

Laser-induced Incandescence 법에 의한 매연 농도 측정법

Laser-induced Incandescence technique for measuring soot particle concentration

정 중 수*, 강 경 태*
Jongsoo Jung and Kyung-Tae Kang

- 1. 서 론
 - 2. LII 측정법의 원리 및 배경
 - 3. LII 실험 장치 및 방법
 - 4. LII 측정법의 신호 특성
 - 4.1 레이저 에너지에 따른 LII 신호의 변화
 - 4.2 측정 파장 변경의 영향
 - 4.3 레이저 에너지 유속 변화에 따른 LII 신호의 반경 방향 분포의 영향
 - 4.4 레이저 광 강도에 따른 LII 신호비
 - 4.5 매연 입자의 온도 및 입경의 영향
- (이상의 내용은 제 1 편, 본 지 제1권 제2호, pp. 8 - 15, 1996 을 참조하기 바랍니다.)¹

5. LII 법의 적용을 위한 제안

5.1. 사용 레이저의 선정

LII 법의 측정에 사용하는 레이저의 종류에는 특별한 제한은 없으며, LII 매연측정법이 레이저의 광 에너지를 이용하여 매연을 거의 탄소 성분이 증발하기 직전 온도인 4,000~5,000 K 정도의 고온으로 가열하고

가열된 매연입자에서 나오는 백열광(일종의 흑체 복사광)을 이용하여 매연 농도를 측정하는 방법[1-3]이므로, 매연 입자를 4,000~5,000 K 까지 온도를 상승시킬 수 있을 정도의 충분한 광 에너지를 가지는 레이저라면 충분하다. 헬륨-네온 레이저나 아르곤-이온 레이저와 같은 연속 발진(cw) 레이저의 경우는 일반적으로 레이저 광의 에너지가 충분하지 않으므로 사용된 예가 없으며, 펄스형 이산화탄소 레이저, Nd:YAG 레이저나 펄스형 색소(Dye) 레이저와 같은 펄스 레이저를 일반적으로 사용하고 있다.

지금까지 수행되었던 LII 측정법을 이용한 실험적 연구들에 대하여 사용 레이저의 종류(두번째 열), 수광부(세번째 열) 등 실험 조건들을 Table 1 에 정리하였다. 레이저 광 에너지의 공간 분포와 매연 입자의 직경 등에 따라서 달라지지만 대개는 정량적 LII 실험을 수행하기 위해서 필요한 최소 레이저 에너지 밀도(fluence)인 임계 레이저 에너지 밀도(critical fluence)는 Table 1 의 네 번째 열에 나타낸 대로 $10^7 \sim 10^8 \text{ W/cm}^2$, 즉 레이저 한 펄스 당 $0.05 \sim 0.5 \text{ J/cm}^2$ 정도이다. 펄스 레이저의 펄스의 지속 시간은 일반적으로 5~10 ns 정도로 매우 짧기 때문에, 난류 화염과 같이 매우 빠르게 변하는 연소 현상에 있어서도 거의 순간적으로 매연 농도를 측정할 수 있다는 점이 또 다른 장점이다. 한편 최근에는 기존의 LII 신호의 이론적 해석에서 가정하는 것과는 달리 일부에서 이러한 짧은 펄스 지속 시간에 고 에너지 밀도를 가진 펄스형 레이저를 매연 입자에 조사(照射)하면 입자의 표면으로부터 증발이

* 정회원, 한국과학기술연구원 기전연구부

일어날 뿐만 아니라 매연 입자 내부의 비정형 탄소가 녹으면서 입자의 표면이 유리화 같이 변형될 수 있다는 것을 전자현미경을 이용한 연구를 통하여 밝혔다[13]. 이 연구의 결과는 초기 LII 연구자들, 예를 들면 Eckbreth 등[3]이 사용한 $1\mu\text{s}$ 정도의 비교적 펄스 길이가 긴 레이저를 사용하도록 추천하고 있다. 하지만 현재까지는 이러한 비교적 펄스 길이가 긴 레이저를 사용하여 LII 법에 의한 매연 입자를 측정하는 연구 결과는 없었다.

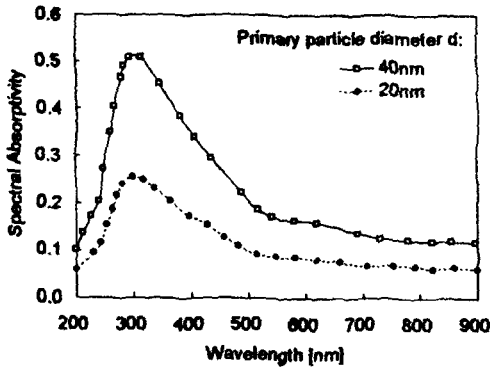


Figure 1. Spectral absorptivity of soot as a function of wavelength[14].

사용 레이저에 관한 또 하나의 중요한 고려 사항은 레이저의 파장(wavelength)이다. 레이저의 광 에너지를 이용하여 매연을 고온으로 가열하는 LII 법의 특성 상 입사광의 파장에 따른 매연 입자의 광 흡수 계수(absorption coefficient)의 값은 매우 중요하다. Figure 1은 Mewes와 Seitzman[14]의 계산 결과를 나타내고 있는데, 300 nm 이상의 파장에서는 파장이 증가함에 따라 광 흡수 계수가 감소하고 있음을 보이고 있는데 매연 입자의 평균 직경이 40 nm 일 때가 20 nm 경우보다 이런 경향이 더 강하다. 따라서 파장이 짧은 레이저를 사용하면 상대적으로 작은 입계 레이저 에너지 밀도에서도 LII 신호가 나오게 된다. 이러한 짧은 파장 레이저의 장점에도 불구하고 Bengtsson과 Alden의 연구[15]와 Vander Wal의 연구[16]에 따르면 사용 레이저의 파장이 짧으면 LII 측정

시의 주요한 노이즈인 다중고리 방향족 탄화수소(PAH)의 형광 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.

5.2. 측정 파장 범위의 선정

LII 법의 측정에서는 측정 파장 범위가 매우 중요한 요소이다. 바람직한 LII 신호를 얻기 위해서는 입사 레이저 파장과 관련된 하에 입사광의 산란에 의한 산란광과 PAH 등에 의한 형광 이외에도 노이즈인 C_2 분자에 의한 형광이 거의 검출되지 않는 파장대를 택할 필요가 있고, 측정 대상 매연 입자의 입경 분포에 무관한 측정 파장대를 결정하여야 한다. LII 신호를 이론적으로 분석하여 보면, 측정 파장대가 길어질수록 LII 신호가 매연의 체적 분율에 더 선형적으로 비례하는 것으로 알려져 있다[2]. 이러한 선형성은 LII 법을 이용한 정량적인 매연 측정에 매우 중요하다. 매연 입자로부터의 산란광에 의한 노이즈를 피하기 위해서는 입사광의 파장으로부터 충분히 떨어진 파장 범위에서 측정하여야 한다. 또한 매연 전 단계 물질인 PAH에 의한 형광 노이즈를 피하기 위해서는 입사 레이저 파장보다 짧은 측정 파장을 사용하여야 하며, 에너지가 강한 레이저에 의해서 매연 입자의 표면에서 증발하여 생성되는 C_2 에 의한 형광 노이즈는 특히 532 nm 부근의 레이저를 사용하는 경우에 매우 심각한데, 이 노이즈의 영향을 줄이기 위해서는 460~560 nm 파장 구간 이외의 파장에서 LII 신호를 측정할 필요가 있다[15]. Figure 2는 Shaddix and Smyth[17]의 이론 계산 결과인데, LII 신호의 근원인 4000, 5000 K에서의 흑체 복사와 C_2 형광 신호를 잘 표시하고 있고 560.3 nm 파장을 가

Table 1 Parameters for LII Measurements

Authors (pub. year)	Laser (wavelength, duration)	Detection[nm]	Fluence (critical)	Profile	gate & delay
Dec et al. (1991) [4]	Nd:YAG (532nm)	Two 450 nm short-pass filter + BG 39 filter + 532 nm mirror (2D)	$1.6 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$		80ns gate
Dec (1992) [5]	Nd:YAG (532nm)	450 nm short-pass filter(2D)	10^4 W/cm^2		70ns gate
Pinson et al.(1993) [6]	Nd:YAG (532nm)	388-412 nm (2D)	$2.2 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$		50ns gate
Hofeldt (1993) [12]	Nd:YAG (1064/532nm)	400-600/650-1000 nm (1D)	$1 \times 10^4 / 5 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$	Gaussian	
Quay et al. (1994) [10]	Nd:YAG (1064/532nm)	400/400,500,700 (1D)	$3 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$	Gaussian	
Shaddix et al. (1994) [8]	Dye(560nm, 10ns)	300-480 (2D)	$7 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ ($3 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$)		100 ns gate
Ciagnoli et al. (1994) [19]	Nd:YAG(266nm)	(1D)/365-435(2D)			20 ns delay
Ni et al. (1994) [9]	Nd:YAG(532nm)	425-475(2D)	$4.6 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$	Rectangular	
Vander Wal et al. (1995) [13]	Nd:YAG(1064nm)		$5 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$	Gaussian	
Ni et al. (1995) [21]	Nd:YAG(532nm, 7ns)	425-475 (2D)	$4.6 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$	Rectangular /Gaussian	
Bengtsson and Alden (1995) [15]	Nd:YAG(266nm, 10ns) / Dye(563.4nm, 10ns)	450-700 (1D) / 500, 516, 650 (2D)	$5 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ ($2 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$)		100 ns gate
Shaddix and Smyth(1996) [17]	Dye(560.3 nm, 10 ns)	320-440 nm (2D)			
Dec and Espey (1995) [7]	Nd:YAG (532 nm, 7 ns)	450nm short-pass filter(2D-LII)			50 - 100 ns
Koshida et al. (1995) [22]	Nd:YAG(532 nm)	367-433(2D-LII) /532(2D-LIS)			
Vander Wal et al. (1996)[23]	Nd:YAG(1064 nm)	450,550 (1D) / (2D)	$5.7 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$		250 ns gate
Will et al. (1996)[20]	Nd:YAG(532nm, 8 ns)		10^4 W/cm^2	Rectangular	100/800 ns delays
Vander Wal (1996) [16]	Nd:YAG(1064 nm for LII / 266 nm for LIF & LII)	365-435(2D)	$2.5 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ / $9 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$		40, 80, 160 ns delay
Mewes and Seitzman (1996) [14]	Nd:YAG(1064 /532 nm, 7ns) / Dye(590 nm, 1 μs)	350-700 (1D)	10^4 W/cm^2 ($7 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$) / $5 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$	Gaussian / Rectangular	0-50 ns delay 50-450 gate (Nd:YAG laser) 0-1 μs delay 2-3 μs gate (Dye laser)
Jung et al. (1996) [18]	Nd:YAG(532, 1064nm)	400, 680 (2D)		Rectangular / Gaussian	18 ns gate

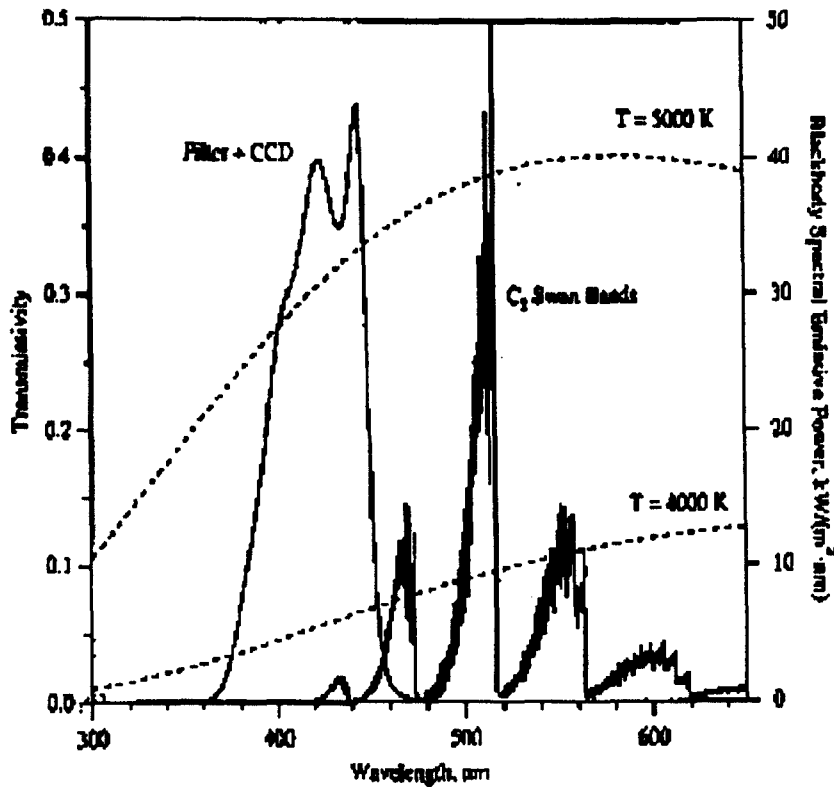


Figure 2. Spectral characteristics of the LII imaging filter, as well as C_2 LIF interferences and blackbody radiation curves for 4000 and 5000 K, which are temperatures characteristics of the peak LII signals[17].

지는 입사 레이저를 사용하는 경우 이러한 C_2 형광을 피하기 위한 측정 파장 범위를 추천하고 있다. 따라서 측정 대상 파장의 선정에서는 LII 법의 정량적인 매연 측정을 위해서는 매연 체적 분율과 LII 신호 간의 선형성과 PAH 에 의한 형광 노이즈를 억제하여야 한다는 두 조건이 서로 상반되지만, 노이즈의 억제가 측정 파장의 결정에서 더 중요하다. Table 1 에서 알 수 있듯이 일반적으로 360~440 nm 의 파장 범위가 가장 널리 사용되고 있다.

LII 신호는 사용 레이저 파장과 측정 파장 이외에도 매연 입자의 크기, 주변 지역의 기체 온도 등의 영향을 받을 수 있다[14]. 측정 대상 매연 입자의 주변 지역의 기체 온도를

알 수 없는 경우에도 두 개의 측정 파장, 예를 들면 700 nm 및 400 nm 에서 각각 LII 신호를 측정하고 그 신호의 비를 이용하여 매연 입자의 크기를 정하는 2-색 LII 법을 유효한 LII 측정법으로 제안하고 있다[16].

5.3. 측정 지연 시간의 선정

Quay 등[10]이 실험적으로 측정한 결과인 Fig. 3 와 같이 매연 입자에 의한 산란광 신호의 지속 시간은 10 ns 이하로 거의 레이저 광의 조사 시간과 일치하고 있는 반면 LII 신호는 매우 오랜 시간동안 지속되며 심지어 레이저 조사 후 약 700 ns 이상 이후에도

측정 가능한 신호가 검출된다. LII 신호는 시간 경과에 따라서 레이저에 의해서 매연 입자의 온도가 상승함에 따라서 급격히 상승하여 신호의 정점(5~10 ns)에 이른 후에 매연 입자의 냉각에 따라서 40 ns 까지 비교적 완만히 감소하지만 매우 오랫동안 신호가 지속된다. 한편 C₂의 형광 신호는 산란광 신호의 시작 후 5~10 ns 정도 지난 후에 검출이 시작되며 레이저 광의 조사가 종료된 후 수십 nanosecond 정도만 지속되며, PAH에 의한 형광 신호는 C₂의 형광 신호보다 지속 시간이 짧을 때 비해서, LII 신호는 매우 긴 시간 동안 검출된다[15].

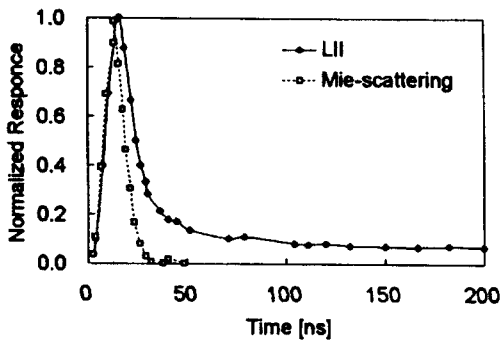
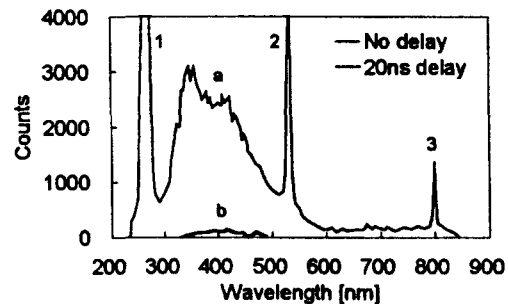


Figure 3. Temporal response of the laser-induced incandescence[10].

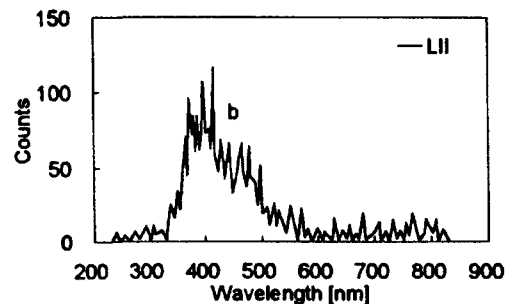
Figure 4(a)은 Ciagnoli 등[19]이 측정 지연 시간을 변화시켜서 측정한 LII 신호의 측정 결과이다. 이 그림에서 'a'는 측정 지연 시간이 없는 경우이며 'b'로 나타낸 결과는 20 ns의 지연시간을 사용한 결과이다. 측정 지연을 주지 않은 'a'에는 LII 신호이외에도 PAH와 C₂에 의한 형광 신호, 각각 '1', '2', '3'으로 표시된 매연 입자에 의한 입사광의 산란 신호 등 여러 가지 노이즈가 섞여 있다. 이러한 노이즈들은 20 ns의 측정 지연 시간을 준 'b'에는 거의 소멸되어 있음을 볼 수 있다. Figure 4(b)는 Fig 4(a)의 'b'부분을 확대한 그림으로 LII 신호만을 의미하는 것이다. 한편 Vander Wal[16]은 측정 지연 시간을 40 ns, 80 ns, 160 ns로 바꾸면서 수행한 실험을 통하여 80 ns 이상의 지연 시간을 주면 LII 신호 이외의 노이즈는 소멸

된다고 결론을 내리고 있다.

레이저 광의 조사가 종료된 후 시간 경과에 따른 LII 신호의 감쇠의 속도 및 정도는 매연 기본 입자의 크기와 주위의 기체 온도에 의해서 달라진다[14]. 따라서 LII 법에 의해서 매연 농도를 정량적으로 측정하기 위해서는 LII 신호가 매연 입자의 평균 입경에 따라서 측정 지연 시간에 의한 영향을 받는다는 점을 고려해야 한다. 한편, 이러한 LII 신호의 특성을 이용하여 두 개의 서로 다른 측정 지연 시간에서의 LII 신호를 각각 측정하고, 이 두 신호의 비를 이용하여 매연 입자의 직경을 측정하려는 시도가 있었다. 이를 시간 분해(time-resolved)-LII (TIRE-LII)라고 부르고 있는데[20], 이 방법으로 매연 입자의 직경을 측정할 수 있지만, 매연 입자 주위의 화염 내의 온도의 영향을 배제할 수는 없다고 생각된다[14].



(a)



(b)

Figure 4. Time-delayed and zero-delayed spectra. (a) Curve a shows zero-delayed measurement, and curve b shows the time-delayed measurement. (b) An enlargement of curve b[19].

5.4. 노이즈의 제거 방안

LII 법에서 LII 신호 이외의 노이즈를 제거하기 위한 방법으로는 앞 절에서 설명한 바와 같이, 사용하는 입사 레이저의 파장, 측정 파장 범위 및 측정 지연 시간을 적절하게 선정하여 사용하는 것이다. 이 방안을 간단히 요약하면, 입사광으로는 가능하면 자외선 레이저의 사용을 피하고, 측정 파장을 레이저의 파장에 비해 짧은 파장 영역에서 선택하고, 측정 지연 시간은 80 ns 이상을 주면 LII 신호의 측정에 미치는 주변 노이즈의 영향을 최소화 할 수 있다.

위에서 언급한 방법 이외에도 편광을 이용하여 노이즈를 제거하는 방법과 레이저의 에너지 변화를 이용하는 방법이 있다. 편광을 이용하는 방법은 매연 입자의 산란광을 제거하는 방법으로 주로 사용된다. 매연 입자의 평균적인 크기는 사용한 레이저의 파장보다 대체로 작으므로, 수직으로 편광되어 있는 레이저 빔을 사용하면 대부분의 산란광이 수직으로 편광이 되는 현상이 관찰된다. 따라서 수직 편광을 제거하기 위한 수평 편광 필터를 측정부의 광학계에 사용하면 매연 입자로부터 산란되는 산란광을 거의 대부분 제거할 수 있고, LII 신호는 일종의 흑체 복사(blackbody radiation)이어서 특별한 편광이 생기지 않으므로 매연 입자로부터의 산란광이 배제된 신호를 얻을 수 있다. 그러나 이 방법으로는 LII 신호와 마찬가지로 편광이 발생하지 않는 PAH, C₂ 등의 형광 신호를 LII 신호로부터 제거할 수는 없다. 이에 반해서 레이저의 에너지 변화를 이용하는 방법을 이용하면 PAH 에 의한 LIF 신호는 어느 정도 구별할 수 있을 것이다. LII 신호와 PAH 에 의한 LIF 신호는 모두 가시광 영역에서 광대역 스펙트럼(broadband spectrum)을 나타내므로 광학적 필터로는 구별하기 어려우나 PAH 에 의한 LIF 신호와는 달리 LII 신호는 threshold 효과라고 불리는 매연 입자가 어느 온도 이상으로 가열된 경우에만 신호가 검출되는 특징이 있다. 이러한 LII 신호의 특성을 이용하면 비교적 작은 레이저 강도 조건하에서 PAH 에 의한 LIF 신호 만을 가시화하면 매연에 의한 LII

신호를 분리해 낼 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Dasch, C.J., "Continuous-wave probe laser investigation of laser vaporization of small soot particles in a flame," *Applied Optics* 23:2209-2215 (1984).
2. Melton, L.A., "Soot diagnostics based on laser heating," *Applied Optics*, 23: 2201 - 2208 (1984).
3. Eckbreth, A.C., "Effects of laser-modulated particulate incandescence on Raman scattering diagnostics," *J. Appl. Phys.* 48: 4473 - 4479 (1979).
4. Dec, J.E., zur Loye, A.O. and Siebers, D.L., "Soot distribution in a D.I. diesel engine using 2-D laser-induced incandescence imaging," SAE technical paper series 910224 (1991).
5. Dec, J.E., "Soot distribution in a D.I. diesel engine using 2-D imaging of laser-induced incandescence, elastic scattering and flame luminosity," SAE technical paper series 920115 (1992).
6. 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 932650 (1993).
7. Dec, J.E. and Espey, C., "Ignition and early soot formation in a D.I. diesel engine using multiple 2-D imaging diagnostics," SAE technical paper series 950456 (1995).
8. Shaddix, C.R. Harrington, J.E. and Smyth, K.C., Quantitative measurement of enhanced soot production in flickering methane/air diffusion flame, *Combust. Flame* 99:723-732 (1994).
9. Ni, T., Gupta, S.B. and Santoro, R.J., "Suppression of soot formation in ethene laminar diffusion flames by chemical additives," Twenty-fifth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp.585-592 (1994).
10. Quay, B., Lee, T.W., Ni, T. and Santoro, R.J., "Spatially resolved measurements of soot volume fraction using laser-induced incandescence," *Combust. Flame* 97:384-392 (1994).

11. 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 (1992).
12. Hofeldt, D.L., Real-time soot concentration measurement technique for engine exhaust streams, SAE technical paper series 93007 (1993).
13. Vander Wal, R.L., Choi, M.Y. and Lee, K.O., "The effects of rapid heating of soot: implications when using laser-induced incandescence for soot diagnostics," CF 102:200-204 (1995).
14. Mewes, B. and Seitzman, J.M., "Analysis of laser-induced incandescence and novel soot measurement approaches," AIAA 34th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit (1996).
15. Bengtsson, P.-E. and Alden, M., "Soot visualization strategies using laser techniques," Applied Physics B60:51-59 (1995).
16. 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).
17. Shaddix, C.R. and Smyth, K.C., "Laser-induced incandescence measurement of soot production in steady and flickering methane, propane, and ethylene diffusion flame," Combust. Flame 107:418-452 (1996).
18. Jurng, J. et al., 26th Symposium on Combustion(1996).
19. Ciagnoli, F., Benecchi, S. and Zizak, G., "Time-delayed detection of laser-induced incandescence for the two-dimensional visualization of soot in flames," Applied Optics 33:5778-5782 (1994).
20. Will, S., Schraml, S. and Leipertz, A., "Comprehensive two-dimensional soot diagnostics based laser-induced incandescence (LII)," 26th Symposium (International) on Combustion, (1996).
21. Ni, T., Pinson, J.A., Gupta, S. and Santoro, R.J., "Two-dimensional imaging of soot volume fraction by the use of laser-induced incandescence," Applied Optics 34:7083-7091 (1995).
22. Koshida, H., Nishigaki, T., Harada, S. and Kamimoto, T., "Soot formation and oxidation in unsteady spray flame via laser-induced incandescence and scattering techniques," 日本機械學會論文集(B) 61: 28-33 (1995).
23. Vander Wal, R.L. Zhou, Z. and Choi, M.Y., "Laser-induced incandescence calibration via Gravimetric sampling," Combustion and Flame 105:462-470 (1996).

(다음 호에 계속)

다음 호의 목차

6. LII 측정법의 응용 예

- 6.1. 디젤 엔진 연소에의 응용 예
- 6.2. 비정상 및 난류 확산 화염에의 응용 예
- 6.3. 비정상 free spray flame 에 대한 평면 LII 와 LIS (광산란) 측정
- 6.4. 앞으로의 LII 측정법의 전망

7. 결 론