

# 레이저 유도 백열법을 이용한 화염 내부 매연 농도 측정

이 승\* · 이상협\* · 이병준\*\* · 한재원\*\*\*  
(1999년 10월 25일 접수)

## Measurements of Soot Volume Fraction Using Laser Induced Incandescence

Seung Lee, Sang Hup Lee, Byeong Jun Lee and Jae Won Hahn

**Key Words:** Laser Induced Incandescence(레이저 유도 백열법), Laser Scattering/Extinction(레이저 산란/감쇠법), Soot Volume Fraction(매연 체적분율).

### Abstract

Laser induced incandescence (LII) method is frequently used to measure soot volume fraction in flames. In this study, experiments were performed to measure soot volume fraction in coaxial diffusion flame using LII method and calibrated with laser scattering/extinction method. The effects of laser intensity ( $> 1 \times 10^8 \text{W/cm}^2$ ), laser wavelength (532nm, 1064nm) and detection wavelength (400nm, 600nm) on the LII signal were investigated. On the range of  $4 \times 10^8 \sim 8 \times 10^8 \text{W/cm}^2$  there were no effects of laser intensity on LII signal. Except these ranges, LII signal was increased with laser intensity. For the long gate width, the LII signals of the higher laser intensity ( $> 8 \text{GW/cm}^2$ ) cases had better correlation with soot volume fraction which were measured by laser extinction method compared with lower laser intensity cases. The errors of 2-dimensional cases at the calibration height were approximately 50% regardless of laser wavelength.

### 1. 서 론

자동차, 가스터빈 등에서 매연배출은 환경오염의 주된 원인의 하나이며, 매연이 형성되기 전 단계에서 형성된 다중고리 방향족 화합물 및 매연의 배출은 돌연변이 유발 요인, 암 발생 원인으로 작용하는 등 인체에 직·간접으로 영향을 미친다. 이러한 매연의 측정에는 직접 탐침을 이용한 방법과 유동장에 영향을 주지않는 비접촉식 방법인 레이저 산란/감쇠법(Laser scattering/extinction method)과 레이저 유도 백열법(Laser induced incandescence, LII)이 사용된다. 레이저

유도 백열법은 실시간 측정과 2차원 측정이 가능하기 때문에 최근에 그 연구가 활발히 일어나고 있다.

레이저 유도 백열법에 대한 연구는 1977년 Eckbreth<sup>(1)</sup>에 의해 매연이 있는 화염에서 라만 산란 신호를 압도하는 매연입자의 배경광도(background luminosity)의 관찰로부터 이런 배경광도가 화염에서 매연질량농도를 측정하는데 유용하다고 제안한 이후 이루어졌다. 이후 Melton<sup>(2)</sup>은 레이저세기(flouence)와 매연입자크기의 함수로서 LII 신호를 이론, 수치적으로 예측하고, 매연질량농도에 대한 LII의 비례성을 보였다. Melton 모델의 확대로, Hefeldt<sup>(3)</sup>는 어떻게 파장에 의존하는 물성치(property)가 각각 다른 직경의 매연입자의 흡수 및 방출특성을 변경하는가를 해석함으로써 Melton의 이론은 확장하였다.

Quay 등<sup>(4)</sup>은 층류 확산화염에서 LII신호가 광

\* 영남대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 영남대학교 기계공학부

E-mail : bjlee@yu.ac.kr

TEL : (053)810-3526 FAX : (053)813-3703

\*\*\* 한국표준과학연구원

산란/감쇠법으로 측정된 매연 체적분율과 잘 일치함을 보였다. 이들은 LII 신호가 어떤 세기 밀( $1.2 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ )에서는 레이저세기에 선형적이며, 어떤 세기 위에서는 '포화'되고 거의 일정한 값을 유지함을 보였다.

Ni 등<sup>(5)</sup>은 LII신호의 2차원 이미징(imaging)으로 LII기법을 확대하였고, 간단한 층류화염에서 복잡한 난류화염까지 연소환경 범위에 적용하였다.

Santoro 등<sup>(6)</sup>은 광산란/감쇠법을 이용하여 동축 확산화염에서 매연입자의 입자의 크기 분포를 측정하여, 화염의 구조가 매연 생장이 지배적인 영역과 산화가 지배적인 영역의 2개의 영역으로 나누어짐을 밝혔으며 이 연구가 LII 신호의 정량화에 많이 이용되어지고 있다.<sup>(4,5)</sup>

발생하는 LII 신호는 사용되는 레이저의 공간 분포에도 영향을 받음이 밝혀졌다.<sup>(4,5)</sup> 즉, 사각형 분포를 갖는 레이저의 경우 포화된 이후 LII 신호는 감소하는 경향을 가지나, 가우스형의 공간 분포를 갖는 레이저의 경우 입사되는 레이저 광의 강도가 커지면 포화된 후에도 증가하는 경향을 나타낸다. 이와 아울러 대칭인 화염에서 발생하는 LII 신호가 레이저의 강도에 따라 비대칭성으로 검출됨이 확인되었다. Kosaka 등<sup>(7)</sup>은 비정상 spray연소에서 매연의 생성과 산화에 대한 연구에 LII법을 적용하였다. Dec 등<sup>(8,9)</sup>은 LII를 디젤엔진에서 시간-변동 연소환경의 정성적인 매연분포 측정에 적용하였다. 또한 Choi 등<sup>(10)</sup>은 중심선에 대한 광소멸법과 LII 신호로부터, 매연의 체적분율에 대한 LII 신호의 보정법을 제안하였다.

이러한 대부분의 연구에서 매연 분포의 정량화는 LII 신호 분포가 매연의 체적분율 분포와 동일하다는 가정 하에 광산란 등의 방법으로 구한 한 지점의 매연 체적분율을 사용하여 보정상수를 구하고, 이 보정상수를 전체 분포에 곱하여 행하고 있다. 그러나 레이저 파장, 강도 및 수광부에 따라 매연의 농도 분포가 어떠한 영향을 받는지에 대한 연구는 미흡하다. 따라서 본 연구에서는 긴 게이트폭(320ns)인 경우에서 LII 신호의 발생부(레이저강도, 파장)와 수광파장이 매연 체적분율에 미치는 영향에 관하여 고찰하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

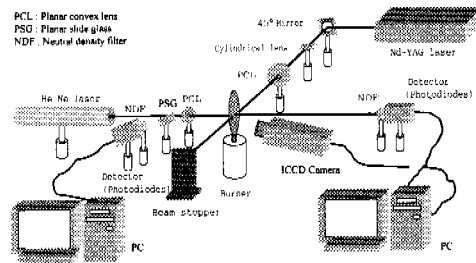


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

본 실험의 장치는 크게 버너와 광학측정장치로 구성되어 있다[Fig. 1참조]. 버너는 프로판(순도 99.99%)이 공급되는 내경 10.5mm, 외경 12.7mm의 연료 공급용 튜브와, 외부에 공기가 공급되는 내경 101.5mm, 외경 106mm의 튜브로 이루어진 동축류 확산 화염 버너를 사용하였다. 공기를 공급하는 외부 튜브에는 하니콤과 3mm의 유리구슬로 균일한 유동이 생성되도록 하였다. 연료 노즐 출구유속 1.8 cm/s, 공기 유량 70 L/min 이 되도록 조절하였다.

LII 신호 발생을 위해 Nd : YAG 레이저(Continuum, 600mJ/pulse @532nm)의 1064nm, 532nm의 파장을 사용하였으며, LII 신호 검출을 위해 400nm(fwhm 10nm)와 600nm(fwhm 10nm)의 필터를 사용하였다. 발생된 LII 신호는 105mm 망원 렌즈를 장착한 ICCD 카메라(ORIEL, Instaspec V)를 사용하여 검출하였다.

LII 신호의 보정을 위한 레이저 산란/감쇠 실험에서는 20mW의 He-Ne 레이저와 중심 파장 632.8 nm의 필터를 사용하였으며, 감쇠된 레이저 신호는 광다이오드(Hamamatsu: S1337-1010BQ)로, 산란 신호는 ICCD 카메라로 검출하였다.

Nd : YAG 레이저광을 직경 54mm, 초점거리 500mm의 볼록렌즈로 측정영역에서 집광시켜 일차원 LII 신호를 얻거나, 초점거리 -12.7mm의 실린더형 렌즈를 사용하여 레이저광을 펼친 후, 볼록 렌즈(f:500mm)로 평행광을 만들어 이를 측정 지점에 조사하여 2차원 LII신호를 발생시켰다. 레이저광은 1064nm와 532nm의 두 종류를 사용하였으며, 각각에 대해 600nm와 400nm의 필터를 사용하였다. 편의상 1차원 LII 신호 측정실험은 측정부에서 레이저강도가  $1\text{GW/cm}^2$ 를 중심으로 저출력과 고풍력으로 구분하여 수행하였다. 저출력 실험은 편광을 사용하여 펄스 당 0.05~

1.05mJ의 레이저광을 폭 1.6mm로 줄인 후 다시 f:500mm 렌즈로 집광시켜 수행하였다. 고출력 실험은 펄스 당 2~100mJ의 레이저를 f:500mm의 렌즈로 집광시켜 수행하였다. 화염 배경효과(background)의 영향을 제거하기 위해 레이저광이 없는 상태에서의 신호를 측정하여, 데이터 처리 과정에서 LII 신호에 빼주었다. LII 신호 측정에서 사용된 ICCD 카메라의 게이트 폭(Gate Width)은 320ns로 하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 레이저 산란/감쇠 신호 측정

매연 입자를 입사레이저 파장에 비하여 충분히 작은 구형 입자로 가정하는 경우에 매연 입자의 체적 분율  $\phi$ , 크기  $D_{63}$  및 수밀도  $N$ 는 다음과 같다.<sup>(6,11)</sup>

$$\phi = \frac{\lambda K_{ext}}{6\pi E(\tilde{m})} \quad (1)$$

$$D_{63} = \lambda \left( \frac{4}{\pi^2} \frac{E(\tilde{m})}{F(\tilde{m})} \frac{Q_{VV}}{K_{ext}} \right)^{1/3} \quad (2)$$

$$N = \frac{12\phi}{\pi D_{63}^3} \quad (3)$$

$$\frac{I_W}{I_0} = Q_W V_C \quad (4)$$

$$\frac{I_{ext}}{I_0} = \exp \left[ - \int_{x_c}^{-x_0} K(x, y) dx \right] \quad (5)$$

$$F(\tilde{m}) = \left| \frac{\tilde{m}^2 - 1}{\tilde{m}^2 + 2} \right|^2 \quad (6)$$

$$E(\tilde{m}) = \text{Im} \left( - \frac{\tilde{m}^2 - 1}{\tilde{m}^2 + 2} \right) \quad (7)$$

여기서  $\lambda$ : 입사에너지 파장,  $K_{ext}$ : 소멸계수,  $\tilde{m}$ : 매연의 굴절계수,  $f_N$ :  $(D_{63}/D_{30})^3$ ,  $I_0$ : 입사광의 강도,  $I_W$ : 산란된 레이저광의 강도,  $V_C$ : 측정 체적,  $I_{ext}$ : 감쇠된 레이저광의 강도이며, 굴절계수는 650nm에 해당하는 1.57~0.56i를 사용하였다.<sup>(12)</sup> 레이저가 매연에 의하여 감소되는 양( $I_{ext}/I_0$ )의 공간적 측정과 수직으로 편광된 레이저가 매연에 의해 수직으로 산란된 성분을 측정하여

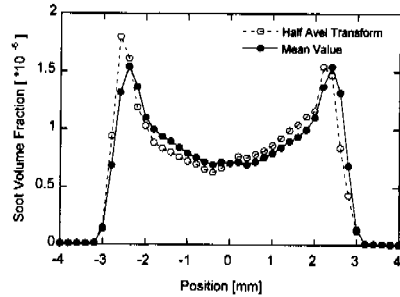


Fig. 2 Radial profile of soot volume fractions

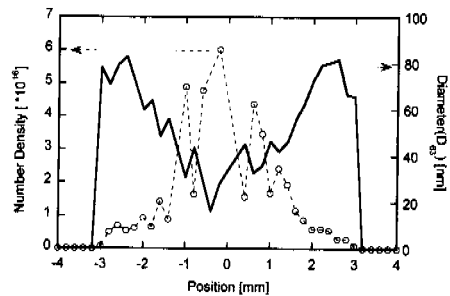


Fig. 3 Radial distribution of number density and soot diameter

매연의 체적분율과 수밀도, 매연 입자의 크기 등을 구하였다.

Fig. 2는 버너 출구로부터 30mm 높이의 화염단면에서 구한 매연의 체적분율을 나타낸다. 식(5)는 레이저광의 경로에 대하여 적분된 값이므로 이를 각 위치에 대하여 변환시키기 위하여 Abel 변환을 수행하였다. 본 실험과 같이 중심축에 대하여 대칭인 화염의 매연 체적분율은 좌우대칭의 형태이나, 본 실험의 경우 좌·우측 체적분율의 최대치가 15% 차이가 나고, 버너의 1/4과 3/4 되는 지점에서 좌·우측 체적분율은 18% 차이가 남을 볼 수 있다. 본 실험이 수행된 영역은 높이 변화에 따라 매연의 체적분율이 많이 변하는 영역(중심에서 2차원 LII 신호가 높이 0.5mm 변할 때 30% 변하는 영역(Fig. 8 참조))이므로, 노즐 선단부에 대하여 버너의 이송이 평행이 아닌 각도로 이송, 혹은 레이저광의 버너 출구 단면과의 비평행성 등에 의한 것으로 유추된다. 좌우대칭의 불균일성을 제거하는 방법으로 본 실험에서는

버너 중심에 대하여 좌우에 있는 값을 평균한 결과를 택하기로 한다.(Fig. 2의 속이 찬 원)

Fig. 3은 레이저광 산란 실험으로 측정된 매연의 수밀도와 직경( $D_{63}$ )을 나타낸다. 본 조건에서 매연 입자의 크기는 30~80nm, 수밀도는  $0.55 \sim 5.7 \times 10^{16}$ 으로 변하며 화염의 중앙부에 직경이 작은 많은 수의 매연이 있으며, 화염 측면부에 큰 크기의 매연이 적은 양 존재함을 볼 수 있다. 이는 화염 전면에서 생성된 매연 입자가 유선을 따라 화염 측면부로 가면서 합체 및 성장이 일어나는 것에 기인한다.

### 3.2 일차원 LII 신호 측정

Fig. 4는 저출력의 경우에 레이저가 화염에 입사되는 쪽의 LII 신호의 최대치를 레이저 강도에 따라 나타낸 그림이다. LII 신호는 ICCD 카메라로 250회 측정된 신호를 합산한 결과이며, 카메라 이득과 노출은 (a), (b)에 대해 동일한 조건을 사용하였다. 위 그림에서 레이저 파장에 따라 레이저 강도가 다른 이유는 동일한 system setup를 사용하여도 측정영역에 집광되는 레이저광의 직경이 다르기 때문이다. 일반적으로 LII 신호는 특정 세기 ( $1.2 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ ) 밑에서는 레이저 강도에 선형적이며, 그 이후에서는 포화되어 거의 일정한 값을 유지하거나,<sup>(4)</sup> 또는 감소하는 경향<sup>(5)</sup>을 나타낸다. 그러나, 본 실험의 경우 532nm를 사용한 경우 LII 신호가 거의 선형적으로 증가하는 경향을 나타내고, 1064nm의 경우는 비선형적으로 증가함을 볼 수 있다. 레이저 강도가 더욱 커진 경우(Fig. 5)는 두 경우 모두 선형적으로 증가함을 볼 수 있다.

여기파장에 따른 차이는 레이저 파장에 따른 흡수효율(absorption efficiency)의 차이에 기인한다. 즉, 동일한 레이저 에너지라도 매연입자가 에너지를 흡수하는 정도의 차이에 따라, 매연입자의 가열 및 증발에 차이를 나타내게 되어 레이저 강도에 따른 LII 신호의 차이를 나타내게 된다.  $1 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$  이하에서는 레이저 강도에 영향을 받는 LII 신호가 얻어지고  $2 \times 10^7 \sim 1 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  영역에서는 일정한 LII 신호가 얻어지며, 그 이상에서는 다시 선형적인 LII 신호가 얻어진다는 Bengtsson<sup>(13)</sup>의 결과와 유사한 결과임을 볼 수 있다. 일정한 LII 신호를 내는 영역은 강한 레이저에 의하여 레이저광의 가운데에서 매연이 기화하

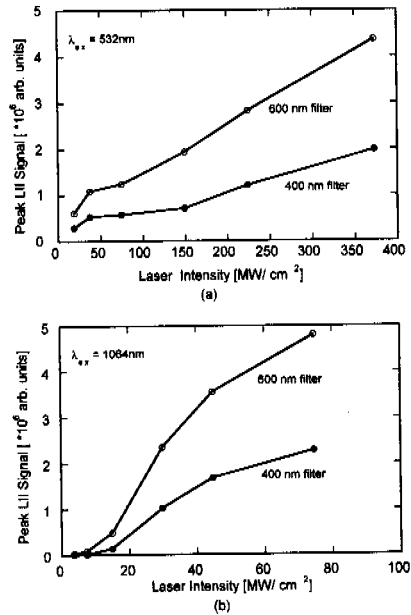


Fig. 4 Effect of laser intensity on the LII signal when low power was used. (a)532nm, (b)1064nm

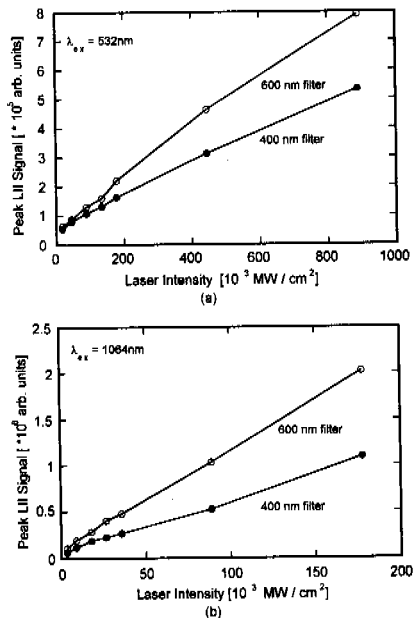


Fig. 5 Effect of laser intensity on the LII signal when high power laser was used. (a)532nm, (b)1064nm.

여 감소되는 LII 신호를 레이저 폭의 증가로 인한 LII 신호증가가 상쇄하기 때문이다.

수광부 파장에 따른 LII 신호의 차이는 350~650nm 부근에서 LII 신호는 5000K 근처의 흑체 복사와 유사하다는 Quay 등<sup>(4)</sup>의 결과로부터 설명할 수 있다. 즉, 5000K의 흑체 복사인 경우 Wien의 법칙으로부터 최대에너지를 내는 중심파장을 구하면 579.6nm가 되고 이를 중심으로 흑체 복사에너지가 감소하므로 이 중심파장에 가까운 600nm 필터를 사용한 경우가 400nm 필터를 사용한 경우보다 더 큰 LII 신호를 내게된다.

본 실험의 조건에서 일으킬 수 있는 간섭은 레이저 산란과 레이저유도 형광, C<sub>2</sub> swane band의 효과 등이다. 모든 조건에서 동일하게 레이저 출력에 비례하여 LII 신호가 증가하므로 1064nm의 레이저를 사용하고 400nm의 필터를 사용한 경우에 대하여 설명하기로 한다. 본 실험에서 LII 신호검출에 사용된 ICCD 카메라는 그 특성상 180~850nm 범위만 수광하게 되므로 레이저 산란의 효과는 배제되고, 1064nm에서 여기되어 400nm ± 5nm에서 레이저 유도 형광신호를 내는 화염내 물질이 없고, C<sub>2</sub> swane band는 436.49nm 이상이므로 이에 대한 간섭도 배제할 수 있으므로 본 실험에서의 다른 신호의 간섭은 무시할 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 6은 LII 신호의 최대치와 화염중앙의 LII 신호의 비를 나타낸 것이다. 여기서 Extinction으로 표시된 부분은 레이저광 감소법으로 구한 농도의 좌·우측 최대치와 버너중앙 값의 비로서 본 실험에서 기준으로 삼을 수 있는 범위를 나타낸다. 532nm의 레이저를 사용하고 600nm의 수광부를 사용하는 경우가 레이저 감소법의 결과와 가장 잘 맞는 것을 볼 수 있다. 또한 9(GW/cm<sup>2</sup>) 이상의 높은 에너지 강도를 사용한 경우(b)가 9(GW/cm<sup>2</sup>) 이하의 에너지강도를 사용한 경우보다 레이저 광산란법에 잘 맞는 것을 볼 수 있다. 이는 본 실험에서 사용한 ICCD 카메라의 게이트 폭이 큰 것에 기인하는 것으로 사료된다. 레이저에 의하여 가열된 매연입자는 레이저에 의한 가열이 멈춘 후에도 작은 입자에 비해 덜 식게 되므로 작은 입자에 비하여 상대적으로 더 큰 LII 신호를 내게 된다. 이 신호는 ICCD의 게이트가 열려 있는 동안 계속 적분되므로 큰 매연 입자가 있는 화염측면부(Fig. 3 참조)가 상대적으로

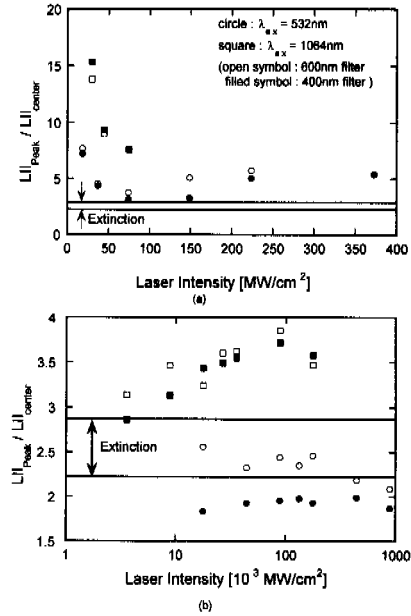


Fig. 6 Effect of laser intensity on the peak/center LII signal (a) low power, (b) high power

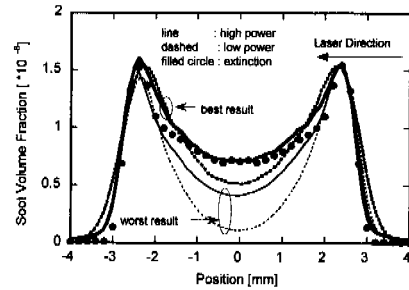


Fig. 7 Radial soot volume fraction distributions

더 커지게 되어, Fig. 6(a)과 같이 작은 에너지강도에서는 잘 안 맞게 된다. 이에 비하여 고풍력인 경우에는 레이저에 의하여 상당부분의 매연이 증발하여 큰 게이트 폭임에도 불구하고 측면부 LII 신호의 증가폭이 둔한 것으로 사료된다. 그러나, 이에 대한 연구는 더 진행되어야 할 부분으로 사료된다. Fig. 6은 단순히 레이저가 들어가는 쪽의 LII 신호의 최대치와 중심부의 LII 신호의 비만을 나타낸 것으로, 레이저에서 먼 곳에 있는 화염의 LII 신호도 고려해 주어야한다.

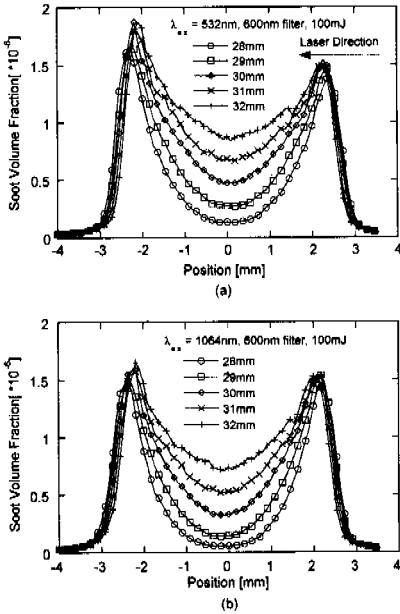


Fig. 8 Spatial variation of Soot Volume Fraction for 2-D case. (a)532nm, (b)1064nm

Fig. 7은 레이저 입구측의 최대 LII 신호를 레이저 감쇠법의 결과를 이용하여 정량화시켜 나타낸 것으로 Fig. 6의 결과 중 최대 LII 신호와 중앙 LII 신호의 비가 레이저 감쇠결과와 가장 근사한 경우와 가장 차이나는 경우를 나타낸 것이다. 중앙부에서 레이저 광감쇠법과 비교하여 가장 잘 맞지 않는 경우 78%의 오차가 발생함을 볼 수 있다. LII 신호의 형태가 사용하는 레이저의 강도, 파장, 수광부에 따라 영향을 받음을 보여주는 것으로, LII 신호 측정시에 이들에 대한 세심한 주의를 요함을 의미한다.

3.3 2차원 LII 신호 측정

Fig. 8은 1064nm, 532nm의 레이저에 대해서 동일한 에너지(100mJ)와 필터를 사용한 경우에 대하여 높이에 대한 LII 신호의 변화를 나타낸 것이다. 두 경우 모두 높이를 28mm에서 32mm로 변화시켰을 때 LII 신호 최대치의 증가에 비해 중심부의 LII 신호의 증가폭이 매우 크게 나타났다. 이는 높이가 증가함에 따라 매연 입자가 화염 중앙부에서 생성되는 양이 증가함을 의미한다. 532nm의 2차원 LII 신호의 경우는 레이저의

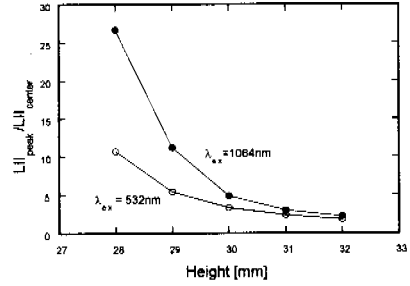


Fig. 9 Ratio of peak/center LII signals for 2-D case.

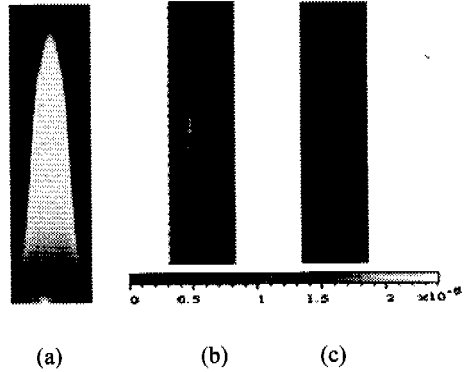


Fig. 10 Flame shape and volume fraction profiles produced by LII images. (a) flame shape, (b)  $\lambda_{ex}=532nm$ , (c)  $\lambda_{ex}=1064nm$  (with 100mJ laser power and 600nm filters)

입구측과 출구측의 최대치가 서로 상이한 비대칭성이 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이 경우 532nm~600nm의 경우 좌측의 최대치가 약 23%의 오차를 나타내고 있으며, 1064nm~400nm의 경우는 중심부에서 레이저 광산란법(Fig.2 참조)과 비교하여 약 50%의 오차를 나타냄을 볼 수 있다. 532nm의 레이저 입·출구측 최대치의 차이는 매연입자의 흡수효율 차이에 기인한다. 532nm가 1064nm보다 흡수효율이 크기 때문에 532nm의 경우에는 광 중앙에 있는 입구측 매연입자가 타기 때문에 LII 신호가 출구측에 비하여 적게 나타난다.<sup>(5)</sup> 1064nm의 경우에는 흡수효율이 낮아서 타는 매연입자가 적으므로 좌우의 차이가 미미하다.

Fig. 9는 레이저 출구측에서 LII 신호 최대치에 대한 화염 중앙부 LII 신호값의 비를 나타낸 그림으로 532nm의 경우보다 1064nm의 경우가 그 비가 큰 것을 볼 수 있다. 이러한 차이는 전술한 바와 마찬가지로 파장과 입자 직경의 함수인 흡수효율의 차이에 기인한 것으로 사료된다. 이는 LII 신호를 절대값으로 환산할 때 입사되는 레이저광의 파장선택에 세심한 주의를 요함을 의미한다.

Fig. 10은 화염의 형태와 2차원 LII 신호를 나타낸 것으로 측정된 LII 신호에서 레이저를 끈 경우의 배경효과를 제거한 후 이를 매연 체적분율로 환산한 결과이다. 532nm의 레이저광의 공간적 분포를 보정하기 위하여, 평면 레이저광의 산란 신호로 LII 신호를 나눈 후, 매연 체적분율로 환산하였다. 532nm의 경우(Fig. 10(b))는 Fig. 8(a)과 유사하게 좌우 비대칭성이 나타남을 볼 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 동축류 확산화염에서의 매연 농도를 레이저 유도 백열법을 이용하여 1차원·2차원적으로 측정하여 이를 레이저 광산란/감쇠법의 결과를 이용하여 체적분율로 정량화하였다. 게이트 폭이 320ns인 경우에 대하여 레이저 세기, 발전과장, 수광필터 등이 LII 신호에 미치는 영향에 대해 살펴보았다.

$1 \times 10^7 \text{W/cm}^2$  이상의 레이저강도를 사용한 본 실험에서 LII 신호의 크기는 레이저강도에 따라 증가하다가  $4 \times 10^8 \text{W/cm}^2$  영역에서는 일정하고 그 이후는 증가하는 경향을 나타내었으며, 600nm 필터를 사용한 경우가 400nm를 사용한 경우보다 크게 나타났다.

본 실험과 같이 게이트 폭이 큰 경우,  $\vartheta$  ( $100 \text{GW/cm}^2$ )의 고강도 레이저를 사용한 경우가 통상적으로 사용되는  $\vartheta$  ( $100 \text{MW/cm}^2$ )의 레이저 경우보다 매연 공간 분포의 왜곡이 적음을 확인하였다. 고강도 레이저인 경우에도 532nm의 여기가 1064nm보다 더 좋은 결과를 얻었다. 레이저 산란/감쇠법과 비교한 높이에서의 오차는 2차원실험의 경우 약 50%이었다.

#### 후 기

본 연구는 한국표준과학연구원(KRISS)와 수행한 연·학협동연구의 일부입니다. 지원을 해주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Eckbreth A. C., 1977. "Effects of Laser-Modulated Particle Incandescence on Raman Scattering Diagnostics," *J. of applied physics*, Vol. 48, pp. 4473~4479.
- (2) Melton L. A., 1984. "Soot Diagnostics Based on Laser Heating," *Applied Optics*, Vol. 23, pp. 2201~2208.
- (3) Hefedt D. L., 1993. "Real-Time Soot Concentration Measurement Technique for Engine Exhaust Streams," *SAE technical paper* No. 930075, pp. 33~45.
- (4) Quey B., Lee T. W., Ni T., and Santoro R. J., 1994. "Spatially Resolved Measurements of Soot Volume Fraction Using LII," *Combustion and Flame*, Vol 97, pp 384~392.
- (5) Ni T., Pinson J. A., Gupta S., and Santoro R. J., 1995. "2-Dim Imaging of Soot Volume Fraction by the Use of LII," *Applied Optics*, Vol 34, pp 7073~7091.
- (6) Santoro R. J., Semerjian H. G., and Dobbins R. A., 1983. "Soot Particle Measurements in Diffusion Flames," *Combustion and Flame*. Vol 51, pp 203~218.
- (7) Kosaka H., Nishigaki T., Kamimoto T., and Harada S., 1995. "A Study on Soot Formation and Oxidation in an Unsteady Spray Flame Via Laser Induced Incandescence and Scattering Techniques," *SAE technical paper* No. 952451, pp. 1390~1399.
- (8) Dec J. E., and Zur Loye A. O., and Diebers D. L., 1995. "Soot Distribution in a D.I. Diesel Engine Using 2-D Laser Induced Incandescence Imaging," *SAE technical paper* No. 950456, pp. 51~59.
- (9) Dec J. E., and Espey C., 1993. "Imaging and Early Soot Formation in a Di Engine Using 2-Dim Laser Induced Incandescence Imaging," *SAE technical paper* No. 910224, pp. 1~13.

- (10) Choi M. Y., Jensen K. A., 1998. "Calibration and Correlation of LII for Soot Volume Fraction Measurements," *Combustion and Flame*. Vol 112, pp. 485~491.
- (11) 황준영, 1995. "확산 화염의 매연특성에 관한 실험적 연구," 서울대학교 대학원 석사학위논문.
- (12) Vaglieco B. M., Beretta F., and D'alessio A., 1990. "In Situ Evaluation of the Soot Refractive Index in the Uv-Visible from The Measurement at the Scattering and Extinction Coefficients in Rich Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 79, pp. 259~271.
- (13) Bengtsson P. E., Alden M., 1995. "Soot-Visualization Strategies Using Laser Techniques Laser-Induced Fluorescence in C//2 from Laser-Vaporized Soot and Laser-Induced Soot Incandescence," *Applied Physics. B* Vol. 60, pp. 51~59.