

## 입자측정조건이 디젤 나노입자의 입경분포에 미치는 영향

### Effects of Particle Measuring Conditions on Diesel Nanoparticles Distribution

이진욱\* · 김홍석<sup>1)</sup> · 정용일  
한국기계연구원 친환경엔진연구센터, <sup>1)</sup>무·저공해자동차사업단  
(2006년 5월 9일 접수, 2006년 7월 19일 채택)

Jin-Wook Lee\*, Hong-Suk Kim<sup>1)</sup> and Young-Il Jeong  
*Engine Research Center, Korea Institute of Machinery and Materials (KIMM)*  
<sup>1)</sup>*Center for Environmentally Friendly Vehicle (CEFV)*  
(Received 9 May 2006, accepted 19 July 2006)

#### Abstract

Due to the stronger exhaust emission regulations and the introduction of advanced technology in Diesel engine, the specific Diesel particulate matters have decreased by about one order of magnitude since the 1980's. In recent years, particle number emissions rather than particulate mass emissions have become the subject of controversial discussions. Recent results from health studies imply that it is possible that particulate mass does not properly correlated with the variety of health effects attributed to Diesel exhaust. Concern is instead now focusing on nano-sized particles. This study has been performed for the better understanding about the Diesel nano-particle measurement and size distribution characteristics in the exhaust system of a turbo charged Diesel engine. A scanning mobility particle sizer (SMPS) system was applied to measure the particle number and size concentration of Diesel exhaust particles. As the experimental results, the number concentrations in the particle size ( $D_p < 200$  nm) were very sensitive to dilution conditions. Specially the changes in nano-particle number concentrations ( $D_p < 50$  nm) increased along the downstream of exhaust flow. Also we found the dilution conditions were influencing the condensation of SOF and H<sub>2</sub>O during dilution and cooling of hot exhaust.

**Key words** : Diesel particulate matter, Nanoparticles, Particle size, SMPS

#### 1. 서 론

자동차 연비 향상과 대표적 지구 온난화 가스인 이산화탄소저감이라는 2가지 맥락에서 볼 때, 가장

유리한 내연기관(internal combustion engine)인 직접 분사식디젤엔진(direct injection Diesel engine)은 21 세기에 들어서면서 사회적 인식의 전환과 관련 첨단 엔진기술개발로 인해 이의 사용증가가 예상되고 있다. 그러나 이와 더불어 디젤엔진에서 발생하는 입자상 물질(PM, particulate matter)의 측정 및 저감 기술은 디젤엔진만이 가지고 있는 현안 문제이기에, 이에

\*Corresponding author.  
Tel : +82-(0)42-868-7386, E-mail : immanuel@kimm.re.kr

대한 연구가 활발히 수행중이다(박덕신 등, 2003; 김민철 등, 1999).

현재 디젤엔진에서 배출되는 입자상 물질의 계측은 필터질량법(gravimetric PM mass analysis)이 국제 표준인데, 전체 배출가스 유량을 대상으로 하는 CVS(constant volume sampling)법과 일부 배기가스 유량을 대상으로 하는 부분 샘플링(partial flow sampling)법이 있다. 특히 최근에는 기존 계측법(질량농도)의 고도화와 디젤엔진에서 배출되는 극미세입자 즉, 수억분의 1미터 수준의 입자가 새로운 대기오염 물질로써 부각되고 있는 상황이다. 즉, 인체의 위해성 측면에서 중요한 극미세 크기의 입자상 물질 개수 농도를 측정하여 규제하려는 연구가 진행 중이다(Donaldson *et al.*, 1998).

따라서 본 연구에서는 실제 디젤엔진에서 배출되는 극미세입자를 대상으로 해서, 이의 특징 및 희석 온도 등 희석 조건과 측정 위치가 이의 입경 분포에 어떠한 영향을 미치는지 실험적으로 규명하고자 수행하였다. 이를 위해 이젝터형의 희석장치와 회전형 희석장치를 각각 비교 적용하였으며, 특히 이젝터형의 희석장치에 있어서는 2단 이젝터 배열의 영향도 살펴보았다.

## 2. 디젤 극미세입자 특징

일반적으로 디젤 엔진에서 발생하는 입자상 물질의 대부분은 연료의 탄화수소계의 불완전 연소에 기인하며, 일부는 엔진 윤활유에서 발생된다. 대체적으로 직경  $1\mu\text{m}$  이하의 작은 크기로, 유기물에 가까운 것들로서 유해한 성분 또한 많이 포함하고 있다(Abdul-Khalek and Kittelson, 1998).

주요 구성성분은 크게 고체 탄소 입자(carbon cluster)와 유기성 용제(organic solvent)로 제거할 수 있는 성분인 용해성 유기물(SOF, soluble organic fraction) 그리고 황산염(sulfuric acid; sulfates)과 이산화황 등의 무기성분(inorganic species)으로 나눌 수 있다. 특히 일정 배기가스 온도이하에서 입자상 물질에 흡착되어 있는 용해성 유기물(H/C비~약 1.5 정도)은 미연탄화수소, 산화탄화수소, PAH(polycyclic aromatic hydrocarbons, 2개 이상의 벤젠이나 시클로펜탄 고리를 가진 방향족 탄화수소계) 등으로

구성되어 있다.

이러한 입자상 물질의 분포상태는 중량 기준(accumulate mode)으로 할 경우, 입자 직경이 약  $0.1\sim 0.25\mu\text{m}$ 에 집중되어 있다. 그러나 입자 개수기준(nuclei mode)으로 보면 입자직경  $50\text{nm}$  이하 영역에 주로 분포하고 있다. 참고로 1995년부터 국내에서는 PM10(직경  $10\mu\text{m}$  이하인 대기중 부유 입자상 물질)을 규제하고 있다.

디젤엔진의 입자상 물질은 고온( $1,000\sim 2,800^\circ\text{K}$ ) 상태에서 국부적 연료 과다로 인해 긴 사슬모양의 연료분자가 열분해(thermal decomposition)를 일으켜 발생한다. 생성된 초기 미립자는 아세틸렌, 분자량이 큰 화합물과 PAH로 구성되어 있으며, 직경은 약  $2\text{nm}$  이하의 초미립자이다. 이 입자는 엔진 연소실내 국부적 산소 부족(혼합기 유동형태가 주요 변수)과 연료성분, 연소온도, 확산속도, 반응 시간 등에 의한 탈수(dehydration) 및 분해 반응을 거치게 된다. 이를 통해 입자 표면성장, 응집, 응결 그리고 집합 등의 과정을 거쳐 입자상 물질을 형성하게 된다.

그림 1은 각각 주사전자현미경으로 획득된 직경  $50\text{nm}$  이하의 디젤 극미세입자의 응집으로 이루어진 디젤 극미세입자의 영상과 고속 촬영된 미시적 입자상 물질의 영상이다. 직경  $50\text{nm}$  이하의 디젤 극미세 입자는 구형 입자(spherical particle)라고 가정하는 것이 타당하며, 이러한 입자가 수백 개 뭉쳐져 길고 복잡한 사슬형태로 구성된 큰 입자에서는 위의 가정이 유효하지 않음을 알 수 있다.

그림 2는 이를 보다 더 도식적으로 나타낸 것으로서, 디젤 입자상 물질은 이미 언급한 2가지 크기분포를 가지게 됨을 알 수 있다.

현재까지 디젤 극미세입자의 크기에 대한 정확한 규정은 없으나, 대개 직경  $50\text{nm}$  이하의 입자를 총칭하는게 일반적이다. 이러한 크기와 형태의 디젤 극미세입자는 매우 불안정한 휘발성이고 미연탄화수소와 황산 응축물로 구성되어 있다. 또한 극미세입자 최대 농도는  $10\sim 20\text{nm}$ 에서 발생하며, 전체 입자 개수의 90% 이상을 차지하는 특징이 있다. 이는 전체 입자상 물질의 중량(total PM mass)으로 볼 때 오직  $0.1\sim 10\%$ 만을 차지하는 양이다.

그리고 이들의 농도는 디젤엔진 기술과 샘플링 기술, 특히 희석조건(예, 희석비와 체류시간)에 의해 대부분 결정된다(Suresh and Johnson, 2001). 따라서 디

젤 극미세입자의 구성 성분별 질량 및 입경을 직접적으로 정확히 샘플링하고 분석하는 것은 매우 어렵다. 따라서 디젤 극미세입자에 대한 정확한 체계적 분석은 입자 샘플링 시스템을 통해 구현되어야 한다. 최근에는 실제 엔진에서 배출되는 극미세입자를 계측할 수 있는 측정 장비가 개발되어, 디젤 자동차 및 엔진을 대상으로 한 측정연구에 사용되고 있으며, 특히 측정 장비 상호간의 비교 연구를 통해 데이터의 정확성 및 재현성에 대한 검증연구가 많이 수행되고 있다(Pagan, 1999). 특히, 기존의 중량 규제 대상이 되고 있는 입자상 물질에 비해, 입자의 직경이 100분의 1 정도 범위인 디젤 극미세입자는 입자 측정 방법 및 조건에 따라, 디젤 엔진의 배출가스 성분 중에 존재하는 수분(H<sub>2</sub>O), 용해성 유기물(SOF, soluble organic fraction), 황(sulfate)성분 등이 응축 및 증발되어 이의 입자크기는 변하게 되는 특징이 있다(김홍석 등, 2003; Andrew *et al.*, 2001).

참고로, 기존 CVS법의 경우, 측정된 입자상 물질은 모든 배기 성분을 포함하게 되며, 발생량은 사용연료량의 약 0.2~0.5% (중량)범위이다. 그리고 회석

비는 10~30 정도로, 실제 디젤엔진의 배기관에서 배출된 가스가 대기중에서 회석되는 경우(500~1,000)와 비교해 볼 때, 매우 작은 값으로 실제 상황을 반영하지 못하며, 특히 대기의 습도조건이나 사용되는 공기필터의 성능 그리고 첨단엔진기술로 인한 저배기화로 개선이 필요한 상태이다. 향후 2007년부터 미국 EPA에서는 이를 개선한 보다 새롭고 엄격한 샘플링 규정(예, 세분화된 온도범위 및 사용 필터 조건 등)을 적용할 예정이다.

### 3. 연구 방법

본 연구에서는 표 1에 나타낸 배기량 2,974 cc급 소형 디젤 엔진에서 배출되는 극미세입자를 대상으로 회석조건 및 측정위치에 따른 영향을 분석하였다. 따라서 극미세입자 배출 특성을 분석하기 위한 엔진 실험시스템은 크게 ① 디젤엔진 ② 엔진성능측정시스템(엔진동력계, Fuchino사) ③ 입자분석시스템으로 구성하였다. 그림 3은 본 연구에 적용된 실험장치의 개략도 및 전경을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 디젤 입자 측정시스템으로는 SMPS (Grimm사, Model 5403), ELPI (Dekati사, Model 3935) 그리고 EEPs (TSI사, Model 3090) 등을 그림에 표기된 위치에 설치 가능한데, 본 연구에서는 엔진의 정상상태 시험 적용, 상대적으로 작은 크기의 입자 측정(~10 nm) 그리고 상대적으로 넓은 측정영역(<1 μm)을 보유한 SMPS를 사용하였다. 입자 측정위치는 엔진 배기관내 장착된 터보차저의 하류 140 cm 지점을 기준지점으로 설정하였으며, 배출가스를 회석하기 위하여 먼저 이젝터형(ejector type) 회석장치(Dekati사)와 캐비티 회전형 회석장치(Matter Engineering AG, MD19-2E)를 사용하였다. 이젝터형(ejector type) 회석장치의 경우, 배출가스 내에 존재하는 수분 및 휘발성 성분의 응축을 방지하기 위하여 회석장치 첫

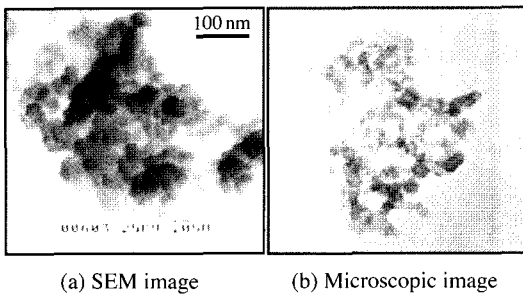


Fig. 1. PM Image emitted from Diesel engine.

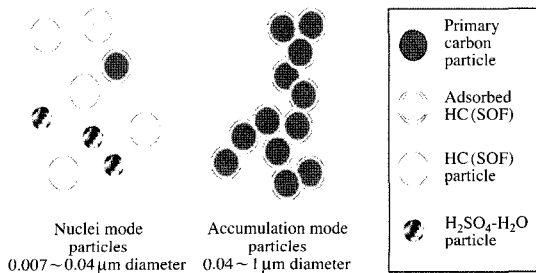


Fig. 2. Schematic of Diesel particulate matters.

Table 1. Specification of test Diesel engine.

Variables	Mighty
Displacement (cc)	2,974
No. of cylinder	5
Bore × Stroke (mm)	89 × 92.4
Compression ratio	22 : 1
Maximum torque (kg <sub>f</sub> -m/rpm)	23.4/2400

단의 회석공기 온도를 200°C로 가열하여 공급하였으며, 두 번째 단의 회석장치는 상온의 회석공기를 공급하였다. 그리고 회석공기의 공급 압력은 2bar로 일정하게 유지하였다. SMPS (scanning mobility particle sizer)는 분급부인 DMA (differential mobility analyzer)와 입자개수기인 CPC (condensation particle counter)로 구성된다. DMA의 측정 원리는 전하를

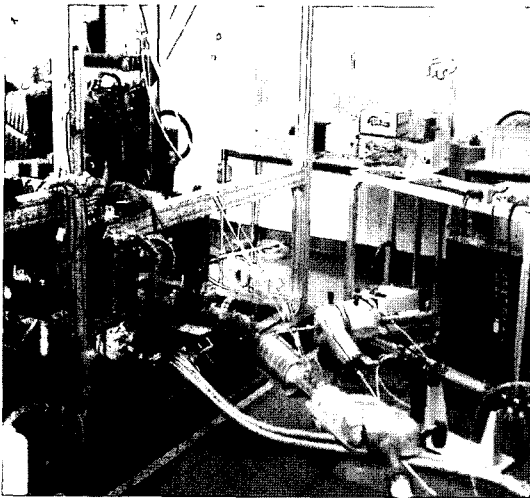
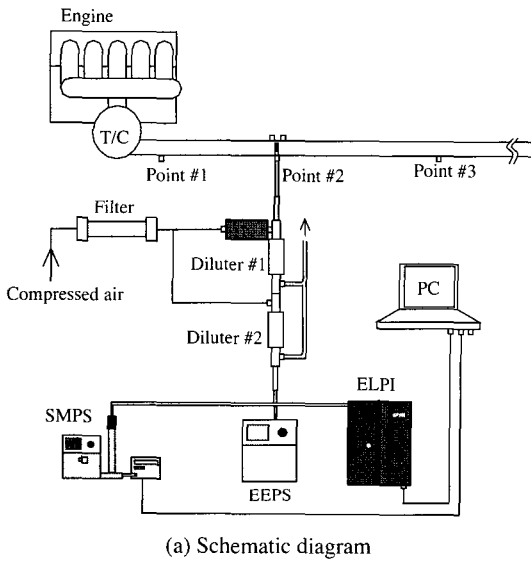


Fig. 3. Experimental setup for measurement of Diesel nano-particles.

가진 입자가 전기장이 존재하는 매체내에서 운동할 때, 입자에는 정전기력과 유체저항이 작용하며, 이러한 힘의 평형이 입자의 크기에 따라 변하게 되어 발생한 입자의 전기적 이동도(electrical mobility)의 차이를 이용한 것이다. DMA는 전극이 되는 2중 원통의 내부 공간에 직류전기장이 형성되어 있으며, 미리 대전된 입자는 상부 바깥벽에서 이에 유입된다. 이때 전기 이동도의 차에 의해 작은 입자는 내통상부에 그리고 큰 입자는 하부에 도달하여 특정 입경범위의 입자만 전극하단에 설치된 슬릿에 유입됨에 의해 입자가 크기별로 분류된다. 또한 DMA에서 중심전극에 인가하는 전압을 제어하여 전체의 강도를 변화시킴에 의해 입자의 분급 크기를 제어하게 된다. 이후, 슬릿에 유입된 입자는 광학적인 방법을 이용하여 입자의 개수를 세는 역할을 하는 CPC에 보내져 입자농도가 측정되게 된다 (Gulijk *et al.*, 2003; Kasper *et al.*, 2001).

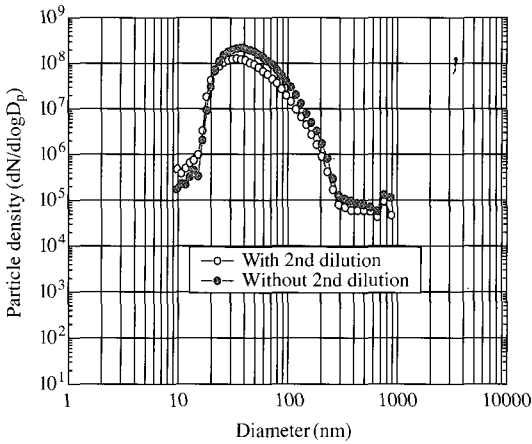
#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 회석장치 및 회석비 영향

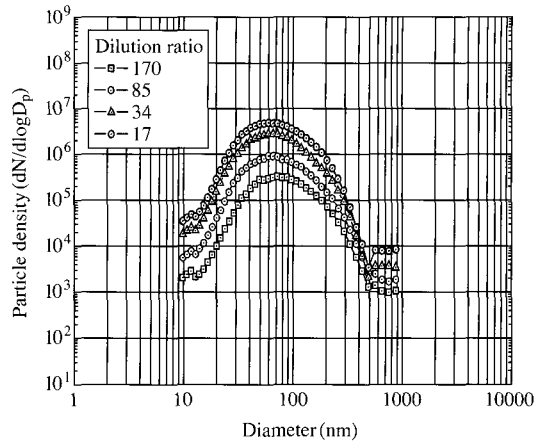
그림 4는 1개의 이젝터형 회석장치만을 사용하여 회석하는 경우(회석비 8.5:1)와 2개의 이젝터형 회석장치를 직렬로 연결한 2단 회석하는 경우(회석비 78.5:1)의 디젤 극미세입자 입경 분포를 비교해 나타낸 것이다. 이 두 경우 모두 첫 번째 회석 장치에 공급되는 공기는 전기 히터를 이용하여 200°C로 가열하였고, 2단 회석하는 경우, 2단 회석 공기의 온도는 상온(25°C)으로 유지하였다. 엔진 운전조건은 아이들(idle)상태(엔진회전수 785 rpm)로 설정하였다. 그리고 회석 공기와 배출가스의 비가 회석비를 결정하게 되며, 이젝터 방식 회석장치에서 회석비는 넓은 범위에서 자동적으로 일정 값을 가지게 된다. 회석비는 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$\text{회석비} = (\text{회석공기유량} + \text{샘플배출가스}) / \text{샘플배출가스}$$

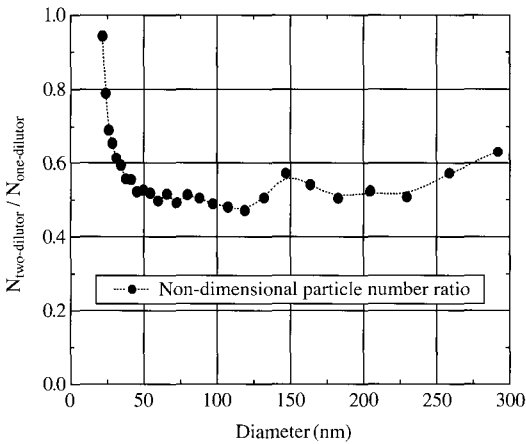
그림 4(a)는 측정된 디젤 입자의 입경 분포 변화를 나타낸 것인데, 2단 회석장치는 약 200 nm 이하의 입자개수의 농도를 대부분 감소시키지만, 매우 작은 크기인 약 15 nm 부근에서는 증가하는데, 이는 2단 회석장치의 영향보다는 적용된 엔진조건 및 측정시



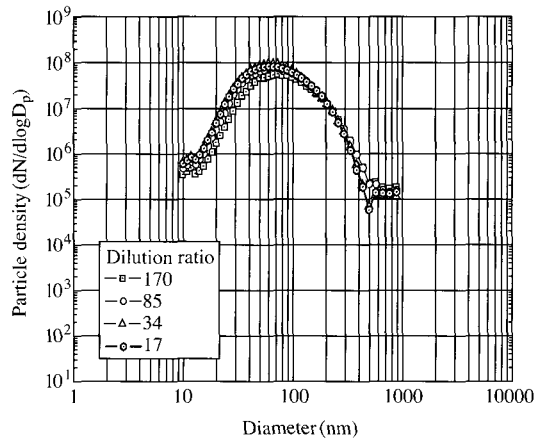
(a) Diesel particle number density



(a) Particle number concentration (Not consider dilution ratio)



(b) Ratio of non-dimensional particle number density



(b) Particle number concentration (Consider dilution ratio)

Fig. 4. Effect of dilution ratio on Diesel nano-particle number concentration.

Fig. 5. Calculated particle number concentration for different dilution ratios.

스택의 측정 가능한 등가직경의 특성에 기인하는 것으로 판단된다.

그림 4(b)는 1단 희석하는 경우에 대한 2단 희석하는 경우의 입자 개수 감소율을 나타낸 것이다. 앞서 기술한 바와 같이, 이를 통해 상대적으로 희석비가 높은 경우, 희석비가 낮은 경우에 비해 디젤 극미세입자의 개수농도가 감소함을 알 수 있었다. 이러한 희석비의 영향을 보다 자세히 고찰하기 위해서, 희석비 제어에 용이한 캐비티 회전형 희석장치의 가변저항기를 조절하여 희석비를 17:1에서 최대 170:1까지 변화시켜 구한 결과를 그림 5에 나타내었다. 이

경우, 본 연구에서는 희석장치의 온도는 상온으로 유지하였으며, 캐비티가 10개인 회전판을 사용하였다. 엔진운전조건은 엔진회전수 1,600 rpm, 부하는 전 부하(full load) 상태로 설정하였다. 그림 5(a)는 실제 측정된 디젤 극미세입자의 개수 농도분포인데, 희석비가 증가할수록 실제 측정되는 배출가스의 단위 체적당 극미세입자의 개수는 감소함을 알 수 있었다. 그림 5(b)는 그림 5(a)의 실제 측정된 입자의 개수 농도에 희석비를 고려하여 산출한 배출가스중의 디젤 극미세입자 개수 농도분포를 나타낸 것이다. 그림 5(a)

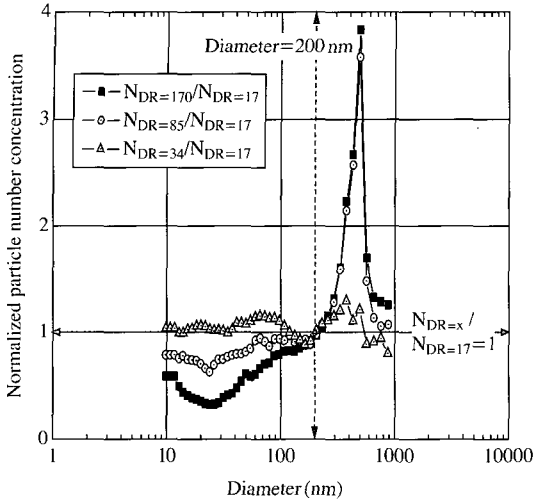


Fig. 6. Normalized particle number concentration for different dilution ratios.

와 비교해 볼 때, 희석비에 따라 디젤 극미세입자의 입경 분포 차이는 현저히 변화됨을 알 수 있었다.

그림 6은 이상의 각 희석비별로 측정된 입자개수 농도를 희석비 17:1에서 측정된 입자개수농도로 나눈 값들의 분포를 나타낸 것이다.

이는 희석비와 입자 크기 및 농도분포 사이의 상관관계를 해석할 수 있는 중요한 분석인자에 해당된다. 그림에서 보듯이 희석비가 감소할수록 극미세입자의 입경이 200 nm 이하인 입자들의 개수 농도는 증가하며, 200 nm 이상인 입자들의 개수 농도는 감소함을 알 수 있었다. 이는 희석비가 감소하면 배출가스 중의 용해성 유기물(SOF) 및 수분의 분압이 희석비가 높을 때보다 증가하여 이들의 응축이 활발해지며, 이에 따라 입경이 200 nm 이하인 입자들의 개수 농도가 증가하는 것으로 판단이 된다.

#### 4.2 희석공기의 온도 영향

그림 7은 엔진회전수 785 rpm (idle상태)에서 2개의 이젝터형 희석장치를 직렬로 연결한 2단 희석시스템(희석비 78.5:1)에서 첫번째 희석장치의 희석공기를 25°C로 가열하여 얻은 결과를 기준으로 100°C와 200°C로 가열 공급하는 경우의 디젤 극미세입자 개수가 어떻게 변화하는지에 대해서 살펴본 것이다. 이 경우에 있어서, 두 번째 희석장치의 2단 희석

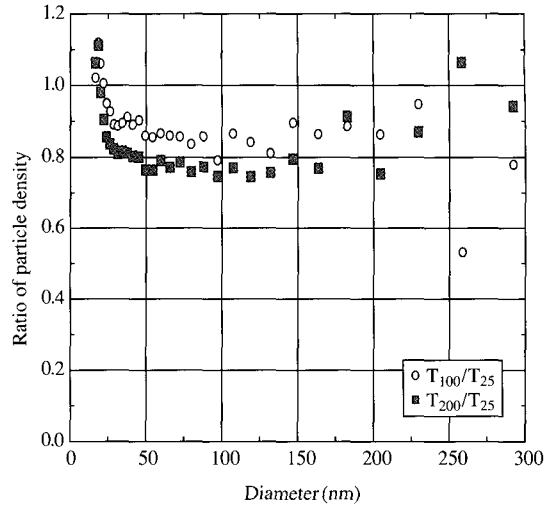


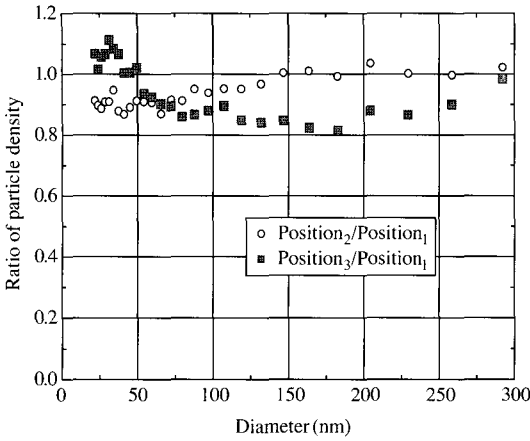
Fig. 7. Effect of dilution air temperatures.

공기의 온도는 상온(25°C)으로 유지하였다. 우선 희석공기의 온도를 가열하는 경우, 디젤 입자의 개수는 감소함을 알 수 있었다.

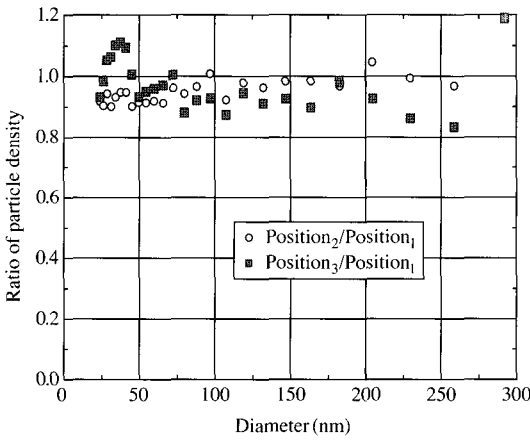
특히, 희석공기의 온도를 25°C에서 200°C로 가열하는 경우, 디젤 입자의 개수는 약 0.2배 정도 감소한다. 이는 희석공기의 온도가 높아지면 샘플 가스 중의 미연탄화수소 등의 휘발성 성분과 황 성분의 응축이 억제되어 발생하는 현상으로 판단이 된다. 즉, 1단 희석장치 온도가 증가할수록 배출가스 온도에 영향을 미치는데, 이를 통해 배출가스중에 가스상으로 존재하던 일부 성분이 고체 입자로 전환하기 어려운 조건이 형성되어 전체적인 입자개수밀도는 감소하게 된다.

#### 4.3 엔진 배기관내 측정위치별 영향

그림 8은 앞서 기술한 희석 조건(희석비 78.5:1, 1차 희석온도=200°C, 2차 희석온도=25°C)과 동일한 경우, 그림 3(a)의 측정점 1을 기준으로 측정점 2와 3에서 측정된 디젤 극미세입자의 개수 농도분포를 2가지 엔진회전수별(엔진회전수 785 rpm, 1,600 rpm)로 측정 후, 측정점 1의 데이터값으로 무차원화해서 나타낸 것이다. 이미 기술한 바와 같이, 측정점 1은 터보차저의 하류 140 cm 지점에 위치하며, 측정점 2와 3은 측정점 1과 2로부터 각각 70 cm 후방에 위치한다. 그림 8(a)는 엔진회전수 1,600 rpm (전부하)



(a) Engine speed : 1,600 rpm (Full load)



(b) Engine speed : 785 rpm (Idle)

Fig. 8. Effect of particle measuring position in the exhaust pipe of Diesel engine.

조건에서 측정된 결과로서, 측정 위치에 따라서 측정되는 디젤 극미세입자의 개수 농도는 매우 큰 차이가 있음을 알 수 있었다. 특히, 측정점 3의 결과는 측정점 1의 결과와 비교하였을 때 약 50 nm 미만의 작은 크기의 입자들의 개수 농도는 증가하는 반면에, 약 50 nm 이상 입자들의 개수 농도는 약 0.3배 정도 감소함을 알 수 있었다. 이러한 특성은 엔진 운전조건을 아이들 상태로 해서 구한 그림 8(b)에서 보듯이, 엔진회전수에 관계없이 유사한 경향을 나타냄을 알 수 있었다. 이는 엔진 배기관 하류에서 배출가스

가 냉각됨에 따라 수분 및 용해성 유기물 등이 응축되어 작은 입자가 생성되기 쉬운 환경이 될 것으로 판단된다. 그리고 배출가스 내에 존재하는 입자들이 배기관을 통해 이동하면서 상호간의 충돌 유착되어 개수농도가 감소하면서 성장하게 된다. 이러한 복잡한 과정에 의해서 디젤 극미세입자의 입경분포는 엔진 배기관내 측정 위치마다 다르게 측정되는 것으로 사료된다.

### 5. 결 론

현행 입자상물질의 중량측정법을 적용하여, 관련 배기규제를 만족하는 경유승용차는 향후 본격적으로 후처리장치(DPF)를 장착하여 친환경 자동차로서의 이미지로 새롭게 변모하고 있으며, 향후, 관련 산업에도 지대한 영향을 미칠 것으로 판단이 된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 상황을 보다 극대화하기 위해 간과할 수 없는 사항중 하나인, 디젤 극미세입자의 배출 특성을 주요 입자측정 인자들 즉, 회석장치, 회석비, 회석공기 온도 그리고 측정 위치별로 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 디젤 극미세입자 측정시 필수적인 회석장치에 있어서, 캐비티 회전형 회석장치는 이젝터형 회석장치에 비해 엔진배기관의 압력에 의해 회석비가 변하지 않으며, 또한 넓은 범위의 회석비 조절이 가능하기에 실제 디젤엔진을 대상으로 한 극미세입자 측정에 상대적으로 적합함을 알 수 있었다.

2. 디젤입자 측정 특성인자중에서 회석비의 경우, 이를 감소시키면 배출가스 중의 SOF 및 H<sub>2</sub>O의 응축이 활발해져서 극미세입자의 입경이 200 nm 이하인 입자들의 개수 농도는 증가하였다. 반면에 회석공기의 온도를 높이는 경우, SOF 및 H<sub>2</sub>O의 응축이 억제되어 입경이 큰 디젤 입자의 개수 밀도는 약 0.2배 (25°C에서 200°C로 가열하는 경우) 정도 감소하였다.

3. 또한 디젤 극미세입자의 입경 분포는 측정 위치에 따라서 변할 수 있음을 알 수 있었다. 실험에 적용된 측정점 1과 3지점에 있어서, 엔진 배기관의 하류방향에서 측정할수록 약 50 nm 미만의 작은 크기의 입자들의 개수 농도는 증가하나, 약 50 nm 이상 입자들의 개수 농도는 약 0.3배 정도 감소하였다.

향후, 이들 디젤 극미세입자에 대한 보다 명확한

측정 특성 (입자채취온도, 희석율, 습도, 채취기간 등) 을 확립하여 이의 대기질 및 인체 영향과 연계함으 로써, 대도시 대기환경 개선 및 국민건강 증진을 위 한 국가정책 수립에 필요한 과학적 근거를 제공하고 자 한다.

### 감사의 글

본 연구는 환경부 (무 · 저공해자동차사업단)의 ECO-STAR Project내 공통기반기술과제 (연구과제명: 극미세입자 평가관리 기반구축)의 연구비로 수행되 었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

### 참 고 문 헌

김민철, 권순박, 이규원, 김종춘, 정일록, 류정호, 엄명도 (1999) 디젤엔진에서 배출되는 미세입자의 크기 분포, 한국대기환경학회지, 15(5), 657-665.

김홍석, 이상수, 조규백, 성낙원, 정용일 (2003) ELPI와 SMPS 를 이용한 디젤엔진 입자상물질 측정 특성 비교, 한국자동차공학회 2003년도 추계학술대회논문집, 285-291.

박덕신, 김태오, 김동술 (2003) 디젤기관차 엔진에서 배출되

는 입자의 특성분석, 한국대기환경학회지, 19(2), 133-143.

Abdul-Khalek, I.S. and D.B Kittelson (1998) Diesel Trap Performance: Particle Size Measurements and Trends, University of Minnesota, SAE paper, 982599.

Andrew, G.E., A.G. Clarke, N.Y. Rojas, T. Sale, and D. Gregory (2001) Diesel Particle Size Distribution: the Conversion of Particle Number Size Distribution to Mass Distribution, SAE paper, 2001-01-1946.

Donaldson, K., X.Y. Liu, and W. MacNee (1998) Ultrafine (Nanometre) Particle Mediated Lung Injury, J. Aerosol Science, Vol. 29, pp. 553-560.

Gulijk, C.V., J.C. Marijnissen, M. Makkee, and J.A. Moulijn (2003) The Choice of Instrument (ELPI and/or SMPS) for Diesel Soot Particulate Measurements, SAE paper, 2003-01-0784.

Kasper, M., U. Matter, and H. Burtscher (2001) NanoMet: On-line Characterization of Nanoparticle Size and Composition, SAE paper, 2001-01-1998.

Pagan, J. (1999) Study of Particle Size Distributions Emitted by a Diesel Engine, SAE paper, 1999-01-1141.

Suresh, A. and J.H. Johnson (2001) A Study of the Dilution Effects on Particle Size Measurement from a Heavy-Duty Diesel Engine with EGR, SAE paper, 2001-01-0220.