

LII/LIS 기법을 이용한 층류확산화염 매연입자의 정량화

정재우* · 이원남** · 한용택*** · 김병수* · 이춘범* · 김덕진* · 이기형****

Quantitative Measurements of Soot Particles in a Laminar Diffusion Flame Using a LII/LIS Technique

J. W. Chung*, W. Lee**, Y. T. Han***, B. S. Kim*, C. B. Lee*, D. J. Kim*, K. H. Lee****

ABSTRACT

In this study, the quantification of soot particles in laminar diffusion flame with LII/LIS methods was performed. In these quantification, soot diameter, number density and volume fraction are included. For the quantification of soot particles, calibration tests are needed and the development of algorithm has to be performed. So, in this study, extinction and scattering test at co-flow burner were performed to acquire calibration data. And algorithm for LII/LIS simultaneous measurement for the quantification of soot were developed. The algorithm, which was the quantification of simultaneous photographing using one ICCD camera, to measure LII/LIS signal simultaneously, the best fitted light intensity and acquisition time was needed.

Key Words : LII, LIS, Soot

기 호 설 명

D_{pq}	Mean Diameter(pq^{th} moment)	Q_{sv}	Scattering Cross Section
λ	Wave Length	I_{lis}	LIS Intensity Acquired with ICCD
ϕ	Soot Volume Fraction	I_{lil}	LII Intensity Acquired with ICCD
k_{ext}	Extinction Coefficient	η_{lis}	Constant
m	Refractive Index	η_{lil}	Constant

1. 서 론

최근 자동차에 사용되는 연소기관의 연소 및 배기 성능개선과 연관되어 연소실내에서의 매연 계측에 관한 연구가 많은 연구자들의 관심 대상이 되어지고 있다. 연소실내의 매연을 계측하는 방법은 레이저 광 계측의 발달에 따라 다양한 레이저를 이용한 계측 방법이 시도되어왔다. 특히

Melton[1]이 LII(laser induced incandescence)를 이용한 매연입자의 측정 가능성을 제시한 후 이를 이용한 난류화염의 매연분포의 2차원 계측이 가능하게 되었다.

Dec et al.[2]은 LII 기법을 이용하여 디젤엔진 연소실내의 매연생성과 분포 2차원으로 측정하여 디젤 확산화염의 soot 생성에 관한 많은 정보를 제공해주었다. 그러나 대부분의 연구에서의 LII 계측은 매연체적분율을 제외하고는 매연입자에 관한 정성적인 자료만 제시하고 있다. 따라서 이와 같은 LII 계측의 정성적이며 매연체적분율 자료를만 제공한다는 단점을 극복하기 위해서 매연입자 계측의 정량화와 관련된 많은 연구들이 수행되어왔다. 이러한 연구의 일환으로서 LII 및

* 자동차부품연구원 동력시스템실

** 단국대학교 기계공학과

† 연락처자 : wlee@dku.edu

*** 한양대학교 대학원

****한양대학교 기계공학과

LIS(Laser induced scattering) 기법의 동시적용을 통한 정성적인 soot 특성, 즉 상대 수밀도, 상대 입경 등을 측정하는 연구[3-5]가 수행되었다.

Pinson et al[6]은 디젤 엔진 연소실내에서 LII 기법으로 측정된 매연체적분율을 기존의 Santoro et al[7]의 광소멸법으로 측정된 결과를 이용하여 정량화하였으며, 매연입자 입경의 정량화에 관하여는 광산란법(laser scattering method)과 LII 기법의 동시적용실험과 광산법을 이용한 보정실험을 통하여 수행하였다. 이와 같은 매연입자의 정량화를 위한 연구에서는 대부분 상대 입경 및 상대 수밀도에 대한 해석이 이루어졌으며, 연소실내에서 LII 기법을 이용한 매연입자의 입경, 체적분율 및 수밀도의 실질적이고 신뢰성 있는 정량적인 측정은 어려움이 많은 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 에틸렌 동축류 확산화염에서 LII/LIS 기법을 이용하여 측정된 확산화염의 매연입자의 정량적인 측정에 관한 실험을 수행하였다. LII/LIS 기법으로 측정된 결과는 레이저 광소멸법과 산란법(laser light extinction and scattering method)으로 얻어진 자료를 바탕으로 정량적으로 분석하였다.

엔진의 연소실내에서는 버너에서의 종류확산화염에서와는 달리 액적이 존재하는 영역이 있을 수 있으며, 액적의 분포 또한 매우 중요한 측정 대상이라고 할 수 있다. 이러한 측면에서 보정실험이 동반된 LII 및 LIS의 동시 측정은 액적의 존재영역에 대한 정보제공 및 soot의 정량적 특성 제공이 가능하므로, 본 연구에서는 추후 디젤 엔진 내에서의 soot 특성의 정량적인 파악의 일환 중의 하나로서 LII 및 LIS의 동시 측정법을 고려하여, 매연입자의 정량화에 관한 연구를 수행하였다.

2. LII/LIS 측정 이론 및 알고리즘

LII 신호는 레이저광에 의하여 가열된 매연입자(soot particle)의 열방사(thermal radiation)가 모아져 얻어진다. 입사된 레이저광은 매연입자를 가열하는데 주로 사용되며, 주위 가스로의 전달이나 열방사는 그에 비하여 무시할 수 있을 정도로 작다고 볼 수 있다. 따라서 입사된 레이저광에 의한 부가 에너지는 매연입자의 증발(vaporization) 에너지와 평형을 이룬 직후 vaporization 온도까지 급격히 증가하게 된다. 이렇게 온도가 상승된 soot 입자로부터의 열방사의 스펙트럼은 좀 더 짧은 파장대로 전이되며, 그 최고 강도는 자발화염내의 soot 온도 2300° K에서의 열방사 강도에 비하여 상대적으로 10³ 배까지 증가된다. 이러한 특성은 LII법을 이용한 측정 시 잡음 제거를 위한 필터 선정의 기본 원리가 된다.

LII 신호는 매연체적분율에 비례하는 다음의 관계를 가진다.

$$I_{LII} \propto \phi \quad (1)$$

$$I_{LII} = \eta_{LII} \phi \quad (2)$$

따라서 광소멸법(extinction method)으로부터의 체적분율 결과와 비교를 통하여 LII 신호의 체적분율의 정량화를 수행할 수 있다.

매연입자가 존재하는 화염에 레이저광이 조사되면 레이저광은 매연입자에 의해서 산란(Mie 산란)되기도 한다. 이때 발생하는 탄성산란광(LIS 신호)이 만약 디젤 엔진 연소시의 soot 온도 2300K 부근의 열방사보다 충분히 큰 경우에는 광학 필터를 통하여 가시화 될 수 있다. Mie 산란 신호는 LII나 LIF(laser induced fluorescence) 신호에 비하여 매우 강하다는 특징이 있다. 또한 탄성산란의 특성상 입사광과 동일한 파장으로 산란되므로, 입사광의 파장영역을 포함하는 narrow-band-pass filter를 이용하여 쉽게 분리하여 낼 수 있다. 이러한 선택적 파장의 취득을 통하여 화염광, LII 및 LIF 신호의 파장은 억제 할 수 있다.

화염의 매연입자에서 발생한 LII 및 LIS 신호를 광소멸법/산란법으로 얻어진 정량적 자료와 비교 보정하면 매연입자의 입경을 정량화 할 수 있다. 매연입자의 입경 분포가 로그 정규이며 self-preserved 분포인 $\sigma_g = 0.28515$ 로 가정하면 다음의 관계를 이용하여 매연입자의 입경, 수밀도 및 매연체적분율을 구할 수 있다.

$$D_{30} = \frac{\lambda}{\pi} \left(\frac{4\pi E(m) Q_{vw}}{f_N F(m) K_{ext}} \right)^{1/3} \quad (3)$$

$$\phi = \frac{\lambda k_{ext}}{6\pi E(m)} \quad (4)$$

$$N = \frac{6\phi}{\pi D_{30}^3} \quad (5)$$

$$f_N = \left(\frac{D_{63}}{D_{30}} \right)^3 = 2.0788 \quad (6)$$

$$E(m) = -\operatorname{Im} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) = 0.25954 \quad (7)$$

$$F(m) = \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} = 0.21734 \quad (8)$$

$E(m)$: Refractive index constant

$F(m)$: Refractive index constant

$$m = 1.57 - 0.56i \quad (9)$$

$$I_{sca} = \eta_{sca} Q_{vw} \quad (10)$$

위의 f_N 은 크기 분포 함수의 편차에 관계된 비로서, 단일 크기 분포일 경우 1, self-preserving 분포일 경우 약 2.1의 값을 갖으며, 또한 식 (2)와 (4)로부터

$$k_{ext} = \frac{\eta_{LII} I_{LII} \cdot 6\pi \cdot E(m)}{\lambda} \quad (11)$$

$$= CI_{LII}$$

또한 식(10)으로부터

$$Q_{vv} = \frac{I_{sca}}{\eta_{sca}} \quad (12)$$

로 표현될 수 있으므로, 다음의 식(13)과 같이 정의되는 D_{63} 에 식(11)과 (12)를 대입하여 식(14)와 같이 정리할 수 있다.

$$D_{63} = \lambda \left(\frac{4E(m)Q_{vv}}{\pi^2 F(m)k_{ext}} \right)^{1/3} \quad (13)$$

$$= C \left(\frac{Q_{vv}}{k_{ext}} \right)^{1/3}$$

$$D_{63} = C \left(\frac{I_{sca}}{I_{LII}} \right)^{1/3} \quad (14)$$

D_{30} 은 식(14)와 (6)을 이용하여 다음의 식(15)와 같이 나타낸다.

$$D_{30}(f_N)^{-1/3} \cdot D_{63} \quad (15)$$

또한 식(5) 및 식 (15)로 표현되는 수밀도는 식 (2)와 식(14)를 이용하여 식(16)과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$N = \frac{6f_N \phi}{\pi D_{63}^3} = C \frac{I_{LII}}{(I_{sca}/I_{LII})} \quad (16)$$

$$= C \left(\frac{I_{LII}^2}{I_{sca}} \right)$$

위와 같은 계산식을 LII 및 LIS의 화상의 pixel에 적용하여 상대입경 및 상대수밀도를 계산하지만, LIS신호에는 연료액적의 신호도 존재하므로 LII와 LIS 두 신호가 모두 존재하는 영역에서만 계산을 수행하여, 액적신호에 대한 영향은 제거한다.

Fig. 1은 위와 같은 계산과정을 흐름도로 나타낸 것이다.

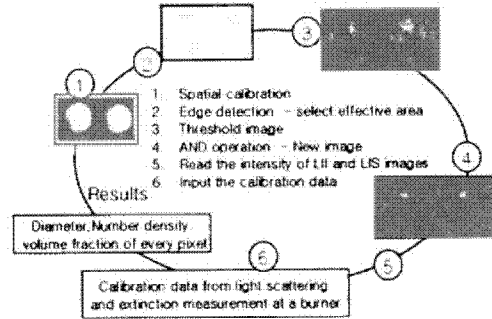


Fig. 1 Procedure of calculation for soot number density, diameter, and volume fraction.

3. 실험장치 및 실험방법

본 연구에서는 LII/LIS 기법을 이용한 매연입자의 2차원 측정과 이를 해석하기 위한 광소멸/산란법을 이용한 매연입자의 정량적인 측정이 수행되었다. 측정 대상으로는 화염과 매연생성 특성이 잘 알려진 에틸렌 확산화염을 사용하였다.[8]

3.1 LII/LIS 실험

LII의 기본 특성의 파악과 보정 및 LII와 LIS의 동시측정 알고리즘의 개발을 위한 실험장치의 구성은 대략 Fig. 2 및 Fig. 3과 같다.

화염은 동축류 버너를 사용하여 생성하였으며, 에틸렌(C_2H_4) 연료를 180sccm으로 공급하였다. 광원으로는 Q-switched Nd : YAG 레이저를 사용하였다. LII법의 계측원리상 파장은 길수록 좋으나, Nd : YAG레이저의 기본 파장인 1064nm의 경우 가시영역을 벗어나므로 실용성이 없으며, 위험성이 존재하므로 본 연구에서는 기본파장 1064nm를 배가한 532nm의 광을 사용하였다. 레이저는 10Hz로 단속적으로 발진되었으며, 이때 발생하는 신호를 trigger 신호로 사용하여, ICCD 카메라를 구동시켰다.

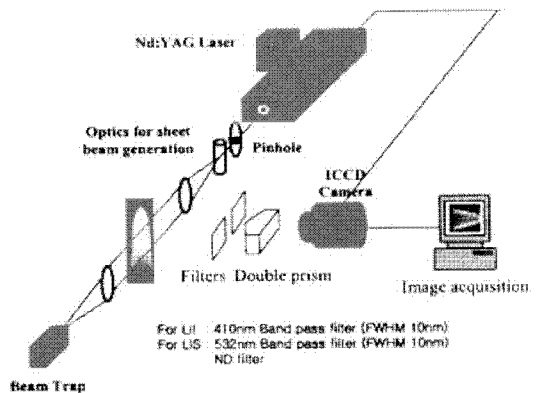


Fig. 2 LII measurement set-up.

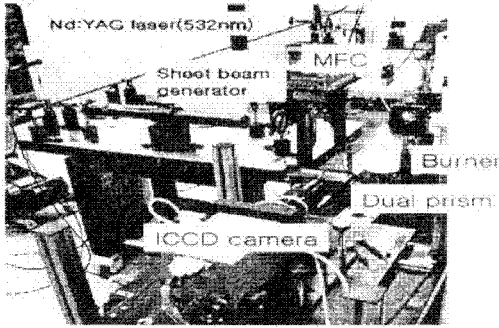


Fig. 3 LII measurement test.

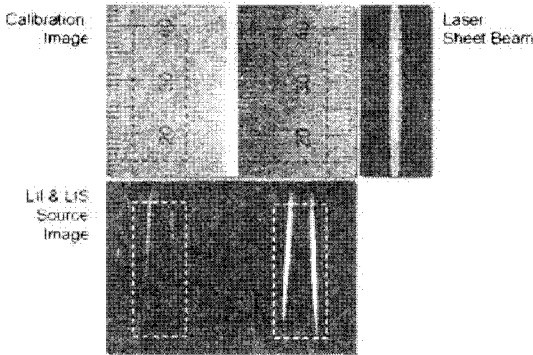


Fig. 4 Spatial calibration

레이저에서 발생된 원형의 광은 평면광 발생 광학계를 이용하여 측정 지역에서 높이 40mm, 두께 0.1mm의 2차원 평면광으로 조정되었다. 촬영장치로서 ICCD 카메라(분해능: 576×484, 최소 gate time : 5ns)를 사용하였으며, 전용의 이미지 저장 보드와 프로그램을 사용하여 취득하였다. 실험 시 화염사진은 10회 이상 반복 취득하여 평균 화상을 제시하였다.

레이저에 입사되는 광에 의한 LII 및 LIS의 취득을 위한 동시 촬영 시에는 두개의 화상을 하나의 ICCD 카메라로 받기 위하여 dual prism을 사용하였다. LIS 신호취득용으로는 중심파장 532nm(FWHM 10nm)의 band pass filter와 ND filter(natural density filter)를 사용하였으며, LII 신호의 취득을 위하여서는 중심파장 410nm(FWHM 10nm)인 band pass filter를 사용하였다.

이차원 화상분석을 위하여서는 실제 측정 대상의 크기와 화상내의 이미지의 크기의 척도를 맞추어주는 작업이 필요하다. Fig. 4에는 실제 실험 시 dual prism을 이용하여 두개의 이미지를 하나의 화면에 취득한 예를 보여주고 있으며, 실험의 실시 전 적절한 초점의 설정과 화상 척도의 보정을 위하여 취득한 표준 척도화상이다. 이러한 작업으로부터 실험 시 측정되는 화상의 실제 크기와 위치를 확인하고, 계산결과와 제공 시 실제길이 척도로 결과를 제공한다. 금번의 실험에서 측

정높이는 버너 노즐의 15mm에서 40mm까지의 영역을 화상 취득하여 처리하였다.

LII 법의 원활한 적용을 위하여서는 무엇보다도 LII의 측정원리에 부합되는 레이저광량의 선정이 중요하다.[9] 따라서 본 연구에서는 본 실험에 앞서 레이저의 광량을 27W/cm²에서 231W/cm²까지 8단계로 변화시켜 레이저 광량이 LII 신호에 미치는 영향을 조사하여 적절한 광량을 선정하였으며, 이와 함께 LII 및 LIS의 동시 촬영시의 최적의 화상취득시기의 결정을 위한 예비실험을 수행하였다.

3.2 광소멸법/산란법 실험

레이저 광소멸법/산란법을 이용한 매연체적분율, 매연입자 입경 및 수밀도의 측정에는 아르곤이온 레이저(Spectra-Physics Stabilite 2017-05)를 파장 514.5nm에서 1W의 출력으로 사용하였다. 광소멸 신호와 광산란 신호는 각각 광다이오드(Hamamatsu 1337-1010BQ)와 PMT 모듈(Hamamatsu H7712-02)을 이용하여 측정하였다.

매연체적분율은 측정된 광소멸 신호로부터 얻어진 적분된 매연체적분율을 Abel 변환하여 계산되었다. 레이저 조사방향과 직각인 위치에서의 매연입자의 광산란 단면적(scattering cross section) $Q_{sc}(\pi/2)$ 는 광산란 측정 신호와 에틸렌의 Rayleigh 산란 신호를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q_{sc, C_2H_4} = N C_{C_2H_4} \quad (17)$$

$$I_{sc, C_2H_4} = \eta_{sc} Q_{sc, C_2H_4} \quad (18)$$

$$\frac{I_{sc, soot}}{\eta_{sc}} = Q_{sc, soot} \quad (19)$$

여기에서 N 은 에틸렌 분자의 수밀도(number density, molecules/cm³), η_{sc} 수광부의 calibration factor를 나타낸다. 이때 에틸렌의 Rayleigh 산란 단면적은 $4.14 \times 10^{-27} \text{cm}^2 \text{sr}^{-1}$ 의 값[10]을 사용하였다.

매연입자의 평균 입경과 수밀도는 측정된 매연체적분율과 산란단면적으로부터 식(3)-(12)를 사용하여 구하게 된다. 이때 레이저광의 흡수(laser beam attenuation)와 산란신호의 흡수(signal trapping)를 보정하면 비교적 정확한 광산란 신호를 얻을 수 있다. Fig. 5는 화염의 높이 35mm에서 측정된 광산란 신호를 보여주고 있으며 이 위치에서와 같이 비교적 매연이 많이 존재하는 지역에서는 광산란 신호의 보정이 필요함을 알 수 있다.

광소멸법/산란법을 이용한 매연입자의 체적분율, 평균입경 및 수밀도의 측정은 화염 높이 15, 25, 35, 45mm에서 반경방향으로 0.1mm 간격으로 수행되었다. 이 결과들은 LII/LIS 계측 시스템의 보정(calibration)에 사용되었으며, 또한 LII/LIS 기법으로 측정된 결과와 비교 검토되었다.

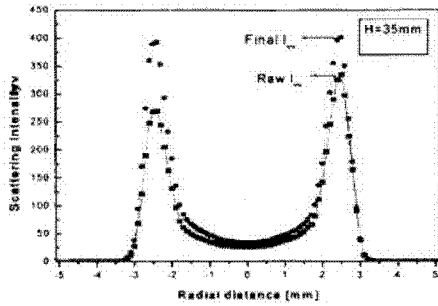


Fig. 5 Light scattering data before and after correction for laser beam attenuation and signal trapping.

4. 결과 및 고찰

4.1 실험조건 설정

4.1.1 레이저광량의 설정

Fig. 6은 화염내의 다양한 높이에서의 레이저광 강도 변화에 따른 LII신호의 변화를 보여주고 있다. 그림의 설명 중 x 축은 동심원화염의 반경방향 길이를 나타내며, 음의 부호는 버너노즐의 중심을 기준으로 레이저 입사 쪽을 의미한다.

LII 신호의 측정은 레이저 광강도 변화에 대하여 동일지점 ($y=30\text{mm}$, $-2.0 \leq x \leq -4.0$)에서 수행되었으며, gate time은 100ns였다. 레이저의 광강도가 $84\text{MW}/\text{cm}^2$ 까지는 레이저광의 증가에 비례하여 LII신호의 강도도 증가되고 있으나, 그 이상의 레이저광 강도에서는 오히려 LII 신호가 떨어지거나, 유지되는 결과를 볼 수 있다. 이는 $84\text{MW}/\text{cm}^2$ 의 레이저광 강도에서 vaporization 이 급격히 증가됨을 의미하여, 이 영역부터 매연입자는 포화(saturation)되었다고 이야기한다. 이 포화영역은 레이저광 강도에 대하여 LII 신호의 변화가 둔감한 영역으로 LII 계측을 위한 적당한 레이저 강도라고 볼 수 있다.

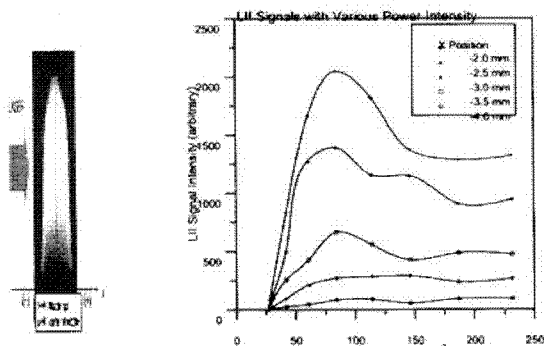
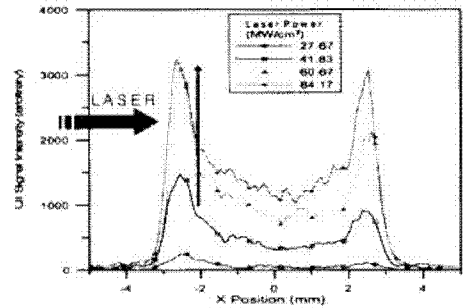
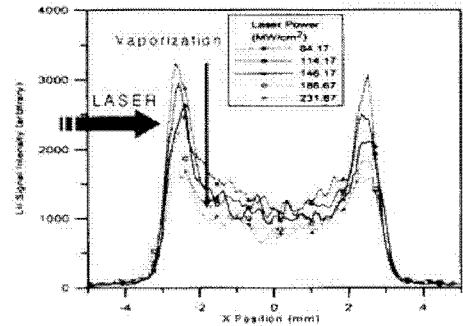


Fig. 6 Characteristics of LII signal with various laser power conditions.



(a) Low laser power



(b) High laser power

Fig. 7 Characteristics of LII signal of a laminar diffusion flame with various laser power.

이러한 광 강도에 대한 특성을 화염 단면에 대하여 고려하였을 때의 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 레이저의 입사 방향은 화염에 대하여 좌측으로부터 입사되며, LII의 계측원리상 레이저는 화염내의 매연지역을 거쳐가며, 그 강도가 작아지는 특징을 가진다. Fig. 7의 (a)의 결과로부터 $84\text{MW}/\text{cm}^2$ 의 레이저 강도까지는 LII 신호가 같이 증가되는 경향을 잘 보여주고 있으나, (b)의 $84\text{MW}/\text{cm}^2$ 의 강도보다 레이저 강도가 증가되는 경우에는 LII 신호가 soot vaporization 효과에 의하여 작아지는 결과를 보여주고 있다. 그러나 화염중심축에 대하여 레이저의 입사방향과 반대쪽의 LII 신호는 대칭을 이루지 못하며, 입사쪽 LII 신호에 비하여 상대적으로 작은 신호를 내보내고 있는 것을 알 수 있다. 이는 전술하였듯이 레이저가 진행하면서 매연입자에 의하여 흡수되므로 레이저의 입사가 진행될수록 그 강도가 작아지기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 Fig. 7(b)의 결과 중 $186\text{MW}/\text{cm}^2$ 과 $231\text{MW}/\text{cm}^2$ 의 레이저 강도 조건에서는 화염중심축에 대하여 레이저 입사와 반대쪽에서는 오히려 LII 신호가 더욱 강하게 나타나는 현상을 볼 수 있다. 본 연구에서는 $84\text{MW}/\text{cm}^2$ 를 최적의 레이저 강도 조건으로 선정하여 실험을 수행하였다.

4.1.2 화상 취득시기의 결정

Fig. 8은 동일한 레이저광강도(84MW/cm²) 및 gate time(25ns)에서의 LII 및 LIS 동시촬영 결과를 gate delay 변화에 따라 보여주고 있다. 두 가지의 신호를 동시에 받기 위하여서는 ICCD 카메라의 적절한 gate timing이 중요하며, 따라서 gate delay를 변화시킨 경우의 LII 및 LIS 신호의 특성을 조사하였다. LIS 신호는 상대적으로 매우 짧은 시간동안 발생되어지고 있으나, LII 신호는 매우 긴 시간동안 지속되고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 LII 및 LIS의 동시 측정을 위하여서는 LIS 신호가 발생하는 시간 영역 안에서 화상취득을 이루어야함을 알 수 있었다. 그러나 매우 빠른 시기에서의 동시화상의 취득은 상대적으로 강한 LIS 신호에 의하여 LII신호가 왜곡될 가능성이 있으므로 어느 정도 LIS 신호가 약화된 시기에 취득하는 것이 바람직한 것으로 생각된다.

4.2 보정실험을 통한 정량화

4.2.1 LII 와 Extinction 실험결과를 이용한 매연체적분율의 정량화

LII 신호는 일반적으로 soot의 체적분율과 비례하는 특성을 가지고 있으므로, 실제 soot의 체적분율과의 비례계수를 도출함으로써 LII 이미지를 정량화할 수 있다. Fig. 9는 광소멸법을 이용하여 측정된 화염내의 매연체적분율 결과를 보여주고 있다.

Fig. 10은 화염내 높이변화시의 soot의 체적분율과 LII 신호를 비교하여 나타내었으며, Fig. 11에는 두 값의 비례계수를 그래프로 나타내었다.

비례계수의 계산시는 매연체적분율의 최대값과 LII 신호의 최대값을 기준으로 계산하였다. Fig. 10의 결과에서 보이듯이 25mm까지 높이의 결과는 거의 동일한 분포를 제공하고 있으며, 그 비례계수 또한 큰 차이가 없는 것을 알 수 있으나, 높이 30mm에서는 화염의 중간부위의 매연체적분율에 차이가 발생하는 것을 알 수 있다.

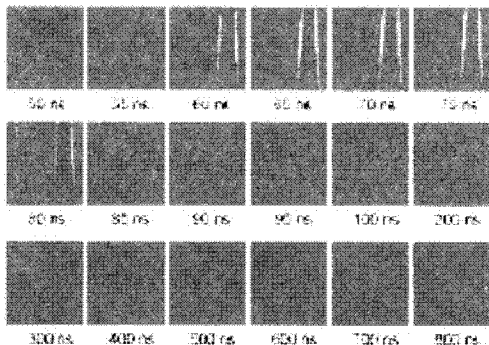


Fig. 8 LII(left) & LIS(right) signals with various gate delay at gate width 25ns obtained simultaneously.

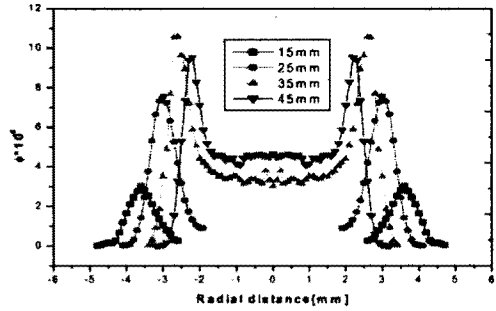


Fig. 9 Soot volume fractions measured by laser extinction method.

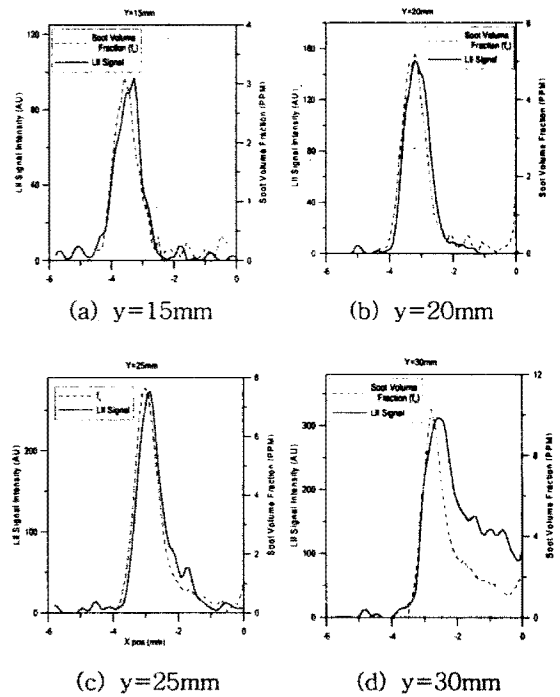


Fig. 10 Soot volume fractions measured by LII(laser 84MW/cm², gate width 25ns, gate time 85ns) and extinction methods.

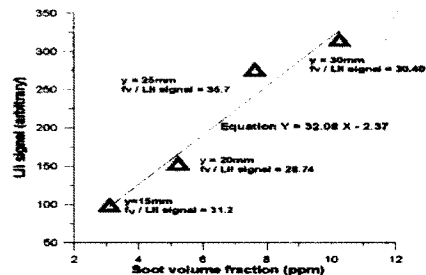


Fig. 11 LII signal vs soot volume fraction obtained from extinction experiments.

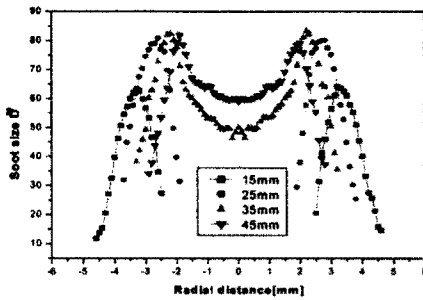


Fig. 12 Mean diameters of soot particles (D30) measured by light extinction/scattering method.

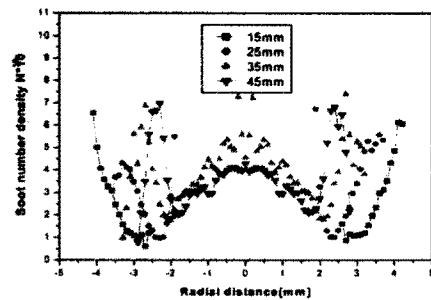


Fig. 13 Number density of soot particles measured by light extinction/scattering method.

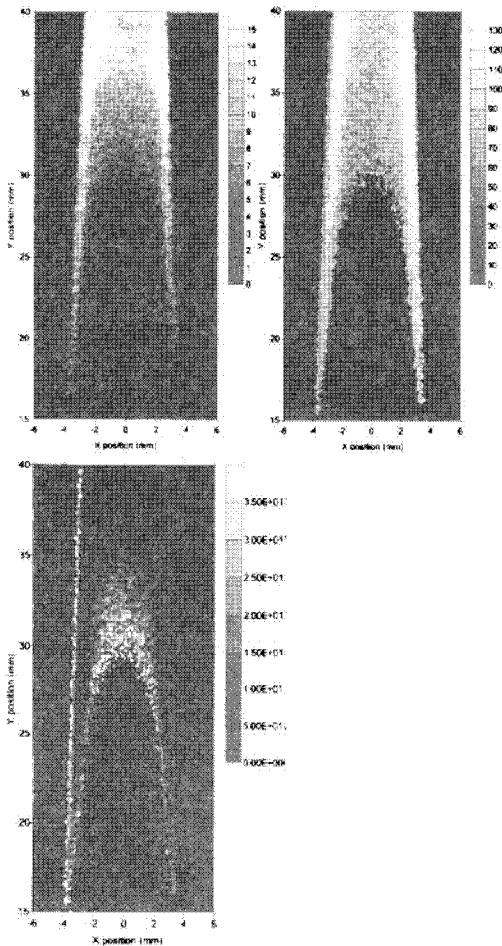


Fig. 14 Simultaneous 2-D LII/LIS measurements, (a) soot volume fraction(ppm), (b) mean diameter(D63) and (c) number density.

이러한 현상의 원인으로 생각되는 것은 LII 측정시의 오차인 것으로 생각되나, 입경의 크기등을 고려하여, 이러한 오차와 관련된 연구가 좀더 신중히 진행되어야 할 것으로 생각되어진다.

4.2.2 매연입자 입경 및 수밀도의 정량화

Fig. 12 와 13은 광소멸법/광산란법을 이용하여 측정된 입자 직경 및 수밀도를 보여주고 있다. 이러한 실험결과를 이용하여 동시에 측정된 2차원 LII 및 LIS 신호로 계산된 매연체적분율, 수밀도 및 매연입자의 평균 입경 분포 결과는 Fig. 14에서 보여주고 있다.

5. 결론

LII/LIS 기법을 이용하여 측정된 에틸렌 화산화염의 매연입자의 정량화 연구를 통하여 다음을 알 수 있었다.

- (1) 광산란 및 소거법을 이용한 보정실험을 통하여 2차원 LII/LIS 동시촬영결과를 정량화할 수 있었다.
- (2) LII/LIS 동시촬영의 정량화 알고리즘을 구성하였으며, 1대의 ICCD카메라를 사용하여 LII/LIS 신호를 동시에 측정하기 위해서는 최적의 광강도와 화상취득시기의 선정이 필요함을 알 수 있었다.
- (3) LII 측정의 경우 광강도가 너무 큰 경우 vaporization 현상이 발생되는 것을 알 수 있었으며, soot 통과시 레이저광의 흡수에 따른 레이저 입사에너지의 감소(laser beam attenuation)현상이 관찰되었다.

후 기

본 내용은 산업자원부에서 시행한 [정책연구과제]의 지원에 의하여 수행된 연구 결과의 일부로서, 관계 기관에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

[1] Lynn A. Melton " Soot Diagnostics Based on Laser Heating," *Applied optics*, Vol. 23, No. 13, July 1984, pp. 2201-2208.

- [2] John E. Dec, Axel O. zur Loye, Dennis L. Siebers, "Soot Distribution in a D.I. Diesel Engine Using 2-D Laser-Induced Incandescence Imaging," *SAE paper*, No.910224, 1991.
- [3] Yong-ho Won, Takeyuki Kamimoto, and Hidenori Kosaka, "A Study on Soot Formation in Unsteady Spray Flames via 2-D Soot Imaging," *SAE paper*, No. 920114.
- [4] Christoph Espey, John E. Dec, "Diesel Engine Combustion Studies in a Newly Designed Optical-Access Engine Using High-Speed Visualization and 2-D Laser Imaging," *SAE paper*, No.930971, 1993.
- [5] Christoph Espey, John E. Dec, "Ignition and Early Soot Formation in a D.I. Diesel Engine Using Multiple 2-D Imaging Diagnostics," *SAE paper*, No.950456, 1995.
- [6] John A. Pinson, David L. Mitchell, Robert J. Santoro, and Thomas A. Litzinger, "Quantitative, Planar Soot Measurements in a D. I. Diesel Engine Using Laser-Induced Incandescence and Light Scattering," *SAE paper*, No.932650, 1993.
- [7] R. J. Santoro, H. G. Semerjian, and R. A. Dobbins, "Soot Particle Measurements in Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 51, 1983, pp203-218.
- [8] 이원남, "동축류 확산화염의 매연생성에 미치는 연료에 첨가된 산화제의 영향," *한국연소학회* 3, 1, 1988, pp 11-19.
- [9] Kazuhisa Inagaki, Semon Takasu, Kiyomi Nakakita, "In-cylinder Quantitative Soot Concentration Measurement by Laser-Induced Incandescence," *SAE paper*, 1999-01-0508, 1999.
- [10] A. D'Alessio, "Laser Light Scattering and Fluorescence Diagnostics of Rich Flames Produced by Gaseous and Liquid Fuels," 207-260, in *Particulate Carbon-Formation During Combustion* (eds D. C. Siegler and G. W. Smith), *Plenum Press*, New York, 1981.