

슬롯버너에서 농도차이에 따른 예혼합화염과 삼지화염의 거동

김태권* · 장준영** · 박정*** · 전성화**** · Kei Miwa*****

Behaviors of Premixed Flames and Triple Flames with its Concentration Difference in a Slot Burner

Tae Kwon Kim, Jun Young Jang, Jeong Park, Seong Hwa Jun and Kei Miwa

ABSTRACT

We have presented characteristics of a transitional behavior from a premixed flame to a triple flame in a lifted flame according to the change of equivalence ratio. The experimental apparatus consisted of a slot burner and a contraction nozzle for a lifted flame. As concentration difference of the both side of slot burner increases, the shape of flame changed from a premixed flame to a triple flame, and the liftoff height is decreased to the minimum value and then increase again. Around this minimum point, it is confirmed a transition regime from premixed flame to triple flame. Consequently, the experimental results of the liftoff height, flame curvature and luminescence intensity showed that the stabilized laminar lifted flame regime is categorized by regimes of premixed flame, triple flame and critical 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. 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.

Key Words : Lifted Flame(부상화염), Premixed Flame(예혼합화염), Triple Flame(삼지화염), Partially Premixed Flame(부분 예혼합화염), Liftoff Height(부상높이)

1. 서론

층류 부상화염(laminar lifted flame)의 화염 선단(flame front)이 삼지화염(triple flame)⁽¹⁻³⁾으로 안정화된다는 많은 이론적 및 실험적 증거들이 제시되고 있으며⁽⁴⁻⁶⁾ 난류 부상화염(turbulent lifted flame)의 안정화 메카니즘에도 많은 관심이 모아지고 있다. 게다가 최근의 난류 부상화염

에 대한 CH-PLIF와 PIV 동시 촬영의 연구 결과들이 삼지화염(triple flame)의 전형적 특성인 유동 분기(divergence)와 유동 재편성(redirection) 특성을 잘 보여줌으로써 난류 부상화염에서의 화염선단(flame front)도 삼지화염(triple flame) 혹은 edge화염으로 안정화되는 것으로 인식되고 있다.⁽⁷⁻⁹⁾ 부상화염의 노즐(nozzle) 출구근처에서는 스칼라 소산율(scalar dissipation rate)이 실제로 소화 한계(quenching limit)를 초과할 정도의 큰 값을 갖고 있다는 실험적 증거들이 제시된다.⁽¹⁰⁾ 그러나 노즐 출구속도를 점차 증가시킴에 따라 난류강도는 증가하고 부상높이도 증가하게 된다. 극단적으로 화염날림(blow-out) 한계까지 부상높이가 증가한 경우는

* 계명대학교 기계자동차공학부

† tkkim@kmu.ac.kr

** 계명대학교 산업기술연구소

*** 순천대학교 기계자동차공학부

**** 경북대학교 공학설계연구원

***** Dep. of Ecosystem Engineering, Univ. of Tokushima

화염 선단은 연료와 산화제의 혼합이 부분 예혼합화염의 범주를 넘어서 잘 섞여진 반응(well-stirred reactor) 수준이 되는 것은 누구나 쉽게 예상할 수 있다는 점이다. 따라서 화염이 적어도 분포화염(distributed reaction) 영역이나 잘 섞여진 반응(well-stirred reactor) 영역에 해당함에도 불구하고, 최근 연구들이 난류 부상화염에서 화염 선단을 삼지화염의 안정화로 인식한다는 것은 무리가 따를 것이란 점이다. 결국 부상화염도 층류화염편(laminar flamelet) 영역이 유효한 조건과 분포화염 영역이나 잘 섞여진 반응 영역이 유효한 조건들로 나뉘어져야 하지 않을까 하는 인식이다. 그러나 이러한 폭 넓은 상황에 대한 실험적 및 이론적인 연구들은 문헌상에 거의 보고되어 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 잘 섞여진 반응 영역에서 유효한 예혼합화염으로부터 농도차이를 변화시킴으로써 궁극적으로 삼지화염이 얻어지는 영역까지 체계적으로 화염 구조를 비교하는 실험을 수행하고자 한다. 농도차이에 따라 화염형상을 관찰하고 화염폭, 부상높이, 자발강도 등을 통해 화염 특성을 비교함으로써 삼지화염이 형성되는 임계영역이 존재함을 제시하고자 한다. 그리고 이들을 통해 구분된 구간에서 농도장을 조사함으로써 각 화염의 특징을 구체적으로 나타내고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 Fig. 1과 같다. 연료는 상업용 프로판(LPG)을 사용하였고 산화제는 질소 79%, 산소 21%로 혼합되어진 고순도 공기(순도 99.99%)를 사용하였다. 혼합챔버(mixing chamber)는 길이 160 mm, 내경 50 mm, 부피 314 ml이며 원통형모양이다. 당량비에 맞춰진 연료와 산화제가 혼합챔버 입구로 공급되어 내부에서의 스윙유동에 의해 혼합기가 균일하게 혼합되도록 제작하였다. 또한 내부에는 각 기체의 수분제거를 위해 실리카겔(silicagel)을 넣어두었다. 혼합챔버와 슬롯버너 사이에는 입자발생챔버(particle generating chamber)를 설치하였으며 유동속도 계측을 위한 PIV(particle image velocimetry) 실험시에만 미세입자 가루를 넣어둔다. 챔버를 통과한 기체는 내경이 4 mm인 비닐 튜브를 거쳐 버너로 공급된다. 연료 산화제 혼합기의 농도차이를 제어하기 위한 슬롯버너는 슬롯 부분과 수축노즐(contraction nozzle)로 이루어져 있다. 슬롯버너는 폭 10 mm, 너비 25 mm, 길이 720 mm의 슬롯 4개로 구성된다. 슬롯버너의 내부에서는 유동장 속도를 균일화시키기 위해 직경 5

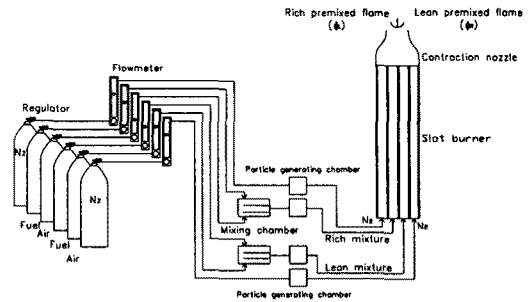


Fig. 1 Schematic diagram of flow system

mm, 길이 200 mm인 합성비닐파이프와 세라믹 허니컴(ceramic honeycomb, 가로 1.5 mm, 세로 1.5 mm, 높이 250 mm)을 설치하였다. 4개의 슬롯중에서 중심부의 2개는 예혼합기의 농도차이를 좌우 달리하여 공급하였고 가장자리의 2개는 주위류로 질소를 공급하였다. 질소의 공급은 혼합기의 출구에서의 속도증가와 외부 산화제의 유입을 차단하고 외부유동 교란을 막아주는 역할을 한다. 세라믹 허니컴을 통과한 예혼합기는 0.38의 수축비를 가지는 수축노즐을 지나 농도차이에 의한 화염이 생성된다. 수축노즐의 출구는 가로 20 mm, 세로 20 mm 크기이며 morel의 연구⁽¹¹⁾를 기초로 3차 근사로 내부 형상을 도안하여 석고로 성형하여 제작하였다.

2.2 실험방법

부상화염 중 예혼합화염과 삼지화염의 특성을 조사하기 위해 슬롯버너에 공급되는 혼합기의 당량비 및 유량을 실험변수로 선정하였다. 예혼합화염에서부터 삼지화염으로의 천이되는 거동을 알아보기 위해 예혼합기가 공급되는 슬릿의 양쪽 부분을 똑같이 이론당량비 $\phi = 1.0$ 화염으로부터 시작하여 좌우의 농도를 변화시킨다. 예혼합기가 공급되는 중심부의 슬릿 2개중 왼쪽부분은 과농당량비(ϕ_L)조건으로 혼합기를 공급하고, 오른쪽부분은 희박당량비(ϕ_R) 조건으로 혼합기를 공급한다. 본 연구에서는 공급되는 혼합기 및 주위류의 전체 유량을 화염이 버너출구에 날림 또는 역화가 일어나지 않으면서 부착되지 않고 부상하는 1.15 m/s의 유속으로 공급하였다. 두 슬릿의 농도차이를 이론적 예혼합화염에서부터 시작하여 슬롯버너 양쪽 당량비를 변화시켰을 때 화염은 화염날림, 화염안정, 그리고 화염날림 순으로 거동이 일어난다. 연소장에서 예혼합화염에서 농도차에 의한 삼지화염으로의 천이되는 거동특성 및 화염의 형태를 정성적으로 분석하기 위한 화염가시화 방법으로 ICCD 카메라(USA Princeton Instruments, PI-MAX)를 이용하여 직접사진 촬영을 하였다. 직접사진을 통해서 화염의 모습과

부상높이, 화염대에서의 곡률반경, 화염 폭을 측정하였다. 그리고 ICCD 카메라에서 촬영된 화상을 상용 소프트웨어(winspec program)를 통해 16비트 강도세기(arbitrary intensity)로 나타내었다.

연소장에서 발생하는 각종 화학종들의 분포를 구하고 연소장의 특성을 정량적으로 분석하기 위하여 미소 샘플링 프로브(sampling probe, 직경 1mm)와 가스 크로마토그래피(Gas chromatograph, model 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.

3. 실험결과

3.1 화염형상 및 부상높이

Fig. 2는 슬릿버너 왼쪽 과농당량비 $\phi_L = 1.1$, 오른쪽 희박당량비 $\phi_R = 1.1 \sim 0.53$ 일 때 화염형상을 나타낸 것이다. 그림의 제일 왼쪽 상단이 과농당량비 $\phi_L = 1.1$, 희박당량비 $\phi_R = 1.1$ 인 양쪽 모두 같은 당량비 조건인 예혼합화염이다. 같은 당량비 예혼합화염의 형상은 화염선단이 매우 둥글며 반구형 형상으로 좌우로 공급되는 혼합비가 같기에 때문에 화염이 대칭성을 가진다. 화염의 색은 청색을 띤다. 사진 밑부분의 흰색선은 슬릿버너 수축노즐 출구 끝부분이다. 슬릿버너의 왼쪽 과농당량비를 고정시키고 오른쪽 희박당량비를 점차 변화시키면 오른쪽 희박당량비 $\phi_R = 0.92$ 부근까지는 예혼합화염의 형상이 나타나고 있다. 그러나 오른쪽 희박당량비 $\phi_R = 0.83$ 부근부터 혼합기의 농도차이가 더 커지면서 둥근 예혼합화염의 모습에서 선단중심이 날카로워지는 유선형 모습으로 바뀌어지고 있으며 화염의 가운데부분에서 확산화염의 꼬리부분(diffusion trailing flame)이 나타나고 있다. 이 꼬리부분의 생성이 확산화염을 갖는 삼지화염의 특징으로, 기존의 연구⁽¹⁾와 잘 일치하고 있다. 오른쪽 희박당량비 $\phi_R = 0.77$ 이하에서는 확산화염에 의한 삼지화염의 형상이 뚜렷이 나타난다. 삼지화염은 연료와 산화제의 조성이 서로 다른 상황에서 농도구배에 의해 발생된다. 부분 예혼합 혼합기에 의해 층류 화염이 형성될 때 선단 근처에는 연료가 이론당량비보다 많은 과농혼합기를 형성하고 다른 영역은 연료가 이론당량비보다 적은 희박혼합기를

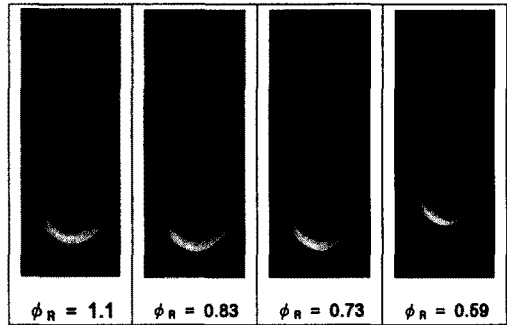


Fig. 2 Flame image ($\phi_L = 1.1$)

형성한다. 따라서 형성되는 화염은 과농 예혼합화염(rich premixed flame)과 희박 예혼합화염(lean premixed flame)이 형성된다. 그리고 과농 예혼합화염으로부터 잔류의 연료가 확산되고 희박 예혼합화염으로부터 산화제가 확산되어 중심부에 당량 혼합비를 갖는 확산화염(diffusion flame)이 존재하게 된다. 농도차이가 증가함에 따라 화염선단이 위치하는 부상높이는 감소하다가 확산화염의 꼬리부분이 나타나는 오른쪽 희박당량비 $\phi_R = 0.83$ 을 최소로 다시 증가하고 있다. 슬릿버너로 공급되는 전체 혼합기의 유량은 동일하므로 화염의 부상높이 변화는 농도차이에 의한 화염의 안정화 특성의 변화로 발생한 것으로 생각된다. 왼쪽 과농당량비 $\phi_L = 1.2 \sim 1.5$ 일 때에서도 슬릿버너에 공급되는 혼합기의 농도차이가 증가할수록 가운데 확산화염의 꼬리부분이 뚜렷하게 나타났으며 부상높이도 감소하였다가 증가하는 변화가 나타났다.

Fig. 3은 슬릿버너에 공급되는 좌우측 혼합기의 당량비 변화에 따른 화염의 곡률반경(radius of curvature)을 나타낸 것이다. 곡률반경은 ICCD 카메라를 이용한 직접사진을 통해 화염의 선단중

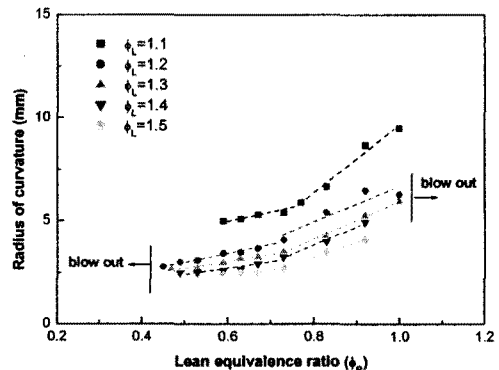


Fig. 3 Radius of curvature at flame tip

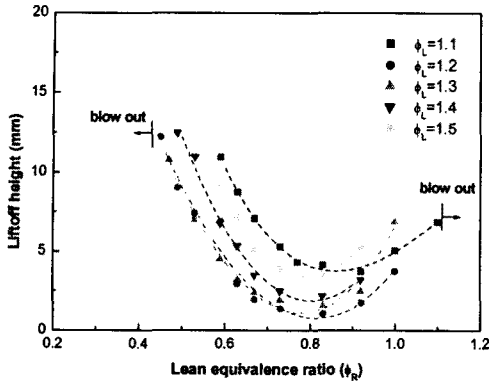


Fig. 4 Liftoff heights

심에 내접하는 원의 곡률반경을 관찰하였다. 슬롯버너 왼쪽 과농당량비를 고정시키고 오른쪽 희박당량비를 변화시키면 희박당량비 ϕ_R 이 줄어들수록 곡률반경이 줄어들고 있다. 또한 희박당량비를 고정시키고 왼쪽 과농당량비 ϕ_L 을 변화시키면 과농당량비가 증가할수록 화염의 곡률반경이 줄어들고 있다. 곡률반경이 농도차이의 증가에 따라 감소하고 있다. Ko 등⁽⁶⁾은 연료 질량분율구배와 곡률과의 관계가 선형적으로 비례함을 이론적으로 보였다. 따라서 곡률반경은 곡률의 역수이므로 질량분율구배가 증가할수록 곡률반경은 반비례적으로 줄어들게 되는 것이다. 그들은 화염의 표면적의 분율을 나타내는 스트레치(stretch)가 혼합기의 질량분율과 곡률에 직접적으로 관계가 있으며 혼합기의 질량분율에 의해 화염구조의 변화로 화염의 곡률과 스트레치(stretch)에 의해 화염전파속도가 감소함을 나타내었다.

Fig. 4는 슬롯버너에 공급되는 혼합기의 농도차이에 따른 화염의 부상높이(liftoff height)를 나타낸 것이다. 부상높이가 좌우측 슬롯에 공급되는 혼합기의 농도차이에 따라 변화되어지고 있음을 볼 수 있다. 왼쪽 과농당량비를 고정시키고 오른쪽 희박당량비를 감소시키면 화염의 부상높이가 줄어들어다가 $\phi_R = 0.83 \sim 0.73$ 부근에서 최소를 이룬 후 다시 화염부상높이가 증가하고 있다. 그림에서 양쪽 끝부분은 화염의 날림(blow out)이 발생하여 꺼지는 영역이다. 부상높이가 최소가 되는 점을 기준으로 Fig. 2의 직접사진을 통한 화염모습관찰과 비교하면 희박당량비 ϕ_R 이 증가하는 방향은 예혼합화염의 거동이 나타나고 있으며 희박당량비 ϕ_R 이 감소하는 방향은 삼지화염의 거동이 나타나고 있는 영역임을 알 수 있다. 화염의 부상높이가 증가한다는 것은 화염전

파속도보다는 출구유동의 속도가 더 큰 경우에 발생된다. 화염형상 변화에 기인한 화염의 곡률에 따라 층류화염속도는 영향을 받게 되므로 부상높이도 또한 변하게 된다. 예혼합화염 거동을 나타내는 경우에서, 부상높이의 급격한 증가는 화염 곡률 반경의 급격한 증가에 따른 화염전파속도의 감소에 기인한다. 또한 삼지화염 거동이 나타내는 경우에 있어서도, 곡률 반경이 미미한 변화를 보이고 있다. 그럼에도 불구하고 부상높이는 희박당량비 ϕ_R 이 감소할수록 다시 증가하고 있다. 이것은 희박당량비 ϕ_R 이 감소함에 따라 예혼합화염 선단 바로 앞의 농도구배의 증가로 인해 스칼라 소산율(scalar dissipation rate)이 증가하게 되어 화염전파속도가 감소하기 때문이다. Chung 등⁽⁴⁾과 Lee 등⁽⁵⁾은 제트노즐에서의 프로판 삼지화염의 부상높이는 출구속도, 노즐 직경, 주위류의 유동속도, 그리고 부분적으로 혼합된 공기 등에 의해 변동이 일어난다고 보고하고 있다. 하지만 본 연구에서는 출구유동의 속도는 1.15 m/s로 고정이 되어 있으므로 부상높이의 증가와 감소는 화염전파속도에 기인하며 이것은 결국 Fig. 4에서 보았듯이 농도차이의 변화에 따라 화염전파속도가 변화하고 있음을 의미한다.

앞선 화염의 직접사진에서 구별된 예혼합화염과 삼지화염의 반응률의 대소를 표현할 수 있는 인자로서 발광강도(luminescence intensity)를 선택하여 비교하였다. 삼지화염이 생성되면 중심부근의 꼬리부근에서 연료와 공기의 확산화염이 생기며 이로 인해 발광강도가 예혼합화염보다 강해진다. Fig. 5는 화염의 발광강도, 화염의 부상높이, 화염의 곡률 결과로부터 부상화염의 안정화 영역에서 예혼합과 삼지화염과 임계연소영역을 나타내었다. 점선의 내부영역은 예혼합화염에서 삼지화염으로의 천이되는 임계연소영역이며 점선의 윗부분은 예혼합화염 영역이며 아래부분은 삼지화염영역인 것이다. 슬롯버너 왼쪽 과농당량비

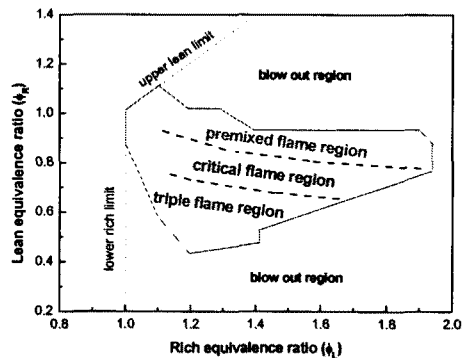


Fig. 5 Flame stabilization curve

Φ_L 을 고정시키고 오른쪽 희박당량비 Φ_R 을 변화시키면 화염은 예혼합화염에서 임계연소영역을 지나 삼지화염의 모습으로 변해간다. 경계부분을 나타내는 점선이 과농당량비 Φ 증가에 따라 점차 아래쪽으로 내려오는 것은 농도차이로 인해 확산화염을 형성하기 위한 산화제의 양이 증가되어야 되기 때문으로 생각된다. 결과적으로 부상 높이, 화염 곡률, 화염 강도 측정 결과들로부터 예혼합화염, 임계연소, 삼지화염으로 구분지음을 일관되게 보여주고 있다.

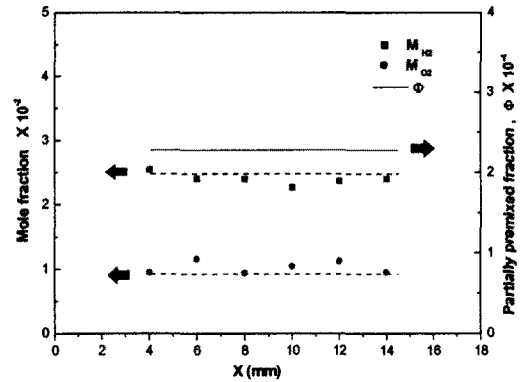
3.2 농도장 특성

예혼합화염과 삼지화염의 구조적 차이는 화염내의 가운데 부분에서 확산화염의 꼬리부분이 발견되는데 있다. 따라서 이 꼬리부분의 화염의 특징이 확산화염에 의한 특징임을 명확히 밝히고자 Favier 등⁽¹³⁾이 제안한 부분적 예혼합비(partially premixed fraction)를 수정하여 사용한다. 본 연구에서 수정된 부분적 예혼합 분율 (partially premixed fraction, Φ)은

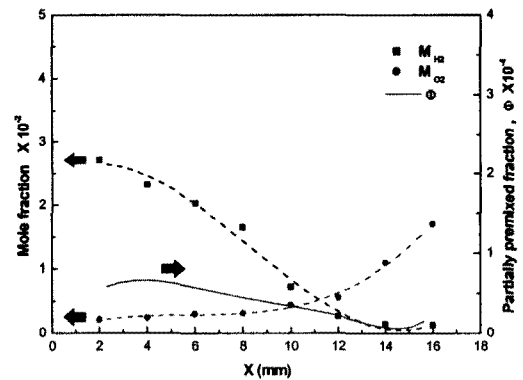
$$\Phi \equiv M_F \cdot M_O \quad (1)$$

로 정의하고 M_F 는 연료(fuel)의 몰분율(mole fraction), M_O 는 산화제(oxidizer)의 몰분율(mole fraction)로 하였다.

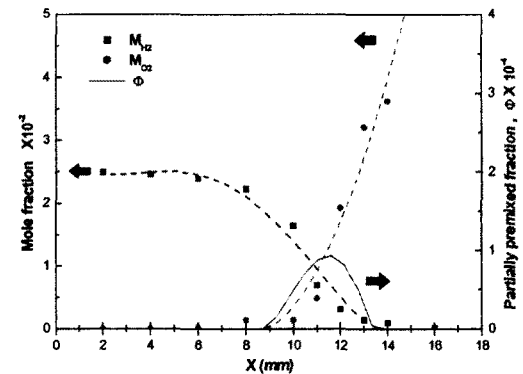
Fig. 6은 연료의 반응물인 수소(H_2)와 산소(O_2)의 질량분율, 부분적 예혼합 분율(partially premixed fraction)을 보여주고 있다. 그림의 중심부근($x = 10$)을 기준으로 왼쪽부분($x < 10$)이 과농당량비 Φ_L 영역이며 오른쪽부분($x > 10$)이 희박당량비 Φ_R 영역이다. Fig. 6(a)의 그림은 슬롯버너 왼쪽 과농당량비 $\Phi_L = 1.1$, 오른쪽 희박당량비 $\Phi_R = 1.1$ 인 예혼합화염 영역으로 화염대 내부에서 일정한 연료 및 산화제 성분이 나타나고 있으며, 식(1)에서 정의된 바와 같이 부분적 예혼합비가 전 영역에 걸쳐서 일정한 값을 가짐을 볼 수 있다. Fig. 6(b)의 그림은 슬롯버너 왼쪽 과농당량비 $\Phi_L = 1.1$, 오른쪽 희박당량비 $\Phi_R = 0.83$ 인 조건으로서 예혼합화염에서 삼지화염으로 변화되는 천이구간의 임계화염으로서 부분적 예혼합영역에서 변화가 나타나고 있다. Φ_L 과 Φ_R 의 당량비 차이가 나타나면서 화염대 내부에서 연료 및 산화제 성분이 서로 교차하고 있음을 볼 수 있다. Fig. 6(c)의 그림은 슬롯버너 왼쪽 과농당량비 $\Phi_L = 1.1$, 오른쪽 희박당량비 $\Phi_R = 0.59$ 인 삼지화염 영역이다. 연료의 감소와 산화제의 급격한 증가가 나타나고 있다. 부분적 예혼합비를 보면 예혼합화염영역에서는 거의 일정한 값을 가지다가 확산화염이 나타나는 꼬리부분에서 매우 높게 나타나고 있다. 따라서 삼지화염의 가운데 부분의 꼬리는 확산화염에 의해 생성되었다고 생각된다. Fig. 6의 그림에서 왼쪽 과농당량비인 $\Phi_L = 1.1$



(a) $\Phi_L = 1.1, \Phi_R = 1.1$



(b) $\Phi_L = 1.1, \Phi_R = 0.83$



(c) $\Phi_L = 1.1, \Phi_R = 0.59$

Fig. 6 Mole fraction and partially premixed fraction

영역에서 산소의 농도는 예혼합화염(Fig. 6(a))이 가장 높으며 삼지화염(Fig. 6(c))으로 갈수록 낮아지고 있다. 이는 삼지화염의 가운데부분의 확산화염이 형성됨으로써 잔류하는 산소를 소모시키는 것으로 생각된다. 따라서 부분적 예혼합 분율(partially premixed fraction)이 Fig. 6(a)의 경우는 거의 변화가 없고 Fig. 6(c)의 경우는 부분적 예혼합 분율이 Fig. 6(a)와는 완전히 다른 모습을 보이고 있다.

4. 결론

잘 섞여진 반응(well-stirred reactor) 영역에서 유효한 예혼합화염으로부터 농도차이를 변화시킴으로써 궁극적으로 삼지화염이 일어나는 영역까지 화염형상을 관찰하고 화염폭, 부상높이, 자발강도, 농도장 특성을 비교하는 실험을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 혼합기의 농도차이가 더 커지면서 등근 예혼합화염의 모습에서 선단중심이 날카로워지는 유선형모습으로 바뀌어지고 있으며 화염의 가운데부분에서 확산화염의 꼬리부분(diffusion trailing flame)이 나타나고 있다. 이 꼬리 부분이 과농 예혼합화염으로부터 잔류의 연료가 확산되고 회박 예혼합화염으로부터 산화제가 확산되어 중심부에 당량 혼합비를 갖는 확산화염(diffusion flame)이며 삼지화염의 특징을 가지게 됨을 확인하였다.
- (2) 농도차이가 증가할수록 화염 곡률반경은 감소하는 일반적 특성을 확인할 수 있었다. 그러나 과농당량비를 고정하고 회박당량비를 감소시킴에 따라 선형적으로 화염 곡률반경은 감소하다가 어느 이상에서는 화염 곡률반경이 변하지 않는 특성을 갖는 영역을 확인할 수 있었다. 또한 부상높이는 속도장의 정보만으로 표현된 화염 곡률거동과는 상이하게 거동한다는 점으로부터 과농당량비를 고정시키고 회박당량비를 감소시킴에 따라 부상높이는 감소하다가 최소를 나타낸 후 다시 증가하는 것을 알 수 있었다. 이러한 최소점 근처에서 예혼합화염으로부터 삼지화염으로 천이하는 것을 알 수 있었고 이러한 천이과정은 화염 강도 측정으로부터 확인되었다.
- (3) 부상높이, 화염 곡률, 화염 강도 측정 결과들로부터 예혼합화염영역과 삼지화염영역 사이에 천이구간인 임계적 연소화염영역이 존재함을 제시하였다.
- (4) 삼지화염과 예혼합화염의 구조적 특성을 구분하기 위해 정의된 Φ (partially premixed fraction)은 예혼합화염에서는 일정하고, 임계화염에서는 약한 구배가 존재하며, 삼지화염에서는

확산화염의 꼬리로 인해 나타나는 전형적인 확산화염의 포물선 분포 형태로 나타나고 있음을 제시하였다.

참고문헌

- [1] Kioni, P. N., Rogg, B., Bray, K. N. C. and Liñán, A., *Combustion and Flame*, Vol. 95, pp. 276~290, 1993.
- [2] Azzoni, R., Ratti, S., Aggarwal, S. K. and Puri, I. K., *Combustion and Flame*, Vol. 119, pp. 23~40, 1999.
- [3] Kioni, P. N., Bray, K. N. C., Greenhalgh, D. A. and Rogg, B., *Combustion and Flame*, Vol. 116, pp. 192~206, 1999.
- [4] Chung, S. H. and Lee, B. J., *Combustion and Flame*, Vol. 86, pp. 62~72, 1991.
- [5] Lee, B. J. and Chung, S. H., *Combustion and Flame*, Vol. 109, pp. 163~172, 1997.
- [6] Ko, Y. S. and Chung, S. H., *Combustion and Flame*, Vol. 118, pp. 151~163, 1999.
- [7] Mansour, M. S., *Combustion and Flame*, Vol. 133, pp. 263~274, 2003.
- [8] Miake-lye, R. C. and Hammer, J. A., *Twenty-Second Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 817~824, 1988.
- [9] Everest, D. A., Feikema, D. A. and Driscoll, J. F., *Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 129~136, 1996.
- [10] Müller, C. M., Breitbach, H. and Peter, N., *Twenty-Fifth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1099~1106, 1994.
- [11] Morel, T., *ASME J. of Fluids Eng.*, pp. 225~233, 1975.
- [12] Schefer, R. W. and Goix, P. J., *Combustion and Flame*, Vol. 112, pp. 559~574, 1998.
- [13] Favier, V. and Vervisch, L., *Combustion and Flame*, Vol. 125, pp. 788~803, 2001.