

삼지화염 구조해석을 위한 다양한 가시화 기술 적용에 대한 연구

김민국* · 원상희* · 정석호†

Study on the Application of Various Visualization Techniques for Analysing the Structure of Tribrachial Flame

Min Kuk Kim, Sang Hee Won and Suk Ho Chung

Abstract

The tribrachial flame in laminar coflow jet has been investigated experimentally with unsteady propagating condition. With adopting various visualization techniques, including OH-PLIF, Rayleigh Scattering technique, it was confirmed that the location of tribrachial point is on the inclined surface of flame and the propagation speed of tribrachial flame was significantly affected by the velocity gradient.

Key Words : Tribrachial Flame(삼지화염), PLIF(평면 레이저유도형광법), Rayleigh Scattering(레이리 산란), Tribrachial Point(삼중점), Angle of Flame Surface(화염면 각도)

1. 서론

부분적으로 혼합된 제트에서 존재하는 부상화염은 복잡한 농도장과 속도장 내에서의 화염의 거동에 대한 연구로써 중요시 되어 왔으며, 많은 연구자들에 의해 삼지화염의 구조, 부상특성 그리고 전파속도 등의 다양한 주제에 대한 연구가 수행되어 왔다. 부상화염의 선단은 희박, 과농 예 혼합 화염 그리고 확산화염이 동시에 존재하는 삼지화염(tribrachial flame)의 구조를 가지게 된다. 따라서 삼지화염은 그 선단에 존재하는 예혼합 화염으로 인해 전파하는 특성을 가지게 되며 이러한 삼지화염의 전파속도를 예측하고자 하는 연구가 이론적, 수치적 그리고 실험적인 분야에서 활발히 진행되어져 왔다[1-4].

실험적인 삼지화염의 연구에 있어서, 직접사진을 이용한 화염 계측에서부터, 광계측 기법을 이용한 상세한 화염내부의 현상 연구에 이르기까지 다양한 가시화 기법의 적용은 필수적이라 할 수 있다. 특히 광계측 방법은 그 적용기술의 어려움에도 불구하고 측정 대상에 교란을 주지 않는 비접촉식 측정방법이며, 높은 정확도의 계측을 가능케 한다는 장점으로 인하여 연소현상 연구에 활발히 적용되고 있다.

본 실험에서는 초기 유속의 변화에 따른 프로판 삼지화염의 전파속도를 측정하였으며, 속도구배가 삼지화염 전파속도에 미치는 영향을 설명하기 위하여 여러 가시화 기법이 적용하였다. 보다 엄밀한 삼중점의 위치를 결정하기 위하여 OH-PLIF 기법이 적용되었으며, ICCD camera를 이용하여

빠르게 전파하는 화염의 구조를 살펴보았다. 또한 Rayleigh Scattering 기법을 적용하여 삼지화염 선단 부근의 온도분포를 측정하였으며 이를 속도 구배가 삼지화염 전파속도에 미치는 영향을 설명하는데 적용하였다.

2. 실험 장치 및 방법

실험 장치는 동축류 버너, 유량 제어 장치, 측정 장치로 구성되었다. 동축류 버너는 연료 노즐로 $d=0.254\text{mm}$ 를 사용하였으며, 동축류 공급은 $d=90\text{mm}$ 의 동축류 노즐을 통해 $V_{co}=3\text{cm/s}$ 로 일정하게 공급하였으며, 정밀한 유량의 제어를 위해 질량유량계를 사용하였다.

전파속도를 측정하기 위해서 고속도 카메라를 이용하여 후류에서 점화된 화염의 위치를 500fps의 간격으로 촬영하였으며, 이렇게 일정한 시간 간격으로 측정된 화염 위치의 변화를 미분하여 화염이 전파되어 나가는 속도(displacement speed, S_d)를 얻어내었다.

화염면의 각도와 곡률을 측정하기 위해서, Nd:Yag 레이저(Continuum, PL8000)와 동기화된 ICCD camera를 이용하여 delay time을 변화시키는 방법으로 빠르게 전파되는 삼지화염에 대한 고해상도의 이미지를 얻을 수 있었으며, 촬영된 이미지는 모두 Abel변환을 거쳐 평면 이미지로 변환, 분석되었다. 또한 program된 code를 이용하여 화염면의 궤적을 측정하는데 있어서 객관성을 유지하도록 하였다.

OH-PLIF 이미지를 얻기 위하여 Nd:Yag 레이저(Continuum, PL8000)와 ICCD camera를 이용하여, 282.95nm의 여기파장에서 이미지를 측정하였으며, 또한 화염 선단의 온도 분포를 살펴보기 위하여 Rayleigh 산란 측정법이 적용되었다.

3. 결과 및 분석

3.1 삼지화염 전파속도와 속도구배

기존의 연구 결과에 의하면, 삼지화염의 전파

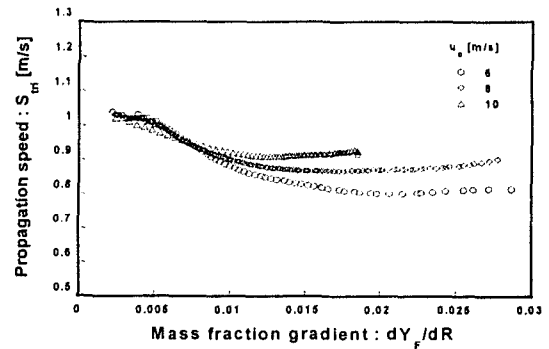


Fig.1. Propagation speed of tribrachial flame at various jet velocities, $U_0=6,8,$ and 10m/s with $\text{C}_3\text{H}_8/\text{Air}$

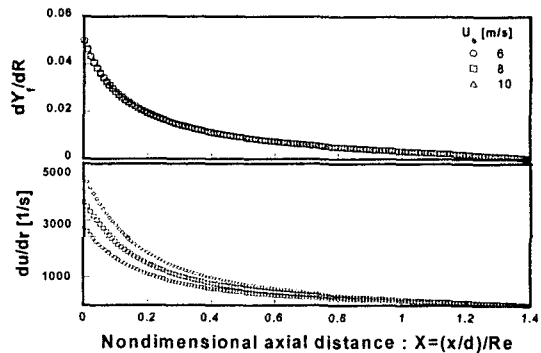


Fig.2. Distribution of concentration and velocity gradients at various jet velocities, $U_0=6,8,$ and 10m/s

속도는 화염에서의 열 발생에 의한 유동의 재배열 효과에 지배적인 영향을 받는다고 알려져 왔으며, 그 결과 삼지화염의 전파속도가 혼합분율의 구배로 잘 예측되어짐이 보고되었다.[2, 4].

본 연구에서 동축류 버너를 이용하여 프로판 연료에 대한 삼지화염의 전파속도를 측정된 결과(그림1) 삼지화염의 전파속도를 혼합분율의 구배로 나타낼 경우, 초기유속의 변화에 대하여 차이가 생김을 확인하였다. 이러한 삼지화염의 전파특성의 차이를 살펴보기 위하여 이론당량비 라인을 따라 전파되는 삼지화염의 삼중점에서의 농도구배와 속도구배의 분포를 무차원화된 높이에 대하여 나타내었다.(그림.2.)

그 결과 초기 유속의 변화에 따른 농도구배의 분포는 변화가 없었으나 속도구배의 경우엔 매우 큰 차이가 있음을 확인 할 수 있었다. 이러한 속도구배의 차이가 삼지화염 전파 속도에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 보다 엄밀한 화염구조에 대한 해석이 필요하게 되었으며, 이를 위해 다양한 가시화 기법을 적용하게 되었다.

3.2 OH-PLIF을 이용한 삼지화염의 연구

삼지화염의 특성을 대표하는 삼중점에서의 농도와 속도구배 조건은 위치에 따라 민감하게 변하므로, 삼지화염의 연구에 있어서 삼중점의 위치를 정확하게 측정하는 것은 매우 중요하다. 균일한 속도조건하에서는 층류화염전파속도가 최대가 되는 이론당량비 지점이 최하단에 존재하게 되어 삼중점의 측정이 비교적 용이하나, 본 실험과 같이 화염 상류의 유동속도가 반경방향으로 큰 구배를 갖는 경우에는 이론당량비점을 기준으로 화염면이 기울어지게 되므로 삼중점은 화염면의 최하단 점이 아닌 경사면에 존재하게 된다.

그림3a는 안정적인 부상화염에 대한 삼지화염의 이미지이다. 삼지화염의 직접사진 이미지(right)로부터 화염의 평면적인 정보를 얻기 위하여 Abel 변환 기법을 적용하였다(left)이다. 그림에서와 같이 화염의 선단에 존재하는 과농 예혼합 화염과 희박 예혼합 화염을 뚜렷하게 확인할 수 있었으며 이를 통해 화염면의 선단을 이루는 예혼합화염의 궤적을 얻을 수 있었다 그러나 후류로 발달되는 확산화염의 경우에는 상대적으로 신호가 약하여 정확한 삼중점의 위치를 결정하기엔 불충분 하였다.

따라서, 확산화염의 위치를 가시화하여 보다 정확한 삼중점을 얻어내기 위하여 OH-PLIF기법을 적용하였다. 안정된 부상화염에 대하여 Nd:YAG레이저(Continuum, PL8000)와 색소레이저(dye-laser, Continuum, ND6000), 그리고 ICCD camera를 이용하여 OH 라디칼 신호를 측정하였다. 이때 측정은 $Q_1(6)$ 전이 중 (1,0)밴드와 관련된 282.95 nm의 여기 파장에서 수행 되었다.

그림3b는 삼지화염에 대하여 측정된 OH-PLIF 신호(right)와 같은 조건에서 동시에 촬영된 직접 사진에서 Abel변환을 통해 얻은 평면 이미지(left) 나타낸 것이다. 그림에서 OH-PLIF신호가 삼지 화염의 예혼합 화염 지역의 후류에서 강하게 측정되고 있음을 알 수 있으며, 이를 통해 OH 라디칼이 후류로 발달되는 확산화염에

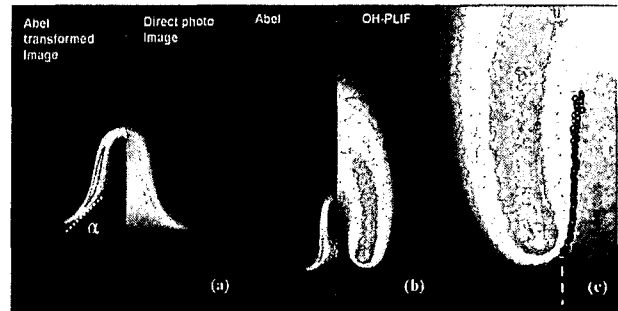


Fig.3. Stationary lifted flame images (a)direct photo(right) and abel transformed image(left) with angle of flame surface, α , (b)OH-PLIF(right) and abel transformed images, (c)magnified image of flame edge from OH-PLIF

서 강한 신호를 발생함을 알 수 있다. 따라서 OH라디칼이 확산화염의 분포를 나타내는 지시자로서 사용되어 질 수 있다는 기존의 연구 결과[5]를 확인 할 수 있었다.

그림3c는 화염면의 선단 부근의 OH-PLIF신호와 직접사진에서 얻은 화염선단의 예혼합 화염의 궤적(open symbol)과 이론적으로 예측되는 이론당량비 궤적(점선)을 중첩시켜 나타낸 것이다. 그림에서 OH-PLIF신호가 화염면의 최하단 부분보다는 화염면의 경사면에서 강한 신호를 띄고 있음을 알 수 있는데 이는 앞서 논의한 바와 같이 속도구배의 존재로 인하여 화염의 삼중점이 경사면에 위치할 수 있음을 설명한 것과 일치하는 결과이다

후류의 확산화염의 궤적의 연장선과 예혼합화염의 궤적의 교점이 이론당량비 궤적에 매우 가깝게 형성됨을 다양한 부상높이에 대하여 반복적인 실험을 통하여 확인 하였다. 이는 상대적으로 계측이 용이한 예혼합화염면과 이론적으로 구해지는 이론당량비 궤적의 교점을 이용하여 근사적인 삼중점을 결정할 수 있음을 의미한다.

따라서 이후의 연구에서는 예혼합화염면의 궤적과 이론당량비 궤적의 교점을 삼중점으로 정의하여 사용하였다. 이와같이 삼중점이 화염의 경사면에 존재하게 되면, 삼지화염은 축방향에 대하여 일정한 각도로 전파하게 된다. 따라서 삼지화염의 전파속도의 예측에 이러한 각도가 고려하여야 함을 이상의 계측 결과로부터 유출 할 수 있었다.

3.3 ICCD camera를 이용한 삼지화염의 연구

삼지화염 전파속도의 측정을 위해서 고속도 카메라를 이용하여 시간의 변화에 따른 화염의 위치 변화를 측정하였다. 그러나 고속도 카메라로 넓은 영역의 삼지 화염의 전파 과정을 측정할 경우 촬영된 화염 이미지는 상대적으로 크기가 작아져서 정확한 삼중점의 위치와 화염면의 기울기와 같은 상세한 삼지화염 구조를 파악하기에는 어려운 단점이 있다.

그러므로 전파하는 화염의 구조를 고해상도의 이미지로 가시화 할 수 있는 방법이 요구된다고 하겠다. 이를 위하여 본 실험에서는 ICCD camera와 레이저 점화 장치를 동기화 시켜 점화 시간과 촬영시간의 간격을 변화시키면서 빠르게 전파하는 화염으로부터 고해상도의 화염 이미지를 촬영하였다. 이러한 이미지는 Abel변환을 거쳐 평면 이미지로 변환되었으며, 그 결과를 분석하여 전파하는 화염에 대한 삼지화염 선단의 예혼합화염의 궤적을 측정할 수 있게 되었다.

그림 4.는 연료 제트의 출구 유속 $U_0=6\text{m/s}$ 와 동축류 속도 $V_{co}=3\text{cm/s}$ 조건에서의 전파하는 삼지화염의 이미지를 계측한 결과에 이론적으로 예측되어지는 이론당량비 궤적(점선)을 중첩시켜 나타낸 것이다. 화염면의 궤적과 이론당량비 궤적이 만나는 지점이 화염의 경사면에 위치하고 있음을 재차 확인 할 수 있었으며, 이를 통해 앞서 살펴본 안정적인 부상화염과 마찬가지로 전파하는 삼지화염 역시 일정한 크기의 화염면 각도를 가짐을 확인 하였다.

그림 5.는 측정한 화염면의 각도를 속도 구배로 나타낸 그림이다. 그 결과 삼중점에서의 화염면의 각도가 속도구배의 크기에 비례하며, 초기유속의 변화에도 불구하고 속도구배 만으로 잘 예측 되어 질 수 있음을 확인 할 수 있다.

이와 같이 고속도 카메라를 이용한 전파속도 측정과 병행하여 점화 장치와 연동되는 ICCD 카메라를 사용함으로써 삼지화염의 전체적인 전파 거동의 측정과 더불어 삼지화염의 상세한 구조를 살펴 볼 수 있었다.

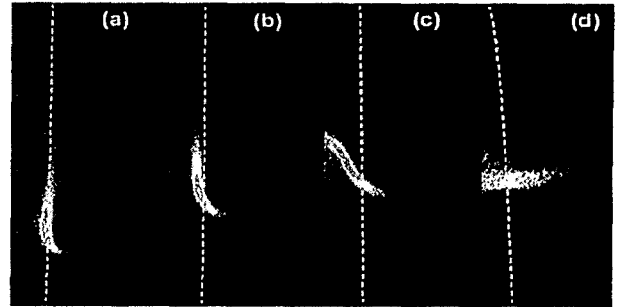


Fig.4. Unsteady propagating flame images from ICCD camera with $U_0=6\text{m/s}$, $V_{co}=3\text{cm/s}$ at location of (a)20.5, (b)30.5, (c)44.5, and (d)60mm

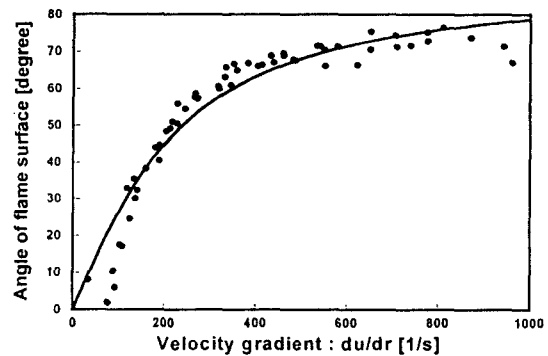


Fig.5. Angle of flame surface with velocity gradient at various jet velocity, $U_0=6, 8, \text{ and } 10\text{m/s}$

3.3 Rayleigh scattering 기법을 이용한 삼지 화염 연구

화염 상류에서는 화염에서의 열발생에 의한 영향으로 인하여 유동의 재배열 현상이 발생하게 된다. 이러한 유동의 재배열 효과는 삼지화염의 전파속도를 결정하는 데 있어서 재배적인 요인으로 알려져 있다[2,3]. 따라서 삼지화염의 선단부근의 열적 특성을 살펴보기 위하여 Rayleigh 산란법을 이용하여 온도분포를 측정하였다.

Rayleigh 산란 신호를 이용하면, 측정 영역에 존재하는 기체의 평균 밀도에 대한 상대적인 차이를 살펴볼 수 있는데 이는 이상기체 가정을 통하여 온도분포로 변환될 수 있다[6]. 이를 이용하여 삼지화염 선단 부근의 온도 분포를 살펴 보았다. 그림6은 안정적인 부상화염에서 얻은 Rayleigh scattering 신호와 그 신호를 분석하여 얻을 수 있는 등온도 선도(iso-temperature line)를 보여주고 있다. 여기서 화염면에 수직한 방향으로 온도구배가 매우 크게 형성되고 있음을 확인할 수 있으며 그로인해 화염면에 수직한 방향

으로의 열확산이 지배적임을 확인할 수 있다.

삼지화염이 특정한 각도를 갖고 전파되어 나가는 것과 마찬가지로 온도 구배로 인한 열확산 방향 역시 축방향에 대하여 어떠한 각도를 이루고 있음을 알 수 있다.

따라서 속도구배가 증가함에 따라 증가하는 화염면 각도로 인하여 상류로의 열확산량이 감소하게 되며 이로 인해 유동의 재배열 효과가 감소되어 결과적으로 삼지화염의 전파속도가 작아짐을 알 수 있다.

그림 7은 화염면 각도가 고려된 삼지화염의 전파속도를 속도구배로 나타낸 것이다. 초기 유속의 변화에도 불구하고, 삼지화염의 전파속도가 속도구배로 잘 예측 될 수 있음을 확인할 수 있다.

4. 결론

프로판 연료에서 삼지화염의 전파속도에 대한 속도구배의 영향을 대하여 연구하기 위하여 여러 가지 화염의 가시화 기법이 적용되었다.

고속도 카메라를 이용하여 동축류 제트에서의 삼지화염의 전체적인 전파 거동을 측정하였으며, 동시에 ICCD 카메라를 이용하여 빠르게 전파하는 삼지화염의 상세한 구조를 해석할 수 있었다.

ICCD 카메라를 이용하여 얻은 화염의 이미지를 Abel변환하여 화염의 평면적인 정보를 얻어내었으며, 이를 분석하여 삼지화염 선단의 예혼합 화염의 궤적을 얻어 낼 수 있었다. 이렇게 얻어진 화염면의 궤적과 이론적으로 예측되는 이론당량비 궤적이 화염의 경사면에서 만나며, 그로 인해 삼중점이 특정한 각도를 갖게 됨을 관찰 하였다.

또한 OH-PLIF 기법을 이용하여 확산화염의 위치에 대한 정보를 추가함으로써 화염면에서의 삼중점의 위치가 경사면에 존재함을 검증할 수 있었다.

마지막으로 Rayleigh 산란 신호를 측정함으로써 화염면의 온도분포를 측정하였으며, 그 결과 화염면에서의 열확산의 방향이 축방향에 대하여 어떠한 각도를 이루고 있음을 검증하였다. 그 결과 화염 상류로의 열확산량이 감소되며, 이러한 효과

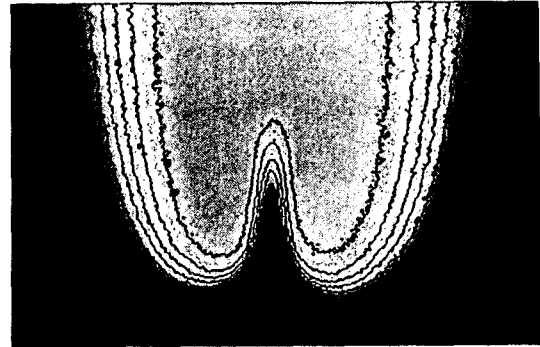


Fig.6. Rayleigh scattering of lifted tribrachial flame, $U_0=9\text{m/s}$, $V_{co}=4\text{cm/s}$, and liftoff height $H_L=25\text{mm}$

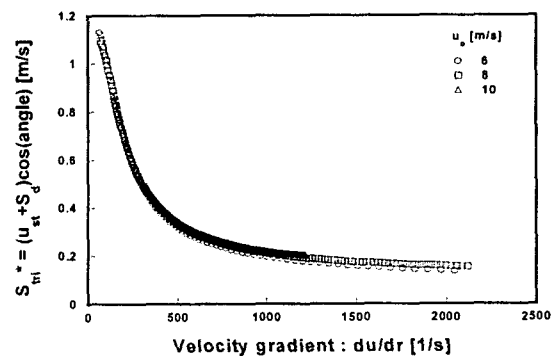


Fig.7. Modified propagation speed of tribrachial flame at various jet, $U_0=6,8,\text{and }10\text{m/s}$

로 인하여 삼지화염의 전파속도가 변할 수 있음을 예측 하였다. 이와 같이 다양한 가시화 기법이 상호 보완적으로 적용됨으로써 삼지화염의 전파속도에 있어서 속도구배와 같은 새로운 영향인자의 효과를 성공적으로 설명할 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) Lee, B. J. and Chung, S. H., 1997, "Stabilization of lifted tribrachial flames in a laminar nonpremixed jet", *Combust. Flame*, Vol.109, pp.163-172.
- 2) Ruetch, G. R., Vervisch, L. and Linan, A., 1995, "Effects of heat release on triple flames", *Phys. Fluids*, Vol.7, pp.1447-1454.
- 3) Hartley, L. J., and Dold, J. W., 1991, "Flame propagation in a Nonuniform Mixture : Analysis of a propagating Triple-Flame", *Combust. Sci. Technol.* Vol.80, pp.23-46.

- 4) Ko, Y. S., and Chung, S. H., 1999, "Propagation of Unsteady Tribrachial Flames in Laminar Non-premixed Jets", *Combust. Flame*, Vol.118, pp.151-163.
- 5) Won, S. H., Chung, S. H., Cha, M. S., and Lee, B. J., 2000, *Proc. Combust. Inst.* Vol.28, pp.2093-2099.
- 6) Chung, S. H. et al., 2001, *Laser Application Measurement on Combustion*, Moonundang, pp. 126-133