

## 이차원 V 화염의 기본 유동장과 안정화 특성

박장희\* · 이대근\* · 신현동\*\*† · 김문언\*\*

### Basic flow fields and stability characteristics of two dimensional V flames

Jang Hee Park\*, Dae Keun Lee\*, Hyun Dong Shin\*, Moon-Uhn Kim\*

#### ABSTRACT

Basic flow fields of two dimensional V flames were examined as a preliminary work to study the instability of premixed flame with vorticity generation. Laminar premixed propane and methane flame were anchored by electrically heated wire to make two dimensional V flames. Flow fields were measured mainly by PIV(Particle Image Velocimetry) and the results were compared with those obtained by LDV(Laser Doppler Velocimetry) to confirm their reliability. Because the curvatures of V flames are so small, V flames were locally assumed to be inclined planar flames in gravitational field. The measured flow fields were locally compared with those of analytical solutions, which showed the qualitatively similar results. In downstream region, the vorticity fields were nearly constant except region near the center line, which support the assumption of locally one dimensional flame. Besides it was tried to find experimentally the similarity of flow fields in downstream region. Finally, stability diagram of propane and methane flames were drawn for the equivalence ratio less than one and the wide range of mean velocity.

**Key Words** : V flame, Tangential velocity, Normal velocity, Vorticity, Similarity

#### 기 호 설 명

$\phi$	Equivalence ratio	$\phi_f$	Angle of flame
$U_L$	Laminar burning velocity	$V_m$	Mean velocity
$\rho$	Density	$r$	Dim'less density
$\theta$	Dimensionless temperature	$\psi$	Dim'less mass fraction
$\Lambda_L$	Eigen value of reaction rate	$F(\theta, \psi)$	Dim'less Arrhenius reaction rate
$(x, y)$	Coordinates fixed at a wire	$(n, t)$	Local coordinates
$\gamma$	Expansion parameter( $1 - T_{u,0}/T_{b,0}$ )	$D_{th}$	Thermal diffusivity
• subscript			
	$u$ : unburned state		$b$ : burned state

\* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

\*\* 한국과학기술원 기계공학과

† 연락처자, hdshin@kaist.ac.kr

## 1. 서론

예혼합 화염의 안정성에 관하여 지금까지 많은

결과들이 보고 되어 있다. 먼저 화염면의 발열반응은 유동장과의 상호작용을 통해 화염면을 항상 불안정화 시키는 요인으로 작용하며 이를 Darrieus-Landau 불안정성이라 한다[5,9]. 두 번째, 얇은 화염대 내부에서는 온도장과 농도장의 급격한 변화가 발생함에 따라 열과 물질 전달이 활발하게 일어나며, 두 가지 전달량의 차이가 화염면의 안정성에 영향을 미치게 된다. 따라서 열과 물질 전달계수의 비, Lewis 수가 중요한 변수가 되며 이를 열-물질 확산 불안정성이라 한다[1,2,13]. 마지막으로 발열반응으로 인해 밀도가 낮아진 기연가스는 중력장 하에서 부력을 받게 되므로 화염면이 반중력방향으로 전파하는 경우, 즉 기연가스가 미연가스의 아래쪽에 위치하는 경우 부력은 화염을 불안정화 시키게 되며 이를 Rayleigh-Taylor 불안정성이라 한다[2].

이론적인 측면에서 불 때 이와 같은 화염 불안정성에 관한 연구는 수학적인 어려움으로 인하여 미연가스의 유동방향에 대해 화염이 수직하게 놓여있는 수직 평면화염으로 국한되었다. 따라서, 화염 외부 유동장의 영향은 최소화 되었다. 그러나 일반적인 화염은 층류의 경우일지라도 와도 생성을 수반하여 복잡한 유동을 보인다는 것이 잘 알려져 있다[3,8]. 따라서 외부 유동장이 화염 안정성에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 적절한 연소장의 선택이 중요하다.

본 연구에서는 이를 위한 선행연구로서 가느다란 열선에 의해 부착된 2차원의 V 화염을 채택하여, 실험적으로 그 기본 유동장을 파악하고 안정화 특성을 살펴 보았다. 기본적으로 속도장 측정은 PIV를 사용하였으며, LDV를 사용하여 얻은 결과와 비교함으로써 그 신뢰성을 확보하였다. 또한 관찰된 2차원 V 화염의 곡률이 매우 작다는 사실로부터, 실험적으로 계측된 외부 유동장과 화염에 의해 생성된 와도장을 중력장 하에서 기술어진 평면화염의 해석적인 해와 비교하였다. 그리고 V 화염이 가지는 기하학적 단순성으로부터 전체적인 외부 유동장의 상사성을 찾고자 하였다. 마지막으로 프로판과 메탄을 사용하여 당량비 (0.45~0.92)와 수축노즐 출구에서의 평균 유속(20~90cm/s)을 변화시켜 가면서 화염의 안정화 특성을 관찰하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

실험에 사용된 버너의 개략적인 구조는 Fig. 1과 같다. 유량 제어를 위해 MFC (Mass Flow Controller)가 사용되었고, 각각 제어된 연료와 공기가 혼합 챔버에서 1차적으로 혼합되고, 버너 안에서 한번 더 혼합되어진다. 버너부분에서 균

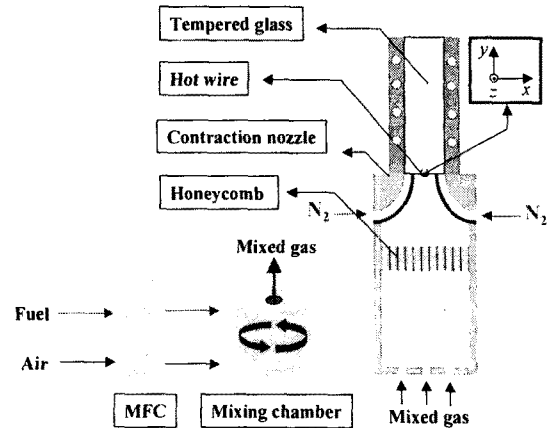


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

일한 유속을 얻기 위해 허니콤(Honeycomb, 196pixel/inch<sup>2</sup>)과 축소형 노즐 (Contraction, 면적비=4:1)이 사용되었다. 허니콤은 균일 유속을 갖도록 해주는 동시에 혼합기체가 버너 안으로 역화되는 것을 방지하기도 한다. 축소형 노즐 끝단의 면적은 62mm × 40mm이며, V 화염을 부착하기 위해 축소형 노즐 끝단에서 높이 20mm에 열선(Kanthal wire, 직경 0.4mm)을 부착했다. 축소형 노즐 사방에 주위류 슬롯(두께 4mm)을 설치하고, 불활성 기체인 질소를 공급하여 화염이 벽면에 탈부착되는 영향을 제거하였다. 버너의 벽면은 두께 30mm의 두랄루민을 사용하였고, 강화유리로 화염 가시화 창을 만들었다.

### 2.2 실험 방법 및 조건

유동장을 계측하기 위해서 1 $\mu$ m의 산화 알루미늄( $Al_2O_3$ ) 입자를 투입하여 유동과 함께 흘러가도록 하고 LDV system(Ar-Ion Laser, 5W, 514nm)과 PIV system(ND-YAG Laser, 532nm)을 이용하여 이차원 유동장을 계측하였다. 비반응 유동장 계측은 공기만을 사용했으며, 반응 유동장과의 비교를 위해서 열선을 그대로 장착한 채  $V_{in}$ =30, 40, 50 cm/s,  $y$ =10, 20, 30, 40mm에서 이루어 졌다. 반응 유동장의 계측을 위한 혼합기체는 공기와 99% 이상의 순도를 가지는 프로판을 이용했다. PIV에 의한 정확한 속도장을 얻기 위해 본 실험에서는 PIV를 이용한 속도값의 오차의 정도로 LDV를 이용한 데이터와 비교하였고 오차 범위가 5% 이내에서 실험을 수행하였다. 또한 이차원 V화염의 안정화 특성을 검토하기 위해 프로판과 메탄을 각각  $\phi$ (0.45~0.92)와  $V_{in}$ (20~90 cm/s)을 변화시키며 화염을 관찰하였다. 화염의 순간상은 ICCD (PI instrument,

Intensified Charge Coupled Diode) 카메라를 이용했고, 연속된 화염의 모양은 high speed camera (Kodak Ektapro, 250 frame/sec)를 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

서론에서 언급한 바와 같이 본 연구의 목적은 복잡한 외부 유동장이 화염 안정성에 미치는 영향을 평가하기 위한 적절한 연소장의 선택이다. 이를 위해 채택된 V 화염은 Fig 2.와 같이 열선에 의해 부착된 부분을 제외하고는 그 곡률이 매우 작다.

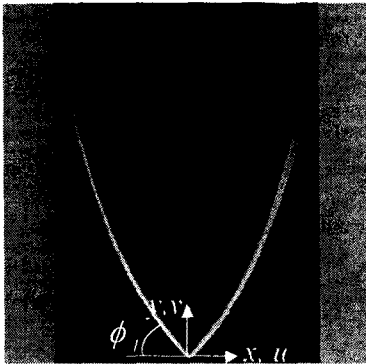


Fig 2. Direct photograph of V flame  
( $C_3H_8$  :  $\phi=0.56$ ,  $V_{in}=30\text{cm/s}$ )

따라서, 작은 곡률을 가지는 화염의 일부분을 중력장하에서 기울어진 평면 화염으로 가정하고 해석해와 실험에 의해 얻어진 유동장을 비교함으로써 해석해에서의 그 가정의 타당성을 검토하고자 한다.

#### 3.1 중력장 하에서 기울어진 평면 화염의 해석해

Fig 3.은 해석적인 기본 유동장의 개략도를 나타낸 것이다. 즉, 화염대 상류에서는 균일한 유동장을 형성하고, 화염대 하류에서는 일정한 와도를 가지는 중력장하에서의 일차원 화염이다. 일차원화염이기 때문에 화염면을 따른 즉,  $t$ 방향으로의 변화율은 생각하지 않는다. 각 물리량과 변수의 무차원화와 지배방정식 및 경계조건은 아래와 같다.

□ 무차원화

- Length by  $d(\rho D_{11}/\rho_n U_L)$
- velocity by  $U_L$  • time by  $d/U_L$
- Density by  $\rho_n$
- pressure as  $(p - p_n)/\rho_n U_L^2$
- Temperature as  $(T - T_n)/(T_f - T_n)$

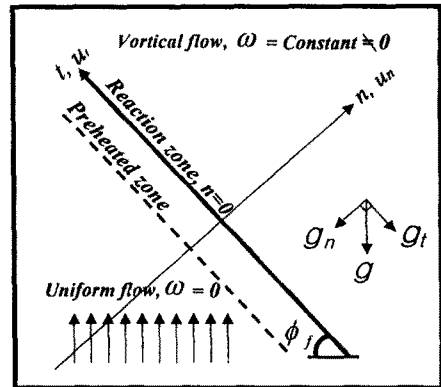


Fig 3. Basic flow

- Species mass fraction by  $Y_n$

□ 지배방정식

i) Continuity equation

$$\frac{d}{dn}(ru_n) = 0$$

ii) Navier-Stokes equation

$$\frac{du_n}{dn} = -\frac{\partial p}{\partial n} + (Pr_1 + Pr_2)\frac{d^2u}{dn^2} - \frac{rd}{U_L^2}g_n$$

$$\frac{du_t}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial t} + Pr_1\frac{d^2u_t}{dn^2} - \frac{rd}{U_L^2}g_t$$

iii) Energy equation

$$\frac{d\theta}{dn} = \frac{d^2\theta}{dn^2} + \Lambda_L F(\theta, \psi)$$

iv) Species equation

$$\frac{d\psi}{dn} = Le^{-1}\frac{d^2\psi}{dn^2} - \Lambda_L F(\theta, \psi)$$

v) Equation of state

$$r = u_n^{-1} = \left(1 + \frac{\gamma}{1-\gamma}\theta\right)^{-1}$$

□ 경계조건

As  $n \rightarrow -\infty$      $\theta = 0, \psi = 1, r = 1, u_n = 1,$   
 $u_t = V_1,$

At  $n = 0^+$      $\theta = 1, \psi = 0, r = 1 - \gamma,$   
 $u_n = (1 - \gamma)^{-1}, u_t = V_2,$

여기서  $u_n, u_t$ 는 각각 화염에 수직한 방향( $n$ )과 평행한 방향( $t$ )의 무차원 속도이다.

위에서 나타낸 지배방정식과 경계조건을 이용해 화염대 상류와 하류에서의 속도장을 계산하면 다음과 같다.

□  $n < 0$

$$u_n = 1 + \frac{\gamma}{1-\gamma}e^n$$

$$u_t = V_1 + \frac{g_t d}{U_L^2} \gamma (Pr_1 e^{n/Pr_1} + \frac{1}{\gamma} \ln \frac{1}{1-\gamma}) + u_p(n)$$

where,

$$u_p(n) = \frac{g_t d}{U_L^2} \int_n^0 (e^{(n-\xi)/Pr_1} - 1) \frac{\gamma e^\xi}{1-\gamma + \gamma e^\xi} d\xi$$

□  $n > 0$

$$u_n = (1-\gamma)^{-1}$$

$$u_t = V_1 + \frac{g_t d}{U_L^2} \gamma (Pr_1 + \frac{1}{\gamma} \ln \frac{1}{1-\gamma}) + \frac{g_t d}{U_L^2} \gamma m$$

따라서, 위에서 구한 화염대 전후의 속도장, 즉 화염대 상류와 하류에서 속도분포를 그리면 Fig 4.과 같다. 먼저 법선방향속도는 Fig 4. (a)에서 보는 바와 같이 화염대를 기준으로 화염대 상류와 하류에서 일정한 값을 가지는 것 알 수 있다. 하지만, 접선방향속도[Fig. 4(b)]는 상류에서 일정한 값을 갖지만, 하류에서는 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서, 화염대 하류에서 일정한 와도가 존재한다는 것을 알 수 있다. 즉,  $(n, t)$  좌표계에서 와도의 정의를 살펴보면  $w = \partial u_t / \partial n - \partial u_n / \partial t$  이고, 일차원 화염을 가정 했으므로  $w = \partial u_t / \partial n$  이다. 따라서 화염대 하류에서  $u_t$ 가  $n$ 에 대해 선형적으로 증가한다는 것은 와도가 일정하다는 것을 나타낸다.

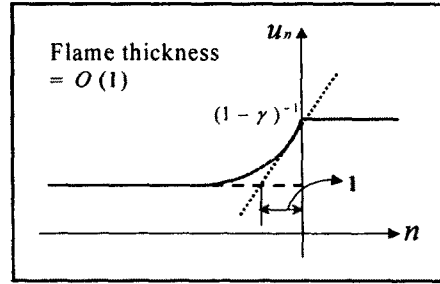
Navier-Stokes 방정식에 curl을 취해서 얻은 와도 방정식을 살펴보면 이러한 와도는 주로 밀도장과 압력장이 평행하지 않을 때 생겨나는 baroclinic torque에 의해 화염대 내부에서 발생함을 알 수 있다. 화염대 상류와 하류에서는 와도의 생성항과 소멸항이 없기 때문에 대류와 확산만이 존재한다. 따라서 해석해에서 나타나는 와도장을 살펴보면 다음과 같다.

$$\bigcirc n \rightarrow -\infty : w = 0$$

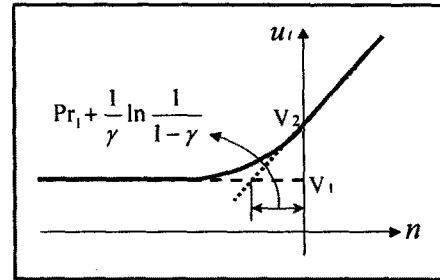
$$\bigcirc n > 0 : w = \frac{g_t d}{U_L^2} \gamma = \frac{g d}{U_L^2} \gamma \sin \phi_f \quad (1)$$

### 3.2 V 화염의 기본 유동장

Fig 5.는 우선 화염이 없는 경우 균일한 유동이 얻어짐을 확인하기 위해  $V_m$ 을 변화시켜 가면서 수직방향속도  $v$ 를 LDV를 이용해서 측정 한 결과이다. 화염이 없는 경우에 열선을 기준점( $y=0$ )으로 잡고 높이( $y$ )에 따라 동일한 유속을 가지는 것을 확인 하였고, 충분히 하류( $y=40mm$ )인 지점에서  $y=10mm$ 인 지점의 유속과 동일한 유속을 갖고 있음을 확인 하였다. 즉, 실험 범위 내에서 균일한 유동장이라 볼 수 있다. 이것은 혼합부에서 잘 섞여진 예혼합 가스가 허니콤과 축소형 노즐을 통과 하면서 균일한 속도 분포를 갖게 되는



(a) Normal velocity



(b) Tangential velocity

Fig 4. Plots of analytic velocity field

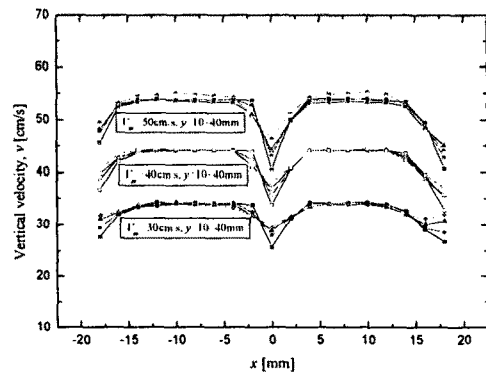


Fig 5. Velocity distribution according to y-axis in the cold-flow

것이다. Fig 6.과 Fig 7. 은 프로판인 경우  $\phi = 0.64$ ,  $V_m = 40cm/s$ 에서 각각 PIV와 LDV를 이용해 계측한 V 화염의 속도 데이터이다. Fig 6.은 속도벡터장과 유선을 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 화염대에서 유선의 방향이 바뀌는 것을 알 수 있다. Fig 7.은 x축에 대한 수직방향속도  $v$ 와 수평방향속도  $u$ 를  $(x, y)$ 에 따라 나타낸 결과이다. 그림에서 보듯이 수직방향속도 [Fig 7. (a)]는 화염대 하류에서 높이에 따라 동

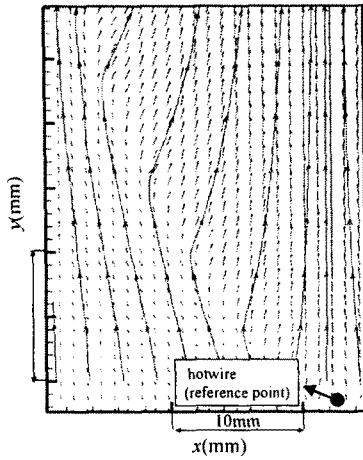
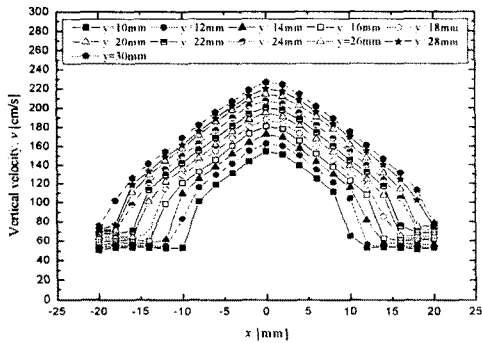
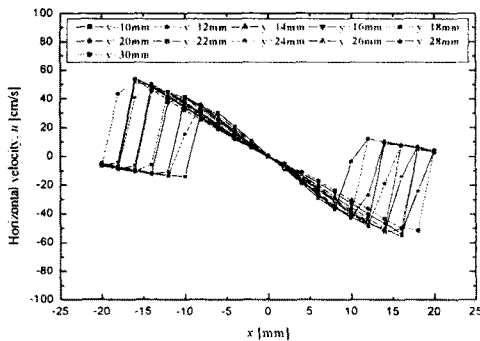


Fig 6. Velocity vector and streamlines



(a) vertical velocity



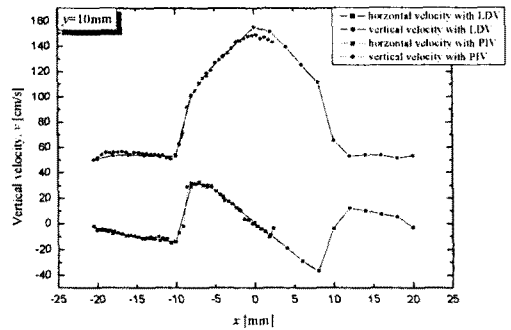
(b) horizontal velocity

Fig 7. Velocity distribution in the hot flow

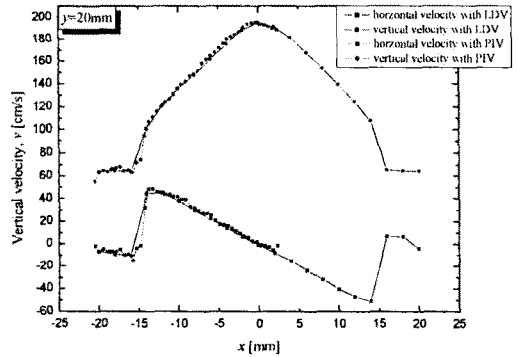
일한 기술기를 가지고 닭은꼴의 속도장을 형성하는 것을 알 수 있다. 수평방향속도[Fig 7. (b)] 역시 닭은꼴의 속도장을 형성하고있고, 높이에 따라 속도가 거의 변화하지 않는 것을 알 수 있다. Fig 7. (a)에서 수직방향속도가 갑자기 점프

를 하는 곳과 Fig 7. (b)에서 수평방향속도가 음의 값에서 양의 값으로 되는 곳을 화염대라 할 수 있다. 그것은 Fig 6.에서 보는 바와 같이 화염대에서 유선의 방향이 바뀌는 것을 생각해 보면 알 수 있다.

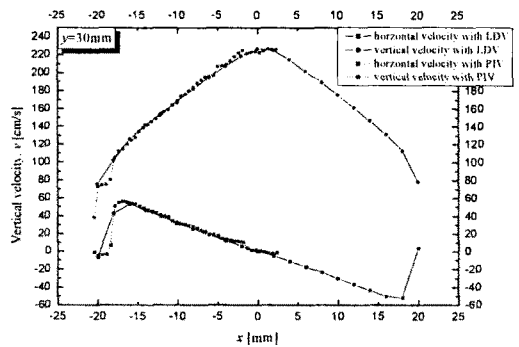
### 3.3 PIV 데이터의 신뢰성



(a)  $y=10$ mm



(b)  $y=20$ mm



(c)  $y=30$ mm

Fig 8. Comparison of PIV and LDV data

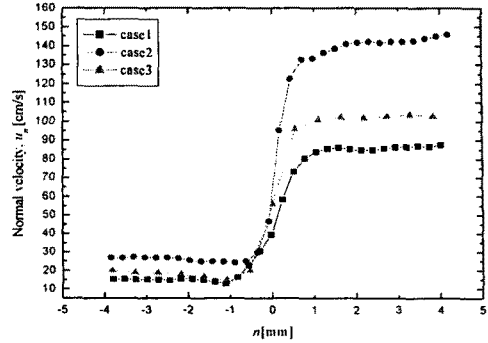
Fig 8.은 Fig 7.과 같은 조건( $\phi$ ,  $V_m$ )에서 반응 유동장의  $x$ 축에 따른 수직방향속도와 수평방향속도를 LDV 데이터와 PIV 데이터를 비교한 것이다. PIV 데이터는 열선을 기준점으로 잡고 기준점으로부터 LDV 측정높이( $y=10, 20, 30, 40\text{mm}$ )와 같은 높이( $y$ )에서 왼쪽 화염편에서만 45개의 데이터를 추출하여 그래프를 그렸다. 이것은 V 화염이  $y$ 축에 대하여 대칭이기 때문이다. 오른쪽까지 연결된 선이 있는 데이터가 LDV에 의해 얻어진 속도이고, 왼쪽만 촘촘히 있는 데이터가 PIV에 의해 얻어진 속도이다. Fig 8.에서 보는 바와 같이 화염대라고 생각되는 지점 즉, 수직방향속도가 갑자기 점프를 하는 지점과 수평방향속도가 음에서 양으로 되는 지점에서만 약간의 오차가 있고, 화염대 상류와 화염대 하류에서는 PIV에 의한 결과가 LDV에 의한 결과와 정량적으로 5%범위 내에서 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 PIV 속도 데이터의 신뢰성은 충분히 있다고 판단되며, 본 실험에서의 모든 속도성분을 얻는 데 PIV를 사용하였다.

3.4 국부 유동장

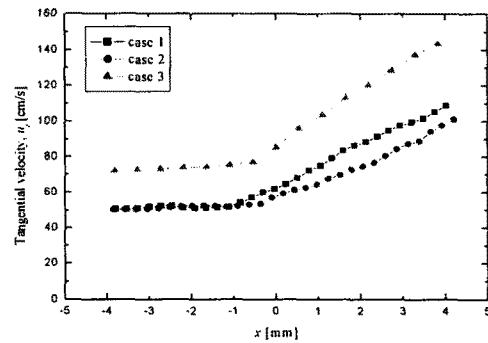
2차원 V 화염이 해석적 1차원 화염의 적절한 연소장의 선택인지 판단하기 위해서, 국부적인 영역에서 속도분포를 비교하였다. 이를 위해 해석해에서 채택한 좌표계 즉, 화염에 수직한 방향(법선방향)을  $n$ , 화염에 평행한 방향(접선방향)을  $t$ 로써 사용했다.  $\phi$ 와  $V_m$ 을 바꾸면서 3가지의 경우에서의 화염에 대해 법선방향속도( $v_n$ )와 접선방향속도( $v_t$ )를 계측하였다. 각각의 경우는 아래와 같다.

	$\phi$	$V_m(\text{cm/s})$
case 1.	0.64	40
case 2.	0.70	40
case 3.	0.64	60

2차원 V 화염에 대한 법선방향속도와 접선방향속도를 살펴보면 Fig 9.과 같다. Fig 9. (a), (b)에서 나타난 접선방향 속도와 법선방향 속도 분포는 Fig 4.에 나타난 해석해의 속도장과 비교해 보면 정성적으로 같은 경향을 보인다는 것을 알 수 있다. 즉, 화염에 대한 법선방향 속도는 화염대 상류와 하류에서 일정한 값을 가지나, 화염에 대한 접선방향 속도는 화염대 상류에서는 일정한 값을 가지고, 화염대 하류에서는 선형적으로 증가한다. 따라서, 국부적인 영역에서는 2차원 V 화염이 기울어진 1차원 평면화염과 같은 유동장을 가지고 있다고 생각할 수 있다.



(a) Normal velocity



(b) Tangential velocity

Fig 9. Normal & tangential velocity according to case.

3.5 화염대 하류에서의 와도

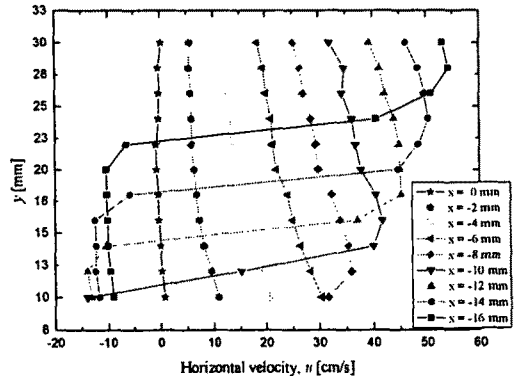


Fig 10. Horizontal velocity distribution according to  $y$ -axis in the hot-flow

앞에서 살펴보았던 것처럼, Fig 7. (a)에서  $x$ 축에 대한 수직방향속도의 변화율은 버너의 중심축( $x=0$ ) 근처를 제외하고 화염대 하류에서 선형적으로 나타나며 그 변화율은  $y$ 에 거의 무관하다. 한편 Fig 10.은 Fig 7. (b)를  $y$ 축에 대한 수평방향속도로 다시 그린 그림이다. 그림에서  $y$ 축에 대한 수평방향속도의 변화율은 화염대 하류에서 매우 작다. 따라서  $(x, y)$ 좌표계에 대한 와도의 정의

$$w = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$$

로부터 화염대 하류에서의 와도 분포는 중심 근처를 제외하고 거의 일정하게 나음을 알 수 있다. 화염대 하류에서의 와도 측정을 위해 PIV로 측정된 데이터를 이용하였다. 화염을 부착하는 열선을 기준점으로 잡고, 기준점에서  $y = 10, 20, 30$  mm를 예서의 수직방향속도와 수평방향속도를 끄집어내어 와도를 계산하였다. 화염대 하류에서의 와도는 3가지 경우에 계산되었다. 또한  $\phi$ 와  $V_m$ 를 바꾸어 각각 다른  $\phi_f$ (화염각도)에서의 와도를 계산하였다. 그 결과는 Table 1.과 같다.

	$\phi$	$V_m$ (cm/s)	$\phi_f$ ( $^\circ$ )	$w$ (1/s)
case 1.	0.64	40	60	75
case 2.	0.70	40	50	60
case 3.	0.64	60	63.3	90

Table 1. Vorticity at each case

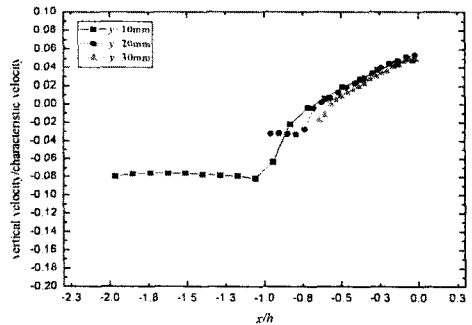
즉, 하나의 화염이 결정되었을 때 중심축 근처를 제외하고 화염대 후류 전체영역에서 일정한 와도가 나오는 것을 확인하였다. 이는 앞에서도 언급했듯이, 화염대 후류의  $x$ 축에 대한 수직방향속도의 기울기와  $y$ 축에 대한 수평방향 속도 기울기가 유사하게 나온다는 점에서 예상했던 일이다. 이는 해석적인 1차원 화염과도 정성적으로 같은 경향을 보이고 있다. 즉, 전체영역에서의 2차원 V 화염은 해석적인 1차원 화염과 와도장에서 정성적으로 같은 거동을 보인다. 또한 열선에서 화염이 세워진 각을 정의 내림으로써, 화염각도에 대한 와도의 경향을 알 수 있다. 화염각도는  $x$ 방향에 대한 수직방향속도의 기울기가 일정하지 않은 곳을 시작점으로 하여, V 화염이 벽면에 의해 V 형상을 유지하지 못하고 꺾이기 시작하는 지점까지의 각도를 화염각도라고 정의하였다. V 화염은 벽면에 의해 꺾이는 지점에서 화염대의 수평방향속도의 기울기가 달라진 점을 이용하여 그 지점을 찾아내었다. 이렇게 화염 각도를 정의 내리는 것은 이차원 V 화염이 이상적인 평

면화염이 아니라 작은 곡률을 가지고 있기 때문이다. 그 결과, 표에서 알 수 있듯이 화염의 각도가 커질수록 와도의 값 또한 커지는 것을 확인하였다. 해석해에서도 마찬가지로 화염대 하류에서의 와도(1)는  $w = \frac{g_t d}{U_L^2} \gamma$ 로 나타나며  $g_t = g \sin$

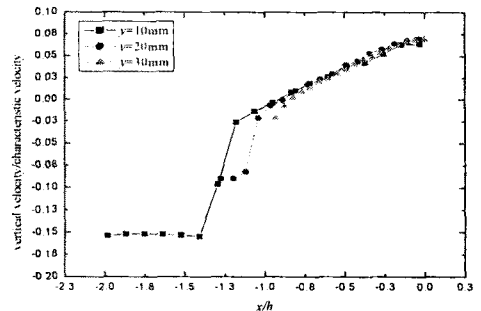
$\phi_f$ 에 의해서 화염각도( $\phi_f$ )가 커질수록 와도 또한 커진다는 것을 앞에서도 살펴보았다. 따라서 해석해의 와도장과 이차원 V 화염의 와도장은 정성적으로 같은 거동을 보인다고 생각할 수 있다.

### 3.6 유동장의 상사성

유동장에서의 상사성은 중요한 의미를 지닌다. 먼저, 한조건의 화염에 대한 상사성을 살펴 본 다음 같은 당량비에서의 화염각도에 대한 상사성에 대해 살펴볼 것이다. 특성길이로써 측정높이( $h$ (mm)), 특성속도로써 와도 $\times$ 측정높이( $w \times h$ (m/s))로 선택했다. 그리고,  $x$ 축을 특성길이로 무차원화하고, 각 위치에서의 수직방향속도에 화염대 바로 뒤에서의 수직방향속도를 뺀 값을 특성속도로 무차원화하였다. 각 경우별 상사성은 Fig 11.과 같다.

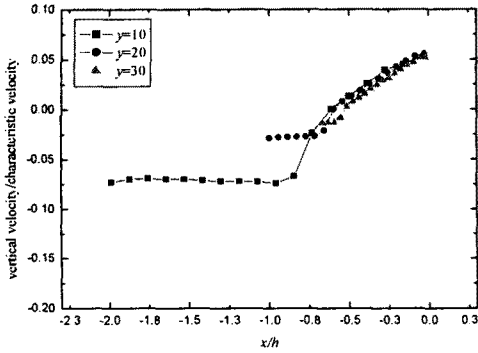


(a) case 1 ( $\phi=0.64, V_m=40$ cm/s)



(b) case 2 ( $\phi=0.7, V_m=40$ cm/s)

Fig 11. Similarity in each case



(c) case 3 ( $\phi=0.64$ ,  $V_{m}=60\text{cm/s}$ )

Fig 11. Similarity in each case (continued)

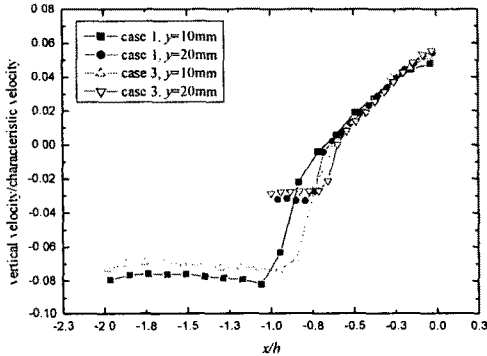


Fig 12. Similarity at  $\phi=0.64$

$\phi$ 와  $V_m$ 이 정해진, 한 조건의 화염에 대해 화염 대 하류에서의 상사성은 아주 잘 나타나는 것을 확인하였다. Fig 12.는  $\phi=0.64$ ,  $V_m=40\text{cm/s}$ 와  $\phi=0.64$ ,  $V_m=60\text{cm/s}$ 에서의 높이에 따른 상사성을 본 것이다. 그림에서 보듯이 같은 당량비에서는 각도에 따른 상사성이 보이는 것으로 판단된다. 여기서 알 수 있는 사실은 특성속도를 정의했던 와도가 V 화염의 상사성에 대해 아주 중요한 변수가 된다는 것이다. 하지만, 위의 상사성을 찾는 문제에서 당량비가 달라지면 상사성이 나타나지 않은 것으로 관찰되었다. 이에 대해서는 좀 더 많은 연구가 필요로 한다.

3.7 이차원 V화염의 안정화 특성

외부 유동장이 화염 안정성에 미치는 영향을 평가하기 위해서 넓은  $\phi$ 와  $V_m$ 범위에 대해서 이차원 V 화염의 안정화 특성을 살펴보는 일은 중요하다. 이차원 V 화염의 안정화 특성에 대해서 살펴보기 위해 프로판과 메탄을 사용하였다. Fig

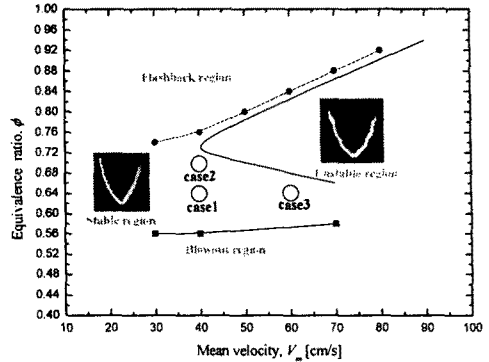


Fig 13. Stability diagram of propane flame

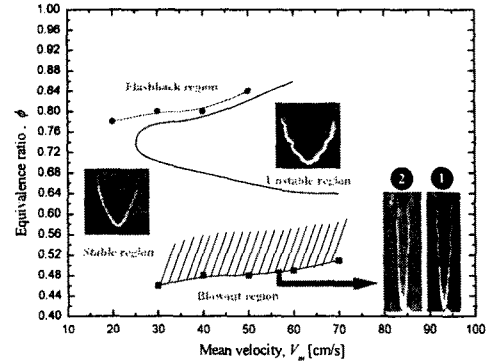


Fig 14. Stability diagram of methane flame

13.과 Fig 14.는 프로판 화염과 메탄 화염의 안정화 선도이다. 그림에서 보는 바와 같이 안정영역을 중심으로 유속 조건과 당량비에 따른 4가지 영역으로 구분된다. 즉, 안정영역(stable region), 불안정영역(unstable region), 역화영역(Flashback region), 그리고 날림영역(blowout region)이다. 먼저 유속이 연소속도에 비해 매우 크면 예혼합기에 의한 화염이 열선에 부착되지 못하고 날림이 발생한다. 그리고 연소속도가 유속에 비해 크면 화염이 노즐 안으로 역화가 된다. 또한 화염면이 안정하게 유지되는 안정영역이 있으며, 적당한 유속과 연소속도 하에서 화염면에 굴곡이 생기며 진동을 하는 불안정영역이 있다. 불안정영역에서는 화염의 굴곡이 열선 끝단에서부터 생기는 것이 관찰 되었다. 메탄의 경우 Fig 14. 에 나타나 있는 높은 당량비에서 화염날림이 일어나기 전 빗금친 영역에 들어가면 대부분 1번 모드(화염날개에서 진동이 일어나 화염 날개 끝단으로 전달)로 진동을 한다. 하지만, 유속이 작은 경우는 1번 모드로 진동을 한 후, 화염날림이 일어나기 직전에 2번 모드(화염날개



에서 진동이 일어나 화염날개 끝단에서 진동이 화염 상류방향으로 밀림)로 진동을 한 후, 화염 날림이 발생한다. 메탄 화염인 경우가 프로판 화염의 경우보다 역화영역과 화염날림영역이 더 넓게 나타나며, 당량비 1보다 작은 영역에서 불안정영역 또한 넓은 범위에서 나타나는 것을 확인하였다.

#### 4. 결론

지금까지 본 연구는 2차원 V화염을 1차원 평면 화염으로의 가정에 대한 타당성을 검토하고자, 2차원 V 화염을 1차원 평면화염의 해석해와 비교하는데 중점을 두었다. 즉, 국부영역에서의 속도 분포, 화염대 하류에서의 와도, 그리고 상사성에 대해서 살펴봤다. 또한 외부유동장이 화염의 안정성에 미치는 영향을 살펴보기 위해 먼저 넓은 범위( $\phi, V_m$ )에서의 V화염의 안정화 특성에 대해 살펴봤다. 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 국부적인 영역에서 2차원 V 화염의 속도장은 해석해의 속도장과 정성적으로 같은 거동을 보인다.
2. 한 조건에 대해서 (일정한  $\phi, V_m$ ), 화염대 하류에서의 와도는 중심축 근처를 제외하고 일정한 값을 가지고, 화염각도가 커질수록 와도 또한 커진다. 이는 해석해의 와도장과 정성적으로 같은 거동을 보인다.
3. 같은 당량비에 대해서 한조건의 화염뿐만 아니라 화염각도에 대해서도 상사성이 있다. 또한 상사성 문제에서 와도는 중요한 변수이다.
4. 프로판 화염과 메탄 화염에 대해 화염이 안정하게 유지되는 안정 영역, 화염면이 진동하는 진동영역, 화염이 노즐안으로 들어가는 역화 영역, 열선에 부착되지 못하고 날라 가버리는 화염날림 영역의 네 영역으로 나눌 수 있다.

#### 후 기

이 연구를 위한 연소기술연구센터(CERC)와 BK21의 연구비 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] Barenblatt, G. I., Zel'dovich, Ya. B. & Istratov, A. G., "On diffusional thermal stability of laminar flame", *Prikl. Mekh. Tekh. Fiz.*, 2, 1962, pp. 21-26.
- [2] Bychkov, V. V. & Liberman, M. A., "Dynamics and stability of premixed flames",

*Physics Reports*, 325, 2000, pp. 115-237.

- [3] Choi, B. I. & Shin, H. D., "Flame/flow interaction in oscillating flow field", *Combust. Sci. and Tech.*, 159, 2000, pp. 87-107.
- [4] CURRIE I. G., "Fundamental mechanics of fluids" second edition, pp. 224-229.
- [5] Darrieus, G., "Propagation d'un front de flamme. Essai de théorie des vitesses anormales de déflagration par développement spontané de la turbulence." 1938, Unpublished works presented at La Technique Moderne 1938 and at Le Congrès de Mécanique Appliquée 1945.
- [6] Drazin, P. G. & Reid, W. H., Hydrodynamic Stability, *Cambridge University Press*, 1981.
- [7] Frankel, M. L. & Sivashinsky, G. I., "The effect of viscosity on hydrodynamic stability of a plane flame front, *Combust. Sci. and Tech.*, 29, 1982, pp. 207-224.
- [8] Hayes, W. D., "The vorticity jump across a gasdynamic discontinuity", *J. Fluid Mech.*, 2, 1982, pp. 595-600.
- [9] Landau, L., "On the theory of slow combustion", *Acta Physicochimica URSS*, 19, 1944, pp. 77-85.
- [10] Matalon, M. & Matkowsky, B. J., "Flames as gasdynamic discontinuity", *J. Fluid Mech.*, 124, 1982, pp. 239-259.
- [11] Park, P. M., "Experimental Study on the Pilot Flame Anchored Lean Laminar Premixed Flame", Ph.D. Thesis, KAIST, 2001.
- [12] Pelce, P. & Clavin, P., "Influence of hydrodynamics and diffusion upon the stability limits of laminar premixed flames", *J. Fluid Mech.*, 124, 1982, pp. 219-237.
- [13] Sivashinsky, G. I., "Diffusional-thermal theory of cellular flames", *Combust. Sci. and Tech.*, 15, 1977, pp. 137-146 .
- [14] Williams, F. A. "Combustion Theory", Addison-Wesley, 1985.
- [15] Zel'dovich, Ya. B. & Frank-Kamenetski, D. A., "Acta Physicochimica", *URSS*, 9, 1938, pp. 341-350.