

고온 채널 내부 에지화염의 소염 한계 영역에서의 화염 안정화 및 구조에 관한 실험적 연구

이민정* · 김남일**

Experimental Study on the Edge Flame Stabilization and its Structure Nearby Quenching Limits in a High Temperature Channel

Min Jung Lee and Nam Il Kim

ABSTRACT

Edge flames have been interested as a basic structure that is concerned to flame stabilization and re-ignition of non-premixed flames. The edge flame consists of a lean premixed flame, a rich premixed flame, and a diffusion flame. In order to investigate fundamental structures of the edge flames at the conditions near the flammability limits, edge flames were stabilized within a heated narrow channel. Highly diluted partially premixed methane was used, and the flow rates of air and the partially premixed mixture were controlled. Various flame behaviors, including a transition between ordinary edge flames and premixed flames, were observed. Flame stabilization characteristics were examined as well. All flame stabilization conditions in this study showed a similar trend: characteristic time scales were inversely proportional to the equivalence ratio defined at the burner inlet. Finally, an interesting flame structure having a weak diffusion branch enveloped by a closed premixed branch was found near the flammability limits even in a fuel-air mixing layer. This structure was named as a “flame-drop” and the importance of this structure was first suggested.

Key Words : Edge flame, Mixing layer, Flame-drop, High temperature, Edge flame quenching

기 호 설 명

Alphabets		y : y -direction
h : lifted flame height		x : x -direction
V_m : mean velocity		
V_{flame} : propagation flame velocity		Greek Symbols
T_{in} : inside channel temperature		δ : mixing layer thickness
∇Y_f : fuel concentration gradient		ϕ : equivalence ratio
$S_{L st}^o$: laminar burning velocity		τ : characteristic time

1. 서론

일반적으로 화염과 단순 화학반응은 자체적이고 지속적인 반응 유무에 따라 구분되며, 그 경계에 연소공학에서 다루는 소염 현상이 존재한다. 화염은 연료와 산화제의 혼합여부에 따라 예혼합화염과 확산화염(혹은 비예혼합화염)으로 구분하고 각각에 대해 별도의 접근법을 통해 해석되어 왔다. 하지만 화

산화염에서 관찰되는 부상 특성 및 혼합경계층 내부에 형성된 확산화염의 전파 특성을 이해함에 있어 예혼합화염과 확산화염의 특성이 공존하는 조건이 중요하게 인식되었으며, 그 대표적인 경우가 1965년 Phillips[1]에 의해 처음으로 발견된 삼지화염을 비롯한 에지화염에 해당된다. 이러한 에지화염은 연료와 공기의 혼합 경계층에 형성되어 예혼합화염과 확산화염의 구조를 동시에 가지고 있어, 학문적으로 화염의 선단에서 발생하는 층류 화염의 안정화와 난류화염의 혼합층에 생성되는 화염전파 및 재점화에 대한 해석을 위한 기초 연구로서 중요한 물리

* 중앙대학교 기계공학부 대학원

** 중앙대학교 기계공학부

† 연락처자, nikim@cau.ac.kr

적 의미를 가지게 되었다[2,3].

지난 20여년 동안 삼지화염을 포함하는 에지화염에 대한 이론 및 수치 연구는 Dold, Buckmaster, Kurdyumov[3-5] 등에 의해 다수 이루어 졌으며, 실험적으로 Kioni, Azzoni, Kim 등에 의해 농도구배의 제어를 통한 에지화염 구조에 대한 연구가 진행된 바 있다[6-8]. 이러한 연구를 통해 에지화염은 화염 선단의 국부적인 연료농도 구배와 화염 곡률에 따른 전파 속도의 변화를 가지게 되며, 그 전파속도의 크기가 연료 농도 구배의 증가에 따라 감소하고, 이론 당량비의 층류 예혼합 화염의 연소 속도의 크기보다 훨씬 높다는 것을 알 수 있었다. 이러한 현상을 설명하기 위해서 Ruetsch 등은 열방출 모델을 적용하여 상류 방향으로 불룩한 화염의 선단에서 발생한 유동 재편 현상이 입구 유속으로 정의 되는 화염 전파 속도의 크기를 증가 시킨다고 설명한 바 있다[9].

최근에는 소형 발전 및 추진 시스템의 개발과 더불어 소형 연소기 내부의 에지화염 거동 특성에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[10,11]. 소형 연소기 내부의 화염은 단위 체적당 표면적 비의 증가에 의해 심각한 열손실을 겪게 되므로, 대부분의 소형 연소기 개발의 목표는 이러한 열손실에 의한 소음을 극복하는 데 있다[12]. 이러한 소형 연소기의 개발과 더불어 좁은 채널 내부에서의 에지화염 거동 특성에 관한 연구도 활발히 수행되었는데, Lee 등은 좁은 채널 내부의 혼합 경계층에 형성된 에지화염의 부상화염 높이를 이용하여 혼합 증대 효과를 고려한 이론적 접근을 수행하였다[13]. 또한, Miesse 등은 0.75 mm의 채널 간격을 가지는 연소기 내부의 화염 불안정성에 대해 살펴보고, 다양한 연료의 혼합 및 희석조건을 이용하여 다수의 화염이 존재하는 것을 관찰하였으며, 또한 Xu 등은 앞의 연구를 바탕으로 좁은 채널 내부의 혼합층에서 생성되는 이른바 ‘flame street’의 구조를 처음으로 관찰하였고, ‘flame street’을 구성하는 다수의 화염에 대한 거동 특성을 열손실 및 연소 생성물에 의한 희석효과를 고려하여 실험적으로 밝혀낸 바 있다[10,11].

그간의 연구를 통해 다양한 실험변수를 활용하여 실험적인 접근이 수행된 바 있으며, 이러한 결과로부터 좁은 공간 내부에서의 에지화염의 안정화와 혼합층의 발달의 상관성을 일부 이해할 수 있었다. 그런데 다양한 화염이론이 공존하는 에지화염 구조의 본질을 보다 깊이 이해하기 위해서 단순 화학반응과 화염 구조로의 발달 경계에 해당하는 연소공학적인 관점에서의 소염 한계 근처 조건에서 에지화염 거동과 구조에 관해 주목할 필요가 있다. 하지만 지금까지의 연구는 소염 한계 영역에서의 에지화염 구조에 관해서는 상대적으로 부족한 실정이다. 특히

화염으로부터의 열손실 및 희석에 의한 가연한계의 인위적 변화에 의해 영향을 받게 되는 소염 조건에서의 에지화염 구조에 관한 연구는 매우 부족하였다. 따라서 본 연구에서는 에지화염의 소염한계에서 발생하는 현상을 관찰하고자 하였으며, 이를 위해 온도, 질소 희석 및 당량비, 유속등의 경계 조건의 효과적인 제어를 통해 채널 내부의 혼합 경계층에 형성되는 에지화염 구조의 변화와 화염 안정화에 관한 기초적인 자료를 제시하고자 한다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1. 실험 장치

본 연구에 사용된 연소기는 크게 두 개의 투입부와 채널로 구성되어 있으며, 이에 대한 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 먼저, 연소기의 투입부 내부에는 작은 유리구슬을 삽입하고 수축부를 두어 유동의 균일성을 확보하였으며, 0.5 mm 두께의 스테인리스 격막을 설치하여 공기측과 연료측을 구분하였다. 다음으로 화염이 안정화되는 채널은 3 mm 두께의 석영 판을 이용하였으며, 화염의 구조 및 거동 현상을 CCD 영상장비를 활용하여 촬영이 가능하게 하였다. 공기 및 연료 투입 시스템은 질량유량계(Mass Flow Controller, MFC)를 사용하여 정밀하게 제어 하였다. 또한 채널 내부의 가열을 위해 열전도율이 우수한 동으로 제작된 구조물 내부에 카트리지 히터(1.2 kW)를 삽입하여 열원으로 이용하였으며, 온도 제어는 가변 전압 장치를 이용하였다. 채널 내부의 공간적인 온도 분포와 유속 분포를 측정하기 위해 K-타입

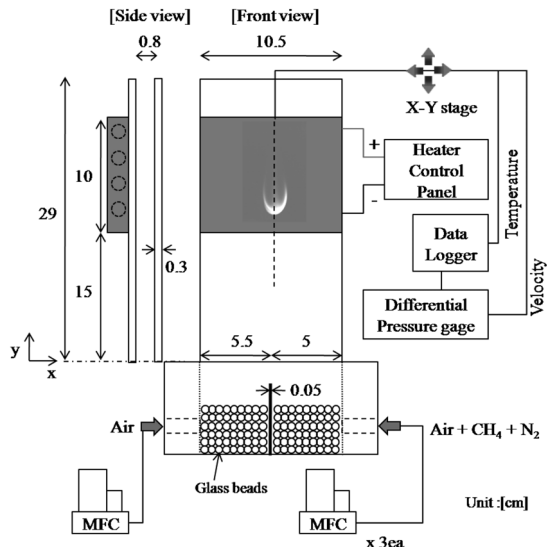


Fig. 1. Experimental setup.

열전대와 Pitot관을 별도로 제작된 x - y stage에 장착하여 채널 내부에 삽입하였으며, 이들은 각각 온도 기록 장치와 차압계에 연결시켰다. 측정에 사용된 차압 센서는 0~5 Pa의 범위를 가지며 표시값을 기준으로 $\pm 0.25\%$ 의 정확도와 0.01 Pa의 해상도(resolution)를 가지는 정밀 센서를 이용하였다. 이러한 실험 장비를 활용하여 연료와 산화제의 유속과 질소 희석 비율 및 채널 내부의 온도를 효과적으로 제어하였다. 혼합기의 평균 유속은 투입되는 혼합기의 총 유량에서 유입 경계에서의 단면적으로 나눈 값을 사용하였다. 화염의 초기 점화는 특정 유속 및 당량비 조건에서 파일럿 화염을 이용하여 채널 외부에서 이루어졌다. 이후 유량 조절을 통해 화염을 원하는 위치 범위 내에 안정화되도록 하였으며, 장치에 사용된 연료는 메탄($CH_4 > 99.995\%$)이며, 산화제는 압축공기를 사용하되 수분과 먼지를 제거하기 위해 별도로 필터를 사용하였다.

2.2. 실험 변수 설정 및 실험 방법

먼저, 실험 연소기 채널 내부의 입구($y=0$)에서 폭 방향(x -방향)유속을 측정하여 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 측정 오차를 줄이기 위하여 별도로 제작한 30 cm 길이의 직선 피토관을 이용하였으며, 채널 간격 방향으로 최대값을 기준으로 그래프에 나타내었다. 그 결과 전체 투입되는 유량을 채널의 단면적으로 나누어 계산된 평균 속도 값과 실제 측정된 값을 비교하였을 때 유사함을 알 수 있다. 이는 채널의 간격이 0.8 cm로 채널의 폭(10.5 cm)에 비해 아주 좁아 채널 입구에서의 압력장이 채널 내부의 유

속을 균일하게 유지시키는데 도움을 준 것으로 판단된다. 실제 실험에서는 연료측과 산화제측의 각각의 유속이 조건에 따라 약간의 차이가 발생하지만 최대한 속도구배의 영향을 배제하고자 하였다. 또한 이전의 실험 결과[13]를 통해 좁은 채널 내부의 선형적인 압력장의 분포로 인해 유속 분포는 균일하게 유지됨을 알 수 있었는데, 이러한 실험 결과를 활용하여 본 연구에 사용된 실험 연소기 채널 내부의 유동장을 균일하다고 가정하였으며, 평균속도를 기준 속도로 설정하였다.

실험 장치에서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 아주 낮은 유속과 높은 질소 희석조건까지의 넓은 조건에서 실험을 실시하기 위하여 외부에 열원을 설치하였다. 여기서 열원의 위치와 온도에 따른 기준 온도를 설정하기 위하여 먼저 채널 내부의 온도 분포를 높이별로 측정하여 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 연소기의 높이에 따라 열원이 존재하는 주위로 온도 변화가 급격하게 발생하였으며, 채널 내부의 유속에 의해 열원의 중앙보다 다소 높은 위치에서 최대 온도를 나타내었다. 따라서 최고 온도 값을 기준온도로 설정하였다. 이와 같이 열원이 존재하는 부분에서는 열손실에 의한 소염 한계를 극복할 수 있으므로 채널 내부에서 화염은 열원 근처에 안정화 될 것을 예상할 수 있다. 본 연구에서는 열원의 위치를 열원의 중심을 기준으로 입구로부터 20 cm에 고정하여 실험을 실시하였다. 입구 경계의 당량비 조건은 연료측에 투입되는 부분 예혼합기의 당량비를 의미한다. 또한 질소 희석 비율은 연료측에 공급되는 전체 유량에 대한 질소 희석량을 부피

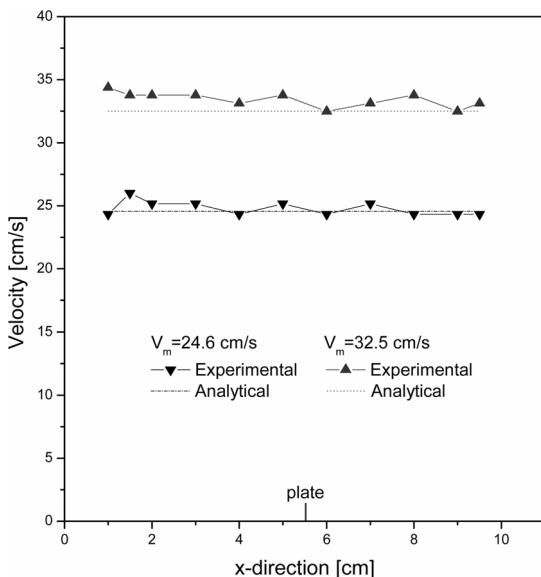


Fig. 2. Velocity distribution along the x -direction at $y=0$.

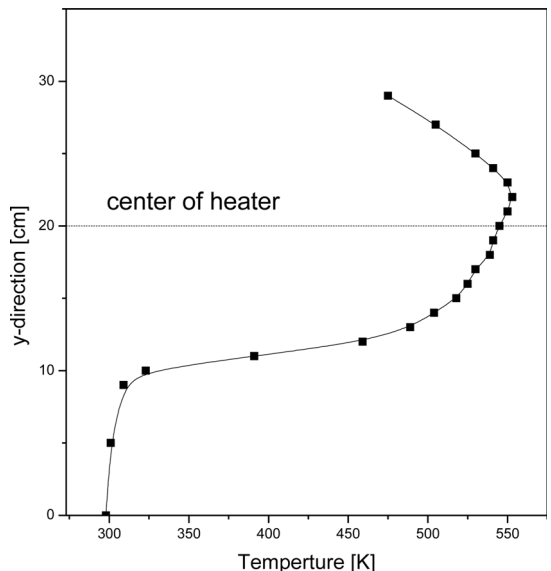


Fig. 3. Channel inside temperature(T_m) distribution along the center line of the combustor($x=5.25$ cm).

비로 나타내었다. 각 실험 변수는 다수의 예지화염 연구에서 도출된 화염 안정화에 영향을 미치는 인자로서 다수의 실험 변수 제어를 통해 화염 역화조건과 화염 안정화 위치를 살펴보고, 외부 열원의 변화에 따른 예지화염의 구조를 살펴보았다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 화염의 안정화 영역

초기에 채널 외부에서 점화되어 안정화되어 있던 화염은 채널 입구 경계에서의 유속, 당량비, 질소 희석 비율에 따라 다양한 조건에서 채널 외부에서 채널 내부로 역화되거나 안정화 될 수 있다. 기본적으로 채널 내부에서 예지화염의 안정화는 예지화염의 전파속도와 유동 속도의 균형이 이루어지는 지점에서 나타나게 되므로, 화염 안정화에 영향을 미치는 경계 조건을 변화시키면서 화염이 역화되는 조건을 살펴보았다. Fig. 4의 결과는 외부 열원을 사용하지 않고 측정된 것으로 역화에 해당하는 대부분의 조건(Flash back으로 표기)에서 화염이 채널 내부에 안정되지 못하고 역화 도중에 소멸되었다. 이러한 현상은 채널 내부의 평균 유속이 화염 전파속도보다 낮아 채널 상류로 화염이 전파하게 되지만, 낮은 평균 유속에 의해 반응물의 공급시간이 부족하게 되어 화염은 결국 열손실에 의해 소멸되는 것으로, Xu[10]의 실험 결과에서 나타난 과도기적 이중화염 영역에 해당된다. 하지만 상대적으로 높은 유속 조건과 낮은 질소 희석 비율을 적용한 경우(stable로 표기)에서는 이전의 많은 연구자들에 의해 수행되었던 삼지화염 구조를 관찰할 수 있었으며, 이를 Fig. 4의 그래프에 사진으로 나타내었다. Fig. 4의 결과를 살펴보면, 동일한 당량비 조건에서 유속이 낮아질수록, 동일한 유속 조건에서는 당량비를 증가시키수록 높은 질소 희석 비율에서도 역화가 가능함을 알 수 있다. 이는 상대적으로 낮은 유속과 높은 당량비 조건에서 화염이 채널 내부로 역화되는 현상을 보다 넓은 영역에서 관찰할 수 있음을 의미한다. 이러한 조건에서 적절한 열원을 사용하여 추가적인 열을 공급하게 되면 상온에서는 역화되어 연료 투입부 측으로 전파되어 사라지거나 채널 내부에서 열손실에 의해 소멸되어 관찰할 수 없던 실험 조건에서 화염을 안정화 시킬 수 있게 된다.

3.2. 유속변화에 따른 부상화염 높이 변화

앞에서 살펴본 Fig. 4의 역화가 발생하는 조건에서 외부의 열원을 이용하여 채널 내부에 화염을 안정화시켰으며, 안정화된 화염은 실험변수에 따라 다시 채널 상류로 역화가 발생하거나 화염 날림 현상

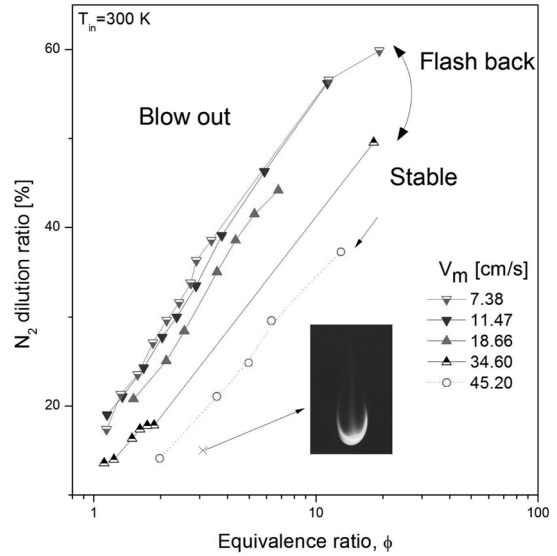


Fig. 4. Flash back and stable condition for various experimental conditions without heating.

이 발생하게 된다.

본 연구에서 열원이 위치한 곳에 화염이 안정화되는 현상은 근본적으로는 열적인 현상에 기인한다. 채널 내부로 전파된 예지화염은 혼합 경계층이론에 의하면 채널 상류로 이동할수록 전파속도는 감소하게 되고, 질소에 의해 희석된 조건이므로 일반적인 예혼합 화염의 소멸현상과 동일하게 예지화염 역시 채널 외부로의 열손실에 의해 소멸이 발생하게 된다. 이러한 상황에서 소멸을 극복할 수 있는 추가적인 열원이 존재하게 되면 화염은 그 위치에서 안정적으로 존재할 수 있게 된다. 이때의 화염 전파속도는 희석된 조건이므로 상당히 낮을 것으로 판단된다. 이러한 조건에서 채널 내부에 안정화된 화염의 부상 위치를 다양한 유속 및 당량비 조건에서 측정하여 Fig. 5에 나타내었다. 채널 내부의 온도는 503 K이며, 동일한 당량비 조건에서 유속이 증가하면 화염은 하류로 이동하게 된다.

여기서 주목할 만한 점은 당량비 조건이 높아질수록 화염 날림 영역이 확대되는 것을 확인할 수 있다는 것이다. 이를 통해 상대적으로 높은 유속 조건에서 안정화된 화염은 높은 전파속도를 가지게 되며, 당량비가 높은 조건에서 소멸 한계 근처의 낮은 유속 조건의 화염을 관찰하기 위해서는 결과적으로 더 높은 온도의 열이 필요함을 알 수 있다. 물론 상대적으로 낮은 당량비에서의 화염은 충분히 낮은 속도까지 화염을 안정화시킬 수 있으나 입구 당량비 조건이 낮아지게 되면, 혼합층 내부의 연료 농도 구배가 낮아지면서 결국 예혼합 화염의 구조가 관찰된다. 따라서 이러한 조건에서도 소멸 근처에서의

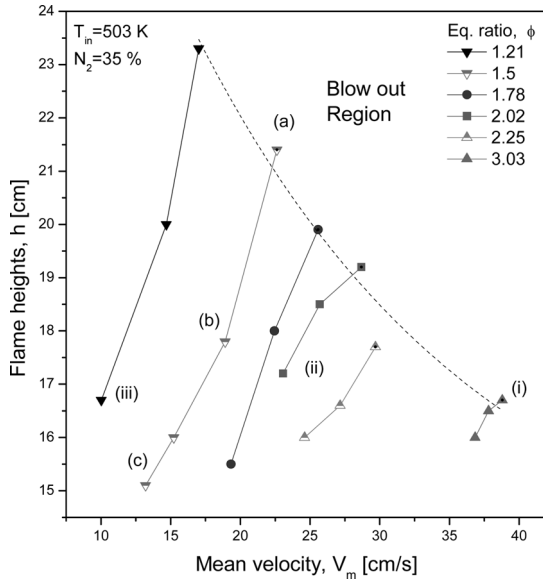


Fig. 5. Lifted flame heights with variation mean velocity for constant equivalence ratio.

화염 특성을 파악하기 위해서는 보다 낮은 속도와 더 높은 추가적인 열이 요구됨을 알 수 있다.

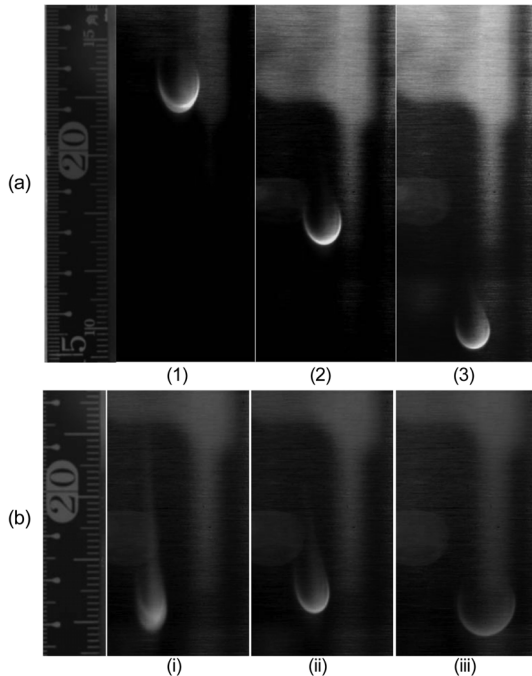


Fig. 6. Lifted flame heights and its structure variation for experimental condition in case of $T_{in}=503\text{ K}$, $N_2=35\%$.

(1) $\phi=1.5$, $V_m=22.62$ (2) $\phi=1.5$, $V_m=18.91$ (3) $\phi=1.5$, $V_m=13.2\text{ cm/s}$, (i) $\phi=3.03$, $V_m=38.79$ (ii) $\phi=2.02$, $V_m=23.05$ (iii) $\phi=1.21$, $V_m=10.01\text{ cm/s}$

다음으로 화염의 구조를 살펴보기 위해 Fig. 5에 나타난 조건 (1), (2), (3)에 해당하는 부상 화염을 Fig. 6(a)에 나타내었다. 그 결과 평균 유속의 감소에 의해 화염은 상류로 이동하면서 화염 폭은 감소하고 에지화염의 구조에서 확산 화염의 길이는 감소하여, 화염의 전반적인 크기가 감소하였다. 특징적인 것은 유속을 감소할수록 예혼합 화염의 끝단이 점점 확산 화염쪽으로 기울어져 마치 물방울의 형태를 가지게 되었다. 이와 같은 구조는 당량비를 감소시키게 되면 보다 원형에 가까워지는데, Fig. 5의 (i), (ii), (iii)에 해당하는 화염 구조를 Fig. 6(b)에 나타내었다. 그 결과 유속의 감소와 당량비의 감소를 통해 확산화염은 과농예혼합 화염측으로 이동하며 길이는 줄어들고, 전반적인 에지화염의 곡률은 감소하게 되었다. 이러한 조건에서 유속을 보다 감소시키게 되면 화염은 소멸되게 되므로 Fig. 6(a)-(3)와 (b)-(iii)의 화염 구조가 본 연구와 관련있는 소멸 직전에서의 에지화염 구조라고 판단하였다. 따라서 이러한 구조의 화염을 ‘화염 방울’, 혹은 ‘flame-drop’ 이라고 명명하고, 보다 자세하게 관찰하였다.

3.3. 당량비에 따른 화염 구조 변화

앞에서 언급한 flame-drop과 관련하여 보다 낮은 속도에서의 화염 구조를 살펴보기 위하여 현재의 실험 연소기에서 가능한 최소 속도와 최대 가열 조건에서 입구 경계의 당량비를 조절하였다. 설치된 히터의 정격 용량의 제한으로 인해 본 연구에서의 최대 채널 내부 온도는 753 K가 최대 온도였으며, 다양한 유속조건에 대해 당량비를 조절하여 화염 안

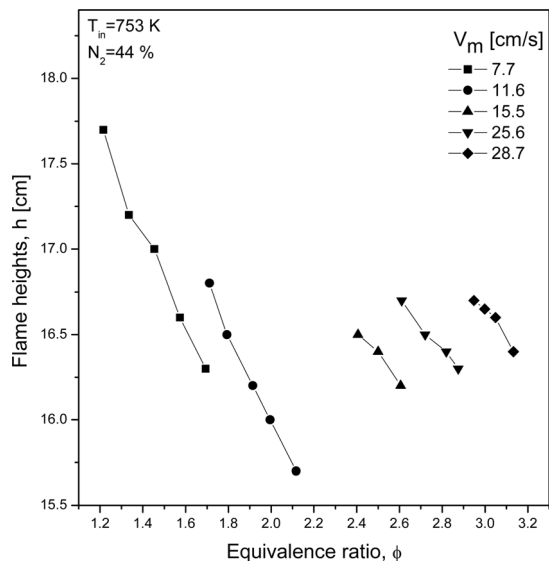


Fig. 7. Lifted flame heights with variation equivalence ratio for constant mean velocity.

정화 특성을 파악하였고, 화염의 높이를 측정하여 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 전반적인 경향은 상대적으로 온도가 낮은 조건인 Fig. 5의 결과와 동일하게 평균 유속이 일정한 조건에서 입구 경계의 당량비를 증가시키게 되면 부상화염의 높이는 감소하였다. 이러한 경향은 두 가지 이유로 설명 될 수 있는데 첫 번째는 이론 당량비를 기준으로 한 층류 예혼합 화염의 전파속도($S_{L,0}^0$)와의 관계를 적용한 예로 Kim 등이 당량비 증가에 따라 $S_{L,0}^0$ 는 증가하게 되어 부상 화염의 높이가 감소함을 밝힌 바 있다[14]. 두 번째로 Fig. 6(b)의 사진에서 알 수 있듯이 당량비의 증가에 따라 확산 화염의 강도가 증가함을 시각적으로 확인할 수 있는데 질소 희석조건에서의 예지화염 전파속도와 관련하여 Seo 등은 질소 희석 조건에서 확산화염에 의한 화염 전파속도 증가 효과가 희석하지 않은 경우에 비해 크게 나타남을 밝힌 바 있다[15].

결과적으로 7.7 cm/s의 평균 유속조건까지 화염을 안정화시킬 수 있었으며, 그래프로 나타내지는 않았지만 61%의 희석 조건에서는 4.7 cm/s의 아주 낮은 평균 유속 조건에서도 화염을 안정화시킬 수 있었다. 화염의 구조 변화에 대한 이해를 위해 경계 조건의 당량비를 조절하여 희박 조건에서부터 과농 조건까지의 구조를 Fig. 8에 나타내었다. 그 결과 과농 조건으로 갈수록 화염은 벽면에서 부터(Fig. 8 (a)에 해당) 이론 당량비 조건을 따라 공기측으로

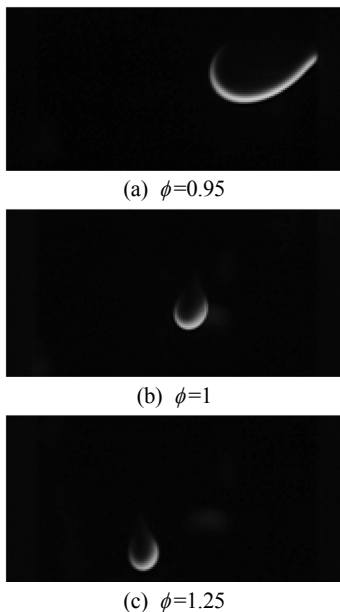


Fig. 8. Flame structure with variation of equivalence ratio from lean to rich condition ($T_m=753$ K, $N_2=44\%$, $V_m=7.7$ cm/s).

이동하게 되며, 화염은 보다 분명하게 단혀 있는 구조를 가지게 되었다.

3.4. 온도 및 질소 희석 효과

앞선 결과를 통해 소염 한계에 존재하는 예지화염을 특정 위치에 안정시키고, 보다 낮은 평균 유속 조건에서 예지화염 구조를 살펴보기 위해서는 외부 열원과 질소 희석이 반드시 필요한 것을 알 수 있었다. 이러한 조건에서 보다 낮은 속도 혹은 평균 유속을 무시할 수 있을 정도의 영역에서 예지화염 소염 현상에 대해 접근하기 위해서는 온도 상승->질소 희석->유속 감소 과정의 다양한 실험 변수에 대한 동시 제어가 반드시 필요하게 된다. 따라서 지금까지의 결과를 토대로 실험 전반의 경향을 살펴보기 위해 부상화염의 높이(h)를 평균 유속(V_m)으로 나눈 값에 해당하는 특성 시간(τ)을 이용하여 Fig. 5와 7의 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 여기서 특성 시간은 실험 조건에 따라 변화하는 부상화염의 높이와 당시의 평균 유속에 대한 상대적인 크기를 의미한다. Fig. 9의 결과를 살펴보면, 상대적으로 높은 온도와 높은 질소 희석 조건에서 특성 시간의 기울기가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 열원이 위치한 곳의 온도가 높을수록 높이별 온도구배는 증가하여 $S_{L,0}^0$ 에 의해 변화하는 부상화염의 높이 변화가 크다는 것을 알 수 있다. 또한 동일한 당량비 조건에서 특성 시간의 크기는 온도와 희석조건이 높은 경우에 큰 값을 가지게 되는데 이러한 현상은 높은 온도와 희석조건에서 보다 낮은 속도의 화염을 관찰할 수 있음을 의미한다. 또한 당량비를 증가 시키게

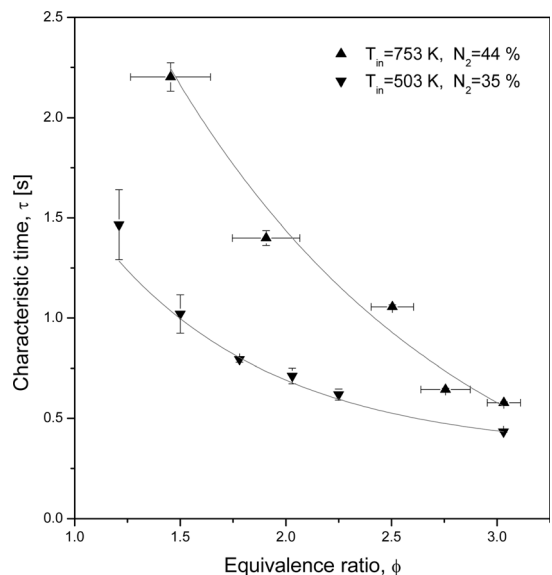


Fig. 9. Characteristic time for all experimental conditions.

되면 온도 상승 또는 질소 희석효과는 상대적으로 감소함을 알 수 있는데 그 이유는 3.3절에서 언급한 당량비 상승에 의한 $S_{L,St}^0$ 의 증가로 인해 안정화될 수 있는 범위가 감소하였기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 고온 채널 내부의 혼합 경계층에 형성된 소염 한계 영역에서의 에지화염 안정화 및 화염 구조를 살펴보았다. 먼저, 에지화염의 안정화에 영향을 미치는 다양한 실험 변수를 적용하여 채널 외부에 안정된 화염을 채널 내부로 화염이 역화되는 조건을 살펴본 결과 입구 경계의 당량비가 증가할수록 질소 희석비율이 높은 조건까지 역화가 발생함을 알 수 있었다. 이러한 조건에서 채널 내부로 역화된 화염을 외부 열원과 연료측 질소 희석비율을 조절하여 아주 낮은 화염 전파속도를 가지는 소염 직전의 부상된 에지화염을 관찰 할 수 있었으며, 또한 화염 구조적 측면에서 고온조건에서 예혼합 화염이 닫힌 형태의 화염을 관찰 할 수 있었고, 이를 ‘flame-drop’이라 명명하였다. 보다 낮은 속도 혹은 평균 유속을 무시할 수 있을 정도의 영역에서 에지화염 소염 현상에 대해 접근하기 위해서는 온도 상승->질소 희석->유속 감소 과정의 다양한 실험 변수에 대한 동시 제어를 필요로 하게 됨을 알 수 있었다. 지금까지의 결과를 토대로 추후 이러한 닫힌 형태의 화염 구조에 대한 보다 진화된 특성연구를 수행하고자 하며, 본 연구에서는 이를 위한 기초자료를 확보하는 데 그 의의가 있다.

후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2009-0069570).

참고문헌

- [1] H. Phillips, “Flame in a buoyant methane layer”, Symposium (International) on Combustion, Vol. 10, pp. 1277-1283, 1965.
- [2] S. H. Chung, “Stabilization, propagation and instability of tribrachial triple flames”, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 31, pp. 877-892, 2007.
- [3] J. Buckmaster, “Edge-flames”, Progress in Energy and Combustion Science, vol. 28, pp. 435-475, 2002.
- [4] J. W. Dold, “Flame propagation in a nonuniform mixture: Analysis of a slowly varying triple flame”, Combustion and Flame, Vol. 76, pp. 71-88, 1989.
- [5] V. N. Kurdyumov and M. Matalon, “Dynamics of an edge flame in a mixing layer”, Combustion and Flame, Vol. 139, pp. 329-339, 2004.
- [6] P. N. Kioni, et al., “Experimental and numerical studies of a triple flame”, Combustion and Flame, Vol. 116, pp. 192-206, 1999.
- [7] R. Azzoni, et al., “The structure of triple flames stabilized on a slot burner”, Combustion and Flame, Vol. 119, pp. 23-40, 1999.
- [8] N. I. Kim, et al., “Lift-off characteristics of triple flame with concentration gradient”, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 30, pp. 367-374, 2005.
- [9] G. R. Ruetsch, et al., “Effects of heat release on triple flames”, Physics of Fluids, Vol. 7, pp. 1447-1454, 1995.
- [10] B. Xu and Y. Ju, “Studies on non-premixed flame streets in a mesoscale channel”, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 32, pp. 1375-1382, 2009.
- [11] C. Miesse, et al., “Diffusion flame instabilities in a 0.75 mm non-premixed microburner”, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 30, pp. 2499-2507, 2005.
- [12] N. I. Kim, et al., “Development and scale effects of small Swiss-roll combustors”, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 31, pp. 3243-3250, 2007.
- [13] M. J. Lee and N. I. Kim, “The stabilization of a methane-air edge flame within a mixing layer in a narrow channel”, Combustion and Flame, Vol. 157, pp. 201-203, 2010.
- [14] K. N. Kim, et al., “Characteristics of laminar lifted flames in coflow jets with initial temperature variation”, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 31, pp. 947-954, 2007.
- [15] J. I. Seo, et al., “An experimental study of the fuel dilution effect on the propagation of methane-air tribrachial flames”, Combustion and Flame, Vol. 153, pp. 355-366, 2008.