

# 대향류 유동장에서 삼지 화염 전파 특성에 관한 연구

정태만\*. 고영성\*\*. 정석호\*\*\*

## Characteristics of Propagating Tribrachial Flames in Counterflow

Tae Man Chung • Young Sung Ko • Suk Ho Chung

**Key Words :** Tribrachial flame, Fuel concentration gradient, Flame displacement speed, Burnt gas.

### Abstract

Propagation characteristics of tribrachial flames have been investigated experimentally in both two-dimensional and axisymmetric counterflows. Mixture fraction gradient at stoichiometric location is controlled by varying equivalence ratios at the two nozzles, one of which maintains rich while the other lean premixture. Tribrachial flames propagating through these mixtures are investigated.

The propagation speed of tribrachial flames in two-dimensional counterflow decreases with fuel concentration gradient and has much higher speed than the maximum speed predicted previously in two-dimensional mixing layers. From an analogy with premixed flame propagation, this excessively large propagation speed can be attributed to the tribrachial flame propagating with respect to burnt gas. Corresponding maximum speed in the limit of small mixture fraction gradient is estimated and extrapolated experimental results substantiate this limiting speed. As mixture fraction gradient approaches zero, a transition in propagation characteristics occurs, such that the propagation speed of tribrachial flame approaches stoichiometric laminar burning velocity with respect to burnt gas. Similar behavior has been obtained for tribrachial flames propagating in axisymmetric counterflow.

된다.

### 1. 서 론

삼지 화염(tribrachial flame or triple flame)은 층류 제트에서 부상화염(lift flame)<sup>[1-5]</sup>, 이차원 혼합층(mixing layer)<sup>[6-11]</sup>등에서 생기는 다양한 유동 형태에 중요한 역할을 한다.

삼지 화염은 이론 당량비(stoichiometric) 궤적을 따라 연료 농도 구배(fuel concentration gradient)가 존재하는 곳에서 형성될 수 있다. 희박 예혼합화염(lean premixed flame), 과농 예혼합화염(rich premixed flame) 및 확산화염(diffusion flame)으로 구성된 삼지 화염은 삼중점(triple point)에서 만나게 되며, 이론 당량비 궤적을 따라 존재하여 이론 당량비 예혼합화염과 유사한 전파 특성을 갖게

Chung<sup>[1-4]</sup> 등은 층류 제트의 부상화염에서 나타나는 삼지 화염의 전파 속도와 이론 당량비 궤적을 따르는 유동 속도와의 관계로부터 부상화염의 높이를 성공적으로 예측하였다. 또한 제트 속도, 노즐 직경, 공기 및 질소 희석, 그리고 연료의 Schmidt number(Sc)의 의존성에 관한 관계식을 이끌어내었다.

Ruettsch 등은 이론적, 실험적으로 이차원 혼합층에 대한 연구를 통해 연료 농도 구배로 표현되는 혼합비 구배(mixture fraction gradient)는 삼지 화염 전파 속도에 영향을 주는 중요한 요소중의 하나임을 보였다<sup>[7-9]</sup>. 이 때 삼지 화염의 최대 전파 속도는 이론 당량비에서의 층류화염 속도(laminar burning velocity)에 미연 가스(unburnt gas)와 기연 가스(burnt gas)의 비(ratio)의 제곱근의 꼽으로 유도되며, 메탄과 프로판에 대하여 약 1 m/s이다.

Ko 등<sup>[10]</sup>은 층류 제트에서 펠스레이저를 이용하여 제트의 하류 위치에서 점화한 후 형성되는

\* 서울대학교 기계공학과

\*\* 한국우주항공연구소

\*\*\* 서울대학교 기계항공공학부

삼지 화염의 전파에 대해 실험적으로 연구하였는데, 메탄에 대하여 최대 속도가 0.96 m/s로 이는 Ruetsch 등<sup>[9]</sup>이 이론적으로 예견한 최대값인 1.09 m/s와 잘 부합된다. 또한 화염 선단의 곡률과 연료 농도 구배와 관련된 화염 스트레치가 전파 속도에 영향을 주는 중요한 요소임을 밝혔다.

한편, 정체 혼합층에서 메탄의 경우 삼지 화염 전파 속도는 1.8 m/s 까지 측정되었는데<sup>[6,11]</sup>, 이는 Ruetsch 등이 예견한 최대값보다 훨씬 더 크다.

본 논문에서는 이러한 차이를 설명하고, 난류 비균일 혼합에서 자발화 전파와 관련된 증상(stratified) 유동장에서 삼지 화염의 전파 속도를 조사하기 위하여 Fig. 1과 같은 이차원 및 축대칭 대향류 유동에 대해 실험하였다.

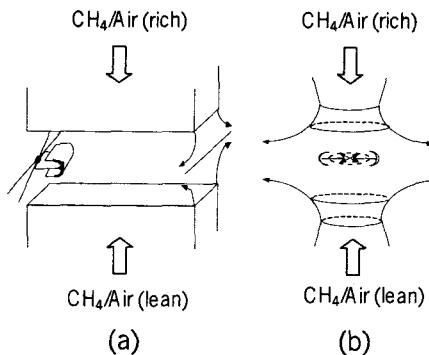


Fig. 1. Schematics of tribrachial flame propagation for (a) two-dimensional and (b) axisymmetric counterflows.

## 2. 실험장치 및 방법

실험장치는 대향류 버너, 유량조절시스템, 점화장치, 가시화장치 및 신호제어부로 구성되어 있다.

2차원 대향류 버너의 한쪽 노즐은 폭 10 mm, 길이 100 mm로 연료 또는 공기를, 바깥쪽 둘레의 노즐은 폭 10 mm로 질소를 공급하였다. 두 버너 사이의 간격은 8 mm이다. 연료 노즐과 질소 차폐와의 틈은 7 mm이고, 균일한 유동장을 얻기 위하여 다공성 판(porous plate)을 사용하였다. 축대칭 버너의 노즐 출구 직경은 21 mm이고, 두 노즐의 간격은 20 mm이다. 출구 유동을 가급적 균일하게 유지하기 위하여 단면적 비 40:1인 확대-축소 노즐을 두었다. 위쪽 노즐에서는 C.P. 등급의 메탄(CH<sub>4</sub>)이나 과농 메탄/공기 혼합기를, 아래쪽 노즐에서는 희박 메탄/공기 혼합기, 혹은 공기를 공급하였다. 평균 노즐 출구 속도는 이차원인 경우 5 cm/s와 10 cm/s이고, 축대칭 대향류 유동장인 경우 50

cm/s로 양쪽 노즐에 대하여 동일하게 공급하였다.

점화원은 Q-switched Nd: YAG 레이저(Spectra-Physics, GCR-150)를 사용하였고, 점화 위치는 볼록 렌즈( $f = 200 \text{ mm}$ )로 조절하였으며, 레이저와 다른 장비를 동기시키기 위해 8253 카운터로부터 발생된 단일펄스(single pulse)를 통해 단발(single shot)로 발진시켜 사용하였다.

화염 전파속도를 측정하기 위해 새도우(Shadow) 광학 기법을 이용하였다. 유동 및 화염 가시화를 위하여 고속도 CCD 카메라(Kodak, SR-ULTRA)를 이용하여 1000~2000 Fps (frame per second)의 속도를 얻은 후 카메라에서 제공되는 화소(pixel)정보로부터 시간에 따른 화염의 전파 속도(flame displacement speed)를 측정하였다. OH 농도 분포를 조사하기 위한 OH PLIF (planer laser-induced fluorescence) 시스템은 Nd: YAG 레이저(Continuum, Powerlite 8000), 색소 레이저(dye laser; Continuum, ND 6000), 그리고 주파수 변조기(frequency modulator; Continuum, UVT)로 구성되어 있다. 여기 파장으로  $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$  (1, 0) 밴드  $Q_1(6)$  라인(282.95 nm)을 선정하였고, 천이와 수광부로는 UG-11과 WG-305의 광학 필터를 장착한 ICCD 카메라(Princeton Instruments, EEV 02-06)를 이용하였다.

## 3. 결과 및 검토

### 3.1 이차원 대향류 유동장

이차원 대향류 유동에 대하여 두 가지 방식을 고려하였는데, 노즐 양쪽이 열려있는 경우(open end)와 노즐 한쪽 끝을 막은 경우(closed end)이다. 점화는 노즐의 한 쪽 끝으로부터 3 mm 떨어진 곳에서 점화가 되도록 하였다.

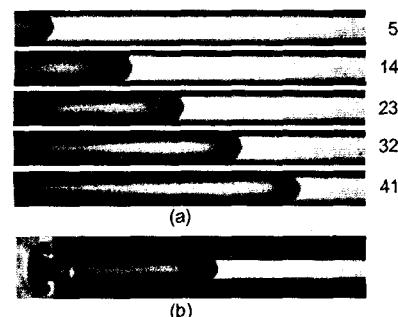


Fig. 2. Shadowgraphs of propagating flames in (a) 2-D counterflow with open ends and (b) hot burnt gas is ejected through open end by forming a vortex.

Figure 2는 출구 유속이  $V_o = 5$  cm/s인 경우의 삼지 화염 전파 모습을 새도우(shadow) 기법으로 찍은 사진이다. 이 경우 위쪽 노즐에  $\phi_R = 2.0$ 으로 과농 조건을, 아래 노즐로부터 회박( $\phi_L = 0.3$ ) 조건의 혼합기를 공급하였다. 점화 후에 초기에 약간의 지연시간(induction period) 후 거의 시간에 따라 선형적으로 전파됨을 알 수 있다. 이러한 거동을 좀더 자세히 알아 보기 위해 Fig. 3에 한쪽이 막힌 경우(closed end)에 대하여 화염 이동과 시간과의 관계를 나타내었다. 레이저 점화 후 약  $t = 18$  ms 이후 부터는 화염면 끝의 이동이 시간에 따라 매우 선형적으로 전파되는 것을 알 수 있다.

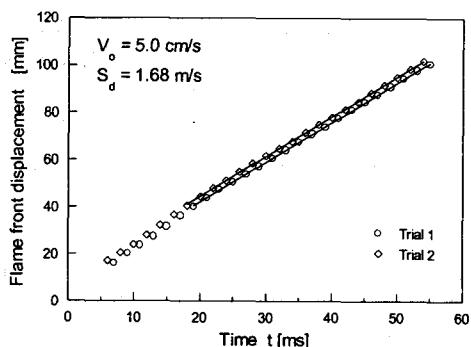


Fig. 3. Evolution of flame front displacement for  $\phi_R = 2.0$  and  $\phi_L = 0.3$  in 2-D counterflow with closed end.

이때 화염 이동 속도( $S_d$ )는 1.68 m/s로 이론 당량비에서 메탄의 층류 화염 전파 속도  $S_{L,u}^o|_{st} = 0.40$  m/s<sup>[13]</sup> 보다 훨씬 큰 값을 가진다. 또한, 이 값은 Ruetsch 등<sup>[8]</sup>이 이론적으로 유도한 식  $S_{L,u}^o|_{st} (\rho_u / \rho_b^o)^{1/2}$  으로부터 구한 최대 삼지 화염 전파속도  $S_{tri,u}^*$  가 이론 당량비의 메탄/공기에 대하여 최대 삼지 화염 전파 속도는 1.09 m/s임을 고려하면 매우 큰 값을 가짐을 알 수 있다. Figure 4는 전파되는 화염과 안정화 된 후의 화염에 대한 직접 사진이다. 양쪽 노즐을 통하여 ( $\phi_R, \phi_L = (1.4, 0.6), (2.0, 0.3), (5.5, 0.27)$ , and  $(\infty, 0)$ )로 당량비를 변화시켜 가며 삼지 화염이 전파 되어 가는 모습을 찍었다. 마지막 경우는 확산화염의 경우이다. (a)와 (b)는 안정화 후 세 개의 화염이 뚜렷하게 존재하는 경우로서, 삼지 화염이 전파되는 동안 과농 예혼합 화염과 회박 예혼합 화염의 날개(wing)가 길게 늘어져 있는 것을 볼 수 있다. (c)의 경우에는 과농 예혼합 화염이 확산 화염으로 충돌(merge)되어 세 화염에서 두 화염으로 천이되고, (d)의 경우에는 오직 확산 화염만이 존재

한다. 화염이 전파되는 동안 (c)의 경우 짧은 과농 예혼합 날개가 아직 존재하고 있고, 회박 예혼합 화염 날개가 길게 늘어져 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 (d)의 경우는 과농 예혼합 화염 날개는 존재하지 않고 짧은 회박 예혼합 화염 날개만이 존재하였다.

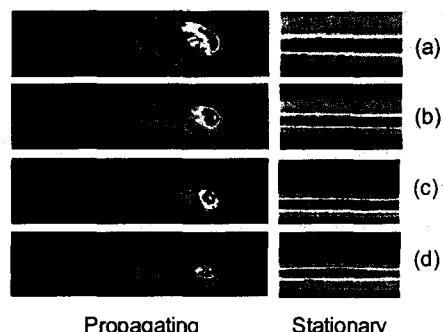


Fig. 4. Direct photographs of propagating tribrachial flames and stationary triple-layer flames using ICCD camera.

Figure 5에 전파되는 삼지 화염과 안정화 된 후의 화염에 대해 PLIF 기법을 사용하여 찍은 OH 이미지이다. Fig. 4의 직접 사진과 비교해 볼 때, 일반적으로 최대 강도의 위치는 회박한 쪽으로 이동된다. OH는 삼지 화염을 확인하는데 사용할 수 없기 때문에 삼지 화염을 구성하는 세 개의 화염들 간의 구분이 명확하게 보이진 않는다.

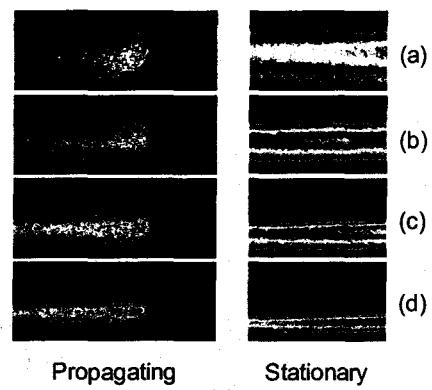


Fig. 5. OH PLIF images of propagating tribrachial flames and stationary triple-layer flames.

### 3.2 축대칭 대향류 유동장

Figure 6a는  $V_o = 50$  cm/s,  $(\phi_R, \phi_L) = (1.4, 0.6)$  인 경우에 혼합기의 정체점에서 점화하여  $t = 8$  ms 후 삼지 화염이 전파되는 모습이고, Fig. 6b는 대응되는 삼중 화염(triple layer flame)에 대한 ICCD 직접

사진이다.

비정상 삼지 화염의 전파 형태는 점화 후 기연 가스 지역이 타원형 모양을 가지며 수직과 수평 양 방향으로 성장한다. 삼지 화염이 반경 방향으로 전파되며, 약간의 초기 지연 시간(induction time),  $t \approx 8$  ms 후에는 삼지 화염 선단의 곡률변경이 비교적 일정한 형태를 유지하며 전파된다.

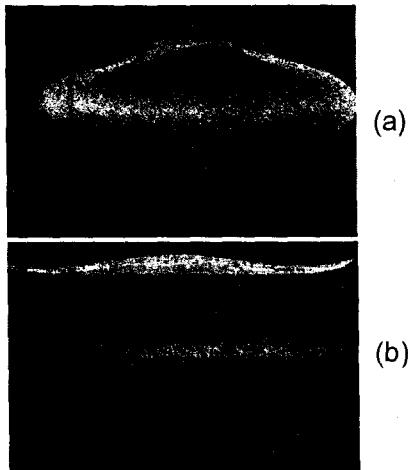


Fig. 6. ICCD images of propagating tribrachial flame (a) at  $t = 8$  ms and (b) corresponding stationary flame.

Figure 7에 삼지 화염의 이동 전개 모습을 나타내었다.  $t \approx 8$  ms 후에 화염 이동은 시간에 따라 선형적으로 전파되며, 이 때의 이동 속도는 2.15 m/s이다. 이차원 대향류 유동과 마찬가지로 이론 당량비의 층류 화염 전파속도보다 훨씬 큰 값을 가지며, 또한 이전에 예상한 삼지 화염의 최대 전파 속도보다도 훨씬 큰 값을 가지는 것으로 나타났다.

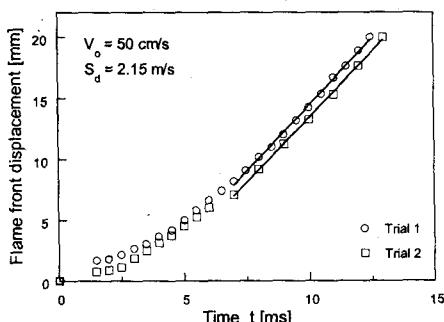


Fig. 7. Evolution of flame front displacement with time for axisymmetric counterflow.

### 3.3 삼지 화염의 전파 속도

연료 농도 구배로 표현되는 혼합비 구배는 삼지 화염의 전파에 영향을 주는 중요한 인자로서 화염 이동속도  $S_d$ 는 ( $\phi_r$ ,  $\phi_l$ )를 변화시킬 때 형성되는 연료 농도 구배의 함수로 결정되어 진다.

특정 ( $\phi_r$ ,  $\phi_l$ )에 대하여 연료 농도 구배  $dY_F/dz|_{st}$ 는 Smooke 등이 개발한 코드를 수정하여 계산하였다. 여기서  $Y_F$ 는 메탄의 질량분율(mass fraction)이고  $z$ 는 축방향 좌표를 나타낸다. 비반응 유동(cold flow)에 대한 계산은 plug flow로 가정하여 계산하였고, 연료 농도 구배는 당량비가 1인 지점의 축방향 위치에서 결정되었다.

이차원과 축대칭 대향류 유동에 대한 화염 이동 속도를 Fig. 8에 나타내었다. 여기에 몇 가지 주목할 점이 있는데, 첫째, 화염 이동 속도는 이론 당량비의 층류 화염 전파 속도보다 훨씬 큰 값을 가지며, 둘째 연료 농도 구배의 증가에 따라 화염 이동 속도는 감소한다. 셋째 실험에서 얻은 최대 화염 이동 속도는 3.15 m/s로, 이전에 예상한 삼지 화염 최대 전파 속도  $S_{tri,u}^* = S_{L,u}^o|_{st} (\rho_u / \rho_b^o)^{1/2}$ 보다도 훨씬 더 큰 값을 가진다는 것을 알 수 있다

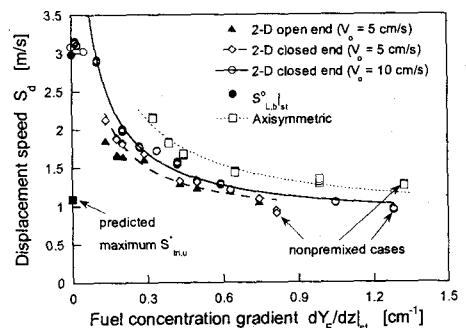


Fig. 8. Flame displacement speed with fuel concentration gradient in 2-D and axisymmetric counterflows.

곡률이 있는 삼지 화염의 선단에 열적 팽창에 의한 유동 재순환 효과(flow redirection effect)<sup>[8-9]</sup>가 생기는 데, 결과적으로 화염 선단이 상류를 향하여 불록하게 곡률이 생기면 화염면을 따라 접선 방향 속도는 일정하게 유지되는 반면, 화염면에 수직한 방향으로는 속도가 증가한다. 이로 인해 유선은 확대되게 되고, 결국 화염면 바로 앞의 국소 유동 속도는 감소하게 된다. 그래서 국소 삼지 화염의 전파 속도는 이론 당량비의 층류 화염 전파 속도와 비교할 만한 값을 가진다고 할지라도 삼지 화

염의 전파 속도는  $S_{L,u}|_{st}$  보다 큰 속도를 가지고 전파한다. 이러한 메커니즘은 볼록한 선단에서 층류 화염 전파 속도보다 더 큰 속도를 가진다는 Landau 의 수력학적 불안정(hydrodynamic instability) 메커니즘으로부터 쉽게 이해될 수 있다.

연료 농도 구배에 따라 전파 속도가 감소하는 이유는 가연 지역이 오직 삼지 화염 선단에서만 연소가 일어날수 있기 때문에 혼합비 구배는 예혼합 화염 모드에서 연소량(rate of burning)에 영향을 주고, 결국 혼합비 구배의 감소가 예혼합 화염의 연소량을 증가시키기 때문이다. 따라서 혼합비 구배가 증가함에 따라 삼지 화염면의 곡률에 의한 유동 재순환 효과가 완화되고, 결과적으로 전파 속도는 감소한다.

자유 제트에서 제트의 하류 위치에서 점화되어 형성되는 삼지 화염 전파에 관한 이전의 연구<sup>[10]</sup>에서 연료 농도 구배는 전파되는 삼지 화염면의 곡률반경과 선형적으로 결합되어 있다. 그러므로 Fig. 4에서 보여준 것처럼, 연료 농도 구배가 증가함에 따라 곡률반경은 감소한다. Markstein 의 수력학적 불안정성 이론에 의하면, 유동 상류방향으로 볼록한 면에 대하여 곡률반경의 감소함에 따라 전파속도가 감소한다. 이것은 상류를 향하여 오목한 텁을 가진 분진 화염 텁에서 전파속도가 상당히 증가된다는 거동으로부터 쉽게 이해될 수 있다. 이러한 복합적인 효과에 의해 연료 농도 구배가 증가함에 따라 삼지 화염의 전파 속도는 감소하게 된다.

Figure 8을 보면, 같은 출구 유속 조건에서 노즐 한쪽 끝이 열려 있는 경우보다 막혀 있는 경우에 전파 속도가 더 높음을 알 수 있다. 한쪽 끝이 열려 있는 경우에 Fig. 2b에서 보여준 것처럼 뜨거운 기연가스가 버너 바깥 쪽으로 분출되어 마치 버섯 모양(mushroom-shape)의 와동(vortex)이 생기게 된다. 이것으로 인해 상대적으로 화염 이동 속도가 줄어들게 된다.

실험에서 측정된 화염 이동 속도는 3.15 m/s 까지 올라간다. 이는 이전에 예견되었던 메탄/공기의 삼지 화염의 최대 전파 속도인 1.09 m/s 와 비교해 볼 때, 매우 큰 값을 가진다. 측정된 최대 화염 이동 속도와 이론적인 계산으로 유도된 전파 속도와 차이는 예혼합 화염 전파를 고려함으로서 해결될 수 있다. 균일한 예혼합기에 점화가 되면, 전파속도는 기연가스와 관련 지어 생각할 수 있다. 유사하게 혼합비 구배가 작은 한계점의 삼지 화염은 기연 가스에 따라 전파되게 된다. 간단한 예혼합 화염 전파 해석으로부터, 이에 상응한 대응되

는 기연가스 팽창 효과를 고려한 최대 삼지 화염 전파 속도  $S_{tri,b}^*$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$S_{tri,b}^* = S_{L,b}|_{st} (\rho_u / \rho_b^o)^{1/2}. \quad (1)$$

전파 속도(burning velocity)의 질량보존으로 부터,  $\rho_b^o S_{L,b}^*|_{st} = \rho_u S_{L,u}^*|_{st}$  가 되고, 기연 가스 팽창을 고려한 최대 화염 전파속도는 다음과 같이 된다.

$$S_{tri,b}^* = S_{L,u}^*|_{st} (\rho_u / \rho_b^o)^{3/2}. \quad (2)$$

이 식을 이용하여 메탄/공기의 경우 최대 삼지 화염 전파 속도는 8.09 m/s 가 된다.

이차원 대향류 유동의 경우에 연료/산화제는 끊임없이 노즐을 통하여 공급되고, 기연가스는 노즐 양 방향으로 효과적으로 배출된다. 그래서 오직 화염 전파 방향에서의 기연 가스만이 삼지 화염면의 하류 쪽에 쌓이게 된다. 그러므로 한쪽 끝이 막힌 2-D 대향류 유동의 경우 화염 이동 속도는 기연가스 팽창 효과를 고려한 삼지 화염의 전파 속도와 같게 된다.

최대 화염 전파 속도를 8.09 m/s로 예상하여, 한쪽 끝이 막힌 경우의 이차원 대향류 유동의 실험에서 얻은 데이터를 곡선 접합(curve fitted)한 식이 아래 식이다.

$$\frac{S_{tri,b}^*}{S_{L,u}^*|_{st}} = a \left[ \frac{dY_F}{dz} \Big|_{st} + b \right]^{-1} + c \quad (3)$$

$V_o = 10 \text{ cm/s}$  인 경우에  $a = 0.794$ ,  $b = 0.0433$ ,  $c = 1.89$  의 값을 가지는데,  $dY_F / dz|_{st} \leq 0.1$  인 데이터는 곡선 접합할 때 제외되었다. 곡선 접합한 식을 Fig. 8에서 실선으로 표시하였다. 그럼에서 알 수 있듯이 실험 결과와 아주 잘 맞는다는 것을 알 수 있다.

$dY_F / dz|_{st}$  가 아주 작을 때 삼지 화염은 예혼합 화염의 전파 특성으로 전이된다. 결과적으로 Fig. 8에서 보여준 것과 마찬가지로  $dY_F / dz|_{st}$  가 감소함에 따라 화염 속도는 감소하기 시작하고, 결국 당량비가 1인 균일한 예혼합 화염의 전파 속도로 접근한다. Fig. 8에 예혼합 화염 전파 속도  $S_{L,b}^*|_{st} = 3.08 \text{ m/s}$  를 검은 점으로 표시하였다.

$S_{L,u}^*|_{st} = 40 \text{ cm/s}$  에 근거하여 계산된 값이 2.97 m/s 인 것을 고려하면 실험과 잘 부합된다는 것을 알 수 있다.

연료 농도 구배가 작은 경우에 측정된 삼지 화염의 전파 속도가  $S_{L,b}^*|_{st}$  보다 더 크다는 것은 식

(3)에서 주어진 극한값을 설명해 준다.

$dY_F / dz|_{st}$  가 무한대로 커질 때 예상되는 최소 전파속도는  $V_o = 5 \text{ cm/s}$  와  $10 \text{ cm/s}$  인 경우에 각각  $0.760 \text{ m/s}$  와  $0.756 \text{ m/s}$  가 된다. 이 값들은 자유 계트 실험<sup>[10]</sup>에서 결정된  $0.56 \text{ m/s}$  보다 크게 차이가 나지 않는 반면,  $dY_F / dz|_{st} \rightarrow 0$  일 때 차이는 거의 7 배에 이른다. 이는  $dY_F / dz|_{st}$  가 커질 때 전체 화염 특성은 확산 화염으로 변화되어 균일 예혼합 화염 해석이 틀려지게 되기 때문이다.

축대칭 버너의 경우의 최대 화염 속도  $8.09 \text{ m/s}$ 로 예상하여 곡선 접합한 결과 식 (3)의 상수 값들  $a = 1.275$ ,  $b = 0.0696$ ,  $c = 1.91$  을 얻었다. Fig. 8 에 점선으로 표시하였는데, 역시 실험 결과와 잘 부합됨을 알 수 있다. 이 때 연료 농도 구배가 무한대로 커질 때의 최소 화염 이동 속도는  $0.764 \text{ m/s}$  로서 2-D 의 경우와 잘 맞는다.

마지막으로  $S_{tri,b}$  가  $S_{tri,u}$  보다 훨씬 큰 값을 가진다는 사실로부터 이전에 관측된 전파속도<sup>[6,11]</sup> 와 Reutsch 등이 이론적으로 유도한 식으로부터 얻을 수 있는 최대 삼지 화염 전파 속도와의 차이가 생김을 해결하였고, 난류 비균일 연료/산화제 혼합기에서 자발화 전파<sup>[12]</sup>와 관련되어 있다는 것을 해결 할 수 있었다. 자발화 선단의 이동이 이전에 예견 된  $S_{L,u|st}^o (\rho_u / \rho_b^o)^{1/2}$  의 값 보다 훨씬 더 빠를 수 있고, 대신 이동 속도에 대한 극한 값으로  $S_{L,u|st}^o (\rho_u / \rho_b^o)^{3/2}$  을 이용할 수 있을 것으로 예상 된다.

#### 4. 결 론

2-D 와 축대칭 대향류 유동장에 대하여 삼지 화염의 전파에 관해 실험적으로 연구하였다.

이차원 대향류 유동에서 삼지 화염 선단의 전파 속도는 연료 농도 구배에 따라  $0.92 \sim 3.15 \text{ m/s}$  의 값을 가졌다. 이 값들은 일반적으로 이전에 예견된 최대 화염 전파 속도보다 훨씬 큰 값을 가진다. 균일한 혼합물에서의 예혼합 화염에 대한 간단한 해석으로부터, 삼지 화염의 최대 전파 속도에 대한 극한값은 기연 가스의 팽창 효과를 고려하여  $S_{L,u|st}^o (\rho_u / \rho_b^o)^{3/2}$  로 유도 될 수 있다. 실제로 실험 결과를 곡선 접합한 결과 이 극한 거동(limiting behavior)과 잘 부합됨을 알 수 있었다. 혼합비 구배가 영으로 접근함에 따라 삼지 화염의 전파속도는 균일 예혼합 화염이 전파로 천이된다.

또한, 유사하게 축대칭 대향류 유동장에서도 화염 이동 속도는 연료 농도 구배가 감소함에 따라 감소하였으며, 극한 화염 이동 속도는 이차원 대향류 유동장의 경우와 잘 부합된다.

본 연구에서는 이전에 예견된 화염 전파 속도와 극한 속도 값과의 차이점을 해결하였고, 또한 비균일 난류 혼합물에서 자발화의 전파가 이전에 예상한 값들 보다 훨씬 클 수 있음을 보였다.

#### 후 기

본 연구는 정밀기계설계공동연구소 연구비 지원으로 이루어 졌으며 이에 감사 드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Chung, S. H., and Lee, B. J., *Combust. Flame* 86:62-72 (1991).
- (2) Lee, B. J., Kim, J. S., and Chung, S. H., *Twenty-Fifth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, 1994, pp. 1175-1181.
- (3) Lee, B. J., Cha, M. S., and Chung, S. H., *Combust. Sci. Technol.* 127:55-70 (1997).
- (4) Lee, B. J., and Chung, S. H., *Combust. Flame* 109:163-172 (1997).
- (5) Cha, M. S., and Chung, S. H., *Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, 1996, pp. 121-128.
- (6) Phillips, H., *Tenth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, 1965, pp. 1277-1283.
- (7) Dold, J. W., *Combust. Flame* 76:71-88 (1989).
- (8) Ruetsch, G. R., Vervisch, L., and Linan, A., *Phys. Fluids* 7:1447-1454 (1995).
- (9) Veynante, D., Vervisch, L., Poinsot, T., Linan, A., and Ruetsch, G., *Proceedings of the Summer Program*, Center for Turbulence Research, 1994, pp. 55-73.
- (10) Ko, Y. S., and Chung, S. H., *Combust. Flame* 118:151-163 (1999).
- (11) Mielenz, O., Schlotmann, F., and Rogg, B., *Seventeenth ICDERS*, 1999, Paper no. 215.
- (12) Domingo, P., and Vervisch, L., *Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, 1996, pp. 233-240.
- (13) Law, C. K., in *Reduced Kinetic Mechanism for Application in Combustion Systems* (N. Peters and B. Rogg, Eds.), Lecture Notes, in Physics Series m15, Springer-Verlag, Berlin, 1993, pp. 15-26.
- (14) Smooke, M. D., *J. Computat. Phys.* 48:72-105 (1982).