

〈논 문〉 SAE NO. 97370049

## 2파장 보정 Laser-Induced Incandescence 법을 이용한 매연 농도 측정

### Quantitative Measurement of Soot Concentration by Two-Wavelength Correction of Laser-Induced Incandescence Signals

정 중 수\*  
J. S. Jung

#### ABSTRACT

To quantify the LII signals from soot particle of flames in diesel engine cylinder, a new method has been proposed for correcting LII signal attenuated by soot particles between the measuring point and the detector. It has been verified by an experiment on a laminar jet ethylene-air diffusion flame. Being proportional to the attenuation, the ratio of LII signal at two different detection wavelengths can be used to correct the measured LII signal and obtain the unattenuated LII signal, from which the soot volume fraction in the flame can be estimated. Both the 1064-nm and frequency-doubled 532-nm beams from the Nd : YAG laser are used. Single-shot, one-dimensional(1-D) line images are recorded on the intensified CCD camera, with the rectangular-profile laser beam using 1-mm-diameter pinhole. Two broadband optical interference filters having the center wavelengths of 647 nm and 400 nm respectively and a bandwidth of 10 nm are used. This two-wavelength correction has been applied to the ethylene-air coannular laminar diffusion flame, previously studied on soot formation by the laser extinction method in this laboratory. The results by the LII measurement technique and the conventional laser extinction method at the height of 40 mm above the jet exit agreed well with each other except around outside of the peaks of soot concentration, where the soot concentration was relatively high and resulting attenuation of the LII signal was large. The radial profile shape of soot concentration was not changed a lot, but the absolute value of the soot volume fraction around outside edge changed from 4 ppm to 6.5 ppm at  $r=2.8$  mm after correction. This means that the attenuation of LII signal was approximately 40 % at this point, which is higher than the average attenuation rate of this flame, 10~15%.

주요기술용어 : Soot Formation(매연 생성), Diesel Combustion(디젤 연소), Laser(레이저), Soot Concentration(매연 농도), Laser-induced Incandescence(레이저 가열 측정법)

## 1. 서 론

엔진 실린더 내에서의 매연 입자의 생성을 측정하는 것은 디젤 엔진 내에서 생성되는 매연 입자의 배출 문제를 해결하기 위한 연구에서 가장 중요한 문제 중의 하나이다. 특히 최근 레이저를 이용한 측정 방법의 개발이 진전됨에 따라서 엔진 실린더 내에서의 연소 과정을 보다 명확하게 이해할 수 있게 되었다. 본 논문에서 제시하는 Laser-Induced Incandescence법(이하 LII 법)은 매연 입자의 생성 과정을 연구하는데 가장 중요한 점인 실시간으로 측정할 수 있다는 점에서 이 분야의 연구자들 사이에서 크게 주목을 받고 있다.<sup>1~12)</sup> 종전에는 엔진 실린더 내의 매연 농도 및 매연 입자의 입경 분포에 대한 측정 방법으로 레이저 산란-감쇠법(Laser Scattering-Extinction Method)를 적용해 왔는데<sup>14)</sup> 이 방법은 원리 상으로 볼 때 매연 입자 생성 과정을 실시간(Real Time)으로 측정하는 것이 불가능하다. 특히 디젤 엔진 연소 과정에서의 매연 생성 연구에 LII법을 적용한 Dec 등<sup>17)</sup>과 Pinson 등<sup>18)</sup>의 일련의 연구는 디젤 엔진 연소에 대한 새로운 측정 방법의 예를 제시하였다. 디젤 엔진 내의 화염 내에는 미중발 연료 액적과 매연 입자가 동시에 존재하기 때문에, 레이저 광 산란법을 적용하면 미중발 연료 액적에 의한 산란광으로부터 매연 입자에 의한 산란광만의 강도를 분리하는 것이 불가능하다. 이에 반하여 LII 법을 적용하면 미중발 연료 액적으로부터는 신호가 검출되지 않으므로 이 연구에서는 매연 입자만의 농도를 선택적으로 가시화할 수 있었으며, 이제까지의 통념과는 다르게 화염 단면 거의 전역에 걸쳐 연속적으로 매연 입자가 분포되어 있다는 사실을 보여 주고 있다.

LII법 측정 기술의 원리는 측정 대상부의 매연 입자(煤煙 粒子, Soot Particle) 군에 고 에너지 밀도(High Energy Density)의 펄스 레이저 광이 수 Nanosecond 정도의 짧은 시간 동안 조사(照射)될 때 4000 K 이상의 고온으로 가열되는 매연 입자들이 가열 과정과 그 이후의 식는 과정을 통해 방출하는 LII 신호를 측정하는 방

법이다. 고온의 매연 입자로부터 방출되는 흑체 복사(黑體 輻射, Blackbody Radiation)의 강도(強度)를 나타내는 이 LII 신호가 매연 입자의 농도에 비례한다.<sup>2,3)</sup>는 현상을 이용하여 매연 입자의 농도를 측정하는 것이다.

LII법의 가장 큰 장점은 한 측정점에서의 매연 농도에 대한 정보를 순간적으로 얻을 수 있다는 점이다. 이제까지 매연 농도 및 입자 직경 등의 측정에 널리 적용되어 왔던 기존의 레이저 산란-감쇠법(Laser Scattering-Extinction Method)에 의한 매연 입자 농도의 측정 방법은 경로 적분형(經路 積分型, Path-Integration Type)이라는 측정 원리상 광 감쇠(Light Attenuation)에 대한 일차 측정 결과를 다시 단층 분석(Tomographical Reconstruction)을 통해서만 매연 입자 농도를 구할 수 있다고 하는 큰 단점이 있다. 따라서 디젤 엔진과 같이 시간적인 변동이 큰 화염에서는 이 방법을 매연 입자의 측정에 적용하기가 어렵다. 한편, LII법은 이러한 단점이 없고 시간적으로도 분해능이 매우 우수한 방법이므로 차세대의 매연 농도 측정 방법으로서 주목을 받고 있다.

레이저 광의 강도가 충분하여 매연 입자의 도달 온도가 거의 탄소의 증발 온도에 도달하는 상태라고 가정하면, LII 신호의 측정 파장(Wavelength)이  $\lambda_{cut}$ 일 때 매연 입자군으로부터의 LII 신호가 매연 입자 평균 입경의  $(3+0.154/\lambda_{cut})$ 승에 비례한다고 알려져 있다.<sup>2)</sup> 따라서, 가시(可視) 영역인 400~700 nm(Nanometer)인 파장 범위의 측정대상 파장  $\lambda_{cut}$ 에 대해서, LII 신호는 매연 입자 평균 입경의 3.38~3.22승에 비례하게 되므로, 따라서 LII 신호는 매연 입자 입경의 3승에 비례하는 매연 입자의 체적 분율에 거의 비례한다고 할 수 있다.

한편 실제 화염에서의 LII신호의 계측을 통하여 정량적 측정을 하기 위해서는 두 가지 실험적인 문제를 해결하여야 할 필요가 있다. 이 두 가지의 문제는 각각 LII 신호 자체의 감쇠와 입사되는 레이저 광 감도의 감쇠에 따른 LII 신호 측정치의 변화에 대한 것이다. 입사되는 레이저 광은 통과 경로 상의 매연 입자 등에 의해 레이

저 광의 감쇠가 일어나서 각 측정 위치에서의 강도가 달라지게 된다. 이러한 레이저 광의 감쇠는 실험실 규모의 화염에서도 초기 레이저 에너지의 약 20%에 달하며 디젤 엔진이나 액체 연료를 사용하는 가스터빈 연소기 등에서는 이보다 더욱 감쇠가 커질 것으로 예상된다. 이러한 레이저 광의 감쇠에 의해, 측정되는 LII 신호가 측정점에서의 매연 입자의 농도에 선형적으로 비례하지 않게 될 수 있으므로 정량적인 측정을 위해서는 이에 대한 보정(Correction)이 필요하다. 또한 매연 입자로부터 방출되는 LII 신호 자체도 레이저 광과 유사하게 검출기까지 도달하는 경로상의 매연 입자에 의한 감쇠가 일어날 수 있으며 이러한 감쇠의 정도는 경로상의 매연 농도에 큰 영향을 받게 된다. 특히 디젤 엔진과 같이 매연 농도의 분포가 매우 불균일한 경우에는 이러한 불균일한 감쇠에 의한 문제 때문에 매연 농도 분포의 정량적인 측정이 어려울 수 있으므로 이에 대한 보정방법의 개발이 필요하다.<sup>10)</sup>

본 연구에서는 이 LII 측정 방법을 적용하는데 있어서, 2개의 서로 다른 파장에서 측정하는 LII 신호의 감쇠율이 파장에 따라 달라진다는 점을 이용하는 2 파장 LII 신호보정법을 제안한다. 실험적인 검증을 위하여, 매연 입자 농도 등에 대한 측정 결과가 비교적 잘 알려져 있는 동축 층류 확산 화염에 대해 이 방법을 적용하여 매연 입자 농도의 측정을 보다 정밀하게 할 수 있는지를 실험적으로 검토하였다.

## 2. 이론적 배경

레이저 광이 화염내의 매연 입자에 조사될 때 매연 입자의 최종 도달 온도는 매연입자의 레이저 광 에너지의 흡수율, 탄소분자의 증발률, 주위 기체로의 전도, 대류열전달 및 흑체 복사에 의한 열손실 등에 의하여 결정된다. 예를 들어 본 연구에서 사용한 Nd:YAG 펄스 레이저는 레이저 빔이 한 펄스 당 약 7ns 정도 지속되는데, 이때 매연 입자의 레이저 에너지의 흡수량에 비하여 주위 기체로의 대류 및 복사 열전달에 의한 열 손실량은 상대적으로 매우 작으므로, 레이

저 광이 지속되는 이 짧은 시간 동안 매연 입자는 레이저 광의 에너지를 흡수하여 급격하게 온도가 상승하여 탄소의 증발 온도인 약 4,000K 정도까지 상승하게 된다. 레이저 광이 조사된 매연 입자에 대한 에너지 보존 방정식으로부터 입자의 온도  $T_s$ 의 변동을 나타내는 식을 다음과 같이 쓸 수 있다.<sup>11)</sup>

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{I_s A_{abs}}{c_s} - \frac{6h(T_s - T_\infty)}{\rho_s c_s D_s} - \frac{6N_s H_v}{\rho_s c_s D_s N_{Av}} - \frac{3}{2\rho_s c_s D_s} \int_0^\infty Q_{abs} E_{\beta\lambda}(T_s) d\lambda \quad (1)$$

이 식에서 우변의 첫번째 항은 매연 입자에 의한 조사된 레이저 광의 흡수율(Absorption Rate)을 나타내며, 나머지 항들은 매연 입자로부터의 열손실량을 나타내는 항들로 두번째 항은 주위 기체로의 대류에 의한 냉각, 세번째 항은 증발에 의한 에너지 손실을 나타내며 마지막 항이 가열된 입자로부터의 복사열 방출에 의한 에너지 손실을 나타내는 항이다. 일단 충분한 레이저 에너지가 흡수되어 입자의 온도가 탄소 분자의 증발 온도인 4,000K에 도달하면 매연 입자의 증발이 시작되어서 레이저 에너지의 흡수와 매연입자의 증발에 의한 손실이 균형을 이루게 되므로 이에 의해 입자의 온도가 거의 일정하게 유지된다. 레이저 펄스의 지속 기간(Pulse Duration)이 지나면 레이저 에너지의 흡수가 종료되므로 매연 입자의 온도는 입자 주변의 기체로의 전도, 대류 열손실 및 복사 열손실에 의하여 최고 도달 온도로부터 점차 하강하게 된다.

단일 매연 입자의 LII 강도, 즉 레이저 광에 의한 가열 전후의 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. Hofeldt는 그의 논문에서 LII 신호의 강도  $S$ 를 다음의 (2)식과 같이 나타낼 수 있다고 제안하였다.<sup>11)</sup>

$$S = V_{ms} \frac{\Omega}{4\pi} \int_0^{\tau} M_s(t) W(t) \int_0^\infty g(D_s) \quad (2)$$

$$\int_0^{\infty} G_r(\lambda) A_{m,r}(\lambda, D_r) E_{b,\lambda}(\lambda, T_r) d\lambda dD_r dt$$

이 식에서  $V_m$ 는 측정 체적(Measuring Volume)을 나타내며,  $\Omega$ 는 체적(Solid Angle),  $M_r(t)$ 와  $W(t)$ 는 각각 시간  $t$ 에서의 매연 입자의 질량 및 측정 시스템의 윈도우 함수(Signal Windowing Function),  $g(D_r)$ 는 매연 입자의 입경 분포 함수를 나타낸다. 한편  $G_r(\lambda)$ 는 상대 파장 응답함수(Relative Wavelength Response Function)로 정의되는 값으로, 파장에 따른 측정 체적(Measuring Volume)과 측정 장치(Detector) 사이의 광학계(Optics)의 감쇠(Extinction) 특성에 따라 결정된다. 또한  $A_{m,r}(\lambda, D)$ 는 파장과 입자의 평균 직경에 따른 매연 입자의 흡수 계수(Absorption Coefficient)를 나타내며,  $E_{b,\lambda}(\lambda, T_r)$ 는 온도  $T_r$ 인 매연 입자의 파장  $\lambda$ 에 따른 흑체 복사(Blackbody Radiation)를 나타내는 Planck 함수이다. 따라서 이 식은 LII 신호는 이러한 여러가지 인자 들을 신호의 검출 시간, 매연 입자의 입경 분포 및 파장에 따라 적분한 형태를 가지게 된다는 것을 의미하는 것이라고 생각된다. 매연 입자의 표면으로부터 방출되는 전체 복사열 방출량(Total Incandescence)는 매연 입자 온도의 4승에 비례하는 함수이다. 한편 매연 입자의 온도는 조사된 레이저광의 지속 시간에 따라 상승, 일정한 온도 유지 및 하강의 과정을 거쳐 변하며, 따라서 LII 신호는 시간에 따른 매연 입자의 온도에 따라 결정된다.

화염 내의 어떤 위치의 측정 체적 내의 매연 입자군으로부터 나오는 LII 신호의 강도를 주어진 광학 시스템으로 측정한다고 가정하면, 앞의 (2)식에서 입자군의 입경에 따른 신호 특성과 측정 지연 및 지속 시간 등에 따른 특성을 제외할 수 있으므로, 식 (2)를 측정 파장에 대한 부분만 남도록 간단하게 정리하면, 매연 입자의 LII 신호의 강도  $S^0$ 를 다음 식과 같이 나타낼 수 있을 것이다.

$$S^0 = C(\tau, D_r) V_m \int_{\lambda} G_r(\lambda) A_{m,r}(\lambda, D_r) E_{b,\lambda}(\lambda, T_r) d\lambda \quad (3)$$

이 식에서는 LII 신호 측정을 위한 광학 시스템의 시간에 따른 특성과 입자군의 입경에 따른 신호 특성을 모두 포함하는 부분을  $C(\tau, D_r)$ 라는 상수로 정리하였다. 이 식으로 나타낸 LII 신호의 강도  $S^0$ 는 화염을 통과하면서 화염 내의 매연 입자 등에 의해 감쇠되어 신호의 크기가 작아진다.

서로 다른 두 파장  $\lambda_1, \lambda_2$ 에서 측정된 LII 신호를 각각  $S_{\lambda_1}, S_{\lambda_2}$ 라고 하면, 측정 체적부에서 실제 방출되는 원래의 신호 강도, 즉 매연 입자군에 의하여 감쇠되기 전의 LII 신호  $S^0_{\lambda_1}, S^0_{\lambda_2}$ 와  $S_{\lambda_1}, S_{\lambda_2}$ 의 관계는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$S_{\lambda_1} = S^0_{\lambda_1} \exp\left(-\int_x k_{\lambda_1} f_s(x) dx\right) \quad (4)$$

$$S_{\lambda_2} = S^0_{\lambda_2} \exp\left(-\int_x k_{\lambda_2} f_s(x) dx\right) \quad (5)$$

이 식에서  $f_s(x)$ 는 화염 내의 위치  $x$ 에서의 매연의 체적분율(Soot Volume Fraction)을 나타내며,  $k_{\lambda_1}, k_{\lambda_2}$ 는 각각 파장  $\lambda_1$ 과  $\lambda_2$ 에 대한 매연 입자의 감쇠계수를 나타낸다.  $k_{\lambda_1}$  및  $k_{\lambda_2}$ 를 경로상의 매연 입자의 체적 분율 등에 무관한 상수로 가정하고 식 (4)를 정리하면

$$\int f_s(x) dx = -\frac{1}{k_{\lambda_1}} \ln\left(\frac{S_{\lambda_1}}{S_{\lambda_1}^0}\right) \quad (6)$$

식 (5)에 대해서도 동일한 방법으로 정리할 수 있으므로 이 2개의 식으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{S^0_{\lambda_1}}{S_{\lambda_1}} = \left(\frac{S^0_{\lambda_2}}{S_{\lambda_2}}\right)^{\frac{k_{\lambda_1}}{k_{\lambda_2}}} \quad (7)$$

이 식에서 파장  $\lambda_1$ 과  $\lambda_2$ 의 신호비(Signal Ratio)  $R, R^0$ 를 다음 식과 같이 정의하고

$$R = \frac{S_{\lambda_2}}{S_{\lambda_1}}, R^o = \frac{S^o_{\lambda_2}}{S^o_{\lambda_1}} \quad (8)$$

식 (7)의 우편 항의 지수부를 상수  $k$ 로 정의한다.

$$k = \frac{k_{\lambda_2}}{k_{\lambda_1}} \quad (9)$$

따라서  $S_{\lambda_1}$ 와  $S_{\lambda_2}$  사이의 관계는 신호비  $R, R^o$ 를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S^o_{\lambda_1} = S_{\lambda_1} \left(\frac{R^o}{R}\right)^m, m = \frac{k}{1-k} \quad (10)$$

따라서 서로 다른 2개의 파장  $\lambda_1$ 과  $\lambda_2$ 에서의 감쇠 전의 LII 신호를 측정하는 적절한 검정 실험을 통하여, 이 신호의 비  $R^o$ 를 미리 검정하여 두면, 화염 내의 어떤 위치에서 방출되는 LII 신호를 2개의 서로 다른 파장대  $\lambda_1$ 과  $\lambda_2$ 에서 측정하여 신호비  $R$ 을 구하고, 측정된 LII 신호  $S_{\lambda_1}$ 을 식 (10)을 이용하여 보정하여 감쇠되기 전의 LII 신호  $S^o_{\lambda_1}$ 를 구하면, 이 LII 신호로부터 측

정 체적에서의 매연 체적 분율을 구할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는, 여기서 이론적으로 제안하는 이러한 일련의 과정을 실험적으로 검증하여 이 방법, 즉 2개의 파장에서 측정된 LII 신호의 비를 통하여 감쇠되기 전의 LII 신호를 구하는 방법의 가능성에 대한 연구를 수행하였다.

### 3. 실험 장치 및 방법

Fig.1은 본 연구에서 사용한 LII법을 이용한 매연 입자의 농도 측정에 사용하는 광학적 측정 장치의 개략도이다. 본 연구에서 사용하는 광학 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 조절하는데 사용되는 Neutral Density Filter들, 레이저 광의 강도를 연속적으로 조절하기 위한 반파장 통과 필터(Half-Wave Plate)와 편광빔 분리기(Polarizing Beam Splitter), 조리개(Aperture) 및 집광(集光, Focusing) 렌즈 등으로 구성되어 있다. 한편 본 연구

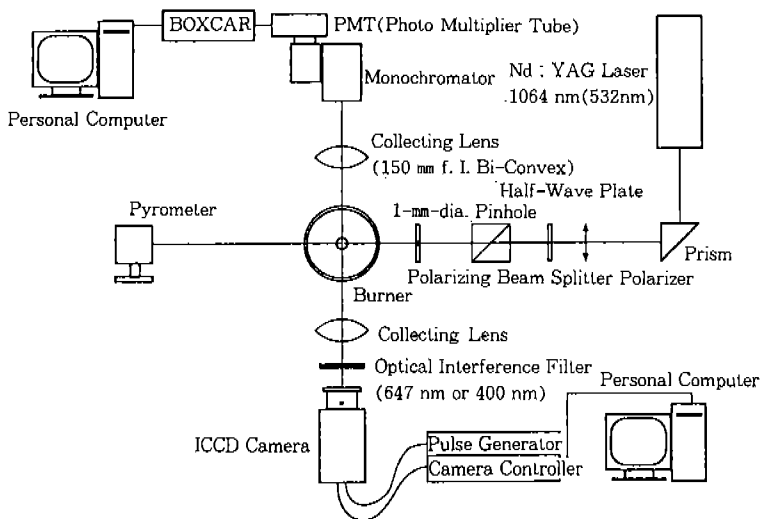


Fig.1 Schematics of the LII Optical Arrangement

에서는 1 차원 측정에서는 수광부로 모노크로메이터와 PMT를 사용하였으며, 2차원 측정을 위해서는 ICCD 카메라, 집광용 렌즈, 광학 필터(Optical Filter)로 구성된 수광부를 사용하여 2차원 영상(Image) LII 신호를 수광하며 레이저 펄스의 주기와 LII신호를 동조시키는 신호처리 시스템을 사용한다. 이 그림에서 평광기와 반과장 통과 필터 및 편광 빔 분리기를 사용하여 레이저 광원의 강도를 연속적으로 조절하였다.

본 연구에서 레이저 광원으로 연구에서 사용한 Nd : YAG 펄스(Pulse) 레이저(Continuum Model NY61-10)를 사용하였고, 레이저 광의 지속 시간이 약 7ns(Nanosecond)이다. 한편 초점거리 400mm의 Bi-Convex 렌즈를 사용하여 측정부의 레이저 빔의 초점부의 직경(Beam Waist)이 약 0.38mm가 되도록 하였다. 레이저 광의 파장으로 Nd : YAG 펄스 레이저의 주파수 배증된 532nm 청색광을 사용하였는데, 레이저 광원의 종류는 고에너지의 펄스 레이저이기만 하면 사용에 큰 문제는 없으나 사용 파장에 따라 매연 입자의 레이저 광 흡수율이 달라지는 점을 고려하여야 한다.

2차원 측정에서는 ICCD 카메라로 잡은 LII 신호의 2차원 평면 화상의 1 픽셀(Pixel)의 한 변의 길이는 대략 0.053mm로 연구에 사용한 레이저 빔의 빔 웨이스트(FWHM, 약 0.38mm)에는 7개의 픽셀이 포함되는 정도로 높은 해상도를 가지는데, 전형적인 실험 결과의 분석에서는 레이저 빔 중심선 주위의 2개의 픽셀을 선택하여 LII 신호의 강도를 평균하였다.

#### 4. 실험 결과

##### 4.1 파장에 따른 LII신호의 감쇠율 변화

본 연구에서는 우선 점 측정(Point Measurement) LII법에 의한 측정 결과에 이 보정 방법을 적용할 수 있는 지에 대하여 실험적으로 검토하였다. Fig.2는 층류 에틸렌-공기 동축 제트 화염의 높이 40mm의 위치에서 측정한 LII 신호의 반경 방향의 분포를 나타낸 그림이다. 우선, 이 그림의 (a)에는 측정부의 기하학적인 배치를 나

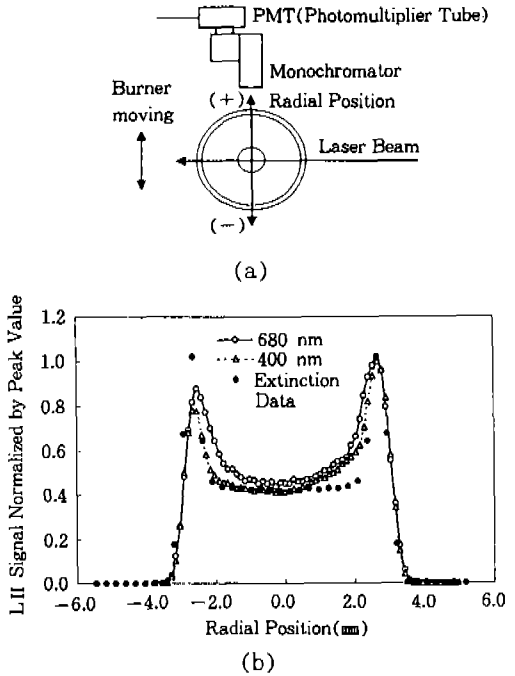


Fig.2 Radial Distribution of LII Signal of a Laminar Ethylene-Air Coaxial Diffusion Flame, Measured at 40mm Above the Jet Exit by the Point-Measurement Optical Setup

타내고 있는데, 그림에서 보이는 대로 검출 광학계와 레이저 광의 통과 위치를 고정하고 레이저 광의 통과 방향에 대하여 직각으로 버너를 이동시키면서 버너 중심축 상의 LII 신호의 분포를 측정하였다. 이 그림에서 반경 방향 위치(Radial Position)의 (+)의 부호가 검출계에 가까운 쪽을 의미한다. 그림의 (b)에서 원(Open Circle)과 실선으로 나타난 것이 680 nm의 파장에서 측정한 LII 신호의 분포이고 삼각형(Triangle)과 점선으로 나타난 것은 400 nm의 파장에서 측정한 LII 신호의 분포이다. 여기에 나타난 채운 원(Solid Circle)으로 나타난 광 감쇠-산란법의 측정 결과<sup>13)</sup>와 비교하여 두 경우 모두 분포 형태는 비교적 유사하다. 그런데 이 그림에서 관찰할 수 있는 점은 (+) 측의 피크(Peak)에 비하여 (-) 측의 피크가 10~20% 정도 작으며, 이러한 신호의 감쇠는 검출 파장이 400 nm로

일 때 더욱 커졌다. 400 nm에서 측정 한 (-) 측의 피크에서의 LII 신호의 크기는 680 nm에서의 LII 신호에 비해 약 10% 정도 작으며, 화염 중심부에서도 유사한 경향이 나타난다. 이러한 현상은 레이저 광이 통과하는 위치에서 발생한 LII 신호가 화염을 통과하여 검출기로 도달하는 동안 화염 중의 매연 입자에 의한 감쇠가 일어나는 것으로 생각된다. 또한 파장이 짧은 광은 매연 입자에 의한 감쇠가 더 크므로 400nm에서의 (-) 측의 피크 치가 작은 것으로 생각된다.

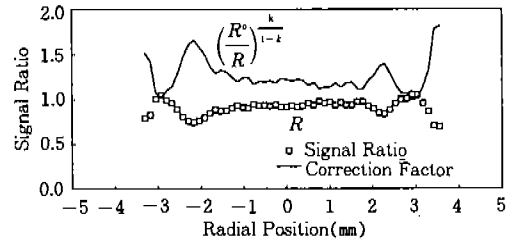
#### 4.2 2파장 보정법의 적용

따라서 본 연구에서는 이러한 화염 내의 매연 입자에 의한 감쇠를 보정하기 위해 2개의 서로 다른 파장에서 측정 한 LII 신호의 강도의 비를 이용하는 보정 방법을 제안하기로 한다. 우선 앞의 Fig.2의 측정 결과를 바탕으로 LII 신호비  $R$ 과 이론으로부터 구한 보정치(Correction Factor

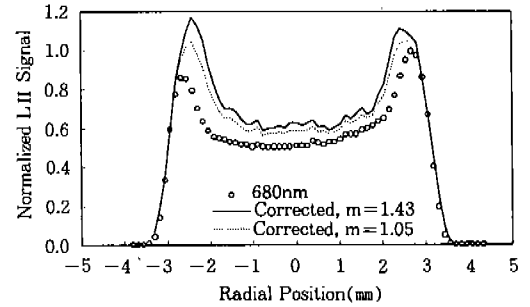
$(\frac{R^0}{R})^{\frac{x}{1-x}}$ 의 분포를 구하여 Fig.3(a)에 나타내었다. 이 그림에서 보정치를 구하기 위해서는  $R^0$ 를 알아야 하는데 우선 여기에서는 1.0으로 가정하였다. LII 신호비  $R$ 은 화염 전체에 걸쳐 대략 0.7에서 1.05 범위의 값을 나타내며 반경 방향의 위치에 따라 달라진다. 또한 LII 신호비  $R$ 이 작다는 것은 국소적인 LII 신호의 감쇠율이 크다는 것을 의미한다. 이 그림에서 보면 LII 신호의 양측 피크의 내측에서 각각 LII 신호비  $R$ 이 가장 작은 값을 보이며 보정치의 피크는 반경 방향 위치 -2mm에서 관찰된다.

한편 식 (10)에서 상수  $x$ 는 각각의 파장 680nm 및 400nm에서의 매연 입자의 감쇠 계수  $k_{\lambda_1}$  및  $k_{\lambda_2}$  간의 비를 나타낸다. 매연 입자의 감쇠계수  $k_{\lambda_1}$ 의 파장 특성에 대해서는 여러 가지 이론이 제시되어 있으나 본 연구에서는 감쇠계수가 측정 파장에 역 비례한다<sup>15)</sup>는 가장 간단한 가정을 사용하여 다음 식으로 상수  $k$ 를 나타내기로 한다.

$$k = \frac{k_{\lambda_1}}{k_{\lambda_2}} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (9')$$



(a) LII Signal Ratio of the Flame Using the Point-Measurement Optical Setup



(b) Comparison of the Corrected LII Signal Profile with the Measured Profile

Fig.3

이 실험에서는 모노크로메이터를 사용하여 측정하였으므로 측정 파장대의 폭은 1nm이고, 식 (9')에서  $k=400/680=0.588$  이며, 따라서 식 (10)의 지수부  $m$ 은 1.43이다.

Fig.3 (b)에서 원으로 나타낸 것이 680 nm에서 측정된 원래의 LII 신호이고, 선으로 나타낸 것은 이 값에 대하여 2 파장 보정법을 적용한 결과이다. 이 그림에서 보면 보정 후에는 측정 LII 신호의 양측 피크의 약간 안쪽으로 피크가 이동하게 되며, 신호의 값은 최대 25% 정도 증가한다. 한편 실선으로 나타낸 보정 결과는  $m=1.43$ 의 값을 사용한 결과인데, 좌측의 (-) 측의 피크가 (+)측에 비해 약간 크므로 약간 과잉 보정하고 있는 것으로 생각된다. 물론, 상수  $m$ 의 값 1.43은 앞서의 설명대로 엄밀한 값은 아닌데,  $m$ 값이 커지면 보정치가 약간 커진다. 본 연구에서는  $m$  값이 보정에 미치는 영향을 검토해 보았는데,  $m$  값의 변경에 따라서 좌우측의

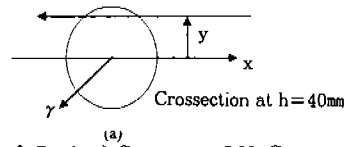
피크의 크기에 약간의 차이가 나타나며 점선으로 나타낸  $m=1.05$ 의 값을 사용한 결과가 좌우의 피크의 크기가 거의 같았다. 이 검토에서 알 수 있듯이  $m$ 과  $R^o$  등의 보정에 필요한 파라미터들은 사용되는 광학계에 따라서 약간씩 달라진다. 따라서 현재로는 주어진 광학계에 대한  $m$ 과  $R^o$  등의 결정을 위한 검증 실험이 필요하며, 앞으로 이러한 광학계의 변경에 따른 영향을 배제하기 위한 연구를 수행할 예정이다.

4.3 중심축에서 벗어난 위치에서의 LII 신호의 반경 방향 분포

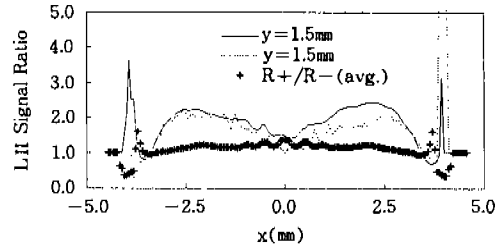
LII 신호의 정량적인 보정을 위해서는 식 (10)에서 감쇠 이전의 신호비  $R^o$ 를 구해야 한다. 본 연구에서는  $R^o$ 를 구하기에 앞서, 감쇠율의 차이에 따른 LII 신호의 감쇠의 정도가 어느 정도인지를 알기 위하여 동일한 위치에서 나오는 LII 신호를 화염을 통과시켜서 감쇠가 심한 경우를 측정하여 상대적으로 감쇠가 심하지 않은 경우의 LII 신호와 비교하여 보았다.

Fig.4는 총류 에틸렌-공기 동축 제트 화염의 높이 40 mm의 위치에서 중심으로 부터 1.5mm 떨어진(Off-Center) 단면의 LII 신호를 화염의 양 쪽에서 각각 측정 한 결과를 나타낸 그림이다. 그림 (a)에 화염에 대한 레이저 빔의 상대적인 위치를 나타냈다. 이 그림에서  $y$ 는 화염의 중심 부에서 레이저 빔의 통과 위치까지의 거리를 나타낸다. 그림 (b)에서는 실선으로 나타낸 +1.5 mm 위치의 LII 신호와 비교하면, 점선으로 나타낸 -1.5mm의 위치에서의 LII 신호값이 양측 피크의 안쪽을 중심으로 약 10% 정도 작은 값을 나타낸다. 이 두 측정치의 감쇠 전의 LII 신호는 동일한 값이라고 생각할 수 있으므로, 이러한 현상이 일어나는 것은 수광부 측에서 더 멀리 떨어진 -1.5mm 쪽으로부터의 LII 신호가 화염을 통과하는 동안 화염 내의 매연 입자에 의해 감쇠되기 때문일 것이다.

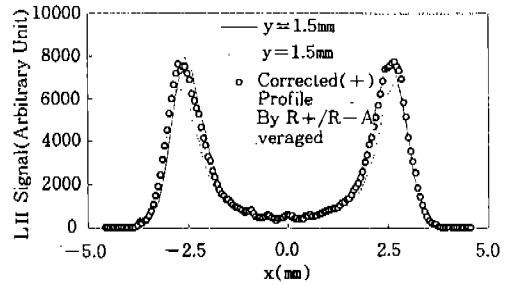
이러한 감쇠의 정도를 이론적으로 분석해 보면, 동일한 측정점에서의 매연 입자의 농도 및 평균 입경 등은 동일하므로 파장  $\lambda$ 에서 측정된 LII 신호의 감쇠 전의 강도  $S^o_{\lambda}$ 는 식 (10)으로



(a) Geometry of Optical Setup at Off-Center Position



(b) LII Signal Ratio at Off-Center Positions



(c) Comparison of the Corrected LII Signal Profile with the Measured Profile

Fig.4

부터

$$S^o_{\lambda_1} = S^+_{\lambda_1} \left( \frac{R^o}{R^+} \right)^{\frac{x}{1-x}} = S^-_{\lambda_1} \left( \frac{R^o}{R^-} \right)^{\frac{x}{1-x}} \quad (11)$$

따라서 이 식을 이용하여 상대적으로 많이 감쇠된 -1.5mm의 위치에서의 LII 신호의 강도  $S^-_{\lambda_1}$ 로부터  $S^+_{\lambda_1}$ 를 계산하여 +1.5mm 위치에서의 LII 신호와 비교하였다. Fig.4 (a)에서는 -1.5mm와 +1.5mm의 위치에서의 LII 신호의 강도비  $R^+$  및  $R^-$ 를 비교하고 있는데, 특히 양측 외곽부에서 LII 신호의 강도비가 매우 큰 값을 나타내는 것은 이 위치에서의 LII 신호의 절대값이 작기 때문으로 물리적인 의미는 작다. 이



그림에서는 동시에 두 위치에서의 신호비의 비  $R^+/R^-$ 를 나타내고 있는데, LII 신호의 양측 피크 부근을 제외하고는 전반적으로 상당히 균일하게 1.0 부근의 값을 보이고 있으며, 이 값이 1.0에서 떨어진 값이면 그만큼 보정이 필요하다는 의미가 된다.

Fig.4(b)에서 원(Open Circle)으로 나타낸 결과 과 식 (11)의 보정 방법을 적용하여,  $-1.5\text{mm}$ 의 위치에서의 LII 신호의 강도를 보정하여 구한  $S^+_{\lambda}$ 을 나타내는 결과인데, 보정된 신호는 실선으로 나타낸  $+1.5\text{mm}$ 의 위치에서의 본래의 LII 신호와 화염 전체에 걸쳐서 상당히 잘 일치하였다. 특히 양 측 피크의 내측에서 점선과 실선으로 나타낸 보정 전의 LII 신호가 상당한 차이가 있는데, 이 보정에 의하여 이러한 차이가 거의 없어지기 때문에, 본 연구에서 제시하는 2 과정 보정법은 타당성이 있다고 생각된다.

#### 4.4 2과정 보정법을 위한 기준치 검정

본 연구에서 제시하는 2 과정 보정 방법을 실제로 적용하기 위해서는 감쇠 전의 LII 신호비인  $R^0$  값을 결정하여야 하며 이 값은 각각의 주어진 광학 시스템에 대해 보정의 기준치가 된다. 감쇠 전의 LII 신호비  $R^0$  값은 집광 렌즈, 광학 필터 및 ICCD 카메라 등 검출 장치 측의 파장 특성에 따라 달라진다.

본 연구에서는  $R^0$  값을 결정하는 방법으로 이미 다른 실험을 통하여 매연 농도 분포 등에 대한 정보를 충분히 가지고 있는 에틸렌-공기 동축 제트 화염에 대해서 실험을 수행하였다. Fig. 5는 이 화염에 대하여 높이 40mm의  $r=2.7\text{mm}$ 의 위치에서 측정된 LII 신호비를 나타낸 그림이다. 그림 (a)는 레이저 빔이 통과하는 위치의 개략도인데, 이 위치는 매연농도 피크의 위치 중에서 LII 신호비를 우선 감쇠 전의 LII 신호비  $R^0$ 로서 사용할 수 있을 것이다. 또한 이 위치에서는 반경 방향으로  $\pm 1\text{mm}$ 에 걸쳐 매연 농도의 변화가 거의 없고, 예를 들어 에너지가  $3\text{mJ}$ 인 레이저 빔이 통과하는 경우 상당히 넓은 범위에 걸쳐 거의 변화가 없이 2.5 부근의 값을 나타낸다. 이 실험 결과로부터 LII 신호비의 값이 거의 일

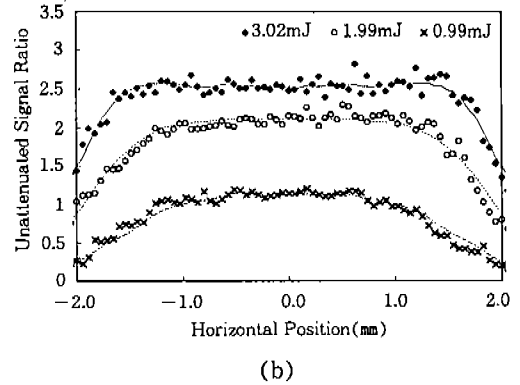
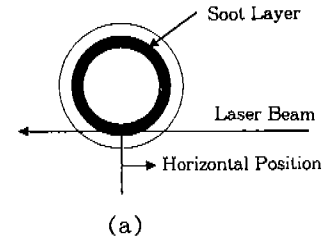


Fig.5 Distribution of the LII Signal Ratio with Different Energy Fluences

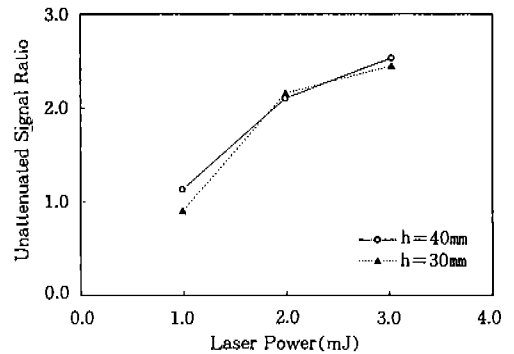


Fig.6 Unattenuated LII Signal Ratio with Increasing Energy Fluences

정한  $-0.5 \sim 0.5\text{mm}$ 의 범위에서의 LII 신호비의 값을 평균하여 레이저 에너지의 증가에 따라 나타낸 그림이 Fig.6이다. 이 그림에서 보면 레이저 광의 에너지 유속이 증가하면 LII 신호비  $R^0$ 가 증가하지만 그 증가는 완만해 진다는 것을 알 수 있다. 한편 이 그래프에서는 높이 40mm 위치와 30mm 위치에서의 LII 신호비  $R^0$ 의 측정 결과를 비교하고 있는데, 위치에 따른 차이가 거

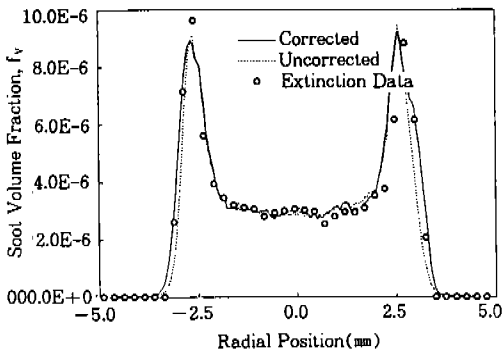


Fig.7 Comparison of Corrected Soot Volume Fraction with the Result by Conventional Laser Extinction Method( $h=40$  mm, 647 nm, 3.0mJ)

의 없으므로, 주어진 레이저 에너지 유속 조건에 대해 이 실험에서 측정된  $R^2$  값을 LII 신호의 감쇠를 보정하는 검정치로 사용할 수 있을 것이다.

#### 4.5 2파장 보정법에 의한 매연 농도 측정 결과의 보정

Fig.7은 높이  $h=40$ mm 위치에서 측정한 매연 체적 분율을 나타낸 그림으로, 레이저 광 감쇠법을 이용하여 Santoro 등<sup>13)</sup>이 측정한 결과와 본 실험에서 LII법에 의하여 측정한 결과를 비교한 그림이다. 이 그림에서는 레이저 감쇠-산란법으로 측정한 화염 중심부에서의 측정치를 기준으로 LII법에 의하여 측정한 결과를 규격화(Normalize)하였다. 이 그림에서 보면 레이저 산란-감쇠법의 측정 결과(원)와 LII법에 의하여 측정한 보정전의 매연 체적 분율(점선)이 대체로 잘 일치하지만 피이크의 양쪽 외곽부의 값을 비교하면 LII법에 의하여 측정한 매연 체적 분율이 약간 작은 값을 나타내고 있다. 이 그래프에서 실선으로 나타난 것이 본 연구에서 제안한 2파장 보정법(Correction)을 적용하여 측정치를 보정한 값이다. 전체적인 매연 체적 분율의 반경 방향의 분포에는 큰 차이가 없는 것처럼 보이지만, 매연 체적 분율의 양측 피이크를 중심으로 외곽 측에서의 보정치가 실제 값과 비교하여 상당히

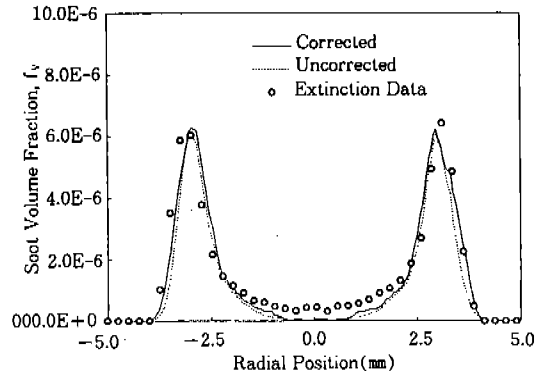


Fig.8 Comparison of Corrected Soot Volume Fraction with the Result by Conventional Laser Extinction Method( $h=30$  mm, 647 nm, 3.0 mJ)

큰 값을 보이고 있으며 차이가 큰 경우에는 약 2 배 정도까지 크다. 예를 들어 피이크의 외곽 부분에서 매연의 체적 분율의 피이크 값의 1/2 정도의 값을 보이는 위치인  $r=2.8$ mm 위치에서 보정하기 전의 값인 4ppm으로부터 보정을 하면 6.5ppm으로 증가하며 이러한 보정에 따르면 이 위치에서의 LII신호의 감쇠율은 약 40%에 달하며 이러한 값은 화염 전체의 매연 체적 분율을 근거로 한 평균 감쇠율 10~15%에 비해 국소적으로 매우 높은 값이다. 이러한 현상은 특히 이 위치 부근에서 매연 체적 분율이 가장 구배가 심하고 광학적으로 생각해도 가장 LII 신호의 감쇠가 심할 것으로 생각되는 위치이기 때문일 것이다.

Fig.8은 높이  $h=30$ mm에서의 측정 결과로 대체적으로 레이저 감쇠법에 의한 측정 결과와 전반적으로 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 그러나, 화염의 중앙부에서는 Santoro의 결과에서는 작은 값이기는 하나 매연 체적 분율이 나타나는데 반하여 LII 신호는 감쇠에 의하여 거의 나타나지 않는다. 이 부분에서도 LII 신호의 측정치를 2 파장 보정법(correction)을 적용하여 보정하였으나, 측정된 LII신호의 절대값 자체가 너무 작아서 보정 시의 오차의 영향이 크다고 생각되어 이 그림에서는 그 결과를 제외하였다.

## 5. 결 론

본 연구는 매연 입자의 생성 과정을 연구하기 위한 측정 방법인 Laser-induced Incandescence 측정법을 정량적인 매연 농도의 측정 방법으로 사용할 수 있도록, 2개의 파장 범위에서 측정한 LII 신호의 비를 이용하여 LII 신호를 보정하는 2 파장 보정법을 제안하고 이 보정법을 디젤 엔진 등의 실제 시스템에서의 적용하기 위한 연구이다.

본 연구에서는 LII 신호의 측정 대상으로 매연 농도 등의 측정 결과를 잘 알고 있는 층류 에틸렌-공기 동축 제트 화염을 선택하여, 이 화염에 대해서 높이 40mm의 위치에서 중심축으로부터 1.5mm 떨어진 위치의 LII 신호를 화염의 양측에서 측정한 결과를 비교해서, 감쇠의 차이에 따라 서로 상당히 다른 LII 신호에 본 연구에서 제시한 보정법을 적용해 본 결과 감쇠에 의한 이러한 LII 신호 간의 차이를 거의 없앨 수 있었다. 또한 측정된 LII 신호에 이 방법을 적용하여 레이저 감쇠-산란법으로 측정한 매연 농도 분포와 비교해 본 결과 상당히 잘 일치하는 결과를 얻었다. 이러한 결과는 본 연구에서 제시하는 LII 신호에 대한 2 파장 보정법을 디젤 엔진 실린더 내의 매연 농도 측정 등의 실제 연소 시스템에 적용할 수 있다는 의미로 생각된다.

그러나, 본 연구에서 실험한 층류 에틸렌-공기 동축 제트 화염은 결과적으로는 여기에서 제시하는 2 파장 보정법의 효과를 명확히 보여주는 적절한 예는 아니라고 판단되며 향후 이러한 문제를 고려하여 매연 입자의 농도가 높은 분무 화염 등의 다른 종류의 화염에 대한 연구를 계속해서 수행하여야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

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.
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. 정중수, 1996, "레이저 가열 측정법을 이용한 화염 내 매연농도 측정", *한국연소학회*

- 지, 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. Quay, B., T-W. Lee, T. Ni, and Santoro, R. J., "Spatially Resolved Measurement of Soot Volume Fraction Using laser-Induced Incandescence", *Combustion and Flame*, V. 97, pp. 384~392, 1994.
  13. Santoro, R. J., Semerjian, H. G., and Dobbins, R. A., "Soot Particle Measurements in Diffusion Flames", *Combustion and Flame*, V. 51, pp. 203~218, 1983.
  14. Won, Y. H. et al., 1992, SAE Paper No. 920114.
  15. Siegel, R and Howell J. R., Thermal Radiation Heat Transfer, Second edition, McGraw-Hill Book Co., 1981.