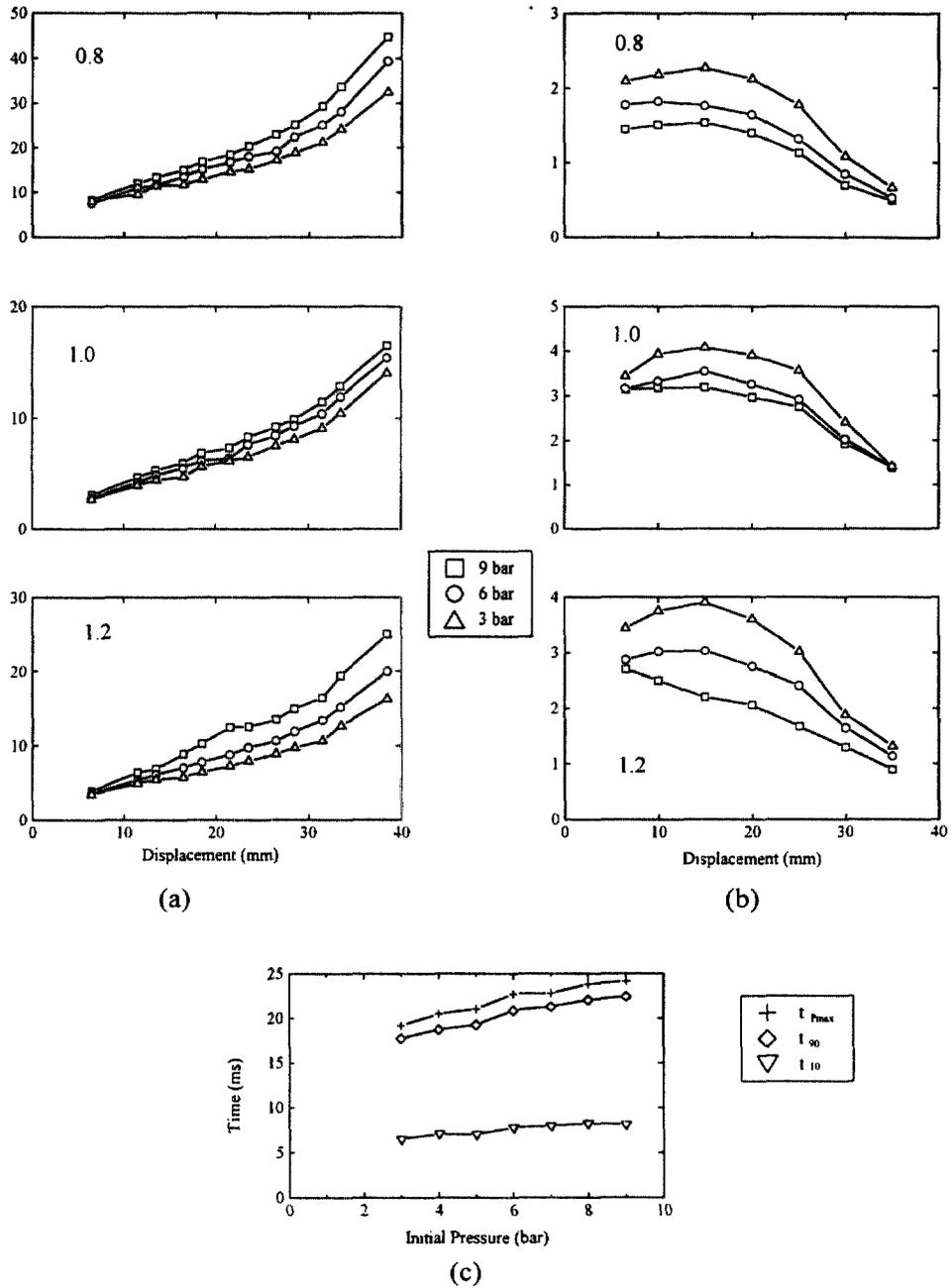


Fig. 5 Effect of initial pressure on flame propagation in a cylindrical combustion chamber
 ($T = 150^\circ\text{C}$)
 (a) flame front travel (b) flame propagation speed
 (c) combustion duration

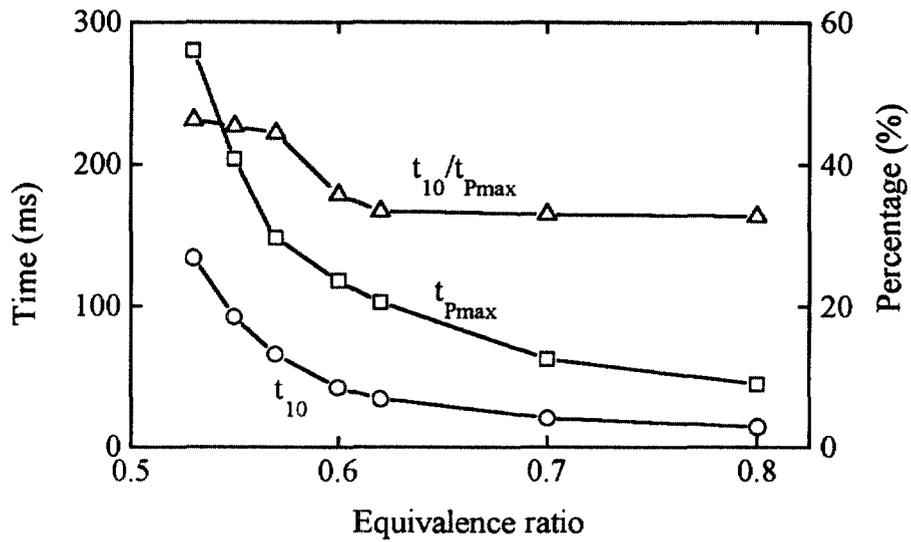


Fig. 8 Combustion duration near lean ignition limit in a cylindrical combustion chamber
 ($P_i = 6 \text{ bar}$, $T = 150 \text{ }^\circ\text{C}$)

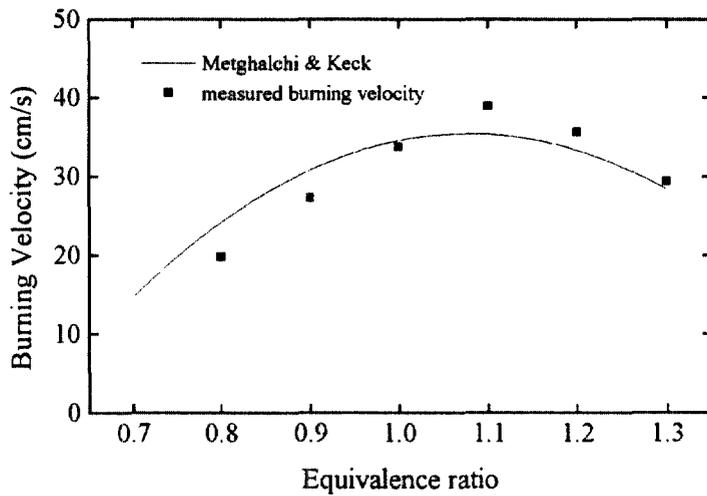


Fig. 9 Burning velocities of propane-air mixture measured in a spherical combustion chamber
 ($P_i = 2 \text{ bar}$, $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$)

참고문헌

- [1] Gaydon, A. G. and Wolfhard, H. G., 1979, *Flames ; Their structure, Radiation and Temperature*, 4th ed., Chapman and Hall.
- [2] Lewis, L. and von Elbe, G., 1961, *Combustion, Flames and Explosions in Gases*, 2nd ed., Academic press.
- [3] Metghalchi, M. and Keck, J. C., 1980, Laminar Burning Velocity of Propane-Air Mixtures at High Temperature and Pressure, *Combustion and Flame*, Vol. 38, pp143-154
- [4] Metghalchi, M. and Keck, J. C., 1982, Burning Velocities of Mixtures of Air with Methanol, Isooctane and Indolene at High Pressure and Temperature, *Combustion and Flame*, Vol. 48
- [5] Lefebvre, A. H. 1983, *Gas Turbine Combustion*, McGraw-Hill
- [6] Ghoniem, A. and Knio, O. M., 1986, Numerical Simulation of Flame Propagation in Constant Volume Chambers, 21st Symposium on Combustion
- [7] Dugger, G. L. and Heimel, S., 1952, Flame Speeds of Methane-Air, Propane-Air and Ethylene-Air Mixtures at Low Initial Temperature, NACA TN 2624.
- [8] Andrews, G. E. and Bradley, D., 1973, Determination of Burning Velocity by Double Ignition in a Closed Vessel, *Combustion and Flame*, Vol 20
- [9] Foster, D. E. and Witze, P. O. 1988, A Comparison of Flame Detection Techniques for Premixed-Charge Combustion in Spark Ignition Engines, *Experiments in Fluids*, vol 6: p283
- [10] Arcoumanis, C. and Bae, C-S., 1992, Correlation between Spark Ignition Characteristics and Flame Development in a Constant Volume Combustion Chamber, SAE Paper 920413.
- [11] 양 수 석, 1985, 구형 정적연소실을 이용한 프로판-공기 예혼합기의 연소속도 측정과 그에 미치는 습도의 영향, 서울대학교 석사학위논문
- [12] Rallis, C. J and Tremeer, G. E. B., 1963, Equations for the Determination of Burning Velocity in a Spherical Constant Volume Vessel, *Combustion and Flame*, Vol. 7, pp 51
- [13] Binder, K. and Maly, R., 1986, Effects of Ignition and Turbulence on Flame Speed at High Pressures and Temperatures, Proc. of the XXI FISITA Congress, Paper 865036
- [14] Hattori, T., Goto, K. and Ohigashi, S., 1979, Study of Spark Ignition in Flowing Lean Mixtures, IMechE Paper C101/79