

레이저 가열 측정법을 이용한 화염 내 매연 농도 측정

정 종 수*

Measurement of soot concentration in flames using laser-induced incandescence method

Jongsoo Jung

Key Words : laser-induced incandescence method (레이저 가열 측정법), soot particulate (매연 입자), path-integration (경로적분), laser extinction and scattering method (레이저 광 감쇠 및 산란측정법), tomographical reconstruction (단층 분석), laser energy fluence (레이저 에너지 유속), blackbody radiation (흑체 복사)

Abstract

Laser induced incandescence, LII, recently developed technique for measuring soot concentration in flames, can overcome most of limitations of conventional laser extinction measurement. In this study, experiments were performed to investigate the effect of laser intensity, detection wavelength, and also laser beam quality on both LII signal at a particular position and peak-to-centerline LII signal ratio. The results of LII signal with increasing laser intensity shows its near-independence of laser intensity once threshold level of laser intensity has been reached. However, this near-independence depends on laser beam quality and the incident optical setup. The peak-to-centerline LII signal ratio slowly but continuously increases with laser power. This fact is due to the dependence of LII signal on particle mean diameter. LII signal is attenuated during it passes through the flame containing soot particles. The attenuation rate is inversely proportional to detection wavelength. In this study, LII signal at 680 nm band is 10% greater than the signal at 400 nm band.

1. 서 론

레이저 가열(加熱) 측정법 (Laser-Induced Incandescence) 측정 기술의 원리는 고 에너지 밀도의 레이저 광이 측정 대상부의 매연 입자(煤煙粒子, soot particle) 군에 수 ns 동안 조사(照射)될 때 4000 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 비례한다는 현상을 이용하는 것이다. 원어인 Laser-Induced

Incandescence 는 직역하면 레이저 유도 백열법으로 일부 연구자는 그렇게 부르기도 하지만 본 논문에서는 의역(意譯)하여 레이저 가열 측정법 (LII 법)이라고 부르기로 한다.

레이저 가열 측정법 (LII 법)의 가장 큰 장점은 한 측정점에서의 매연 농도에 대한 정보를 순간적으로 그대로 얻을 수 있다는 점이다. 이제까지 매연 농도 및 입자 직경 등의 측정에 널리 적용되어 왔던 기존의 레이저 광 감쇠(減衰) 및 산란(散亂)광 강도 측정 기술 (laser extinction and scattering method) 에 의한 매연 입자 농도의 측정 방법은 측정 원리상으로 경로 적분형 (經路 積分型, path-integration type)이므로 공간 상의 한 측정점

* 정희원, 한국과학기술연구원

에서의 매연 입자 농도를 얻기 위해서는 광 감쇠(light attenuation)에 대한 일차 측정 결과를 이용하여 단층 분석(tomographical reconstruction)을 할 필요가 있다고 하는 단점이 있다. 이 LII 법은 이러한 단점이 없고 시간적으로도 분해능이 매우 우수한 방법이므로 차세대 매연 농도 측정 방법으로서 주목을 받고 있으며 최근 많은 연구자들이 시도하고 있는 매연 농도 측정 방법이다.^[1-11]

조사된 에너지가 충분하다면 레이저 광의 에너지를 흡수한 매연 입자가 탄소 입자의 증발(sublimation) 온도인 약 4000 K의 고온까지 매연 입자는 거의 흑체(黑體, blackbody)에 가까운 복사체(輻射體)가 되어 매연 입자의 도달 온도에 따라서 Planck's 복사 함수에 따르는 복사열을 방출하게 되며 LII는 이에 따른 매연 입자의 흑체 복사를 측정하는 것이다.

레이저 광이 조사될 때 매연 입자의 도달 온도는 매연 입자의 레이저 광 에너지의 흡수율, 탄소 분자의 증발율, 주위 기체로의 전도, 대류 열전달 및 흑체 복사에 의한 열손실 등에 의하여 결정된다.^{[1][2]} 예를 들어 본 연구에서 사용한 Nd:YAG 펄스 레이저는 레이저 빔이 약 7 ns 정도 지속되는데, 레이저 광이 지속되는 동안 매연 입자의 온도는 레이저 광의 에너지를 흡수하여 급격하게 상승하게 된다. 이때 주위 기체로의 열전달 및 복사 열손실량은 매연 입자의 레이저 에너지 흡수율에 비하여 매우 작으므로, 매연 입자 온도의 상승률이 매우 높다. 매연 입자의 온도가 탄소의 증발 온도인 약 4,000 K 정도까지 상승한 후에는 매연 입자의 증발에 의해 지속적인 온도의 상승이 억제되어 완만히 상승하거나 거의 온도가 일정하게 유지된다. 레이저 조사의 강도가 매우 큰 상태에서는 매연 입자의 표면 온도가 탄소의 증발 온도보다 높아지는 과열(過熱, superheated) 현상으로 약 5,000 K 정도까지 도달하는 것으로 주장하기도 하지만^[1] 이를 뒷받침할 만한 확실한 실험 결과는 아직 충분하지 않은 것 같다.

한편, 레이저 펄스의 지속 기간(pulse duration)이 지나면 입자 주변의 기체로의 전도, 대류 열손실 및 복사 열손실에 의하여 매연 입자의 온도는 최고 도달 온도로부터 점차 하강하게 된다. 단일

매연 입자의 LII 강도, 즉 레이저 광에 의한 가열 후의 흑체 복사의 강도는 매연 입자의 최고 도달 온도 및 시간에 따른 온도 변동, 측정 파장 범위 및 조사된 레이저의 강도(laser fluence)에 따라 달라진다. 매연 입자의 표면으로부터 방출되는 전체 복사열 방출량(total incandescence)는 매연 입자온도의 4승에 비례한다. 한편, 파장에 따른 복사 방출의 특성은 Planck's law를 따라 달라지는데, 최대값이 나타나는 파장은 Wien's displacement law에 따라 결정되며 매연 입자의 도달 온도에 역비례(inversely proportional)한다. 따라서 매연 입자의 온도는 조사된 레이저 광의 지속 시간에 따라 상승, 일정한 온도 유지 및 하강의 과정을 거쳐 변하며 LII 신호는 시간에 따른 매연 입자의 온도에 따라 결정된다.

강한 레이저 광에 의하여 가열된 화염 내의 매연 입자로부터의 복사열 신호가 Raman 산란광에 비해 커질 수 있다는 관찰이 Eckbreth에 의해 보고된 이래^[3] CARS 측정 등에서 오차로 작용하는 이러한 LII 신호를 제거하기 위한 노력으로 이에 대한 연구가 시작되었다. 그런데 1984년 Melton^[1]과 Dasch^[2]가 거의 동시에 각각 독자적으로 매연 입자의 가열과 흑체 복사에 대한 에너지 보존 방정식을 적용하여 이론적인 계산을 수행함으로써 이러한 LII 신호가 그 측정점에서의 매연 농도에 비례하며 이 방법을 매연 입자 농도 측정에 사용할 수 있다는 결과를 발표함으로써 이들의 연구 결과를 바탕으로 화염 내에서의 LII 신호를 측정함으로써 매연 입자의 농도를 측정하려는 일련의 연구가 최근에 이르러 미국의 연구자들을 중심으로 시작되었다. 이러한 연구의 예로는 우선 디젤 엔진을 중심으로 실린더 내에서의 화염 중의 매연 입자의 농도 분포를 측정하는 연구가 시도되어 정성적인 결과를 얻어냈으며^[4-7] 비정상(非定常, unsteady) 화염에 대한 적용이 가능한 LII 측정 방법의 장점을 이용하여 주기적인 flickering flame에 대한 매연 농도 측정에 대한 연구 결과가 보고되었다.^[7]

Santoro 등의 연구에서는 레이저 광 감쇠 및 산란법을 적용하여 얻은 실험 결과를 LII 법에 의한 측정 결과와 비교하여 상당히 잘 일치한다는 것을 보고하였다.^[9-10] 이들의 연구에 의하면 LII 신호는

산란광 신호(약 30 ns 동안 지속)에 비해 충분히 긴 시간동안 지속되며(약 600 ns 정도까지) 레이저 강도(laser intensity)가 약 $1.2 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 정도로 충분히 큰 경우 LII 신호는 포화(飽和, saturated) 상태가 되어 레이저 광의 강도가 계속 증가하여도 신호가 증가하지 않는다는 결과를 보고하였다.

Melton의 연구 결과^[1]에 의하면 레이저 광의 강도가 충분히 높고 매연 입자의 온도가 거의 증발 온도에 도달하는 상태를 가정하면 측정 파장(detection wavelength)이 λ_{det} 일 때 매연 입자 군으로부터의 LII 신호는 매연 입자의 평균 입경의 $(3 + 0.154 / \lambda_{\text{det}})$ 승에 비례한다. 따라서, 본 연구에서와 같이 측정 파장 λ_{det} 가 가시(可視) 광 영역인 400 - 700 nm 인 파장 범위에 있다면 LII 신호는 매연 입자 평균 입경의 3.38 - 3.22 승에 비례하게 되므로, LII 신호는 매연 입자 평균 입경의 3 승에 비례하는 매연 입자의 체적 분율에 거의 비례한다고 볼 수 있다. 따라서 이러한 관계로부터 각 점에서의 매연 체적 분율을 LII 신호로부터 추정할 수 있다. 본 연구에서는 Santoro 등의 연구 결과^[9]를 바탕으로 측정 파장의 변경에 따른 LII 신호의 영향, 측정되는 화염 내의 매연 농도의 분포에 대한 레이저 에너지 유속 변화의 영향 등을 검토하기 위하여 조사되는 레이저 광의 강도를 변경하면서 실험을 수행하였다.

2. 실험 장치 및 방법

본 연구에서 사용한 LII 법을 이용한 매연 입자의 농도 측정에 사용하는 방법 및 장치 (Fig. 1)에 대하여 설명하기로 한다.

LII 법에서 사용하는 광학 장치의 주요부는 Nd:YAG 펄스 레이저와 레이저 광을 측정부에 조사하는 광학 장치 부와 LII 신호를 검출하는 수광부의 2 부분으로 크게 나누어진다. 레이저 광을 조사하는 부분의 광학계는 레이저 광의 강도를 적당한 범위가 되도록 조절하는데 사용되는 Neutral Density Filter 들, Half-wave plate 와 polarizing Beam Splitter, Aperture 및 집속(集束, focusing)

렌즈 등으로 구성되어 있다. 한편 수광부는 한 측정점에 대한 측정 (point measurement) 시에는 LII 신호용 집속 렌즈 (Collecting lens), 광학 필터 (optical filters), Monochromator, 광배증관 (光倍增管, photo-multiplier tube) 및 레이저 펄스의 주기와 LII 신호를 동조시키는데 사용되는 BOXCAR 등으로 구성되어 있다. 한편 본 논문에서 발표하는 연구 결과는 한 측정점에 대한 측정 (point measurement)에만 한정하였으나, 2 차원 영상을 처리하여 평면 전체의 매연 농도 분포를 측정하는 경우에는 LII 신호를 수광하는 수광부는 집속 렌즈, 광학 필터와 ICCD 카메라를 사용하며 역시 레이저 펄스의 주기와 LII 신호를 동조시키는 신호처리 시스템을 사용한다.

본 연구에서 사용한 Nd:YAG 펄스 (pulse) 레이저 (Continuum Model NY61-10)는 레이저 광의 지속 시간이 약 7 ns 이다. 레이저 빔은 촛점거리 400 mm 의 bi-convex 렌즈를 사용하여 측정부의 촛점의 직경 (beam waist)가 0.38 mm 가 되도록 하였다. 레이저 광의 파장은 Nd:YAG 펄스 레이저의 본래의 파장인 적외 영역의 1,064 nm 의 레이저 광과 주파수 배증을 통하여 532 nm 의 2 종류로 사용하였다.

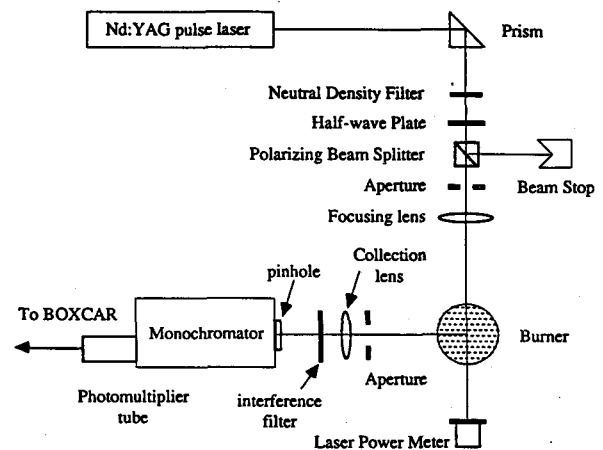


Fig. 1 Optical arrangement for laser-induced incandescence measurements

3. 실험 결과 및 고찰

본 연구에서는 Santoro 등의 연구 결과를 바탕으로 측정 파장의 변경에 따른 LII 신호의 영향, 측정되는 화염 내의 매연 농도의 분포에 대한 레이저 에너지 유속 변화의 영향 등을 검토하기 위하여 조사되는 레이저 광의 강도를 변경하면서 실험을 수행하였다.

본 연구에서 매연 농도 분포의 측정 대상이 된 화염은 Santoro 등의 연구^[9]에서 사용한 동축(coannular) 층류 확산 화염으로 중심부의 연료 분출관의 내경이 11.1 mm, 외부의 동축 공기 분출부의 내경은 101.6 mm 이다. 연료로는 에틸렌(ethylene, C₂H₄)을 사용하였으며 대표적인 실험 조건에 대해 연료 유량은 3.85 cm³/s 이고 공기 유량은 1060 cm³/s 로 하였다.

3.1 레이저 에너지 유속에 따른 LII 신호의 변화

Fig. 2. 는 LII 신호에 대한 레이저 에너지 유속의 영향을 나타내는 그림이다. 본 실험에서는 half-wave plate 와 polarizing beam splitter 를 조합하여 레이저광의 유속을 0.025 - 0.55 J/cm² 의 범위에서 변화시켰다. 이 그림으로부터 레이저 에너지 유속이 0.15 J/cm² 에 이르기까지는 레이저 에너지 유속의 증가에 따라 LII 신호가 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 레이저 에너지 유속이 0.15 J/cm² 이상이 되면 신호의 증가율이 둔화되기 시작하여 0.2 J/cm² 이상에서는 거의 레이저 에너지 유속의 변화에 대해서 LII 신호의 변화가 없는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 Ni 등의 연구(1995)의 결과와도 잘 일치한다.

LII 신호의 레이저 에너지 유속의 변화에 따른 이러한 특성은 다음과 같이 설명할 수 있다. 즉, 레이저 에너지 유속이 아직 크지 않은 0.1 J/cm² 이하의 레이저 에너지 유속 범위에서는 매연 입자의 도달 온도가 탄소의 증발 온도에 도달할 때까지 계속 증가한다. 레이저 에너지 유속의 증가에 따라 가장 흡수 계수(absorption coefficient)가 커서 온

도가 빨리 상승하는 크기의 매연 입자 군이 먼저 탄소의 증발 온도인 약 3915 K 에 도달하게 되고 따라서 LII 신호의 증가율이 둔화된다. 레이저 에너지 유속이 충분히 커져서 모든 크기의 입자가 동시에 증발 온도에 도달하면 LII 신호는 더 이상 증가하지 않게 된다. Hofeldt 의 연구^[12]에 의하면 532 nm 의 Nd:YAG 레이저를 사용할 때 매연 입자의 흡수 계수는 평균 입경 100 nm 부근에서 최대값을 나타낸다고 보고하고 있다.

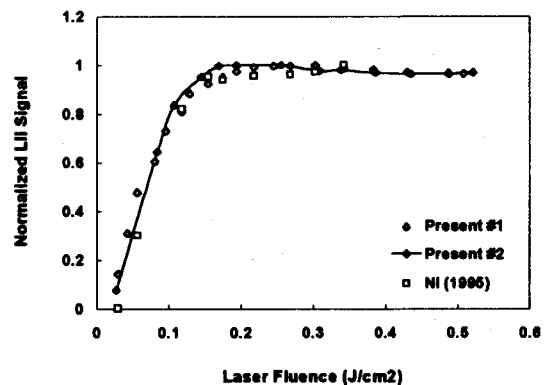


Fig. 2 Effect of laser fluence on LII signal

한편으로는 이러한 레이저 에너지 유속에 대한 LII 신호의 특성에 대해서는 레이저 광의 강도 분포의 영향을 고려하여 해석할 필요가 있다. 즉, 레이저 광의 강도 분포는 대략 중심 부근의 강도가 최대치가 되는 가우스 분포함수(Gaussian distribution function)의 형태를 가지는 것이 일반적이며 본 연구에서 사용한 레이저 광에 대한 측정 결과 예측한 대로 거의 가우스 분포함수의 강도 분포를 가지는 것을 알 수 있었다. 따라서 레이저 광의 강도 분포함수를 고려하면 레이저 광의 중심부에서는 강한 레이저 에너지 유속을 받게 되고 주변부에서는 상대적으로 약한 레이저 에너지 유속을 받게 되므로 레이저 광의 중심부에서는 입자들의 대부분이 증발 온도에 도달하는 경우에도 주변부에서는 아직 레이저 에너지 유속의 증가에 따라 입자의 도달 온도가 증가하고 있다는 가정이 가능하다. 측정되는 LII 신호의 강도는 이러한 효과가 합하여 검출되는 것이므로 이와 같은 점을 고려하여야 하

며 이러한 현상은 레이저 유도 포화 형광법 (LSF, laser-induced saturated fluorescence method) 측정에서도 발견되는 현상으로 알려져 있다. 향후의 연구에서는 이와 같은 가정에 대한 검증을 위한 실험을 수행할 예정이다.

한편 이와 같이 일정한 레이저 에너지 유속 이상의 값에 대해서는 레이저 에너지 유속의 변화에 따라 LII 신호가 거의 변화하지 않는 Level-off 특성은 일반적으로 LII 측정시에 공통적으로 나타나는 현상이고 레이저 광의 유속이 매연 입자에 의하여 감소되는 경우에도 LII 신호 자체에 대한 영향이 크지 않다는 면에서 LII 측정법의 장점이 될 수 있는 하지만 몇몇 연구자들의 연구 결과^[8-10]를 검토해 본 결과 실험의 광학적 (optical) Setup, 특히 레이저 입사광의 특성에 따라서 달라지는 것으로 생각되며 앞으로 이 문제에 대한 연구도 반드시 이루어져야 한다.

3.2 측정 파장 변경의 영향

Fig. 3 은 본 실험에 사용한 화염에 대하여 높이 40 mm 의 위치에서 측정된 LII 신호의 반경 방향의 분포를 나타낸 그림이다. 이 분포는 중심축 상에서 측정된 신호로 검출광학계와 레이저 광이 통과하는 위치를 고정하고 버너를 움직여서 화염을 레이저 광의 통과 방향에 대하여 직각으로 이동시키면서 측정된 분포이며 이 그림에서 (+) 의 부호는 검출계 측에 가까운 쪽을 나타낸다.

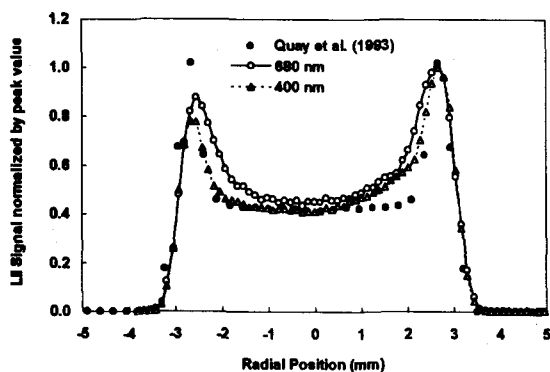


Fig. 3 Radial profiles of LII signal at two different detection wavelengths

이 그림에서 가장 큰 특징은 (+) 측의 최대치 (peak) 에 비하여 (-) 측의 최대치가 10 - 20 % 정도 작은 값을 나타내는 점이다. 이러한 특징은 LII 신호가 화염을 통과하여 검출기로 도달할 때까지 화염 중의 매연 입자에 의한 감소가 일어나서 신호가 작아지는 것으로 생각되며 특히 이러한 신호의 감소는 검출 파장이 짧은 경우 커지는 것을 알 수 있다. 본 실험에서 680 nm 에서 잦은 (-) 측의 최대점에서의 LII 신호의 크기는 400 nm 에서의 LII 신호에 비해 약 10 % 이상 큰 값을 보이는 것을 알 수 있으며 화염 중심부로부터의 LII 신호에 대해서도 이러한 경향이 나타나는 것을 알 수 있다. 특히 이러한 특성이 뚜렷하게 나타나는 위치는 양쪽의 피크 내측으로 이 부분에서는 특히 매연 입자의 농도가 높아서 LII 신호의 감소량의 차이가 현저하게 나타나는 것이 관찰된다.

3.3 레이저 에너지 유속 변화에 따른 LII 신호의 반경 방향 분포의 영향

Fig. 4 는 레이저 광의 강도를 0.44, 1.0 및 2.0 mJ 로 변화시킨 경우의 40 mm 단면에서의 LII 신호의 반경 방향 분포를 측정된 결과를 나타낸 그림이다. 측정 결과의 비교를 위하여 중심축 부근에서의 LII 신호의 평균치를 기준으로 하여 나타냈다.

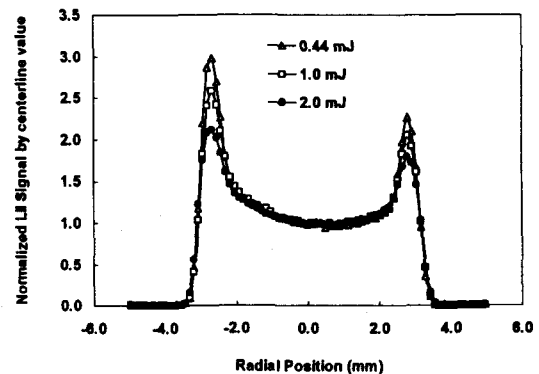


Fig. 4 Radial Profiles of LII Signals with various laser energy fluences

레이저 광의 강도가 증가함에 따라 관찰되는 특징은 양측 피이크에서의 LII 신호의 최대값이 작아진다는 점이다. 레이저 광의 강도가 0.44 mJ 이었을 때 중심축에서의 LII 신호의 약 3 배에 달하는 (-) 측의 최대치는 1.0 mJ 에서는 약 2.5 배로 감소하고 레이저 광이 2.0 mJ 이 되면 2 배가 약간 넘는 수준이 된다.

3.4 레이저 광 강도에 따른 LII 신호비

Fig. 5 는 레이저 광의 강도를 약 2.5 mJ 까지 변화시키면서 40 mm 단면에서의 피이크에서와 중심선에서의 LII 신호의 변화를 측정된 결과이다. 레이저 광의 강도가 증가함에 따라 피이크에서와 중심선에서의 LII 신호의 변화는 거의 유사한 경향을 나타내며 앞서의 3.1 절에 보인 레이저 에너지 유속에 대한 LII 신호의 특성과 대체로 일치한다. 즉, 처음에는 레이저 에너지 유속의 증가에 따라 LII 신호가 급격히 증가하다가 레이저 에너지 유속이 어느 정도 이상이 되면 LII 신호의 증가율이 둔화되기 시작하여 0.5 mJ 이상의 레이저 강도에서는 레이저 에너지 유속의 변화에 대해서 변화가 크지 않은 것을 알 수 있다. 이러한 레이저 에너지 유속에 대한 LII 신호의 변화율은 피이크에서와 중심선에서 거의 동일한 것을 이 그림으로부터 알 수 있다. 그러나 Fig. 2 의 LII 특성이 거의 변화가 없는 것에 반해 Fig. 5 에서는 레이저 에너지 유속이 큰 범위에서도 완만하지만 계속 증가하는 경향을 보이고 있으며 이와 같은 현상은 레이저 광 입사부의 조리개의 크기를 조절하여 변화시킨 결과로 생각된다. 따라서 특히 레이저 광 입사 측의 광학계의 차이에 의하여 이러한 경향이 달라질 수 있으므로 이에 대하여 유의하여야 할 것으로 생각되며 이에 대한 연구 결과는 다음 기회에 보고하기로 한다.

레이저 가열 측정법을 적용하는 경우 대부분 매연 농도 등에 대한 측정치를 미리 레이저 감쇠-산란 측정법 등의 다른 측정 방법 등을 적용하여 구해 놓은 화염 내의 어느 위치에서의 LII 신호를 검정치로 사용하고 있다. 즉, 미리 알려져 있는 매연 입자의 체적 분율 (volume fraction) 과 LII 신호와의 관계를 이용하여 측정하려는 위치에서의 LII 신

호의 크기로부터 그 위치에서의 매연 체적 분율 값을 구하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 대상으로 하는 화염의 제트 분출구로부터의 높이 40 mm 위치에서의 매연 체적 분율의 피이크 치와 화염의 중심 부근에서의 매연 체적 분율을 비교함으로써 이러한 검정 방법의 타당성을 검토하였다. 레이저 감쇠-산란 측정법을 이용하여 측정된 이 위치에서의 매연 체적 분율의 피이크 치에 대한 화염의 중심부의 매연 체적 분율의 비는 약 0.38 이다.

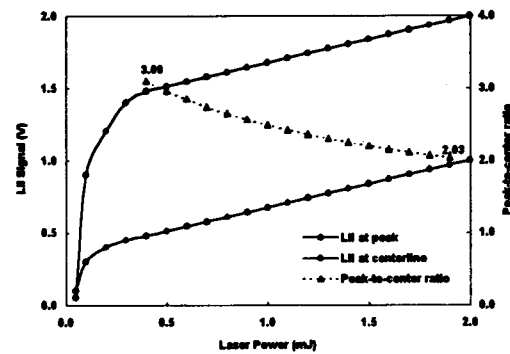


Fig. 5 LII Signals at peak and centerline with varying laser energy fluence

Fig. 5 에 레이저 광의 강도를 약 2.5 mJ 까지 변화시키면서 피이크에서의 LII 신호에 대한 중심선에서의 LII 신호의 비의 변화를 나타내고 있는데, 상당히 넓은 범위의 레이저 광의 강도 변화에 대해서 LII 신호비가 비교적 완만하게 거의 직선적으로 증가하는 경향이 관찰된다. 즉, 레이저 광의 강도가 1 mJ 인 경우에는 피이크에서의 LII 신호에 대한 중심선에서의 LII 신호비는 약 0.39 정도로 레이저 감쇠-산란 측정법에 의한 이 화염에 대한 매연 체적 분율의 비와 유사한 값을 나타내고 있다. Quay 등^[9] 의 레이저 가열법을 이용한 측정에서도 본 실험에서의 레이저 광의 강도 1 mJ 과 유사한 레이저 에너지 유속 범위를 사용하고 있으며 화염 전체에 걸쳐 레이저 감쇠-산란 측정법을 이용한 결과와 비교적 잘 일치한다는 결론을 내리고 있다. 그런데 이러한 LII 신호비는 레이저 광의 강도가 2 mJ 인 경우에는 0.46 정도로 상당히 커지고, 0.44 mJ 인 경우 0.34 정도로 작아지는 등 상당한 차이

를 나타낸다. 레이저 광의 강도가 화염을 통과하면서 약 20 % 정도 감소하는 정도로는 3 - 4 % 정도의 변동 정도이므로 큰 영향이 없을 것으로 생각되지만 레이저 광의 입사 강도 자체를 1 mJ 로부터 2 mJ 로 변화시키는 등의 큰 차이를 줄 경우에는 20 % 정도의 큰 변동이 있을 수 있다. 이러한 변동은 주로 피이크 위치와 중심부의 매연 입자의 평균 입경 분포의 차이에 기인하는 것으로 생각되거나 앞으로 이에 대해 검증을 위한 실험이 필요하다. 따라서 레이저 가열 측정법의 적용 시 측정 위치에서의 실제의 매연 체적 분율을 결정하기 위해서는 이와 같은 LII 신호에 대한 입사광 강도의 영향을 고려하여야 할 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 화염 내의 매연 입자의 체적 분율의 측정에 레이저 가열 측정법의 적용하기 위하여 필요한 여러 가지 실험적인 검증을 수행하였다. 에틸렌을 연료로 사용하는 동축 층류 확산 화염에 대한 Santoro 등의 연구 결과를 바탕으로 레이저 에너지 유속에 따른 LII 신호의 변화, 측정 파장의 변경에 따른 LII 신호의 영향, 측정되는 화염 내의 매연 농도의 반경 방향 분포에 대한 레이저 에너지 유속 변화의 영향 및 레이저 광 강도에 따른 피이크에 대한 화염 중심부의 LII 신호비의 변동 등을 검토하기 위하여 입사 레이저 광의 강도를 변경하면서 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

레이저 에너지 유속에 대한 LII 신호의 특성은, 처음에는 레이저 에너지 유속의 증가에 따라 LII 신호가 급격히 증가하다가 레이저 에너지 유속이 어느 정도 이상이 되면 LII 신호의 증가율이 둔화되기 시작하여 레이저 에너지 유속이 0.2 J/cm^2 이상이 되면 레이저 에너지 유속의 변화에 대해서 LII 신호의 변화가 크지 않은 것을 알 수 있다. 이러한 레이저 에너지 유속에 대한 LII 신호의 변화율은 피이크에서와 중심선에서 거의 동일한 것이 그림으로부터 알 수 있다. LII 신호가 화염을 통

과하여 검출기로 도달할 때까지는 화염 중의 매연 입자에 의해 LII 신호가 감소하며, 검출 파장이 짧은 경우 감소량이 증가한다. 본 실험에서는 680 nm 에서 잡은 LII 신호가 400 nm 에서의 LII 신호에 비해 약 10 % 이상 큰 값을 보인다. 레이저 광의 강도를 0.44, 1.0 및 2.0 mJ 로 변화시킨 경우의 40 mm 단면에서의 LII 신호의 반경 방향 분포를 측정된 결과 양측 피이크에서의 LII 신호의 최대값이 작아진다. 레이저 광의 강도가 1 mJ 인 경우에는 피이크에서의 LII 신호에 대한 중심선에서의 LII 신호비는 약 0.39 정도로 레이저 감소-산란 측정법에 의한 이 화염에 대한 매연 체적 분율의 비와 유사한 값을 나타내고 있다. 그러나 LII 신호비는 레이저 광의 강도가 달라지면 상당한 차이를 나타내며 이러한 변동은 피이크 위치와 중심부의 매연 입자의 평균 입경 분포의 차이에 따른 영향으로 생각된다.

따라서 레이저 가열 측정법을 화염 내에서의 매연 입자 체적 분율의 측정에의 적용할 때에는 이와 같은 LII 신호에 대한 입사광 강도 및 입사광의 강도 분포의 영향, 측정 파장의 영향 등을 고려하여야 할 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학기술연구원 (KIST) 의 단기 해외방문 연구 프로그램의 지원을 받아 이루어진 연구의 일부이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Melton, L.A., 1984, "Soot Diagnostics based on Laser Heating," *Applied Optics*, V. 23, No. 13, pp. 2201 - 2208.
- (2) Dasch, C.J., 1984, "Continuous-wave Probe Laser Investigation of Laser Vaporization of Small Soot Particles in a Flame," *Applied Optics*, V. 23, No. 13, pp. 2209 - 2215.
- (3) Eckbreth, A.C., 1977, "Effects of

- Laser-Modulated Particulate Incandescence on Raman Scattering Diagnostics," *Journal of Applied Physics*, V. 48, p. 4473.
- (4) Dec, J. E., zur Loye, A. O., and Siebers, D. L., 1991, "2-D Soot Imaging in a Direct Injection Diesel Engine Using Laser Induced Incandescence," SAE Technical Papers Series SAE-910224.
 - (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., 1992, "Soot and Fuel Distribution in a D.I. Diesel Engine via 2-D Imaging," SAE Paper No. 922307.
 - (7) Dec, J.E. and Espey, C., 1995, "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.
 - (8) Shaddix, C.R., Harrington, J.E., and Smyth, K.C., 1994, "Quantitative Measurements of Enhanced Soot Production in a Flickering Methane / Air Diffusion Flame," *Combustion and Flame*, V. 99, pp. 723 - 732.
 - (9) Quay, B., T.-W. Lee, T. Ni, and Santoro, R.J., 1994, "Spatially Resolved Measurement of Soot Volume Fraction Using Laser-Induced Incandescence," *Combustion and Flame*, V.97, pp. 384-392.
 - (10) Ni, T., Gupta, S.B., and Santoro, R.J., "Suppression of soot formation in ethene laminar diffusion flames by chemical additives," *Proceedings of the Twenty-Fifth Symposium (International) on Combustion*, to be published.
 - (11) Tait, N.P. and Greenhalgh, D.A., 1992, "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.
 - (12) Hofeldt, D.L., 1993, "Real-time soot concentration measurement technique for engine exhaust streams," SAE Paper No. 930079.