

## SMPS와 TR-DMPS를 이용한 도로변 초미세 입자 모니터링 결과의 비교

### Comparison of Ultrafine Particles Monitored at a Roadside Using an SMPS and a TR-DMPS

우대광<sup>1)</sup> · 이승복 · 배귀남\* · 김태성<sup>1),2)</sup>

한국과학기술연구원 환경기술연구단,

<sup>1)</sup>성균관대학교 성균나노과학기술원, <sup>2)</sup>성균관대학교 기계공학부

(2007년 12월 31일 접수, 2008년 7월 21일 채택)

Daekwang Woo<sup>1)</sup>, Seung-Bok Lee, Gwi-Nam Bae\* and Taesung Kim<sup>1),2)</sup>  
Center for Environmental Technology Research, Korea Institute of Science and Technology  
<sup>1)</sup>SKKU Advanced Institute of Nanotechnology (SAINT), Sungkyunkwan University  
<sup>2)</sup>Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

(Received 31 December 2007, accepted 21 July 2008)

#### Abstract

A Transient Differential Mobility Particle Spectrometer (TR-DMPS) with a short response time was recently developed to monitor high concentration of ultrafine particles emitted from vehicles. To investigate the availability of the TR-DMPS for monitoring transient roadside aerosols, the number size distribution of ultrafine particles was monitored at the Cheongnyangni roadside in Seoul on March 23, 2007 together with a Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS). The roadside aerosols were monitored every 5 min and 0.1 sec by using the SMPS and the TR-DMPS, respectively. The concentration of ultrafine particles at the roadside was highly fluctuated for a short duration. From the comparison of particle number concentrations and size distributions between two instruments, it was confirmed that the SMPS provided fairly good time-averaged number size distribution although it did not follow rapid change of particle number concentration at the roadside. The TR-DMPS quickly responded to a rapid change of particle number concentration due to abrupt traffic flow. However, the TR-DMPS frequently showed electrical noise events, resulting in underestimated particle contamination. A more stable operation of the TR-DMPS is needed in application of roadside aerosol monitoring.

**Key words** : SMPS, TR-DMPS, Ultrafine particle, Size distribution, Roadside

#### 1. 서 론

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-958-5676, E-mail : gnbae@kist.re.kr

입자상 물질 (particulate matter)은 생성 과정의 차

이에 따라 1차 입자(primary particle)와 2차 입자(secondary particle)로 분류된다. 1차 입자는 대부분 자동차, 선박, 항공기 등과 같은 이동 오염원, 공장, 발전소의 굴뚝 등 고정 오염원으로부터 직접 배출되거나 화산 폭발, 산불 등 자연 재해시 발생된다. 2차 입자는 대기 중에서 광화학 반응에 의해 가스상 물질이 입자상 물질로 변환되어 생긴다. 지난 십여 년 동안 전염병 학제는 대기 중 입자상 물질의 노출이 인체에 큰 위협이 될 것이라고 주장하고 있다. 특히, 입자상 물질에 대한 장시간 노출이 호흡기관과 심장 혈관에 많은 부담을 주므로 노출시간이 사망률의 증가와 관계가 있고, 자동차에서 배출되는 디젤 입자 등은 잠재적으로 암을 유발시킬 수 있다고 보고되었다(Samet *et al.*, 2000; Ishinishi *et al.*, 1986). 또한, 독성학 연구를 통해 단위 질량당 넓은 표면적을 갖는 초미세 입자는 상피 세포에 침투하여 인체에 위험하다고 경고하고 있다(Oberdorster, 2001). 초미세 입자는 단위 질량당 수 농도가 매우 높기 때문에 100 nm 이상의 미세입자보다 더 위험할 수 있다. 그러므로 최근에는 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>와 같이 질량 농도를 기초로 한 연구뿐만 아니라 입경별 수 농도 또는 표면적을 이용하여 대기 에어로졸의 특성을 나타내고 있다(Watson *et al.*, 2006; Shuichi *et al.*, 2004; Woo *et al.*, 2001a).

자동차는 도시에서 대기 중 입자상 물질의 주요 배출원 중 하나이다(배귀남 등, 2007). 보통 100 nm보다 작은 입자를 초미세 입자로 정의하는데, 이들 대부분은 엔진의 연소과정에 의해 생성된다. 최근 실험실에서 차대동력계를 이용하여 입자의 크기분포를 측정하는 연구가 많이 수행되고 있다. 배출된 입자의 크기분포는 엔진의 속도, 연료의 품질, 후처리 장치와 같은 다양한 변수에 따라 달라질 수 있다. 실제 도로 주행 중에는 운전조건뿐만 아니라 배기관에서 확산과 회석으로 인한 기존 입자와의 충돌, 가스 전구체로부터 응축에 의한 입자의 생성, 응고, 응집 등이 일어나 입자의 크기분포는 크게 달라진다(Zhang and Wexler, 2004; Kittelson *et al.*, 1988). 그러므로 대기 중 초미세 입자의 특성을 이해하기 위해서는 다양한 조건에서 차대동력계를 이용한 연구뿐만 아니라 실제 도로 근처에서 연구도 중요하다.

최근 국내외적으로 대기 중 초미세 입자의 특성을 밝혀내려는 연구가 많이 수행되고 있다. 유럽에서는 Tuch *et al.* (2003)이 SMPS(Scanning Mobility Particle

Sizer)와 TDMPS(Twin Differential Mobility Particle Sizer)를 이용하여 독일의 Erfurt와 Leipzig에서 5년 동안 초미세 입자를 측정하여 두 도시의 배경 입경분포 및 계절별 입경분포 특성을 밝혀내었다. Woo *et al.* (2001b)은 SMPS와 NSMPS(Nano-Scanning Mobility Particle Sizer)를 이용하여 13개월 동안 대기질을 모니터링하여 미국 애틀랜타시 대기 중 초미세 입자의 특성을 밝혀내었다.

한편, 국내에서는 김필수 등(1991, 1988, 1986)이 EAA(Electrical Aerosol Analyzer)로 0.01~1 μm 범위의 서울 대기 에어로졸의 크기분포를 측정하였으며, 배귀남 등(2003)은 2001년 겨울철 서울에서 SMPS와 APS(Aerodynamic Particle Sizer)를 사용하여 0.02~10 μm 범위인 대기 에어로졸의 입경분포를 측정하였다. 김용민과 안강호(2005)는 SMPS를 이용하여 안산지역 대기 중 0.03~0.5 μm 범위의 초미세 입자를 측정하였다. 이들 연구는 도시의 일반 대기 에어로졸에 관심을 두어 자동차에 의한 오염 현상을 직접적으로 이해하는 데 한계가 있다.

최근 배귀남 등(2007)은 연세대학교 정문 앞 성산로의 도로변에서 SMPS로 초미세 입자를 측정하여 자동차의 통행량, 기상 요인 등에 따라 달라지는 일변화 오염 특성을 밝혀냈다. 특히 초미세 입자의 농도와 크기분포가 짧은 시간 동안에도 매우 빠르게 변하므로, SMPS보다 빠른 반응시간을 갖는 측정장비의 필요성을 제기하였다.

현재 디젤 엔진에서 배출되는 입자를 실시간으로 측정하기 위해 DEKATI의 ELPI(Electrical Low Pressure Impactor), TSI의 EEPS(Engine Exhaust Particle Sizer), GRIMM의 TR-DMPS(Transient Differential Mobility Particle Spectrometer) 등이 사용되고 있다. Abu-Qudais *et al.* (2001)은 SMPS, MOUDI(Micro-Orifice Uniform Deposit Impactor) 및 LPI(Low Pressure Impactor)를 이용하여 차대동력계에서 엔진의 회전수를 변화시켜 질량농도를 측정하였고, MOUDI와 SMPS로 측정된 입경분포를 비교하여 두 장비 사이에 정량적인 오차가 있음을 밝혀내었다. Zervas and Dorlhene(2006)은 CPC(Condensation Particle Counter), ELPI 및 EEPS를 사용하여 정상 상태의 엔진에서 배출되는 입자의 크기분포를 실시간으로 측정하였다. 현재 ELPI, EEPS를 이용한 대부분의 연구는 차대동력계를 이용한 자동차 배출가스의 입경분

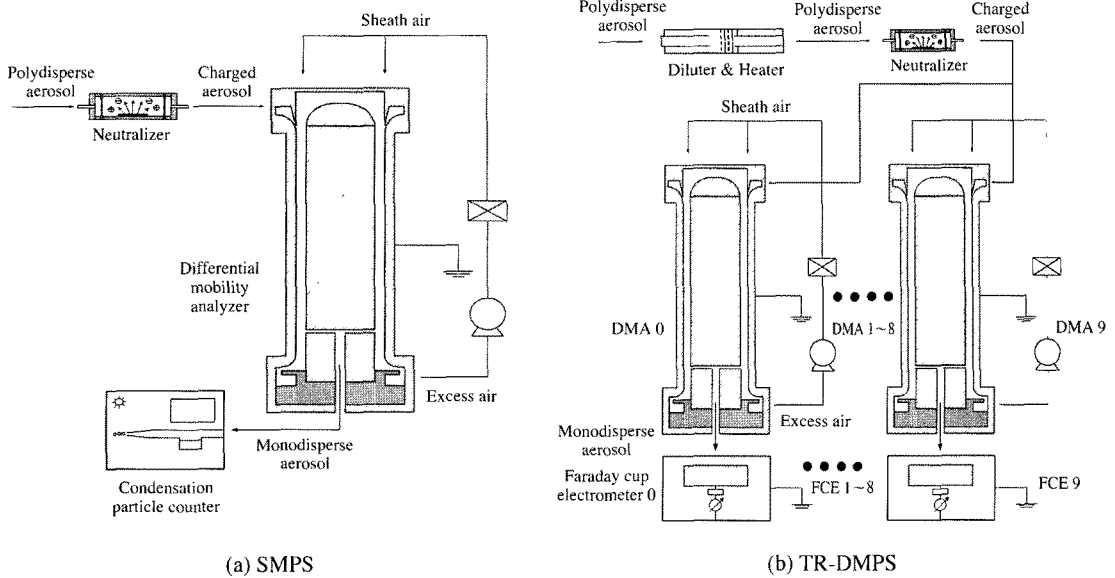


Fig. 1. Schematics of aerosol monitoring instruments used in this study.

포 특성을 다루고 있다. 이들 장비를 이용하여 도시의 도로변에서 입자 오염 특성을 파악한 연구는 거의 알려져 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 일반적으로 초미세 입자의 크기분포 측정에 많이 사용되고 있는 SMPS와 자동차 배출 초미세 입자를 신속하게 측정하기 위하여 최근에 개발된 TR-DMPS를 사용하여 2007년 3월에 서울시 동대문구 청량리동에 위치한 청량리 로터리의 도로변에서 초미세 입자를 모니터링하였다. SMPS와 TR-DMPS의 측정 입경 범위는 각각 14~710, 10~571 nm이었는데, 측정된 입자를 초미세 입자(20~100 nm)와 미세입자(100~570 nm)로 구분하여 수농도의 일변화 특성을 살펴보고(배귀남 등, 2007), SMPS와 TR-DMPS로 측정한 수농도 및 입경분포 결과를 비교하여 도로변 측정시 이들 측정장비의 장단점을 비교하였다.

## 2. 측 정

### 2.1 측정장비의 특성 비교

본 연구에서 사용한 SMPS (TSI model 3936)와 TR-DMPS (GRIMM FAPES 5.600)의 개략도를 비교하

여 그림 1에 나타냈다. SMPS와 TR-DMPS의 가장 큰 차이점은 DMA (Differential Mobility Analyzer)의 개수와 수 농도 측정 부분이다. SMPS는 그림 1(a)와 같이 다분산 입자를 크기에 따라 단분산 입자로 분급할 수 있는 DMA와 입자의 수 농도를 측정할 수 있는 CPC로 구성되어 있으며, 다양한 대전량을 갖는 다분산 입자를 평균적으로 중성에 가까운 평형 대전량 분포(Boltzmann charge distribution)로 만들어 주는 중화기(neutralizer)가 DMA 앞에 설치되어 있다.

TR-DMPS는 자동차 배기관에서 배출되는 고농도의 입자를 신속하게 측정하기 위하여 개발된 장비인데, 그림 1(b)와 같이 DMA, FCE (Faraday Cup Electrometer) 및 중화기로 구성되어 있다. 고온, 고농도의 입자를 측정하기 위하여 1:5.71~1:40의 희석비를 갖는 희석기(diluter)와 500°C까지 온도를 높일 수 있는 가열기(heater)로 구성된 샘플링 프로브를 중화기 앞에 연결하여 사용하고 있다. DMA에 전압을 순차적으로 인가하는 SMPS와 달리 반응 시간(response time)을 짧게 하기 위하여 병렬로 연결된 10개의 DMA에 고정된 전압을 인가하기 때문에 SMPS보다 약 300배 빠르게 입경분포 데이터를 얻을 수 있다. TR-DMPS는 입경을 21개의 채널로 구분하고, SMPS는 본 측정조건에서 110개의 채널로 입경을 구분하

므로, SMPS가 TR-DMPS에 비해 보다 자세한 입경 분포 정보를 제공한다.

FCE는 입자의 대전량을 측정하는 장비로, DMA를 통과하면서 1가로 대전된 입자의 대전량을 측정하여 수 농도를 제공한다. 그러나 FCE는  $10^3 \sim 10^4$ 개/cm<sup>3</sup> 이하의 저농도에서 측정되는 전류가 낮아 전기적 노이즈 때문에 CPC에 비해 정확도가 떨어지므로, 소프트웨어를 통한 노이즈 저감 필터링이 필요하다. 현재 GRIMM의 TR-DMPS 구동 소프트웨어에는 각기 다른 알고리즘의 7가지 소프트웨어 필터가 있으며, 본 연구에서는 7가지의 소프트웨어 필터 중 제작사의

권고에 따라 필터1을 사용하여 데이터를 처리하였다. 본 연구에 사용된 SMPS와 TR-DMPS의 주요 사양과 작동 조건을 비교하여 표 1에 나타냈다.

2.2 도로변 모니터링 방법

본 연구에서는 2007년 3월 23일(금) 오전 3시부터 7시까지 4시간 동안 서울시 동대문구 청량리동에 위치한 청량리역 로터리의 도로변에서 SMPS와 TR-DMPS로 입경별 수 농도 분포를 측정하였다(그림 2). 이곳은 국가에서 운영하는 청량리 도로변 측정소와 동일한 도로변에서 약 50 m 떨어진 위치이다. 그림 3은 청량리 도로변 측정위치 주변의 모습을 나타낸 것이다. 청량리는 경기도 동북부 지역과 서울을 연결하는 대표적인 서울의 부심으로 교통이 매우 혼잡한 지역이다. 경기도 동북부 지역을 운행하는 많은 버스들이 회차하는 위치이고, 지하철 1호선 지하 전철역과 지상 전철역이 있고, 중앙선과 경원선의 출발역으로 많은 인파가 모여드는 곳이다. 또한, 서울의 강북 중심에서 구리, 남양주 방향으로 운행하는 차량이 통과하는 지역이다.

Table 1. Specifications and operating conditions of aerosol monitoring instruments used in this study.

Items	SMPS	TR-DMPS
Neutralizer	Kr-85	Am-241
Particle size range (nm)	14~710	10~571
Aerosol flow rate (L/min)	0.3	1.6 for each DMA
Sheath flow rate (L/min)	3	8 for each DMA
Measuring time per scan (sec)	240	0.1
Particle size resolution (channels)	110	21

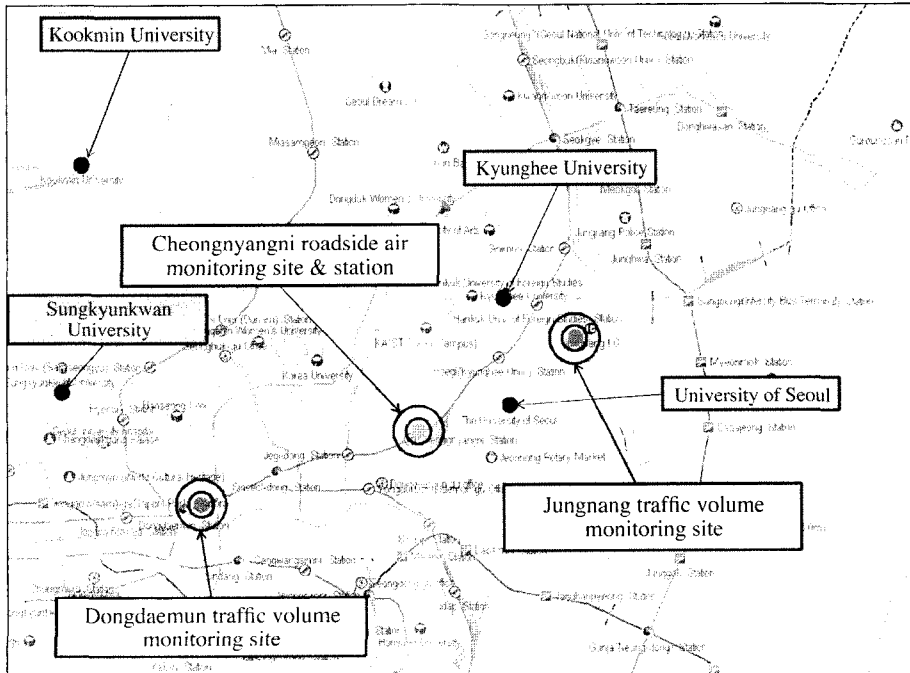


Fig. 2. Location of the Cheongnyangni roadside air monitoring site.



Fig. 3. View around the Cheongnyangni roadside air monitoring site ( $\Delta$ ).

SMPS (TSI model 3936)는 DMA (TSI model 3081)와 CPC (TSI model 3025A)로 구성되어 이동식 캐비닛 내부에 설치하였으며, 지면으로부터 약 2 m 높이에 흡입관을 설치하여 진공펌프로 등속 흡입하였다. 이 중 0.3 L/min를 SMPS의 샘플링 유량으로 사용하였으며, 14~710 nm 범위인 입자를 240초(up scan: 180 sec, retrace: 60 sec) 동안 측정하였고, 측정 시간을 포함하여 5분마다 측정하였다.

TR-DMPS (Grimm FAPES 5.600)는 별도의 캐비닛 없이 SMPS 캐비닛 옆에 설치하여 자체 샘플링관을 통해 1.6 L/min으로 도로변 대기를 샘플링하였으며, 10~571 nm 범위인 입자를 0.1초마다 측정하였다. TR-DMPS는 샘플링관에 별도의 회석장치와 히터가 장착되어 있는데, 강제적으로 회석하지 않을 경우 장비 내부의 유량 조절에 문제가 발생할 수 있으므로 본 연구에서는 1:5.71의 비율로 회석하였으며 데이터 처리시 회석비를 반영하였다. 또한, 샘플링관이 60°C로 가열된 상태에서 측정하였다. 측정장비의 오류로 인해 오전 6시 40분의 SMPS 데이터를 얻지 못하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 수 농도 특징

2007년 3월 23일 (금) 오전 3시부터 7시까지

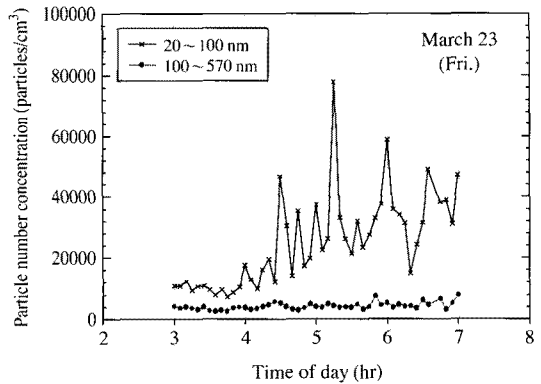


Fig. 4. Variation of particle number concentrations at the roadside on March 23, 2007.

SMPS로 측정된 도로변 에어로졸을 초미세 입자(20~100 nm)와 미세입자(100~570 nm)로 구분하여 수 농도의 변화를 그림 4에 나타내었다. Matthias *et al.* (2003)이 코펜하겐에서 측정하였던 도로변 결과와 유사하게 본 연구에서도 전체적으로 수 농도가 짧은 시간 동안 매우 큰 폭으로 변하고 있음을 확인하였다. 미세입자에 대한 초미세 입자의 농도비가 2~18로 초미세 입자가 이러한 변화를 주도하고 있음을 알 수 있다. 이것은 측정위치가 자동차 배출가스의

**Table 2. Comparison of total concentrations measured by an SMPS and a TR-DMPS.**

Time on March 23, 2007	Ultrafine particles (10~100 nm, particles/cm <sup>3</sup> )		Ratio (TR-DMPS /SMPS)	Fine particles (100~570 nm, particles/cm <sup>3</sup> )		Ratio (TR-DMPS /SMPS)
	SMPS	TR-DMPS		SMPS	TR-DMPS	
3:00~4:00	9966±2422*	7689±7501	0.73	3466±565	4385±4091	1.27
4:00~5:00	22259±10953	20945±19685	0.94	4098±845	5477±9466	1.34
5:00~6:00	35073±15466	36358±44288	1.04	4506±1029	5543±3322	1.23
6:00~7:00	36257±11060	37321±26409	1.03	4955±1340	6506±8170	1.31

\*average ± standard deviation

영향을 직접적으로 받는 도로변이기 때문이라고 생각된다. 모니터링 기간 동안 초미세 입자의 수 농도는 7,345~77,706개/cm<sup>3</sup>, 미세입자의 수 농도는 2,503~7,805개/cm<sup>3</sup> 범위이었다.

새벽 3~4시 사이 초미세 입자의 수 농도는 매우 안정적이고, 표 2에 나타난 바와 같이 1시간 평균 수 농도도 9,966개/cm<sup>3</sup>로 낮았다. 4시부터 수 농도가 증가하는 추세를 나타내었다. 미세입자도 시간이 경과함에 따라 서서히 증가하였으나 수 농도의 증가율은 초미세 입자에 비해 낮았다.

SMPS와 TR-DMPS의 도로변 에어로졸 측정 특징을 비교하기 위하여 3월 23일 오전 3시부터 7시까지 측정된 입자를 초미세 입자(20~100 nm)와 미세입자(100~570 nm)로 구분하여 각 시간대의 측정자료를 비교하여 그림 5에 나타냈다. SMPS 측정값과 비교하기 위하여 TR-DMPS 데이터의 5분 평균값을 함께 나타냈다. 예상대로 TR-DMPS는 짧은 시간 동안 빠른 농도 변화를 나타내고, 순간적으로 매우 높은 농도도 빈번하게 측정하고 있음을 알 수 있다. 대체로 SMPS의 수 농도는 TR-DMPS의 5분 평균 수 농도와 비슷한 수준을 나타내고 있다. 특히, 4~6시 사이 TR-DMPS로 측정된 초미세 입자의 수 농도는 매우 뚜렷한 변화 경향을 나타냈는데, SMPS와 TR-DMPS의 5분 평균 수 농도가 대체로 잘 일치하고 있다.

각 시간대별 평균 수 농도와 표준편차를 비교하여 나타낸 표 2를 보면, 초미세 입자의 경우 수 농도가 가장 낮은 3~4시 사이에 TR-DMPS가 SMPS에 비해 약 27% 낮게 측정하였지만, 4시 이후에는 1시간 평균 수 농도의 편차가 ±6% 이내로 매우 적었다. 미세입자의 경우 모든 시간대에 TR-DMPS의 수 농도가 SMPS에 비해 23~34% 높았다. 도로변 에어로

졸 농도는 개별 자동차의 통행에 따라 달라지는 비정상 상태 현상을 반영하므로, 표준편차가 크게 나타난 것으로 생각된다. TR-DMPS는 electrometer의 특성상 전기적 노이즈가 생기면 수 농도를 100개/cm<sup>3</sup>로 나타낸다. Electrometer의 노이즈 수준이 10<sup>3</sup>~10<sup>4</sup>개/cm<sup>3</sup>이므로, 이보다 높은 수 농도에서 노이즈 발생률은 매우 낮으나 낮은 농도에서는 노이즈가 빈번하게 발생하는 문제점이 있다. 미세입자의 농도가 초미세 입자에 비해 상당히 낮으므로, 더 많은 노이즈가 발생되어 편차가 커진 것으로 추정된다.

도로변에서 입자의 주된 배출원은 자동차이므로, 교통량과 입자 농도의 관계를 살펴보기 위하여 서울지방경찰청 종합교통정보센터로부터 교통량 자료를 입수하였다. 청량리 로터리의 교통량은 모니터링하지 않으므로, 그림 2에 나타난 바와 같이 청량리 로터리를 왕래하는 차량이 가장 많이 통행하는 것으로 추정되는 동대문과 중랑교의 교통량 자료를 입수하여 시간 평균 교통량의 변화를 그림 6에 나타냈다. 일주일(3월 16~22일 0~9시) 평균 교통량과 3월 23일 0~9시 교통량을 구분하여 나타냈다. 2곳 모두 3월 23일 교통량의 일변화는 일주일 평균 교통량의 일변화와 매우 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 중랑교에서 교통량의 일변화는 동대문에 비해 뚜렷하게 나타났고, 일평균 교통량도 2배 이상 많았다. 경기도 동북부 지역과 청량리 사이를 왕래하는 교통량이 이러한 차이가 나는 원인 중의 하나일 것으로 추정된다. 즉, 청량리 로터리의 교통량은 중랑교에 비해 적지만, 동대문에 비해 많을 것으로 추정된다.

그림 6을 보면, 교통량은 아침 3~6시 사이에 가장 적었으며, 아침 6시 이후로 출근 시간대가 되면서 9시까지 급격하게 증가하였다. 중랑교에서 교통량의 일변화 경향은 서울의 주요 간선도로의 하나인 성산

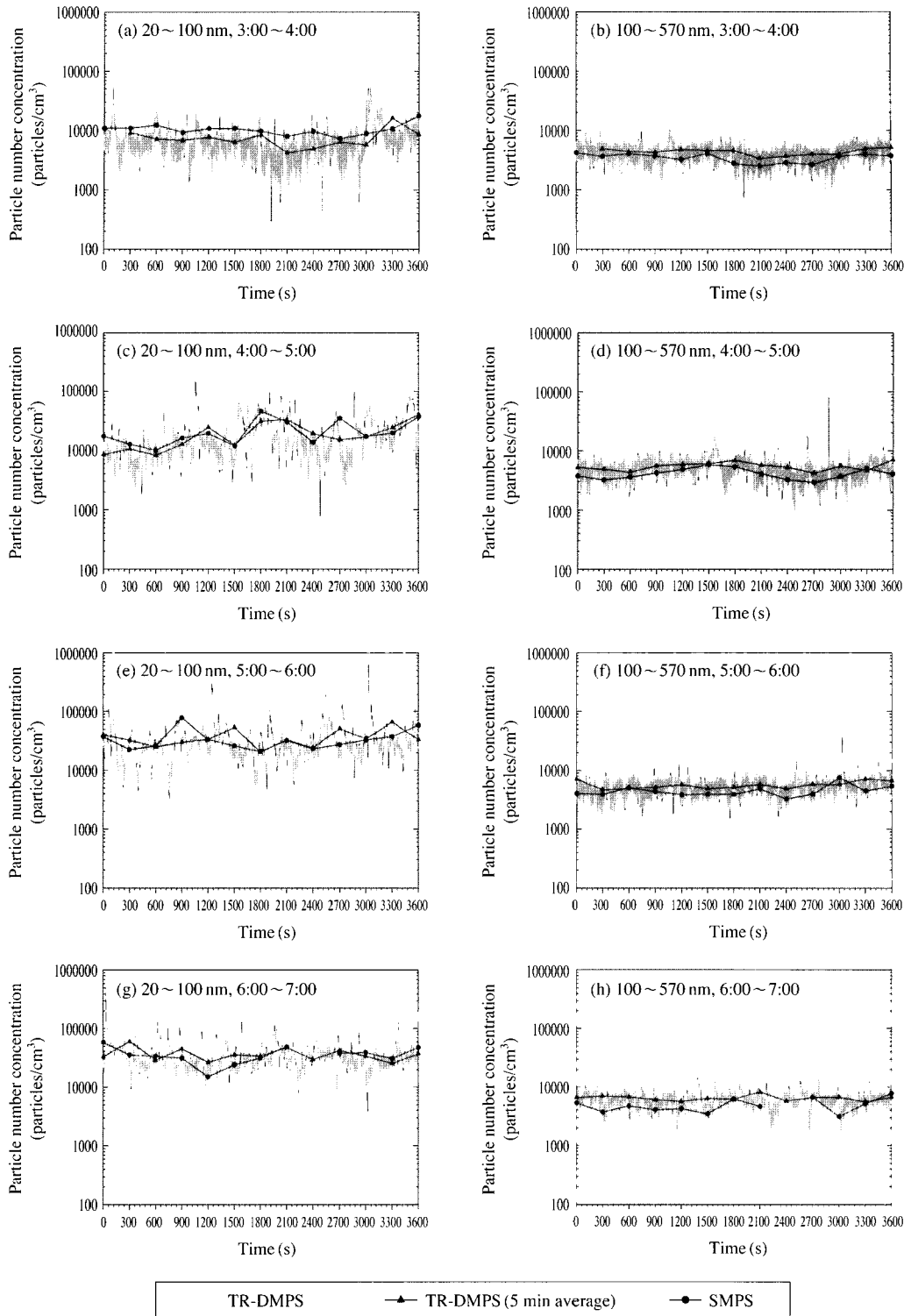


Fig. 5. Comparison of particle number concentrations monitored by using an SMPS and a TR-DMPS on March 23, 2007.

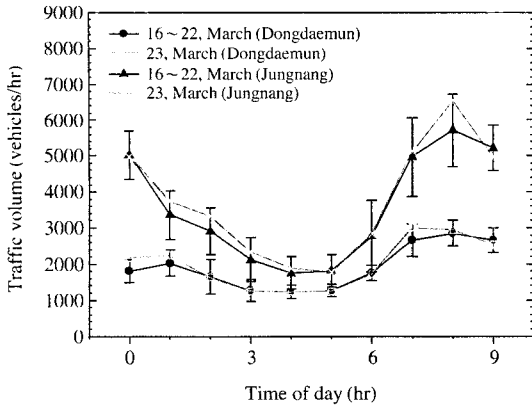


Fig. 6. Variation of traffic volumes on the Dongdaemun and the Jungnang roads in March of 2007.

로의 연회교차로에서 관측한 교통량의 변화와 유사하였다(배귀남 등, 2007; 이승복 등, 2007). 그림 4와 6을 보면, 4시 이후의 수 농도 증가는 교통량의 증가에 기인되는 것으로 추정되며, 주위 교통량 정보에 비해 입자의 수 농도가 측정위치에서 자동차 오염을 보다 잘 반영하는 것으로 판단된다.

3. 2 입경분포 특징

도로변에서 짧은 시간 동안 입자의 수 농도가 급격하게 변화하였는데, 이러한 변화를 주도하는 입자의 크기를 파악하기 위하여 3월 23일 3시부터 7시까지 SMPS로 측정된 시간 경과에 따른 입경분포의 변화를 그림 7에 나타내었다. x축은 시간, y축은 입경, color contour는 입자의 수 농도를 나타낸다.  $dN/d\log D_p$ 는 채널별 입경 간격을 고려하여 측정된 수 농도를 나타낸 것으로, 입자의 크기분포를 표현할 때 많이 사용하는 방법이고, SMPS의 소프트웨어에서 제공한  $dN/d\log D_p$  값을 이용하였다.

도로변에서 80 nm 이하인 초미세 입자가 높은 농도로 빈번하게 관측되고 있으며, 23일 새벽 3~4 사이에는 교통량이 적어 높은 농도의 입자가 관측되지 않았다. 4시가 지나면서 20 nm 이하의 입자들이 고농도로 관측되었으며, 출근시간이 다가오면서 100 nm 이하의 초미세 입자들이 점차 증가하였다. 이러한 특징은 배귀남 등(2007)이 연세대 앞 도로변에서 측정한 결과와 유사하다.

SMPS와 TR-DMPS로 측정된 도로변 입자의 크기

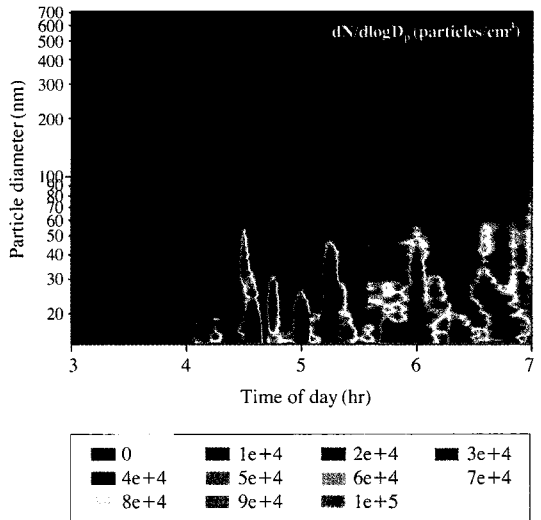


Fig. 7. Variation of particle size distribution at the roadside on March 23, 2007 with diameter on the vertical axis and particle concentration ( $dN/d\log D_p$ ) represented by color contours.

분포를 비교하기 위하여 3월 23일 오전 3~7시 사이의 1시간 평균 입경분포를 구하여 그림 8에 나타냈다. 새벽 3~4시 사이의 입경분포를 나타낸 그림 8(a)를 보면, SMPS는 100 nm 이하인 초미세 입자의 농도가 비슷한 수준의 평평한 분포를 나타내지만, TR-DMPS는 20 nm 이하와 100 nm 근처에서 농도가 높은 이산형 분포를 나타내고 있다. 오전 4~7시 사이의 입경분포를 나타낸 그림 8(b)~(d)를 보면, 대체로 SMPS와 TR-DMPS의 입경분포가 서로 매우 유사함을 알 수 있다. 즉, 입경이 클수록 수 농도가 낮아지는 단조 감소의 경향을 나타내고 있다. 이러한 비교로부터 대체로 SMPS가 도로변 입자의 평균적인 입경분포를 잘 측정하고 있으며, TR-DMPS는 일부 시간대에 SMPS와 매우 유사한 입경분포를 제공하고 있음을 알았다. TR-DMPS는 하루 중 입자의 수 농도가 가장 낮은 새벽 3~4시 사이에 20 nm 이하인 입자를 잘 측정하였으나, 20~50 nm 범위의 일부 채널에서 SMPS보다 낮게 측정된 것은 이들 채널에서 전기적 노이즈가 발생했을 가능성이 있다.

TR-DMPS와 SMPS는 입자의 측정원리가 약간 상이하므로, TR-DMPS를 도로변 초미세 입자의 측정에 활용하기 위해서는 입경분포의 노이즈가 발생되



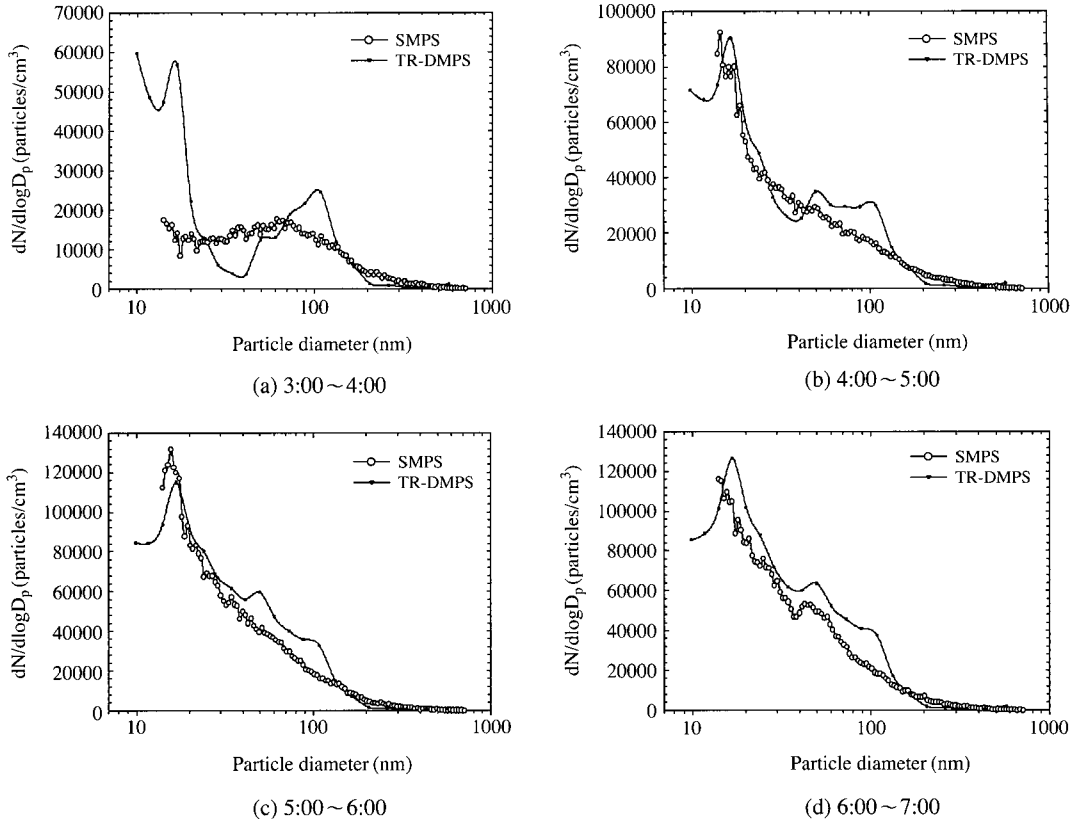


Fig. 8. Comparison of particle size distributions measured by an SMPS and a TR-DMPS on March 23, 2007.

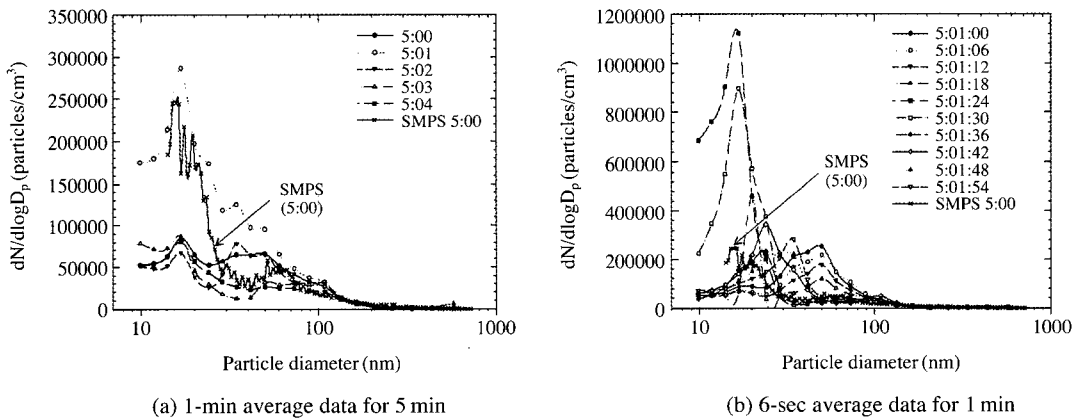


Fig. 9. Comparison of particle size distributions measured by an SMPS and a TR-DMPS around 5:00 on March 23, 2007.

는 조건 및 원인을 실험실 연구 등을 통해 체계적으로 규명할 필요가 있다.

TR-DMPS의 신속한 크기반응 특성을 살펴보기 위하여 SMPS로 측정된 수 농도를 나타낸 그림 4에

서 갑자기 약 2배의 매우 높은 초미세 입자의 농도가 측정된 3월 23일 오전 5시경 SMPS의 입경분포와 1분 평균 TR-DMPS의 입경분포를 비교하여 그림 9(a)에 나타냈다. 다른 시간에 비해 5시 1분에 입자가 가장 높은 농도를 나타내고, 피크 농도를 나타내는 모드 입경도 SMPS의 모드 입경과 매우 비슷하다. 이것은 고농도 현상이 5시 1분경 발생하였음을 의미한다. 이러한 현상을 보다 상세하게 파악하기 위하여 5시 1분부터 2분까지 6초 동안의 평균 입경분포를 구하여 그림 9(b)에 나타냈다. 5시 1분부터 24초 동안 입경분포의 모드 입경은 50 nm이었으나, 24, 30초에 농도가 급격히 증가한 입경분포를 나타내고 모드 입경이 SMPS와 유사하다. 즉, 5시 1분 24~30초 사이에 모드 입경이 약 17 nm인 고농도 오염 현상이 발생하였고, 6초 경과 후 수 농도가 20% 정도 감소하였으며, 12초 후에는 20 nm 이하의 입자가 급격히 감소하여 모드 입경이 약 24 nm로 증가하였다. 이러한 비교로부터 SMPS는 4분 동안 측정하여도 고농도 현상을 평균적인 농도로 모니터링하고, TR-DMPS는 0.1초마다 측정하므로 짧은 시간 동안 일어나는 고농도 오염 현상을 잘 모니터링할 수 있다고 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 TR-DMPS를 도로변의 초미세 입자 측정에 활용할 수 있는 가능성을 파악하기 위하여 SMPS와 TR-DMPS를 사용하여 서울시 청량리 로터리의 도로변에서 2007년 3월 23일 오전 3시부터 4시간 동안 입자의 크기분포를 실시간으로 측정하였다. 이러한 측정을 통하여 도로변의 입자 오염 특징을 파악하였고, SMPS와 TR-DMPS의 수 농도 및 입경분포를 비교하여 두 장비의 특성을 파악하였으며, 이 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

첫째, 도로변은 자동차 배출가스의 영향을 직접적으로 받는 곳이므로, 입자의 수 농도가 짧은 시간 동안 매우 큰 폭으로 변화하였고, 초미세 입자(20~100 nm)의 수 농도가 미세입자(100~570 nm)에 비해 매우 높았다. 새벽 3~4시 사이에 수 농도가 가장 낮았고, 아침 출근 시간대에 수 농도가 급격히 증가하였다.

둘째, 23일 오전 4~7시 사이 TR-DMPS의 5분 평균 수 농도는 SMPS의 수 농도와  $\pm 6\%$  이내로 매우 잘 일치하였고, 이때 1시간 평균 입경분포도 서로 매우 유사하였다. 그러나 오전 3~4시 사이 TR-DMPS의 5분 평균 수 농도는 SMPS의 수 농도와  $-27\%$ 로 큰 차이를 보였고, 1시간 평균 입경분포도 상당한 차이를 보였으며, 20~50 nm 범위의 입경에서 노이즈가 발생한 것으로 추정된다.

셋째, TR-DMPS가 전기적 노이즈의 발생 등으로 아직 안정적인 측정자료를 제공하지 못하지만, SMPS에 비해 매우 빠르게 도로변 초미세 입자의 오염 변화를 추적하고 있음을 확인하였다.

에어로졸은 지구적 규모(기후 변화), 지역적 규모(황사), 국지적 규모(자동차 배출) 등 다양한 측면에서 중요성이 대두되고 있으며, 특히 자동차 배출에 의한 초미세 입자의 인체 노출은 어린이 건강 보호를 위해 중요한 이슈로 부각되고 있다. 그러므로 자동차 배출의 직접적인 영향을 받는 도로변에서 초미세 입자의 노출 특징을 파악하기 위해서는 매우 짧은 시간 동안 급격히 변하는 초미세 입자의 거동을 정확히 측정할 수 있는 장비가 필요하다. 현재 SMPS가 초미세 입자의 크기분포를 실시간으로 측정하는 장비로 널리 사용되고 있는데, 입경분포 측정 시간이 길어 급격히 변하는 도로변 초미세 입자를 추적하는데 한계가 있다.

본 연구에서는 SMPS와 측정 시간이 0.1초로 매우 짧은 TR-DMPS를 도로변 측정에 사용하여 SMPS가 평균적인 수 농도 및 입경분포를 잘 제시하며, TR-DMPS도 신속하게 입경분포를 잘 측정할 수 있음을 확인하였다. 다만 안정적인 측정결과를 얻기 위해서 TR-DMPS에서 발생하는 전기적 노이즈 문제의 원인을 밝혀내고, 실험실 연구 등을 통해 다양한 조건에서 SMPS와 TR-DMPS의 반응 특성을 비교할 필요가 있다.

#### 감사의 글

이 연구는 환경부 Eco-STAR project (무·저공해 자동차사업단)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 김용민, 안강호 (2005) SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer)를 이용한 안산지역 대기중 초미세입자(30 ~ 500 nm) 분포연구, 한국대기환경학회지, 21(3), 295-301.
- 김필수(1988) 서울 대기 Aerosol의 물리적 특성: 가시광선의 산란, 한국대기환경학회지, 4(2), 28-37.
- 김필수, 김윤장, 이양호, 조숙현, 안승태(1986) 도시대기 Aerosol의 입자직경 0.10~1.0 μm 범위의 농도변화 특성, 한국대기환경학회지, 2(2), 41-50.
- 김필수, 오미석, 김의훈(1991) 서울 대기 에어로솔의 농도와 광소산에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 7(3), 227-234.
- 배귀남, 김민철, 임득용, 문길주, 백남준(2003) 2001년 겨울철 서울 대기 에어로졸의 입경별 수 농도 특성, 한국대기환경학회지, 19(2), 167-177.
- 배귀남, 허선영, 이승복, 안민하, 박동호, 황정호(2007) 봄철 서울 도로변의 초미세 입자 오염 특성, Particle and Aerosol Research, 3(1), 29-40.
- 이승복, 배귀남, 박수미, 정상근(2007) 봄철 서울 도로변의 검댕 오염 특성, 한국대기환경학회지, 23(4), 466-477.
- Abu-Qudais, M., A. Matson, and D.B. Kittelson (2001) Combination of methods for characterization diesel engine exhaust particulate emissions, JSME International Journal, Series B, Fluids and Thermal Engineering, 44(1), 166-170.
- Ishinishi, N., N. Kuwabara, S. Nagae, T. Suzuki, S. Ishiwata, and T. Kohno (1986) Long-term inhalation studies on effects of exhaust from heavy and light duty diesel engines on F344 rats, Dev. Toxicol. Environ. Sci., 13, 329-348.
- Kittelson, D.B., P.A. Kadue, H.C. Scherrer, and R.E. Loverien (1988) Characterization of diesel particles in the atmosphere, Coordinating Research Council AP-2 Project Group Final Report, Coordinating Research Council.
- Matthias, K., W. Peter, B. Ruwim, and P. Finn (2003) Particle and trace gas emission factors under urban driving conditions in Copenhagen based on street and roof-level observations, Atmospheric Environment, 37(20), 2735-2749.
- Oberdorster, G. (2001) Pulmonary effects of inhaled ultrafine particles, Int. Arch. Occup. Environ. Health, 74(1), 1-8.
- Samet, J.M., S. Zeger, F. Dominici, and F.C. Curreiero (2000) The National Morbidity, Mortality, and Air Pollution Study (NMMAPS): Part 2. Morbidity and Mortality from Air Pollution in the United States, Health Effects Institutes.
- Shuichi, H., H. Motohiro, K. Shinji, M. Yuichi, K. Yoshinori, T. Kiyoshi, and W. Shinji (2004) Size distribution and characterization of ultrafine particles in roadside atmosphere, Journal of Environmental Science and Health, Part A, A39(10), 2671-2690.
- Tuch, Th. M., B. Wehner, M. Pitz, J. Cyrus, J. Heinrich, W.G. Kreyling, H.E. Wichmann, and A. Wiedensohler (2003) Long-term measurements of size segregated ambient aerosol in two German cities located 100 km apart, Atmospheric Environment, 37(33), 4687-4700.
- Watson, J.G., J.C. Chow, D.H. Lowenthal, N.M. Kreisberg, S.V. Hering, and M.R. Stolzenburg (2006) Variations of a nanoparticle concentrations at the Fresno Supersite, Science of the Total Environment, 358, 178-187.
- Woo, K.S., D.R. Chen, D.Y.H. Pui, and W.E. Wilson (2001a) Use of continuous measurements of integral aerosol parameters to estimate particle surface area, Aerosol Science and Technology, 34(1), 57-65.
- Woo, K.S., D.R. Chen, D.Y.H. Pui, and P.H. McMurry (2001b) Measurement of Atlanta aerosol size distributions: Observations of ultrafine particle events, Aerosol Science and Technology, 34(1), 75-87.
- Zervas, E. and P. Dorlhène (2006) Comparison of exhaust particle number measured by EEPS, CPC, and ELPI, Aerosol Science and Technology, 40(11), 977-984.
- Zhang, K.M. and A.X. Wexler (2004) Evolution of particle number distribution near roadways-Part I: Analysis of aerosol dynamics and its implications for engine emission measurement, Atmospheric Environment, 38, 6643-6653.