

농도구배가 삼지화염의 부상특성에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

서정일[†] · 김남일^{**} · 오광철^{*} · 신현동^{***}

An Experimental Study on the Lift-off Characteristics of the Triple Flame with Concentration Gradient

Jeong Il Seo, Nam Il Kim, Kwang Chul Oh and Hyun Dong Shin

ABSTRACT

The lift-off characteristics of the triple flame have been studied experimentally with various mean velocities and concentration gradients using a multi-slot burner, which can control the concentration gradient and the mean velocity independently. Lift-off height, axial maximum velocity, flame temperature, and some other characteristics were examined for methane and propane flame. It was found that minimum values of the lift-off heights exist at a certain concentration gradient for constant mean velocity, and this result implies that the propagation velocity has a maximum value at this condition. OH radical distribution was measured with LIF method and velocity variation along streamline was measured with PIV system. In addition maximum temperature along streamline was measured with CARS system. The intensity of the diffusion flame affects on the propagation velocity of triple flame in the region of very weak concentration gradient.

기호설명

Y_F	: 연료의 질량분율	$\Delta\phi$: 슬롯간의 당량비 차이
∇Y_F	: 농도구배 (연료의 질량분율의 구배)	V_m	: 수축 노즐 출구에서의 평균유속
ϕ	: 당량비	S_l^0	: 총류 평면화염 전파속도

Key Words : Triple flame(삼지화염), Flame Stabilization(화염안정화), Lift-off(부상), Flame Propagation Speed(화염전파속도), Flame Temperature(화염온도)

1. 서 론

예혼합 화염은 연료와 산화제의 혼합기를 연화산을 통하여 전파되지만, 확산 화염은 이러한 전파 메커니즘을 가지지 못한다. 확산 화염은 부상

화염의 형태로 안정화 될 수 있으며, 이런 경우 연료와 산화제가 부분적으로 예혼합 상태가 되면서 질량분율의 구배(이후 농도 구배)가 공간에 형성된다.

연료의 농도 구배가 있는 공간에 화염이 존재할 때 이론 당량비 조건을 기준으로 한쪽은 희박 예혼합 화염 그리고 반대쪽은 과농 예혼합 화염이 형성된다. 이러한 예혼합 화염 하류에 미연의 산화제와 연료가 만나서 다른 하나의 확산 화염을 형성하게 되는데 이와 같이 예혼합 화염과 확산 화염이 동시에 존재하면 이를 삼지화염(Triple

* 한국과학기술원 기계공학과

† 연락처자, E-mail: seoji@kaist.ac.kr

Tel : 042-869-3057 Fax : 042-869-8820

** Tohoku University

*** 한국과학기술원 기계공학과

flame or Tribrachial flame)이라고 한다. 삼지화염은 부상된 화산화염의 선단이나 소화와 재점화시 빈번히 일어나는 난류화염 연구에 적용되어 왔다.

Phillips[1]는 농도구배를 가지는 메탄과 공기의 혼합총에서 화염의 전파를 실험적으로 연구하여 삼지화염의 구조를 발견하였다. 수평으로 설치한 덕트 내부로 상부에는 메탄을, 하부에는 공기를 유입시켜 메탄의 유량을 증가시키면 자연스럽게 농도구배가 증가하도록 설계하였다. 농도구배의 증가에 따라 삼지화염의 선단이 혼합총으로 전파되어 가는 속도를 측정하였다. 그 결과 농도구배가 증가함에 따라 화염전파속도가 감소함을 보였다.

Azzoni[2], Puri[3] 등은 삼중 슬롯 버너를 제작하여 중심슬롯에는 과농예혼합기를 양쪽에는 희박예혼합기를 각각 공급하여 삼지화염을 만들었다. 이 연구에서는 과농과 희박예혼합의 당량비를 바꾸면서 농도구배를 조절하였고, 각 슬롯의 유속을 변화시키면서 삼지화염의 응답을 연구하였다. 그러나 실험장치의 한계로 안정한 부상화염을 얻지 못하고, 세라믹 허니콤(ceramic honeycomb)에 부착된 삼지화염의 특성을 주로 관찰하였다. 부착 삼지화염의 형상, 온도, 그리고 화학조성 측정치가 부상화염에 관한 수치계산의 결과와 거의 일치함을 보였다.

Kioni[4,5] 등은 보다 능동적인 농도구배를 줄 수 있는 다중슬롯 버너를 제작하여 안정한 부상삼지화염을 구현하였다. 이를 이용해 삼지화염의 전파속도를 측정하고, 이론해석[4]과 수치계산[5]을 수행하였다. 연소실 덕트의 각도를 조절하여 유동장에 역속도 구배를 주어 화염의 안정화를 쉽게 하였고, 부피기준으로 연료 중 질소가 55%인 희석연료를 사용하여 화염의 역화를 방지하였다. 그 결과 농도구배가 증가할수록 Phillips의 결과와 반대로 화염전파속도가 조금 상승하는 결과를 보였다. 그러나 연료유량 중 질소가 55%를 차지한 희석연료를 사용하였기 때문에 다른 연구자의 결과와 직접적으로 비교되기가 어렵다.

Plessing[6] 등은 삼중농축관을 이용하여 중심관으로부터 차례로 희석연료, 희박예혼합연료, 공기를 공급하여 안정적인 부상화염에 대한 실험을 행하였다. 희석연료와 희박연료의 속도와 농도에 따른 부상 특성을 연구하였으나, 화염상류의 속도 분포가 균일하지 않아서 기준의 이론들과 직접 비교되기에 적합하지 않다.

Chung[7]과 Lee[8]는 0.2mm 정도의 미세노즐을 이용하여 농도와 속도의 혼합영역(mixing layer)에서의 층류제트에 대한 이론해석과 화염의 부상높이 실험치로부터 부상화염의 안정화기구

를 해석하였다. 특히 Ko[9]는 축대칭 조건에서 노즐출구 속도에 따라 상대적으로 큰 농도구배 영역에서 삼지화염의 전파속도를 측정하였다. 그러나 이론당량비 조건의 화염특성에 변화를 주지 않는 상태에서 낮은 농도구배의 삼지화염(희박가연한계로부터 과농가연한계까지의 화염을 가지는)을 형성하기에는 농축관을 이용한 분류는 적합하지 않다.

Ruetsch[10], Chen[11] 등은 화염의 열생성(heat release)이 층류삼지화염의 전파속도에 미치는 영향에 대해 수치해석적으로 설명하였다. 층류삼지화염의 전파속도는 화염에 의해 유동의 재편이 발생할 때 이것의 영향을 받지 않는 상류의 혼합기 속도(U_p)로 정의하였다. 화염전단으로의 열확산에 의해 유동의 재편(flow redirection)이 이루어지고, 화염의 전파속도 증가는 이에 기인한다. 또한, 삼지화염의 전파속도는 열생성에 의한 화염대 전후의 기연기체(burnt gas)와 미연기체(unburned gas)의 밀도비의 제곱근에 비례함을 보였다.

$$\frac{U_p}{S_L} = \sqrt{\frac{\rho_u}{\rho_b}} \quad \text{식 (1)}$$

이상과 같은 많은 연구에서 삼지화염의 전파속도가 이론당량비인 층류예혼합화염의 연소속도보다 큰 값을 가지는 것으로 보고되었다. 이러한 삼지화염 전파속도의 증가는 예혼합화염 하류의 밀도변화가 유발하는 화염상류쪽의 유동변화로 설명되었다.

지금까지의 삼지화염에 관한 연구는 대부분 농도구배가 적절히 커서 화산화염이 활발히 존재하는 경우에 대해 주로 다루어졌다. 본 연구에서는 농도구배가 기존의 삼지화염연구에 비해 상대적으로 매우 작은 범위에 대해 실험을 행하였다. 이는 농도구배가 없는 조건부터 농도구배를 세밀하게 증가시켜 평면화염(flat flame)에서 삼지화염으로의 전이를 구현하고, 이로부터 농도구배가 삼지화염의 부상특성에 미치는 영향을 관찰하기 위함이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

농도구배와 평균유속은 삼지화염의 부상특성에 영향을 미치는 중요한 인자이다. 이런 이유로 균일유동과 농도구배의 능동적 제어가 필요하며, 다중슬롯과 수축노즐로 구성된 버너를 제작하여 이를 구현하였다. Fig. 1은 실험장치의 기본적인 구조를 보여주고 있다.

버너는 슬롯부, 허니컴, 수축노즐로 이루어져 있다. 슬롯부는 각슬롯에 공급되는 혼합기의 농도를 조절할 수 있는 폭 10.5mm, 너비 80mm, 길이 400mm의 슬롯 14개로 구성된다. 폭방향

의 유동 균일화를 위해 각 슬롯에는 별도의 격막을 추가로 설치하였으며 격막과 슬롯벽은 두께 0.5mm의 스테인리스 판이다. 슬롯을 지난 예혼합기는 유동 균일화를 증진시키기고 화염의 역화를 방지하기 위한 세라믹 허니컴을 지나 약 1/6의 수축비를 가지는 노즐을 지나게 된다. 노즐 출구는 50×40 (mm)이며 노즐 출구로부터 높이 방향을 x, 슬롯을 가로 지르는 방향(농도 구배가 발생하는 방향)을 y, 슬롯의 너비 방향을 z라고 정의하였다.

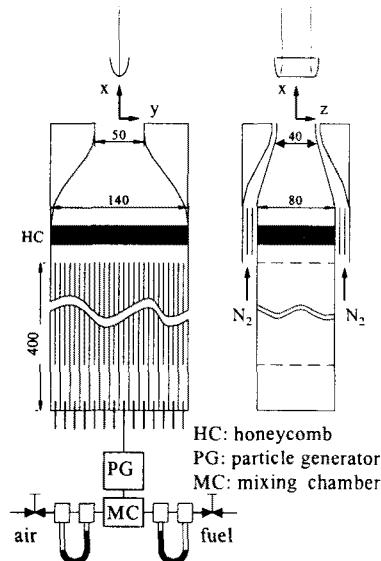


Fig. 1 Experimental apparatus and coordinates

각 슬롯으로 유입되는 공기와 연료의 유량은 각각 미세관을 지나는 유동 양단의 압력차를 마노미터와 미세조절 밸브를 이용해 조절하였으며 각각의 유량은 포말유량계(bubble meter)를 이용하여 검정하였다. 실험에 사용된 연료는 메탄(99.95%)과 프로판(98%)이며 유동 교란과 외부 산화제 유입을 막기 위해 14개 슬롯 중 가장자리 2개의 슬롯과 이중 수축노즐을 이용해서 질소를 공급하였다.

2.2 실험 방법

실험 변수로는 평균유속(V_m)과 농도구배($\nabla Y_F = dY_F/dy$)가 사용되었다. 평균유속은 노즐 출구에서의 유량을 노즐단면으로 나눈 값을 사용하였으며, 농도구배 제어를 위해 14개의 슬롯 중 12개를 사용하고 가장자리 2개의 슬롯에는 질소를 유입시켰다. 또한, z방향으로는 별도의 이중 수축노즐을 설치하여 질소를 흘려주었다. 각각의 슬롯으로 공급되는 유량을 수축노즐의 면적비를 고려하여 일정하게 유지함으로써 평균 속도를 조절

하였다.

평균유속 $V_m = 100\text{cm/sec}$ 일 때 y, z방향으로의 비반응 축방향 유속을 살펴보기 위해 마이크로마노미터와 피토튜브를 이용하였다. 화염 선단이 주로 위치하게 되는 하류 $x=100\text{mm}$ 지점까지 영역에서 유속측정 결과 축방향 속도가 균일 유속으로 유지되고 축방향 속도 감소는 초기속도의 2%미만으로 매우 작음을 확인하였다.[13]

또 하나의 실험변수인 농도구배(∇Y_F)는 12개의 슬롯 중에서 가운데 슬롯의 예혼합기 당량비가 이론당량비가 되도록 일정하게 고정하고 이웃한 각각의 슬롯간의 당량비의 차($\Delta\phi$)를 일정하게 조절하여 선형적인 분포를 가지도록 제어하였다.[13]

이 같은 조건에서 실제 노즐 출구에서의 농도구배를 구하기 위해 메탄의 경우 질량스펙트럼분석기(Mass Spectroscopy: HIDEN HPR20)를 사용하여 연료 질량분율의 공간 분포를 구하였고, 2nd harmonic Nd:Yag 레이저(500mJ max.)와 고감도 ICCD(Intensified CCD: PIMAX 512512)를 이용한 Rayleigh 산란 신호로부터 프로판의 질량분율의 공간분포를 구하였다. 이로부터 이론당량비에 해당하는 지점에서의 질량분율의 기울기 값을 구하여 농도구배로 사용하였다.[13]

축방향 속도장을 측정하기 위해 PIV(Particle Image Velocimetry) 시스템을 이용하였다. 광 소스로 더블 펄스 Nd:YAG 레이저(500mJ, 532 nm)와 cylindrical 렌즈와 convex 렌즈를 사용하여 평면 레이저 면(sheet)을 만들어 주었다. 224.9 us의 시간간격을 가지는 두장의 이미지를 얻어 이것으로 유선(streamline)과 속도장을 얻었다.

OH 라디컬 측정을 위해 LIF(Laser Induced fluorescence) 방법과 온도를 측정하기 위한 CARS(Coherent Anti-Stokes Raman Scattering) 시스템을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 삼지화염의 형상

화염면의 전파 속도가 공급되는 예혼합기의 속도보다 클 때 역화가 발생하며, 평균유속을 보다 증가시키면 화염이 안정적으로 존재하는 부상영역이 있다. 평균유속이 한계 값보다 크면 화염이 더 이상 안정적으로 존재하지 못하며 하류로 이동하면서 결국엔 화염날림이 발생한다. 이러한 평균 유속과 농도 구배에 따른 삼지화염의 안정화 선도의 특성은 다음과 같다.[13]

첫째, 농도 구배를 고정시키고 평균 유속을 증가 시키면 부상 삼지화염은 역화 영역에서 안정적으로 존재하는 영역, 그리고 화염의 날림이 발

생하는 영역을 두루 거친다.

둘째, 평균 유속을 고정시키고 농도 구배를 증가 시키면 화염의 날립이 발생하는 영역에서 부상 화염이 안정적으로 존재하는 영역, 그리고 다시 화염의 날립이 발생하는 영역을 거치거나, 혹은 부상 화염이 안정적으로 존재하는 영역에서 화염의 역화 영역, 그리고 다시 안정적으로 존재하는 영역을 거친다.

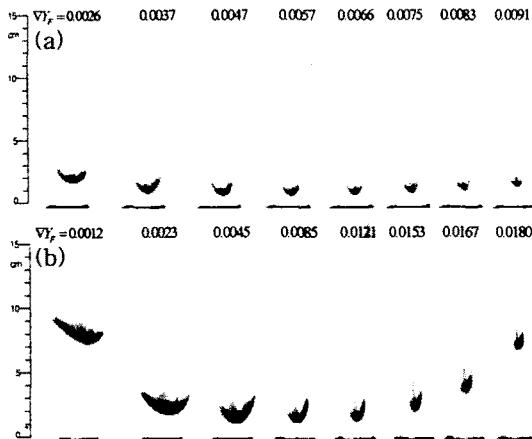


Fig. 2 Flame shape and lift-off height for the various concentration gradients (a) methane flame $V_m = 97.5 \text{ cm/s}$, (b) propane flame $V_m = 120 \text{ cm/s}$

이러한 특성은 메탄과 프로판의 화염에서 공통적으로 나타나는 현상이다. 즉, 평균 유속과 농도 구배의 변화에 대한 부상 삼지화염은 안정화 특성은 두 연료에서 서로 비슷하다.

주어진 평균 속도에 대한 농도 구배가 변할 때 삼지화염의 부상 특성을 관찰하기 위해 직접사진을 촬영하였다. Fig. 2는 메탄은 평균 유속이 $V_m = 97.5 \text{ cm/sec}$, 프로판은 평균 유속이 $V_m = 120 \text{ cm/sec}$ 인 조건에서 농도구배를 증가시켰을 때의 화염의 형상과 부상높이의 변화를, 쉽게 확인 할 수 있다.

메탄의 경우 희박 가연 농도 한계($\theta=0.53$)와 과농 가연 농도 한계($\theta=1.58$)가 이론당량비를 기준으로 거의 대칭이므로 농도 구배의 증가에 의해 희박/과농 혼합화염이 비슷한 크기로 감소하고 있음을 확인 할 수 있다. 반면에 프로판의 경우 희박 가연 농도 한계($\theta=0.50$)와 과농 가연 농도 한계($\theta=2.36$)가 이론당량비를 기준으로 상당한 비대칭이므로 농도 구배의 증가에 의해 과농 혼합화염의 감소보다는 희박 혼합화염의 감소가 두드러짐을 확인 할 수 있다.

3.2 삼지화염의 축방향 속도

주어진 평균 속도에서 안정적으로 부상 화염이

존재하는 영역에 대해 농도 구배에 따른 삼지화염의 축방향 속도를 측정하기 위해 PIV(Particle Image Velocimetry)를 사용하였다. 여기에 $1.0 \mu\text{m}$ 의 산화알루미늄(Al_2O_3) 입자를 이용하였다. 유동 교란을 최소화하기 위해 가연 농도 범위 내에 해당하는 슬롯으로만 particle을 공급하였다.

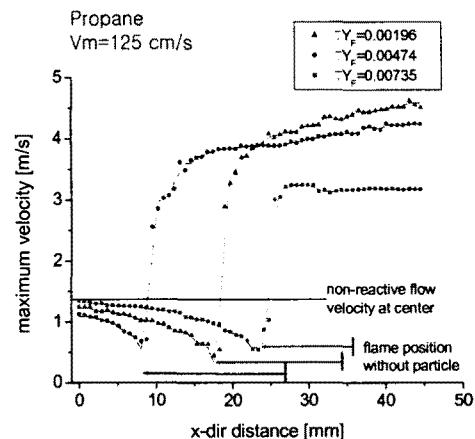


Fig. 3 Axial velocity in x-direction measured with PIV

우선 유선(streamline)에서 알 수 있는 것은 혼합화염대로부터 열확산으로 인해 화염대 상류 기체의 부피 팽창으로 상류 유동이 영향을 받게 된다. 즉, 유선튜브가 화염대 상류에서 열확산에 의해 영향을 받아 유동의 재편이 발생한다. 이와 같은 화염대 상류 유동의 재분배는 유선을 따라 측정한 축방향 최고 속도의 변화로 확인 할 수 있다.

Fig. 3는 평균 유속이 $V_m=125 \text{ cm/s}$ 일 때 농도 구배가 $\nabla Y_F=0.00196$, $\nabla Y_F=0.00474$, 그리고 $\nabla Y_F=0.00735$ 에 대해 PIV로 측정한 축방향(x-direction) 최대 속도를 나타내고 있다. 비록 최소 슬롯에서 공급된 particle에 의해 부상 높이가 유동 상류쪽으로 이동하지만, 정성적으로 각각의 농도 구배에 대한 축방향 속도를 비교할 수 있다.

농도 구배가 증가 할수록 화염대 하류의 기연가스(burnt gas)의 축방향 속도가 감소하는 경향을 보이고 있다. 이것은 농도 구배가 증가함에 따라 화염의 곡률(flame curvature)의 증가와 이에 따른 스트레치(stretch) 효과가 증가하면서 화염대의 열손실(heat loss)이 커지기 때문이다. 그리고 기연가스의 축방향 속도가 부력 효과(buoyancy effect)에 의해 조금씩 증가하고 있다. 그리고 화염대 상류의 유동장을 자세히 살펴보기 위해 부상 높이에 관계없이 화염대의 위치를 일치시키고

가상의 시작점으로 축방향 속도를 다시 그려 보면 다음과 같은 경향을 관찰할 수 있다. 즉 화염대 상류의 축방향 속도는 화염에 의한 유동 재편(flow redirection)으로 화염대 직전까지 유선 튜브의 단면적이 넓어지므로 축방향 속도가 점점 감소한다. 또한, 축방향 속도의 최소값은 화염대 직전에서 얻어지며, 그 값은 총류 예혼합 화염의 이론당량비에서의 전파 속도와 거의 같은 크기의 속도를 보인다. 마지막으로 노즐 입구부터 화염까지의 거리에 따라 화염이 유동에 미치는 영향이 달라진다. 그러므로 삼지화염의 전파속도는 화염에 의한 열 확산에 의한 유동 재편의 영향을 받지 않는 영역에서의 혼합기의 속도로 정의 [10,11]되므로 이 연구에서는 화염이 상류 유동상에 영향을 미치지 않는 화염 날림(blow out) 직전에서의 혼합기 유입 속도를 삼지화염의 전파속도(propagation speed)라고 간주하였다. 이에 대해서는 다음 장에서 설명하겠다.

3.3 삼지화염의 곡률

선형적인 농도 구배에 의해 형성된 삼지화염은 예혼합 화염면을 따라 서로 다른 연소속도를 가지므로 화염의 형상을 규정하는 또 다른 파라미터로 화염의 곡률을 이용하였다. 본 연구에서는 OH 라디칼의 이미지로부터 직접 화염 곡률을 계산하였다. Fig. 4는 본 실험 장치에서 구현된 삼지화염의 OH 라디칼 이미지이며 삼지화염의 선단(이론당량비를 나타내는 삼지점)에서 곡률을 구하였다. 화염의 곡률은 식 (2)과 같이 정의하였다.

$$K = \frac{dx^2}{1 + (\frac{dx}{dy})^2} \quad \text{식 (2)}$$

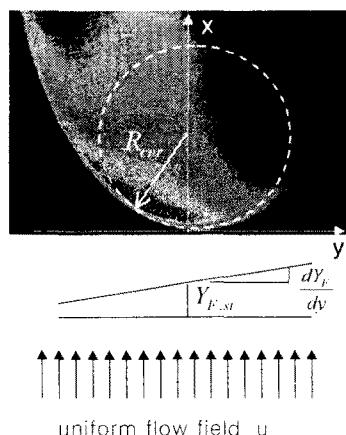


Fig. 4 Flame curvature

부분적인 예혼합에 의한 부상 화염은 가연 농도 범위가 비교적 좁고 독립적으로 존재하기가 어렵기 때문에 보통 정확한 화염 곡률을 측정하기가 곤란하였다. 본 실험에서는 선형적인 농도 구배에 의해 형성된 비교적 큰 삼지화염으로부터 화염의 곡률을 계산하였다.

평균 유속과 농도 구배에 따라 부상 화염의 부상 높이는 변하며 이를 보다 정확히 측정하기 위해 ICCD 카메라를 이용하였다. 노즐 끝단에서부터 ICCD 카메라로 100의 이미지를 중첩해서 최고의 이미지 강도(intensity)를 가지는 곳까지의 수직 거리를 부상 높이로 정의하여 측정하였다. 각각의 조건에 대한 부상 높이의 결과를 OH 라디칼 이미지로부터 계산한 화염의 곡률로 나타낸 것이 Fig. 5이다.

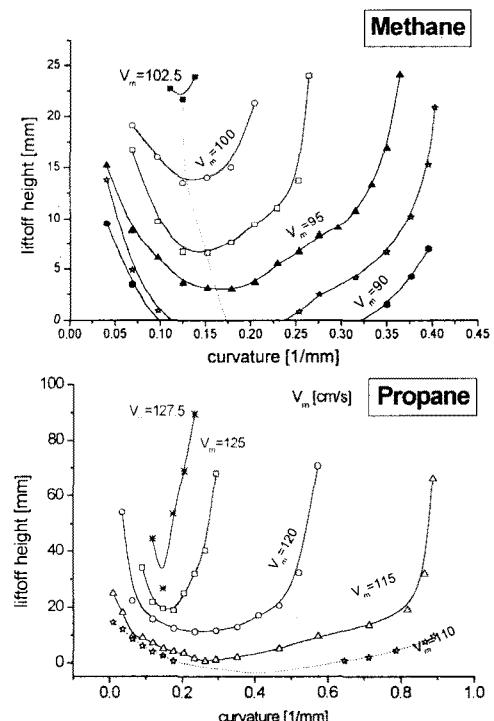


Fig. 5 Lift-off height with mean velocity and concentration gradient (a) methane, (b) propane

이것으로부터 삼지화염의 부상특성은 다음과 같다. 첫째는 일정한 평균유속에 대해 농도구배가 증가할 때 화염의 부상높이는 U자 형태의 곡선 궤적을 가진다. 즉, 삼지점이 부상 높이가 최저점에 이를 때까지 감소하다가 이후에는 증가한다. 화염 부상 높이의 감소와 증가는 각각 화염 전파 속도의 증가와 감소를 의미한다. 즉, 화염의 날림(blow out) 직전에서의 혼합기 유입 속도를 삼지

화염의 전파속도로 결정할 수 있다. 이 사실로부터 최소 부상 높이를 기준으로 농도구배가 더 작은 영역에서는 농도구배의 증가가 화염 전파 속도를 증가시킨다. 이는 회석연료를 사용하여 화염전파속도를 측정한 Kioni[4,5]의 실험결과와 유사하다. 이 구간은 약간의 농도 구배 증가에 대해서도 화염의 속도가 급격히 증가하기 때문에 이로 인한 화염 상류의 유동이 큰 영향을 받게 되므로 농도 구배 증가에 대해 화염 전파 속도가 증가한다. 그러나 최소 부상 높이를 기준으로 농도구배가 더 큰 영역에서는 농도 구배의 증가가 화염 전파 속도를 감소시킨다. 이는 기존의 많은 연구에서와 같이 농도 구배의 증가에 대해 화염의 속도가 증가가 눈화되고 이로 인한 화염 상류의 영향이 작아지고 예혼합 화염면의 스트레치가 증가함으로 농도구배가 증가할 때 삼지화염의 전파 속도가 감소하는 것으로 설명될 수 있다.

둘째는 메탄 화염의 경우 프로판 화염에 비해 안정화 조건에서 부상 높이가 상대적으로 매우 작다. 메탄 화염의 경우 부상 높이가 25mm 정도를 넘으면 화염 날림이 발생하였으며, 프로판의 경우 80mm 이상까지도 화염이 안정화 될 수 있었다. 이것은 프로판 화염의 가연 농도 범위가 메탄에 비해 넓어서 화염으로 인한 화염대 상류의 유동 재편이 더 크기 때문이다.

3.4 삼지화염의 OH 라디칼 분포 특성

OH 라디칼은 반응이 가장 활발하게 일어나는 영역에서 큰 값을 가지므로 반응대를 대표하는 파라미터로서 OH 라디칼의 분포를 측정하였다. Fig. 6은 주어진 평균 유속에 대한 농도 구배에 대한 OH 라디칼 이미지이다. 농도 구배의 변화에 따른 삼지화염의 속도 변화는 위 결과와 같이 점진적으로 증가함을 확인 할 수 있다.

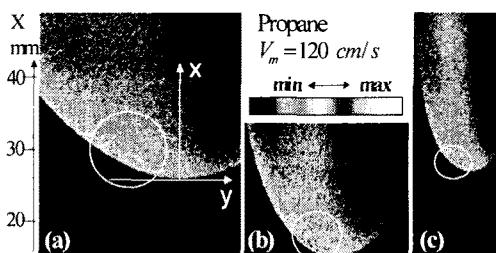


Fig. 6 OH radical distribution according to concentration gradient; (a) $\nabla Y_F=0.00196$, (b) $\nabla Y_F=0.00563$, (c) $\nabla Y_F=0.01055$

확산 화염과 예혼합 화염이 서로 만나는 삼지점에서 가장 높은 OH 라디칼 강도를 가진다(Fig. 6에 각각 표시). 이것은 삼지점에서 가장 활발한 반응이 일어나고 있음을 의미하고 있으며, 이 영

역은 거의 이론적 당량비를 가진다. 그리고 회박/파농의 예혼합 화염대를 따라 OH 라디칼의 분포를 살펴보면, 파농의 예혼합 화염대의 OH 라디칼이 회박 예혼합 화염대보다 급격하게 감소하는 특성을 보이고 있다.

제다가 삼지화염의 최저점(이후 화염 기저)과 삼지점이 일치하지 않는다는 것은 Fig. 6에서 확인 할 수 있다. 또한, OH 라디칼 분포의 y 방향으로 plot한 Fig. 7에서 OH 라디칼 강도가 가장 큰 지점이 $x=0$ 이 아닌 $x=5$ 근처에 존재하며 이것으로부터 유추할 수 있다. 기존의 많은 연구에서 화염의 기저를 삼지점과 같다고 가정을 했으나, 사실은 삼지점이 조금 더 회박 예혼합 화염쪽으로 치우쳐 있음을 알 수 있다. 이것은 충류 예혼합 화염의 전파 속도가 이론당량비보다는 약간의 과농 근처($\delta=1.05$)에서 최고값을 가지는 사실에서 설명할 수 있는데[12] 이로 인해 화염의 기저는 예혼합 화염이 가장 큰 전파 속도를 가지는 과농 근처에서 생성되고, 삼지점의 기준이 되는 확산 화염은 연료와 산화제가 확산되어 만나는 이론당량비 영역 근처에서 생기므로 두 지점은 약간 편심(offset)해서 존재하게 된다. OH 라디칼 분포를 y 방향으로 plot한 그래프인 Fig. 7로부터 화염대 직후에 가장 큰 값을 가지며 x 방향으로 높이가 증가함에 따라 라디칼 강도가 감소하며 이와 더불어 회박 예혼합 화염쪽에서 확산 화염의 라디칼 강도와 비슷한 크기의 라디칼 강도를 가지게 됨을 알 수 있다. 또한, 과농 예혼합 화염 영역보다는 회박 예혼합 화염 영역에서 OH 라디칼 강도가 세게 측정 되었다.

Fig. 8은 농도 구배에 대한 OH 라디칼 분포를 x 방향으로 plot한 그래프이다. 예혼합 화염 전후로 급격한 라디칼 강도 증가 후 점진적으로 감소함을 알 수 있다. 그리고 확산 화염($y=-4mm$ 와 $y=-1.5mm$)을 따라 화염대 후단 $x=20mm$ 근처 영역에서 작지만 또 다른 피크가 존재함을 확인 할 수 있다.

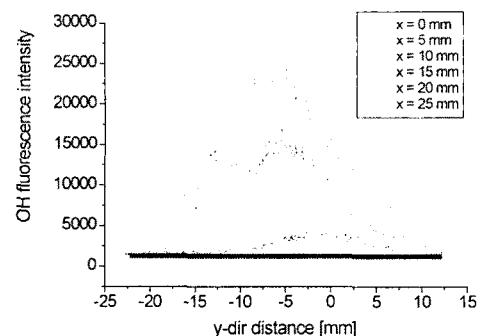


Fig. 7 OH radical distribution in y-direction; propane $V_m = 120 \text{ cm/s}$ $\nabla Y_F=0.00563$

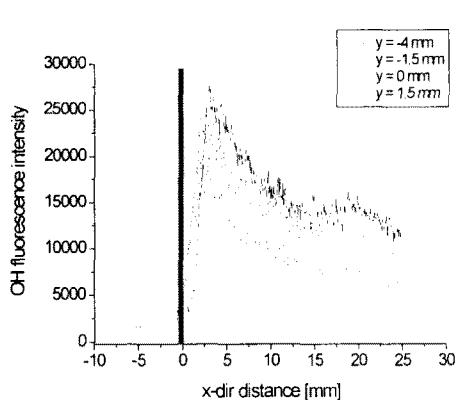


Fig. 8 OH radical distribution in x-direction; propane $V_m = 120 \text{ cm/s}$ $\nabla Y_F = 0.00563$

3.5 CARS를 이용한 화염 온도

화염 선단에서부터 화산 화염을 중심축으로 횡방향(y-direction)으로 1mm 간격으로 측정하여 이 중 최대 온도를 이 높이의 대표 온도로 정의하고, 유동방향(x-direction)으로 높이를 증가시키면서 온도의 분포를 나타낸 것이 Fig. 9 이다. 같은 높이에서 양쪽의 예혼합 화염보다는 화산 화염에서 더 높은 온도가 측정되었으며, 유동방향으로의 최고 화염 온도는 대부분 화산 화염에 존재하였다. 그리고 주어진 유속($V_m = 120 \text{ cm/s}$)에서 부상 높이가 최저점에 가까운 농도 구배 조건, $\nabla Y_F = 0.00383$ 과 $\nabla Y_F = 0.00735$ 에서는 화염대 하류에서 약간의 온도 상승 부분이 존재함을 알 수 있다. 이 온도 상승 영역은 비록 농도 구배 조건은 다르지만 OH 라디칼의 x 방향 분포에서 나타난 화염대 후단($x=20\text{mm}$)의 작은 피크 영역과 거의 일치한다. 이 구간은 화염의 곡률이 충분히 작아서 예혼합 화염의 스트레치 영향은 작으므로 온도의 감소는 매우 작다. 하지만, 예혼합 화염 후단의 화산 화염의 약간의 반응 증가에 의해 추가적인 온도 상승 구간을 일으킨다. 농도 구배에 대한 곡률의 변화로 인한 화염 상류의 유동 재편의 영향뿐만 아니라 이런 화산 화염의 반응 증가는 화염의 전파 속도를 증가 시킬 수 있다.

마지막으로 화염대 후단의 화염 온도가 단일 화염 온도(adiabatic flame temperature)보다 더 높은 온도를 가짐을 알 수 있다. 이것은 대부분 화산 화염에서 측정된 화염의 온도이기 때문에 이는 예열(preheating) 효과로 볼 수 있다.

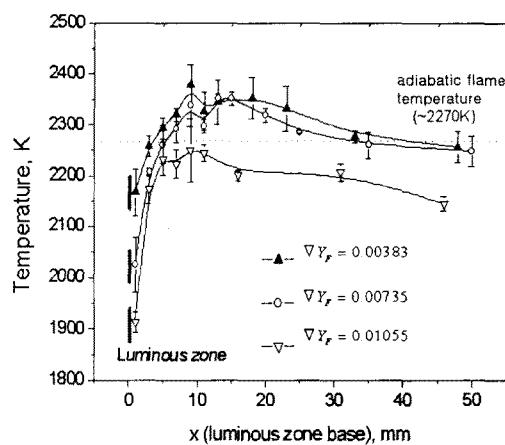


Fig. 9 Maximum temperature of triple flame; propane $V_m = 120 \text{ cm/s}$

삼지화염의 구조의 특성상 화산 화염은 희박과 과농 예혼합 화염대를 거친 미연 산화제와 미연 연료가 이론 당량비로 혼합되어 연소 반응이 일어나므로 화산 화염은 예열된 산화제와 연료의 반응으로 간주 될 수 있다. 따라서 삼지화염은 연료의 발열량뿐만 아니라 예열량이 추가됨으로 충분히 단열 화염 온도보다 더 높은 온도를 가질 수 있다.

4. 결 론

평균 유속 및 농도 구배에 따라 삼지화염의 부상높이, 형상, 축방향 속도, 그리고 OH 라디칼과 화염의 온도에 대해 실험적으로 알아보았고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째 일정한 평균유속에 대해 농도구배가 증가할 때 화염의 부상높이는 U자 형태의 곡선 궤적을 가진다. 즉, 농도구배를 증가시키면 삼지점의 부상높이는 최저점에 이를 때까지 감소하다가 이후에는 증가한다.

둘째 PIV를 이용한 streamline을 따라 축방향 속도 측정 결과 농도 구배가 증가 할수록 화염대 하류의 기연가스(burnt gas)의 축방향 속도가 감소하는 경향을 보이고 있다. 이것은 농도 구배가 증가함에 따라 화염의 곡률이 증가와 스트레치 효과의 증가로 설명 될 수 있다.

셋째 최소 삼지점을 기준으로 농도구배가 더 큰 영역에서는 농도구배의 증가가 화염전파속도를 감소시킨다. 이는 기존의 많은 연구에서와 같이 농도 구배의 증가에 대해 화염의 곡률 증가가 눈화되고 이로 인한 화염 상류의 영향이 작아지고 예혼합 화염면의 스트레치가 증가하므로 삼지화염의 전파속도가 감소한다. 그러나 농도 구배가

증가함에도 불구하고 부상 높이가 감소하는 구간은 약간의 농도 구배 증가에 대해서도 화염의 곡률이 급격히 증가하기 때문에 이로 인한 화염 상류의 유동이 큰 영향을 받게 되므로 농도 구배 증가에 대해 화염 전파 속도가 증가한다. 또한 곡률이 충분히 작을 때 예혼합 화염 후단의 확산 화염의 약간의 반응 증가에 의한 추가적인 온도 상승은 화염의 전파 속도를 증가 시킬 수 있다.

마지막으로 화염의 온도는 단열 화염 온도보다 더 높은 온도를 가짐을 알 수 있다. 이것은 확산 화염이 예혼합 화염대를 거친 예열된 미연 산화제와 미연 연료의 혼합에 의한 반응으로 예열효과로 볼 수 있다.

후기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)의 지원을 받았습니다.

참고문헌

- [1] Phillips, H., 1965, "Flame in a Buoyant Methane Layer," Tenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 1277-1283
- [2] Azzoni, R., Ratti, S., Aggarwal, S. K., and Puri, I. K., 1999, "The Structure of Triple Flames Stabilized on a Slot Burner," Combust. Flame 119, pp. 23-40
- [3] 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," Combust. Flame 124, pp. 311-325
- [4] Kioni, P. N., Rogg, B., Bray, K. N. C. and Linan, A., 1993, "Flame Spread in Laminar Mixing Layers: The Triple Flame," Combust. Flame 95, pp. 276-290
- [5] Kioni, P. N., Bray, K. N. C., Greenhalgh, D. A., and Rogg, B., 1999, "Experimental and Numerical Studies of a Triple Flame," Combust. Flame 116, pp. 192-206
- [6] Plessing, T., Terhoeven, P., Peters, N., and Mansour, M. S., 1998, "An Experimental and Numerical Study of a Laminar Triple Flame," Combust. Flame 115, pp. 335-353
- [7] Chung, S. H., and Lee, B. J., 1991, "On the Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Nonpremixed Jet," Combust. Flame 86, pp. 62-72
- [8] Lee, B. J. and Chung, S. H., 1997, "Stabilization of Lifted Tribrachial Flames in a Laminar Nonpremixed Jet," Combust. Flame 109, pp. 163-172
- [9] Ko, Y. S., and Chung, S. H., 1999, "Propagation of Unsteady Tribrachial Flames in Laminar Non-premixed Jets," Combust. Flame 118, pp. 151-163
- [10] G. R. Ruetsch, L. Verisch, and A. Linan, 1995, "Effects of Heat Release on Triple Flames," Phys. Fluids 7 (6), pp. 1447-1454
- [11] Yung-Cheng Chen, and Robert W. Bilger, 2000, "Stabilization Mechanisms of Lifted Laminar Flames in Axisymmetric Jet Flows," Combust. Flame 122, pp. 377-399
- [12] L. K. Tseng, M. A. Ismail, and G. M. Faeth, 1993, "Laminar Burning Velocities and Markstein Numbers of Hydrocarbon/Air Flames," Combust. Flame 95, pp. 410-426
- [13] 서정일, 김남일, 오광철, 신현동, 2003, "농도 구배와 평균속도가 삼지화염의 부상 특성에 미치는 영향에 관한 실험적 연구," 대한기계학회논문집 B권, 제27권 제8호, pp. 1061-1070