



저작자표시-비영리 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 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 박 사 학 위 논 문

부력이 최소화된 대향류확산화염
소화거동에 관한 연구



2014年 2月

부 경 대 학 교 대 학 원

기 계 공 학 과

박 인 식

Thesis for the Doctor of Philosophy of Engineering

Study on Flame Extinction Behavior
in Buoyancy-minimized Counterflow
Diffusion Flame



by

In Sik Park

Department of Mechanical Engineering

The Graduate School

Pukyong National University

February 2014

공 학 박 사 학 위 논 문

부력이 최소화된 대향류확산화염
소화거동에 관한 연구

지도교수 박 정

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함

2014년 2월

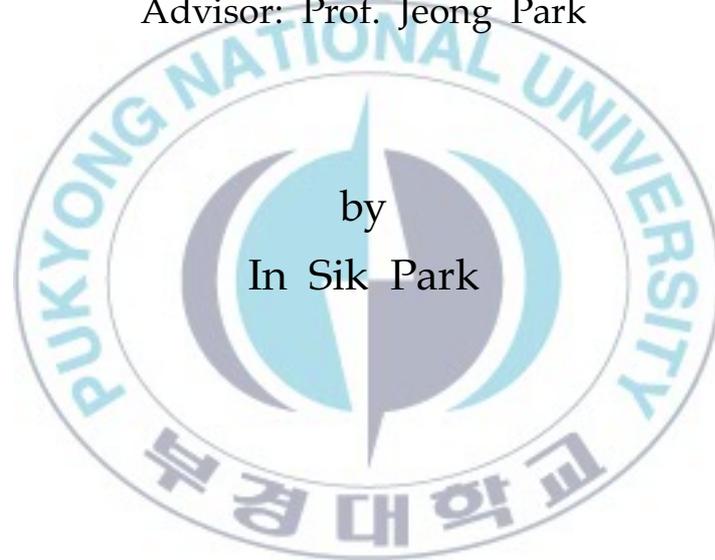
부 경 대 학 교 대 학 원

기 계 공 학 과

박 인 식

Study on Flame Extinction Behavior in Buoyancy-minimized Counterflow Diffusion Flame

Advisor: Prof. Jeong Park



by
In Sik Park

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements
for the degree of

Doctor of Philosophy

in Department of Mechanical Engineering,
The Graduate School, Pukyong National University

February 2014

박인식의 공학박사 학위논문을
인준함.

2014 년 2 월 21 일



주	심	공학박사	권 오 봉 (인)
위	원	공학박사	유 춘 상 (인)
위	원	공학박사	이 창 용 (인)
위	원	공학박사	김 제 도 (인)
위	원	공학박사	박 정 (인)

목 차

목차	i
Nomenclature.....	iii
초록	iv
제 I 장 서 론	1
제 II 장 이론적 고찰.....	14
2.1 대향류 확산화염	14
2.2 S-curve 거동 특성.....	17
2.3. 대향류 확산화염 수치해석.....	21
제 III 장 실험장치 및 방법.....	30
3.1 실험장치	31
3.1.1 대향류버너.....	31
3.1.2 상부버너 냉각수 순환장치와 장막유동.....	33
3.1.3 질량유량 제어기.....	34
3.2 실험방법.....	36
3.2.1 대향류화염의 소화특성 가시화.....	36

3.2.2 화염분석을 위한 Matlab 기법.....	37
3.2.3 실험조건.....	38
3.2.4 부력의 제거.....	39
제 IV장 실험결과 및 고찰.....	42
4.1 부력이 제거된 대향류화염의 소화거동.....	42
4.2 대향류 확산화염의 진동과 부력.....	49
제 V장 결 론.....	57
감사의 글.....	59
참고문헌.....	61
영문초록.....	66



Nomenclature

a	: Local strain rate
a_g	: Global strain rate
D	: Burner diameter
g	: Acceleration of gravity
k	: Thermal conductivity of gaseous mixture
L	: Separation distance between the fuel and the oxidizer nozzles
l_f	: Flame length
l_m	: Mixing length thickness
q_r	: Radial conductive heat loss
r_f	: Flame radius
T	: Temperature
T_{\max}	: Maximum flame temperature
V_F	: Nozzle exit velocity in the fuel side
V_r	: Velocity ratio
V_a	: Nozzle exit velocity in the oxidizer side
V_b	: Buoyancy-induced Convection Velocity
X_i	: Mole fraction of chemical species i
z	: mixture fraction

부력이 최소화된 대향류확산화염 소화거동에 관한 연구

박 인 식

부 경 대 학 교 대 학 원
기 계 공 학 과

초 록

대향류 확산화염의 화염 거동에 대해 진행된 기존의 연구들을 명확히 하기 위해 부력을 제거한 조건에서 실험을 진행하였다. 상온에서 헬륨의 밀도와 화염대 밀도의 차이가 매우 적은 것에 주목하여 대향류 환경에서 장막유동을 헬륨으로 선택함으로써 10^2 - 10^3 g 수준의 미소 중력 환경을 얻을 수 있는 실험 기법을 개발하였다. 실험은 화염의 점화 후에 연료측에 희석제의 물분율을 증가시키는 형식으로 진행되었고, 장막유동에 질소를 첨가하는 형식으로 주위 분위기를 형성하는 혼합기체의 밀도를 조정함으로써 부력의 크기를 점차 증가시키며 수행하였다.

전체 신장률에 따른 연료 희석제의 화염소화 임계물분율은 C-커브 형태로 나타났으며, 순수 메탄화염에서 화염이 소화되는 임계 전체신장률은 4.7 s^{-1} 이며, 이는 본 연구에서 사용되었던 26 mm 직경의 버너보다 큰 버너를 사용하였을 경우 임계 전체신장률은 더 낮은 값을 가질 것이라 판단된다.

한편 부력을 제거하였을 경우 화염은 전체신장률과 희석제의 물분율에 관계없이 약 4~5 Hz의 진동이 발생하였으며, 이는 부력과 관계있는 것으로 판단하고 장막유동에 질소를 첨가하는 형식으로 밀도를 달리하여 부력의 크기를 조절한 결과 부력의 크기가 증가할수록 진동주파수는 감소하는 것을 알 수 있었다. 부력이 증가하면 진동 주파수는 감소하는 것을 보면 부력이 화염 소화 직전 나타나는 화염 불안정성을 억제한다는 것을 알 수 있었다. 또한 이러한 진동을 유발하는 요인에 대해서는 루이스 수라고 판단하고 있으나, 이를 명확히 하기 위해서는 후속 연구 진행이 필요하다.

제 1장 서 론

1960년대 달에 가기 위한 우주 개발 경쟁을 하던 미국과 러시아는 각각 전선 화재(electric wire-fire)로 우주인들이 목숨을 잃는 문제를 겪었다. 우주개발 초기 러시아는 1961년 순수 산소로 가득 채워진 실험 장비 속에서 우주인 발렌티나 본다렌코가 화재로 사망하는 사건이 발생했다. 순수 산소를 사용하면 탑재부 부분 압력(partial pressure)이 감소하여 우주선의 벽을 얇게 할 수 있어 무게를 줄이는 효과가 있었기 때문이다. 이후 러시아는 순수 산소 대신 공기를 사용해야 함을 알았지만, 이러한 사실을 알지 못한 미국은 1967년 아폴로 1호를 발사하기 한달 전 Saturn 로켓을 사용한 지상 실험에서 이중으로 우주선 문을 굳게 닫고 지상 모의실험을 하던 중에 전선 화재(electric wire-fire)가 발생하여 우주인 3명이 모두 목숨을 잃는 사건이 발생하여 아폴로 1호 발사 미션은 실패하였다. (Figure 1.1)

국제우주정거장에서 화재 발생은 대부분 전선화재에 기인하며, 전선이 수북이 쌓여 있는 국제우주정거장은 누전과 과전류로 인한 화재에 언제나 노출되어 있는 상황이다. 또한 국제우주정거장에서

화재가 발생하는 경우 water spray를 사용하게 되면 전자 장치들의 고장을 유발하고 Halon의 경우 우주인들에게는 치명적이기 때문에 질소, 헬륨, 이산화탄소 등의 가스 소화제를 사용해 화재 진화를 하고자 하는 연구들이 미국 NASA와 일본 JAXA 등에서 진행 중이다.



Fig. 1.1 Apollo 1호기의 화재현장 및 사망한 3명의 우주인

국제우주정거장에서 화재가 발생하여 진화하지 못하는 경우 수천 억원의 예산을 들인 미션이 실패하게 되어 경제적 피해는 막심할 것이다.

지상에서도 공장 혹은 가정집 등의 화재의 40%는 전선의 누전 혹은 과전류에 의해 나타나기 때문에 지상에서 전선 화재의 연구는 화재 진화의 안전 전략 수립에 있어서 중요하게 다루어져야 한다. 한편 우주에서의 화재 발생은 지상에서 발생하는 화재와는 상이하다. 무중력 상태에서는 부력에 의한 자연대류 효과가 없어 중력 가속도가 없기 때문에 부력이 생겨나지 않는다. 단적으로 촛불이 지상에서는 부력에 의해 유도되는 속도(Buoyancy-induced velocity)에 의해 유지될 수 있는 반면 우주에서는 촛불은 유지될 수가 없다.

공기의 대류가 존재하지 않는 점은 화염의 입장에서 새로운 산소의 공급과 발생한 이산화탄소의 배출이라는 측면에서 매우 불리하게 된다. 따라서 확산에 의해서만 산소 공급이 원활치 않아 화염이 매우 작게 유지되거나 소화되고, 대류가 없는 환경은 화재의 위험성을 낮출 것으로 생각되는데, 실제로는 화재의 위험을 더 높이는 원인으로 작용한다. 무중력에서는 대류가 없으므로 적은 열이 공급되더라도 한 곳에 계속 머물게 된다. 시간이 오래 지나면 조금씩 공급되는 열이라고 하더라도 발화점까지 충분히 온도를 높일 수 있다. 따라서 무중력상태에서 일단 점화되면, 작은 화염이라도 대류가 존재하지 않아 발생한 열을 다른 곳으로 빠르게 이송하는 대류가 없으므로, 발생한 고온의 열이 거의 안 흩어지고 한 곳에 머무

르게 된다.

무중력에서는 대류가 일어나지 않기 때문에 화염에서 발생한 일산화탄소, NOx 등 유독가스가 한 곳에 머물러 있게 되고, 결국 우주인들에게는 유독 가스로 인한 질식사 등 치명적인 위험 요소를 제공하여 미션 실패에 가장 큰 원인이 될 수 있다. 또한 공기가 원활히 공급되지 않기 때문에 지상에서 연소할 때보다 더 많은 유독 가스가 발생하기도 한다. 우주에서 화재로 인한 수차례의 위험을 겪은 후 미국, 일본 등 우주 선진국들은 우주에서의 화재 안전 코드 개발의 연구들을 수행하여 왔고 미소중력 상태에서의 화염 구조와 소화 거동 등의 연구를 통해 우주에서의 가스 소화제 개발을 위해 많은 연구비를 투입하여 왔다.

화재 진화 연구를 위한 표준 버너로는 컵버너와 대향류버너가 있다. 컵버너는 화재원을 잘 모사할 수 있는 장점이 있으나 3차원 특성으로 인해 파라미터 연구가 용이하지 않은 반면, 대향류 버너는 1차원 화염구조를 갖고 있고 국제우주정거장에서 ventilation 유동을 모사할 수 있다는 장점으로 대향류 버너를 사용하여 화재 억제를 위한 기법과 가스 소화제 개발이 주로 이루어지고 있다.

대향류 확산화염에서 화염 소화에 대한 이해는 화염 안정화를 평가하는데 매우 중요한 부분이다. 대향류 화염의 연구는 Tsuji[1] 등

이 화염 구조와 화염 소화 거동을 이해하기 위해 수행하였으나, 주로 고신장률 화염 소화 한계를 주요 타깃으로 화염 구조와 화염 소화에 대한 많은 양의 연구가 진행되었다.[2-6]

한편, 우주에서는 우주인들이 호흡함에 따라 이산화탄소를 배출하고 공기를 지속적으로 공급한다는 점 그리고 우주에서의 화재는 전선 화재로만 가능하다는 점으로부터 N_2 , CO_2 , Ar, He 등 가스 소화제를 저신장률 확산 화염에 첨가하여 화염이 소화되는 임계 가스 소화제 물분율을 정량화하기 위해 대향류 확산 화염을 대상으로 연구를 수행하고 있다.

Tien의 연구 그룹이 1990년대 이론적으로 고신장률 확산화염의 소화가 화염 스트레치에 기인하고 저신장률의 화염 소화는 복사 열 손실에 기인함을 1차원 상사성에 근거하여 제시하였다. 1997년 Maruta 연구그룹에서는 10초간 미소 중력을 얻을 수 있는 일본 홋카이도에 있는 JAMMIG 낙하 설비를 이용하여 Tien 그룹의 연구 결과인 C-curve를 얻어 실험적으로 Tien의 주장을 뒷받침한 것으로 모두가 이해하였다.[9]

그러나 Tien의 이론은 1차원 상사성에 근거하며 화염 구조가 1차원 상사성(Similarity)을 갖기 위해서는 무한 거리가 떨어진 두 개의 점원(Point source)로부터 대향으로 유동이 불어오는 경우 정체점

근처에서만 유효하다. 따라서 이러한 경우 저신장률 화염과 고신장률 화염은 가스 소화제를 첨가하는 경우 각기 복사열손실과 화염 스트레치에 의해 소화되는 것으로 이해할 수 있다.

그러나 Tien은 신장률이 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] 이러한 개념을 근거로 실제로 23 cm 직경의 스킵트에서 수행된 실험에서 화염 소화는 저신장률과 저신장률로 화염 구멍을 통해 이루어짐을 보였다[8].

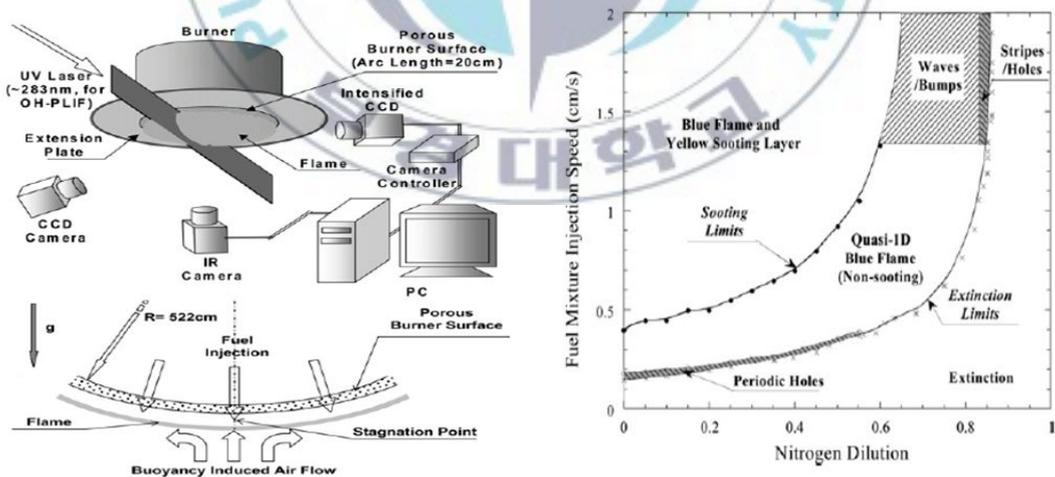


Fig. 1.2 Tien's research group의 버너와 실험결과

한편 Maruta 등의 연구에서 14mm 직경의 버너가 사용되었기 때문에 저신장률 화염의 경우 화염 크기가 노즐 직경보다도 더 작을 수 있기 때문에 정체점 근처의 화염 중심부가 측면 열손실에 노출되어 일차원 화염으로 볼 수 없다. 즉, 미소 중력 화염에서는 측면 방향으로의 측면 열손실 그리고 정상 중력장에서는 측면방향을로의 전도 열손실과 부력에 의한 버너 림 (burner rim)으로의 대류 열손실 등 다차원 효과 (multi-dimensional effects)가 중요하게 된다.

그 후 Park 등은 유한한 버너직경에서의 화염은 다차원 효과에 의해 저신장률 화염 소화가 결정적으로 영향을 미친다는 것을 제안하였고, 실제로 18, 26, 46 mm의 버너를 사용하여 저신장률 화염의 소화는 반경방향으로의 전도열손실이 복사열손실에 비해 우세하게 기여함을 실험 및 수치해석으로 보였다. 그리고 화염 소화거동을 전체신장률에 따라 반경방향으로 진동 후 수축하며 소화되는 모드 부터 진동 없이 화염 중심부에 화염 구멍이 생기며 소화되는 모드 까지 체계적으로 나타내었다. 이는 Tien의 연구결과인 저신장률 고신장률 모두 화염구멍을 통과 소화가 발생한다는 내용과 전면 배치 된다.

그리고 유한한 버너직경에서의 화염은 Figure 1.3에서 보는 것과 같이 저신장률에서는 1차원의 수치해석 결과와 큰 차이를 보이고

있어 이는 다차원 효과를 고려해야 함을 시사하며 저신장률 화염 소화가 반경방향으로의 전도열손실에 지배적으로 기인함을 보였다.[10-12] 이 또한 과거 Maruta 교수의 연구 결과인 저신장률에선 복사 열손실에 의해 화염이 소화된다는 주장과 상충한다.

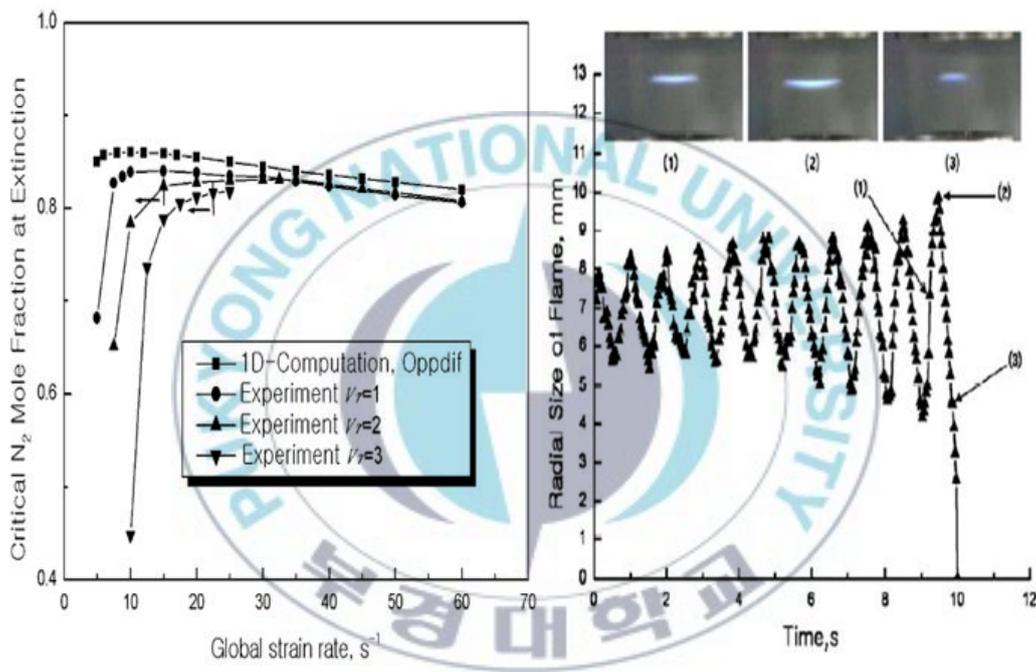


Fig. 1.3 Combust. Flame 146 (2006) 612-619 J. Park research group

한편, Figure 1.4에서 보는 바와 같이 대향류 확산화염의 에지 부분은 전형적인 부분 예혼합 구조를 가지므로 최외각 에지화염은 화염 전파 속도를 갖게 된다. 최외각 에지화염이 만일 정지화염이라면 변위속도가 영이므로 화염 전파속도가 국부 유동속도와 균형을

이루어야 한다. 이것은 국부 유동 속도가 항상 양의 반경 방향이므로 화염은 언제나 음의 화염 전파속도를 갖는다는 것을 의미한다. 음의 화염 전파 속도를 가짐에도 불구하고 고신장률에서 최외각 에지 화염이 언제나 정지하고 있는 것은 최외각 에지 화염이 정지화염으로 존재할 수 있도록 하는 이유가 존재하여야 한다. 또한 에지 화염의 전파속도는 혼합강도, 열손실, 국부 신장률(연료농도구배), 부력 등에 의해 결정된다.[26]

결국 최외각 에지 화염이 정지 화염으로 존재하던 화염 중심부로 수축하면서 소화하는 경우든 그 원인은 위의 에지화염 전파속도에 미치는 함수적 의존성에 대한 명확한 조사가 필요함을 의미한다.

한편 최외곽 에지 화염은 낮은 신장률에서도 항상 화염의 끝이 뭉툭하다(blunt shape).[10-12] 이는 최외곽의 에지화염은 전체신장률이 낮음에도 불구하고 연료농도의 구배(국부신장률)가 높음을 의미한다.[13] 기존 연구에서 C-curve의 고신장률 측은 신장률 변화에 민감하지 않음을 보였고, 저신장률에서는 오히려 신장률이 증가하는 경우 화염 강도가 증가함을 보였는데 이것은 최외각 에지 화염이 저신장률에서 중심부로 수축하면서 소화되는 현상을 설명하지 못한다.

이것은 최외각 에지 화염이 국부 신장률에 민감하게 함수적 의존성을 나타내지 않는다는 것을 의미한다. 또한 가스 소화제의 몰분율을 화염 소화 근처까지 증가시키더라도 화염 길이는 크게 변하지 않는데 이것은 혼합기 강도(mixture strength)에 최외각 에지 화염 전파속도가 민감하지 않다 것을 의미한다. 결국 기존의 Park 등의 연구 결과를 토대로 최외각 에지 화염의 화염 전파속도는 부력 혹은 열손실이 중요한 함수적 의존성을 갖는다는 것을 의미한다.

따라서 부력을 제거할 수 있다면 최외각 에지 화염의 전파속도는 열손실 만에 의존할 것이다. 이 실험의 결과가 기존의 Park 등의 연구 결과들과 유사하게 나타난다면, 과거 Tien 그룹과 Maruta 등의 연구 결과에서 보여준 유한한 버너 직경을 갖는 저신장률 대향류 화염소화는 복사 열손실에 의한 것이 아닌 측면 방향으로의 전도 열손실에 기인한다는 것을 실험적으로 규명한다는 측면에서 매우 중요한 연구 결과가 될 것이다.

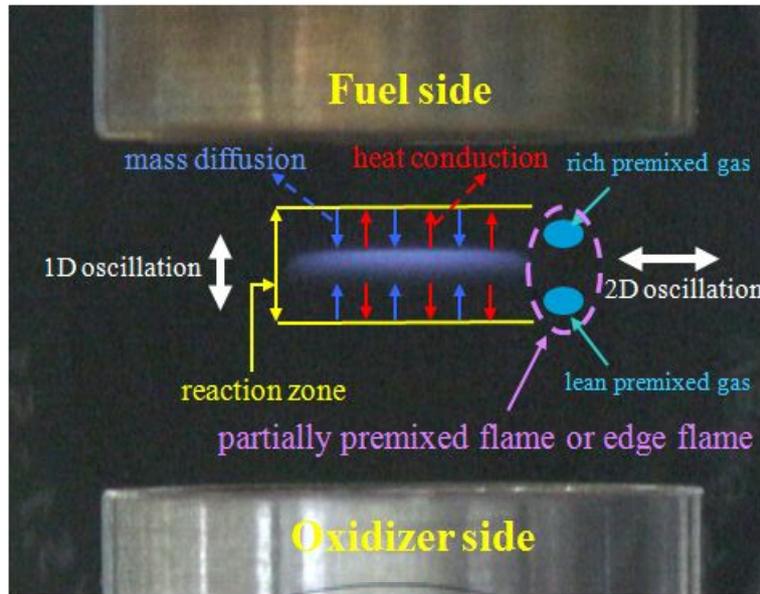


Fig. 1.4 Low strain rate counterflow configuration

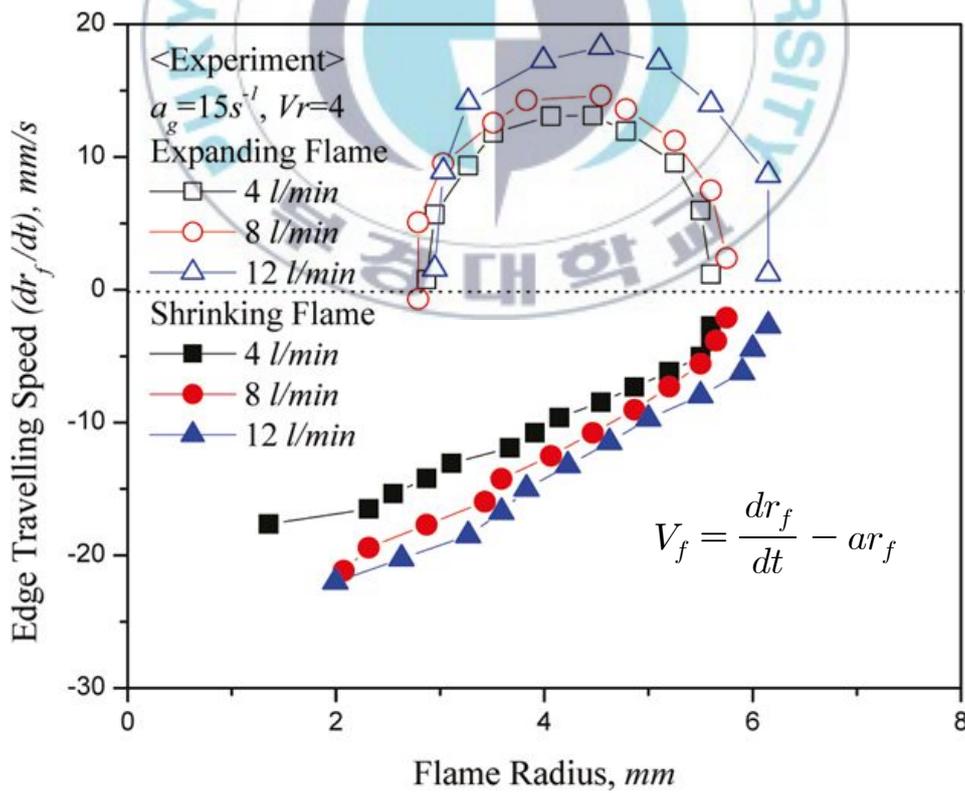


Fig. 1.5 Traveling-velocities of expanding and shrinking edge flow[12]

Figure 1.5는 전체 신장률이 15 s^{-1} 이고 상대속도(V_r)가 4인 에지 화염이 소화되기 전 확장과 수축을 할 때 에지화염의 변위속도($\frac{dr_f}{dt}$)를 장막유동의 변화에 따른 그래프를 보여주고 있다.

에지 화염이 정체면 (Stagnation plane)에 위치하면, 에지 화염의 전파속도(V_f)는 $V_f = \frac{dr_f}{dt} - ar_f$ 식으로 표현된다. 여기서 r_f 는 화염의 반경, a 는 화염 외부에서의 국부 신장률을 말하므로 ar_f 는 국부 유동속도(local flow velocity)를 말한다. 또한, 국부유동속도의 크기는 0 (10) cm/s 이고, 에지 변위 속도는 0 (10) mm/s 이다. 그러므로 에지 화염전파속도(V_f)는 항상 음의 값을 가지고 팽창 화염기간 동안에 서도 음의 값을 갖는다는 것을 알 수 있다. 수축화염 동안 화염 반경이 작아지면 에지 변위속도는 더욱 음의 큰 값으로 된다. 반경방향 전도열손실은 화염의 반경에 반비례하므로 반경방향 열전도 손실이 증가하여 에지 변위속도가 커지게 된 것이다.

화염반경은 화염의 안정화를 나타내어 주는 인자로서 화염이 정지(에지변위속도가 0임)하기 위해서는 화염반경이 충분히 커야 함을 의미한다. 결과적으로 에지화염이 진동을 하지 않는 임계 화염반경이 존재할 것이라는 점도 알 수 있다. 따라서 앞서 언급한 화염 소화모드에서의 진동 역시 에지화염의 안정화 메커니즘에서 설명될

수 있어야 하므로, 확장 연구에서[16] 실험 및 수치해석을 통해 에지화염의 안정화 메커니즘이 화염 소화에 미치는 영향에 대해 보고된 바 있다.

그러나 이러한 연구 결과들은 부력의 영향에서 자유로울 수 없기 때문에 앞선 언급한 연구들을 명확하게 하기 위해서는 부력을 제거한 조건에서의 실험이 필요하다. 지상에서의 미소중력 실험에는 Drop-tower나 Parabolic flight를 이용한 실험정도가 있는데 이러한 방법은 경제적인 측면이나 미소중력 조건의 유지 시간 등의 제한이 따른다.

따라서 본 연구에서는 화염대와 주위 분위기와의 밀도 구배를 최소화하는 실험 기법을 개발하였고, 경제적인 이득 뿐 아니라 실험 시간의 제한을 받지 않는 우수한 장점이 있어 이러한 실험 기법은 많은 연구자들에 의해 사용될 것으로 기대된다. 따라서 본 연구를 통해 개발된 부력 최소화 기법을 사용하여 Park 등의 연구 결과에 대해 확장 연구를 수행하였고, 유한한 버너 직경을 사용하는 경우 최외각 에지 화염이 중요한 역할을 하게 되고 최외각에지화염의 화염 전파 속도에 의해 화염 소화 모드가 나타난다는 것을 입증하고자 한다.

제 II 장 이론적 고찰

2.1 대향류 확산화염

층류 화염편 모델은 난류 화염의 순간 구조가 층류화염으로 구성되고, 평균 구조는 이러한 층류 화염들의 앙상블로 되어 있으며 화염대의 두께는 난류의 최소 크기인 콜모고로프[17]의 크기보다 작아 화염대 내에 난류 생성을 허용하지 않는다. 그러므로 1984년 Peters에 의해 개념이 완성된 층류 화염편 개념(flamelet model)[18]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.[19]

대향류 화염은 상사(Similarity) 변수를 이용하여 1차원 화염으로 간단히 모델링 할 수 있어 화염구조와 소화거동에 대해 잘 정의된

데이터 제공이 가능하며, 난류화염의 국소구조인 화염편(flamelet)에 대한 유용한 정보를 제공해 준다.[20-22]

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 화염 스트레치가 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 과다하게 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.

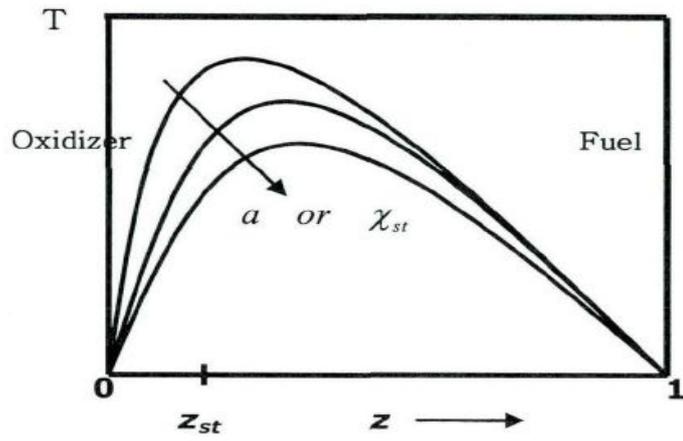
2.2 S-curve 거동 특성

대향류 화염의 경우 신장률은 스칼라 소산률과 일대일 대응관계 (one-to-one correspondence)에 있고, 스칼라 소산률은 혼합층 내 반응물의 농도와 관련되는 혼합분율 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.

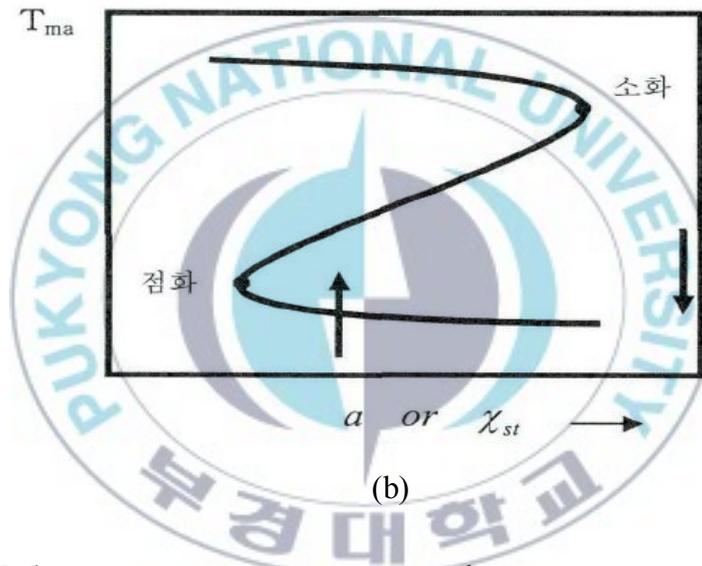
Figure 2.1(a)는 혼합분율(mixture fraction)에 따른 화염의 온도분포를 나타낸 그림이다. 이론적으로는 산화제가 이론 혼합비를 이루는 당량혼합비 조건(Z_{st})에서 화염 최고 온도가 나타나야 하겠지만, 실제의 경우 연료 과잉 쪽으로 약간 이동한 지점에서 화염의 최고 온도가 나타난다. 또한 신장률이 증가할수록 화염 최고 온도의 위치가 연료 과잉 쪽으로 옮겨감을 알 수 있다. Figure 2.1(b)는 신장률(또는 스칼라 소산률)에 따른 화염 최고온도의 변화를 개념적으로 도시한 것이며, Figure 2.2는 Nanduri[22]에 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 있는

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.

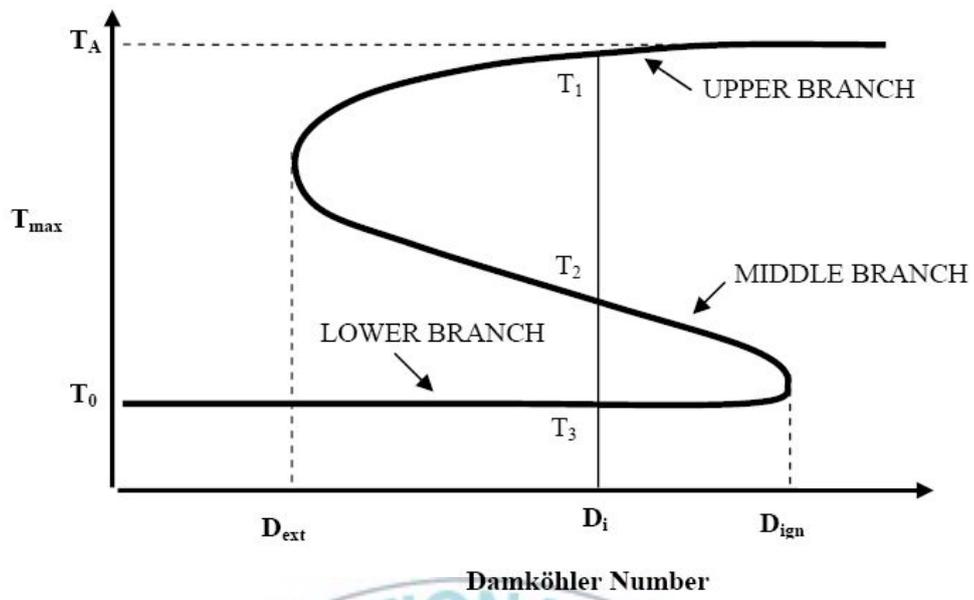
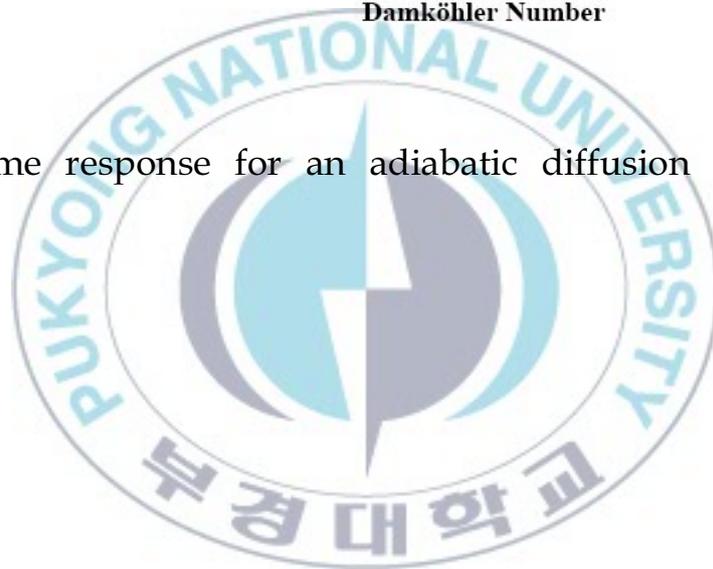


Fig. 2.2 Flame response for an adiabatic diffusion flame system "S-curve"



2.3 대향류 확산화염 소화거동 수치해석

대향류 확산화염의 온도분포와 반경방향의 전도열손실이 화염 소화 거동과 진동 현상에 어떻게 작용하는지 규명하기 위해 수치해석을 수행하였다.[23]

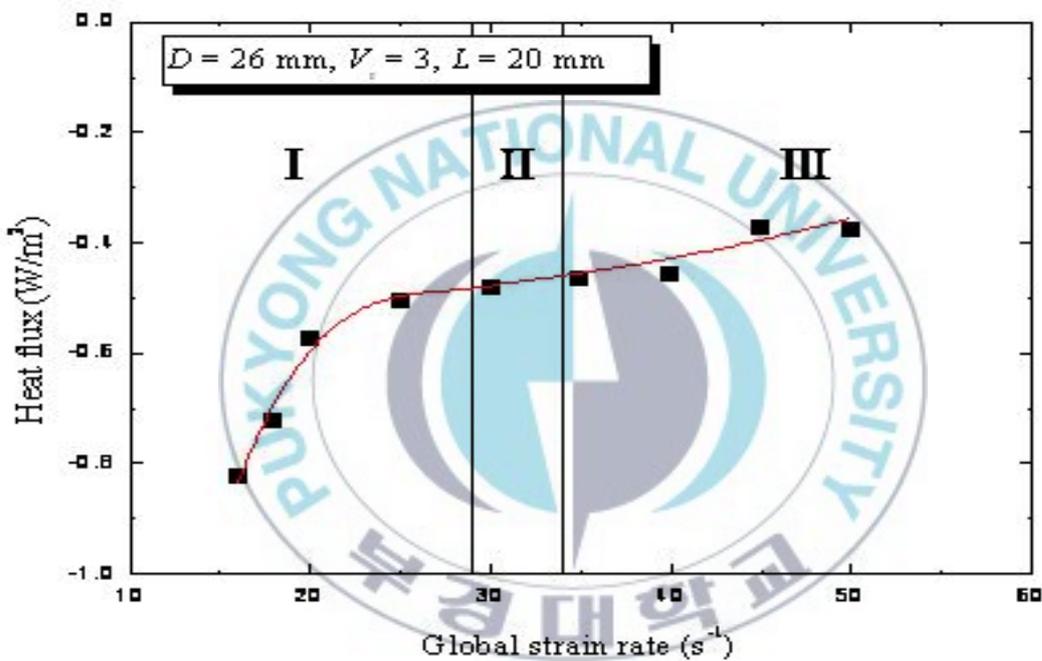


Fig. 2.3 Conductive heat loss at the outer flame edge versus global strain rate at 90%-dilution of flame extinction in case of $L=20\text{mm}$, $D=26\text{mm}$, and $V_r=3$.

Figure 2.3은 DNS방식으로 수행한 수치해석으로 얻은 화염 소화 지점의 90%희석 조건에서 전체신장률에 따른 바깥 에지화염의 전

도열손실을 나타낸 것이다. 그래프에 표시한 Regime은 전체신장률에 따라 3가지의 소화모드가 나타나는 영역을 표시한 것이다. 전도열손실은 Regime I에서 Regime II로 전화되는 동안 급격히 감소하고, Regime III까지는 조금씩 감소한다. 이는 Regime이 I에서 III으로 갈수록 전체신장률은 증가하고, 화염길이 또한 증가 하는데 화염길이는 반경방향의 전도 열손실과 반비례관계에 있기 때문에 고신장률로 갈수록 전도열손실이 감소하는 것으로 볼 수 있다.

Figure 2.4는 Oh 등이 수행한 연구에서[23] 이용된 계산 방법을 이용하여 전체 신장률에 따라 화염 에지부분과 화염 중심 부분의 에너지 방정식의 각 항을 분석하여 그래프로 나타낸 것이다. 수치 해석에 사용된 에너지 방정식은 식 2-2와 같다.

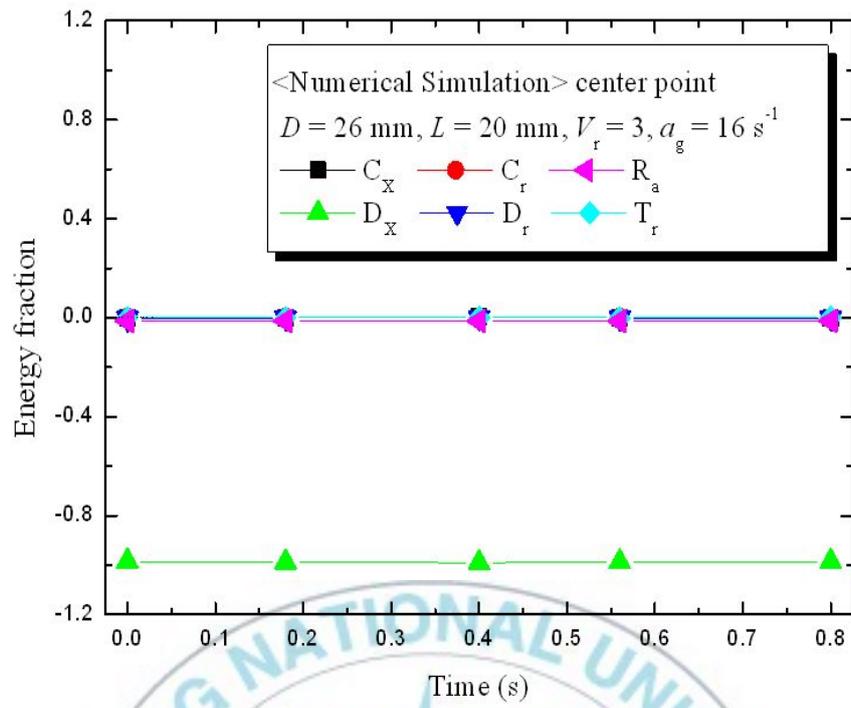
$$\begin{aligned}
 \underbrace{\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}}_{T_r} = & \underbrace{-\rho c_p u \frac{\partial T}{\partial x}}_{C_x} + \underbrace{-\rho c_p v \frac{\partial T}{\partial r}}_{C_r} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right)}_{D_x}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

식 (2-2)

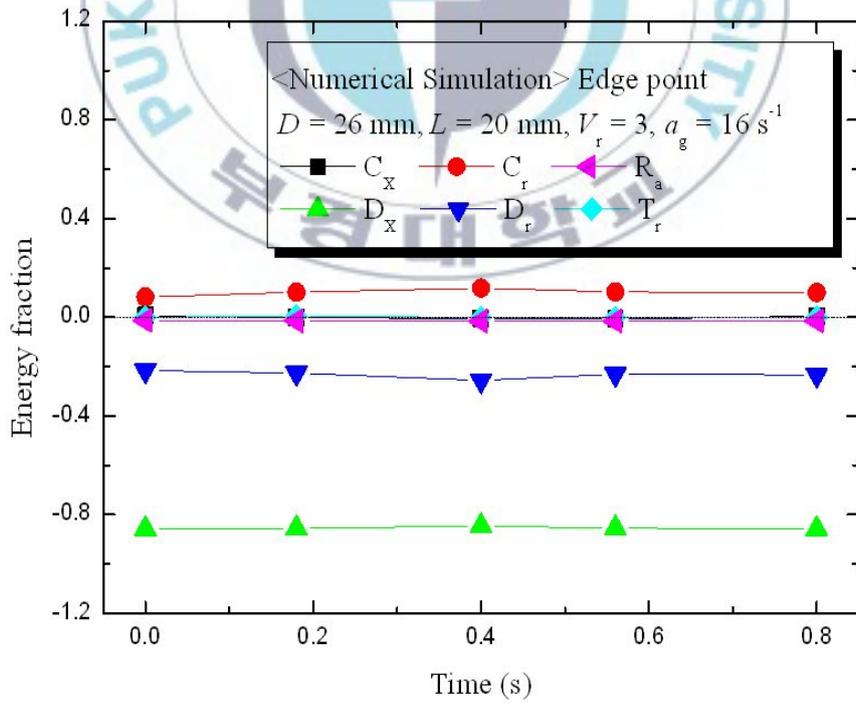
위 식에서 C_x항과 C_r항은 각각 축 방향과 반경방향의 대류 항,

D_x 항과 D_r 항은 축 방향과 반경방향의 전도 항, M_x 항과 M_r 항은 축 방향과 반경방향의 확산에 의한 에너지 전달 항(Secondary Diffusion Term), R_a 항은 복사열손실 항, C_s 항은 화학에너지 항 (Chemical Source Term)을 나타낸다.





(a)



(b)

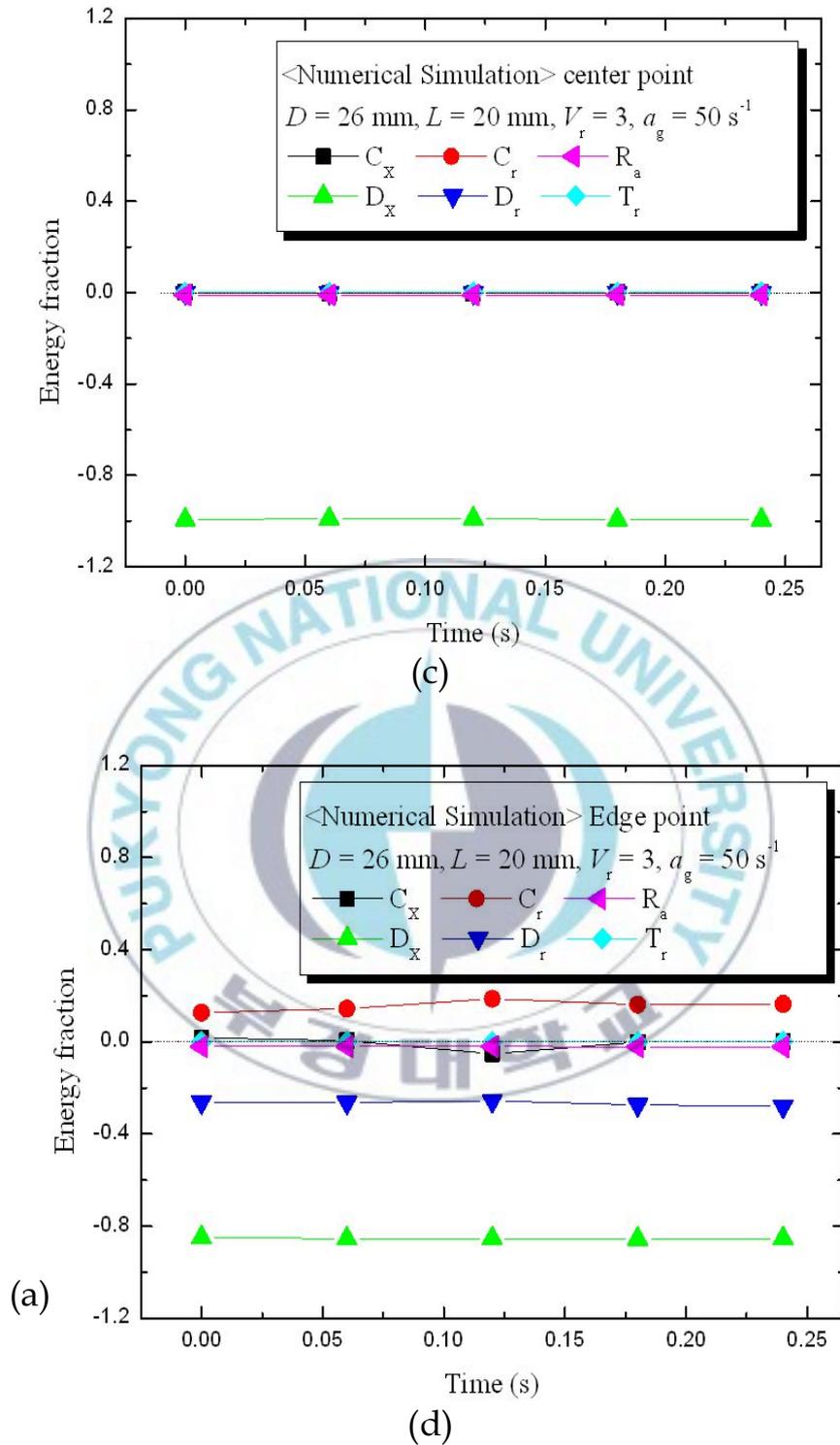


Fig. 2.4 Temporal variations of the individual energy fraction at the flame center and near the flame edge at the representative low and high strain rate flames in normal gravity.

Figure 2.4 (a) (c)의 화염 중심부의 결과를 살펴보면 고신장률과 저신장률 화염 모두 축방향의 전도열손실이 가장 크게 나타났으며, 다른 항들은 복사열손실이 지배적이지만 모두 무시할 수 있을 정도로 낮게 나타났다.

반면, Figure 2.4 (b) (d)의 에지부분 경우를 살펴보면 축방향의 전도열손실에 추가하여 반경방향 전도열손실과 반경방향의 대류 항이 우세하게 나타났다. 특히, 복사 열손실 항은 중심과 에지 부분에서 모두 매우 낮은 값을 갖고 있는 사실을 알 수 있는데, 이는 유한한 버너직경에서의 화염 소화에 전도 열손실의 영향이 복사 열손실보다 더 지배적으로 작용한다는 것을 다시 확인 할 수 있다.

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

저신장률 영역에서 에지화염은 반경방향의 대류 항에 비해 반경 방향의 전도열손실이 지배적으로 나타났다. 대향류확산화염의 정지 화염에서 에지화염의 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 화염소화 시에 화염이 수축하는 현상으로 나타난다.

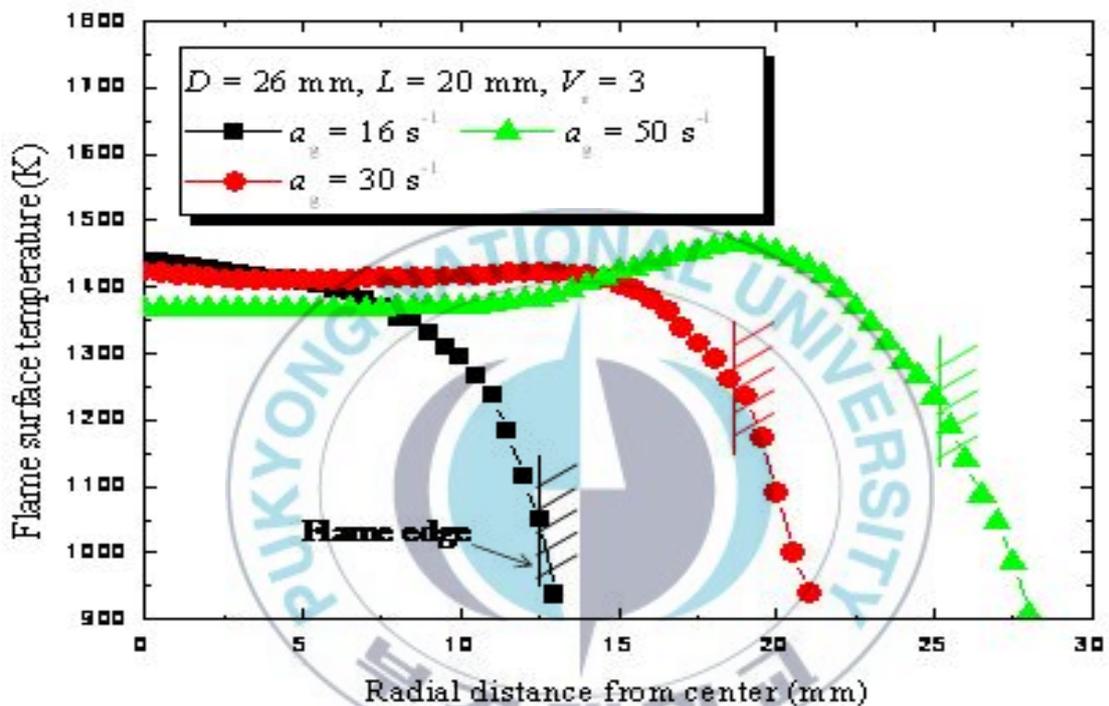


Fig. 2.5 Measured the flame surface temperatures at 90%-dilution condition of flame extinction()

그리고 Figure 2.5 에서 16 s^{-1} 인 저신장률 화염의 그래프를 살펴 보면 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.

Figure 2.5의 30 s^{-1} 에 해당하는 전체 신장률이 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 저신장률 화염의 그래프와 비교하였을 때 화염 온도가 낮아지는 기울기가 비교적 완만하다는 것을 알 수 있다. 이러한 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.

반면 고신장률의 에지화염은 중심부보다 에지부분이 온도가 더 높고, Figure 2.4의 결과와 같이 반경방향의 전도 열손실과 함께 반경방향의 대류항도 지배적으로 작용한다. 그러므로 고신장률 영역의 에지화염에서는 반경방향의 대류 항이 에지화염의 안정화에 기여를 하게 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.

이러한 화염 소화 메커니즘에서도 알 수 있듯이, 유한한 직경의 대향류 확산화염의 화염 소화가 전도 열손실에 지배적으로 기인한다는 Park 등의 지난 연구결과와 잘 일치함을 알 수 있다.[10]



제 III장 실험장치 및 방법

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

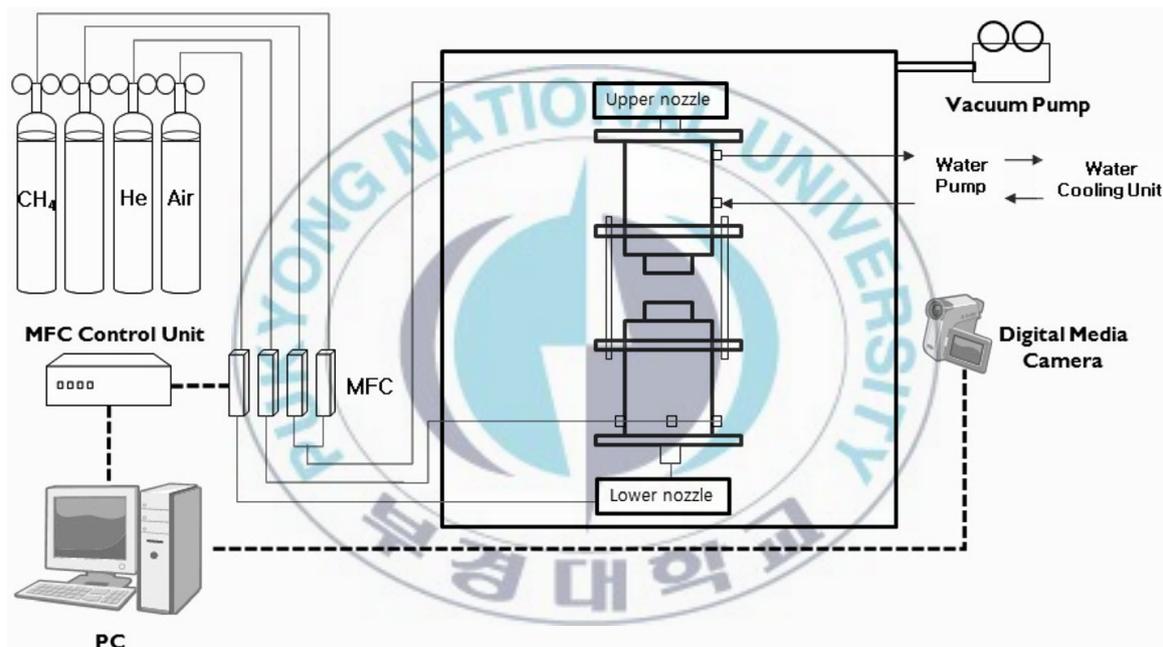


Fig. 3.1 Schematic diagram of counterflow burner and flow systems

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 외부로부터의 유동의 교란을 막을 수 있도록 아크릴로 제작된 밀폐된 공간에 설치되었다. 버너의 직경은 26mm 이며 버너 노즐간의 간격은 15mm로 고정하였다. 대향류 화염에서의 화염대는 산화제 측에 형성되는데, 화염대가 노즐에 부착되는 것을 막기 위해 연료를 상부 노즐에서 공급하였고, 산화

제는 하부노즐에서 공급하여 실험하였다.



Fig. 3.2 Experimental apparatus of counterflow burner

각 노즐 내부에는 미세한 매쉬 스크린(mesh screen)을 다단으로 설치하여 노즐 출구에서 균일한 유동속도를 갖게 하였고 이를 마이크로 마노미터를 이용하여 검증하였다.

3.1.2 상부버너 냉각수 순환장치와 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 배출시켰다. 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 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 고순도 질소(99.999%)와 고순도 헬륨(99.99%)을 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)을 나타내는지 확인하기 위하여 유량검정을 실시하였다. 유량검정은 유량측정장치(Bios Drycal Technology, The Definer 220)을 이용하여 분사되는 유체의 실제 유량을 측정하였고, 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 몰분율의 측정은 소프트웨어를 이용하여 전체 화염신장률을 고정시키고 희석제 몰분율을 증가시키면서 화염 소화가 나타나는 조건을 찾음으로써 얻을 수 있다.



3.2 실험방법

3.2.1 대향류 화염의 소화특성 가시화

저신장률 화염과 고신장률 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 60 frame의 제한이 있었으며 이를 image processing을 통하여 화염 이미지를 취득하였다.

3.2.2. 화염분석을 위한 Matlab 기법

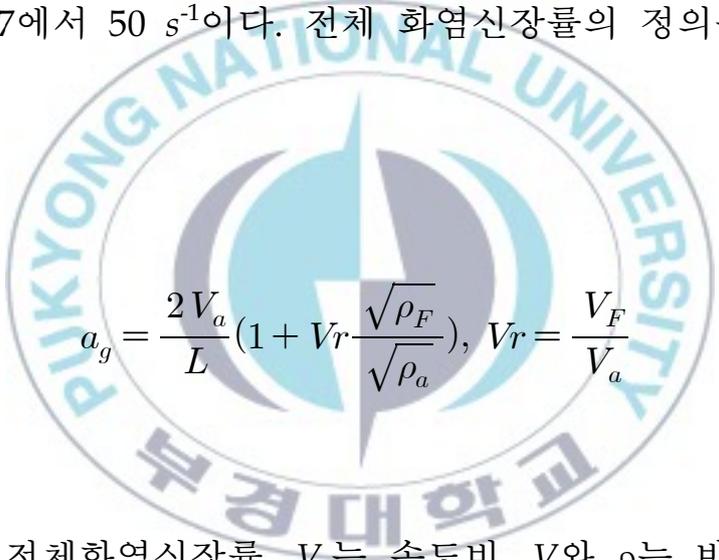
디지털 미디어를 통해 동적거동을 갖는 에지화염이 저장된 동영상은 상용소프트웨어(Adobe Premiere Pro ver. 7.0)를 이용해 시분할 하였다. 상용소프트웨어를 통해 시분할 된 이미지는 1초에 30 frame의 파일 (720 × 480 pixel, JPG)이 획득된다. 이 이미지 파일은 Matlab 기법으로 분석하면 720×480×3 (X×Y×n) 크기의 매트릭스(matrix) 형태를 취하게 된다. 여기서 3(n)은 720×480의 매트릭스가 Red, Green, Blue의 3색의 강도(intensity)를 규정짓는 각각의 매트릭스를 의미한다. 즉, 1개의 화소 (pixel)는 1×1×3의 매트릭스로 표현된다. 이러한 매트릭스로 구성된 데이터에서 빛의 발광강도(luminance intensity)의 정보를 추출하여 화염길이를 측정하게 된다. 단위 화소 (pixel)당 발광강도를 구하는 식은 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. 버너의 직경은 26mm 이며 버너 노즐간의 간격은 15mm 로 고정하였다.

전체 신장률을 변화시키면서 실험을 수행하였으며, 전체 신장률의 범위는 4.7에서 50 s^{-1} 이다. 전체 화염신장률의 정의는 다음과 같다.[24]


$$a_g = \frac{2V_a}{L} \left(1 + V_r \frac{\sqrt{\rho_F}}{\sqrt{\rho_a}} \right), \quad V_r = \frac{V_F}{V_a} \quad (3.2)$$

여기서 a_g 는 전체화염신장률, V_r 는 속도비, V 와 ρ 는 반응물의 유동 속도와 밀도를 나타내며, L 은 노즐간의 거리, 하첨자 F 와 a 는 각각 연료와 산화제를 나타낸다.

3.2.4 부력의 제거

일반 중력장에서 부력은 식 (3.3)과 같이 정의된다.

$$F_b = - (\rho - \rho_0) g \quad (3.3)$$

여기서 ρ 는 화염대의 밀도, ρ_0 는 주위 분위기의 밀도이며, g 는 중력 가속도를 의미한다. Oppdif 코드의 계산결과인 Figure 3.3에서 보듯이 화염대의 밀도는 약 0.15~0.16 kg/m³이며 상온에서의 헬륨의 밀도는 약 0.17 kg/m³이다.

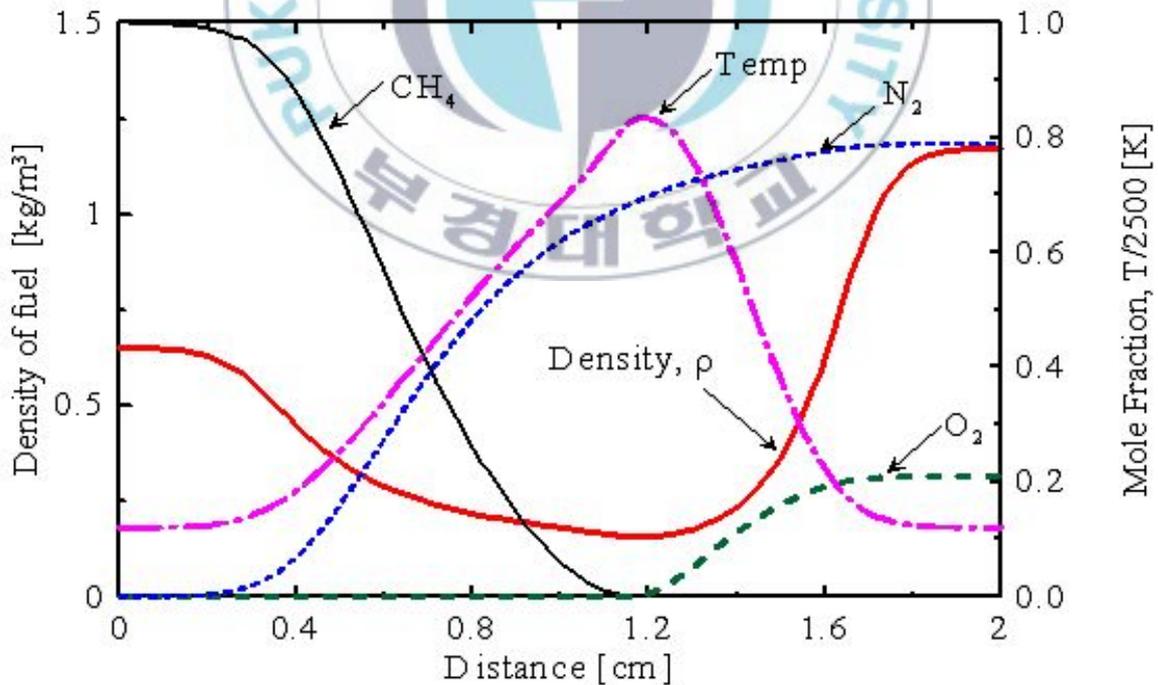


Fig 3.3 Oppdif 계산 결과 (20 s⁻¹)

따라서 대항류 확산화염의 실험구조에서 장막유동을 헬륨으로 선택하여 주위분위기를 헬륨으로 조성하게 된다면 식 (3.3)에 따라 부력은 10^{-2} g 정도가 되어 Hokkaido에 있는 50m의 Drop-Tower(낙하시간 2.7초, 1회 낙하비용 2~3만 $\text{\$}$) 설비수준의 미소중력 (Microgravity) 효과를 가지게 될 것이라 기대된다. 이러한 방법은 경제적인 측면 뿐 아니라 미소중력 조건의 유지시간 등의 제한이 없다는 아주 큰 장점이 있다.

Figure 3.4는 장막유동을 헬륨과 질소를 선택하였을 때의 화염 모습이다. 장막유동이 헬륨일 경우 화염대와 주위 분위기와 밀도구배가 매우 낮아져서 부력이 10^{-2} g 정도가 되기 때문에 장막유동 밀도가 1.25 kg/m^3 정도인 질소를 선택한 경우와 비교해서 보면 부력의 영향을 뚜렷이 볼 수 있으며 화염대가 정 가운데 위치함을 알 수 있다.

실험은 화염의 점화 후에 연료 측에 희석제의 몰분율을 증가시키는 형식으로 진행되었고, 장막유동에 질소를 첨가하는 형식으로 주위분위기를 형성하는 혼합기체의 밀도를 조정함으로써 부력의 크기를 점차 증가시키며 수행하였다.

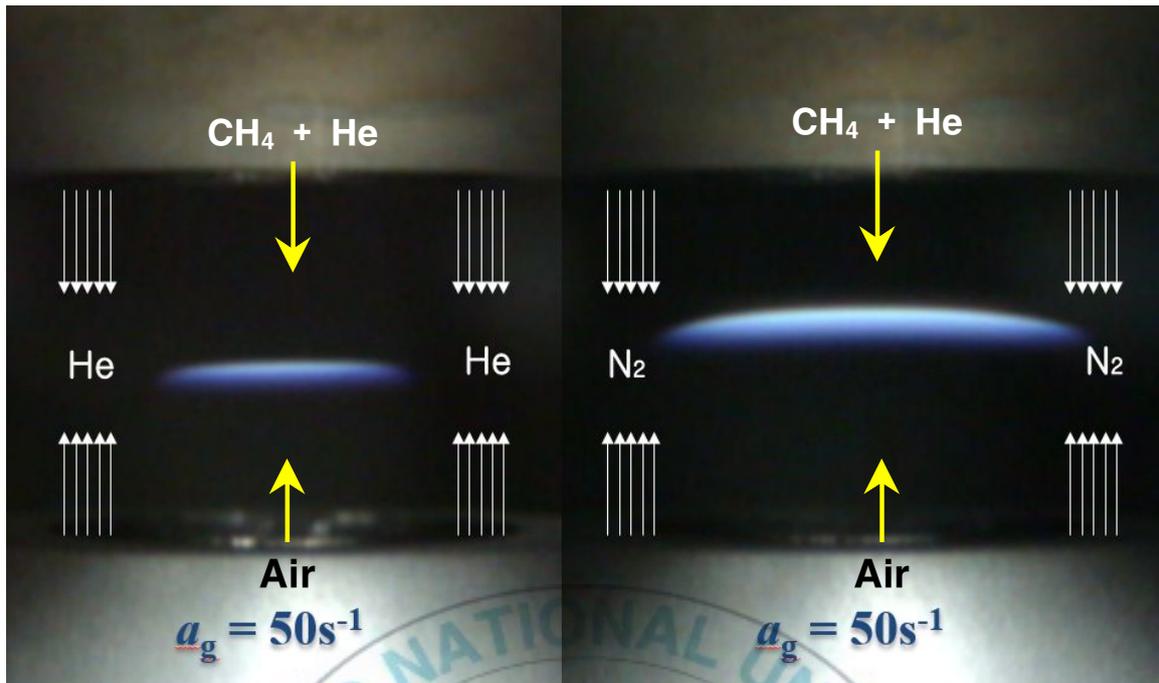


Fig 3.4 The comparison of counterflow flame between helium and nitrogen curtain flow

제 IV장 실험결과 및 고찰

4.1 부력이 제거된 대향류 화염의 소화거동

Figure 4.1은 장막유동으로 헬륨을 선택하고 질소를 10%씩 추가로 첨가하여 실험을 수행하여 도출된 전체신장률에 따른 화염소화 임계몰분율이다. 화염이 소화될 때 전체신장률에 따라 임계 헬륨몰분율(critical He mole fraction)을 도시한 것으로 전형적인 화염소화 한계선도 (C-curve)를 나타내고 있다.

헬륨이 질소에 비해 열전도도가 높기 때문에 주위분위기를 헬륨 100%로 조성하였을 때 가장 화염소화임계몰분율이 낮았고, 질소를 첨가함에 따라 단계적으로 높아졌다. 여기서 부력의 크기가 낮아짐에 따라 부력에 의한 화염 불안정성이 억제되어 화염 소화 임계몰분율이 다소 높아 질수도 있을 것이라 생각되나 상반되는 결과가 나타났는데, 이는 화염 소화에 부력의 제거를 통한 화염의 안정화보다 주변으로의 열손실이 더 우세하게 작용한다는 것으로 판단된다.

또한 고신장률에서는 부력과 열손실에 의한 효과를 무시 할 수 있으므로 하나의 곡선으로 일치함을 알 수 있다. 그리고 본 연구에 사용된 26 mm에서는 순수 메탄화염일 경우 전체신장률 4.7 s^{-1} 가 화염이 유지되는 임계값이었으며, 전체신장률이 더 낮은 경우에는 주변으로의 열손실로 인해 화염이 소화되는 현상을 보였고, 좀 더 직경이 큰 버너의 경우에는 더 낮은 신장률에서도 화염이 유지될 것이라 판단된다.

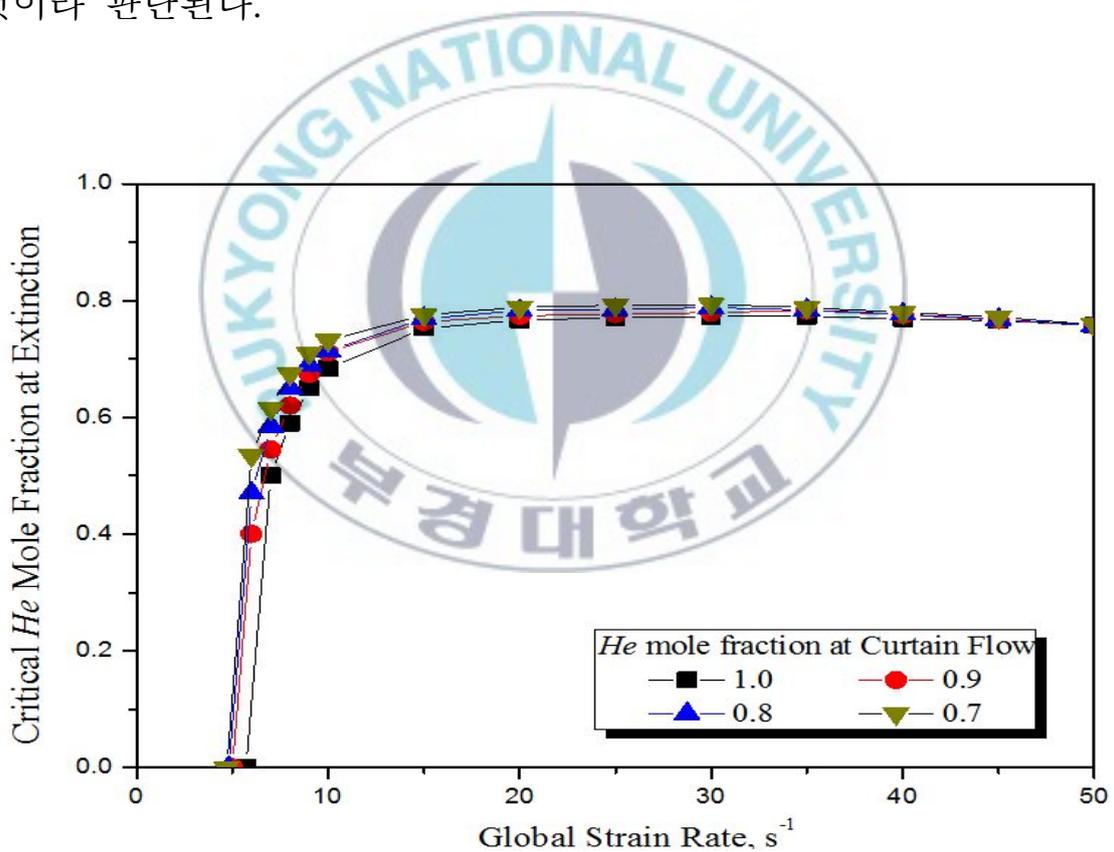


Fig. 4.1 Variations of critical mole fractions at flame extinction with global strain rate

Figure 4.2와 같이 장막유동과 희석제를 N_2 로 사용하였을 경우 저신장률에서 상부노즐의 출구속도가 Buoyancy-induced flow velocity 보다 낮아져서 신장률 15 s^{-1} 이하로 내려서 실험하기 어려웠으나[12], He을 장막유동으로 사용하면 신장률 5 s^{-1} 이하까지 내려서 데이터를 취득할 수 있었다.

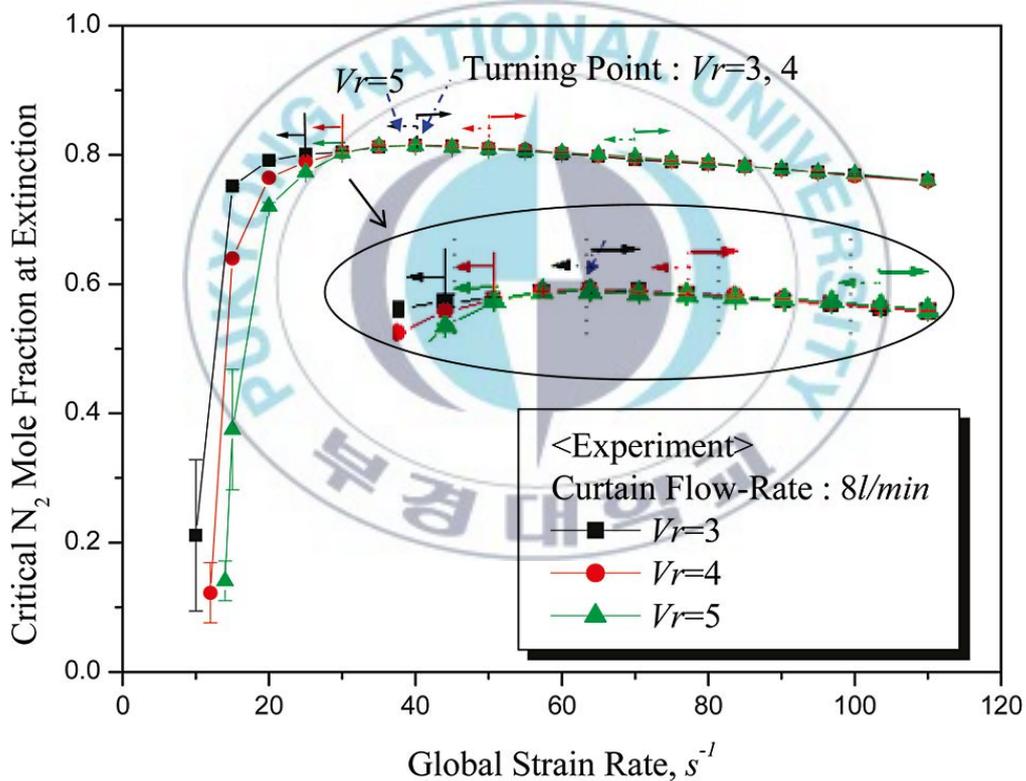


Fig. 4.2 Variations of critical nitrogen mole fraction at flame extinction with global strain rate for various velocity ratios at the nitrogen curtain flow rate of 8 L/min [12]

Fig. 4.3은 버너직경 26 mm에서 수행된 실험에서 대표적인 화염 소화 모드를 나타내었다. Regime I은 에지화염의 진동 후에 화염 중심으로 수축하며 소화하는 저신장률의 소화 영역이며, Regime III에서는 최외곽 에지화염이 움직이지 않고 정지된 상태에서 화염의 진동 없이 화염 중심에 구멍이 생기며 소화가 이루어지는 고신장률의 화염 소화 영역이다. 그리고 Regime II는 에지화염의 진동 없이 화염 중심으로 수축하며 소화가 되며, Regimes I과 III의 천이영역에 해당한다. 따라서 화염 소화모드는 전체 신장률에 따라 3가지의 Regime으로 구분되는 것을 알 수 있다.

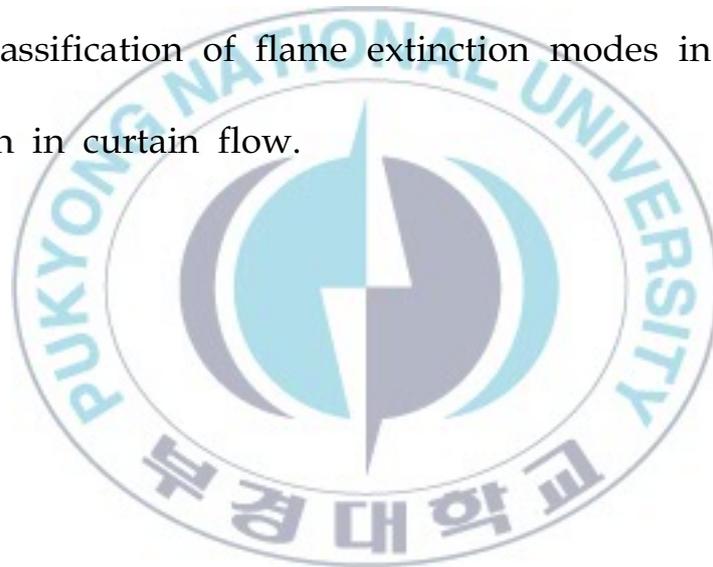


Table. 4.1은 이러한 소화거동을 좀 더 자세히 설명하기 위해 각 실험 조건별로 나타난 화염 소화 모드를 분류해 놓은 것이다. 장막 유동의 헬륨 몰분율을 줄여가면서 전환점(TP, Turning Point)과 Regime III의 전체신장률이 저신장률 영역으로 미소하게 이동하는 것을 알 수 있다. Regime II에서는 화염의 진동이 없이 에지화염이 화염중심으로 수축하면서 소화되며, Regime II에 속해있는 전환점의 전체신장률은 Regime III의 신장률 보다 항상 낮은 값을 가진다. 이는 고신장률에서 화염의 소화는 스트레치에 의해 야기되며 이미 다른 보고서에서 알려진 바와 같이[24] 최외곽 에지화염이 정지상태에서 화염 중심에 구멍이 확장하면서 화염소화가 이루어진다.

Regimes I & II의 영역이 장막유동의 헬륨 몰분율이 낮아질수록 감소한다. 이는 헬륨의 열전도도가 질소보다 높은 상황에서 헬륨의 몰 분율이 낮아져 화염대에서 반경방향으로의 전도열손실이 감소하게 되고, 반경방향의 전도 열손실이 지배적으로 작용하는 소화 모드인 I & II의 영역이 감소하는 것으로 판단된다.

Regime	He mole fraction at curtain flow			
	1.0	0.9	0.8	0.7
I	≤ 16	≤ 15	≤ 11	≤ 9
II	17-31	16-31	12-30	10-29
III	$32 \leq$	$32 \leq$	$31 \leq$	$30 \leq$
T.P	31	30	30	29

Table 4.1 Classification of flame extinction modes in terms of He mole fraction in curtain flow.



4.2 대향류 확산화염 진동과 부력

대향류 확산화염의 에지 부분은 Figure 1.1에서 보는 바와 같이 과농과 희박 예혼합 화염이 만나는 삼중점을 시작으로 확산화염이 분포되는 부분 예혼합화염의 구조를 가지고 있다. 바깥 에지화염이 정지화염이라면 화염 전파속도와 국부 유동 속도와 균형을 이루며 안정화된다.

이는 화염중심에서 에지 화염으로 충분한 열이 제공되지 않으면 화염이 중심으로 수축하는 작용을 하는 것을 의미한다. 에지화염의 전파속도는 혼합강도, 열손실, 국부 신장률(연료농도구배), 부력 등에 의해 결정된다.[26]

장막유동의 희석제 물분율을 변화시키더라도 혼합강도와 연료의 루이스 수는 변화하지 않는다. 또한 저신장률에서 화염의 위치는 비록 장막유동의 헬륨의 몰 분율을 0.7까지 내려도 그렇게 많이 변하지 않는다. 이는 부력의 효과가 여전히 미미함을 의미한다. 이러한 상황에서는 부력이 에지화염의 속도에 영향을 미치지 않는다. 화염소화는 에지에서 주변 장막유동으로 전도 열손실과는 결코 무관하지 않음을 의미한다. 에지화염에서 주변으로 과도한 열전도 손실이 발생하면, 에지화염의 속도는 감소하게 되어 화염이 수축하게

된다. 이러한 상황에서 화염중심에서 에지화염으로 전도 또는 대류 열전달이 충분히 이루어 지지 않으면 결국 에지화염이 화염중심으로 수축하게 되고 결국 화염이 소화하게 된다. 그러나 향후 추가적인 실험과 수치해석을 통해 신뢰할 만한 추가 설명이 필요하다.

저신장률의 화염 소화는 에지 화염의 수축으로 발생되고, 고신장률의 화염 소화는 중심에 구멍이 생기면서 발생한다고 보고된 바 있다.[16] 저신장률 화염의 에너지 비교를 해보면 반경방향의 전도 열손실은 반경방향의 대류가 화염소화를 막아주지만 다른 열손실에 비해 지배적으로 나타났다.

Figure 4.4는 여러 가지 화염상태에서 Power Spectrum을 보여주고 있다. 부력을 제거하였을 경우 전체 신장률과 관계없이 항상 화염이 진동하는 현상이 나타났으며, 기존에 저신장률 화염의 소화모드에 관찰되었던 진동과는 다른 진동으로 판단되며 부력을 제거한 조건에서의 저신장률 화염소화에서는 이러한 두진동이 혼재되어 나타나는 것을 확인하였다. 좀 더 자세한 논의를 위해 진동 주파수를 FFT분석을 통해 Figure 4.4에 나타내었다.

Figure 4.4는 부력을 최소화한 경우와 일반적으로 부력이 있는 환경에서의 대향류 화염에서 도출되는 화염진동을 FFT분석을 통해 나타낸 것이다. 먼저 Figure 4.4의 (c)와 (d)를 보면 부력이 작용하

는 조건에서 나타나지 않는 약 4~5 Hz의 진동이 부력을 제거하였을 때 관찰되는 것을 알 수 있으며, 저신장률 영역에도 역시 부력을 제거하였을 때 약 4~5 Hz의 진동을 확인할 수 있다. 특히, 저신장률 영역에는 기존의 연구에서 보고되었던 소화모드인 반경방향의 전도열손실에 기인하는 약 1.2~1.3 Hz의 진동이 나타나는데 부력을 제거한 경우에는 두 진동이 혼재되어 나타나는 것을 알 수 있다.

지난 연구결과[16]에 따르면, 현재의 대항류 확산화염에선 부력에 의한 진동은 에지화염 앞에서 부분 예혼합·예열 혼합이 축적되지 않기 때문에 발생하지 않는다. 그리고 화염의 flicker로 발생하는 $O(10 \text{ Hz})$ 주파수의 부력에 의한 진동도 발생하지 않는다. 그러면 대항류화염에서 가능성이 있는 에지화염 진동은 열손실에 의한 진동 또는 루이스 수에 의한 진동일 수 있다.

그러나 약 4~5 Hz의 진동은 윤성환 등의 연구결과[15]에 의해 층류 부상화염에서 0.1 Hz 보다 작은 주파수로 나타난다는 점으로부터 루이스 수에 의한 진동과 연관이 있는 것으로 사료된다. 헬륨과 질소 희석제를 사용한 메탄 화염의 루이스 수는 1 또는 이보다 약간 큰 값을 가진다. 이전 연구에서 에지화염이 과도한 열손실(전도)이 발생하면 루이스수 1 이하에서도 진동이 발생한다는 점을 보인 바 있다.[25]

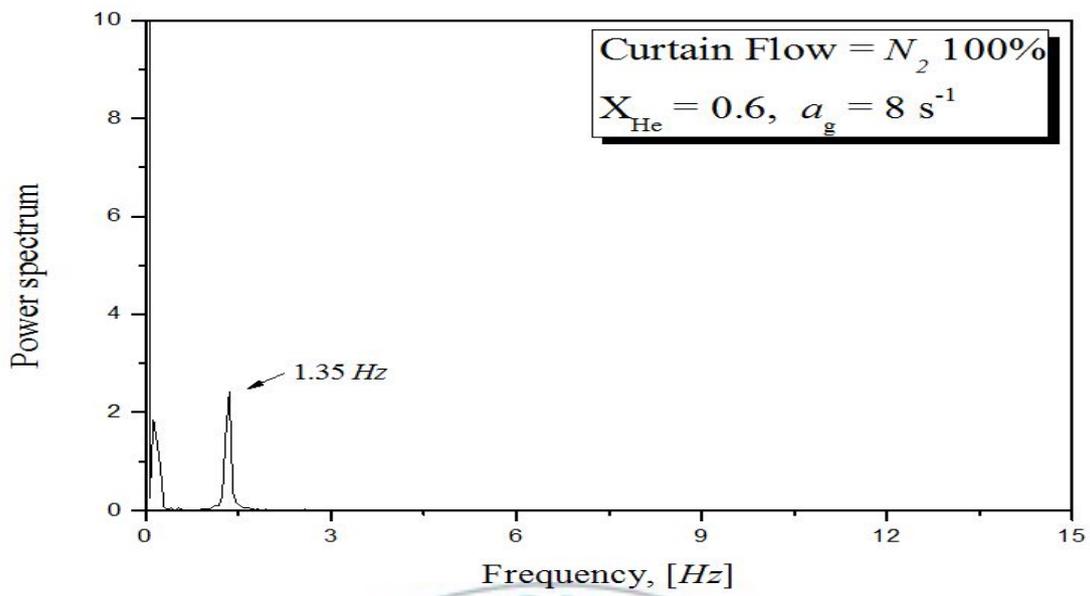
Figure 4.4 (d)에서 높은 열전도율을 가진 He 장막유동은 에지부분에서 과도한 열손실을 일으킬 수 있어 루이스 수에 의한 진동을 유발시킬 수 있다. 이러한 사실로부터 부력의 효과가 나타나는 질소 장막유동은 루이스수에 기인한 진동이 억제될 수 있음을 알 수 있다.

부력이 루이스수에 의한 진동을 억제하는 것을 명확하게 하기 위해, 장막유동에 분사되는 혼합기체의 밀도를 달리하여 부력의 크기를 조절하여 화염 거동을 FFT분석을 통해 Figure 4.5와 같이 나타내었다. 연료 측의 희석제로 쓰인 헬륨의 몰분율을 0.7과 0.75로 고정하고, 장막유동의 질소를 조금씩 첨가하여 부력의 크기가 점차 증가하였을 때 나타나는 화염 거동을 FFT분석을 통해 도출한 그래프이다. Figure 4.5에서 알 수 있듯이 장막유동의 질소 몰분율이 증가할수록 즉, 부력의 크기가 증가할수록 진동 주파수는 감소하는 것을 알 수 있으며, 장막유동의 질소 몰분율이 임계값보다 커지면 진동 주파수는 사라지게 된다. 즉 부력의 크기가 어느 임계값보다 초과 되면 앞선 보았던 약 4~5 Hz의 진동이 멈추는 것을 확인할 수 있다.

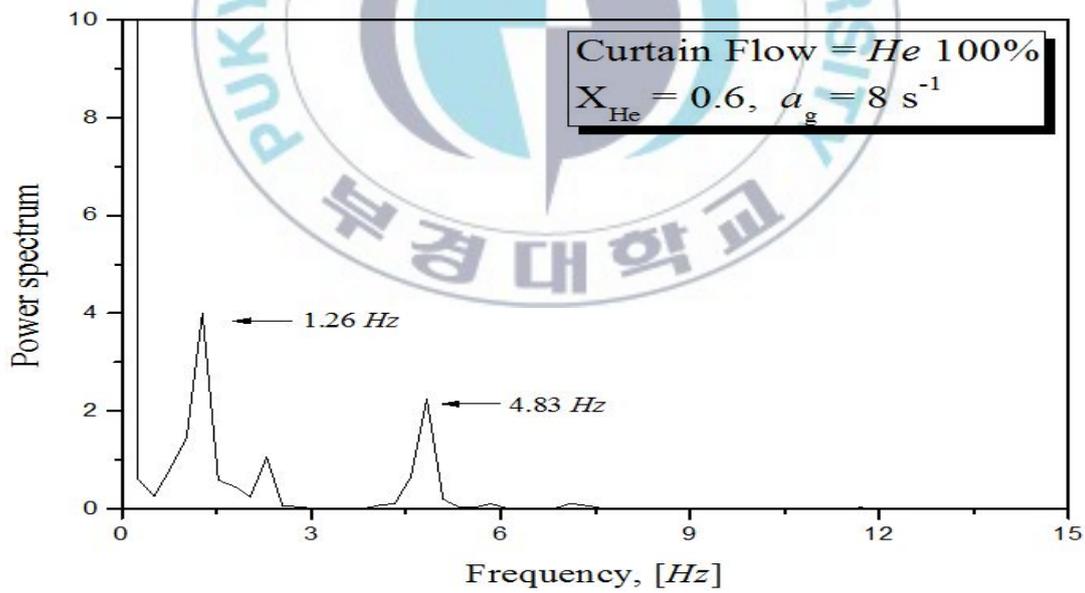
이는 앞서 관찰된 약 4~5 Hz의 진동이 일반적으로 부력에 작용하는 조건에서는 부력에 의해 억제되어 관찰되지 않고, 부력의 크

기가 임계값 이상으로 낮춰진 조건에서 비로소 관찰됨을 알 수 있다. 또한, 이러한 진동을 유발하는 요인에 대해서는 루이스 수라고 판단하고 있으나, 이를 명확하게 하기 위해서 추가적인 실험과 DNS코드를 이용한 수치해석을 수행하여 좀 더 면밀히 살펴 볼 필요가 있다.

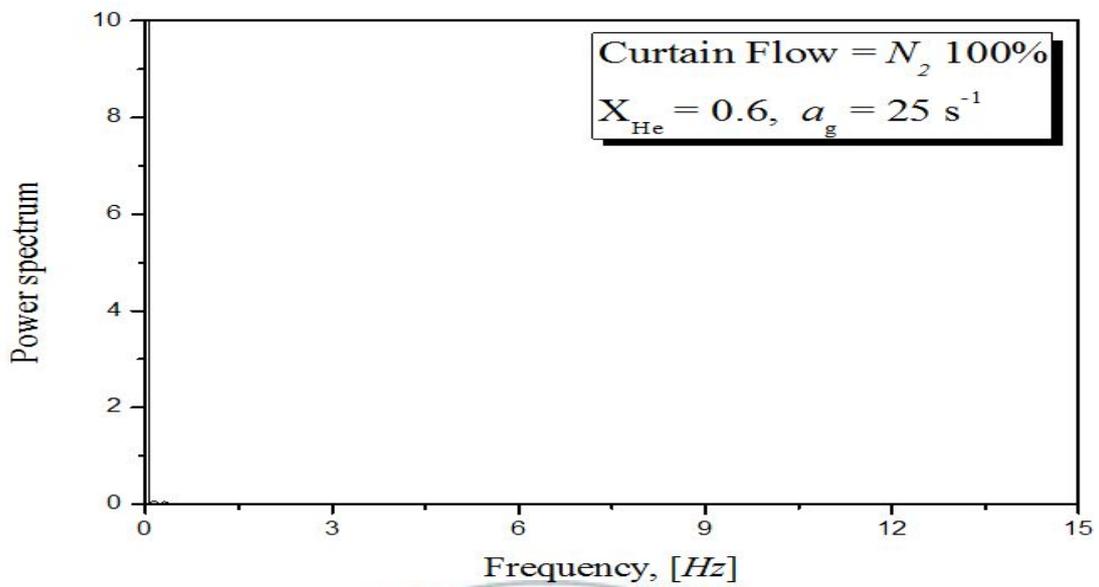




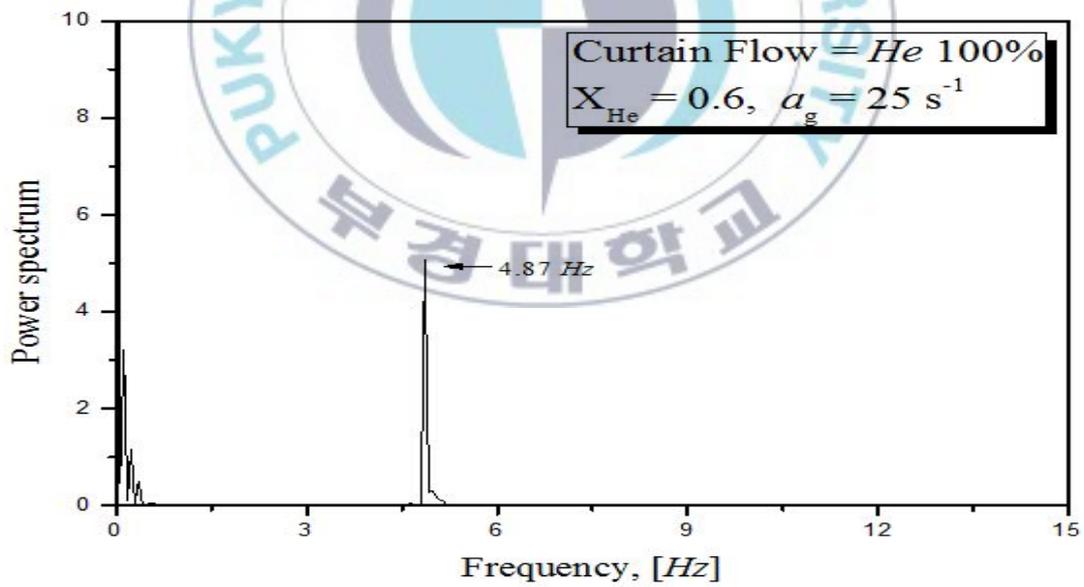
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4.4 Various of flame oscillation frequency in terms of both global strain rate and buoyancy.

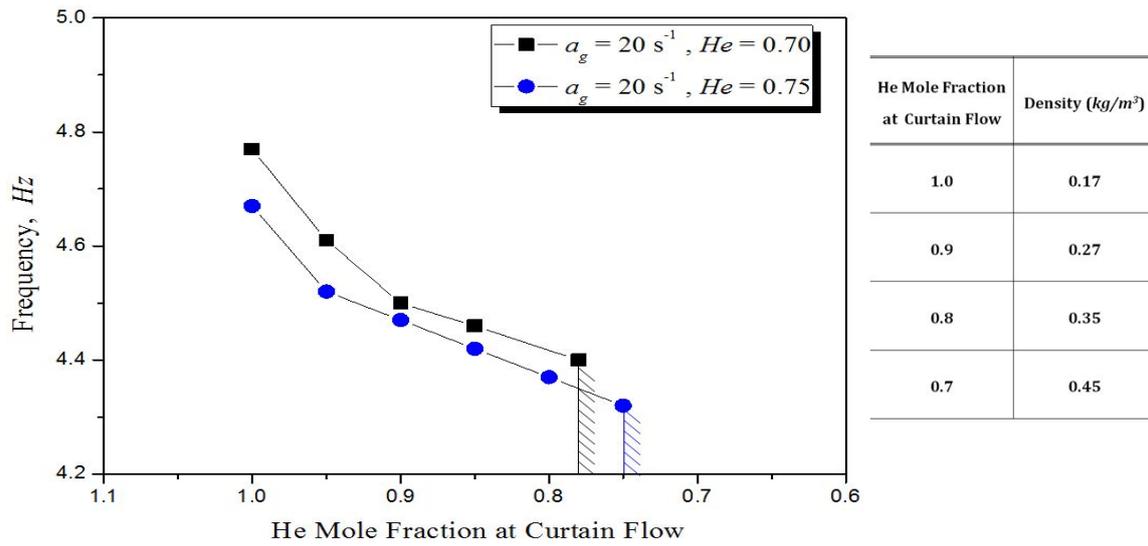
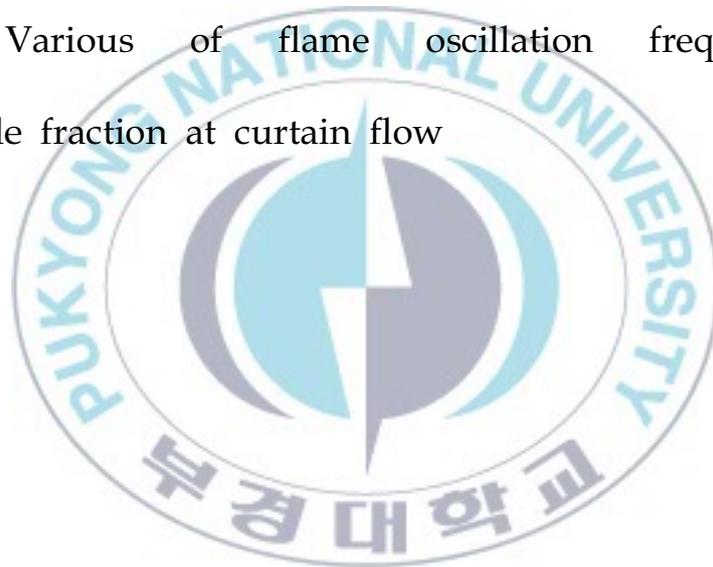


Fig. 4.5 Various of flame oscillation frequency with helium mole fraction at curtain flow



제 V 장 결 론

대향류 확산화염의 화염 거동에 대해 진행된 기존의 연구들을 명확히 하기 위해 부력을 제거한 조건에서 실험이 진행되었다. 상온에서의 헬륨의 밀도와 화염대 밀도의 차이가 매우 적은 것에 주목하여 대향류 환경에서 화염 교란 방지와 주위 분위기 형성에 사용되는 장막유동을 헬륨으로 선택하여 부력을 제거하는 실험기법을 개발하였다. 실험은 화염의 점화 후에 연료 측에 희석제의 물분율을 증가시키는 형식으로 진행되었고, 장막유동에 질소를 첨가하는 형식으로 주위분위기를 형성하는 혼합기체의 밀도를 조정함으로써 부력의 크기를 점차 증가시키며 수행되었다.

전체 신장률에 따른 연료 희석제의 화염소화임계 물분율은 C 커브 형태로 나타났으며, 순수 메탄화염에서 화염이 소화되는 임계 전체신장률은 4.7 s^{-1} 이며, 이는 본 연구에 사용되었던 26 mm 직경의 버너보다 큰 버너를 사용하였을 경우 임계 전체신장률은 더 낮은 값을 가질 것이라 판단된다.

한편, 부력을 제거하였을 경우 화염은 전체 신장률과 희석제의 물분율에 관계없이 약 4~5 Hz의 주파수로 진동하였다. 특히, 저신장률의 화염 소화 시에는 기존의 화염 소화에 나타났던 반경방향의

전도열손실에 기인하는 진동과 혼재되어 나타남을 확인하였다. 이러한 약 4~5 Hz의 진동이 부력과 관계있는 것으로 판단하고 장막 유동에 질소를 첨가하는 형식으로 밀도를 달리하여 부력의 크기를 조절한 결과 부력의 크기가 증가할수록 진동 주파수는 감소하는 것을 알 수 있었으며, 부력의 크기가 임계값보다 커지면 진동 주파수는 사라지게 되며, 이는 부력에 의해 진동이 억제되고 있다가 임계값 이상으로 부력이 제거되면 진동이 나타난다는 것을 알 수 있다.

또한, 이러한 진동을 유발하는 요인에 대해서는 루이스 수라고 판단하고 있으나, 이를 명확하게 하기 위해서는 추가적인 실험과 DNS코드를 이용한 수치해석을 수행하여 좀 더 면밀히 살펴볼 필요가 있다.

감사의 글

2011년 5월 따뜻한 봄날에 창원 두산중공업으로 원자력발전소의 주요 기자재인 원자로와 터빈을 제작하는 공장을 견학하게 되었다. 같이 견학을 간 직원들과 얘기를 나누며 환경산터널을 통과하던중 부경대를 졸업한 직원들이 있어 커피 한잔과 캠퍼스를 둘러보기 위해 그 곳을 방문하게 되었다. 이것이 나와 부경대가 인연을 맺어주는 계기가 될 줄 그 때 몰랐다.

캠퍼스를 돌아보던중 조선공학과에 과거 실험실의 선배이셨던 김동준 교수님이 계셔서 인사를 드릴려고 연구실을 방문하였다. 김동준 교수님께서 반갑게 맞이하여 주시면서 부산에 머무는 동안 공부를 더 하는게 어떻겠느냐고 조언을 해주셨다. 김교수님의 그런 제안이 없었다면 아마도 내 인생의 올바른 선택중 하나를 놓쳤을 것이다. 내 인생의 멘토로서 항상 많은 가르침을 주시는 김동준 선배님이 계셔서 고향 부산에 가면 든든한 마음이 드는 것은 사실이다.

김교수님의 권유로 기계공학과의 권오봉 교수님을 소개받았고 권교수님의 도움으로 박정 교수님을 지도교수로 모시는 영광을 얻게 되었다. 권교수님은 이후 박사과정 내내 저의 학업에 관심과 격려를 아끼지 않으셔서 항상 마음속 깊이 고마움을 느낍니다.

학사와 석사를 조선공학과에 다니면서 주로 구조 및 유체 역학, 유체도 해수를 중심으로 공부를 하였으며, 석사에서는 해양 구조물의 거동에 대한 논문을 썼지만 졸업하자마자 1989년 한전 및 한수원에 근무를 하다 보니 내가 배운 것은 오직 원자력발전에만 관한 것이 전부였다.

박사논문의 주제인 연소 및 화염 분야는 나에게 너무나 생소하고 어려운 분야임에도 불구하고 여러모로 물심양면 많은 도움을 준 같은 실험실의 석사과정 정용호, 송원식 그리고 학부과정이지만 실험에 많은 도움을 준 반규호에게 깊은 감사의 마음을 전하며 앞으로도 좋은 추억으로 간직하겠습니다.

박사과정을 수학하면서 내가 참 행운아라고 느낀 것은 연소 특히 화염분야에 세계적인 석학이신 박정 교수님을 지도교수로 모셨다는 것이다. 학자로서 인생은 어떻게 살아오셨고 그리고 교수님의 생활과 삶의 방식을 옆에서 지켜보면서 내 인생에 많이 부족한 부분을 깨달을 수 있는 좋은 기회가 되었다. 비록 제가 이 분야의 뛰어난 제자는 아니지만 항상 교수님의 명예를 더 높일 수 있도록 산업계에서 더욱 분발하겠습니다. 그리고 진정 감사합니다.

회사 업무와 병행하면서 학업을 수행하는 것은 오직 나만이 노력한다고 되는 것은 아니다. 나와 같이 근무하면서 항상 내 빈자리를 메꿔어 주었던 최진혁, 김길호, 이승찬, 박정철 차장에게도 그 동안의 노고에 감사를 드리며, 특히 여러 모로 지원과 배려를 아끼지 않으셨던 석기영 소장님, 그리고 윤종성 실장님께도 깊은 감사를 드리며 앞으로도 계속 건강하시기를 기원합니다.

집안의 둘째 아들로써 기대에 못 미치지만 항상 사랑과 격려로 이끌어 주신 아버님, 어머님께 깊이 감사를 드리며, 유일한 아들이 수원이를 지금까지 돌보아 주셔서 어엿한 대학생이 되도록 해주신 장모님(송순이 여사님)께도 아무리 감사와 보답을 해 드려도 아마 부족할 것입니다.

끝으로 좋은 자식, 남편, 부모로서 부족한 저에게 20여 년간 묵묵히 자기 자리를 지키면서 오늘날 여기까지 이끌어주고 사랑으로 헌신해준 아내 이지연(眞如)에게도 존경과 고마움을 전하며 남은 미래를 아내와 함께 행복하고 아름답게 그려 나가겠습니다.

2014년 01월

박인식 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 tribrachial 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] Y. H. Chung, D. G. Park, J. H. Yun, J. Park, O. B. Kwon, S. I. Keel, "Role of outer-edge flame on flame extinction in nitrogen-diluted non-premixed counterflow flames with finite

burner diameters.", *FUEL*, Vol. 105, pp. 540-550, 2013

- [17] Kolmogorov, A. N., Fomin, S. V., "Elements of the Theory of Functions and Functional Analysis", Dover Pubns, ISBN-10 : 0486406830, ISBN-13 : 9780486406831, 1999.
- [18] Peters, N., "Laminar Diffusion Flamelet Models in Non-premixed Turbulent Combustion", *Prog. Energy Comb. Sci.*, Vol. 10, pp.319-339, 1984.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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

- [23] 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.
- [24] V.S. Santoto, A. Liñáan, A. Gomez, "Propagation of edge flame in counterflow mixing layers in Experiments and theory", *Proc. Combust. Inst.* 28 (2000) 2039-2046.
- [25] V.N. Kurdyumov, M. Matalon, "Stabilization and onset of oscillation of an edge-flame in the nearwake of a fuel injector", *Proc. Combust. Inst.* 31 (2007) 909-917.
- [26] M.S. Cha, P.D. Ronney, "Propagation rate of non-premixed edge flame", *Combust Flame* 146 (2006) 312-328.

Study on Flame Extinction Behavior in Buoyancy-minimized Counterflow Diffusion Flame

In Sik Park

Department of Mechanical Engineering,
Graduate School
Pukyong National University

Abstract

An experimental study was conducted to elucidate flame extinction phenomena in buoyancy-minimized counter-flow flames. Considering a small difference between the densities of flame zone and helium, helium curtain flow was adopted to minimize buoyancy force in non-premixed counterflow configuration. Experiments were performed such that diluent mole fraction in the fuel side could increase until the flame was extinguished, and the buoyancy force could increase gradually by adding nitrogen to the helium curtain flow.

Critical helium mole fraction at flame extinction with global strain rate showed the typical C-shape. The global limit strain rate, below which even pure methane could be extinguished, was 4.7 s^{-1} . The limit strain rate was expected to have lower values in case of larger burner diameters than 26 mm.

The outermost edge flame without buoyancy effect was self-excited in oscillation range of 4~5 Hz irrespective of global strain rate and diluent mole fraction in the fuel side. Such orders in frequency could be caused by buoyancy and/or Lewis number. In the past study on self-excitations

in laminar lifted jet flames, Lewis-number-induced self-excitation was shown to be suppressed by buoyancy-driven one, and both had the similar order of $O(1.0 \text{ Hz})$. In this sense, experiments were conducted by varying the buoyancy force via adding nitrogen into the helium curtain flow. The result showed that the self-excitation frequency decreased with increasing buoyancy force and it disappeared below the critical helium mole fraction in curtain flow (above the critical buoyancy force), implying that the buoyancy force suppressed the self-excitation. Considering many aspects observed in the past studies, the self-excitation might be addressed to Lewis number. Nevertheless, further research efforts are required to solve it in the future.

