

이중 동축류 버너에서의 예혼합화염 특성에 관한 연구

권성준* · 차민석** · 최만수*** · 정석호***
(2000년 5월 15일 접수)

Characteristics of Premixed Flames in a Double Concentric Burner

Sung Jun Kwon, Min Suk Cha, Mansoo Choi and Suk Ho Chung

Key Words : Double Concentric Burner(이중동축류버너), Lifted Flame(부상화염), Tribrachial Flame(삼지화염), Liftoff(화염부상), Blowout(화염날림)

Abstract

Various flame types are observed in a double concentric burner by varying equivalence ratio and flow rates in each tube. Observed flame types include bunsen-type flame, ring-shaped flame, outer lifted flame, inner lifted flame, and oscillatory lifted flame. The domain of existence of various flames is mapped with equivalence ratio and annular jet velocity. Each flame is investigated through direct photography and OH PLIF. As central air velocity increases, the blowout region is diminished and lifted oscillating flames are observed. Inner lifted flames are observed from bunsen flames or rich ring shaped flames by increasing central air velocity. For inner lifted flames, annular jet velocity at flame liftoff decreases with increasing central air jet velocity. Axial velocity profile and temperature field using LDV and CARS, respectively, for a typical inner lifted flame are also measured through which the role of tribrachial flame for stabilization is emphasized.

기호설명	
V	축방향 속도 성분
V_a	환부분 제트 출구 유속
V_c	중심관 제트 출구 유속
ϕ	당량비

1. 서론

다중 동축류 버너에서는 과농 예혼합기, 희박 예혼합기, 혹은 공기를 각기 다른 노즐로 공급할 수 있으며, 이에 따라 다양한 화염의 특성이 나타날 수 있다. 이에 따라 다중 동축류 버너에서 화염의 안정성 및 NO_x 나 CO 와 같은 연소 배출물 특성에 관한 연구가 이루어져 왔다.

Zhan 등⁽¹⁾ 은 부분 예혼합화염에서 NO_x 및 CO,

C₂H₂ 등 주요 화학종의 농도 분포에 대하여 연구하였다. Puri 등⁽²⁻⁵⁾ 은 이중 동축류 버너에서 부분 예혼합화염의 화염구조에 대한 수치해석적 연구를 통해 부분적으로 부상하고 있는 부분 예혼합화염에서 확산화염과 예혼합화염간의 상호작용 및 반응 메커니즘에 대하여 연구하였다. 이중 동축류 버너에서 관찰되는 화염은 구조가 상이한 여러 형태의 화염이 형성될 수 있으므로, 화염부상(lift-off), 화염날림(blowout) 등을 포함한 화염의 안정화 특성 연구에 이용될 수 있다.

화염의 안정화와 관련하여 지금까지 층류 제트 화염의 부상특성에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다.⁽⁶⁻¹¹⁾ 순수 연료 제트 및 공기 혹은 질소로 희석된 자유제트에서 화염부상 및 화염날림 현상이 연구되었으며,⁽⁶⁻¹⁰⁾ 층류 부상화염(lifted flame)의 밑면이 확산화염, 과농 및 희박 예혼합화염이 공존하는 삼지화염(tribrachial 혹은 triple flame)임에 착안하여, 삼지화염의 전과속도와 유동속도의 균형이 화염을 안정화 시키는 중요 요소임이 밝혀졌다.⁽⁶⁾ Plessing 등⁽¹¹⁾ 은 층류 메탄 제트에 형성된 삼지화

* 서울대학교 대학원
** 한국기계연구원
*** 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : shchung@snu.ac.kr
TEL : (02)880-7114 FAX : (02)883-0179

염에서 속도분포, 온도 및 화학종의 분포를 실험 및 수치적으로 연구하여 삼지화염에서의 특징을 설명하였고, 열발생율이 삼지화염의 형상을 명확하게 구별할 수 있는 인자임을 제안하였다.

다중 동축류 버너는 미세입자 제조 등의 물질 합성(material synthesis) 분야에서 널리 이용되고 있음에도 불구하고, 이와 관련된 화염의 특성에 대한 실험적 연구는 그리 많이 진행되지 않았다. 이에 따라 본 연구에서는 이중 동축류 버너에서 형성될 수 있는 여러 가지 화염의 특성을 고찰하고, 화염의 구조 및 안정성에 대하여 연구하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

실험 장치는 이중 동축류 버너, 유량 조절부 및 화염 측정부로 구성되었다. 이중 동축류 버너는 Fig. 1 에 나타낸 바와 같이 중심관은 10.2 mm i.d., 11.0 mm o.d. 이며, 중심관을 둘러싸고 있는 동축관은 12.7 mm i.d., 13.8 mm o.d.이다. 바깥쪽 외부관의 직경은 30 mm 이며 세라믹 하나몸을 사용하여 균일한 유동장이 형성되도록 하였다. 연료는 C.P. 등급의 메탄(CH₄)이 사용되었고, 산화제로는 순도 99%의 공기가 사용되었다. 연료와 공기의 유량 제어는 습식 가스미터(wet-test gas meter)로 보정된 질량유량계(mass flow controller)를 사용하였다. 연료와 공기의 완전한 혼합이 이루어지도록 유리구슬을 채운 혼합기를 거쳐 예혼합기를 중심관과 동축관 사이의 환(annular)부분으로 공급하였다.

실험 조건의 다양성으로 인해, 본 연구에서는 환 부분에서 연료/공기 혼합기가 공급되고 나머지 중심관과 외부관에서는 공기가 공급되는 경우만을 고려하였다. 외부 동축류의 유속은 예비실험 결과

외부 교란 차단 효과와 비교적 안정된 화염을 형성시킬 수 있는 0.33 m/s 고정하였으며, 실험 변수의 단순화를 위하여 외부 동축류 유속의 변화는 고려하지 않았다. 실험은 환 부분 예혼합기의 당량비와 유속, 중심 공기의 유속을 변화시켜가며 진행되었으며, 화염 특성 파악을 위한 실험 조건을 Table 1 에 나타내었다.

화염의 형상을 관찰하기 위하여 35 mm 카메라 및 ICCD 카메라(Princeton Instrument)를 사용하였다. 평면 레이저 유도 형광법(planar laser induced fluorescence; PLIF)을 이용하여 화염중의 OH 라디칼분포를 측정하였으며,⁽¹²⁾ 속도 계측을 위하여 후방산란 방식의 2-빔, 1-성분 레이저 도플러 유속계(laser Doppler velocimetry; LDV)를 사용하였다. 또한, 코헤런트 반 스톡스 라만 산란(coherent anti-Stokes Raman scattering; CARS) 장치를 이용하여 연소장의 온도를 측정하였다.⁽¹³⁾

3. 결과 및 검토

3.1 당량비와 속도 변화에 따른 화염 특성

Table 1 Experimental conditions for flame characteristics

V_c [m/s]	V_a [m/s]	ϕ
0	0.8 - 2.4	1.0 - 1.5
0.11	0.8 - 4.0	0.6 - 1.7
0.19	0.8 - 4.0	0.6 - 1.7

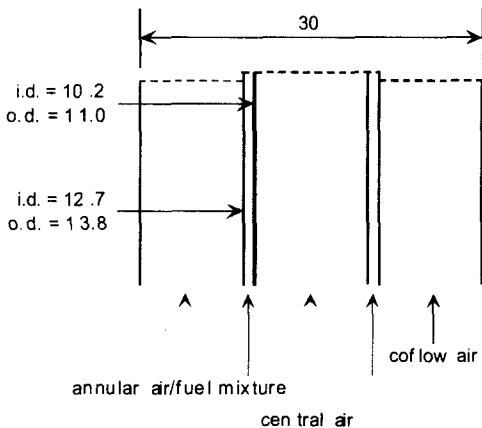


Fig. 1 Experimental setup

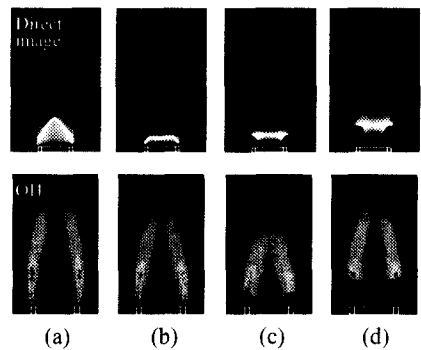


Fig. 2 Direct photographs and OH PLIF images of flames; (a) $\phi = 1.47$, (b) 1.20, (c) 1.02, and (d) 1.20

중심관의 공기 유속 $V_c = 0$ 이고 환에서의 제트 유속 $V_a = 1.5$ m/s 인 경우에 당량비 ϕ 를 변화시킬 때 나타나는 다양한 화염에 대한 직접사진 및 OH 라디칼의 PLIF 이미지를 Fig. 2 에 나타내었다. $\phi = 1.47$ 인 경우에는 과농한 동축류 화염과 유사하게 원추형에 가까운 분철편화염이 형성되어 내측에 예혼합화염이 존재하고, 화염면을 통하여 유출된 여분의 연료는 주위의 공기와 함께 확산화염을 형성한다 (a). 이 경우 OH 라디칼의 분포는 예혼합 화염보다는 확산화염 부분에서 강하게 나타나고 있는데, 이는 과농 동축류 화염의 일반적 특성과 부합한다.⁽¹²⁾ $\phi = 1.20$ 에서는 (b) 예혼합화염이 환 부분에 모두 부착된 형태인 고리형 화염(ring-shaped flame)이 형성되지만, OH 의 분포를 볼 때 제트의 중심까지는 주위 공기의 확산이 이루어 지지 않아 확산화염은 $\phi = 1.47$ 의 경우와 유사한 위치에 존재하며, 연료량의 감소로 그 길이가 약간 짧아졌다. 한편, $\phi = 1.02$ 인 경우에는 환의 내측 림(rim)에 화염이 부착되고 외측에서는 부상이 일어나는 외주부상화염(outer lifted flame)이 나타난다 (c). 이 경우는 이론 당량비에 가까운데 중심 공기 제트의 공급이 없으므로 환 내부 유동은 정체되어 있는데 비해 환 외부는 공기의 유입에 의해 연료 농도가 국소적으로 감소하고 동축류에 의한 노즐 냉각 효과가 부가되어 외측에서의 화염이 더 쉽게 부상하게 된다.

특이한 점은 유량의 증감에 따른 이력현상(hysteresis)이 넓은 유량범위에서 발생하는 것인데, $\phi = 1.20$ 을 예로 들면 Fig. 2(b) 에서 볼 수 있듯이 $V_a = 1.5$ m/s 에서 고리형 화염이 형성되며, 유량을 증가 시키면 환 부분의 외측 림에서 부상하는 외주부상화염으로 변화하게 된다. 이 상태에서 유량

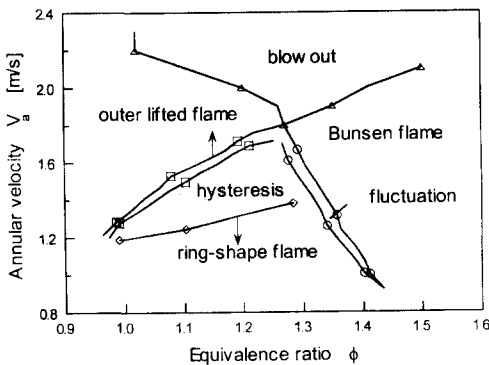


Fig. 3 Flame map with various equivalence ratio and annular jet velocity for $V_c = 0$

을 감소시키면 환 유속 $V_a = 1.5$ m/s 에서도 고리형 화염이 아닌 외주부상화염을 유지하게 되는데, 이를 Fig. 2(d) 에 나타내었다.

이와 같이 다양한 화염들에 대해서 중심 공기 유속 $V_c = 0$ 인 경우에 당량비와 V_a 의 변화에 따른 화염특성을 Fig. 3 에 나타내었다. 환 유속의 변화는 화염간의 구분이 가능한 $V_a > 0.8$ m/s 에 대해 수행하였다. $1.0 < \phi < 1.27$ 에서는 주어진 당량비에 따라 V_a 를 증가 시키면 고리형 화염에서 약간의 요동(fluctuation)이 발생하는 구간이 존재하다가 외주부상화염으로 변화하게 된다. 그리고 V_a 의 증가 상태에서는 고리형 화염이 관찰되고, V_a 를 감소시킬 때에는 외주부상화염이 유지되는 영역을 이력현상 영역으로 그래프에 나타내었다. $1.27 < \phi < 1.4$ 구간에서 당량비를 일정하게 유지하고 V_a 를 증가 시키면, 고리형 화염에서 분철편화염으로 천이하며 이 때에도 역시 좁은 구간에서 요동 현상이 발생한다.

중심 공기 제트의 공급에 따라 화염의 안정화 특성은 크게 달라진다. 중심 공기 공급이 없는 경우 화염날림이 일어났던 $\phi = 1.50$, $V_a = 2.50$ m/s 인 조건에서 중심 공기를 $V_c = 0.11$ m/s 로 공급하게 되면 환 부분의 내측 림에 부착된 외주부상화염이 형성되는데, Fig. 4 에 직접 사진 (a), ICCD 이미지를 Abel 변환하여 얻은 화염단면 이미지 (b), 및 OH 라디칼의 PLIF 이미지 (c)를 나타내었다. Abel 변환된 단면 이미지를 보면 제트의 중심부에 원추형의 화염이 존재하는데 이는 예혼합화염에서 유출된 연료와 중심 공기에 의한 확산화염이다. PLIF 이미지 (c)는 제트의 중심부에 다량의 OH 라디칼이 존재하고 있음을 보여주며, 이 부분에 형성된 확산 화염이 전체화염의 보염 역할을 하여 안정화 영역을 넓힌다. 육안으로 관찰할 때 거의 동일한 구조를 보이는 Fig. 2(d) 와 Fig. 4(a) 의 안

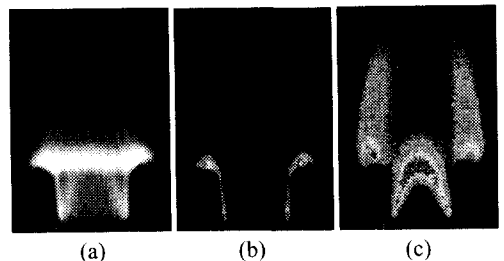


Fig. 4 Flame images for $\phi = 1.50$, $V_a = 2.50$ m/s, and $V_c = 0.11$ m/s; (a) direct photograph, (b) Abel transformed cross-sectional image, and (c) OH PLIF image

정화 메커니즘에서 중심부 확산화염의 역할을 강조하고 있다.

이와 같이 중심 공기 제트 유속 $V_c = 0.11$ m/s 인 경우에 ϕ 와 V_a 의 변화에 따른 화염 특성 선도를 Fig. 5 에 나타내었다. 그래프에서 빗금친 영역은 화염이 환 부분의 림에서 부분적으로 부상하여 비대칭적인 모양을 보이는 구간을 나타낸다. 고리형 화염에서 외주부상화염으로 천이되는 경계는 중앙 공기가 없는 Fig. 3 과 유사하나, 과농한 지역에서 관찰되던 분젠 화염과는 달리 중앙에서 공급되는 공기로 인하여 형성되는 확산화염의 영향으로 고리형 화염과 외주부상화염을 관찰할 수 있다. 전체적으로 노즐 중심부에 형성된 확산화염의 영향으로 안정성이 현저하게 향상되었으며, 중심 관에서 공기를 공급하지 않은 경우와는 달리 $0.9 < \phi < 1.2$ 영역의 외주부상화염에서 유속을 증가 시키면 환의 내측 림에 부착되었던 화염이 약 3 mm 정도 부상하는 화염이 나타나게 되며, 부상하여 주기적으로 진동하는 화염(lifted oscillating flame)과 안정된 부상화염(stable lifted flame)이 나타난다.

부상하여 주기적으로 진동하는 화염 중에서 $\phi = 0.9$, $V_a = 2.7$ m/s, $V_c = 0.11$ m/s 인 경우에 대하여 Fig. 6 에 화염의 ICCD 직접 이미지를 Abel 변환하여 구한 화염의 단면을 나타내었다. 이를 보면, 화염 밀면의 위치는 대체로 고정되어 있고 그 후류로부터 화염의 진동이 일어나고 있음을 알 수 있다. 이 화염에 대한 OH 라디칼의 PLIF 이미지를 나타낸 것이 Fig. 7 인데, 화염의 진동은 화염면과 주위류에 의하여 발달되는 와류에 의한 것임을 알 수 있으며, 이 와류에 의하여 교란된 OH 라디칼 영역이 후류로 이동함을 알 수 있다. 슬리렌 이미지로부터 진동화염에 해당하는 영역에서, 비반응 유동장의 경우에는 와류가 생성되지 않음을 확인

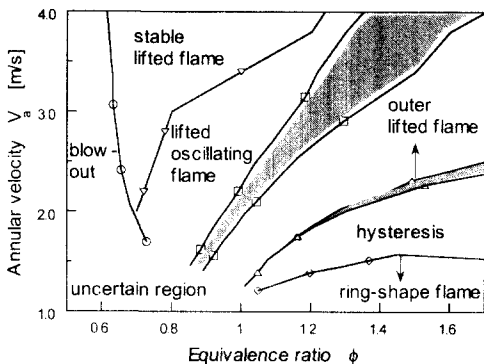


Fig. 5 Flame map with various equivalence ratio and annular jet velocity for $V_c = 0.11$ m/s

하였고, 이로 미루어 화염에 의한 열팽창 및 부력 등의 영향으로 야기된 불안정성이 와류를 생성시키고 이에 따라 화염이 진동하는 것으로 판단된다.

중심 공기 제트 유속의 변화에 따른 화염 안정화 특성의 차이를 확인하기 위하여 $V_c = 0.19$ m/s 인 경우에 대한 화염 특성을 Fig. 8 에 나타내었다. 화염선도에서 빗금친 부분은 Fig. 5 에서와 유사하게 부분 부상이 일어나 화염이 비대칭을 이루는 구간을 나타낸다. Fig. 5 의 $V_c = 0.11$ m/s 인 경우와 비교하여 고리형 화염에서 외주부상화염으로 천이하는 경계는 크게 차이가 나지 않으나, 중심 공기 유속이 0.19 m/s 로 증가되었기 때문에 외주부상화염 구간이 크게 줄어들었으며, 넓은 V_a 구간에 대하여 환의 내측 림에서 부분 부상된 화염이 나타난다. 전체적으로 중앙 공기 유속의 증가로 인하여 상대적으로 희박한 예혼합 영역에서 화염날림 영역이 확대되어 화염안정성이 감소되었다. 이를 근거로 중앙 공기제트의 역할로 형성되는 확산화염이 안정성을 확대시키는 하지만 제트의 유속의 증가에 따른 화염 스트레치(stretch)의 증가로 인하여 화염 안정화 영역이 다시 감소하는 것을 확인할 수 있다.

또한 환 부분에서 화염이 모두 부상하여 있는 부상화염도 부상하여 안정된 화염은 관찰되지 않

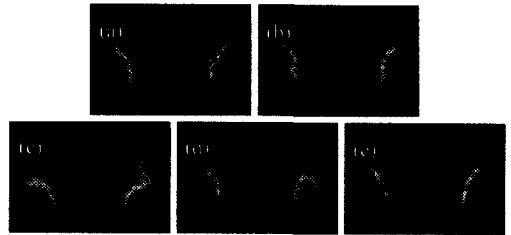


Fig. 6 Abel transformed cross-sectional images of lifted oscillating flame for $\phi = 0.9$, $V_a = 2.7$ m/s, and $V_c = 0.11$ m/s

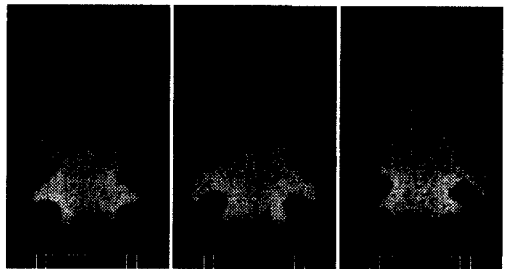


Fig. 7 OH PLIF images of lifted oscillating flame for $\phi = 0.9$, $V_a = 2.7$ m/s, and $V_c = 0.11$ m/s

있고, 부상하여 진동하는 화염만 관측되었으며, 진동 화염의 소음을 주파수 분석기(frequency analyzer)를 이용하여 측정하고 그 결과를 Fig. 8에 점선으로 표시하였으며, 대체로 V_a 와 ϕ 의 증가에 따라 진동하는 화염의 주파수가 커짐을 알 수 있다.

3.2 화염의 부상특성

중심관에서의 공기유속을 증가시킴에 따라 나타나는 화염의 변화는 환 부분 예혼합기의 당량비에 따라 크게 두 가지 형태로 구분된다. Fig. 2(c)의 경우와 같은 외주부상화염이 존재하는 구간에서 중심 공기를 공급할 때와, Fig. 2(a)의 경우와 같이 분체형 화염의 구간에서 중심 공기를 공급하게 되었을 때, 화염은 모두 환의 내측 림에서 부상되는 현상을 나타낸다.

중심 공기 제트 유속의 증가에 따른 외주부상 화염의 변화를 Fig. 9에 나타내었다. 중심 공기의 공급이 없는 경우 환의 외측 림에서 화염부상이 일어나 외주부상화염이 형성된다. 중심 공기를 공급하게 되면 (b) 환의 내측 림에 부착되어 있던 화염 또한 약 3 mm 부상하고 약하게 진동한다. 중심 공기 유속이 더 증가되면 화염의 진동은 더욱 심해지며 소음까지 동반하게 된다. 이 경우에 OH 라디칼 이미지는 화염이 진동하고 있기 때문에 20 장의 이미지를 평균하여 나타내었다. 중심 공기 유속이 더욱 증가함에 따라 화염의 진동수도 점점 커지게 되며 V_c 가 어느 이상이 되면 화염날림이 일어나 더 이상 안정된 화염을 관찰할 수 없게 된다.

분체 화염 (Fig. 2(a)) 혹은 과농한 고리형 화염 (Fig. 2(b))에 중심 공기를 공급할 때 형성되는 고

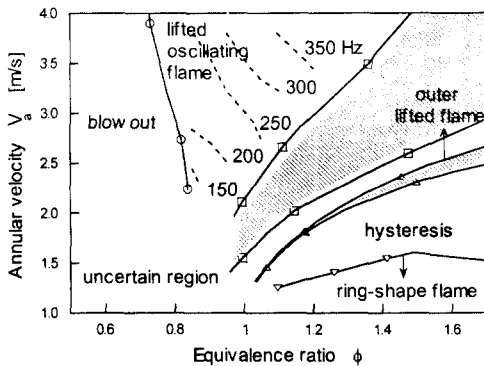


Fig. 8 Flame map with various equivalence ratio and annular jet velocity for $V_c = 0.19$ m/s

리형 화염을 Fig. 10에 나타내었다. 환 부분에 형성된 예혼합 화염과 그 주위에 환의 내측과 외측에 형성된 확산화염을 명확하게 구분할 수 있는데 (a), 앞에서 언급한 바와 같이 중심 공기의 영향으로 제트의 중심쪽에도 예혼합화염면을 통해 유출된 연료와 중심 공기가 확산화염을 형성하게 되기 때문이다. PLIF 이미지를 보면 예혼합 화염보다는 주위의 확산화염 부분에 다량의 OH 라디칼이 분포함을 알 수 있으며, 중심 공기 제트가 화염을 관통하여 버너의 중심 부분에는 반응이 존재하지 않음을 확인할 수 있다. 즉, 동축유동장에서 형성되는 과농예혼합 화염⁽¹²⁾이 환을 따라 존재하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10과 같은 고리형 화염에서 중심 공기 제트 유속을 더욱 늘리면 환의 내측 림에서 화염부

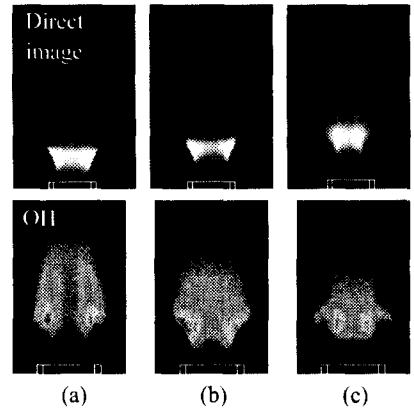


Fig. 9 Flame shape for $\phi = 0.89$, $V_a = 2.73$ m/s with increasing central air velocity; (a) $V_c = 0$ m/s, (b) 0.11 m/s, and (c) 0.19 m/s

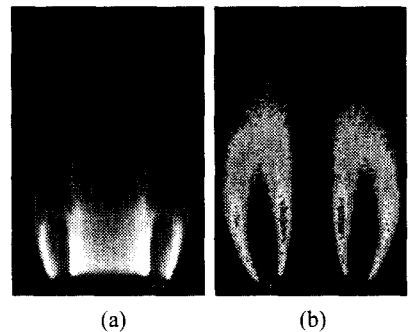


Fig. 10 Ring shaped flame for $\phi = 3.0$, $V_a = 1.2$ m/s, and $V_c = 0.39$ m/s; (a) direct photograph and (b) OH PLIF image

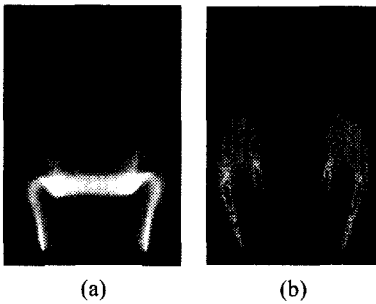


Fig. 11 Inner lifted flame for $\phi = 3.0$, $V_a = 1.2$ m/s, and $V_c = 1.31$ m/s; (a) direct photograph and (b) OH PLIF image

상이 시작되는데, $V_c = 1.31$ m/s 에 대한 직접 사진과 OH 분포를 Fig. 11 에 나타내었다. 직접사진에서 볼 수 있듯이 환의 내측 림에서 화염부상이 일어나 내측이 부상된 화염(inner lifted flame)을 관찰할 수 있으며, 부상된 화염의 후류에도 확산화염이 존재함을 알 수 있다. OH 라디칼의 분포를 볼 때 부상된 화염의 밑면에 다량의 OH 라디칼이 존재하고 있어 이지역에서 화학반응이 활발함을 확인할 수 있고, 부상된 화염의 밑면에 국부적으로 유동장의 최 상류에 존재하고 있어 이 지점으로부터 후류의 화염이 안정화 되고있음을 알 수 있다. 예혼합화염과 확산화염이 부상된 화염의 밑면에 동시에 공존하고, 부상된 화염 밑면의 상류에서는 비반응 유동장의 혼합이 이루어지게 되므로 이와 같이 부상된 화염은 농도 성층화 (stratified) 된 유동장에서 형성되는 삼지화염⁽⁶⁾ (tribranchial flame)의 특성을 보인다.

고리형 화염의 부상 특성에 대하여 더 깊게 살펴보면, 당량비가 대략 2 이하인 경우에는 고리의 내측화염 일부가 먼저 부상(partial inner lifted flame)하여 비대칭적인 모양을 유지하다가 중심 공기의 유속이 더 증가해야 화염의 내측이 모두 부상하여 축대칭 모양을 이루게 된다. 이 때 내측의 부상한 화염이 비대칭을 이루는 중심 공기 및 환 유속의 구간이 상당히 넓은 영역을 차지하게 된다. 이는, 먼저 부상된 화염 부분에 의해 유동장이 왜곡되게 되어 화염이 존재하지 않는 부분 부상 지역으로 유동이 집중되게 되며, 따라서 아직 노즐에 부착된 화염 부분에서의 유속은 오히려 전체 화염이 노즐에 부착되어 있을 때보다 낮은 속도분포를 가질 수 있다. 그러므로, 나머지 화염이 모두 노즐로부터 부상하기 위해서는 더 큰 평균유속이 필요하게 되어 완전 부상이 일어날 때까지 화염 모양의 비대칭 구간이 생기게 된다.⁽¹⁴⁾

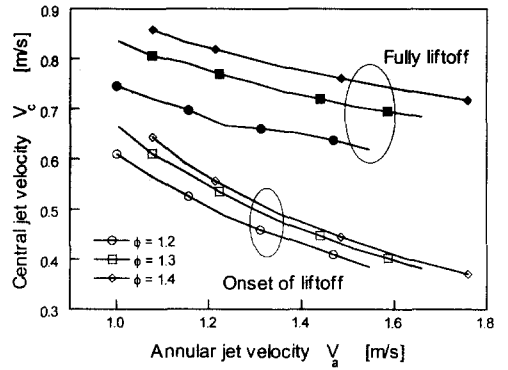


Fig. 12 Velocity condition for flame liftoff

이들 부상 조건을 정성적으로 확인하기 위하여 각각의 당량비에 따른 내측 부상이 일어날 때의 V_a, V_c 의 관계를 Fig. 12 에 나타내었다. 앞서 언급한 대로 환의 내측 림에서 화염이 동시에 부상하는 것이 아니기 때문에 부분적으로 부상이 시작되는 지점(open symbol)과 완전 내측 부상이 일어나 축대칭을 이루는 지점(closed symbol)을 모두 표시하였다. 이 두 지점 사이에는 큰 속도 차이가 존재하지만, 정성적으로 주어진 당량비에 대해 고리형 화염에서 V_a 를 일정하게 유지하면, V_c 의 증가에 따라 화염 부상이 일어나게 되며, 큰 V_a 에 대하여는 작은 V_c 에서 화염이 부상하게 되고, V_a 가 줄어들면 V_c 가 증가되어야 화염 부상이 일어나게 되어 전체적으로는 화염면 근처에서의 평균 유속의 변화는 그리 크지 않다.

화염 부상이 일어날 때 노즐에 부착된 화염 부분에서의 속도 구배(velocity gradient)가 일정 값을 갖게 된다고 생각될 수 있는데,⁽¹⁴⁾ 본 연구의 경우 V_c 의 영향으로 화염 부상이 일어나는 V_a 가 줄어들어 오히려 평균 속도 구배는 줄어드는 것처럼 보일 수도 있다. 그러나 관내 유동의 점착조건(no slip)을 고려할 때 노즐 출구에서의 속도 구배는 환 제트와 중심 제트에 의한 속도 구배의 합으로 여겨질 수 있으며, 속도 구배의 합이 일정한 값에 이르면 화염 부상 조건을 만족시킨다고 생각할 수도 있다. 또한 중심공기의 공급으로 말미암아 노즐 냉각 효과가 증대되어 낮은 환 제트 유속에서 화염 부상이 일어나는 것에 기여하는 것으로 판단된다. 그러나 Fig. 12 에서 볼 수 있듯이 화염 부상시의 비대칭성 등으로 인하여 정성적인 특성만을 파악했을 뿐 화염부상을 지배하는 메커니즘에 대한 연구는 앞으로 좀더 깊게 추진할 계획이다.

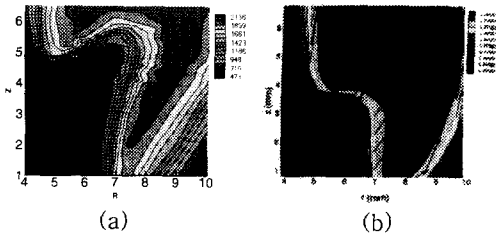


Fig. 13 Temperature profile of inner lifted flame for (a) $\phi = 2.00$, $V_a = 1.23$ m/s, $V_c = 0.80$ m/s and (b) $\phi = 2.53$, $V_a = 0.98$ m/s, $V_c = 0.77$ m/s⁽¹⁻⁴⁾

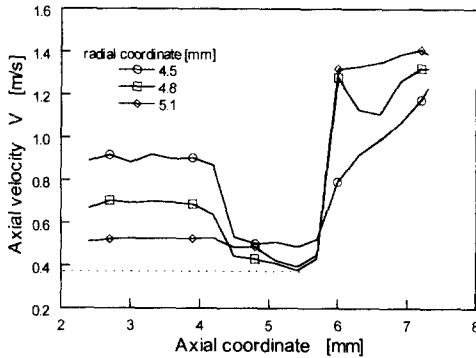


Fig. 14 Axial velocity profile along a jet axis through the tribranchial point for $\phi = 2.00$, $V_a = 1.23$ m/s, $V_c = 0.80$ m/s

3.3 삼지화염의 특성

내측이 부상한 고리형 화염에 대하여 CARS 기법을 이용하여 온도장을 측정된 결과를 Fig. 13a에 나타내었다. Fig. 13(b)는 Puri⁽¹⁻⁴⁾ 등에 의한 수치해석결과로 본 실험에 사용된 버너의 노즐 크기와 유사한 조건에서 계산된 것으로 당량비와 유량 조건에 다소 차이는 있지만 내측이 부상된 상태의 화염에서 온도장의 분포는 유사한 특성을 보임을 알 수 있다. 화염면을 경계로 온도가 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있으며 화염면 이후에도 온도가 높은 분포를 보이는 것을 볼 수 있다. 내측의 부상된 지역에서 온도 구배가 매우 큰 것으로 보아 반응이 매우 활발한 것을 알 수 있으나, 부상된 지역의 예혼합 화염과 확산화염의 구분이 모호하다. 이는 온도의 확산에 의해 삼지화염의 특성인 과농 예혼합화염, 희박 예혼합화염, 및 확산화염이 구분되지 않기 때문이다.

Fig. 14는 화염의 내측 부상된 지점을 중심으로 제트의 축을 따라 축방향 속도를 측정된 결과이다.

노즐로부터의 높이 4.2 mm 부근에서 속도가 감소하여 5.8 mm에서 급격하게 속도가 증가하는데 속도의 증가는 기체 팽창에 의한 것이며, 화염면 이전의 속도 감소는 삼지화염의 특성으로 화염 곡률 (curvature)에 의한 유동 재분배 (flow redirection) 효과에 기인한다.^(11,15) 화염면 직전의 유동속도는 38 cm/s로 메탄의 총류 최대 화염 전파속도와 대체로 일치하고 있어 삼지화염의 전파와 유동속도의 균형이 내측 부상화염의 안정화 메커니즘임을 알 수 있으며, 직접 사진 등의 육안 관찰과 속도 분포를 통하여 내측 부상화염의 밀면은 삼지화염 구조임을 확인할 수 있었다.

4. 결론

이중 동축류버너에 형성되는 다양한 화염을 관찰하였다. 환에서의 당량비와 유속 및 중심관에서의 공기유속을 변화 시킴으로써 고리형 화염, 외주 부상화염, 내주부상화염을 관찰하였으며, 각 화염에 대한 특성을 직접사진 및 OH PLIF를 통해 알아보았다. 환에서 과농 예혼합기가 공급되는 경우에 중심 노즐에서 공기를 공급하게 되면, 예혼합화염면에서 유출된 연료와 중심 노즐에서 공급되는 공기가 형성하는 확산화염이 보염 작용을 하여, 화염의 안정화 영역이 확대되었으며 경우에 따라서는 부상하여 진동하는 화염도 발생하였다.

과농한 고리형 화염으로부터 중심 공기 제트 유속을 늘려줌으로써 환의 내측 림에서 부상하는 화염을 관찰할 수 있었다. 직접사진 및 OH 라디칼의 분석을 통해 부상된 지역에 예혼합화염과 확산화염이 공존하고 있음을 알 수 있었고, LDV 계측을 통해 내측 부상화염의 밀면에 대한 속도를 구한 결과 삼지화염에서 나타나는 유동 재분배 현상에 의해 화염면 상류에서 유속의 감소가 일어나게 되고, 이때의 유동속도가 메탄 예혼합화염의 화염 전파속도와 거의 일치하여 화염 전파속도와 유동속도의 균형이 내측 부상화염의 안정화 메커니즘임을 확인하였다. CARS 기법을 이용하여 내측 부상화염의 온도분포를 구하여 부상된 지점의 온도 구배가 아주 크고 기존의 수치해석결과와 대체로 일치함을 확인하였으며, 온도장을 통하여 삼지화염의 구조적 특성을 파악할 수는 없었다.

후 기

(1998-018-E00045) 에 의해 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Gore, J. P. and Zhan, N. J., 1996, "NO_x Emission and Major Species Concentrations in Partially Premixed Laminar Methane / Air Co-flow Jet Flames," *Combust. Flame*, Vol. 105, pp. 414-427.
- (2) SHU, Z., Aggarwal, S. K., Katta, V. R., and Puri, I. K., 1997, "A Numerical Investigation of the Flame Structure of an Unsteady Inverse Partially Premixed Flame," *Combust. Flame*, Vol. 111, pp. 296-311.
- (3) SHU, Z., Aggarwal, S. K., Katta, V. R., and Puri, I. K., 1997, "Flame-Vortex Dynamics in an Inverse Partially Premixed Combustor: The Froude Number Effects," *Combust. Flame*, Vol. 111, pp. 276-295.
- (4) Aggarwal, S. K. and Puri, I. K., 1998, "Flame Structure Interactions and State Relationships in an Unsteady Partially Premixed Flame," *AIAA*, Vol. 36, No 7.
- (5) Azzoni, R., Ratti, S., Aggarwal, S. K., and Puri, I. K., 1999, "The Structure of Triple Flames Stabilized on a Slot Burner," *Combust. Flame*, Vol. 119, pp. 23-40.
- (6) Chung, S. H. and Lee, B. J., 1991, "On the Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Nonpremixed Jet," *Combust. Flame*, Vol. 86, pp. 62-72.
- (7) Lee, B. J., Kim, J. S., and Chung, S. H., 1994, "Effect of Dilution on the Liftoff of Non-Premixed Jet Flames," *Twenty-Fifth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 1175-1181.
- (8) Lee, B. J., Cha, M. S., and Chung, S. H., 1997, "Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Partially Premixed Jet," *Combust. Sci. Technol.*, Vol 127, pp. 55-70.
- (9) Lee, B. J., and Chung, S. H., 1997, "Stabilization of Lifted Tribraichial Flames in a Laminar Nonpremixed Jet," *Combust. Flame*, Vol 109, pp. 163-172.
- (10) 이병준, 정석호, 한재원, 1997, "평면 레이저유도 형광법을 이용한 부상화염의 특성 연구," 대한기계학회논문집 (B), 제 21 권 제 11 호, pp. 1393-1402.
- (11) Plessing, T., Terhoeven, P., Peters, N., and Mansour, M. S., 1998, "An Experimental and Numerical Study of a Laminar Triple Flame," *Combust. Flame*, Vol. 115, pp. 335-353.
- (12) 이원남, 차민석, 송영훈, 정석호, 1999, "LIF 를 이용한 메탄 화염의 OH, CH 분포 및 NO 생성 메카니즘에 관한 실험적 연구," 대한기계학회 '99 년도 열공학부문 추계학술대회 논문집, pp. 129-133.
- (13) 길용석, 차민석, 송영훈, 한재원, 정석호, 1997, "축대칭 곡면벽 제트 유동장에서 화염 안정화에 관한 연구," 제 15 회 KOSCO Symposium 논문집, pp. 51-60
- (14) Lewis, B. and von Elbe, G., 1987, "Combustion, Flames and Explosions of Gases," Academic Press, INC., 3rd Edition
- (15) Veynante, D., Vervisch, L., Poinso, T., Liñán, A., and Ruetsch, G., 1994, "Triple flame structure and diffusion flame stabilization," *Proceedings of the 1994 Summer Program*, Center for Turbulence Research