

< 논문 >

시분해 레이저 유도 백열법을 이용한 에틸렌 확산 화염에서의 매연 일차입자크기 측정에 관한 연구

김규보* · 조승완* · 이종호* · 정동수** · 장영준*** · 전충환†
(2006년 5월 3일 접수, 2006년 8월 4일 심사완료)

Study on Soot Primary Particle Size Measurement in Ethylene Diffusion Flame by Time-Resolved Laser-Induced Incandescence

Gyu Bo Kim, Seung Wan Cho, Jong Ho Lee,
Dong Soo Jeong, Young June Chang and Chung Hwan Jeon

Key Words: Laser Induced Incandescence(레이저유도백열법), Soot(매연), Primary Particle Size(일차입자크기), Diffusion Flame(확산화염), Time Resolved(시분해), Ethylene(에틸렌)

Abstract

Recently there is an increasing interest in particulate matter emission because of new emission regulations, health awareness and environmental problems. It requires to improve particulate measurement techniques as well as to reduce soot emissions from combustion systems. As mentioned above, it is demanded that reduction techniques together with measurement techniques of exhausted particulate matters in combustion systems such as vehicles. However, measurement techniques of particulate matters should be prior to reduction techniques of that because it is able to know an increase and a decrease of exhausted particulate matters when measured particulate matters. Therefore, in this study, we report the measurement of soot primary-particle size using time-resolved laser induced incandescence (TIRE-LII) technique in laminar ethylene diffusion flame. As an optical method, laser induced incandescence is one of well known methods to get information for spatial and temporal soot volume fraction and soot primary particle size. Furthermore, TIRE-LII is able to measure soot primary particle size that is decided to solve the decay rate of signal $S(t_1)$ and $S(t_2)$ at two detection time. In laminar ethylene diffusion flame, visual flame height is 40 mm from burner tip and measurement points are height of 15, 20, 27.5, 30 mm above burner tip along radial direction. As increasing the height of the flame from burner tip, primary particle size was increased to HAB(Height Above Burner tip)=20mm, and then decreased from HAB=27.5 mm to 30 mm. This results show the growth and oxidation processes for soot particles formed by combustion.

———— 기호설명 ————

c_s : 매연 입자 비열[J/kg K]

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부 기계기술 연구소

E-mail : chjeon@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-3051 FAX : (051)582-9818

* 회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 한국기계연구원 엔진환경그룹

*** 회원, 부산대학교 기계공학부 기계기술연구소

FWHM : 반치폭[ns]

G : 형상 계수

h : 열전달 계수[W/m K]

k_{∞} : 주위의 열전도 계수[W/m K]

m_p : 매연 입자 질량[kg]

P^* : 증발에 대한 참고압력[N/m²]

R_m : 일반 기체 상수

$r(t)$: 매연 입자 반경[mm]

$S(t)$: 레이저 유도 백열 신호[a.u.]

$T(t)$: 매연 입자 온도[K]
T_{∞}	: 주위 온도[K]
T^*	: 매연 입자 증발 온도[K]
U_v	: Langmuir 증발율
W_v	: 증발 입자 물질량[kg/mol]
α_{abs}	: 흡수 계수[a.u.]
$\Delta H_v(T)$: 증발 엔탈피[J/mol]
λ_{mp}	: 평균자유행로[m]
ρ_s	: 매연 입자 밀도[kg/m ³]
ρ_v	: 증발 입자 밀도[kg/m ³]

1. 서론

환경오염에 의한 인류에 미치는 영향이 심각해지면서, 전 세계적으로 환경오염에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히, 대기오염은 일산화탄소, 탄화수소, 질소산화물, 매연 등에 의해 신체 각부의 산소 결핍, 눈병, 폐 기능장애, 광화학 스모그 등의 현상과 같은 심각한 문제를 발생시키고 있고, 자동차에서 발생하는 유해 배출 가스는 이러한 대기오염의 주된 원인의 하나로 인식되고 있으며 이러한 이유로 배출가스 규제를 점점 강화하고 있다. 특히 매연 생성의 전구물질인 다중 고리 방향족 화합물 및 매연의 경우 돌연변이 유발 및 암 발생의 원인으로 작용하는 등 인체에 심각한 영향을 미치고 있다. 최근 자동차 산업의 경우, 지금까지는 EuroIII나 EuroIV를 통해 매연입자의 총량규제를 강화하였으나, 인체에 영향을 미치는 것이 매연입자의 총량보다는 그 크기가 더 심각한 영향을 미치는 것으로 보고하고 있다.⁽¹⁻³⁾ 따라서 현재의 매연 입자 총량 규제에 대한 방향에서 입자 크기까지 규제하는 방안을 모색하고 있으며 이를 극복하기 위한 방법으로 매연입자 생성을 감소시키는 기술개발과 동시에 배출되는 매연입자의 크기를 측정하는 기술의 개발이 필수적이라 할 수 있으며, 후자의 경우 두 가지 방법에서 우선되어야 할 과제라 할 수 있다.

이러한 매연입자를 측정하는 방법에는 직접 탐침법과 레이저 감쇠/산란법(Laser extinction/ scattering method; LES), 레이저 유도 백열법(Laser induced incandescence; LII) 등의 방법이 사용된다.

특히 레이저 백열법은 레이저 조사로 적열된 작은 입자들의 열복사를 해석하는데 기초를 두고

있으며, 공간 분해능이 우수한, 실시간 매연의 체적분율과 입자크기 측정이 가능한 기법으로 높은 주목을 받고 있다. 입자의 크기는 LII 신호 감쇠비에 의존한다고 알려져 있으며^(4,5) 이는 시간의 경과에 따른 입자의 냉각거동을 조사하면 입자크기를 결정할 수 있다는 것을 의미한다. 이를 시분해 레이저 유도 백열법(Time REsolved LII; TIRE-LII)라고 하여, 레이저 조사로 적열된 매연 입자들의 열전달 메커니즘을 해석하는데 기초를 두고 있다.

레이저 유도 백열법에 관한 연구는 Eckbreth (1977)⁽⁶⁾에 의해 매연이 있는 화염에서 라만 산란 신호를 방해하는 매연입자의 배경광도의 관찰로부터 처음 밝혀졌으며 이후 Melton⁽⁴⁾과 Dasch⁽⁷⁾에 의해 레이저세기(fluence)와 매연입자크기의 함수로서 LII신호를 이론, 수치적으로 예측하였고, 매연 질량농도에 대한 LII의 비례성을 보였다. Melton모델의 확대로써 Hefeldt⁽⁸⁾는 어떻게 파장에 의존하는 물성치가 각각 다른 직경의 매연입자의 흡수 및 방출특성을 변경하는가를 해석함으로써 Melton 이론을 확장하였다. Quay⁽⁹⁾ 등은 LII신호가 어떤 세기 이하에서는 레이저세기에 선형적이며, 어떤 세기 이상에서는 포화되고 거의 일정한 "plateau" 영역을 나타냄을 보였으며, Ni⁽¹⁰⁾ 등은 LII신호의 2차원 LII 측정기법을 확대하였다. Santoro⁽¹¹⁾와 Lee⁽¹²⁾ 등은 광산란/감쇠법을 이용하여 동축 확산화염에서 매연입자의 입자크기 분포를 측정하여, 화염의 구조가 매연 성장에 지배적인 영역과 산화가 지배적인 영역의 2개의 영역으로 나누어짐을 밝혔다. 특히 이들 연구는 LII 신호의 정량화에 많이 이용되어지고 있다. Vander wal⁽¹³⁾ 등은 예혼합 평면 화염의 매연 체적분율을 LII로 측정하여 적절한 검출 게이트 시간을 선택하면 레이저 유도 간섭을 제거한 시간-공간적으로 분해능을 가지는 측정이 가능하다고 보고하였다. Will⁽¹⁴⁻¹⁶⁾ 등은 2차원 이미지 기법으로 시간분해능에 따른 LII신호를 이용하여 화염 내 매연의 크기를 LII신호의 비로 직접적으로 구하는 TIRE-LII를 제시하였다.

따라서 본 연구에서는 매연 입자크기 측정에 대한 연구의 필요성에 그 중요함이 있다고 판단되는 바 선행연구결과인 Lee⁽¹⁷⁾ 등의 TIRE-LII 모델결과를 적용하여 모델링과 실험결과의 비교를 통해 에틸렌 확산화염에서 실시간 일차입자크기

측정이 가능한 2차원 시분해 레이저 유도 백열법을 이용하여 매연입자의 크기를 측정하고 그 가능성을 확인하며 매연의 성장(surface growth), 산화(oxidation)과정에 기초적인 중요 정보를 얻고자 한다.

2. TIRE-LII 원리

TIRE-LII 기법은 매연입자에 레이저를 조사시켜 약 4000k까지 가열시키고 이후 입자가 방출하는 신호를 검출하여 매연 입자의 정보를 결정하는 것이다. 특히 가열된 매연 입자의 표면이 냉각되는 동안 방출되는 신호의 감쇠률(decay rate)을 통해 매연의 일차입자크기를 결정할 수 있다. 매연의 일차입자크기와 감쇠율의 명확한 관계를 결정하기 위해 입자의 서로 다른 두 가지의 평형 방정식(에너지, 질량 평형 방정식)에 기초를 두고 있으며, 다음의 두 방정식을 기본으로 하여 결정할 수 있다.

$$m_p c_s \frac{dT}{dt} = \alpha_{abs}(r, \lambda_0) I_L(t, x) \pi r(t)^2 + \frac{\Delta H_v(T)}{W_v} \frac{dm_p}{dt} - 4\pi r(t)^2 h \frac{(T - T_\infty)}{r(t)} - 4\pi r(t)^2 q_{rad}(T, r) \quad (1)$$

$$-\rho_s \frac{dr}{dt} = \rho_v U_v \quad (2)$$

식 (1)과 (2)는 각각 에너지 평형 방정식(흡수, 증발, 전도, 복사, 내부에너지)과 질량 평형 방정식을 나타낸 것이다. 여기서 λ_0 는 입자가 흡수한 레이저 파장(nm), I_L 은 흡수된 레이저 강도(W/m²), q_{rad} 는 복사항을 각각 나타내는 것이다. 위 두 식을 통해 입자의 온도 및 크기에 관한 두 개의 비선형 방정식을 유도할 수 있으며, LII 신호의 계산은 직접적으로 입자의 온도와 반지름을 통해 구할 수 있으며 그 식은 will⁽¹⁵⁾ 등에 의해 아래와 같이 제안되었다.

$$S_{LII} \propto r^2 \int R(\lambda) \alpha_{abs}(r, \lambda) \frac{c_1 n_\infty^2}{\lambda_5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)} d\lambda \quad (3)$$

여기서 S_{LII} 는 레이저 유도 백열 신호, λ 는 LII 신호 검출파장(nm), c_1 과 c_2 는 플랑크식의 첫 번째, 두 번째 상수, n_∞ 는 주위가스의 굴절률, $R(\lambda)$ 은 광학 시스템의 전송과 검출기의 스펙트럼의 민감도에 대한 복합적인 함수이다. 본 연구에

서는 단일 검출 파장을 사용하였기에, 상대적으로 나타내게 되는 S_{LII} 를 구하는 식 (3)에 있어서 $R(\lambda)$ 은 생략 가능하다.⁽¹⁸⁾

식 (1)과 (2)로부터 다음에 표현할 온도와 입자의 크기 함수로 표현할 수 있다.

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{p^*}{\rho_s} \sqrt{\frac{W_v}{2R_m T}} \exp\left[\frac{\Delta H_v(T)(T - T^*)}{R_m T T^*}\right] \quad (4)$$

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{3q_{rad}(T, r)}{r \rho_s c_s} - \frac{3(T - T_\infty)k_\infty}{\left[1 + \frac{G\lambda_{mfp}}{2r(t)}\right]r(t)^2 \rho_s c_s} - \frac{3\alpha_{abs}(r, \lambda_0)I_L(t, x)}{4r(t)\rho_s c_s} + \frac{3\Delta H_v(T)\dot{r}}{W_v r(t)c_s} \quad (5)$$

식 (3)과 (4)로부터 LII 신호에 대한 입자의 관계식을 구할 수 있으며, 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} [\ln S(t)] = \frac{3c_1 h [T(t) - T_\infty]}{\rho_s c_s r T(t)} \approx -\frac{C}{r} \quad (6)$$

식 (6)에서 C는 입자의 밀도와 비열계수, 플랑크 상수와 관련된 상수이며 입자의 온도가 주위 온도보다 매우 큰 값이므로 온도함수를 1로 근사할 수 있으며, 결과적으로 LII 신호의 비를 통해 입자의 크기를 나타낼 수 있다. 이를 바탕으로 레이저 조사 후 일정 주어진 시간의 지연에서 LII 신호비를 계산한다면 실험을 통해 얻어진 신호비를 통해 입자의 크기를 결정하게 된다. 이때 오차를 줄이기 위한 적절한 신호비 선택은 실험과 모델의 비교를 통해 획득하게 된다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 동축류 층류 화염 연소기

Fig. 1는 본 실험에 사용된 동축류 버너의 개략도를 나타낸 것으로, 연료 (에틸렌; C₂H₄)를 공급하는 내경 8mm의 연료노즐과 이차공기를 공급하는 내경 76mm의 이차공기노즐로 구성되어 있다. 또한 균일한 유동이 생성되도록 버너내부에 3mm의 유리구슬을 채웠으며 버너출구에 세라믹 하나컴(honeycomb)을 설치하여 화염을 최대한 안정화시켰다. 본 실험에 사용된 연소조건은 Table 1과 같으며 대기압, 상온조건에서 연료, 공기의 유량은 각각 0.117, 50 [ppm]으로써 이때의 화염높이(HAB, Height Above Burner tip)는 약 40mm를 생성시켰다.

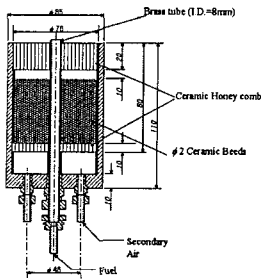


Fig. 1 Schematic diagram of co-axial burner

Table 1 Experimental conditions

	Item	Unit	Condition
Flame	Fuel	L/min	0.117
	Secondary Air	L/min	50
	Amb. Temp.	K	298
	Amb. Press.	MPa	0.1
Measurement	HAB	mm	15, 20, 27.5, 30
	Radius	mm	0.2
	Gate width	ns	25

3.2 TIRE-LII 계측 시스템

본 연구에 사용된 레이저 유도 백열법 (LII) 실험장치는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 1차원과 2차원 측정을 위한 장치로 구성되어 있다. 장치도는 크게 버너와 화염에 LII 신호발생을 위한 2차 고조파의 Nd:YAG 레이저, 레이저광을 측정부에 조사하는 광학 장치부 그리고 LII신호를 검출하는 광증배관과 신호 및 영상 취득부(오실로스코프, ICCD 카메라)로 구분 할 수 있다.

본 실험에서는 생성된 LII 신호의 1차원 정보는 광증배관으로 취득하였고, 2차원 이미지는 대역필터(중심파장 400nm, FWHM=10nm)를 장착한 ICCD 카메라로 취득하였다.

1차원 LII 측정을 위해 우선, 조사된 레이저광을 핀홀로 통과시켜 광폭(3mm)을 줄인 후 화염에 조사하여 LII 신호를 생성시킨다. 발생한 LII 신호를 초점렌즈와 중심파장 400nm의 대역필터를 통해 광증배관(Photo Multiplier Tube : PMT)에 집광시키고 연결된 디지털 오실로스코프(500MHz, 1GSa/s)를 통해 신호를 읽어 들이고 PC에 저장하게 된다.

2차원 LII 측정을 위해 평면광 생성기(sheet beam generator)를 사용하여 평면 광으로 만든 후 화염의 중심부에 조사하여 발생한 LII 신호를 16

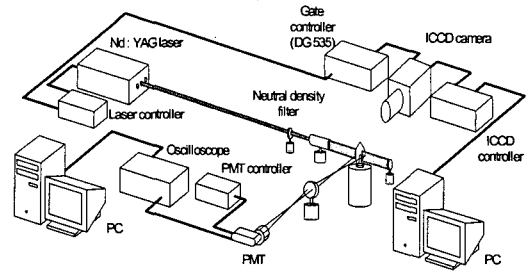


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus for LII

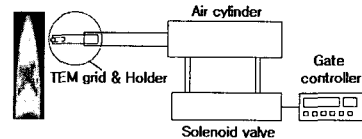


Fig. 3 Schematic diagram of nano particle sampling equipment

bit, 1MHz의 A/D 변환기와 중심파장 400nm (FWHM=10nm) 필터가 장착된 ICCD 카메라 (Princeton Instrument, IMAX-512)로 받아들이고 이를 gate 컨트롤러(DG-535)를 이용하여 시간에 따른 매연 입자의 LII 신호로 취득하였다.

ICCD의 gate는 Nd:YAG 레이저 컨트롤러에서 출력되는 플래쉬 램프 신호를 받아 동기신호를 주기 위한 gate 컨트롤러(DG-535)에서 제어하였으며 ICCD 카메라 게이트 폭(gate width)은 25ns로 설정 하였다.

3.3 나노입자샘플링시스템

직접검침을 통한 TEM 이미지를 분석하기 위해 사용된 급속 삽입식 샘플링 장치의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 급속삽입장치는 TEM 격자를 부착한 TEM grid holder(thickness=100μm), 장치 삽입부, 솔레노이드를 이용한 구동부, 그리고 DG-535의 신호를 이용한 제어부로 나누어진다.

화염내의 매연입자를 열영동 현상을 적용해 취득하는 것으로, 제어부에 의해 화염 내 삽입 후 체류시간 70ms동안 TEM grid(300mesh, d=3mm, thickness=100μm)를 통해 매연입자를 취득, 분석 하였다.

3.4 실험방법

Fig. 4에는 본 연구에서 TIRE-LII 기법을 적용한 화염 내 soot 입자의 크기를 결정하게 되는 일

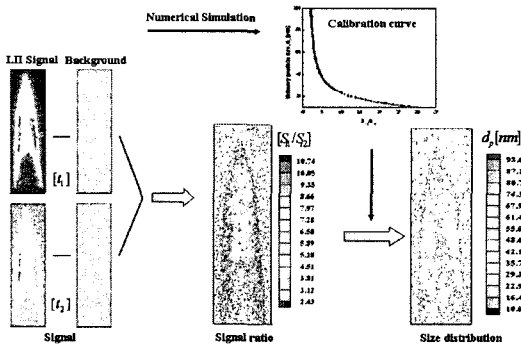


Fig. 4 Schematic of signal analysis method with experimental results

련의 과정을 나타낸 것으로, 2차원 측정의 예로 표현하였다. 우선 ICCD카메라를 이용하여 레이저를 조사받은 화염이미지를 각각 t_1 , t_2 시간에 대해 각각 게이트 25ns 동안 취득하고 그 시간에 해당하는 각 background 이미지를 빼어 화염 내 순수한 LII 신호를 각 시간별로 취득한다. 여기서 생성되는 LII 이미지는 레이저 조사 후 약 1000ns의 lifetime을 가지게 되는데 레이저 조사 후 100ns 이후 t_1 과 t_2 시간의 LII 화염이미지를 선택하여 신호비를 계산한다. 화염 내 신호비 분포도를 에너지 및 질량 평형방정식에 의해 구해진 보정곡선 (calibration curve : 신호비와 일차입자크기의 관계)과의 상관관계를 통해 최종적으로 화염 내 일차입자크기 분포도가 구해지게 된다. 본 실험에서는 2D 화염전체 이미지에 대한 일차입자크기 분포를 위와 같은 방식으로 구함에 있어 그 과정을 검증하기 위해 우선 1D 측정인 PMT를 이용하여 화염의 각 높이별 일차입자크기 분포를 구하고 그 결과를 TEM 이미지와 비교하였다. 다음으로 검증된 각 높이별 1D 결과를 최종적으로 2D 화염전체 일차입자크기분포에서 1D에 해당하는 각 높이결과 값과 비교함으로써 2차원 시분해 레이저 유도 백열법을 이용한 에틸렌 확산 화염 내 일차입자크기분포의 실시간 측정 가능성을 보이고자 한다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 1차원 측정 결과

Fig. 5에는 레이저 강도에 따른 적산된 LII 신

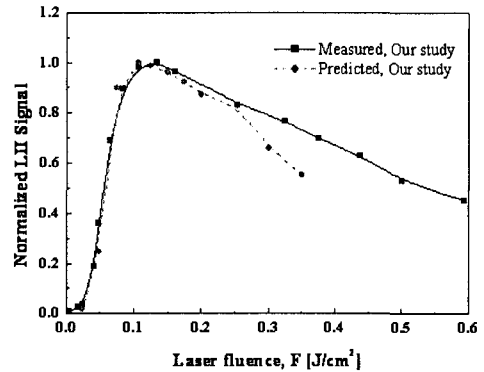


Fig. 5 Effects of optical properties of soot on the prediction of excitation curves

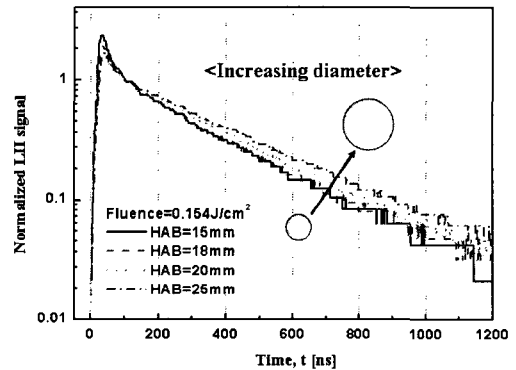


Fig. 6 Temporal profile of normalized LII signal, at HAB=15, 18, 20, 25mm

호의 세기와 에너지 및 질량 평형 방정식을 기초로한 LII 모델의 결과를 비교 분석한 결과를 나타내었다. 모델링을 통해 적산된 LII 신호의 세기와 실험에서의 값이 0.25 J/cm^2 까지 거의 유사한 것을 확인 할 수 있으며 이후로 실험을 수행함에 있어 S/N비(ratio of signal to noise)가 가장 작은 최고 강도 값의 0.154 J/cm^2 를 선택하였다. 또한 실험결과와 모델결과가 잘 일치함을 통해 모델을 통한 TIRE-LII 실험에서의 일차입자크기 결정을 위한 보정곡선을 적용함에 있어서 LII 모델이 적합함을 확인할 수 있었다.

Fig. 6에는 LII 신호와 일차입자크기의 관계를 나타낸 것으로 입자의 크기가 클수록 신호의 기울기가 완만해 지는 것을 확인 할 수 있으며 특히 레이저 조사 후 100ns 정도 이후에서부터 기울기가 선형성을 유지하고 있으며 이후 400ns 정도까지 유지됨을 확인할 수 있다. 즉 100ns 지점을

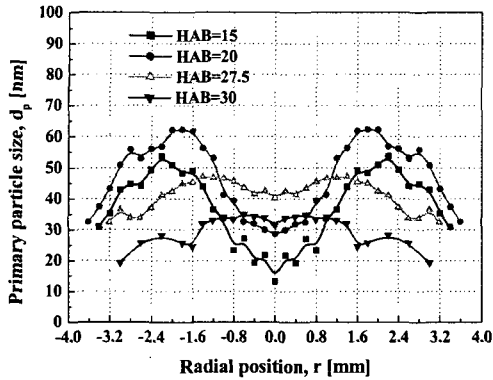


Fig. 7 Results of soot primary particle size by 1-D measurement

t_1 이후 400ns 이후 지점을 t_2 로 하여 두 구간에서의 기울기 값을 구하여 LII 모델의 보정곡선과 비교함으로써 입자의 크기를 결정하였고 이후 입자의 크기를 검증하기 위해 TEM 분석결과와 비교하였다. 추가적으로 그림에서 HAB=15mm와 25mm 지점의 LII 신호기울기를 고려하였을 때 25mm 지점의 신호기울기가 더 완만한 것을 확인할 수 있으며 이는 15mm에서의 일차입자크기보다 25mm에서의 일차입자크기가 더 크다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 화염의 높이에 따른 입자의 크기 분포에 대한 1차원 실험 결과를 나타낸 것이다. 측정 구간은 HAB=15, 20, 27.5, 30mm 지점으로 반경방향으로 2mm 간격마다의 화염 내에 존재하는 일차입자크기분포를 1차원 측정결과로 나타낸 것이다. 그림에서 나타낸 것과 같이 $r=0$ 부근에서는 HAB=15mm부터 27.5mm 지점까지 입자의 크기가 증가하다가 그 이상의 높이에서는 다시 작아지는 것을 확인할 수 있으며, 반경방향에 있어서는 HAB=20mm까지 일차입자크기가 증가하다가 다시 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 이는 화염 내에서의 입자가 생성되어 성장, 산화되는 잘 알려진 과정을 입자의 크기로 확인할 수 있으며, 화염 내에 적어도 10nm~65nm까지의 일차입자크기분포가 존재하는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 8는 입자샘플링장치를 이용하여 HAB=15, 20mm 지점에서, 반경방향 1.6mm 지점에서 각각 포집된 soot 입자를 TEM 이미지 분석을 통해 나타낸 결과이다. 그림에서 (a)는 HAB=15mm 지점의 결과를 나타낸 것으로 평균일차입자크기가

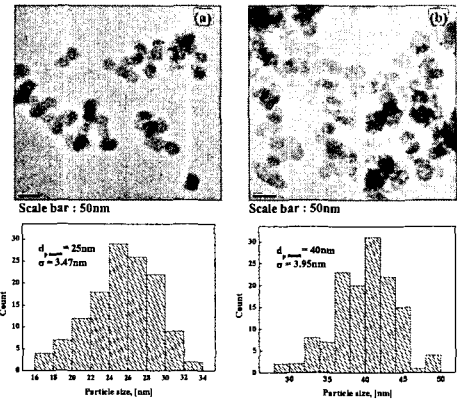


Fig. 8 TEM micrographs via thermophoretic sampling at (a) HAB=15mm, (b) HAB=20mm

Table 2 Comparison of experimental results with TEM image

HAB [mm]	15	20
TEM image [nm]	25	40
Experimental results [nm]	50	60

25nm인 것을 확인할 수 있으며, (b)는 HAB=20mm 지점의 결과로 평균일차입자크기가 40nm인 것을 확인할 수 있다.

Table 2는 1차원 측정결과와 TEM 분석결과를 비교하여 나타낸 것으로 포집된 입자와 광학측정결과를 비교한 것이다. 일차입자크기에 있어서 두 결과가 다소 차이를 발생하는 것을 확인할 수 있는데 이는 LII 시뮬레이션 과정에서 입자의 크기를 결정하는 중요한 변수인 T_{∞} (surround gas temperature)값을 참고문헌을⁽¹⁹⁾ 통한 평균온도 1800K로 설정하여 수치해석을 수행하여 발생하는 오차로 판단되며, 수치해석상에서는 40nm의 일차입자크기에 대해 T_{∞} 값을 10% 증가시켰을 경우 일차입자크기가 15% 감소, T_{∞} 값을 10% 감소시켰을 경우 15% 정도 일차입자크기가 증가하는 것으로 나타났으며 이는 실제 화염의 온도를 고려한다면 두 측정결과의 오차를 줄일 것으로 판단되는바 차후 연구에 있어서 화염온도의 측정이 보다 중요하다는 것을 판단할 수 있었다.

4.2 2차원 측정 결과

Fig 9는 0.154J/cm²의 레이저 강도로 조사한 후

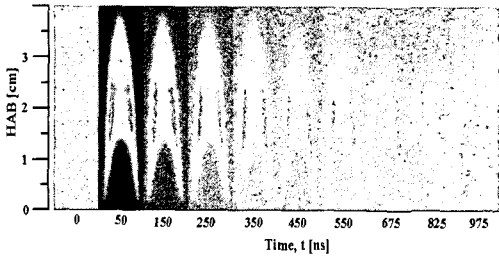


Fig. 9 Temporal sequence of 2D LII image

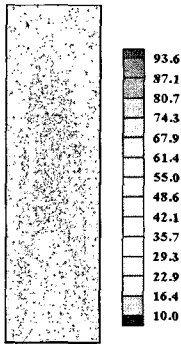


Fig. 10 Primary particle size distribution by 2-D Measurement

취득한 2D TIRE-LII 화염 이미지를 나타낸 것이다. 좌측 그림으로부터 각각 게이트 폭을 25ns씩 시분해하여 얻은 화염 이미지이며 오른쪽으로 갈수록 시간에 따른 LII 강도는 약해짐을 알 수 있으며 이는 1차원 측정 결과에서의 LII 신호 강도와 동일한 특성을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 또한 이때 생성된 LII 신호는 약 1000ns까지 지속됨을 확인할 수 있었다. 각각의 이미지는 배경 값을 뺀 것으로서 일정한 두 시점에서의 신호 비로부터 시뮬레이션의 보정곡선을 통해 화염 내 입자 크기 분포를 바로구할 수 있게 된다.

Fig. 10은 ICCD 카메라를 이용하여 구한 화염 전체 LII 이미지를 이용하여 식 (6)에 따라 신호비를 구하고 이를 시뮬레이션에 대비하여 구한 화염전체의 입자 크기분포를 나타내고 있다. 입자 크기분포는 전체적으로 화염 중심방향에서 작고 화염중심에서 반경방향으로 갈수록 커지는 경향을 나타냄을 확인할 수 있다. 또한 화염높이 방향으로 올라갈수록 일차입자크기는 점점 커지다가 다시 작아지는 산화 영역이 나타남을 볼 수 있다.

화염 외부에도 일차입자크기가 일부 나타남을

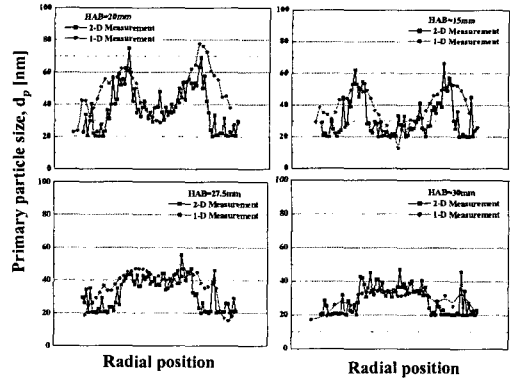


Fig. 11 Comparison of 1D with 2D measurement results for primary particle size

볼 수 있는데 이는 ICCD 카메라를 이용하여 LII 이미지를 취득하고 신호비를 구하고 처리하는 과정에서 생기는 배경 값의 오차로써 실제 화염 내 일차입자크기 분포만을 고려하면 된다.

4.3 1, 2차원 TIRE-LII 측정 결과 비교

Fig. 11은 화염 내 전체 입자 크기분포에서 1D에서와 동일한 각 높이에서의 입자 크기분포를 상호 비교함으로써 2D 결과 값을 검증하였다.

각 높이 HAB=15, 20, 27.5, 30mm 모두에 대해서 2D로부터 구한 입자 크기분포는 1D 결과와 아주 유사한 경향을 보임을 확인할 수 있다. 하지만 일차입자크기가 커지는 화염중심에서 반경방향으로의 지점(대체로 매연 체적분율이 최대가 되는 지점)과 화염경계가 일어나는 양 끝단 부분에서는 1D 결과와 비교하여 일부 일차입자크기 오차가 발생하고 있는데 이는 1D, 2D 측정이 가지는 detection의 차이, 그리고 2D 데이터 처리에서 발생하는 오차로 고려해 볼 수 있다.

전자의 경우는 1D 측정부가 광파이버(직경 400 μm)를 통해 PMT로 LII신호를 받아들이는 반면 2D 측정부는 ICCD카메라의 Pixel(1Pixel=109 μm) 단위를 통해 LII신호를 취득하고 있다. 따라서 1D 측정부와 2D 측정부가 단위면적당 받아들이는 신호의 오차가 발생할 수 있다.

후자의 경우는 2D로부터 취득한 LII 신호를 앞서 실험해석방법에서 설명한(신호비로 나누고 시뮬레이션 보정곡선에 피팅하는 것)과정에서 신호의 데이터처리 과정, 특히 화염 끝 경계면에서 발생하는 LII 신호의 오차에 기인한 것으로 일차

입자크기 결과에 영향을 미침을 알 수 있다.

하지만 2D 결과는 전체적으로 1D 결과와 상당히 유사한 경향을 보여주고 있다. 특히, 이는 향후 엔진 배기단과 같이 일차입자크기 측정이 실시간으로 요구되는 환경에서 보다 효율적인 일차입자크기 측정이 가능함을 나타내고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 에틸렌 확산 화염에서 TIRE-LII 기법을 이용하여 매연의 일차입자크기를 측정해 보았다. 우선 2D TIRE-LII 실험을 하기에 앞서 1D(PMT)를 이용하여 화염 각 높이에서의 일차입자크기 분포를 살펴보았으며 각 높이별 1D 결과를 최종적으로 구한 화염전체의 2D 일차입자크기 분포 결과에 비교함으로써 2D TIRE-LII를 이용한 화염 내 매연 일차입자크기의 실시간 측정 가능성을 확인 하였다. 본 실험을 통해 다음과 같은 결론을 취득 하였다.

(1) 1D 측정결과에서 화염높이에 따른 전체적인 매연 일차입자크기 분포는 화염중심에서 위로 올라갈수록 일차입자크기가 증가하고 약 $HAB=27.5mm$ 이상에서는 다시 감소하였다. 이는 매연 일차입자크기 분포를 통해 매연 입자의 생성, 성장, 산화 메커니즘에 대한 정보를 제공한다.

(2) 2D 측정결과에서 화염 전체에 분포하는 매연 입자 크기 값을 1D에서 보다 용이하게 나타낼 수 있었으며, 화염의 높이별로 관찰 하였을 경우 중심부분에 성장된 큰 매연 입자들이 분포하는 것을 볼 수 있으며 위, 아래에 각각 중심보다 작은 크기의 매연입자들이 분포함으로써 매연 입자의 생성, 소멸 메커니즘에 대한 정보를 제공 하였다.

(3) 2D TIRE-LII 실험결과를 통해 화염전체에서의 매연 입자 크기분포를 나타내었다. 1D 결과와는 정량적으로 약간의 차이를 보였으나 정성적으로 잘 일치함을 보였으며, 이는 일차입자크기 측정에 있어 2D TIRE-LII 기법의 실시간 측정 가능성을 제시 하였다.

후 기

이 연구는 ‘미래형 자동차 배기가스 제로화 기술 개발’ 과제와 ‘부산대학교 자유과제 학술연구

비(2년)’의 일부로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Lehre, T., Jungfleisch, B., Suntz, R. and Bockhorn, H., 2003, "Size Distributions of Nanoscaled Particles and Gas Temperatures from Time-Resolved Laser-Induced Incandescence Measurements," *Applied Optics*, Vol. 42, pp. 2021~2030.
- (2) Wahlin, P., Palmgran, F. and Dingenen, R. V., 2001, "Experimental Studies of Ultrafine Particles in Streets and the Relationship to Traffic," *Atmos. Environ.*, Vol. 35, pp. 63~69.
- (3) Nikula, K. J., Finch, G. L., Westhouse, R. A., Seagrave, J. C. and Mauderly, J. L., 1999, "Progress in Understanding the Toxicity of Gasoline and Diesel Engine Exhaust Emissions," *SAE Technical Paper*, 1999-01-2250.
- (4) Melton, L. A., 1984, "Soot Diagnostics Based on Laser Heating," *Applied Optics*, Vol. 23, No. 13, pp. 2201~2208.
- (5) Roth, P. and Filippov, A. V., 1996, "In Situ Ultrafine Particle Sizing by a Combination of Pulsed Laser Heatup and Particle Thermal Emission," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 27, pp. 95~104.
- (6) Eckbreth, A. C., 1977, "Effects of Laser Modulated Particle Incandescence on Raman Scattering Diagnostics," *J. Appl. Phys.*, Vol. 48, pp. 4473~4479.
- (7) Dasch, C. J., 1984, "Continuous-Wave Probe Laser Investigation of Laser Vaporization of Small Soot Particles in a flame," *Appl. Optics*, Vol. 23, pp. 2209~2215.
- (8) Hefeldt, L. D. 1993, "Real-Time Soot Concentration Measurement Technique for Engine Exhaust Streams," *SAE technical paper*, 930075.
- (9) Quey, B., Lee, T. W., Ni, T. and Santoro, R. J., 1994, "Spatially Resolved Measurements of Soot Volume Fraction Using LII," *Combust. and Flame*, Vol. 97, pp. 384~392.
- (10) Ni, T., Pinson, J. A., Gupta, S. and Santora, R. J., 1995, "2-Dimensional Imaging of Soot Volume Fraction by the Use of LII," *Applied*

- Optics*, Vol. 34, pp. 7073~7091.
- (11) Santoro, R. J., Semerjian, H. G. and Dobbins, R. A., 1983, "Soot Particle Measurements in Diffusion Flames," *Combust. and Flame*, Vol. 51, pp. 203~218.
- (12) Lee, G. W., Jung J. S. and Hwang J. H., 2002, "Soot Concentration and Temperature Measurements in Laminar Ethylene Jet Double Concentric Diffusion Flames," *Trans. of the Korea Society of Mechanical Engineers*, B, Vol. 26, No. 3, pp. 402~409.
- (13) Vander Wal, R. L., Ticich, T. M. and Stephens, A. B., 1999, "Can Soot Primary Particle Size be Determined Using Laser-Induced Incandescence?," *Combust. and Flame*, Vol. 1161, pp. 291~296.
- (14) Will, S., Schraml, S. and Leipertz, A., 1995, "Two-Dimensional Soot-Particle Sizing by Time-Resolved Laser-Induced Incandescence," *Optics Letter*, Vol. 20, pp. 2342~2344.
- (15) Will, S., Schraml, S. and Leipertz, A., 1996, "Comprehensive Two-Dimensional Soot Diagnostics Based on Laser-Induced Incandescence (LII)," *Proc. Combust. Instit.*, Vol. 26, pp. 2277~2284.
- (16) Will, S., Schraml, S., Bader, K. and Leipertz, A., 1998, "Performance Characteristics of Soot Primary Particle Size Measurements by Time-Resolved Laser-Induced Incandescence," *Applied Optics*, Vol. 37, pp. 5647~5658.
- (17) Jong Ho Lee, Jeong Yong Kim, Dong Soo Jeong, Chung Hwan Jeon and Young June Chang, 2005, "Numerical Investigation on Soot Primary Particle Size Using Time Resolved Laser Induced Incandescence (TIRE-LII)," *Trans. of the Korea Society of Mechanical Engineers*, B, Vol. 29, No. 9, pp. 1022~1031.
- (18) Bladh, H. and Bengtsson, P. E., 2004, "Characteristics of Laser-Induced Incandescence from Soot in Studies of a Time-dependent Heat- and Mass-transfer Model," *Applied Physics*, B, Vol. 78, pp. 241~248.
- (19) Schraml, S., Dankers, S., Bader, K., Will, S. and Leipertz, A., 2000, "Soot Temperature Measurements and Implications for Time-Resolved Laser-Induced Incandescence (TIRE-LII)," *Combust. and Flame*, Vol. 120, pp. 439~450.