

레이저 유도 백열법을 이용한 단기통 커먼레일 디젤 엔진 배기에서의 PM 크기 계측에 관한 연구

전 홍 식¹⁾ · 김 희 준¹⁾ · 류 훈 철¹⁾ · 박 종 일¹⁾ · 한 재 원²⁾ · 전 광 민^{*2)}

연세대학교 기계공학과 대학원¹⁾ · 연세대학교 기계공학부²⁾

A Study on Measurements of PM Size in a Single Cylinder Common-rail Diesel Engine Exhaust using LII Method

Hongsik Chun¹⁾ · Huijun Kim¹⁾ · Hoonchul Ryu¹⁾ · Jongil Park¹⁾ · Jaewon Hahn²⁾ · Kwang Min Chun^{*2)}

¹⁾Graduated School of Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

(Received 21 September 2005 / Accepted 9 December 2005)

Abstract : Recently particulate matter (PM) emission regulations are becoming more strict for diesel engines. There is increasing interest for measuring not only concentration but also size of the particles. Laser-induced incandescence (LII) has emerged as a promising technique for measuring particle volume fraction and size. In this study, the Simple Time Resolved-LII method was applied to exhaust of Ethylene diffusion flame and diesel engine exhaust for measuring soot and PM size. The particle size data from LII technique were calibrated using Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) and Transmission Electron Microscope (TEM) photographs. In diesel engine experiments for particle size measurement, results from LII measurement are in a good agreement with those from TEM photograph, and difference between two measurements was less than 16%.

Key words : Laser-induced incandescence(레이저 유도 백열법), Particulate matter(입자상 물질), Soot(그을음), Time resolved-LII(시분해 레이저 유도 백열법), Simulated engine exhaust(엔진 모사 배기), Diesel engine(디젤 엔진), Primary particle(일차 입자)

Nomenclature

K_{abs}	: Mie absorption efficiency	K_n	: Knudsen number
K_a	: thermal conductivity of air, $Wcm^{-1}K^{-1}$	ΔH_v	: heat of vaporization, J/mol
q	: laser intensity, W/cm^2	W_s	: molecular weight, g/mol
a	: radius of soot or PM particle, cm	σ_{sb}	: Stefan-Boltzman coefficient
T	: temperature of particle, K	M	: mass particle, g
T_0	: ambient temperature, K	I	: spectrum intensity
G	: geometry-dependent heat transfer factor	ρ_s	: density of particle, $P W_s/RT$
		c_s	: specific heat, $J g^{-1}K^{-1}$
		h, k, c	: Planck constant

*Corresponding author. E-mail: kmchun@yonsei.ac.kr

1. 서론

대기 오염에 관한 사람들의 관심이 늘어남에 따라 대기 오염원에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 그 중에서도 대기 오염의 큰 비율을 차지하는 자동차 배출가스에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 자동차 배출가스 중에서 이슈가 되는 부분은 디젤 엔진 차량에서 배출되는 PM(입자상 물질)과 NOx(질소 산화물)이다.

PM은 디젤 엔진에서 배출되는 물질 중에서 공기와 희석된 상태에서 가스가 아닌 물질을 뜻하며 soot, 용해성 유기 분율(Soluble Organic Fraction, SOF), 황화염, 수분, 재 등의 성분으로 이루어져 있다. PM은 수십 나노미터 크기의 입자가 수십에서 수백 개 모여서 생성되며 대부분 불완전 연소된 연료 성분에 기인하여 생성된다. 생성물의 대부분은 연소실 내부에서 산화하지만 반응하지 않은 soot 성분은 대기 중으로 방출된다.¹⁾ PM을 이루고 있는 성분 중에서는 soot의 비율이 40% 이상으로 가장 많은 비율을 차지하고 있다.²⁾

현재까지의 PM에 대한 연구의 초점은 질량 중심의 PM의 배출량에 맞추어져 있다. 그에 따라 연구의 목적도 PM 배출량을 줄이는 것에 주안점을 두고 있다. 그러나 최근에는 나노 크기(본 연구에서 사용하는 크기라는 용어는 primary particle size, 즉 입자 입자의 크기를 뜻함) 입자의 인체 유해성에 관한 관심이 고조되면서³⁾ 유럽의 자동차 배출가스 규제인 EURO-V에서 입자의 크기에 대한 부분을 규제 대상으로 할 것인지에 대한 논의가 활발히 이루어지고 있다. 따라서 나노 입자의 크기를 정확하게 측정하는 측정법의 확립이 절실히 요구되는 상황이다.

나노 크기의 입자를 측정하는 방법으로는 전기적인 방법을 이용하는 ELPI(Electrical Low Pressure Impactor), SMPS(Scanning Mobility Particle Sizer)와 광학적인 방법을 이용하는 LII(Laser-Induced Incandescence) 등이 있다. 본 연구에서는 LII 기법을 이용하여 단기통 커먼레일 디젤 엔진에서 발생하는 나노 단위 PM의 크기를 측정하였다. LII 기법은 PM의 크기를 실시간, 비접촉식으로 측정할 수 있는 방법으로 PM의 온도를 레이저 빔의 조사로 승화온도 근처까지 상승시킨 후 가열된 PM에서 발생하는 흑체

복사 신호를 취득하여 크기 및 농도를 측정하는 방법이다. 입자의 크기를 해석하기 위해서 복사 신호의 감쇄 추이를 이용하는 Time Resolved-LII 기법^{4,5)}을 간략화한 방법을 이용하였다. 이 방법은 Eom⁶⁾ 등에 의해 발표된 내용으로 위의 기법을 본 연구에서는 Simple Time Resolved-LII 기법이라고 부르기로 하였으며 이 기법을 에틸렌 화염으로 구현한 엔진 모사 배기계에 적용하여 그 가능성을 검증하고 위의 실험을 바탕으로 디젤 엔진에서 생성되는 PM의 크기를 측정하였다.

2. 이론

Melton에 의하여 완성된 LII 에너지 평형 방정식⁷⁾을 바탕으로 입자의 크기와 농도를 측정하는 것이 가능하게 되었다. 본 연구에서는 에너지 평형 방정식을 full scale로 해석하는 방법을 사용하지 않고 몇 가지 가정을 통하여 LII신호와 입자의 크기를 직접적으로 구할 수 있는 Simple Time Resolved-LII 기법을 사용하였으며 그 방법은 다음과 같다.

에너지 평형 방정식으로부터,

$$K_{abs}(a)\pi a^2 q - \frac{K_a(T - T_0)(4\pi a^2)}{a(1 + GK_n)} + \frac{\Delta H_v}{W_s} \frac{dM}{dt} - \sigma_{sb}(T^4 - T_0^4) \times (4\pi a^2) - \frac{4}{3}\pi a^3 \rho_s c_s \frac{dT}{dt} = 0 \quad (1)$$

식(1)을 시간에 따른 온도의 변화율로 정리하면,

$$\frac{dT}{dt} = \frac{qA_{abs}}{c_s} - \frac{3h_c(T - T_0)}{\rho_s c_s a} - \frac{3N_v \Delta H_v}{\rho_s c_s a N_{Av}} - \frac{3\sigma_{sb}(T^4 - T_0^4)}{\rho_s c_s a} \quad (2)$$

(여기서, $A_{abs} = \frac{3K_{abs}}{4\rho_s a}$)

의 형태로 나타낼 수 있다.

한편, 방사율 $\varepsilon(\lambda)$ 은 K_{abs} 와 같고, 방출 스펙트럼의 세기는 플랑크 흑체 복사식에 의해 정리된다.⁸⁾

$$I(\lambda) = K_{abs}(\lambda)P(\lambda) = \frac{4A_{abs}\rho_s a}{3} \frac{2hc^2}{\lambda^5} \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_b T(t)}\right) - 1 \right]^{-1} = \frac{8hc^2 \rho_s a A_{abs}}{3\lambda^5} \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_b T(t)}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (3)$$

식(3)에서 입자의 크기가 일정하다고 가정하면, 입자가 발생시키는 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S(t) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left\{ \frac{8hc^2 \rho_s a A_{obs}}{3\lambda^5} \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_b T(t)}\right) - 1 \right]^{-1} \right\} d\lambda \quad (4)$$

(Blackbody spectrum range $\lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2$)

($\frac{1}{e^x - 1} \approx \frac{C_2}{x C_1}$ 로 표현할 수 있다고 가정한다,

$$x = \frac{hc}{\lambda k_b T}, \quad C_1, C_2 \text{는 상수})$$

식 (4)에 로그를 취한 후에 미분을 취하면 다음과 같이 간략하게 정리된다.

$$\frac{d}{dt} [\ln S(t)] \approx -\frac{C_1}{T(t)} \frac{dT(t)}{dt} \quad (5)$$

한편, 신호가 감쇄하는 구간에서는 레이저에 의한 에너지 흡수를 무시할 수 있고, 입자의 승화도 없다고 할 수 있다. 또한 $K_n \ll 1$ (대기압)이고 열전달 항에 비해서 복사 항이 매우 작다고 하면 식 (2)는 다음과 같이 정리될 수 있다.⁵⁾

$$\frac{dT(t)}{dt} = -\frac{3h_c(T(t) - T_0(t))}{\rho_s c_s a} \quad (6)$$

$T(t)$ 는 $T_0(t)$ 보다 매우 크다고 가정할 수 있으므로, 이를 적용하여 식 (6)을 식 (5)에 대입하면,

$$\frac{d}{dt} [\ln S(t)] \approx \frac{1}{\tau} = -\frac{3C_1 h_c}{\rho_s c_s a} = -\frac{\text{Constant}}{a} \quad (7)$$

와 같이 정리되어지고, 결국 LII의 신호 값에 로그를 취한 후 미분을 한 값은 입자의 크기 a 만의 함수로 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 따라서 한차례의 보정 과정을 통해 a 를 제외한 나머지 상수들의 값을 알 수 있다면 입자의 크기를 계측할 수 있다.⁶⁾

3. 엔진 모사 배기계 실험

Simple Time Resolved-LII 기법을 디젤 엔진 배출 가스에 적용하기에 앞서서 기법의 타당성을 검증하기 위한 단계로서 에틸렌을 이용한 엔진 모사 배기계 실험을 실시하였다.

3.1 실험 장치

실험 장치는 레이저 부분, 버너 부분, 신호 취득 부분, 신호 처리 부분으로 나눌 수 있으며 전체적인 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 본 연구에서는 광장

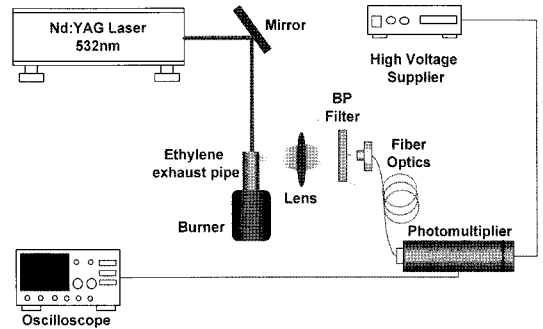


Fig. 1 Schematic diagram setup for simulated engine exhaust experiments

이 532nm(10ns at FWHM)인 ND:YAG 레이저를 사용하였다.

버너에서 화염 생성을 위한 연료는 MFC(Mass Flow Controller, MKS inst.)를 이용하여 중심부에 있는 내경 9.0mm, 외경이 9.6mm인 황동관으로 공급한다. 황동관의 바깥쪽에는 화염을 안정화하기 위한 세라믹 허니컴이 설치되어 있다. 그리고 메탄이나 프로판에 비해서 더 많은 양의 soot을 발생시킨다고 알려져 있는 에틸렌을 연료로 사용하였다.⁹⁾ 화염에서 발생된 soot는 내경 36mm, 길이가 180mm인 배기관을 통과한 후 출구에서 레이저 빔에 의하여 조사 되도록 하였다. 그리고 출구부에서는 열전대를 이용하여 배출가스의 온도를 측정하였다. Soot에서 방출되는 LII 신호는 초점거리 100mm인 렌즈를 통해 광증배기(PMT, Photo Multiplier Tube, Hamamatsu R2496)로 전해진다. 광증배기의 전단에는 광대역필터(400nm±10)를 설치하여 광산란 신호나 LIF(Laser Induced Fluorescence) 신호를 제거하였다. 광증배기를 통한 신호는 디지털 오실로스코프(500MHz)로 보내져서 처리된다.

3.2 실험 방법

본 실험에서는 연료의 유량을 변화시키면서 발생하는 soot의 크기를 Simple Time Resolved-LII 기법을 이용하여 계측할 수 있는지 알아보려고 하였다. 실험을 수행하기에 앞서 적절한 레이저 출력을 선정하기 위해서 동일 유량 조건에서 레이저 출력을 변화시켜가며 LII 신호를 취득하였다. 실험에 수행된 조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Experimental conditions

Ex. 1	Fuel flow rates	150cc/min (constant)
	Laser fluence	0.064J/cm ² ~ 0.311J/cm ²
Ex. 2	Fuel flow rates	120cc/min~ 180cc/min
	Laser fluence	0.163J/cm ² (constant)
	Temperatures	48°C~61°C

3.3 결과 및 고찰

3.3.1 출력 변화에 따른 LII 신호 분석

Soot의 승화온도는 약 3915K 정도로 알려져 있다.^{10,11)} 레이저 빔에 의해서 에너지를 얻은 soot의 온도가 승화온도를 넘어서면 입자의 크기가 줄어들게 되므로 LII 신호를 취득하는 과정에서 너무 높은 출력의 레이저를 사용하지 않도록 주의할 필요성이 있다. 따라서 본 실험에서는 동일한 연료 유량 조건에서 레이저의 출력을 조절하면서 soot의 승화 여부를 살펴보고자 하였다.

Fig. 2는 LII 신호의 최고지점 이후의 감쇄양상을 나타내는 그림이다. 레이저의 세기가 0.311J/cm² 인 경우에는 초기 10ns 이전 영역에서 신호의 감쇄양상이 바뀌는 것을 알 수 있다. 그보다 조금 작은 세기인 0.223J/cm² 인 경우에도 비슷한 현상이 나타나지만 0.311J/cm² 인 경우에 비해서는 변화의 폭이 작음을 알 수 있다. 이러한 현상의 원인은 soot이 승화하면서 soot의 크기가 줄어들었기 때문이라고 생각할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 soot이 승화하지 않는 조건에서 신호를 취득하는데 있어서 다양한 조건에서 실험을 한 결과, 0.163J/cm²이 실험 조건으로 적합함을 알 수 있었고 따라서 이 값을 실험조건

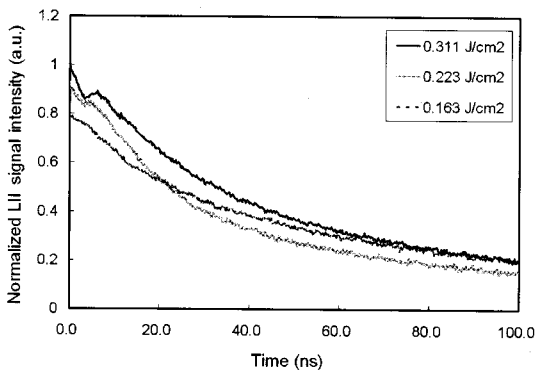


Fig. 2 LII signals for various laser fluence

으로 결정하였다.

3.2.2 유량 변화에 따른 soot 크기 계측

Fig. 3은 에틸렌의 공급 유량을 변화시켜가면서 얻은 LII 신호를 로그 단위로 나타낸 그림이다. 측정 위치에서의 온도는 에틸렌 공급 유량이 120cc/min 인 경우에는 48°C로 측정되었으며, 180cc/min 인 경우에는 61°C로 측정되었다. 이는 연료 유량 변화에 따른 화염 높이의 변화가 온도에 영향을 줄 수 있기 때문이라고 생각되지만 13°C의 온도차는 결과에는 큰 영향을 미치지 않는 정도이다.¹²⁾ Time Resolved-LII 기법을 적용하기 위해서는 LII 신호가 감쇄하는 구간에서 시간에 따른 신호의 변화 추이를 살펴보아야 한다.⁵⁾ Fig. 3에서 볼 수 있듯이 승화의 가능성이 있는 초기 영역과 신호의 진폭이 커지는 300ns 이후의 영역을 제외하면 어느 구간을 이용하여 신호를 해석하더라도 결과에는 큰 영향을 없음을 예상할 수 있다. 이에 본 실험에서는 100ns부터 250ns영역의 신호를 분석함으로써 측정 위치에서 가장 지배적인 soot의 크기를 측정하였다. 지배적인 입자란 많은 크기 분포 중에서 가장 대표적인 크기를 지닌 입자를 뜻하며 그 결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4에서 나타난 것처럼 에틸렌의 유량을 120cc/min부터 180cc/min으로 증가시킬수록 로그화된 LII 신호의 기울기의 절대값이 0.078에서 0.0047로 작아지는 것을 알 수 있다. 결국 식 (7)로부터 알 수 있듯이, 입자의 크기 a는 식 (7)의 상수값을 로그화 된 LII 신호의 미분값(=Fig. 4의 기울기)으로 나누어 준 값이 되므로 기울기의 절대값이 작을수

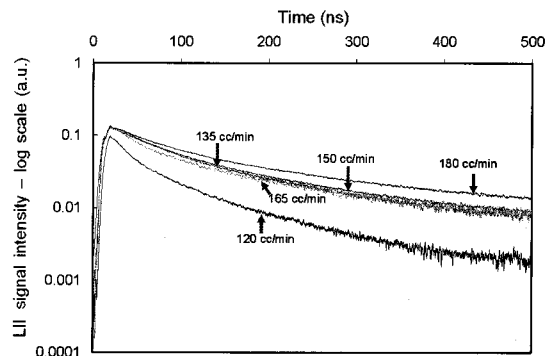


Fig. 3 Variation of LII signal for various fuel flow rates. Laser fluence is constant

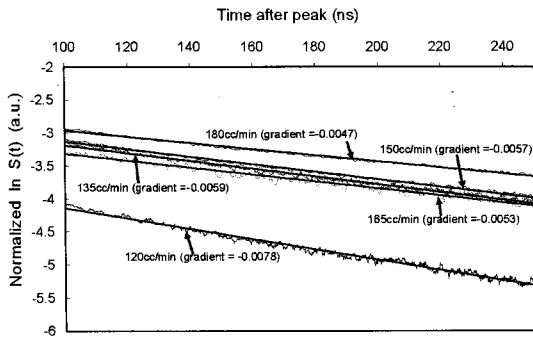


Fig. 4 Gradients of the logarithmic LII signal from 100ns to 250ns

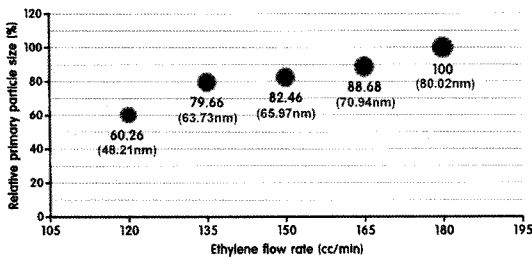


Fig. 5 Relative size of soot primary particle for various fuel flow rates

특 입자의 크기는 큰 값을 갖게 된다.

Fig. 5는 유량의 변화에 따른 입자간의 상대적인 크기를 비교한 값으로, 식 (7)을 이용하여 알 수 있는 그래프이다. Fig. 5에 나타난 입자간의 상대적 크기를 확인하고, 보정 과정을 통해 입자의 실제 크기를 얻기 위하여 본 연구에서는 주사 전자 현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope)을 이용하였고, 그 값은 Fig. 5의 괄호 안에 나타내었으며, 그 모습을 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6에 나타난 것처럼 에틸렌 공급 유량이 180cc/min인 경우, 지배적인 soot의 크기는 지름이 약 80nm인 것으로 확인되었다. 기법의 타당성을 검증하기 위하여 에틸렌 유량을 150cc/min으로 한 경우도 위와 동일한 방법으로 하여 soot의 크기를 측정된 결과, 지름이 약 64nm로 판명되었다. 이 결과는 실험을 통해 예측한 결과인 66nm와 약 3%의 오차를 보여주고 있다. 이러한 결과로 판단할 때, Simple Time Resolved-LII 기법을 대기압상의 입자 크기 측정에 적용하는 것에 대한 타당성을 확인할

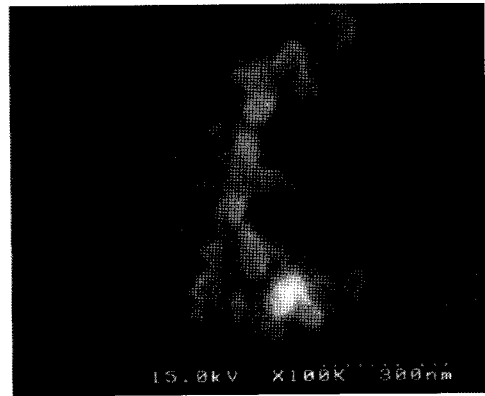


Fig. 6 FE-SEM photograph of particles sampled at the experimental conditions of 180cc/min and 0.163 J/cm^2

수 있었다. 이것은 기존의 방법들이 겪었던 full-fitting 과정이나 해석 과정에서 요구되었던 soot의 여러 가지 물성치를 모르는 상태에서도 입자의 크기 측정이 가능하다는 면에서 큰 의미를 가진다고 할 수 있다.

4. 디젤 엔진 배기 실험

엔진 모사 배기계 실험에서 얻어진 결과를 바탕으로 Simple Time Resolved-LII 기법을 단기통 커먼레일 디젤 엔진 배기에 적용하여 PM의 크기를 측정하였다.

4.1 실험 장치

디젤 엔진 배기 실험에 이용된 실험 장치의 개략도를 Fig. 7에 나타내었다. 실험 장치는 레이저 부분, 엔진 부분, 신호 취득 부분, 신호처리 부분으로 나뉘며 레이저 부분과 신호 처리 부분은 에틸렌 배기 실험의 것과 동일하다.

실험에 사용된 엔진은 498cc 단기통 커먼레일 디젤 엔진으로 자세한 제원은 Table 2에 나타내었다. 연료 분사 방식은 커먼레일 직접 분사 방식이며 단분사가 가능하도록 엔진 제어부를 설계 제작하였다.

신호 취득 부분은 기존의 배기 시스템을 변경하여 제작한 것으로 엔진 배기 포트에서 약 50cm 떨어진 지점에 장착하였고 그 모습을 Fig. 8에 나타내었다. 다른 디젤엔진용 후처리 장치와의 연계나 배기

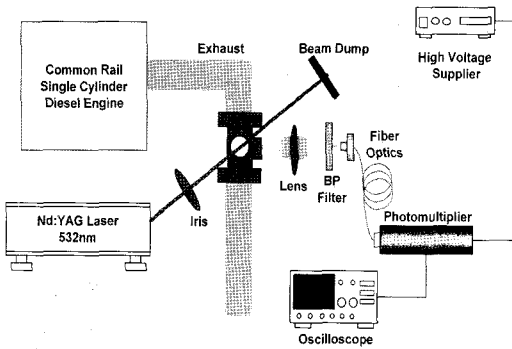


Fig. 7 Schematic diagram of setup for diesel engine experiments

Table 2 Engine specification

Engine model	RSI 090 research engine
Engine type	Single cylinder
Injection system	Common rail diesel
Bore × Stroke	83mm × 92mm
Displacement	498cc
Compression ratio	19.5:1

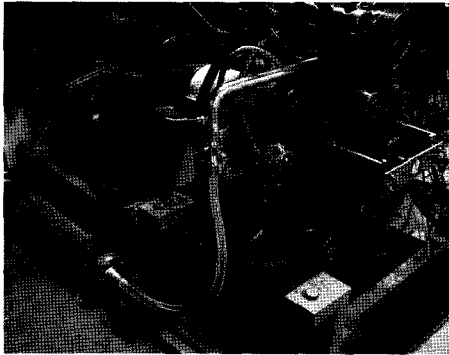


Fig. 8 The optical window parts in the diesel engine exhaust pipe

관 하류로의 측정 위치 변경이 용이하도록 제작하였으며, 측정 지점에서의 배기의 온도를 측정할 수 있도록 전단과 후단에 각각 열전대를 설치하였다. 유동 형태 및 열전달 특성의 변화를 최소화하기 위하여 기존의 배기관과 같은 직경과 재질로 제작하였고 레이저 빔의 입구, 출구, 발생한 LII 신호를 취득하기 위한 세 부분에는 탈부착이 가능한 지름 25mm의 윈도우 시스템을 제작하여 설치하였다.

4.2 실험 방법

본 실험에서는 LII 기법을 디젤 엔진 배기에 적용하여 연료 분사압과 엔진 부하 조건 변화에 따른 PM 크기 특성 파악을 목적으로 하였으며 각각의 실험 조건을 Table 3에 자세히 나타내었다.

Table 3 Experimental conditions

Laser fluence	0.178J/cm ²	
Engine speed	1500rpm	
Injection timing	BTDC 5°	
	Rail pressure(bar)	bmep(bar)
Ex. 1	600, 800, 1000	5.6 (constant)
Ex. 2	900 (constant)	5.5, 6.0, 6.5

4.3 결과 및 고찰

4.3.1 연료 분사압 변화에 따른 PM 크기 측정

Fig. 9는 연료 분사압을 600bar에서 1000bar로 변화시켜가며 얻은 LII 신호를 나타낸 것이다. 이 신호를 Simple Time Resolved-LII 기법으로 분석하여 얻은 결과를 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다.

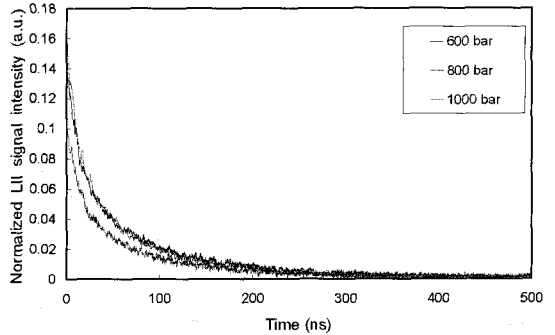


Fig. 9 LII signals with various fuel injection pressure 6

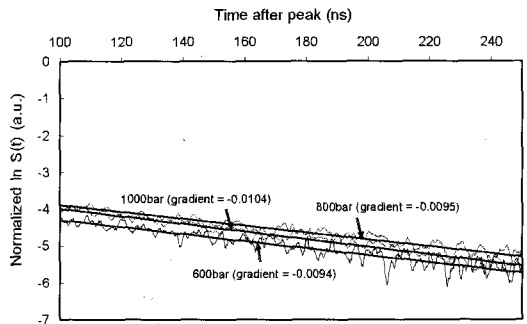


Fig. 10 Gradients of the logarithmic LII signal from 100ns to 250ns

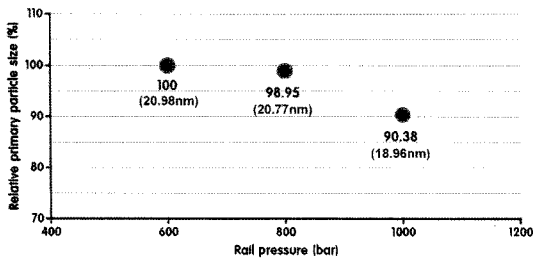


Fig. 11 Relative PM primary particle diameter for various fuel injection pressure

Fig. 11에서 알 수 있듯이 엔진 회전수와 엔진 부하 조건, 연료 분사 시기 등을 일정하게 한 상태에서 연료의 분사압을 변화시키는 경우에는 연료 분사압이 높을수록 발생하는 PM의 크기가 작아진다는 것을 알 수 있었다. 이는, 연료 분사압 상승에 따른 연료의 미립화로 인하여 연소 후 생성되는 PM 일차 입자의 크기도 더 작아지는 것으로 판단된다.

본 실험으로 알 수 있는 입자의 상대적 크기 값을 바탕으로 실제 입자의 크기를 얻기 위해 결과를 보정하는 방법으로 투과 전자 현미경(Transmission Electron Microscope)을 이용하였고 연료 분사압을 800bar로 한 경우의 사진을 Fig. 12에 나타내었다.

TEM사진은 연료 분사압이 600bar, 800bar인 경우의 것을 취득하였으며 사진을 통해 약 160개의 일차 입자 크기를 분석한 결과, 각각의 경우 PM 일차 입자의 평균크기는 약 21nm, 18nm로 나타났다. 이 값은 Simple Time Resolved-LII 기법을 이용하여 예상

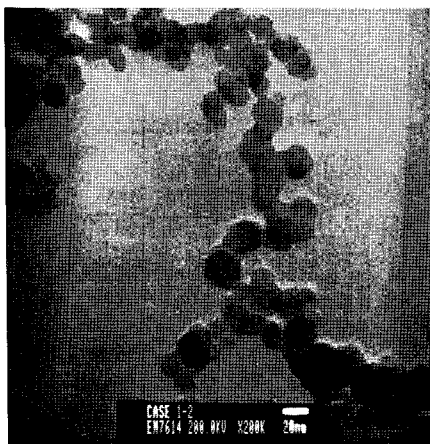


Fig. 12 TEM photograph of particles sampled at injection pressure of 800bar

한 결과와 약 16%의 오차를 나타내었다. 엔진 모사 배기 실험에서의 결과보다 큰 오차가 발생한 원인은 대상 PM 일차 입자의 절대적인 크기가 작고, 사진에서의 입자 크기 측정상의 오차에 기인하는 것으로 추정되며 이에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4.3.2 엔진 부하 변화에 따른 PM 크기 측정

Fig. 13과 Fig. 14는 엔진 부하 조건을 변화시켰을 때의 LII 신호를 분석하여 얻은 결과이다. 그 결과, 엔진의 부하가 클수록 발생하는 PM의 크기는 더 크다는 사실을 알 수 있었다. bmep값이 5.5bar, 6bar, 6.5bar인 경우에서 투과 전자 현미경 보정 결과를 이용한 PM 일차 입자크기는 약 18nm, 19.5nm, 21nm로 추정되었다.

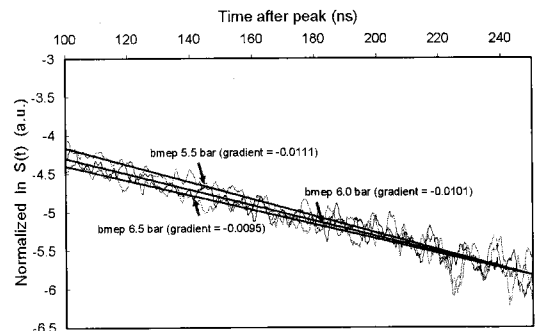


Fig. 13 Gradients of the logarithmic LII signal from 100ns to 250ns

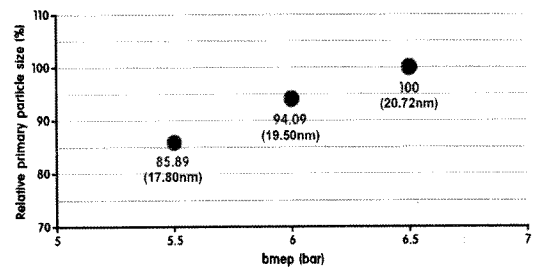


Fig. 14 Relative PM primary particle diameter for various engine load conditions

5. 결론

본 연구에서는 기존의 Time Resolved-LII 기법을 간략화한 Simple Time Resolved-LII 기법을 에틸렌 화염을 이용한 엔진 모사 배기와 단기통 커먼레일

디젤 엔진 배기계에 적용하여 soot와 PM의 크기를 계측하였다.

- 1) 에틸렌 화염을 이용하여 모사한 엔진 배기계에서 발생한 soot의 크기를 계측하기 위해 다양한 레이저 세기로 신호를 획득한 결과 $0.2 J/cm^2$ 이상의 세기를 사용할 경우에는 soot의 승화 현상이 나타났다.
- 2) 에틸렌 배기 실험에서 LII 입자 측정 기법을 사용할 때, 에틸렌의 공급 유량을 늘려감에 따라서 soot의 크기가 증가함을 알 수 있었다. FE-SEM을 통한 결과와 비교했을 때, 약 3%의 오차를 보였다.
- 3) 디젤 엔진 배기 실험에서 연료 분사압을 높일수록 발생하는 PM 일차 입자의 크기는 더 작아진다는 사실을 확인할 수 있었다.
- 4) 엔진 부하 조건 변화에 따른 PM 크기 계측 실험의 경우, 실험 조건 내에서 엔진의 부하가 클수록 발생하는 PM의 일차 입자 크기는 더 커진다는 사실을 알 수 있었다.
- 5) 본 연구에서는 Simple Time Resolved-LII 기법을 엔진 배기에 적용하였으며 정밀한 보정 방법을 거치면 PM 일차 입자 크기 계측에 활용할 수 있다는 가능성을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 ‘미래형 자동차 배기가스 제로화 기술 개발’ 과제의 일부로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- 1) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, New York, pp.626-648, 1988.
- 2) W. A. Majewski, Diesel Particulate Matter, <http://www.dieselnet.com/tech/dpm.html>, 2002.
- 3) D. Satcher, Toxicological Profile for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 1995.
- 4) S. Will, S. Schraml and A. Leipertz, “Two-Dimensional Soot-particle Sizing by Time-resolved Laser-induced Incandescence,” *Optics Letters*, Vol.20, No.22, pp.2342-2344, 1995.
- 5) S. Will, S. Schraml, K. Bader and A. Leipertz, “Performance Characteristics of Soot Primary Particle Size Measurements by Time-resolved Laser-induced Incandescence,” *Applied Optics*, Vol.37, No.24, pp.5647-5658, 1998.
- 6) G. S. Eom, C. W. Park, Y. H. Shin, K. H. Chung, S. Park, W. Choe and J. W. Hahn, “Size Determination of Nanoparticles in Low-pressure Plasma with Laser-induced Incandescence Technique,” *Applied Physics Letters*, Vol.83, No.6, pp.1261-1263, 2003.
- 7) L. A. Melton, “Soot Diagnostics based on Laser Heating,” *Applied Optics*, Vol.23, No.13, pp.2201-2208, 1984.
- 8) W. W. Stoffels, E. Stoffels, G. M. W. Kroesen and F. J. de Hoog, “Detection of Dust Particles in the Plasma by Laser-induced Heating,” *J. Vac. Sci. Technol. A*, 14, p.588, 1996.
- 9) C. R. Shaddix and K. C. Smyth, “Laser-Induced Incandescence Measurements of Soot Production in Steady and Flickering Methane, Propane, and Ethylene Diffusion Flames,” *Combustion and Flame*, Vol.107, pp.418-452, 1996.
- 10) S. Gupta, R. Poola and R. Sekar, “Issues for Measuring Diesel Exhaust Particulates Using Laser Induced Incandescence,” SAE 2001-01-0217, 2001.
- 11) J. S. Jung, “Quantitative Measurement of Soot Concentration by Two-wavelength Correction of Laser-Induced Incandescence Signals,” *Transactions of KSAE*, Vol.5, No.3, pp.54-65, 1997.
- 12) S. Schraml, S. Will and A. Leipertz, “Simultaneous Measurement of Soot Mass Concentration and Primary Particle Size in the Exhaust of a DI Diesel Engine by Time-Resolved Laser-Induced Incandescence (TIRE-LII),” SAE 1999-01-0146, 1999.