

수소 난류확산화염에서의 부상 메커니즘에 대한 연구

오정석* · 김문기* · 최영일* · 윤영빈†

Investigation of liftoff mechanisms in hydrogen turbulent non-premixed jet flames

Jeongseog Oh, Munki Kim, Yeongil Choi and Youngbin Yoon

Abstract

The stabilization mechanism of turbulent, lifted jet flames in a non-premixed condition has been studied experimentally. The objectives are to explain the phenomenon of a liftoff height decreasing as increasing fuel velocity and to reveal the mechanisms of flame stability. Hydrogen was varied from 100 to 300 m/s and a coaxial air was fixed at 16 m/s with a coflow air less than 0.1 m/s. The technique of PIV and OH PLIF was used simultaneously with CCD and ICCD cameras. It was found that the liftoff height of the jet decreased with an increased fuel jet exit velocity. The leading edge at the flame base was moving along the stoichiometric line. Finally we confirmed that the stabilization of lifted hydrogen diffusion flames is related with a turbulent intensity, which means combustion is occurred where the local flow velocity is equal to the turbulent flame propagation velocity.

Key Words : Liftoff flame(부상화염), Turbulent non-premixed flame(난류확산화염), PIV, OH PLIF

1. 서론

난류 확산화염에서의 부상화염에 대한 연구는 연소 안정성이라는 근본적인 원인을 이해하는데 있어서 중요하므로, 이와 관련된 많은 연구들이 수행되어져 왔다[1,2]. 층류영역에서는 삼지화염의 전파속도가 국소유동속도와 균형을 이루는 지점에서 연소가 시작된다고 알려져 있고, 이에 영향을 미치는 인자들로서 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.

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 예혼합 화염의 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

† 서울대학교 공과대학 기계항공공학부
E-mail : ybyoon@snu.ac.kr

* 서울대학교 공과대학 기계항공공학부

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 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[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 연료증가에 따라 줄어드는 경향을 보이는 부상화염의 거동을 설명하고 화염구조 분석을 통하여 화염안정의 근본 원인을 밝혀내는데 있다.

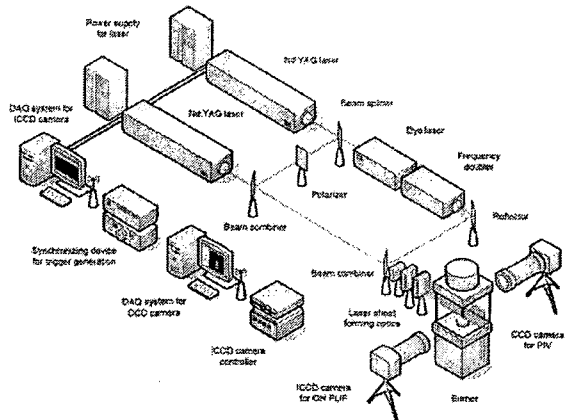


Fig. 1 Schematic diagram of a simultaneous measurement system for PIV and OH PLIF

2. 실험방법

2.1 실험장치

실험장치는 크게 연소기와 레이저 및 광학기기, 그리고 영상취득장치 등의 세 부분으로 나뉜다. 먼저 연소기는 20X20cm 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, $d_{co}=15mm$ 의 동축류 노즐이 둘러싸고 있다. 다음으로 PIV(Particle 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 형광신호는 306~320nm의 파장을 통과시키는 필터(UG-11, WG-305)와 렌즈(Nikor f/4.5 105mm UV macro)를 통하여 1024X1024 해상도를 가지는 ICCD 카메라(Princeton instruments inc., PI-MAX 1K)로 받아들여졌다. PIV 측정을 위해 1 μm 의 SiO₂가 연료와 동축공기관으로 주입되었으며 532nm의 레이저광에 의해 산란된 Mie scattering 신호는 1008X1018 해상도의 CCD 카메라(Kodak ES 1.0)로 수광되었다.

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_A [m/s]	100	200	300
Coaxial air velocity, u_{co} [m/s]	16	16	16
Coflow air velocity, u_{∞} [m/s]	0.1	0.1	0.1
Liftoff height, x [mm]	57~67	40~50	37~47

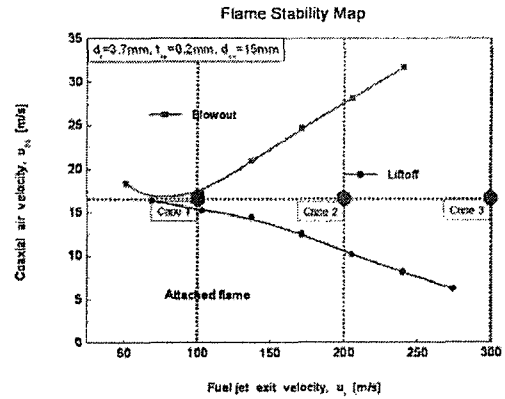
2.2 실험조건

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

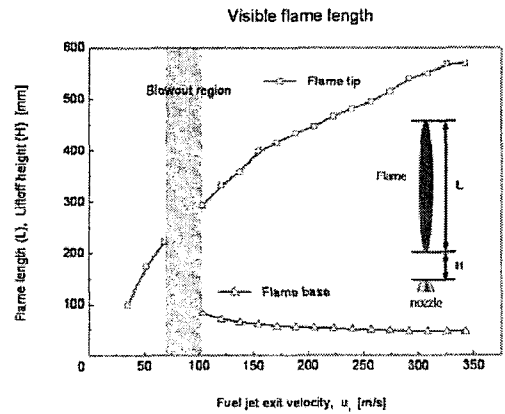
3. 결과 및 토의

3.1 가시화염

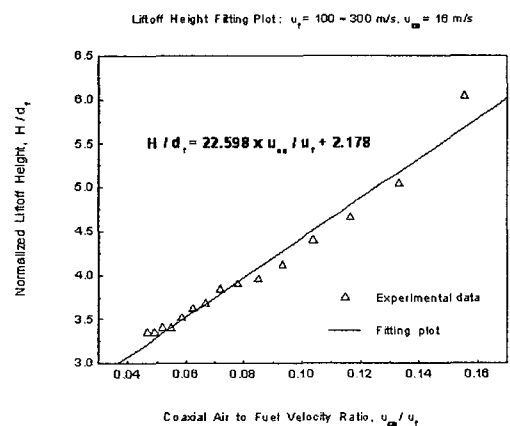
Figure 2는 가시화염사진을 통해 얻어진 화염 안정화 지도(a)와 화염길이(b) 그리고 부상화염의 fitting plot(c)을 나타내고 있다. $u_{co}=16m/s$ 를 기준으로 화염이 안정적인 지역과 부상화염지역 그리고 소멸지역으로 나뉘어졌다. 화염길이(flame length, L)는 화염밀단에서부터 화염의 끝부분(flame tip)에서 강도변화를 인지할 수 있는 제일 후류의 지점까지 거리로 하였고, 가시화염의 디지털 데이터를 컴퓨터로 처리하기 위하여 최고 강도값의 5%를 문턱값(threshold value)으로 하였다. 부상화염높이(liftoff flame height, H)는 노즐출구에서 화염밀단까지의 거리로 정의하였으며, 화염길이를 구할 때와 같은 방법으로 처리하였다. Figure 2 (b)에서 동축공기를 16m/s로 고정하였을 때, u_f 를 증가함에 따라 화염길이는 증가하였고 반면 부상화염의 높이는 감소하였다. 이 때 무차원화한 부상화염의 높이는 동축공기의 속도에 비례하고 연료의 속도에 반비례하는 관계를 보였다. (Fig. 2 (c) 참조)



(a)



(b)



(c)

Fig. 2 Results from visible flame images; (a) flame stability map, (b) visible flame length and liftoff height, (c) normalized liftoff height and fitting plot

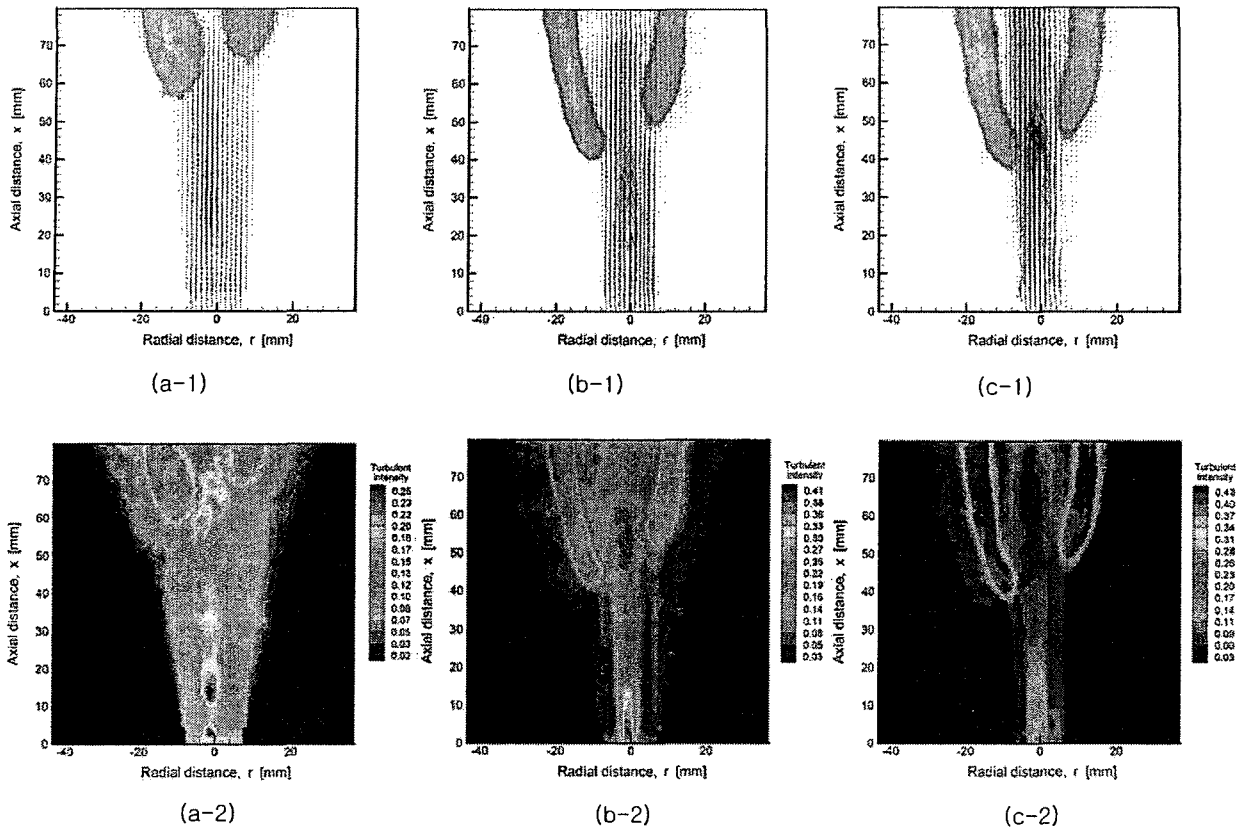


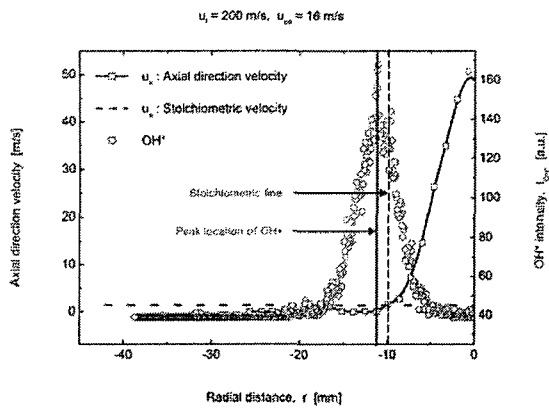
Fig. 3 Simultaneously measured PIV and OH PLIF results, showing time-averaged velocity vector field on OH* layer (top,1) and turbulent intensity distribution with the contour of OH* layer (bottom,2) for (a) case 1, (b) case 2 and (c) case 3

3.2 OH PLIF/PIV 동시측정결과

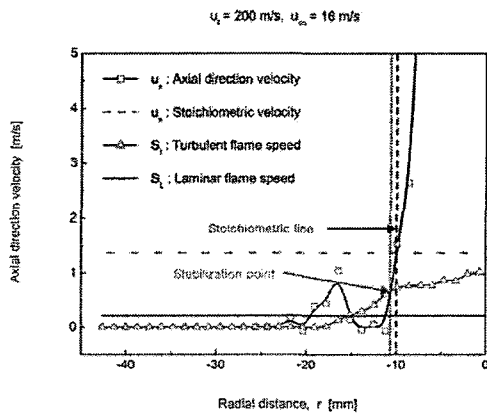
동시측정을 통해서 유동장과 OH 라디칼의 형광신호분포를 구하였다. 본 실험에서는 OH를 반응영역을 나타내는 표식자(indicator)로 가정하고 OH의 분포를 연소가 이루어지는 반응영역으로 보았다. Figure 3 (a,b,c-1)은 각 조건에서 시간 평균한 속도장과 반응영역을 나타낸다. 연료속도 증가에 따라 벡터의 길이가 증가하였으며 화염밀단은 상류(upstream)로 내려왔다. 반응영역에서의 생성열로 인한 팽창효과(3 dimensional effect)로 인해 벡터의 방향이 화염의 바깥쪽으로 벌어지고, 부력효과에 의한 동축공기가 연소장으로 유입(entrainment)되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 이러한 영향은 연료의 운동량 증가로 인해 점점 줄어들었으며, 후류(downstream)로 갈수록 속도감쇠(decay)가 두드러졌다. Figure 3 (a,b,c-2)는 화염면과 난류강도분포를 나타내고 있다. 난류강도분포는 연료속도 증가에 따라 축

방향의 속도성분이 반경방향에 비하여 상대적으로 증가하므로 case 3에서 제일 적으나, 난류강도분포 경계영역은 화염면과의 비교에서 대략적으로 일치함을 확인할 수 있다. 이는 난류화염전파속도가 난류강도와 관련이 있음을 의미한다.

본 논문에서는 화염밀단에서 반응이 시작되는 지점을 화염면(hot temperature line)으로 보고, 이 높이에서 OH 강도가 최고인 지점을 leading edge로 정의하였다. Figure 4 (a)에서 이론공연비선과 leading edge의 위치가 상당히 근접함을 확인할 수 있다. 이로서 탄화수소계열의 화염에서와는 달리 수소 확산화염에서 OH를 반응영역의 표식자로서 사용하는 것이 타당함을 알 수 있다. PIV의 결과에서 국소유동속도와 난류화염전파속도가 일치하는 지점에서 화염이 안정적으로 존재한다고 가정하여 이 지점을 stabilization point로 정의하였다. 이 때 난류화염전파속도(S_t)는 Klimov



(a)

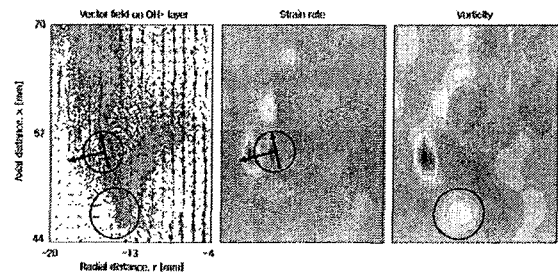


(b)

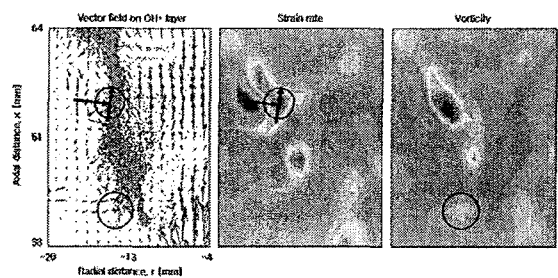
Fig. 4 Profile of (a) local flow velocity and OH* distribution, (b) local flow velocity and turbulent flame speed at leading edge obtained from time-averaged PIV and OH PLIF data

model을 사용하였으며, $S_t/S_L = 3.5(v'_s/S_L)^{0.7}$ for $v'_s/S_L \gg 1$ 로 하였다[12]. 여기서 v'_s 은 속도의 RMS(root mean square)값이고, S_L 은 상온에서 수소의 층류화염전파속도($\approx 0.21\text{m/s}$)이다. Figure 4 (b)에 이론공연비선과 stabilization point와의 위치를 나타내었다. Fig. 3과의 비교를 통해 화염전파속도와 국소유동속도가 일치하는 지점에서 화염이 안정화됨을 알 수 있고, 이는 본 실험조건에서 난류강도이론이 성립함을 의미한다.

동시측정의 순간사진에서 국소유동장과 반응영역 사이의 관계를 Fig. 5에 나타내었다. 화염밀단에서 공통적으로 와도가 강하게 발달하였으며, 축방향을 따라 반응영역과 와도의 분포지역이 상호 일치함을



(a)



(b)

Fig. 5 Instantaneous local flow field of vector on OH* layer(left), strain rate(middle) and vorticity(right) for (a) case 2 and (b) case 3

확인할 수 있었다. 이는 화염이 큰와류를 따라 전파된다는 큰와류이론으로 설명되어질 수 있다. Figure 5의 가운데 사진에서 국소신장율이 발달한 지점에서 화염면이 얇아졌고, 신장률의 양 또는 음의 분포에 따라서 화염면의 기울기가 달라짐이 관찰되었다. Rehm 등[13]은 반응영역이 이론공연비선 근처에서 강한 와류의 생성지역과 일치함을 발견하였고, 신장률이 강한 지역에서 반응영역이 얇아지며 화염면의 기울기는 유동방향에 45°의 기울기를 가진다고 하였다.

3.3 화염안정화 메커니즘

탄화수소계열의 연료와 주유류를 사용한 선행연구들의 결과는 연료속도증가에 따라 부상화염의 길이가 증가한다고 보고하고 있다. 그러나 본 실험조건에서는 이와 반대의 경향을 보이고 있으며, 이는 동축류 주입으로 인한 연소장로의 공기유입 증가, 그리고 공기와 연료의 경계층에서의 혼합과 난류강도의 증가로 설명되어질 수 있다. 이를 통해 볼 때, 국소유동속도와 난류화염전파속도가 일치하는 곳에서 연소반응이 시작되며, 화염 밀단에서 국소와도의 증가도 화염안정화에 영향을 미치는 것으로 생각된다.

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 거동을 나타내었고, 동축공기와 연료 유속의 비에 선형적으로 증가하는 경향을 보였다.

2) 화염 밑단에서의 leading edge는 연료속도를 달라하였을 때, 화염면을 따라 이동하였고, 이는 모서리화염이론에 의하여 설명되어질 수 있다.

3) 동시측정을 통하여 부상화염의 반응영역은 난류강도분포와 일치하였고, 화염 밑단에서 국소 유동속도와 난류화염전파속도가 균형을 이루는 지점에서 반응이 시작되었다. 이는 난류강도이론으로 설명되어질 수 있다.

참 고 문 헌

- 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, "Lift-off 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, "Lift-off 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 Lift-off 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) Turns, S. R., 2000, "An Introduction to Combustion (2nd edition)," McGraw-Hill, New York, p. 463.
- 13) Rehm, J. E. and Clemens, N. T., 1998, "The Relationship between Vorticity/Strain and Reaction Zone Structure in Turbulent Non-premixed Jet Flames," 27th Symposium (International) on Combustion Institute, pp. 1113~1120.