

## 동축 확산 부상화염의 Blow-off와 연소 특성

곽지현\* · 전충환\*\* · 장영준†  
(2002년 12월 23일 접수, 2003년 5월 9일 심사완료)

### Blow-off and Combustion Characteristics of a Lifted Coaxial Diffusion Flame

Ji-hyun Kwark, Chung-hwan Jeon and Young-june Chang

**Key Words:** Lift-Off Height(부상 높이), Blow-Off(불어꺼짐), Blow-Off Limit(가연한계),  
Turbulent Diffusion Flame(난류확산화염)

#### Abstract

An experiment was performed to investigate lift-off, blow-off and combustion characteristics of a lifted coaxial diffusion flame according to fuel jet and air velocity. A jet diffusion flame which is attached on the nozzle rim begins to be lifted with increase of air velocity, and finally becomes blow-off at higher air velocity. In experiment, blow-off limit increased with increase of fuel jet velocity, however lift-off occurred at lower air velocity. Flame structure and combustion characteristics were examined by schlieren photos, temperature distributions and emissions concentration distributions. Flame temperature became higher at midstream and its RMS became larger at up and downstream with increase of air velocity. Local NO concentration decreased but CO<sub>2</sub> concentration increased with increase of air velocity, which shows combustion reaction becomes close to be stoichiometric at higher air velocity in spite of lift-off.

#### 1. 서론

##### 기호 설명

H	: 부상높이 [mm]
L	: 화염길이 [mm]
L/H	: 화염길이비
R	: 반경방향거리 [mm]
S <sub>L</sub>	: 층류화염속도 [m/s]
T	: 평균화염온도 [K]
V <sub>f</sub>	: 연료분출속도 [m/s]
V <sub>a</sub>	: 공기분출속도 [m/s]
V <sub>a</sub> /S <sub>L</sub>	: 무차원공기유속
X	: 축방향거리 [mm]

확산화염에서 연료를 분사할 때 노즐에 부착된 화염은 연료와 산화제가 초기에 분리된 상태로부터 확산과 대류에 의하여 화염지역으로 전달되어 분자적 혼합이 일어나 화학반응이 발생하고, 생성된 열과 물질은 전달 현상에 의하여 화염 바깥 쪽으로 이동된다.<sup>(1)</sup> 이러한 화염은 유속의 증가에 따라 화염이 노즐로부터 떨어져 존재하는 부상화염으로 변환되거나 화염꺼짐이 발생할 수 있다.<sup>(2)</sup> 부상화염에서 노즐로부터 화염 밀면까지의 거리를 부상높이라고 한다. 화염이 부상한 후 유량을 어느 한계 이상 증가시키면 화염날림이나 불어꺼짐 현상이 발생한다. 이론적인 연소를 위해서는 이론 혼합비에 맞는 공기와 연료가 요구 되지만, 완전 연소를 위해서는 이론 공기량보다 더 많은 공기가 필요하게 되고, 때론 지나친 공기과다로 blow-off 현상을 초래할 수 있다. 따라서 난류 화염의 연소에 있어서 가장 중요한 요소는

† 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소  
E-mail : changyj@pusan.ac.kr  
TEL : (051)510-2332 FAX : (051)582-9818

\* 회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

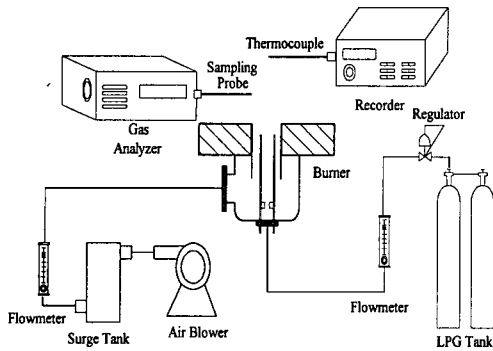


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

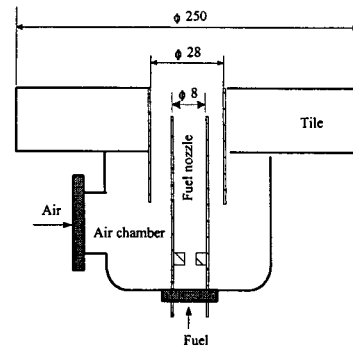


Fig. 2 Specification of the burner

연소 안정성이며 오랫동안 연구자들의 관심의 대상이 되어왔다. 그리고 이러한 연구들은 화염 안정화에 영향을 미치는 물리적 메커니즘을 밝혀내고, 이러한 현상에 대한 예측 가능한 기술을 개발하는 방향으로 이루어져 왔다.<sup>(3-5)</sup> 또한 Vanquickenborne과 Tiggelen,<sup>(6)</sup> Hall 등<sup>(7)</sup>과, Kalghatgi,<sup>(8)</sup> Peters와 Williams,<sup>(9)</sup> Byggstoyl과 Magnussen 등<sup>(10)</sup>의 많은 학자들에 의해 난류 화염 속도에 대한 여러 가지 다른 모델들에 기초한 다양한 기구들이 연구 되어 졌다. 이러한 연구들은 주로 연료와 공기의 유속이나 선회 강도에 따른 화염의 불안정 특성과 메커니즘에 중점을 두고 있다.<sup>(11-15)</sup> 따라서 부상 화염의 구조나 온도 분포, 연소 가스의 특성 등에 관한 연구는 많지 않다.

이 연구는 동축 난류 확산 화염에서 연료와 공기의 유속에 따른 화염의 부상과 가연 한계를 살펴보고, 특히 부상 화염의 구조와 연소 특성에 초점을 맞춘다. 따라서 부상 화염의 슬리넨 사진과 국소 온도 분포, 국소 연소 배출물 등의 측정을 통해 림 부착 화염과 비교 분석하여 부상 화염의 연소 특성을 살펴보고자 한다.

## 2. 실험 장치 및 방법

실험 장치는 Fig. 1과 같이 크게 연소기, 공기 공급장치, 연료공급장치, 온도계측장치, 그리고 배가스 농도 분석 장치로 구성되어 있다. 공기는 출력 0.75kW의 송풍기로부터 서지 탱크를 거쳐 연소기로 공급되며, 연료는 저위 발열량 25.3kJ/Nm<sup>3</sup>, 이론공기량 23.8 Nm<sup>3</sup>/Nm<sup>3</sup>의 프로판을 사용하였다. 화염의 온도는 Pt/Pt-Rh 13%

의 R형 열전대와 다채널 동시 측정 및 기록이 가능한 온도 기록 장치를 사용하였으며 복사과 전도에 의한 열손실은 고려하지 않았다. 주요 배가스의 농도 분포는 외경 2mm의 석션 프로브를 화염 내에 삽입하여, 전기 화학 센서가 내장된 배가스 분석기로 측정하였다. 측정기의 사양은 NO의 경우 측정 범위가 0에서 4,000 ppm이고 오차가 ±2 ppm이며, CO<sub>2</sub>는 측정 범위가 0에서 25 %, 오차가 ±2 %이다. Fig. 2에 연소기의 상세도를 나타낸다. 동축 확산 버너로 가운데에 외경 10mm, 내경 8mm의 연료노즐이 있고, 공기노즐의 직경은 28mm 이다.

연료 유속에 따른 가연 한계와 부상 높이 및 화염 길이의 측정은 각 연료 유속에 대해 공기 유속을 변화시켜 가며 Blow-off 될 때의 공기 유속을 가연 한계로 규정하였고, 각 연료 유속에서 공기 유속 변화에 따른 부상 높이와 화염 길이를 카세트미터를 이용하여 측정하였다. 이 때 측정 기준은 육안으로 관찰되는 가시적 화염 길이를 기준으로 하였고, 모든 값은 각 조건에서 30회 반복 측정한 뒤 평균하여 나타내었다. 부상 화염의 국소 온도분포는 연료 노즐로부터 반경방향으로 10mm, 축방향으로 30mm 간격으로 측정하였고, 각 지점에서 100회 측정하여 평균 온도와 RMS 분포를 구하였다. 그리고 이들의 2차원 분포는 각 측정 격자 사이의 값들을 컴퓨터 프로그램으로 계산한뒤 등궤적선으로 처리하여 비교하기 쉽게 나타내었다. 화염의 국소 배가스 농도도 온도 분포와 같은 간격으로 측정하였다. 자세한 실험조건을 Table 1에 나타낸다.

Table 1 Experimental condition

Item	Blow-off Lift-off height Flame length	Schlieren photos	Temperature Emissions
Fuel jet velocity(m/s)	1~5	3, 4	2, 3
Air velocity(m/s)	0.8~6.2	1~5	1~4
Re (air)	923~7154		

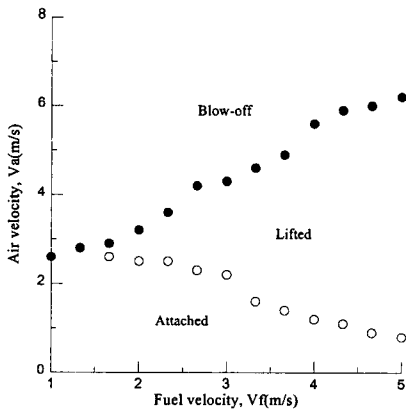


Fig. 3 Blow-off limit

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 가연 한계 및 부상 높이

Fig. 3은 연료 분출 속도에 따른 화염의 가연한계를 나타낸 그림이다. 연료 유속이 1.7 m/s 미만에선 공기 유속의 증가에 따라 부상화염이 생기지 않고 바로 blow-off 된다. 그러나 그 이상의 연료 유속에서는 공기 유속이 빨라짐에 따라 노즐 립에 붙어 있던 화염은 부상하게 되고, 공기 유속이 더욱 빨라지면 결국 화염은 소멸된다. 즉 그림에서 화염은 노즐 립에 붙어 있는 안정 화염의 영역과 부상 화염의 영역, 그리고 blow-off 되어 화염이 존재하지 않는 영역으로 나뉜다. 연료 유속이 증가함에 따라 화염이 꺼지지 않고 존재하는 가연 한계도 증가한다. 확산에 의해 연소 반응이 지배되는 본 화염에서 연료 유속이 증가하면 더욱 빠른 유속을 가지는 공기와의 반응하여 연소할 수 있기 때문이다. 그러나 연료 유속이 빨라질수록 더욱 낮은 공기 유속에서 부상이 시작되어 립에 부착되는 안정 화염의 한계는 더

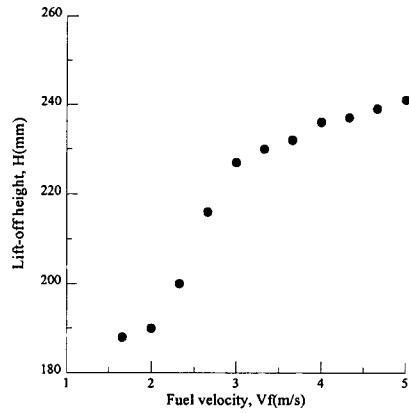


Fig. 4 Lift-off height at the blow-off limit

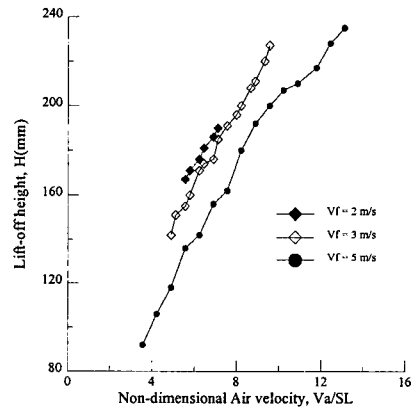


Fig. 5 Lift-off height according to air velocity

욱 작아진다. 연료 유속이 빨라지면 공기 유속이 느려도 분출된 연료와 공기의 혼합기는 큰 운동량을 가지게 되고, 이에 따라 화염이 부상되는 것으로 생각된다.

Fig. 4는 화염이 blow-off 될 때의 부상 높이를 연료 유속에 따라 나타낸 그림이다. 연료 유속이 빠를수록 blow-off 시의 공기 유속은 커지므로 부상 높이는 증가한다. 특히 연료 유속 2~3 m/s 사이에서 급격히 증가하며 S자 형태의 분포를 보인다. Fig. 5에서 보듯이 공기 유속의 증가에 따라 부상 높이도 증가한다. 연료와 공기의 혼합 작용이 개선되어 연소 반응률이 높아지게 되는 효과-이러한 효과를 위해 공기 유속에 선회를 가하기도 하는데 이 논문에선 고려하지 않는다-보다 공기 유속 증가에 화염이 떠밀려 올라가는 현

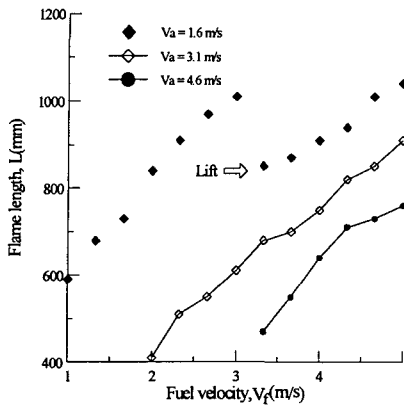


Fig. 6 Flame length according to fuel velocity

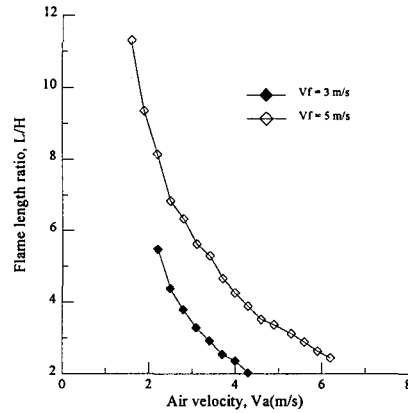


Fig. 8 Flame length ratio according to air velocity

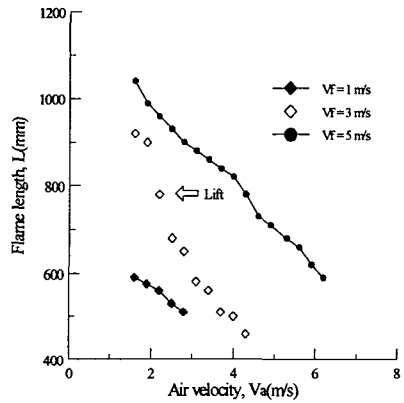


Fig. 7 Flame length according to air velocity

상이 지배적이기 때문이다. 그림에서, 공기 유속을 연료의 층류화염속도로 나눈 무차원 유속  $V_a/S_L$ 와 부상 높이의 관계는 각각 다음 식과 같이 구해진다.

$$H = 50.776 + (V_a/S_L)^{0.655} \quad (V_f=3 \text{ m/s})$$

$$H = 40.829 + (V_a/S_L)^{0.688} \quad (V_f=5 \text{ m/s})$$

이 결과로부터 본 연소기의 부상 높이는 무차원 유속의 약 0.67승에 비례하는 것으로 나타났다.

### 3.2 연료와 공기 유속에 따른 화염 길이

연료 분출 속도에 따른 화염의 길이 변화를 Fig. 6에 나타낸다. 일정한 공기 유속에서 연료 유속의 증가는 곧 연료 유량의 증가를 의미하므로 단위 시간 당 연소하는 연료량이 증가하게 되

고, 이는 화염의 체적을 증가시켜 화염 길이의 신장으로 나타나게 된다. 반면에 Fig. 7과 같이 연료 유속, 즉 연료량이 일정할 때 공기 유속의 증가는 단위 시간 당 보다 많은 연료와 반응할 수 있게 되어 화염 길이는 감소하게 된다. Fig. 6에서  $V_a=1.6 \text{ m/s}$ 의 경우, 연료 유속  $3.2 \text{ m/s}$ 에서 부상이 일어나며 화염의 길이가 갑자기 감소하게 됨을 알 수 있다. 화염이 부상하게 되면 화염 상류의 모양이 역삼각형에서 보따리 모양으로 변하고, 화염 단면적이 커지게 된다. 따라서 화염 길이는 감소하는 것이다. Fig. 7의  $V_f=3 \text{ m/s}$ 일 때도 마찬가지이다.

공기 유속의 변화에 따라 화염의 부상높이에 대한 화염 길이와의 비의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 임의의 연료 유속에서 공기 유속이 증가하게 되면 부상 높이는 커지고, 화염 길이는 짧아지므로 화염 길이 비는 급격히 감소한다. 두 가지 연료 유속에 대해 비슷한 기울기의 분포를 보여 일정한 경향을 나타내었다.

### 3.3 부상 화염의 구조

Fig. 9는 연료 유속이 3과 4 m/s일 때 공기 유속의 증가에 따른 화염의 슬리펜 사진을 나타낸다. (a)와 (f)는 림 부착 화염이고, 나머지는 모두 부상 화염이다. 공기 유속이 증가할수록 화염 내부의 직경이 커지며, 난류 강도의 증가로 인한 작은 와의 형성이 관찰된다. 이러한 와의 구조는 연소 반응을 촉진시켜 고온 영역의 분포를 예상하게 한다. (e)와 (j)에서 부상 화염의 밑면이 관

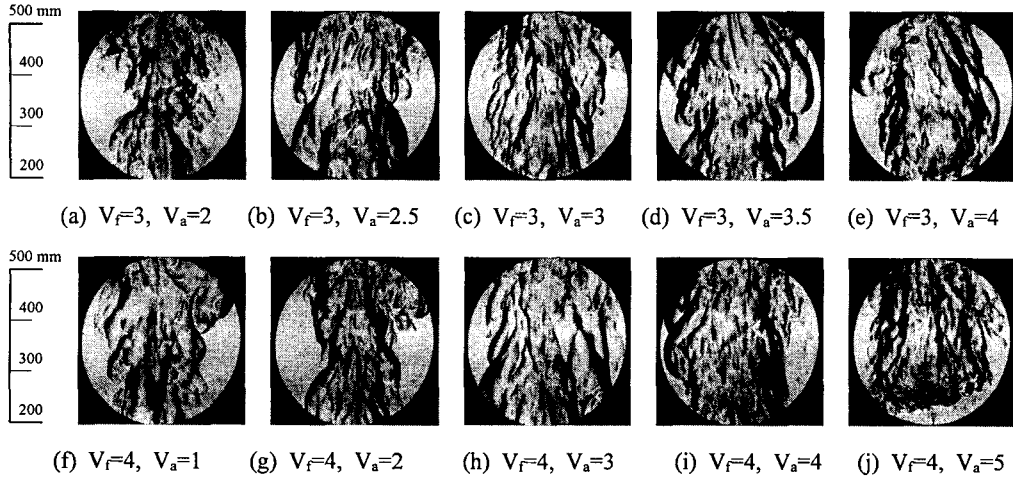


Fig. 9 Schlieren photos of flames according to fuel and air velocities

찰되는데 넓고 둥근 형태를 가지고 있으며 보다 작은 스케일의 와들이 형성되어 있어 난류 강도가 특히 강하고, 이 영역의 온도 변동이 특히 심할 것으로 예상된다.

3.4 화염의 온도 분포

측정된 화염의 순간 온도를 Reynolds 분해를 이용하여 평균 성분과 변동 성분으로 나누어 화염의 평균 온도와 RMS를 구하였다.<sup>(16)</sup>

Fig. 10은 연료 유속 3 m/s일 때 축방향 화염 중심의 평균 온도 분포를 공기 유속별로 나타낸 그래프이다. 부상 화염이 아닌  $V_a=1$  m/s의 림 부착 화염은 화염 상류에서 하루까지 완만하게 증가하는 분포를 보인다. 그러나 나머지 부상 화염은 부상 높이 바로 위인 화염 상류에서 급격한 온도 구배를 가지며 온도가 급격히 상승한다. 하지만 중,하류에서는 균일한 온도 분포를 나타내고 있다. 또한 공기 유속이 빠를수록 화염 중,하류의 온도 분포도 더 높게 나타나 충분한 산화제의 공급으로 연소 반응이 더욱 촉진되는 것으로 판단된다.

Fig. 11은 림 부착화염과 부상화염의 중심 단면의 2차원 온도 분포를 나타낸 그림이다. (a)의 림 부착 화염은 중심축에서 화염의 가장자리로 갈수록 온도 구배가 크게 나타나지만, (b)의 부상 화염은 화염 밑면이 넓게 형성되면서 화염의 단면

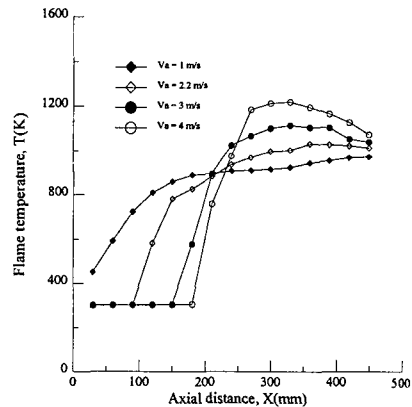
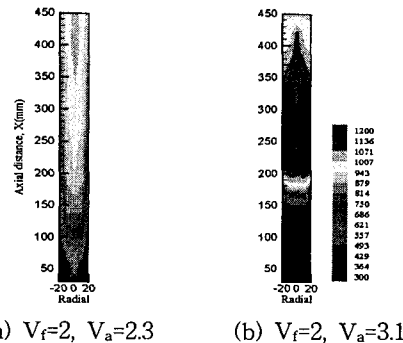


Fig. 10 Flame temperature in the axial direction ( $R=0$ ,  $V_f=3$  m/s)



(a)  $V_f=2$ ,  $V_a=2.3$  (b)  $V_f=2$ ,  $V_a=3.1$   
Fig. 11 2D distribution of flame temperature (K)

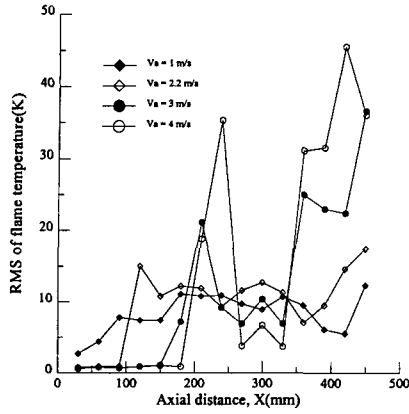


Fig. 12 RMS of flame temperature (R=0,  $V_f=3$  m/s)

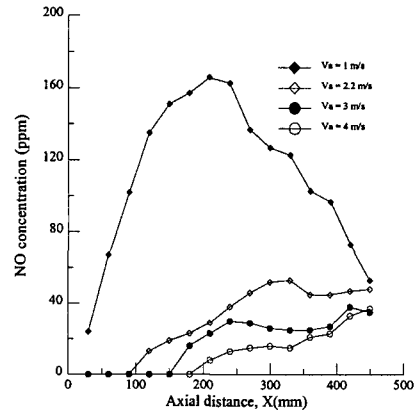
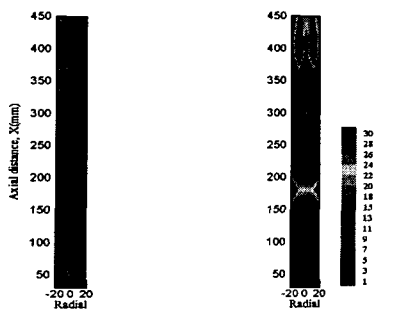


Fig. 14 Distribution of local NO concentrations (R=0,  $V_f=3$  m/s)



(a)  $V_f=2, V_a=2.3$  (b)  $V_f=2, V_a=3.1$   
Fig. 13 2D distribution of RMS (K)

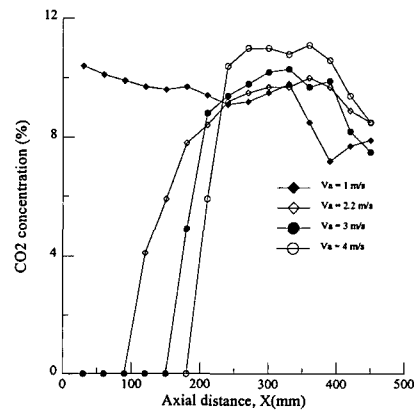


Fig. 15 Distribution of local CO<sub>2</sub> concentrations (R=0,  $V_f=3$  m/s)

적이 커지며, 반경 방향의 온도 구배가 작은 분포를 나타낸다. 또한 화염 종류에 연소 반응이 무척 활발하며 높은 온도 분포를 보이고 있다. 하지만 화염 밀면과 하류에서의 축방향으로의 온도 구배는 크게 나타나는 특성을 가진다.

Fig. 12는 연료 유속 3 m/s일 때 축방향 화염 중심 온도의 RMS 분포를 나타낸다.  $V_a=1$  m/s인 림 부착화염의 RMS는 화염 전체에 걸쳐서 비슷한 분포를 보인다. 반면에 나머지 부상 화염은 각 공기유속에 따라 화염 밀면이 형성되는 지점에서 특히 큰 값을 나타내어 이 지점의 연소 반응이 불안정함을 알 수 있다. 그러나 화염의 종류에선 더욱 낮은 분포를 나타내어 국소적으로 높은 온도 분포와 함께 안정된 연소가 이루어지고 있다. 하지만 화염 하류에서는 강한 난류 강도로 인해 다시 큰 값을 가지며 공기 유속이 빠를수록 그 값은 더욱 커진다. Fig. 13에서도 이와

같은 경향이 뚜렷이 확인된다. 이러한 결과로부터 부상 화염은 화염 상류와 하류가 불안정하며, 종류에서의 연소 반응이 급속히 이루어지는 특성을 가진다.

### 3.5 배가스 농도 분포

주요 연소 배출물 중 화염 내 국소 NO 및 CO<sub>2</sub>의 농도 분포를 각각 Fig. 14와 Fig. 15에 나타낸다. 공기 유속이 더욱 빠른 부상화염의 NO 농도가 더 낮게 나타난다. 특히  $V_a=1$  m/s인 림 부착화염과 부상이 시작되는  $V_a=2.2$  m/s인 화염의 농도는 최대값이 3배 이상 차이를 보여 부상화염의 특징을 뚜렷이 보여주고 있다. 이 결과에서 보여지는 NO의 농도는 화염의 온도가 1500K 미만인

므로 온도에 의해 지배 받는 열적 NO는 아닌 것으로 보인다. 공기 유속이 빨라질수록 혼합기의 체류시간이 짧아지게 되고 이에 따른 prompt NO의 감소가 지배적인 것으로 생각되며, 공기량 증가에 따른 연소 반응물의 증가도 한 몫 하는 것으로 사료된다. 그러나 화염 하류에서의 농도 차이는 크지 않은 것으로 보아 총괄 반응에서의 NO 생성량은 크게 다르지 않을 것으로 생각된다. 또한 공기 유속 증가에 따라 CO<sub>2</sub>의 농도가 높아지는 것으로 보아 공기량 증가에 의해 완전 연소에 더욱 가까워 짐을 알 수 있다.

#### 4. 결론

동축 난류 확산 화염에서 연료와 공기의 유속에 따른 화염의 부상과 가연 한계를 살펴보고, 부상 화염의 구조와 연소 특성 실험을 통해 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 노즐 림에 부착된 제트 확산 화염은 공기 유속의 증가에 따라 부상하게 되고, 유속이 더욱 증가하면 결국 blow-off 된다. 특히 연료 유속이 증가할수록 가연 한계는 증가하지만, 더 낮은 공기 유속에서 부상이 시작 된다.
- (2) 화염의 길이는 연료 유속이 빨라질수록 길어지지만, 공기 유속이 빨라짐에 따라 연소 반응이 촉진되어 줄어든다.
- (3) 부상 화염 종류의 온도는 공기 유속의 증가와 함께 높아지고 RMS도 작아지나, 화염의 밑면과 하류에서 불안정한 분포를 나타낸다.
- (4) 공기 유속의 증가에 따라 부상 화염 내 국소 NO 농도는 감소하고, CO<sub>2</sub>의 농도는 증가한다. 이것은 화염이 부상 되어짐에도 불구하고 보다 이론적인 연소 반응에 가까워짐을 의미한다.

#### 참고문헌

- (1) Turns, S. R., 2000, "An Introduction to Combustion : Concepts and Applications," McGRAW-HILL.
- (2) Broadwell, J. E., Dahm, W. J. A., and Mungal, M. G., 1984, *Twentieth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute*, p. 303
- (3) Dahm, W. J. A. and Dibble, R. W., 1988, *Twenty-Second Symposium (International) on*

- Combustion, The Combustion Institute*, p. 801
- (4) Takahashi, F., Mizomoto, M., Ikai, S., and Futaki, N., 1984, *Twentieth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute*, p. 295
- (5) Eickhoff, H., Lnze, B., and Leuckel, W., 1984, *Twentieth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute*, p. 311
- (6) Vanquickenborne, L. and Tiggelen, V. A., 1966, *Combustion and Flame*, Vol. 10, p. 59
- (7) Hall, L., Horch, K., and Gunther, R., 1980, *Brennst-Warme-Kraft* Vol. 32, p. 26
- (8) Kalghatgi, G. T., 1984, *Combustion Science and Technology*, Vol. 41, p. 17
- (9) Peters, N. and Williams, F. A., 1983, *AIAA Journal*, Vol. 21, p. 423
- (10) Byggstoyl, S. and Magnussen, B. F., 1985, *Turbulent Shear Flows*, Vol. 4, P. 381
- (11) Miake-Lye, R. and Hammer, J. A., 1988, *Twenty-Second Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute*, p. 817
- (12) Schefer, R. W., Namazian, M., and Kelly, J., 1988, *Twenty-Second Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute*, p. 833
- (13) Birch, A. D. and Hargrave, G. K., 1988, *Twenty-Second Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute*, p. 825
- (14) Yuasa, S., 1986, *Combustion and Flame*, Vol. 66, pp. 181~192
- (15) Pitts, W. M., 1988, *Twenty-Second Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute*, p. 809
- (16) Reynolds, O., 1883, "An Experimental Investigation of the Circumstances Which Determine Whether the Motion of Water Shall be Direct or Sinuous, and of the Law of Resistance in Parallel Channels," *Transactions of Royal Society of London*, Vol. 174, pp. 935~982
- (17) Mahmud, C. Y., Fairweather, M. and Hampartsoumian, E., 2002, *Combustion and Flame*, Vol. 128, pp. 60~73
- (18) Lee, J. and Chung, S. H., 2001, *Combustion and Flame*, Vol. 127, pp. 2194~2204
- (19) Chen, Y. C. and Bilger, R. W., 2000,

- Combustion and Flame*, Vol. 123, pp. 23~45
- (20) Burgess, C. P. and Lawn, C. J., 1999, *Combustion and Flame*, Vol. 119, pp. 95~108
- (21) Schefer, R. W. and Goix, P. J., 1998, *Combustion and Flame*, Vol. 112, pp. 559~574
- (22) Seo, J. I., Kim, N. I. and Shin, H. D., 2001, "Concentration Gradient Effects on Lifted Characteristics of Triple Flame on a Slot Burner," *24th KOSCO symposium*, pp. 99~105
- (23) Lee, J. S., Won, S. H., Jin, S. H. and Chung, S. H., 2001, "Lifted Flames in Laminar Coflow Jets of Propane," *24th KOSCO symposium*, pp. 61~67.
- (24) Lee, S. and Lee, B. J., 2001, "Characteristics of Interacting Lifted Flames," *Transaction of Korea Society of Mechanical Engineers*, Vol. 25, No. 4, pp. 461~466