

삼지화염의 전파속도에 대한 속도구배의 영향에 관한 실험적 연구

김민국* · 원상희* · 정석호** · O. Fujita***

Experimental Study on the Effect of Velocity gradient on Propagation speed of Ttribrachial flame in Laminar Coflow Jets

M. K. Kim, S. H. Won, S. H. Chung and O. Fujita

ABSTRACT

The tribrachial flame in laminar coflow jet has been investigated experimentally with unsteady propagating condition. In this experiment, we found that the tribrachial point has an angle of flame surface because the location of tribrachial point is not on the base point of flame but on the inclined surface of flame. This angle of Flame surface at tribrachial point are increasing when the flame is approaching to the nozzle exit. With considering this angle of flame surface, the radial velocity gradient can affect flame propagation speed by increasing flow-stretch effect.

The propagation speed of tribrachial flame was calculated with including above stretch effect. The speed decreases with increasing velocity gradient due to the increment of stretch effect.

Key Words : Propagation speed(전파속도), Tribrachial flame(삼지화염), Laminar jet(층류 제트), Velocity gradient(속도구배), Stretch(스트레치), Angle of flame surface(화염면 각도)

기 호 설 명

d : 노즐 직경	X : 무차원 축방향 거리
r : 반경 방향 거리	X_v : 속도 가상 원점
r_0 : 노즐 반경	$X_{v,F}$: 농도 가상 원점
S : 전파속도	R : 무차원 반경 (=r/r ₀)
t : 시간	Y : 화학종 질량 분율
u : 축방향속도	Sc : Schmidt number
u_0 : 제트 속도 [m/s]	Le : Lewis number
θ : 화염면 각도	하첨자
κ : 스트레치	o : 노즐 출구
ν : 동점성 계수 [m ² /s]	∞ : 대기 조건
ρ : 밀도 [kg/m ³]	st : 이론당량비
	tri : 삼중점

1. 서 론

화염의 안정화 메커니즘을 규명하기 위하여 층류제트에서의 부상화염의 선단에 관한 연구가 활발히 진행되어져 왔다. 부분적으로 혼합된 제트에서 존재는 부상화염의 선단은 희박, 과농 예혼합 화염 그리고 확산화염이 동시에 존재하는 삼지화염(tribrachial flame)의 구조를 가지게 된다.

* 서울대학교 대학원 기계항공공학부

** 서울대학교 기계항공공학부

† 연락처자, shchung@snu.ac.kr

*** Division of Mechanical Science, Hokkaido University

삼지화염은 선단에 존재하는 예혼합 화염으로 인해 전파하는 특성을 가지게 되며 이때의 전파속도와 국부 유동속도가 균형을 이루는 지점에서 삼지화염의 부상 높이가 결정되어 진다. 이러한 속도의 균형에 의한 안정화 메커니즘을 통해서 제트 속도와 노즐직경에 관련된 부상화염 높이와의 관계식이 유도된 바 있다[1,2].

동축류 제트의 경우에는 자유제트의 경우보다 안정적인 부상화염을 얻을 수 있으며, 수치 해석적으로도 경계조건을 쉽게 설정할 수 있는 장점이 있어서, 동축류 제트에서의 부상화염에 대한 해석이 활발히 진행되었다[3,4].

이러한 연구 과정에서 자유제트와 동축류 제트의 속도장과 농도장의 차이에 대한 보정식이 제시되었다. 난류 동축류 제트에서 제트 속도와 동축류 속도의 차이로 정의된 상대속도가 상사성을 가진다는 실험결과[5]를 통해 속도장의 근사해가 유도 되었으며, 레이저 계측법을 이용한 농도장의 계측을 통해 근사해가 검증된 바 있다[6].

삼지화염의 특성을 해석하는데 있어서 화염의 전파속도는 주요한 관심분야이다. 이는 전파속도의 예측을 통해 속도 균형의 안정화 메커니즘을 이용하여 연료에 따른 부상화염의 존재 여부 [2], 부상높이, 화염의 날림, 그리고 재부착등의 화염 거동이 예측 될 수 있기 때문이다[6]. 또한 삼지화염의 전파속도는 복잡한 농도장과 속도장 조건하에 위치하므로 이러한 삼지화염에 관한 연구는 복잡한 난류 화염의 구조를 층류 소화염의 복합체로 해석하는 관점에서 주요한 선행 연구가 된다.

삼지화염의 전파속도에 대한 연구는 이론해석, 수치 해석적 방법을 이용한 많은 연구를 통해 Lewis 수[7], 혼합분율의 구배[8-10], 열발생[11] 및 부력[12]등의 영향이 알려져 왔다. 일련의 연구 결과에서 삼지화염의 전파속도가 제트의 혼합분율의 구배와 열발생으로 인한 유동 재배열 효과에 지배적으로 영향을 받는다고 보고되었다. 이를 통해 삼지화염의 전파속도는 혼합분율의 구배에 대해 비선형적으로 감소하게 되며, 혼합분율이 작아짐에 따라 근사적인 삼지화염의 최대 전파속도가 예측되었다[6,11].

또한 실험적으로도 메탄과 프로판 연료에 대한 삼지화염의 전파에 관한 연구가 이루어 졌으며, 전파속도와 혼합분율의 관계식이 보고되었다[13].

그러나 삼지화염의 전파속도를 혼합분율을 통해 예측한 결과를 살펴보면 초기 유속이 변함에 따라 전파속도가 차이를 보임을 확인할 수 있었다.

따라서 좀 더 엄밀한 화염전파속도의 예측을 위해서는 혼합분율 이외의 다른 효과를 고려해 줄 필요가 있다. 기존의 이론해석적 연구[14]에서 화염전파속도에 대한 화염면에 작용하는 스트레

치의 영향이 제시되 바 있었는데 본 실험에서는 이러한 초기 유속의 변화에 따른 화염 전파 속도의 변화를 속도구배와 관련하여 화염면에 작용하는 스트레치의 변화를 통해 알아보고자 하였다.

2. 실험

실험장치는 동축류 버너, 유량 제어 장치, 측정 장치로 구성되었다. 동축류 버너는 연료 노즐로 $d=0.254\text{mm}$ (propane), $d=0.508\text{mm}$ (methane)를 사용하였으며, 동축류 공급은 $d=90\text{mm}$ 의 동축류 노즐을 통해 $V_{co}=3\text{cm/s}$ 로 일정하게 공급하였다. 연료는 메탄과 프로판을 사용하였으며, 정밀한 유량의 제어를 위해 질량유량계를 이용하였다.

전파속도와 화염의 위치를 측정하기 위해서 고속도 카메라를 이용하여 후류에서 점화된 화염의 위치를 500fps의 간격으로 촬영하였다.

화염면의 각도와 곡률을 측정하기 위해서는 Nd:Yag 레이저(Continuum, PL8000)와 ICCD camera를 동기화 시킨후 delay time을 변화 시키는 방법으로 빠르게 전파되는 삼지화염에 대한 고해상도의 정보를 얻을 수 있었다. 촬영된 이미지는 Abel-transform을 통해 평면 이미지로 변화하여 분석하였다. 이러한 평면화염 이미지의 분석에 program된 code를 이용하여 화염면의 곡률등을 측정하는데 있어서 객관성을 유지하도록 하였다.

또한 OH-PLIF 이미지를 얻기 위하여 Nd:Yag 레이저(Continuum, PL8000)와 ICCD camera를 이용하였으며, 이때 282.95nm의 여기파장을 이용하였다.

무중력 장에서의 삼지화염의 전파 실험은 MG-Lab(Japan)에서 자유낙하는 캡슐 내부에서 진행 되었으며, PLC 장치를 이용하여 연료와 동축류의 분사 시기를 제어하였으며 제트의 발달시간을 고려하여 micro-gravity 조건 이내에 전파 실험이 완료 되도록 하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 측정 결과

Fig. 1은 프로판 연료에 대한 화염전파 과정을 시간에 따른 화염의 위치변화로 나타낸 측정 결과이다. 동축류 속도 $V_{co}=3\text{cm/s}$ 에서 안정적인 부상화염이 존재하는 유속보다 낮은 조건인 $u_0=6.8\text{ m/s}$ 의 경우에는 후류에서 점화된 화염이 노즐로 부착 될 때까지 전파되며, $u_0=10\text{m/s}$ 의 경우에는 안정적인 부상화염위치로 전파되어 감을 알 수 있다.

이러한 시간에 따른 화염의 위치변화를 미분하

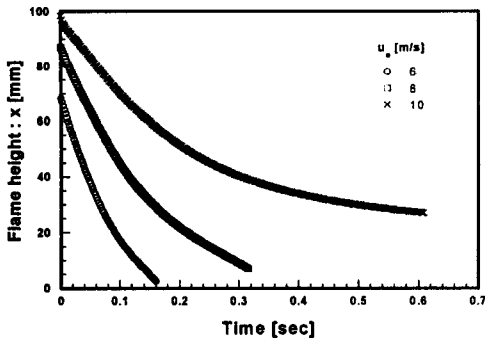


Fig. 1 Change of flame height with time

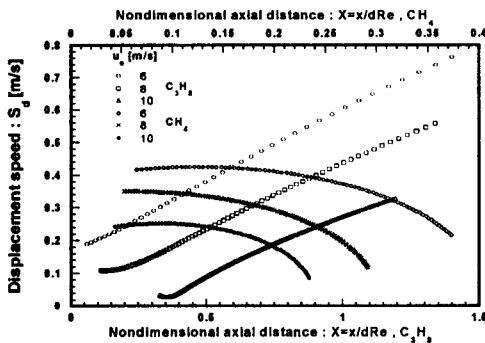


Fig. 2 Displacement speed with Nondimensional axial distance

여 화염이 전파되어 나가는 속도(S_d)를 프로판과 메탄 연료에 대해 무차원화된 높이($X=x/dRe$)로 나타내었다. (Fig. 2)

출구 유속이 작을수록 전체적인 화염전파속도는 빨라진다. 동일한 초기 유속 조건에 대해서는 프로판의 경우엔 노즐 쪽으로 접근함에 따라 전파속도가 감소하는 반면에 메탄의 경우에는 오히려 전파속도가 증가하다가 거의 일정해 짐을 반복실험을 통하여 확인 하였으며 이는 기존의 실험적 연구 결과와 일치하는 결과이다.[6].

Fig. 3-1과 Fig. 3-2는 프로판과 메탄 연료에 대해 삼지화염의 전파속도(S_{tri})를 연료의 농도구배에 대해 나타난 그래프이다. 측정된 화염의 전파속도(S_d)와 이론적으로 예측된 이론당량비 지점의 국부유동속도(u_{st})와의 합으로 정의되는 삼지화염의 전파속도(S_{tri})는 농도구배가 증가함에 따라 비선형적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 기존의 많은 실험적, 이론적 그리고 수치 해석적 연구 결과와 일치한다[8-11].

그러나 Fig 3-1을 보면 초기 유속의 변화에 따라 삼지화염의 전파속도(S_{tri})에 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 좀 더 엄밀한 삼지화염의 전파속도의 예측을 위해서는 농도구배의 영향과 함께 속도장에 관련된 영향이 고려되어야 함을 나타낸다.

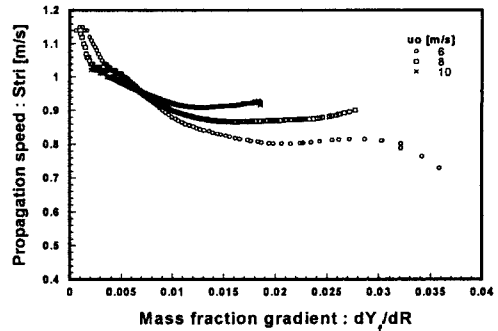


Fig. 3-1 Propagation speed of Tribachial flame with Mass fraction gradient, C3H8

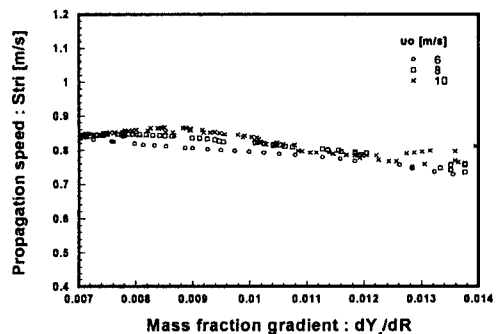


Fig. 3-2 Propagation speed of Tribachial flame with Mass fraction gradient, CH4

메탄의 경우에는 초기 유속의 변화에 따른 삼지화염의 전파속도의 변화폭이 프로판의 경우에 비해 매우 작게 나타났다. 이는 연료의 종류에 따라 삼지화염의 전파속도를 예측하는데 있어서 지배적인 변수가 달라 질 수 있음을 나타낸다.

3.2 속도 구배의 영향

3.2.1 연료에 따른 구배특성

Lee등은 동축류 효과와 가상원점(Virtual origin)이 고려된 제트에서의 속도장과 농도장에 대한 이론적 상사해를 제시하였다[6]. Fig. 4는 이러한 이론해에서 얻어지는 프로판과 메탄연료의 농도구배와 속도구배를 각 연료에 대한 최대치로 normalizing한 무차원화된 부상높이에 대하여 나타낸 것이다. 초기 유속에 따른 이론당량비 지점의 농도구배는 거의 일정하게 유지되는 반면에 속도구배의 경우에는 차이가 있음을 알 수 있다. 따라서 화염은 동일한 농도구배 조건에 대하여 서로 다른 속도구배의 조건에 의해 영향을 받을 수 있음을 생각해 볼 수 있다. 또한 이러한 속도구배의 차이가 노즐 쪽으로 접근 할수록 커지는 경향은 삼지화염의 전파속도의 초기 유속에

대한 변화의 정도가 노즐 쪽으로 갈수록 증가하는 것과는 일치한다. 이러한 사실에서 삼지화염의 전파속도에 속도구배의 영향이 작용하고 있다고 할 수 있다.

메탄 화염의 경우 역시 초기 유속의 변화로 인한 속도구배의 차이가 존재하나 프로판의 경우에 비해 속도구배 값의 크기가 작다. 따라서 속도구배에 의한 영향이 프로판에 비해 상대적으로 작을 수 있다. 이러한 메탄과 프로판의 연료에 따른 전파특성의 차이는 이후 전개되는 연료의 Le 수에 따른 신호 확산 효과와 병행하여 추가적으로 살펴보도록 하겠다.

이후에는 본 연구의 관심분야인 삼지화염 전파속도에 대한 속도구배의 효과를 알아보기 위하여 상대적으로 속도구배의 효과가 클 것으로 예상되는 프로판 화염에 대하여 살펴보도록 하겠다.

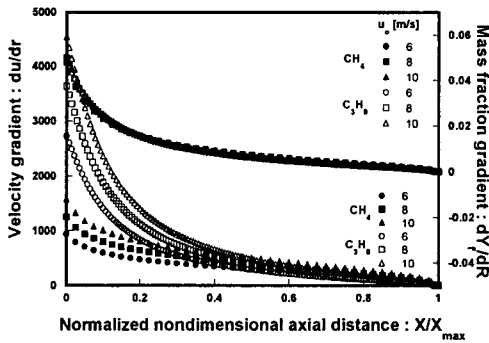


Fig 4 Velocity gradient & Mass fraction gradient with Normalized nondimensional axial distance X/X_{max} .

3.2.2 화염면 각도

프로판 화염의 안정적인 부상화염의 이미지와 Abel transform 변환을 통하여 얻은 평면 이미지 통하여 화염의 구조를 살펴보았다 (Fig.5-1,2).

삼지화염은 과농 예혼합화염과 희박 예혼합화염 그리고 후류의 확산화염의 세가지 화염이 만나는 삼중점에서 그 지배적인 특징이 결정되게 된다.

기존의 실험적인 연구에 있어서 이러한 삼중점의 위치는 화염의 최하단에 위치하는 것으로 정의하여 해석되어져 왔다

이론당량비 부근에서 층류 화염 전파 속도가 최대가 되므로 유동 속도가 균일한 경우에는 삼중점이 화염면의 최하단에 존재하게 된다. 그러나 유동속도가 반경방향의 구배를 갖는 경우에는 이론당량비점을 기준으로 화염면이 기울어지게 되므로 삼중점에서의 화염면은 어떠한 각도를 가질 수가 있게 된다. 고해상도의 직접사진 (Fig. 5-1)에서 후류로 발달하는 확산화염과 화염면이 교차하는 지점이 화염의 최하단 지점보다 안쪽에 위

치하며 또한 일정한 각도를 가지고 있음을 관찰 할 수 있었다. 이러한 삼중점 위치의 변화에 대하여 검증을 위하여 OH-LIF 광계측 기법을 적용하였다

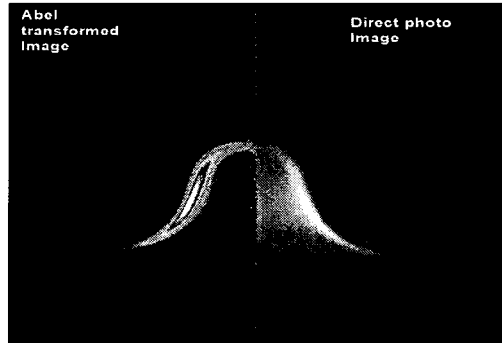


Fig. 5-1 Lifted tribrachial flame image

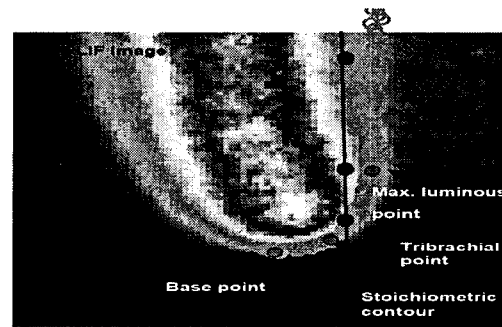


Fig. 5-2 OH-LIF image of Tribrachial flame edge with Flame surface contour and Stoichiometric contour

Fig. 5-2는 삼지화염 선단에 대한 OH-LIF 신호와 직접사진에서 추출한 화염면 궤적을 중첩시켜 나타낸 것이다. 일반적으로 삼지화염 선단의 OH-LIF 신호는 확산화염을 따라 강한 신호를 띄는 것으로 보고 된 바 있다. [3,15]. 그림에서 OH-LIF 신호가 화염면의 최하단 부분 보다는 화염면의 경사면에서 강한 신호를 띄고 있음을 알 수 있는데 이는 앞서 논의한 바와 같이 속도구배의 존재로 인하여 삼중점이 화염면의 경사면에 위치할 수 있음을 설명한 것과 일치하는 결과이다.

Fig. 6은 프로판의 비정상 전파 화염의 사진을 판독하여 얻은 화염면 각도이다. 그림의 각점은 초기 유속을 6, 8, 10 m/s로 변화 시키면서 측정 한 결과를 함께 나타낸 것이다. 이를 통해 화염면 각도가 속도구배의 증가에 따라 증가함을 알 수 있었다.

이처럼 삼중점에서의 화염면이 유동방향과 일

정한 각도를 이루게 되면 화염 선단이 받는 스트레치가 변하게 된다. 화염면이 유동의 축방향에 수직할 때는 수직방향의 속도구배에 의한 스트레치 항이 무시 될 수 있으나 화염면이 기울어짐으로 인하여 화염면에 수직한 방향으로의 속도구배 값이 증가하여 이에 의한 스트레치 효과를 무시할 수 없게 된다. 따라서 속도구배의 효과는 노즐쪽으로 갈수록 크게 나타나게 된다.

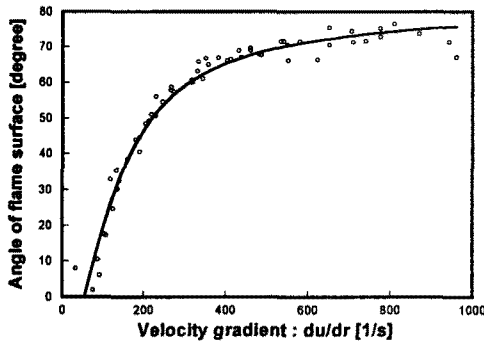


Fig. 6 Angle of flame surface with velocity gradient

3.2.3 곡률과 Stretch의 변화

Karlovitz에 의해 제안된 화염면에서의 스트레치는 Chung등의 연구 결과[16]에서 식(1)과 같이 일반적인 형태로 표현되었다.

이를 화염면 각도(θ)를 고려하여 기울어진 화염면에 작용하는 속도장에 대한 식으로 나타내면 식(2)와 같이 나타낼 수 있다

$$\kappa = \nabla_t \cdot \vec{v}_t + (\vec{V} \cdot \vec{n})(\nabla \cdot \vec{n}) \quad (1)$$

$$\kappa = \sin\theta \cos\theta \frac{du}{dr} + \frac{|u \cos\theta| + S_d}{r_{curv}} \quad (2)$$

이때 (2)식의 첫 번째항은 상대적으로 매우 작은 값을 갖는 축방향의 속도구배항은 무시하고 반경방향의 속도구배항만을 고려하여 나타낸 것이다. 두 번째 항은 곡률을 갖는 화염면에 작용하는 유동 속도와 전파속도에 의한 스트레치를 나타낸다.

이 식을 이용하여 스트레치를 계산하기 위해서는 우선적으로 삼중점에서의 곡률의 크기를 알아야 하는데, Fig. 7은 서로 다른 초기유속 조건에서 비정상(unsteady) 전파를 하는 화염의 이미지에서 측정된 곡률 값을 나타낸 것이다. 화염의 곡률은 농도구배가 클수록 커지는 경향을 나타내는데 Ko등[13]은 메탄 화염의 비정상 삼중점에서의

삼중점에서의 곡률을 측정된 결과 곡률이 농도구배의 증가에 선형적으로 증가함을 보고하였는데 이러한 경향은 프로판 연료에 대해 측정된 본 연구의 결과에 동일하게 적용 할 수 있었다.

이상의 연구 결과에서 얻은 화염면의 각도와 곡률을 이용하여 삼중점에 작용하는 스트레치를 계산한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 화염이 노즐 쪽으로 접근 할수록 화염면에 작용하는 스트레치가 증가하는 경향이 보이는 데 이는 농도와 속도구배가 커짐에 따라 곡률과 화염면 각도가 증가하기 때문이다.

이 때 초기 유속이 작을수록 전체적인 스트레치 값이 크게 나타나는 이유는 초기 유속이 작을 경우 화염의 전파 속도 (S_d)가 빨라져서 (Fig. 2-1) 곡률에 관계되는 스트레치가 커지기 때문이다.

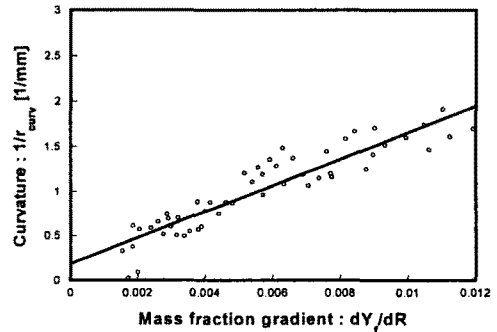


Fig. 7 Flame curvature with mass fraction gradient

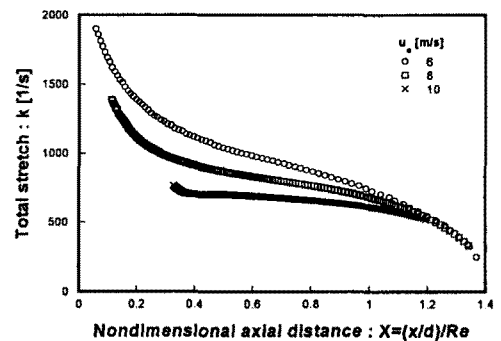


Fig. 8 Flame stretch with Nondimensional axial distance

3.3 삼중점화염 전파속도 : S_{tri}

3.3.1 층류 화염 전파속도 : S_L

이론적인 해석 결과에 의하면 곡률을 갖는 예혼합화염에 대하여 Le 수와 화염의 곡률 그리고 스트레치가 화염 전파 속도에 미치는 영향이 보고된 바 있다[14]. 식(3)은 그 결과를 식으로 나

타낸 것이다. 이때 화염에서의 Heat loss항은 무시하였다. 곡률을 가지는 화염의 층류 화염 전파 속도는 Le 수가 1이 아닌 경우 선호 확산 효과에 의해 영향을 받게 되며 그에 따라, 화염의 곡률이 클수록 전파속도는 감소하며 또한 화염면에 작용하는 스트레치에 비례하여 Le 수가 1보다 클 경우에는 전파속도가 감소되고, Le 수가 1보다 작을 경우에는 전파속도를 빨라 질 수 있음이 예측된다.

$$\frac{S_L}{S_L^0} = 1 - \left(\frac{\alpha}{S_L^0} \right) \left(\frac{1}{r_{curv}} \right) + \left(\frac{1}{Le} - 1 \right) \left(\frac{\alpha}{S_L^0} \right) \left(\frac{T_a}{2T_{ad}} \right) \kappa \quad (3)$$

삼지화염의 선단이 예혼합 화염으로 구성되어져 있는 점에서 착안하여 삼지화염의 층류화염 전파 속도의 예측에 있어서 위의 이론해석의 결과를 적용하였다.

Fig. 9는 식(3)에 의해 계산된 층류 화염 전파 속도 결과를 나타낸 것이다. 전체적으로 화염이 노즐쪽으로 접근하면서 전파속도가 감소하는 경향을 보이는 데 이는 노즐쪽으로 접근할 수록 화염의 곡률이 증가하고 스트레치가 커지기 때문이다.

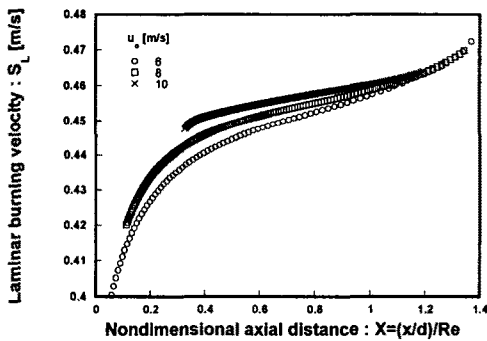


Fig. 9 Laminar burning velocity with Nondimensional axial distance

앞서 살펴 보았던 메탄화염의 전파 특성에 있어서 초기 유속에 대한 메탄 화염의 전파속도의 변화가 작은 이유를 속도구배의 크기가 프로판에 비하여 작음을 들어 설명하였다. 이는 식(3)에 의하여 Le 수가 1에 가까운 메탄의 경우에는 속도구배의 영향이 포함된 스트레치항의 계수가 0에 근접하게 되어 속도구배가 층류 화염 전파 속도에 미칠 수 있는 영향이 매우 작아지는 것으로 더욱 분명하게 설명되어 질 수 있다.

따라서 메탄 화염의 경우 초기 유속이 변하더라도 농도구배만으로 삼지화염 전파속도가 잘 예측될 수 있게 된다. 반면에 프로판 화염의 경우 Le 수가 1보다 상당히 큰 값을 가짐으로 인하여 스트레치의 효과가 화염의 전파속도에 미치는 영향이 커지게 되어 삼지화염 전파속도의 예측에 있

어서 농도구배와 함께 속도구배가 고려되어야 함을 알 수 있다. 이를 통해 삼지화염의 전파특성을 해석함에 있어서 연료의 종류에 따라 중요하게 고려해야 할 변수가 달라질 수 있음 재차 확인할 수 있다.

3.3.2 삼지 화염 전파 속도의 보정

삼지화염의 전파속도(S_{tri})는 층류 화염 전파속도(S_L)보다 상당히 큰 값을 갖는다. 이것은 기존의 많은 이론해석과 수치적 해석과정에서 화염의 열발생으로 인한 gas-expansion효과와 함께 상류 유동장의 재배열 효과로 설명 되어져 왔다.

또한 이러한 효과가 혼합층의 두께와 관련되며, 그로 인해 농도구배가 클수록 혼합층의 두께가 감소되어 삼지화염 전파 속도가 감소하는 것으로 설명되어 졌다.[10,11].

Lee등은 프로판 화염의 삼지화염 전파속도를 측정하였으며, 그 결과를 고정된 층류 화염 전파속도의 가정 하에서 농도구배와의 관계를 아래와 같은 경험식으로 유도한 바 있다[17].

$$\frac{S_{tri}}{S_L^0} = 0.00313 \left[\left(\frac{dY_F}{dR} \right)_{st} + 0.00237 \right]^{-1} + 1.42 \quad (4)$$

본 연구에서는 Lee등이 제시한 농도구배와 삼지화염의 관계식을 보정하여 일정한 층류화염 전파속도(S_L^0)대신에 앞서 제시된 식(3)을 적용하여 화염이 위치한 영역에서의 구배 효과에 의하여 변할 수 있는 층류 화염 전파 속도(S_L)로 대체하여 삼지화염의 전파속도를 계산하였다.

이러한 보정식이 직접적인 유도과정을 거쳐 구성된 것이 아니나, 스트레치가 삼지화염의 전파속도에 미치는 양향을 고려하고자 하는 목적에는 부합될 수 있을 것으로 생각하였다.

Fig. 10은 위에서 제안한 가변적인 층류 화염 전파 속도(S_L)가 고려된 삼지화염 전파속도를 계산한 결과이다. Fig. 1과 비교하면, 초기 유속의 변화에 따른 삼지화염의 전파속도의 차이가 현저히 감소되어 있음을 알 수 있다.

이는 동일한 화염의 속도와 농도 정보에 대해서 화염 선단의 스트레치 효과를 삼지화염의 전파속도의 예측에 포함시킴으로써 삼지화염의 전파속도를 농도구배의 함수로 예측한 기존의 연구 결과가 보정될 수 있음을 보여준다. 이때 예측된 삼지화염의 전파속도의 크기는 기존의 연구 결과에 비해 낮게 예측 되었다. 이는 보정된 전파속도에는 속도구배에 의해 생기는 화염면의 각도가 고려되었기 때문으로 사료 된다.

Fig. 11과 Fig 12는 무중력 조건에서의 프로판 연료의 전파실험 결과이다.

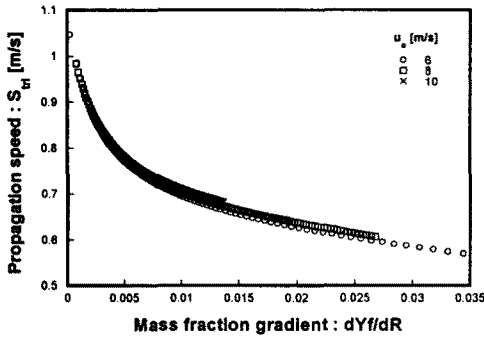


Fig. 10 Predicted Propagation speed of Tribachial flame with mass fraction gradient

농도구배에 대한 삼지화염 전파속도(S_{tr})의 변화의 경향은 유지되는 것으로 나타났으나, 무중력 조건에서의 전파속도가 중력장에서의 전파속도 보다 약 10%가량 빨라짐을 확인 할 수 있었다. 이는 유동속도가 이론식에 의해서 동일하게 예측되는 반면에 측정된 전파속도(S_d)가 무중력에서 10%정도 빠르기 때문이다.

제트의 농도장과 속도장에 관한 이론식에는 부력의 효과가 포함되어 있지 않으므로 이론적으로 구해지는 농도와 속도의 정보는 실제와 다를 수 있다. 본 실험과 같이 충분히 작은 노즐을 사용할 경우 농도장에 대한 부력의 영향이 크지 않으며, 반면에 속도장에 대해서는 부력의 존재로 인하여 주위 유동의 유입량만큼 빨라지게 되어 이론적으로 예측되는 속도보다 실제 속도가 빠를 수 있다[17].

따라서 삼지화염의 전파속도(S_{tr})를 단순히 측정된 전파속도(S_d)와 이론식에서 얻은 유동 속도의 합으로 예측하기는 어려울 수 있다. 또한 화염면에 유동속도의 구배에 의하여 생기는 각도를 적용하게 되면 삼지화염의 전파속도를 재정의 할 필요성이 생긴다. 이에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다고 하겠다.

4. 결론

삼지화염의 전파 속도(S_{tr})가 초기 유속의 변화에 따라 다른 경향을 보이는 이유에 대하여 속도 구배의 영향을 포함시켜 살펴보았다. 기존의 많은 연구에 적용되었던 삼지화염의 삼중점이 화염면의 최하단에 존재한다는 가정을 보완하여 속도구배가 있는 영역에 삼지화염이 존재할 경우에는 삼중점이 화염의 경사면에 위치할 수 있음을 제안하였으며, 그로 인한 화염면의 각도와 속도구배의 관계식을 제시하였다.

또한 화염면 각도의 존재가 화염면에 작용하는 스트레치의 형성에 변화를 가져오며, 그 결과 화

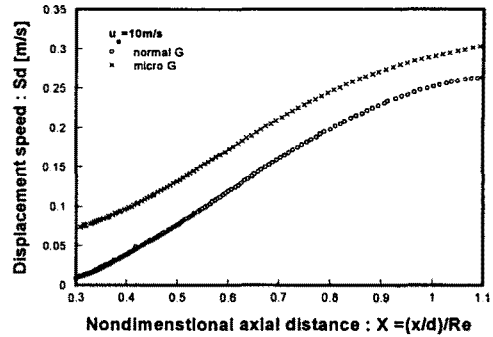


Fig. 11 Displacement speed(S_d) with Nondimensional axial distance in normal & micro gravity

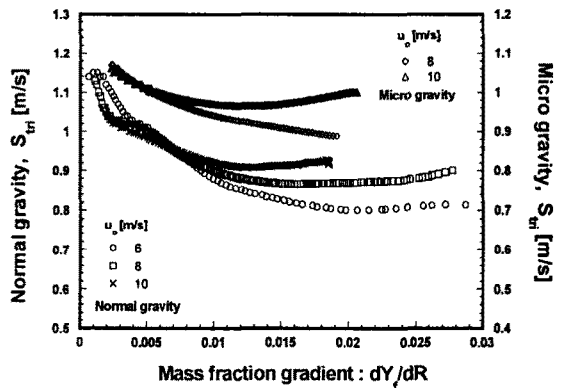


Fig. 12 Propagation speed of Tribachial flame with mass fraction gradient in Normal & Micro gravity condition

염면에 작용하는 스트레치에 속도 구배에 의한 스트레치가 고려되어야 함을 보였다. 이는 기존의 최하단에 위치하는 삼중점의 가정에서는 속도 구배에 의한 스트레치가 매우 작게 계산되었던 것과는 다르다고 하겠다.

삼지화염의 전파속도를 예측함에 있어서 고정된 종류 화염 전파 속도(S_L^0)대신에 곡률과 스트레치 조건에 따라 변할 수 있는 가변적인 종류 화염 전파속도를 적용하여 스트레치의 효과를 포함시켰다.

이러한 과정에서 매탄 화염의 경우 농도구배만으로 삼지화염의 전파속도가 예측 될 수 있는 반면에 프로판의 경우 속도구배의 효과가 고려되어야 함을 보였다. 이는 연료의 Sc수의 차이에 의하여 연료마다 삼중점이 존재하는 이론당량비 지점의 속도구배가 달라지며, 또한 Le수에 따라 속도구배가 화염 전파속도에 미치는 영향이 다르기 때문으로 보인다. 따라서 삼지화염의 전파속도의 예측에 고려해야할 지배적인 변수가 연료의 종류

에 따라 달라 질수 있음을 제시하였다.

무중력장에서의 전파 속도 측정 실험을 통해 부력에 의하여 실제 유동 속도는 이론적으로 예측되는 값보다 클 수 있음을 보였으며, 이로 인해 정확한 삼지화염의 전파속도를 예측하기 위해서는 속도장에 대한 보다 엄밀한 고찰이 필요하며, 화염면의 각도가 고려된 삼지화염의 전파속도의 정의가 필요함을 제안 하였다

후 기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)의 지원으로 이루어 졌으며, 원상희, 김민국은 기계분야 BK-21사업의 지원을 받았고, 정석호, 원상희, 김민국은 미래형 자동차 배기가스 제로화 기술개발 사업단의 지원을 받았기에 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [[1] Chung, S. H. and Lee, B. J., "On the Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Nonpremixed Jet," *Combust. Flame*, Vol. 86, 1991, pp.62-72.
- [2] Lee, B. J. and Chung, S. H., "Stabilization of Lifted Tribrachial Flames in a Laminar Nonpremixed Jet," *Combust. Flame*, Vol. 109, 1997, pp. 163-182.
- [3] Plessing, T., Tefhoeven, P., Peters, N. and Mansour, M. S., "An Experimental and Numerical Study of a Laminar Triple Flame," *Combust. Flame*, Vol. 115, 1995, pp. 335-353.
- [4] Smooke, M. D., Ern, A., Tanoff, M. A., Valdati, B. A., Mohammed, R. K., Marran, D. F. and Long, M. B., "Computational and Experimental Study of NO in an Axisymmetric Laminar Diffusion Flame," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 26, 1996, pp. 2161-2170
- [5] Rajaratnam, N., "Turbulent Jets", *Elsevier Scientific Publishing Company*, 1976.
- [6] Lee, J., Won, S. H., Jin, S. H., Chung, S. H., "Lifted flames in laminar jets of propane in coflow air," *Combust. Flame*, Vol. 135, 2003, p. 449-462.
- [7] Buckmaster, J. and Matalon, M., "Anomalous Lewis Number Effects in Tribrachial Flames," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 22, 1988, pp. 1527-1535.
- [8] Dold, J. W., "Flame Propagation in a Nonuniform Mixture: Analysis of a Slowly Varying Triple Flame," *Combust. Flame*, Vol. 76, 1989, pp. 71-88.
- [9] Hartley, L. J. and Dold, J. W., "Flame Propagation in a Nonuniform Mixture: Analysis of a Propagating Triple-Flame," *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 80, 1991, pp. 23-46.
- [10] Ghosal, S. and Vervisch, L., "Theoretical and Numerical Study of a Symmetrical Triple Flame using the Parabolic Flame Path Approximation," *J. Fluid Mech*, Vol. 415, 2000, pp. 227-260.
- [11] Ruetsch, G. R., Vervisch, L. and Linan, A., "Effect of heat release on Triple Flames," *Phys. Fluids*, Vol. 7, 1995, pp. 1447-1454.
- [12] Chen, J. Y. and Echehki, T., "Numerical Study of Buoyancy Effects on the Structure and Propagation of Triple Flames," *Combust. Theory Modelling*, Vol. 5, 2001, pp. 499-515.
- [13] Ko, Y. S., Chung, S. H., "Propagation of Unsteady Tribrachial Flames in Laminar Non-premixed Jets", *Combust. Flame*, Vol. 118, 1999, pp. 151-163
- [14] Chung, S. H., Law, C. K., "An Integral Analysis of the Structure and Propagation of Stretched Premixed Flames," *Combust. Flame*, Vol. 72, 1988, pp. 325-336
- [15] Won S. H., Chung, S. H., Cha, M. S., Lee, B. J., *Proc. Combust. Inst.* Vol. 28, 2000, pp 2093-2099
- [16] Chung, S. H., Law, C. K., "An Invariant Derivation of Flame Stretch," *Combust. Flame*, Vol. 55, 1984, pp. 123-125
- [17] Lee, J., Won, S. H., Jin, S. H., Chung, S. H., Fujita, O. and Ito, K., "Propagation Speed of Tribrachial Flames of Propane in Laminar Jets under Normal and Micro Gravity Conditions," *Combust. Flame*, 2002.