

과장 가변형 KrF 엑시머 레이저를 이용한 층류 비예혼합 수소 화염에서의 2차원적 온도 및 농도 측정

김군홍* · 진성호** · 김용모*** · 박경석**** · 김세원***** · 김경수*****
(2000년 4월 12일 접수)

Planar Imaging of Temperature and Concentration of a Laminar Nonpremixed H₂/N₂ Flame Using a Tunable KrF Excimer Laser

Gunhong Kim, Seongho Jin, Yongmo Kim, Kyongsuk Park,
Sewon Kim, and Gyungsoo Kim

Key Words: Rayleigh Scattering(레이저 산란), Laser Induced Predissociative Fluorescence(레이저 유도 선헬리 형광), Laminar Nonpremixed Flame(층류 비예혼합 화염), Excimer Laser(엑시머 레이저)

Abstract

Rayleigh scattering and laser induced predissociative fluorescence are employed for capturing two-dimensional images of temperature and species concentration in a laminar nonpremixed flame of a diluted hydrogen jet. Rayleigh scattering cross-sections are experimentally obtained at 248nm. Dispersed LIPF spectra of OH and O₂ are also measured in a flame in order to confirm the excitation of single vibronic state of OH and O₂. OH and O₂ are excited on the P₁(8) line of the A²Σ⁺(v'=3) - X²Π (v''=0) band and R(17) line of the Schumann-Runge band B³Σ_u⁻(v'=0) - X³Σ_g⁻(v''=6), respectively. Fluorescence spectra of OH and Hot O₂ are captured and two-dimensional images of the hydrogen flame field are successfully visualized.

기호설명

I_r : 레이저 산란 강도
 C : 실험 상수
 I_0 : 레이저 강도
 n : 측정 체적내의 총분자 농도
 σ_{eff} : 유효 산란 단면적
 σ_i : 특정 분자 i 의 산란 단면적

x_i : 특정 분자 i 의 몰분율
 σ_s : 개지의 산란 단면적
 I_{rs} : 개지의 레이저 산란 강도
 f : 형광 수율
 F : 형광률
 Q : 소광률
 P : 선헬리율
 θ : 분자 상수
 Q_{pre} : 해리율
 Q_{ion} : 이온화율
 Q_{rot} : 회전 에너지 전이율
 Q_{vib} : 진동 에너지 전이율
 Q_{elec} : 전자 에너지 전이율
 B_{12} : 자극 흡수 계수
 B_{21} : 자극 방출 계수
 I_F : 형광 강도

* 한양대학교 대학원

** 회원, 경희대학교 산학협력기술연구원

E-mail : jinsh@nms.kyunghee.ac.kr

TEL : (041)589-8545 FAX : (041)589-8510

*** 회원, 한양대학교 기계공학부

**** 회원, 경희대학교 기계산업시스템공학부

***** 한국생산기술연구원

A_{ul} : 자발 방출 계수

1. 서론

디젤 엔진, 가스 터빈 연소기 등과 같이 실용화되어 있는 연소기에서 가장 널리 사용되고 있는 화염은 비에혼합 화염이다. 비에혼합 화염에 대한 실험적, 수치적 연구가 활발히 진행되고 있으며 특히 레이저를 이용한 속도, 온도 및 농도 분포에 대한 계측은 화염 구조와 연소 특성을 파악하는 데에 필수적이라고 할 수 있다.

대표적인 레이저를 이용한 연소장 계측법으로는 레일리 산란법(Rayleigh Scattering),⁽¹⁻³⁾ 라만 산란법(Raman Scattering),⁽⁴⁻⁷⁾ 레이저 유도 형광법(Laser-induced Fluorescence),⁽⁸⁻¹²⁾ CARS (Coherent Anti-Stokes Raman Scattering)^(13,14) 등이 있다. 본 연구에서는 2차원 계측이 가능한 레일리 산란법과 레이저 유도 선헨리 형광법을 이용하였다. 레일리 산란을 이용한 화염장내의 온도 분포 측정은 비교적 간단하게 온도를 측정할 수 있는 계측 기법이나, 유효 산란 단면적의 변화에 대한 신중한 고려가 필요하며 산란 강도가 큰 Mie 산란에 의한 신호 간섭을 받기 때문에 실험 장치 구성에 많은 주의가 필요한 단점이 있다.⁽¹⁵⁾ 일반적으로 널리 사용되고 있는 레이저 유도 형광법(LIF)은 신호 강도가 높기 때문에 농도가 낮은 각종 화학종의 농도 계측에 매우 유용한 기법이나 충돌에 의한 소광 현상(collisional quenching)때문에 고압에서의 정량적인 계측이 불가능하다.⁽¹⁶⁾ 이에 레이저 유도 선헨리 형광법(LIPF)은 분자의 선헨리 경로가 존재하는 에너지 준위로 여기시켜 일반 형광법의 난제인 고압에서의 충돌에 의한 소광 효과를 최소화할 수 있기 때문에 최근에 많은 관심을 얻고 있는 계측 기법이다.

본 연구에서는 비에혼합 화염의 특성을 살펴보기 위하여 30% H_2 /70% N_2 를 연료로 하는 비에혼합 화염에 대하여 레일리 산란법과 레이저 유도 선헨리 형광법을 이용한 레이저 계측을 수행하였다. 2차원 레일리 산란 신호와 레이저 유도 선헨리 형광 신호를 계측하기 위해서 측정 신호에 대한 filter의 사용을 제외하고는 동일한 실험장치를 사용하였다.

레일리 산란법을 이용한 온도 측정을 위하여 레일리 산란 단면적에 대한 기초 실험을 통하여

적절한 연료 혼합비를 고려하였으며 비에혼합 화염내의 온도를 정량적으로 계측하였다.

OH와 Hot O_2 의 농도 분포를 계측하기 위해 분광 실험을 통하여 형광 신호를 측정하였고 이를 2차원 농도 계측의 기초 자료로 이용하였다. 2차원 측정시에 LIPF 신호만을 측정하기 위하여 ICCD 카메라 앞에 UG-11 filter를 위치시켜 타 신호의 간섭을 제거하였다.

2. 기본 이론

2.1 레일리 산란법

레일리 산란은 레이저광과 분자들 사이의 탄성 충돌 과정이며, 입사 파장에 대하여 동일한 파장을 갖는다. 혼합 기체내의 레일리 산란 강도는 일반적으로 다음 식과 같이 표현된다.

$$I_r = C \cdot I_o \cdot n \cdot \sigma_{eff} \quad (1)$$

여기에서 C는 실험 상수, I_o 는 레이저 강도, n은 측정 체적내의 총분자 농도, 그리고 σ_{eff} 는 식 (2)로 표현되는 유효 산란 단면적으로 각 분자에 대한 산란 단면적(σ_i)과 물분율(x_i)의 곱들의 합으로 표현되어진다.

$$\sigma_{eff} = \sum_i \sigma_i \cdot x_i \quad (2)$$

레일리 산란 신호로부터 온도를 구하기 위하여 식 (1)에 이상 기체 상태 방정식, $PV=nRT$ 를 적용시키면 식 (3)과 같은 분자 농도와 온도의 관계식을 얻을 수 있다.

$$T = \frac{PV}{R} \cdot \frac{CI_o\sigma_{eff}}{I_r} \quad (3)$$

식 (3)을 이용하면 미지의 온도장에서 측정된 레일리 산란 강도(I_r)로부터 알려진 온도(T_s)와 압력(P_s)에서 측정된 레일리 산란 강도(I_{rs})를 이용하여 온도를 구할 수 있다.

$$T = \frac{\sigma_{eff}}{\sigma_s} \cdot \frac{I_{rs}}{I_r} \cdot \frac{P}{P_s} \cdot T_s \quad (4)$$

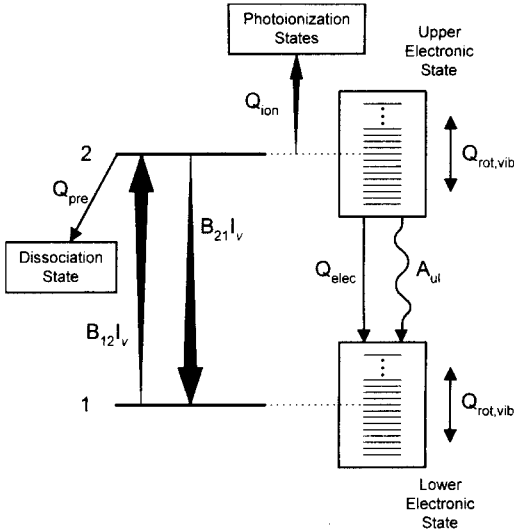


Fig. 1 Critical energy transfer processes in laser induced fluorescence

대부분의 대기압하의 실험에서는 동일한 압력을 가정할 수 있으므로 주요한 실험 오차는 측정 체적내에서의 유효 산란 단면적의 변화를 적절하게 고려함에 달려있음을 알 수 있다. 특히 유효 산란 단면적의 변화는 수 mm내에서 급격한 농도와 온도의 변화가 존재하는 연소장에서의 레이저 측정에 많은 어려움을 발생시킨다.

2.2 레이저 유도 형광법(LIF)과 레이저 유도 선헨리 형광법(LIPF)

레이저 유도 형광법(LIF)을 이용한 계측법은 연소장을 가시화시키는 데에 일반적으로 사용되어지고 있는 정밀한 측정 기법으로, 특정 양자 상태에 있는 원자나 분자들의 수밀도를 계측하는데에 사용되어진다. 그러나 레이저 유도 형광법의 난제인 고압에서의 충돌에 의한 소광 현상(collisional quenching)이 발생하여, 형광 신호의 정량화에 많은 한계점을 가져오게 된다. 이에 반해 레이저 유도 선헨리 형광법(LIPF)은 소광 현상을 근본적으로 제거하기 위한 계측법으로 선헨리 경로를 이용하는 기법이다.

레이저 유도 형광법(LIF)과 레이저 유도 선헨리 형광법(LIPF)을 비교하기 위하여 Fig. 1의 여러 가지 에너지 안정화 과정중에 중요한 3가지 과정만을 고려하여 해석하면 다음과 같다. 즉, 여기된

상태는 (a)형광률 F로 형광을 방출하거나, (b)선헨리율 P로 선헨리되거나 또는 (c)소광률 Q로 충돌에 의하여 소광되어질 수 있다. 여기에서 형광률 F와 선헨리율 P는 오직 여기된 분자의 물리적 특성에만 의존하고, 소광률 Q는 측정점의 주위 조건(온도, 압력, 조성비)에 의존하기 때문에 이를 보정함에 많은 어려움이 있다.

레이저를 이용하여 특정 분자를 여기시켰을 때, 방출되는 형광 강도(I_F)는 다음 식으로 표현된다.

$$I_F = [F/(F + Q + P)] \theta n_i = f n_i \theta \quad (5)$$

여기에서 f 는 형광 수율(fluorescence yield)이며 θ 는 분자 상수, 레이저 강도, 그리고 실험 장치들에 의존하는 상수값이다.

일반 레이저 유도 형광법(LIF)에서는 선헨리 경로가 없기 때문에 $P=0$ 이다. 고압하에서는 충돌 빈도가 증가하여 소광 현상이 형광을 압도하게 되므로 $Q \gg F$ 상태가 된다. 따라서 식 (5)를 수정하면 식 (6)과 같이 표현되어진다.

$$I_F = [F/Q] \theta n_i \quad (6)$$

이 식에서 보면, LIF 신호 I_F 는 소광률 Q에 의존적이기 때문에 n_i 를 구하기 위한 실험적 보정이 거의 불가능하게 된다. 이에 반하여 선헨리 레이저 유도 형광법(LIPF)에서는 소광률이나 형광률보다 빠른 선헨리율로 인하여 $P \gg Q$ 와 $P \gg F$ 를 만족하기 때문에 LIPF 신호는 식 (7)로 표현되어진다.

$$I_F = [F/P] \theta n_i \quad (7)$$

위 식에서 I_F 와 n_i 는 Q의 함수가 아니라, 오직 분자 상수인 F와 P로 나타내어지기 때문에 측정 시스템에 대한 보정이 가능해진다. 그리고 LIPF 신호가 분자 농도 n_i 에 선형적으로 비례한다는 것을 알 수 있다.

선헨리 유도 형광법은 선헨리 준위가 존재하는 상위 상태로 여기시키기 때문에 일반 레이저 유도 형광 신호보다 형광 강도가 약하다. 따라서 강한 여기 에너지를 가진 고출력 레이저의 사용

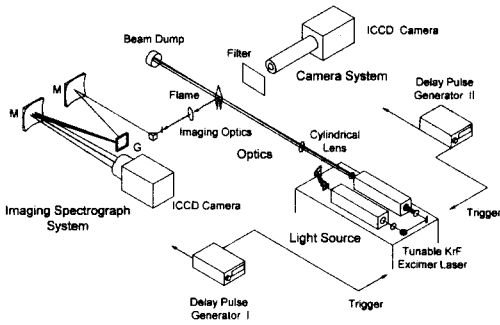


Fig. 2 General laser-based experimental setup for combustion diagnostics

은 특히 2차원 계측에 있어서는 필수적이라 할 수 있다.

3. 실험 장치 및 방법

본 실험에 사용된 실험 장치 구성은 여러 타 연구실에서도 일반적으로 사용되고 있으며 Fig. 2에 나타내었다. 사용된 광원은 KrF Excimer Laser로써 247.9~248.9nm 사이에서 과장 가변 가능하고 선폭은 0.003nm 이며, 20ns 이하의 펄스 길이와 0.45J/pulse의 고출력을 가지고 있다. 레이저 산란 및 형광 신호를 측정하기 위하여 576 × 384pixel의 ICCD(16bit) 카메라를 사용하였다.

2차원 계측을 위하여 레이저빔은 cylindrical lens($f=1000\text{mm}$)를 이용하여 빔 높이는 약 20mm, 두께는 0.1mm 이하가 되도록 하였다. 레이저 광의 shot to shot 세기 변화에 대한 오차를 최소화하기 위하여 레이저 펄스 20 shot에 대한 산란 및 형광 신호를 산술 평균하였다. 또한, 레이저 산란 실험 시에는 렌즈 앞부분에 레이저 라인 간섭 필터를 사용하고 레이저의 파장을 off-resonance로 하여 순수한 레이저 신호만을 취득하였고, 형광 실험 시에는 UG-11 필터를 사용하여 레이저 산란 신호를 제거하고 순수한 OH 및 O₂ 분자의 형광 신호만을 취득하도록 하였다.

분광 실험을 위하여 레이저빔은 spherical lens($f=1000\text{mm}$)를 이용하였고, 초점에서의 air breakdown 현상에 의한 신호 간섭을 피하기 위해 측정 지점에서 4cm 가량 뒤쪽에 초점이 위치하도록 렌즈를 구성하였다. Fig. 2에도 나타났듯이 형

광 신호의 수광을 위하여 단일 렌즈($f=10\text{cm}$)를 이용한 image to image법을 사용하였고, 슬릿 폭은 10 μm 를 사용하였다.

본 실험에 사용된 버너 실험 장치는 지름 50mm의 원통에서 균일한 속도로 공기가 분출되고 중심에 내경 4.4mm인 스텐레스 관을 위치시켜 연료 노즐로 사용하였다. 연료와 주위 공기 유량 제어를 위하여 각각의 유량 범위에 적절한 전자 유량 제어 장치를 사용하였고, 정확한 유량 제어를 위하여 사전에 습식 유량계(wet gas meter)를 이용하여 사용된 기체들에 대하여 유량 보정 실험을 수행하였다. 본 실험에 사용된 유량 조건은 안정화된 층류 화염을 만들기 위하여 연료의 평균 유속은 2.2ms, 주위 공기의 평균 유속은 0.26ms로 설정하였다. 3축 이송 장치를 이용하여 레이저빔과 측정 카메라에 대한 버너의 상대적 위치 및 측정 범위를 제어하였다.

4. 실험 결과

4.1 레이저 산란법을 이용한 온도 분포 측정

식 (1)에서 볼 수 있는 것처럼 기체 분자들의 레이저 강도는 측정 체적내의 기체 분자들의 농도와 레이저 산란 단면적에 비례한다. 본 연구에서는 식 (1)을 이용하여 레이저 산란 단면적을 실험적으로 구하기 위하여 정적 용기안에 측정하고자 하는 기체를 일정 압력으로 충전시킨 후, 248 nm KrF Excimer Laser에 의한 2차원 레이저 이미지를 ICCD 카메라로 측정하였다. 측정된 레이저 이미지들은 각각의 기체들에 대하여 동일한 조건(T,P)에서 N₂ 기체의 레이저 이미지를 측정하여 레이저 이미지들의 강도를 비교함으로써 N₂에 대해 보정된 유효 산란 단면적(σ_{IN})을 구하였다. 248 nm에서의 측정된 여러 기체 분자들의 레이저 산란 단면적 결과들과 타 연구자의 결과들에 대하여 Table 1에 나타내었다.⁽¹⁷⁾

식 (4)에서 유효 산란 단면적의 변화는 비예혼합 화염에서는 기체의 조성이 위치에 따라 달라지기 때문에 이 변화를 최소화할 수 있는 연료의 혼합비를 결정하기 위하여 완전 반응을 가정한 연소 생성물의 유효 산란 단면적(σ_{eff})과 기준 상태인 질소 분자의 유효 산란 단면적(σ_{N_2})의 비를 당량비에 따라 Fig. 3에 나타내었다.

그림의 결과로부터 유효 산란 단면적의 변화를

최소화하기 위하여 체적 혼합 비율이 30% H₂와 70%N₂의 혼합기를 연료로 선정하였다.⁽¹⁸⁾ 본 연구에서 온도를 구할 때에 위치에 따른 유효 산란 단면적비(σ_{eff}/σ_s)를 1.0로 가정하였기 때문에 연소가 발생하기 전까지의 반응물에 대하여 오차가 발생하게 된다. 그러나 화염면 이후에는 화염장 온도가 아주 정확하게 측정됨을 예측할 수 있다. Fig. 4에 최종 처리된 비예혼합 화염장내의 온도 분포를 나타내었다.

4.2 레이저 유도 선해리 형광법을 이용한 농도 측정

248nm대의 발진 과장을 갖는 KrF Excimer Laser의 가변 범위내에서 OH와 O₂는 많은 여기 라인들을 가지고 있으며 이는 예혼합 CH₄/air 화염내의 분광 실험을 통하여 확인할 수 있었다.⁽¹⁹⁾ 분광 실험을 통하여 가장 강한 선해리 형광 강도

를 가지고 있는 OH의 (3-0), P₁(8)과 O₂의 (0-6), R(17) 여기 라인들을 각각의 농도 계측을 위하여 라인들로 선정하였다. Fig. 5에 OH 농도 계측을 위해 사용된 P₁(8) 여기 라인의 선해리 형광 신호를 나타내었다. 3-0 준위의 전이율은 0-0 전이율에 비하여 작지만 고출력 엑시머 레이저와 ICCD의 사용으로 형광의 S/N 비가 우수하다.

OH 라디칼은 여기되는 회전 준위에 관계없이 공통적으로 3개의 강한 형광 스펙트럼 영역대가 존재한다. 그림에서 볼 수 있듯이 3-1(265~275 nm), 3-2(295~305nm), 3-3(325~335nm) 전이에서 발생하는 형광들이다. 화염내의 OH 농도 이미지는 Fig. 6에 나타내었다.

Table 1 Normalized Rayleigh cross-section, $\sigma_{iN} = \sigma_i / \sigma_{N_2}$, for various molecules i at 248nm⁽¹⁷⁾

gases i	Absolute value [cm ²]	Normalized value	
		σ_{iN}	σ_{iN}
H ₂	3.67×10^{-27}	0.236	0.259
N ₂	1.555×10^{-26}	1.00	1.00
O ₂	1.384×10^{-26}	0.89	0.844
H ₂ O	1.166×10^{-26}	0.75	-
CO ₂	-	2.25	2.364
비고	P.Andresen	P.Andresen	Our result

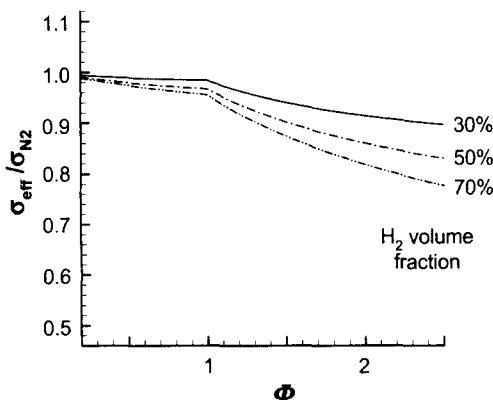


Fig. 3 Relation between effective Rayleigh cross-section and equivalence ratio

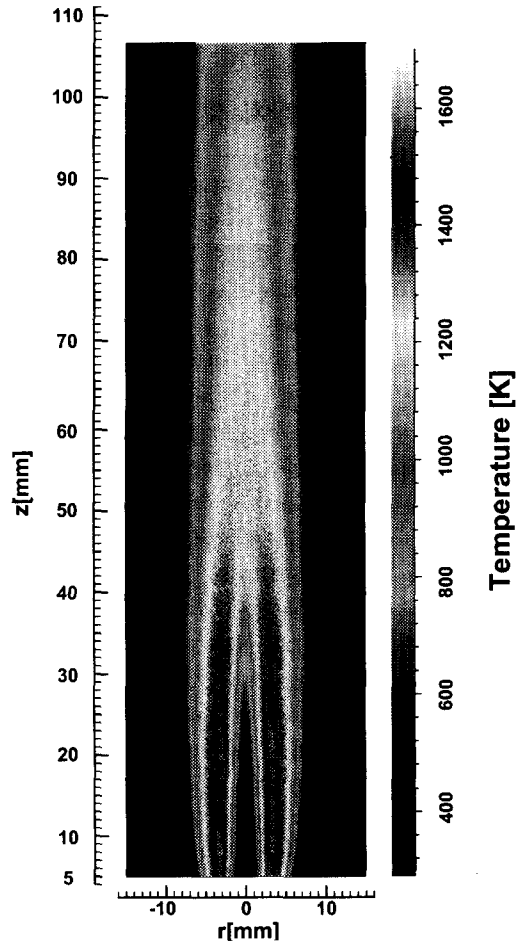


Fig. 4 Temperature image of nonpremixed H₂/N₂ jet flame

OH 농도 분포 이미지로부터 국부적으로 소멸(extinction)되는 화염 끝의 개방(flame tip opening) 현상이 나타남을 확인할 수 있다. 편중 확산의 존재로 인해 화염 끝의 개방 현상이 나타나는 경우에는 상류 부분에서 높은 온도를 가지며 연료가 고갈되는 축 방향 위치에서 최대 온도가 중심축에 위치하지 않고 약간 떨어진 위치에 존재하게 되는데 이러한 사실은 온도 분포 이미지 결과와 매우 잘 일치한다.⁽²⁰⁾

Hot O₂ 농도 계측을 위해 사용된 R(17) 여기 라인의 선택리 형광 신호를 Fig. 7에 나타내었다. O₂ 분자는 OH 분자에 비하여 260~340nm까지 다소 넓게 분포되어 있고 분자 특성에 의하여 스펙트럼은 P와 R 선만 나타나고 있다. 화염내의 농도 이미지는 Fig. 8에 나타내었다. 온도 이미지 결과와 비교했을 때, 고온인 영역에서만 계측이 됨을 알 수 있으며, 이는 R(17) 여기 라인은 기저상태내의 높은 진동 준위(v''=6)을 여기시키는데 낮은 온도에서는 상위 진동 준위의 수밀도가 거의 분포하지 않기 때문이다.

각각의 실험 결과들을 비교하기 위하여 Fig. 9에서 노즐 출구로부터 10mm 떨어진 지점에서의 측정치들을 서로 비교하였다. 온도 분포를 보면 중심 축의 연료 온도가 400K 이상으로 측정되었는데 이는 앞서 논의되었듯이 측정장에 대한 유효 산란 단면적의 변화는 일정하다는 가정으로 인해 과대 예측된 값이나 화염면 이후에서는 정확한 온도 계측이 가능함을 확인할 수 있다.

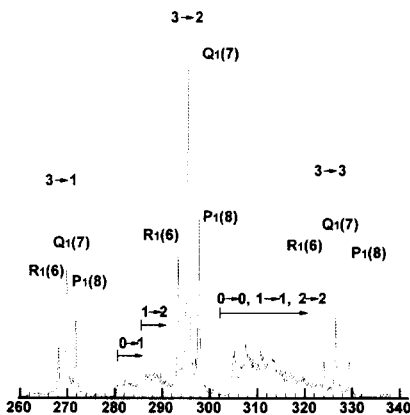


Fig. 5 Emission spectrum of OH via A-X, P₁(8)

OH 농도 분포를 보면 OH의 LIPF 강도가 강하여 높은 신호 대 잡음비를 유지하고 있음을 알 수 있으며, 좌우 대칭성이 유지되지 않은 이유는 레이저 빔이 우에서 좌로 입사할 때, 우측에 위치한 OH 분자의 레이저 광 흡수에 의한 레이저 강도 감쇠 및 실험 장치의 구성 상태가 완전하지 않았기 때문으로 사료되어진다. OH 농도 분포와 온도 분포를 비교해 보면, OH 농도의 최고 지점과 최대 온도 지점이 일치함을 알 수 있다.

Hot O₂ 농도 분포를 보면 (0-6), R(17) 여기 라인을 이용하였기 때문에 화염면 근처와 연소된 기체장내의 1200K 이상의 고온 영역에서만 계측됨을 확인할 수 있다. 최고 온도 지점에서 Hot O₂가 약하게 계측되는 이유는 이 지점에서 급격한 O₂의 소모로 인한 것으로 추측된다.

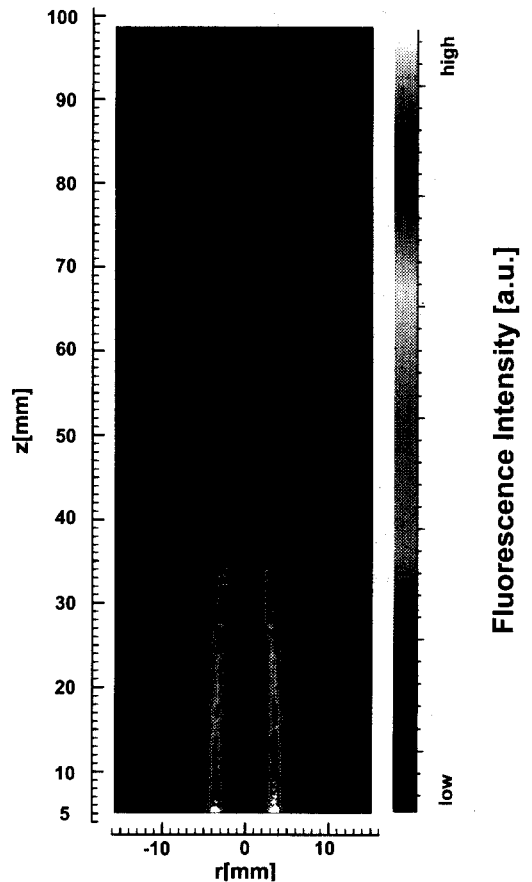


Fig. 6 LIPF image of OH in H₂/N₂ jet diffusion flame

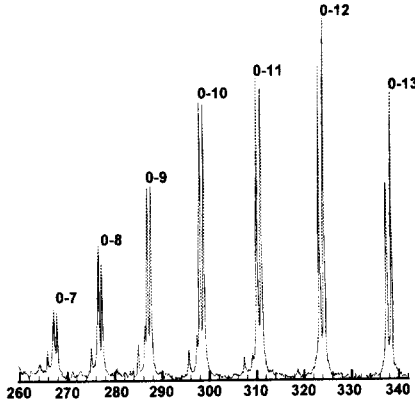


Fig. 7 Emission spectrum of O₂ via B-X, R(17)

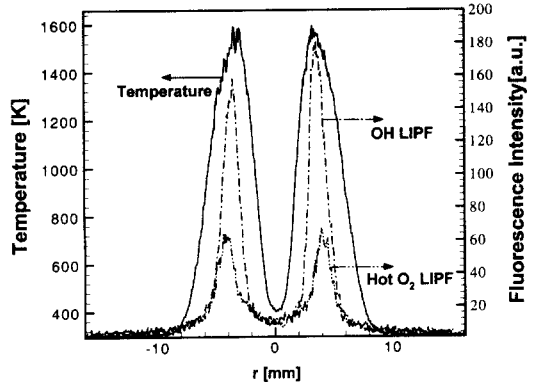


Fig. 9 Profiles of temperature, OH and O₂ concentration at z=10mm

5. 결론

가변형 KrF 엑시머 레이저를 이용하여 종류 비예혼합 30%H₂/70%N₂ 제트 화염에 대한 2차원 온도 분포 및 농도 분포 측정 실험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 레이저 산란법을 이용하여 온도 분포를 정량적으로 계측하였다.
- (2) 레이저 유도 선택리 형광법을 이용하여 OH 및 Hot O₂의 농도 분포의 2차원 이미지를 가시화하였고 상대적인 농도 분포를 계측하였다.
- (3) 계측된 온도 분포 이미지와 OH 농도 분포 이미지로부터 화염 끝 개방(flame tip opening) 현상을 확인할 수 있었다.
- (4) 상세 화염 구조 및 연소 특성 해석을 위한 광계측 기법의 타당성을 확인하였다.

후 기

본 논문은 일부 1999년도 경희대학교 교비지원에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Stepowski, D. and Cabot, G., 1991, "Single-Shot Temperature and Mixture Fraction Profiles by Rayleigh Scattering in the Development Zone of a

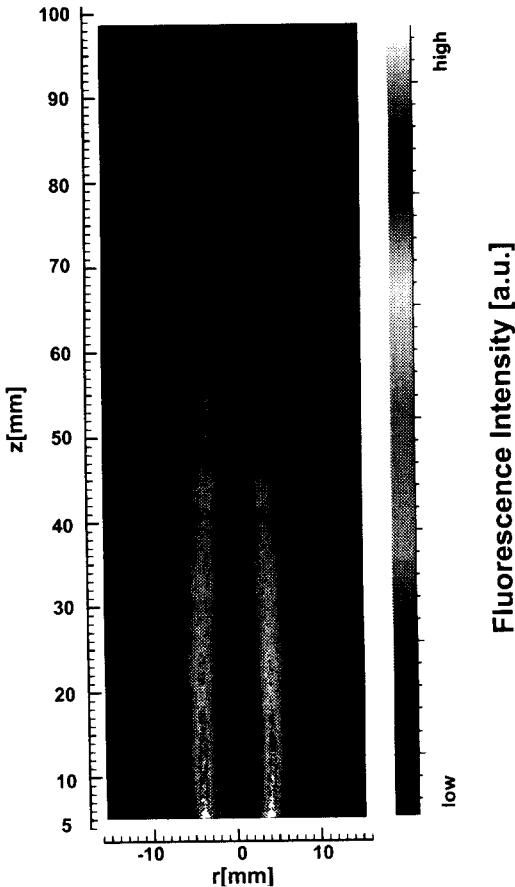


Fig. 8 LIPF image of hot O₂ in H₂/N₂ jet diffusion flame

- Turbulent Diffusion Flame," *Combust. Flame* 88, pp. 296~308.
- (2) Dibble, R.W. and Hollenbach, R.E., 1981, "Laser Rayleigh Thermometry in Turbulent Flames," *Eighteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburg*, pp. 1489~1499.
- (3) Zhao, F.-Q., Takemoto, T., Nishida, K., et. al., 1992, "Two-Dimensional Measurements of the Fuel Vapor Concentration in the Combustion Chamber of a SI Engine with Laser Rayleigh Scattering," SAE Paper, No. 922389.
- (4) Setchell, R.E., 1978, "Initial Measurements within an Internal Combustion Engine Using Raman Spectroscopy," Sandia National Laboratories Report, SAND 78-1220.
- (5) Johnston, S.C., 1979, "Precombustion Fuel/Air Distribution in a Stratified Charge Engine Using Laser Raman Spectroscopy," SAE Paper, No. 790433.
- (6) Smith, J.R., 1980, "Temperature and Density Measurements in an Engine by Pulsed Raman Spectroscopy," SAE Paper, No. 800137.
- (7) Miles, P. and Dilligan, M., 1996, "Quantitative In-Cylinder Fluid Composition Measurements Using Broadband Spontaneous Raman Scattering," SAE Paper, No. 960828.
- (8) Crosley, P.R., 1989, "Semiquantitative Laser-Induced Fluorescence in Flames," *Combust. Flame* 78, pp. 153~167.
- (9) Hanson, R.K., Seitzman, J.M. and Paul, P.H., 1990, "Planar Laser-Fluorescence Imaging of Combustion Gases," *Appl. Phys.*, B 50, pp. 441~454.
- (10) Baritaud, T.A. and Heinze, T.A., 1992, "Gasoline Distribution Measurements with PLIF in a SI Engine," SAE Paper, No. 922355.
- (11) Neij, H. and Alden, M., 1994, "Application of Two-Photon Laser-Induced Fluorescence for Visualization of Water Vapor in Combustion Environments," *Appl. Opt.*, Vol. 33, No. 27, pp.6514~6523.
- (12) Engelhard, M., Jacob, W., Moller, W., et. al., 1995, "New Calibration Method for the Determination of the Absolute Density of CH Radicals through Laser Induced Fluorescence," *Appl. Opt.*, Vol. 34, No. 21, pp. 4542~4551.
- (13) Nakada, T., 1990, "Unburnt Gas Temperature Measurements Using Single Shot CARS in a Spark Ignition Engine," *International Symposium COMODIA 90*, pp. 393~398.
- (14) Lebel, M. and Cottreau, M.J., 1992, "Study of the Effect of Residual Gas Fraction on Combustion in a S.I. Engine Using Simultaneous CARS Measurements of Temperature and CO₂ Concentration," SAE Paper, No. 922388.
- (15) Ecbreth, A.C., 1996, *Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species*, Abacus Press, pp. 268~272.
- (16) 진성호, 남기중, 김희산, 장래각, 박승한, 김웅, 박경석, 심경훈, 김경수, 1996, "레이저 유도 선행리 형광법(LIPF)을 이용한 화염내 OH 및 O₂ 분자의 2차원 농도 분포 측정," 대한기계학회논문집(B) 제20권 제12호, pp. 4044~4052.
- (17) Koch, A., Andresen, P., 1993, "Planar Imaging of a Laboratory Flame and Internal Combustion in on Automobile Engine Using UV Rayleigh and Fluorescence Light," *Appl. Phys.*, B 56, pp. 177~184.
- (18) Komiyama, M., Kema, T., and Takagi, T., 1990, "Measurements of OH Concentration and Temperature in Diffusion Flame by Excimer Laser-induced Fluorescence and Rayleigh Scattering," *Trans. of JSME*, Vol. 56, No. 523, pp. 810~816.
- (19) Andresen, P., Bath, A., Groger, W., Lulf, H.W., and Meijer, G., 1988, "Laser-induced Fluorescence with Tunable Excimer Lasers as a Possible Method for Instantaneous Temperature Field Measurements at High Pressures: Checks with an Atmospheric Flame," *Appl. Opt.*, Vol. 27, No. 2, pp. 365~378.
- (20) 김후중, 김용모, 안국영, 1997, "수소 확산 화염의 구조에 미치는 Lewis 수의 영향," 대한기계학회논문집(B) 제21권 제9호, pp. 1126~1138.