

**LII 신호에 대한 입사 레이저 특성의 영향**  
(An effect of the characteristics of incident laser beams  
on laser-induced incandescence signals)  
정 종 수, 이 교 우 (한국과학기술연구원 기전연구부)  
Jongsoo Jung, Gyo-Woo Lee (KIST, Division of Mechanical Systems)

**Key Words** : Laser-induced Incandescence(레이저 가열 측정법), incident laser beams(입사 레이저 빔), Beam attenuation(광 감쇠), soot concentration(매연 농도), Intensity distribution(강도 분포), Deconvolution(역 콘볼루션)

**ABSTRACT**: An experimental study on LII signal images from soot particles in a flame has been carried out in order to investigate the effect of the incident laser characteristics. By changing the wavelength of the incident laser beam, the LII signal was saturated at smaller laser power with 532 nm than 1,064 nm. This implies that the larger absorption coefficient of soot particles at 532 nm would influence the LII signal characteristic. Using the deconvolution technique, the projected LII line images were converted to reconstruct the local LII signals inside the beam. The results show that the LII images at ICCD camera result from the integration of LII signal across the laser beam.

## 1. 서 론

Laser-Induced Incandescence 측정법, 즉 LII 법은 기존의 매연 입자 농도의 측정 방법이 가지고 있는 단층 분석이 필요하다는 단점이 없고 시간적으로도 분해능이 매우 우수한 차세대의 매연 농도 측정 방법으로서 최근 많은 연구자들의 주목을 받고 있는 매연 농도 측정 방법이다. Laser-Induced Incandescence 측정 기술의 원리는 측정 대상부의 매연 입자(煤煙 粒子, soot particle) 군에 고 에너지 밀도의 레이저 광이 수 ns 동안 조사(照射)될 때 4,000 K 이상의 고온으로 가열되는 매연 입자들이 가열 과정과 그 이후의 식는 과정을 통해 방출하는 흑체 복사(黑體輻射, blackbody radiation)의 강도(強度)가 매연 입자의 농도에 거의 비례하는 현상을 이용하는 것이다. 이 방법으로 가열된 매연 입자로부터 방출되는 복사광을 검출하면 매연 입자의 농도 및 입경 분포 등을 거의 실시간(real-time)으로 측정할 수 있다. LII 법의 가장 큰 장점은 앞서의 설명대로 한 측정점에서의 매연 농도에 대한 순간적인 정보를 얻을 수 있다는 점이다. 또한 2 차원 평면 광을 이용하면 LII 법에 의해 화염 내의 매연 농도의 2차원 분포를 얻을 수 있으며 시간적인 분해능도 매우 우수하므로 형상이 비교적 복잡한 난류 화염의 경우에도 적용이 가능하다는 점에서 주목된다. LII 법의 적용에 대한 최근의 연구에서는 매연 입자 농도 등에 따른 LII 신호의 특성에 미치는 여러 가지 실험 조건의 영향에 대한 연구가 수행되고 있다.[1 - 11]

이러한 기존의 연구 결과를 바탕으로 본 연구에서는 특히 LII 신호에 미치는 입사 레이저의 특성의 영향에 대하여 연구를 수행하였으며 입사 레이저의 파장 및 강도의 공간적인 분포가 LII 신호에 미치는 영향에 대하여 연구를 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

Figure 1 은 본 연구에서 사용한 LII 법을 이용한 매연 입자의 농도 측정에 사용하는 광학적 측정 장치의 개략도이다. 본 연구에서 사용하는 광학 측정 장치의 주요부는 레이저 광원인 Nd:YAG 펄스 레이저, 레이저 광을 측정부에 조사하는 광학 장치부와 LII 신호를 검출하는 수광부의 3 부분으로 크게 나눌 수 있다. 레이저 광을 조사하는 부분의 광학계는 레이저 광의 강도를 적당한 범위가 되도록 조절하는 Neutral Density Filter 들, 화염을 통과하는 레이저 광의 강도를 연속적으로 조절 반 파장 통과 필터(Half-wave plate)와 편광 빔 분리기(polarizing beam splitter), 조리개(aperture) 및 집광(集光, focusing) 렌즈 등으로 구성되어 있다. 한편 본 연구에서는 2 차원 측정을 위해서 ICCD 카메라, 집광용 렌즈, 광학 필터(optical filter)로 구성된 수광부를 사용하여 평면 영상(image) LII 신호를 수광하며 레이저 펄스의 주기와 LII 신호를 동조시키는 신호처리 시스템을 사용한다. 레이저 광원으로는 지속 시간이 약 7 ns(nanosecond)인 Nd:YAG 펄스(pulse) 레이저(Continuum Model NY61-10)를 사용하였고, 직경 1.0 mm 의 편

홀(pinhole)을 사용하여 원형의 빔을 측정부에 통과되도록 하였다. 레이저 광의 파장은 Nd:YAG 펄스 레이저의 원래의 파장인 1,064 nm 의 적외선 빔과 주파수 배증된 532 nm 의 청색 광을 사용하여, 입사 레이저 빔의 파장에 따라 매연 입자의 레이저 광 흡수율이 달라지는 점의 영향을 검증하였다.

2 차원 측정에서는 ICCD 카메라로 잡은 LII 신호의 2 차원 평면 화상의 1 픽셀(pixel)의 한 변의 길이는 대략 0.053 mm 로 본 실험의 레이저 빔의 빔 웨이스트(FWHM, 약 1.0 mm)에는 약 19 개의 픽셀이 포함되는 정도로 높은 해상도를 가진다.

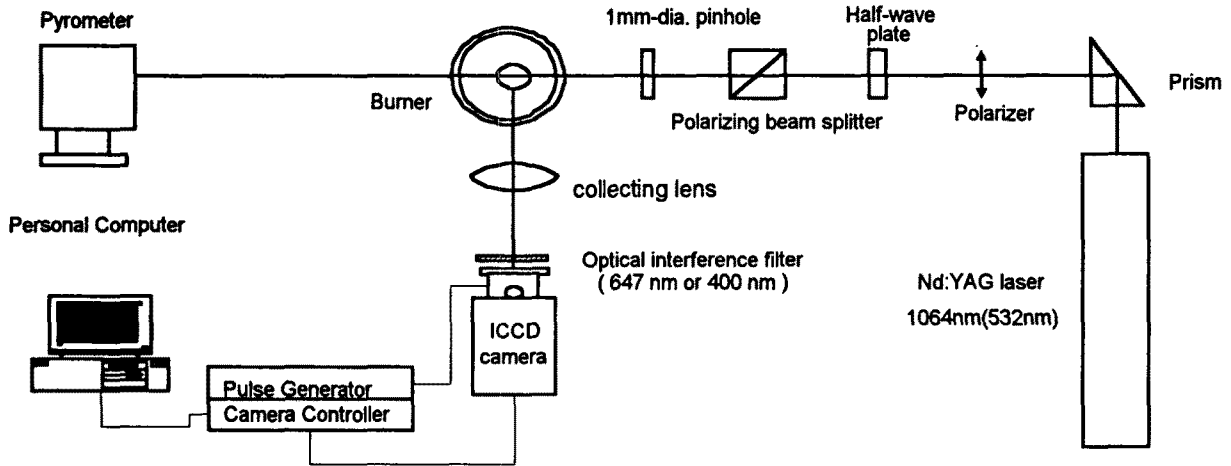


Figure 1. Schematics of LII optical setup

### 3. 실험결과 및 검토

#### 3.1 입사 레이저의 파장에 따른 영향

사용 레이저에 관한 중요한 고려 사항 중 하나는 입사 레이저의 파장(wavelength)이다. LII 법의 원리가 레이저의 광 에너지를 이용하여 매연을 고온으로 가열하는 것이므로 입사광의 파장에 따라 달라지는 매연 입자의 광 흡수 계수(absorption coefficient)의 값은 매우 중요하다. Mewes 와 Seitzman[12] 의 계산에 의하면, 300 nm 이상의 파장대에서는 파장이 증가하면 광 흡수계수가 감소하므로, 파장이 짧은 레이저를 사용하면 상대적으로 작은 입계 레이저 에너지 밀도에서도 LII 신호가 나오게 된다 이러한 짧은 파장 레이저의 장점에도 불구하고 Bengtsson 과 Alden 의 연구[13]와 Vander Wal 의 연구[14]에 따르면 사용 레이저의 파장이 짧으면 LII 측정 시의 주요한 노이즈인 다중고리 방향족 탄화수소(PAH)의 형광

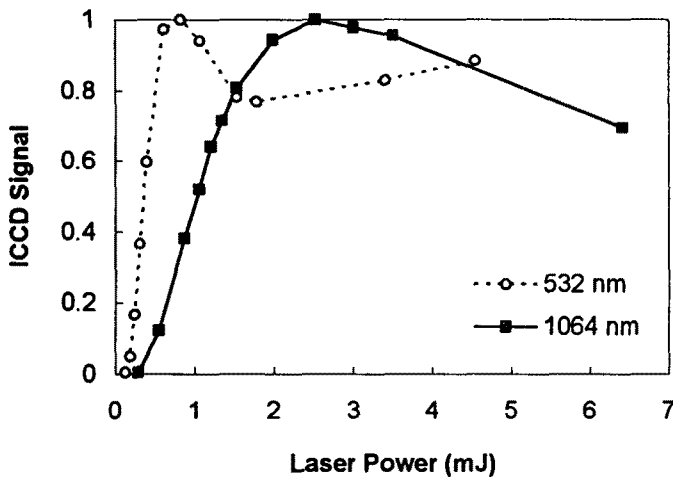


Figure 2 Effect of laser wavelength on LII signals with varying laser input

신호가 커지므로 파장이 짧은 자외선 영역의 레이저는 가능한 한 피하는 것이 좋다. 또한 레이저의 구입 가격도 고출력 펄스 레이저의 경우 에너지 출력을 같으면 파장이 짧아질수록 가격이 비싸진다. 현재까지 가장 널리 LII 법에서 사용하고 있는 레이저는 Nd:YAG 레이저의 2차 고조 파장(532nm)과 기본 파장(1064nm)의 2 종류이다. Figure 2 는 레이저의 강도를 변화시키면서 측정한 LII 신호의 변화를 나타내는 예이다. 이 그림에서는 532 nm 의 파장을 사용한 실험에서는 약 0.8 mJ 정도의 레이저 강도에서 최대치를 나타내고 그 이후 레이저 강도가 증가하면 신호가 약 0.8 까지 감소하다 다시 증가하는 현상이 관찰된다. 한편 1064 nm 를 사용한 실험에서는 약 2.5 mJ 까지 지속적으로 증가하는 현상을 관찰할



Figure 3 LII line image (532 nm, 0.314 mJ)



Figure 4 LII line image (532 nm, 4.55 mJ)

수 있다. 이러한 현상은 레이저 광을 흡수하는 매연 입자의 흡수 계수가 1064 nm 보다 532 nm 의 파장에서 약 3 배 정도의 값을 보인다는 점으로 설명할 수 있을 것이다.[11] 즉 동일한 레이저 광 강도에 대해서 흡수 계수가 상대적으로 큰 532 nm 레이저 광을 사용하는 경우에는 매연 입자의 온도가 먼저 상승하여 탄소의 증발온도에 도달하게 된다는 것을 의미한다.

### 3.2 입사 레이저 빔의 강도 분포에 따른 영향

LII 측정 방법을 적용하는 광학 장치의 구성(optical setup)은 일반적으로 원형의 레이저 빔 혹은 평면광(sheet beam)이 화염을 통과하여 지나가는 형태이다. 따라서 레이저 빔에 대해 직각 방향에서 ICCD 카메라를 이용하여 LII 신호의 영상을 계측하면 위 그림과 같은 레이저 빔의 중심선을 대칭축으로 하는 상하 대칭의 영상을 얻을 수 있다.

Fig. 3 과 4 는 각각 레이저 광의 강도가 0.314, 4.55 mJ 인 조건에서의 측정한 대표적인 LII 영상이다. 레이저 광은 이 이미지의 오른쪽으로부터 들어와서 왼쪽으로 통과하므로 오른쪽의 peak 가 더 밝게, 즉 신호의 강도가 크게 나타난다. 이 화염을 레이저 광이 통과하는 동안 오른쪽 피크에서 왼쪽 피크까지 대략 10% 정도의 감쇠(attenuation)가 일어난다. 입사 레이저의 강도가 증가하면 LII 신호의 강도는 어느 정도의 강도까지 거의 선형적으로 증가한다. 이러한 현상은 레이저 빔이 지속되는 약 7 ns 동안 매연 입자의 온도는 급격히 상승하는데 그 상승하는 정도는 레이저 빔의 강도가 증가함에 따라 커진다. 따라서 매연 입자의 최종 도달 온도, 혹은 탄소의 증발 온도인 포화 온도에 도달하는 시기가 레이저 빔의 강도에 따라 결정된다고 할 수 있다. 실제로는 이것은 단순히 레이저 강도가 아니라 매연 입자가 흡수한 에너지에 따라 결정되므로, 매연 입자의 흡수 계수가 중요한 역할을 하게 된다. 최종 도달 온도, 또는 매연 입자의 온도 이력(temperature history)은 Planck's law 에 따라 흑체 복사 강도를 결정하게 되고, 마지막으로 LII 신호는 흑체 복사의 강도와 매연의 방출 계수(흡수 계수), 표면적의 곱으로 결정된다.

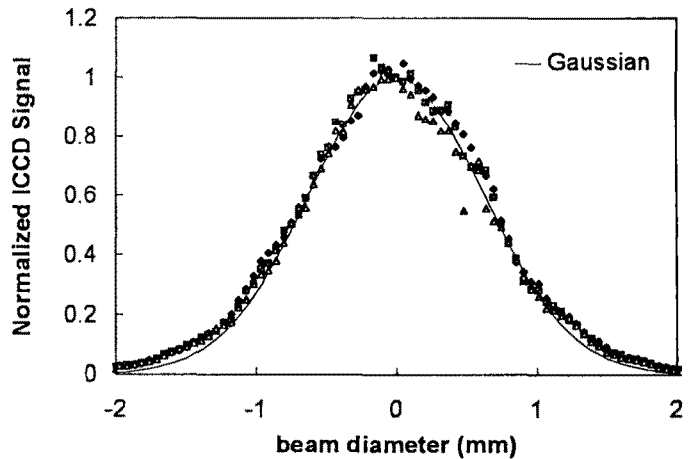


Figure 5 Gaussian profile of a laser beam

한편 일반적으로 LII 측정에 대한 이론 해석에서는 해석을 간단하게 하기 위하여 공간적으로 균일한 에너지 유속을 가정한다. 그러나 레이저 빔은 Figure 5 와 같이 대개 Gaussian 함수 형태의 에너지 유속 분포를 가지는 경우가 일반적이다. 레이저 빔에 직각 방향에서 얻게 되는 영상은 LII 신호의 공간적인 분포를 적분하는 의미의 projection 이 된다 즉 레이저 빔의 강도가 강한 빔의 중심부에서의 LII 신호와 빔 주변부에서의 LII 신호가 합쳐져서 수광부에서 검출되는 것이다. 따라서 어떤 레이저 강도에 대해서는 중심부에서는 매연 입자의 온도가 이미 포화 온도에 도달하여 강한 LII 신호를 내는 반면 주변부에서는 매연 입자의 최종 도달 온도가 포화 온도에 비해 상당히 낮아서 상대적으로 약한 LII 신호를 내게 되며 이러한 신호들이 동시에 ICCD 카메라에 의해 검출된다.

따라서 연구에 따라서는 이러한 Gaussian 함수 형태의 에너지 유속 분포에 의한 공간적인 차이를 줄이기 위해서 본 연구에서 사용한 것처럼 편광을 사용하고 소위 "top-hat" 형태의 사각형 분포를 가정하고 있다. Figure 6 은 "top-hat" 형태의 레이저 빔 강도의 공간적 분포를 나타내는 그림으로, 본래의 빔의 분포인 Gaussian 함수 형태는 아니지만 사각형 분포라고 생각하기는 어려운 형태의 분포를 나타내므로, 문

제의 해결책이라고 할 수는 없을 것 같다.

따라서 본 연구에서는 이러한 분포가 실질적으로 존재하는 것을 그대로 인정하는 한편 국소적인 레이저 에너지 강도의 분포에 따른 LII 신호의 강도를 분석하기 위하여 실험을 수행하였다.

본 연구에서는 ICCD 카메라로 받은 LII 신호의 영상이 원형의 레이저 빔에 의한 투영(projection)이라는 점에서 이러한 경우에 각 부분에서의 국소적인 신호를 분석할 수 있는 Deconvolution 법을 적용하여 신호를 분석하였다.

### 3.3 Deconvolution 법에 대한 검증

Deconvolution 법은 신호의 투영치로부터 신호를 분석하는데 사용하는 수학적 방법으로 연소 분야의 연구에서는 이제까지는 주로 축대칭 화염의 매연 농도를 측정하기 위해 사용하는 레이저 감쇠법(laser extinction method)과 함께 사용되는 방법이다. Figure 7 은 LII 신호의 분석을 위하여 본 연구에서 Deconvolution 법을 적용한 예에 대한 검증 결과를 나타내는 그림이다. 검증의 방법은 다음과 같다. 우선 이 그림에서 원으로 나타낸 데이터와 같이 적절한 LII 신호를 가정하고 원형의 레이저 빔이 통과하는 위치에서 축대칭의 LII 신호가 방출되어 계측 장치에 검출되는 projection 을 구하여 보면 이 그림에서 점선으로 나타낸 것과 같은 결과가 된다. 이 projection 을 Deconvolution 법을 이용하여 원래의 LII 신호를 재구성한 결과가 실선으로 나타낸 것으로 원래의 데이터와 매우 잘 일치하므로 이 Deconvolution 법을 적용하는 것이 큰 무리가 없는 것으로 판단된다.

### 3.4 Deconvolution 법으로 구한 LII 신호의 레이저 유속 강도에 따른 변화

따라서 본 실험에서는 파장 1,064 nm 의 레이저 유속 강도를 0.29 mJ 부터 6.4 mJ 까지 증가시키면서 ICCD 카메라로 측정한 LII 신호의 영상으로부터 Deconvolution 법으로 구한 LII 신호의 레이저 유속 강도에 따른 변화를 분석하였다. 그 결과를 보여주는 그림이 Figure 8 인데 LII 신호를 측정하는 위치는 영상의 우측 피크가 위치하는 곳이다. 이 그림에서 deconvoluted LII 신호는 레이저 빔의 중심부에서의 값을 나타낸다. 이 그림에서 보면 원래의 LII 신호는 약 2.5 mJ 정도의 레이저 강도에서 최대치를 나타내고 그 이후 레이저 강도가 증가하면 신호가 약 0.8 까지 감소하는데 반하여 레이저 빔 중심부의 deconvoluted LII 신호는 약 1.3

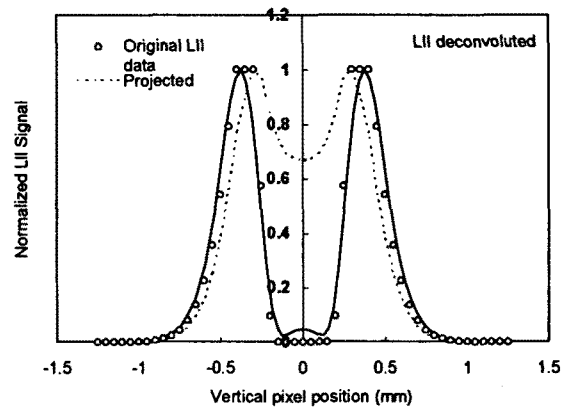


Figure 7 Proving Deconvolution

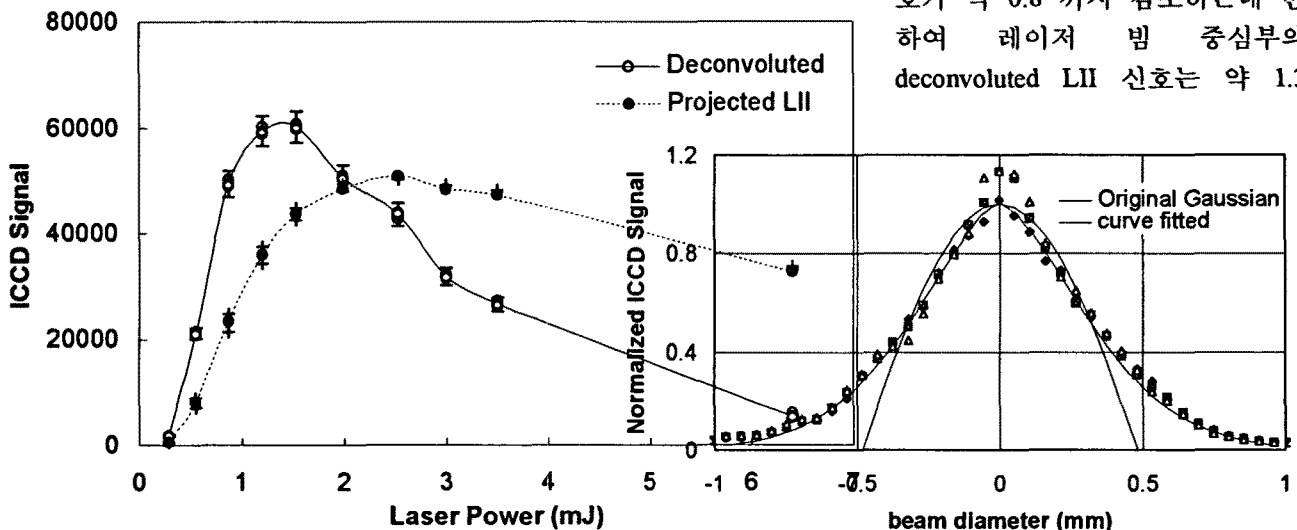


Figure 8 Deconvoluted LII vs laser power Figure 6 Profile of a laser beam by a 1 mm-dia pinhole

mJ 정도의 레이저 강도에서 이미 포화 상태가 되고 그보다 레이저의 강도가 크면 이 부분에서 나오는 LII 신호는 급격히 감소하는 현상이 관찰된다.

Figure 9 는 레이저 빔의 중심축으로부터 반경 반향으로 deconvoluted LII 신호의 분포를 원래의 LII 신호와 비교해 본 그림이다. 이 그림에서 x 축은 수직 방향의 픽셀의 위치를 나타내고 있다. 이 그림에서 축을 중심으로 우측에 나타난 결과가 원래의 LII 신호이고 좌측에는 deconvoluted LII 신호의 분포를 나타냈다. 이 그림에서는 앞서의 Figure 8 에서 나타난 레이저 강도가 크면 관찰되는 빔 중심 부분에서의 LII 신호의 감쇠의 형태를 분명하게 나타내 주고 있다. 레이저 광의 강도가 1.2 mJ 이상이 되면 강도가 증가함에 따라서 빔 중심부에서는 국소적인 LII 신호가 오히려 감소하기 시작하며 그 이유는 레이저 광

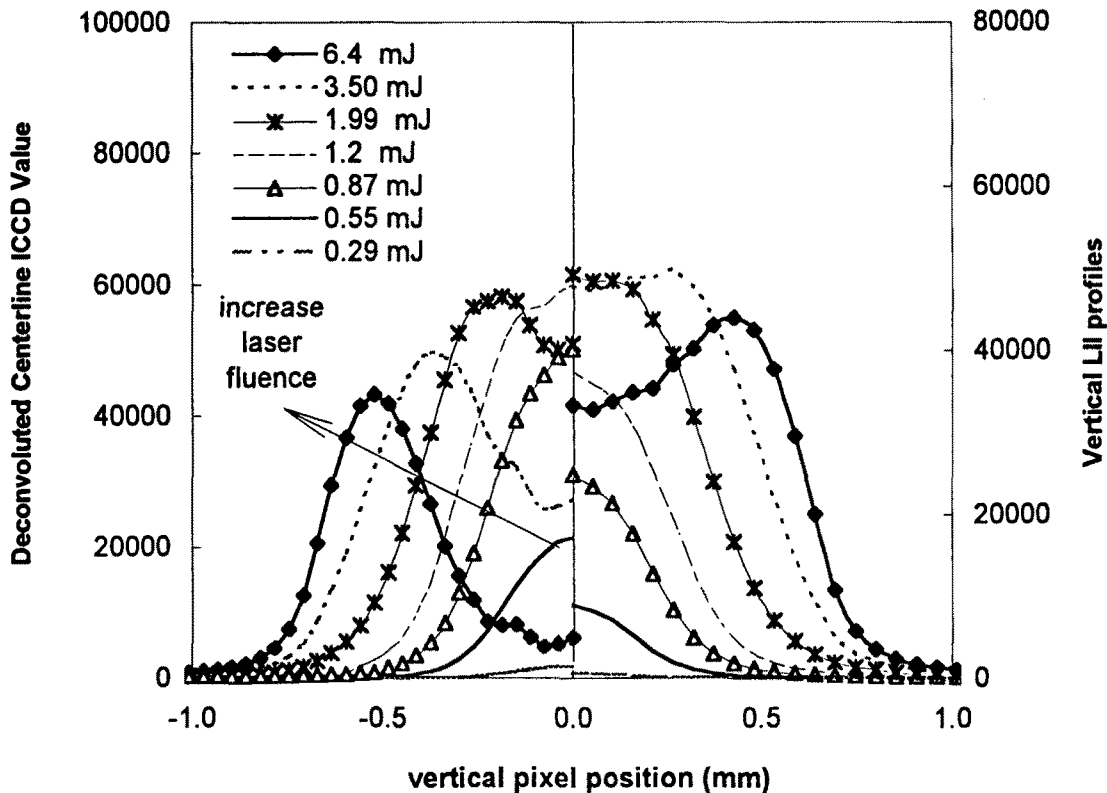


Figure 9 radial distributions of LII signals deconvoluted with varying laser power

의 강도가 충분히 커서 매연 입자로부터 탄소의 증발이 시작되기 때문이라고 생각된다. 따라서 원래의 LII 신호는 1.2 mJ 이상에서도 레이저 광의 강도가 증가함에 따라 LII 신호가 계속 증가하는 현상을 나타내지만 이러한 현상은, 주로 LII 신호에 유효한 강도를 가지는 빔의 폭이 증가하게 되기 때문이다. 레이저 빔의 전체 강도가 2.5 mJ 이상이 되면 빔 중앙부의 매연 입자가 증발하기 시작하는 현상이 이 그림에서 분명하게 관찰된다.

#### 4. 결 론

- (1) 입사 레이저 빔의 파장 532 nm 와 1,064 nm 인 경우를 비교하면 동일한 레이저 강도에 대해 532 nm 의 편이 LII 신호가 먼저 증가한다.
- (2) ICCD 카메라 혹은 PMT 등으로 검출되는 LII 신호는 레이저 광이 통과하는 체적에서 방출되는 LII 신호의 projection 이며 Deconvolution 방법을 이용한 LII 신호의 분석은 유용하다.
- (3) 레이저 광의 강도 증가에 따른 LII 신호의 강도 곡선(LII-Laser fluence curve)은 원래의 LII 신호에 대해서는 약 2.5 mJ 정도의 레이저 강도에서 최대치를 나타내고 그 이후 레이저 강도가 증가하면 신호가 약 0.8 까지 감소하는데 반하여 레이저 빔 중심부의 deconvoluted LII 신호는 급격히 증가해서 약 1.3 mJ 정도의 레이저 강도에서 이미 포화 상태가 되고 그보다 레이저의 강도가 크면 이 부분에

서 나오는 LII 신호는 급격히 감소한다. 이러한 형태가 실제 국소 측정 체적에서의 레이저 강도와 LII 신호의 관계를 보다 정확히 나타내는 것으로 생각된다.

- (4) 레이저 광의 강도가 증가함에 따라서 빔 중심부에서는 국소적인 LII 신호가 오히려 작아지며 그 이유는 매연 입자로부터 탄소의 증발이 시작되기 때문이라고 생각된다. 따라서 레이저 광의 강도가 증가함에 따라 LII 신호가 증가하는 현상은, 레이저 강도가 크지 않은 경우에는 주로 전체적인 빔의 강도가 증가함에 따른 것이지만 LII 신호에 유효한 강도를 가지는 빔의 폭이 증가하게 되기 때문이다.
- (5) 빔 중앙부의 매연 입자가 증발하기 시작하는 강도 이상으로 레이저의 강도가 커지면 LII 신호는 오히려 감소하기 시작한다.

## 참고 문헌

- [1] Eckbreth, A.C., "Effects of Laser-Modulated Particulate Incandescence on Raman Scattering Diagnostics," *Journal of Applied Physics*, V. 48, p. 4473, 1977.
- [2] Melton, L.A., "Soot Diagnostics based on Laser Heating," *Applied Optics*, V. 23, No. 13, pp. 2201 - 2208, 1984.
- [3] Tait, N.P. and Greenhalgh, D.A., "2D soot field measurements by laser induced incandescence," *Proceeding of the Optical Methods and Data Processing in Heat Transfer and Fluid Flow Conference*, London, April 1992, 1992.
- [4] Dec, J. E., zur Loye, A. O., and Siebers, D. L., "2-D Soot Imaging in a Direct Injection Diesel Engine Using Laser Induced Incandescence," *SAE Technical Papers Series SAE-910224*, 1991.
- [5] Dec J.E., "Soot Distribution in a D.I. Diesel Engine Using 2-D Imaging of Laser Induced Incandescence," *SAE Technical Papers Series SAE-920115*, 1992.
- [6] Dec, J.E. and Espey, C., "Soot and Fuel Distribution in a D.I. Diesel Engine via 2-D Imaging," *SAE Paper No. 922307*, 1992.
- [7] Dec, J.E. and Espey, C., "Ignition and Early Soot Formation in a DI Diesel Engine Using Multiple 2-D Imaging Diagnostics," *SAE Paper No. 950456*, *Engine Combustion and Flow Diagnostics*, SAE SP-1090, pp. 155 - 177, 1995.
- [8] Pinson, J.A., Mitchell, D.L., Santoro, R.J., and Litzinger, T.A., "Quantitative, planar soot measurements in a D.I. Diesel engine using laser-induced incandescence and light scattering," *SAE Paper No. 932650*, 1993.
- [9] Kosaka, H., Nishigaki, T., Harada, S., and Kamimoto, T., 1995, "Soot Formation and Oxidation in Unsteady Spray Flame via Laser-Induced Incandescence and Scattering Technique," *JSME Transaction*, V. 61, No. 590, pp. 28-33.
- [10] 정 중수, 1996, "레이저 가열 측정법을 이용한 화염 내 매연농도 측정," *한국연소학회지*, V. 1, No. 1, pp. 75-82.
- [11] Hofeldt, D.L., "Real-time soot concentration measurement technique for engine exhaust streams," *SAE Paper No. 930079*, 1993.
- [12] Mewes, B. and Seitzman, J.M., "Analysis of laser-induced incandescence and novel soot measurement approaches," *AIAA 34th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit* (1996).
- [13] Bengtsson, P.-E and Alden, M., "Soot visualization strategies using laser techniques," *Applied Physics B60:51-59* (1995).
- [14] Vander Wal, R.L., "Soot precursor material: visualization via simultaneous LIF-LII and characterization via TEM," *Twenty-sixth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute (1996).