

평면 레이저유도 형광법을 이용한 부상화염의 특성 연구

(Study on the characteristics of laminar lifted flames
using planar laser induced fluorescence technique)

이 병준(영남대학교), 정 석호(서울대학교), 한 재원(한국표준과학연구원)

ABSTRACT

Characteristics of the lifted flame which is generated by issuing of the fuel through the miniature nozzle, $d=0.164$ mm, are studied using the planar laser induced fluorescence technique.

OH radical is excited on the $Q_1(8)$ line of the $A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi(1,0)$ band transition(283.55 nm) and LIF signals are captured at the bands of (0,0) and (1,1) transition(306~326 nm) using the filters and ICCD camera.

Hydroxyl radical(OH) profile for nozzle attached flame shows that OH radical populations at the flame sides and flame tip are larger than those at the base. But for the lifted flame (tribranchial flame) case, those are larger at the flame base than at the flame tip and flame sides.

The OH radical is more dense near the center line of flame base at the blowing out. This fact proves the Chung and Lee's blowout theory - blowout occurs when the flame is anchored at the flame axis.

1. 서론

화염의 안정화 (flame stabilization) 특성은 가스 터빈, 보일러 등의 연소실 설계 및 연소기기의 설계시 고려 되어야할 중요한 인자의 하나로서 화염의 노즐 부착 여부에 따른 화염 부상 (liftoff), 부상화염의 특성 및 안정성 (stability), 화염 부착 (anchoring) 특성 및 화염날림(blowout) 특성 등이 이에 관련된다.

순수연료를 분사할때 노즐에 부착된 화염은 연료와 산화제가 초기에 분리된 상태에서부터 확산과 대류에 의하여 화염지역으로 전달되어 분자적혼합이 일어나 화학반응이 발생하고, 생성된 열과 물질은 전달현상에의하여 화염 바깥 지역으로 이동되는 확산화염(diffusion flame)이다. 이러한 노즐 부착 화염 (nozzle attached flame) 은 유량의 증가에 따라 화염이 노즐로부터 떨어져 존재하는 부상화염 (lifted flame) 으로 변환되거나 화염꺼짐 (blowoff) 이 발생 할 수 있다. 부상화염에서 노즐로부터 화염 밑면까지의 거리를 부상 높이 (liftoff height)라고 한다. 부상화염의 경우 연료가 노즐로부터 화염밑면에 도달하는 동안 주위 산화제의 유입 (entrainment) 에 의해 연료가 분자적으로 혼합될 시간이 커지므로, 전파하는 특성을 가진 예혼합화염 (premixed flame) 의 특성이 나타난다. 화염이 부상한 후 유량을 어느 한계 이상 증가시키면 화염날림(blowout) 현상이 발생한다.

화염부상이나 화염꺼짐이 발생하는 메카니즘은 명확히 규명되어 있지 않으나, 층류의 경우는 Schmidt 수가 화염 꺼짐과 연관이 있음을 Chung등⁽¹⁾이 밝힌 바 있다.

화염 부상의 특성 및 부상높이에 관하여는 이제까지 많은 연구가 수행되어 왔다. 부상화염이 노즐과 화염밑면 사이에서의 주위 공기 유입으로 인하여 난류 부상화염의 밑면

이 예혼합적 특성을 갖게되므로 난류 부상화염을 예혼합화염적 특성과 관련지어 연구하는 분야⁽²⁻⁶⁾, 난류 확산화염을 층류 확산 소화염 (laminar diffusion flamelet) 들의 집합체로 보고 이들의 소염과 관련지어 화염 안정성을 설명하려는 분야⁽⁷⁻⁹⁾, 제트에서 발생하는 거대 구조 내부에서 화염의 국부 소염과 관련 지어 설명하려는 분야⁽¹⁰⁻¹⁵⁾ 로 대별할 수 있고⁽¹⁶⁾, 분포반응 (distributed reaction) 모델⁽¹⁷⁾ 및 혼합도 (mixedness) 와 반응도 (reactedness) 모델⁽¹⁸⁾ 로 설명하려는 분야가 있다. 층류 화염의 부상에 대한 연구는 예혼합적 특성으로 설명하는 분야⁽¹⁹⁾ 와 삼중 화염 (triple flame)⁽¹⁾ 의 특성으로 설명하려는 분야가 있다.

층류화염의 부상특성에 대한 연구는 난류 화염 특성의 기초 연구로서 화염에서의 열 및 물질 전달 특성등을 규명하고, 연소기의 소형화를 위한 노즐직경의 감소 추세등에 기인하여 그 중요성을 더해가고있다.

Savas 와 Gollahalli⁽¹⁹⁾ 는 층류 제트에서의 화염 부상 및 화염날림에 관한 실험을 통해, 화염면에 수직한 유동 속도 성분과 화염의 전파 속도가 같고 축방향으로의 화염 전파 속도의 변화율이 축 방향으로의 유동 속도의 변화율보다 크면 안정하다는 조건으로부터 층류 부상화염의 곡률 반경이 클 때, 즉 화염날림 한계 근처에서의 화염 형상을 구하고, 화염날림시의 부상 높이는 노즐 출구 직경의 제곱에 비례함을 유도하였다.

Chung 과 Lee⁽¹⁾ 는 층류 제트에서의 화염 부상 및 화염날림에 관한 연구를 수행하였으며, 층류 제트이론으로부터 화염 부상높이의 변화에 대한 이론적인 식을 유도하여 층류 부상화염에 미치는 Schmidt 수의 중요성을 밝혔으며, 실험 결과와 비교하여 화염 부상 높이는 유량과 노즐 직경에 의존하며, 부상화염의 기저에 과농 예혼합화염, 희박 예혼합화염 및 확산 화염이 공존하는 삼지 화염 (tribranchial flame) 형상 (또는 삼중화염)^(20,21) 을 하고 있고 이 삼지 화염이 화염 부상과 관련이 있음을 규명하였다.

그러나 이러한 삼지화염의 구조와 노즐 부착화염의 구조 사이의 연관성이나, 차이점에 대한 연구는 결여되어 있으므로 본 연구는, 레이저 유도형광법⁽²²⁻²⁵⁾을 이용하여 축대칭 미소 노즐에서 연료를 분사할때 형성되는 층류 부상화염의 특성을 조사하였다.

2. 실험 장치 및 방법

실험 장치는 노즐, 유량 조절부 및 레이저 유도 형광법을 이용한 화염 중의 OH 농도 측정부로 구성되어 있다(Fig. 1 참조).

노즐은 O.D. 3.0 mm, I.D. 1.9 mm 의 석영관을 이용하여 노즐 출구 직경 $d = 0.164$ mm 로 가공하여 사용하였다. 노즐 출구 단면에서 균일한 속도분포를 갖도록 하기 위하여 면적비가 약 100 이상이 되도록 하였으며, 유량 조절은 질량 유량계(Datametrics, 프로판의 경우 최대 유량 43 ml/min) 를 사용하였다.

외부 유동의 영향을 막기 위하여 60 cm x 60 cm x 60 cm 의 투명한 사각실린더를 이용하였으며, 이 실린더의 윗면에는 외부 유동으로부터의 교란을 막기위하여 철망을 설치하였으며, 레이저 광의 투과를 위하여 측면에 0.5 cm x 5 cm 의 틈새를 내어 사용하였다.

연료로는 순도 99.0% 의 프로판을 사용하였다.

레이저 유도 형광법을 이용한 화염중의 OH 농도측정부는 크게 자외선 레이저 생성부, LIF 신호의 점 측정부, 2차원 영상측정부로 구성되어 있다.

자외선 레이저 생성부는 7~8 ns 펄스폭, Q-스위치된 Nd:YAG 레이저(Quentel, 660-10)와 0.05 cm⁻¹의 선폭을 가진 색소레이저(Lumonics Hyper Dye SLM) 및 KDP결

정에 의한 주파수 배가기(Lumonics Hyper Trak 1000)로 구성되어 있다. 색소 레이저는 메탄올에 R590 (2×10^{-4} 몰농도)을 용해시킨 염료를 사용하는 공진기와 R590(BF₄) (1×10^{-4} 몰농도) 색소를 사용하는 2단 증폭기로 구성되어 있다. Nd:YAG 레이저의 2차 고조파인 532nm의 파장(110 mJ/pulse)이 색소레이저의 공진기에 의해 파장선택이 된 후 증폭기에 의해 증폭된 후 (553~570 nm, 20 mJ/pulse) 주파수 배가기에 의하여 277.5~285 nm(1.5 mJ/pulse)의 자외선 레이저를 생성한다.

LIF 신호의 점 측정부는 LIF 신호의 여기를 위하여 필요한 레이저의 파장확인 및 선택을 위하여 사용되는 부분으로 단색기(monochromator, CVI DK 240, 1200 groove / mm)와 광 증배관(Hamamatsu R955) 및 BOXCAR 평균기로 구성되어 있다.

2차원 화염의 영상처리와 OH 라디칼의 2차원적 분포를 알아보기 위하여, 576 * 384 화소, 1~100 count/photoelectron, 500 kHz 12 bit와 150 kHz 16 bit의 이중 A/D 변환기를 장착한 2차원 ICCD 카메라 (Princeton Instrument, ICCD-576)와 이의 구동기인 ST 138을 사용하였다.

카세토미터를 사용하여 직경 0.164mm 노즐에서 형성된 화염의 특성 높이를 측정 한 후, 특징적인 유량에서 LIF 실험을 행하였다. LIF 실험은 LIF 신호의 점 측정 실험으로부터 여기 레이저 파장을 선택한 후 레이저 파장을 고정하고, 화염의 형상과 2차원 LIF 신호의 측정 순으로 하였다.

3. 결과 및 검토

부상화염은 내부에 청녹색의 화염과 가장자리의 청보라색의 화염 그리고 내부 화염을 둘러싸고 있는 담청색 화염으로 육안으로 명확히 구분할 수 있는데, Fig. 2는 노출시간을 10 ms 로하여 ICCD 카메라로 찍은 사진을 영상 처리한 결과와 이의 간략한 구조 및 측정 한 화염의 크기에 대한 표시를 나타낸다. Figure 2(c)에서 내부의 청녹색 화염(3)은 과농 예혼합화염, 가장자리의 청보라색 화염(1)은 희박 예혼합화염의 전형적인 특징을 보이며, 과농 예혼합화염을 둘러싸고 있는 화염(2)은 대항류 유동장에서 과농 예혼합기와 희박 예혼합기를 붙어낼 때 형성되는 삼중화염 (triple flame) 중 가운데 생기는 확산화염의 색깔 특성⁽²⁶⁾ 과 같다. 이러한 부상화염의 하단은 Phillips⁽²⁰⁾가 층상화된 농도장에서 형성시킨 화염과 유사한 화염으로 희박 예혼합화염, 과농 예혼합화염 및 확산화염이 한 점에서 동시에 존재하는 삼지 화염 (tribranchial flame) 의 형태임을 볼 수 있다. 따라서 부상한 화염의 안정화 메카니즘과 이러한 삼지 화염은 밀접한 관계가 있음을 유추할 수 있다.

Figure 3은 노즐 출구 유속 증가에 따라 노즐로부터, 노즐 부착 화염의 화염 선단부까지의 높이와 부상화염의 화염 밀면까지의 높이(부상높이)를 나타낸다. 노즐에 붙어있는 화염은 Burke - Shumann 화염의 경향과 동일하게 유속의 증가에 따라 화염높이가 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 노즐 출구 유속이 11.5 m/s 로 증가하면 화염은 부상하고, 부상한 후 화염 자체의 길이는 유량 증가에 따라 감소하여 화염 자체의 길이가 거의 없는 평면 화염으로 변한 후, 유속 16.9 m/s, 부상높이 약 70 mm 에서 화염날림이 발생한다. 부상 높이는 노즐 출구 유속 변화에 대하여 매우 비선형적인 특성을 보임을 알 수 있다. 이러한 부상 특성을 살펴보기 위하여 제트 이론을 도입하자.

대기중으로 균일한 속도로 분사되는 제트에 대한 연속방정식, 축방향 운동량식, 농도의 보존식의 해는 다음과 같다⁽¹⁾.

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

$$v = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3}{8\pi} \frac{J}{\rho} \frac{\eta}{x} \frac{1-\eta^2/8}{(1+\eta^2/8)^2}} \quad (2)$$

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

여기서 u, v 는 축 방향 및 반경방향 속도, Y_F 는 연료의 질량 분율을 나타내고, ν 는 동점성 계수이고, ρ 는 밀도, 하첨자 i 는 i -화학종, Sc_i 는 ν/D_i 로 정의된 Schmidt 수이며 D_i 는 i - 화학종의 공기로의 질량 확산 계수를 나타낸다. 또한 상사 변수 η 는 $\sqrt{u_{CL}x/\nu}(r/x)$ 로 정의 되어 있으며, u_{CL} 는 중심축의 속도로 $(3/8\pi)(J/\rho)/x$ 로 정의 되어 있다. 노즐 출구에서의 운동량 유속(J)과, 질량유속(I_F)은 다음과같이 정의되어 있다.

$$J = \int_0^\infty 2\pi\rho u^2 r dr = \pi\rho u_o^2 d^2/4 \quad (4)$$

$$I_F = \int_0^\infty 2\pi\rho u Y_{F,o} r dr = \pi\rho u_o d^2/4 \quad (5)$$

여기서 하첨자 o 는 노즐 출구 조건을 나타낸다. 순수한 연료만을 노즐로 부터 분사하는 경우에, 연료에 대해 $Y_{F,o} = 1$ 이 되고, 하첨자 F 는 연료를 나타낸다.

삼지화염의 밀면에 희박 및 과농 예혼합화염과 확산 화염이 동시에 존재하므로 이 점의 당량비는 이론 당량비 (stoichiometry) 이어야 하며, 연료와 공기가 이론 당량비로 혼합된 경우 일정한 화염 전파 속도로 전파하는 특성이 있음⁽²⁷⁾을 이용하여 부상높이와 유량과의 관계를 구할 수 있다. 부상화염이 안정화된 위치 (x^*, r^*) 에서 화염면에 수직한 속도성분이 층류 화염 전파 속도와 같아야 화염이 안정되며, 이 지점의 연료 농도 Y_F^* 는 $(1-Y_F^*)$ 의 농도를 갖는 공기와 이론 당량비에 있어야 한다. 따라서, (x^*, r^*) 에서 $Y_F = Y_F^*$ 인 등농도선 (iso - concentration line) 과 $u = u^*$ 인 등속도선 (iso - velocity line) 이 교차하는 지점이 부상화염이 안정화되는 위치가 된다. 노즐로부터 순수한 연료만을 분출하므로 $Y_{F,o} = 1$ 이고, 반경 방향 속도는 축방향 속도에 비하여 작으므로 무시하고, 상기의 식 (1) 과 (3) 에서 η^* 를 소거하면

$$Y_F^* = \frac{2Sc+1}{32\nu x} Y_{F,o} u_o d^2 \left(\frac{32\nu u x}{u_o^2 d^2} \right)^{Sc} \quad (6)$$

의 관계식을 얻는다. 이를 x^* 에 대하여 정리하고, 외부에서 조절할 수 있는 변수인 노즐 출구 유량 $Q = \pi d^2 u_o / 4$ 만을 고려하면, x^* 는 부상 높이 H_L 이 되고 이는 다음과 같이 유도된다.

$$x^* = H_L = \text{constant} * u_o^{(2Sc-1)/(Sc-1)} \quad (7)$$

여기서, constant는 연료의 초기 조건에 따라 결정되는 상수이다. 부상 높이와 출구 유속과의 관계를 식 (7) 을 사용하여 $H_L \sim Q^n$ 의 형태로 곡선 맞춤을 한 결과를 Fig. 3에 실선으로 나타내었는데 본 실험의 경우 $n=4.23$ 이다. 이를 식 (7) 로부터 역산하여 프로

판의 Schmidt 수를 구하면 1.445 로, 프로판에 대하여 제안된 Schmidt 수인⁽¹⁹⁾ 1.376 과 5% 오차로 일치함을 알 수 있다.

Figure 4는 LIF 실험 장치 중 점측정부를 사용한 결과를 보여 준다. 초점거리 200 mm의 렌즈를 사용하여 화염의 후류에 집광시킨 레이저의 파장을 283.1~283.8 nm로 변화시키는 경우에 대해, 수광부인 단색기(0.1 nm 해상도, 중심 파장:313.6 nm, 입사슬릿 및 출사슬릿: 1000 μ m) 출구에 설치된 광증배관 신호를 입사 레이저광의 강도로 나누어 준 값을 나타낸다. 이는 OH라디칼의 바닥상태($X^2\Pi$) 중 진동 띠가 0에서, 여기상태($A^2\Sigma^+$)중 진동띠가 1인 - (1,0) 밴드- 여기 스펙트럼 주사 결과를 나타낸다. 이때 나타나는 봉우리들이, OH 라디칼에 의하여 (1,0)로의 천이가 가능한 에너지인 입사 레이저 광을 흡수하여 여기되었다가 충돌이나 소광에 의해 회전 및 진동 에너지의 전이가 일어난 후 자발방출⁽²²⁾하면서 313.6 nm 근처의 빛을 내는 것으로, LIF신호이다. Dieke와 Crosswhite의 OH흡수스펙트럼⁽²⁸⁾과 비교하여 각각의 봉우리들에 대한 위치와 명칭을 Fig. 4에 나타내었다. 신호대 잡음비가 큰 LIF 신호의 발생을 위하여는 여기 레이저 파장의 동조에 세심한 주의를 요한다. 농도의 계측을 위해서 선택하는 여기 레이저 선은, 발생되는 LIF신호 크기가 온도 변화에 대하여 변화가 적고, 이웃한 라인과 충분히 분리가 되고, LIF신호의 세기가 커야한다. 본 실험에서는 이러한 조건을 만족하는 $Q_1(8)$ 라인 (283.64 nm)을 채택하였다

초점거리 5 cm의 평면-오목 실린더형 렌즈와 초점거리 50 cm의 평면-볼록 렌즈를 사용하여, $Q_1(8)$ 의 레이저 광선을 평면광(넓이 30mm* 두께 0.1 mm)으로 만든후, OH라디칼 2차원 분포를 측정하였다. 2차원 LIF의 수광부인 ICCD 카메라의 전면에는 WG305 (300nm 이상만 투과)와 UG 11 필터(300~350nm에서 투과율 70%이상)를 부착하여 305~340 nm근처의 빛 만을 수광하도록 하였다.

LIF 신호의 해석 중에서 가장 간단한 모델인 2 에너지 준위 모델 중 선형 영역의 결과를 도입하면 다음과 같다.

$$N_1^0 \sim (F/I_v) \frac{B_{12} + B_{21}}{B_{12}} \cdot \frac{A_{21} + Q_{21}}{A_{21}} \quad (8)$$

여기서 N_1^0 는 기저 상태에 있는 OH라디칼의 개수, F 는 레이저 유도 형광 신호의 강도, I_v 는 레이저의 강도, B_{12} , B_{21} 는 레이저광의 흡수 및 유도방출과 관련된 Einstein B 계수, A_{21} 자발방출과 관련된 Einstein A 계수, Q는 소광율을 나타낸다.

레이저광은 일반적으로 가우스 분포를 가지므로 이로부터 형성된 평면광도 균일하지 않고 공간적인 분포를 갖게된다. 이러한 공간 분포는 레이저광의 시간적인 변화와 경로 변화에 기인하나, 본고에서는 해석의 편리성을 위하여 레이저광의 시간적인 분포 변화와 경로의 변화를 무시하고, 평면광이 레이저 진행 방향으로는 균일한 분포를 갖고, 단면방향으로는 일정한 분포를 갖는다고 가정하였다.

Figure 5는 측정된 레이저광의 축방향 분포(Fig. 5a)와 LIF 신호의 강도 분포(Fig. 5b) 및 OH 라디칼에 비례하는 공간 분포(Fig. 5c)를 나타낸다. 본 고의 나머지 영상에서 사용되어지는 광의세기와 이에 대응하는 색상의 변화를 Fig. 5a에 나타내었다. Fig. 5(c)는 LIF 신호의 강도 분포인 Fig. 5b로부터, 동일한 조건에서 레이저만 끄고 촬영한 영상인 배경 잡음 영상을 빼준 후, 레이저광의 분포를 각 화소별로 나누어 구하였다(식 (8) 참조). 이와같이 구한 분포는 탄화 수소계 연료에서 소광율의 변화가 작다는 가정⁽²³⁾

을 도입하면 OH 라디칼에 비례하는 공간 분포임을 알 수 있다. 여기서 특이한 사실은 Fig. 5(b)와 Fig. 5(c)에서 붉은색 부분이 많이 나타나는 영역인 강도가 강한 영역의 분포가 서로 상이하다는 사실이다. 즉, 레이저 광의 공간적 분포로 인하여 LIF신호의 세기가 큰 영역은 화염의 측면 부분이나, OH라디칼이 많이 나타나는 부분은 화염의 밑면임을 알 수 있다.

Figure 6은 유속 8.6 m/s 의 경우로서 노즐에 부착된 화염으로 화염 선단부에 흰색으로 표시된 매연 영역이 존재 하는 화염임을 알 수 있다. 노즐에 의한 소염과 스트레인을 증가로 화염이 노즐로부터 약 1.5mm 위에 존재하고 있으나, 삼지화염의 형상은 확인되지 않는다. OH 라디칼은 육안으로 관찰되는 화염의 후류에 존재함을 볼 수 있다 또한 화염 밑면에서는 OH라디칼의 분포가 미약하고, 화염선단부 이후와 화염 측면부에서 많음을 볼 수 있다. 매연이 형성되는 영역에서는 OH가 미약하게 분포함을 볼 수 있다.

Figure 7은 부상화염의 경우로서, 시각 효과를 위하여 화염 형상(Fig. 7a)은 자연 대수의 척도를 사용하였다. 화염 밑면에 확산화염, 희박 예혼합화염 및 과농 예혼합화염이 공존하는 삼지화염이 형태임을 볼 수 있다. 노즐 부착화염의 OH 분포 특성과 상이하게 삼지화염의 경우는, 세 개의 화염 가지가 만나는 화염 밑면 영역에서 OH라디칼이 많이 분포하고 화염 선단부는 상대적으로 적게 존재함을 볼 수 있다. 확산화염, 희박 예혼합화염 및 과농 예혼합화염이 공존하는 삼지점은 이론 당량비로 혼합된 영역이므로 이부분에서 반응이 활발하게 일어나고, 온도가 높은 영역으로 추론되므로 이 지점에서 OH라디칼이 많이 존재하는 것으로 사료된다.

Figure 8은 화염 날림이 발생하기 전에 형성되는 평면화염의 경우이다. 이때 형성된 화염은 화염 끝이 유동의 후류방향으로 길게 뻗은 꼬리를 가진 옅은 청색으로 사진기의 셔터 소리 등의 약한 교란으로도 꺼진다. 노즐 출구 유속 증가에 따라 부상화염의 밑면이 넓어지고 화염 자체의 길이는 감소하는데 기인하여, 화염 밑면에서 화염 형상을 따라 OH라디칼이 많이 존재함을 볼 수 있다. 또한 화염 후류로 갈수록 약해지는 OH 라디칼의 분포를 볼 수 있다.

Figure 9는 화염 날림이 발생하기 직전 화염의 OH라디칼 분포로, 중심축 영역에서 OH라디칼이 많이 존재함을 볼 수 있다. 즉, 전체 반응이 중심축에서 활발함을 볼 수 있다. 이는 Chung등⁽¹⁾이 화염 날림이 발생하는 조건이 중심축에서 이론 당량비이고, 이때의 유속이 이론 당량비에서의 화염 전파속도 일 때 라고한 사실을 입증해 준다. 이는 화염 날림이 일어 날때는, 화염이 안정하게 부상해 있고, 반응이 활발한 영역이 중심축으로 이동한 때로 해석할 수 있으므로, 이러한 해석과 본 실험 결과는 일치함을 알 수 있다.

4. 결론

미소노즐로부터 연료를 분사할 때 형성되는 화염에서의 OH 농도분포 변화를 2차원 평면 레이저 유도 형광법을 사용하여 고찰하였다.

노즐 부착화염은 OH라디칼이 화염의 측면부와 선단부에서 많이 존재하나, 부상한 삼지화염은 화염의 밑면부에서 많이 존재하여 화염의 구조가 서로 상이함을 확인하였다.

속도 및 농도 조건을 만족하는 화염부착점의 위치가 제트의 중심축상에서 위치할 때 화염날림이 발생한다는 기존 이론의 타당성을, 화염 날림이 발생할 때 중심축상에 OH라디칼이 많이 존재하고 있는 사실로부터 확인하였다.

참고 문헌

1. Chung, S. H. and Lee B. J., 1991, *Combust. Flame*, v.86, pp. 62 ~ 72.
2. Vanquickenborne, L., and van Tigglen, A., 1969, *Combust. Flame*, v.10, pp. 59 ~ 69.
3. Gunter, R., Horch, K., and Lenze, B., 1982, First Specialist Meeting (International) on Combustion, pp. 117 ~ 122, The combustion Institute.
4. Eickhoff, H., Lenze, B., and Leuckel, W., 1986, Twentieth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 311 ~ 318.
5. Kalghatgi, G. T., 1981, *Combust. Sci. Tech.*, 26, pp. 233 ~ 239.
6. Kalghatgi, G. T., 1984, *Combust. Sci. Tech.*, 41, pp. 17 ~ 29.
7. Peters, N., and Williams, F. A., 1983, *AIAA J.*, v.21, pp. 423 ~ 429.
8. Donnerhack, S., and Peters, N., 1984, *Combust. Sci. Tech.*, 41, pp. 101 ~ 108.
9. Sanders, J. P. H., and Lamers, A. P. G. G., 1994, *Combust. Flame*, v.96, pp. 22 ~ 33.
10. Broadwell, J. E., Dahm, W. J., and Mungal, M. G., 1984, Twentieth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 303 ~ 310.
11. Dahm, W. J. A., and Dibble, R. W., 1988, Twenty Second Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute pp. 801 ~ 808.
12. Miake-Lye, R. C. and Hammer, J. A., 1988, Twenty Second Symposium (International) on combustion, The Combustion Institute, pp. 817 ~ 824.
13. Pitts, W. M., 1989, *Combust. Flame*, v.76, pp. 197 ~ 212.
14. Pitts, W. M., 1990, Twenty Third Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 661 ~ 668.
15. Schefer, R. W., Namazian, M. and Kelly, J., 1988, Twenty Second Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 833 ~ 842.
16. Pitts, W. M., 1988, Twenty Second Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 809 ~ 816.
17. Schefer, R. W., Namazian, M. and Kelly, J., 1990, Twenty-Third Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 669 ~ 676.
18. Bradley, D., Gaskell, P. H., and Lau, A. K. C., 1990, Twenty -Third Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 685 ~ 692.
19. Savas, O., and Gollahalli, S. R., 1986, *J. Fluid Mech.*, v.165, pp. 297 ~ 318.
20. Phillips, H., 1965, Tenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 1277 ~ 1283.
21. Kioni, P. N., Rogg, B., Bray, N. C., and Linan A., 1993, *Combust. Flame*, v.95, pp. 276 ~ 290.
22. A.C. Eckbreth, 1988, "*Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species*, Acabus, pp.301~361.
23. W.R. Anderson, L.J. Decker, and A.J. Kotlar, 1982, *Combust. Flame* 48,179~190.
24. 한 재원, 편집자, 1994, "레이저 응용연소진단기술," 산업응용광계측연구회, 115~168.
25. 이병준, 길용석, 한재원, 정석호, 1996, 대한 기계학회논문집(B), 제 20권, 제2호, pp 710-719.
26. Lee, C. H., and Chung, S. H., 1987, *Trans. Korea Soc. Mech. Eng.* 11, pp. 991 ~ 1000.
27. Lewis, B. and von Elbe, G., 1987, *Combustion, flames, and Explosion of Gases*, 3rd Ed., Academic press, p. 487.
28. G.H. Dieke, and H.M. Crosswhite, 1962, *J. Quant. Spectrosc. Radia. Transfer* 2, pp.97~199.

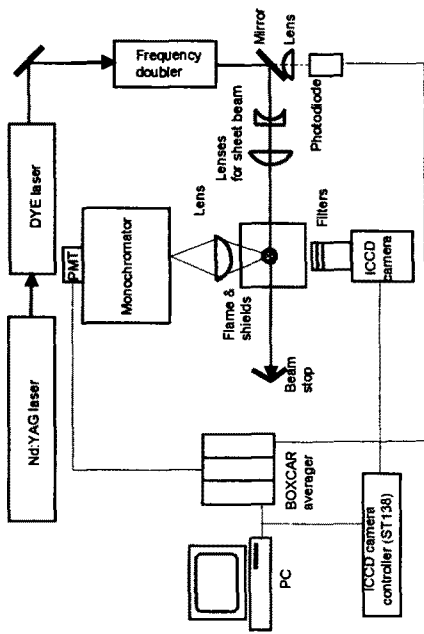


Fig. 1 Schematics of the experimental setup.

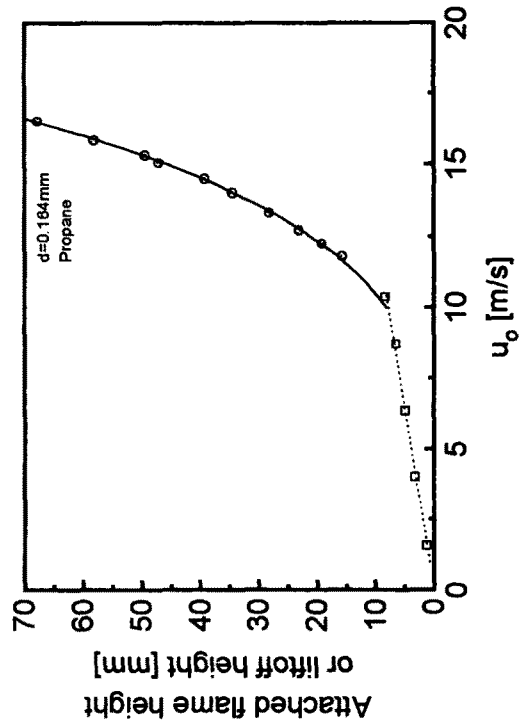


Fig. 3. Attached flame height and liftoff height with nozzle exit velocity (open symbol : attached flames, closed symbol : lifted flames, lines : results of curve fitting for each cases)

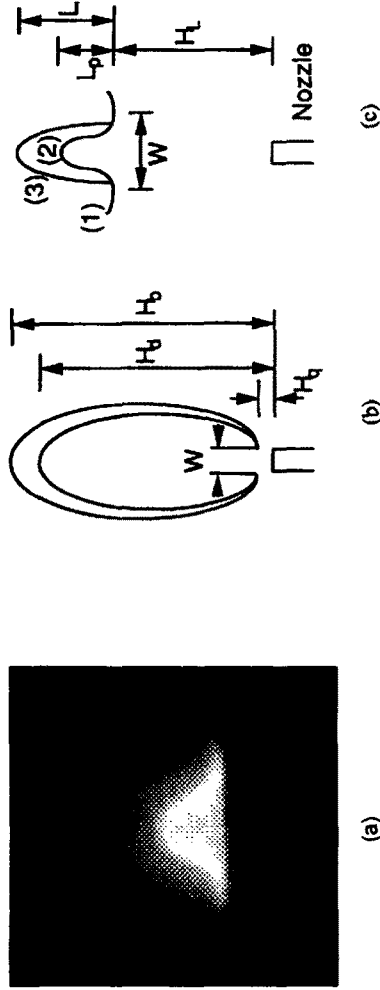


Fig. 2. Details of lifted flames for propane (a) photograph, schematics of attached (b) and lifted (c) flames.

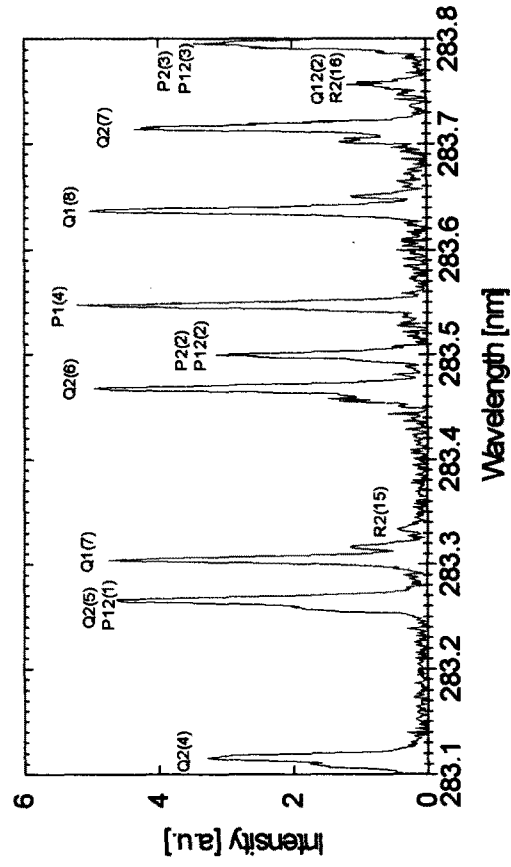


Fig. 4 CH(1,0) excitation spectrum

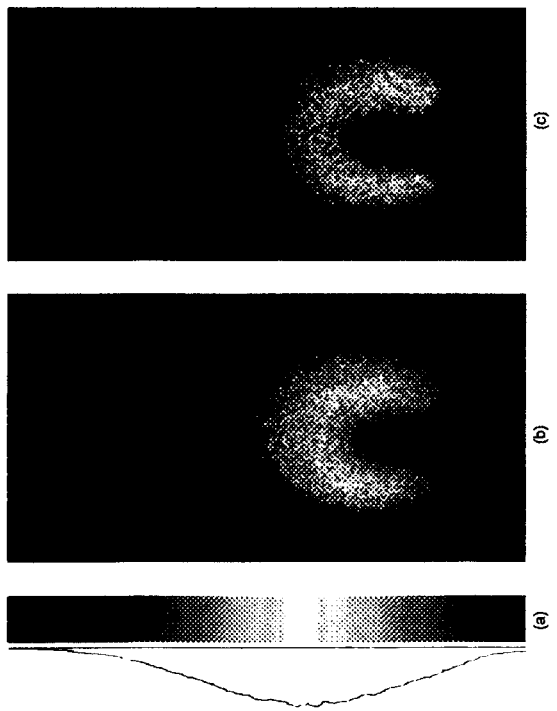


Fig. 5 Laser sheet intensity profile (a), PLIF image (b) and OH radical image (c).

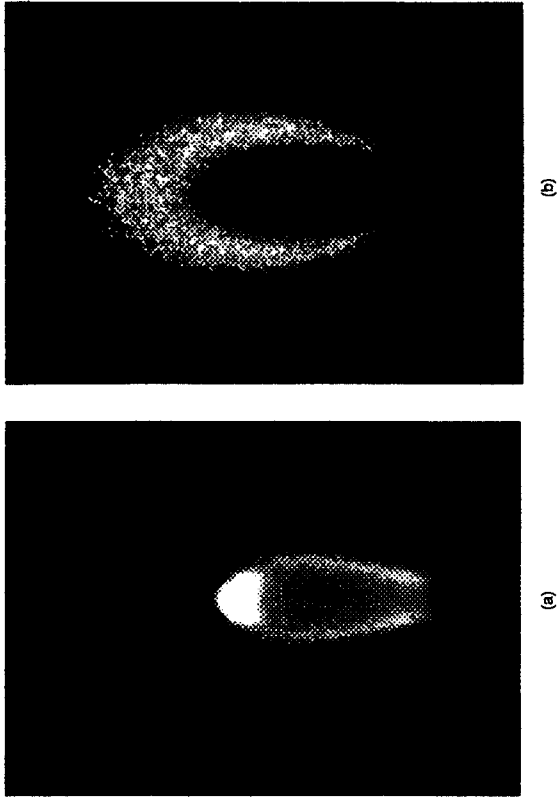


Fig. 6 Flame shape (a) and OH radical profile (b) for attached flame at $u_0 = 8.6$ m/s.

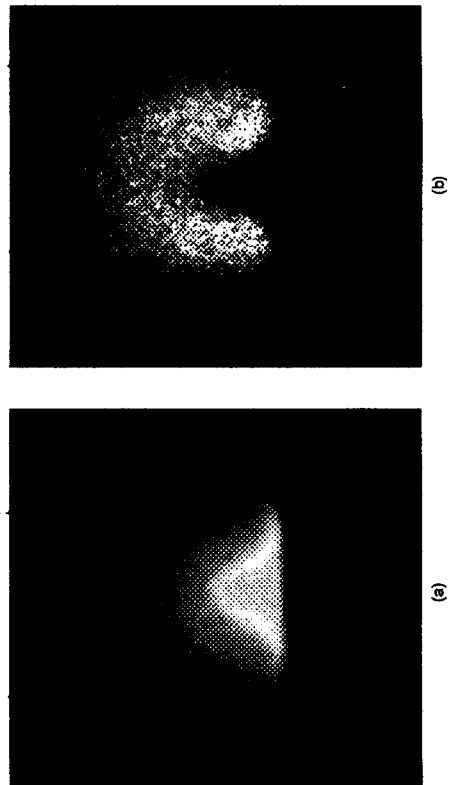


Fig. 7 Flame shape (a) and OH radical profile (b) for lifted flame at $u_0 = 14.8$ m/s.

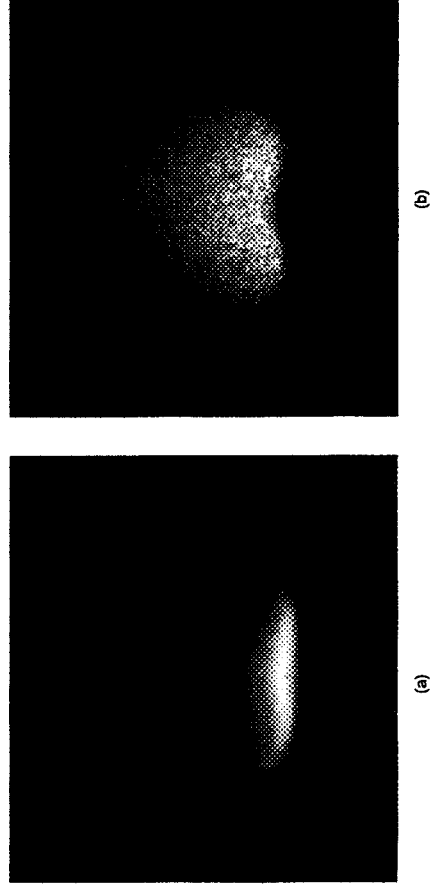


Fig. 8 Flame shape (a) and OH radical profile (b) for flat flame at $u_0 = 15.9$ m/s.

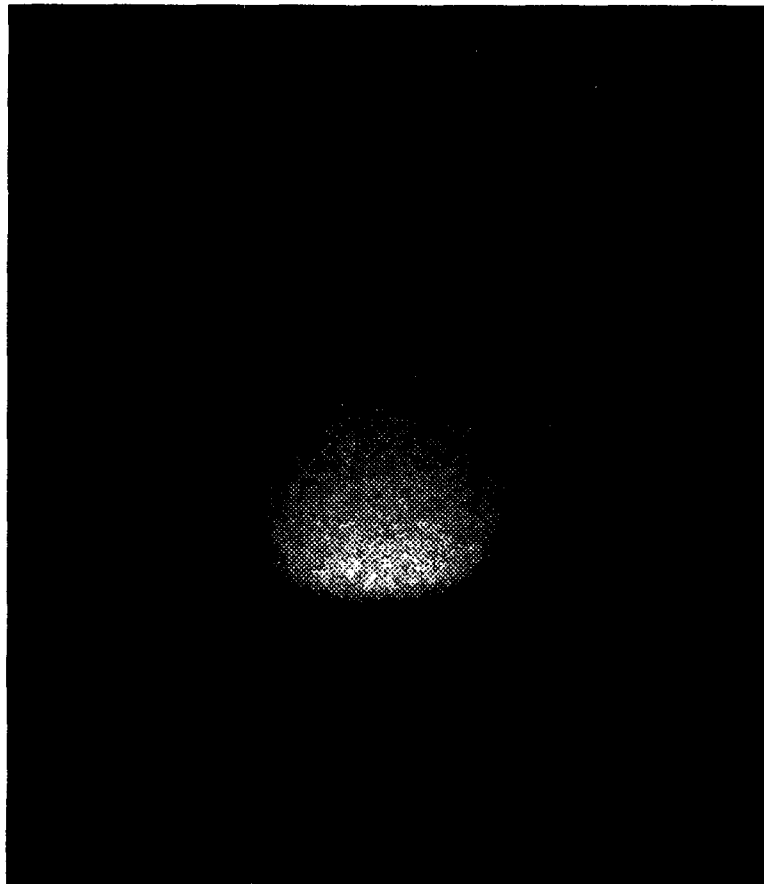


Fig. 9 OH radical profile for blowing out flame.