

< 논문 >

부상화염에서 예혼합화염과 삼지화염의 천이적 거동 (II)

김 태 권* · 장 준 영*

(2004년 10월 28일 접수, 2005년 1월 24일 심사완료)

A Transitional Behavior of a Premixed Flame and a Triple Flame in a Lifted Flame (II)

Tae Kwon Kim and Jun Young Jang

Key Words: Lifted Flame(부상화염), Premixed Flame(예혼합화염), Triple Flame(삼지화염), Partially Premixed Flame(부분 예혼합화염), Liftoff Height(부상높이), Slot Burner(슬롯버너), Contraction Nozzle(수축노즐)

Abstract

In the paper we investigate characteristics of a transitional behavior from a premixed flame to a triple flame in a lifted flame according to the change of equivalence ratio. In previous study, we showed that the stabilized laminar lifted flame regime is categorized by regimes of premixed flame, triple flame and critical flame. A gas-chromatograph is used to measure concentration field, a smoke-wire system is used to measure streak line, and a PIV system is used to measure velocity field in lifted flame. In the visualization experiment of smoke wire, the flow divergence and redirection reappeared in premixed flame as well as triple flame. Thus we cannot express the flame front of lifted flame has a behavior of triple flame with only flow divergence and redirection. In PIV measurement, flow velocity for those three flames has minimum value at the tip of flame front. To differentiate triple flame and premixed flame, Φ value of partially premixed fraction is employed. The partially premixed fraction Φ was constant in premixed flame. In critical flame small gradient appears over the whole regime. In triple flame, typical diffusion flame shape is obtained as parabolic distribution type due to diffusion flame trailing.

1. 서 론

노즐로부터 떨어져 일정한 거리에 위치하는 부상화염(laminar lifted flame)의 화염 선단(flame front)부는 이미 연료와 산화제가 상당한 수준으로 혼합되어 있어 예혼합화염의 특성을 반영하므로 수십 년에 걸쳐 다양한 모델들이 제시되어 왔다. 제시되는 모델로는 예혼합연소 모델(premixed combustion model), 층류 화염편 모델(laminar flamelet model), 삼지화염(triple flame) 등에 기인한 다양한 연구가 진행되어 왔고, 최근에는 삼지화염 모델에 관해 많은 연구가 진행중이다.⁽¹⁻³⁾

삼지화염의 구조는 처음으로 Philips⁽⁴⁾가 석탄광산의 천장에서 부상된 메탄 공기 혼합기의 화

기호설명

- ϕ_L : 희박당량비
- ϕ_R : 과농당량비
- Φ : 부분적 예혼합분율

† 책임저자, 회원, 계명대학교 기계자동차공학부
E-mail : tkkim@kmu.ac.kr
TEL : (053)580-5551 FAX : (053)586-8312

* 회원, 계명대학교 산업기술연구소

염퍼짐을 연구하면서 관찰되었다. Schefer 등⁽⁵⁾의 부상된 난류화염의 안정화 연구에서 평균농도(mean concentration)나 평균속도(mean velocity)의 값은 매우 매끄러운 가우시안(Gaussian)의 형태를 보이는 반면, 순간 연료농도(instantaneous fuel concentration)는 매우 예리한 경계면을 가지며, 따라서 혼합기의 농도구배가 존재함을 나타내었으며 혼합기의 농도구배에 의해 삼지화염이 나타나게 된다. 부분 예혼합 혼합기에 의해 층류 부상화염이 형성될 때 선단 근처에는 연료가 이론당량비보다 과잉한 과농 혼합기를 형성하고 다른 영역은 연료가 이론당량비보다 희박한 희박 혼합기를 형성한다. 따라서 형성되는 화염은 과농 예혼합화염(rich premixed flame)과 희박 예혼합화염(lean premixed flame)으로 구성된다. 그리고 과농 예혼합화염으로부터 잔류의 연료가 확산되고 희박 예혼합화염으로부터 산화제가 확산되어 이론당량 혼합비를 갖는 중심부에 확산화염이 존재한다. 이와 같이 형성된 삼지화염이 이론당량 혼합비를 갖는 층류 화염전과 속도로 부분 예혼합층을 전파한다면 이론당량 혼합비를 이루는 확산화염부의 화염전과 속도가 가장 크고 과농 및 희박 예혼합화염은 상대적으로 작게 되므로 화염 선단이 중심부로부터 양측으로 가면서 원호를 이루고 중심부 하류로 확산화염의 긴 꼬리를 갖는 형상을 갖게 된다. 한편 상류에서 본다면 화염 선단이 원호를 이루고 있으므로 삼지화염의 중심으로 접근하는 유동의 분기(divergency)를 이루게 되므로 유동속도는 상류의 속도가 점점 감소하다가 삼지화염 중심부에서 층류 화염전과속도까지 감소하고 다시 화염면에서 열팽창에 의해 속도가 증가하는 특성을 갖게 된다.

최근의 난류 부상화염에 대한 CH-PLIF와 PIV 동시 촬영의 연구 결과들을 보면 유동 분기와 유동 재편성 특성이 삼지화염의 전형적 특성인 것으로 나타내고 있다.⁽⁶⁻⁸⁾ 하지만 이러한 특성이 예혼합화염에서도 나타날지는 의문이며 예혼합화염과 삼지화염을 비교하는 연구들은 문헌상에 거의 보고되지 않고 있다. 본 연구의 선행연구결과에서⁽⁹⁾ 부상화염의 선단부를 예혼합화염과 삼지화염, 그리고 천이구간인 임계연소 화염영역으로 구분하였다. 혼합기의 농도차이에 따라 부상높이를 비롯하여 화염폭, 곡률반경, 자발강도가 달라지며 화염의 구조를 변화시킬 수 있음을 제시하

였다. 따라서 본 연구에서는 선행연구의 구분된 구간에서 농도장 및 속도장을 조사함으로써 각 화염의 특징을 구체적으로 나타내고자 한다. 직접 샘플링에 의한 화염내부에서의 반응물과 생성물의 국소농도를 측정하여 반응물인 연료와 산화제의 몰 분율(mole fraction)을 통해 각각의 화염의 거동특성을 평가하고 연기발생선법(smoke wire)과 PIV(particle image velocimetry)방법을 이용하여 유동장의 유선과 속도정보를 확인하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 선행연구⁽⁹⁾와 같다. 4개의 슬롯으로 구성된 슬롯버너는 농도차이 변화를 주기 위해 중심부의 2개는 예혼합기의 농도차이를 좌우를 달리하여 공급하였고 가장자리의 2개는 주위류로 질소를 공급하였다.

연소장에서 발생하는 각종 화학종들의 분포를 구하고 연소장의 특성을 정량적으로 분석하기 위하여 미소 샘플링 프로브(직경 1mm)와 가스 크로마토그래피(Donam, 6200)를 사용하여 화염의 단면에서 국소적으로 연소생성물의 농도를 측정하였다. 샘플링 프로브는 가로방향과 축방향으로 이송이 가능한 이송대에 설치하였다. 가스 크로마토그래피는 열전도 검출법(Thermal conductivity detector, TCD)과 화염이온화 검출법(Flame ionization detector, FID)에 의해 분석되어지며 수소, 일산화탄소, 이산화탄소, 산소, 질소, 프로판 등을 분석한다. 측정위치는 화염선단으로부터 높이 15mm(h = 15mm)에서 가로방향(x)으로 2mm 간격으로 측정하였다.

연소장에서 예혼합화염과 삼지화염의 화염대 및 주위류의 유동 가시화를 위해 연기 발생선법을 이용하였다. 연기 발생선법은 액체 파라핀(liquid paraffin)을 일정한 간격으로 꼬아진 니크롬선(직경 0.2mm)의 표면에 바르고 전원공급기(교류 5 volt)로 적절한 전압을 가하여 니크롬선의 발열로 인해 파라핀 연기가 발생되며 이때 주위 유동의 변화에 따른 유맥선(streak line)을 관찰하였다.

부상화염의 속도장을 정보를 얻기 위한 PIV 실험장치의 구성은 Fig. 1와 같으며 광원으로 사용될 Nd:YAG 레이저, 평면광(sheet beam)으로 만드

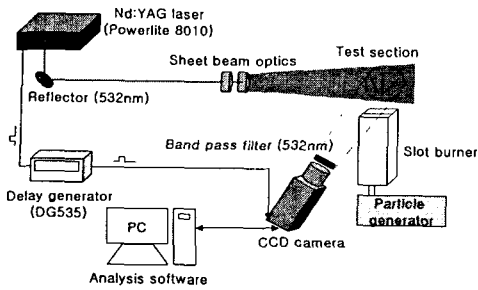


Fig. 1 PIV system

는 광학계, CCD 카메라, 레이저와 CCD 카메라의 동기시간조절을 위한 지연펄스발생기, 입 자발생부, 속도분석프로그램으로 이루어져 있다. 한 대의 Nd:YAG 레이저(powerlite 8010)에 이중 펄스 발생장치(double pulse operation, DPO)를 부착하여 시간간격($\Delta t = 135\mu s$)을 가지는 두 펄스를 발생시켰다. 레이저 빔은 광학계(plano-concave spherical lens, 직경 25.4mm, $f = -75mm$ 와 plano-convex cylindrical lens, 25.4mm, $f = 100mm$)를 통과하여 평면광으로 바뀌며, 평면광은 슬롯버너 상단을 지나면 수축노즐을 통과하는 입자들을 산란시킨다. 레이저광이 조사될 때 CCD 카메라 촬영을 위해 레이저광과의 동기가 필요하며 이를 위해 지연펄스발생기(USA Stanford Research System, DG535)를 통해 레이저광의 출력신호와 카메라 구동신호를 동기시켰다. CCD 카메라는 1008×1018 pixel의 해상도를 가지며 이중노출 프레임 기능이 있는 CCD 카메라(Kodak, Megaplus ES:1.0)를 사용하였다. 입자는 $0.3\mu m$ 의 크기를 가지는 산화알루미늄(Al_2O_3)가루를 사용하였다. 속도벡터 분석은 상용프로그램(PIVVIEW)을 이용하여 분석하였으며 비반응 유동장에서 검증하여 사용하였다.

2.2 실험방법

예혼합기가 공급되는 중심부의 슬롯 2개중 왼쪽부분은 과농당량비(ϕ_R)조건으로 혼합기를 공급하고, 오른쪽부분은 희박당량비(ϕ_L) 조건으로 혼합기를 공급한다. 본 연구에서는 공급되는 혼합기 및 주위류의 전체 유량을 화염이 버너출구에 날림 또는 역화가 일어나지 않으면서 부착되지 않고 부상하는 $1.15m/s$ 의 유속으로 공급하였다. 본 연구의 실험영역은 앞선 선행연구에서 구분한 세가지 영역에서 수행하였다. 슬롯버너 왼쪽 과농당량비 $\phi_R = 1.1$ 을 기준으로 예혼합화염 영역

($\phi_L = 1.1$)과 임계화염 영역($\phi_L = 0.83$), 삼지화염 영역($\phi_L = 0.59$)으로 실험영역을 설정하였다.

3. 실험 결과

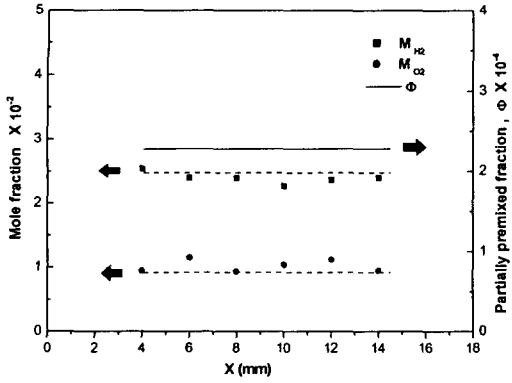
3.1 농도장 특성

먼저 세 영역(예혼합화염, 삼지화염, 임계화염)에서 화염내부에서 반응물(reactant)과 생성물(product)의 농도를 비교하고자 한다. 반응물은 산화제인 산소(O_2)와 연료의 중간생성물인 수소(H_2)의 농도를 측정하였고, 생성물은 이산화탄소(CO_2)와 일산화탄소(CO)의 농도를 측정하였다. 반응물의 농도계측에서 연료로 프로판(C_3H_8) 대신에 수소(H_2)의 농도를 측정한 이유는 예혼합화염은 화염대에서 연소반응이 매우 급격히 일어나므로 화염대를 통과하면서 프로판이 분해되면서 중간생성물인 수소나 다른 탄화수소계열의 성분으로 바뀐 것으로 생각한다. 이는 Puri 등⁽¹⁰⁾이 버너에 부착된 삼지화염의 축방향의 농도측정을 통해 연료인 메탄(CH_4)이 화염면을 통과하면서 검출되지 않았으며 중간생성물인 수소의 농도가 증가함을 보였다. 따라서 중간생성물인 수소의 농도를 측정하여 이를 화염내의 반응물로 보고자 한다.

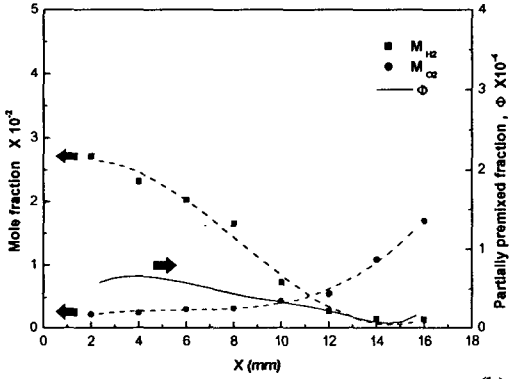
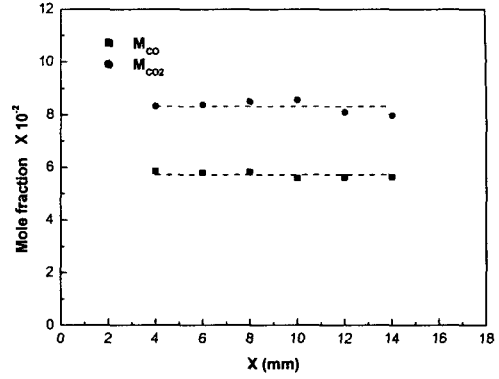
삼지화염의 존재를 나타내기 위해 Favier 등⁽¹¹⁾은 부분적 예혼합화염에서 삼지화염으로의 천이되는 화염에서 연료와 산화제의 국소적 혼합정도를 나타내는 부분적 예혼합분율(partially premixed fraction, Φ)을 제안하고 있다. 이들은 관계식 (1)로 정리하였으며 다음과 같다.

$$\Phi = Y_F \cdot Y_O \quad (1)$$

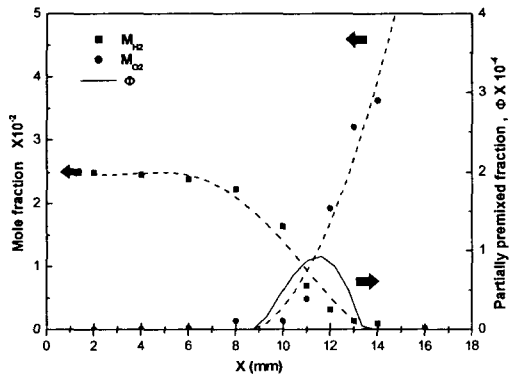
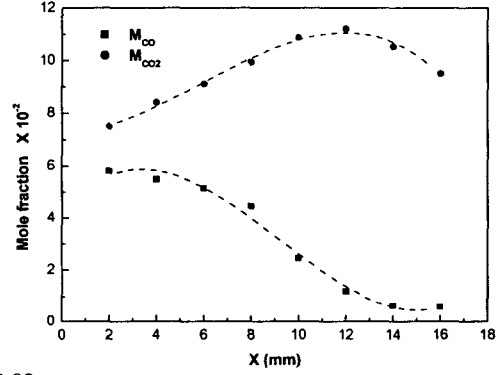
여기서 Y_F 는 연료의 질량분율, Y_O 는 산화제의 질량분율을 나타낸다. 확산화염이 형성될 때 반응대를 제외한 영역에서는 연료나 산화제중 하나의 성분값만을 가지므로 부분적 예혼합비는 0이며 반응대에서만 특정값을 지게 되는 것이다. 또한 예혼합화염이 형성될 때는 연료와 산화제가 전체적으로 어떠한 일정한 값을 가진다. 예혼합화염과 삼지화염의 구조적 차이는 화염내의 가운데 부분에서 확산화염의 꼬리부분이 발견되는데 있다. 따라서 꼬리부분의 화염의 특징이 확산화염에 의한 특징임을 명확히 밝히고자 Favier 등이 제안한 부분적 예혼합분율을 수정하여 사용한다.



(a) $\phi_L = 1.1$



(b) $\phi_L = 0.83$



(c) $\phi_L = 0.59$

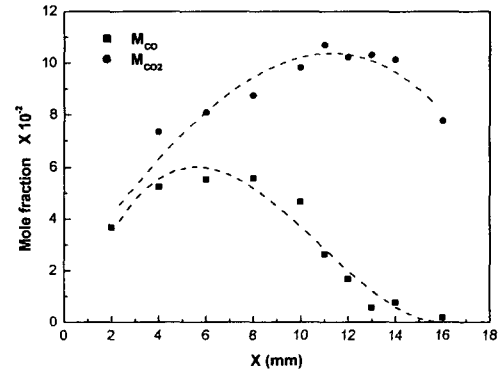


Fig. 2 Mole fraction and partially premixed fraction ($\phi_R = 1.1$)

본 연구에서 수정된 부분적 예혼합분율(Φ)은 관계식 (2)로 정리하였으며 다음과 같다.

$$\Phi \equiv M_F \cdot M_O \quad (2)$$

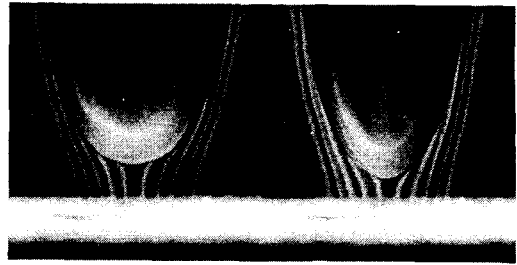
M_F 는 연료의 몰분율, M_O 는 산화제의 몰분율이다.

Fig. 2는 반응물인 수소와 산소의 질량분율, 부분적 예혼합분율, 그리고 생성물인 이산화탄소와

일산화탄소의 물분율을 보여주고 있다. 그림의 중심부근($x = 10$)을 기준으로 왼쪽부분($x < 10$)이 과농당량비 ϕ_R 화염이 나타나는 영역이며 오른쪽부분($x > 10$)이 희박당량비 ϕ_L 화염이 나타나는 영역이다. Fig. 2(a)의 그림은 슬롯버너 왼쪽 과농당량비 $\phi_R = 1.1$, 오른쪽 희박당량비 $\phi_L = 1.1$ 인 예혼합화염 영역으로 화염대 내부에서 일정한 연료 및 산화제 성분이 나타나고 있으며, 식 (2)에서 정의된 바와 같이 부분적 예혼합분율이 전 영역에 걸쳐서 일정한 값을 가짐을 볼 수 있다. 이산화탄소와 일산화탄소도 화염내부에서 일정하게 나타나고 있다. Fig. 2(b)의 그림은 슬롯버너 왼쪽 과농당량비 $\phi_R = 1.1$, 오른쪽 희박당량비 $\phi_L = 0.83$ 인 조건으로서 예혼합화염에서 삼지화염으로 변화되는 천이구간의 임계화염으로서 부분적 예혼합영역에서 변화가 나타나고 있다. ϕ_L 과 ϕ_R 의 당량비가 차이가 나타나면서 화염대 내부에서 연료 및 산화제 성분이 서로 교차하고 있음을 볼 수 있다. 풍부한 산화제로 인해 왼쪽 과농당량비 부근보다 이산화탄소는 증가하고 있으며 일산화탄소는 감소하고 있다. Fig. 2(c)의 그림은 슬롯버너 왼쪽 과농당량비 $\phi_R = 1.1$, 오른쪽 희박당량비 $\phi_L = 0.59$ 인 삼지화염 영역이다. 연료의 감소와 산화제의 급격한 증가가 나타나고 있다. 부분적 예혼합분율은 예혼합화염 영역에서는 거의 일정한 값을 가지다가 확산화염이 나타나는 꼬리부근에서 매우 높게 나타나고 있다. 따라서 삼지화염의 가운데 부분의 꼬리는 확산화염에 의해 생성되었다고 생각된다. 이산화탄소와 일산화탄소는 Fig. 2(b)와 유사한 경향을 보이지만 풍부한 산소의 양으로 인해 더욱 더 뚜렷해짐을 볼 수 있다. Fig. 2의 그림에서 왼쪽 과농당량비인 $\phi_R = 1.1$ 영역에서 산소의 농도는 예혼합화염[Fig. 2(a)]이 가장 높으며 삼지화염[Fig. 2(c)]으로 갈수록 낮아지고 있다. 이는 삼지화염의 가운데부분의 확산화염이 형성됨으로써 잔류하는 산소를 소모시키는 것으로 생각된다. 따라서 부분적 예혼합분율이 Fig. 2(a)의 경우는 거의 변화가 없고 Fig. 2(c)의 경우는 Fig. 2(a)와는 완전히 다른 모습을 나타낸다.

3.2 유선 및 속도장 특성

유선의 변화를 통해 화염대 선단유동의 흐름을 파악하고자 액체파라핀을 이용한 유선을 관찰하



(a) $\phi_R = 1.1, \phi_L = 1.1$ (b) $\phi_R = 1.1, \phi_L = 0.67$

Fig. 3 Photographs of smoke streak

였다. Fig. 3(a)는 슬롯버너 왼쪽 과농당량비 $\phi_R = 1.1$, 오른쪽 희박당량비 $\phi_L = 1.1$ 일 때, 액체 파라핀을 통한 수축노즐 출구에서의 화염선단 부근의 유선을 나타낸 것이다. 슬롯버너 양쪽 모두 같은 당량비로 공급되는 예혼합화염으로서 수축노즐 출구부분에서부터 유선이 형성되어 화염의 선단으로 접근하면서 서서히 좌우로 분리되어 유동의 분기(divergence)가 일어나고 있음을 확인할 수 있다. 유선은 서로 대칭적이며 화염선단에서의 모습은 직접사진에서와 마찬가지로 둥근 타원의 모습을 보인다. Fig. 3(b)는 왼쪽 과농당량비 $\phi_R = 1.1$, 오른쪽 희박당량비 $\phi_L = 0.67$ 일 때, 슬롯버너의 출구에서의 화염유동을 나타내는 것이다. 위의 결과와 마찬가지로 유선은 화염선단의 끝부분에서 서서히 좌우로 구부러져 화염면 옆을 통과하고 있다. Ruetsch 등⁽¹²⁾은 삼지화염과 평면 예혼합화염을 비교하면서 삼지화염의 경우, 화염의 열발생(heat release)으로 화염선단에서의 유동 분기로 인해 유동의 재편(redirection)이 일어나며 평면 예혼합화염의 경우, 유동의 재편이 일어나지 않기 때문에 유동속도가 일정하다가 화염선단에서 급격히 증가함을 보였다. 그러나 Fig. 3(a)의 이론당량비 예혼합화염이나 Fig. 3(b)의 농도차이에 의한 삼지화염이나 두 경우 모두 화염선단에서의 분기가 일어나고 있으며 유동의 재편이 일어난다. 따라서 예혼합화염의 경우에서도 유동의 속도가 감소하다가 화염이 안정화된 위치에서 최소를 이루며 다시 급격히 증가될 것으로 생각된다. 결론적으로 말한다면 유동 분기와 유동 재편이 삼지화염을 예혼합화염과 구분짓는 특성으로 간주하기는 어렵다는 것을 알 수 있다.

예혼합화염, 삼지화염, 임계화염의 속도장의 정보를 파악하기 위해 PIV에 의한 속도장 측정을

수행하였다. Fig. 4는 슬롯버너 왼쪽 과농당량비 $\phi_R = 1.1$, 오른쪽 희박당량비 $\phi_L = 1.1 \sim 0.59$ 일 때 수축노즐의 중심에서 높이방향에 대한 PIV에 의한 축방향 속도를 나타낸 것이다. 축방향 속도는 슬롯버너로 공급되는 유량이 노즐출구를 통과하여 높이가 증가함에 따라 점차 감소하며 화염 선단에서 최소를 이룬다. 그리고 화염대에서부터 급격히 증가하여 화염 후류로 갈수록 속도가 증가한다. 속도가 최소가 되었다가 급격히 증가하는 지점에서 유동의 분기와 함께 화염의 부상이 일어나고 있다. 화염대를 지나 화염후류로 갈수록 최대 속도값을 가진다. 슬롯버너 오른쪽 희박당량비 감소에 따라 $\phi_L = 1.1$ 에서 점차 증가하여 $\phi_L = 0.92 \sim 0.83$ 에서 최대 유속을 나타낸 후 감소되어지고 있다. 유선관찰 결과에서 입증되었듯이 예혼합화염에서도 공급되는 혼합기가 화염선단에서의 유동의 분기가 일어나며 속도값이 감소한 후 화염대에서 급격히 상승함을 볼 수 있다. Ruetsch 등⁽¹³⁾은 삼지점에서의 속도가 최소가 되는 이유를 화염면 앞의 유동의 분기로 설명하고 있다. 이에 따라 화염면의 선단중심에서 분기가 일어나 속도가 급격히 감소된다고 보는 것이다.

Fig. 5는 슬롯버너 왼쪽 과농당량비 $\phi_R = 1.1$, 오른쪽 희박당량비 $\phi_L = 1.1 \sim 0.59$ 일 때 직접사진에 의한 부상높이와 PIV에 의한 부상높이를 나타낸 것이다. PIV에 의한 부상높이는 Fig. 4에서 축방향 속도가 최소값을 가지는 위치를 부상높이로 설정하였다. 부상높이는 양쪽 슬롯에 공급하는 농도차이에 따라 변화하고 있음을 확인할 수 있다. 오른쪽 희박당량비를 감소시키에 따라 화염의 부상높이가 점차 줄어들어다가 임계화염 부근인 $\phi_L = 0.92 \sim 0.83$ 부근에서 최소를 이룬 후 다시 증가하고 있다. PIV에 의한 부상높이가 직접사진에 의한 부상높이보다 작으며 이는 입자의 공급으로 인해 중력의 영향을 받아 덜 부상되는 것으로 생각된다.

Fig. 6은 슬롯버너 왼쪽 과농당량비 $\phi_R = 1.1$, 오른쪽 희박당량비 $\phi_L = 1.1 \sim 0.59$ 화염의 경우에 노즐출구 중심에서부터 화염대까지의 평균 축방향 속도와 수축노즐 출구에서의 축방향 속도이다. 평균 축방향 속도는 수축노즐 출구에서 화염대까지의 속도의 평균이다. 수축노즐 출구에서부터 화염대까지의 축방향 속도값은 화염의 부상높이를 좌우한다. 높은 축방향속도는 화염의 부상

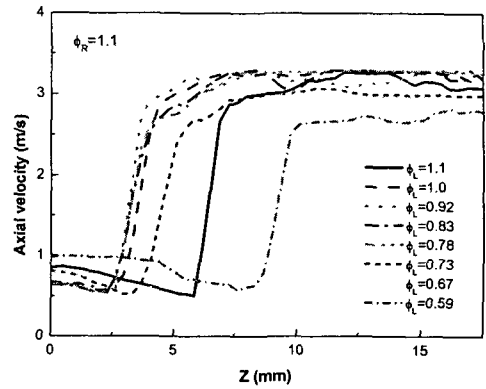


Fig. 4 Axial velocity

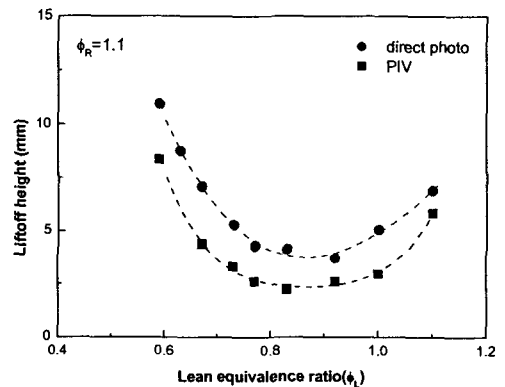


Fig. 5 Liftoff height of direct photo and PIV data

높이를 증가시키며 낮은 축방향 속도는 부상높이를 감소시킨다. 이 결과는 Fig. 5의 부상높이와의 결과와 비교하면 일치하고 있음을 보여준다. Kioni 등⁽¹⁾은 연료 질량분율구배(fuel mass fraction gradient)에 따른 삼지화염의 평균 유속을 실험적으로 관찰하여 질량분율구배가 증가할수록 화염 선단에서의 평균 유속이 증가함을 보였다. 그리고 이 속도는 이론당량비로 혼합된 예혼합기의 층류연소속도보다 높음을 보였다. 한편 평균 축방향 속도값과 노즐출구에서의 축방향 속도값의 경향은 서로 같다. 따라서 부상높이를 결정짓는 화염선단의 축방향의 속도성분이 수축노즐에서 영향을 미치는 것으로 생각된다.

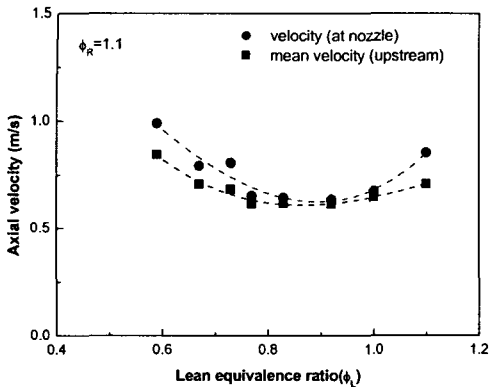


Fig. 6 Axial velocity at nozzle exit and upstream of flame tip

4. 결론

선행연구⁽⁹⁾에서 구분한 예혼합화염과 삼지화염, 그리고 천이구간인 임계연소 화염영역에서 직접 샘플링에 의한 화염내부에서의 반응물과 생성물의 국소농도를 측정하고 연기발생선법과 PIV방법을 이용하여 유동장의 유선과 속도정보를 확인하는 실험을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 삼지화염과 예혼합화염의 구조적 특성을 구분하기 위해 정의된 부분적 예혼합분율은 예혼합화염에서는 일정하고, 임계화염에서는 약한 구배가 존재하며, 삼지화염에서는 확산화염의 꼬리모양으로 나타나는 전형적인 확산화염의 포물선 분포 형태로 나타나고 있음을 제시하였다.

(2) 부상화염 선단이 삼지화염이라는 증거로 제시되고 있는 유동 분기와 유동 재분배를 확인하기 위해 수행된 스모크 와이어 가시화로부터, 예혼합 화염에서도 삼지화염과 유사한 유동분기 및 재분배 특성을 재현할 수 있었다. 추가적인 PIV 측정에서 화염 선단에서 본 연구에서 확인된 3가지 화염의 경우에 선단 유동속도가 최소를 나타내는 것을 재확인할 수 있었다. 결론적으로 '유동 분기와 유동 재분배만으로는 부상화염 선단이 삼지화염이다.' 라고 표현할 수 없음을 알게 되었다.

후 기

본 연구는 2003년도 계명대학교 비사연구기금

으로 이루어졌음.

참고문헌

- (1) Kioni, P. N., Rogg, B., Bray, K. N. C. and Liñán, A., 1993, "Flame Spread in Laminar Mixing Layers: The Triple Flame," *Combustion and Flame*, Vol. 95, pp. 276~290.
- (2) Azzoni, R., Ratti, S., Aggarwal, S. K. and Puri, I. K., 1999, "The Structure of Triple Flame Stabilized on a Slot Burner," *Combustion and Flame*, Vol. 119, pp. 23~40.
- (3) Kioni, P. N., Bray, K. N. C., Greenhalgh, D. A. and Rogg, B., 1999, "Experimental and Numerical Studies of a Triple Flame," *Combustion and Flame*, Vol. 116, pp. 192~206.
- (4) Philips, H., 1965, "Flame in a Buoyant Methane Layer," *Twenty Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1277~1283.
- (5) Schefer, R. W., Namazian, M. and Kelly, J., 1988, "Structural Characteristics of Lifted Turbulent-Jet Flames," *Twenty-Second Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 833~842.
- (6) Mansour, M. S., 2003, "Stability Characteristics of Lifted Turbulent Partially Premixed Jet Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 133, pp. 263~274.
- (7) Miake-lye, R. C. and Hammer, J. A., 1988, "Lifted Turbulent Jet Flames: A Stability Criterion Based On The Jet Large-Scale Structure," *Twenty-Second Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 817~824.
- (8) Everest, D. A., Feikema, D. A. and Driscoll, J. F., 1996, "Image of Strained Flammable Layer Used to Study the Liftoff of Turbulent Jet Flames," *Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 129~136.
- (9) Jang, J. Y., Kim, T. K. and Park, J., 2005, "A Transitional Behavior of a Premixed Flame and a Triple Flame in a Lifted Flame (I)," *Transaction of the Korean Society Mechanical Engineer (B)*, submitted.
- (10) Puri, I. K., Aggarwal, S. K., Ratti, S. and

- Azzoni, R., 2001, "On the Similitude Between Lifted and Burner-Stabilized Triple Flames: A Numerical and Experimental Investigation," *Combustion and Flame*, Vol. 124, pp. 311~325.
- (11) Favier, V. and Vervisch, L., 2001, "Edge Flame and Partially Premixed Combustion in Diffusion Flame Quenching," *Combustion and Flame*, Vol. 125, pp. 788~803.
- (12) Ruetsch, G. R., Vervisch, L. and Liñán, A., 1995, "Effects of Heat Release on Triple Flames," *Phys. Fluids*, Vol. 7, No. 6, pp. 1447~1454.