

## 레이저 유도 선행리 형광법과 래일레이 산란법에 의한 층류 비예혼합 수소/질소 화염의 온도 및 라디칼 특성에 관한 연구

진성호\*, 박경석\*\*, 김군홍\*\*\*, 김경수\*\*\*

\*서울대학교 기계항공공학부

\*\*경희대학교 기계산업시스템공학부

\*\*\*한국생산기술연구원 청정생산기술센터

## A Study on Characteristics of Temperature and Radicals in Laminar Non-premixed H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> Flame Using LIPF and LRS

Seong Ho Jin\*, Kyoung Suk Park\*\*, Gun Hong Kim\*\*\*, Gyung Soo Kim\*\*\*

\*School of Mechanical and Aerospace Engineering, College of Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-744, Korea

\*\*School of Mechanical & Nuclear Engineering, Kyunghee University Yongin-si, Kyunggi-do, 449-701, Korea

\*\*\*Cleaner Production Technology Center, Korea Institute of Industrial Technology Chonan-si, Chungnam, 330-825, Korea

### ABSTRACT

Rayleigh scattering and laser induced predissociative fluorescence are used to obtain two-dimensional images of temperature and species concentration in a laminar non-premixed flame of a diluted hydrogen jet. Rayleigh scattering cross-sections are experimentally obtained at 248nm. Planar images of OH and O<sub>2</sub> with tunable KrF excimer laser which has a) 0.5cm<sup>-1</sup> linewidth, b) 0.5nm tuning range, c) 150mJ pulse energy, and d) 20ns pulse width are obtained to determine spatial distributions of OH and O<sub>2</sub>. The technique is based on planar laser induced predissociative fluorescence (PLIPF) in which collisional quenching is almost avoided because of the fast predissociation. Dispersed LIPF spectra of OH and O<sub>2</sub> are also measured in a flame in order to confirm the excitation of single vibronic state of OH and O<sub>2</sub>. OH and O<sub>2</sub> are excited on the P<sub>2</sub>(8) and Q<sub>1</sub>(11) line of the A<sup>2</sup>Σ<sup>+</sup>(v'=3) - X<sup>2</sup>Π (v''=0) band and R(17) line of the Schumann-Runge band B<sup>3</sup>Σ<sub>u</sub><sup>-</sup>(v'=0) - X<sup>3</sup>Σ<sub>g</sub><sup>-</sup> (v''=6), respectively. Fluorescence spectra of OH and Hot O<sub>2</sub> are captured and two-dimensional images of the hydrogen flame field are successfully visualized.

**주요기술용어** : Rayleigh scattering(래일레이 산란법), Laser induced predissociative fluorescence (레이저 유도 선행리 형광법), Laminar non-premixed flame(층류 비예혼합화염), Excimer laser (엑시머 레이저)

## 기호설명

|                |                      |
|----------------|----------------------|
| $A_{ul}$       | : 자발 방출 계수           |
| $B_{12}$       | : 자극 흡수 계수           |
| $B_{21}$       | : 자극 방출 계수           |
| $C$            | : 실험 상수              |
| $f$            | : 형광 수율              |
| $F$            | : 형광율                |
| $I_F$          | : 형광 강도              |
| $I_o$          | : 레이저 강도             |
| $I_r$          | : 레일레이 산란 강도         |
| $I_{rs}$       | : 개지의 레일레이 산란 강도     |
| $n$            | : 측정 체적내의 총분자 농도     |
| $P$            | : 선헤리율               |
| $Q$            | : 소광율                |
| $Q_{elec}$     | : 전자 에너지 전이율         |
| $Q_{ion}$      | : 이온화율               |
| $Q_{pre}$      | : 해리율                |
| $Q_{rot}$      | : 회전 에너지 전이율         |
| $Q_{vib}$      | : 진동 에너지 전이율         |
| $x_i$          | : 특정 분자 $i$ 의 몰분율    |
| $\sigma_{eff}$ | : 유효 산란 단면적          |
| $\sigma_i$     | : 특정 분자 $i$ 의 산란 단면적 |
| $\sigma_s$     | : 개지의 산란 단면적         |
| $\theta$       | : 분자 상수              |

## 1. 서 론

디젤 엔진, 가스 터빈 연소기 등과 같이 실용화되어 있는 연소기에서 가장 널리 사용되고 있는 화염은 비예혼합 화염이다. 현재까지 비예혼합 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 레일레이 산란법(Rayleigh Scattering)<sup>1~3)</sup>, 라만 산란법(Raman Scattering)<sup>4~7)</sup>, 레이저 유도 형광법(Laser Induced Fluorescence)<sup>8~12)</sup>,

CARS(Coherent Anti-Stokes Raman Scattering)<sup>13,14)</sup> 등이 있다. 본 연구에서는 2차원 계측이 가능한 레일레이 산란법과 레이저 유도 선헤리 형광법을 이용하였다. 레일레이 산란법을 이용한 화염장내의 온도 분포 측정은 비교적 간단하게 온도를 측정할 수 있는 계측 기법이다. 단, 유효 산란 단면적의 변화에 대한 신중한 고려가 필요하며 산란 강도가 큰 Mie 산란에 의한 신호 간섭을 받기 때문에 실험 장치 구성에 많은 주의가 필요하다<sup>15)</sup>. 일반적으로 널리 사용되고 있는 레이저 유도 형광법(LIF)은 신호 강도가 높기 때문에 농도가 낮은 각종 화학종의 농도 계측에 매우 유용한 기법이다. 그러나 충돌에 의한 소광 현상(collisional quenching) 때문에 고압에서의 정량적인 계측이 불가능하다<sup>16)</sup>. 이에 반해 레이저 유도 선헤리 형광법(LIPF)은 분자의 선헤리 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 비예혼합 화염의 특성을 살펴보기 위하여 30% $H_2$ /70% $N_2$ 를 연료로 하는 비예혼합 화염에 대하여 레일레이 산란법과 레이저 유도 선헤리 형광법을 이용한 레이저 계측을 수행하였다. 2차원 레일레이 산란 신호와 레이저 유도 선헤리 형광 신호를 계측하기 위해서 측정 신호에 대한 광학 필터의 사용을 제외하고는 동일한 실험 장치를 사용하였다.

레일레이 산란법을 이용한 온도 측정을 위하여 레일레이 산란 단면적에 대한 기초 실험을 통하여 적절한 연료 혼합비를 고려하였으며 비예혼합 화염내의 온도를 정량적으로 계측하였다.

또한, OH와 Hot  $O_2$ 의 농도 분포를 계측하기 위하여 분광 실험을 통하여 형광 신호를 측정하여 모의 실험 결과와 비교하였으며, 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 래일레이 산란법

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

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

여기에서  $C$ 는 실험 상수,  $I_o$ 는 레이저 강도,  $n$ 은 측정 체적내의 총 분자 농도, 그리고  $\sigma_{eff}$ 는 식 (2)로 표현되는 유효 산란 단면적으로 각 분자에 대한 산란 단면적 ( $\sigma_i$ )과 몰분율 ( $x_i$ )의 곱들의 합으로 표현된다.

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

래일레이 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 래일레이 산란 강도 ( $I_r$ )로부터 알려진 온도 ( $T_s$ )와 압력 ( $P_s$ )에서 측정된 래일레이 산란 강도 ( $I_{rs}$ )를 이용하여 온도를 구할 수 있다.

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

대기압 하의 실험에서는 동일한 압력을 가정할 수 있으므로, 온도를 측정하기 위한 주요 변수는 측정 체적내에서의 유효 산란 단면적의 변화를

적절하게 고려해야 함을 알 수 있다.

### 2.2 레이저 유도 형광법 (LIF)과 레이저 유도 선해리 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 사용된다. 그러나 레이저 유도 형광법의 단점인, 고압에서의 충돌에 의한 소광 현상 (collisional quenching)이 발생하여, 형광 신호의 정량화에 많은 한계점을 가져오게 된다. 이에 반해 레이저 유도 선해리 형광법 (LIPF)은 소광 현상을 근본적으로 제거하기 위한 계측법으로 선해리 경로를 이용하는 기법이다.

레이저 유도 형광법 (LIF)과 레이저 유도 선해리 형광법 (LIPF)을 비교하기 위하여 Fig. 1의 여러 가지 에너지 안정화 과정중에 중요한 3가지

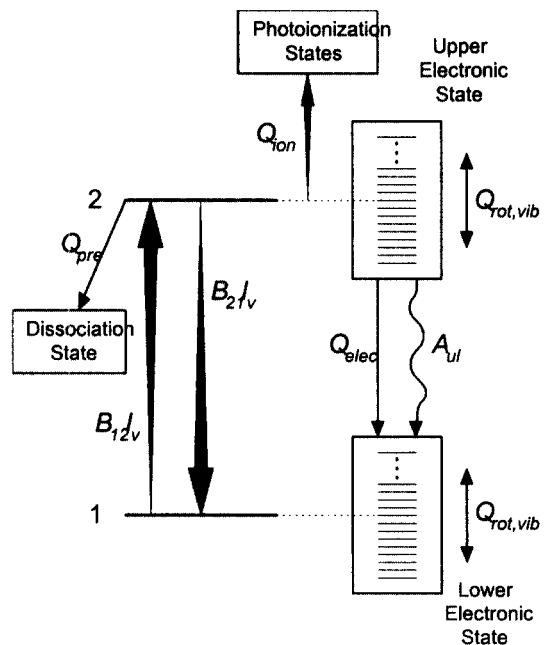


Fig. 1. Critical energy transfer processes in laser induced fluorescence.

과정만을 고려하여 해석하면 다음과 같다. 즉, 여기된 상태는 (a) 형광을  $F$ 로 형광을 방출하거나, (b) 선회리를  $P$ 로 선회리되거나 또는 (c) 소광을  $Q$ 로 충돌에 의하여 소광될 수 있다. 여기에서 형광을  $F$ 와 선회리를  $P$ 는 오직 여기된 분자의 물리적 특성에만 의존하고, 소광을  $Q$ 는 측정시의 주위 조건 (온도, 압력, 조성비 등)에 의존하기 때문에 이를 보정함에 많은 어려움이 있다.

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

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

여기서  $f$ 는 형광 수율 (fluorescence yield)이며,  $\theta$ 는 분자 상수, 레이저 강도, 그리고 실험 장치들에 의존하는 상수값이다. 일반 레이저 유도 형광법 (LIF)에서는 선회리 경로가 없기 때문에  $P=0$ 이다. 고압하에서는 충돌 빈도가 증가하여 소광 현상이 형광에 비해 우세하게 되므로  $Q \gg F$  상태가 된다. 따라서 식 (5)를 수정하면 식 (6)과 같이 표현된다.

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

이 식에서 보면, LIF 신호  $I_F$ 는 소광을  $Q$ 에 의존적이기 때문에  $n_i$ 를 구하기 위한 실험적 보정이 거의 불가능하다. 이에 반하여 선회리 레이저 유도 형광법 (LIPF)에서는 소광율이나 형광을 보다 빠른 선회리율로 인하여  $P \gg Q$ 와  $P \gg F$ 를 만족하기 때문에 LIPF 신호는 식 (7)로 표현된다.

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

위 식에서  $I_F$ 와  $n_i$ 는  $Q$ 의 함수가 아니라, 분자 상수인  $F$ 와  $P$ 의 함수로 표현되기 때문에 측정

시스템에 대한 보정이 가능하다. 그리고 LIPF 신호가 분자 농도  $n_i$ 에 선형적으로 비례한다는 것을 알 수 있다. 선회리 유도 형광법은 선회리 준위가 존재하는 상위 상태로 여기시키기 때문에 일반 레이저 유도 형광 신호보다 형광 강도가 약하다. 따라서 강한 여기 에너지를 갖는 고출력 레이저의 사용은 특히, 2차원 계측에 있어서는 필수적이라 할 수 있다.

### 3. 실험 장치 및 방법

본 실험에 사용된 실험 장치 구성을 Fig. 2에 나타내었다. 사용된 광원은 KrF 엑시머 레이저로서 247.9~248.9nm 사이에서 파장 가변 가능하고 선폭은 0.003nm이며, 20ns 이하의 펄스 길이와 450mJ/pulse의 고출력을 가지고 있다. 레이저 산란 및 형광 신호를 측정하기 위하여 576×384 pixel의 화소수를 갖는 ICCD (16bit) 카메라를 사용하였고 gating은 100ns로 고정하였다.

2차원 계측을 위하여 레이저빔은 cylindrical lens ( $f=1000\text{mm}$ )를 이용하여 빔 높이는 약 20mm, 두께는 0.1mm 이하가 되도록 하였다. 레

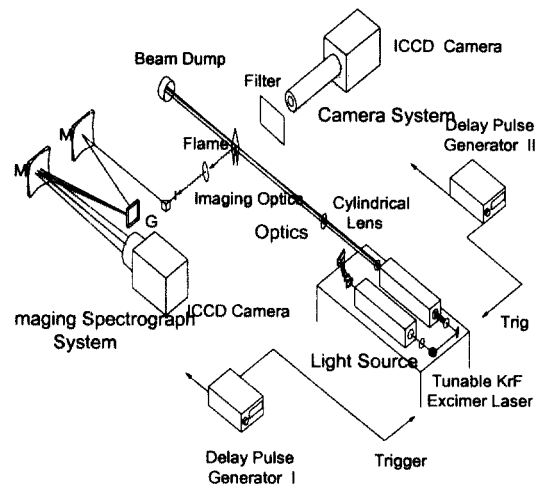


Fig. 2. General laser-based experimental setup for combustion diagnostics.

Table 1. Normalized Rayleigh cross-section,  $\sigma_{iN} = \sigma_i/\sigma_{N_2}$ , for various molecules  $i$  at 248nm<sup>16)</sup>.

| gases $i$        | Absolute value<br>[cm <sup>2</sup> ] | Normalized value |               |
|------------------|--------------------------------------|------------------|---------------|
|                  |                                      | $\sigma_{iN}$    | $\sigma_{iN}$ |
| H <sub>2</sub>   | $3.67 \times 10^{-24}$               | 0.236            | 0.259         |
| N <sub>2</sub>   | $1.555 \times 10^{-26}$              | 1.00             | 1.00          |
| O <sub>2</sub>   | $1.384 \times 10^{-26}$              | 0.89             | 0.844         |
| H <sub>2</sub> O | $1.166 \times 10^{-26}$              | 0.75             | -             |
| CO <sub>2</sub>  | -                                    | 2.25             | 2.364         |
| 비교               | P.Andresen                           | P.Andresen       | Our result    |

이제 광의 shot to shot 세기 변화에 대한 오차를 최소화하기 위하여 레이저 펄스 20 shot에 대한 산란 및 형광 신호를 산술 평균하였다. 래일레이 산란 실험 시에는 렌즈 앞부분에 레이저 라인 간섭 필터를 사용하고 레이저의 파장을 off-resonance로 하여 순수한 래일레이 신호만을 취득하였다. 또한, 형광 실험시에는 UG-11 필터를 사용하여 래일레이 산란 신호를 제거하고 순수한 OH 및 O<sub>2</sub> 분자의 형광 신호만을 취득하도록 하였다.

분광 측정을 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 형광 신호의 수광을 위하여 분광기를 사용하였고 단일 렌즈 ( $f=10\text{cm}$ )를 이용한 image to image법을 사용하였다. 또한, 분광기의 슬릿 폭은 10 $\mu\text{m}$ 로 하였다.

본 실험에 사용된 버너 실험 장치는 지름 50mm의 원통에서 균일한 속도로 공기가 분출되고 동심에 내경 4.4mm인 스텐레스 관을 위치시켜 연료 노즐로 사용하였다. 연료와 주위 공기 유량 제어를 위하여 각각의 유량 범위에 적절한 전자 유량 제어 장치를 사용하였다. 정확한 유량 제

어를 위하여 사전에 습식 유량계 (wet-test gas meter)를 이용하여 사용된 기체들에 대하여 유량 보정 실험을 수행하였다.

본 실험에 사용된 유량 조건은 안정화된 층류 화염을 만들기 위하여 연료의 평균 유속은 2.2m/s, 주위 공기의 평균 유속은 0.26m/s로 설정하였다. 3축 이송 장치를 이용하여 레이저빔과 측정 카메라에 대한 버너의 상대적 위치 및 측정 범위를 제어하였다.

## 4. 실험 결과

### 4.1 래일레이 산란법을 이용한 2차원 온도 분포 측정

식 (1)에서 볼 수 있는 것처럼 기체 분자들의 래일레이 강도는 측정 체적내의 기체 분자들의 농도와 래일레이 산란 단면적에 비례한다. 본 연구에서는 식 (1)을 이용하여 래일레이 산란 단면적을 실험적으로 구하기 위하여 정적 용기안에

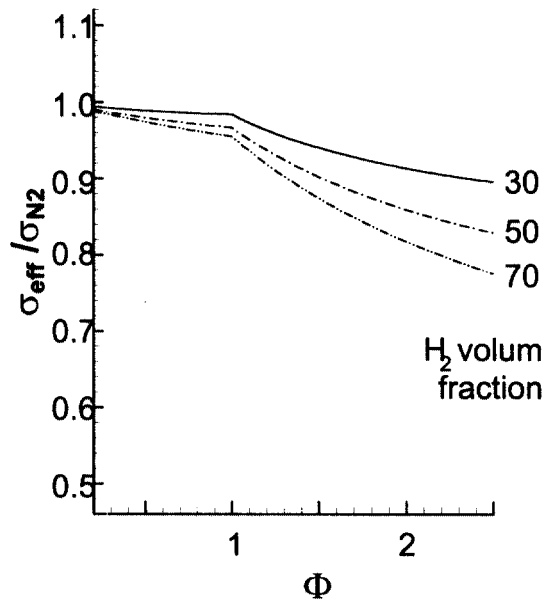


Fig. 3. Relation between effective Rayleigh cross-section and equivalence ratio.

측정하고자 하는 기체를 일정 압력으로 충전시킨 후, 248nm KrF 엑시머 레이저에 의한 2차원 레일레이 이미지를 ICCD 카메라로 측정하였다. 측정된 레일레이 이미지들은 각각의 기체들에 대하여 동일한 조건 (T, P)에서 N<sub>2</sub> 기체의 레일레이 이미지를 측정하여 레일레이 이미지들의 강도를 비교함으로써 N<sub>2</sub>에 대해 표준화된 유효 산란 단면적 ( $\sigma_{iN}$ )을 구하였다. 248nm에서의 측정된 여러 기체 분자들의 레일레이 산란 단면적 결과들과 타 연구자의 결과들에 대하여 Table 1에 나타내었다<sup>16)</sup>.

식 (4)에서 유효 산란 단면적의 변화는 비예혼합 화염에서는 기체의 조성이 위치에 따라 달라진다. 따라서 이 변화를 최소화할 수 있는 연료의 혼합비를 결정하기 위하여 완전 반응을 가정한 연소 생성물의 유효 산란 단면적 ( $\sigma_{eff}$ )과 기준 상

태인 질소 분자의 유효 산란 단면적 ( $\sigma_{N2}$ )의 비를 당량비에 따라 Fig. 3에 나타내었다.

그림의 결과로부터 유효 산란 단면적의 변화를 최소화하기 위하여 체적 혼합 비율이 30% H<sub>2</sub>와 70% N<sub>2</sub>의 혼합기를 연료로 선정하였다<sup>17)</sup>. Fig. 4에 최종 처리된 비예혼합 화염장내의 온도분포를 나타내었다.

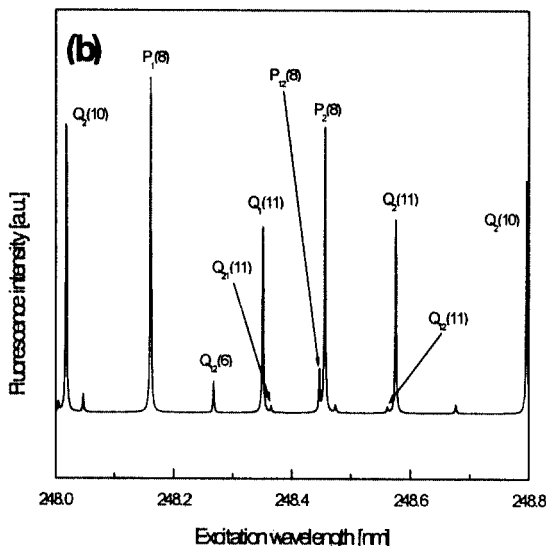
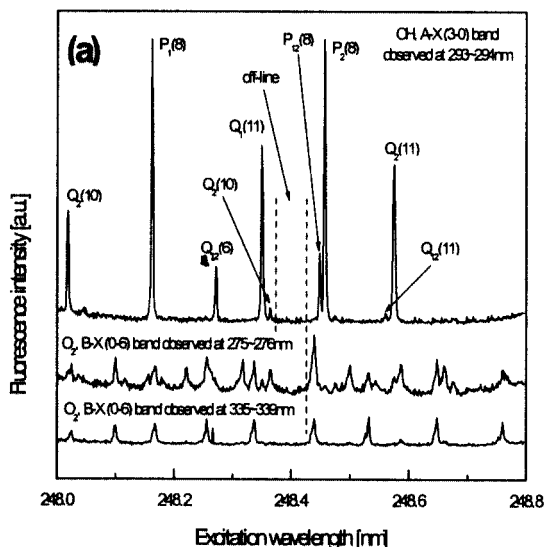


Fig. 4. Temperature image of non-premixed H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> jet flame.

Fig. 5 Excitation spectra of the OH (3-0) and O<sub>2</sub> (0-6) transition; (a) experiment, (b) simulation.

## 4.2 OH 및 O<sub>2</sub> 분자의 형광스펙트럼의 특성

형광 스펙트럼 연구에 이용된 KrF 엑시머 레이저의 가변 파장 영역 (247.9 ~ 248.9nm)에서 흡수되는 대표적인 가스 분자는 OH 와 O<sub>2</sub> 가 있다. 특히 OH 분자의  $v''=0 \rightarrow v'=3$  여기 후,

$v'=3$ 에서 발생하는 형광 신호는 O<sub>2</sub> 분자의  $v''=2 \rightarrow v'=7$  과  $v''=6 \rightarrow v'=0$  여기 후 발생하는 형광에 비하여 세기가 강하며 이러한 사실은 레이저를 broadband (선폭: ~1nm)로 조사하는 경우에 발생하는 형광 스펙트럼에서도 확인할 수 있었다.

OH 분자의  $A^2\Sigma^+(v'=3) \leftarrow X^2\Pi(v''=0)$  천이와 O<sub>2</sub> 분자의 Schumann-Runge band인  $B^3\Sigma_u^-(v'=0) \leftarrow X^3\Sigma_g^-(v''=6)$  천이의 레이저 유도 형광 여기 스펙트럼의 실험 결과와 simulation의 비교를 Fig. 5에 나타내었다. 측정을 위하여 8nm 대역의 영상 분광기를 275nm, 293nm 및 337nm 중심 파장에 고정시켰으며 20번의 측정 평균값을 나타내었다. 알려진 OH 분자의 흡수 스펙트럼과 비교하여 보면 P-branch의 회전 여기 준위 및 Q-branch의 회전 여기 준위를 구별할 수 있다. 실험의 목적에 따라 결정된 회전-진동 에너지 천이 준위에 tunable KrF 엑시머 레이저의 파장을 가변시켜 고정시켰다. 또한, 연소장 및 비연소장에서 래일레이 및 라만 산란 실험시에는 OH 및 O<sub>2</sub> 분자의 공조 (on-resonance) 파장에 레이저 파장을 고정시켰을 경우, 발생하는 형광 신호를 배제하기 위하여 이조 (off-resonance) 파장에 레이저 파장을 고정시켜 실험을 수행하였다.

Fig. 6은 OH 라디칼의 공진 흡수 전이대인  $A^2\Sigma^+(v'=3) - X^2\Pi(v''=0)$  band에서 회전 준위 Q<sub>1</sub>(11)과 P<sub>2</sub>(8)을 여기시켰을 때, 발생하는 형광 스펙트럼을 보여준다. 3-0 준위의 전이율은

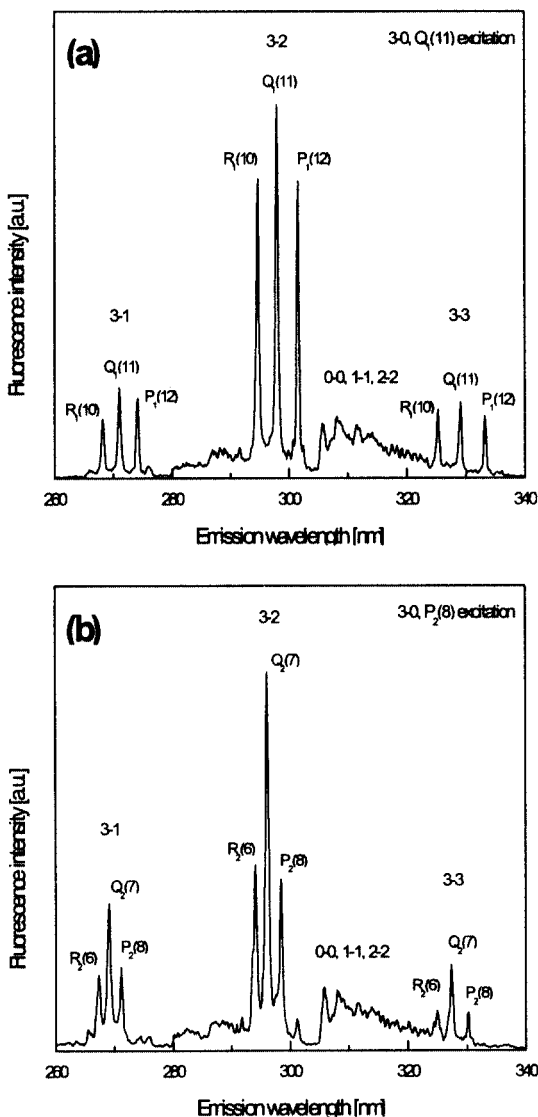


Fig. 6. Fluorescence spectra of the OH (3-0) band; (a) Q<sub>1</sub>(11) excitation, (b) P<sub>2</sub>(8) excitation.

Table 2. Einstein Probabilities from this work compared with selected Results from other authors<sup>(18)</sup>.

| Einstein A coef. | Our Work | Andre-sen | Crosely (calcul.) | Henn-ker | Lear-ner |
|------------------|----------|-----------|-------------------|----------|----------|
| A <sub>30</sub>  | -        | 9.5±2     | 11                | 9        | 12       |
| A <sub>31</sub>  | 152±10   | 130±15    | 173               | 159      | 148      |
| A <sub>32</sub>  | 500      | 500       | 515               | 488      | 466      |
| A <sub>33</sub>  | 110±6    | 140±20    | 113               | 116      | 223      |

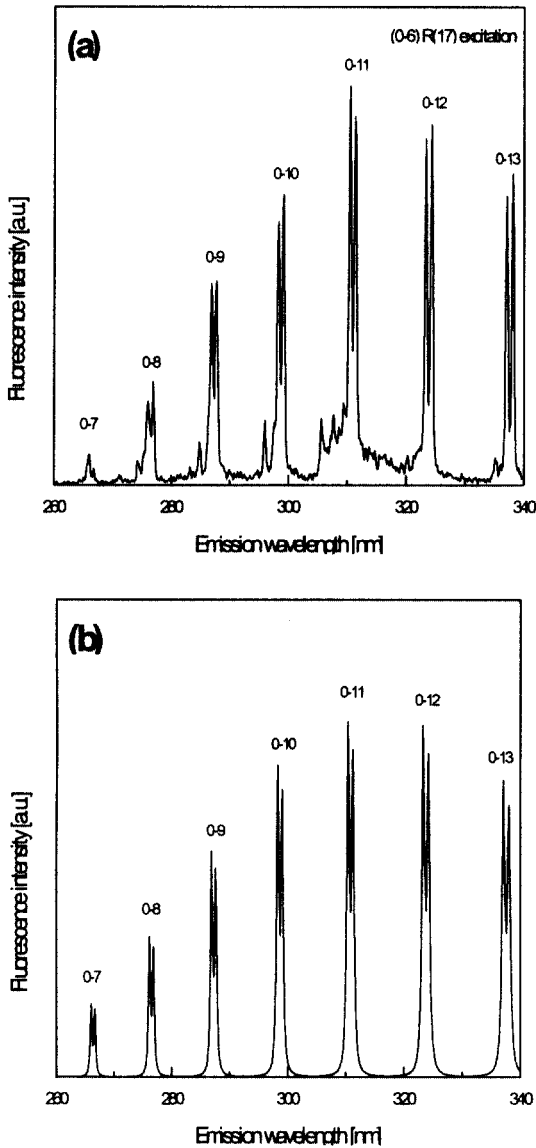


Fig. 7. Fluorescence spectra of the O<sub>2</sub> (0-6) R(17) band; (a) experiment, (b) simulation.

0-0 전이율에 비하여 작지만 고출력 엑시머 레이저와 ICCD의 사용으로 형광의 S/N 비가 매우 우수하다. OH 라디칼은 여기되는 회전 준위에 관계없이 공통적으로 3개의 강한 형광 스펙트럼 영역대가 존재한다. 그림에서 볼 수 있듯이 3-1 (265~275nm), 3-2 (295~305nm), 3-3 (325~

335nm) 전이에서 발생하는 형광들이다. 또한 각 영역대에는 3개의 P, Q, R 스펙트럼 선들이 존재한다.

Table 2는 본 연구에서 측정한 3-1, 3-2, 3-3의 형광 스펙트럼 세기의 비를 계산하여 구한 각 band의 Einstein A 상수와 다른 연구의 결과를 나타내었다. 데이터는 앞의 여기 형광 실험과 동일한 방법으로 측정하였고, 각 데이터는 20번 측정한 후 평균하여 표준 편차를 구하였다. 타 연구 결과 중, Crosely, Henker, Learner 등은 A<sub>00</sub>를 1000으로 하였을 때 상대적인 값이고, Andresen 과 본 연구는 A<sub>32</sub>를 500으로 놓고 A<sub>31</sub>과 A<sub>33</sub>의 상대적인 값을 구한 결과이다. 본 연구 결과는 비교적 이론적인 계산 결과 및 기타 실험 결과<sup>(8)</sup>와 잘 일치됨을 알 수 있다. A<sub>30</sub>는 영상 분광기를 사용하는 경우에 매우 강한 레일레이 산란 신호 때문에 측정할 수 없었다. 형광 스펙트럼 측정 결과 A<sup>2</sup>Σ' (v'=3) - X<sup>2</sup>Π (v''=0) band에서 발생하는 대부분의 형광은 3-2 전이에 의한 것임을 알 수 있다.

OH 분자의 형광 스펙트럼에서 흥미로운 사실 중의 하나는 3-2 형광의 좌우에서 나타나는 보다 낮은 진동 준위 (v'=0,1,2)에서 기저 준위로 떨어지면서 발생하는 형광 신호이다. 이러한 형광은 화염의 자발광과도 일치할 수 있다. 이러한 사실을 확인하기 위해 ICCD의 gating 시간을 300μs로 증가시켰을 때, 이 파장대에서 측정되는 형광의 세기는 ICCD의 동일한 증폭 세기에서 포화가 될 정도로 강하게 나타난다. 그러나 본 연구에서 실험한 100ns에서는 ICCD의 자체 잡음 수준으로 작게 측정되었다. 따라서 v'=0,1,2에서 발생하는 형광 신호는 v'=3로 여기된 분자가 충돌 등에 의하여 보다 낮은 진동 준위로 전이된 것으로 볼 수 있다. 0-0의 전이율이 매우 크므로 이 전이에서 발생하는 형광의 세기도 비교적 크게 측정되고 있다. 그러나 v'=3에서 발생하는 형광 스펙트럼과는 달리 broad하게 나타나는 것은 충돌에 의하여 여러 회전 준위로의 전이가 발생하고, 이러한 많은 회전 준위에서 기저 준위로 떨어지



면서 형광을 방출하기 때문이다. 따라서 이러한 스펙트럼의 특성은 화염내에서 분자간의 충돌에 의한 에너지 전이 (energy transfer), 즉 진동 에너지 전이에 대한 정보를 제공해 준다고 볼 수 있다.  $v'=3$  준위의 수명 시간은 약 100ps 정도이나  $v'=0,1,2$  준위의 수명 시간은 대기압 화염에서 대략 2ns 정도이기 때문에 약 10bar까지는  $P \approx 10Q$  정도이므로 충돌에 의한 효과를 무시할 수 있다. 그러나 엔진과 같이 매우 높은 고압하에서 충돌에 의한 소광률은 선택리율과 비슷하기 때문에 이것에 의한 형광 신호의 왜곡은 크다. 따라서 대기압하에서의 이와 같은 형광 스펙트럼의 분석은 매우 높은 고압에서의 충돌 효과를 예측할 수 있는 정보를 제공해 줄 것으로 사료된다.

Fig. 7은  $O_2$  분자의 Schumann-Runge band  $B^3\Sigma_u^- (v'=0) - X^3\Sigma_g^- (v''=6)$ 에서 R(17)을 여

기시켰을 때 나타나는 형광 스펙트럼이다.  $O_2$  는 OH 분자에 비하여 280~360nm까지 다소 넓게 분포되어 있다. Fig. 7의 (a)는  $O_2$  분자의 Franck-Condon factor를 이용하여 컴퓨터에서 모의 실험한 결과이다. 모의 실험에서 각 스펙트럼선은 로렌쯔 (Lorentzian) 형태로 하였으며 선폭은 분광기의 분해능을 고려하여 0.5nm 정도로 하였다. 전이 준위는 본 실험의 측정 영역대와 일치하기 위하여  $v'=0 \rightarrow v''=7\sim 13$  까지 하였다.  $O_2$  분자의 특성에 의하여 스펙트럼은 P와 R선만 나타나고 있다. Fig. 7의 (b)는 레이저를 R(17) 흡수 파장에 고정하여 측정한 스펙트럼이다. 0-11 형광의 좌우에 작게 나타나는 스펙트럼은

레이저의 작은 broadband 광에 의한 영향이다. 형광 파장의 위치 및 세기 경향이 모의 실험 및

Fig. 8. LIPF image of OH in  $H_2/N_2$  jet diffusion flame.

Fig. 9. LIPF image of hot  $O_2$  in  $H_2/N_2$  jet diffusion flame.

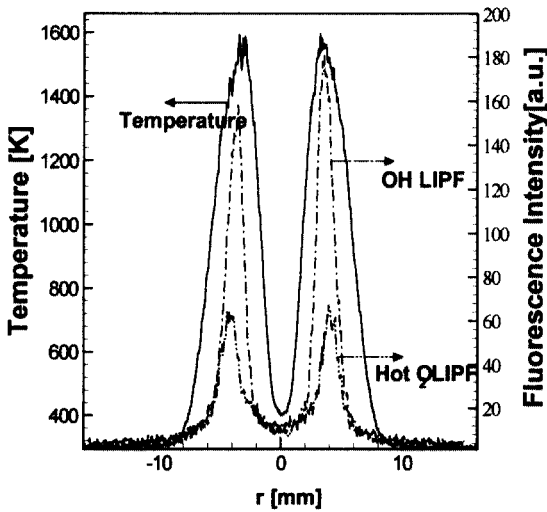


Fig. 10. Profiles of temperature, OH and O<sub>2</sub> concentration at z=10mm.

타 연구 결과<sup>21)</sup>와 잘 일치하고 있다. 모의 실험결과와 비교하여 낮은 파장대에서 측정된 형광의 세기가 비교적 낮게 측정된 것은 측정시 248nm의 레이저 산란 신호의 제거를 위하여 사용된 UG-11 필터 및 ICCD의 감응도, 분광기내의 회절 격자의 효율이 다소 낮은 이유 때문인 것으로 사료된다.

### 4.3 레이저 유도 선해리 형광법을 이용한 2차원 농도 분포 측정

248nm대의 발진 파장을 갖는 KrF 엑시머 레이저의 가변 범위내에서 OH와 O<sub>2</sub>는 많은 여기 라인들을 가지고 있으며 이는 앞 절의 분광 실험을 통하여 확인할 수 있었다. 분광 실험을 통하여 가장 강한 선해리 형광 강도를 가지고 있는 OH의 (3-0), P<sub>2</sub>(8)과 O<sub>2</sub>의 (0-6), R(17) 여기 라인들을 각각의 농도 계측을 위한 여기 라인들로 선정하였다.

화염내의 OH 농도 이미지는 Fig. 8에 나타내었다. OH의 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 현상

이 나타나는 경우에는 상류 부분에서 높은 온도를 가지며 연료가 고갈되는 축 방향 위치에서 최대 온도가 중심 축에 위치하지 않고 약간 떨어진 위치에 존재하게 되는데 이러한 사실은 온도 분포 이미지 결과와 매우 잘 일치한다<sup>19)</sup>.

화염내의 O<sub>2</sub> 분자의 농도 이미지는 Fig. 9에 나타내었다. 온도 이미지 결과와 비교했을 때, 고온인 영역에서만 계측이 됨을 알 수 있다. 이는 R(17) 여기 라인은 기저 상태내의 높은 진동 준위 (v''=6)을 여기시키는데, 상대적으로 낮은 온도에서는 상위 진동 준위의 수밀도가 거의 분포하지 않기 때문이다.

각각의 실험 결과들을 비교하기 위하여 Fig. 10에 노즐 출구로부터 10mm 떨어진 지점에서의 측정치들을 서로 비교하였다. OH 농도 분포를 보면 OH의 LIPF 강도가 강하여 높은 신호 대 잡음비를 유지하고 있음을 알 수 있다. 좌우 대칭성이 유지되지 않은 이유는 레이저 빔이 우에서 좌로 입사할 때, 우측에 위치한 OH 분자의 레이저 광 흡수에 의한 레이저 강도 감소 때문인 것으로 사료된다. OH 농도 분포와 온도 분포를 비교해 보면, OH 농도의 최고 지점과 최대 온도 지점이 일치함을 알 수 있다.

Hot O<sub>2</sub> 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 O<sub>2</sub>가 약하게 계측되는 이유는 이 지점에서 급격한 O<sub>2</sub>의 소모로 인한 것으로 사료된다.

## 5. 결 론

가변형 KrF 엑시머 레이저를 이용하여 층류 비예혼합 30%H<sub>2</sub>/70%N<sub>2</sub> 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) 형광 스펙트럼의 분석을 통하여 레이저 조사 시 나오는 형광의 신호는 레이저의 조건과 화염의 안정도, 검출기의 특성에 민감하게 반응함을 알 수 있었다.
- 3) OH 와 O<sub>2</sub>의 형광 스펙트럼은 형광 모의 실험 결과와 잘 일치하였으며, OH 분자의 0-3 여기 시 발생하는 형광은 대부분 3-2 전이에 의한 것임을 확인하였다.
- 4) OH 분자의 형광 스펙트럼에서는  $v'=3$  준위로 여기된 OH 분자가 충돌에 의하여 보다 낮은 진동 에너지로 소량 전이하는 것을 확인하였다. 이것은 특히 OH 분자가 엔진과 같은 매우 높은 고압의 연소장에서 존재할 때는 충돌에 의한 소광률이 선헬리 전이율과 비슷하기 때문에 엔진에서의 OH 분자의 형광 측정시 발생하는 오차를 줄일 수 있는 가능성을 제공해 줄 것으로 사료된다.
- 5) 레이저 유도 선헬리 형광법을 이용하여 OH 및 Hot O<sub>2</sub>의 농도 분포의 2차원 이미지를 가시화하였고 상대적인 농도 분포를 계측하였다.
- 6) 계측된 온도 분포 이미지와 OH 농도 분포 이미지로부터 화염 끝 개방 (flame tip opening) 현상을 확인할 수 있었다.
- 7) 상세 화염 구조 및 연소 특성 해석을 위한 광 계측 기법의 타당성을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- 1) D. Stepowski and G. Cabot : "Single-Shot Temperature and Mixture Fraction Profiles by Rayleigh Scattering in the Development Zone of a Turbulent Diffusion Flame", Combust. Flame 88, 1991, pp. 296-308.
- 2) R. W. Dibble and R. E. Hollenbach : "Laser Rayleigh Thermometry in Turbulent Flames", Eighteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburg, 1981, p. 1489-1499.
- 3) F. -Q. Zhao, T. Takemoto, and K. Nishida : "Two-Dimensional Measurements of the Fuel Vapor Concentration in the Combustion Chamber of a SI Engine with Laser Rayleigh Scattering", SAE Paper, No.922389, 1992.
- 4) R. E. Setchell : "Initial Measurements within an Internal Combustion Engine Using Raman Spectroscopy", Sandia National Laboratories Report, SAND 78-1220, 1978.
- 5) S. C. Johnston : "Precombustion Fuel/Air Distribution in a Stratified Charge Engine Using Laser Raman Spectroscopy", SAE Paper, No.790433, 1979.
- 6) J. R. Smith : "Temperature and Density Measurements in an Engine by Pulsed Raman Spectroscopy", SAE Paper, No.800137, 1980.
- 7) P. Miles and M. Dilligan : "Quantitative In-Cylinder Fluid Composition Measurements Using Broadband Spontaneous Raman Scattering", SAE Paper, No.960828, 1996.
- 8) P. R. Crosley : "Semiquantitative Laser Induced Fluorescence in Flames", Combust. Flame 78, 1989, pp. 153-167.
- 9) R. K. Hanson, J. M. Seitzman, and P. H. Paul : "Planar Laser-Fluorescence Imaging of Combustion Gases", Appl. Phys., B50, 1990, pp. 441-454.
- 10) T. A. Baritaud and T. A. Heinze : "Gasoline Distribution Measurements with PLIF in a SI Engine", SAE Paper, No.922355, 1992.
- 11) H. Neij and M. Alden : "Application of Two-Photon Laser-Induced Fluorescence for

- Visualization of Water Vapor in Combustion Environments", *Appl. Opt.*, Vol. 33, No. 27, 1994, pp. 6514-6523.
- 12) M. Engelhard, W. Jacob, and W. Moller : "New Calibration Method for the Determination of the Absolute Density of CH Radicals through Laser Induced Fluorescence", *Appl. Opt.*, Vol. 34, No. 21, 1995, pp. 4542-4551.
- 13) T. Nakada : "Unburnt Gas Temperature Measurements Using Single Shot CARS in a Spark Ignition Engine", *International Symposium COMODIA 90*, 1990, pp. 393-398.
- 14) M. Lebel and M. J. Cottreau : "Study of the Effect of Residual Gas Fraction on Combustion in a S.I. Engine Using Simultaneous CARS Measurements of Temperature and CO<sub>2</sub> Concentration", *SAE Paper*, No.922388, 1992.
- 15) A. C. Ecbreth : "Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species", *Abacus-press*, UK, 1996, pp. 268-272.
- 16) A. Koch and P. Andresen : "Planar Imaging of a Laboratory Flame and Internal Combustion in on Automobile Engine using UV Rayleigh and Fluorescence Light", *Appl. Phys.*, B56, 1993, pp. 177-184.
- 17) M. Komiyama, T. Kema, and T. Takagi : "Measurements of OH Concentration and Temperature in Diffusion Flame by Excimer Laser-induced Fluorescence and Rayleigh scattering", *Trans. of JSME*, Vol. 56, No. 523, 1990, pp. 810-816.
- 18) P. Andresen, A. Bath, W. Groger, H. W. Lulf, G. Meijer, and J. J. Meuler : "Laser Induced Fluorescence with Tunable Excimer Lasers as a Possible Method for Instantaneous Temperature Filed Measurements at High Pressures: Checks with an Atmospheric Flame", *Appl. Opt.*, Vol. 27, No. 2, 1988, pp. 365-378.
- 19) 김후중, 김용모, 안국영 : "수소 확산 화염의 구조에 미치는 Lewis 수의 영향", *대한기계학회논문집(B)*, Vol. 21, No. 9, 1997, pp. 1126-1138.