

## 디젤기관 배기 배출물에 있어서 매연 응집체 크기 및 농도의 시간적 계측에 관한 연구

배 명 환<sup>1)</sup> · Takeyuki Kamimoto<sup>2)</sup> · 배 창 환<sup>3)</sup>

경상대학교 기계항공공학부, 항공기부품기술연구센터<sup>1)</sup> · Tokai University<sup>2)</sup> · 동경공업대학 대학원<sup>3)</sup>

### A Study on Temporal Measurement of Size and Concentration for Soot Aggregates among Exhaust Emissions in Diesel Engines

Myung-whan Bae<sup>\*1)</sup> · Takeyuki Kamimoto<sup>2)</sup> · Chang Hwan Bae<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Research Center for Aircraft Parts Technology, School of Mechanical and Aerospace Engineering,  
Gyeongsang National University, Gyeongnam 660-701, Korea

<sup>2)</sup>Joint Research Center of Future Science & Technology, Tokai University,  
1117 Kitakaname, Hiratsuka-shi, Kanagawa 259-1292, Japan

<sup>3)</sup>Microsystem Research Center, Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology,  
4259 Nagatsuta, Midoriku, Yokohama 226-8503, Japan

(Received 26 May 2006 / Accepted 30 July 2006)

**Abstract** : An optical method to measure the size and number density of soot aggregates in diesel exhaust has been proposed in this study. Two laser beams in co-axial alignment transmit a soot loaded exhaust gas flow, and the transmittance at each wavelength is detected by a photo diode simultaneously. The volume equivalent diameter and number density of soot aggregates in the optical path can be theoretically given by the transmittance values measured at two wavelengths. A test conducted by a single cylinder, 4 cycle, small and DI diesel engine shows that the temporal variations of the size and number density of soot aggregates in the diesel exhaust can be measured by the proposed method at a transient mode operation. It is found that the volume equivalent diameter varied temporally from 70 to 110 nm during the period that high soot concentration is observed. One can also conclude that the optical length longer than 1 m in the dynamic range regarding this method is preferable for measuring soot concentration at the level of 1 mg/m<sup>3</sup>.

**Key words** : Diesel engine(디젤기관), Exhaust emissions(배기 배출물), Soot aggregates(매연 응집체), Measurement of size and number density(크기 및 수밀도의 계측), Laser diagnostics(레이저진단), Volume equivalent diameter(체적등가직경)

### 1. 서 론

디젤기관의 배기 배출물 중에 들어있는 미세한 미립자는 인체 호흡기 계통의 병을 일으키는 원인이 된다고 하여 최근에는 미립자 분포, 크기, 농도 등에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다. 특히 2.5 μm

이하의 미립자(PM 2.5, fine particles) 가운데 100 nm 이하의 초미립자(ultrafine particles) 혹은 50 nm 이하의 나노입자(nanoparticles)는 폐의 세포내에 축적되어 폐암 등의 원인이 된다고 하는 보고가 있어 미국의 EPA는 1997년에 PM 2.5에 대한 규제를 제정하였다. 미국의 미립자 규제에 대한 움직임에 주목하여 유럽에서는 CONCAWE, UK Research Program,

\*Corresponding author, E-mail: mwbae@nongae.gsnu.ac.kr

RICARDO 등이 미립자의 측정법에 관해서 조사를 하고 있다.

미립자는 희석터널(dilution tunnel)로부터 채취한 가스에 대하여 다음의 두 가지 방법으로 측정되고 있다. 즉, DMA인 TSI의 SMPS Model 3934에서는 5 nm에서 1000 nm까지 크기의 미립자를 64 단계(channels)로 나누어 30초부터 300초 사이에 측정한다. 또한, ELPI에서는 채취한 기체중의 입자를 코로나 차저(Corona Charger)에서 하전한 후, 다단 다공저압실 캐스케이드 임팩터(Cascade Impactor)에 도입하여 공기역학적인 입자직경에 따라서 각 단계 분급하여 보완하고 수정한다. Finland의 DAKATI사의 장치는 30 nm에서 10000 nm의 미립자를 5초 동안에 측정한다.

어떠한 방법에서도 미립자의 입자경 분포와 농도를 측정할 수 있지만, 배기중의 탄화수소가 희석과정에서 응축하여 생성되는 나노 미립자 또는 2차 입자에 관한 측정결과가 희석터널의 희석비나 터널내에서 채취기체의 체류시간에 의해 다르게 되는 것이 문제가 되고 있다.<sup>1)</sup> 이것은 2차 입자의 생성과정이 온도나 농도에 의해서 다르기 때문이다. 이 과정을 고려한 측정방법이 각 기관에서 검토되고 있지만, 아직 규제를 위한 미립자 측정법이 정해져 있지 않다.

디젤기관으로부터의 배출된 대기중의 미립자 거동을 시뮬레이션하려고 하는 희석터널에서의 미립자 측정에서는 이러한 탄화수소로부터의 2차 입자에 대한 취급이 문제가 된다. 그러나 기관측에서 보면 배출 미립자의 성분은 2차 입자원인 탄화수소와 배출 미립자 질량의 대부분을 차지하는 탄소상 미립자, 즉 매연이다. 따라서 연소조절의 면에서 배출 미립자를 고려할 때에는 탄화수소와 매연을 분리해서 취급하는 것이 좋고, 이와 같은 고려에 의한 SOF와 고체매연의 농도측정법도 이미 시판되고 있다.<sup>2)</sup> 또한, 탄화수소의 고응답 측정기도 시판되고 있다.

한편, 매연농도 측정법에는 이전부터 여과지식과 오페시미터(Opaci-meter)가 있는데, 두 방법 모두 EURO-III 규제수준(10 mg/m<sup>3</sup>)의 농도를 측정할 수 있도록 고감도로 되어있다. 그러나 전자는 실시간 측정을 할 수 없고, 후자는 실시간 측정은 가능하지

만, 탁도를 측정하고 있는 것에 지나지 않는다. 최근 LII법에 의해 매연의 크기와 농도를 실시간에서 측정하는 방법이 검토되고 있다.<sup>3,5)</sup> 그러나 고밀도 레이저 시트(laser sheet)에서 매연을 4500 K 정도까지 가열하므로 매연의 크기나 구조가 변화될 가능성이 높다. 또한, 가열된 매연의 냉각과정은 매연 응집체의 크기가 아니고, 매연 응집체를 구성하는 각 단위 매연의 크기에 의존하므로 LII법에서는 단위 매연의 크기밖에 측정할 수 없다. 또한 가열과 냉각과정의 이론식에는 많은 가정이 포함되어 있으므로 정밀한 검토를 필요로 한다. 또한, 복사광강도의 절대값 측정법이고, 보정은 감쇠법에 의존하고 있다.

이와 같은 관점에서 본 연구에서는 상대값 측정법인 레이저광 감쇠법을 이용하여 디젤기관으로부터의 배기 배출물중 매연 응집체의 체적증가 직경과 농도를 실시간에 높은 정밀도로 측정할 수 있는 새로운 방법을 제안하는 것이 목적이다.

## 2. 측정이론

### 2.1 매연 응집체군의 투과광 감쇠

미소입자군에 평행한 광선이 입사한 경우, 광통과 길이를  $\ell$ , 감쇠계수를  $K_{ext}$ 라고 하면 투과율  $\tau$ 는 Bouguer-Lambert의 법칙에 의해 다음과 같이 된다.

$$\ln \tau = -K_{ext} \cdot \ell \quad (1)$$

식 (1)에서 매연 응집체에 대한 감쇠계수  $K_{ext}$ 는 Dobbins 등<sup>6)</sup>에 의하면 식 (2)로 주어진다.

$$K_{ext} = K_{abs} \cdot (1 + r_{sa}) = \frac{4\pi \cdot N_a \cdot n_p \cdot \alpha_p^3 \cdot E(m)}{(2\pi/\lambda)^2} (1 + r_{sa}) \quad (2)$$

여기서  $N_a$ 는 단위체적중의 매연 응집체 수,  $n_p$ 는 매연 응집체를 구성하는 요소매연의 수,  $\alpha_p = \pi d_p / \lambda$ ,  $d_p$ 는 요소매연의 직경,  $m$ 은 매연의 복소굴절률인데,  $m = n - ik$ 이다.  $r_{sa}$ 는 매연 응집체의 산란단면적과 흡수단면적의 비이다.  $E(m)$ 은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$E(m) = \text{Im} \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) \quad (3)$$

식 (2) 중의  $r_{sa}$ 는 다음과 같은 식으로 주어진다.<sup>10)</sup>

$$r_{sa} = \frac{2}{3} \frac{F(m)}{E(m)} \alpha_p^3 n_p f_n \left[ 1 + \frac{16}{3D_f} (2\pi/\lambda)^2 \overline{R_g^2} \right]^{-D_f/2} \quad (4)$$

여기서  $f_n$ 은 매연 응집체 크기분포에 관한 계수로서 포화탄화수소에서는 2.0에서 2.5 정도의 값이다.  $R_g$ 는 매연 응집체의 관성모멘트에 있어서 회전반경이다. 또한,  $D_f$ 는 응집체의 분열도형 차원(fractal dimension)인데, 대부분의 매연 응집체에서 1.75이다.  $F(m)$ 은 복소굴절률의 함수로서 다음 식으로 주어진다.

$$F(m) = \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 \quad (5)$$

또한,  $n_p$ 와  $R_g$ 는 다음 식과 같은 관계가 있다.

$$n_p = k_f \left( \frac{\sqrt{R_g^2}}{d_p} \right)^2 \quad (6)$$

여기서  $k_f$ 는 응집체 형상에 관한 계수이고, 일반적으로 6에서 10의 값이다.

식 (4)에 있어서 우변의 괄호내의 제2항이 1에 비하여 작은 경우,  $r_{sa}$ 는  $n_p \cdot \alpha_p^3$ , 즉 응집체의 체적에 비례한다. 단,  $n_p \cdot \alpha_p^3$ 는  $10^{-2}$  크기이므로  $r_{sa}$ 는 무시할 수 있다. 한편, 매연 응집체의 크기가 크고, 괄호안의 제2항이 1에 비해 충분히 큰 경우에는 식 (4)의  $n_p$ 와  $(R_g/d_p)^{D_f/2}$ 는 상쇄되고,  $r_{sa}$ 는 식 (7)과 같이 응집체의 크기에 관계가 없다.

$$r_{sa} = \frac{2}{3} \frac{F(m)}{E(m)} \alpha_p k_f [3D_f / (16\alpha_p^2)]^{D_f/2} \quad (7)$$

$D_f$ 를 1.75로 하면  $r_{sa}$ 는  $a^{1.26}$ 에 비례, 즉 파장의 1.26승에 역비례한다.

식 (4)의  $r_{sa}$ , 즉 응집체의 산란단면적과 흡수단면적의 비는 파장, 단위 매연의 직경, 복소굴절률, 응집체의 분열도형 차원 등의 함수이다.<sup>6)</sup> Dobbins 등의 계산법<sup>7)</sup>에 따라  $r_{sa} \cdot E(m)/F(m)$ 을  $n_p$ 에 대해 계산한다. 계산에 있어서  $k_f$ 의 값은 Puri 등<sup>8)</sup>의 실험값  $k_f = 9.0$ 을 사용했다.

$d_p$ 와  $f_n$ 은 디젤기관 매연에 관한 측정값을 참고로 하여 정하였다. Fujiwara 등의 전자현미경 관찰<sup>9)</sup>에 의하면 수가 가장 많은  $d_p$ 는 35 nm이다. 또한, Köyü 등<sup>10)</sup>의 실험에 의하면 n-헵탄 확산화염의  $d_p$

는 35 nm이다. Schraml 등<sup>4)</sup>의 LII법 측정에 의하면  $d_p$ 는 25 nm에서 35 nm인 것에 대하여 Smallwood 등<sup>3)</sup>의 측정에서는 40 nm에서 60 nm가 되고 있다. 이와 같이 LII법에 의한 측정값은 연구자에 따라서 크게 다르기 때문에 신뢰성이 부족하다. 따라서 본 연구에서는 전자현미경의 관찰에 의한 값  $d_p = 35$  nm를 채용했다.

$f_n$ 은 응집체의 등가직경 분포로부터 결정된다. ELPI에 의한 디젤입자의 측정결과에 따르면  $dn/d\log(D_a) - \log(D_a)$ 분포의 표준편차는 대략 0.1이고, 이 값으로부터  $f_n = 2.5$ 로 결정했다.

본 실험에서 사용한 파장 635 nm와 780 nm에 있어서  $r_{sa} \cdot E(m)/F(m)$ 과  $n_p$ 의 관계를 Fig. 1에 나타내고 있다.  $r_{sa} \cdot E(m)/F(m)$ 의 값은  $n_p$ 의 증가와 함께 증가하고, 파장이 긴 쪽이 변화는 적다.

### 2.2 매연 응집체의 농도

매연의 질량농도  $C_s$ 는 매연의 밀도를  $\rho_s$ 라고 하면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있고, 식 (2)의 감쇠계수  $K_{ext}$ 는 식 (9)와 같이 바꾸어 쓸 수 있다.

$$C_s = \rho_s \cdot N_a \cdot \bar{n}_p \cdot \frac{\pi}{6} \cdot d_p^3 \quad (8)$$

$$K_{ext} = C_s \cdot \frac{6\pi \cdot E(m)}{\rho_s \cdot \lambda} \cdot (1 + r_{sa}) \quad (9)$$

비감쇠계수  $\alpha_{ext}$ 를 다음과 같이 정의하면, 식 (1)을

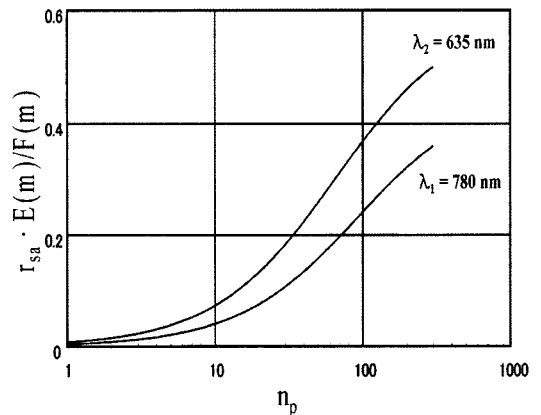


Fig. 1 Correlation between  $r_{sa} \cdot E(m)/F(m)$  and the number of primary soot particles forming the aggregates  $n_p$  as a parameter of wave length  $\lambda$

식 (10)과 같이 바꾸어 쓸 수 있다.

$$\sigma_{ext} = \frac{6\pi \cdot E(m)}{\rho_s \cdot \lambda} \cdot (1 + r_{sa}) \quad (10)$$

$$C_s = -\frac{1}{\sigma_{ext} \cdot \ell} \cdot \ln \tau \quad (11)$$

여기서 구해진 매연 질량농도  $C_s$ 는 측정 광통과 길이에 있어서 값이므로, 광통과 길이중의 배기온도  $T_e$ 를 사용하여 표준상태에 있어서 값으로 환산한다.

$$C_{SN} = \frac{T_N}{T_e} \cdot C_s \quad (12)$$

여기서  $T_N$ 은 표준상태에 있어서 온도 288 K이다.

저매연농도를 본 연구의 방법으로 측정하기에 필요한 광통과 길이, 선택파장, 광원의 변동 정확도 등을 단순화하기 위해 감쇠에 대해 Hottel과 Broughton의 반실험식을 이용하면 감쇠율  $\epsilon_x$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.<sup>10,11)</sup>

$$\epsilon_x = \frac{72\pi}{\rho_s} \cdot E(m) \cdot C_s \cdot \frac{1}{\lambda^{1.38}} \cdot \frac{T_N}{T_e} \cdot \ell \quad (13)$$

$r_{sa}$ 는 매연 응집체의 체적등가 직경에 대해서 정의한 입자파라미터( $\alpha = \pi \cdot D/\lambda$ )가 0.5에서는 약 5%이다. 일반적으로 관찰되는 디젤기관의 매연 응집체의 등가직경은 약 100 nm이고, 파장을 635 nm로 하면  $\alpha$ 는 0.5이다. 즉, Dobbins 등<sup>7)</sup>의 설에 의하면 산란의 영향은 파장 635 nm에 있어서 5% 정도 존재하게 된다. 한편, Köylü 등<sup>12)</sup>도 실험 데이터에 근거하여 응집체를 구성하는 요소매연 입자수에 대한  $r_{sa}$ 의 값을 정리하고 있다. 이것에 의하면 다환방향족계의 고리수가 많은 연료일수록 산란의 영향이 크고, n-파라핀계의 프로판에서는 그 영향이 가장 작다. 디젤기관에서 배출되는 매연의 전자현미경 사진에 의하면 요소매연의 직경은 35 nm 전후이고, 응집체의 직경은 100 nm 정도이다. 이 값을 사용하여 디젤기관으로부터의 매연 응집체의  $r_{sa}$ 를 추정하면 파장 635 nm에서는 6% ~ 14%가 된다. 이상과 같이 검토한 값으로부터  $r_{sa}$ 는 0.1 정도가 된다.

본 논문의 식 (10)에 있어서  $r_{sa}$ 항이 일정하다고 가정하면 비감쇠계수  $\sigma_{ext}$ 는 파장  $\lambda$ 에 있어서  $m$ 과

$\rho_s$ 값만으로 계산되는 정수가 된다. 실험에 있어서도 특정연료를 사용한 연소계의 경우에  $\sigma_{ext}$ 는 매연 응집체의 크기에 의존하지 않고 거의 일정하게 되는 것이 확인되었다.<sup>12)</sup> 따라서 매연의 질량농도  $C_s$ 는 응집체의 크기, 형상, 입자직경 분포 등이 미지수일지라도 투과율 측정 만으로부터 구할 수 있다.

매연 혹은 흑연의 복소굴절률(refractive index)  $m$ 에 대해서는 지금까지 많은 값들이 발표되고 있다.<sup>13)</sup> Yanzen<sup>14)</sup>은 75 nm의 흑연 미립자의 코로이드 용액을 사용해서 투과광 감쇠율을 측정하여 실측 투과율에 맞는 복소굴절률로서  $m = 2.0 - 1.0i$ 를 제안하였다. 또한 실측과 일치하기 위해서는 복소굴절률의  $k/n$ 는 약 0.5가 될 필요가 있다고 보고하였다. Pluchino 등<sup>15)</sup>은 직경 1.5  $\mu\text{m}$ 에서 8  $\mu\text{m}$ 의 흑연 미립자를 사용해서 산란광 강도분포를 측정하고, 실측값에 맞는 복소굴절률로서  $m = 1.7 - 0.8i$ 로 결정하였다. 또한, Menna 등<sup>16)</sup>은 메탄-공기의 과농 예혼합기 화염에 있어서 투과광 감쇠율을 측정하여 이론값이 실측값과 일치하기 위해서는  $m = 1.7 - 0.75i$ 가 적당하다고 보고하였다. Mulholland 등<sup>17)</sup>은 아세틸렌 또는 에틸렌의 예혼합 및 확산 화염의 배기흐름에 투과광 감쇠법을 적용하여 실측 투과율에 일치하는 이론 투과율을 구하기 위해서는 복소굴절률의 허수부는 0.8 정도로 할 필요가 있다고 보고하였다. 이들의 보고는 이전부터 사용되어 온 Dalzell 등<sup>18)</sup>의 복소굴절률 값  $m = 1.55 - 0.5i$ 는 화염이나 배기중의 매연 투과광 감쇠법에 적용하기에는 적절하지 않기 때문에, 허수부의 값을 보다 큰 값으로 할 필요가 있음을 시사하고 있다. 이러한 검토에 의해 본 연구에서는 Menna 등의  $m = 1.7 - 0.75i$ 를 이용하기로 했다. 매연의 밀도  $\rho_s$ 의 값은 1.8  $\text{g/cm}^3$ 를 사용했다.<sup>19)</sup>

파장  $\lambda = 635 \text{ nm}$ 에 있어서 식 (10)의  $r_{sa}$ 를 0.1로 가정하고, 여기서 결정한 매연밀도와 복소굴절률을 이용해서 파장 635 nm에 있어서 비감쇠계수  $\sigma_{ext}$ 를 계산하면 6.5가 된다.  $\sigma_{ext}$ 가 파장에 역비례하는 것을 고려하여 이 값을 Scherrer 등<sup>20)</sup>이 디젤기관에서 배출되는 매연에 대해서 측정한 파장 555 nm에 있어서 값으로 환산하면 7.4가 된다. 이 값은 그 들이 실측해서 얻은 평균값 7.9와 거의 일치한다. 그러나 위에서 검토한 것처럼 복소굴절률  $m$ 의 값은 불명확한

요소가 남아 있으므로, 앞으로 다른 방법에 의해 질량농도를 동시에 측정하여 본 방법의 신뢰성을 높일 필요가 있다.

### 2.3 매연 응집체의 등가직경

매연 응집체 질량농도의 측정에서는 식 (10)의  $r_{sa}$ 가 일정하다고 가정했다. 그러나 응집체의 크기를 측정하기 위해서는 Fig. 1에서 나타낸 것처럼  $r_{sa}$ 가  $n_p$ , 즉 응집체의 크기와 파장에 의존함을 이용한다.

2 개 파장  $\lambda_1$ 과  $\lambda_2$ 에 있어서 투과율을  $\tau_1$ 과  $\tau_2$ 로 하여 양자의 대수비를 취한다.

$$\frac{\ln \tau_1}{\ln \tau_2} = \frac{\sigma_{ext1}}{\sigma_{ext2}} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{1+r_{sa1}}{1+r_{sa2}} \quad (14)$$

앞에서 검토한 매연 응집체의 특성값을 이 식에 대입하면 우측항은  $n_p$ 의 함수가 된다. 매연 응집체의 체적등가 직경  $D_g$ 는 다음과 같은 식으로 정의한다.

$$D_g = (n_p)^{1/3} \cdot d_p \quad (15)$$

따라서 파장  $\lambda_1$ 과  $\lambda_2$ 에 있어서 투과율  $\tau_1$ 과  $\tau_2$ 를 측정하면 매연 응집체의 체적등가 직경을 알 수 있다.

Fig. 2에는 투과율의 대수비와 체적등가 직경과의 관계를 나타내고 있다. 그림으로부터 알 수 있는 것처럼 본 연구에서 선택한 파장의 조합에서는 체적등가 직경의 측정가능 동적 특성범위가 35 nm에서 180 nm이다. 가정된  $d_p$ 의 영향을 검토하기 하기 위하여  $d_p = 35 \pm 5$  nm의 경우에 대한 곡선도 나타내고 있다.

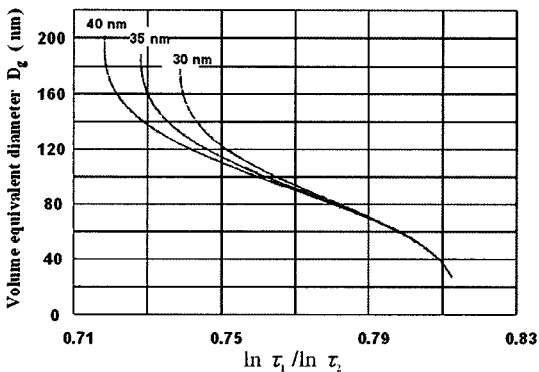


Fig. 2 Relationship between  $\ln \tau_1 / \ln \tau_2$  and the volume equivalent diameter  $D_g$  as a parameter of diameter of the primary soot  $d_p = 35 \pm 5$  nm

### 3. 측정장치

Fig. 3에는 측정장치의 개략도를 나타내고, Fig. 4에는 측정부의 상세도를 나타내고 있다. 배기 일부를 분류시켜 계측용 유로로 유도한다. 직경 21.6 mm, 길이 240 mm의 계측유로 양단에 레이저 광속을 입사시켜 출사시키기 위한 석영창(유효직경 5 mm)이 각각 설치되어 있다. 석영창에 매연이 부착하는 것을 방지하기 위하여 전체블록을 50 W 히터 4개에 의해 230°C로 가열하고 있다.

다이오드 레이저 1(파장 780 nm, 출력 5 mW)과 다이오드 레이저 2(파장 635 nm, 출력 6 mW)로부터 나온 2개 광속은 거울과 프리즘에 의해 동축화되어 입사 시준기(incident collimator)를 거쳐서 광섬유(optical fiber : 미쓰비시전선공업 FV952-400T-1, 내

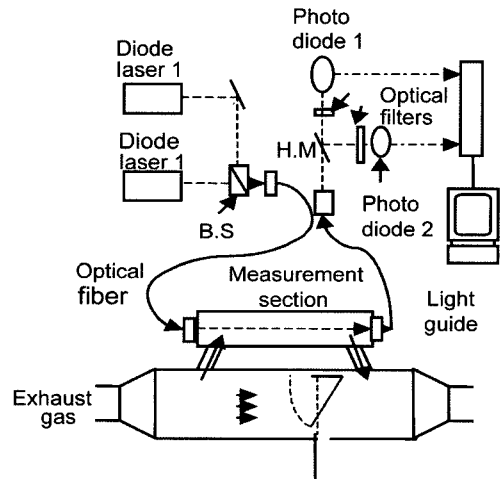


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

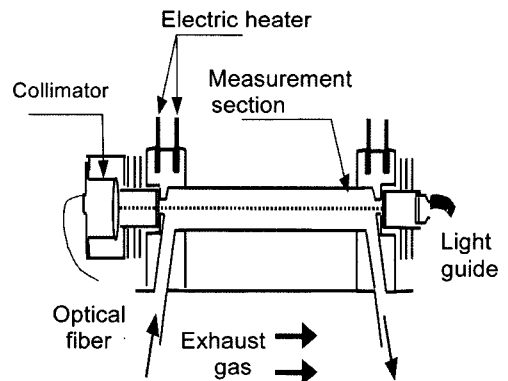


Fig. 4 Details of measurement section

경 400  $\mu\text{m}$ )로 들어간다. 출사 시준기(emanative collimator)로부터 나온 광속은 석영창으로부터 측정유로로 들어가 매연입자군에 의해서 감쇠된 후에 반대 방향에 있는 석영창을 투과하여 출사한다.

출사광속은 렌즈에 의해서 집광된 후에 심경 4 mm의 라이트가이드(light guide)를 통과하여 검출계로 유도된다. 라이트가이드의 다른 끝으로부터 나온 광은 광속 분리기(beam splitter)에서 2방향의 광속으로 분리된 후, 각각의 광속강도는 실리콘 포토다이오드(silicon photo diode : Hamamathu Photonics S2281)에 의해서 검출되어 증폭된 후에 디지털 오실로스코프(Yokogawa Denki DL716)에서 A/D 변환(12 bit)되어 저장된다.

K 열전대(소선직경 0.1 mm)에서 측정된 측정유로의 배기온도, 기관회전속도, 토크데이터도 동시에 디지털 오실로스코프에 저장되어 PC로 전송된다. PC에서는 2 파장의 투과율 대수비를 계산하여 사전에 입력한 Fig. 2의 곡선으로부터 매연 응집체의 체적등가 직경을 구한다. 또한,  $\tau_{10}$ 을 이용해서 식(11)과 (12)에 의해 매연 질량농도를 계산한다.

#### 4. 실험 결과 및 고찰

소형 직접분사식 디젤기관을 과도운전하여 배출된 매연의 체적등가 직경과 농도의 시간변화를 측정했다. 시험기관은 4사이클의 단기통인데, 보어 78 mm, 스트로크 62 mm, 배기량 296 cc, 연속정격출력 4.4 kW(Yanma L70A)이다. 부하와 기관속도를 변화시켜 기관배기포트 출구에서 1.5 m의 측정유로에 있어서 두 개 파장의 투과율을 측정했다.

Fig. 5에서 8가지에는 실험결과를 나타내고 있는데, Figs. 5 및 6에는 매연농도가 800  $\text{mg}/\text{m}^3$  수준의 경우이고, Figs. 7 및 8에는 100  $\text{mg}/\text{m}^3$  수준의 경우이다. Fig. 5의 상부 곡선은 투과율의 측정 데이터(raw data)이다. 전반에 보이는 투과광 강도가 평탄한 부분은 무부하 운전으로 무연의 상태이고, 이 수준을 투과율 100%로 간주했다. 부하를 걸기 직전에 레이저 광속을 폐색시켜 투과율 0%의 출력도 기록했다. 부하의 증가에 따라서 투과광 강도는 일단 저하하고, 그 후에 무부하로 되돌아 온 경우에 최초의 수준으로 복귀하고 있다. 이러한 결과로부터 운전중 광학유리의 더

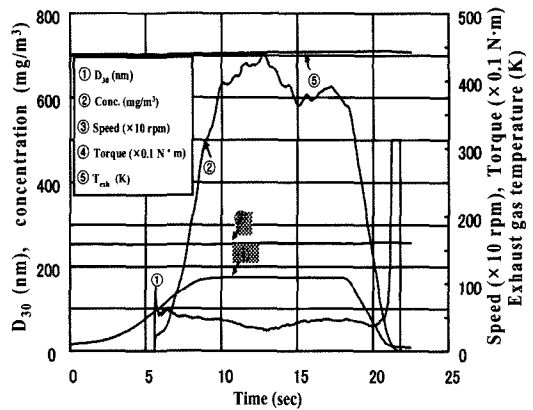
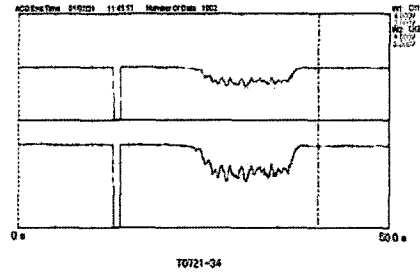
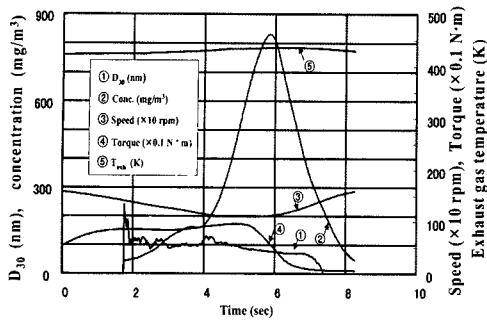


Fig. 5 Measured results of transmitted light(upper side),  $D_{30}$ , concentration, engine speed, torque and exhaust gas temperature  $T_{\text{ex}}$  as a function of time at high load condition

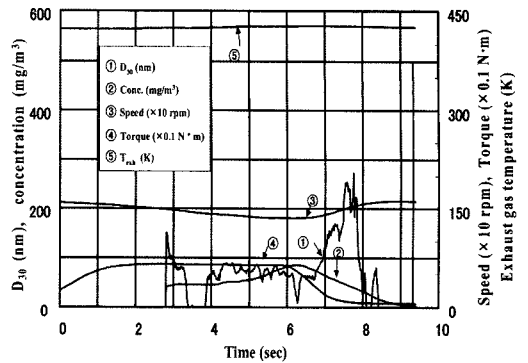
럽혀짐에 의한 영향이 없음을 알 수 있다.

Figs. 5 및 6에는 회전속도가 1000 rpm에서 1500 rpm 사이에서 부하를 변화시키면서 매연농도와 체적등가 직경의 시간변화의 관찰을 나타내고 있다. 배기온도는 소선직경 0.1 mm의 열전대에서 측정하고 있지만, 배기관이 보온되고, 측정블록이 일정한 온도 유지되고 있기 때문에, 온도는 450 ~ 460 K로 일정하게 되고 있다. 그런데 배기 매연농도의 시간변화가 토크의 시간변화보다도 1 ~ 2 초 정도 늦어지고 있다. 이것은 배기포트로부터 측정부까지 거리가 있고, 또한 Fig. 4의 배기유로 확대부에서 다중반사장치를 설치하여 10번 광속이 통과되었기 때문이다.

본 연구에서는 어떠한 결과를 관찰해도 체적등가 직경은 70 ~ 110 nm의 범위에서 변화하고 있다. 직경의 정의는 다르지만, 그 값은 ELPI나 SMPS에서 측정된 값과 유사한 값이다.<sup>21,22)</sup> 부하가 낮은 Figs. 7 및 8의 경우에 대해서도 직경은 크게 변화하



(a) A sample of typical data



(b) Another sample of typical data

Fig. 6 Measured results of  $D_{30}$ , concentration, engine speed, torque and exhaust gas temperature  $T_{\text{exh}}$  as a function of time at high load condition

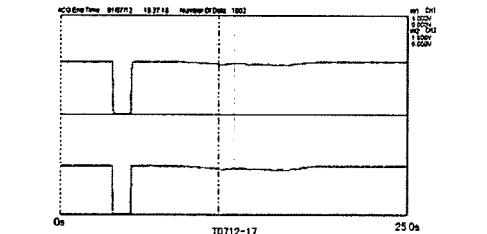


Fig. 7 Measured results of transmitted light (upper side),  $D_{30}$ , concentration, engine speed, torque and exhaust gas temperature  $T_{\text{exh}}$  as a function of time at low load condition

Fig. 8 Measured results of  $D_{30}$ , concentration, engine speed, torque and exhaust gas temperature  $T_{\text{exh}}$  as a function of time at low load condition

지 않고 있다. 매연농도가 증가하기 시작하는 상승점과 하강점에서 체적등가 직경이 커지는 경향이 관찰되었다. 한편, 역으로 작아지는 경우도 있다. 이것은 각각 그림의 측정 데이터에서 관찰할 수 있는 것처럼 신호에 포함되는 잡음과 투과율 변화의 정도가 비슷하게 되어 오차가 발생했기 때문이다. 그러나 본 연구에서 사용한 광원인 레이저 다이오드의 강도변동이 0.2 ~ 0.5%이고, 또한, 광통과 길이가 240 mm로 짧기 때문에, 매연농도가  $100 \text{ mg}/\text{m}^3$  정도 이하에서의 매연직경 측정에 대한 정확도가 충분하지는 않았다.

### 5. 결론

본 연구에서는 새롭게 제안한 방법에 의해 디젤 기관으로 부터 배출되는 매연 응집체의 농도와 체적등가 직경을 실시간으로 측정할 수 있음을 보여주었다. 그러나 측정의 신뢰성과 정확도를 향상시키기 위해서는 계속적으로 측정시스템을 검토하여 개량할 필요가 있다.

강화되고 있는 배기 배출물의 규제중, EURO-III 규제기관의 매연농도는  $10 \text{ mg}/\text{m}^3$  정도이고, EURO-IV 규제기관의 정도에서는  $1 \text{ mg}/\text{m}^3$ 이다. 따라서 본 연구의 방법에 의하면 감쇠율은 파장의 1.38승에 역비례하고, 광통과 길이에 비례하기 때문에, 이와 같은 저농도를 본 연구의 방법으로 측정하기 위해서는 원리적으로는 파장이 짧고, 광통과 길이를 길게 하여야 한다. 그러나 파장을 짧게 하면 측정할 수 있

는 증가체적 직경의 최대값이 작아지는 경향이 있으므로, 동적 특성범위의 면에서 파장은 길게 하여야 한다. 광통과 길이는 길수록 좋은데,  $1 \text{ mg/m}^3$  정도의 측정에는 약 1 m 이상이 바람직하다. 이 경우, 광원의 변동폭은 0.05% 이하가 요구된다.

## 후 기

본 연구는 대한민국 경상대학교 공학연구원 주관의 제13차 산학연공동기술개발컨소시엄 및 2단계 BK21 사업의 지원에 의해, 일본국 운수시설정비사업단 「운수분야의 기초적 연구추진제도」의 프로젝트 No. 2000-01과 일본기계학회 RC170 연구분과회 「간헐연소의 고도환경 적합화 및 기구해명」의 지원에 의해 수행된 국제공동연구임을 밝혀두며, 도움을 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

## References

- 1) I. Abdul-Khalek, D. Kittelson and F. Brear, "The Influence of Dilution Conditions on Diesel Exhaust Particle Size Distribution Measurements," SAE 1999-01-1142, 1999.
- 2) T. Kawai, Y. Iuchi, S. Nakamura, and K. Ishida, "Real Time Analysis of Particulate Matter by Flame Ionization Detection," SAE 980048, 1998.
- 3) D. R. Snelling, G. L. Smallwood, R. A. Sawchuk, W. S. Neill, D. Gareau, D. J. Clavel, F. Chippior, W. L. Liu, O. L. Gulder and W. D. Bachalo, "In Situ Real-Time Characterization of Particulate Emissions from a Diesel Engine Exhaust by Laser-Induced Incandescence," SAE 2000-01-1994, 2000.
- 4) S. Schraml, S. Will, A. Leipertz, T. Zens and A. D'Alfonso, "Performance Characteristics of TIRE-LII Soot Diagnostics in Exhaust Gases of Diesel Engines," SAE 2000-01-2002, 2000.
- 5) P. Witze, "Optical Diagnostics Developed for Real-time Measurement of Nano-size Particulate Matter," CRF News, Sandia National Laboratories, Vol.22, No.3, 2000.
- 6) R. A. Dobbins, R. J. Santoro and H. G. Semerjian, "Analysis of Light Scattering from Soot using Optical Cross Sections for Aggregates," 23rd Symposium (International) on Combustion/ The Combustion Institute, pp.1525-1532, 1990.
- 7) R. A. Dobbins, G. W. Mulholland and N. P. Bryner, "Comparison of a Fractal Smoke Optics Model with Light Extinction Measurements," Atmospheric Environment, Vol.28, No.5, pp.889-897, 1994.
- 8) R. Puri, T. F. Richardson, R. J. Santoro and R. A. Dobbins, "Aerosol Dynamic Processes of Soot Aggregates in a Laminar Ethane Diffusion Flame," Combustion and Flame, Vol.92, pp.320-333, 1993.
- 9) Y. Fujiwara and S. Fukazawa, "Growth and Combustion of Soot Particles in the Exhaust of Diesel Engines," SAE 800984, 1980.
- 10) M. W. Bae, "A Study on Soot Formation of Turbulent Premixed Propane Flames in a Constant-Volume Combustor at High Temperatures and High Pressures," Transactions of the KSAE, Vol.9. No.4, pp.1- 9, 2001.
- 11) M. W. Bae, C. H. Bae, S. K. Lee and S. W. Ahn, "Soot Yield of Turbulent Premixed Propane-Oxygen-Inert Gas Flames in a Constant-Volume Combustor at High Pressures," Int. J. Automotive Technology, Vol.7, No.4, pp.391-397, 2006.
- 12) U. O. Köylü and G. M. Faeth, "Structure of Overfire Soot in Buoyant Turbulent Diffusion Flames at Long Residence Times," Combustion and Flame, Vol.89, pp.140-156, 1992.
- 13) S. C. Lee and C. L. Tien, "Optical Constants of Soot in Hydrocarbon Flames," 18th Symposium on Combustion, pp.1159-1166, 1981.
- 14) J. Yanzen, "The Refractive Index of Colloidal Carbon," Journal of Colloid and Interface Science, Vol.69, No.3, pp.436-447, 1979.
- 15) B. Pluchino, S. S. Goldberg, J. M. Dowling and C. M. Randall, "Refractive Index Measurements of Single Micron-Sized Carbon Particles," Applied Optics, Vol.19, pp.3370-3372, 1980.
- 16) P. Menna and A. D'Alessio, "Light Scattering and Extinction Coefficients for Soot Forming Flames in the Wavelength Range from 0.2  $\mu\text{m}$  -



- 0.6  $\mu\text{m}$ ,” 19th Symposium on Combustion/ The Combustion Institute, pp.1421-1428, 1982.
- 17) G. W. Mulholland and M. Y. Choi, “Measurement of the Mass Specific Extinction Coefficient for Acetylene and Ethane Smoke Using the Large Agglomerate Optics Facility,” 27th Symposium on Combustion/The Combustion Institute, pp.1515 -1522, 1998.
  - 18) W. H. Dalzell and A. F. Sarofim, “Optical Constants of Soot and Their Application to Heat-Flux Calculations,” Transaction of ASME, pp.100-104, 1969.
  - 19) C. Park and J. P. Appleton, “Shock-Tube Measurements of Soot Oxidation Rates,” Combustion and Flame, Vol.20, pp.369-379, 1973.
  - 20) H. C. Scherrer, D. B. Kittelson and D. F. Dolan, “Light Absorption Measurement of Diesel Particulate Matter,” SAE 810181, 1981.
  - 21) Z. G. Liu, E. M. Thurow, R. Caldow and T. R. Johnson, “Transient Performance of Diesel Particulate Filters as Measured by an Engine Exhaust Particle Size Spectrometer,” SAE 2005-01-0185, 2005.
  - 22) L. Erkki, M. Pirita, O. Johanna, V. Kati and K. Jorma, “Sampling and Engine After- Treatment Effect On Diesel Exhaust Particle Size Distributions,” SAE 2005-01-0192, 2005.