

〈논 문〉

## 천연가스의 연소속도 측정에 관한 실험적 연구

유현석\* · 한정옥\* · 방효선\*

(1996년 1월 13일 접수)

### An Experimental Study on the Burning Velocity Measurement of Natural Gas

You Hyun-Seok, Han Jeong-Ok and Pang Hyo-Sun

**Key Words :** Laminar Burning Velocity(층류연속속도), Static Flame(정지화염), Non-Static Flame(비정지화염), Conical Flame(원추형화염), Constant Volume Combustion Chamber(정적연소기), Natural Gas Combustion(천연가스 연소)

#### Abstract

Static and non-static flame methods were used to measure the laminar burning velocity of methane, ethane and natural gas. The flame slot angle and velocity of unburned gas mixture were determined by Schlieren method and LDV, respectively, for static flame. The diameter of nozzle was selected as 11mm. The experimental results containing the stretch effect showed that the maximum burning velocities were 41.5 for natural gas, 40.8 for methane and 43.4cm/sec for ethane on equivalence ratio of 1.1. Constant volume combustion chamber was also used for non-static flame. The propagation process of flame front was visualized by high speed camera during constant pressure. The maximum burning velocity of natural gas was determined as 42.1cm/sec on equivalence ratio of 1.15.

#### 1. 서 론

천연가스의 사용이 점차 증대되면서 이용기기의 종류와 방법 등이 다양화되고 있으며 이에 따라 천연가스에 대한 물성뿐 아니라 연소물성에 대한 기본적인 자료의 필요성이 증대되고 있다. 특히 연소물성치 중의 하나인 연소속도(burning velocity)는 연료성분, 당량비 및 온도 압력에 관련되는 특성치로써 연소과정을 이해하는데 중요한 인자이다. 연소속도의 측정방법은 크게 화염대가 정지한 상태에서 측정하는 정지화염법과 화염대가 이동하는 상태에서 측정하는 비정지화염법으로 구분된다.

비정지화염법(non-static flame method)에는 튜브

방법, 비누방울법, 정적연소기, 화염핵 전파법 등이 있으며, 측정방법은 순간적으로 전파하는 화염을 고속촬영기법으로 가시화하여 연소속도를 구하는 방법이다. 이때 고속촬영으로 구한 화염전파 속도에는 기연가스의 온도 상승에 의한 팽창속도가 포함되어 있으므로 이 영향을 고려하여야 한다. 정적연소기의 경우 화염 생성 초기에는 압력 변화가 매우 작으므로 정압과정으로 가정하면 팽창속도로부터 간단히 연소속도를 구할 수 있다.

정지화염법(static flame method)은 버너 등의 부착장치를 통해 정지화염을 형성한 후 미연혼합기의 유속과 화염이 이루는 각도나 화염 면적을 측정하여 연소속도를 계산하는 방법이다. 비정지화염법에 비하여 실험장치가 간단하며 steady 상태에서 측정할 수 있다는 점이 장점이다.

50, 60년대에는 주로 연소속도 측정방법론적인

\*한국가스공사 연구개발원

접근이 이루어졌으며, Karlovitz가 유동장의 속도 구배나 화염곡률 등으로 인해 화염대의 신장(stretch)이 발생된다는 이론적 발표 후에 연소속도와 화염부착기구에 대한 stretch의 영향에 대해 많은 연구가 이루어져 왔다.

Reed<sup>(1)</sup> 등은 stretch와 blow-off의 상관관계에 대하여 조사를 했으며, 최근에 Law 등<sup>(2,3)</sup>은 stretch의 영향을 배제한 연소속도 데이터를 얻기 위해 대향류 평면화염 유동장 분석을 통하여 외삽에 의해 stretch가 제로인 연소속도를 구하였다. 한편, Maaren<sup>(4)</sup> 등은 Law의 선형외삽으로 구한 연소속도는 실제의 연소속도보다 높게 나타내주므로, 이를 보완하기 위해 stretch가 없는 일차원 평면화염을 형성한 후 상류로의 열손실을 측정하여 보정하는 열손실방법 결과를 제시하였으며 메탄-공기의 경우, Law의 결과치보다 약 7% 정도 낮게 측정되었다.

본 실험에서는 오리피스형 예혼합연소기인 원추 화염 버너(conical flame burner)와 정적연소기(constant volume combustion chamber)를 이용하여 천연가스 및 순수 메탄과 에탄에 대한 연소속도를 측정하고 조성 및 측정방법들에 대한 결과를 비교 검토하였다. 여기에 화염의 스트레치(stretch)에 대한 영향은 고려하지 않았으며 측정된 결과와 스트레치 효과를 배제한 Law 등의 결과를 비교하여 스트레치의 영향을 조사하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 정지화염법

Fig. 1에 실험에 사용된 원추화염버너의 개략도가 나타나 있다.

원추화염버너의 노즐은 오리피스형으로 제작하였고, 노즐의 단면형상은 원형( $r_0=5.5\text{mm}$ )으로 제작하였다. 화염에 의해 가열된 노즐에 미연혼합기

가 예열되는 것을 방지하기 위해 노즐 주위에 냉각장치를 설치하였다.

노즐로 유입되는 미연혼합기의 유로형상은 원통으로 내경 50mm, 길이를 1000mm로 했으며 유동상류측에 유동을 균일하게 유지시키기 위해 honeycomb을 설치하였다. 연소 초기조건 측정을 위해 온도 및 압력측정구를 예혼합기 위치에 설치하였다.

화염면은 Schlieren 방법을 이용하여 가시화하였고, image processor를 이용하여 화염 원추각도(flame cone angle,  $2\alpha$ )를 측정하였다. 미연가스속도( $U_u$ )는 LDV를 사용하여 측정하였으며 화상 데이터와 동시에 얻었다. 이들 결과로부터 연소속도( $S_u$ )는 아래 식에 의해 결정하였다.

$$S_u = U_u \sin \alpha \quad (1)$$

실험에 사용된 천연가스의 조성과 주요 물성치를

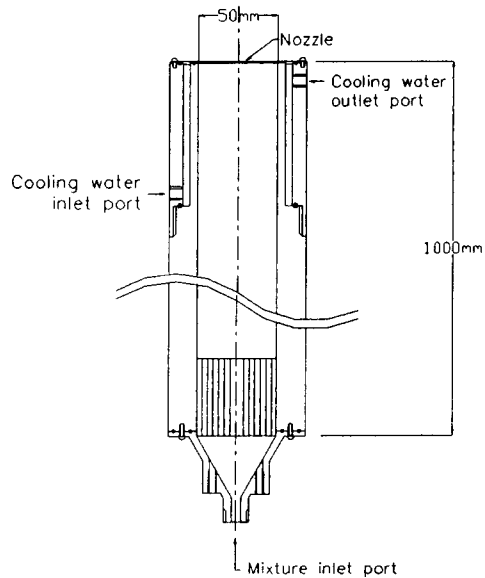


Fig. 1 Schematic diagram of conical flame burner

Table 1 Compositions and major properties of natural gas employed in experiment

(Indonesian)

Composition	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	N <sub>2</sub>
Vol. %	89.78	7.48	2.02	0.36	0.34	0.02
HHV	10,467 (Kcal/Nm <sup>3</sup> )					
S · G	0.62 (Air : 1.0)					

Table 1에 나타냈다. 천연가스의 주성분은 메탄(CH<sub>4</sub>)으로써 공기보다 가벼우며 도시가스의 주 원료로 사용된다. 또한 실험에 사용된 메탄과 에탄은 단일 가스로서 99.999%이다.

## 2.2 비정지화염법

본 연구에서 연소속도 측정을 위하여 사용한 정적연소기를 Fig. 2와 같이 설계하여 제작하였다.

정적연소기는 크기가 140(w)\*140(h)\*170(l)이며 직각방향에서 화염의 전파 과정을 관찰하기 위해 사면에 관측창을 설치하였다. 관측창은 내열성과 강도가 우수한 quartz로써 유효직경이 80mm, 두께는 25mm를 사용하였다. 연료가스 흡입구와 배기구는 솔레노이드(solenoid) 밸브에 의해 동작되도록 하였다.

점화에너지를 정적연소기의 중심부에서 공급해 주기 위해 TCI(Transistor Controlled Ignition) 점화장치를 설치하였으며 방출에너지는 약 28mJ이

다. 연소압력 측정을 위해 piezo-electric형 압력센서를 설치하였고 신호증폭기로 charge amplifier를 사용하였다.

화염전파과정의 가시화를 위해 Shadowgraph 방법을 사용하였으며 Fig. 3에 실험장치의 개략도가 나타나 있다.

화상데이터는 35m/m Drum Camera를 사용하여 pulse형 광원과 동기시켜 점화 초기부터 화염 전파 과정을 기록하였다. 점화시기, 화상데이터 및 연소 압력데이터 취득 등은 정확히 동시에 이루어져야 하므로 트리거 신호에 의해 조절되도록 시간지연 회로를 구성하였으며 트리거 신호는 미연혼합가스가 정적연소기에서 완전히 정지된 후에 작동시켰다. 압력데이터는 PC로 구성된 data acquisition system으로 일정 시간 간격으로 수집하였다.

정적연소기에 화염 전파과정시 압력구배가 작고 기연가스와  $PV^{r_b} = Const.$ 을 만족한다고 가정하면 질량보존식으로부터 연소속도( $S_u$ )는 다음과 같이 표시될수 있다.

$$S_u = \frac{\bar{\rho}_b}{\rho_u} \left( S_s + \frac{r_b}{3\gamma_b P} \frac{\partial P}{\partial t} \right) \quad (2)$$

$\bar{\rho}_b$  : mean density of burned gas

$\rho_u$  : unburned gas density of initial conditions

$\gamma_b$  : ratio of specific heat of burned gas

$S_s$  : flame propagation speed

$r_b$  : flame radius

$P$  : pressure of burned gas

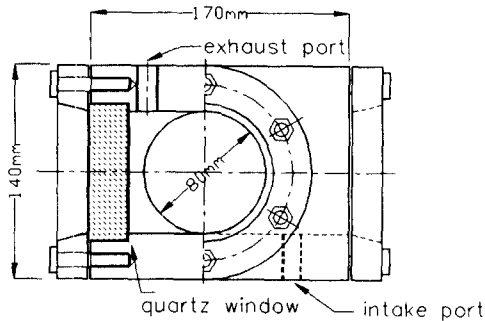


Fig. 2 Experimental apparatus for the determination of burning velocity(constant volume combustion chamber)

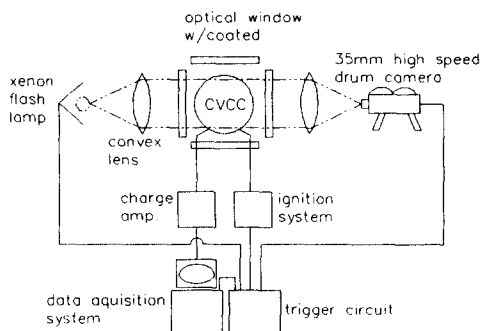


Fig. 3 Schematic diagram of shadow photography to visualize the flame propagation

여기서 화염 진행 초기의 압력 변화가 거의 없다면 압력구배를 무시할 수 있으므로 정적연소기에서

Table 2 Summary of methane-air density ratios with various mixture conditions( $p=1$  atm,  $T=298 \pm 3K$ )

Equivalence ratio	Density ratio ( $\rho_u / \rho_b$ )
0.6	4.33
0.7	4.77
0.9	5.57
1.0	5.93
1.1	5.59
1.2	5.23
1.35	4.69

의 연소속도와 화염 전파속도는 다음과 같이 간략하게 표시될 수 있다.

$$S_u = \frac{\rho_b}{\rho_u} S_s \quad (3)$$

본 실험에서는 밀도비 결정을 위해서 Tseng 등<sup>(5)</sup>이 제시한 메탄-공기화염에서 당량비 변화에 따른 밀도비를 이용했으며 Table 2에 나타나 있다.

추정된 연소속도는 Byren<sup>(6)</sup>이 제안한 다음 식을 이용하여 정상상태온도(20°C)로 보정하였다.

$$S_{u(293.15K)} = S_{u(T)} + 0.000742 T (293.15 - T) \quad (4)$$

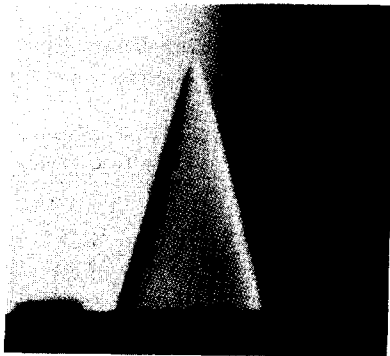
### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 정지화염법

Conical flame의 직접촬영사진과 Schlieren 사진이 Photo 1에 나타나 있으며 오리피스형의 노즐



(a) Luminous flame



(b) Schlieren flame

Photo 1 Photographs of luminous and Schlieren images ( $\phi=1.2$ )

효과( $\partial u/\partial r=0$ )로 화염대가 선형적임을 볼 수 있다.

Fig. 4는 화염장에서 반경방향에 따른 축방향 유속 분포이다. 미연가스의 plug flow 분포를 위해서 실험장치에 적용한 오리피스형 노즐형태가 적절함을 볼 수가 있다. 그러나 화염대의 영향으로 노즐 출구 부근( $z=2\text{mm}$ )의 유속분포는 단면에서 일정하지 않은 특성을 보이고 있으며 노즐 출구로부터 4~5mm 지점, 즉 노즐반경과 축방향 거리비( $z/r_0$ )가 0.7~1.1 부근에서 일차원 유속분포를 나타내고 있으며 원추화염 끝으로 갈수록 부력 효과로 유속은 선형적으로 증가하고 있다. 따라서 화염대 유입 전의 미연혼합기 유속을 측정하기 위해서는 노즐 출구로부터 거리( $z/r_0$ )가 1.0 정도가 적절한 위치임을 알 수 있다.

Fig. 5에 동일한 당량비 조건에서 일차원 원추화

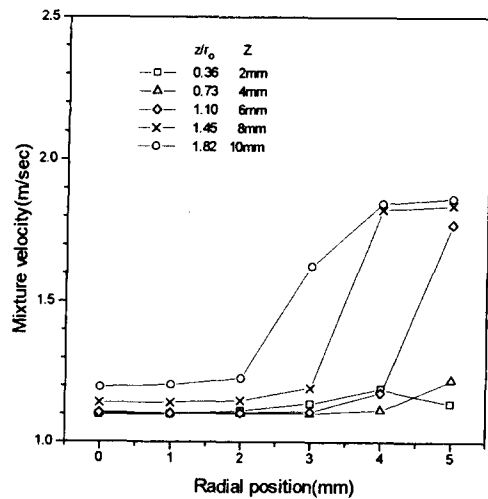


Fig. 4 Axial velocity of CH<sub>4</sub>-air mixtures versus radial position in the conical flame ( $\phi=1.2$ ,  $Q_f=560\text{cc/min}$ )

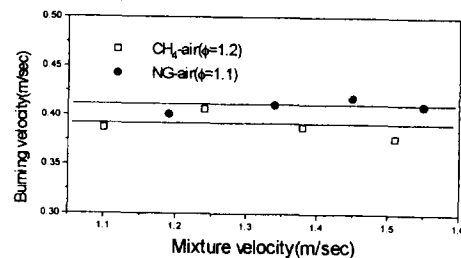


Fig. 5 The burning velocity of CH<sub>4</sub>, NG-air mixtures versus mixture velocity

염이 형성되는 조건에서 유량에 따른 연소속도 영향을 조사하였으며 보인 바와 같이 유속변화에 따른 연소속도는 영향이 없는 것으로 나타났다. 이는 오리피스형태의 노즐로 인해 노즐로부터 미연가스의 예열효과가 거의 없고, 화염대의 영향이 비교적 적은 위치( $z/r_0=1.0$  부근)에서 미연가스의 유속을 측정된 결과로 보인다.

당량비에 따른 메탄, 천연가스, 에탄의 연소속도 결과를 Fig. 6에 나타냈다. 천연가스의 주성분은 Table 1에서 볼 수 있는 것처럼 메탄( $\text{CH}_4$ )이 주

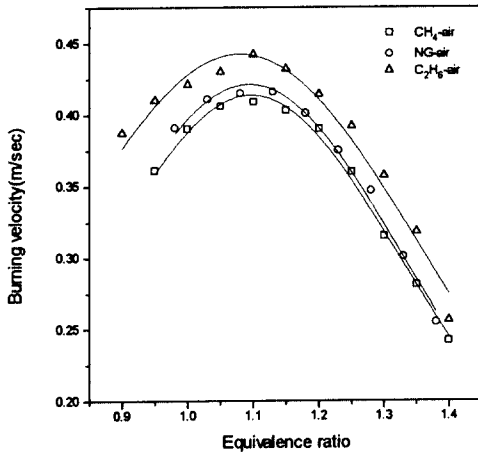


Fig. 6 The laminar burning velocities for various gas-air in the conical flame as a function of equivalence ratios ( $20^\circ\text{C}$ , latm)

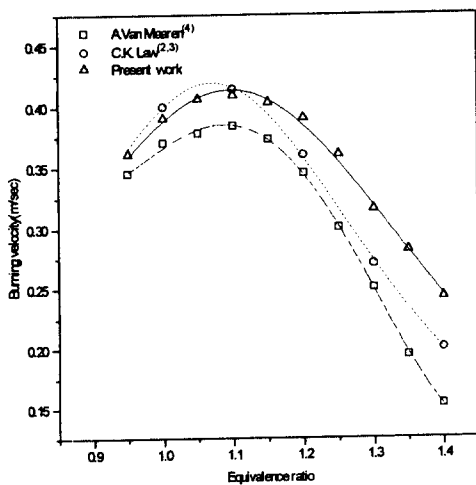


Fig. 7 Comparisons of laminar burning velocities between present and reference data for  $\text{CH}_4$ -air mixture

성분( $\sim 90\%$ )이며 약 7~8%의 에탄( $\text{C}_2\text{H}_6$ )이 포함되어 있으며 연소속도의 크기는 메탄, 천연가스, 에탄 순으로 변하고 있음을 볼 수 있다. 천연가스가 메탄과 에탄을 포함한 혼합가스임을 고려할 때 연소속도의 크기변화는 타당한 결과라 판단된다. 또한 최고 연소속도의 당량비가 모두 1.1 위치에서 발생하며 천연가스의 연소속도는 순수한 메탄과 에탄의 사이값을 가지며 이들 가스의 연소속도와 일정한 관계가 유지됨을 알 수 있다.

한편, 당량비 0.9 이하의 희박한 혼합기조건에서 오리피스 노즐에서 낮은 열발생률로 인해 화염의 불어날림 (blow out)이 발생하여 측정하지 못하였다.

Fig. 7에 stretch를 고려한 메탄과 에탄의 연소속도 결과(Maaren, Law)를 본 실험의 결과와 비교하였다. 화염의 stretch 효과를 제거한 Law의 결과와 실험 결과를 비교해 볼 때 당량비 1.0 부근에서는 서로 차이가 없지만 과농영역에서는 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 이것은 상대적으로 연소속도가 작은 과농영역에서 stretch 효과 및 2차공기 유입에 따른 유동효과 등으로 Law보다 큰 연소속도를 보이는 것으로 판단된다.

### 3.2 비정지화염법

Photo. 2는 천연가스에 대해 당량비가 1.1인 조건에서 정적연소기 내부의 화염 전과과정을 고속 사진으로 촬영한 결과이다. 점화 후 화염형태는 구

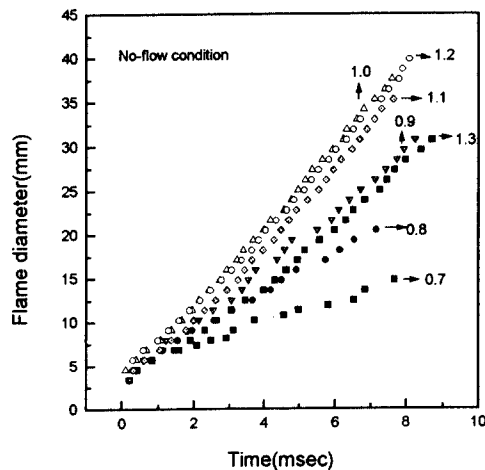


Fig. 8 Variations of flame diameter during the explosion of quiescence mixtures in CVCC at various equivalence ratios

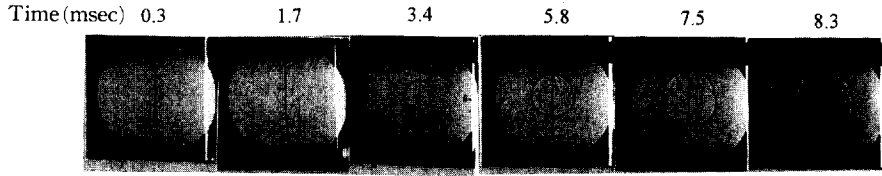


Photo 2 Schlieren images of propagating flame in CVCC ( $\phi=1.2$ )

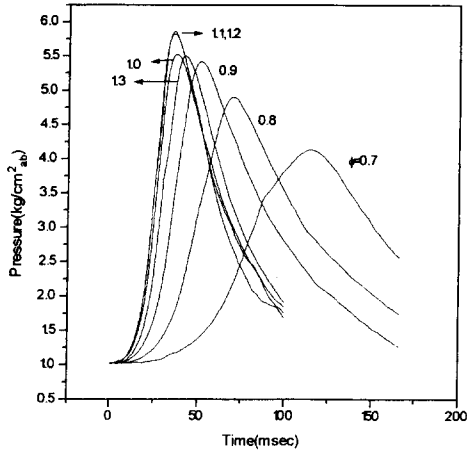


Fig. 9 Variations of combustion pressure with time at several equivalence ratios in CVCC

형으로 전과되며 내부유동이 없는 조건이다. 공연비 변화에 따른 화염 직경 변화를 화상처리를 통하여 Fig. 8에 나타냈다. 이론 혼합기 근처( $\phi=1.0\sim 1.2$ )에서 시간에 따른 화염직경 변화가 높은 것을 볼 수 있으며, 혼합기가 lean( $\phi=0.7$ )한 경우 열 발생률이 낮아 상대적으로 화염직경 변화율이 작게 나타나고 있다. 정적 연소기 방법은 초기 화염 전과 기간동안 압력 변화가 매우 작고 화염의 크기 변화는 크기 때문에 특히 연소 속도가 빠른 연료의 경우의 화염 전과 속도를 구하는 것이 효과적인 것으로 알려져 있다.

Fig. 9에 화염이 진행되는 동안 정적연소기내의 압력변화를 도시하였다. 화염직경 변화와 같이 이론 혼합비부근에서 최고압력이 높고 도달시간이 짧은 것을 볼 수가 있으며, 희박한 영역( $\phi=0.8\sim 0.7$ )에서는 열발생률 저하로 최고압력 및 도달시간이 급격히 떨어짐을 볼 수가 있다. 그리고 가시화부로부터 관찰된 화염 전과 기간동안( $\sim 8m/sec$ ) 압력은 거의 정압과정을 유지하고 있다. 이는 연소속도 계산시 정압 조건인  $dp/dt=0$ 을 만족하고 있음을 알 수 있다.

따라서 식 (3)를 이용하여 화염전과속도( $S_b$ )와

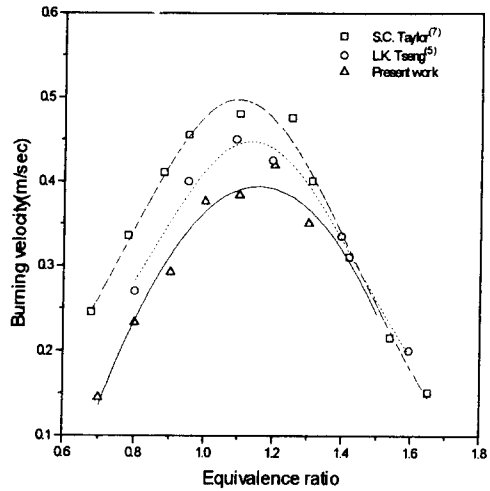


Fig. 10 Laminar burning velocities for NG as compared with the reference data for  $CH_4$  in CVCC technique as a function of equivalence ratios

Table 3 Flame and burning velocity measured in CVCC with NG-air mixtures at various equivalence ratio ( $\phi$ )

$\phi$	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3
$\rho_u/\rho_b$	4.77	5.15	5.57	5.93	5.59	5.23	4.87
$S_s$ (m/s)	0.685	1.17	1.63	2.24	2.15	2.2	1.62
$S_u$ (cm/s)	14.36	23.4	29.26	37.77	38.46	42.06	35.21

Tseng<sup>(6)</sup>가 제시한 밀도비( $\rho_u/\rho_b$ )를 이용하여 당량비에 따른 층류연소속도를 구한 결과가 Table 3에 나타나 있다. 한편 정적연소 실험의 경우 초기점화 에너지는 안정된 화염핵을 형성시키는데 중요하지만 화염핵 형성 이후에는 방전에너지는 화염전과에 영향을 주지 않는 것으로 알려져 있다. 본 실험의 경우 점화방법은 자동차용 점화장치를 이용하였으며 최소점화에너지 이상의 에너지를 공급하였다.

당량비에 따른 연소속도를 Fig. 10에 정리하였다. Taylor, Tseng 등의 경우 메탄-공기 혼합기

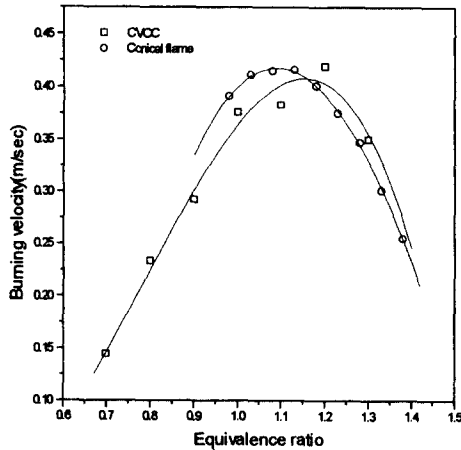


Fig. 11 Comparisons of NG laminar burning velocities measured using conical flame burner and constant bomb methods

에 대한 실험치로 정적연소기에 대해 얻은 결과이다. 측정결과 마다 약간의 차이는 있지만 당량비 변화에 따른 경향은 비슷함을 알 수 있다.

측정방법에 따른 특징으로 정적 연소기 방법이 분젠 버너 방법보다 실험장치는 복잡하나 희박한 영역의 연소속도까지 측정할 수 있음을 확인할 수 있다.

원추화염 방법과, 정적 연소기로 측정된 천연가스의 연소속도를 Fig. 11에 비교하였다. 정적연소기 방법으로 구한 최고 연소속도의 위치가  $\phi=1.15$ 에서 발생하고 원추화염법보다 약간 과농한 쪽으로 치우쳐 있으며 상대적인 차이가 약 6% 정도 있음을 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

천연가스 및 단일가스의 연소속도를 실험적으로 측정하기 위해서 원추화염과 정적연소기를 이용하여 일련의 실험을 통한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 원추화염의 경우, 노즐속도 변화에 따른 연소속도차이는 없었으며, 메탄, 천연가스, 에탄에 대해 당량비 1.1 부근에서 최대연소속도는 40.8,

41.5, 43.4 (cm/sec)를 얻었다.

(2) 원추화염에서, 노즐 출구로부터 일정 단면에서의 미연 혼합기 축방향 유속은 노즐 출구로부터 4~5mm 부근에서 반경방향에 따라 일정하게 나타났으며 후류로 갈수록 점차 증가하였다. 따라서 노즐 출구속도는 출구로부터 화염대 영향을 받지 않는 일정 높이에서 측정하는 것이 중요하다.

(3) 정적연소기를 사용한 연소속도 측정에서 초기화염 전파기간 동안 정압이 유지되었으며 희박한 영역( $\phi=0.7$ )까지 측정이 가능하였다.

(4) 측정방법이 다른 연소속도는 6% 이내에서 일치하였으며 정적연소기의 경우 최대연소속도는 당량비( $\phi$ )가 1.15로 원추화염법보다 다소 과농(rich)한 조건에서 발생하였다.

#### 참고문헌

- (1) Stuart, B. Reed, 1967, "Flame Stretch-A Connecting Principle for Blow-Off Data," *Combustion and Flame*, Vol. 11, pp. 177~189.
- (2) Law, C. K., 1986, "Propagation and Extinction of Stretched Premixed Flames," *21th Symposium on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1419~1426.
- (3) Law, C. K., 1988, "Dynamics of Stretched Flames," *22th Symposium on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1381~1402.
- (4) Van Maaren, A., 1994, "Measurement of Flame Temperature and adiabatic Burning Velocity of Methane-air Mixtures," *Comb. Sci. and Tech*, Vol. 96, pp. 327~344.
- (5) Tseng, L. K. and Ismail, M. A., 1993, "Laminar Burning Velocities and Markstein Numbers of hydrocarbon-Air Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 95, pp. 410~426.
- (6) Byrne, J., 1953, *4th Symposium on Combustion*. The Williams and Wilkins Company, Baltimore, pp. 345~348.
- (7) Taylor, S. C., 1991, Ph. D. Thesis, University of Leeds.