

< 논문 >

부상화염에서 예혼합화염과 삼지화염의 천이적 거동 (I)

장준영* · 김태권† · 박 정**
(2004년 10월 28일 접수, 2005년 1월 24일 심사완료)

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

Jun Young Jang, Tae Kwon Kim and Jeong Park

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

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 decreased to the minimum value and then increased 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.

기호설명

ϕ_L : 희박당량비
 ϕ_R : 과농당량비

1. 서 론

층류 부상화염(laminar lifted flame)의 화염 선단(flame front)이 삼지화염(triple flame)⁽¹⁻⁴⁾으로 안정화된다는 많은 이론적 및 실험적 증거들이 제시되고 있으며,⁽⁵⁻⁷⁾ 난류 부상화염(turbulent lifted

flame)의 안정화 메카니즘에도 많은 관심이 모아지고 있다. 게다가 최근의 난류 부상화염에 대한 CH-PLIF와 PIV 동시 촬영의 연구 결과들이 삼지화염의 전형적 특성인 유동 분기(divergence)와 유동 재편성(redirection) 특성을 잘 보여줌으로써 난류 부상화염에서의 화염선단도 삼지화염 혹은 edge 화염으로 안정화되는 것으로 인식되고 있다.⁽⁸⁻¹⁰⁾ 이러한 부상화염 선단을 소염 한계(quenching limit) 근처로 인식하는 경우, 몇 가지 의문이 여전히 풀리지 않는 문제로 남아있다. 예로서 부상화염의 노즐 출구근처에서는 스칼라 소산율(scalar dissipation rate)이 실제로 소화 한계를 초과할 정도의 큰 값을 갖고 있다는 실험적 증거들이 제시된다.⁽¹¹⁾ 그러나 노즐 출구속도를 점차 증가시킴에 따라 난류강도는 증가하고 부상높이도 증가하게 된다. 극단적으로 화염날림(blow-out) 한계까지 부상높이가 증가한 경우는 화염 선단은

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

* 회원, 계명대학교 산업기술연구소

** 회원, 순천대학교 기계자동차공학부

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 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.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 Fig. 1과 같이 연료와 산화제의 유량을 조절하는 유량조절부와 슬롯버너(slot burner)로 구성된다. 유량조절부는 가스용기(bomb), 압력조정기, 유량계, 혼합챔버로 구성된다. 연료는 상업용 프로판(LPG)을 사용하였고 산화제는 질소 79%, 산소 21%로 혼합되어진 고순도공기(순도 99.99%)를 사용하였다. 각 기체는 용기에서 나와 일정한 압력조건으로 공급하기 위해 압력조정기(regulator)를 거치며 버블미터(bubble meter)를 사용하여 정확한 유량값으로 교정된 유량계(Matheson 602, 604)에서 유량이 조절된다. 유량계를 통과한 기체는 혼합챔버(mixing chamber)를 거쳐 슬롯버너로 공급된다. 혼합챔버는 길이 160mm, 내경 50mm, 부피 314ml이며 원통형모양이다. 당량비에 맞춰진 연료와 산화제가 혼합챔버 입구로 공급되어 내부에서의 스윙유동에 의해 혼합기가 균일하게 혼합되도록 제작하였다. 내부에는 각 기체의 수분제거를 위해 실리카

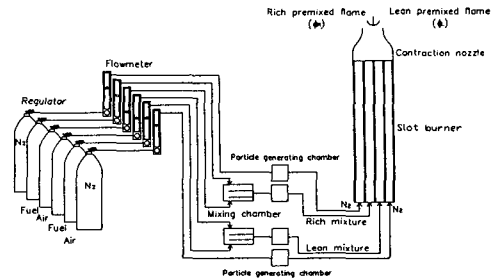


Fig. 1 Schematic diagram of flow system

겔(silicagel)을 넣었다. 혼합챔버와 슬롯버너 사이에는 입자발생챔버(particle generating chamber)를 설치하였으며 유동속도 계측을 위한 PIV(particle image velocimetry) 실험시에만 미세입자 가루를 넣어 둔다. 챔버를 통과한 기체는 내경 4mm인 비닐튜브를 거쳐 버너로 공급된다. 공급튜브의 길이를 내경의 1000배 정도로 충분히 길게 하여 버너로 공급되기 전에 혼합기가 균일하게 혼합되도록 하였다. 슬롯버너는 Seo 등의 연구⁽⁴⁾에 사용된 버너와 유사하며 농도차이 변화를 주기 위해 폭 10mm, 너비 25mm, 길이 720mm의 슬롯 4개로 구성된다. 슬롯의 재료는 아크릴 판(acrylic plate, 두께 10mm)과 스테인레스 판(stainless steel plate, 두께 0.5mm)을 사용하였으며 볼트로 체결하였다. 슬롯버너의 내부에서는 유동장 속도를 균일화하기 위해 직경 5mm, 길이 200mm인 합성비닐파이프와 세라믹 허니콤(ceramic honeycomb, 가로 1.5mm, 세로 1.5mm, 높이 250mm)을 설치하였다. 세라믹 허니콤은 유동장의 속도를 균일화시킬 뿐만 아니라, 화염의 역화방지 역할을 한다. 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 허니콤을 통과한 예혼합기는 0.38의 수축비를 가지는 수축노즐(contraction nozzle)을 지나 농도차이에 의한 화염이 생성된다. 수축노즐의 출구는 가로 20mm, 세로 20mm 크기이며, Morel의 연구⁽¹²⁾를 기초로 3차 근사로 내부 형상을 도안하여 식고로 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 슬롯의 양쪽 부분을 똑같이 이론당량비 $\phi = 1.0$ 화염으로부터 시작하여 좌우의 농도를 변화시킨다. 예혼합기가 공급되는 중심부의 슬롯 2개중 왼쪽부분은 과농당량비(ϕ_R) 조건으로 혼합기를 공급하고, 오른쪽부분은 희박당량비(ϕ_L) 조건으로 혼합기를 공급한다. 과농당량비 영역에서는 혼합기를 $\phi_R = 1.0$ 에서 점차 증가시키고 희박당량비 영역에서는 혼합기를 $\phi_L = 1.0$ 에서 점차 감소시키면서 화염의 날림이나 역화(flash back)가 없이 안정하게 부상되는 영역을 관찰한다. 본 연구에서는 공급되는 혼합기 및 주위류의 전체 유량을 화염이 버너출구에 날림 또는 역화가 일어나지 않으면서 부착되지 않고 부상하는 1.15m/s의 유속으로 공급하였다.

Fig. 2는 이론적 예혼합화염에서부터 시작하여 슬롯버너 양쪽 당량비를 변화시켰을 때 화염이 안정적으로 존재하는 영역을 나타낸 것이다. 슬롯버너의 왼쪽 과농당량비를 고정시키고 오른쪽 희박당량비를 변경하면 화염날림, 화염안정, 그리고 화염날림 순으로 거동이 일어난다. 또한 슬롯버너의 오른쪽 희박당량비를 고정시키고 왼쪽 과농당량비를 변경하여도 화염날림, 화염안정, 그리고 화염날림 순으로 거동이 일어나고 있으며 희박당량비 $\phi_L = 0.45$ 미만에서는 과농당량비 ϕ_R 을 조절하여도 화염의 안정영역이 관찰되지 않았다. 실선의 안쪽이 화염이 부상하여 안정화 하는 영역(lifted flame stabilization region)이다.

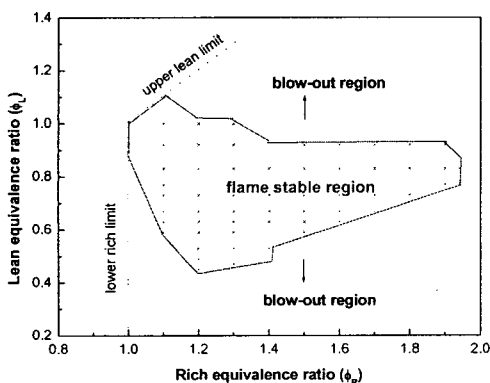


Fig. 2 Flame stability curve with equivalence ratios

연소장에서 예혼합화염에서 삼지화염으로의 천이되는 거동특성 및 화염의 형태를 정성적으로 분석하기 위한 화염가시화 방법으로 ICCD 카메라(USA Princeton Instruments, PI-MAX)를 이용하여 직접 촬영을 하였다. ICCD 카메라의 노출시간을 10ms, 증폭 이득(gain)을 10으로 설정하였다. 화염모습을 통해 부상높이, 화염대의 곡률반경, 화염 폭을 측정하였다. 그리고 ICCD 카메라에서 촬영된 화상을 상용 소프트웨어(Winspec program)를 통해 16비트 강도세기(arbitrary intensity)로 나타내었다.

3. 실험 결과

3.1 화염형상 및 부상높이

Fig. 3은 슬롯버너 왼쪽 과농당량비 $\phi_R = 1.1$, 오른쪽 희박당량비 $\phi_L = 1.1 \sim 0.53$ 일 때 화염형상을 나타낸 것이다. 그림의 제일 왼쪽 상단이 과농당량비 $\phi_R = 1.1$, 희박당량비 $\phi_L = 1.1$ 인 양쪽 모두 같은 당량비 조건인 예혼합화염이다. 같은 당량비 예혼합화염의 형상은 화염선단이 매우 둥글며 반구형 형상으로 좌우로 공급되는 혼합기가 같기에 때문에 화염이 대칭성을 가진다. 화염의 색은 청색을 띤다. 사진 밑부분의 흰색선은 슬롯버너 수축노즐 출구 끝부분이다. 슬롯버너의 왼쪽 과농당량비를 고정시키고 오른쪽 희박당량비를 점차 변화시키면 오른쪽 희박당량비 $\phi_L = 0.92$ 부근까지는 예혼합화염의 형상이 나타나고 있다. 그러나 오른쪽 희박당량비 $\phi_L = 0.83$ 부근부터 혼합기의 농도차이가 더 커지면서 둥근 예혼합화염의 모습에서 선단중심이 날카로워지는 유선형모습으로 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 $\phi_L = 0.77$ 이하에서는 확산화염에 의한 삼지화염의 형상이 뚜렷이 나타난다. 삼지화염은 연료와 산화제의 조성이 서로 다른 상황에서 농도구배에 의해 발생된다. 부분예혼합 혼합기에 의해 층류 화염이 형성될 때 선단 근처에는 연료가 이론당량비보다 많은 과농혼합기를 형성하고 다른 영역은 연료가 이론당량비보다 적은 희박혼합기를 형성한다. 따라서 형성되는 화염은 과농예혼합화

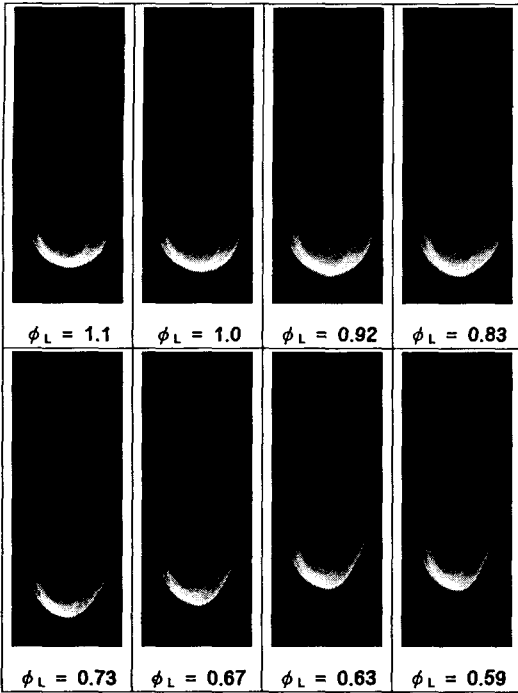


Fig. 3 Flame image ($\phi_R = 1.1$)

염(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 확산화염이 존재하게 된다. Fig. 3에서 농도차이가 증가함에 따라 화염선단이 위치하는 부상높이는 감소하다가 확산화염의 꼬리부분이 나타나는 오른쪽 희박당량비 $\phi_L = 0.83$ 을 최소로 다시 증가하고 있다. 슬롯버너로 공급되는 전체 혼합기의 유량은 동일하므로 화염의 부상높이 변화는 농도차이에 의한 화염의 안정화 특성의 변화로 발생한 것으로 생각된다. 왼쪽 과농당량비 $\phi_R = 1.2 \sim 1.5$ 일 때에서도 슬롯버너에 공급되는 혼합기의 농도차이가 증가할수록 가운데 확산화염의 꼬리부분이 뚜렷하게 나타났으며 부상높이도 감소하였다가 증가하는 변화가 나타났다.

Fig. 4는 슬롯버너에 공급되는 좌우측 혼합기의 당량비 변화에 따른 화염의 곡률반경(radius of curvature)을 나타낸 것이다. 곡률반경은 ICCD 카메라를 이용한 직접사진을 통해 화염의 선단중심

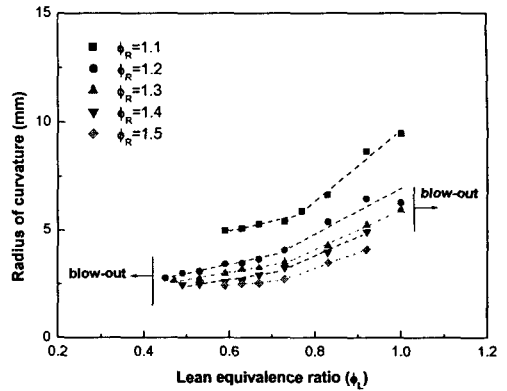
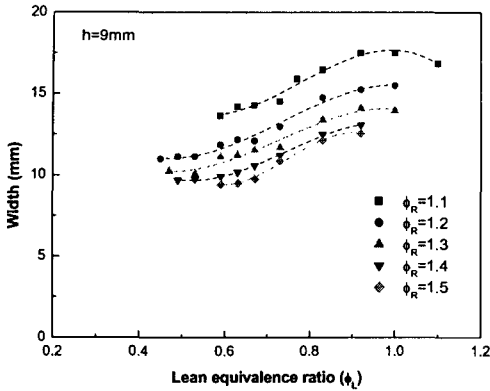


Fig. 4 Radius of curvature at flame tip

에 내접하는 원의 곡률반경을 관찰하였다. 슬롯버너 왼쪽 과농당량비를 고정시키고 오른쪽 희박당량비를 변화시키면 희박당량비 ϕ_L 이 줄어들수록 곡률반경이 줄어들고 있다. 또한 희박당량비를 고정시키고 왼쪽 과농당량비 ϕ_R 을 변화시키면 과농당량비가 증가할수록 화염의 곡률반경이 줄어들고 있다. 즉, 곡률반경이 혼합기의 농도차이가 증가함에 따라 감소하고 있다. Ko 등⁽⁷⁾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 스트레치가 혼합기의 질량분율과 곡률에 직접적으로 관계가 있으며 혼합기의 질량분율에 의해 화염구조의 변화로 화염의 곡률과 스트레치(stretch)에 의해 화염전파속도가 감소함을 나타내었다. Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 Ko 등이 지적한 부분예혼합화염에서 연료 질량 분율 구배와 곡률반경의 선형적 관계는 오히려 희박당량비 ϕ_L 을 증가시키기에 따라 미미한 선형적 증가를 나타내고 있다. 또한 예혼합화염으로 접근함에 따라 곡률반경의 급격한 증가를 나타내고 있어 두 영역 사이의 곡률 거동이 구분되어 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 슬롯버너에 공급되는 혼합기의 농도차이 따른 화염의 폭을 나타낸 것이다. 화염의 폭은 부상된 화염선단으로부터 9mm와 18mm 높이에서 화염의 좌우 폭을 측정하였다. Fig. 5(a), 5(b)



(a) h = 9mm

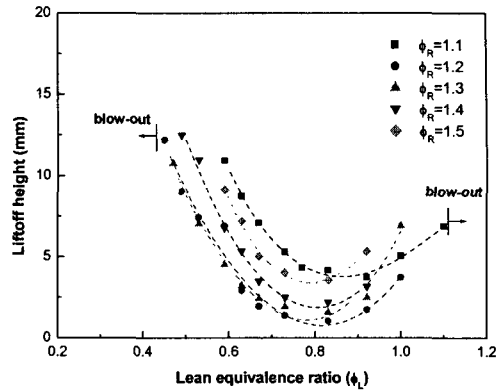
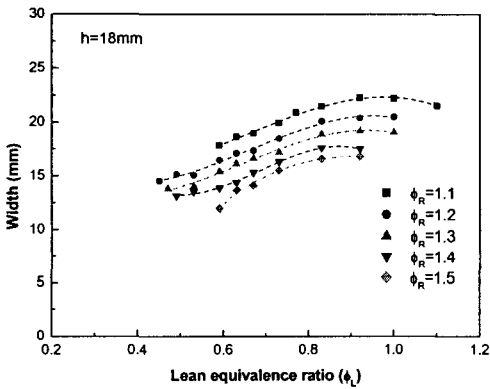


Fig. 6 Liftoff heights



(b) h = 18mm

Fig. 5 Width of flame

에서 오른쪽 희박당량비 ϕ_L 이 줄어들수록 화염의 폭이 줄어들고 있다. 또한 왼쪽 과농당량비 ϕ_R 이 증가할수록 화염의 폭이 줄어들고 있다. Kioni 등⁽¹⁾은 연료 질량분율구배(fuel mass fraction gradient)에 따른 삼지화염의 폭을 실험적으로 관찰하여 연료 질량분율구배가 증가할수록 화염의 폭이 감소함을 보였으며 이것은 Fig. 4에서 농도 차이가 커질수록 화염의 폭이 감소하고 있는 것과 정성적으로 일치하고 있다. Schefer 등⁽¹³⁾은 화염폭이 곡률반경의 2배 정도가 된다고 하였으며 Fig. 4와 Fig. 5의 화염의 곡률반경과 화염폭의 결과와 유사한 경향을 보여주고 있다.

Fig. 6은 슬롯버너에 공급되는 혼합기의 농도차이에 따른 화염의 부상높이(liftoff height)를 나타

낸 것이다. 부상높이가 좌우측 슬롯에 공급되는 혼합기의 농도차이에 따라 변화되어지고 있음을 볼 수 있다. 왼쪽 과농당량비를 고정시키고 오른쪽 희박당량비를 감소시키면 화염의 부상높이가 줄어들어다가 $\phi_L = 0.83 \sim 0.73$ 부근에서 최소를 이룬 후 다시 화염부상높이가 증가하고 있다. 그럼에서 양쪽 끝부분은 화염의 날림(blow-out)이 발생하여 거지는 영역이다. 부상높이가 최소가 되는 점을 기준으로 Fig. 3의 직접사진을 통한 화염모습관찰과 비교하면 희박당량비 ϕ_L 이 증가하는 방향은 예혼합화염의 거동이 나타나고 있으며 희박당량비 ϕ_L 이 감소하는 방향은 삼지화염의 거동이 나타나고 있는 영역임을 알 수 있다. 화염의 부상높이가 증가한다는 것은 화염전파속도 보다는 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 곡률반경의 급격한 증가에 따른 화염전파속도의 감소에 기인한다. 또한 삼지화염 거동이 나타내는 경우에 있어서도, 곡률 반경이 미미한 변화를 보이고 있다. 그럼에도 불구하고 부상높이는 희박당량비 ϕ_L 이 감소할수록 다시 증가하고 있다. 이것은 희박당량비 ϕ_L 이 감소함에 따라 예혼합화염 선단 바로 앞의 농도구배의 증가로 인해 스칼라 소산율(scalar dissipation rate)이 증가하게 되어 화염전파속도가 감소하기 때문이다. Chung 등⁽⁵⁾과 Lee 등⁽⁶⁾은 제트노즐에서의 프로판 삼지화염의

부상높이는 출구속도, 노즐 직경, 주위류의 유동 속도 그리고 부분적으로 혼합된 공기 등에 의해 변동이 일어난다고 보고하고 있다. 하지만 본 연구에서는 출구유동의 속도는 1.15m/s로 고정되어 있으므로 부상높이의 증가와 감소는 화염전파속도에 기인하며 이것은 결국 Fig. 6에서 보았듯이 농도차이의 변화에 따라 화염전파속도가 변화하고 있음을 의미한다.

Fig. 3~6의 결과를 정리하면 농도차이에 따라 화염의 형상, 부상높이, 화염의 곡률반경, 화염의 폭이 변화되고 있으며, 이것은 혼합기의 농도차이가 화염의 구조를 변화시킬 수 있음을 암시하고 있다. 또한 이런 화염구조의 변화는 화염전파속도의 변동을 예고하고 있다. 따라서 슬롯버너의 양단의 농도차이가 화염의 안정성을 좌우하게 되는 주요한 요인임을 알 수 있다.

3.2 화염 자발강도

앞선 화염의 직접사진에서 구별된 예혼합화염과 삼지화염의 반응물의 대소를 표현할 수 있는 인자로서 발광강도(luminescence intensity)를 선택하여 비교하였다. 삼지화염이 생성되면 중심부근의 꼬리부근에서 연료와 공기의 확산화염이 생기며 이로 인해 발광강도가 예혼합화염보다 강해진다. 따라서 이 발광강도에 따라 예혼합화염과 삼지화염의 발생영역을 관찰할 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 3의 왼쪽 과농당량비 $\phi_R = 1.1$ 일 때 오른쪽 희박당량비 ϕ_L 을 변화시켜 부상화염의 선단에서 23.8mm의 높이에서 화염의 발광강도를 나타낸 것이다. 그림의 중심부근($x=15$)을 기준으로 왼쪽부분($x < 15$)이 과농당량비 ϕ_R 화염이 나타나는 영역이며 오른쪽부분($x > 15$)이 희박당량비 ϕ_L 화염이 나타나는 영역이다. 오른쪽 희박당량비 ϕ_L 이 낮아질수록 중심부근의 강도세기가 크게 변화되고 있으며, 변화가 크게 나타나는 부분($\phi_L = 0.77\sim 0.59$)과 약한 변화가 있는 부분($\phi_L = 0.92\sim 0.83$), 변화가 거의 없는 부분 ($\phi_L = 1.1\sim 1.0$)으로 구분된다. 앞 절의 직접사진관찰에 의한 화염모습과 비교하면 $\phi_L = 1.1\sim 1.0$ 영역에서는 예혼합화염의 모습이 관찰되며, $\phi_L = 0.92\sim 0.83$ 을 경계로 $\phi_L = 0.77\sim 0.59$ 인 영역에서 삼지화염의 모습이 뚜렷이 관찰되고 있다. 따라서 중심부근의 강도의 세기가 증가하는 것은 확산화염의 꼬리부근이 발달하는 것이다.

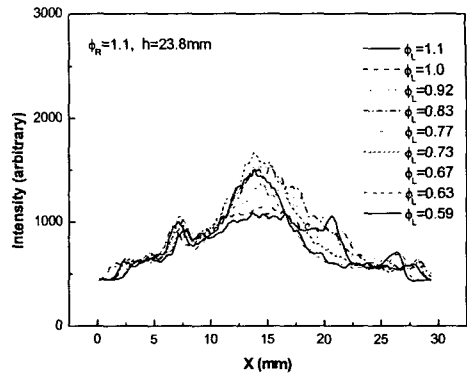


Fig. 7 Flame image intensity

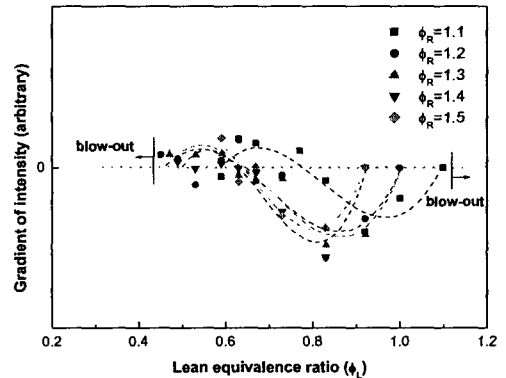


Fig. 8 Gradient of maximum intensity with equivalence ratios of ϕ_L and ϕ_R

삼지화염의 경계를 구체적으로 밝히기 위해 부상화염의 선단중심($x = 15$)에서 축방향 23.8mm 높이에서의 최대 발광강도(maximum luminescence intensity)의 기울기(gradient)를 Fig. 8에 나타내었다. 세로축의 중심선 0의 값을 기준으로 편차(deviation)가 클수록 발광강도의 변화가 큰 경우이다. 기울기가 급격히 변화하는 당량비 범위를 기준으로 삼지화염과 예혼합화염으로 구분되며, 이 기준점이 삼지화염과 예혼합화염을 구분짓는 임계영역으로 생각된다. 그림에서 과농당량비 ϕ_R 이 증가할수록 기울기가 급격히 변화되는 점이 점차 낮은 희박당량비로 변화되어 감을 볼 수 있다. 왼쪽 과농당량비 $\phi_R = 1.1$ 일 때 $\phi_L = 0.92$,

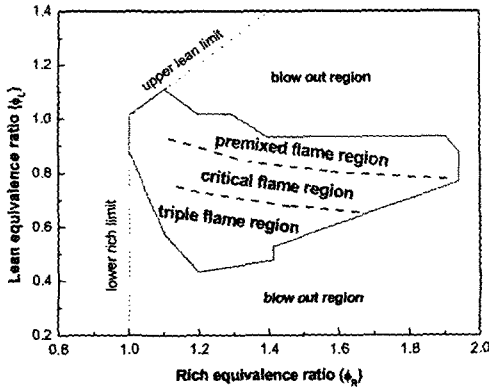


Fig. 9 Flame stabilization curve

왼쪽 과농당량비 $\phi_R = 1.2, 1.3$ 일 때 $\phi_L = 0.83$, 왼쪽 과농당량비 $\phi_R = 1.4$ 일 때 $\phi_L = 0.73$ 이 삼지화염이 생성되는 경계점이다. 이는 삼지화염의 발생을 화염중심에서의 확산화염의 생성과 연관지어 볼 때 과농당량비 영역의 미연의 연료가 희박당량비 영역의 잔존하는 공기와 확산화염을 형성하기 위해서는 미연의 연료가 많을수록 희박당량비 영역에서의 많은 공기가 유입되어야 한다. 그래서 삼지화염이 형성되기 위해서는 과농당량비가 증가할수록 희박당량비의 크기는 낮아지는 것으로 생각된다. 결과적으로 부상높이, 화염 곡률, 화염 강도 측정 결과들로부터 예혼합화염, 임계연소, 삼지화염으로 구분지음을 일관되게 보여주고 있다.

Fig. 9는 화염의 부상높이, 화염의 곡률, 화염강도 결과로부터 Fig. 2의 화염안정화 곡선에서 예혼합과염과 삼지화염과 임계연소영역을 나타내었다. 점선의 내부영역은 예혼합과염에서 삼지화염으로의 천이되는 임계연소영역이며, 점선의 윗부분은 예혼합과염 영역이며 아래부분은 삼지화염 영역인 것이다. 왼쪽 과농당량비 ϕ_R 을 고정시키고 오른쪽 희박당량비 ϕ_L 을 변화시키면 화염은 예혼합과염에서 임계연소영역을 지나 삼지화염의 모습으로 변해간다. 경계부분을 나타내는 점선이 과농당량비 ϕ_R 증가에 따라 점차 아래쪽으로 내려오는 것은 농도차이로 인해 확산화염을 형성하기 위한 산화제의 양이 증가되어야 되기 때문으로 생각된다.

4. 결론

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

(1) 혼합기의 농도차이가 더 커지면서 등근 예혼합과염의 모습에서 선단중심이 유선형모습으로 바뀌어지고 있으며 화염의 가운데부분에서 확산화염의 꼬리부분이 나타나고 있다. 이 꼬리 부분이 과농 예혼합과염으로부터 잔류의 연료가 확산되고 희박 예혼합과염으로부터 산화제가 확산되어 중심부에 당량 혼합비를 갖는 확산화염이며 삼지화염의 특징을 가지게 됨을 확인하였다.

(2) 농도차이가 증가할수록 화염 곡률반경은 감소하는 특성을 확인할 수 있었다. 또한 부상높이는 과농당량비를 고정시키고 희박당량비를 감소시킴에 따라 점차 감소하다가 최소를 나타낸 후 다시 증가하는 것을 알 수 있었다. 이러한 최소점 근처에서 예혼합과염으로부터 삼지화염으로 천이하는 것을 알 수 있었고 이러한 천이과정은 화염 강도 측정으로부터 확인되었다.

(3) 부상높이, 화염 곡률, 화염 강도 측정 결과들로부터 예혼합과염영역과 삼지화염영역 사이에 천이구간인 임계적 연소화염영역이 존재함을 제시하였다.

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) Seo, J. I., Kim, N. I., Oh, K. C. and Shin, H. D., 2003, "An Experimental Study on the Effects of Concentration Gradient and Mean Velocity on the Liftoff Characteristics of the Triple Flame," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers (B)*, Vol. 27, No. 8, pp. 1061~1070.
- (5) Chung, S. H. and Lee, B. J., 1991, "On the Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Nonpremixed Jets," *Combustion and Flame*, Vol. 86, pp. 62~72.
- (6) Lee, B. J. and Chung, S. H., 1997, "Stabilization of Lifted Tribachial Flames in a Laminar Nonpremixed Jet," *Combustion and Flame*, Vol. 109, pp. 163~172.
- (7) Ko, Y. S. and Chung, S. H., 1999, "Propagation of Unsteady Tribachial Flames in Laminar Non-Premixed Jets," *Combustion and Flame*, Vol. 118, pp. 151~163.
- (8) 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.
- (9) Mansour, M. S., 2003, "Stability Characteristics of Lifted Turbulent Partially Premixed Jet Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 133, pp. 263~274.
- (10) 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.
- (11) Müller, C. M., Breitbach, H. and Peter, N., 1994, "Partially Premixed Turbulent Flame Propagation in Jet Flames," *Twenty-Fifth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1099~1106.
- (12) Morel, T., 1975, "Comprehensive Design of Axisymmetric Wind Tunnel Contractions," *ASME J. of Fluids Eng.*, pp. 225~233.
- (13) Schefer, R. W. and Goix, P. J., 1998, "Mechanism of Flame Stabilization in Turbulent, Lifted-Jet Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 112, pp. 559~574.