

디젤엔진에서 배출되는 미세 입자의 크기 분포

Submicrometer Particle Size Distribution of Emissions from Diesel Engines

김민철 · 권순박 · 이규원 · 김종춘¹⁾

정일록¹⁾ · 류정호¹⁾ · 엄명도¹⁾

광주과학기술원 (K-JIST) 환경공학과 분진공학연구소

¹⁾국립환경연구원 자동차공해연구소

(1999년 4월 21일 접수, 1999년 10월 4일 채택)

Min Cheol Kim, Soon Bark Kwon, Ken Won Lee, Jong-Chun Kim¹⁾

Il-Rok Jung¹⁾, Jung-Ho Ryu¹⁾ and Myoung-Do Eom¹⁾

*Aerosol Technology Laboratory, Department of Environmental Science and Technology,
Kwangju Institute of Science and Technology, Kwangju*

¹⁾*Motor Vehicle Emission Research Laboratory, National Institute of Environmental Research*

(Received 21 April 1999; accepted 4 October 1999)

Abstract

Particulate matter produced by diesel engines is of concern to engine manufacturers because of its environmental impact. The majority of diesel particles are in the range of smaller than 1 μm . Because of their tiny volume, ultrafine diesel particles contribute very little to the total mass concentration which is currently regulated for automobile emissions. Ultrafine particles are known to have deleterious effects upon human health especially because they penetrate deeply human respiratory tract and have negative effects on the health. In this study, the engine exhaust gas was diluted in a dilution tunnel and the particle size distribution was measured using the scanning mobility particle sizer system. Measurements of the number and the mass concentrations of the diesel exhaust were made under different engine operating conditions. The dilution sampling system provided a common basis for collection of the exhaust by cooling and diluting the source emission prior to the measurement. The measurement results showed that the particle size distributions of the exhaust from the diesel vehicles equipment with either heavy-duty or light-duty diesel engines, were similar in the particle size range of 0.08 ~ 0.2 μm .

Key words : diesel engine, particulate matter, size distribution, dilution tunnel, measurement

1. 서 론

디젤엔진을 이용한 자동차는 연료의 효율성 및

경제성 등에서 많은 장점을 가지고 있다. 그러나 서울시의 경우 운행되고 있는 디젤자동차는 전체 차량 중 22%에 불과하지만 배출되는 오염물질량은 전체 차량의 NOx는 82%, PM (Particulate Matter)은

98% 이상을 차지하고 있어 대표적인 오염원이다(이재현, 1997). 디젤엔진의 사용을 증가시키기 위해서는 결국 오염물질 배출을 최소화할 수 있는 엔진 개발과 아울러 후처리장치의 개발이 필요하다. 현재 국내·외 자동차사는 매연을 획기적으로 줄일 수 있는 방법을 강구하고 있다. 초고압분사기술을 이용한 저연비 자동차 개발과 더불어 입자상 물질의 농도를 0.1 g/kwh 이하(국내 2000년 기준, Euro III {2000년} 기준)로 줄이기 위한 엔진이 개발되고 있다.

디젤 자동차에서 배출되는 오염물질은 크게 NO_x, HC, CO, PM 등으로 나눌 수 있다. 이 중 디젤 입자상 물질(diesel particulate matter, DPM)은 연료 중 탄화수소계의 불완전 연소와 엔진 윤활유에서 발생된다. DPM의 특성은 배기가스 온도, 연료, 첨가제, 엔진의 특성, 후처리장치 등에 따라 달라지며, 입자 크기는 조건에 따라 0.001 μm에서 1 μm까지 다양한 입자 크기를 가진다. 새로이 연구가 진행되고 있는 초고압분사기술은 PM을 규제기준이하로 배출할 수 있다고 발표하고 있다. 그러나 초고압연료분사기술은 심미적인 영향과 시정악화를 유발하는 매연 등보다 큰 입자의 제거에는 용이한 반면, 오히려 0.1 μm 이하의 미세 입자의 발생량을 크게 증가시킨다고 보고되고 있다(Hunter, 1997; Bagley *et al.*, 1996). 초고압분사기술은 고압으로 연료를 분사하기 때문에 연소실내에서는 완전연소에 가까운 상태에 도달하게 되어 에너지 효율은 증가하지만, nuclei mode의 특성을 갖는 0.03 μm 이하의 입자를 증가시켜 결국 배출되는 총 입자 수는 증가하게 된다. PM에 대한 기준은 이미 새로운 방식으로 변경될 개연성이 다분히 존재하고 있다. 그 이유는 인체의 건강에 대한 유해도가 입자 크기의 함수이기 때문이다(정용일, 1998). 미국의 HEI(Health Effects Institute) 조사 결과에서도 폐포에 도달하는 율이 높은 입자는 0.1 μm 이하의 미세 입자라고 보고되고 있다.

디젤엔진에서 발생하는 입자상 물질은 주로 철(iron), 검댕(soot), 타르(tar), 탄소계 물질(carbonaceous material) 등으로 구성되어있다(Kittelson, 1998). 디젤엔진에서 처음 배출되는 입자는 nuclei mode로 그 크기가 0.03 μm 이하로 탄소물질(carbon material)로 구성되어있으며, 배기 시스템에서 온도에 따라 산화와 응집(agglomeration)에 의해 특성이 변하게 된다. 일부 입자는 배기관 벽에 열 영동력(ther-

mophoretic force)에 의해 침전(deposition)된다. DPM의 물리·화학적 특성은 희석관(dilution tunnel)에 유입하면서 변화하며 탄소류는 불완전 연소, 윤활유 등이 응축하거나 탄소입자 표면에 흡착되어 입자는 성장하게 된다. 디젤엔진이 연소하는 동안 입자의 형성 메커니즘은 잘 알려지지 않았는데 그 주된 이유는 입자의 형성과 침전 등이 복잡하고, 물리적·화학적 특성, 배기가스 시스템 등이 영향을 미치기 때문이다. 또한 입자의 배출율과 입자의 특성에 영향을 주는 요인으로는 엔진의 사용연수, 주행거리, 연료형태, 운전조건, 엔진형태, 후처리 장치 등이 있다.

디젤엔진에서 배출되는 입자 크기는 대부분 1 μm 이하이고, 이러한 입자들은 큰 입자에 비해 넓은 비표면적을 가지고 있어 발암성, 돌연 변이성을 가진 물질이 쉽게 흡착된다. 서술한 바와 같이 미세 입자가 인체에 유해하기 때문에 DPM 입경 분포는 많은 연구자들에 의해 관심의 대상이 되어 왔다. 미국에서는 이미 10 μm 이하의 입자에 대해서 규제 기준(PM₁₀)을 적용하고 있으며, 1997년에는 2.5 μm 이하(PM_{2.5})의 입자에 대해서도 기준을 마련하여, 미세 입자에 대한 규제를 강화하고 있다. 디젤엔진에서 배출되는 입자에 대한 건강 위해 기준이 정확히 정립되지 않은 실정이지만 수년 내에 이에 대한 이론이 정립되리라 본다. 이렇게 되면 현재 단순히 전체의 질량에 대해서만 그 기준을 정하는 방법에서 입자의 크기(size), 개수(number)와 더불어 물리적·화학적 특성을 고려해야 할 것이다. 본 실험의 목적은 현재 국내에 사용되고 있는 디젤엔진의 배출가스 중에 포함되는 미세 입자의 크기 특성을 알아보는 데 그 목적이 있으며, 본 연구를 통해 배출가스 후처리장치에 대한 미세 입자의 제거 연구에도 토대를 마련함에 있다.

2. 실험방법

2.1 실험개요

디젤엔진 배기가스에서 입자의 채취(sampling)는 희석 조건에 따라 변할 수 있기 때문에 많은 주의가 요구된다. 희석(dilution)의 변수(희석비, 희석속도, 체류시간)는 실제 대기 상태와는 상이하며, tail pipe에서 샘플링은 희석관(dilution tunnel)에서 샘플

링과도 크게 다르다(Suzuki *et al.*, 1985). 디젤엔진 배기가스는 고온상태로 배출되며, 고온에서 입자는 고체상으로 대기 중에 방출된다. 배출된 배기가스가 대기중의 공기와 혼합하게 되면 배기가스 온도가 낮아져 입자는 핵화(nucleation), 흡착(adsorption) 그리고 응축(condensation)에 의해서 크기가 증가하게 된다. 핵화율은 포화율(saturation ratio)의 정도가 증가할수록 증가하게 된다. nuclei mode의 입자는 탄소류의 핵화에 의해서 입자의 크기가 증가하게 되며 특히 희석비가 낮을 수록 포화율이 증가하기 때문에 핵화 할 가능성은 증가하게 된다. 희석관에서는 실제 대기 상태보다 희석비가 적기 때문에 포화율은 상대적으로 높게 된다. 측정된 입자의 크기 분포가 0.03~0.04 μm에서 최대농도를 보이는 경우에는 배출가스 온도가 120°C일 경우이며, 이때 입자는 대부분 수증기(H₂O)로 구성되어 배출가스의 온도가 증가하게 되면 입자는 대부분 증발하기 때문

에 nuclei mode의 입자의 분포는 적게 된다. 핵화가 전체의 질량에서 차지하는 비율이 적더라도 개수 증가에는 아주 중요하다.

“표 1”은 본 연구에 사용된 디젤엔진의 제원을 나타내고 있다. “표 1”에서와 같이 E1과 E2 엔진은 배기량이 11,051 cc인 대형 디젤엔진으로 대형버스나 트럭 등에 많이 사용되고 있다. 또한 E3와 E4 엔진은 승합차용으로 사용되고 있는 소형 디젤엔진이다.

2.2 디젤엔진 실험

디젤엔진에서 배출되는 입자상 물질을 측정하는 방법은 현재 미국 EPA에서 규정하고 있는 50°C 이하의 온도에서 필터 포집 방법을 사용한다. 배기 시스템에서 배출되는 물질은 대부분 연소과정에 의해서 생성되고 이러한 물질은 고온에서는 가스상태로 존재하므로 대기와 비슷한 조건이 되지 않으면 필터를 이용하여 분석하기 힘들다. 희석과 냉각되지

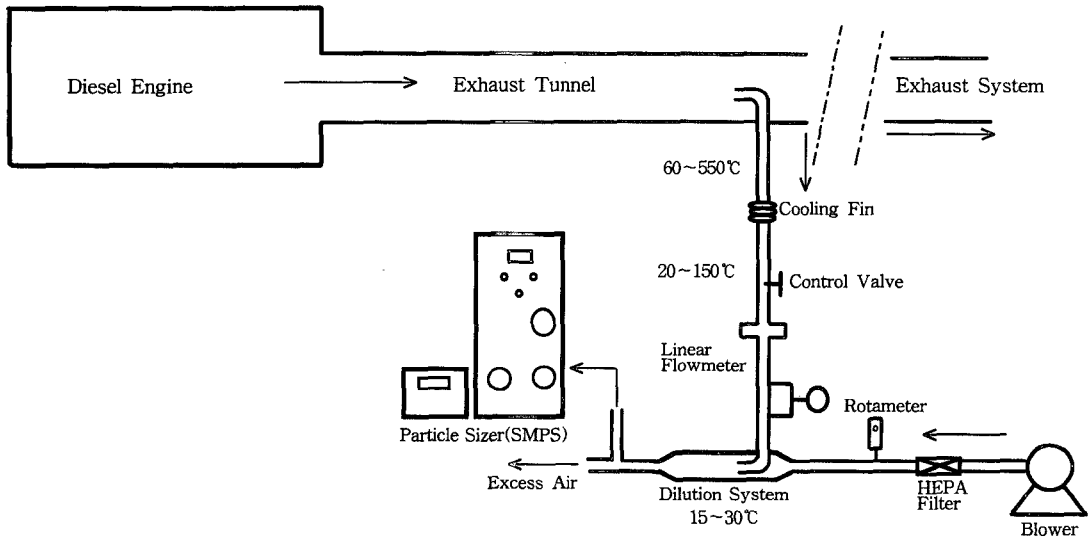


Fig. 1. Diagram of dilution tunnel system used for emission aerosol measurements.

Table 1. Specification of test vehicles.

Type	Manufacturer	Test vehicles	Displacement	Application	Combustion system	Maximum power (ps/rpm)
E1	DAEWOO	DE12	11,051 cc	Urban Bus	direct injection	225/2,200
E2	DAEWOO	DE12T	11,051 cc	Urban Bus, Truck	direct injection	300/2,200
E3	SSANGYONG	Musso	2,874 cc	Private car	turbo-intercooler	120/4,000
E4	KIA	Sportage	1,998 cc	Private car	turbo-intercooler	93/4,000

않은 경우에는 유기물은 과소평가 되고 대기 조건에서는 과대평가 되어 그 비율이 많게는 10배 이상 차이가 난다. 전형적인 디젤엔진 배출가스의 대기중의 공기와의 희석배수는 500~1000배이지만 희석관에서는 1:10이다. 따라서 희석관에서 측정된 입자 분포는 대기에서와는 다를 수 있다. 또한 샘플링하는 동안 시간과 온도 역시 중요한 요인이 된다. 과포화된 (supersaturated) 유기가스 (organic gas)는 균일 핵형성 (homogenous nucleation) 과정을 거치거나 입자의 표면에 흡착된다. 균일 핵이 형성되게 되면 불균일 응축 (heterogenous condensation)에 필요한 시간은 입자의 수와 표면적 등에 의존하게 된다. Schure and Natusch (1982)에 의하면 응축할 때 필요한 시간은 2~3초의 체류시간이면 가능하다고 했다.

“그림 1”은 디젤엔진 배출가스의 입자 측정을 위해 set-up된 dilution system을 나타낸 그림이다.

먼저 대형엔진 (E1, E2)과 소형엔진 (E3, E4)에서 배출되는 오염물질은 배기터널 (exhaust tunnel)을 통과하며, 이때 등속흡인을 할 수 있도록 등속흡입 샘플러 (isokinetic sampler)를 설치하였다. 등속흡입 샘플러를 통과하는 배출가스는 운전조건에 따라 60~550°C 사이를 유지하게 되며, 1차적으로 냉각핀 (cooling fin)을 설치하여 배출가스 온도를 20~150°C까지 냉각 시켰다. 이때 희석에 사용된 공기는 HEPA filter를 통과시킨 깨끗한 공기를 사용하였다. 희석관 (dilution tunnel)을 통과한 배출가스 온도는 15~30°C로 유지하여 대기의 조건에 근접하게 하였다. 희석률은 운전조건 또는 엔진에 따라 그 비율이 5~30배까지 다르게 하였다. 희석관에서 배출되는 입자의 측정은 전기적 이동차 입자 측정기 (SMPS, scanning mobility particle sizer)를 이용하여 측정하였다. SMPS를 개발하기 전에는 다단 임팩터 (cascade impactor), 광화학적 입자측정기, 전기적 저압력 임팩터 (electrical low pressure impactor) 그리고 확산 배터리 (diffusion battery) 등을 이용하였으나, 1990년 이후에는 전기적 이동차를 이용한 방법이 각광 받기 시작하였다 (Kittelson, 1998; Dürnholz and Lüders, 1997; Joumard and Perrin, 1988). 이 방법은 미세 입자를 전기적으로 대전시키는 기술을 이용하여 입자의 직경을 측정하는 방법으로, 시스템은 크게 SMA (scanning mobility analyzer)와 CPC (condensation particle counter) 그리고 이 두 장비를 통합 조

절하며 데이터를 수집·해석하는 컴퓨터로 구성되어 있다. SMA는 다분산 (polydisperse) 입자를 Kr-85 방사능 중화기에 노출시켜 전기적으로 중화시킨 뒤 입자를 크기별로 분류해내는 장비이다. Kr-85 방사능 중화기에 노출된 입자들은 전기적으로 일정한 비율로 입자크기에 따라 Boltzmann 하전 분포에 도달하게 된다. 이렇게 전기적으로 중화된 입자는 외부 원통의 안쪽으로 유입되며 일정한 전압이 걸려 있는 전기장내를 통과하게 된다. 일반적으로 외부원통은 접지 되어 있으며, (-) 전압인 내부원통에 인가되었을 때 (+) 전하를 띤 입자들이 내부원통 방향으로 끌려가게 되면 이때 입자는 유체에 의한 저항력과 전기장에 의한 힘이 균형을 이루며 하류 측으로 흘러 내려가게 된다. 입자의 하전량이 같다고 하면, 큰 입자는 내부원통에 높은 전압이 걸렸을 때, 작은 입자는 낮은 전압이 걸렸을 때 SMA내의 슬릿 (slit)을 각각 통과하며 CPC에서 개수가 측정된다. 이 방법은 기존의 DMPS (differential mobility particle sizer)에 비해 입자에 걸리는 전압을 지수함수적으로 변화시켜 측정하므로 측정시간을 2분 이하로 할 수 있다. 또한 SMPS는 자체적인 통계기법을 이용하여 짧은 시간 내에 연속적으로 각각의 입자 크기별 농도와 중간입자 (median particle), 평균 입자 (mean particle) 크기 등을 데이터화 할 수 있다.

“표 2”는 대형디젤엔진 실험에 사용된 엔진 모드 (mode)이다. 운전조건은 총 6단계로 구분하였으며, Mode 1~3은 회전수 1320 rpm에서 부하율 (loading ratio)을 10~100%로 변화시킨 운전조건을 말한다. Mode 4~6은 회전수 2200 rpm에서의 부하율을 달리한 조건을 말한다.

운전시간은 각각의 모드에 도달한 뒤 충분한 시간을 둔 후, 실제 측정에 소모된 시간을 뜻한다. 측정값은 각각의 엔진에 대해서 5회 측정된 값을 평

Table 2. Operating mode for heavy-duty diesel engines.

Type	RPM	Loading ratio (%)	Operating time (sec)
Mode 1	1320 rpm	10	300
Mode 2	"	50	"
Mode 3	"	100	"
Mode 4	2200 rpm	10	"
Mode 5	"	50	"
Mode 6	"	100	"

균한 것이다.

소형디젤엔진에서 배출되는 미세 입자의 특성을 조사하기 위해서, 본 연구에서는 대형디젤엔진과 유사한 방법을 사용하였다. 소형디젤엔진에서 배출되는 미세 입자의 양은 대형디젤엔진에 비해 적기 때문에 회석 비를 5~10배로 하여 측정하였다. 소형디젤엔진에 대한 미세 입자의 특성은 자동변속기어를 사용하는 엔진에 대해서 그 운전속도를 각각 20 km/hr, 40 km/hr, 60 km/hr, 80 km/hr로 증가시키면서 그 변화를 측정하였다. 측정값은 각각의 엔진에 대해 3회 측정된 값을 평균한 것이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 대형디젤엔진

디젤엔진 배출가스의 특성은 서술한 바와 같이 다양한 변수에 의해 변한다. DPM을 채취 (sampling) 할 때 측정지점과 측정방법, 측정기기, 온도, 회석률 등에 따라 그 특성이 변한다. 특히 본 연구에서는 배출가스 농도에 따라 회석비를 다르게 하였기 때문에 이에 대한 예비실험을 실시하였다.

“그림 2”는 회석비와 입자크기에 따른 개수농도 (number concentration)를 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이 0.15 μm 입자 크기에서 입자의 농도는 회

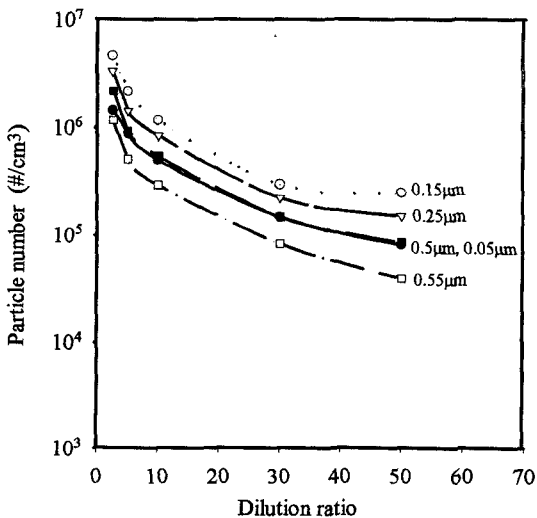


Fig. 2. Number concentration measured as a function of particle size and dilution ratio.

석비가 증가함에 따라 일정한 율로 감소하였으며, 이러한 경향은 0.05 μm , 0.25 μm , 0.5 μm , 0.55 μm 에서도 같은 결과를 얻었다. 즉, 회석비가 2.5~50배로 증가함에 따라 입자의 크기 분포는 거의 변화하지 않았으며, 회석비가 증가하면서 전체적인 입자의 개수농도가 감소하는 경향을 나타내었다.

본 연구에서 사용된 미세 입자 측정기, SMPS는 측정범위가 개수농도로 10⁵/cm³개 이하이므로 이 범위 내의 입자 측정은 정확하다고 할 수 있다. 그러나 측정한계에서 벗어나게 되면 정확한 측정을 위해 회석이 필요하다. 과부하 상태에서는 대부분 측정 한계를 벗어나기 때문에 본 연구에서는 단지, 이에 대한 보정을 위해서 회석비를 다르게 하여 측정하였다. “그림 2”에서와 같이 본 연구에서 사용된 회석비 범위 내에서는 입자 크기 분포에 영향을 주지 않음을 알 수 있었다. 그러나 과 부하상태에서 운전하는 경우를 제외하고는 동일한 회석비를 사용하여 최대한 오차를 줄였다.

디젤엔진에서 발생하는 PM은 연료 중 탄화수소계의 불완전 연소와 엔진 윤활유에서 발생한다. 배출되는 입자는 조건에 따라 0.01 μm 에서 1 μm 까지 다양한 크기를 가진다. 디젤엔진에서 배출되는 PM의 질량평균입자크기 (mass mean diameter)는 0.1~0.3 μm 에 집중되어 있으며, 개수평균입자크기 (number mean diameter)는 0.06~0.2 μm 정도이다. Rickeard(1996) 등은 디젤엔진에서 배출되는 입자는 대부분 1 μm 이하의 미세 입자로 구성되어 있으며, 중간 입자크기 (median particle diameter)는 0.1 μm 정도이며, 중간 입자의 크기는 연료와 운전조건 등에 따라 달라진다고 했다. 본 연구에서 디젤엔진 배출가스의 입자 크기 측정결과는 Dürnholz and Lüders (1997), Hildemann *et al.* (1991), Rickeard *et al.* (1981), Kittelson *et al.* (1991)에서의 측정값과는 약간의 차이점은 있었지만 대부분 입경 분포는 일치하였다.

“그림 3”은 대형디젤엔진인 E1 엔진에서 배출되는 입자의 크기분포를 나타내는 그림이다.

“그림 3”에서 (a)는 회전수 1320 rpm에서 부하율 (loading ratio)을 10% (Mode 1), 50% (Mode 2) 그리고 100% (Mode 3)로 다르게 하여 측정된 결과 값이다. “그림 3(a)”에서와 같이 Mode 1에서는 개수평균 입자크기가 약 0.04 μm 이었으며, Mode 2에서는 약

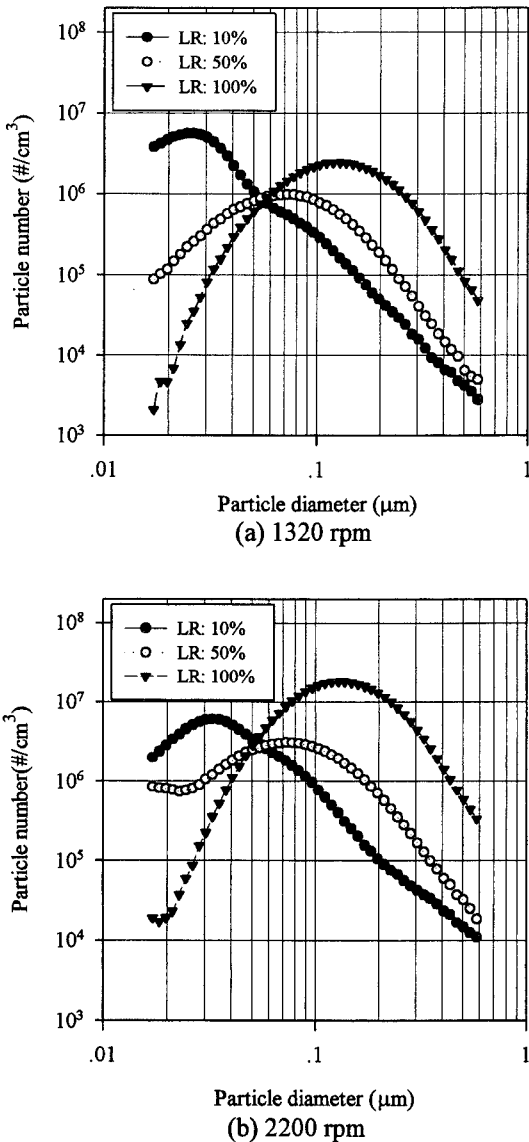


Fig. 3. Particle size distribution measured of the exhaust of E1 engine at the different loading ratio (LR : loading ratio).

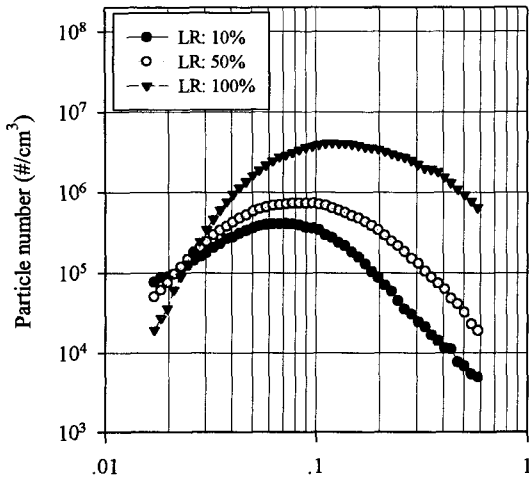
0.084 μm에서 평균값을 보였다. 또한 Mode 3에서는 약 0.14 μm에서 개수평균입자크기를 보였다. 입자의 개수농도 (number concentration)는 회전수와 부하율에 따라 약 $2 \times 10^7 \sim 3 \times 10^8 \text{ #/cm}^3$ 이었다. 같은 회전수에서는 부하율이 증가함에 따라 평균 입자크기 및 개수농도도 함께 증가였다. 이러한 경향은 회전

수 2200 rpm에서 부하율이 10% (Mode 4), 50% (Mode 5), 100% (Mode 6)일 때도 같은 결과를 얻었다(그림 3(b)). Patschull and Roth (1995)는 이러한 결과를 부하율이 증가함에 따라 고온의 배출가스를 배출하기 때문에 입자간에 응집현상이 가속되거나, 불완전 연소에 의해 개수평균입자크기가 증가하였기 때문으로 설명하였다.

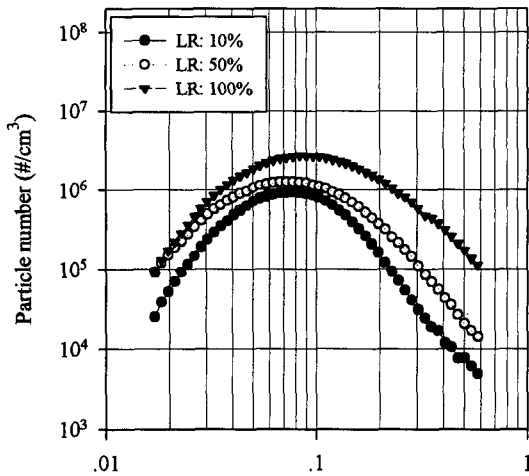
디젤엔진에서 배출되는 입자의 분포는 서늘한 바와 같이 다양한 조건에 따라 변화한다. 특히 디젤엔진의 입경 특성은 연료의 성분에 따라 달라지게 되는데, 황 성분이 기준(0.05% 이하) 이상 포함될 경우에는 nuclei mode 입자가 다량 발생하게 된다 (Kittelson, 1998). 그러므로 “그림 3”과는 다르게 입자 분포가 2중 peak를 보이게 된다. 즉 nuclei mode와 accumulation mode가 함께 측정된다. 본 연구에서 측정된 입자의 분포 형태는 대부분 accumulation mode만이 측정되었는데 이는 황 성분이 0.05% 이하인 경우를 사용하였기 때문으로 추측할 수 있다. 또한 입자의 크기 분포는 공기와 연료의 비율(공연비)에 따라 다른 특성을 지니게 된다. 대형디젤엔진에서 고부하율을 유지하여 운전하는 경우에는 대부분 과부하 상태를 말하는데, 과부하 상태에서는 공연비가 낮아 공기에 비해서 다량의 연료를 소모하여 불완전 연소를 하거나 고온의 입자를 배출하게 된다. 이때 입자는 고온, 고농도로 배출되어 입자의 응집현상은 가속되기 때문에 결국 입자 분포는 nuclei mode보다 accumulation mode 입자가 주가 된다.

“그림 4”는 대형디젤엔진으로 E1의 후속모델인 E2 엔진에서 배출되는 입자 크기분포를 나타낸 그림이다.

E2 엔진의 입자 개수농도는 $1 \times 10^6 \sim 1 \times 10^8 \text{ #/cm}^3$ 이었다. 개수평균입자크기는 “그림 4(a)”에서와 같이 Mode 1에서는 개수평균입자크기가 약 0.078 μm이었으며, Mode 2에서는 약 0.086 μm에서 입자 크기를 보였다. 또한 Mode 3에서는 약 0.12 μm에서 개수평균입자크기를 보였다. 같은 회전수에 부하율이 증가하면서 평균 입자크기는 증가하였으나, E2 엔진의 구 모델인 E1엔진에 비해서는 그 변화량이 적었다. 또한 미세 입자 발생량도 E1엔진에 비해서 적게 측정되었다. 회전수 2200 rpm에서는 회전수 1320 rpm과는 달리 각 Mode별 농도차이가 적었다(그림 4(b)). 이러한 측정 결과를 고려할 때, E2엔



(a) 1320 rpm



(b) 2200 rpm

Fig. 4. Particle size distribution from the E2 engine at the different loading conditions (LR : loading ratio).

진에서는 개수평균입자크기 분포는 부하율보다는 회전수와 상관관계가 더 가지며, 입자농도는 부하율과 비례함을 알 수 있었다.

3. 2 소형디젤엔진

“그림 5”는 E3 소형디젤엔진에 대해서 개수 및

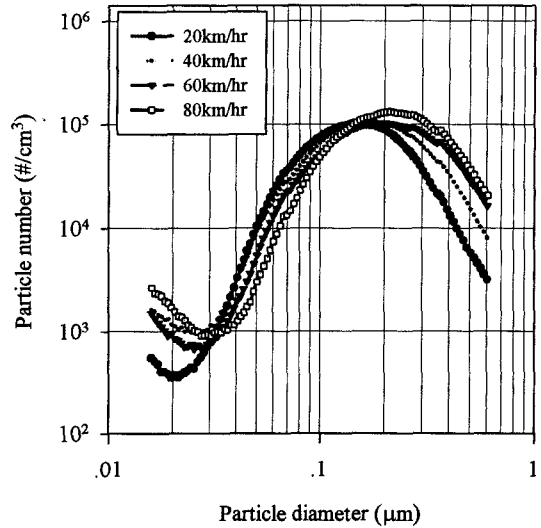


Fig. 5. Particle size distribution measured of the exhaust of E3 engine at different engine speed.

질량 분포 특성을 나타내고 있다.

“그림 5”와 같이 배출되는 미세 입자의 개수 농도는 $3.6 \times 10^6 \sim 4.8 \times 10^6 \text{ #/cm}^3$ 정도이다. 배출되는 입자의 양은 운전속도가 증가하면서 점차 증가하는 경향을 보였으며, 개수평균입자크기는 약 $0.2 \mu\text{m}$ 이다. 입자의 분포 경향은 운전속도와는 상관없이 일정한 형태를 보이고 있다. E3 엔진에서는 대형디젤엔진인 E1, E2와 소형디젤엔진인 E4와는 다르게 $0.02 \mu\text{m}$ 이하의 입자가 다량 측정되었다. 이러한 측정 결과는 Dürnholz and Lüders(1997)가 디젤엔진의 입경 분포를 측정하였을 때도 본 연구결과와 비슷한 경향을 보였다. nuclei mode와 accumulation mode가 함께 측정되는 경우는 대부분 연료 성분과 엔진 특성에서 그 원인을 찾을 수 있다. 본 연구에서는 동일한 연료를 사용하였기 때문에 연료 성분보다는 사용된 엔진 특성 또는 다른 요인에 의해서 2중 peak 값을 보인 것으로 추론할 수 있다.

“그림 6”은 E4 소형디젤엔진에 대해서 개수 및 질량 분포 특성을 나타내었다.

“그림 6”에서와 같이 배출되는 미세 입자의 양은 개수농도는 $4.4 \times 10^6 \sim 8.2 \times 10^6 \text{ #/cm}^3$ 이고, 입자의 분포가 운전의 속도와는 무관한 경향은 소형 디젤엔진인 E3엔진과 비슷하였으나, 미세 입자의 평균

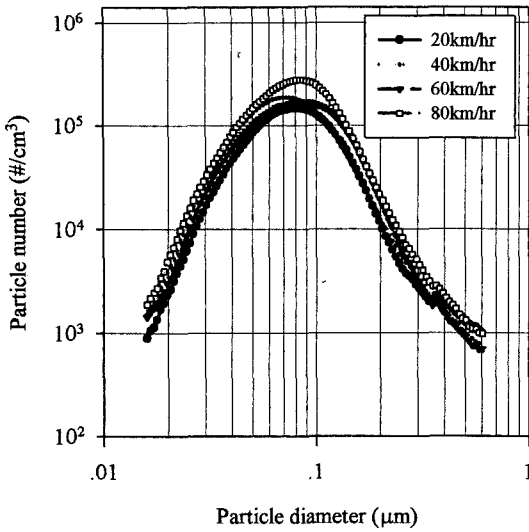
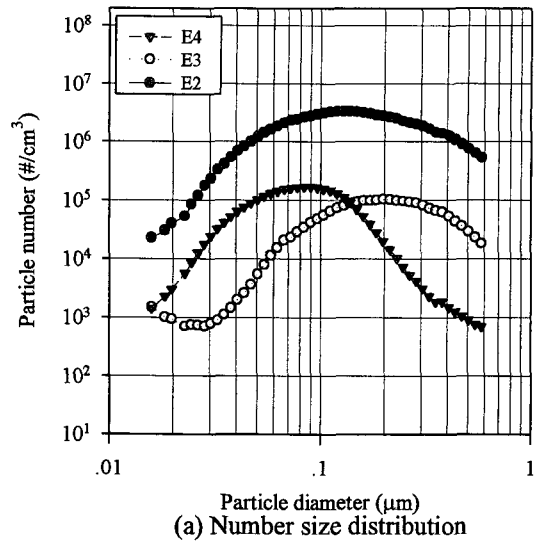


Fig. 6. Particle size distribution measured of the exhaust of E4 engine at different engine speed.

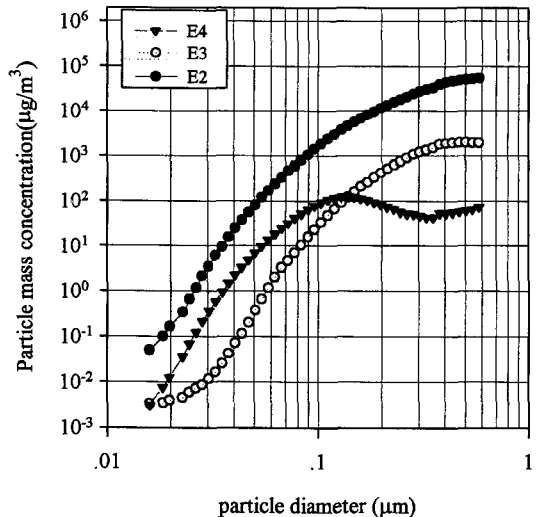
입자크기는 약 0.08 μm로 E3엔진에 비해서는 조금 작게 측정되었다. 또한 개수농도는 E3엔진에 비해 많이 배출되었으나, 질량농도는 오히려 낮았다.

“그림 7”은 대형디젤엔진 E2와 소형디젤엔진 (E3, E4)엔진에 대해서 개수평균입자크기 분포와 질량농도 분포를 나타낸 그림이다.

“그림 7(a)”에서와 같이 각각의 엔진에 따라서 개수평균입자크기 분포가 변화함을 알 수 있었다. 대형디젤엔진인 E2 엔진에서는 약 0.14 μm에서 최대농도를 보였으며, 소형디젤엔진인 E3 엔진과 E4 엔진에서는 약 0.2 μm, 0.08 μm로 측정되었다. 대형디젤엔진과 소형디젤엔진의 운전 조건이 일치하지는 않지만 “그림 7(a)”에서 개수농도는 대형디젤엔진에서 소형디젤엔진에 비해 약 40배 이상 많은 미세 입자를 배출하고 있는 것으로 측정되었다. 이러한 입자분포의 차이는 엔진 특성과 관련이 있을 것으로 추정된다. “그림 7(b)”는 대형디젤엔진과 소형디젤엔진의 질량농도 분포를 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이 E2 엔진에서는 $5.8 \times 10^5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, E3 엔진에서는 $2.8 \times 10^4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, E4엔진에서는 $2.3 \times 10^3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 그림과 같은 조건을 고려할 때 대형디젤엔진인 E2엔진은 소형엔진인 E3엔진에 비해서 약 20배 이상의 질량농도를 가진 입자를 배출하고



(a) Number size distribution



(b) Mass size distribution

Fig. 7. Size distribution of different type of engines (Test conditions; E2-1320 rpm, 100% loading ratio E3, E4-60 km/hr).

있으며, E4엔진에 비해서는 200배 이상의 질량농도를 배출하고 있다. 단지 질량농도가 높다고 해서 배출된 가스가 인간을 포함한 환경에 영향을 더 미친다고는 단정할 수는 없다. 예를 들어, 동일한 조건에서 질량농도가 높은 경우에는 대부분 작은 입자에 비하여 큰 입자가 많이 분포되어 있으며, 큰 입자는

작은 입자에 비하여 제어하는 방법이 더 용이하며, 인체에 대한 유해도와 시정악화 등도 입자 크기와 함수이기 때문에 질량농도만을 가지고 환경에 대한 영향을 논할 수는 없다고 본다.

4. 결 론

본 연구에서는 우리 나라에서 사용되고 있는 대형디젤엔진(E1, E2)과 소형디젤엔진(E3, E4)에 대해서 미세 입자의 입경 특성을 측정하였다. 본 연구에 이용된 대형디젤엔진에서 배출되는 입자개수는 $3 \times 10^5 \sim 1.1 \times 10^8 \text{ \#/cm}^3$ 이며, 질량은 $6.3 \times 10^4 \sim 7 \times 10^5 \text{ \mu g/m}^3$ 이었다. 개수 평균입자 크기는 운전조건과 엔진의 종류에 따라 달랐지만, 대략 $0.08 \sim 0.2 \text{ \mu m}$ 에서 존재하였다. 또한 본 연구에 이용된 소형엔진에서 배출되는 입자개수는 $5 \times 10^4 \sim 3.2 \times 10^6 \text{ \#/cm}^3$ 이며, 질량은 $2.5 \times 10^3 \sim 2 \times 10^4 \text{ \mu g/m}^3$ 이었다. 하지만 소형엔진에서 배출되는 개수평균입자크기는 E3엔진인 경우에는 약 0.2 \mu m 이었고, E4엔진은 약 0.08 \mu m 이었다. 디젤엔진에서 배출되는 입자의 특성은 외국 문헌의 발표 값과 거의 비슷하였다(Matter *et al.*, 1998; Rickeard *et al.*, 1996; Hildmann *et al.*, 1991; Kittelson *et al.*, 1991). 디젤엔진에서 배출되는 입자의 대표적인 특성을 파악하기 위해서는 입자 크기에 따른 화학적 성분 분석과 더불어 회석방법의 규격화에 대한 연구가 더 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 환경부 지원하의 “경유엔진에 의한 대기오염물질 저감대책에 관한 연구(II) - 입자상 물질 입경분포 및 배출특성 해석” 사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

이재현 (1997), 자동차 배출가스 저감정책에 관한 전문가 토론회, 한국대기보전학회 실태 및 관리분과회, 사단법인 녹색교통운동, 74pp.
 정용일 (1998), 매연후처리장치 성능시험 결과 발표집, 국립환경연구원 75pp.

Bagley, S.T., K.J. Baumgare, L.G. Gratz, J.H. Johnson, and D.G. Leddy (1996) Characterization of Fuel and Aftertreatment Device Effects on Diesel Emission, Health Effects Institute (HEI), Research Report No.76.
 Dürnholtz, L. and H. Lüders (1997) Effects of a Diesel Particulate Filter on Particle Size Distribution of a Heavy Duty Diesel Engine, Corning Particle Sizing Program-Final Report.
 Habibi, K. (1973) Characterization of Particulate Matter in Vehicle Exhaust, Environ. Sci. and Tech., 3, 223-234.
 Hildemann, L.M., G.R. Markowski, M.C. Jones, and G.R. Cass (1991) Submicrometer Aerosol Mass Distributions of Emissions from Boilers, Fireplaces, Automobiles, Diesel Trucks, and Meat-Cooking Operation, Aerosol Sci. and Tech., 14, 138-152.
 Hunter, G. (1997) Formation and Characterization of Particles : Report of the 1996 HEI Workshop, Particle Formation in Combustion, HEI Commu., 5, 6-7.
 Joumard, R. and M. Perrin (1998) Measurement of Particle and Gaseous Pollution of the Atmosphere Due to Buses, The Sci. of the Total Environ., 76, 55-62.
 Kittelson, D.B. (1998) Engines and Nanoparticles : A Review, J. Aerosol Sci., 29(5/6), 575-588.
 Kittelson, D.B. and J.H. Johnson (1991) Variability in Particle Emission Measurements in the Heavy Duty Transient Test, SAE, 910738.
 Matter, U., J. Paul, L., Scherrer, and K. Siegman (1998) Dynamic Characterization of Diesel Particulate Emissions Using Two Portable Sensors, J. Aerosol Sci., 29, S951-S952.
 Patschull, J. and P. Roth (1995) Measurement and Reduction of Particles Emitted From a Two-Stroke Engine, J. Aerosol Sci. 26, 979-987.
 Rickeard, D.J., J.R. Bateman, Y.K. Kwon, J.J. McAughey, and C.J. Dickens (1996) Exhaust Particulate Size Distribution: Vehicle and Fuel influences in Light Duty Vehicles, SAE, 961980.
 Schure, M.R. and D.F.S. Natusch (1982) In Polynuclear Aromatic Hydrocarbons : Physical and Biological Chemistry, Battelle Press, Columbus, OH, 713-724.
 Suzuki, J., H. Yamazaki, Y. Yoshida, and M. Hori (1985) Development of Dilution Mini-Tunnel and Its Availability for Measuring Diesel Exhaust Particulate Matter, SAE, 851547.