

슬롯 버너에서 농도 구배가 삼지 화염의 부상 특성에 미치는 영향

서정일* · 김남일** · 신현동***

Concentration Gradient Effects on Liftoff Characteristics of Triple Flame on a Slot Burner

Jeong Il Seo, Nam Il Kim, Hyun Dong Shin

Key Words : triple flame, lifted flame, slot burner, laminar burning velocity

ABSTRACT

The concentration gradient effects on triple flame have been studied experimentally using a slot burner in order to stabilize stationary triple flame in coflowing stream. By means of contraction we generate the coflowing stream with uniform velocity and linear concentration gradient at the outlet of the slot. In this paper we investigated the response of the triple flame, to the concentration gradient, like the stability, the liftoff height, and the structure of triple flame. Flow velocity is measured with Laser Doppler Velocimetry. As the concentration gradient increases, the flame propagation velocity in immediately upstream triple point increases until the liftoff height of triple flame becomes minimum, and then decreases.

기 호 설 명

- ϕ : 당량비
 $\nabla\phi$: 농도 구배
 V_m : 축소형 노즐 출구에서의 평균유속
 V_f : 화염 전파 속도
 S_L : 층류 화염 전파 속도
 LP : 회박 예혼합 화염
 RP : 과농 예혼합 화염
 DF : 확산 화염

1. 서 론

최근에 층류나 난류에서 화염의 부상과 화염의

전파를 연구하는데 있어 삼지 화염이 중요한 역할을 차지하고 있다. 특히, 확산 화염의 안정화와 난류에서 국부적 소화이후 재 점화의 과정에서 삼지 화염이 화염의 구조를 이해하는데 기초가 된다.

Phillips⁽¹⁾가 부력의 영향을 받고 있는 메탄과 공기의 혼합 층에서 화염의 전파를 실험적으로 연구하여 삼지 화염의 구조를 1965년에 발견하였다. 이 연구에서 그는 삼지 화염의 선단에 작은 농도 구배를 주어 혼합 층으로 화염이 전파되어 가는 속도를 측정하였다. 실험 장치에서 메탄의 유로는 공기의 유로 상부에 위치하여, 메탄은 공기의 위쪽에서 아래쪽으로 확산되어 혼합 기체를 만들었다. 공기 유로의 상부는 연료 농도가 진하고, 반대로 하부는 순수 공기만 존재하게 된다. 따라서, 연료의 유량 조절로 농도 구배를 가해 줄 수 있는 범위가 한정되어 있다. 큰 농도 구배를 줄 수 없었기 때문에 작은 농도 구배에서만 삼지 화염의 전파 속도를 관찰하였다.

Azzoni⁽²⁾, Puri⁽³⁾ 등은 Wolfhard-Parker 형태의

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

** 한국과학기술원

*** 한국과학기술원 기계공학과

슬롯 버너를 제작하여 중심 슬롯에는 과농 예혼합기를 양쪽에는 희박 예혼합기를 각각 공급하여 삼지 화염을 만들었다. 이 연구에서는 과농과 희박 예혼합의 당량비를 바꾸면서 농도 구배를 조절하였고, 각 슬롯의 유속을 변화시키면서 삼지 화염의 응답을 연구하였다. 그러나, 실험적 조건의 한계로 안정한 부상 화염을 얻지 못하고, 세라믹 허니콤(ceramic honeycomb)에 부착된 삼지 화염의 특성을 관찰하였다. 또한, 부상 화염에 관한 수치계산의 결과가 실험에서 관찰된 삼지 화염과 화염의 형상, 온도, 그리고 화학 조성이 거의 일치함을 보였다.

Chung^(4,6)과 Lee⁽⁵⁾는 미세 노즐을 통한 부상 화염의 안정성과 부상 높이의 측정, 이를 통해 이론적인 부상 높이의 계산 모델을 연구하였다. 노즐 출구 속도와 연료에 따라 안정한 부상 화염을 구현하였고, LDV(Laser Doppler Velocimetry)와 수치계산을 통해 속도를 측정하고 검증하였다. 화염의 존재로 인한 유동장의 재분배 효과 때문에 삼지 화염의 전파 속도가 층류 화염 전파 속도보다 상당히 빠름을 보여주고 있다.

Kioni^(7,8) 등은 다양한 농도 구배를 줄 수 있는 버너를 제작하여 안정한 부상 삼지 화염을 구현하였다. 이를 통해 삼지 화염의 전파 속도를 측정하였고, 수치계산의 결과로써 측정치를 검증하였다. 버너에서 연소 챔버(chamber) 벽의 각도를 조절하여 유동장에 역속도 구배를 주어 화염의 안정화를 쉽게 하였다. 또한, 부피 기준으로 연료 중 질소가 55%인 희석 연료를 사용하여 화염의 역화를 방지하였다. 그러나, 연료 전체 유량 중 질소가 큰 양을 차지하므로 연료 자체로써 농도 구배를 줄 수 있는 범위가 한정되었다.

이처럼 많은 이론적, 실험적 연구와 수치계산을 통해 삼지 화염이 혼합 층 중으로 전파되어 가는 속도와 부상 특성을 연구하였다. 본 연구자들은 각 슬롯의 연료 유량을 개별적으로 컨트롤하여 다양한 농도 구배를 줄 수 있는 버너를 제작하였다. 유량의 개별 제어로 각 슬롯마다 상호 독립적으로 실험 조건을 여러 가지로 바꿀 수 있었기 때문에 평면 화염에서 농도 구배가 큰 삼지 화염으로의 변화를 관찰 할 수 있게 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

농도 구배가 삼지 화염의 부상 특성에 미치는 영향을 알아보기 위한 실험에는 슬롯 버너가 사용되었다. 그림 1은 실험장치의 기본적인 구조를 보여주고 있다. 다양한 농도 구배를 줄 수 있는

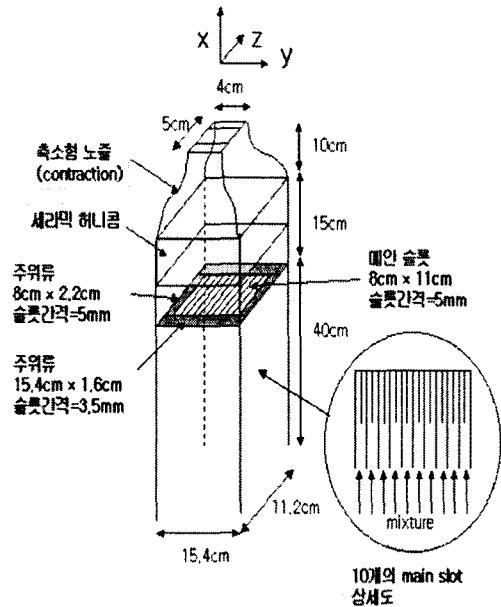


그림 1 실험 장치

10개의 메인 슬롯, 메인 슬롯 사방에 주위류 슬롯, 그리고 균일 유속을 얻기 위한 축소형 노즐 (contraction) 부분으로 구성되어 있다.

8cm x 11cm의 메인 슬롯은 두께 0.5mm의 스테인레스스틸 판을 겹쳐 슬롯을 만드는 방법을 이용하였다. 10개의 메인 슬롯은 그림 1의 상세도처럼 슬롯 출구에서 공급되는 예혼합 기체가 완전발달 유동이 되도록 각 슬롯 사이에 스테인레스스틸 판을 하나씩 삽입하였다. 예혼합 기체가 하나의 슬롯에 유입된 후 5mm 간격의 슬롯 2개로 나누어지는 방식이다. 메인 슬롯 사방에 주위류 슬롯을 설치하고, 불활성 기체인 질소를 공급하여 슬롯 출구에서 Wolhard-Parker 형태의 2차원 화염을 형성하게 된다. 이때 주위류는 화염을 안정화시키고 주위 공기의 유입을 차단하는 역할을 하게 된다. 슬롯 출구에서 혼합 기체는 균일 농도를 가지고, 슬롯 끝단에 설치된 축소형 노즐을 지나면서 균일 유속을 가지게 된다. 면적이 1/8로 줄어드는 축소형 노즐은 농도 구배는 그대로 유지시키고, 노즐 출구에는 균일 유속을 갖도록 한다.

축소형 노즐 상류에 세라믹 허니콤(ceramic honeycomb)을 설치하여 화염이 버너 안으로 역화되는 것을 방지하였다.

2.2 실험방법

10개의 메인 슬롯과 주위류의 유량 조절은 오리

피스를 이용한 마노미터(manometer)를 제작하여 각각 metering valve로 연료와 공기 그리고 질소의 유량을 개별적으로 조절하였다. 실험에는 99% 이상의 순도를 가지는 프로판을 연료로 사용하였다.

노즐 출구에서 층류 화염 전파 속도보다 빠른 평균 유속을 가지도록 여러 가지의 평균 유속에 대해 실험하였다. 실험 조건으로는 축소형 노즐 출구의 평균 유속이 $V_m = 75, 100, 105, 110, 115, 120, 125, 130, 150$ cm/sec인 경우에 대해서 행하였다.

실험의 초기 조건은 주어진 노즐 출구의 평균 유속에 따라 10개의 메인 슬롯의 당량비가 1이 되도록 개별적으로 슬롯의 공기와 연료량을 조절하였다. 주위류의 유속도 메인 슬롯의 유속과 같아지도록 조절하여 정해진 평균 유속이 되도록 하였다.

10개의 메인 슬롯이 주어진 노즐 출구 유속에 대해 모두 당량비가 1인 경우를 농도 구배($\nabla\phi$)가 0이라고 정의하였다. 농도 구배가 0인 조건에서 6번째 슬롯을 기준으로 하여 1~5번 슬롯은 농도 구배만큼 당량비 1에서 빼주고, 7~10번 슬롯은 농도 구배만큼 당량비 1에서 더해 주었다. 이런 방법으로 공기의 유량은 고정한 채 연료의 유량만을 변화시켜 각 슬롯에 원하는 당량비를 얻었다. 농도 구배는 0에서 1.95까지 0.05만큼 증가시켜 주어 다양한 경우의 실험 조건을 얻었다. 만약 농도 구배가 커서 각 슬롯의 당량비가 0보다 작은 경우에는 각 슬롯의 연료를 전혀 공급하지 않게 metering valve를 조작하였다. 단지 슬롯의 연료 유량만을 조절하여 주어진 농도 구배 조건을 갖도록 하였기 때문에 전체 유량에서 증가되거나 감소된 연료의 유량은 0.3% 미만으로 노즐 출구에서 평균 유속의 변화는 무시할 수 있다. 여러 가지 경우의 농도 구배 실험 조건은 표 1과 같이 설정하여 실험하였다.

표 1 여러 가지의 농도 구배에 대한 각 슬롯의 당량비 조건

case	$\nabla\phi$	slot 1	slot 2	slot 3	slot 4	slot 5	slot 6	slot 7	slot 8	slot 9	slot 10
1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0.05	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1	1.05	1.1	1.15	1.2
3	0.1	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4
...
40	1.95	0	0	0	0	0	1	2.95	4.9	6.85	8.8

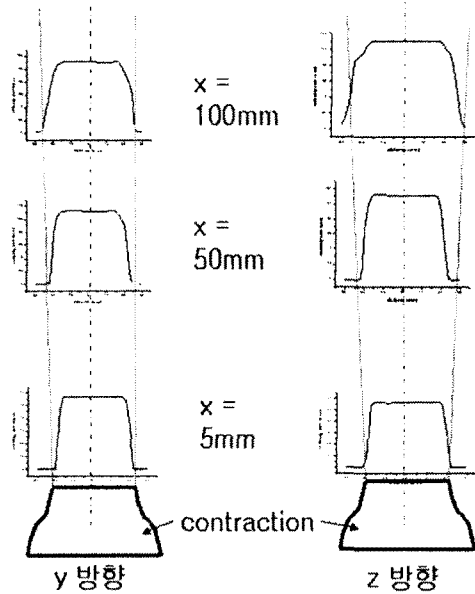


그림 2 화염이 없을 때 노즐 출구에서 하류 방향으로의 유속 분포

축소형 노즐 출구의 유속 분포를 측정하기 위해 피토 튜브를 이용한 마이크로 마노미터(micro manometer)를 사용하였다. $0.5\mu\text{m}$ 의 산화 알루미늄(Al_2O_3) particle을 띄우고 LDV (Dantec Laser Doppler Velocimetry)를 사용하여 속도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구는 우선 화염이 없는 경우 노즐 출구에서의 유속을 마이크로 마노미터를 이용하여 하류 방향으로 x 만큼 이동하면서 측정된 결과를 그림 2에 나타내었다. 화염이 없는 경우에는 y, z 방향으로 노즐 출구에서 충분히 하류인 지점에서도 출구 유속과 동일한 유속을 갖고 있음을 확인하였고, 유속 분포 또한 거의 일치하였다. 따라서, 실험 범위 내에서 균일 유동장이라 볼 수 있다.

3.1 농도 구배에 따른 삼지 화염 특성

그림 3은 본 연구에 사용된 버너로 구현한 안정한 삼지 화염이다. 삼지 화염은 오른쪽의 과농 예혼합 화염과 왼쪽의 희박 예혼합 화염과 두 예혼합 화염 중간에 유동 방향으로 긴 확산 화염으로 구성되어 있다. 중간의 확산 화염은 과농 예

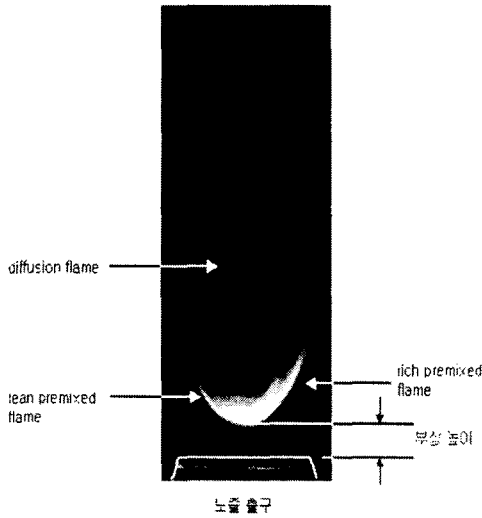


그림 3 대표적인 안정적인 삼지 화염 사진 ($V_m = 120 \text{ cm/sec}$, $\nabla \phi = 0.2$)

혼합 화염에서 미연으로 남은 연료와 희박 예혼합 화염에서 초과 공급된 공기가 서로 이론적 당량비로 결합하여 연소되는 형태이다. 양쪽의 두 예혼합 화염과 중간의 확산 화염이 서로 만나는 지점을 삼지점(triple point)이라 한다. 안정한 부상 화염의 부상 높이는 노즐 출구에서 이 삼지점까지의 수직 높이로 정의하여 측정하였다.

노즐 출구의 평균 유속에 따라 표 1의 조건으로 농도 구배를 바꿔 주었을 때 안정한 삼지 화염의 존재 유무를 관찰한 결과를 그림 4에 나타내었다. 노즐 출구의 평균 유속이 층류 화염의 전파 속도보다 약 3배정도 더 빠른 130 cm/sec 이상에서는 어떠한 농도 구배의 조건에서도 안정한 삼지 화염이 존재하지 않으며, 전 실험 조건에 대해 화염의 날림(blow out)이 발생하였다. 노즐 출구 평균 속도가 125 cm/sec의 경우 적당한 농도 구배의 조건까지 안정한 부상 화염으로 존재하다가 농도 구배가 더 커지면 안정한 부상 화염이 존재하지 못하고 하류 방향으로 서서히 화염이 이동하면서 날아가 버린다.

노즐 출구의 평균 유속이 층류 화염 전파 속도보다 약 2.3배 이상 빠르지 않으면 어떠한 농도 구배 조건에서도 안정한 삼지 화염은 존재하지 않으며, 전 조건에 대해 화염이 역화(flash back)되었다. 노즐 출구 속도가 105 cm/sec의 경우 화염이 적당한 농도 구배의 조건까지는 역화되다가 농도 구배가 더 커지면 안정한 부상 화염이 존재하였다. 당량비가 1인 지점을 따라 삼지 화염의 전파 속도와 유동장의 속도가 일치하는 지점에서 안정한 부상 화염이 존재함을 볼 때, 화염의 역

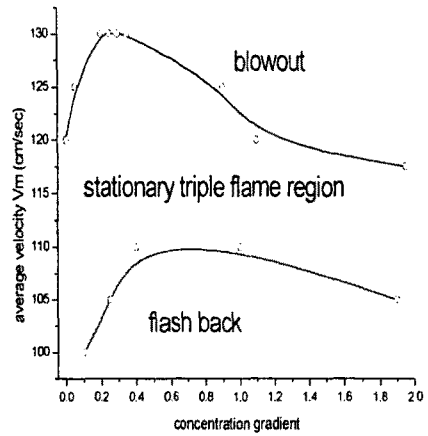


그림 4 농도 구배에 따른 부상 화염의 안정화 선도

화는 삼지 화염의 전파 속도가 유동장의 속도보다 빠름을 의미한다. 여기에서 층류 화염 전파 속도와 삼지 화염의 농도 구배에 따른 전파 속도를 비교할 수 있다. 또한, 화염의 역화는 화염의 날림과 반대의 경향을 보임을 알 수 있다. 두 경계선 안쪽은 어떤 농도 구배의 조건에서도 안정

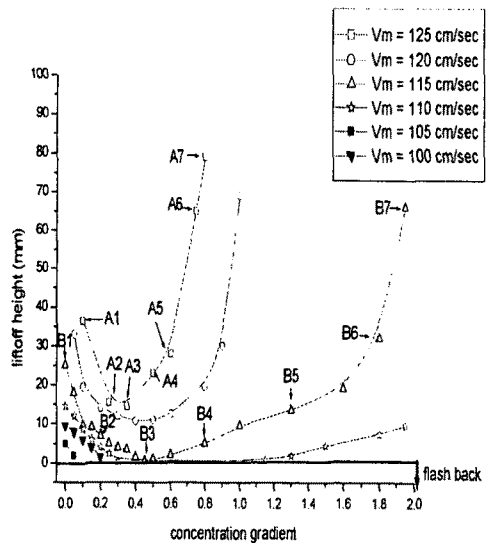


그림 5 노즐 출구 평균 유속과 농도 구배에 따른 안정한 부상 화염의 부상 높이 변화

한 부상 화염이 존재하였다.

화염의 안정화 선도를 바탕으로 해서 농도 구배에 따른 안정한 삼지 화염의 부상 높이를 측정 한 결과를 그림 5에 나타내었다. 출구 평균 유속에 따라 농도 구배를 증가시키면 따라 화염의 부상 높이가 U자 형태로 삼지점이 최저점에 이를 때까지 감소하다가 이후에는 증가함을 볼 수 있다. 출구 평균 유속이 층류 화염 전과 속도보다 약 2.3배정도 빠른 100 cm/sec와 105 cm/sec인 경우에는 작은 농도 구배에서만 안정한 화염이 존재하고, 부상 높이도 1cm 미만으로 화염이 축소형 노즐 근처에서 안정화되었다. 농도 구배가 더 커짐에 따라 화염이 노즐 안으로 재빨리 역화하였다.

노즐 출구 평균 유속이 층류 화염 전과 속도보다 약 2.6배정도 빠른 115 cm/sec에서는 모든 농도 구배 조건에서 화염의 날림과 역화가 발생하지 않았다. 부상 화염의 안정화는 당량비가 1인 지점을 따라 삼지 화염의 전과 속도와 유동장의 속도가 일치하는 지점에서 이루어진다. 이 경우 농도 구배를 0.4까지 증가시키면 삼지 화염의 전과 속도가 빨라지나 역화하지는 않고, 농도 구배를 1.95까지 증가시키면 반대로 삼지 화염의 전과 속도는 느려지나 화염의 날림은 발생하지 않는다.

층류 화염 전과 속도보다 2.5배 빠른 출구 평균 유속이 110 cm/sec인 경우에는 농도 구배를 증가시키면 따라 화염이 역화 되었다가 농도 구배를 1.05이상 증가시키면 다시 안정적인 부상 화염을 얻을 수 있음을 확인하였다. 노즐 출구 평균 유속에 따라 안정한 부상 화염이 존재 할 수

있는 영역이 기하 급수적으로 증가함을 알 수 있었다. 실험 조건에서는 관찰이 되지 않았으나, $V_m = 100 \text{ cm/sec}$ 나 $V_m = 105 \text{ cm/sec}$ 에서도 농도 구배가 1.95보다 더 커지면 다시 안정한 부상 화염을 얻을 수 있을 것이다.

그림 6은 노즐 출구 평균 유속이 115 cm/sec 와 125 cm/sec 일 때 농도 구배에 따른 삼지 화염의 형상 변화를 그림 5의 표기된 부상 높이에 따라 나타내었다.

농도 구배가 0에 가까울수록 화염의 형상은 평면 화염에 가깝게 나타난다. 따라서, 평면 화염에서 삼지 화염으로 어떻게 화염 형상이 변하는지, 그리고 층류 화염 전과 속도($S_L = 0.44\text{m/sec}$)와 삼지 화염의 전과 속도를 직접 비교 할 수 있게 된다. 비교를 위해 삼지점에서의 화염 전과 속도를 측정하는 것이 중요하다. $0.5\mu\text{m}$ 의 산화 알루미늄(Al_2O_3) particle을 띄어서 유동의 왜곡을 최소화 한 후, LDV(Laser Doppler Velocimetry)를 사용하여 화염이 있을 때의 유동장의 속도를 측정하였다. 비교적 넓은 영역에서 화염이 안정적으로 존재 할 수 있는 유속 120 cm/sec 에 대해 유동장의 속도를 측정하였으며, 그 중 농도 구배가 0.2인 경우에 대해 유동장 유속을 그림 7에 나타내었다.

화염이 있을 때의 유동장은 화염대의 열 확산의 영향을 직접적으로 받지 않는 영역과 화염대 직전의 열 확산 영역(heat diffusion zone), 그리고 연소 가스가 부력의 영향을 받는 영역(buoyancy effect zone)으로 구분 할 수 있었다. 화염대로부터 열 확산을 직접적으로 받지 않는 영역에서는 유동장의 유속이 화염의 존재 때문에 유동장이

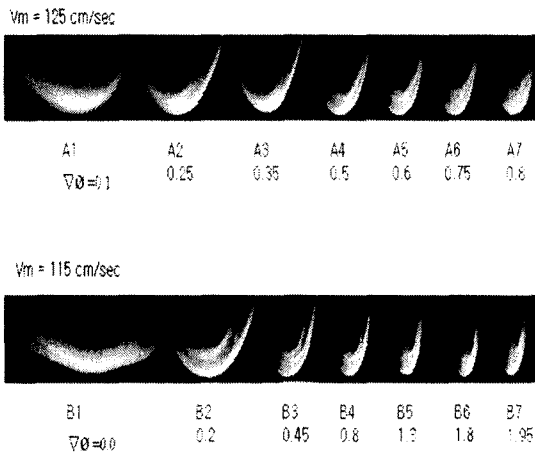


그림 6 농도 구배에 따른 부상 화염의 형상 변화

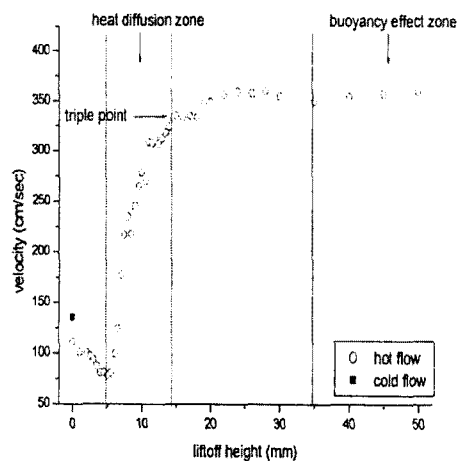


그림 7 $V_m = 120 \text{ cm/sec}$, $\nabla \phi = 0.2$ 일 때 유속

재분배가 생겨서 서서히 느려지다가 열 확산 영역에서는 급격히 유속이 빨라진다. 화염대 이후의 연소 기체는 온도가 상승하여 부력의 영향으로 점차적으로 유속이 증가하는 경향을 보임을 확인하였다.

삼지 화염의 부상 높이를 측정된 후, 화염이 없을 때 이 부상 높이에서의 유동장의 유속을 삼지 화염의 화염 전과 속도라고 생각하면 화염의 전과 속도를 쉽게 측정할 수 있다. 그러나, LDV를 이용해서 화염이 없을 때(cold flow)와 화염이 있을 때(hot flow) 각각 같은 위치의 유동장의 속도를 측정해본 결과 화염이 없을 때가 화염이 있을 때 보다 유속이 더 빠름을 확인하였다. 따라서, 화염이 없을 때 측정된 값은 실제보다 빠른 유속을 가지고 있으므로, 위의 방법으로 화염의 전과 속도를 구할 수 없다. 화염이 있을 때 유동장의 유속이 작게 나타나는 이유는 화염의 존재로 유동장의 재분배가 발생하기 때문이라고 생각된다.

삼지 화염의 전과 속도를 측정하기 위해서는 삼지점 바로 상류에 화염의 존재에 영향을 거의 받지 않는 지점에서 속도를 측정해야 한다. 즉, 열 확산 영역 직전에서 유동장의 유속을 측정하여 농도 구배에 따른 삼지 화염 전과 속도를 측정하였다. 이 측정값을 층류 화염 전과 속도($S_L = 0.44\text{m/sec}$)의 비로 나타낸 결과를 그림 8에 나타내었다. 이것을 보면 화염 전과 속도는 농도의 구배에 따라 부상 높이가 최저가 될 때까지 빨라졌다가 이후에 부상 높이가 높아지면 화염의 전과 속도는 감소함을 확인 할 수 있었다. 평면 화염에서 출발하여 여러 값의 농도 구배가 있는 삼지 화염까지 화염의 전과 속도가 변해 가는 것을 명확하게 보여주지는 못 했으나, 그런 경향이 나

타남을 알 수 있었다.

다시 말해, 평면 화염에서 농도 구배가 있는 삼지 화염으로 변해 갈 때 그림 8과 같이 화염 전과 속도는 점선과 실선을 거치면서 변해 갈 것이다.

4. 결론

주어진 노즐 출구 평균 유속에 따라 다양한 농도 구배를 주었을 때 삼지 화염의 형상, 부상 높이, 그리고 안정화 유무에 대해 실험적으로 알아 보았다.

노즐 출구 평균 유속이 층류 화염 전과 속도보다 약 3배정도 빠르면 모든 실험 조건에서 화염의 날림이 발생하였고, 약 2.3배 보다 평균 유속이 빠르지 않으면 모든 실험 조건에서 화염의 역화가 발생하였다. 특히, 층류 화염 전과 속도보다 2.6배 빠른 유속에서는 모든 실험 조건의 농도 구배에 대해서 화염의 날림과 역화가 발생하지 않음을 확인하였다.

화염의 존재로 화염대 상류 쪽에 유동장의 재분배가 일어났기 때문에 삼지 화염의 전과 속도가 층류 화염 전과 속도보다 크게 측정되었다. 농도 구배가 0일 때 화염은 평면 화염의 형상에 가까웠으나, 이때 화염의 전과 속도를 측정하기가 어려워 층류 화염 전과 속도와 농도 구배가 0인 삼지 화염의 전과 속도를 서로 연계시키기는 힘들었다. 하지만 평면 화염에서 삼지 화염으로 변해 갈 때 화염의 전과 속도가 명확하게는 보여주지는 못했지만, 그림 8과 같은 경향을 보임을 확인하였다. 또한, 화염 전과 속도는 농도의 구배를 증가시켜 주면 부상 높이가 최저가 될 때까지 빨라졌다가 이후에 화염 전과 속도가 감소하는 경향을 가짐을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)의 지원을 받았습니니다.

참고문헌

- (1) Phillips, H., Tenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1965, pp. 1277-1283
- (2) Azzoni, R., Ratti, S., Aggarwal, S. K., and Puri, I. K., Combust. Flame 119, 1999, pp. 23-40

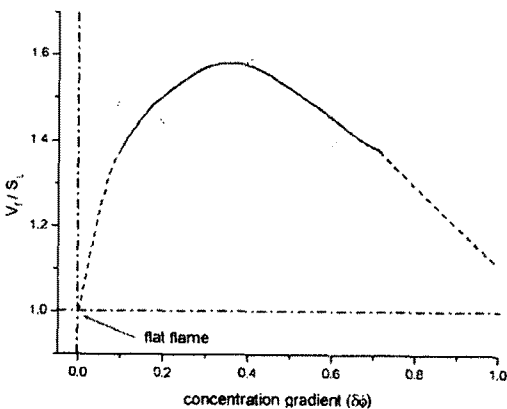


그림 8 농도 구배에 대한 삼지 화염의 전과 속도 ($V_m = 120 \text{ cm/sec}$)

- (3) Puri, I. K., Aggarwal, S. K., Ratti, S., and Azzoni, R., *Combust. Flame* 124, 2001, pp. 311-325
- (4) S. H. Chung, and B. J. Lee, *Combust. Flame* 86, 1991, pp. 62-72
- (5) B. J. Lee, and S. H. Chung, *Combust. Flame* 109, 1997, pp. 163-172
- (6) S. H. Chung, The Second Asia-Pacific Conference on Combustion, Taiwan, 1999, pp. 39-46
- (7) P. N. Kioni, B. Rogg, K. N. C. Bray, and A. Linan, *Combust. Flame* 95, 1993, pp. 276-290
- (8) P. N. Kioni, K. N. C. Bray, D. A. Greenhalgh, and B. Rogg, *Combust. Flame* 116, 1999, pp. 192-206