

## 서울시 노원구 도로상 극미세입자 오염도 공간분포 특징

이승복 · 이동훈 · 이승재 · 진현철 · 배귀남\*  
한국과학기술연구원 지구환경센터

(2011년 3월 10일 투고; 2011년 3월 28일 게재확정)

## Characteristics of spatial distribution of ultrafine particle number concentration on the roads of Nowon-gu, Seoul

Seung-Bok Lee, Dong-Hun Lee, Seung Jae Lee, Hyoun-Cher Jin, Gwi-Nam Bae\*  
*Global Environment Center, Korea Institute of Science and Technology*

(Received 10 March 2011; accepted 28 March 2011)

### Abstract

The spatial distributions of air pollutants, in particular, ultrafine particles near traffic congestion roads at urban areas need to reduce human exposure levels for protecting public health. In this study, the number concentrations of ultrafine particles larger than 5 nm were measured every second during driving on the major roads of Nowon-gu, Seoul for 1.6 h using a mobile emission laboratory on October 5, 2010. The ultrafine particle number concentrations ranged from 7,009 to 265,600 particles/cm<sup>3</sup> with an average of 55,570 particles/cm<sup>3</sup>, and these levels were comparable to concentrations of ultrafine particles larger than 3 or 7 nm on the arterial roads at urban areas in Los Angeles, USA and Zürich, Switzerland. It was frequently observed that the ultrafine particle number increased rapidly when vehicle speed was accelerated and it decreased sharply when vehicle speed was decelerated. The high peak events of ultrafine particle concentration larger than 200,000 particles/cm<sup>3</sup> were observed seven times during the measurement period. From the three repeated measurements during the short period of 50 min, it was concluded that the ultrafine particle number concentration on the road was significantly time-dependent. This on-road measurement approach can be utilized to manage vehicle-related air pollution in urban.

**Keywords :** Ultrafine particle, Spatial distribution, Mobile Emission Laboratory, On-road measurement

### 1 서 론

우리나라 수도권의 대기질을 개선하기 위해 정부

는 수도권 대기환경관리 기본계획('05~'14)을 수립하여 실시하여 오고 있다. 황사 기간을 제외한 서울시 미세먼지(PM<sub>10</sub>)의 연평균 농도는 2003년에 69 µg/m<sup>3</sup>에서 2009년에 51 µg/m<sup>3</sup>으로 약 26% 감소하였고, 이산화질소(NO<sub>2</sub>)는 같은 기간 동안 38 ppb에서 35 ppb로 약간 감소하였다. 2005년부터 시행된 저공해

\* Corresponding author.

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

자동차 보급 및 자동차 배출가스 저감장치 부착 등과 같은 자동차 환경정책이 이러한 서울시 평균 대기질의 개선에 기여한 것으로 평가되고 있다(MOE, 2009).

그러나 자동차 배출가스에 의한 대기질 오염은 국소 고농도(hot spot) 오염 현상이므로, 자동차 환경정책은 도심 평균 대기질의 개선 측면뿐만 아니라 자동차 인접 생활환경에서 개인에게 노출되는 오염도 및 이로 인한 위해도의 저감 관점에서 수립될 필요가 있다. 전국 자동차 등록대수가 2010년말 기준으로 1,794만대(2.8명당 1대)에 이를 정도로 자동차의존도가 높은 우리나라의 경우 대도시의 도로상 자동차에서 배출된 고농도 유해대기오염물질이 평균 대기질 수준으로 희석되기 전에 자동차 운전자 및 도로 주변 보행자에게 노출되어 위해를 나타낼 가능성이 매우 높다. 특히, 자동차 엔진에서 배출되는 입자의 경우 수백 나노미터 이하 크기의 극미세 입자가 대부분이므로, 수 마이크로미터 크기의 입자에 비하여 상대적으로 입자의 표면적이 넓어 세포속으로 침투하기 쉽고, 단위 질량당 표면적이 상대적으로 커서 염증반응 등과 같은 생물학적인 반응성이 높을 수 있다(Oberdörster *et al.*, 2005). 평균 71세인 680명의 노인을 대상으로 1996년~2007년에 수행한 cohort-study 결과에 의하면, 자동차에 기인한 입자가 인체에 산화적 스트레스를 유발시킴으로써 중추신경계의 기능에 영향을 미칠 수 있으며, 노출된 검댕(black carbon)의 농도가 증가할수록 인지능력의 저하가 통계적으로 유의한 수준이었다(Power *et al.*, 2010). 그러므로 국민보건의 향상을 위해 도로상 및 도로 인접지역의 대기 오염도를 관리할 필요가 있는데, 미국 로스앤젤레스의 경우 자동차 배출오염물질로부터 학생들을 보호하기 위하여 고속도로에서 500 ft(약 168 m) 이내에는 새로운 학교를 설립하지 못하도록 2004년부터 제한하고 있다(Green *et al.*, 2004).

우리나라의 환경부(환경관리청)와 지방자치단체에서는 자동차에 의한 대기오염을 감시하기 위해 교통량이 많은 교차지점, 지역을 대표하는 간선도로, 주택 밀집지역을 통과하는 도로, 대형 자동차의 통행량이 많은 지점, 오염물질이 확산되기 어려운 지점 등에 도로변 대기 측정망을 운영하고 있다(MOE, 2010a). 2009년 4월 기준으로 서울에 12곳, 6

대 광역시에 총 12곳, 기타 9개 도시에 각각 1곳씩 모두 33곳에서 SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub> 등의 기준성 오염물질을 측정하고 있으며, 필요시 Pb, PM<sub>2.5</sub>, HC 등을 측정할 수 있도록 규정하고 있다(MOE, 2010b). 서울시의 경우 각 구별로 0~2곳의 도로변 측정소가 있는데, 고정 측정소라는 한계 때문에 지역적으로 넓은 행정구역 내의 도로상 또는 도로변 오염도의 공간분포를 파악할 수 없고, 이로 인해 운전자 또는 보행자들에게 노출되는 오염도 수준별 인체 위해성을 상세하게 평가하지 못하고 있다. 서울, 인천, 부산 등을 비롯한 일부 지방자치단체는 대기오염 이동측정차량을 운영하여 대기오염 자동측정망이 없는 시 지역이나 지역주민의 요청지점, 대기오염 우심지역 등에서 이동측정차량을 정차해 놓고 일반 대기질 측정항목, 중금속 및 휘발성유기화합물을 측정하고 있으나, 도로를 주행하면서 대기오염물질을 측정할 수 있는 주행모드 기능이 없기 때문에 넓은 지역에서 오염도의 공간적인 분포를 측정하지는 못하고 있다(MOE, 2010a).

최근 국외에서는 이동형 대기오염 측정차량을 이용하여 도로상 주행 중 자동차 배출 대기오염물질의 모니터링 또는 인체 노출평가 연구가 활발히 수행되고 있다(Pirjola *et al.*, 2004; Westerdahl *et al.*, 2005; Zarvalis *et al.*, 2008; Zhu *et al.*, 2008). 본 연구에서는 이동형 자동차 배출가스 측정 시스템(Mobile Emission Laboratory, MEL)을 이용하여 서울시 노원구 주요 도로상에서 극미세입자 수 농도의 공간분포를 측정하여 도로상 자동차 오염의 특징을 분석하였다. 이러한 측정방법 및 결과는 향후 지방자치단체 단위로 관할 지역에서 지역 주민의 건강을 보호하기 위하여 도로상의 자동차와 같은 국소 고농도 오염원에 의해 유발된 유해대기오염물질의 인체 노출수준을 감시하고 관리하는 도구로 사용될 수 있을 것이다. 또한, 유럽에서 중소형 경유 자동차에 대한 Euro 5 규제의 일부로 20 nm 이상 입자의 개수 배출량 기준인  $6 \times 10^{11}$ 개/km가 2011년부터 시행될 예정인데, 이와 유사하게 국내에서도 자동차 배출 나노입자의 개수에 대한 규제 수준을 결정하는데 기초자료로 활용될 수 있을 것이다(Myung *et al.*, 2009).

참고로 2007년 서울 시계 교통량 자료를 이용하여 1개 이상의 주변 도로들의 시계 유출입 교통량의

합을 나타낸 Fig. 1에서 보듯이 주요 서울 시계 통과 도로들을 통하여 매일 총 250만대 이상의 차가 유출입하였다. 예를 들어 서울의 북동쪽 시계를 통과하는 화랑로, 북부간선도로, 47번 국도, 망우로의 일평균 교통량은 각각 46,000대/일, 121,000대/일, 28,000대/일, 52,000대/일로, 총 247,000대/일의 차량이 서울과 구리시를 통행하였다. 북쪽보다는 남쪽으로, 동쪽보다는 서쪽 방향으로 시계를 통과하는 차량이 상대적으로 많았다. 가장 교통량이 많은 도로는 자유로, 신월 IC, 양재 IC 등으로 18~23만대/일 범위이었다.

## 2. 측정

### 2.1 측정지역

본 연구에서는 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 서울시 행정구역의 하나인 노원구를 측정지역으로 선정하였는데, 노원구 상계동에서 의정부로 연결되는 동일로 시계의 교통량은 약 10만대/일로 유출입량이 비교적 많은 도로이다. 서울시의 통계 자료에 의하면, 2009년 기준 노원구의 인구는 615,161명으로 서울시 25개 자치구 중에서 두 번째로 많으며, 환경성 질환에 취약한 65세 이상의 고령인구는 54,756명으로 서울에서 가장 많을 뿐만 아니라 노원구의 초등학교 수 및 초등학생 수는 각각 42개와 44,276명으로 서울에서 가장 많다(Seoul, 2010). 자동차 등록대수는 151,687대로 서울에서 5번째로 많았지만, 노

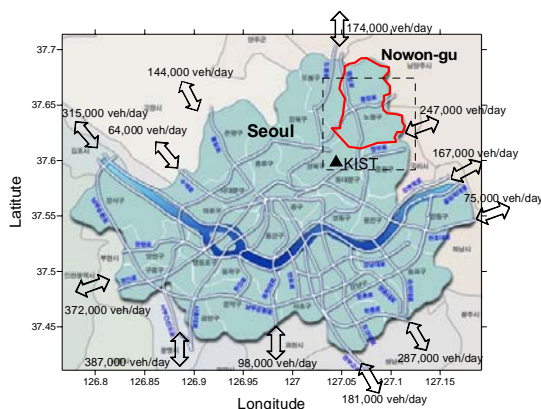


Fig. 1. Major traffic volumes at the boundary of Seoul in 2007.

원구 상계동에 위치한 도시대기 측정소의 2009년 PM<sub>10</sub> 연평균 농도는 55  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 서울시 평균인 54  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 유사하였다. 노원구의 면적은 서울시의 약 6%에 해당하는 35  $\text{km}^2$ 로 서울시 자치구 중에서 네 번째로 넓다. Fig. 2에서 보듯이 노원구에서 교통량이 많은 동부간선도로와 동일로가 비교적 평행하게 직선형태로 뻗어있고, 동일로로부터 가지처럼 주요 도로들이 분기되면서 이면도로들과 연결되어 있어서 MEL을 이용하여 넓은 지역의 도로상 자동차 배출 극미세입자의 오염도를 평가하는 것이 비교적 수월하다. Fig. 2에서 A, R, T로 표시한 지점은 각각 상계동 도시대기 측정소, 태릉입구 도로변 대기 측정소, 노원역(동일로) 교통량 수집지점을 의미한다.

도로상 극미세입자의 공간분포를 측정하기 위한 주행경로는 Fig. 2에 표시한 것과 같이 한국과학기술연구원(KIST) 연구동 앞(1)에서 출발하여 KIST 후문(2)을 나와 우회전하여 태릉입구역(3)부터 동일로를 따라 하계역(4) - 중계역(5) - 상계 7, 9, 10단지(6) - 마들역(7) - 상계 14, 16단지(8)까지 이동한 후 우회전하여 수락산길과 당고개길을 지나 샷갯봉 근린공원(9) - 노해 근린공원(10) - 중계역(5)으로 돌아왔고, 다시 동일로를 따라 상계 7, 9, 10단지(6) - 마들역(7)까지 이동하였다가 우회전하여 한글비석길을 따라 샷갯봉 근린공원(9) - 대진교(11) - 하계역(4) - 중계역(5)까지 되돌아왔다. 세 번째로 다시 동일로를 따라 이동하여 상계 7, 9, 10단지(6)에서 우회전한 후 노원길로 노해 근린공원(10) - 대진교(11) - 화랑대(12)에 도착하여 화랑로를 이용하여 태릉입구역(3) - KIST 후문(2) - KIST 연구동(1)으로 돌아오는 총 35 km의 도로이었다. 2010년 10월 5일(화) 10시 48분 37초에 출발하여 12시 26분 17초에 종료하여 총 1시간 37분 40초 동안 측정하였다. 태릉입구역(3)부터 상계 14, 16단지(8)까지의 거리는 약 6.3 km이다.

본 연구에서는 MEL 차량의 운전시 특정 차량을 뒤쫓아가지 않았으며, 정지시 앞차와의 간격을 가능한 일정하게 유지하는 등 측정 당시의 교통상황에 맞추어 운행하였다.

### 2.2 측정장비

본 연구팀에서는 그랜드 스타렉스 내부에 실시간 입자 측정기 7종(PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>1</sub>, 검댕, 인체 내 침

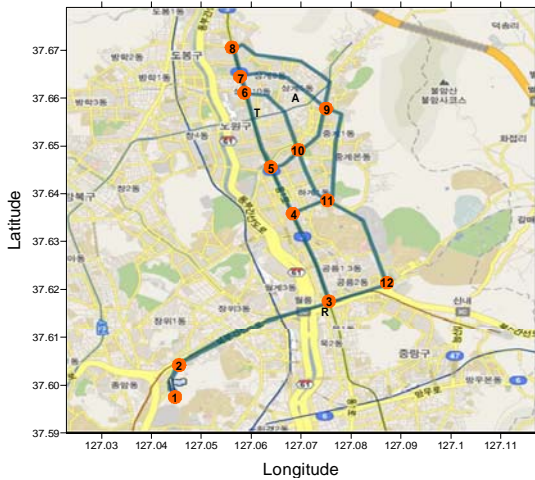


Fig. 2. Measurement area in Nowon-gu. A and R stand for ambient air monitoring station and roadside air monitoring station, respectively, and T denotes a traffic volume examination station.

착 입자의 표면적, particle-bound PAHs, 입자의 총 수 농도, 입자의 크기 분포)과 가스상 물질 측정기 3종(CO/CO<sub>2</sub>, NO/NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>, Total HC/Methane/Non-methane HC)을 탑재하여 도로를 주행하면서 도로상 오염도를 측정할 수 있도록 이동형 배출가스 측정 시스템(MEL)을 개발하였다. 본 연구에서는 5 nm 이상인 극미세입자의 총 수 농도를 Condensation Particle Counter(CPC, Grimm mobile 5404)로 매초마다 측정하였다. 외부의 공기 시료는 MEL 차량 앞 유리창 바로 위, 지면으로부터 약 2 m 높이에 설치한 SUS 재질의 통합 흡입관을 통해 채취하였다. 내경이 48 mm이고 길이가 약 1.6 m인 통합 흡입관의 한쪽 끝은 직경이 완만히 감소하여 직경이 10 mm인 흡입구가 되고, MEL 차량 내부에 있는 다른 한쪽 끝은 내경이 150 mm인 분기챔버에 연결되었다. MEL이 50 km/h로 주행할 때 흡입구에서 등속흡입 조건인 14 m/s로 공기 시료가 흡입될 수 있도록 65 L/min으로 흡입하는 경우 직경이 48 mm인 관 내부에서 유속은 0.6 m/s가 되고 Reynolds 수는 1900 수준이 되어 내부의 유동은 층류가 된다. 이 때 내경이 150 mm로 확대된 분기챔버 내부에서 유속은 다시 0.1 m/s로 매우 낮아진 후 3/8" SUS 튜브를 통해 0.3 L/min 만큼의 공기 시료가 0.1 m/s 속도로 분기된 후 1/4" 전도성 튜브를 통해 CPC 내부로 흡입되었다.

CPC로 측정된 극미세입자의 수 농도 자료를 위치 정보와 연동시키기 위해 GPS(Ascen GPS741)로부터 매초마다 주행위치의 위도, 경도, 차속 등의 데이터를 받아 저장하였다. 도로상 대기오염물질을 측정하는 동안 기상장비(Weather Transmitter, Vaisala WXT520)를 함께 이용하여 상대적인 풍향, 풍속, 기온, 상대습도 등의 기상자료를 측정하였다. 오전 측정 중 평균 기온은 약 18°C이었고, 평균 상대습도는 약 60%이었다. 노원구 공릉동 육군사관학교에 위치한 기상청 자동기상관측소의 자료에 따르면, 측정일의 평균 기온과 풍속은 각각 14.4°C, 0.6 m/s로 2010년 10월 평균인 13.5°C, 1.1 m/s와 유사하였다(KMA, 2010).

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 도로상 극미세입자 수 농도 특징

본 연구에서는 MEL을 이용하여 2010년 10월 5일에 노원구 주요 도로를 주행하면서 매초마다 극미세입자의 수 농도를 측정하여 도로상 오염도의 공간분포 자료를 확보하였다. 이 때 시간에 따른 MEL 차량의 차속과 극미세입자의 수 농도 변화를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 숫자는 Fig. 2에 나타낸 주요 지점의 위치를 의미한다. MEL 차량의 차속은 신호등에 대기 중일 때인 0 km/h부터 최고 62 km/h까지 큰 폭으로 급격히 변화하였는데, 측정기간 동안 평균 차속은 21±20 km/h이었다. 10 km/h 간격으로 나누어 차속의 빈도를 살펴보면, 0~10 km/h 구간이 약 41%로 가장 빈도가 높았고 나머지 구간의 경우 모두 12% 이하였는데, 이는 잦은 교통신호에 기인된 것으로 추정된다. 측정 당시 주변 교통 흐름에 맞추어서 MEL 차량을 운전하였기 때문에 MEL의 차속은 주변 차량들의 평균적인 차속과 크게 다르지 않았을 것이다.

차속과 극미세입자의 수 농도는 위치 또는 시간에 따라 변동폭이 크고 빈번하게 변화하였다. KIST 내부 도로를 주행하였던 측정 시작 후 3분 동안과 측정 종료 전 약 3분 동안의 극미세입자의 평균 수 농도는 12,249개/cm<sup>3</sup>로, 전체 구간의 평균 농도인 55,570개/cm<sup>3</sup>의 22% 수준으로 낮았으며 급격한 고농도 피크가 관찰되지 않았다. 이는 KIST 내부를 통해

하는 차량의 대수가 매우 적을 뿐만 아니라 교통량이 많은 화랑로와 북부간선도로로부터 100 m 이상 떨어져 있기 때문인 것으로 생각한다. 차속과 극미세입자의 수 농도의 선형 상관성의 상관계수는 0.25로 매우 낮아 직접적인 상관관계를 찾을 수 없었으나, 극미세입자 수 농도의 급격한 증감이 차속의 변화와 함께 나타나는 것을 뒤에서 자세히 살펴볼 것이다.

본 연구에서 측정된 입자의 크기 범위와 일치하지 않아 직접적으로 비교하기는 어렵지만, 도로상 극미세입자의 농도 수준을 참고할 수 있는 다음과 같은 기존 연구결과들이 있다. 2003년 봄에 미국 Los Angeles의 University of Southern California 북쪽 간선도로를 주행하면서 이동 측정 차량(mobile platform)으로 측정된 7 nm 이상인 입자의 평균 수 농도는 약 40,000개/cm<sup>3</sup>이었고, 2001년 11월 낮 시간에 스위스 Zürich의 시내 도로를 주행하면서 이동 측정 차량(mobile laboratory)으로 측정된 3 nm 이상 입자의 평균 수 농도는 78,000개/cm<sup>3</sup>이었다(Buko-wiecki *et al.*, 2002; Westerdahl *et al.*, 2005).

전체 측정기간 동안 극미세입자의 최저 농도는 11시 43분에 한글비석길(7-9 구간)을 통행하는 중에 측정된 7,009개/cm<sup>3</sup>이었으며 최고 농도는 11시 12분에 중계역 사거리(5번 지점)를 약 50 km/h로 지난 직후에 관찰된 265,600개/cm<sup>3</sup>이었다. 전체 평균 농도보다 3배 이상 높은 200,000개/cm<sup>3</sup>를 초과하는 고농도 피크도 7회나 관찰되었는데, 이러한 고농도 피크의

경우 대부분 30초 이하로 짧게 유지되었고 급격한 변동을 보였으므로 통과지점의 평균 농도로 보기는 어렵다. 하지만 통과지점의 평균 농도가 그만큼 높지 않더라도 주변 차량에서 배출된 고농도의 배출 가스가 충분히 희석되지 않은 채 운전자 및 보행자에게 노출될 수 있음을 의미한다.

Fig. 3(b)의 극미세입자의 수 농도 측정자료를 10,000개/cm<sup>3</sup> 간격으로 나누어 농도의 빈도를 Fig. 4에 나타냈다. 10,000~20,000개/cm<sup>3</sup> 구간이 가장 많은 빈도를 나타냈으며, 이보다 농도가 증가할수록 전반적으로 빈도가 감소하는 경향을 나타내었는데, 40,000~50,000개/cm<sup>3</sup> 구간과 130,000~150,000개/cm<sup>3</sup> 구간의 값만 전반적인 경향보다 상대적으로 많은 빈도를 보였고, 전체적으로 대수정규분포와 유사하였다. 가장 많은 빈도를 나타낸 10,000~20,000개/cm<sup>3</sup> 구간 내 995개 측정값의 평균은 14,050개/cm<sup>3</sup>이었다.

측정한 입자의 크기 범위가 달라서 직접적으로 비교하기는 어렵지만, 동대문구 청량리 교차로의 도로변에서 약 1m 떨어진 고정위치에서 scanning mobility particle sizer(SMPS)로 측정된 20~600 nm 범위인 극미세입자의 수 농도의 일변화 중 배경농도에 해당하는 새벽 3시의 경우 약 17,000개/cm<sup>3</sup> 수준이었고, 일평균 농도는 28,500개/cm<sup>3</sup> 수준이었다(Lee *et al.*, 2010). 서대문구 신촌동 연세대학교 정문 앞 도로변 약 10 m 지점에서 SMPS로 측정된 20~600 nm 범위인 입자의 수 농도 역시 청량리 도로변의 농도 수준과 유사하였다(Bae *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2010).

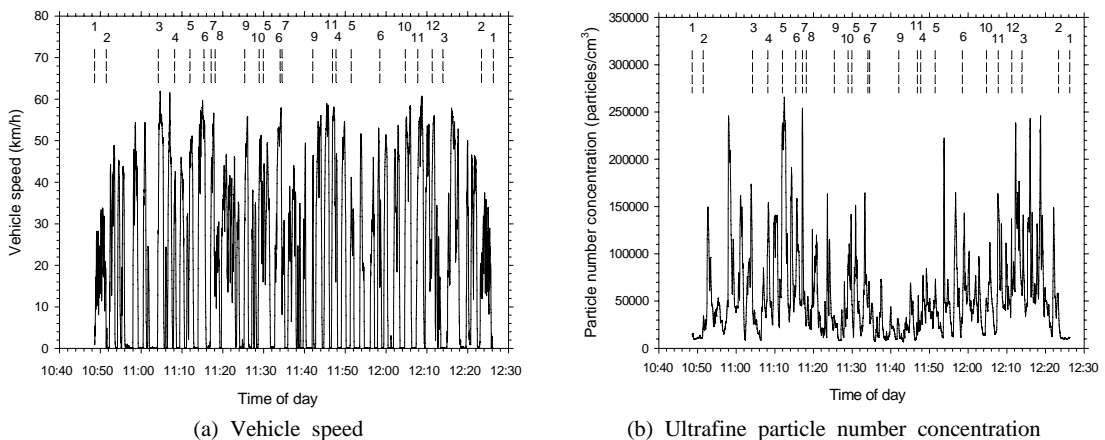


Fig. 3. Time-series plot of the vehicle speed and particle number concentration.

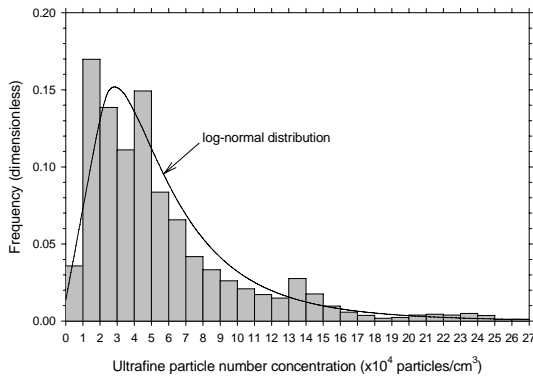


Fig. 4. Frequency of the ultrafine particle number concentrations measured on the roads.

### 3.2 극미세입자 수 농도의 도로상 공간분포

노원구 도로상 오염도의 도로별 차이를 파악하기 위해 매초 단위로 측정된 극미세입자의 수 농도를 Fig. 5와 같이 공간분포로 나타내었다. 앞에서 언급한 것과 같이 KIST 내부의 극미세입자 수 농도는 다른 도로에 비하여 매우 낮음을 알 수 있다. KIST 내부 수준과 같이 20,000개/cm<sup>3</sup> 이하로 낮은 농도가 화랑도(2-3 구간), 동일로(3-8 구간), 수락산길(8-9 구간)에서도 관찰되었지만 그 구간이 비교적 짧았던 반면, 한글비석길의 샷샷봉 근린공원(9)부터 상대적으로 긴 구간에서 관찰되었는데, 이는 다른 도로에 비해 교통량이 상대적으로 적었기 때문인 것으로 생각한다. 극미세입자의 수 농도가 160,000개/cm<sup>3</sup> 이상인 고농도 지점들을 살펴보면, 장위사거리 부근, 월릉교 출구 부근, 중계역(5)부터 노원역 구간, 마들역(7) 부근, 당고개 입구 오거리와 샷샷봉 근린공원(9) 중간지점, 대진고교 사거리(11), 화랑대역에서 태릉입구역(3)을 지나 월릉교 입구 구간 등이다. Fig. 5에서 경로가 중복되는 일부 도로의 경우 심볼이 겹쳐지므로, 보이는 농도는 가장 낮은 시간대의 결과이다. 대진고교 사거리에서 화랑대 사거리 방면 1/3 지점의 공릉터널 내부에서 120,000개/cm<sup>3</sup> 이상의 고농도를 보였다. 같은 지점이라도 도로상 교통량 또는 통행 차량의 종류에 따라 오염도가 달라지므로, Fig. 5의 공간분포가 측정일을 대표한다고 할 수 없으므로 대표적인 공간분포 자료를 확보하기 위해서는 반복 측정자료를 이용한 통계처리 기법이 필요하다.

본 측정결과만을 가지고 공간적인 특징을 살펴보기 위해 하계역(4) 북쪽 지역을 동일로와 평행하게 북서방향으로 세 구역으로 나눈다면, 60,000개/cm<sup>3</sup> 이상의 고농도를 기준으로 비교하였을 때 동일로 구역 도로상에서 더 빈번하게 그리고 더 오래 관찰되었고, 가장 오른쪽에 있는 샷샷봉 근린공원(9) 부근 구역에서 고농도의 관찰 빈도가 낮았고 시간도 짧았으며, 가운데 부분은 양쪽 구역의 중간 정도 수준이었다. 이러한 특징이 교통량이 많은 동부간선도로 및 동일로의 영향을 더 많이 받은 것인지 아니면 각 도로의 교통량 및 통행 차량의 종류의 차이가 더 중요한 원인인지는 향후 연구를 통해 밝혀낼 필요가 있다.

직선 형태에 가까운 동일로 태릉입구역 사거리(3)에서 상계 14, 16단지(8)까지 약 6.3 km 구간에 대해 태릉입구역 사거리로부터의 거리에 따른 극미세입자의 수 농도를 Fig. 6에 나타내었다. 여기서 거리는 위도 정보를 이용하여 단순 선형식으로 계산하였다. 이 구간에 890개의 농도 데이터가 있으므로 평균적으로 7 m 간격으로 극미세입자 수 농도를 측정하였다. 앞에서 언급한 것과 마찬가지로 이 구간에서도 차속과 극미세입자 수 농도간의 선형 상관계수 (R=0.27)는 좋지 않았다. 차속이 50 km/h 이상이어도 처음 2 km와 끝 2 km 구간에서는 극미세입자의 수 농도가 10,000개/cm<sup>3</sup> 이하로 낮았던 반면, 중간 거리

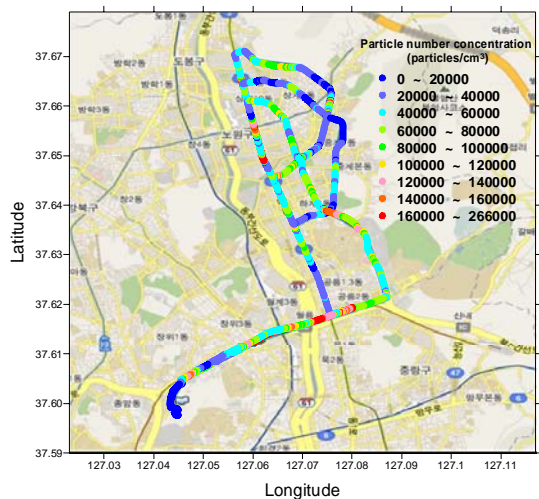


Fig. 5. Spatial distribution of the ultrafine particle number concentration.

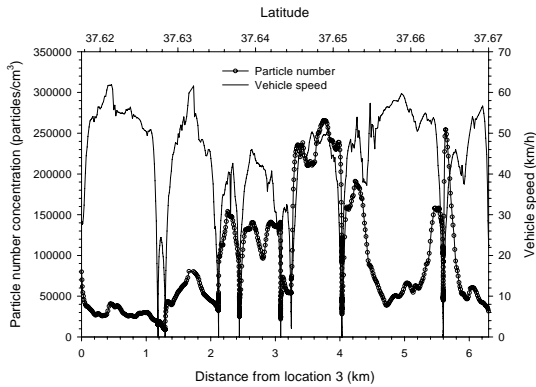


Fig. 6. Comparison of particle number concentration and vehicle speed at the Dongil road.

에서는 20,000개/cm<sup>3</sup> 이상으로 높았다. 하지만 차속이 0 km/h로 급격히 낮아졌다가 30 km/h 이상으로 급격히 증가하는 경우 극미세입자의 수 농도도 같은 경향을 자주 나타냈다. 즉, 농도의 증감 폭은 일정하지 않지만, MEL 차량 및 주변 차량이 정차하는 동안 극미세입자 수 농도가 급격히 낮아졌다가 차량이 출발하면 다시 극미세입자 수 농도가 급격히 증가하였다. 이러한 현상은 차대동력계를 이용한 오염물질 배출시험에서 차속이 감소되는 경우 오염물질의 배출량이 감소하고, 가속하기 위해 액셀을 밟는 경우 오염물질의 배출량이 증가하기 때문인 것으로 생각한다(Lee *et al.*, 2008).

### 3.3 도로상 극미세입자 수 농도의 변동성

Fig. 6의 결과 중에서 중계역 사거리(5)~상계 7, 9, 10 단지(6) 구간은 11시 11분 58초부터 11시 15분 21초 사이에 측정하였는데, 이 구간의 결과와 함께 11시 29분 55초부터 11시 34분 2초 사이와 11시 51분 29초부터 11시 58분 28초 사이에 2회 더 반복하여 측정한 결과를 Fig. 7에 공간분포로 나타내었다. Fig. 7에서 보듯이 상계 7, 9, 10 단지 사거리(6) 부근의 농도가 다른 지점에 비해 상대적으로 낮았고, 상계 백병원 사거리 부근의 농도는 3회 모두 100,000개/cm<sup>3</sup> 이상의 고농도를 나타내었으나, 전반적인 지점별 농도 수준은 일정하지 않았다. 1차 측정시 중계역 사거리(5)부터 노원역 사거리 이전 구간에서는 상계 2-6단지 사거리에서 정지했던 지점을 제외하고 140,000개/cm<sup>3</sup> 이상의 고농도를 길게 나타낸 반면에, 2차와 3차 측정시 상계 백병원 사거리와 노원역 사거리에서 비교적 짧게 140,000개/cm<sup>3</sup> 이상의 고농도를 나타냈다. 즉, 20여분 차이로 측정한 동일 도로상 극미세입자의 수 농도는 큰 차이를 나타내었는데, 이는 주위 차량의 대수와 종류가 변할 뿐만 아니라 주행 상태도 함께 변하기 때문인 것으로 추정된다.

Fig. 7의 결과를 중계역 사거리(5)로부터의 거리에 따른 극미세입자의 수 농도로 변환하여 Fig. 8(a)에 다시 그렸고, 이때의 차속을 Fig. 8(b)에 나타내었다. 1차 측정의 경우 극미세입자 수 농도는 0.7 km 부근에서 정지하기까지 약 230,000개/cm<sup>3</sup> 수준의 고농도

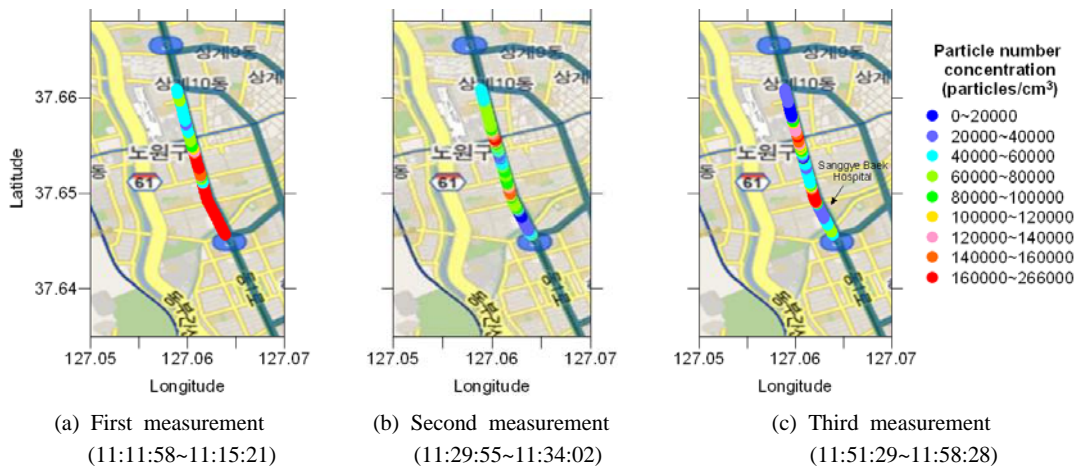


Fig. 7. Comparison of spatial distributions of the ultrafine particle number concentration between location 5 and 6.

를 유지했다가 정지 및 출발하면서 급격한 변화를 보인 후 노원역 사거리(약 1.3 km 지점)까지 감소하였고, 그 이후에 약 50,000개/cm<sup>3</sup> 수준을 유지하였다. 2차 측정의 경우 0.3 km 부근에서 감속되어 15 km/h로 느려졌다가 가속되면서 0.5 km 부근에서 150,000개/cm<sup>3</sup> 수준의 고농도를 나타내었다. 3차 측정의 경우 0.4 km 부근에서 정차했다가 출발하여 0.5 km 부근에서 200,000개/cm<sup>3</sup> 이상의 고농도를 나타내었다. 2차와 3차 측정의 경우 1차 측정과는 달리 0.7 km 부근에서는 큰 가감속이 없다가 1 km 부근에서 정차 및 출발하면서 다시 150,000개/cm<sup>3</sup> 이상의 고농도를 나타내었다. 3차 측정의 경우 1.5 km 부근에서 한 번 더 정차 및 출발이 있었으나, 이때는 극미세입자 수 농도의 급격한 증가는 관찰되지 않았다. 주위에서 주행하는 자동차의 교통량이 줄었거나 오염물질의 배출이 심한 차종이 줄었던 것으로 추정된다.

구간 및 지점별 극미세입자 수 농도의 변동 특징을 살펴보면, 0~0.3 km 구간의 경우 1차 측정에서 200,000개/cm<sup>3</sup> 이상의 고농도가 관찰된 반면, 2차와 3차 측정에서는 10,000~80,000개/cm<sup>3</sup> 범위로 상대적으로 낮은 농도가 관찰되었다. 0.5 km 지점 부근의 경우 3번 측정에서 모두 150,000개/cm<sup>3</sup> 이상의 고농도가 관찰되었고, 1.6~1.9 km 구간의 경우 3번 측정에서 모두 70,000개/cm<sup>3</sup> 이하의 낮은 농도가 관측되었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 대도시 도로상 대기 오염도의 공간분포 자료를 확보하기 위하여 이동형 자동차 배출가스 측정 시스템을 이용하여 서울시 노원구 주요 도로상을 주행하면서 5 nm 이상인 극미세입자 수 농도를 매초마다 측정하여 다음과 같은 도로상 자동차 오염의 특징을 밝혀냈다.

첫째, 서울시 노원구 주요 도로 중 35 km 구간을 평균 21 km/h 속도로 약 1시간 38분 동안 주행하면서 측정된 도로상 극미세입자의 수 농도는 7,009~265,600개/cm<sup>3</sup> 범위였으며, 평균 농도는 55,570개/cm<sup>3</sup> 이었다. 둘째, 차속이 동일해도 주변 교통상황에 따라 도로상 극미세입자의 수 농도가 크게 변동하므로 차속과 극미세입자의 수 농도 사이에 선형 상관성은 나타나지 않았지만, 대체로 감속시 낮아지고 가속시 높아졌다. 이러한 현상은 차대동력계를 이용한 오염물질 배출시험에서 차속이 감속되는 경우 오염물질의 배출량이 감소하고, 가속하기 위해 엑셀을 밟는 경우 오염물질의 배출량이 증가하는 경향과 일치한다. 셋째, 측정기간의 평균 농도보다 3배 이상 높은 200,000개/cm<sup>3</sup>를 초과하는 고농도가 7회나 관찰되었으며, 대부분 30초 이하로 짧았다. 이것은 도심 주요 도로 주행시 1시간당 4회 정도 30초 미만의 시간 동안 주변 차량에서 배출된 고농도의 배출가스가 충분히 희석되지 않은 채 운전자 및 보행자

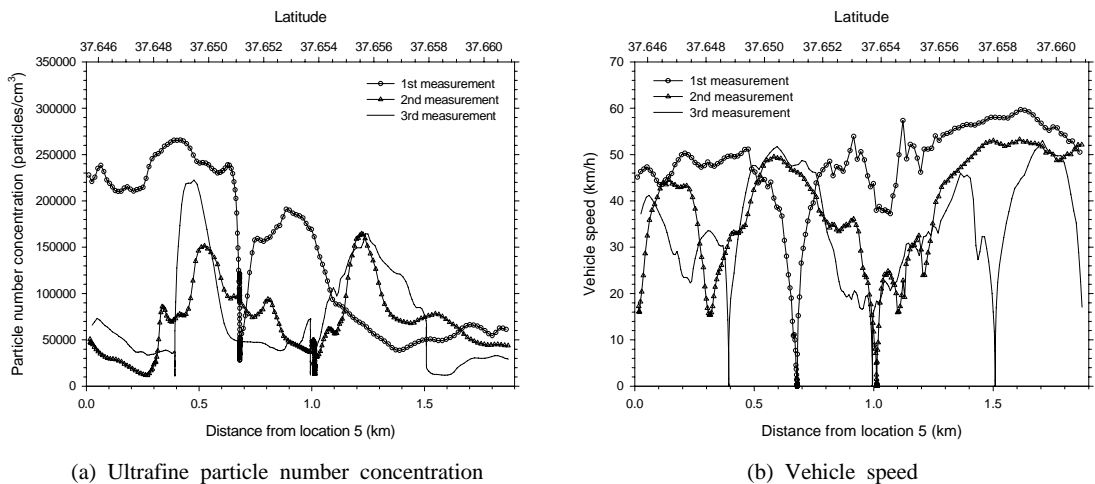


Fig. 8. Variation of the ultrafine particle number concentration and the vehicle speed between location 5 and 6.



에게 노출될 수 있음을 의미한다. 넷째, 동일 측정지점에서 3회 반복하여 측정한 극미세입자 수 농도의 변동성은 지점에 따라 다른 경향을 보였으며, 변동성이 큰 지점의 경우 10,000~200,000개/cm<sup>3</sup> 범위의 큰 폭으로 변화였다.

향후 추가적인 측정을 통해 이상과 같은 도로상 자동차 오염의 특징의 타당성을 확인하고, 관측된 현상의 주요한 원인들을 규명할 계획이다.

본 연구에서 사용한 이동형 자동차 배출가스 측정 시스템은 향후 지방자치단체 단위로 관할 지역에서 자동차에 의한 극미세입자의 수 농도를 비롯한 유해대기오염물질의 도로상 오염도 수준을 상세하게 감시하고 관리하는 도구로 활용될 수 있을 것이다.

## 감사의 글

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

## 참고 문헌

- Bae, G.N., Hu, S.Y., Lee, S.B., Ahn, M.H., Park, D.H., and Hwang, J.H. (2007). Ultrafine particle level at a roadside of Seoul in spring, *Particle and Aerosol Research*, 3(1), 29-40.
- Bukowiecki, N., Dommen, J., Prévôt, A.S.H., Richter, R., Weingartner, E., and Baltensperger, U. (2002). A mobile pollutant measurement laboratory - measuring gas phase and aerosol ambient concentrations with high spatial and temporal resolution, *Atmospheric Environment*, 36, 5569-5579.
- Green, R.S., Smorodinsky, S., Kim, J.J., McLaughlin, R., and Ostro, B. (2004). Proximity of California public schools to busy roads, *Environmental Health Perspectives*, 112(1), 61-66.
- Korea Meteorological Administration (2010). Monthly report of automatic weather system data on October, 2010, Publishing number 11-1360000-000005-06.
- Lee, J., Jung, M., Jeong, Y., and Cha, K. (2008). Analysis of diesel nano-particle characteristics for different vehicle test mode in diesel passenger vehicle, *Transaction of KSAE*, 16(1), 114-120.
- Lee, S.-B. and Bae, G.-N. (2010). Characteristics of air pollution at a junction area contaminated with vehicle emissions, *Transaction of KSAE*, 18(4), 48-53.
- Ministry of Environment, Korea (2009). Report on additional and supplementary management plan for ambient air quality in Greater Seoul Area, [http://www.me.go.kr/kor/notice/notice\\_02\\_01.jsp?id=notice\\_02&cate=02&dirinfo=&key=subject&search=&search\\_regdate\\_s=&search\\_regdate\\_e=&order=&desc=asc&pg=7&mode=view&idx=176235](http://www.me.go.kr/kor/notice/notice_02_01.jsp?id=notice_02&cate=02&dirinfo=&key=subject&search=&search_regdate_s=&search_regdate_e=&order=&desc=asc&pg=7&mode=view&idx=176235), Accessed on February 6, 2011.
- Ministry of Environment, Korea (2010a). Guidebook on the Installation and Management of Air Quality Monitoring station, <http://webbook.me.go.kr/DLi-File/pdf/2010/03/200143.pdf>, Accessed on February 24, 2011.
- Ministry of Environment, Korea (2010b). Annual Report of Air Quality in Korea 2009, National Institute of Environmental Research, <http://webbook.me.go.kr/DLi-File/pdf/2010/09/204423.pdf>, Accessed on February 24, 2011.
- Myung, C.L., Lee, H., Kwon, S., Lee, S., Jun, J., Lee, Y., Woo, Y., Lee, M., Bae, G.-N., and Park, S. (2009). Inter-laboratory correlation exercise on a light-duty diesel passenger vehicle to verify nano-particle emission characteristics by Korea, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 23(3), 729-738.
- Oberdörster, G., Oberdörster, E., and Oberdörster, J. (2005). Nanotoxicology: An emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles, *Environmental Health Perspectives*, 113(7), 823-839.

- Pirjola, L., Parviainen, H., Hussein, T., Valli, A., Hämeri, K., Aalto, P., Virtanen, A., Keskinen, J., Pakkanen, T.A., Mäkelä, T., and Hillamo, R.E. (2004). Sniffer - a novel tool for chasing vehicles and measuring traffic pollutants, *Atmospheric Environment*, 38, 3625-3635.
- Power, M.C., Weisskopf, M.G., Alexeeff, S.E., Coull, B.A., Spiro III, A. and Schwartz, J. (2010). Traffic-related air pollution and cognitive function in a cohort of older men, *Environmental Health Perspectives*, doi: 10.1289/ehp.1002767, Online December 20, 2010 (available at <http://dx.doi.org/>).
- Seoul Metropolitan Government (2010). Seoul Statistical Yearbook 2010, Publishing number 51-6110000-000003-10.
- Westerdahl, D., Fruin, S., Sax, T., Fine, P.M., and Sioutas, C. (2005). Mobile platform measurements of ultrafine particles and associated pollutant concentrations on freeways and residential streets in Los Angeles, *Atmospheric Environment*, 39, 3597-3610.
- Zarvalis, D., Tsakis, A., Konstandopoulos, A.G., Prati, M.V., and Costagliola, M.A. (2008). A mobile laboratory for on-board and ambient level emissions measurement, *SAE 2008-01-0756*, 2008 World Congress, Detroit, Michigan, April 14-17, 2008.
- Zhu, Y., Fung, D.C., Kennedy, N., Hinds, W.C., Fernandez, A.E. (2008). Measurements of ultrafine particles and other vehicular pollutants inside a mobile exposure system on Los Angeles freeways, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 58, 424-434.