

층류 동축류 제트에서의 프로판 부상 화염에 관한 실험적 연구

이종수* · 원상희* · 진성호* · 정석호*

Lifted Flames in Laminar Coflow Jets of Propane

J. Lee, S. H. Won, S. H. Jin, and S. H. Chung

ABSTRACT

Characteristics of lifted flames in axisymmetric laminar coflow jets have been investigated experimentally. Approximate equations for velocity and concentration with virtual origins have been proposed to analyze the behavior of flames in coflow jets. Measuring Rayleigh intensity to investigate the concentration field, proposed approximate equations were confirmed. By using the results of OH PLIF, direct photography and Rayleigh scattering measurement, it is shown that the locations of maximum intensity in direct photography coincide with the tribrachial points in axisymmetric jets and the tribrachial points travel on the stoichiometric contour. For coflow jets, the experimental results of liftoff height have been successfully correlated with nozzle exit velocity using predicted behavior from proposed approximated equations. These results substantiate the stabilization mechanism in coflow jet is based on the balance between flame propagation speed and axial flow velocity, same as for the free jets.

Key Words : 삼지 화염 (tribrachial flame), 화염 부상 (liftoff), 레이저 유도 형광법 (PLIF)

1. 서 론

층류 부상 화염에 대한 연구는 그동안 실용 연소기에서의 안정화 측면에서 광범위하게 연구되었다. 특히 부상 화염은 확산 화염과 과농, 희박 예혼합 화염이 공존하는 삼지 화염의 구조를 갖고 있음이 밝혀진 바가 있고 [1], 또한 여러 조건에서 층류 부상 화염의 안정화 메커니즘에 대해 연구된 바가 있다 [2-5].

부상 화염의 안정화 메커니즘은 삼지 화염의 전파속도와 유동의 속도가 일치하는 지점에서 화염이 안정화된다는 것으로 설명된 바가 있으며, 이러한 안정화 메커니즘 (balance mechanism) 을 통하여 부상 화염의 거동 및 특성에 대해 질소 회석, 부분 예혼합 그리고 노즐 직경에 대해 연구되어 왔다 [2-5].

최근에는 수치적 접근의 용이성으로 인해 동축류 버너에서의 부상 화염에 대한 연구가 수행되었다 [6, 7]. 동축류 버너에서의 실험과 수치 해석을 통해서 상대적으로 큰 노즐 ($O(10\text{mm})$) 을 사용할 경우 화염의 부력에 의한 영향이 중요함을 밝힌 바가 있다 [8-10].

자유 제트 유동장에 대해서는 그동안 속도 및 농도의 상사해를 통해 많은 연구가 이루어져 왔다. 그러나 상대적으로 동축류 제트의 경우에는 여러 실험적 장점에도 불구하고 이러한 상사해에 대해 보고된 바가 없었다. 그러나 실험적으로는 동축류 제트의 경우에도 동축류 속도와 제트의 출구 속도의 차이에 의해 상사성이 존재함이 밝혀진 바가 있다 [11]. 따라서 본 연구에서는 동축류 제트에 대해 적절한 가정의 도입을 통하여 상사해를 구하고, 광계측을 통하여 농도장과 삼중점의 위치를 파악하고자 하였다. 그리고 마지막으로는 이론식을 통하여 동축류 제트에서의 부상 화염의 거동을 예측하고자 하였다.

* 서울대학교 대학원

† 서울대학교 기계항공공학부, shchung@snu.ac.kr

2. 실험 장치

실험 장치는 동축류 버너, 유량 제어부, 농도 계측 시스템 그리고 가시화 시스템으로 구성되어 있다. 동축류 버너의 내부 노즐의 내경은 0.254 mm 이고 실험 조건에서 노즐 내부의 속도 분포가 완전 발달됨을 고려하여 10 cm 로 하였다. 동축류 공기는 직경이 154 mm 인 외부 노즐을 통해 공급되며, 출구에 세라믹 하니콤 구조를 설치하여 균일한 속도 분포가 되도록 하였으며, 내부 노즐은 하니콤 위로 약 10 mm 도출되도록 설치하였다. 연료로는 C.P. 등급 (>99%) 의 프로판을 사용하였으며, 질량유량계 (MKS) 를 사용하여 유량을 제어하였다.

제트에서 분출된 프로판 연료의 Rayleigh 산란 신호를 통한 농도 계측을 위하여 Nd:YAG 레이저 (Continuum, PL8000) 를 사용하였으며, 532 nm 파장에서 최대 출력 450 mJ 을 사용하였다. 실린더 렌즈의 조합을 통해 약 50 mm 높이의 평면광을 조사하였으며, 프로판 연료의 Rayleigh 산란 신호는 중심 파장이 532 nm 인 광학 필터와 ICCD 카메라 (Princeton Instrument, ICCD-MAX) 를 이용하여 측정하였다. 또한 Rayleigh 신호의 측정시 버너 표면등에서의 산란 신호등의 잡신호를 보정하기 위해서 Rayleigh cross section 이 0.0136 인 헬륨을 동축류에 공급하고 그 신호를 측정하여 보정하였다. 프로판과 공기의 혼합기의 경우 Rayleigh 산란 신호를 통한 농도계측은 다음과 같은 식에서 구한다 [12].

$$I_{mix} = CI_0n[X_{C_3H_8}\sigma_{C_3H_8} + (1 - X_{C_3H_8})\sigma_{air}]$$

여기서 I_0 는 레이저 파워, n 은 기체의 수밀도, $X_{C_3H_8}$ 는 프로판의 몰비 그리고 $\sigma_{C_3H_8}$, σ_{air} 는 각각 프로판과 공기의 Rayleigh cross section이며, C 는 시스템 구성에 따른 보정 상수이다. 위의 식을 연료와 공기에 대한 각각의 Rayleigh 신호로부터 연료의 농도를 구하는 식은 다음과 같다.

$$X_{C_3H_8} = \left(\frac{I_{mix}}{I_{air}} - 1 \right) / \left(\frac{\sigma_{C_3H_8}}{\sigma_{air}} - 1 \right)$$

본 연구에서는 삼중점의 가시화를 위해 OH 라디칼에 대한 평면 레이저 유도 형광법 (PLIF) 을 적용하였다. 이를 위한 시스템은 Nd:YAG 레이저 (Continuum, PL8000), 색소 레이저 (Continuum, ND6000), 그리고 주파수 변환 장치

(Continuum, UVT) 와 이미지 측정부로는 ICCD 카메라 (Princeton Instrument, ICCD-MAX) 를 사용하였다. OH 라디칼의 LIF 신호는 $Q_1(6)$ 라인의 $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi(1,0)$ 밴드를 282.95 nm의 레이저로 여기시켜 측정하였으며, UG-11 과 WG-305 의 광학 필터를 사용하였다. 또한 화염의 직접 사진을 얻기 위해 ICCD 카메라를 이용하였다.

삼지 화염의 전과 궤적을 측정하기 위해 레이저 점화 기술을 사용하였다. 점화 레이저로는 Nd:YAG 레이저 (Spectra-Physics, GCR-150) 를 f200 인 볼록 렌즈를 이용하여 초점에서 점화가 이루어지도록 하였으며, 삼지 화염의 전과 이미지는 고속도 카메라 (Kodak, Ekta Pro SR-ULTRA) 를 사용하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 동축류 제트에서의 부상 높이

Figure 1은 동축류 속도와 제트의 출구 속도의 변화에 따른 부상 화염의 부상 높이를 나타낸 것이다. 일정한 동축류 속도에서 제트의 출구 속도의 변화에 따라 부상 높이는 전체적으로 비선형적인 증가를 하고, 특정한 출구 속도에서 화염 날림이 발생한다. 이러한 부상 화염의 거동은 자유 제트에서의 거동과 일치한다 [4]. 일반적으로 자유 제트에서의 부상 화염의 부상 높이는 유동장과 농도장의 이론 해석으로부터 프로판의 경우 $H_L/d^2 : u_0^{(2Sc-1)/(Sc-1)}$ 의 관계를 갖고 있음이 밝혀진 바가 있다. Figure 1의 동축류 제트에서의 부상 화염의 높이 변화 또한 실선으로 표현된 바와 같이 전체적으로는 자유 제트에서의 상관 관

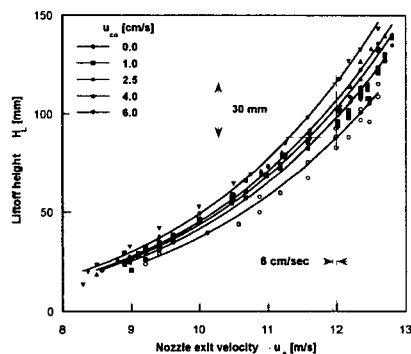


Fig. 1 Liftoff height with various coflow velocity

계식으로도 잘 표현될 수 있음을 보이고 있다. 그러나 동축류의 존재로 인해 화염의 부상과 화염 날림의 시기는 약간의 차이를 보이고 있다. 자유 제트의 부상 화염과 비교할 때, 동축류 속도가 커질수록 화염 부상이 더 낮은 속도에서 일어나고 그 높이 또한 증가하는 경향을 보인다. 예를 들면, 제트의 출구 속도, $u_0 = 12$ m/sec 인 경우 제트의 출구 속도의 변화에 비해 상대적으로 적은 0.06 m/sec 의 동축류 속도의 변화에 따라 부상 높이가 30 mm 나 차이가 남을 보이고 있다.

이러한 동축류 속도에 따른 부상 높이의 변화를 규명하기 위해 본 연구에서는 위에서 언급한 바와 같이 동축류 제트의 부상 화염 또한 자유 제트에서의 부상 특성과 마찬가지로 실험적으로는 $(u_0 - u_{co})$ 로 동축류 제트의 상사 관계가 규명된 바가 있을 뿐만 아니라 부상 특성 또한 $H_L/d^2 : u_0^{(2Sc-1)/(Sc-1)}$ 의 상관 관계를 갖음에 착안하여 이론식으로부터 상사해를 구하고자 하였다 [11].

3.2 동축류 제트에서 유동장과 농도장의 근사식

동축류 제트의 층류 냉간 제트에 대한 상사해는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$u = \frac{3}{8\pi\nu x} \frac{J}{\rho} \frac{1}{(1+\eta^2/8)^2}$$

$$Y_F = \frac{3}{8\pi\nu x} \frac{I}{\rho} \frac{1}{(1+\eta^2/8)^{2Sc}}$$

여기서 u 는 축방향 유동 속도이고, r, x 는 각각 반경방향과 축방향 거리를 나타내며, J 는 축방향의 운동량, I 는 연료의 질량 유량, ρ 는 밀도, ν 는 동점성 계수, η 는 상사 변수이며, 마지막으로 Sc 는 연료의 Schmidt 수이다.

동축류 제트에서는 운동량 방정식의 비선형성으로 인해 이론식을 구할 수 없다. 그러나 실험적으로는 제트의 평균 출구 속도와 동축류 속도의 차이인 $(u_0 - u_{co})$ 로 상사 관계가 존재하며, 특히 동축류 제트에서도 중심축의 속도 변화, $(u_m - u_{co})$ 가 강한 제트인 경우, 즉 $(u_m - u_{co}) \gg u_{co}$ 인 경우에는 $1/x$ 에 비례함이 밝혀진 바가 있다 [11]. 따라서 본 연구에서는 위의 가정을 도입하여 속도식과 농도식을 다음과 같이 나타내었다.

$$u - u_{co} = \frac{3}{8\pi\nu x} \frac{J}{\rho} \frac{1}{(1+\eta^2/8)^2}$$

$$Y_F = \frac{3}{8\pi\nu x} \frac{I}{\rho} \frac{1}{(1+\eta^2/8)^{2Sc}}$$

상사 변수 η 와 축방향 운동량 J , 연료의 질량 유량 I 은 다음과 같다.

$$\eta = \sqrt{\frac{(u_{CL} - u_{CO})x}{\nu} \frac{r}{x}}$$

$$J = \int_0^\infty \rho u (u - u_{CO}) 2\pi r dr = \text{const}$$

$$I = \int_0^\infty \rho u Y_F 2\pi r dr = \text{const}$$

위의 식을 제트의 출구 조건에서 계산을 하면 다음과 같다.

$$J = \int_0^d u(\rho_f u - \rho_x u_{CO}) 2\pi r dr$$

$$I = \int_0^d \rho_f u Y_{F,0} 2\pi r dr = \int_0^d \rho_f u 2\pi r dr$$

여기서 $Re = u_{m,0} d / \nu_x = 2u_0 d / \nu_x$ 이라 하고, 무차원화된 축방향 거리를 $X = x / (Re \cdot d)$, 반경 방향 거리를 $R = r / r_0$ 라 정의하고, 무차원화된 속도를 $U^* = (u - u_{CO}) / (u_{m,0} - u_{CO})$ 이라 정의하고, 이론식에서 속도와 농도의 가상 원점, X_v 과 $X_{v,F}$ 을 대입하여 속도장과 농도장을 계산하면 다음과 같다.

$$U^*(X,R) = \frac{u - u_{CO}}{u_{m,0} - u_{CO}} = \frac{\nu_x \rho_f}{\nu \rho} \frac{\left(1 - \frac{3}{2} \frac{\rho_c}{\rho_f} q\right)}{1 - q} \frac{1}{32(X+X_v)} \frac{1}{\left\{1 + \frac{\rho_f}{\rho} \left(1 - \frac{3}{2} \frac{\rho_c}{\rho_f} q\right) \left(\frac{\nu_x}{\nu} \frac{1}{32(X+X_v)}\right)\right\}^2}$$

$$Y_F = \frac{\nu_x \rho_f}{\nu \rho} \frac{2Sc+1}{64(X+X_{v,F})} \frac{1}{\left\{1 + \frac{\rho_f}{\rho} \left(1 - \frac{3}{2} \frac{\rho_c}{\rho_f} q\right) \left(\frac{\nu_x}{\nu} \frac{1}{32(X+X_{v,F})}\right)\right\}^{2Sc}}$$

여기서 $q = u_{CO} / u_{m,0}$ 이다.

속도와 농도의 가상 원점은 포물선 형태의 제트 출구 속도 분포의 경우 반경방향 확산과 주변으로부터의 유입이 중요한 제트의 발달길이를 무시하고 구하였다 [13-15]. 이러한 속도와 가상 원점에 대한 계산은 본 논문에서는 언급하지 않도록 하겠다. 그러나 제트의 출구 속도와 동축류 속도의 비 q 에 따라 속도와 농도의 가상 원점을 계산하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

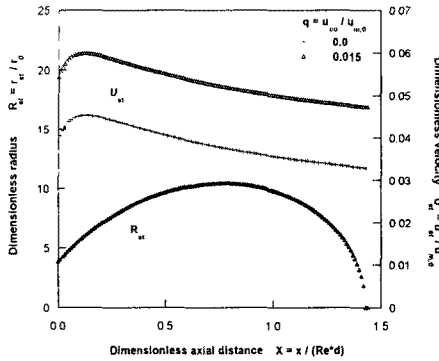


Fig. 2 Profile for axial velocity and stoichiometric contour with axial distance

$$X_v = 0.09575 + 0.05235q$$

$$X_{v,f} = 0.12745 - 0.02123q$$

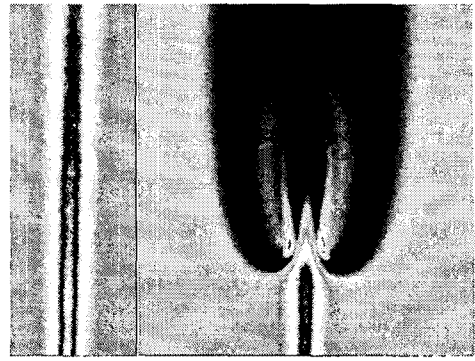
위의 계산 값들을 이용하여 이론 식으로부터 무차원화된 이론 당량비선 R_{st} 과 이론 당량비선을 따르는 무차원화된 속도 $U_{st} = u_{st}/u_{m,0}$ 로 그리면 Fig. 2와 같다. 그림에서 보듯이 축방향 속도는 노즐 근처에서 급격히 증가하여 최대값을 갖은 후 서서히 감소하는 경향을 보인다. 이러한 증감 특성은 정성적으로 수치계산 결과와 유사하다 [16].

일반적으로 동축류 속도가 큰 경우, 축방향 속도는 상대적으로 자유 제트의 경우($q=0$) 보다 큰 값을 갖는다. 그러나 그림에서 보듯이 축방향 속도 분포는 동축류 제트에서와 자유 제트에서 모두 비슷한 경향을 보인다.

3.3 동축류 제트의 농도장 계측

본 연구에서는 위에서 가정을 통한 이론식에서 구한 농도식의 검증에 위하여 Rayleigh 산란 측정법을 통해 농도장을 계측하였다. Figure 3은 냉간 제트 (a)와 부상 화염의 존재할 경우 (b)의 Rayleigh 산란 이미지이다. 특히 Fig.1 (b)는 OH PLIF 이미지와 Abel 변환된 자발광 이미지를 중첩한 결과이며, 그림에서 보듯이 OH LIF 신호는 알려진 바와 같이 확산 화염을 따라 강한 값을 갖으며, 자발광 강도는 예혼합 화염면을 따라 강하게 나타나므로 [8], 이를 중첩하면 그림과 같이 삼지 화염의 삼중점을 가시화 할 수 있다.

위의 결과로부터 프로판의 질량분율을 계산하였다. Figure 4는 프로판의 질량 분율 Y_f 을 반경



(a) (b)
Fig. 3 Image of Rayleigh scattering intensity for cold flow (a) and Rayleigh intensity, OH PLIF and direct photography for lifted flame (b) ($u_0 = 9.0$ m/s, $u_{co} = 4$ cm/s)

방향에 따라 $X = 0.52$ ($x = 38$ mm @ $u_0 = 9.0$ m/s, $x = 40$ mm @ $u_0 = 9.5$ m/s) 일 경우 무차원화된 축방향 속도를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯 실험결과와 이론식 결과가 오차 범위 약 10%내로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 위의 결과로부터 위에서 언급한 가정을 통한 이론식의 결과가 매우 타당함을 알 수 있다. 또한 $Sc = 1$ 인 경우보다 1.366인 경우 반경방향 농도 분포가 상대적으로 큰 이유는 실제로 이 경우 프로판의 점성력이 확산보다 지배적이기 때문으로 사료된다.

제트의 출구 속도가 9.0, 9.5 m/s이고 동축류 속도가 4 cm/s 인 경우에 대해 중심축에 따른 프로판의 질량 분율 변화를 Fig. 5에 나타내었다.

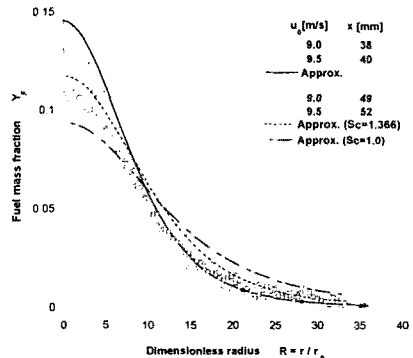


Fig. 4 Radial profile of fuel mass fraction with dimensionless radius

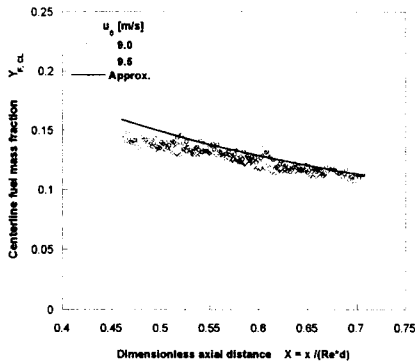


Fig. 5 Fuel mass fraction along the centerline with dimensionless axial distance

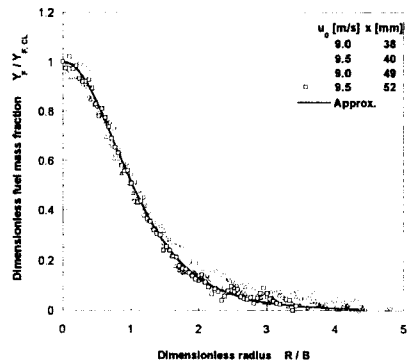


Fig. 6 Dimensionless fuel mass fraction with dimensionless radius

실험 결과에서 $X < 0.45$ ($x=30$ mm) 의 부분은 노즐에서의 레이저 평면광의 산란 신호로 인한 오차로 인해 삭제하였다.

Figure 6 은 실제 실험에서 구한 농도 분포가 반경방향에 따라 상사성을 갖는지 확인하기 위해 $Y_F = Y_{F,CL} / 2$ 로 표현한 것이다. 그림에서 보듯이 실험 결과 및 이론 해석 결과가 일치하는 것으로 보아 실제로 동축류 제트의 경우에도 그 속도가 낮을 경우에는 위와 같이 상사성을 갖음을 알 수 있다.

일반적으로 부상 화염이 갖는 삼지 화염의 구조는 확산 화염과 과농, 희박 예혼합 화염이 공존하는 구조를 갖고 있으며, 삼중점이 확산 화염의

특성에 의해 이론 당량비인 지점에 존재함이 이미 밝혀진 바가 있다. 이러한 특성을 이용하여 자유 제트에서의 삼지 화염의 전파 특성을 밝힐 바가 있다. 따라서 만일 실험적으로 삼중점의 위치를 밝힐 수 있다면, 실제적으로 이론적 접근을 통하여 밝히기 어려운 경우 삼중점의 전파 궤적을 통하여 이론 당량비를 밝힐 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 층류 영역에서 안정적인 부상 화염을 관찰할 수 있는 작은 노즐을 사용하여 실험을 하였다.

일반적으로 수치 해석을 통한 연구에서는 이러한 삼지 화염의 구조를 파악하기 위해 반응율을 가시화하고 있으나 실험적으로는 반응율을 측정할 수 있는 방법이 제시된 바가 없다. 최근에는 레

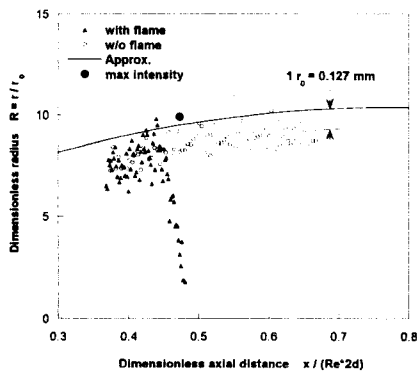


Fig. 7 Stoichiometric contour and maximum intensity in direct photography ($u_0 = 9.0$ m/s, $u_{co} = 4$ cm/s)

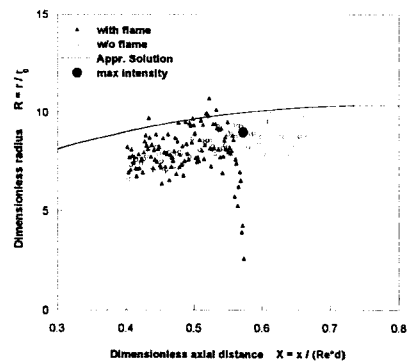


Fig. 8 Stoichiometric contour and maximum intensity in direct photography ($u_0 = 9.5$ m/s, $u_{co} = 4$ cm/s)

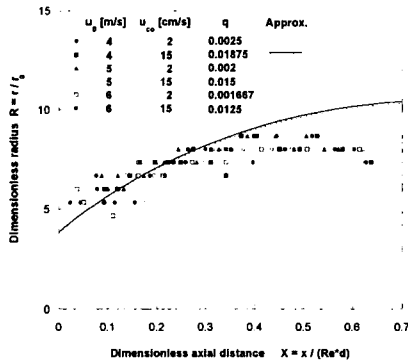


Fig. 9 Loci of tribrachial point with various nozzle exit velocity and coflow air velocity

이제 유도 형광법을 이용하여 화염내의 대표적 라디칼 몇가지의 신호를 측정, 후처리하여 실험적으로 반응률을 가시화하고자 한 연구들이 있었으나 아직 정확히 검증된 바는 없다.

따라서 본 연구에서는 앞서 언급한 Fig.2 (b)에서와 같이 OH 라디칼의 PLIF 이미지와 자발광 이미지의 중첩을 통하여 삼지 화염의 확산 화염과 예혼합 화염을 각각 가시화하였다. 그리고 또한 자발광 이미지에서 최대값을 갖는 지점이 삼중점임을 밝히기 위해 Rayleigh 산란 신호로부터 구한 이론 당량비선과 비교하였다. Figure 7, 8은 제트의 출구 속도가 각각 9.0, 9.5 m/s이고, 동축류 속도가 4 cm/s일 경우 자발광 강도가 최대인 지점과 실험으로 측정 한 이론 당량비선을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 두 경우 모두 화염이 존재하지 않은 냉간 제트의 경우 자발광 강도가 최대인 점이 이론 당량비선 위에 위치함을 알 수 있다. 또한 실제로 부상 화염이 존재하는 경우에는 삼중점이 존재하는 위치에서의 온도 상승으로 인한 Rayleigh 산란 신호의 감소함으로 인한 오차가 존재함을 알 수 있다.

위에서 언급한 바와 같이 자발광 강도가 최대인 지점이 삼중점이라는 사실에 근거하여 실제로 동축류 제트에서의 삼지 화염의 전파 궤적이 이론적으로 구한 이론당량비와의 차이를 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 보듯 실제 삼지 화염의 전파 궤적이 이론당량비선과 매우 일치함을 알 수 있다 [17, 18].

4. 결론

본 연구에서는 동축류 제트에서의 축대칭 층류 부상 화염에 대해 고찰하였다. 가정을 통해 구한 동축류 제트의 노즐 근처에서의 가상 원점을 통해 이론식으로부터 동축류 버너에서의 제트의 농도 분포를 Rayleigh 산란 실험 결과와 비교하여 동축류 제트에서의 농도장의 상사성에 대해 고찰하였다.

또한 본 연구에서는 일반적인 부상 화염이 갖는 삼지 화염의 구조를 가시화하기 위해 OH 라디칼에 대한 레이저 유도형광법을 적용하여 그 결과를 자발광 이미지와 비교함으로써 삼지 화염의 구조를 가시화하였다. 그리고 삼지 화염의 삼중점을 실험적 방법으로 측정하기 위해 위의 광계측 방법과 Rayleigh 산란 신호의 측정을 통한 농도장과의 비교를 통해서 자발광 강도가 가장 강한 지점이 삼중점임을 밝혔다.

최종적으로 본 연구에서는 위의 계측 방법을 통해 동축류 제트에서 상류로 전파하는 삼지 화염의 삼중점의 궤적과 이론식으로부터 구한 이론 당량비선이 일치함을 확인함으로써 위의 결과를 검증하였다.

후 기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] Phillips, H., *Proc. Combust. Inst.* 10:1277-1283 (1965)
- [2] Chung, S. H. and Lee, B. J., *Combust Flame* 86:62-72 (1991)
- [3] Lee, B. J. and Chung, S. H., *Combust Flame* 109:163-182 (1997)
- [4] Lee, B. J., Cha, M. S., and Chung, S. H., *Combust Sci. Technol* 127:55-70 (1997)
- [5] Lee, B. J., Kim, J. S., and Chung, S. H., *Proc. Combust. Inst.* 25:1175-1181 (1994)
- [6] Plessing, T., Terhoeven, P., Peters, N., and Mansour, M. S., *Combust Flame* 115:335-353 (1995)
- [7] Smooke, M. D., Ern, A., Tanoff, M. A., Valdati, B. A., Mohammed, R. K., Marran, D. F., and Long, M. B., *Proc. Combust. Inst.* 26:2161-2170, (1996)

- [8] Won, S. H., Chung, S. H., Cha, M. S., and Lee, B. J., *Proc. Combust. Inst.* 28:2093-2099 (2000)
- [9] Won, S. H., Kim, J., Shin, M. K., Chung, S. H., Fujita, O., Mori, T., Choi, J. H., and Ito, K., "Normal and Micro Gravity Experiment of Oscillating Lifted Flames in Coflow," to appear in *Proc. Combust. Inst.* 29, (2002)
- [10] Kim, J., Won, S. H., Shin, M. K., and Chung, S. H., "Numerical Simulation of Oscillating Lifted Flames in Coflow Jets with Highly Diluted Propane," to appear in *Proc. Combust. Inst.* 29, (2002)
- [11] Rajaratnam, N., *Turbulent Jets*, Elsevier Scientific Publishing Company (1976)
- [12] Eckbreth, A. C., *Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species*, 2nd ed., Gordon and Breach Publishers (1996)
- [13] Rankin, G. W., Sridhar, K., *J. Fluids Engineering/Trans. ASME* 100:55-59 (1978)
- [14] Lee, D. S., and Kihm, K. D., and Chung, S. H., *J. Fluids Engineering/Trans. ASME* 119:716-718 (1997)
- [15] Lee, J., and Chung, S. H., *Combust. Flame* 127:2194-2204 (2001)
- [16] Chen, Y. C., and Bilger, R. W., *Combust. Flame* 122:377-399, (2000)
- [17] Ko, Y. S., Chung, S. H., Kim, G. S., and Kim, S. W., *Combust. Flame* 123:430-433 (2000)
- [18] Ko, Y. S., and Chung, S. H., *Combust. Flame* 118:151-163 (1999)