

수소 난류확산화염에서의 부상 메커니즘에 대한 연구

오정석* · 김문기* · 최영일* · 윤영빈†

Liftoff Mechanisms in Hydrogen Turbulent Non-premixed Jet Flames

Jeongseog Oh, Munki Kim, Yeongil Choi and Youngbin Yoon

ABSTRACT

To reveal the newly found liftoff height behavior of hydrogen jet, we have experimentally studied the stabilization mechanism of turbulent, lifted jet flames in a non-premixed condition. The objectives of the present research are to report the phenomenon of a liftoff height decreasing as increasing fuel velocity, to analyse the flame structure and behavior of the lifted jet, and to explain the mechanisms of flame stability in hydrogen turbulent non-premixed jet flames. The velocity of hydrogen was varied from 100 to 300m/s and a coaxial air velocity was fixed at 16m/s with a coflow air less than 0.1m/s. For the simultaneous measurement of velocity field and reaction zone, PIV and OH PLIF technique was used with two Nd:Yag lasers and CCD cameras. As results, it has been found that the stabilization of lifted hydrogen diffusion flames is related with a turbulent intensity, which means that combustion occurs at the point where the local flow velocity is balanced with the turbulent flame propagation velocity.

Key Words : Liftoff flame(부상화염), simultaneous measurement(동시측정), Hydrogen(수소)

기 호 설 명

u_F : 노즐 출구에서의 연료속도	d_F : 연료노즐직경
u_A : 노즐 출구에서의 동축공기속도	S_t : 난류화염전파속도
$d_{F,eff}$: 노즐출구에서의 주위류 속도	u'_{rms} : 속도의 rms 값

1. 서 론

연소안정성의 근본적인 원인을 이해하기 위한 하나의 방법으로써 난류확산화염에 대한 많은 연구들이 진행되어져 왔다.[1,2] 층류영역에서는 삼지화염의 전파속도가 국소유동속도와 균형을 이루는 지점에서 연소가 시작된다고 알려져 있고, 이에 영향을 미치는 인자들로써 유동속도, 연료와 공기의 밀도비, 노즐의 직경 등이 있다[3,4].

근래에 들어 층류영역에서의 화염 안정화 개념을 난류영역에 접목시키려는 노력이 시도되고 있으며[2,5], 몇 가지 화염안정성에 관한 메커니즘

들이 알려지고 있다.

먼저 난류강도이론(turbulent intensity theory)에 따르면 국소유동속도와 난류화염 전파속도가 일치하는 지점에서 화염이 안정화 된다고 알려져 있다[6]. 즉, 난류강도가 큰 확산화염에서도 화염의 부상조건일 경우 화염의 밑단(flame base)에서 연료와 산화제의 혼합이 증가하므로 예혼합화염의 성격을 지니게 되고 화염의 전파속도(flame propagation velocity)는 난류 예혼합화염의 연소속도(burning velocity)와 같아지므로 화염의 안정성과 난류강도가 상호 관련성을 지니게 된다.

Mungal 등[7]은 반응영역이 와류의 구배(large eddy gradient)와 관련이 있고, 신장율(strain rate)이 큰 영역보다는 이론공연비선(stoichiometric line) 근처에서의 와도(vorticity)나 팽창율(dilatation)이 큰 곳에서 화염이 안정화 된다고

* 서울대학교 공과대학 기계항공공학부원

† 서울대학교 공과대학 기계항공공학부

(E-mail : ybyoon@snu.ac.kr)

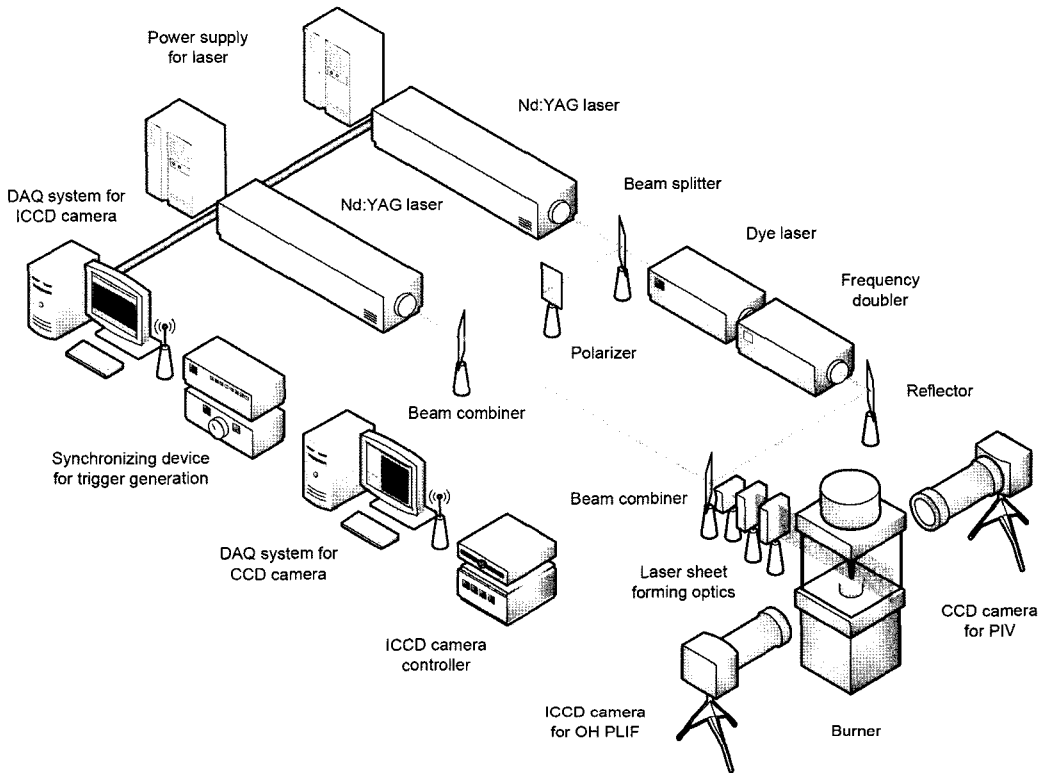


Fig. 1 Schematic diagram of a simultaneous measurement system for PIV and OH PLIF

보고하고 있다. 이러한 큰 와류이론(large eddy theory)에 따르면 화염이 하나의 큰 와류에서 다른 와류로 이동하고, 전파된 화염은 화염밀단에서 안정화 된다고 한다. 최근 Driscoll 등[8]은 화염 밀단에서의 와류와의 상호작용은 부상화염높이에는 영향을 주지 않는다는 것을 밝혀내었다.

그리고 모서리화염이론(edge flame theory)은 층류영역에서의 삼지화염이론(tribranchial flame theory)에서 발전된 것으로, 난류영역에서는 삼지화염 세 가지의 끝부분이 와류 등의 영향으로 하나의 화염으로 변형되었다고 가정한다. Buckmaster 등[9]은 유동장이 자기상사성을 가진다면 가스의 평균 속도는 이론공연비선을 따라 일정한 값을 유지한다고 주장하였다.

난류화염 안정화의 또 다른 이론중 하나인 국소신장이론(local strain theory)에 의하면 화염밀단에서의 화염전파속도는 유동의 국소신장(local stretch)에 영향을 받는다고 알려져 있다. Chen 등[10]은 부상된 비예혼합화염은 화염면 안쪽과 외부의 혼합층이 만나는 곳에서의 국소소멸(local flame extinction)에 지배를 받는다고 보고하고 있다.

마지막으로 소산율이론(scalar dissipation rate theory)에서는 소산율(scalar dissipation rate)이

반응열의 해리(heat release)에 영향을 주므로 화염전파속도에 영향을 미치게 되고 결국 부상화염의 높이와 상호 관련성을 지니게 된다. 그러나 Watson 등[11]에 따르면 소산율이 모서리화염에서의 국소적인 소멸(local flame extinction)과는 관계가 없음이 밝혀졌다.

앞에서 언급된 난류 화염안정화 이론에도 불구하고 화염안정성의 근본적인 원인을 규명하기 위하여 많은 연구들이 수행되어져 오고 있다. 본 논문에서는 수소 난류확산화염에서의 일반적인 경향과 다른 부상화염 특성을 보고하고 있으며 이를 화염안정화 메커니즘과 연계하여 그 근본적인 원인을 다루고자 한다. 따라서 연구의 목적은 연료출구 속도 증가에 따라 부상높이가 감소하는 수소난류확산화염의 거동을 설명하고 화염구조 분석을 통하여 화염안정의 근본 원인을 밝혀내는 데 있다.

2. 실험방법

2.1 실험장치

실험장치는 크게 연소기와 레이저 및 광학기기, 그리고 영상취득장치 등의 세 부분으로 나뉜다.

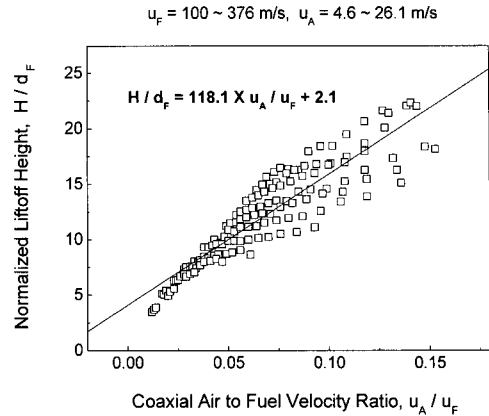
Table 1 Operating variables of lifted jet flames in coaxial flow

	Case1	Case2	Case3
Jet Reynolds number, Re_{jet}	3364	6727	10091
Jet exit velocity, u_F [m/s]	100	200	300
Coaxial air velocity, u_A [m/s]	16	16	16
Coflow air velocity, u_∞ [m/s]	0.1	0.1	0.1
Liftoff height, H [mm]	57~67	40~50	37~47

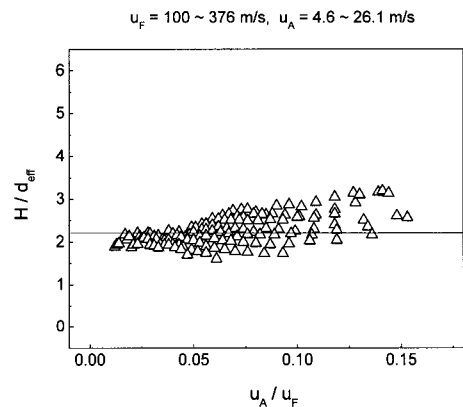
먼저 연소기는 20×20 cm 너비와 80cm 높이의 제어체적을 가지고 있으며 광학적 접근이 가능하도록 네 개의 합성석영재질의 평판(quartz plate)으로 둘러싸여져 있다. 사용된 연료노즐은 직경(d_F) 3.7mm, 두께(t_{tip}) 0.2mm의 원통형이며, 이 주위를 지름, $d_A=15$ mm의 동축류 노즐이 둘러싸고 있다. 다음으로 PIV(Particel Image Velocimetry)와 OH PLIF(Planar Laser Induced Fluorescence) 동시측정을 위하여 두 대의 Nd:YAG 레이저(532nm, 300mJ/pulse, Continuum co. Surelite1, Spectra-Physics co. Quanta-Ray)와 Dye 레이저(10mJ/pulse; Lumonics co. HyperDYE-300), Frequency doubler(Lumonics co. HyperTRACK-1000)가 사용되었다. OH 라디칼은 283.93nm에서 여기되는 $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$ 밴드의 $Q_1(6)$ 전자준위를 가지고 있으며, 방출되는 형광 신호는 306~320nm의 파장을 통과시키는 필터(UG-11, WG-305)와 렌즈(Nikor f/4.5 105mm UV macro)를 통하여 1024×1024 해상도를 가지는 ICCD 카메라(Princeton instruments inc., PI-MAX 1K)로 받아들여졌다. PIV 측정을 위해 $1\mu\text{m}$ 의 SiO_2 가 연료와 동축공기관으로 주입되었으며 532nm의 레이저광에 의해 산란된 Mie scattering 신호는 1008×1018 해상도의 CCD 카메라(Kodak ES 1.0)로 수광되었다.

2.2 실험조건

수소량 변화에 따른 부상화염의 거동을 보기 위하여 연료 노즐 출구속도(u_F)를 100~300m/s 사이에서 조절하였고, 동축공기속도(u_A)는 16m/s로 고정하였다. 전체 당량비($\phi_{global}=0.5$)를 일정하게 유지시키기 위하여 연소장에 교란을 일으키지 않는 범위내(0.1m/s 이하)에서 주위류를 공급하였다. 연료 제트의 레이놀즈수를 구하기 위하여 $Re_{jet}=u_F d_F/\nu$ 로 정의하였다. 여기서 ν 는 상온에서 수소의 동점성계수이다. 실험조건을 Table 1에 정리하였다.



(a)



(b)

Fig. 2 Results from visible flame images: (a) normalized liftoff height fitting plot, (b) liftoff height tendency in a view of an effective diameter concept.

3. 결과 및 토의

3.1 가시화염 측정결과

연소현상을 거시적인 관점에서 분석하기 위하여 가시화염의 길이에 대한 많은 연구들이 수행되었다. Kalghatgi [6]는 다양한 연료들(수소, 메탄, 에탄, 프로판)을 사용하여 부상화염길이를 수식으로 표현하였다. 또한 Chen [10] 등은 그의 논문에서 일반적으로 부상화염의 길이는 연료의 노즐출구에서의 속도에 비례하며 최고 층류화염전파속도에 반비례한다고 기술하였다. 이의 관계식을 다음의 식 (1)과 (2)에 나타내었다.

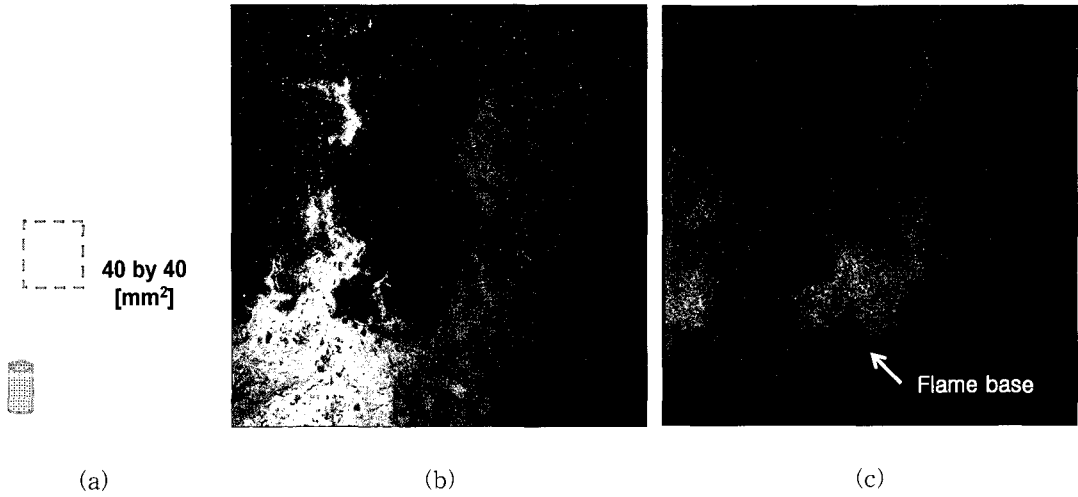


Fig. 3 Definition of leading edge; (a) interesting area in the reaction zone, (b) PIV raw image shows the burnt area generally coincides with a flame surface, (c) OH PLIF image indicating reaction zone.

$$H = \frac{50u_F(\rho_F / \rho_A)^{3/2}}{(S_{L,0})^2 / \alpha} \quad (1)$$

$$H \propto u_F / (S_{L,max})^2 \quad (2)$$

Figure 2는 가시화염사진을 통해 얻어진 부상화염의 fitting plot을 나타내고 있다. 부상화염높이(liftoff flame height, H)는 노즐출구에서 화염밀단까지의 거리로 정의하였고, 가시화염의 디지털 데이터를 처리하기 위하여 최대강도값의 20%를 문턱값(threshold value)으로 하였다. Figure 2(a)에서 보듯 무차원화한 부상화염의 높이는 동축공기의 속도에 비례하고 연료의 속도에 반비례하는 관계를 보였으며 다음의 관계식 (3)으로 표현할 수 있었다.

$$\frac{H}{d_F} = 118.1 \times \left(\frac{u_A}{u_F} \right) + 2.1 \quad (3)$$

이는 선행연구의 결과 식 (1), (2)와 반대되는 경향을 나타내고 있다. 선행연구에서는 대부분의 경우 탄화수소 계열의 연료를 사용하였고, 화염이 대기에 노출되어있거나 주위류(coflow air)가 있는 경우였다. 본 실험에서는 연료로 밀도가 작아 축방향으로의 속도감쇠가 크고 화학반응이 빠른 수소를 사용하였으며 산화제로서 유동장에서 축방향으로 속도감쇠의 특성을 지니는 동축공기를 사용하였다. 부상화염의 가시적인 거동에서의 차이점을 알아보기 위하여 far field 개념을 도입

하여 유효지름을 구해보았다. far field 개념은 노즐출구에서 분사된 연료와 공기가 후류로 감에 따라 주위와의 밀도차이가 점점 작아진다는 것으로, 주로 화염 밀단에서 강한 와류 등으로 인해 예혼합화염의 성격을 지니는 부상화염을 분석할 때 사용되고 있다. 유효제트직경(d_{eff})은 다음의 식 (4)로 정의된다.

$$d_{eff} = \frac{\text{Source mass flux}}{\text{Source momentum flux}} = \frac{2}{\sqrt{\pi\rho_A}} \frac{\rho_F u_F \left(\frac{\pi}{4} d_F^2 \right) + \rho_A u_A \left[\frac{\pi}{4} (d_A^2 - d_{F,out}^2) \right]}{\left\{ \rho_F u_F^2 \left(\frac{\pi}{4} d_F^2 \right) + \rho_A u_A^2 \left[\frac{\pi}{4} (d_A^2 - d_{F,out}^2) \right] \right\}^{1/2}} \quad (4)$$

위 식에서의 유효제트 지름을 사용하여 부상화염 높이와 공기, 연료 속도비와의 관계를 구해보았다. Figure 2 (b)에서 볼 수 있듯이 공기와 연료의 속도비 변화에 관계없이 부상화염은 일정한 높이에서 안정화 된다는 것을 알 수 있다.

3.2 PIV/OH PLIF 동시측정결과

유동장과 연소장 분석을 위하여 PIV와 OH PLIF 기법을 이용하였고, 두 기법의 동시측정을 통해서 속도와 OH 라디칼의 형광신호분포를 구하였다. 본 실험에서는 OH를 반응영역을 나타내는 표식자(indicator)로 가정하고 OH의 분포를 연소가 이루어지는 반응영역으로 보았다.

Figure 3은 부상화염 밀단에서의 동시측정 영역과 이때의 획득한 PIV, OH PLIF 이미지의 원본

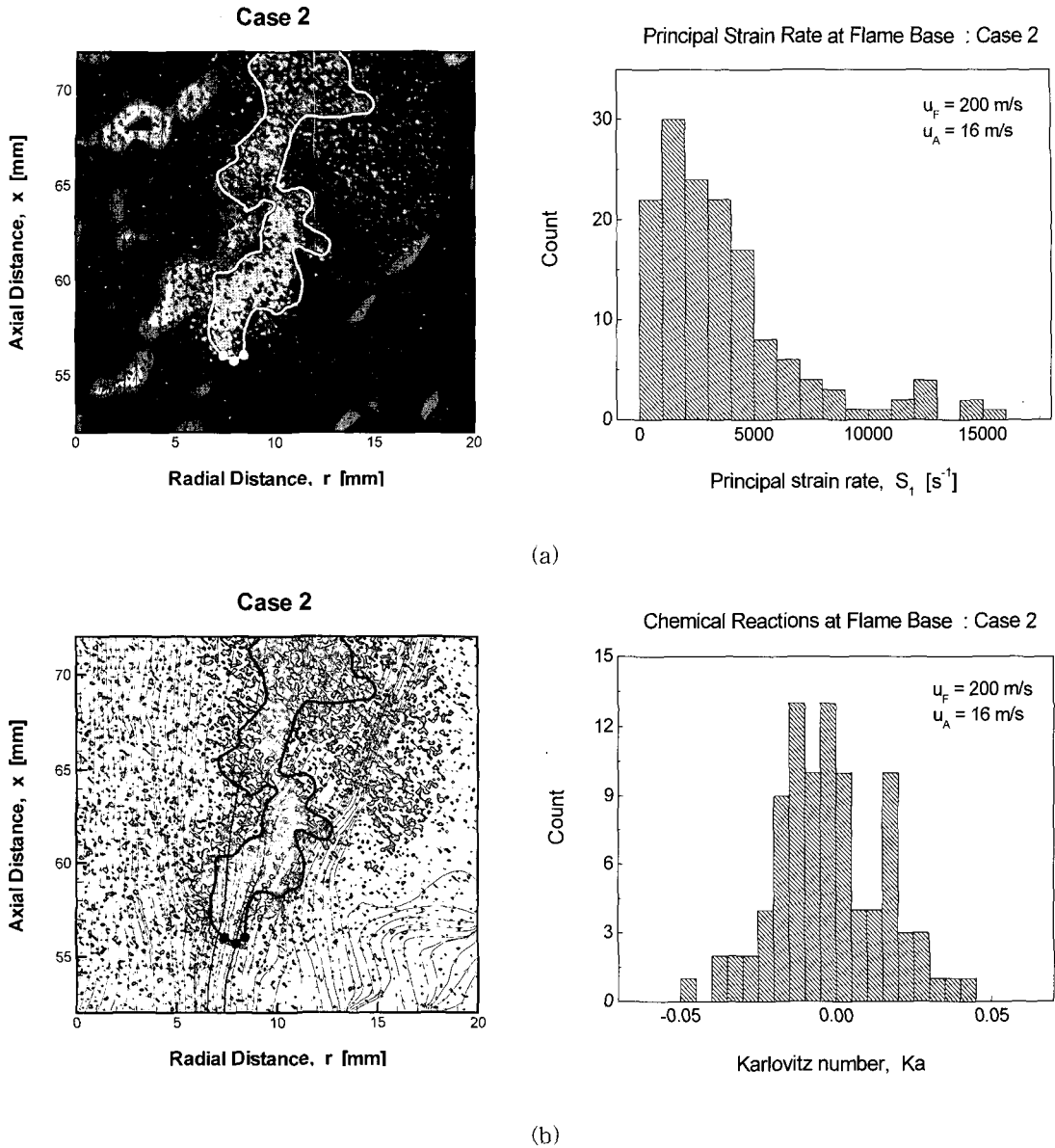


Fig. 4 Instantaneous results of case 2 ($u_F=200\text{m/s}$ and $u_A=16\text{m/s}$) at flame base; (a) vector field over reaction zone and principal strain rate distribution, (b) stream line and Karlovitz number.

을 나타내었다. Figure 3 (b)에서 보듯 연소로 인하여 주입된 PIV용 입자들이 타버린 것을 확인할 수 있으며 OH 사진과 비교하였을 때 화염면의 형상을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 이때 화염면을 따라 화염밀단에서 노즐에 가장 가까운 지점을 부상화염을 지지하고 있는 곳으로 보고 leading edge로 정의 하였다. Leading edge 개념은 층류영역에서 화염안정화를 설명하는 방

법 중 하나인 삼지점(tribrachial point 또는 triple point)에서 유래되었다. 즉 난류영역에서의 화염은 leading edge에서 안착되며 이론 공연비선(stoichiometric line)을 따라 유동장 위아래로 움직인다고 가정한다. 본 연구에서는 leading edge를 화염이 안정화 되는 지점으로 보고 화염 안정화 메커니즘 분석을 위해 이 지점에서의 속도 및 신장률, 난류강도 등을 살펴보았다.

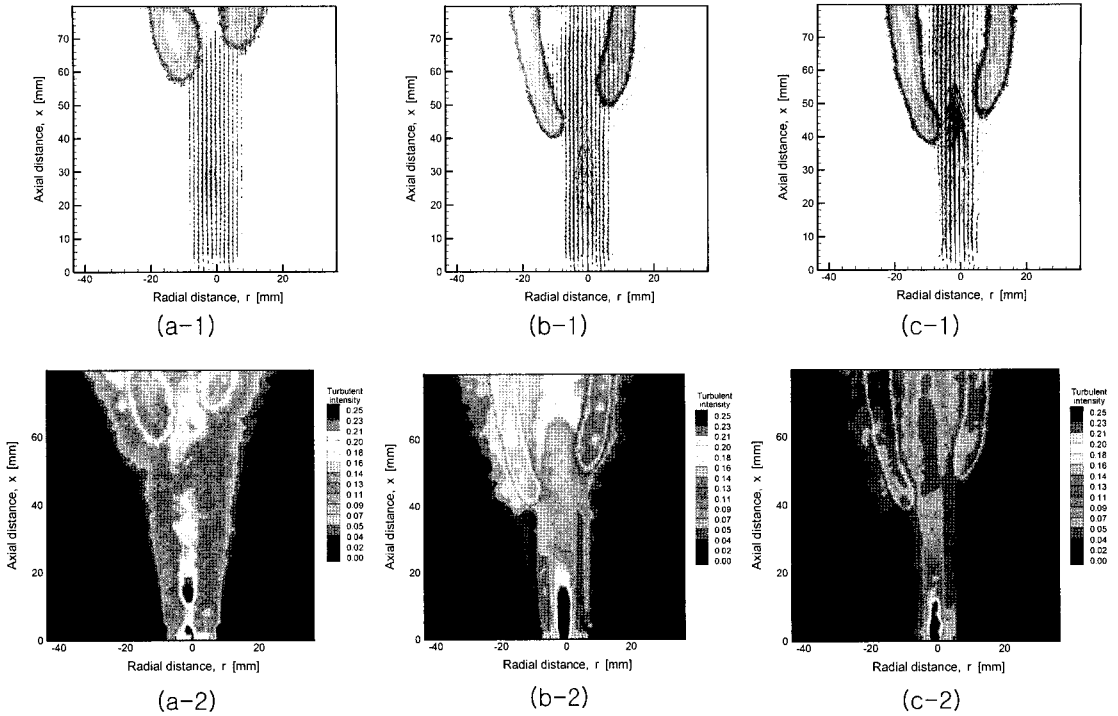


Fig. 5 Simultaneously measured PIV and OH PLIF results, showing time-averaged velocity vector field on OH* layer (top,1) and turbulent intensity distribution with the contour of OH* layer (bottom,2) for (a) case 1, (b) case 2 and (c) case 3.

Figure 4는 $u_f=200\text{m/s}$ 조건일 때 화염밀단에서의 주신장률과 Karlovitz 수를 나타내었다. 주신장률은 변형방향의 측면에서의 전단력(shear force)이 없는 상태에서의 신장(extension) 또는 압축(compression)되는 양을 나타내는 것으로 화염 밀단에서의 혼합기 및 화염면의 가속상태를 살펴볼 수 있다. 본 연구에 사용된 주변형률(S_1)은 다음의 식 (5)와 같다. 여기서 S_r , S_x 는 반경방향(r)과 축방향(x)의 신장률이고, S 는 $(S_r^2+S_x^2)^{1/2}$ 이다.

$$S_1 = \frac{S_r + S_x}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{S_r - S_x}{2}\right)^2 + \left(\frac{S}{2}\right)^2} \quad (5)$$

Figure 4 (a)의 동시측정 결과에서 보듯 중심축에 가까울수록 큰 벡터로 표현되는 강한 속도장이 형성되고 가장자리로 갈수록 속도가 줄어들음을 확인할 수 있다. 또한 반응영역을 지나면서 연소의 영향으로 속도가 증가한 것을 확인할 수 있다. 화염 밀단에서의 주신장률은 대체적으로 0에 가까게 분포하였다. 이는 반응이 시작되는 지점에서의 속도증가가 크지 않음을 의미하며 연소가 일어날 수 있는 여건이 조성됨을 의미한다. 이

때의 반응속도를 알아보기 위하여 Karlovits 수를 도입하였다. Ka 수는 화학반응특성시간(τ_c , characteristic chemical reaction time)과 와류의 가장 작은 단위인 Kolmogorov 와류의 특성시간(τ_K , characteristic Kolmogorov time scale)의 비율로서 그 값이 1보다 작으면 화학반응이 빨리 일어나고 있음을 의미한다. 본 연구에서는 Ka 수를 축방향신장률(S_{xx})과 반응률(α/SL^2)을 사용하여 구하였다. 표현식은 다음의 식 (6)과 같다.

$$Ka = \tau_c / \tau_K \approx S_{xx} \cdot \alpha / S_L^2 \quad (6)$$

Figure 4 (b)에서 유선에서 중심축 안쪽에서의 혼합기가 화염밀단으로 유입되고 leading edge를 지나면서 반응영역을 따라 점점 벌어지는 것을 볼 수 있다. 이는 연소열에 의한 열팽창의 영향으로 생각된다. 또한 leading edge 오른쪽 아래에서 공기가 연소장으로 유입되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 공기의 유입은 화염밀단에서 반응이 활발히 일어나는데 도움을 줄 것으로 생각된다. 동시측정 순간사진의 결과에서 leading edge에서의 Ka 수 분포를 구하였다. 대체적으로 0에 가까운 분포를 보였으며 이로서 화염밀단에서 반응이 활발히 일어나고 있음을 알 수 있다.

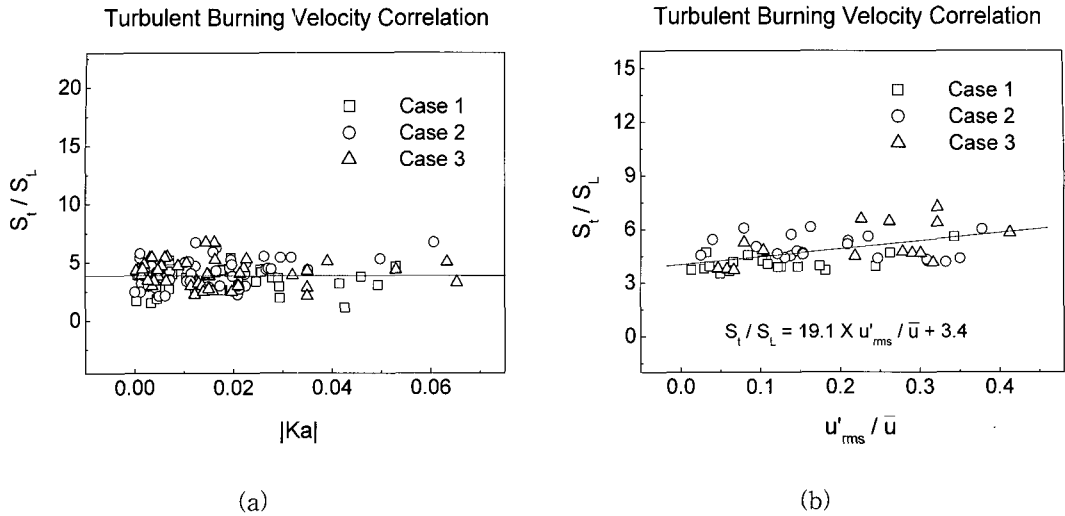


Fig. 6 Turbulent burning velocity correlation; effects of Karlovitz number, (a) and axial turbulent velocity, (b),

Figure 5 (a,b,c-1)은 각 조건에서의 시간 평균한 동시측정 결과이다. 노즐출구에서의 연료속도가 증가함에 따라 leading edge의 위치는 상류(upstream)로 이동함을 볼 수 있다. Figure 5 (a,b,c-2)는 화염면과 난류강도분포를 나타내고 있다. 난류강도분포는 노즐출구에서 연료와 공기의 속도차로 인해 큰 값을 보였으며 후류로 갈수록 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 연료속도가 증가함에 따라 축방향으로의 모멘텀이 증가하기 때문에 속도의 상대적인 변화량이 줄어들어 $u_f=300\text{m/s}$ (case 3)에서 제일 작게 나타났다. 표시되는 화염면과 뒷면의 난류강도분포가 대체로 일치함을 알 수 있다. 이는 연소장에서의 반응영역과 유동장에서의 난류강도가 서로 관련이 있음을 의미한다.

난류영역에서의 화염안정성 이론중 하나인 난류강도이론에 따르면 국소유동속도와 난류화염 전파속도가 균형을 이루는 지점에서 화염이 안정화 된다고 설명하고 있다. 이를 위의 결과에 적용하여 불 때 유동조건변화와 난류강도 및 난류화염 전파속도는 화염안정화 메커니즘을 설명하는데 있어서의 중요한 인자로 작용할 것으로 생각된다.

3.3 화염안정화 메커니즘

화염의 안정화 메커니즘을 설명하기 위하여 난류화염 전파속도와 이에 영향을 미치는 인자에 관한 많은 선행연구들이 진행되어왔다. 일반적으로 난류화염전파속도는 Da 및 Ka 수, 난류강도, 신장률, Re 수, 혼합기의 농도분포(scalar dissipation

rate) 등에 영향을 받는다고 알려져 있다. 아래의 식 (7), (8)은 난류화염전파속도를 예측한 수식들이다.[12]

$$S_t = 0.875 \cdot Ka^{-0.392} \cdot u_{rms} \quad (7)$$

$$S_t = S_L + 0.62 \cdot S_L^{0.5} \cdot u_{rms}^{-0.5} \cdot Re_{int}^{0.25} \quad (8)$$

본 연구에서는 부상조건에서 수소난류화염의 화염안정화 메커니즘을 규명하기 위하여 leading edge를 화염이 안정화되는 지점(stabilization point)으로 보았다. 이 때 화염 밑단의 화염면에서 국소유동속도(local flow velocity)와 난류화염전파속도(turbulent burning velocity)가 균형을 이룬다고 가정하여 stabilization point에서 난류화염전파속도와 난류강도 및 Ka 수와의 관계를 살펴보았다.

Figure 6 (a)에서 보듯 stabilization point에서의 Ka 수는 비교적 작은 값을 가졌으며, Case 1~3 경우에서 공통적으로 화염밑단에서의 빠른 반응이 일어남을 알 수 있다. Ka 수 변화에 따른 난류화염 전파속도의 변화는 크지 않았다. 즉 수소 연소의 특성상 빠른 화학반응으로 인해 화염 밑단에서는 Ka 수가 난류화염전파속도에 미치는 영향이 적음을 의미한다. 그러나 난류화염전파속도는 난류강도와 선형적인 관계에 있음을 Fig. 6 (b)을 통해 알 수 있었다. Figure 6 (b)의 결과에서 연료속도가 증가할수록 난류화염전파속도가 대체로 큰 값을 가지고 있음을 볼 때, 연료속도

증가에 따른 부상높이의 감소는 난류강도 증가에 따른 난류화염전파속도의 증가 때문으로 생각된다.

4. 결론

수소와 동축공기를 이용한 난류확산화염에서 부상특성과 화염안정화 메커니즘을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 수소연료속도 증가에 따른 부상화염 높이의 감소는 동축공기속도 증가의 경우와는 반대의 경향을 나타내었고, 동축공기와 연료 유속의 비에 선형적으로 증가하는 경향을 보였다.
- 2) 화염 밑단에서의 Ka 수는 1보다 작았으며, 이를 통해 빠른 반응이 일어남을 알 수 있었다. 또한 난류화염전파속도에 미치는 영향은 미미하였다.
- 3) 동시측정을 통하여 화염 밑단에서 국소유동속도와 난류화염전파속도가 균형을 이루는 지점에서 반응이 시작되었으며, 이때 난류화염 전파속도는 난류강도에 비례하였다.

참고문헌

- [1] Chen, Y. C. and Bilger, R. W., 2000, "Stabilization Mechanisms of Lifted Laminar Flames in Axisymmetric Jet Flows," *Combustion and Flame*, Vol. 122, pp. 377~399.
- [2] Scheffer, R. W. and Goix, P. J., 1998, "Mechanism of Flame Stabilization in Turbulent," *Lifted-Jet Flames*, *Combustion and Flame*, Vol. 112, pp. 559~574.
- [3] Lee, J. and Chung, S. H., 2001, "Characteristics of Reattachment and Blowout of Laminar Lifted Flames in Partially Premixed Propane Jets," *Combustion and Flame*, Vol. 127, pp. 2194~2204.
- [4] Lee, J., Won, S. H., Jin, S. H. and Chung, S. H., 2003, "Lifted flames in laminar jets of propane in coflow air," *Combustion and Flame*, Vol. 135, pp. 449~462.
- [5] Watson, K. A., Lyons, K. M., Donbar, J. M. and Carter, C. D., 1999, "Scalar and Velocity Field Measurements in a Lifted CH₄-Air Diffusion Flame," *Combustion and Flame*, Vol. 117, pp. 257~271.
- [6] Kalghatgi, G. T., 1984, "Liftoff heights and visible flame lengths of vertical turbulent jet diffusion flames in still air," *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 41, pp. 17~29.
- [7] Muniz, L. and Mungal, M. G., 1997, "Instantaneous Flame-Stabilization Velocities in Lifted-Jet Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 111, pp. 16~31.
- [8] Upatnieks, A., Driscoll, J. F., Rasmussen, C. C. and Ceccio, S. L., 2004, "Liftoff of turbulent jet flames—assessment of edge flame and other concepts using cinema-PIV," *Combustion and Flame*, Vol. 138, pp. 259~272.
- [9] Buckmaster, J. and Weber, R., 1996, "Edge-flame-holding," *Proceedings of the Combustion Institute*, 26, pp. 1143~1148.
- [10] Chen, Y. C., Chang, C. C., Pan, K. L. and Yang, J. T., 1998, "Flame Liftoff and Stabilization Mechanisms of Nonpremixed Jet Flames on a Bluff-body Burner," *Combustion and Flame*, Vol. 115, pp. 51~65.
- [11] Watson, K. A., Lyons, K. M., Donbar, J. M. and Carter C. D., 2000, "Simultaneous Rayleigh Imaging and CH-PLIF Measurements in a Lifted Jet Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 123, pp. 252~265.
- [12] Burgess, C. P. and Lawn, C. J., 1999, "The Premixture Model of Turbulent Burning to Describe Lifted Jet Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 119, pp. 95~108.