



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

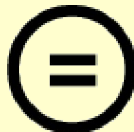
다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

대향류확산화염에서 에지화염이
화염소화에 미치는 영향에 관한 연구



부 경 대 학 교 대 학 원

의 생 명 융 합 공 학 협 동 과 정

정 용 호

공 학 석 사 학 위 논 문

대향류확산화염에서 에지화염이
화염소화에 미치는 영향에 관한 연구

지도교수 박 정

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2014년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

의 생 명 융 합 공 학 협 동 과 정

정 용 호

정용호의 공학석사 학위논문을
인준함.

2014년 1월 5일



주 심 공학박사 권 오 봉 印

위 원 공학박사 이 창 용 印

위 원 공학박사 박 정 印

목 차

목차	i
Nomenclature.....	iii
초록	iv

제 I 장 서 론	1
-----------------	---

제 II 장 이론적 고찰.....	4
2.1 대향류 확산화염	4
2.2 S-curve 거동 특성.....	10

제 III 장 실험장치 및 방법.....	12
3.1 실험장치	12
3.1.1 대향류버너.....	12
3.1.2 상부버너 냉각수 순환장치.....	14
3.1.3 질량유량 제어기.....	15
3.2 실험방법.....	16
3.2.1 대향류화염의 소화특성 가시화.....	16

3.2.2 화염분석을 위한 Matlab 기법.....	17
3.2.3 실험조건.....	18
제 IV장 실험결과 및 고찰.....	21
4.1 장막유동 유량변화에 따른 효과.....	21
4.2 버너직경 변화에 따른 효과.....	28
제 V장 결 론.....	38
감사의 글.....	57
참고문헌.....	59
영문초록.....	66



Nomenclature

a	: Local strain rate
a_g	: Global strain rate
D	: Burner diameter
g	: Acceleration of gravity
k	: Thermal conduction
L	: Separation distance between the fuel and the oxidizer nozzle
l_f	: Flame length
l_m	: Mixing length thickness
q_r	: Lateral heat loss
r_f	: Flame radius
T	: Temperature
$T_{\max}$	: Maximum flame temperature
U_F	: Nozzle exit velocity of fuel
V_r	: Velocity ratio
V_a	: Axial velocity at oxidizer nozzle exit
V_f	: Axial velocity at fuel nozzle exit, Propagation velocity
V_b	: Buoyant Convection Velocity
X_i	: Mole fraction of chemical species i
z	mixture fraction

대향류확산화염에서 에지화염이 화염소화에 미치는 영향에 관한 연구

정 용 호

부 경 대 학 교 대 학 원
의 생 명 융 합 공 학 협 동 과 정

초 록

대향류확산화염의 화염소화에 있어서 에지화염 역할에 관한 실험적 연구가 진행되었다. 속도비, 버너직경, 그리고 버너간격을 변화시키며 수행된 실험에서 전체신장율에 따른 화염소화 임계질소물분율의 그래프는 c-커브 형태로 나타났다. 고신장율화염에서는 화염소화 임계질소물분율의 그래프가 하나의 곡선으로 일치하였으며, 화염이 일차원의 응답특성을 갖는 것을 확인하였다. 화염 소화는 바깥 에지화염이 반경방향으로의 진동 후에 화염 중심으로 수축하며 소화하는 영역, 진동 없이 화염 중심으로 수축하며 소화하는 영역, 그리고 바깥 에지부분의 수축과 진동 없이 화염 중심에 화염 구멍이 생기며 소화하는 영역으로 세 가지 모드로 나타났다. 화염 표면온도 측정과 에너지 방정식의 각항을 수치해석 한 결과를 토대로 에지화염부분에서의 반경방향 전도 열손실이 에지화염의 불안정을 야기한다는 것과 전도를 통한 열 공급뿐만 아니라 대류를 통한 열 공급도 바깥 에지화염의 안정화에 기여한다는 것을 보였다. 그리고 반경방향의 전도열손실이 수축하며 소화하는 메커니즘의 지배적인 역할을 함을 보였다.

제 1장 서 론

대향류 확산화염에서 화염 소화에 대한 이해는 화염 안정화를 평가하는데 매우 중요한 부분이다. 대향류 화염의 연구는 Tsuji[1] 등이 화염 구조와 화염 소화 거동을 명확히 정의하기 위해 사용되었고, 특히 고신장을 화염 소화 한계를 주요 타겟으로 화염 구조와 화염 소화에 대한 많은 양의 연구가 진행되었다.[2-6]

한편, 최근 몇몇의 연구에서는 저신장을 확산 화염의 소화 거동에 대해 연구를 진행하고 있다. Tien 연구그룹에서는 신장율이 2 s^{-1} 일 때 확산화염의 두께는 2~3 cm가 될 수 있음을 보였고, 이는 화염을 일차원 화염구조로 간주하여 해석하기 위해서는 최소 20 cm 이상의 버너 직경에서 실험을 수행하여야 함을 의미한다.[7] 실제로 23 cm 직경의 스커트에서 수행된 실험에서 화염 소화는 화염 구멍을 통해 이루어짐을 보였다.[8] 그 후, Maruta 등의 14mm 직경의 버너가 사용된 미소중력 실험에서 저신장율의 화염 소화는 복사 열 손실에 기인하고, 고신장율의 화염 소화는 화염 스트레치에 기인함을 보고한 바 있다.[9] 이러한 결과들은 화염을 정체점 근처에서 유효한 상사 개념(similarity concept)하에서 해석한 결과이며, 상사 개

념에서는 반경 방향으로의 측면 열손실이 중심부에 영향을 미치지 않기 때문에 상사 개념에 근거한 일차원 화염으로만 간주한다. 그러나 실제로 실험실에서는 유한한 버너직경에서 실험이 진행되고 있기 때문에 화염 크기가 충분히 크지 않아 정체점 근처의 화염 중심부가 측면 열손실에 노출되게 되어 상사 개념이 유효한 일차원 화염으로 볼 수 없으며, 소 중력 화염에서는 측면 방향으로의 측면 열손실 그리고 정상 중력장에서는 측면방향으로의 전도 열손실과 부력에 의한 버너 림 (burner rim)으로의 대류 열손실 등 다차원 효과 (multi-dimensional effects)가 중요하게 된다. Park 등은 실험과 2차원 수치계산을 통해 신장율에 따른 화염 소화 거동을 반경방향으로부터 진동후 수축하는 모드부터 화염 구멍으로 소화하는 모드까지 체계적으로 나타내었고, 유한한 버너직경에서의 화염은 다차원 효과를 고려해야 함을 시사하며 저신장율 화염 소화가 반경방향으로의 전도열손실에 지배적으로 기인함을 보였다.[10-12]

한편, Fig.1.1에서 보는 바와 같이 대향류 확산화염의 에지 부분은 전형적인 부분 예혼합이며, 바깥 에지화염이 만일 정지화염이라면 화염 전파속도와 국부 유동속도와 균형을 이루며 안정화된다. 에지 화염의 전파속도는 혼합강도, 연료 농도, 부력, 루이스 수, 선포 확산 등에 의해 결정된다.[13] 게다가 확산화염과 에지 부분의 예혼합

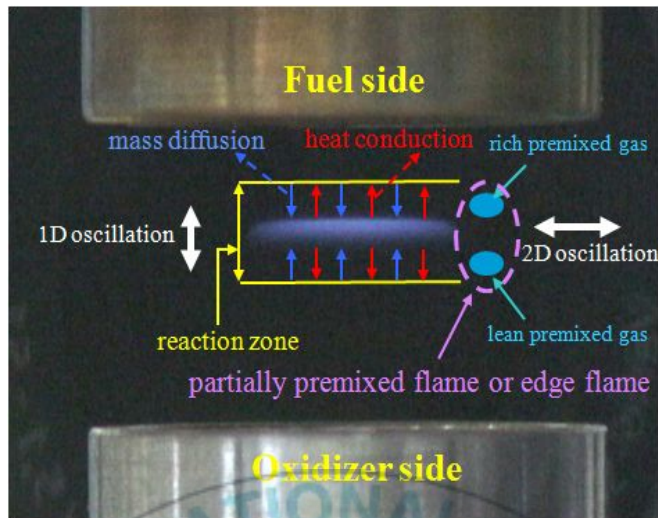


Fig.1.1 Low strain rate counterflow configuration.

가지와의 전도열전달도 에지화염 전파 속도와 화염 안정화를 제어하는 요소가 될 수 있다.[14-15] 따라서 유한한 버너직경의 대향류 확산화염에서 에지화염의 안정화 메커니즘은 화염 구조와 소화 거동에 중요한 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단되며, 이에 따른 연구 결과를 얻고자 한다. 따라서 전체 신장율(global strain rate), 속도비(velocity ratio), 그리고 버너 직경과 간격의 변화에 따른 화염 소화 거동 및 화염 안정화 선도를 제시하여 저신장율과 고신장율 화염의 화염 소화 메커니즘을 명확히 하고자 한다.

제 II 장 이론적 고찰

2-1 대향류 확산화염

난류 화염의 순간 구조는 층류화염으로 되어 있고 평균 구조는 층류 화염들의 앙상블로 되어 있으며, 화염대의 두께는 난류의 최소 크기인 콜모고로프[16]의 크기보다 작아 화염대 내에 난류 생성을 허용하지 않는다. 그러므로 1984년 Peters에 의해 개념이 완성된 층류 화염편 개념 (flamelet model)[17]은 유동장과 화학반응을 분리 (de-couple)할 수 있는 유일한 개념이기 때문에 현재까지 화염 해석 연구에 주류를 이루고 있다. 또한, 층류 화염편 모델은 난류 화염의 앙상블 평균을 위해 화염 구조가 체계적으로 연구된 기초 연소장으로부터 정보를 제공받아야 하기 때문에 제트 화염과 혼합층의 상사성과 더불어 1차원 화염 구조를 갖고 있는 대향류 화염에 대한 연구는 층류 화염편 개념에 대한 연구와 더불어 약 50여 년간 활발한 연구 주제가 되었다.[18] 대향류 화염은 상사 (similarity) 변수를 이용하여 1차원 화염으로 간단히 모델링 할 수 있어 화염구조와 소화거동에 대해 잘 정의된 데이터 제공이 가능하며, 난류화염

의 국소구조인 화염편 (flamelet)에 대한 유용한 정보를 제공해 준다.[19-22] 대향류 확산화염 연구는 1950년 Spalding에 의해 다공질 구 형상의 버너에서 정체점 (stagnation point) 근처의 화염을 대상으로 시작되어, Tsuji 연구그룹[1]에서 1960년대부터 이 분야에 기여를 하여 많은 데이터베이스를 구축하였다고 해도 과언은 아니다. 특히 정상 대향류 화염에서는 화염이 공간상에 정지하고 있기 때문에 화염스트레치가 화염 곡률 향이 사라지고 화염면에 접선방향의 유동속도 구배로 표현되며, 정상상태 비압축성 유동을 가정하는 경우 연속 방정식으로부터 접선방향 속도 구배는 축방향 속도구배로 표현할 수 있어 출구에서의 속도 증가에 따라 선형적으로 증가하는 특성을 갖고 있다. 또한 Chelliah 등[4]에 의해 전체신장률의 식이 제시되어 양측 노즐의 경계조건이 고정되면 화염 구조는 화염신장률에 의해 지배를 받게 된다. 신장률은 유동의 변화를 대표하는 인자로 화염대 (reaction zone)에서 반응물 (reactants) 체류시간의 역수와 비례하며, 특히 확산화염의 경우 연료와 산화제의 확산이 중요해지는 영역인 혼합층의 두께 (mixing layer thickness)에 영향을 주는 인자이다.

대향류 확산화염에서는 산화제 측과 연료 측의 질량 유속이 균형을 이루는 위치에서 화염이 존재하며, 일반적으로 연료 측을 과다

하게 희석한 경우를 제외하고는 화염은 산화제 측에 형성된다.

신장률은 노즐 출구 유속과 정비례하는 관계에 있으며, 노즐출구의 산화제와 연료류의 유속 (V_a , V_f), 산화제와 연료 노즐 양단간의 거리(L), 연료와 산화제의 밀도 (ρ_f , ρ_a)의 함수이다. 본 실험에 사용된 전체 화염 신장률 (a_g)은 Chelliah 등[4]이 제안한 식을 수정하여 다음과 같이 정의 된다.

$$a_g = \frac{2V_a}{L} \left(1 + V_r \frac{\sqrt{\rho_f}}{\sqrt{\rho_a}} \right), \quad V_r = \frac{V_f}{V_a} \quad (2-1)$$

여기서, V_r 은 연료와 산화제 측 버너 노즐 출구에서의 속도비 (velocity ratio)를 의미한다. v 와 ρ 는 반응물의 유동속도와 밀도를 나타내고, L 은 버너 노즐 간 거리를 나타내며, 아래첨자 f 와 a 는 각각 연료와 산화제를 의미한다.

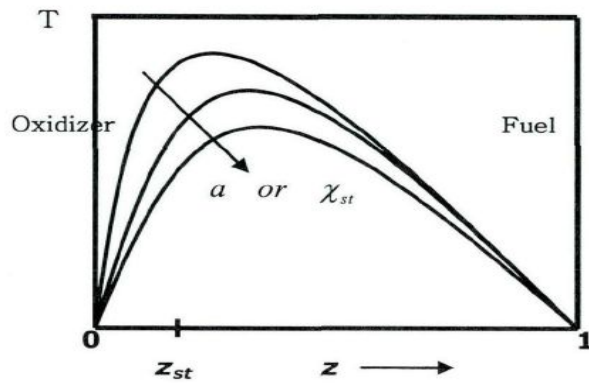
2-2 S-curve 거동 특성

대향류 화염의 경우 신장률은 스칼라 소산률에 비례하여 일대일 대응관계 (one-to-one correspondence)에 있고 스칼라 소산률은 혼합층 내 반응물의 농도와 관련되는 혼합분을 구배의 제곱에 비례한다. 따라서 층류 화염편 모델 적용에 필요한 스칼라 소산률의 값은 신장률로부터 바로 알 수 있기 때문에 대향류 화염에서 화염 소화한계 등을 정량화할 수 있게 된다.

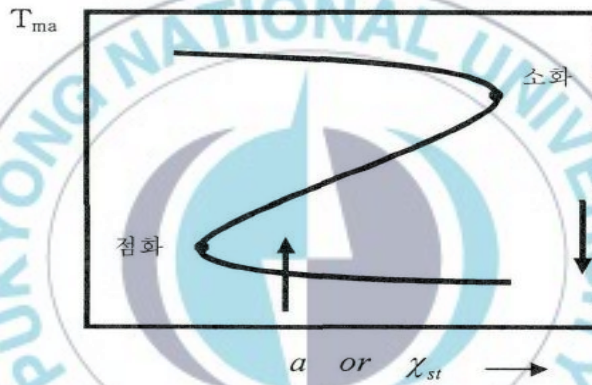
Figure 2.1(a)는 혼합분율 (mixture fraction)에 따른 화염의 온도 분포를 나타낸 그림이다. 이론적으로는 산화제가 이론 혼합비를 이루는 당량혼합비 조건 (Z_{st})에서 화염 최고 온도가 나타나야 하겠지만, 실제의 경우 연료 과잉 쪽으로 약간 이동한 지점에서 화염의 최고 온도가 나타난다. 또한 신장률이 증가할수록 화염 최고 온도의 위치가 연료 과잉 쪽으로 옮겨감을 알 수 있다. Fig. 2.1(b)는 신장률 (또는 스칼라 소산률)에 따른 화염 최고온도의 변화를 개념적으로 도시한 것이며, Fig. 2.2은 Nanduri[24]에 의해 제안된 담켈러 수 (Damköhler number)를 기준으로 한 화염 최고온도의 변화를 보여주는 S-curve 이다. S-curve는 높은 온도에서 신장률이 증가함에 따라 소화에 이르는 상부분기 (upper branch), 점화 현상과 관련 있

는 하부분기 (lower branch), 점화와 소화 사이의 중간분기 (middle branch)로 나눌 수 있으며, 중간분기는 수치적인 해는 존재하나 정상 상태에서는 얻을 수 없고 비정상 상태에서 나타나는 불안정한 영역이다. 화염의 소화는 매우 낮은 신장률 하에서 복사 열손실 (radiative heat loss)에 의해 발생하기도 하지만, 보통은 S-curve의 상부분기에서 신장률이 증가함에 따라 화염의 온도가 낮아지며 일어나게 된다.





(a)



(b)

Fig. 2.1 (a) Schematic representation of temperature as a function of Z , (b) S-curve of maximum flame temperature with strain rate or scalar dissipation rate.

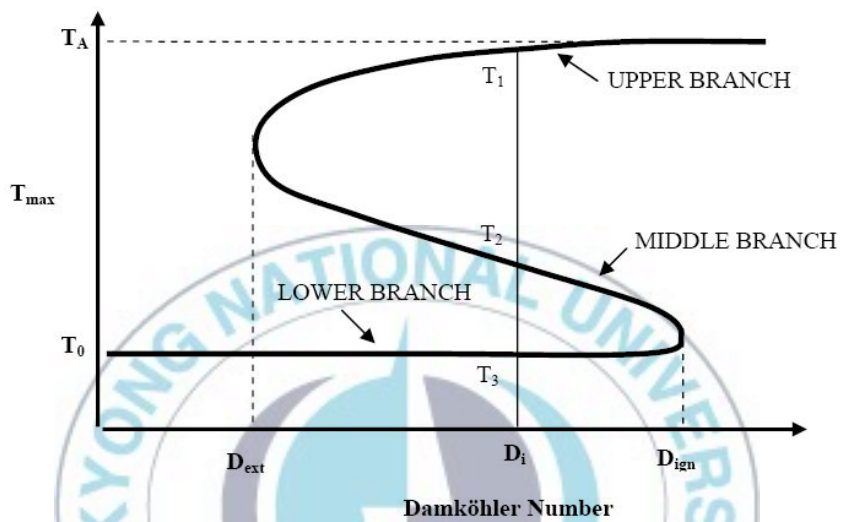


Fig. 2.2 Flame response for an adiabatic diffusion flame system
"S-curve"

제 Ⅲ장 실험장치 및 방법

이 장에서는 본 연구에 사용된 실험 장치에 대한 구성과 각 부분의 기능을 살펴보고, 실험방법에 대한 설명을 논의하도록 한다.

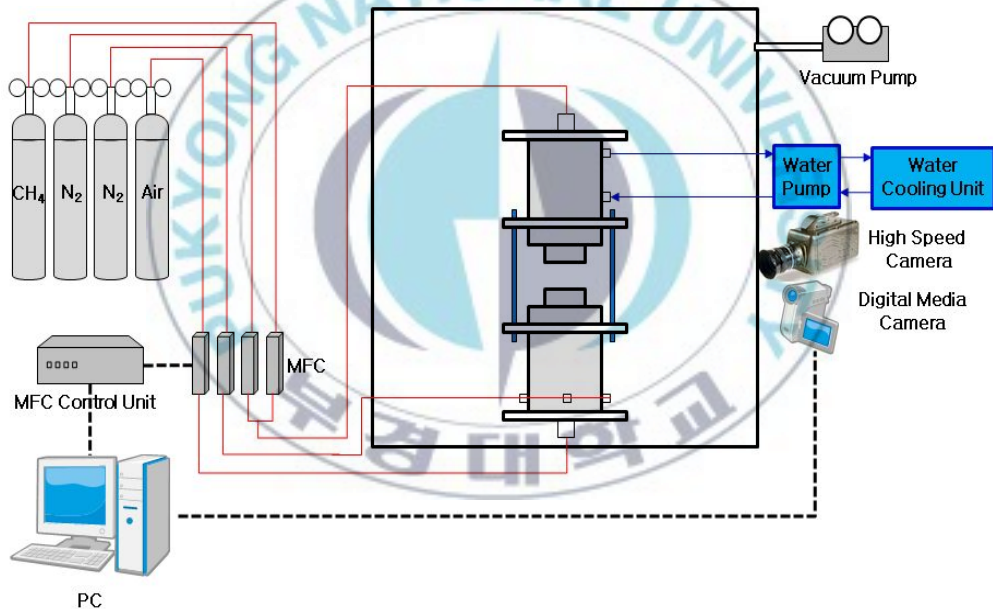


Fig. 3.1 Schematic diagram of counterflow burner and flow systems

3.1 실험장치

Figure 3.1은 실험에 사용된 대향류버너와 유로계 시스템에 대한 개략도이다. 본 실험 장치는 대향류 버너 부분, 화염온도 측정 및 저장장치, 화염변위측정과 화염 소화특성을 파악하기 위한 카메라 장치, 유량의 제어와 화상을 저장하기 위한 컴퓨터, 대향류 버너의 냉각을 위한 냉각수 장치 그리고 각종 가스의 정량 공급을 위한 질량유량 제어장치로 구성되어진다.

3.1.1 대향류 버너

Figure 3.2는 본 실험에 사용된 실험장치의 실제 이미지를 보여주고 있다. 사진에서 보여주는 바와 같이 스테인리스 스틸 (stainless steel)로 제작된 대향류 버너는 아크릴로 제작된 밀폐된 공간에 설치하였으며, 버너의 내경은 18, 26, 그리고 46mm 로 변화를 주며 실험하였다. 대향류 화염에서의 화염 대는 산화제 측에 형성되는데, 화염대가 노즐에 부착되는 것을 막기 위해 연료를 상부 노즐에서 공급하였고, 산화제는 하부노즐에서 공급하여 실험하였다. 또한 유



Fig. 3.2 Experimental apparatus of counterflow burner

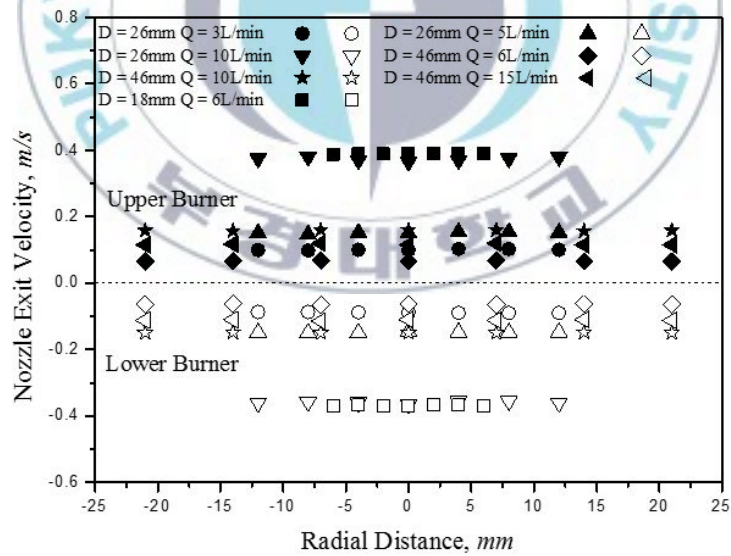


Fig. 3.3 Nozzle exit velocity with radial distance across burner nozzle for burner diameter 18, 26 and 46mm

동 자체에서 일어나는 부력의 효과를 최대한 배재하기 위해 상대적으로 낮은 밀도의 연료혼합물을 상부 노즐에서 분사하였다. 각 노즐 내부에는 미세한 매쉬 스크린 (mesh screen)을 다단으로 설치하여 노즐 출구에서 균일한 유동속도를 갖게 하였고 이를 Fig. 3.3과 같이 마이크로 마노미터를 이용하여 검증하였다.

3.1.2 상부버너 냉각수 순환장치와 하부버너의 장막유동

화염 면으로부터 복사열전달에 의한 노즐의 과열 방지와 온도 경계조건의 유지를 위해 상부버너에 냉각수를 순환시켰다. 냉각수를 순환시키기 위한 냉각장치로서 상온의 물이 전기 모터로 강제 순환되어 냉매 측의 라디에이터를 통과하면서 열 교환되어 냉각된다. 냉각된 물은 냉각수 저장탱크에 저장하여 냉각수의 온도가 일정하게 유지되도록 하였다. 냉각수의 온도는 제어기에 의한 온도 세팅으로 자동 제어된다. 또한 연소 후 발생하는 배기가스와 질소가 쌓이는 것을 방지하기 위해 진공 펌프를 통해 외부로 배출시켰으며, 진공펌프의 맥동이 화염에 영향을 주지 않게 하기 위하여 버너 상부에 설치하지 않고 버너로부터 멀리 떨어진 곳에 설치하여 배출시

켰다. 대향류 버너 화염은 미세한 충격에도 영향을 받기 때문에 주위류의 영향을 최대한 받지 않도록 하였다. 외부로부터의 화염 교환을 막고 후류 (wake flow)에 의해 유지되는 외측 화염을 제거하기 위해 질소를 위한 장막 유동 (curtain flow)을 하부 버너의 외측 노즐에서 분사하여 실험하였다.

3.1.3. 질량유량 제어기

본 실험에 사용된 연료는 99.95%의 고순도 메탄 (CH_4)를 사용하였으며, 희석제로는 일발순도 질소 (99.95%)를 사용하였다. 또한 산화제로 고순도 (zero grade) 공기를 사용하였다. 대향류 버너로 공급되는 연료 및 산화제를 비롯한 모든 유체는 질량 유량제어기 (Mass Flow Controller, Bronkhost 사)를 통해 제어되며, 질량유량 제어기를 제어하는 장치 (Read-out Box, CDS사)는 컴퓨터를 통해 조절할 수 있도록 하였다. 질량유량 제어기는 최대 사용량의 약 $\pm 1\%$ 의 정확도를 가지고 있다. 최저 사용량과 최대 사용량 사이에서의 입력 값에 대한 실제 유량이 선형성 (linearity)를 나타내는지 확인하기 위하여 유량검정을 실시하였다. 유량검정은 유량 측정장

치(Bios Drycal Technology, The Definer 220)을 이용하여 분사되는 유체의 실제 유량을 측정 하였고, 측정된 실제 유량 값을 유량조절 프로그램에 입력하여 입력 값과 실제 유량 값이 일치하도록 보정(calibration)하였다.

모든 실험은 전체신장률 (Global Strain Rate)을 일정하게 유지시키면서 희석제의 공급 유량을 증가시키면서 실험하였고, 유량의 제어는 유량조절 프로그램을 통해 자동 제어되도록 하였다. 화염소화에서 임계 물분율의 측정은 소프트웨어를 이용하여 전체화염신장율을 고정시키고 희석제 물분율을 증가시키면서 화염 소화가 나타나는 조건을 찾음으로써 얻을 수 있다.

3.2 실험방법

3.2.1 대향류 화염의 소화특성 가시화

저 신장율 화염과 고신장율 화염의 영역을 확인하기 위해 디지털 미디어 카메라 (HDV 1080i, SONY사)와 고속카메라 (Phantom

v7.2)를 이용하였다. 진동하는 화염의 거동을 관찰하기 위하여 화염 정면에서 디지털 미디어 카메라로 촬영 (30 frame)하였고, 화염구멍을 통한 화염 소화과정을 관찰하기 위해 상부에서 고속카메라 (60 frame)를 이용하여 화염 거동을 관찰하였다. 고속카메라의 경우, frame 수를 높일 경우 노출 시간이 상대적으로 작아지기 때문에 60frame의 제한이 있었으며 이를 image processing을 통하여 화염 이미지를 취득하였다.

3.2.2. 화염분석을 위한 Matlab 기법

디지털 미디어를 통해 동적거동을 갖는 에지화염이 저장된 동영상은 상용소프트웨어 (Adobe Premiere Pro ver. 7.0)를 이용해 시분할 하였다. 상용소프트웨어를 통해 시분할 된 이미지는 1초에 30 frame의 파일 (720×480 pixel, JPG)이 획득된다. 이 이미지 파일은 Matlab 가반으로 분석하면 $720 \times 480 \times 3$ ($X \times Y \times n$) 크기의 매트릭스 (matrix) 형태를 취하게 된다. 여기서 3(n)은 720×480 의 매트릭스가 Red, Green, Blue의 3색의 강도 (intensity)를 규정짓는 각각의 매트릭스를 의미한다. 즉, 1개의 화소 (pixel)는 $1 \times 1 \times 3$ 의 매트릭스로 표

현된다. 이러한 매트릭스로 구성된 데이터에서 빛의 발광강도 (luminance intensity)의 정보를 추출하여 화염길이를 측정하게 된다. 단위 화소 (pixel)당 발광강도를 구하는 식[25]은 3.1과 같다.

$$Y \text{ (Luminance Intensity)} = (0.3 \times \text{Red}) + (0.59 \times \text{Green}) + (0.11 \times \text{Blue}) \quad (3.1)$$

3.2.3 실험 조건

앞서 언급된 대향류버너는 외부에 교란되는 화염을 제거할 수 있는 구조로 제작되었다. 18, 26, 그리고 46 mm의 세 가지 버너직경에 대해 15, 20 mm의 버너 간격을 두고 실험을 수행하였다.

다차원적 효과를 명확히 하기 위해 속도비와 전체신장율을 변화시키면서 실험을 수행하였다. 속도비의 범위는 1에서 5, 전체 신장율의 범위는 12에서 100 s^{-1} 이다. 전체 화염신장율의 정의는 다음과 같다.[24]

$$a_g = \frac{2V_a}{L}(1 + V_r \frac{\sqrt{\rho_f}}{\sqrt{\rho_a}}), V_r = \frac{V_f}{V_a} \quad (3.2)$$

여기서 V_r 는 속도비, V 와 ρ 는 반응물의 유동속도와 밀도를 나타내며, L 은 노즐간의 거리, 하첨자 f 와 a 는 각각 연료와 산화제를 나타낸다. 본 실험에서는 혼합층두께 (1.49 mm)와 부력에 의한 대류 속도 ($l = 15 \text{ mm}$ 경우 8.13 cm/s, $l = 20 \text{ mm}$ 경우 9.40 cm/s)를 평가하였고[25] 위의 값을 기준으로 실험에 영향을 주지 않는 범위내에서 실험을 수행하였다. 그 정의는 다음과 같다.

Mixing Length Thickness : $l = \frac{\sqrt{\alpha}}{\sqrt{a_g}} \quad (3.3)$

Buoyant Convection Velocity : $V_b = \sqrt{\frac{gl}{2}} \quad (3.4)$

여기서 α 는 열확산계수, a_g 는 전체화염신장율, g 는 중력가속도, 그리고 l 은 버너간의 거리를 나타낸다.

화염의 온도 측정은 열전대를 삽입함으로 인해 화염소화가 이루어지는 것을 방지하기 위해 화염 소화 지점의 임계 질소 물분율의

90% 조건에서 이루어 졌으며, 직경 75 μm 의 R-type 열전대를 이용하여 화염 중심으로부터 반경방향으로 0.5 mm 간격으로 화염 온도를 측정하였다.



제 IV장 실험결과 및 고찰

4.1. 화염 안정화 선도 및 화염 소화 거동

Fig. 4.1은 전체 신장율에 따른 화염 소화 한계 선도를 나타낸 그래프이다. 대향류 화염에서는 서로 반대로 흐르는 유동이 충돌하여 정체점 (stagnation point) 근처에서 화염이 형성되며, 이 지점은 수학적으로 1차원 상사성 (similarity)을 갖는다. 이때 상부 버너에 공급되는 연료에 질소를 지속적으로 공급하게 되면 화염이 불안정해지게 되며, 결국 소화한계에 달하게 되면 화염이 소화하게 된다. 화염이 소화될 때 전체신장율에 따라 임계 질소몰분율 (critical N_2 mole fraction)을 도식한 것이 화염 소화 한계 선도 (C-curve)이다. 저신장율 영역을 살펴보면, 버너 직경과 버너 간의 간격이 증가함에 따라 화염 소화 임계 질소 몰분율은 높게 나타나고, 속도비의 증가에 따라 화염 소화 임계 질소 몰분율은 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 그러나 열손실과 부력효과를 무시 할 수 있는 고신장율 영역에서는 화염 소화 임계 질소 몰분율이 하나의 곡선으로 일치함을 알 수 있으며, 이는 화염이 일차원 응답의 거동 특성을 따르고 있음을 의미한다.

Fig. 4.2는 전체 신장율에 따른 소염 직전의 화염 반경을 나타낸 것이다. 화염 반경은 화염 소화 임계 질소 물분율과 비슷하게 속도 비가 증가함에 따라 감소하고, 버너 직경과 버너 간격, 그리고 전체 신장율이 증가함에 따라 증가한다. 이는 식 4.1과 같이 이전 Park 등의 연구 결과에서 밝힌 바 있는 반경방향의 전도 열손실이 화염 반경에 반비례한다는 것과 잘 일치하고 있다.



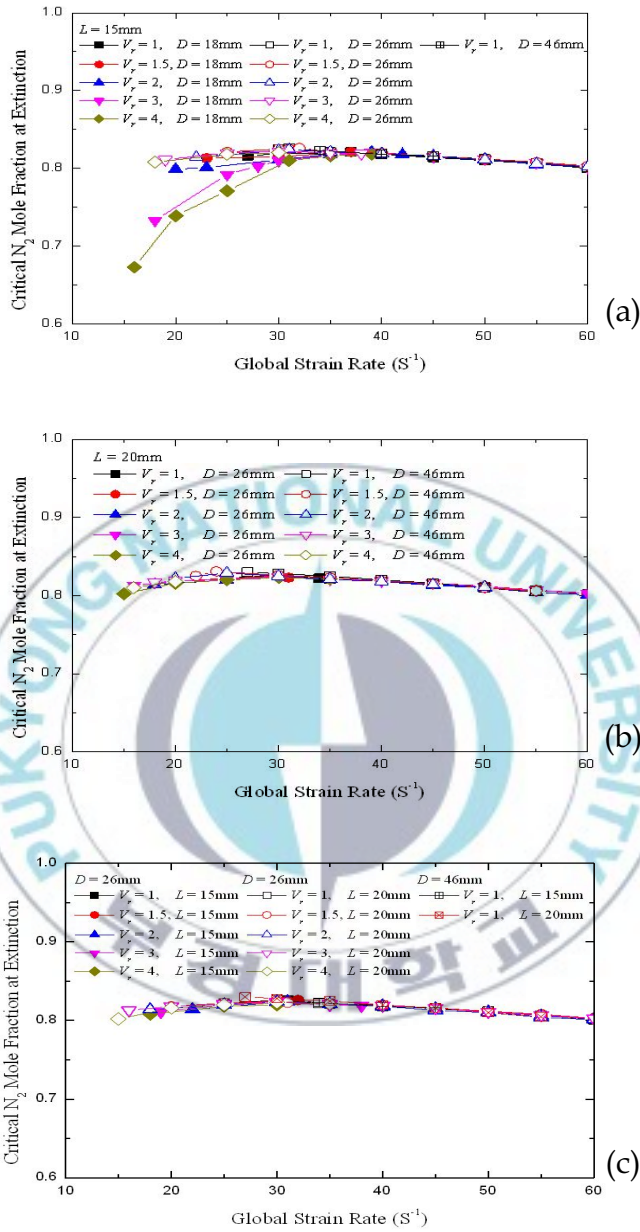


Fig. 4.1 Critical nitrogen mole fractions at flame extinction versus global strain rate.

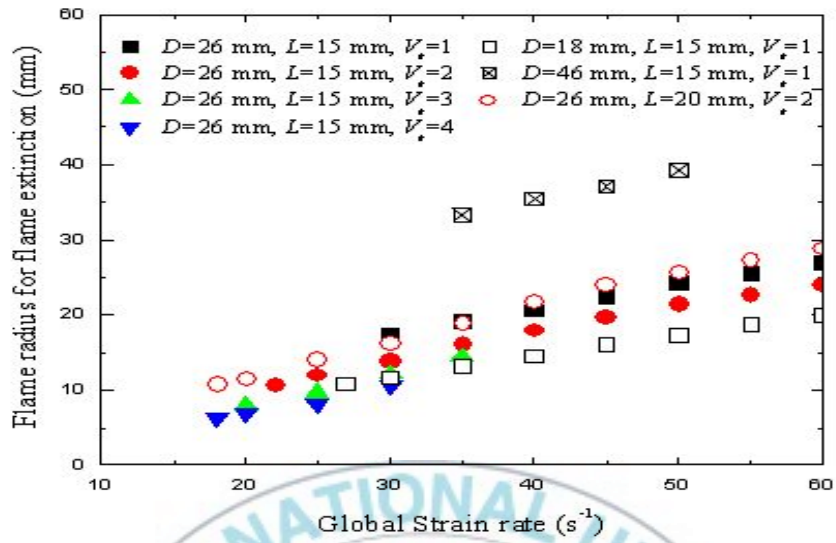


Fig. 4.2 Variation flame length with global strain rate at various flame conditions.

$$q = k \frac{\partial T}{\partial x} \sim \frac{1}{l_f} \quad (4.1)$$

where, l_f = Radial flame length

Fig. 4.3은 버너직경 26 mm에서 수행된 실험에서 대표적인 화염 소화 모드를 나타내었다. Regime I은 에지화염의 진동 후에 화염 중심으로 수축하며 소화하는 저신장율의 소화 영역이며, Regime III에서는 에지화염의 진동 없이 화염 중심에 화염 구멍이 생기며 소화가 이루어지는 고신장율의 화염 소화 영역이다. 그리고 Regime II는 에지화염의 진동 없이 화염 중심으로 수축하며 소화가 되는 Regime I과 Regime III의 천이영역에 해당한다. 따라서 화염 소화 모드는 전체 신장율에 따라 3가지의 Regime으로 구분되는 것을 알 수 있다. Table. 4.1은 각 실험 조건별로 나타난 화염 소화 모드를 분류해 놓은 것이다. 속도비가 증가할수록 고신장율 영역의 소화모드인 Regime III와 전환점은 고신장율 영역으로 이동하는 것을 알 수 있다. 또한 버너직경과 버너간격이 감소하거나 속도비가 증가할수록 저신장율의 화염 소화모드가 고신장율 영역 쪽으로 더욱 확장되어 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 화염길이가 감소할수록 반경방향의 전도열손실이 증가하여 반경방향의 전도열손실이 지배적으로 작용하여 나타나는 소화모드의 영향이 고신장율 영역으로 확장된 것으로 이해될 수 있으며 이전 Park 등의 연구결과에서 저신장율화염의 화염소화가 복사열손실에 추가하여 반경방향의 전도열손실에 기인한다고 보인 사실과 일치하고 있다.[10]

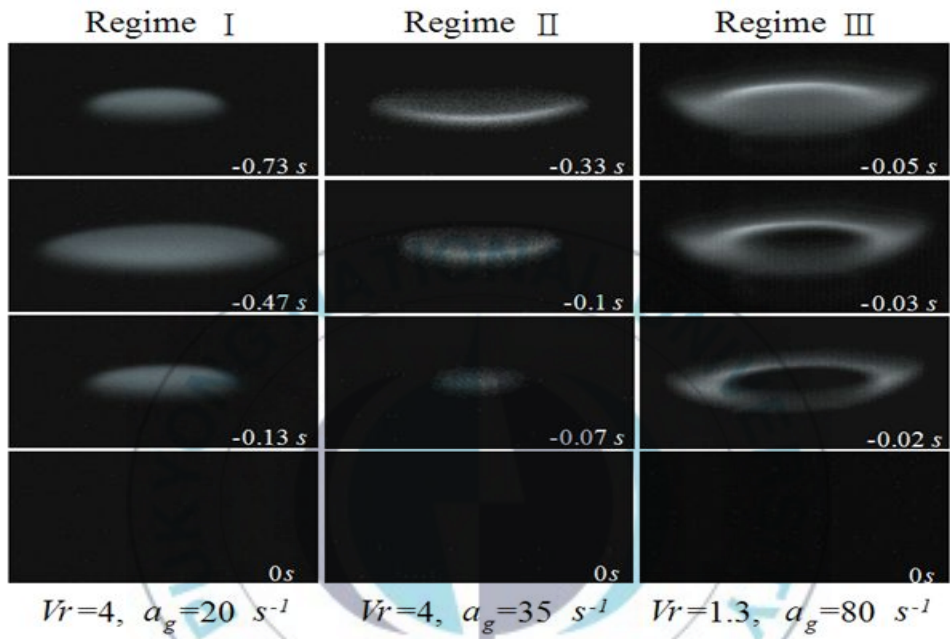


Fig. 4.3 Various flame extinction modes for the burner diameters of 26 mm

V_r	Regime	D=18 L=15 (mm)	D=26 L=15 (mm)	D=26 L=20 (mm)	D=46 L=15 (mm)	D=46 L=20 (mm)
		$a_{g_1} \text{ s}^{-1}$	$a_{g_2} \text{ s}^{-1}$	$a_{g_2} \text{ s}^{-1}$	$a_{g_1} \text{ s}^{-1}$	$a_{g_2} \text{ s}^{-1}$
1	I	-	-		-	-
	II	27-36	30	25-34	-	-
	III	$37 \leq$	$31 \leq$	$35 \leq$	$34 \leq$	$27 \leq$
	T.P.	37	31	30	-	-
1.5	I	-	-	-		-
	II	23-38	25-31	20-34		22-23
	III	$39 \leq$	$32 \leq$	$35 \leq$		$24 \leq$
	T.P.	37	31	30		24
2	I	≤ 23	≤ 28	≤ 27		-
	II	24-41	29-30	28-34		20-24
	III	$42 \leq$	$31 \leq$	$35 \leq$		$25 \leq$
	T.P.	39	31	30		25
3	I	≤ 28	≤ 28	≤ 28		-
	II	29-44	29-38	29-34		18-20
	III	$45 \leq$	-	$35 \leq$		-
	T.P.	39	32	31		-
4	I	≤ 30	≤ 29	≤ 29		-
	II	32-39	30	30-35		16-20
	III	-	-	-		-
	T.P.	-	-	32		-

Table 4.1 The classification of flame extinction modes at various flame conditions.

4.2. 화염 소화 메커니즘과 에지화염의 역할

앞 절의 Fig. 4.3에서 보인 바와 같이 화염 소화 모드는 신장율에 따라 3가지로 나누어 생각할 수 있다. 다시 화염 소화모드를 정리해보면 다음과 같다.

Regime I : 에지화염의 진동 후에 화염 중심으로 수축하며 소화하는 저신장율의 소화 영역

Regime III : 에지화염의 진동 없이 화염 중심에 화염 구멍이 생기며 소화가 이루어지는 고신장율의 화염 소화 영역

Regime II : 두 영역사이의 천이 영역으로 화염의 진동 없이 에지화염이 화염 중심으로 수축하며 소화하는 영역

이와 같이 화염의 소화 거동이 상이하게 나타나는 것을 명확히 알아보고자 각 영역에서 화염 표면 온도를 측정하여 Fig. 4.4에 나타내었다. 온도 측정은 소화 임계 지점에서 측정을 하게 되면 열전대로 인해 화염이 소화되는 것을 막기 위해 소화 임계 지점의 90%조건에서 진행되었다.

먼저 $16s^{-1}$ 의 그래프를 보면 화염의 중심이 가장 온도가 높고 가장자리로 갈수록 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 $30s^{-1}$ 에서도 화염 중심이 가장 온도가 높지만 반경에 따라 미약하게 감소하다가 약 13 mm 지점에서부터 가파르게 감소하는 모습을 볼 수 있

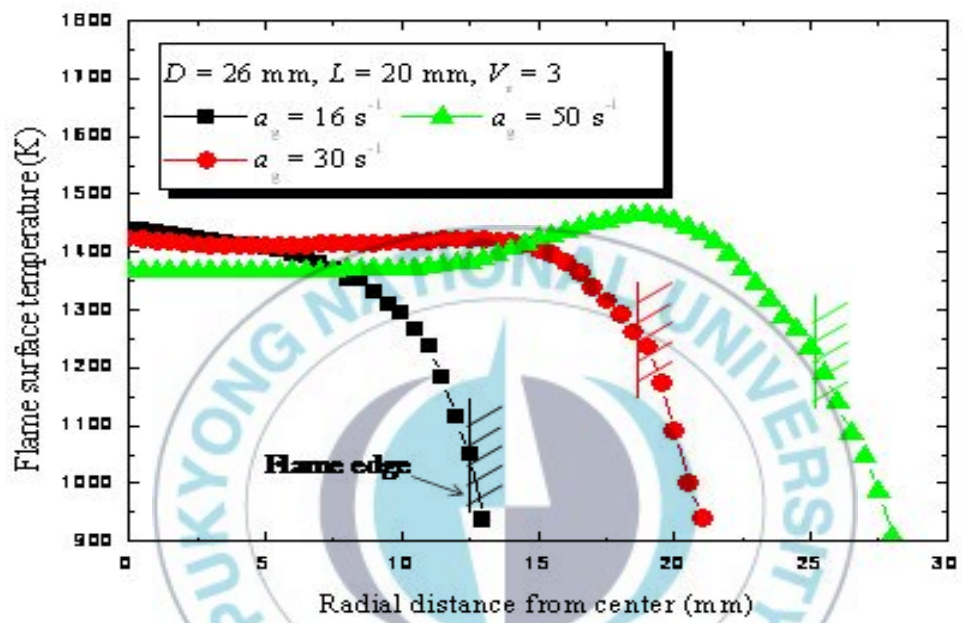


Fig. 4.4 Measured the flame surface temperatures at 90%-dilution condition of flame extinction.

다. 그러나 50 s^{-1} 에서는 화염중심이 가장 온도가 낮게 나타나고 약 11mm지점에서 온도가 미약하게 증가하다가 약 17mm지점에서 가장 높은 온도를 나타내고 급격히 감소하였다. 이러한 온도 분포가 화염 안정화 또는 불안정화에 어떻게 영향을 미치는지는 차후 수치 해석 결과와 비교하여 언급하겠다.

Fig. 7은 DNS방식으로 수행한 수치해석으로 얻은 화염 소화 지점의 90%희석 조건에서 전체신장율에 따른 바깥 에지화염의 전도열 손실을 나타낸 것이다. 그래프에 표시한 Regime은 전체신장율에 따라 3가지의 소화모드가 나타나는 영역을 표시한 것이다. 전도열 손실은 Regime I에서 Regime II로 전화되는 동안 급격히 감소하고, Regime III까지는 조금씩 감소한다. 이는 Regime이 I에서 III으로 갈수록 전체 신장율은 증가하고, 화염길이 또한 증가 하는데 화염 길이는 반경방향의 전도 열손실과 반비례 관계에 있기 때문에 고신장율로 갈수록 전도열손실이 감소하는 것으로 볼수 있다. 이러한 온도분포와 반경방향의 전도열손실이 화염 소화 거동과 진동 현상에 어떻게 작용하는지 규명하기 위해 수치해석을 수행하였다.

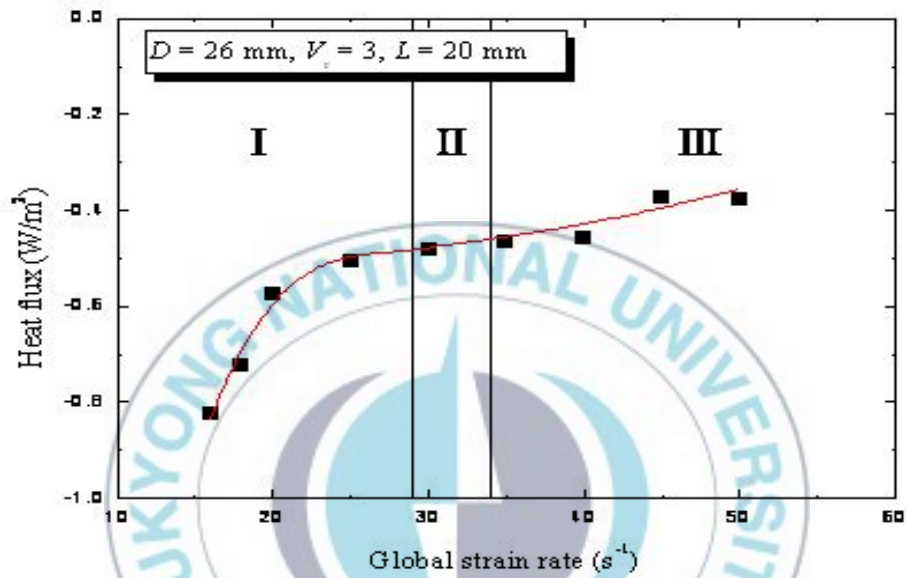


Fig. 4.5 Conductive heat loss at the outer flame edge versus global strain rate at 90%-dilution of flame extinction in case of $L=20\text{mm}$, $D=26\text{mm}$, and $V_r=3$.

Fig. 4.6은 Oh 등이 수행한 연구에서[40] 이용된 계산 방법을 이용하여 전체 신장울에 따라 화염 에지부분과 화염 중심 부분의 에너지 방정식의 각 항을 분석하여 그래프로 나타낸 것이다. 수치해석에 사용된 에너지 방정식은 식 4.2와 같다.

$$\underbrace{\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}}_{Tr} = - \underbrace{\rho c_p u \frac{\partial T}{\partial x}}_{C_x} + \underbrace{- \rho c_p v \frac{\partial T}{\partial r}}_{C_r} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right)}_{D_x} + \underbrace{\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right)}_{D_r} \\ + \underbrace{\sum_{i=1}^n \rho c_{p_i} D_{im} \frac{\partial Y_i}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x}}_{M_x} + \underbrace{\sum_{i=1}^n \rho c_{p_i} D_{im} \frac{\partial Y_i}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r}}_{M_r} + \underbrace{\dot{q}_r}_{R_s} - \underbrace{\sum_{i=1}^n W_i h_i^o \dot{\omega}_i}_{C_s}$$

식 4.2

위 식에서 Cx항과 Cr항은 각각 축 방향과 반경방향의 대류 항, Dx항과 Dr항은 축 방향과 반경방향의 전도 항, Mx항과 Mr항은 축 방향과 반경방향의 확산에 의한 에너지 전달 항, Ra항은 복사열 손실 항, Cs항은 화학 에너지 항을 나타낸다.

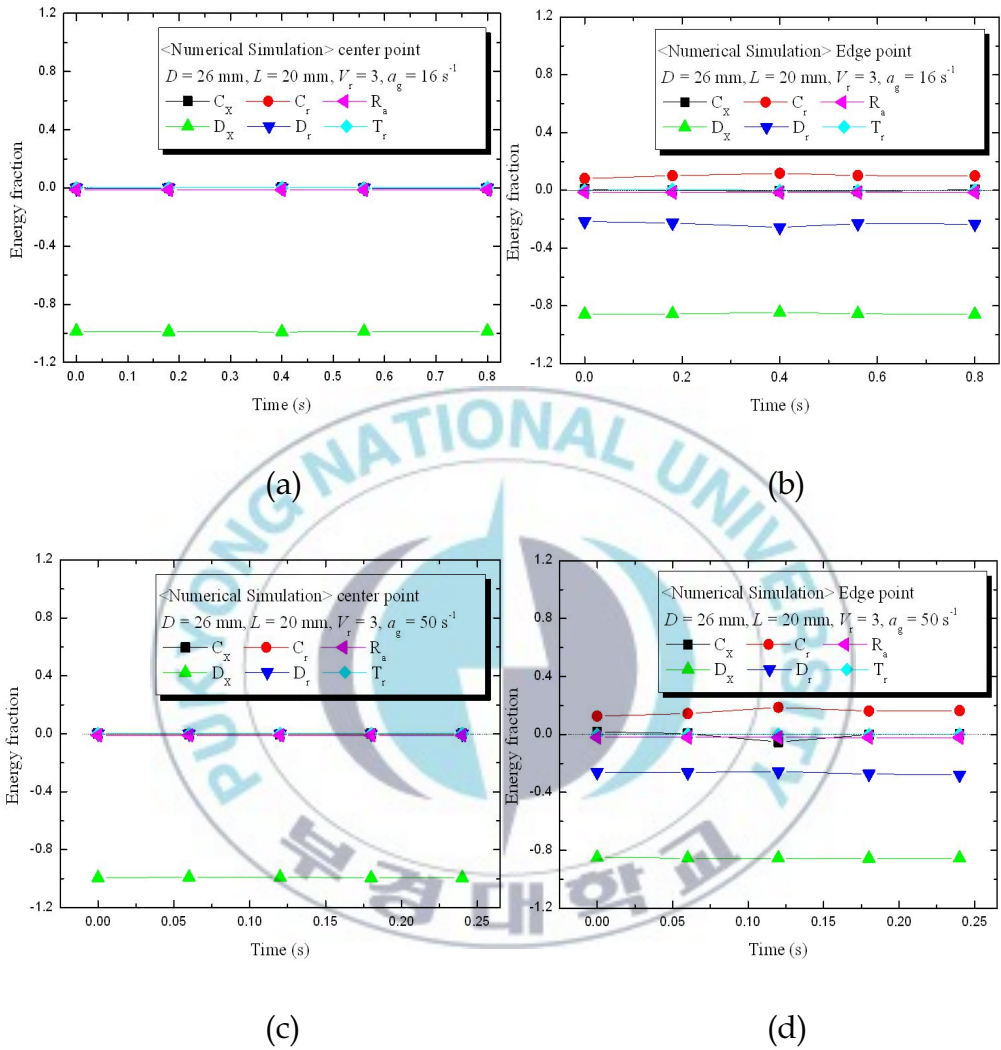


Fig. 4.6 Temporal variations of the individual energy fraction at the flame center and near the flame edge at the representative low and high strain rate flames in normal gravity.

Fig. 4.6의 화염 중심부의 결과를 살펴보면 고신장울과 저신장울 화염 모두 축방향의 전도열손실이 가장 크게 나타났으며, 다른 항들은 무시할 수 있을 정도로 낮게 나타났다. 반면, 에지부분의 경우를 살펴보면 축방향의 전도열손실에 추가하여 반경방향 전도열손실과 반경방향의 대류 항이 우세하게 나타났다. 특히, 복사 열손실의 항은 중심부분과 에지 부분에서 모두 매우 낮은 값을 갖고 있는 사실을 알 수 있는데, 이는 유한한 버너직경에서의 화염 소화에 전도열손실의 영향이 복사 열손실보다 더 지배적으로 작용한다는 것을 다시 확인 할 수 있다.

한편, 고신장울 화염의 경우에 반경 방향의 대류 항이 양의 값을 가지며 저신장울 영역보다 눈에 띄게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 고신장울 영역의 화염에서는 화염 중심으로부터 에지부분으로의 전도를 통한 열 공급 외에도 반경방향의 대류항이 화염 안정화에 기여한다는 것으로 이해될 수 있다.

앞서 보인 화염 온도 측정으로 통한 화염구조와 수치해석 결과를 통해 전체 신장울에 따른 각 Regime 별 화염 소화 메커니즘을 다음과 같이 설명할 수 있다. Fig. 4.6 에서 보인 바와 같이 저신장울 영역에서 에지화염은 반경방향의 대류 항에 비해 반경방향의 전도열손실이 지배적으로 나타났다. 대향류확산화염의 정지화염에서 에

지화염의 전파속도는 국부 유동속도와 균형을 이루게 되며, 서로 균형을 이루기 위해서 에지화염의 전파속도는 기연가스 쪽으로 전파하는 음의 전파속도를 가지게 된다. 에지화염의 전파속도는 희석제의 첨가와 열손실로 인해 음의 방향으로 커지게 되며, 이는 화염 소화 시에 화염이 수축하는 현상으로 나타난다. 그리고 Fig. 4.4 에서 16 s^{-1} 인 저신장을 화염의 그래프를 살펴보면 화염 온도가 화염 중심부가 가장 높고 반경에 따라 급격하게 낮아지는 모습을 볼 수 있다. 이 때문에 화염 중심으로부터 에지화염으로 충분한 열 공급을 하게 되고 화염은 다시 팽창되며, 이는 에지화염 진동이 나타난다. 그 후, 희석제가 계속 첨가됨에 따라 전체적으로 화염의 강도가 약해지게 되며, 따라서 화염 중심으로부터 충분한 열 공급을 할 수 없게 되어 수축하는 화염이 다시 팽창하지 못하고 화염이 소화되게 된다. 이러한 현상은 저신장을의 화염 소화 거동으로 Fig. 4.3 의 Regime I 영역에 해당한다.

Fig. 4.4 의 30 s^{-1} 에 해당하는 전체 신장을이 다소 높아진 경우에는 온도는 여전히 화염중심이 높게 나타나고 있으나, 유한한 거리의 반경까지 거의 온도 변화가 없다가 급격히 낮아지는 것을 볼 수 있다. 또한, 16 s^{-1} 인 저신장을 화염의 그래프와 비교하였을 때 화염 온도가 낮아지는 기울기가 비교적 완만하다는 것을 알 수 있다. 이

러한 요인은 희석제가 계속 첨가됨에 따라 전체적으로 화염의 강도가 약해지게 되어 에지화염이 화염 중심부로 수축하게 될 때, 화염 중심부에서 에지화염으로 충분한 열 공급이 되지 않아 다시 팽창하지 못하고 바로 화염이 소화하게 한다. 이는 Fig. 4.3에 나타난 진동 없이 수축하며 화염이 소화되는 Regime II의 소화 모드가 된다.

반면 고신장울의 에지화염은 중심부보다 에지부분이 온도가 더 높고, Fig. 4.6의 결과와 같이 반경방향의 전도 열손실과 함께 반경방향의 대류항도 지배적으로 작용한다. 그러므로 고신장울 영역의 에지화염에서는 반경방향의 대류 항이 에지화염의 안정화에 기여하게 되고, 희석제의 첨가에 따라 화염의 강도가 약해짐에 따라 화염의 소화 시에 에지화염이 수축하는 현상이 나타나지 않고, 온도가 가장 높은 상태로 안정하게 유지된다. 따라서 화염 온도가 가장 낮게 나타나는 화염 중심부에서 화염 소화가 가장 먼저 일어나면서 화염 구멍(Flame hole)이 생겨서 소화가 이루어지게 된다. 이것이 고신장울의 화염 소화모드인 Regime III의 소화모드에 해당된다. 이처럼 유한한 버너직경의 대향류 확산화염에서 화염 진동과 소화 메커니즘은 에지화염의 불안정으로 설명 될 수 있으며, 에지화염은 화염소화에 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

이러한 화염 소화 메커니즘에서도 알 수 있듯이, 유한한 직경의

대향류 확산화염의 화염 소화가 전도 열손실에 지배적으로 기인한
다는 Park 등의 지난 연구결과와 잘 일치함을 알 수 있다.[10]



제 V 장 결 론

질소를 희석한 메탄-공기 대향류 확산화염에 대한 실험과 수치해석을 통해 화염 소화 모드와 각 화염 소화 모드의 메커니즘을 규명하고, 에지화염이 화염 소화에 미치는 영향을 명확히 알아보고자 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 화염 소화 임계 질소 물분율은 전체 신장율에 따라 전형적으로 C-curve 형태로 나타났다. 화염 소화 모드는 세 가지로 나눌수 있으며 다음과 같다.

Regime I : 에지화염의 진동 후에 화염 중심으로 수축하며 소화하는 저신장율의 소화 영역

Regime III : 에지화염의 진동 없이 화염 중심에 화염 구멍이 생기며 소화가 이루어지는 고신장율의 화염 소화 영역

Regime II : 두 영역사이의 천이 영역으로 화염의 진동 없이 에지화염이 화염 중심으로 수축하며 소화하는 영역

2) 신장율에 따른 화염 표면 온도 측정과 저신장율과 고신장율에서의 수치해석을 통해 얻은 결과로 각 Regime 별 화염 소화 메커니즘을 규명하였다.

Regime I : 에지화염의 전파속도가 희석제의 첨가와 열손실로 인

해 음의 방향으로 커짐에 따라 에지 화염이 화염 중심부로 수축하게 되는데, 저신장을 화염의 표면 온도는 화염 중심부가 가장 높고 반경에 따라 급격하게 낮아지기 때문에 화염 중심으로부터 에지화염으로 충분한 열 공급을 하게 되고 화염은 다시 팽창되며, 이는 에지화염 진동이 나타난다. 그 후, 희석제가 계속 첨가됨에 따라 전체적으로 화염의 강도가 약해지게 되며, 따라서 화염 중심으로부터 충분한 열 공급을 할 수 없게 되어 수축하는 화염이 다시 팽창하지 못하고 화염이 소화되게 된다.

Regime II : 화염 표면 온도는 여전히 화염중심이 높게 나타나고 있으나, 유한한 거리의 반경까지 거의 온도 변화가 없다가 급격히 낮아진다. 또한, 저신장을 화염의 그래프와 비교하였을 때 화염 온도가 감소하는 기울기가 비교적 완만하며, 이러한 요인은 희석제가 계속 첨가됨에 따라 전체적으로 화염의 강도가 약해지게 되어 에지 화염이 화염 중심부로 수축하게 될 때, 화염 중심부에서 에지화염으로 충분한 열 공급이 되지 않아 다시 팽창하지 못하고 바로 화염이 소화하게 한다.

Regime III : 고신장을의 에지화염은 중심부보다 에지부분이 온도가 더 높고, 반경방향의 전도 열손실과 함께 반경방향의 대류항도 지배적으로 작용한다. 반경방향의 대류 항이 에지화염의 안정화에

기여를 하게 되고, 희석제의 첨가에 따라 화염의 강도가 약해짐에 따라 화염의 소화 시에 예지화염이 수축하는 현상이 나타나지 않고, 온도가 가장 높은 상태로 안정하게 유지된다. 따라서 화염 온도가 가장 낮게 나타나는 화염 중심부에서 화염 소화가 가장 먼저 일어나면서 화염 구멍(Flame hole)이 생겨서 소화가 이루어지게 된다.



감사의 글

2005년 3월.. 부경대 기계공학과로 입학하여 군 전역 후 우연한 기회로 연소 및 추진 실험실에 들어온 게 엇그제 같은데 어느덧 석사 과정을 수료하게 되었습니다. 제가 여기까지 오기까지 많은 분들의 도움이 있었기에 이 작은 결실의 기쁨을 함께 나누고자 합니다.

우선, 표현 그대로 아무것도 모르던 저를 목표를 갖게 하시고 게으르고 느릿한 저를 지금까지 이끌어주신 박정교수님 진심으로 고개 숙여 감사의 뜻을 전합니다. 항상 부족한 저를 가르치면서 연구자의 방향과 사내대장부로서 인생을 살아가야 할 길을 깨우치게 해주신 점과 더불어 제가 새로운 꿈과 목표를 가지게 해준 점에 진심으로 감사드립니다.

세미나를 통해 부족한 부분을 지적해주시고 많은 조언을 해주신 배대석 교수님 그리고 이도형 교수님, 김제도 교수님, 비록 다른 과에 계시지만 항상 진심어린 조언을 해주신 오창보 교수님, 이의주 교수님께 깊이 감사드리며, 대학원 과정동안 배움의 깊이를 더해주시는 기계공학과 모든 교수님께도 감사드립니다.

졸업 후에도 자기 일 같이 신경써주시고, 실험에 대해 그리고 인생에 대해 항상 같이 고민해주시고 KAUST에서 현재 박사과정 중인 박대근 형님과 일본에서 박사과정 중인 윤성환 형님에게도 진심으로 감사드리며, 앞으로 유학 잘 마치고 원하는 꿈을 이루기를 기원합니다. 그리고 많은 조언과 실험에 필요한 부분을 지원해주신 한국기계연구원에 윤진한박사님, 길상인 박사님, 한국전력연구원에 김태형 차장님, 박호영 박사님, CSK의 김승곤박사님, 한국선급의 박준성박사님에게도 감사의 말씀드립니다.

실험실에 같은 날 들어왔지만 나이 한 살 적다는 이유로 여러 궂은일을 도맡아 하며 많이 고생한 무결점을 추구하는 호랑이 선생 송원식과 실험실 실장을 이어 받아 앞으로 실험실을 꾸려가게 될 여자를 너무 좋아하는 사고뭉치Ⅰ 동갑 이원준, 그리고 뒤늦게 연구를 시작해 항상 밤을 새워가며 고생하는 동갑내기 정승욱에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 그리고 항상 조용히 제 일을 하는 재미없는 임승재와 제 연구 테마를 물려받는 용당 핵잠수함 사고뭉치Ⅱ 반규호, 최근 가슴근육을 좋아하는 여자친구와 연애를 시작한 박진욱, 이제 막 들어와 아직은 어리둥절한 본전생각에 사로잡힌 카메론 출신 이동원, 학원수학선생님 김경택에게도 감사의 마음을 드리며, 그리고 같은 테마로 연구를 함께 한 한수원의 박인식 팀장님께도 감사의 말씀드립니다. 각자 자신의 위치에서 맡은 바에 최선을 다하여 뛰어난 연구자가 되어 멋진 모습을 기대합니다. 다른 실험실이지만 같이 수업을 들으며 여러 가지 추억을 함께 한 이호현, 박지웅, 전영훈, 김유정에게도 감사드리며, 앞으로 좋은 일이 가득하기를 기원합니다.

오늘의 제가 있기까지 돌보아 주신 부모님 감사드리고, 제가 항상 실험실에 있어서 집안일에 소홀히 한 부분을 메워준 저의 동생에게도 감사한 마음을 전하고 싶습니다.

2014 년 01월

정 용 호 올림

참고문헌

- [1] H. Tsuji, "Counterflow Diffusion Flames", Energy Combust., Vol. 9, 1982, pp. 93-119.
- [2] M.D. Smooke, I.K. Puri, K. Seshadri, "A comparison Between Numerical Calculations and Experimental Measurements of the Structure of a Counterflow Diffusion Flame Burning Diluted Methane in Diluted Air", Combust. Inst. 1986, pp. 1783-1792.
- [3] N. Peters, R.J. Kee, "The Computation of Stretched Laminar Methane-Air Diffusion Flames Using a Reduced Four-Step Mechanism", Combust. Flame., Vol. 68, 1987, pp. 17-29.
- [4] H.K. Chelliah, C.K. Law, T. Ueda, M.D. Smooke, F.A. Williams, "An Experimental and Theoretical Investigation of the Dilution, Pressure and Flow-field Effects on the Extinction Condition of Methane-Air-Nitrogen Diffusion Flames", Combust. Inst. Vol. 23, 1990, pp. 503-511.
- [5] C.-J. Sung, J.B. Liu, C.K. Law, "Structural Response of Counterflow Diffusion Flames to Strain Rate Variations", Combust.

Flame., Vol. 102, 1995, pp. 481-492.

[6] M. D. Smooke, R.A. Yetter, T.P. Parr, D.M. Hanson-Parr, M.A. Tanoff, M.B. Colket, R.J. Hall, "Computational and experimental study of ammonium perchlorate/ethylene counterflow diffusion flames", Combust. Inst., Vol. 28, 2000, pp. 2013-2020.

[7] F. C. Frate, H. Bedir, C. J. Sung, J. S. Tien, "On flammability limits of dry CO/O₂ opposed-jet diffusion flames", Proc. Combust. Inst., Vol. 28, 2000, pp. 2047-2054.

[8] Han B, Ibarreta AF, Sung CJ, Tien JS, "Experimental low-stretch gaseous diffusion flames in buoyancy-induced flowfields", Proc. Combust. Inst. Vol. 30, 2005, pp. 527-535.

[9] Maruta K, Yoshida M, Guo H, Ju Y, Niioka T., "Extinction of Low-Stretched Diffusion Flame in Microgravity", Combust. Flame, Vol. 112, 1990, p181-187.

[10] J. S. Park, D. J. Hwang, J. Park, J. S. Kim, S. C. Kim, S. I. Keel, T. K. Kim, D. S. Noh, "Edge flame instability in low-strain-rate counterflow diffusion flames", Combust. Flame, Vol. 146, 2006, p612-619.

- [11] C. B. Oh, Hamins A, Bundy M, J. Park, "The Two-Dimensional Structure of Low strain rate Counterflow Nonpremixed-Methane Flames in Normal and Microgravity", *Combust. Theory Modeling*, Vol. 12(2), 2008, p283-302.
- [12] D. G. Park, J. H. Yun, J. Park, S. I. Keel, "A Study on Flame Extinction Characteristics along a C-curve", *Energy and Fuels.*, vol. 23, 2009, pp. 4236-4244.
- [13] S. H. Chung, Proc. "Stabilization propagation and instability of tribachial triple flame", *Combust. Inst.*, Vol. 31, 2007, pp. 877 - 892.
- [14] G.R. Ruetsch, L. Vervisch, A., Liñán, "Effects of heat release on triple flames", *Phys. Fluids.*, Vol. 7 1995, pp. 1447-1454.
- [15] S.H. Yoon, J.K. Han, J. Park, J.H. Yun, S.I. Keel, "Self-excitation in laminar free-jet propane flames diluted with nitrogen", *Combust. Flame.*, 2011
- [16] Kolmogorov, A. N., Fomin, S. V., "Elements of the Theory of Functions and Functional Analysis", Dover Pubns, ISBN-10 : 0486406830, ISBN-13 : 9780486406831, 1999.
- [17] Peters, N., "Laminar Diffusion Flamelet Models in

Non-premixed Turbulent Combustion", *Prog. Energy Comb. Sci.*, Vol. 10, pp.319-339, 1984.

[18] Puri, I. K. and Seshadri, K., "Extinction of Diffusion Flames Burning Diluted Methane and Diluted Propane in Diluted Air", *Combustion and Flame*, Vol. 65, pp. 137-150, 1986.

[19] Peters, N., Kee, R. J., "The computation of stretched laminar methane-air diffusion flames using a reduced four-step mechanism", *Combustion and Flame*, Vol. 68(1), pp. 17-29, 1987.

[20] Seshadri, K., Puri, I., Peters, N., "Experimental and theoretical investigation of partially premixed diffusion flames at extinction", *Combustion and Flame*, Vol. 61(3), pp. 237-249, 1985.

[21] Nanduri, J. R., "A Computational Study of Structure, Dynamic Response, and Extinction Characteristics of Edge Diffusion Flames", *Master's Thesis*, Case Western Reserve University, 2002

[38] Park, J. S., "Dynamic Behaviors of Oscillation Edge-Flame in Low Strain Rate Counterflow Diffusion Flames", *Master's Thesis*, Sunchon national university, 2008.

[39] Williams, F. A., "Combustion Theory", *The*

Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc., 1985, pp.350-352

[40] C. B. Oh, C. Lee, J. Park, "Numerical Investigation of Extinction in Counterflow Nonpremixed Flame Perturbed by a Vortex", *Combust. Flame*, 138 (2004) 225-241.



Role of Outer Edge Flame on Flame Extinction in Counterflow Diffusion Flames

Yong Ho Chung

Department of Mechanical Engineering and Interdisciplinary
Program of Marine-Bio,
Electrical & Mechanical Engineering,
Graduate School
Pukyong National University

Abstract

The present study in nitrogen-diluted non-premixed counterflow flames with finite burner diameter experimentally investigates the important role of outer edge flame in flame extinction. Flame stability diagrams mapping the flame extinction response of nitrogen-diluted non-premixed counterflow flame to varying global strain rate in terms of burner diameter, burner gap, and velocity ratio are explored. There exists a critical nitrogen mole fraction beyond which the flame cannot be sustained, and also the curves of critical nitrogen mole fraction versus global strain rate have C-shapes in terms of burner diameter, burner gap, and velocity ratio. At the sufficiently high strain rate flames, the critical nitrogen mole fractions with global strain rate collapse into one curve and the flames can be of 1-D flame response of typical diffusion

flame. Three flame extinction modes are identified: flame extinctions through the shrinkage of outer edge flame with as well as without having an oscillation of the outer edge flame prior to the extinction and flame extinction through a flame hole at the flame center. Measured flame surface temperature and numerical evaluation of the fractional contribution of each term in energy equation show that the radial conductive heat loss at flame edge destabilizes the outer edge flame and the conductive heat addition as well as the convection heat addition to the outer edge from trailing diffusion flame to outer edge stabilizes the outer edge flame. The radial conductive heat loss at flame edge is the dominant extinction mechanism through the shrinkage of the outer edge flame.

