

동축공기 수소 난류확산화염에서의 화염안정성에 대한 실험적 연구

오정석[†] · 김문기* · 최영일* · 윤영빈**
(2007년 8월 30일 접수, 2007년 12월 24일 심사완료)

Study of Hydrogen Turbulent Non-premixed Flame Stabilization in Coaxial Air Flow

Jeongseog Oh, Munki Kim, Yeongil Choi and Youngbin Yoon

Key Words: Hydrogen(수소), Liftoff Flame(부상화염), OH PLIF(레이저유도형광), PIV(속도측정)

Abstract

It was experimentally studied that the stabilization mechanism of turbulent, lifted jet flames in a non-premixed condition to reveal the newly found liftoff height behavior of hydrogen jet. The objectives 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 hydrogen jet velocity was changed 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 a result, it was found that the stabilization of lifted hydrogen diffusion flames is correlated with a turbulent intensity and Karlovitz number.

기호설명

- d_A : 동축공기 노즐 내경
- d_F : 연료 노즐 내경
- H : 부상화염높이
- S_t : 난류화염 전파속도
- u_A : 동축공기 노즐 출구속도
- u_F : 연료제트 노즐 출구속도
- u_r : 반경방향 속도
- u_x : 축방향 속도
- u' : 축방향 속도의 rms 값

1. 서론

화염 안정성의 근본적인 원인을 이해하기 위한 하나의 방법으로써 난류확산화염에 대한 많은 연구들이 진행되어져 왔다.^(1,2) 층류영역에서는 삼지 화염의 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 메커니즘들이 알려지고 있다. 이러한 부상화염의 메커니즘을 설명하는 이론들은 연료공기의 혼합이 활발히 일어나 농도구배가 완만한 영역에서의 예혼합개념(premixed concept), 상대적으로 혼합분율의 변화가 큰 영역에서의 부분예혼합 개념(partially premixed

[†] 책임저자, 회원, 서울대학교 대학원 기계항공공학부
E-mail : jeongs5@snu.ac.kr

TEL : (02)880-7296 FAX : (02)872-8032

* 서울대학교 대학원 기계항공공학부

** 서울대학교 기계항공공학부

concept), 그리고 화염밀단에서의 유동이 화염안정성에 영향을 준다는 와류구조(large or small scale structure)개념 등에 기반을 두고 있다.⁽⁶⁾

먼저 난류강도이론(turbulent intensity theory)에 따르면 국소유동속도와 난류화염 전파속도가 일치하는 지점에서 화염이 안정화 된다고 알려져 있다.⁽⁷⁾ 즉, 난류강도가 큰 확산화염에서도 화염의 부상조건일 경우 화염의 밀단(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.

Muniz와 Mungal⁽⁸⁾은 반응영역이 와류의 구배(large eddy gradient)와 관련이 있고, 변형률(strain rate)이 큰 영역보다는 이론공연비선(stoichiometric line) 근처에서의 와도(vorticity)나 팽창률(dilatation)이 큰 곳에서 화염이 안정화 된다고 보고하고 있다. 이러한 큰와류이론(large eddy theory)에 따르면 화염이 하나의 큰 와류에서 다른 와류로 이동하고, 전파된 화염은 화염밀단에서 안정화 된다고 한다. 최근 Driscoll 등⁽⁹⁾은 따르면 화염 밀단에서의 와류와의 상호작용이 부상화염높이에 미치는 영향이 적다는 연구결과도 보고하고 있다.

그리고 모서리화염이론(edge flame theory)은 층류 영역에서의 삼지화염이론(tribrachial flame theory)에서 발전된 것으로, 난류영역에서는 삼지화염 세 가지의 끝부분이 와류 등의 영향으로 하나의 화염으로 변형되었다고 가정한다. Buckmaster와 Weber⁽¹⁰⁾는 유동장이 자기상사성을 가진다면 평균장의 이론공연비선상에서 국소유동속도는 일정한 값을 지닌다고 보고하였다.

이외에 화염밀단에서의 화염전파속도는 유동의 국소신장(local stretch)에 영향을 받는다고 알려져 있다. Chen 등⁽¹¹⁾은 부상된 비예혼합화염은 화염면 안쪽과 외부의 혼합층이 만나는 곳에서의 국소소멸(local flame extinction)에 지배를 받는다고 보고하고 있다.

마지막으로 부상화염 밀단에서의 혼합분율(scalar dissipation rate)이 화염안정성에 영향을 주기도 한다. 혼합분율의 구배는 열방출률(heat release rate)에 영향을 주므로 화염전파속도에 영향을 미치게 되고 결국 부상화염의 높이와 상호 관련성을 지니게 된다. 그러나 Watson 등⁽¹²⁾에 따르면 소산율이

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

모서리화염에서의 국소적인 소멸(local flame extinction)에 큰 영향을 미치지 않는다는 결과도 보고되고 있다.

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 화염안정화 지점에서의 유동특성 및 안정화 메커니즘을 밝혀내는데 있다.

2. 실험방법

2.1 실험장치

실험장치는 크게 연소기와 레이저 및 광학기, 그리고 영상취득장치 등의 세 부분으로 나뉜다. 먼저 연소기는 20×20cm² 너비와 80cm 높이의 제어 체적을 가지고 있으며 광학적 접근이 가능하도록 네 개의 합성석영재질의 평판(quartz plate)으로 둘러싸여져 있다. 사용된 연료노즐은 내경(d_F) 3.7mm, 두께(t_{tip}) 0.2mm의 원통형이며, 이 주위를 내경, $d_A=15mm$ 의 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.

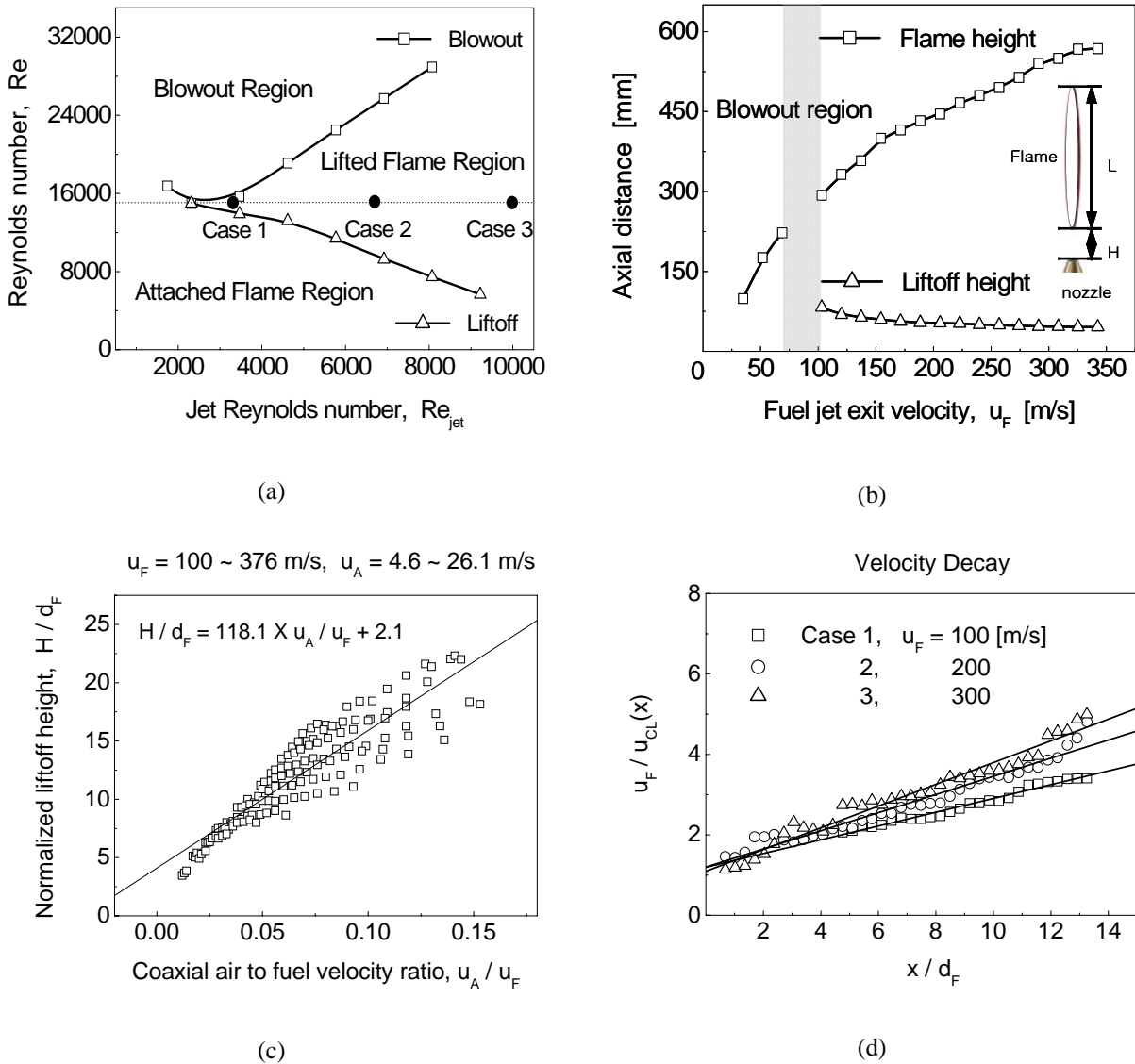


Fig. 1 Visible flame appearance; (a) flame stability map, (b) tendency of flame height and liftoff height, (c) a fitting plot of normalized liftoff height, (d) a different velocity decay of hydrogen jet in case 1 to 3

OH 라디칼은 283.93nm에서 여기되는 $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$ 밴드의 $Q_1(6)$ 전자준위를 가지고 있으며, 방출되는 형광신호는 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 μ m의 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 동점성 계수이다. 실험조건은 Table 1에 정리되었다.

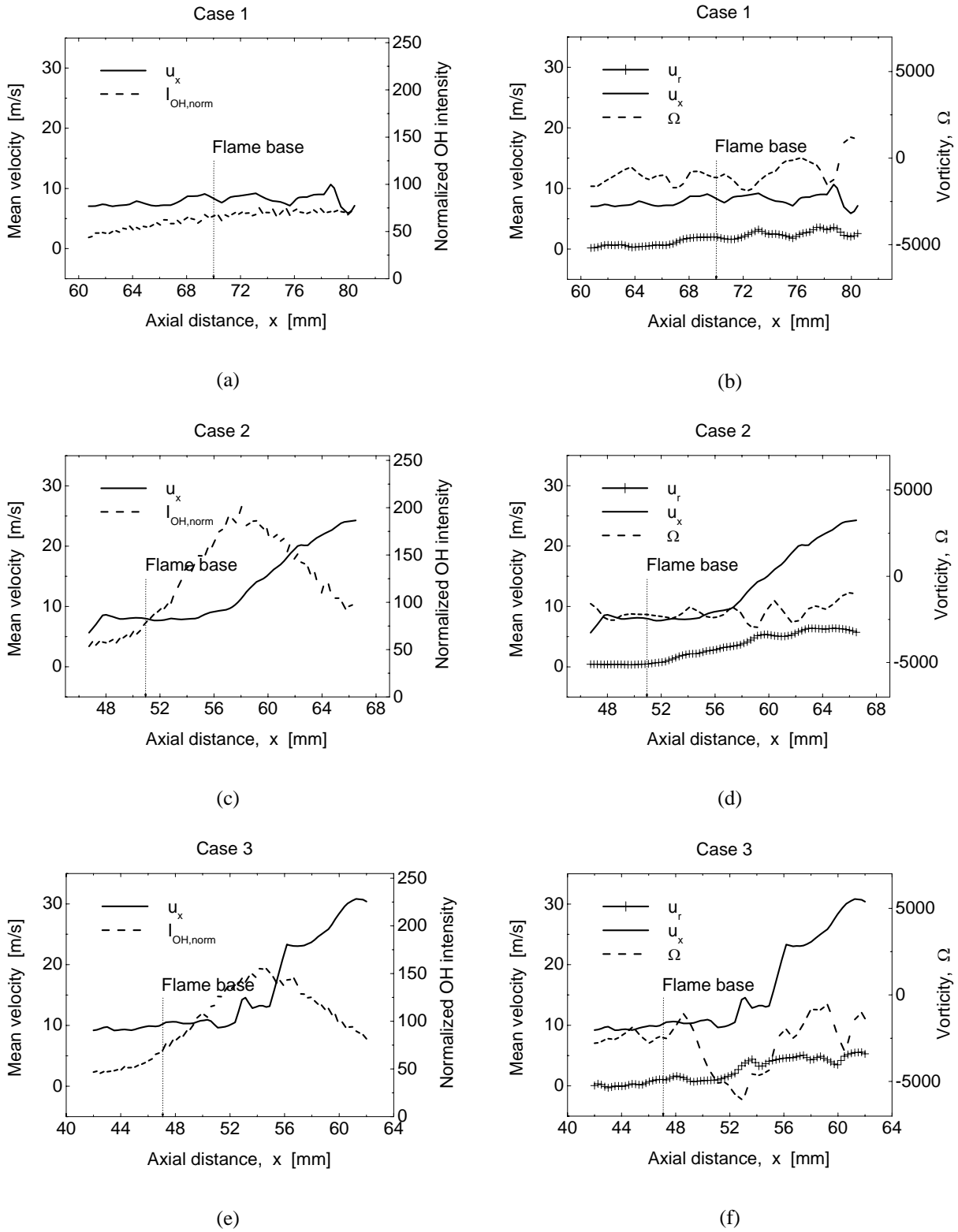


Fig. 2 Characteristics of flow fields to the axial distance around a flame base; (a) and (b) for Case 1, (c) and (d) for Case 2, (e) and (f) for Case 3

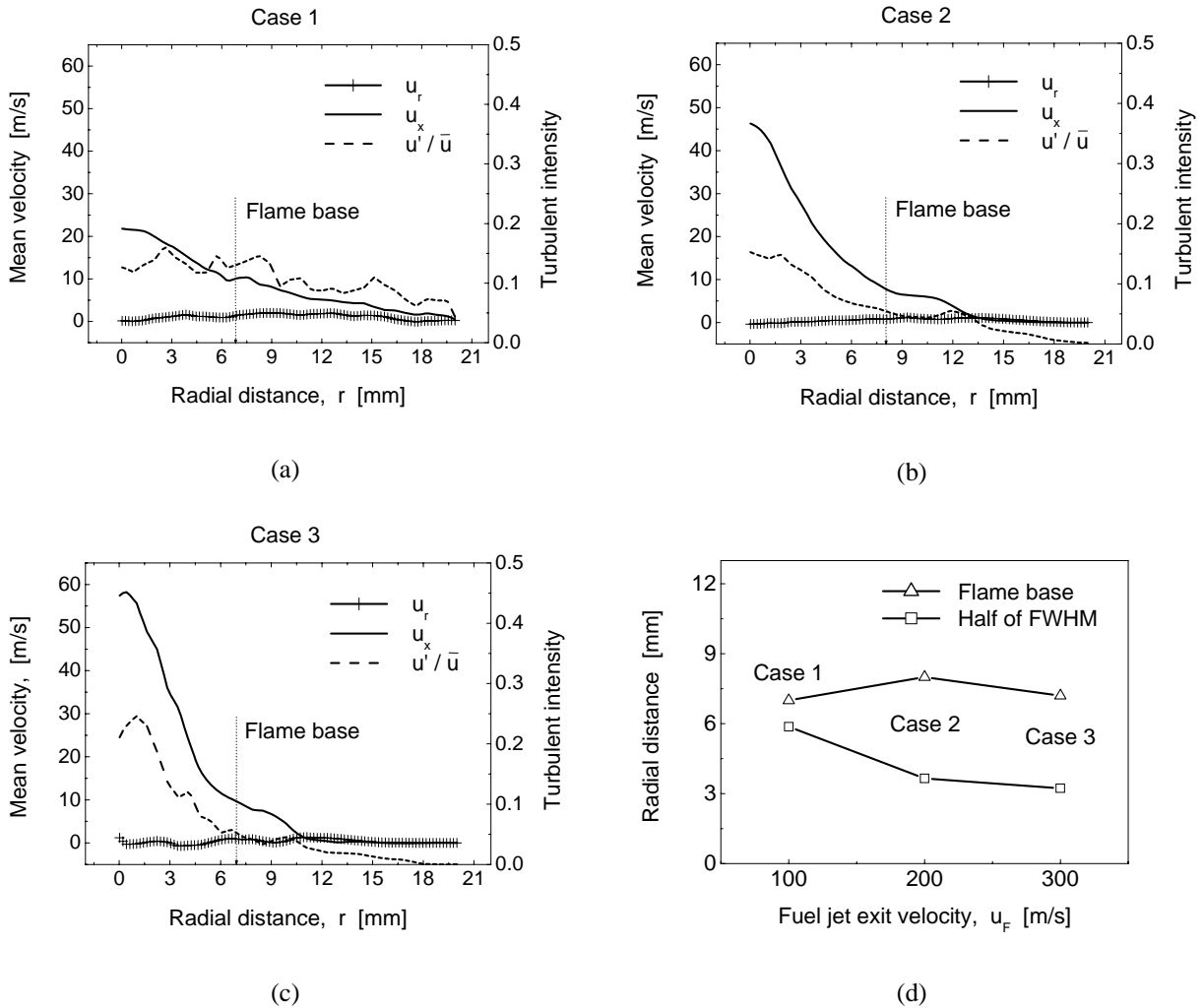


Fig. 3 Characteristics of flow fields to the radial distance at the height of the flame base; (a) and (b) for Case 1, (c) and (d) for Case 2, (e) and (f) for Case 3

3. 결과 및 토의

3.1 화염형상

Figure 1은 각각 가시화염사진을 이용하여 구한 (a) 화염안정화 지도, (b) 부상화염높이 및 화염길이, (c) 무차원화한 부상화염높이의 경향성, (d) 축방향 연료제트의 속도감쇠를 나타내고 있다. 화염안정화 지도는 $u_F \approx 100\text{m/s}$, $u_A = 16\text{m/s}$ 를 기준으로 화염날립지역과 부상화염지역 그리고 소염지역으로 나뉜다. 동축공기의 속도가 일정할 때, 노즐출구에서의 연료속도가 증가함에 따라 화염안정화 지역과 소염지역은 감소하나 부상화염지역은 증가함을 확인할 수 있다. 이때, 화염길이(L)는 화염밀단에서부터 화염의 끝부분(flame

tip)에서 강도변화를 인지할 수 있는 제일 후류의 지점까지 거리로 하였고, 가시화염의 디지털 데이터를 컴퓨터로 처리하기 위하여 최고 강도값의 25%를 문턱값(threshold value)으로 하였다. 부상화염높이(H)는 노즐출구에서 화염밀단까지의 거리로 정의하였으며, 화염길이를 구할 때와 같은 방법으로 처리하였다. Figure 1(b)에서 보듯 동축공기속도를 16m/s로 고정하였을 때, 연료제트속도를 증가함에 따라 화염길이는 증가하는 반면 부상화염의 높이는 감소함을 알 수 있다. 무차원화한 부상화염의 높이는 동축공기의 속도에 비례하고 연료의 속도에 반비례하는 경향을 보였으며 다음의 관계식 (1)로 표현할 수 있었다[Fig. 1(c) 참고].

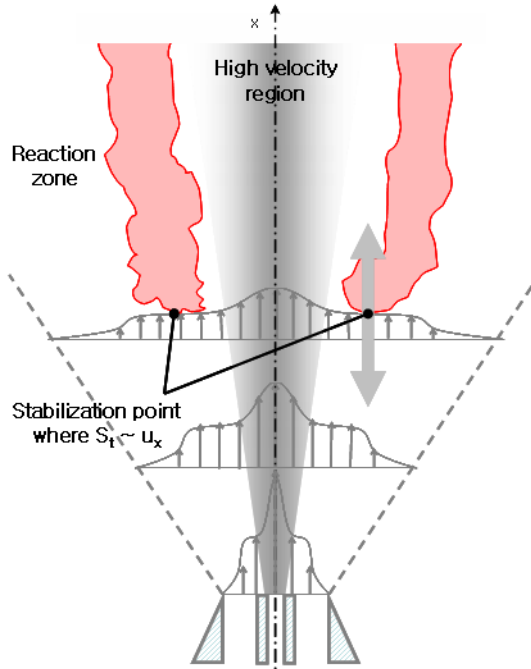


Fig. 4 Stabilization mechanism of lifted hydrogen turbulent non-premixed flames with a coaxial flow

$$\frac{H}{d_F} = 118.1 \times \frac{u_A}{u_F} + 2.1 \quad (1)$$

이러한 관계는 이전연구결과와 배치되는 결과이다.⁽¹³⁾ Figure 1(d)의 중심축에서 축방향 수소의 속도감쇠가 동축공기와의 속도비에 영향을 받음을 볼 때 본 연구에서 수소확산화염의 부상조건을 만들기 위해 사용된 동축공기가 화염의 거시적 경향에 영향을 미쳤을 것으로 생각된다.

3.2 유동장 특성

부상화염의 특성을 분석하기 위하여 동시측정을 통해서 유동장과 OH 라디칼의 형광신호분포를 구하였다. 본 실험에서는 OH를 반응영역을 나타내는 표식자(indicator)로 가정하고 OH의 분포를 연소가 이루어지는 반응영역(reaction zone)으로 보았다. Figure 2는 평균장에서 화염밑단(flame base) 주변의 축방향으로의 속도, 와류도, OH 형광강도를 나타내고 있다. Figure 2 (a), (c), (e)에서 보듯 case 1에서 3으로 갈수록, 즉 연료제트속도가 증가할수록 반응영역을 지나면서 축방향 속도성분(u_x)이 급격히 증가함을 알 수 있었다. Figure 2(b), (d), (f)에서 화염밑단에서부터 반경방

향으로의 반경방향 속도성분(u_r)이 증가되기 시작하였으며 이는 연소에 의한 팽창의 영향으로 생각된다. 부상화염 안정화 메커니즘 중의 하나인 큰와류이론(large eddy theory)에 따르면 화염밑단에서의 강한와류가 화염의 안정성에 긍정적으로 영향을 미치며 화염의 전파역시 이러한 큰 와류들에 의해 영향을 받는다고 알려져 있다. Mungal 등⁽⁸⁾은 메탄과 주위류(coflow air)를 사용한 실험에서 반응영역이 와류의 구배와 관련이 있으며 화염밑단 이론공연비 조건 부근에서의 화염안정성은 강한 와도(vorticity)와 관련이 있음을 실험적으로 밝혀내었다. 본 실험에서 case 1, 2, 3 공통적으로 화염밑단에서부터 와도가 증가하기 시작하는 것을 확인할 수 있었으며, Fig. 2(f)에서와 같이 연료제트속도가 가장 큰 경우 와도가 가장 크게 나타났다. 이는 연료와 공기의 경계면에서 생성되는 강한 와도로 인해 비교적 높은 연료제트속도에서도 화염이 안정화될 수 있는 조건이 형성되는 것으로 생각된다.

Figure 3은 case 1, 2 3의 경우 화염밑단에서의 반경방향으로의 평균장 속도분포를 나타내고 있다. 중심축으로 갈수록 축방향 연료제트속도가 급격히 증가하였으며 이에 따라 난류강도 역시 증가하였다. 세 경우 화염이 안정화되는 화염밑단의 위치는 비교적 고속의 연료제트에서 벗어나 동축공기와의 경계면 부근($r \approx 7.5\text{mm}$)에서 거의 일정하였으며, 화염 밑단에서의 축방향속도도 연료제트속도 증가에 따라 조금씩 증가하였으나 큰 차이를 나타내지는 않았다. Figure 3(d)는 화염밑단과 FWHM의 위치를 비교해 놓았다. $u' \geq S_{L,0}$ 인 영역(moderate and strong turbulence)에서 난류화염전파속도는 integral scale과 관련이 있음이 알려져 있다 (integral scale이 크면 클수록 난류화염전파속도는 증가한다).⁽¹⁴⁻¹⁶⁾ 그러나 동축공기를 사용한 본 실험조건에서는 연료제트의 유동특성이 화염이 안정화되는 위치에 미치는 영향은 크지 않았다.

3.3 부상 메커니즘

화염밑단에서의 화염 안정화 메커니즘을 설명하기 위하여 화염면을 따라 화염밑단에서 노즐에 가장 가까운 지점을 부상화염을 지지하고 있는 곳으로 보고 stabilization point로 정의하였다. 본 실험조건에서 부상화염은 동축공기의 영향으로 제트의 고속유동장을 벗어나 속도가 비교적 낮은 영역에서 안정화되고 있

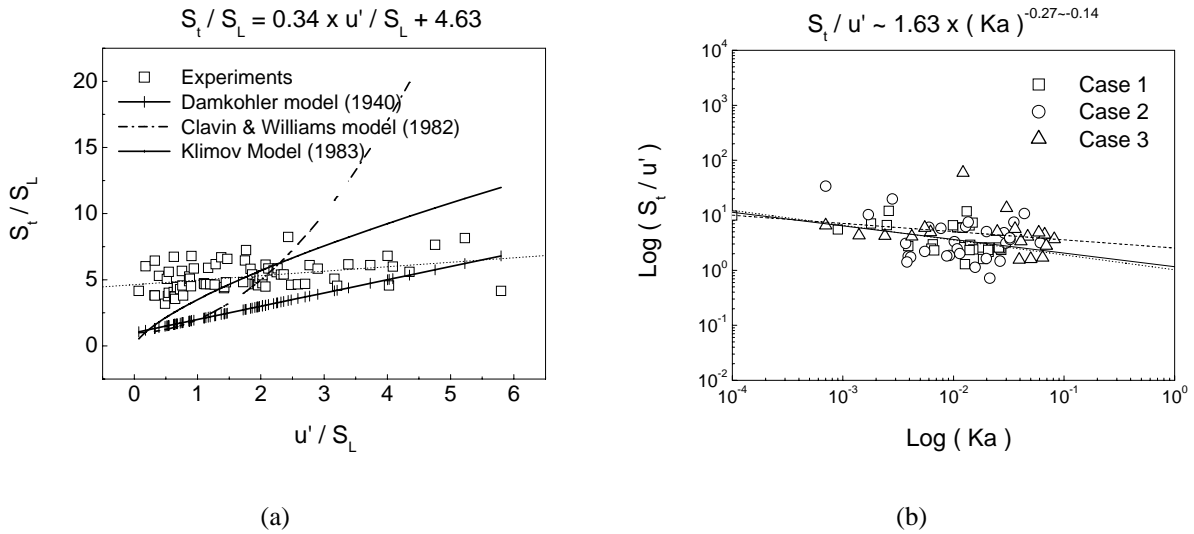


Fig. 5 Turbulent burning velocity correlation; (a) comparison with other models, (b) influence of Ka on S_t/u'

으므로 공기와 연료의 경계층에서 혼합이 활발하여 예혼합특성을 지니는 것으로 생각된다.

Figure 4는 수소제트와 동축공기를 사용한 본 실험에서의 화염안정화 메커니즘을 설명하고 있다. 화염은 상대적으로 고속의 유동장을 벗어나 상대적으로 저속이고 수소와 동축공기의 혼합이 활발히 이루어지는 연료공기 경계면부근의 국소 유동속도(local flow velocity)와 난류화염전파속도(turbulent burning velocity)가 균형을 이루는 곳(stabilization point)에서 안정화됨을 의미한다. 즉 연료공기 속도비가 클수록 stabilization point의 위치가 노즐에 가까워짐을 볼 때, 경계면에서의 유동특성 및 연료공기 혼합정도가 난류화염의 전파속도에 영향을 미치는 것으로 생각된다.

화염의 안정화 메커니즘을 설명하기 위하여 난류화염전파속도와 이에 영향을 미치는 인자에 관한 많은 선행연구들이 진행되어 왔다. 일반적으로 난류화염전파속도는 Da 및 Ka 수, 난류강도, 신장률, Re 수, 혼합기의 혼합분율(scalar dissipation rate) 등에 영향을 받는다고 알려져 있다.⁽¹⁶⁾

Stabilization point에서의 난류화염전파속도와 난류강도 및 Ka 수와의 관계를 Fig. 5에 나타내었다. Figure 5(a)에서 보듯 난류 화염전파속도는 축방향 rms 속도에 선형적으로 비례하였다. 이 관계를 아래의 식 (2)에 나타내었다.

$$S_t/S_L = 0.34 \times u'/S_L + 4.63 \quad (2)$$

이때 층류 화염전파속도로 무차원화 한 축방향 rms 속도는 $0 < u'/S_L < 6$ 의 범위 내에서 분포하였고, 난류화염 전파속도는 층류 화염전파속도의 약 5배 전후였다. 이전 선행연구에서의 난류화염 전파속도와 비교해 볼 때, 축방향 rms 속도가 높을수록 비교적 Damköhler 모델($S_t/S_L = 1 + u'/S_L$)에 근접하였으나 다른 두 모델(Clavin & Williams 모델, $S_t/S_L = \{0.5 [1 + (1 + 8Cu'^2/S_L^2)]^{1/2}\}^{1/2}$ 과 Klimov 모델, $S_t/S_L = 3.5(u'/S_L)^{0.7}$)과는 차이를 보였다.

Figure 5(b)에서 난류 화염전파속도는 Ka 수에 영향을 받으며 S_t/u' 는 연료공기 속도비가 증가할수록 Ka수에 영향을 적게 받는 것으로 나타났다. 관계식은 다음과 같다.

$$S_t/u' \sim Ka^{-0.24} \quad (3)$$

이는 상대적으로 속도차에 의한 수소와 동축공기의 혼합이 활발할수록 수소의 빠른 화학반응속도의 영향이 줄어드는 것으로 생각된다. Ka 수는 화학반응특성시간(τ_c)과 와류의 가장 작은 단위인 Kolmogorov 와류의 특성시간(τ_K)의 비율로서 그 값이 1보다 작으면 화학반응이 빨리 일어나고 있음을 의미한다. 본 연구에서는 Ka 수를 축방향 신장률(S_{xx})과 반응률(α/S_L^2)을 사용하여 구하였다. ($Ka = \tau_c/\tau_K \approx S_{xx} \times \alpha/S_L^2$)

4. 결 론

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) 부상화염은 연료제트와 동축공기의 경계면에서 안정화 되었다.

(3) 동시측정을 통하여 화염 밑단에서 국소유동속도와 난류화염전파속도가 균형을 이루는 지점에서 반응이 시작되었으며, 이때 $S_t/u' \sim Ka^{-0.24}$ 의 관계를 가졌다.

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) Tacke, M. M., Geyer, D., Hassel, E. P. and Janicka, J., 1998, "A Detailed Investigation of the Stabilization Point of Lifted Turbulent Diffusion Flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, 27, pp. 1157~1165.
- (7) 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.
- (8) Muniz, L. and Mungal, M. G., 1997, "Instantaneous Flame-Stabilization Velocities in Lifted-Jet Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 111, pp. 16~31.
- (9) 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.
- (10) Buckmaster, J. and Weber, R., 1996, "Edge-flame-holding," *Proceedings of the Combustion Institute*, 26, pp. 1143~1148.
- (11) 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.
- (12) 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.
- (13) Brockhinke, L., Haufe, S. and Kohse-Hönghaus, S., 2000, "Structural Properties of Lifted Hydrogen jet Flames Measured by Laser Spectroscopic Techniques," *Combustion and Flame*, Vol. 121, pp. 367~377.
- (14) Tennekes, H. and Lumley, J. L., 1999, "A First Course in Turbulence," *MIT Press*.
- (15) Lipatnikov, A. N. and Chomiak, J., 2005, "Molecular Transport Effects on Turbulent Flame Propagation and Structure," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 28, pp. 1~74.
- (16) Lipatnikov, A. N. and Chomiak, J., 2002, "Turbulent Flame Speed and Thickness: Phenomenology, Evolution, and Application in the Multi-dimensional Simulations," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 28, pp. 1~74.