

## 커먼레일 직접분사식 디젤엔진에서 시분해 레이저 유도 백열법을 이용한 매연입자의 배출 특성

김 규 보<sup>1)</sup> · 한 휘 영<sup>1)</sup> · 장 영 준<sup>2)</sup> · 전 충 환<sup>\*2)</sup>

부산대학교 대학원 기계공학과<sup>1)</sup> · 부산대학교 기계공학부 기계기술연구소<sup>2)</sup>

### The Characteristics of Exhausted Soot Particles from a Common-Rail Direct Injection Diesel Engine by TIRE-LII

Gyu-Bo Kim<sup>1)</sup> · Hwi-Young Han<sup>1)</sup> · Young-June Chang<sup>2)</sup> · Chung-Hwan Jeon<sup>\*2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

<sup>2)</sup>School of Mechanical Engineering RIMT, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

(Received 2 January 2007 / 28 February 2007)

**Abstract** : Recently, diesel vehicles have been increased and their emission standards have been getting strict. The emission of diesel vehicles contains numerous dangerous compounds, especially particulate matters cause a serious environmental pollutant and affect to human health seriously. Thousands of studies have already reported that particulate matters are associated with respiratory and cardiovascular diseases, and death. Due to these, it is necessary to measure the soot concentration and soot particle size in laboratory flames or practical engines to recognize the soot formation, and develop the control strategies for soot emission.

In this study, the characteristics of exhausted soot particle size and volume fraction from 2.0L CRDI diesel engine have been investigated as varying engine speed and load. Laser induced incandescence has been used to measure soot concentration. Time-resolved laser induced incandescence has been used to determine soot particle size in the engine. The soot volume fraction is increased as increasing engine load but soot volume fraction is decreased as increasing engine speed. The primary particle size is distributed about 35nm ~ 60nm at each experimental conditions.

**Key words** : Soot(매연), Laser induced incandescence(레이저 유도 백열법), Particle matter(입자상 물질), CRDI(커먼레일 직접분사 디젤엔진), Particle size(입자 크기)

#### Nomenclature

$c_s$  : specific heat of soot, [J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]  
 $h$  : heat transfer coefficient, [W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]  
 $\Delta H_v$  : enthalpy of vaporization, [J mol<sup>-1</sup>]  
 $k_\infty$  : thermal conductivity, [W m<sup>-1</sup> K]  
 $U_v$  : langmuir evaporation rate, [m s<sup>-1</sup>]  
 $m_p$  : mass of a single soot particle, [g]  
 $r(t)$  : radius of soot particle, [m]

$S(t)$  : laser induced incandescence signal, [-]  
 $T(t)$  : temperature of soot particle, [K]  
 $T_\infty$  : surrounding gas temperature, [K]  
 $T^*$  : vaporization temperature of soot, [K]  
 $W_v$  : molecular weight, [kg mol<sup>-1</sup>]  
 $\alpha_{abs}$  : absorption coefficient, [-]  
 $\lambda_{em}$  : emission wave, [m]  
 $\lambda_{mfp}$  : mean free path, [m]  
 $\rho_v$  : density of vaporized soot, [g m<sup>-3</sup>]  
 $\rho_s$  : density of dry soot, [kg m<sup>-3</sup>]

\*Corresponding author, E-mail: chjeon@pusan.ac.kr

## 1. 서론

최근 환경오염으로 인한 인체에 미치는 영향이 심각해지면서 환경오염에 대한 관심이 증대되고 있다. 대기오염의 주범인 미연탄화수소 및 탄소산화물, 질소산화물, 매연 등은 자동차뿐만 아니라 산업용 연소 시스템 등에서 주로 발생하고 있다. 특히 매연(soot)의 경우는 인체와 환경에 미치는 영향뿐 아니라 연소기의 성능, 신뢰성, 그리고 내구성에 중요한 영향을 미치는 인자로 알려져 있어 많은 관심의 대상이 되고 있다.

최근, 디젤 자동차가 전 세계적으로 증가 추세에 있으며 엔진의 수명 또한 길기 때문에 디젤 엔진에서 배출되는 배기가스 규제가 엄격해 지고 있고 앞으로 더욱 엄격해질 예정이다. 이러한 매연배출의 높은 비율을 차지하는 자동차 배출가스에 대한 연구가 전 세계적으로 진행중이다.

디젤 엔진에서 배출되는 입자상 물질의 대부분 탄소 입자(매연)와 재(ash), 휘발성 유기 화합물, 그리고 황 성분으로 구성 되어 있다.<sup>1)</sup> 입자상 물질을 이루고 있는 성분은 매연 입자가 대부분(약 40%)을 차지하고 있으며, 매연 입자는 탄소를 구성된 고품의 입자 배출물질로 기체 생성물에 비하여 그 생성 과정이 매우 복잡하다.

최근의 연구보고에 따르면 비록 매연입자들이 초기에는 각각의 원형입자로 형성되지만 그 입자들이 빠르게 무리를 형성하게 되고 결국은 매연입자들은 작은 초기 입자들이 큰 덩어리로 이루어진다고 보고되고 있다. 이러한 매연입자들은 그 배출 양에도 문제가 있지만 최근의 연구보고에 따르면 배출 입자의 크기 분포가 인체에 미치는 영향이 더 크다고 보고되고 있다.<sup>2)</sup>

디젤 엔진의 매연 중량 및 농도를 측정하는 방법으로는 여지 반사식과 광 투과식 매연측정방법이 있으며, 입자의 크기를 측정하는 방법으로는 ELPI(Electrical Low Pressure Impactor), SMPS(Scanning Mobility Particle Sizer), TEOM(Tapered-Element Oscillating Microbalance), DMPS(Differential Mobility Particle Spectrometer)등이 적용되고 있다.

하지만 이러한 방법들은 샘플링 가스의 희석(dilution)을 필요로 하고 어느 정도의 측정 시간이

필요하기 때문에 엔진의 다양한 운전조건변화에 대해서는 실시간으로 측정하기가 곤란하다.

이러한 문제점들을 극복하기 위해 가장 많이 사용되는 매연측정법으로 광 계측기법 중에서 레이저 유도 백열법(Laser-Induced-Incandescence : LII)을 적용하고 있으며, Eckbreth<sup>3)</sup>에 의해 처음으로 소개 되었으며, 그 후 Melton<sup>4)</sup>이 가열된 매연입자로부터의 열복사 신호를 해석함으로써 매연입자의 질량농도 측정에 대한 적용가능성을 제시하였다.

이후 많은 연구를 통해 확산화염에서 TIRE-LII(Time-Resolved Laser-Induced Incandescence)를 이용하여 매연의 입자크기를 측정하는데 널리 이용되었으며, 최근에는 TIRE-LII의 높은 시간 분해능과 공간 분해능을 이용하여 엔진배기단과 실린더 내에서 매연의 입자크기와 농도 등을 계측하고 있다.

Leipert<sup>5)</sup> 등은 6기통 디젤 엔진에서 TIRE-LII를 이용하여 연료 성분부에 따른 디젤엔진 배기단에서 매연입자크기를 측정하였으며, Snelling<sup>6)</sup> 등은 LII를 이용하여 단기통 디젤엔진에서 엔진의 부하와 연료 등을 변화시켜가며 매연입자크기와 체적분율 그리고 농도 등을 측정하였다. Odaka<sup>7)</sup>와 Chun<sup>8)</sup> 등은 단기통 커먼레일 디젤엔진을 이용하여 EGR 변화율에 따른 배출되는 매연의 입자 크기분포와 체적분율을 측정하여 SMPS와 비교하였으며, Moccia<sup>9)</sup> 등은 4기통 커먼레일 디젤엔진을 이용하여 분사조건에 따른 매연 입자의 크기분포를 측정하였고, Bockhorn<sup>10)</sup> 등은 LII와 two color pyrometer를 이용하여 실린더 내부와 배기단에서 동시에 매연의 농도와 크기 그리고 수밀도를 측정하였다.

본 연구에서는 4기통 커먼레일(CRDI, Common Rail Direct Injection) 디젤엔진에서 시분해 레이저 유도 백열법(TIRE-LII)을 이용하여 엔진 배기단에서의 엔진운전조건에 따른 매연입자의 체적분율과 매연입자의 크기를 구하는데 목적을 두고 있으며, 이러한 목적은 향후 엔진에서의 분사시기변화와 분사방법 등을 변화하는 등의 매연저감을 위한 최적의 엔진운전조건을 구현하기 위한 기초데이터를 획득하고자 한다.

## 2. 이론

TIRE-LII 기법은 강한 에너지를 가지는 펄스 레이저로 매연입자를 증발온도 근처인 약 4000K 까지 가열시킨 후 입자가 다시 냉각되는 동안 방출하는 신호를 검출하여 입자의 정보를 결정하는 것이다.

매연입자의 크기는 가열된 입자로부터 냉각되는 동안 방출되는 LII 신호의 감쇠율에 비례하는 것으로, 명확한 관계를 결정하기 위해 입자의 서로 다른 두 가지의 평형방정식(에너지, 질량 평형방정식)에 기초를 두고 있으며, 아래와 같이 두 방정식을 나타내었다.<sup>4,11)</sup>

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

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

식 (1)과 (2)는 각각 에너지 평형방정식(흡수, 증발, 전도, 복사, 내부 에너지)과 질량 평형방정식을 나타낸 것이다.

### 2.1 LII 신호와 매연체적분율

Melton<sup>4)</sup>에 따르면 열복사를 방출하는 파장  $\lambda_{em}$ 에서 측정된 LII의 최대값은 다음과 같은 비례관계를 가진다고 하고 있다.

$$S_{(t)} \propto N_p d_p^x \quad (3)$$

여기서  $x=3+154 \text{ nm} / \lambda_{em}$ ,  $N_p$ 는 수밀도이다. 식 (3)에서  $x$ 는 3으로 근사하기 때문에 LII 신호에서 최대값은 매연입자의 체적분율에 비례하게 된다.

### 2.2 매연입자크기

매연입자의 냉각에 따른 LII 신호의 감쇠율은 입자의 크기에 관계한다는 기본적인 이론을 바탕으로 TIRE-LII를 이용하여 레이저 조사 후 냉각되는 입자의 감쇠율을 계측하여 입자의 크기를 결정할 수 있다. LII 신호의 감쇠율과 입자크기에 관한 식을 다음과 같이 나타내었다.

$$S_{LII}(t_2) = S_{LII}(t_1) \cdot \exp\left[-\frac{(t_2 - t_1)}{\tau(d_p)}\right] \quad (4)$$

식 (4)는 감쇠율  $\tau$ 를 구하기 위한 식으로서 레이저 조사 후 입자가 냉각되는 기간 동안  $t_1$ 과  $t_2$ 의 냉각되는 시간에 대한 LII 신호비를 구함으로서 입자의 크기가 결정된다. 이러한 이론적 모델을 바탕으로 실험을 통해 얻어진 LII 신호비를 계산하여 모델의 결과 값과 비교함으로써 입자의 크기를 결정하게 된다. 이때 오차를 줄이기 위한 적절한  $t_1$ 과  $t_2$ 의 선택은 실험과 모델의 비교를 통해 획득하게 된다.

## 3. 실험장치 및 방법

### 3.1 엔진 및 배기단 광학장치

본 실험에 사용된 엔진은 직렬 4기통 커먼레일 직접분사(Common Rail Direct Injection:CRDI) 디젤엔진으로서 터보차저와 인터쿨러, EGR 등이 장착되어 있으며, 엔진의 주요 사항은 Table 1과 같다.

Table 1 Engine specifications

Title	Specifications
Model	Hyundai D-2.0 Engine
Engine type	in-line 4 cylinder
Combustion system	CRDI, turbo charged with EGR and intercooler
Displacement	1991cc
Bore	83mm
Stroke	92mm
Compression ratio	18.4:1
Peak power	126ps/4000rpm
Peak torque	29.5 kg · m/2000rpm

엔진 실린더내의 압력을 측정하기 위하여 압력센서(Kistler 6052B)를 사용하였으며, 엔진은 동력계에 연결되어 운전조건과 부하조건을 변화시킬 수 있게 되어 있다.

Fig. 1은 배기단에서 배출되는 매연입자를 계측하기 위해 장착된 광학장치로서 엔진의 배기 매니폴드에 직결되게 되어 있고 경우에 따라 위치를 이동할 수 있게 탈착이 가능하도록 제작하였다.

설치된 광학창은 레이저의 조사와 발생된 LII 신호를 취득할 수 있도록 지름 25mm인 석영을 3곳에

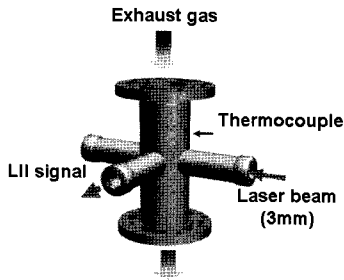


Fig. 1 Optical device for soot measurement

설치하였으며, 배출되는 매연입자에 의한 광학창의 오염에 대비하여 쉽게 열 수 있도록 제작되었다. 그림에서 보는바와 같이 배기가스는 위에서 아래로 지나가며, 레이저를 조사시킨 후 90도 방향에서 신호를 취득하며, 광학창 위치에 설치된 열전대를 이용하여 배기가스의 온도를 측정하였다.

### 3.2 LII 장치

본 실험에 사용된 레이저 유도 백열법 (LII) 장치는 Fig. 2에 나타난 것과 같으며, 1차원 측정을 위한 장치로 구성되어 있다.

실험 장치는 크게 엔진과 동력계 그리고 배기단에서 LII 신호 발생을 위한 2차 고조파(532nm, FWHM=10ns)의 Nd:YAG 펄스레이저와 레이저광을 측정부에 조사하는 광학장치부(핀홀, 초점렌즈), LII 신호를 검출하는 광증배관 (PMT, Photo Multiplier Tube)과 데이터를 취득하는 데이터취득부(오실로스코프, 컴퓨터)로 구성되어 있다.

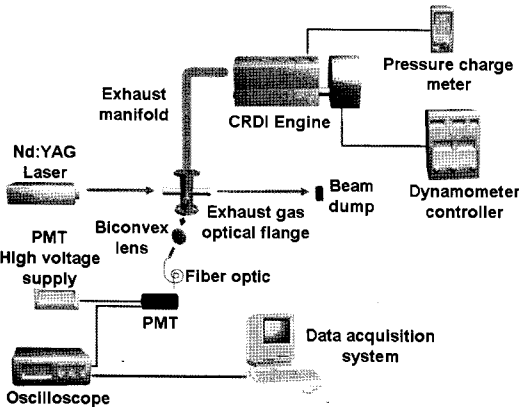


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus for LII

### 3.3 실험방법

본 실험의 조건은 Table 2와 같다. 동력계를 이용하여 각 엔진회전속도에 따른 부하를 변화시켰으며, 실린더내의 압력신호와 LII 신호를 압력센서와 PMT를 통해 동시에 측정하였다.

실험에 사용된 Mini Nd:YAG(Big Sky Laser) 레이저의 최대출력은 150mJ이며, 출력과 반복율의 조정이 가능하며, 시간적으로 가우시안분포 특성을 가진다. LII 측정을 위해 우선 532nm, 반치폭(FWHM) 10Hz로 동작하는 레이저 광을 핀홀로 통과시켜 레이저의 광폭을 3mm로 줄인 후 배기단의 광학장치로 조사하여 LII 신호를 생성시킨다. Fig. 3은 이때 조사된 레이저의 공간적 강도분포를 빔 프로파일러 (Beam profiler, Gentec-eo, Wincam D)로 측정한 결과이며, 레이저광의 강도가 거의 동일한 분포(Top hat)를 가지는 것을 확인하였다.

레이저 조사 후 발생된 LII 신호를 10cm 초점 렌즈와 중심파장 400nm±10nm의 대역 필터를 통해 광증배관(PMT, Photo Multiplier Tube)에 집광시키고 연결된 디지털오실로스코프(500MHz, 1GSa/s)를 통해 신호를 취득하여 PC에 저장하게 된다.

Table 2 Engine operating conditions

Engine speed (rpm)	Break mean effective pressure BMEP (bar)
1000	2, 4, 6, 8
1200	
1500	
1800	
2000	

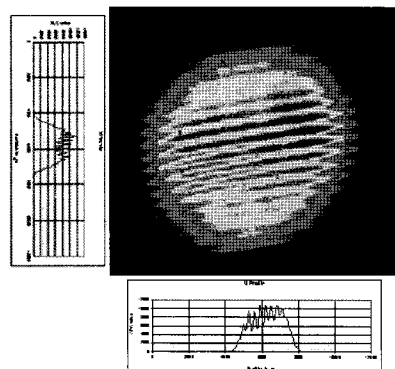


Fig. 3 Laser beam spatial profile(Diameter=3mm)

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 LII 신호 특성 및 레이저 출력 선정

Fig. 4는 레이저 강도(Fluence)에 따른 적산된 LII 신호 결과를 나타내고 있다.

그림에서 보는 바와 같이,  $0.2\text{J}/\text{cm}^2$  이하에서 최대 값을 가진 후 다시 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 일반적으로  $0.2\text{J}/\text{cm}^2$  이상의 레이저 강도에서는 입자크기를 측정함에 있어 증발효과를 가져오게 되어 실제 측정하고자 하는 입자크기가 줄어드는 결과를 가져오게 된다. 따라서  $0.2\text{J}/\text{cm}^2$  이하의 레이저 강도를 선정하였고 그 중에서도 S/N비가 큰 지점 즉, LII 신호가 최대가 되는 레이저 강도,  $0.17\text{J}/\text{cm}^2$ 를 실험 조건으로 선정하였다.

이는 일반 화염에서 쓰이는 레이저 강도인  $0.12 \sim 0.15\text{J}/\text{cm}^2$  보다 약간 높은 값이다. 이는 일반 화염에서의 화염온도는 약  $1800\text{K}$ 인데 비해 디젤엔진 배기단에서의 온도는 약  $500 \sim 700\text{K}$  사이의 분포를 가지므로 초기온도가 화염에 비해 낮기 때문에 매연 입자의 온도를 올리는데 그만큼 많은 에너지가 필요한 것이다.<sup>12)</sup>

또한 레이저 강도에 따른 LII 신호 값이 본 저자들에 의해 계산된 모델결과와도 비교적 잘 일치하는 경향을 확인할 수 있다.

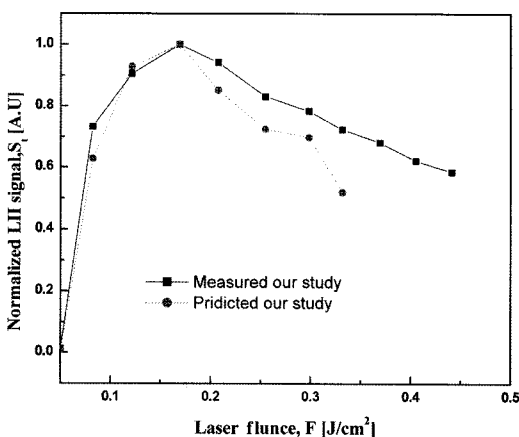


Fig. 4 Effect of laser fluence on LII signal

### 4.2 매연 체적 분율과 체적 배출률 특성

디젤엔진의 각 운전조건에서 측정된 LII 신호는 약 1500 pulse의 평균을 나타낸 것이고 이는 노이즈

의 감소와 엔진 데이터의 사이클 간(cycle to cycle)의 오차를 줄이기 위함이다.

예로서 Fig. 5는 1200rpm, BMEP=6bar에서 측정된 LII 신호를 나타낸다. 측정된 LII 신호는 약 400ns 까지 존재함으로써 일반화염에서의  $1\mu\text{s}$  이상 유지되는 것에 비해 짧은 것을 알 수 있다. 이는 배기단에서의 측정조건이 일반 대기압상태의 화염보다 압력이 높아 압력에 의한 LII 신호의 감소로 나타난 결과이다.<sup>13)</sup>

엔진의 속도와 부하의 변화에 따른 연소실내의 연소상태를 알아보기 위해 실린더압력을 측정하였고 그 결과를 Fig. 6~7에 각각 나타내었다. 각 조건에 따른 P-V 선도는 비슷한 경향을 나타내어 대표적으로 엔진속도는 1500rpm, 엔진의 부하는 BMEP 4bar 일 경우의 결과만 표시하였다.

Fig. 6은 엔진의 회전속도 1500rpm에서 부하를 BMEP 2~9bar까지 변화시켰을 때의 P-V선도를 나타낸 것이다. 부하의 증가에 따라 연소실 최고압력과 압축-팽창 시에 해당하는 부분의 면적이 증가하는 것을 알 수 있으며, Fig. 7은 BMEP 4bar에서 엔진 속도에 따른 P-V선도를 나타낸 것으로 연소실 최고압력에는 큰 차이를 나타내지 못하고 단지 압축-팽창시의 면적만 다소 증가하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 엔진 운전 조건에 따른 매연의 체적분율을 나타내는 그림이다. 매연의 체적분율은 저속조건인 1000rpm의 BMEP 6bar를 제외하면 동일한 엔진회전속도에서 부하가 증가함에 따라 증가하는 것

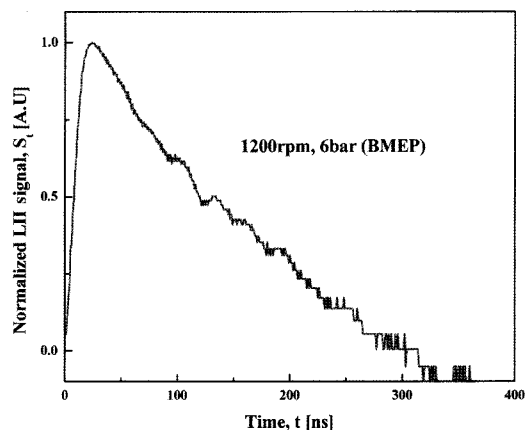


Fig. 5 Normalized LII signal taken at 1200rpm and BMEP 6bar

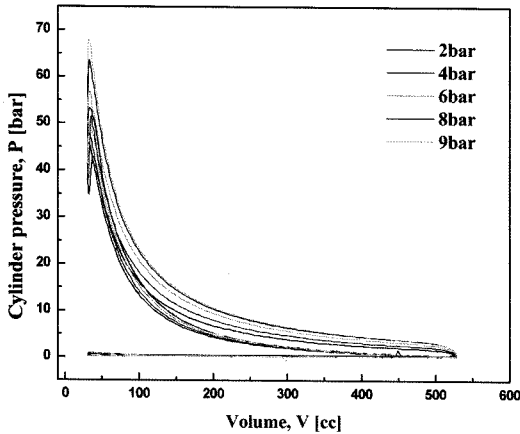


Fig. 6 Characteristics of P-V diagram at 1500 rpm as each load condition

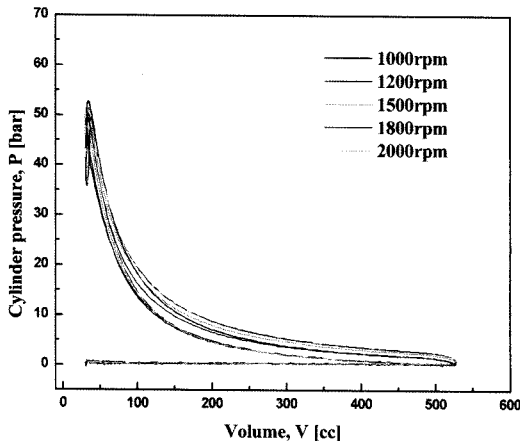


Fig. 7 Characteristics of P-V diagram at BMEP 4bar as each engine speed

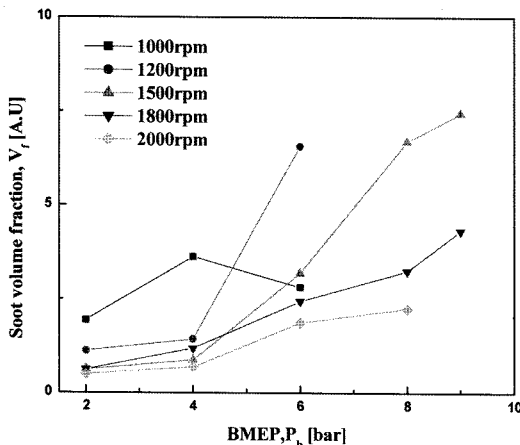


Fig. 8 Characteristics of soot volume fraction at different engine speed and load

을 알 수 있다. 이는 부하의 증가와 함께 연료의 분사량이 증가되어지고, 디젤엔진의 특성상 흡입되는 공기의 양과 속도가 동일한 엔진회전속도에서는 국소적으로 농후한 연료의 불완전 연소에 의한 매연의 증가로 사료된다.

하지만 동일한 부하조건에서는 엔진의 회전속도가 빨라짐에 따라 매연의 체적분율은 감소하는 것을 알 수 있었는데, 이는 엔진의 속도가 빨라지면서 흡입되는 공기의 양과 속도가 증가되어, 연소실내의 유동강화에 따른 스윙효과(swirl effect)가 커지기 때문에 엔진 연소실내에서 상대적으로 연료-공기의 혼합특성이 양호해지고, 이에 따른 연소가 더 활성화되어 나타난 결과로 사료된다.

Fig. 9에서는 각 조건에서의 매연체적분율을 출력으로 나눈 값인 매연체적배출율(soot volume fraction/power)을 나타내는 그림이다. 이는 매연의 체적분율의 증가가 엔진의 출력당 증가폭이 어느 정도인지 살펴보기 위함으로 출력의 증가에 대한 매연체적분율의 증가 폭을 비교하기 위함이다. 매연체적분율을 정량적인 값으로 나타내진 않았으나 정성적인 평가가 가능하므로 엔진에서 발생한 출력으로 나눈 값인 매연체적배출율 또한 엔진운전조건에 따라 상대적인 값으로 나타내었다.

Fig. 8과 마찬가지로 1000rpm, BMEP 6bar의 조건을 제외하고는 동일한 엔진부하에서는 엔진회전속도가 증가함에 따라 매연체적배출율이 감소하는 것을 알 수 있으며, 비교적 저속 구간인 1000rpm과

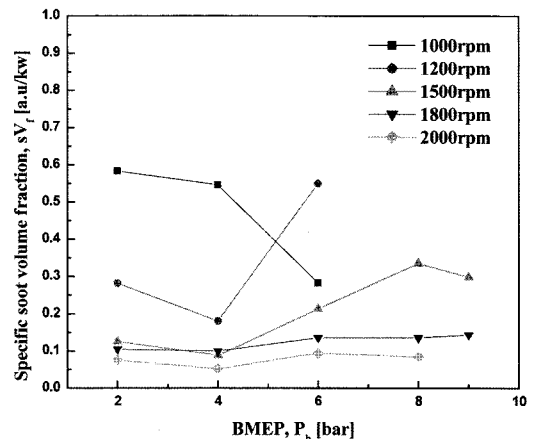


Fig. 9 Characteristics of specific soot volume fraction at different engine speed and load

1200rpm 구간에서는 부하의 증가에 따라 매연체적 배출율의 증감이 큰 것을 알 수 있다.

또한 매연체적분율의 경우 1500rpm과 1800rpm에서 부하의 증가에 따라 최종적으로 1000rpm보다 높은 매연체적분율을 나타내는 반면 매연체적배출율은 부하의 증가에도 1000rpm의 수치보다 작은 값을 가지는 것을 알 수 있다. 이는 출력의 증가와 연료량의 증가에 비해 배출되는 매연체적분율이 작다는 것을 알 수 있다.

### 4.3 운전조건에 따른 매연 입자크기의 특성

Fig. 10은 엔진회전속도와 부하에 따른 매연입자의 크기를 나타낸 것이다. 입자의 크기는 1500, 1800rpm, BMEP 8bar에서 최대의 크기를 가진다.

하지만 엔진의 속도와 부하의 변화에 따른 입자 크기의 증감에 대한 명확한 경향은 나타나고 있지 않다. 이러한 결과는 다른 논문에서도 비슷하게 나타나지만<sup>9,14)</sup> EGR이 없는 대형 디젤엔진에서 실험을 수행한 Lee et al.<sup>15)</sup>가 제시한 엔진부하의 증가에 따라 입자의 크기는 작아진다는 연구결과와는 다소 차이를 나타내고 있다. 이러한 결과의 차이는 서로 다른 엔진을 적용한 것과 엔진마다의 운전조건이 상이하며, 특히 EGR이나 터보차저, 인젝터 특성으로 인한 차이에서 발생하는 것으로 사료된다.

하지만 매연입자의 크기범위는 Lee et al.<sup>15)</sup>, Smallwood et al.<sup>14)</sup> 등이 제시하고 있는 매연입자크기와 유사한 결과로서 약 35~60nm의 크기를 나타냈다.

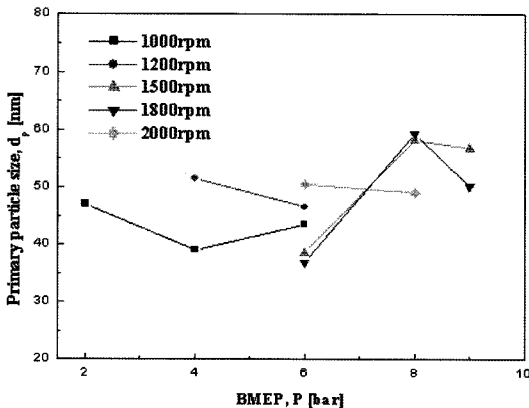


Fig. 10 Characteristics of primary soot particle size at different engine speed and load

향후 엔진회전속도나 부하의 증가와 입자크기에 대한 관계를 알아보기 위해서는 상용화된 엔진이 아닌 실험용 엔진에서의 연구가 필요할 것으로 사료되며, 연료의 분사압력과 분사방법 그리고 EGR율을 일정하게 하고 운전조건을 변화시켜가며 실험을 수행한다면 보다 명백한 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 2.0L CRDI 디젤엔진의 배기단에서 TIRE-LII기법을 이용하여 매연의 입자크기를 측정해 보았다. 이러한 실험을 통해 디젤엔진 배기단에서 매연입자크기의 실시간 측정 가능성을 확인할 수 있었으며, 본 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 매연의 체적분율에 있어서, 주어진 엔진회전속도(1000, 1200, 1500, 1800, 2000 rpm)에 대해 부하를 BMEP=2bar~9bar까지 증가시켰을 경우 매연체적분율이 증가되는 경향을 나타내었다.
- 2) 동일한 엔진부하조건에서는 엔진회전속도가 1000~2000rpm으로 증가할수록 매연체적분율이 감소되는 경향을 나타내었다.
- 3) 매연입자의 크기는 1500, 1800rpm, BMEP 8bar에서 최대의 크기를 가지며 매연입자크기의 범위는 일치입자크기라고 볼 수 있는 약 35~60nm의 범위로 나타났다.
- 4) 매연체적분율이 증가하는 경우 매연 입자의 크기는 줄어드는 결과를 나타내었다. 이는 곧 매연체적분율이 증가하는 경우 작은 입자가 큰 입자에 비해 많이 배출된다는 것을 나타낸다.

## 후 기

이 연구는 산업자원부지원의 “미래형 자동차 배기가스 제로화 기술개발” 과제의 일부와 『2단계 BK21사업』의 지원비를 받아 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## References

- 1) D. B. Kittelson, “Engines and Nano- Particles,”

- J. Aerosol Sci., Vol.29, No.5/6, pp.575-588, 1998.
- 2) T. Lehre, B. Jungfleisch, R. Suntz and H. Bockhorn, "Size Distributions of Nanoscaled Particles and Gas Temperatures from Time-resolved Laser-induced-incandescence Measurements," *Applied Optics*, Vol.42, No.12, pp.2021-2030, 2003.
  - 3) A. C. Eckbreth, "Effects of Laser Modulated Particle Incandescence on Raman Scattering Diagnostics," *J. Appl. Phys.*, Vol.48, pp. 4473-4479, 1977.
  - 4) L. A. Melton, "Soot Diagnostics Based on Laser Heating," *Applied Optics*, Vol.23, No.13, pp.2201-2208, 1984.
  - 5) S. Schraml and A. Leipertz, "Application of a New Soot Sensor for Exhaust Emission Control Based on Time Resolved Laser Induced Incandescence (TIRE-LII)," SAE 2000-01-2864, 2000.
  - 6) D. R. Snelling and G. J. Smallwood, "In-Situ Real-Time Characterization of Particulate Emissions from a Diesel Engine Exhaust by Laser-Induced Incandescence," SAE 2000-01-1994, 2000.
  - 7) D. Kawano and M. Odaka, "Comparative Measurement of Nano-Particulates in Diesel Engine Exhaust Gas by Laser-Induced Incandescence (LII) and Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)," SAE 2004-01-1982, 2004.
  - 8) H. S. Jeon, H. J. Kim, H. C. Ryu, J. I. Park, J. W. Hahn and K. M. Chun, "A Study on Measurements of PM Size in a Single Cylinder Common-rail Diesel Engine Exhaust using LII Method," *Transactions of KSAE*, Vol.14, No.3, pp.95-102, 2005.
  - 9) M. Lazzaro and V. Moccia, "Laser Diagnostic of Particles Exhaust Emission from Advanced Diesel Combustion Systems," SAE 2005-01-0188, 2005.
  - 10) R. Suntz and H. Bockhorn, "Investigations on Soot Emission Behavior of A Common-Rail Diesel Engine during Steady and Non-Steady Operating Conditions by Means of Several Measuring Techniques," SAE 2005-01-2154, 2005.
  - 11) C. J. Dasch, "Continuos-Wave Probe Laser Investigation of Laser Vaporization of Small Soot Particle in Flame," *Applied Optics*, Vol. 23, pp.2209-2215, 1984.
  - 12) S. Gupta, R. Poola and R. Sekar, "Issues for Measuring Diesel Exhaust Particulates Using Laser Induced Incandescence," SAE 2001-01-0217, 2001.
  - 13) M. Hofmann, C. Schulz and H. Jander, "Laser-induced Incandescence for Soot Diagnostics at High Pressures," *Applied Optics*, Vol.42, pp.2052-2062, 2003.
  - 14) D. R. Snelling, G. J. Smallwood and P. O. Witze, "Concurrent Quantitative Laser-Induced Incandescence and SMPS Measurements of EGR Effects on Particulate Emissions from a TDI Diesel Engine," SAE 2002-01-2715, 2002.
  - 15) K. O. Lee, R. Cole and R. Sekar, "Detailed Characterization of Morphology and Dimensions of Diesel Particulates via Thermophoretic Sampling," SAE 2001-01-3572, 2001.