

## 디젤기관차 엔진에서 배출되는 입자의 특성분석

### An Analysis of Characteristics of Particulate Matter Exhausted from Diesel Locomotive Engines

박 덕 신\* · 김 태 오<sup>1)</sup> · 김 동 술<sup>2)</sup>

한국철도기술연구원 철도환경·재료연구팀

<sup>1)</sup>금오공과대학교 토목, 환경 및 건축공학부, 대기환경 및 나노입자연구실

<sup>2)</sup>경희대학교 환경·응용화학대학 및 환경연구센터

(2002년 10월 2일 접수, 2002년 12월 17일 채택)

Duck-Shin Park\*, Tae-Oh Kim<sup>1)</sup> and Dong-Sool Kim<sup>2)</sup>

Environment & Materials Lab., Korea Railroad Research Institute

<sup>1)</sup>School of Architectural, Civil and Environmental Engineering,

Kumoh National Institute of Technology, <sup>2)</sup>College of Environment & Applied Chemistry & Institute of Environmental studies, Kyunghee University

(Received 2 October 2002, accepted 17 December 2002)

### Abstract

Numerous evidence have been reported that fine particulate matters can play an important role in threatening human health. Recently concerns on fine particle pollution from various engines may require re-examination of particulate emission standards. The particles emitted by most diesel engines are mainly divided into their size ranges such as  $D_p < 50$  nm and  $50 \text{ nm} < D_p < 1,000$  nm. In this work, the number concentration and the size distribution of fine particles emitted from an exhaust manifold of a railroad diesel engine were measured under load test conditions using a scanning mobility particle sizer (SMPS). The fine particles observed were within the range of 7 to 304 nm under different load conditions with two different dilution ratios. The fine particles exhibited unique patterns showing bimodal shapes in size distribution.

**Key words** : Diesel locomotive engine, SMPS, Particle size distribution, Dilution tunnel

### 1. 서 론

배출가스 중에 포함된 미세입자는 다양한 경로를 통해 환경에 영향을 미친다. 특히 디젤엔진에서 배

출되는 미세입자는 인체 위해성과 관련하여 중요성이 더욱 증대되고 있다(Kittelson, 1998). 최근의 연구경향은 미세입자가 인체에 미치는 영향을 밝히는 방향으로 진행되고 있으며, 미세입자의 농도보다는 입자의 크기가 인체의 위해성에 더 큰 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(Dockery *et al.*, 1993; Pope *et al.*, 1992).

\* Corresponding author

Tel : +82-(0)31-461-8531, E-mail : dspark@krii.re.kr

현재 내연기관에서 배출되는 입자의 경우 크기나 개수농도(number concentration)가 아닌 질량을 기준으로 규제하고 있으며, 지속적인 배출규제와 차량 엔진제작사들의 오염물질 저감노력으로 질소산화물, 일산화탄소 뿐만 아니라 입자상 오염물질의 배출량도 줄이는 결과를 가져왔다. 그러나 Johnson *et al.* (1996)은 입자상 오염물질의 배출량 저감이 오히려 미세입자의 개수농도를 증가시킬 수도 있다고 보고했다. 우리나라에서의 철도는 도로교통에 비해 수송분담율이 상대적으로 낮지만 2001년을 기준으로 1년 동안 824만 명을 수송하여 전체 여객 수송량의 약 6.2% (환경부, 2001)를 차지했다. 철도차량에는 안전성이 우수하고 연료효율과 인화점이 높다는 이유로 디젤엔진을 주로 장착하며, 국내에서 운행되고 있는 철도 디젤차량의 대부분은 디젤기관차(diesel locomotive)와 디젤동차(diesel rail car) 등으로 연간 약 3억 2천 리터의 경유를 소모하는 것으로 조사되었다.

미국 EPA에서는 비도로용(off-road) 엔진을 '12개월 동안 적어도 1회 이상 비도로에서 사용된 적이 있는 엔진'이라고 규정하고 있다(U.S. EPA, 1998). 최근 연구결과 비도로용으로 사용되고 있는 디젤엔진이 NO<sub>x</sub>와 입자상 오염물질 배출의 주요한 오염원으로 밝혀졌다. 국내외적으로 대기오염원 중 자동차나 트럭 등 도로용 차량에서 배출되는 오염물질에 대해서는 오래 전부터 관심을 기울여 왔지만, 디젤기관차, 선박 및 경작, 건설, 벌목, 채굴 장비 등을 포함하는 비도로용 이동오염원에 의한 오염물질 배출의 제어에 관해서는 논의가 거의 이루어진 적이 없었다. 최근 외국에서는 도로용 차량에 의한 오염물질 배출량 저감 노력이 한계에 부딪치면서 상대적으로 규제를 덜 받는 비도로용 차량에서의 오염물질 배출저감기술에 대해 관심이 고조되고 있다(Andrew *et al.*, 2000).

최근 미국 등 선진국들은 배출가스 규제대상을 기존의 도로용 차량에서 비도로용 차량까지 확대 적용하고 있으며, 우리나라에서도 이에 대한 대책마련을 서두르고 있다. 특히, 국제협약을 통해 비도로용 차량 중 선박, 항공기 등의 배출가스 규제방안이 마련되고 있고, 주요 엔진 제작사들도 국제적 배출가스규제에 대처하기 위한 자구책을 강구하고 있으나, 우리나라의 경우 이에 대한 전문적, 기술적 검토

가 미흡한 실정이다(정일록 등, 1999).

비도로용 디젤엔진 중 선박에서 배출되는 대기오염물질과 관련된 연구는 Lloyd's Register Engineering Services (1995)와 Cooper *et al.* (1996), Cooper *et al.* (2001)을 중심으로 꾸준히 이루어지고 있지만, 아직까지 국내외적으로 디젤 연료사용량을 근거로 한 디젤기관차에서의 대기오염물질 배출량 계산은 Andrew *et al.* (2000)의 연구를 제외하면 거의 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 철도 디젤차량 중 디젤기관차에서의 배출가스와 배출가스에 포함된 미세입자의 배출 특성 및 영향인자를 분석하였다. 도로용 엔진과는 달리 비도로용 엔진에 대해서는 연구가 미비하고, 오염물질 배출자료도 엔진 제작사가 제공하는 국한된 일부 자료에 의존하므로, 본 연구의 일차적 목표는 디젤기관차에서 배출되는 가스상 및 입자상물질에 대한 기초 특성자료를 제공하는 것이다.

## 2. 실험 및 방법

### 2.1 엔진

본 실험에서는 현재 우리나라에서 여객용으로 운영되고 있는 기관차 중 주력 차종인 7000호대 디젤기관차를 사용하였다. 이 디젤기관차는 그림 1에 나타난 바와 같이 디젤기관(diesel engine), 주 발전기(main generator), 견인전동기(traction motor), 대차 및 기타 부속설비로 구성되어 있다. 디젤기관차는 디젤엔진에서 발생한 원동력으로 주발전기를 구동하여 발전된 전원을 견인전동기에 공급하여 견인전동기로 하여금 동륜을 회전시키도록 설계된 기관차를 의미한다. 따라서 디젤기관차는 디젤자가발전장치를 구비한 전기기관차로도 볼 수 있다.

표 1에 7000호대 디젤기관차 엔진의 특징을 나타내었다. 7000호대 디젤기관차 엔진은 2사이클, 16벨크기관으로 아이들(idle) 모드에서 8노치(notch)까지 출력을 조절할 수 있고, 실린더의 크기는 230×254 mm (bore×stroke)로서 실린더 하나의 체적은 10,553 cm<sup>3</sup>, 압축비(compression ratio)는 14.5:1이다. 또한 견인동력은 엔진마다 다소 차이가 있지만 3,000±200 bhp (brake horse power)의 범위이다. 도로용 엔진의 경우에는 배출량을 주로 이동거리에

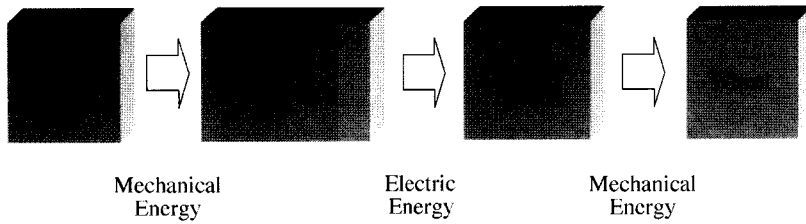


Fig. 1. Schematic diagram of power transmission for a diesel locomotive.

Table 1. Characteristics of the engine tested in this study.

Maker	EMD, GM	
Model	16-645E3	
Cylinder (mm) (bore × stroke)	230 × 254	
Cycle	2	
Compression Ratio	14.5 : 1	
Pulling Capacity (HP)	3,000	
RPM	Idle	315
	8 notch	900

Table 2. Power of the diesel locomotive engine during load tests.

Notch	Power (bhp)	Rated Power (%)
Idle	74.6	2.3
2	358.7	11.2
4	1057.1	33.0
6	1895.1	59.1
8	3205.7	100

따라 방출되는 오염물질의 양으로 표기하지만, 비도로용 엔진의 경우에는 제동력에 따른 오염물질 배출량으로 표기한다(Pollack and Lindhjem, 1997). 표 2는 실험에 사용된 디젤기관차의 부하시험시 엔진 출력을 나타내며, 8노치 최대 출력(100%)을 기준으로 아이들 모드에서는 2.3%, 2 노치에서는 11.2%, 4 노치에서는 33.0%, 6 노치에서는 59.1%로 측정되었다. 디젤기관차 엔진의 분당회전수(revolutions per minute, rpm)는 아이들 모드에서 315~390, 8 노치에서 900 rpm으로 나타났다. 그리고, 디젤기관차의 최고속도는 150 km/h이며, 차량의 크기는 대략 3,150 × 20,982 × 4,000 mm (W × D × H)이다.

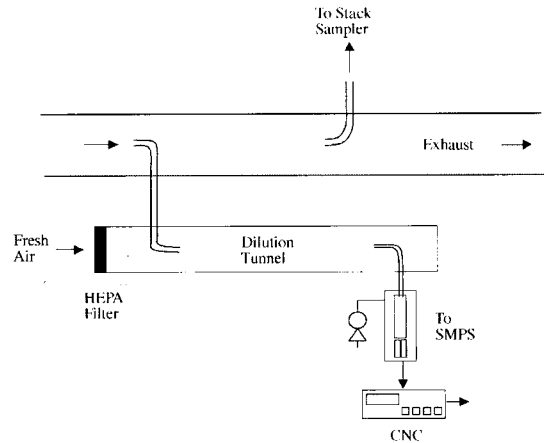


Fig. 2. The exhaust sampling and dilution system for this study.

### 2.2 회석 및 시료채취 시스템

배출가스 측정실험에서 디젤기관차의 출력 측정에는 통상 회전속도가 3000 rpm 이하의 낮은 범위에서 사용하는 전기동력계 (electric dynamometer)를 이용하였다. 이 전기동력계는 전기저항을 이용하여 엔진에서 발생한 동력을 발전기에서 전기에너지로 변환시켜, 이것을 저항기에서 소모시킬 때 전류와 전압 값을 측정하여 엔진의 출력을 구하게 된다. 그림 2에는 본 실험에서 사용된 장치를 나타내었다. 배출가스 측정장치는 디젤기관차의 배출구에 연결시켜 배출가스의 일부분을 흡입하여 측정하도록 구성하였으며, 배출구에서 방출되는 입자상 물질의 농도특성은 회석터널 (dilution tunnel)을 사용하여 입자크기 측정장비인 SMPS (scanning mobility particle sizer, TSI 3934)로 측정하였다. 또한 가스상 물질은 스택 샘플러 (stack sampler, Sensonic 5100)를 사용하

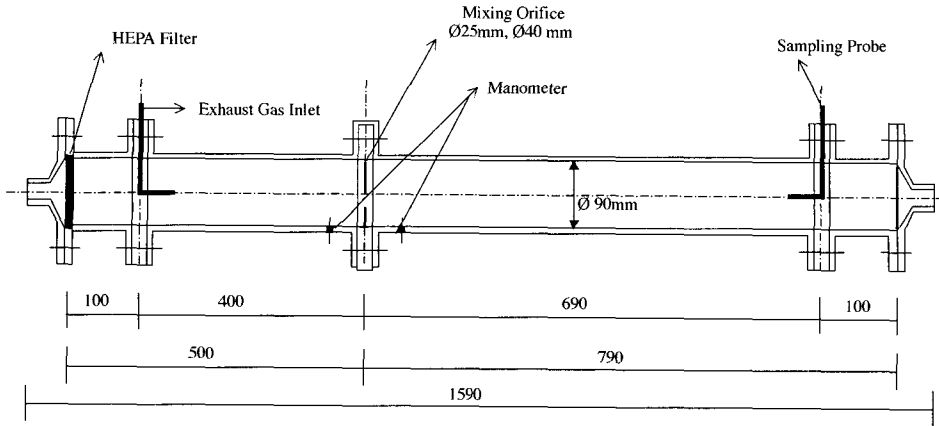


Fig. 3. A schematic dilution tunnel used in this study.

여 계측하였다.

그림 3은 본 실험에 사용한 희석터널을 나타낸 것이다. 희석터널은 미국 EPA의 희석터널법에 준하여 자체 제작하였고, 총 길이 1,590 mm, 내경 90 mm로 매끄러운 스테인레스 304 파이프를 사용하였다. 공기청정 필터는 내경 75 mm의 HEPA 급의 유리섬유(0.3 µm 이하 99.8% 채취) 필터를 여러 장 겹쳐 사용하였으며, 터널내부의 온도는 미국 EPA의 희석터널법에서 규정하고 있는 입자상물질 채취온도인 52°C 이하로 유지하였다. 또한 희석터널 중앙부에 혼합 오리피스(mixing orifice)를 설치하여 필터를 통하여 유입된 청정공기와 배출가스가 균일하게 혼합되도록 하였다. 이러한 희석터널 내에서의 청정공기와 배출가스의 혼합은 첫째, 희석된 배출가스를 시료채취 후 분석할 수 있는 온도점까지 냉각시키고, 둘째, 입자크기분포 측정장치를 이용하기에 적합한 농도로 낮추는 역할을 수행한다.

본 실험에서 광산란식 입자계수기(light scattering particle counter, RION KC-01B)를 이용하여 측정된 결과, 배출되는 입자의 대부분이 4 µm 이하인 것으로 조사되었다. 각종 연구에 의하면, 배출입자의 크기가 4 µm 이하일 경우 시료채취의 등속성(isokineticity) 여부가 측정결과에 큰 영향을 미치지 않는다고 보고되고 있는 바(Kittelson and Dolan, 1980; Lidia *et al.*, 1980), 본 연구에서는 희석터널 내의 등속흡인은 고려하지 않았다. 또한 희석비율은 희석전후의 NO<sub>x</sub> 농도를 계산하여 결정하였고, 희석비율을

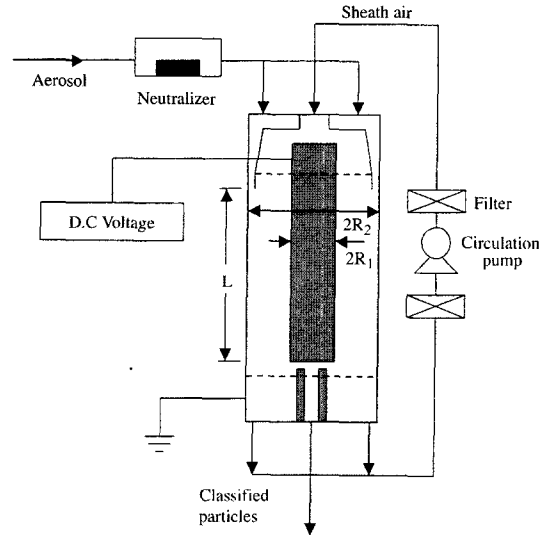


Fig. 4. A differential mobility analyzer used in this study.

조절하여 희석에 따른 영향을 파악하였다.

### 2.3 SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer)

본 실험에 사용된 SMPS는 그림 4에 나타낸 DMA(differential mobility analyzer, TSI 3071A)와 CPC(condensation particle counter, TSI 3025A)로 구성되어 있다.

#### 2.3.1 DMA (Differential Mobility Analyzer)

그림 4는 본 실험에서 사용된 DMA의 개략도를

도식한 것이다. DMA는 다분산입자 (polydisperse particle)로부터 단분산입자 (monodisperse particle)를 분류 (classification)하는 장치로서 DMA의 작동조건은 에어로졸 유량 1.0lpm, 순환가스유량 10.0lpm으로 고정하여 사용하였다.

2. 3. 2 CPC (Condensation Particle Counter)

DMA로 분류된 단분산 입자의 개수농도 측정을 위하여 CPC를 사용하였다. 응축핵법은 입경이 약 0.2µm 이하의 초미립자를 광학적 방법으로 측정할 수 있도록, 증기를 측정대상이 되는 입자의 주위에 응축시켜 수 µm 정도의 크기까지 성장시키는 방법이다. CPC는 응축핵법의 대표적인 장치로 기상 중에 부유하는 미립자의 농도측정장치로서, 각종 에어로졸 연구에서 널리 이용되고 있다. 또한 이것은 CNC (condensation nucleus counter)라고도 불려진다. 본 실험에 사용된 CPC는 전도냉각형으로서 유량 300 cm<sup>3</sup>/min으로 채취된 입자를 함유한 가스의 일부 (30 cm<sup>3</sup>/min)는 직접 응축관으로 유입되고, 나머지 (270 cm<sup>3</sup>/min)는 HEPA 필터에 의해 입자가 제거된 후 n-부탄올 (C<sub>4</sub>H<sub>9</sub>OH) 증기로 포화되어 응축관으로 유입된다. 응축관에 유입된 입자는 응축관의 중심부분을 축방향을 따라 흐르면서 응축되기 때문에 입자의 핵화 효율이 높게 되고 확산침착에 의한 손실도 작아진다.

2. 4 실험방법

디젤기관차 엔진에 대한 배출가스 측정은 SAE procedure J177의 규정을 따랐으며 측정절차는 다음과 같다. ① 엔진을 구동하고 워밍업을 한다. 정격속도 (rated speed)와 부하에서 최소 10분간 혹은, 모든 온도와 압력이 평형상태에 도달하면 워밍업을 완료한다. ② 엔진을 각 모드에서 최소 20분간 작동한다. 즉, 엔진이 안정화되어 배출물질이 일정하게 배출되는데 소요되는 시간이 최소 10분, 배출물의 측정에 소요되는 시간이 최소 5분간이다. ③ 각 성분들에 대한 평균 기록지 출력값과 보정곡선 (calibration curve)으로부터 각 모드에 대한 CO, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, HC의 기록지의 마지막 3분 동안의 자료를 평균하고 기록한다.

가스상물질과 입자상물질의 배출특성은 디젤기관차 엔진의 출력을 아이들 (2.3%)에서 2 노치 (11.2

%), 4 노치 (33%), 6 노치 (59.1%), 8 노치 (100%)까지 단계별로 증가시키면서 측정하였다. 그리고 배출입자의 크기분포와 농도 측정은 한 시료에 대해 90초씩 총 3회 계측하였고, 동일한 시간에 배출가스 측정도 수행하여 실시간으로 컴퓨터에 입력하였다.

3. 결 과

3. 1 배출가스의 조성

디젤기관차 엔진의 배출가스 조성을 파악하기 위해서 배출구에 별도의 보조굴뚝을 설치하고, 스택샘플러로 희석되지 않은 배출가스를 채취하였다. 스택샘플러에는 센서가 내장되어 있으며, 자체 내장된 센서의 전기화학적 작용으로 각 가스 성분의 농도를 분석할 수 있다. 엔진은 워밍업이 끝난 후 정상상태에서 측정을 시작했으며, 아이들 모드에서 엔진의 출력은 최대출력의 2.3%, 분당회전수는 315

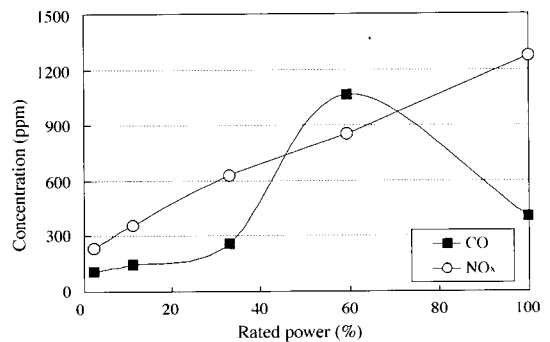
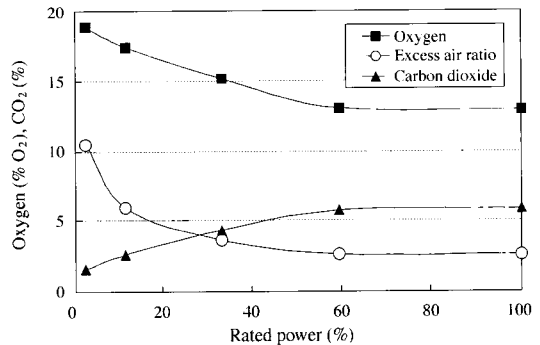


Fig. 5. Relationships between engine power applied and gas compositions from engine exhausts.

Table 3. Characteristics of exhaust gases for various engine loads.

Load (%)	Items	Temp (°C)	O <sub>2</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	Gas concentration (ppm)				Efficiency (%)	$\lambda$ <sup>1)</sup>
					CO	NO	NO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>		
2.3 (idle)		101	18.9	1.5	110	201	33	234	72.4	10.45
11.2 (2 notch)		174	17.4	2.6	147	329	30	359	69.1	5.94
33.0 (4 notch)		268	15.2	4.3	257	610	20	630	69.0	3.62
59.1 (6 notch)		362	13.1	5.8	1069	839	18	857	67.7	2.66
100 (8 notch)		371	13.0	5.9	412	1150	32	1282	67.5	2.62

<sup>1)</sup>  $\lambda$  : excess air ratio

rpm이었다. 디젤기관차 배출가스의 측정결과를 표 3과 그림 5에 나타내었다. 배출가스 온도(°C)는 엔진출력이 최대출력의 2.3%에서 101°C이었으나, 엔진출력이 증가함에 따라 최대출력의 59.1%에서 362°C, 최대출력인 8 노치에서 371°C로 측정되었다. 산소농도(%)는 아이들 모드에서 18.9%, 최대출력의 59.1%에서 13.1%로 최소 값을 보인 후 최대출력에서는 13.0%로 나타났다.

CO<sub>2</sub>(%)의 농도는 아이들 모드에서 1.5%를 보인 후 점차 증가하여 최대출력에서 5.9%로 나타났다. 또한 CO (ppm) 농도의 경우 일반적으로 공연비가 적을수록 CO 농도가 증가한다고 알려져 있지만(구자에 등, 1996), 본 실험에서는 엔진출력이 최대출력의 2.3%에서 110 ppm을 나타낸 후 59.1%에서 최대 값인 1,069 ppm이었으며, 최대출력에서는 412 ppm으로 급격히 감소하는 경향을 나타냈다. 이러한 현상을 정확히 규명하기 위해서는 여러 변수들에 대한 검토가 필요하지만, 현재까지의 실험결과로는 디젤기관차 특성상 터보 과급기(turbo charger)가 작동되어 측정결과에 영향을 미친 것으로 사료된다. 과급기는 제한된 실린더 용적에서 더 큰 출력을 얻기 위해서 연료 공급량을 증대시키고, 이에 상응하는 소요공기량을 증대시키기 위해 급기 밀도를 대기압 이상으로 가압하여 공급하는 장치를 말한다(형설출판사, 1991). 디젤기관차 배출가스는 일반적으로 약 1,000°F(538°C)의 높은 열과 14 psi 가량의 압력을 지니고 있어 가스 터빈을 구동할 만한 에너지를 보유하고 있다. 정격 부하에서 이 배출가스를 터빈 휠에 공급하여 공기압축기를 구동하면 출력 증가, 공기역과기 저항 감소, 고지대에서의 공기 밀도 저하 등에 대처할 만큼 다량의 공기를 생산한다(윤세택, 1984). 과급을 하지 않는 일반 엔진에서는 부하가

증가할수록 공연비가 점차 감소하고, 공연비의 감소에 따라 입자의 배출이 증가하는 경향을 보이지만 터보 과급기에 의해 공기가 추가 공급될 경우 입자 배출 역시 줄어드는 현상이 나타난다(Burscher *et al.*, 1998)고 보고된 바 있다.

NO<sub>x</sub>는 공연비가 거의 양론적(stoichiometric)이고, 온도가 높을 때 형성된다. 다른 인자들이 일정하다면 연소효율이 좋을수록 NO<sub>x</sub>가 많이 생성된다(Janet, 2001). NO<sub>x</sub>의 배출은 분사시기를 늦추거나 폭발시점을 최적화하여 감소시킬 수 있다(Heywood, 1988). NO<sub>x</sub>의 농도(ppm)는 엔진출력이 최대출력의 2.3%에서 234 ppm, 최대출력에서 1,182 ppm으로 엔진출력이 증가하고 배기가스 온도가 상승함에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 연소효율(%)은 최대출력의 2.3%에서 72.4%, 최대출력에서 67.5%로 출력이 증가할수록 점차 감소하는 것으로 나타났다. 과잉공기비(excess air ratio,  $\lambda$ )는 입자의 농도 분포에 큰 영향을 미치는 것으로 보고되었으며(Kittelson, 1998), 측정결과 엔진출력이 최대출력의 2.3%에서 10.45였으나 산소농도의 감소와 함께 점차 감소하여 엔진출력이 최대출력의 59.1%에서 2.66, 최대출력에서 2.62로 나타났다.

### 3. 2 입자크기의 분포특성

그림 6에 디젤기관차 엔진이 저 부하에서 운전될 때 배출되는 입자의 대표적인 크기분포를 나타내었다. 디젤엔진 배기 중 배출되는 입자의 공기역학적 직경이 1  $\mu$ m 이하인 것이 86 $\pm$ 5% w/w(Williams, 1989), 87%(Hare and Baines, 1979)이었으며, 대부분이 2  $\mu$ m 이하인 것으로 보고된 바 있다(Gabele *et al.*, 1986). Lidia *et al.* (1998)와 Ristovski *et al.* (2000)의 연구에서는 디젤엔진에서 배출되는 입자의 대부

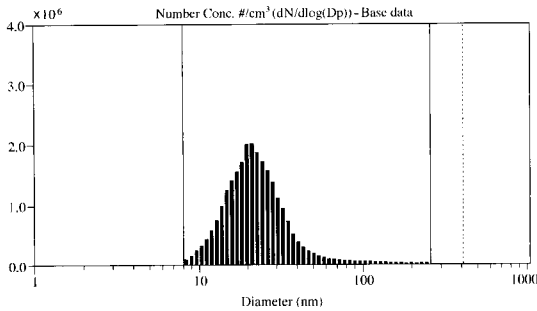


Fig. 6. A typical size distribution of fine particles from a diesel locomotive engine measured by SMPS.

본이 SMPS의 측정범위 (0.007~0.304 μm)에 있으며, APS (aerodynamic particle sizer)로 측정되는 범위 (0.5~20 μm)에서의 입자배출은 평균 청정대기농도와 비슷한 수준인 2 particles/cm<sup>3</sup> 이하로 매우 낮은 것으로 보고되었다. 본 연구에서는 전술한 것처럼 광산란식 입자계수기 측정결과 4 μm 이상의 입자가 존재하지 않는다는 점을 고려하고, 본 연구의 주목적이 철도 디젤차량에서의 미세입자 배출특성과 영향인자를 파악하는 것인만큼, 조대입자 (coarse particle)의 측정은 제외하였다. 본 실험에서 SMPS로 측정된 측정값은 입자의 개수 중앙입경값 (count median diameter), 총 개수농도 (total number concentration) 및 총 부피농도 (total volume concentration)로 각각 나타내었다.

표 4 및 그림 7~13에는 배출입자의 엔진 부하변화에 따른 개수 중앙입경값, 기하평균입경 (geometric mean diameter), 총 개수농도 및 총 부피농도를 나타내었다. 그림 7에 제시한 것처럼 출력에 따른 중앙입경값의 범위는 희석비 3.32에서 26.6~93.5 nm의 범위로 조사되었다. 최대출력대비 2.3%에서 26.5 nm를 보인 후 출력의 상승에 따라 점차 증가하여 최대출력대비 59.1%에서 최고 중앙값 93.5 nm를 나타냈고, 최대출력에서는 89.9 nm로 감소하였다. 또한 희석비 13.34에서도 거의 유사한 결과를 보였다. 저부하 (low load)에서는 희석비가 높을 경우 중앙입경값이 다소 컸으나, 고부하에서는 비슷하거나 오히려 반대되는 경향을 나타냈다. 본 실험에서 측정된 디젤기관차 엔진의 출력대비 중앙입경값의 범위는 26.5~93.5 nm로서 대형버스의 아이들

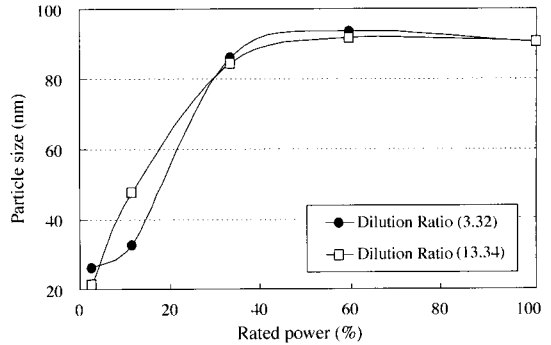


Fig. 7. Distribution of count median diameters according to various engine load conditions.

Table 4. Particle size statistics for various engine powers (%) applied in this study.

	Dilution Ratio 3.32	Dilution Ratio 13.34
<b>At 2.3%</b>		
Power (bhp)	74.6	74.6
CMD (nm)	26.5	21.6
Geo. standard deviation	1.66	1.61
Total number concentration (#/cm <sup>3</sup> )	4.53E05	7.96E05
Total volume concentration (μm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	4.13E01	4.01E01
<b>At 11.2%</b>		
Power (bhp)	358.7	358.7
CMD (nm)	32.8	47.6
Geo. standard deviation	1.92	1.73
Total number concentration (#/cm <sup>3</sup> )	2.45E06	1.97E06
Total volume concentration (μm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	5.74E02	6.53E02
<b>At 33.0%</b>		
Power (bhp)	1057.1	1057.1
CMD (nm)	86.1	84.4
Geo. standard deviation	1.53	1.5
Total number concentration (#/cm <sup>3</sup> )	5.34E06	3.68E06
Total volume concentration (μm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	3.67E03	2.51E03
<b>At 59.1%</b>		
Power (bhp)	1895.1	1895.1
CMD (nm)	93.5	91.8
Geo. standard deviation	1.49	1.54
Total number concentration (#/cm <sup>3</sup> )	5.60E06	3.75E06
Total volume concentration (μm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	4.59E03	2.96E03
<b>At 100%</b>		
Power (bhp)	3205.7	3205.7
CMD (nm)	89.9	90.4
Geo. standard deviation	1.51	1.55
Total number concentration (#/cm <sup>3</sup> )	5.23E06	3.06E06
Total volume concentration (μm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	3.96E03	2.37E03

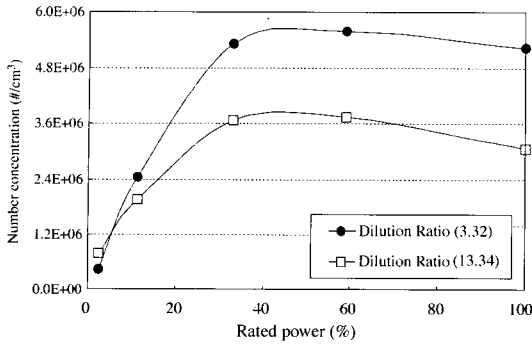


Fig. 8. Total number concentration according to various engine load conditions.

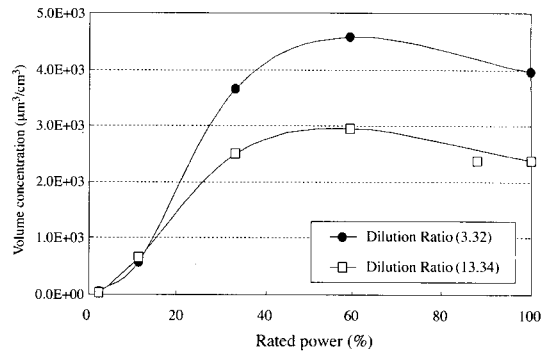


Fig. 9. Total volume concentrations according to various engine load conditions.

모드와 최대출력에서의 측정값인 63~68 nm (Lidia *et al.*, 1998)의 결과와는 다른 크기범위를 나타냈다. 터보 과급기가 장착되지 않은 일반 엔진에서는 부하가 올라가면 그에 상응하여 공연비가 낮아지고, 연소조건이 농후해지며 엔진에서 배출되는 입자의 중앙입경값이 출력에 비례하여 점차 증가하는 것으로 보고된 바 있다 (Burscher *et al.*, 1998). 본 실험에서는 그림 7에서와 같이 출력이 증가함에 따라 중앙입경값이 점차 증가하다가 최대출력의 59.1% 부근에서 더 이상 증가하지 않다가 최대출력에서는 오히려 감소하는 것으로 나타났다. 이런 결과는 여러 가지 환경조건 때문이겠지만 그 중 터보 과급기와 같은 디젤기관차의 엔진특성이 측정결과에 영향을 미쳐서 대형버스와는 다소 다른 결과를 나타낸 것으로 사료되며, 디젤기관차의 터보 과급기는 일반적으로 정격부하의 75%에서 정상적으로 동작한다 (윤세택, 1984).

그림 8에 엔진부하 차이에 따른 입자개수농도의 변화를 나타내었다. 입자개수농도는 희석비 3.32에서  $4.53 \times 10^5 \sim 5.60 \times 10^6$  particles/cm<sup>3</sup>, 13.34에서는  $7.96 \times 10^5 \sim 3.75 \times 10^6$  particles/cm<sup>3</sup>의 범위를 보였으며, 희석비가 낮을 경우 입자 개수농도가 높게 나타나는 경향을 보였다. 농도분포는 엔진 최대출력대비 2.3%에서  $4.53 \times 10^6$  particles/cm<sup>3</sup>, 33.0%에서  $5.34 \times 10^6$  particles/cm<sup>3</sup>으로 증가한 후 59.1%에서는 33.0%와 별다른 차이를 보이지 않았으며, 최대출력에서는  $5.23 \times 10^6$  particles/cm<sup>3</sup>으로 중앙입경값과 유사한 경향을 보이며 감소했다. 그림 9는 총 부피농도를 나

타낸 것으로, 희석비 3.32, 13.34에서 각각  $4.13 \times 10 \sim 4.59 \times 10^3$  µm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,  $4.01 \times 10 \sim 2.96 \times 10^3$  µm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>의 농도범위를 보였다. 희석비에 따른 입자부피농도는 희석비 3.32, 엔진출력 59.1%에서  $1.63 \times 10^3$  µm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>로 가장 크게 나타났고, 농도분포도 개수농도와 유사한 경향을 나타냈다. 본 실험을 통해 엔진에서 배출되는 입자개수농도의 대부분은 나노입자의 범위인  $D_p < 50$  nm인데 반해, 축적모드 (accumulation mode)의 범위인  $50 \text{ nm} < D_p < 1,000 \text{ nm}$ 에서는 중앙입경값이 증가해서 입자의 질량농도는 증가하지만 입자의 개수농도는 감소한다는 Kittelson (1998)의 결과와 유사한 결론을 얻었다.

그림 10과 그림 11은 희석비 3.32에서 SMPS로 측정된 엔진출력 변화에 따른 입자의 개수농도와 부피농도의 크기분포를 나타냈다. 모든 크기분포는 비슷한 형태를 하고 있으며, 축적모드 (accumulation mode)와 핵모드 (nuclei mode)를 형성하는 쌍극 (bimodal) 형태를 나타내고 있다 (Kittelson, 1998). 그림에서 보는 바와 같이 엔진출력 2.3~11.2%와 33.0~100%는 다른 입경분포 형태를 보이고 있다. 이것은 엔진출력이 증가하면서 엔진출력 2.3~11.2%에서는 중앙입경값이 핵모드 범위에 있지만, 엔진출력 33.0~100%에서는 중앙입경값이 축적모드로 이동하면서 농도분포 경향이 변화한 것으로 판단된다. 이는 디젤기관차의 배출특성 중 부하율 이외의 다른 요인에 기인한다고 보여진다. 디젤엔진에서 배출된 입자의 측정은 배출가스를 희석시켜 채취하므로 이 과정에서 입자의 핵생성, 흡착 및 탈착, 응집,



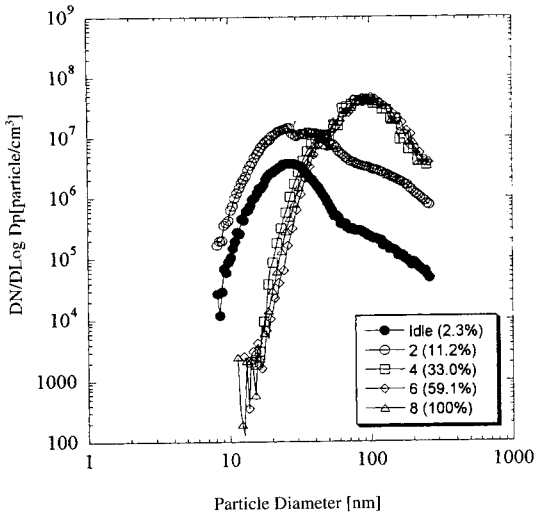


Fig. 10. Changes in number size distributions of generated particles from diesel locomotive engine with various loading conditions. (dilution ratio : 3.32, loading conditions : idle (2.3%), 2 (11.2%), 4 (33%), 6 (59.1%), 8 notch (100%))

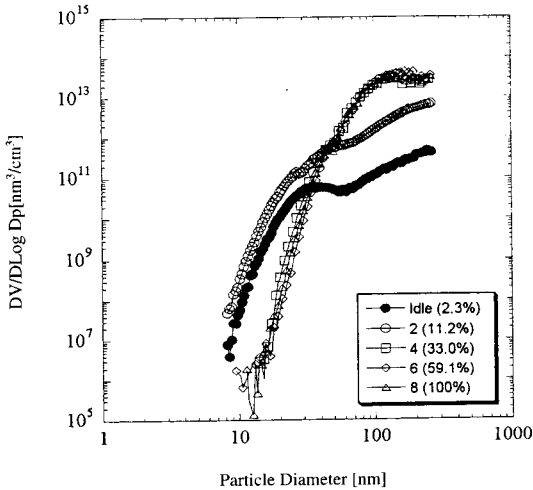


Fig. 11. Changes in volume size distributions of generated particles from a diesel locomotive engine with various loading conditions. (dilution ratio : 3.32, loading conditions : idle (2.3%), 2 (11.2%), 4 (33%), 6 (59.1%), 8 notch (100%))

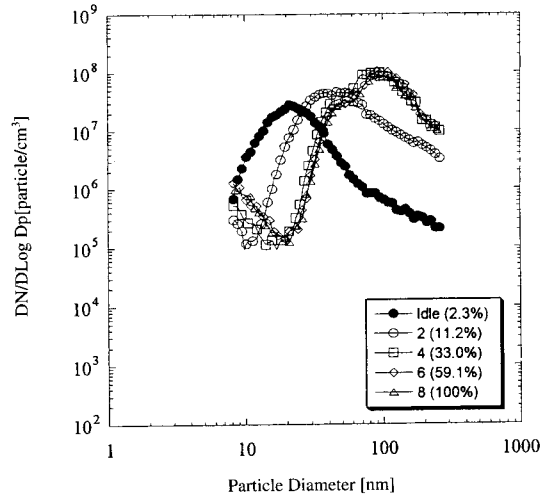


Fig. 12. Changes in number weighted size distributions of generated particles from a diesel locomotive engine with various loading conditions. (dilution ratio : 13.34, loading conditions : idle (2.3%), 2 (11.2%), 4 (33%), 6 (59.1%), 8 notch (100%))

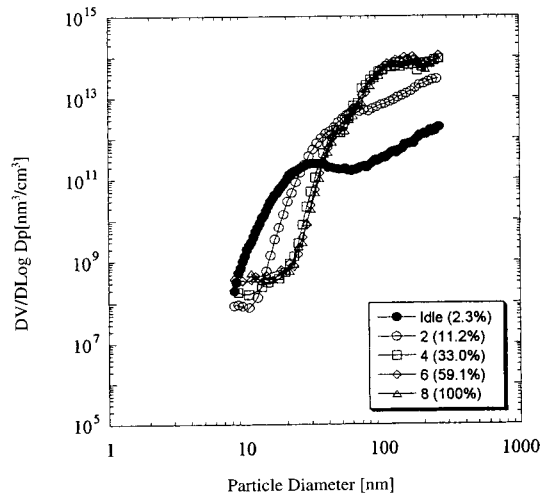


Fig. 13. Changes in volume weighted size distributions of generated particles from a diesel locomotive engine with various loading conditions. (dilution ratio : 13.34, loading conditions : idle (2.3%), 2 (11.2%), 4 (33%), 6 (59.1%), 8 notch (100%))

증발 등 여러 형태의 변화가 일어날 수 있다. 특히 이 현상은 미세입자의 입경분포 변화에 큰 영향을

미칠 것으로 사료되어 측정상의 주의가 요구된다. Kittelson *et al.* (1990)은 희석비가 달라지면 입자농

도와 중앙입경값도 변할 수 있으며 희석터널내 체류시간도 측정결과에 영향을 미칠 수 있다고 보고한 바 있다. 그림 12와 그림 13에 희석비 13.34에서의 측정 결과를 나타내었다. 분포특성은 그림 10과 그림 11의 결과와 유사한 경향을 보였으나, 그림 12에서의 엔진출력의 변화에 따른 중앙입경값의 변화 경향은 희석비 3.32에서의 결과보다 더욱 뚜렷한 변화추이를 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구는 디젤기관차를 실험대상으로 하여, 전기동력계를 이용한 부하시험에서 엔진의 출력을 변화시켜 배출되는 가스상물질과 입자상물질의 배출특성을 파악하였다. 즉, 디젤기관차의 출력을 최대출력 대비 2.3%, 11.2%, 33.0%, 59.1%, 100%로 증가시키면서 스택 샘플러를 이용해 가스상 물질의 배출특성을 분석하였고, SMPS를 이용해 입자상 물질의 배출특성을 분석하였다. 측정결과 가스상 물질의 경우 일반적인 디젤엔진에서의 배출특성과 다소 차이를 보이는 것으로 나타났으며, 이것은 여러 가지 환경조건중 터보 과급기와 같은 디젤기관차의 엔진특성이 측정결과에 영향을 미친 것으로 사료된다.

입자배출특성을 파악하기 위해 SMPS를 이용해서 엔진출력의 변화에 따른 배출입자의 개수 중앙입경값, 기하평균입경, 총 개수농도 및 총 부피농도 등을 구하였다. 희석터널에서의 희석비는 측정 전·후의 NO<sub>x</sub> 농도로 구했다. 희석비 3.32, 13.34에서의 입자배출특성을 측정한 바, 중앙입경값은 모든 희석비에서 유사한 경향을 보였고, 21.6~93.5 nm의 범위내에 존재하였으며, Lidia *et al.* (1998)의 대형버스에서의 측정결과인 63~68 nm와 상이한 경향을 보였다. 입자개수농도는 희석비 3.32, 13.34에서 각각  $4.53 \times 10^5 \sim 5.60 \times 10^6$  particles/cm<sup>3</sup>,  $7.96 \times 10^5 \sim 3.75 \times 10^6$  particles/cm<sup>3</sup>의 범위로 측정되어 희석비가 낮을 경우 입자 개수농도가 높게 나타남을 알 수 있었다. 각 희석비에서 입자의 크기분포는 비슷한 형태를 하고 있으며, 축적모드와 핵모드를 갖는 쌍극 형태를 나타내고 있었다. 엔진출력이 증가하면서 엔진출력 2.3~11.2%에서는 개수 중앙입경값이 핵모드 범위에 있었지만, 엔진출력 33.0~100%에서는

개수 중앙입경값이 축적모드로 이동하면서 농도분포 경향이 변화하였다.

#### 참 고 문 헌

- 구자에, 노수영, 배충식, 정경석, 황상순 공역 (1996) 내연기관, 회중당, 86-90.
- 윤세택 (1984) 최신 디젤전기관차, 정문사문화주식회사, 112-114.
- 정일록, 엄명도, 류정호, 임철수 (1999) 비도로용 건설기계의 오염물질 배출량 산정에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 15(3), 317-325.
- 철도청 (1996) 디젤전기관차 검수지침서 (1).
- 형설출판사 (1991) 내연기관, 형설출판사, 325-342.
- 환경부 (2001) 환경통계연감 (제13호).
- Andrew, J.K., R.F. Sawyer, and R.A. Harley (2000) A fuel based assessment of off-road diesel engine emissions, J. Air & Waste Manage. Assoc. 50, 1929-1939.
- Burtscher, H., S. Kunzel, and C. Huglin (1998) Characterization of Particles in Combustion Engine Exhaust, J. Aerosol Sci., 29, 389-396.
- Carnovale, F., P. Alviano, C. Carvalho, G. Deitch, S. Jiang, D. Macaulay, and M. Summers (1992) Air emissions inventory for the Port Phillip Control Region, Clean Air, 26, 134-141.
- Cooper, D.A., K. Peterson, and D. Simpson (1996) Hydrocarbon, PAH and PCB emission from ferries: A Case Study in the Skagerak-Kattegatt-Oresund Region, Atmospheric Environment, 30(14), 2463-2473.
- Cooper, D.A. (2001) Exhaust emissions from high speed passenger ferries, Atmospheric Environment, 35, 4189-4200.
- Dockery, D., C. Pope, and X. Xu (1993) An association between air pollution and mortality in six US cities New England, J. Med., 329(24), 1753-1759.
- Gabele, P., W. Karches, W. Ray, and N. Perry (1986) Emissions from a light-duty diesel: Ambient temperature and fuel effects. SAE Paper 860618.
- Hare, C.T. and T.M. Baner (1979) Characterization of particulate and gaseous emission from two diesel automobiles as functions of fuel-driving cycle, SAE Paper 790424.
- Heywood, J.B. (1988) *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill: New York.

- ICRP (1984) Task Group Model, Ann. Am. Conf. Ind. Hyg., 11.
- Janet, Y., L.M. Robert, and S.G. Michael (2000) In-use emissions from heavy-duty diesel vehicles, Environ. Sci. Technol., 34(5) 729-740.
- Johnson, J. and K. Baumgard (1996) The Effect of the fuel and engine design on diesel exhaust particle size distributions, SAE Paper, 960131.
- Kittelson, D.B. and D.F. Dolan (1990) *Diesel Exhaust Aerosol. In Generation of Aerosol and Facilities for Exposure Experiments*, Willeke, K. (ed.), Ann Arbor Science Publishers, Michigan, 337-359.
- Kittelson, D.B. (1998) Engines and nanoparticles, J. Aerosol Sci., 29, 575-585.
- Lidia, M., D.B. Neville, K. Ladislav, and N. Altwell (1998) Submicrometer and supermicrometer particles from diesel vehicle emissions, Environ. Sci. and Tech., 32(14), 2033-2042.
- Lloyd's Register Engineering Services (1993) Marine Exhaust Emissions Research Programme, London, England.
- Nonroad Engine Population Estimates (1998) Report No. NR-006a; Office of Mobile Sources, U.S. Environmental Protection Agency: Ann Arbor, MI.
- Pollack, A.K. and C.E. Lindhjem (1997) NONROAD MOBILE Emission Modelling; ENVIRON International Corporation, NOVATO, CA, and Office of Mobile Sources, U.S. Environmental Protection Agency: Ann Arbor, MI.
- Pope, C., J. Schwartz, and M. Ransom (1992) Daily mortality and PM10 pollution in Utah Valley, Arch. Environ. Health, 47(3), 211-217.
- Pratsinis, S.E. (1994) Motor vehicle contributions to the fine carbonaceous aerosol in Los Angeles, Aerosol Sci. Technol., 21, 360-366.
- Ritostovski, Z.D., L. Morawska, J. Hitchins, S. Thomas, C. Greenaway, and D. Gilbert (2000) Particle emission from compressed natural gas engines, J. Aerosol Sci., 31(4), 403-413.
- Sawyer, R. (1995) Successes and Failures in Motor Vehicle Emission Control; Special technical meeting of the NSW Branch of the Clean Air Society of Australia and New Zealand, Sydney, November 7.
- Williams, D.J., J.W. Milne, S.M. Quigley, and D.B. Roberts (1989) Particulate emissions from 'In-Use' motor vehicles-II. Diesel vehicles, Atmospheric Environment, 23(12) 2647-2661.