

고온 미소농도구배 조건에서의 에지화염 강도 변화에 관한 실험적 기초 연구

이 민 정* · 김 남 일*†

* 중앙대학교 기계공학부

Basic Experimental Study of the Edge-Flame Intensity Variation at High Temperature and with Small Fuel-Concentration Gradient

Min Jung Lee* and Nam Il Kim*†

* School of Mechanical Engineering, Chung Ang Univ.

(Received February 9, 2011 ; Revised March 21, 2011 ; Accepted March 22, 2011)

Key Words : Edge Flame(에지화염), Diffusion Flame Intensity(확산화염 강도), High Temperature Combustion(고온 연소), Fuel Concentration Gradient(연료 농도구배), Fuel Dilution(연료 희석)

초록: 본 연구에서는 고온의 미소농도구배 조건에서의 에지화염의 안정화 및 화염 강도 변화를 실험적으로 관찰하였다. 실험 연소기는 크게 혼합기가 투입되는 슬롯과 석영 채널 및 채널 내부 가열을 위한 추가적인 예혼합 연소기로 구성되어 있다. 실험의 정확성을 위해 각 경계 조건에 대한 정량적인 검증 절차가 수행되었다. 결론적으로 연료 농도 구배의 정량적인 제어와 질소 희석비율을 조절하여 고온의 조건에서도 에지화염을 임의의 위치에 안정화 시킬 수 있었다. 에지화염 내부에 존재하는 확산화염의 화염 강도가 채널 내부의 온도증가에 따라 증가하고 질소의 희석비율 증가에 따라 감소하는 것을 보였다. 연료에 따른 화염 강도 변화를 살펴본 결과 프로판의 경우가 메탄에 비해 강도 변화율이 큰 것을 알 수 있었다.

Abstract: In this study, the stabilization of an edge flame and the intensity variation of a diffusion branch were investigated using a multi-slot combustor under conditions of high temperature and small fuel-concentration gradient (FCG). The combustor consists of three narrow channels: a quartz channel and two side-heating combustors. For the accuracy of this experimental study, quantitative analysis was carried out for each boundary condition. Stable edge flames could be observed under high-temperature conditions by controlling the FCG and fuel dilution ratio. Moreover, it was found that the intensity of the diffusion flame was increased by increasing the temperature of the mixture. On the contrary, the intensity of the diffusion flame was decreased by increasing the dilution ratio. It was also found that a propane flame is more sensitively affected by these experimental parameters than a methane flame.

- 기호설명 -

x : 연소기 폭 방향
 y : 연소기 길이(유동 방향)
 z : 연소기 깊이 방향
 ϕ_{side} : 당량비(측면 연소기)

T_{in} : 채널 내부 온도
 $\nabla\phi_{y=0}$: 연료 농도 구배(FCG)
 $V_{m,in}$: 입구 평균 유속
 $N_{2,dil}$: 희석 질소 비율
 I_p : 예혼합화염 강도
 I_d : 확산화염 강도
 P_0 : 대기압
 P_m : 채널 내부 압력

† Corresponding Author, nikim@cau.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서론

에지 화염은 연료와 공기의 혼합층 내부에 형성된 화염의 선단구조를 총칭하여 나타낸 것으로서, 특징적으로 예혼합화염과 확산화염 구조를 동시에 지니고 있다. 이러한 에지 화염의 연구는 삼지화염의 발견에서 기인하고 있으며,⁽¹⁾ 이후 많은 연구자들에 의해 삼지 화염을 포함하는 포괄적인 의미에서의 에지화염이 새롭게 정의되었다.⁽²⁾ 이러한 에지화염 이론은 층류 부분 예혼합화염에서의 화염 전파특성 및 부상 특성을 설명하는 중요한 수단으로 사용되었다. 뿐만 아니라 난류 확산화염에서의 화염 소화 및 재점화 과정에서도 에지화염이 관찰되어 광범위한 영역에서 화염 해석을 위해 중요하게 인식되어 왔다.⁽³⁾

지금까지 에지화염에 관한 대부분의 연구는 화염 전파속도와 연료 농도구배 간의 상관관계를 도출하는데 집중되었다. 이와 관련하여 다양한 형태로 설계된 연소기를 이용하여 실험적으로 접근하거나 이론적인 접근이 수행된 바 있다.⁽⁴⁻⁷⁾ 또한 Aggarwal, Puri 등⁽⁸⁾에 의해 수치해석적인 접근이 다수 수행되었는데, 특히 Matalon 등⁽⁹⁾은 연료와 산화제가 독립적으로 투입되는 불연속적인 입구 경계로부터 발달해가는 경계층에 형성된 화염이 경계 조건에 의해 영향을 받음을 보고한 바 있다.

최근에는 마이크로 연소기와 관련하여 좁은 채널 내부에서의 에지화염 거동 특성을 살펴보고자 하는 연구가 진행되고 있다. Miesse 등⁽¹⁰⁾은 마이크로 연소기 내부에 다수의 에지화염이 발생하는 현상을 발견하였고, Xu 등⁽¹¹⁾은 고온 채널을 이용하여 혼합층 내부에 다수의 에지화염이 존재할 수 있음을 밝혔다. 또한 Lee 등⁽¹²⁾은 부상화염 높이와 농도장 측정을 통해 좁은 채널 내부에서의 화염 안정화를 기존의 에지화염 연구의 연장으로 설명할 수 있음을 보였고 좁은 채널 내부에서의 혼합 증대효과에 의한 차이를 설명하였다.

한편, 연소기가 소형화되면 내부 화염으로부터의 열손실이 증대되어 상대적으로 소염현상이 쉽게 나타날 수 있는데 이러한 상황에서 화염 거동을 살펴보고자 하는 연구가 이어지고 있다. 본 연구 그룹에서는 열손실의 인위적인 제어를 통해 에지 화염의 거동 특성을 꾸준히 연구하고 있다. Lee 등⁽¹³⁾은 외부 열원을 이용하여 고온 조건에서의 화염 안정화 및 구조관찰을 통해 소염 한계 조건에서 'flame-drop'이라는 단쳐 있는 형태의 에지화염의 존재 가능성을 보고한 바 있다. 또한 Cho 등⁽¹⁴⁾은 질

소회석 및 석영 채널의 두께 변화를 통해 열손실 증가에 따라 확산화염 강도가 감소함을 정성적으로 살펴본 바 있다. 결국 열손실에 의한 화염 구조 천이 현상을 살펴보는 것은 아주 짧은 시간에 종료되는 화염의 소염 과정을 이해하는데 큰 도움이 될 수 있다. 하지만 에지화염의 소염과정을 실험적으로 구현하는데 있어 다양한 경계 조건의 제어에 어려움이 존재하기 때문에 관련연구는 현저히 부족한 실정이다.

본 연구에서는 기존 연구보다 엄밀하게 경계조건을 제어할 수 있는 개선된 연소기를 제작하였다. 또한 열손실에 따른 에지화염 구조변화의 연장선상에서 고온조건에서의 에지화염 안정화 및 구조변화를 살펴보고자 한다. 이러한 실험의 정확성을 위해 연소기의 검증절차가 수행되었으며, 경계조건에 해당하는 농도구배, 온도 및 속도에 관해 정량적인 자료를 구체적으로 제시하고자 한다. 이를 통해 낮은 농도구배 조건에 형성된 에지화염에 추가적인 열 투입을 통한 확산화염의 생성 및 구조변화에 대한 기초 실험 결과를 제시하고자 한다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

본 연구를 위해 제작된 연소기와 실험 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 연소기는 Fig. 1(a)과 같이 관찰 대상 화염이 형성되는 중앙 채널(main channel)과 중앙 채널에 추가적인 열을 공급 측면 연소기(side combustor)로 이루어져 있다. Fig. 1(b)에 유량

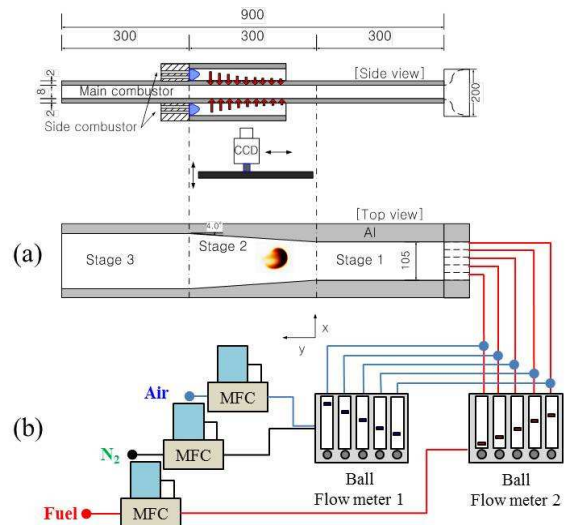
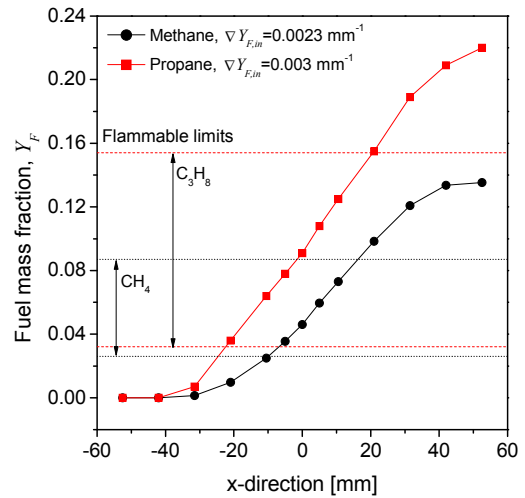


Fig. 1 Configuration of the experimental combustor and setup (a) schematics of the combustor, (b) flow control system

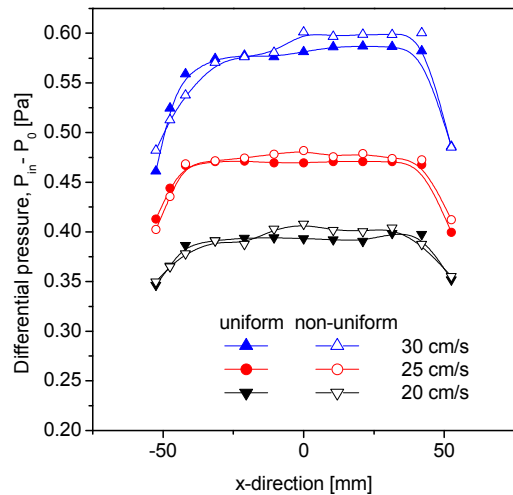
제어 방법을 도식적으로 나타내었다. 공급되는 공기 및 연료의 각각의 유량 조절을 위해 습식 및 건식 가스 미터로 보정된 MFC 를 사용하였으며, 연료 측과 공기 측 각각 5 개씩의 불유량계(ball flow meter)를 추가로 설치하여 전체 유량을 유지하면서 농도 및 속도 구배의 입구조건을 제어할 수 있도록 구성되었다. 또한 채널 내부의 농도, 속도 및 온도 측정을 위해 추가적인 장치를 설치하였다.

연소기는 총 길이 90 cm 의 채널을 가지며, 3 단 (3-stages)으로 구성되어 있다. 1 단부는 서로 다른 농도와 속도를 가지는 예혼합기를 적절히 혼합하여 일정하고 재현성 있는 유속 및 농도구배를 확보하는 목적을 가진다. 효율적인 실험을 위해 본 연구에서는 1 단부의 입구에 위치한 다섯 개의 슬롯을 이용하여 농도와 속도를 제어하게 된다. 1 단부 입구의 다섯 개의 슬롯에서는 각각 다른 당량비와 속도를 가지게 되는데 이러한 조건에서 입구에서의 농도 및 속도는 채널의 폭 방향으로 계단 형태의 분포를 가지게 될 것이다. 하지만 충분한 길이의 1 단부의 공간을 지나면서 농도 및 운동량 확산에 의해 실험이 이루어지는 2 단부의 입구에서 선형적인 농도 분포와 균일한 속도분포를 형성하게 된다.

이를 검증하기 위해 채널 내부의 농도와 압력 분포를 측정하여 Fig. 2 에 나타내었다. 농도 및 압력 측정을 위해 가스 크로마토그래피(ACME 6100, Younglin)와 미소 차압계(FCO 352, Furness)가 사용되었으며, 유동 교란을 최소화하기 위해 미세 노즐($d=0.32$ mm)이 사용하였다. 메탄과 프로판에 대해 2 단부의 입구조건에서의 연료 농도를 Fig. 2(a)에 나타내었다. 두 연료 모두 가연한계 범위 내에서 선형적인 농도 분포를 가짐을 알 수 있다. 추가적으로 Fig. 2(b)를 통해 입구 속도별 채널 내외부의 압력 차이를 나타내었다. 채널 내부에서는 채널 벽면에서의 마찰로 인해 채널의 간격 방향으로 포물선 속도 분포를 가지게 되므로 채널 간격의 중앙에 해당하는 평면에서 최대 속도를 가지게 된다. 채널 내부에서 폭방향(x -방향) 속도 분포의 균일도 측정을 위해서는 압력 측정 노즐을 채널의 간격 방향(z -방향)으로 미세하게 움직이면서 최대 압력을 취득하여 비교하였다. 다섯 개의 슬롯에 균일한 유량을 투입한 경우와 오른쪽 두 개의 슬롯에서 유량을 증가시킨 경우를 비교하였다. 오른쪽 두 개 슬롯에서는 각각 9% 정도의 유량을 증가시켰으며, 나머지 세 개의 슬롯에서는 6%씩



(a) Fuel concentration



(b) Pressure

Fig. 2 Fuel and pressure distribution

유량을 감소시켜서 전체 유량을 유지한 조건이다. 두 조건의 압력 변화는 3 % 미만으로 적은 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 주 연소기의 1 단계에서 질량 확산 및 운동량 확산이 충분히 발생되고 있음을 알 수 있어서 이후에는 입구 슬롯의 유량 조건에 무관하게 균일한 유속 분포를 가정하기로 한다. 이와 같이 농도 분포와 유속이 충분히 발달한 조건에서는 화염이 발생하는 시험 영역에서 연소기의 입구 경계 조건에서의 불연속성의 직접적인 영향을 배제할 수 있다.

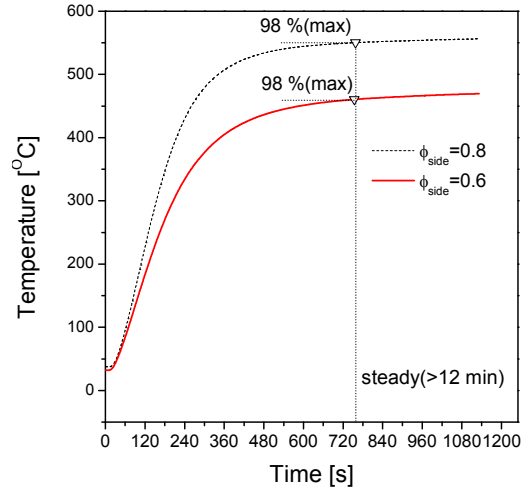
한편, 연소기의 2 단부는 채널의 폭 방향으로 각각 4 도의 경사를 가지고 확장된 좁은 채널로써 화염이 안정화되는 실험의 주된 대상 영역이다. 확장채널 내부에서의 농도 및 속도 변화와 그 효

과는 이전연구에서 논의된 바가 있다.⁽¹⁵⁾ 주 연소기의 입구에서 이미 선형화된 농도 분포는 채널의 하류방향으로 이동함에 따라 추가적인 농도장의 변화는 크지 않다. 다만 채널의 폭이 증가함에 따라 공간 스케일의 증가로 인해 농도구배의 감소가 발생하게 되는데, 본 연구는 화염 선단의 국부적인 농도 및 유속에 의해 지배되는 화염 전파 특성보다 화염 강도의 변화에 주목하고 있으므로 농도구배는 2 단부의 입구(y=0)에서 측정된 값을 사용하기로 한다. 평균유속은 채널의 하류 방향으로 서서히 감소하게 되므로 화염 전파속도와 유속이 일치하는 지점에 화염이 안정화 될 수 있다. 그런데, 일반적으로 고온 조건에서는 화염전파속도가 증가하게 되므로 충분히 빠른 평균 유속이 필요하게 된다. 본 연구에서는 가연한계 근처에서의 층류 에지화염의 구조 변화에 관심을 가지고 질소 희석을 통해 화염의 전파속도를 감소시킨 조건에서 온도 변화에 따른 화염의 강도 변화를 살펴보았다. 여기서 질소 희석은 공기 쪽에 한해서 이루어졌으며, 희석 비율은 전체 연료와 추가 투입된 질소 유량의 합에 대한 질소의 부피 비율을 의미한다.

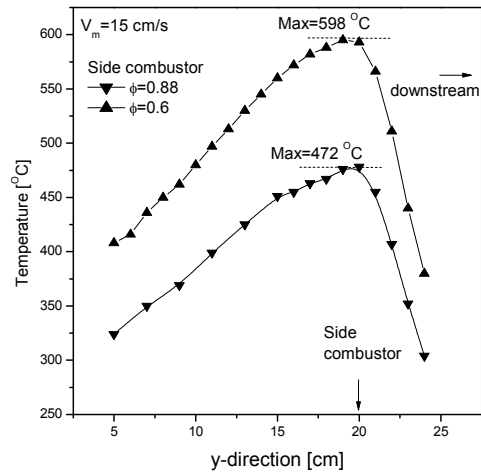
연소기의 3 단부 영역은 출구의 위치를 연소공간으로부터 충분한 거리에 둬므로써 하류 영역 외기의 유입을 방지하고 출구 쪽 경계 조건이 연소영역에 미치는 효과를 최소화하는 역할을 담당한다.

연소공간에 추가적인 열 공급을 위해 측면 연소기를 설치하였으며, 이를 구분하기 위해 화염 안정화가 이루어지는 실험 대상 공간을 주연소기라 칭하기로 하자. 측면 연소기는 수평으로 설치된 주연소기의 상하부 양면에 설치된다. 측면 연소기에 사용된 연료는 메탄이며, 발생하는 고온의 연소 가스는 열전달을 통해 주연소기 내부온도를 상승 시키게 된다. 측면 연소기는 주연소기와 역방향으로 고온 가스가 흐르도록 설치하여 실험이 이루어지는 연소 공간 내부에서 하류 방향으로 온도가 증가하도록 설치하였다. 이는 연소공간 내에 형성된 화염이 하류로 이동하면 보다 높은 온도 조건에 위치하게 되어 전파속도가 증가하게 되므로 화염의 열적 안정화가 유리하기 때문이다.

측면 연소기는 역화 방지를 위해 각각 채널 간격 1.5 mm 인 2 개의 슬롯으로 구성되어 있으며, 예혼합기의 당량비(ϕ_{side}) 조절을 통하여 채널 내부의 온도를 변화시켰다. 주연소기의 내부 온도 측정을 위해 K-type TC(0.5 mm)를 이용하였으며 최초로 측면 연소기에 접화가 된 시점부터 시간에 따



(a)



(b)

Fig. 3 Temperature variation (a) with time and (b) in stream-wise location

른 채널 내부온도 변화를 Fig. 3(a)에 나타내었다. 그 결과 측면 연소기의 당량비 변화에 따라 최대 온도는 증가하였으나 최대온도를 기준으로 98%에 해당하는 지점까지 상승하는데 12 분정도 소요되는 것을 알 수 있었다. 따라서 측면 연소기에 점화를 하고 12 분 이상의 충분한 시간이 경과한 후 실험을 실시하였다.

이처럼 정상상태에 이른 조건에서 채널 내부의 온도 분포를 측정하여 Fig. 3(b)에 나타내었다. 하류로 이동 할수록 채널 내부의 온도는 상승하고, 측면 연소기의 화염이 존재하는 영역에서 최대 온도를 나타내는 것을 알 수 있다. 따라서 화염의 안정화 위치에 따라 온도를 예측할 수 있으며, 화염 위치 변동을 1 cm 미만으로 제어하면, 온도차이를 최대 20 °C 정도로 제한할 수 있다.

본 연구에 사용된 실험 변수인 질소 회석량 및 평균 유속 등을 Table 1 에 나타내었다. 측면 연소기의 당량비(ϕ_{side}) 조절을 통해 주연소기 내부의 온도를 325 °C 에서 605 °C 범위에서 조절하였으며, 채널 내부의 농도구배는 완전 예혼합 조건에서 최대 0.02/mm 의 질량 분율 구배를 가진다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 온도 증가에 따른 에지화염 변화

상온 조건에서 외부에서 점화된 화염은 채널 내부의 평균 유속 및 질소 회석 비율에 따라 다중슬롯 내부로 역화 되거나 임의의 지점에 안정화된다. 이러한 조건에서 측면 연소기에 점화를 시키게 되면, 채널 내부 온도는 상승하게 되어 에지화염의 전파속도를 상승시켜 화염이 보다 상류로 이동하게 된다. 온도 증가에 따라 화염이 전파하는 과정에서는 비정상(unsteady) 효과를 포함하고 있으므로 앞서 살펴본 Fig. 3(a)의 결과를 활용하여 충분한 시간을 두고 실험을 실시하였다.

결론적으로 평균 유속과 질소 회석 비율을 조절

하여 2 단부 영역에 화염을 안정화 시킬 수 있었다. 이렇게 안정화된 화염을 기준으로 온도 증가와 질소 회석율의 증가에 따른 에지화염의 천이과정을 살펴보고, 프로판 연료에 대한 직접사진 이미지와 밝기를 반전시킨 이미지를 Fig. 4 에 나타내었다. 온도 증가에 따라 에지화염 강도는 증가하였으며, 특히 확산화염의 경우 온도의 증가에 따라 화염 강도가 증가함을 명확하게 알 수 있다.

이러한 확산화염의 강도변화를 보다 정량적으로 살펴보기 위하여 상용프로그램인 Matlab 7.8.0 을 이용하여, 강도 분석을 실시 하였다. CCD 로부터 획득된 사진은 적색, 녹색, 청색(R, G, B)의 신호를 가지게 되며, 이중 가장 지배적인 B 값을 비교하였다. 모든 사진은 동일한 설정으로 촬영되었으며, 화염 강도가 포화(saturation)되지 않는 범위 내에서 최대한 노출을 주었다. 본 연구에서는 확산화염의 강도 변화에 관심이 있지만 전체적인 화염 강도 분포를 확인하기 위해 프로판에 대해 상온에서의 에지화염의 화염 강도를 높이에 따라 비교한 결과가 Fig. 5 이다. 에지화염의 높이 별 평균 강도는 유동 방향 하류로 이동할 수록 낮아진다. 그런데 확산화염 위치에 해당하는 중간 부분에 추가적인 신호 증가를 확인할 수 있다. 상온 조건의 직접사진에서는 확인하기 어려웠던 확산화염의 존재를 이러한 영상신호를 통해 명확히 구분할 수 있음을 알 수 있다.

따라서 온도 변화에 따른 확산화염의 밝기 변화

Table 1 Experimental parameter and range

Experimental Parameters		ϕ_{side} (T_{in}) [°C]	$\nabla Y_{F,in}$ [mm ⁻¹]	$N_{2,dil}$ [%]	$V_{m,in}$ [cm/s]
Range	Min	0.6 (325)	0	88	10
	Max	0.9 (605)	0.02	94	30

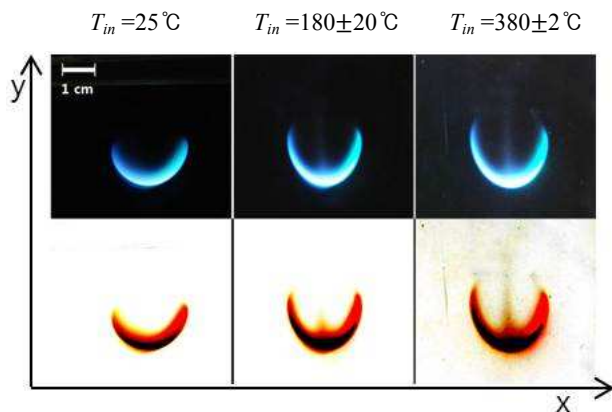


Fig. 4 Direct and reversed images of edge flame for variation with temperature (propane, $V_{m,in}$ = 18 cm/s, $\nabla Y_{F,in}$ = 0.003mm⁻¹, $N_{2,dil}$ = 88 %)

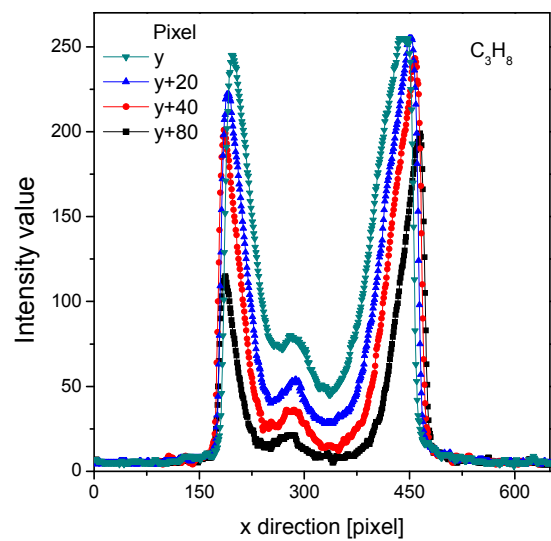


Fig. 5 Intensity distribution for propane edge flame at T_{in} = 25 °C ($V_{m,in}$ = 18 cm/s, $\nabla Y_{F,in}$ = 0.003mm⁻¹, $N_{2,dil}$ = 88 %)

를 Fig. 6 에서 비교하였다. 상대적인 강도비교를 위해 화염 선단을 기준으로 일정 높이에서의 강도값을 기준으로 하였다. 메탄과 프로판의 경우 모두 온도 증가에 따라 확산화염의 강도가 높아짐을 알 수 있다. 일반적으로 예지화염에서 확산화염은 희박 예혼합화염에서의 잔여 산화제와 과농 예혼합 화염에서의 잔여 연료가 서로 반응하여 생성된다. 따라서 확산화염의 생성 및 강도는 연료 농도 구배에 따라 달라지는 산화제와 연료의 질량분율 뿐만 아니라 예혼합화염 후단의 온도 분위기에 따라 달라지게 될 것이다. 다시 말해서 동일 농도구배 조건에서 온도 증가에 따른 확산화염의 생성은

예혼합화염과 삼지화염의 구조가 농도구배에 의해서만 지배되는 것이 아니라 온도 환경에 따라 급격히 변화할 수 있음을 실험적으로 보여주는 결과이다. 이러한 결과는 기존의 실험 연구⁽¹⁴⁾에서 채널 간격 감소를 통한 간접적인 열손실 증가에 따른 확산화염의 소멸이라는 결과와도 동일한 맥락에서 이해될 수 있다. 기존 결과와 비교할 때 본 연구에서는 동일한 채널 조건에서 직접적이고 인위적인 가열을 통해서 확산화염의 생성을 유도하였다는 점에서 예혼합화염과 예지화염의 천이에 대한 보다 의미 있는 실험 결과로 판단된다.

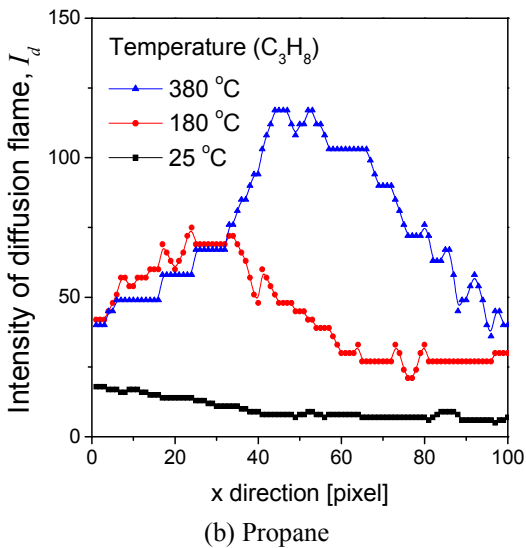
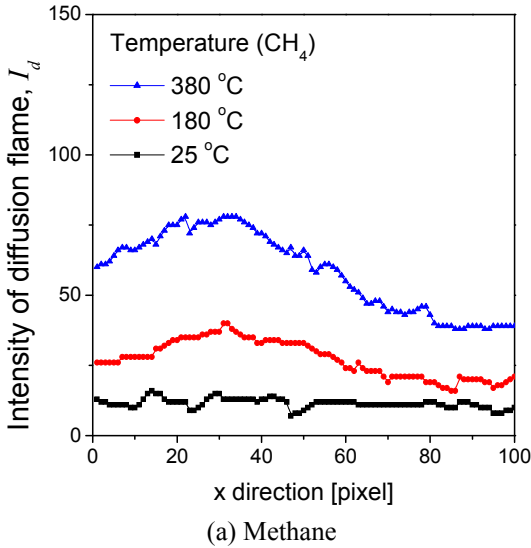


Fig. 6 Intensity variation of diffusion flame by temperature change for (a) methane ($V_{m,in} = 18 \text{ cm/s}$, $\nabla Y_{F,in} = 0.0023 \text{ mm}^{-1}$, $N_{2,dil} = 88 \%$) (b) propane ($V_{m,in} = 18 \text{ cm/s}$, $\nabla Y_{F,in} = 0.003 \text{ mm}^{-1}$, $N_{2,dil} = 88 \%$)

3.2 질소 희석에 따른 화염 변화

다음으로 고온의 채널에 안정화된 화염을 질소 희석율을 증가 시켜 확산화염의 강도변화를 살펴 보았다. 이때, 화염의 위치를 동일하게 유지시키기 위하여 질소 희석율에 따라 평균 유속을 감소시켜 가며 실험을 하였다. 질소 희석에 대한 전파속도 감소율이 평균 유속 감소에 의한 효과보다 크게 나타나서 화염의 위치는 2 cm 내외의 오차를 가질 수 있는데, 이러한 공간 차이는 Fig. 3(b)에 보인 바와 같이 20~30 °C 정도의 온도 차에 해당하므로 전체 가열 온도에 비해서는 상대적으로 작다. 고온 조건에서 메탄의 질소 희석에 따른 화염의 형상 변화를 Fig. 7 에 나타내었다.

그림에서 알 수 있듯이 질소 희석율의 증가에 따라 화염 강도는 감소하며, 화염의 크기도 작아지는 것을 알 수 있다. 그런데 메탄 질소 희석의 경우에는 확산화염의 감소는 명확히 드러나지 않았다. 확산화염의 강도는 기본적으로 농도구배에 의해 발생하는 연료와 산화제의 확산 정도에 의해

$$N_{2,dil} = 88 \% \quad N_{2,dil} = 90 \% \quad N_{2,dil} = 94 \%$$

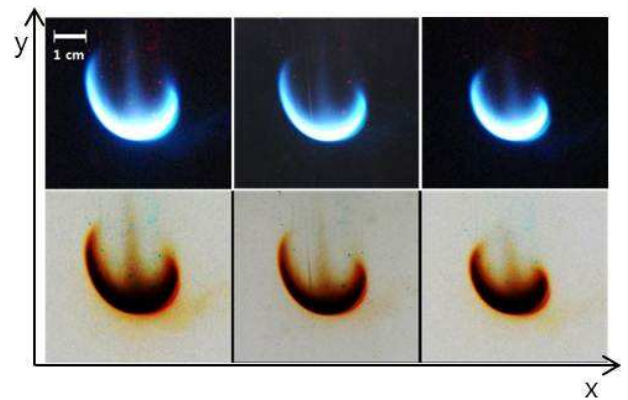
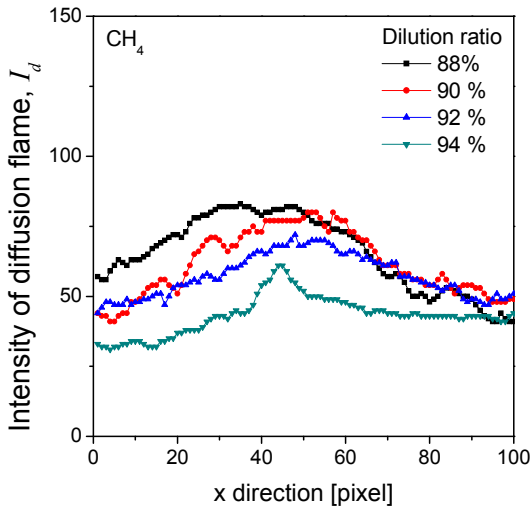
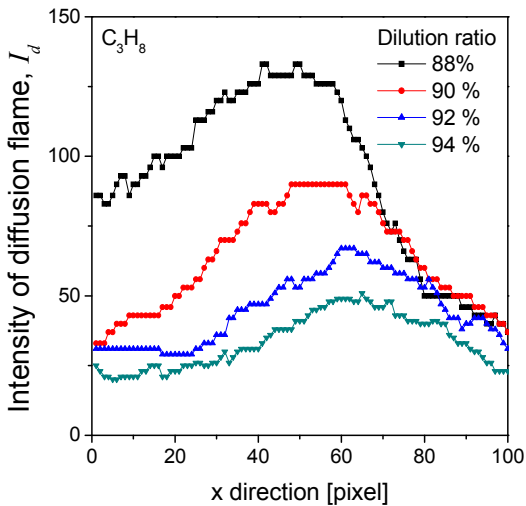


Fig. 7 Direct and reversed images of edge flame for variation with temperature and dilution ratio (methane, $T_{in} = 430 \text{ °C}$, $\nabla Y_{F,in} = 0.0023 \text{ mm}^{-1}$)



(a) Methane



(b) Propane

Fig. 8 Intensity variation of diffusion flame by dilution ratio change for (a) methane ($V_{m,in}=18$ cm/s, $\nabla Y_{F,in}=0.0023\text{mm}^{-1}$, $T_{in}=430^\circ\text{C}$) (b) propane ($V_{m,in}=18$ cm/s, $\nabla Y_{F,in}=0.003\text{mm}^{-1}$, $T_{in}=430^\circ\text{C}$)

지배되는데, 동일한 농도구배 조건에서 질소의 희석은 직접적인 영향이 적기 때문으로 생각된다. 질소의 희석은 결국 예혼합 화염의 온도 및 전파속도를 감소시켜서 물질의 확산 속도를 일부 감소시킬 수 있을 것이다. 하지만 이러한 예혼합 화염의 전파속도 감소는 예혼합화염 후류의 잉여 산화제와 연료가 일정 공간에 체류하는 시간의 증대를 의미하므로 상대적으로 확산되는 질량을 증대시키는 역효과를 기대할 수 있어서 확산화염의 강도 감소를 일부 상쇄할 수 있을 것으로 기대된다.

확산화염의 강도 변화를 상대적으로 비교한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 앞서 언급한 바와 같이 메탄의 경우에는 확산화염의 강도 변화가 명확하게 두드러지

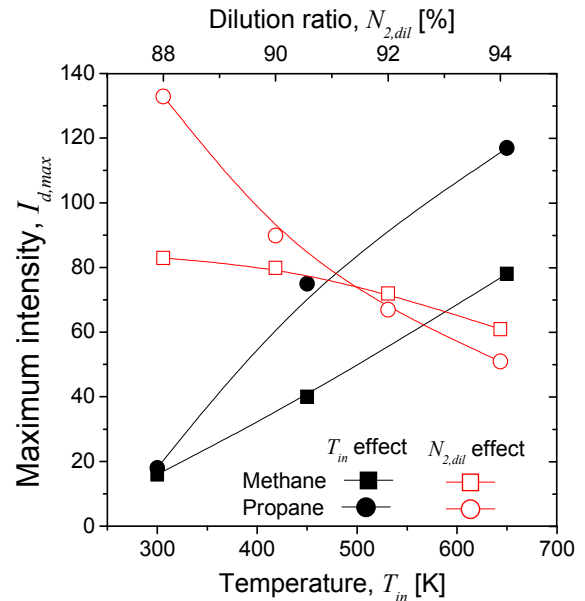


Fig. 9 Maximum intensity variation of diffusion flame with temperature and dilution ratio

지 않는 반면 프로판의 경우 확산화염에 해당하는 강도의 변화가 상대적으로 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 여기서 확산화염의 두께를 정량적으로 제시한 않았으므로 그 경계를 정확하게 구분할 수 없지만 감소율을 비교하였을 때 연료과농 조건에 해당하는 우측보다 연료희박에 해당하는 좌측에서 그 변화가 큰 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 프로판이 가지는 비대칭적인 열-확산 및 물질 전달특성(Le 수)에 기인하는 것으로 판단되며, 상대적으로 1보다 큰 Le 값을 가지게 되는 희박 조건에서는 열확산이 물질 전달보다 크게 발생하여 질소 희석에 따라 보다 민감하게 반응하는 것으로 생각된다.

두 연료에 대해 온도 및 질소희석비율의 효과를 정성적으로 살펴보기 위해 각 조건에서의 최대 화염 강도를 획득하여 Fig. 9에 나타내었다. 상온 조건에서는 메탄과 프로판의 확산화염 강도가 유사한 조건을 비교하였다. 그 결과 온도 증가와 질소 희석 모두에 대해 프로판의 경우가 메탄에 비해 상대적으로 크게 변화하는 것을 확인할 수 있었으며, 메탄의 경우 질소 희석의 영향은 온도 상승에 비해 매우 적음을 확인하였다. 이러한 차이에 대한 보다 구체적인 원인 규명은 확산화염에서의 반응을 지배하는 CO, H₂, O₂의 공간 분포와 반응 메커니즘에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

4. 결론

본 연구에서는 고온, 미소 농도구배 조건에서

연소환경의 경계조건을 보다 엄밀하게 제어할 수 있는 연소기를 제안하고 균일 속도 및 선형적인 농도 분포를 확인하였다. 이러한 연소기를 통해 외부 유동에 의한 교란 방지, 입구 경계조건에 의한 영향을 배제할 수 있었으며 고온조건에서의 예지화염 안정화 및 구조변화를 살펴보았다.

메탄과 프로판의 경우 모두 온도 증가에 따라 확산화염의 강도가 확연히 증가함을 알 수 있었다. 특히 프로판의 확산화염 강도는 온도 증가에 따라 메탄에 비해 두드러지게 증가하였다.

또한 질소 희석 비율의 증가에 따라 확산화염의 강도가 낮아지는데, 메탄의 경우 그 변화가 작음에 반해 프로판의 경우 감소율이 큰 것을 확인하였다.

이러한 결과는 예지화염 구조가 예혼합화염과 확산화염의 천이 과정에 해당한다는 기존의 연구 결과를 심화한 것으로, 예지화염으로부터 예혼합화염으로의 구조 천이의 핵심이 되는 확산화염의 생성과 소멸에 대한 보다 명확한 실험적 결과로서 의미가 크다. 특히 기존의 미소 농도구배에서 일부 확인된 확산화염의 소멸에 관한 실험적 증거를 고온 환경 및 희석 조건으로 확대하여 보다 직접적인 실험적 증거를 제시하였다는 데에 의미가 있으며, 화염 구조 천이에 대한 학술적 이해의 기초가 될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부 한국연구재단 지원 2010 년 기초연구사업인 “화염 구조의 기원으로서의 Flame drop 의 특성” 과제의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Phillips, H., 1965, "Flame in a Buoyant Methane Layer," *Symposium (International) on Combustion* Vol. 10, No.1, pp. 1277~1283.
- (2) Buckmaster, J., 2002, "Edge-Flames," *Progress in Energy and Combustion Science* Vol. 28, No.5, pp. 435~475.
- (3) Chung, S. H., 2007, "Stabilization, Propagation and Instability of Tribraichial Triple Flames," *Proceedings of the Combustion Institute* Vol. 31, No.1, pp. 877~892.
- (4) Dold, J. W., 1989, "Flame Propagation in a Nonuniform Mixture: Analysis of a Slowly Varying Triple Flame," *Combustion and Flame* Vol. 76, No.1, pp. 71~88.
- (5) Ruetsch, G. R., Vervisch, L. and Linan, A., 1995, "Effects of Heat Release on Triple Flames," *Physics of Fluids* Vol. 7, No.6, pp. 1447~1454.
- (6) Kioni, P. N., Rogg, B. and Bray, K. N. C., 1993, "Flame Spread in Laminar Mixing Layers: The Triple Flame," *Combustion and Flame* Vol. 95, No.3, pp. 276~290.
- (7) Kim, N. I., Seo, J. I., Oh, K. C. and Shin, H. D., 2005, "Lift-off Characteristics of Triple Flame with Concentration Gradient," *Proceedings of the Combustion Institute* Vol. 30, No.1, pp. 367~374.
- (8) Aggarwal, S. K., 2009, "Extinction of Laminar Partially Premixed Flames," *Progress in Energy and Combustion Science* Vol. 35, No.6, pp. 528~570.
- (9) Kurdyumov, V. N. and Matalon, M., 2007, "Dynamics of an Edge-Flame in the Corner Region of Two Mutually Perpendicular Streams," *Proceedings of the Combustion Institute* Vol. 31, No.1, pp. 929~938.
- (10) Miesse, C., Masel, R. I., Short, M. and Shannon, M. A., 2005, "Diffusion Flame Instabilities in a 0.75mm Non-Premixed Microburner," *Proceedings of the Combustion Institute* Vol. 30, No.2, pp. 2499~2507.
- (11) Xu, B. and Ju, Y., 2009, "Studies on Non-Premixed Flame Streets in a Mesoscale Channel," *Proceedings of the Combustion Institute* Vol. 32, No.1, pp. 1375~1382.
- (12) Lee, M. J. and Kim, N. I., 2010, "The Stabilization of a Methane-Air Edge Flame Within a Mixing Layer in a Narrow Channel," *Combustion and Flame* Vol. 157, No.1, pp. 201~203.
- (13) Lee, M. J. and Kim, N. I., 2010, "Experimental Study on the Edge Flame Stabilization and Its Structure Nearby Quenching Limits in a High Temperature Channel," *Journal of The Korean Society of Combustion* Vol. 15, No.3, pp. 1~7.
- (14) Cho, S. M., Lee, M. J. and Kim, N. I., 2010, "Experimental Study on Tribraichial Flames in Narrow Channels with Small Fuel Concentration Gradients," *Experimental Thermal and Fluid Science* Vol. 34, No.8, pp. 1432~1438.
- (15) Kim, N. I., Seo, J. I., Guahk, Y. T. and Shin, H. D., 2006, "The Propagation of Tribraichial Flames in a Confined Channel," *Combustion and Flame* Vol. 146, No.1-2, pp. 168~179.