

단면 확대 덕트 내에 형성된 삼지화염의 부상특성에 관한 실험적 연구

서정일* · 김남일** · 오광철* · 신현동***

An Experimental Study on the Lift-off Characteristics of the Triple Flame within a Diverging Duct

Jeong Il Seo, Nam Il Kim, Kwang Chul Oh and Hyun Dong Shin

ABSTRACT

The lift-off characteristics of the triple flame within a diverging duct have been studied experimentally using a multi-slot burner, which can control the concentration gradient and the mean velocity independently. In this experiment the triple flame was stabilized successfully in lift-off condition and flame stabilization with a duct or without a duct, lift-off heights, and some other characteristics were examined for propane flame. It was examined that the effects with various concentration gradient and mean velocity on the triple flame. It was found that minimum value of the lift-off heights exist at a certain concentration gradient for constant mean velocity and flame with a duct is more stable than that without. Moreover the propagation velocity of the flame becomes maximum at a certain concentration gradient regardless of mean velocity.

기 호 설 명

Y_F : 연료의 질량분율	$\Delta\phi$: 슬롯간의 당량비 차이
∇Y_F : 농도구배 (연료의 질량분율의 구배)	V_m : 축소형 노즐 출구에서의 평균 유속
ϕ : 당량비	V_c : 중심축에서의 유속
	S_L^0 : 층류 평면화염 전파속도

Key Words : Triple flame(삼지화염), Flame Stabilization(화염안정화), Lift-off(부상), Slot Burner(슬롯버너), Flame Propagation Velocity(화염전파속도), Diverging Duct(단면 확대 덕트)

1. 서 론

확산화염의 부상과 난류 화염 전파를 연구하는데 있어 삼지화염은 연료의 질량분율의 구배(이후 농도구배)에 따라 서로 다른 화염전파속도가 존재하므로 화염의 구조를 이해하는데 있어 중요한 의미를 가지게 된다.

Phillips[1]는 농도 구배를 가지는 메탄과 공기의 혼합 층에서 화염의 전파를 실험적으로 연구하여 삼지화염의 구조를 발견하였다. 수평으로

* 한국과학기술원 기계공학과

† 연락저자, E-mail: seoji@kaist.ac.kr

Tel : 042-869-3057 Fax : 042-869-8820

** Tohoku University

*** 한국과학기술원 기계공학과

설치한 덕트 내부로 상부에는 메탄을, 하부에는 공기를 유입시켜 메탄의 유량을 증가시키면 자연스럽게 농도구배가 증가하도록 설계하였다. 농도구배의 증가에 따라 삼지 화염의 선단이 혼합층으로 전파되어 가는 속도를 측정하였다. 그 결과 농도구배가 증가함에 따라 화염전파속도가 감소함을 보였다.

Azzoni[2], Puri[3] 등은 삼중 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 실험 장치의 한계로 안정한 부상 화염을 얻지 못하고, 세라믹 허니콤(ceramic honeycomb)에 부착된 삼지 화염의 특성을 주로 관찰하였다. 부착 삼지화염의 형상, 온도, 그리고 화학 조성 측정치가 부상 화염에 관한 수치계산의 결과와 거의 일치함을 보였다.

Kioni[4,5] 등은 보다 능동적인 농도구배를 줄 수 있는 다중 슬롯 버너를 제작하여 안정한 부상 삼지화염을 구현하였다. 이를 이용해 삼지화염의 전파속도를 측정하고, 이론해석[4]과 수치계산[5]을 수행하였다. 연소실 덕트의 각도를 조절하여 유동장에 역속도 구배를 주어 화염의 안정화를 쉽게 하였고, 부피 기준으로 연료 중 질소가 55%인 희석 연료를 사용하여 화염의 역화를 방지하였다. 그 결과 농도구배가 증가할수록 Phillips의 결과와 반대로 화염전파속도가 조금 상승하는 결과를 보였다. 그러나 연료 유량 중 질소가 55%를 차지한 희석 연료를 사용하였기 때문에 다른 연구자의 결과와 직접적으로 비교되기 어렵다.

Plessing[6] 은 삼중 동축관을 이용하여 중심관으로부터 차례로 희석연료, 희박예혼합 연료, 공기를 공급하여 안정적인 부상화염에 대한 실험을 행하였다. 희석연료와 희박연료의 속도와 농도에 따른 부상 특성을 연구하였으나, 화염 상류의 속도 분포가 균일하지 않아서 기존의 이론들과 직접 비교되기에는 적합하지 않다.

Chung[7] 와 Lee[8] 는 0.2mm 정도의 미세 노즐을 이용하여 농도와 속도의 혼합 영역(mixing layer)에서의 층류 제트에 대한 이론해와 화염의 부상 높이 실험치로부터 부상화염의 안정화 기구를 해석하였다. 특히 Ko[9] 는 축대칭 조건에서 노즐 출구 속도에 따라 상대적으로 큰 농도구배 영역에서 삼지화염의 전파속도를 측정하였다. 그러나 이론당량비 조건의 화염 특성에 변화를 주지 않는 상태에서 낮은 농도구배의 삼지화염(희박 가연한계로부터 과농 가연한계까지의 화염을 가지는)을 형성하기에는 동축관을 이용한 분류는

적합하지 않다.

이상과 같은 많은 연구에서 삼지화염의 전파속도가 이론당량비인 층류 예혼합 화염의 연소속도보다 큰 값을 가지는 것으로 보고 되었다. 이러한 삼지화염 전파속도의 증가는 예혼합화염 하류의 밀도 변화가 유발하는 화염 상류쪽의 유동 변화로 설명되었다.

이와 같이 지금까지의 삼지화염에 관한 연구는 대부분 농도 구배가 적절히 커서 확산화염이 활발히 존재하는 경우에 대해 주로 다루어 졌다. 본 연구에서는 농도구배가 기존의 삼지화염 연구에 비해 상대적으로 매우 작은 범위에 대해 실험을 행하고자 한다. 본 연구에서는 안정적인 부상 화염 형성을 위한 실험적 조건을 찾고 낮은 농도 구배 영역에서의 화염전파 특성에 관한 실험 결과를 제시하고자 한다. 또한, 수축노즐 후단에 단면적을 자유롭게 조절할 수 있는 덕트를 설치하여 유동장에 역속도 구배를 주었을 경우 덕트 내 삼지화염의 부상특성을 관찰하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

농도 구배가 삼지화염의 부상 특성에 미치는 영향을 실험하기 위해 농도 구배의 능동적 제어가 필요하다. 이를 위해 다중 슬롯과 수축노즐로 구성된 버너를 제작하였다. Fig. 1은 실험장치의 기본적인 구조를 보여주고 있다.

버너는 슬롯부, 허니컴, 수축 노즐, 단면 확대 덕트로 이루어져 있다. 슬롯부는 다양한 농도 구배를 줄 수 있는 폭 10.5mm, 너비 80mm, 길이 400 mm의 슬롯 14개로 구성된다. 폭방향의 유동 균일화를 위해 각 슬롯에는 별도의 격막을 추가로 설치하였으며 격막과 슬롯벽은 두께 0.5mm의 스테인리스 판이다. 슬롯을 지난 예혼합기는 유동 균일화를 증진시키고 화염의 역화를 방지하기 위한 허니컴을 지나 약 1/6의 수축비를 가지는 노즐을 지나게 된다. 노즐 출구는 50×40 (mm) 이며 노즐 출구로부터 높이가 방향을 x, 슬롯을 가로 지르는 방향(농도 구배가 발생하는 방향)을 y, 슬롯의 너비 방향을 z라고 정의하였다.

수축 노즐이후에는 y 방향으로 단면 면적을 자유롭게 조절할 수 있는 덕트를 이용하여 유동의 유속을 강제적으로 감소하게 하였고, z방향으로는 화염의 가시화를 위해 수직 강화 유리를 설치하였다. 본 연구에서 덕트는 수직축에 대해 대칭으로 3.5° 만큼 경사져 있다.

각 슬롯으로 유입되는 공기와 연료의 유량은 각각 미세관을 지나는 유동 양단의 압력차를 마노미터와 미세조절 밸브를 이용해 조절하였으며 각각의 유량은 포말유량계(bubble meter)를 이용한

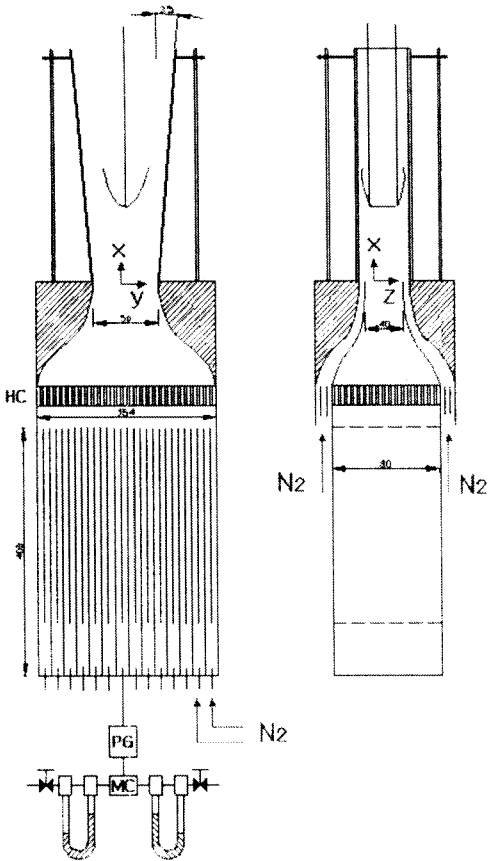


Fig. 1 Experimental apparatus and coordinates (MC: mixing chamber, PG: Particle generator, HC: Honeycomb)

여 검정하였다. 실험에 사용된 연료는 프로판 (98%)이며 유동 교란과 외부 산화제 유입을 막기 위해 14개 슬롯 중 가장자리 2개의 슬롯과 이중 수축노즐을 이용해서 질소를 공급하였다.

2.2 실험방법

실험 변수로는 평균유속(V_m)과 농도구배($\nabla Y_F = dY_F/dy$)가 사용되었다. 평균유속은 노즐 출구에서의 유량을 노즐단면으로 나눈 값을 사용하였으며, 농도구배 제어를 위해 14개의 슬롯 중 12개를 사용하고 가장자리 2개의 슬롯에는 질소를 유입시켰다. 또한, z방향으로는 별도의 이중 수축노즐을 설치하여 질소를 흘려주었다. 각각의 슬롯으로 공급되는 유량을 수축노즐의 면적비를 고려하여 일정하게 유지함으로써 평균 속도를 조절하였다.

평균유속 $V_m = 120\text{cm/sec}$ 일 때 비반응 축방향 유속을 살펴보기 위해 LDV(Dantec Laser Doppler Velocimetry)를 이용하여 유속 측정한다

결과가 Fig. 2(b)이다. 화염 선단이 주로 위치하게 되는 하류 $x=120\text{mm}$ 지점까지 영역에서 유속 측정 결과 축방향 속도가 선형적으로 감소함을 알 수 있었다. (z 방향 질소 유입이 있는 경우의 측정결과임.) 또한, Fig. 2(a)는 유동 가시화 사진이며 너트가 3.5° 만큼 경사각을 가지고 경사져 있는 경우에는 너트 표면에서 유동 박리가 발생하지 않음을 확인할 수 있었다.

LDV 측정시에는 $1.0\mu\text{m}$ 의 산화 알루미늄(Al_2O_3)과 케로신(Kerosine)을 particle로 이용하였다. 특히 케로신의 경우에는 유동에 영향을 미치는 양은 미량을 측정에 사용하였다.

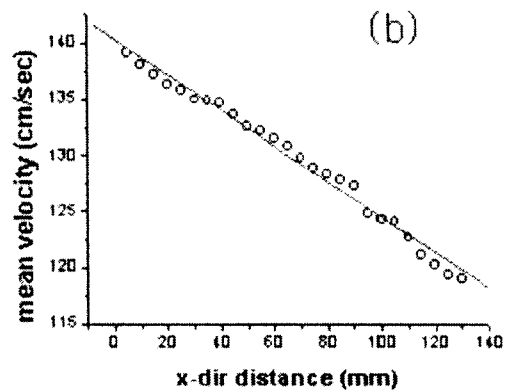
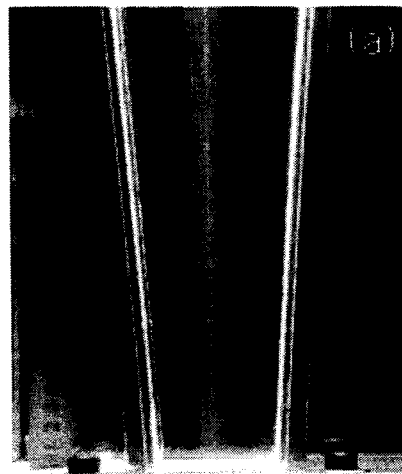


Fig. 2 (a) stream lines (b) axial mean velocity of the cold flow ($V_m=120\text{cm/sec}$)

또 하나의 실험변수인 농도구배(∇Y_F)는 12개의 슬롯 중에서 가운데 슬롯의 예혼합기 당량비가 이론당량비가 되도록 일정하게 고정하고 이웃한 각각의 슬롯간의 당량비의 차($\Delta\phi$)를 일정하게 조절하여 선형적인 분포를 가지도록 제어하였

다. 슬롯 출구로부터 노즐 출구까지의 유동 지체 시간동안 물질 확산계수로부터 구한 대략적인 확산거리는 슬롯 출구에서의 전체 폭(154mm)에 비해 충분히 작고 동일 농도를 가지는 슬롯의 폭(10.5mm)의 1/2 정도 크기를 가지므로 전체적인 농도의 구배는 변하지 않으면서도 슬롯 출구에서 발생한 슬롯간 농도의 계단형 분포는 노즐 출구에 이르면서 사라지게 된다.

이 같은 조건에서 덕트를 제거한 실제 노즐 출구에서의 농도구배를 구하기 위해 2nd harmonic ND-Yag 레이저(500mJ max.)와 고감도 CCD(Intensified CCD: PIMAX 512512)를 이용한 Rayleigh 산란 신호로부터 프로판의 질량분율의 공간분포를 구했는데 그 결과가 Fig. 3이다. 이로부터 이론당량비에 해당하는 지점에서의 질량분율의 기울기 값을 구하여 농도구배로 사용하였다. 노즐 출구에서 농도구배는 덕트 폭의 증가로 감소하지만 선형적인 농도구배를 변화시키지는 않을 것이라고 간주할 수 있다.

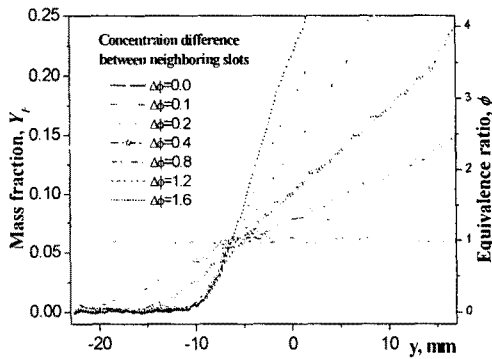


Fig. 3 Mass concentration distribution of the fuel for the given difference of the equivalence ratio

동일한 농도에 대해 평균유속이 변할 때 실제 농도구배의 변화를 추가실험을 통해 평가한 결과 평균유속이 10% 증가할 때 노즐 출구에서의 농도구배는 약 3% 증가하였으며, 이러한 변화는 유량 및 당량비 조절의 실험오차범위에 포함되므로 이후 농도구배는 평균유속에 무관하게 노즐 출구로부터 수직 높이에 따라 선형적으로 변한다고 생각할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 덕트 유무에 따른 삼지화염의 부상특성

연료의 농도구배가 존재하는 공간에 화염이 존재할 때 이론 당량비 조건을 기준으로 한쪽은 연료 희박 반대쪽은 연료 과잉의 상태가 된다. 이때 연료와 산화제의 조성이 예혼합 화염의 가연한계 내에 존재하면 각각 희박예혼합화염 혹은 과농예혼합화염을 형성하게 되는데, 이러한 예혼합화염 하류에서 잔류 산화제와 연료가 만나서 다른 하나의 확산 화염을 형성하게 되고 이를 삼지화염(Triple flame or Tribraichal flame)이라고 한다.

화염면의 전파 속도가 공급되는 예혼합기의 속도보다 클 때 역화가 발생하며, 평균유속을 보다 증가시키면 화염이 안정적으로 존재하는 부상영역이 있으며 평균유속이 일정 값보다 크면 화염이 더 이상 안정적으로 존재하지 못하며 하류로 이동하면서 결국엔 화염날림이 발생한다. 이러한 부상화염의 거동을 관찰하기 위해 직접사진을 촬영하였다. Fig. 4는 평균유속이 120cm/sec 인 조건에서 농도구배를 증가시켰을 때의 화염의 형상과 부상높이의 변화를 확인 할 수 있다.

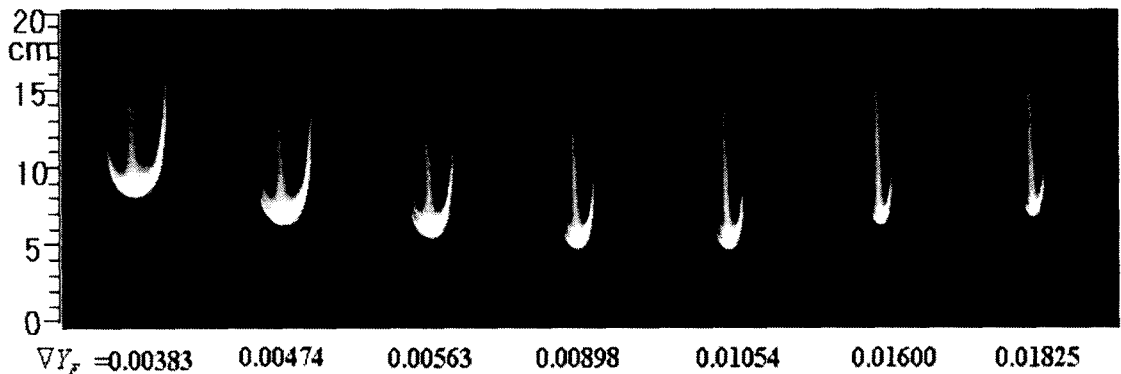


Fig. 4 Flame shape for the various concentration gradients ($V_m=120\text{cm/sec}$)

확산화염과 예혼합화염이 서로 만나는 지점을 삼지점(triple point)이라 하며, 안정한 부상 화염의 부상 높이는 수축 노즐 출구에서 이 삼지점까지의 수직 높이로 정의하여 측정하였다. ICCD 카메라를 이용해서 일정 평균유속에 대한 화염 부상높이를 평균해서 측정한 결과가 Fig. 5이다.

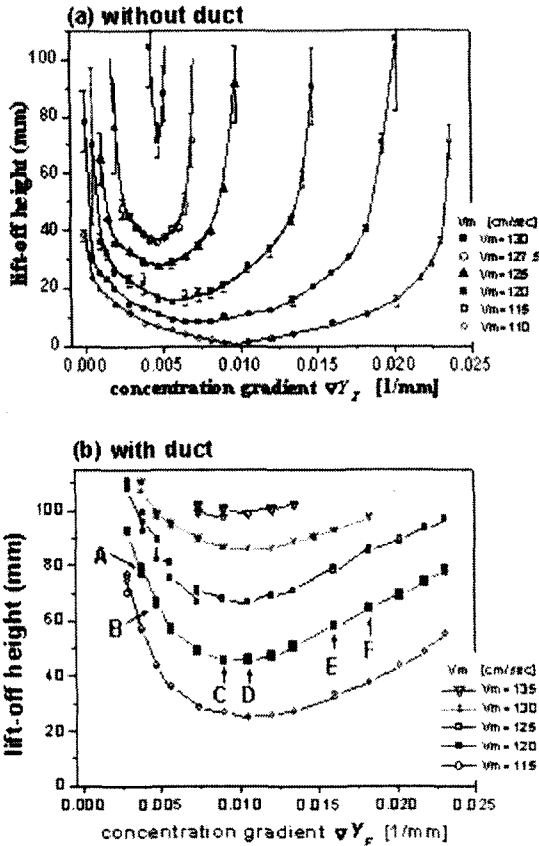


Fig. 5 Lift-off height with various concentration gradient for mean velocity
(a) without duct (b) with duct

이로부터 덕트 유무에 따른 삼지화염의 부상특성을 다음과 같이 확인할 수 있었다.

첫째는 노즐 후단의 덕트 유무에 관계없이 일정한 평균유속에 대해 농도구배가 증가할 때 화염의 부상높이는 U자 형태의 곡선 궤적을 가진다. 즉, 삼지점이 최저점에 이를 때까지 감소하다가 이후에는 증가한다.

둘째는 노즐 후단에 덕트가 존재할 경우 화염의 부상높이가 덕트가 존재하지 않는 경우보다 상대적으로 높다. 덕트가 존재하지 않는 경우에는 화염의 부상높이가 60mm 이상에서부터 진동이 시작되었으며, 80mm 이상에서는 진동폭이 상당히 크다. 그러나 덕트가 존재할 경우 농도구배의 증

가로 인한 급격한 높이의 변화 없이 거의 고정적으로 존재한다. 이는 덕트로 인해 축방향으로 유속 감소가 커서 화염이 상대적으로 높은 부상높이에서도 안정적으로 존재하기 때문이다.

셋째는 각각의 평균 유속에 대한 화염 부상높이를 비교해 볼 때 부상높이의 감소와 증가는 각각 화염전파속도의 증가와 감소를 의미한다. 즉, 일정한 농도구배에서 화염의 날림(blow out)이 발생하는 평균 유속과 날림이 발생하지 않는 평균 유속 사이에서 삼지화염의 전파속도가 결정됨을 알 수 있다. 이 사실로부터 삼지점이 최소가 되는 지점을 기준으로 농도구배가 더 작은 영역에서는 농도구배의 증가가 화염전파속도를 증가시킨다. 이는 희석연료를 사용하여 화염전파속도를 측정한 Kioni[4,5]의 실험결과와 유사하다. 그러나 최소 삼지점을 기준으로 농도구배가 더 큰 영역에서는 농도구배의 증가가 화염전파속도를 감소시킨다. 이는 기존의 많은 연구에서와 같이 화염의 곡률 증가와 예혼합 화염면의 스트레치 증가로 농도구배가 증가할 때 삼지화염의 전파속도가 감소하는 것으로 설명할 수 있다.

3.2 농도구배와 평균속도에 따른 덕트 내의 삼지화염의 부상특성

노즐 후단에 덕트가 존재할 경우 덕트로 인해 축방향 유속 감소가 커서 화염이 높은 위치에서 안정적으로 존재한다. 또한, 화염 상류의 작은 유동 교란에도 급격한 부상높이의 변화가 일어나지 않는다. 상대적으로 안정하게 덕트 내에 존재는 삼지화염의 중심을 지나는 유동방향 속도(V_c)를 각각의 농도구배에 따라 측정하기 위해 LDV(Laser Doppler Velocimetry)를 사용하였다. 여기에 $1.0\mu m$ 의 산화알루미늄(Al_2O_3) 입자를 particle로 이용하였다.

삼지화염은 예혼합화염면을 따라 연소속도가 변하므로 곡률을 가지게 되고 이에 따라 화염 상류의 유동재편(flow redirection)이 발생하는데, Fig. 6(a)는 부상화염 근처에서의 유선 변화를 보여주고 있으며 상대적으로 부상화염이 안정적인 평균 유속 $V_m = 120cm/sec$ 에서 Fig. 5(b)의 A, B, C, D, E, F 위치에서 농도구배에 대해 화염 중심축방향 속도측정의 결과가 Fig. 6(b)이다. 화염에 가까워짐에 따라 유속은 감소되어 최소속도에 이르며 이후 화염으로부터의 열 확산으로 부피가 팽창하고 속도는 급격히 증가하게 된다. 이것은 각각 농도구배 조건에서 공통적으로 나타나는 경향이다. 그리고 농도구배에 관계없이 화염 바로 상류에서 측정된 속도는 이론당량비의 층류 예혼합화염 전파속도와 거의 유사한 값을 가짐을 확인하였다. 즉, 이론당량비로 예혼합 연소하고 있는 삼지점에서는 농도구배에 관계없이 거의 같은 축방향 속도를 가짐을 알 수 있었다.

Fig. 6(b)에서 화염 상류에서 유속의 감소를 살펴보면 농도구배에 따른 부상높이와 화염의 크기에 따라 서로 다른 감소율을 가짐을 알 수 있으며 최종적으로 이론당량비의 층류 예혼합화염 전파속도까지 감소한다. 그밖에 확산화염의 활성화 정도가 감소율에 미치는 영향을 확인하기 위해 추가적인 실험을 행할 계획이다.

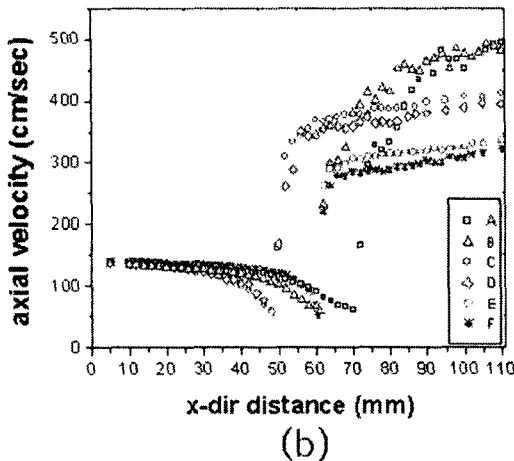


Fig. 6 (a) stream lines of the triple flame (b) axial mean velocity at the triple flame ($V_m=120\text{cm/sec}$)

수축 노즐 후단에 덕트가 있는 경우 다양한 평균유속에 대해 안정적으로 부상화염이 존재한다. 이것으로부터 평균유속과 농도구배의 변화에 따른 부상높이를 얻을 수 있었다. 부상화염의 화염

전파속도를 부상높이에서의 비반응 유속으로 정의하고 부상높이 결과로부터 화염전파속도를 각 위치에서의 비반응 유속으로 나타내면 Fig. 7 과 같다. 그 결과 평균유속에 관계없이 주어진 농도구배에서 일정한 화염전파속도를 가짐을 확인할 수 있었다.

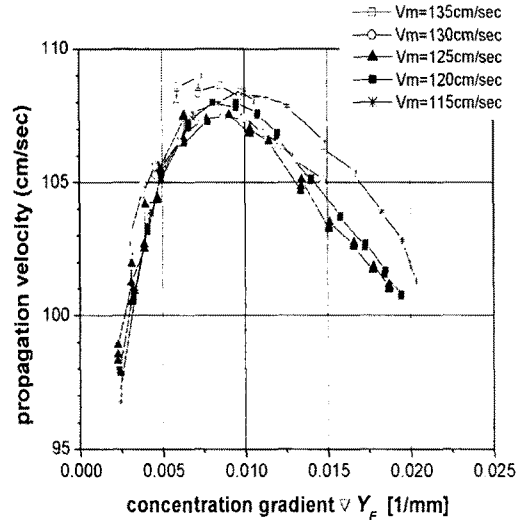


Fig. 7 Propagation velocity of the triple flame for concentration gradient and mean velocity

화염전파속도의 최고점을 기준(농도구배가 대략 $\nabla Y_F = 0.9$)으로 농도구배가 이보다 적은 영역에서는 농도구배의 증가가 오히려 화염전파속도를 증가시키며, 이와는 반대로 농도구배가 큰 영역에서는 농도구배가 증가할수록 화염의 전파속도는 감소함을 알 수 있다.

4. 결론

수축 노즐 후단의 덕트 유무와 평균 유속 및 농도구배에 따라 삼지 화염의 부상높이, 형상, 그리고 축방향 속도에 대해 실험적으로 알아보았고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째 노즐 후단의 덕트 유무에 관계없이 일정한 평균유속에 대해 농도구배가 증가할 때 화염의 부상높이는 U자 형태의 곡선 궤적을 가진다. 즉, 농도구배를 증가시키면 삼지점의 부상높이는 최저점에 이를 때까지 감소하다가 이후에는 증가한다. 그리고 노즐 후단에 덕트가 존재할 경우 화염의 부상높이가 덕트가 존재하지 않는 경우보다 상대적으로 높고 진동폭이 훨씬 적다. 이는 덕트로 인해 축방향으로 유속 감소가 커서 화염이 상대적으로 높은 부상높이에서도 안정적으로 존재하기 때문이다.

둘째 LDV를 이용한 축방향 속도 측정 결과 화

염에 가까워짐에 따라 유속은 감소되어 최소속도에 이르며 이후 화염으로부터의 열 확산으로 부피가 팽창하고 속도는 급격히 증가하게 되는데 이는 농도구배 조건에서 무관하게 공통적으로 나타나는 특성이다. 그리고 화염 바로 상류에서 측정된 속도는 이론당량비에서 층류 화염전파속도와 거의 유사한 값을 가짐을 확인 하였다.

셋째 덕트가 있는 경우 화염전파속도는 평균유속에 관계없이 주어진 농도구배에서 거의 일정한 값을 가진다. 농도구배가 대략 $\nabla Y_F = 0.9$ 인 조건을 기준으로 이보다 농도구배가 작은 영역에서 농도구배가 증가함에 따라 화염전파속도는 증가하며, 이와 반대로 농도구배가 큰 영역에서 농도구배가 증가하면 화염전파속도는 감소한다. 이 결과는 부상높이에서 살펴본 결과와 일치함을 확인하였다.

Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Nonpremixed Jet," *Combust. Flame* 86, pp. 62-72

[8] Lee, B. J. and Chung, S. H., 1997, "Stabilization of Lifted Tribrachial Flames in a Laminar Nonpremixed Jet," *Combust. Flame* 109, pp. 163-172

[9] Ko, Y. S., and Chung, S. H., 1999, "Propagation of Unsteady Tribrachial Flames in Laminar Non-premixed Jets," *Combust. Flame* 118; pp. 151-163

후 기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)의 지원을 받았습니다.

참고문헌

- [1] Phillips, H., 1965, "Flame in a Buoyant Methane Layer," Tenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 1277-1283
- [2] Azzoni, R., Ratti, S., Aggarwal, S. K., and Puri, I. K., 1999, "The Structure of Triple Flames Stabilized on a Slot Burner," *Combust. Flame* 119, pp. 23-40
- [3] Puri, I. K., Aggarwal, S. K., Ratti, S., and Azzoni, R., 2001, "On the Similitude Between Lifted and Burner-Stabilized Triple Flames: A Numerical and Experimental Investigation," *Combust. Flame* 124, pp. 311-325
- [4] Kioni, P. N., Rogg, B., Bray, K. N. C. and Linan, A., 1993, "Flame Spread in Laminar Mixing Layers: The Triple Flame," *Combust. Flame* 95, pp. 276-290
- [5] Kioni, P. N., Bray, K. N. C., Greenhalgh, D. A., and Rogg, B., 1999, "Experimental and Numerical Studies of a Triple Flame," *Combust. Flame* 116, pp. 192-206
- [6] Plessing, T., Terhoeven, P., Peters, N., and Mansour, M. S., 1998, "An Experimental and Numerical Study of a Laminar Triple Flame," *Combust. Flame* 115, pp. 335-353
- [7] Chung, S. H., and Lee, B. J., 1991, "On the