

## 농도구배와 평균속도가 삼지화염의 부상 특성에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

서정일\*·김남일\*\*·오광철\* 신현동†

(2002년 10월 17일 접수, 2003년 5월 21일 심사완료)

### An Experimental Study on the Effects of Concentration Gradient and Mean Velocity on the Liftoff Characteristics of the Triple Flame

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

**Key Words :** Triple-Flame(삼지화염), Flame Stabilization(화염안정화), Lift Off(부상), Slot Burner(슬롯 버너), Flame Propagation Velocity(화염전파속도)

#### Abstract

A triple flame in a mixing layer was studied experimentally with concentration gradient and mean velocity by using a multi-slot burner, which can stabilize the lift-off flame. Flame stabilization condition, lift-off heights, and some other characteristics were examined for methane and propane flame within a range of very low concentration gradient. Pitot-tube and LDV(Laser Doppler Velocimetry) were used for velocity. Mass spectroscopy and Rayleigh scattering signal were used for concentration gradients. Thermo-couples and SiC TFP(Thin Filament Pyrometer) were used for temperature. It was found that minimum values of the lift-off heights exist at a certain concentration gradient for constant mean velocity and this means that the propagation velocity has a maximum value. The scales of flame to the burner nozzle and intensity variation of the diffusion flame were suspected as the cause.

#### 기호설명

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

#### 1. 서론

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

Phillips<sup>(1)</sup>는 농도구배를 가지는 메탄/공기의 혼합층에서 화염전파를 실험하여 삼지화염의 구조를 발견하였다. 수평으로 설치한 덕트 상부에 흐르는 메탄의 유량을 증가시키면 자연스럽게 농도구배가

---

\* 한국과학기술원 기계공학과  
 \*\* 한국과학기술원 연소기술연구센터  
 † 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과  
 E-mail : hdshin@kaist.ac.kr  
 TEL : (042)869-8821 FAX : (042)869-8820

증가하고 그 결과 화염전파속도가 감소함을 보였다. 농도구배에 따른 화염전파속도의 존재는 확산 화염의 부상 높이와 난류 화염전파를 연구하는데 있어 중요한 의미를 가지게 되었으며 그러한 이유로 삼지화염이 비중 있게 다루어지게 되었다.

삼지화염에 대한 이론/수치 연구<sup>(2-6)</sup>는 상당수 다루어졌으나 삼지화염의 전파 속도에 대한 실험은 상대적으로 매우 부족한 편이다. Kioni<sup>(7,8)</sup> 등은 보다 능동적인 농도구배를 줄 수 있는 다중 슬롯 버너를 제작하여 삼지 화염의 전파속도를 측정하고 이론해석<sup>(7)</sup>과 수치계산<sup>(8)</sup>을 수행하였다. 하지만 이들은 질소가 55% 포함된 회석 연료를 사용하였는데 이는 실험적으로 안정적인 부상 삼지화염을 구현하는데 어려움이 있었기 때문으로 사료된다.

Azzoni,<sup>(9)</sup> Puri<sup>(10)</sup> 등은 삼중 슬롯 버너를 제작하여 중심 슬롯에는 과농 예혼합기를 양쪽에는 희박 예혼합기를 각각 공급하여 삼지화염을 만들었다. 이 연구에서는 각각의 예혼합기 당량비를 바꾸어 농도 구배를 조절하였고, 각 슬롯의 유속을 변화시키면서 삼지화염의 응답을 연구하였다. 그러나, 실험적 조건의 한계로 안정한 부상 화염을 얻지 못하고, 세라믹 허니콤(honeycomb)에 부착된 삼지화염의 특성을 주로 관찰하였으며 이에 대한 수치계산의 결과가 실험에서 관찰된 삼지화염의 형상, 온도, 그리고 화학 조성과 유사함을 보였다.

그 밖에 안정적인 부상화염에 대한 실험으로는 Plessing,<sup>(11)</sup> Chung,<sup>(12)</sup> Ko,<sup>(13)</sup> Lee<sup>(14)</sup>와 권성준<sup>(15)</sup> 등의 결과가 있다. Plessing<sup>(11)</sup>은 삼중 동축관을 이용하여 중심관으로부터 차례로 회석연료, 희박연료, 공기를 공급하고 회석 연료와 희박 연료의 속도와 농도에 따른 부상 특성을 연구하였다. 그러나 화염 상류의 속도 분포가 균일하지 않아서 기존의 이론들과 직접 비교되기에는 적합하지 않다. Chung<sup>(12)</sup>과 Lee<sup>(14)</sup>의 연구에서는 0.2mm 정도의 미세 노즐을 이용하여 농도와 속도의 혼합 영역(mixing layer)에서의 층류 제트에 대한 이론해와 측정된 화염 부상높이로부터 부상화염의 안정화 기구를 해석하였으며, 특히 Ko<sup>(13)</sup>는 축대칭 조건에서 농도구배에 의한 삼지화염의 전파속도에 대해 상대적으로 큰 농도구배 영역에서 비교적 믿을 만한 결과를 소개하였다. 그러나 이러한 연구는 분류의 속도 경계층 내에 삼지화염의 삼중점이 위치함으로써 또 하나의 실험 변수인 속도구배의 영향을 평가해야 하는 단점을 가지고 있다. 또한 연소기의 크기 제한으로 인해 낮은 농도구배 영역에서의 삼지화염을 형성하는데 제한을 받았다. 이론당량비 조건의 화염 특성에 변화를 주지않은 상태에서

낮은 농도 구배의 삼지화염(희박가연 한계로부터 과농 가연한계까지의 화염을 가지는)을 형성하기에 동축관을 이용한 분류는 적합하지 않다. 농도 구배가 비교적 낮은 영역에서는 중심축 반대쪽의 화염과의 간섭을 실험적으로 배제하기 힘들다는 단점도 가지고 있다.

이상과 같은 많은 연구의 결과 삼지화염의 전파속도가 이론당량비인 층류 예혼합 화염의 연소속도보다 큰 값을 가지는 것을 알 수 있었으며, 특히 삼지화염 전파속도는 예혼합화염 하류의 밀도 변화가 유발하는 화염 상류쪽의 유동 변화로 설명되었고 그 값은 농도 구배의 증가에 따라 감소하는 것으로 알려져 있다. 그러나 지금까지의 삼지화염에 관한 연구는 대부분 농도 구배가 큰 범위에서 확산화염이 활발히 존재하는 경우에 대해 다루어 진데 반해 낮은 농도 구배에서 화염의 특성을 실험적으로 연구한 결과는 거의 없었다. 높은 농도구배에서는 소수의 슬롯이나 노즐을 이용하더라도 분자의 확산에 의해 자연스럽게 선형적인 농도구배를 구현할 수 있는데 반해 낮은 농도구배에서 가연한계 내에서 농도구배를 선형적으로 유지하는 데는 부가적인 고안이 요구되기 때문이다. 한가지 방법으로 연료를 회석하여 가연 한계 범위를 제한할 수 있는데, 이에 해당하는 것이 앞서 언급한 Kioni<sup>(8)</sup> 등의 경우라 할 수 있다. 그런데 특이하게도 그의 결과는 기타 연구자의 결과와 상반되게 농도구배의 증가가 화염전파 속도를 조금 증가시키는 것을 보이고 있다. 비록 연료의 회석이 화염의 구조를 변화시키므로 직접적으로 타 연구자들의 결과와 비교될 수는 없지만 매우 낮은 농도구배에서 화염의 전파속도에 대한 보다 엄밀한 실험의 필요가 있다고 판단된다.

본 연구에서는 기존의 삼지화염 연구에 비해 농도구배가 상대적으로 매우 작은 범위에서 안정적인 부상화염을 형성시킬 수 있는 연소기의 형태를 제안하고 해당 농도범위에서의 화염 부상특성을 메탄과 프로판에 대해 실험하여 낮은 농도구배 영역에서의 화염전파 특성에 관한 실험 결과를 제시하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

농도 구배가 삼지 화염의 부상 특성에 미치는 영향을 실험하기 위해 농도구배의 능동적 제어가 요구되어 다중 슬롯과 수축노즐로 구성된 버너를 제작하였으며 Fig. 1 은 실험장치의 기본적인 구조

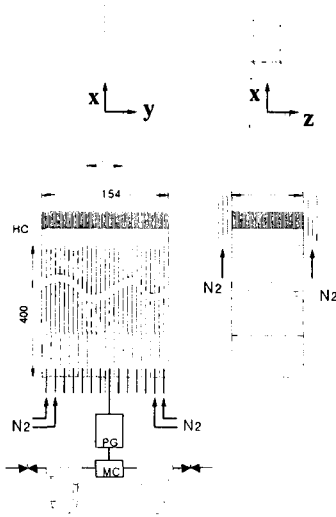


Fig. 1 Experimental apparatus and coordinates (MC: mixing chamber, PG: Particle generator, HC: Honeycomb as a flow straightener)

를 보여주고 있다. 버너는 슬롯부, 허니컴, 수축노즐로 이루어져 있다. 슬롯부는 다양한 농도 구배를 임의로 줄 수 있는 폭 10.5mm, 너비 80mm, 길이 400 mm 의 슬롯 14 개로 구성된다. 슬롯의 너비 방향의 유동 균일화를 위해 각 슬롯에는 별도의 격막을 추가로 설치하였으며 격막과 슬롯벽은 두께 0.5mm 의 스테인레스 판이다. 슬롯을 사용하지 않고 낮은 농도구배를 구현하기 위해서는 한쪽 벽면에 과농 연료를 흘리고 다중 메쉬를 통해 확산을 증진시키는 방법이 있지만 이 같은 경우 경로가 길어지거나 교란이 증가함에 따라 연소기 단면에서의 농도분포가 왜곡되고 심한 경우에는 화염의 선화가 발생하기도 한다. 슬롯을 지난 예혼합기는 유동 균일화를 증진시키기고 화염의 역화를 방지하기 위한 허니컴을 지나 약 1/8 의 수축비를 가지는 노즐을 지나게 된다. 만일 수축노즐을 사용하지 않으면 허니컴 벽면(두께 0.1mm)에서 발생한 속도의 교란으로 인해 허니컴에 인접한 이론당량비 근처의 화염은 대부분의 경우 허니컴 표면에 부착하게 된다. 노즐 출구는 40×40 mm 이며 노즐 출구로부터 높이 방향을 x, 슬롯을 가로 지르는 방향(농도 구배가 발생하는 방향)을 y, 슬롯의 너비 방향을 z 라고 정의하였다.

각 슬롯으로 유입되는 공기와 연료의 유량은 각각 미세관을 지나는 유동 양단의 압력차를 마노미터와 미세조절 밸브를 이용해 조절하였으며 각각의 유량은 포말유량계를 이용하여 검정하였다. 실험에 사용된 연료는 메탄(99.95%)과 프로판(98%)

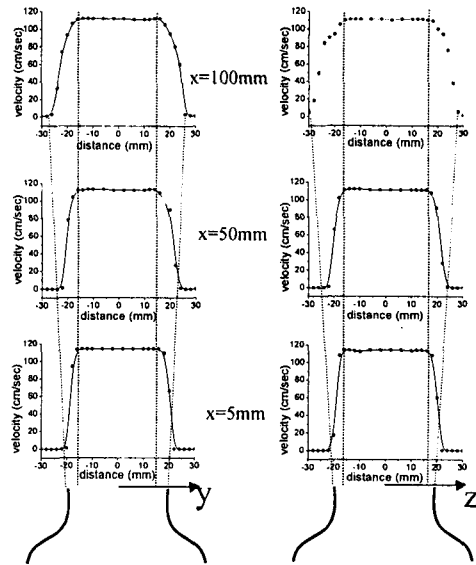


Fig. 2 Distribution of the axial velocity of the cold flow (when  $V_m = 100\text{cm/s}$ )

이며 유동 교란과 외부 산화제 유입을 막기 위해 질소를 사용하였다.

2.2 실험방법

실험 변수로는 노즐 출구에서의 유량을 노즐단면으로 나눈 평균유속( $V_m$ )과 노즐 출구에서의 농도구배( $\nabla Y_f = dY_f / dy$ )가 사용되었다. 농도구배 제어를 위해 14 개의 슬롯 중 10 개를 사용하고 가장자리 각각 2 개의 슬롯에는 질소를 유입시켰으며 Z 방향으로는 별도의 이중 수축노즐을 설치하여 질소를 흘려주게 된다. 각각의 슬롯으로 공급되는 유량을 수축노즐의 면적비를 고려하여 일정하게 유지함으로써 평균 속도를 조절하였다.

평균유속  $V_m = 100\text{cm/s}$  일 때 유동장의 균일도를 검정하기 위해 피토포와 마이크로 마노미터를 이용해 비반응 축방향 유속의 y, z 방향 분포를 측정한 결과가 Fig. 2 이다. 화염 선단이 주로 위치하게 되는 하류  $x=100\text{mm}$  지점까지 영역에서 유속 측정 결과 균일 유동(potential core)이 충분히 유지되고 축방향 속도 감소는 초기속도의 2% 미만으로 매우 작음을 알 수 있었다. (z 방향 질소 유입이 없는 경우의 측정결과임.)

또 하나의 실험변수인 농도구배( $\nabla Y_f$ )는 10 개의 슬롯 중에서 한 슬롯의 예혼합기 당량비가 이론당량비가 되도록 일정하게 고정하고 이웃한 각각의 슬롯간의 당량비의 차( $\Delta\phi$ )를 일정하게 조절하여 선형적인 분포를 가지도록 제어하였다. 슬롯 출구로부터 노즐 출구까지의 유동 지체 시간( $\Delta t \sim 1\text{sec}$ )

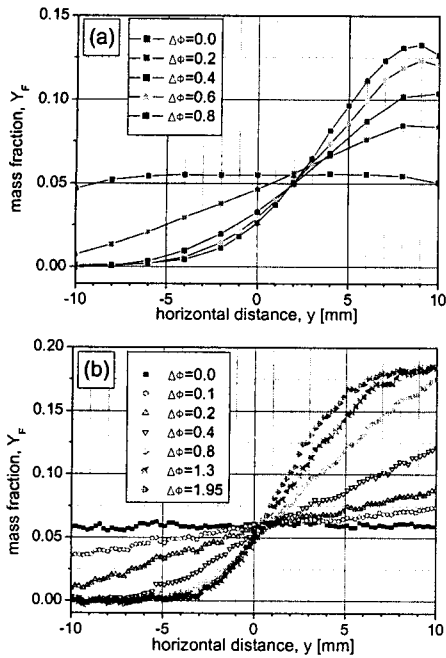


Fig. 3 Mass concentration distribution of the fuel for the given difference of the equivalence ratio (a)Methane: with mass spectroscopy, (b)Propane: with Rayleigh scattering method

동안 물질확산계수 ( $D_{CH_4} \sim 0.225 \text{ cm}^2 / \text{s}$ )로부터 구한 대략적인 확산거리 ( $\sim \sqrt{D_{methane} \Delta t} \sim 5 \text{ mm}$ )는 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 실제 노즐 출구에서의 농도구배를 구하기 위해 메탄의 경우 질량스펙트럼분석기(Mass Spectroscopy: HIDEN HPR20)를 사용하여 질량분율의 공간 분포를 구했으며 프로판의 경우 ND-Yag 레이저(500mJ)와 고감도 CCD(Intensified CCD: PIMAX 512×512)를 이용한 Rayleigh 산란 신호로 질량분율의 공간분포를 구한 결과가 Fig. 3 이다. 두 경우 모두 이론당량비에 해당하는 지점에서의 질량분율의 기울기 값을 구하여 농도구배로 사용하였다. 슬롯 출구에서의 동일한 농도에 대해 평균유속과 노즐로부터 거리가 변할 때 실제 농도구배의 변화를 추가실험을 통해 평가하였다. 평균유속이 10% 증가할 때 노즐 출구에서의 농도구배는 약 3% 증가하였으며, 노즐로부터 거리 증가는 20mm 높이 차이에 대해  $\pm 0.8\%$  이내에서 농도구배의 변화를 보였다. 이러한 변화는 유량 및 당량비 조절의 실험오차범위(2%)에 포함되므로

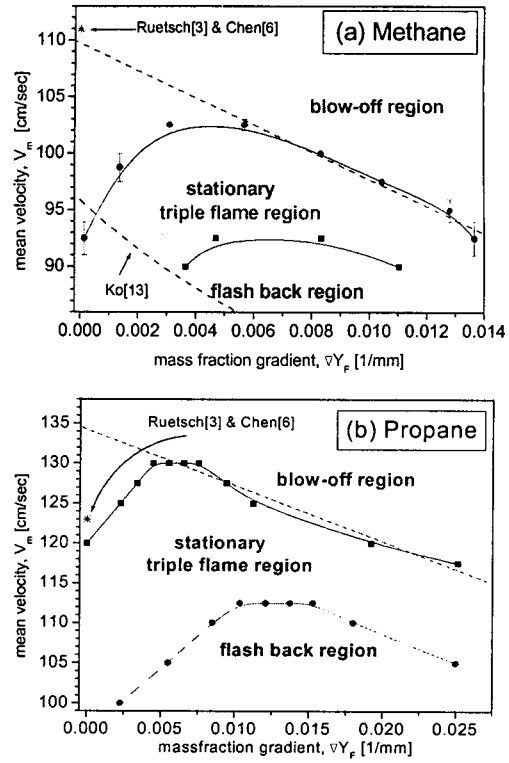


Fig. 4 Flame stabilization conditions for (a) Methane and (b) Propane

이후 농도구배는 유량이나 화염 높이에 무관하게 노즐 출구에서의 농도구배를 사용하기로 한다.

### 3. 결과 및 고찰

메탄과 프로판 화염에 대해 평균유속( $V_m$ )과 농도구배( $\nabla Y_F$ )를 조절하여 각각의 경우 화염 안정화 특성을 구한 결과가 Fig. 4 이다. 일정한 농도구배에 대해 평균유속이 작을 때 화염은 노즐 내부로 역화된다. 역화는 화염면의 전파 속도가 공급되는 예혼합기의 속도보다 클 때 발생한다. 평균유속의 증가에 따라 노즐 출구에 화염이 안정적으로 존재하는 구간을 찾을 수 있으며 평균유속이 일정 값보다 크면 화염날림(blow-off)이 발생한다. 따라서 농도구배에 따른 역화 조건 혹은 화염날림에서의 평균유속은 전체 예혼합 화염면에서의 연소속도의 변화를 정성적으로 보여준다. 또한 동일한 평균유속에 대해서도 연료 농도구배가 변화함에 따라 ‘화염날림→화염안정→화염날림’, 혹은 ‘화염안정→화염역화→화염안정’의 거동을 보일 수 있다.

화염날림은 화염의 안정화 기구의 상실로 설명

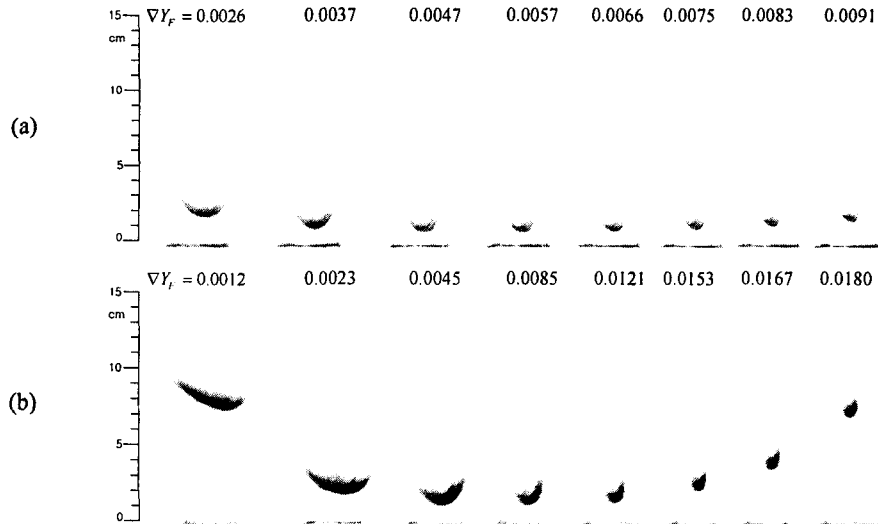


Fig. 5 Flame shape for the concentration gradients (a) Methane,  $V_m = 97.5\text{cm/s}$ , (b) Propane,  $V_m = 120\text{cm/s}$

Table 1 Properties of methane and propane (Turns<sup>(16)</sup>, Borman<sup>(17)</sup>)

	Mol Weight g/mol	flammable lean limit,	Stoichi. Mass fraction	flammable rich limit,	Adiabatic flame temperature K	burning vel., $S_L^o$ , cm/s	Lewis no. (at 1300K)	
		$\phi$		$\phi$			Lean	rich
Methane	16.043	0.53	0.0549	1.58	2250	40	-0.94	-1.02
Propane	44.096	0.50	0.0602	2.36	2270	44	-1.60	-0.85

이 되는데, 화염의 안정화 기구로는 두 가지를 생각할 수 있다. 첫째는 화염이 없는 비반응 유동장에서의 유속의 발산 정도와 관련된다. 비반응 유동장의 축방향 유속 감소가 큰 경우에는 화염이 안정적으로 존재하게 되는데, 이러한 안정화 특성을 잘 이용한 것이 단면적이 바뀌는 덕트 내부 화염으로 Phillips,<sup>(1)</sup> Kioni<sup>(7,8)</sup> 등의 연구결과가 해당된다. 두번째는 화염으로 인한 상류의 속도 재편이 발생할 때 화염 전체의 전파속도가 노즐 출구에서의 평균속도보다 커서 화염은 상류로 전파하려 하지만 노즐 출구에서의 속도 분포의 변화가 억제될 때 생기는 안정화 기구이다.

본 실험장치는 비반응 유동장의 축방향 속도 감소가 2% 미만으로 매우 작고 화염이 비반응 유동장의 균일속도부 내에 위치하므로 두번째 기구를 화염 안정화의 주 원인으로 보는 것이 타당하다. 메탄 화염의 경우 평균유속 90~102.5 cm/s 범위에서, 프로판 화염의 경우 100~127.5 cm/s 범위에서 화염을 안정화시킬 수 있었다. 이론당량비에서 메탄과 프로판의 연소속도는 대략 40 cm/s 와 44 cm/s 이다(Table 1). 연소속도로 무차원화한 화염안정화를 위한 평균유속 범위는 메탄과 프로판에 대해 각각 2.25~2.56, 2.27~2.90 의 범위를 가지며 프

로판 화염이 보다 안정적으로 존재한다고 볼 수 있다.

역화와 화염날림이 발생하는 최대 평균유속의 평균값에 해당하는 일정한 평균유속 조건(메탄: 97.5cm/s, 프로판 120 cm/s)에서 농도구배의 변화가 화염의 형상과 부상높이에 미치는 효과를 알아보기 위해 직접사진을 촬영한 결과가 Fig. 5 이다(셔터속도 1/15 sec, 초점거리 1m). 대체로 삼지화염의 모양이 잘 드러나고 있다. 사진에서 확산화염의 오른쪽이 연료과농 조건이며 왼쪽은 연료희박 조건이다. 메탄의 경우 프로판에 비해 화염날림이 쉽게 발생하므로 직접사진에서는 부상높이의 변화를 확연히 구분할 수 없는 반면, 프로판 화염의 사진은 부상높이의 변화를 뚜렷이 보여주고 있다.

일정 평균유속에 대한 화염 부상높이를 메탄과 프로판 화염에 대해 측정한 결과가 Fig. 6 이다. 화염의 부상높이는 노즐 출구에서 예혼합화염과 확산화염이 만나는 삼지점(triple point)까지의 수직거리로 정의되는데, 실험에서는 노즐 출구와 예혼합 화염의 최저지점 사이의 거리를 카세토미터(cathetometer)를 이용하여 측정하였으며 진동하는 화염에 대해서는 평균 부상높이를 나타내었는데 화염 부상 특성에 대해 차례로 논하기로 하자.

1) 일정한 평균유속에 대해 농도구배가 증가할 때 화염의 부상높이를 나타낸 곡선은 U자 형태를 가진다. 즉, 삼지점이 최저점에 이를 때까지 감소하다가 이후에는 증가한다. → 화염 부상높이의 감소와 증가는 각각 화염전파속도의 증가와 감소를 의미한다. 기존의 많은 연구 결과로부터 농도구배가 증가할 때 삼지화염의 전파속도가 감소하는 것은 화염의 곡률 증가와 예혼합 화염면의 스트레치 증가로 설명할 수 있으며, 부상높이가 증가했을 때 부상높이의 변화가 커지는 이유는 화염으로 인한 상류에 유속변화가 화염으로부터의 거리 증가에 따라 감소하기 때문이다. 그러나 부상높이가 최소가 되는 지점을 기준으로 농도구배가 더 작은 영역에서의 실험결과는 기존의 이론<sup>(2,3,6)</sup>과는 달리 농도구배의 증가가 화염전파속도를 증가시킬 수 있음을 의미한다. 이 같은 결과의 원인으로서는 두 가지를 생각할 수 있다.

첫째는 농도구배의 값이 전체 가연구간을 형성하기에 부족해서 전형적인 삼지화염의 형태를 온전히 형성시키지 못한 점이다. 가연한계 내의 화염을 균일유속이 유지되면서 외부 농도에 영향을 받지 않는 농도장 범위(20mm 이상) 내에 모두 형성시키기 위해서는 메탄과 프로판에 대해 각각  $\nabla Y_F > 0.0029$ ,  $\nabla Y_F > 0.0056$ 의 농도구배가 요구되며 이때 화염의 폭은 화염 근처의 유동 발산으로 인해 대략 노즐 직경(~40mm) 정도의 크기를 가진다. 이 값보다 작은 농도구배에서의 부상높이 감소는 상당부분이 가장자리 화염의 새로운 형성에 기인할 가능성이 크다. 그런데 이처럼 소화한계 근처 화염 가장자리의 증가가 삼지화염의 전파속도를 증가시킨다면 기존의 동축류 실험 결과의 대부분은 충분히 큰 화염을 형성하지 못하였으므로 이상적인 삼지화염 전파 속도보다 작은 값이 측정되었을 가능성이 크다.

둘째는 확산화염의 강도 변화가 전체 화염의 전파속도에 영향을 미칠 수 있다는 점이다. 농도구배의 증가는 확산화염 반응의 전체 예혼합화염 반응에 대한 비를 증가시키는데, 화염의 곡률이 충분히 작아서 삼중점 근처의 예혼합화염 반응의 변화가 작으면 삼중점 근처 확산화염의 반응 증가에 의한 화염 하류쪽의 부피 변화가 작게나마 삼지화염의 전파속도를 증가시킬 것으로 예상된다.

2) 메탄화염의 경우 프로판 화염에 비해 안정화 조건에서 부상높이가 상대적으로 매우 작다. → 메탄화염의 경우 부상높이가 25mm 정도를 넘으면 화염날림이 발생하였으며, 프로판의 경우 80mm 이상까지도 화염이 안정화 될 수 있었는데, 그 원

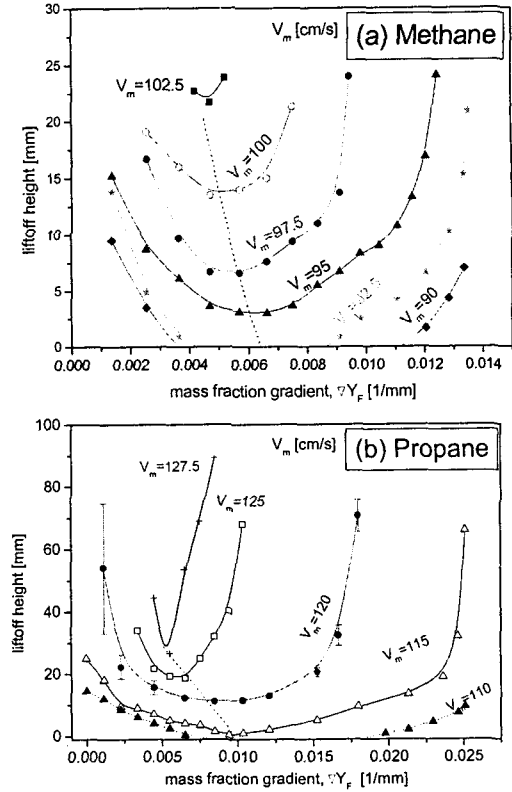


Fig. 6 Lift-off height with concentration gradient for mean velocity. (a) Methane, (b) Propane

인은 두 가지로 생각할 수 있다. 첫째, 프로판 화염의 가연 농도 범위가 메탄에 비해 넓어서 화염으로 인한 유속변동이 더 크기 때문이다. 둘째, 삼중점을 중심으로 대칭적으로 존재하는 화염의 평균 루이스수( $Le \equiv \alpha/D$ )를 비교할 때 프로판의 경우가 더 큰 값을 가지게 되므로 유동에 발생하는 교란에 대해 보다 안정적인 화염이 존재하게 된다.(Table 1)

3) 화염 안정화의 농도구배 범위는 평균속도의 증가에 따라 좁아진다 → 평균유속이 일정 크기 만큼씩 증가함에 따라 화염이 안정화되는 부상 높이가 더 큰 간격으로 증가하므로 평균유속이 클 때의 화염은 낮은 평균유속에 비해 축방향 유속 구배가 보다 작은 영역, 즉 유동 안정성이 상대적으로 낮은 영역에 존재하게 된다. 따라서 농도구배, 속도교란, 혹은 화염 형상의 교란으로 인한 삼지화염 전파속도에 발생하는 작은 변화가 화염날림을 보다 쉽게 일으키므로 화염이 안정화 되는 농도구배의 구간이 좁아지게 된다.

4) 부상높이가 최소가 되는 지점도 평균 유속의 증가에 따라 보다 낮은 농도구배의 영역으로 옮겨

가고 있음을 알 수 있다. → 평균 유속이 비교적 작아서 노즐 근처에 화염이 존재할 때는 화염의 형상이 노즐의 경계조건에 의해 변화하게 된다. 노즐에 가까울수록 곡률이 감소할 것이므로 곡률에 의한 예혼합 화염의 강도 변화는 부상높이가 큰 화염에 비해 보다 높은 농도 구배에서 발생할 것이며 확산화염 역시 보다 큰 농도 구배에서 최대 값을 가지게 될 것이다. 따라서 평균유속의 감소가 화염 부상높이가 최소가 되는 농도구배를 증가시키게 된다. 화염 곡률이 연소속도 변화에 미치는 영향은 평균 루이스수가 상대적으로 큰 프로판의 경우에 더 클 것으로 예상되며 확산화염의 강도 변화 역시 확산계수가 작은 프로판에 대해 더 큰 변화를 일으킬 것으로 예상되므로 평균유속 변화에 따른 최소부상높이 조건에 농도구배의 변화는 프로판 화염에서 더 확연히 드러난다.

이상과 같은 부상화염의 특성을 화염전과 속도와 비교하기 위해서는 화염 근처의 속도를 측정할 필요가 있다. 일반적으로 삼지화염의 전파속도는 이론당량비의 삼중점으로 유입되는 예혼합기의 속도로서 대부분의 연구에서는 화염에 의한 유동장의 변화가 없는 상류쪽에서의 속도로 정의되는데, 비반응 유동장의 특성으로 인한 차이를 배제하기 위해 무한 균일유동에 대해 정의되기도 한다<sup>(3)</sup>.

본 연구에서는 화염의 중심을 지나는 유동방향 속도( $V_c$ )를 LDV(Laser Doppler Velocimetry)로 측정하였으며 0.5  $\mu\text{m}$ 의 산화알루미늄( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 입자를 사용하였다. 삼지화염은 예혼합화염면을 따라 연소속도가 변하므로 곡률을 가지게 되고 화염 상류의 유동재편(flow redirection)이 발생하는데, Fig.7(a)는 화염 근처에서의 유선 변화를 보여주고 있다. 상대적으로 안정적이고 부상높이가 큰 대표적인 속도 측정의 결과가 Fig.7(b)이다. 화염에 가까워 짐에 따라 유속은 감소되어 최소속도에 이르며 이후 화염으로부터의 열 확산으로 부피가 팽창하고 속도는 급격히 증가하게 된다. 이 같은 경향 자체는 기존의 연구들과 동일하다. 그런데 속도 측정을 위한 입자를 유입할 때 화염의 부상높이는 입자에 의해 영향을 받게 되고, 입자의 양이 증가함에 따라 화염의 부상높이가 감소하고 부상높이의 변동 폭도 증가하게 된다. 따라서 부상높이 측정의 결과보다 화염이 상류쪽에 위치하게 되고 화염 근처에서의 예리한 속도 변화를 측정할 수는 없었다. 그러나 화염 하류와 상류에서 온도 변화의 비를 이후에 설명할 SiC 필라멘트를 이용하여 측정한 결과 약 7.3(~2140K/293K)이었으므로 화염하류에서의 속도 측정값(~300cm/s)에

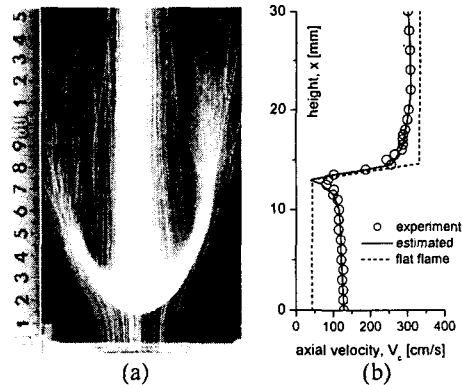


Fig. 7 (a) stream lines of the triple flame; (b) axial velocity at the triple flame, propane,  $V_m = 120\text{cm/s}$ ,  $\nabla Y_f = 0.0153$

근거하여 화염 직전의 속도를 예상해보면 (300/7.3~41cm/s) 연소속도보다 조금 작은 값을 가짐을 알 수 있어서 실제 속도 분포는 그림의 실선과 같이 될 것을 예상할 수 있다. 또한 15mm 정도의 부상 높이에서도 노즐 출구에서의 속도 (~130cm/s)는 거의 일정하고 평균유속과 큰 차이가 없음을 알 수 있는데, Fig. 2 에서 볼 수 있듯이 노즐 중앙의 균일 유속부분이 평균유속보다 15% 정도 크다는 점을 감안하면 화염이 있을 때 노즐에서의 속도는 실제 속도보다 6% 정도 작은 값을 알 수 있다.

본 연구에서의 비반응 유동장은 축방향으로 동일하였으며 화염 안정화 기구가 화염으로 인한 상류 속도에 의해 지배되므로 화염의 부상높이가 충분히 크다면 화염으로부터 상류쪽으로 멀리 떨어진 노즐에서의 유속은 거의 일정한 값이 될 것이며 노즐의 출구 속도는 앞서 정의된 삼지화염의 전파속도와 유사한 값을 가지게 됨을 알 수 있다. 또한 이 속도는 화염을 안정화 시키는 주요 원인의 상실을 의미하며 이는 곧 화염날림이 발생하는 조건에 해당한다. 따라서 Fig. 4 에서 보인 농도 구배에 따른 화염 날림이 발생하는 평균속도 값 자체가 삼지화염의 전파속도와 비교될 수 있으므로 이에 대해 좀더 살펴보자. 결국 Fig. 4 의 화염 날림 조건은 농도구배 변화에 대해 화염전과 속도에 최고 값이 존재함을 보이고 있다. 메탄의 경우  $\nabla Y_f > 0.005$  일 때 기존의 삼지화염의 연구 결과와 마찬가지로 농도 구배에 따라 화염날림이 발생하는 속도가 감소하는 것을 알 수 있으며, 이 값의 연장선으로부터 농도구배가 없을 때 화염날림이 발생하는 속도를 예측해 보면 110 cm/s 정도임을 알 수 있다. 그런데 이는 실제 농도구배가 0 인

조건에서의 화염날림 조건인 93 cm/s 보다 조금 큰 값이다. 프로판의 경우도 마찬가지로  $\nabla Y_F > 0.0075$  일 때 농도구배에 따른 화염날림 속도가 감소하며 농도구배가 없는 조건에 대한 그 연장선의 값은 135 cm/s 이며 농도구배 0 인 조건에서 실제 값은 120 cm/s 였다.

화염두께에 비해 비교적 큰 삼지화염의 유동재편을 고려한 Ruetsch<sup>(3)</sup>와 Chen<sup>(6)</sup>의 삼지화염 전파속도에 대한 제안식을 적용하고 Table 1 의 화염온도를 이용할 때 농도구배가 없을 때의 메탄과 프로판의 화염 전파속도는 다음과 같다.

$$V_{p,CH_4} \sim S_L^0(\rho_u/\rho_b)^{0.5} \sim 40\sqrt{7.68} \sim 111\text{cm/s}$$

$$V_{p,C_3H_8} \sim S_L^0(\rho_u/\rho_b)^{0.5} \sim 44\sqrt{7.76} \sim 123\text{cm/s}$$

메탄의 경우에는 이론값이 실험 결과의 연장선으로 예상한 값과 일치함을 알 수 있다. 노즐 중앙 균일유속 부분의 실제 속도가 평균유속에 비해 15% 정도 큰 것을 고려한다면 농도구배가 없을 때의 실제 실험 결과도 이론 값에 근접할 수 있는데, 평균유속과 균일유속 부분의 실제 속도 중에서 어떤 값이 보다 적절한 기준이 될 것인가는 명확하지 않다. 그러나 한편으로 이 같은 연장선으로 예측한 화염날림 속도와 실제 화염날림 속도의 차이는 결국 화염 가장자리의 존재가 화염 전파속도를 변화시키는데 차지하는 비중을 의미한다고 볼 수 있다. 이러한 관점에서 Ko<sup>(13)</sup> 등이 행한 동축류에서의 실험의 결과가 낮은 농도구배 영역에서 본 연구에 비해 매우 낮은 화염전파속도를 예측하는 것은 불완전한 삼지화염 조건으로 설명할 수 있다.

프로판의 경우에는 연장선으로 예측한 값(135cm/s)이 이론값(123cm/s)에 비해 10% 정도 크다. 이는 프로판의 가연 한계 범위가 메탄에 비해 매우 크고 비대칭적인 특성과 반응구조의 복잡성을 감안할 때 온도와 연소속도로만 표현된 이론식은 적절하지 않은 것으로 판단되며 그 외에도 낮은 농도구배에서는 하류의 확산화염으로 인한 복사열의 영향도 커서 프로판 삼지화염의 전파속도는 기존의 이론식에 비해 더 클 가능성이 있다.

지금까지의 결과로부터 화염날림이 발생하는 속도를 근거로 농도구배 변화에 따른 삼지화염의 전파속도를 논하는 것이 타당함을 알 수 있으며 삼지화염의 전파속도를 구하기 위해서는 전체 가연 범위에 대해 선형적인 농도구배를 가지는 화염을 독립적으로 형성시켜야 함을 예상할 수 있다. 더불어 이처럼 낮은 농도구배에서 화염 구조에 변화가 발생할 가능성에 대한 확인을 위하여 삼지화염

내의 온도 분포를 직경 15  $\mu\text{m}$  SiC 필라멘트를 이용하여 측정하였는데, 이러한 방법은 고온 영역에서 높은 온도 정밀도를 가지고 있다.<sup>(18)</sup> 이 때 온도 보정을 위해서 온도분포를 알고 있는 평면화염과 분진화염을 이용하여 1700~2100K 범위에서 측정하였으며 이를 이용해 5 차 근사식을 구하여 사용하였다.

화염 안정성이 보다 우수한 프로판 화염에 대한 삼지화염 하류의 온도변화 측정 결과를 Fig. 8 에 나타내었다. 상류의 온도를 측정하지 않은 것은 SiC 필라멘트를 화염의 삼중점 상류에 위치시키면 비록 필라멘트 직경이 15  $\mu\text{m}$  로 매우 가늘지만 화염의 부상높이가 영향을 받기 때문이다. 최고온도를 기준으로 왼쪽은 희박예혼합 화염의 하류에 해당하고 오른쪽은 과농 예혼합 화염의 하류에 해당하는데, 과농 예혼합 화염의 하류 영역이 상대적으로 매우 넓은 것을 알 수 있다. 이는 프로판 화염의 높이 증가에 따라 화염의 폭은 증가하고 최고 온도는 감소하며 최고온도의 희박 예혼합 영역으로 조금 이동하는 것을 알 수 있다. 이는 프로판 화염의 과농 가연한계 범위가 희박가연한계보다 상대적으로 매우 넓기 때문으로 생각된다.

이렇게 측정된 화염 온도의 분포로부터 높이변화에 따른 화염의 최고 온도를 여러 가지 농도구배에 대해 구한 결과가 Fig. 9 이다. 농도구배가 낮은  $\nabla Y_F = 0.00229$  와  $\nabla Y_F = 0.00446$  의 경우에는 높이에 따른 최고 화염의 온도 분포가 거의 직선을 이루면서 감소함을 알 수 있다. 화염 하류에서 온도 감소는 실험조건이 단일조건이 아니므로 주위로의 열손실이 발생하기 때문이며 온도 변화가 선형적인 것은 화염이 평면화염에 가까워서 화염 하류에서의 확산화염에 의한 열 생성이 거의 없기 때문이다. 농도구배가 비교적 높은  $\nabla Y_F = 0.0153$  와  $\nabla Y_F = 0.0167$  의 경우에는 화염 직후에 일정 높이에

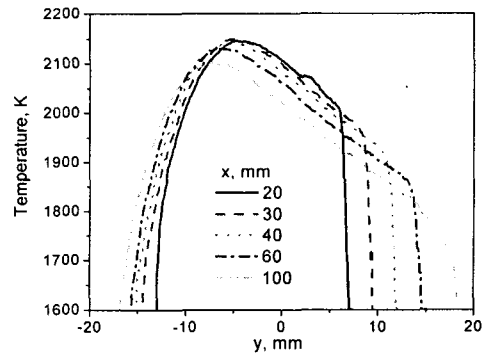


Fig. 8 Temperature distribution near the triple flame (propane,  $V_m = 120\text{cm/s}$ ,  $\nabla Y_F = 0.0085$ )



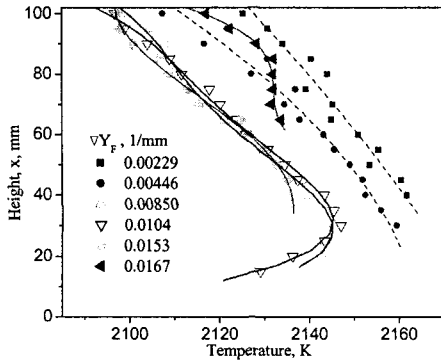


Fig. 9 Maximum temperature with the height for various concentration gradients (propane,  $V_m = 120 \text{ cm/s}$ )

대해 화염의 온도가 거의 변하지 않는 것을 알 수 있는데, 이는 확산화염으로 인한 추가적인 열 생성이 주변으로의 열손실을 상쇄하기 때문으로 생각된다. 그런데 특이하게도 화염의 부상 높이가 낮은 경우, 다시 말해 화염의 전파속도가 큰 경우인  $\nabla Y_F = 0.00850$  와  $\nabla Y_F = 0.0104$  의 농도구배에서는 예혼합 화염의 하류에 별도의 최고온도 영역이 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 예혼합 화염 하류의 확산화염이 활성화 되기 시작하는 단계로서 스트레치 등에 의한 예혼합 화염의 전파속도 및 화염온도 감소는 작은 반면 확산화염에 의한 열이 최대로 생성되는 위치가 예혼합 화염과 구분될 수 있는 하류에 존재하기 때문으로 생각되는데 이는 예혼합 화염으로부터 전형적인 삼지화염으로의 천이과정으로 판단된다.

#### 4. 결론

예혼합기의 평균유속과 농도구배를 독립적으로 제어할 수 있는 다중 슬롯 연소기를 제작하여 지금까지 실험결과가 부족했던 낮은 농도구배 영역에서 안정적인 부상화염을 생성하였으며 메탄과 프로판 화염의 부상 높이와 화염내 온도 등을 측정하였다. 그 결과 기존의 삼지화염 실험의 문제점을 제안하였고 농도구배와 평균유속 변화에 따른 삼지화염의 부상과 화염전파에 대해 다음과 같은 특성을 파악할 수 있었다. 1) 일정한 평균유속에 대해 농도구배가 증가할 때 화염의 부상높이는 삼지점이 최저점에 이를 때까지 감소하다가 이후에는 증가한다. 2) 메탄화염의 경우 프로판 화염에 비해 안정화 조건에서 부상높이가 상대적으로 매우 작다. 3) 화염 안정화의 농도구배 범위는 평균속도의 증가에 따라 좁아진다. 4) 부상높이가 최소가 되는 지점도 평균 속도의 증가에 따라 낮은 농

도구배의 영역으로 옮겨간다.

이로부터 농도구배 변화에 대해 화염 전파속도에 최고값이 존재할 가능성을 제시하였는데, 이는 매우 낮은 농도구배 조건에서 화염부상 특성이 연소기의 크기제한에 영향을 받으며 확산화염의 강도 변화에 영향을 받을 수 있음을 의미한다. 또한 온도 측정 결과는 이러한 결과가 예혼합 화염에서 전형적인 삼지화염으로의 천이 과정일 가능성을 보여주고 있으며 농도구배에 따른 화염 전파속도의 변화를 기준으로 예혼합 화염과 삼지화염을 구분할 필요가 있다고 제안한다. 또한 지금까지의 결과는 큰 스케일의 연소기의 안정화 기구를 이해하는 데 중요한 자료가 될 것으로 판단된다.

#### 후기

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) Dold, J. W., 1989, "Flame Propagation in a Nonuniform Mixture: Analysis of a Slowly Varying Triple Flame," *Combust. Flame*, 76, pp.71~88.
- (3) Ruetsch, G. R., Vervisch, L., and Liñán, A., 1995, "Effects of Heat Release on Triple Flames," *Pys. Fluids* 7(6), pp.1447~1454.
- (4) Echehki, T., and Chen, J. H., 1998, "Structure and Propagation of Methanol-Air Triple Flames," *Combust. Flame*, 114, pp.231~245.
- (5) Im, H. G. and Chen, J. H., 1999, "Structure and Propagation of Triple Flames in Partially Premixed Hydrogen-Air Mixtures," *Combust. Flame*, 119, pp. 436~454.
- (6) Chen, Y-C, and Bilger, R. W., 2000, "Stabilization Mechanisms of Lifted Laminar Flames in Axisymmetric Jet Flows," *Combust. Flame*, 123, pp. 23~45.
- (7) Kioni, P. N., Rogg, B., Bray, K. N. C. and Liñán, A., 1993, "Flame Spread in Laminar Mixing Layers: The Triple Flame," *Combust. Flame* 95, pp. 276~290.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) Chung, S. H., and Lee, B. J., 1991, "On the Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Nonpremixed Jet," *Combust. Flame* 86, pp. 62~72.
- (13) Ko, Y. S., and Chung, S. H., 1999, "Propagation of Unsteady Tribachial Flames in Laminar Nonpremixed Jets," *Combust. Flame* 118; pp. 151~163.
- (14) Lee, B. J. and Chung, S. H., 1997, "Stabilization of Lifted Tribachial Flames in a Laminar Nonpremixed Jet," *Combust. Flame* 109, pp. 163~172.
- (15) Sung Jun Kwon, Min Suk Cha, Mansoo Choi and Suk Ho Chung, 2000, "Characteristics of Premixed Flames in a Double Concentric Burner," *Transactions of the KSME, B*, Vol. 24, pp.1662~1669.
- (16) Turns, S. R., 1996, *An Introduction to Combustion*, McGraw-Hill Inco.
- (17) Borman, G. L. and Ragland, K. W., 1996, *Combustion Engineering*, McGraw-Hill Inco.
- (18) William, M. P., 1996, "Thin-Filament Pyrometry in Flickering Laminar Diffusion Flames," *Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute*, pp. 1171~1179.