

## 겨울철 서울 내부순환로 도로상 초미세입자 오염의 공간분포 특징

### Spatial Distributions of On-road Ultrafine Particle Number Concentration on Naebu Express Way in Seoul during Winter Season

우대광<sup>1),2)</sup> · 이승복<sup>1)</sup> · 이승재<sup>1)</sup> · 김진영<sup>1)</sup> · 진현철<sup>1)</sup> · 김태성<sup>2),3)</sup> · 배귀남<sup>1),\*</sup>

<sup>1)</sup>한국과학기술연구원 환경복지연구원, <sup>2)</sup>성균관대학교 기계공학부, <sup>3)</sup>성균관대학교 성균나노과학기술원  
(2012년 9월 8일 접수, 2012년 11월 19일 수정, 2012년 12월 4일 채택)

Daekwang Woo<sup>1),2)</sup>, Seung-Bok Lee<sup>1)</sup>, Seung Jae Lee<sup>1)</sup>, Jin Young Kim<sup>1)</sup>,  
Hyun Chul Jin<sup>1)</sup>, Taesung Kim<sup>2),3)</sup> and Gwi-Nam Bae<sup>1),\*</sup>

<sup>1)</sup>*Center for Environment, Health and Welfare Research, Korea Institute of Science and Technology*

<sup>2)</sup>*Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University*

<sup>3)</sup>*SKKU Advanced Institute of Nanotechnology (SAINT), Sungkyunkwan University*

(Received 8 September 2012, revised 19 November 2012, accepted 4 December 2012)

#### Abstract

To understand the traffic emissions with high temporal and spatial resolutions on road, a mobile laboratory was developed. The objective of this study is to characterize on-road air pollution on Naebu express way surrounding the northern area of Seoul, Korea. We measured the number concentration of ultrafine particles larger than 5 nm and particle size distribution using a condensation particle counter and a fast mobility particle sizer, respectively on 3, 7, and 8 December 2009. The average ultrafine particle number concentration on the Naebu express way excluding tunnels was 126,000 particles/cm<sup>3</sup> and 4.2 times higher than that on internal road at Korea Institute of Science and Technology in Seoul, and more than twice higher than that measured on and at the arterial roads of Seoul in previous studies. The maximum ultrafine particle number concentration was observed at the tunnel sections. It was 232,000 particles/cm<sup>3</sup> and 1.8 times higher than average ultrafine particle number concentration for the other sections on Naebu express way. The ultrafine particle number concentration on the wider roads with higher traffic volume along the Han River was similar to that in the residential section, probably because of enhanced dilution effect in widely open environment. The size distribution of particles on the Naebu express way was highly fluctuated for a short duration. Ultrafine particles measured at the tunnel showed a bimodal size distribution with mode diameters of ~ 10 nm and ~ 50 nm. At the Han riverside section, ~ 10 nm particles appeared significantly compared with size distribution at the tunnel. This on-road measurement approach can be utilized to manage vehicle-related air pollution in urban area.

**Key words** : Mobile laboratory, On-road measurement, Spatial distribution, Ultrafine particle, Number concentration

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-958-5676, E-mail : [gnae@kist.re.kr](mailto:gnae@kist.re.kr)

## 1. 서 론

최근 Attfield *et al.* (2012)과 Silverman *et al.* (2012)은 미국의 8개 비금속 채광시설에서 12,315명의 작업자를 대상으로 코호트 조사와 환자-대조군 연구를 통해 폐암 발생률이 디젤 배기가스 노출량과 통계적으로 높은 상관성이 있음을 보고하였다. 이 연구를 근거로 세계보건기구 (WHO) 산하 국제암연구소 (IARC)는 디젤 배기가스를 2A 등급(발암성이 있다고 추정)에서 1 등급(인체 발암성을 충분히 입증)으로 상향 지정하였다. 또한, 디젤 자동차에서 배출되는 입자상 물질은 잠재적으로 호흡기 질환, 관상동맥 심장 질환 등을 유발시킬 수 있다고 보고하고 있다 (Mills *et al.*, 2007; Samet *et al.*, 2000). 따라서 자동차에서 배출된 오염물질은 교통 종사자 및 자동차 인접 환경에서 생활하는 일반 대중의 보건에 커다란 위협이 되고 있다.

정부에서는 도시 대기 측정소 및 도로변 대기 측정소를 운영하고 있는데, 고정된 위치에서 PM<sub>10</sub> 질량 농도와 가스상 물질 농도 등을 측정하고 있다. 이 시스템은 도시 대기질 변화를 장시간 모니터링하여 평균적인 데이터를 제공하는 장점은 있으나, 기상 요인 및 대기오염물질의 외부 유입에 의한 영향 등으로 인해 국소적 고농도 현상을 나타내는 자동차 오염에 대한 환경정책의 효과를 평가하는데 어려움이 많다. 그러므로 기존 고정된 위치의 대기 측정소와 달리 공간적 고해상도로 오염도를 모니터링 할 수 있는 이동형 대기오염 측정시스템 (mobile laboratory, ML)과 같은 정밀한 평가 도구가 필요하다.

최근 국내외적으로 자동차의 오염물질 배출 특성을 살펴보기 위해 실험실에서 차대동력계 또는 엔진 동력계를 이용하여 입자상 및 가스상 물질을 측정하는 연구가 많이 수행되고 있으며, 오염물질 배출 특성은 차량속도, 엔진부하 (load) 등과 매우 높은 상관성을 보인다 (Lee *et al.*, 2008; Andre *et al.*, 2006; Joumard *et al.*, 2000). 그러나 실제 운전조건에서 자동차의 속도, 가속도는 교통흐름, 운행환경 (신호등, 표지판, 과속 방지 카메라, 과속 방지턱 등), 운전자의 운전습관 등에 영향을 받으며, 이는 오염물질 배출에 영향을 미칠 가능성이 매우 높다. 그러므로 국외에서는 Kittelson *et al.* (2000), Cocker *et al.* (2004a, b) 등이

이동형 자동차 배기가스 측정시스템 (mobile emission laboratory, MEL)을 구축하여 주행 중인 자동차의 배기가스 측정을 위한 추적 실험 및 도로상 차량 배기가스에 의한 대기오염, MEL을 이용한 운행 경유 대형 차량에서 배기되는 규제물질 및 유해물질 분석, 2차 입자 생성 과정 및 이동현상 등 다양한 주제의 연구를 수행하고 있다. 또한, Kittelson *et al.* (2004)은 MEL을 이용하여 고속도로와 주변 주거지역에서 입자의 수 농도 및 입경분포를 측정하였으며, 차량속도가 증가할수록 고농도의 입자가 발생하였는데 이것은 주로 50 nm 이하의 초미세입자이었으며, 고속도로에 비해 주거지역의 수 농도가 낮음을 밝혀내었다. 또한, Westerdahl *et al.* (2009)은 MEL을 이용하여 중국 베이징의 도로상 차량 오염물질 특성을 밝혀내었고, CO, black carbon (BC), 초미세입자 등의 농도를 측정하여 자동차 배출계수를 산출하고 대기질을 평가하였다.

한편, 국내에서는 최근까지 도로상, 도로변 대기오염 특성 및 실태조사와 관련한 연구로는 PM 질량농도와 가스상 물질을 측정하여 분석하는 것이 대부분이었으며, 일부 연구에서 유해대기오염물질의 도로변 오염 특성을 연구한 바 있으나 모두 고정된 위치에서 측정한 결과들이다 (Kwon and An, 2006; Kim *et al.*, 2002; Park *et al.*, 1998). 최근 본 연구팀에서는 서울시 동대문구 청량리 교차로 도로변에서 입자상 및 가스상 대기오염물질을 측정하였으며, 측정된 대기오염물질의 주간변화, 일변화 경향이 자동차 통행량과 밀접한 관련이 있음을 밝혀냈다 (Lee and Bae, 2010; Woo *et al.*, 2008).

실제 주행 중 도로상 대기오염에 관한 연구로는 이동먼지측정시스템을 이용하여 포장도로 silt loading 값의 시간적, 공간적 분포의 측정 및 재비산 먼지의 발생 특성에 관한 연구가 진행되고 있다 (Han *et al.*, 2007). 또한, 현행 자동차 배기가스 수시점검의 문제점을 보완하기 위해 이동이 쉬우면서 오염물질 과다 배출 차량을 식별할 수 있는 원격측정장비 (remote sensing device, RSD)가 개발되어 가솔린 및 디젤 자동차를 대상으로 CO, HC, NO의 배출농도를 측정하였으며, 청정차량이나 유해가스 과다배출 차량을 식별하는데 타당성이 있다고 보고되었다 (Lee *et al.*, 2008; Park *et al.*, 2005). 그러나 RSD 장비 역시 고정된 위치에서만 자동차 배기가스 농도를 측정할 수 있

으므로, 측정 지점을 지나가는 아주 짧은 시간의 주행조건에서 배출된 오염물질의 특성만 평가할 수 있다. 한편, 본 연구팀에서 개발한 ML을 이용하여 서울 내부순환로에 위치한 정릉터널과 홍지문터널에서 입자상 물질(수 농도, 폐에 침착되는 입자의 표면적 농도) 및 가스상 물질( $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_2$ )의 터널 내부 오염도의 공간분포를 분석하였으며 (Park *et al.*, 2012), 서울시 노원구 주요 도로상에서 5 nm 이상의 초미세입자 수 농도를 측정하여 도로상 입자상 물질의 공간분포를 밝혀내었다(Lee *et al.*, 2011).

본 연구팀에서는 자동차 배기가스의 대기질 영향을 장기적으로 감시하기 위해 입자상 물질( $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ , black carbon, PAHs)과 가스상 물질( $\text{CO}/\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}/\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , hydrocarbons) 및 기상상태, 지리정보 등을 동시에 측정할 수 있는 이동형 대기오염 측정 시스템(ML)을 구축하여 서울 도심을 둘러싼 내부순환로를 정기적으로 주행하면서 도로상 대기오염도의 시간적 변화 및 공간적 분포 특징을 조사하고 있다(Bae *et al.*, 2009). 본 연구에서는 겨울철 내부순환로 도로상 초미세입자 오염의 공간분포 특징을 조사하기 위하여 2009년 12월에 3일(3, 7, 8일) 동안 각각 오전, 오후 두 차례씩 총 6회에 걸쳐 내부순환로를 주행하면서 도로상 초미세입자의 수 농도 및 입경분포를 측정하여 구간별 특징을 비교하였다. 이 연구결과는 자

동차 배기가스의 인체 건강 영향과 관련된 환경정책을 수립하는데 필요한 기초 자료로 활용될 수 있다.

## 2. 측 정

### 2.1 측정지역

서울 내부순환로는 1999년 1월에 완공된 서울 도심을 둘러싸고 있는 도시고속도로로서, 외곽순환도로와 연계하여 서울과 주변 도시를 연결하는 대표적인 도로이며, 서울 강북 지역의 대부분을 둘러싸고 있는 도시고속도로이다. 내부순환로의 주요 통과지역은 마포구 망원동, 성산동에서 시작하여 서대문구, 종로구, 성북구, 동대문구, 성동구, 용산구 등이다. 총 길이는 약 40.1 km(내부본선 약 22 km, 강변북로 16.4 km, 동부간선도로 1.7 km)이며, 너비는 내부본선이 6차로(26 m), 강변북로는 8차로(34.8 m)이고, 길이가 각각 1.64 km, 1.89 km인 정릉터널과 홍지문터널로 구성되어 있다(Son, 1999). 내부순환로의 경우 현재 10톤 이상의 화물차, 가스 및 유류운반 탱크로리, 건설기계 등 특수차량의 통행을 제한하고 있다.

내부순환로상 오염물질의 공간분포를 파악하기 위해서 2009년 12월에 3일(3, 7, 8일) 동안 오전, 오후 한 차례씩 총 6회에 걸쳐 서울시 내부순환로를 주행



Fig. 1. A driving route and main spots on Naebu express way in Seoul, Korea.

하면서 실시간으로 초미세입자의 수 농도와 입경분포를 측정하였다. 그림 1에 나타낸 것과 같이 서울시 성북구 하월곡동에 위치한 한국과학기술연구원(KIST)의 차고지에서 출발하여 12월 3일과 7일 오전 및 8일 오후에는 내부순환로 성산 방면(KIST 후문(1) - 길음램프(2) - 정릉터널 입구(3) - 정릉터널 출구(4) - 홍지문터널 입구(5) - 홍지문터널 출구(6) - 강변북로(7) - 마포대교(8) - 반포대교(9) - 동부간선도로(10) - 내부순환로(11) - 월곡램프(12) - KIST 후문(1))으로 측정하였다. 또한, 12월 3일과 7일 오후 및 8일 오전에는 반대 방향인 마장 방면(KIST 후문(1) - 월곡램프(12) - 내부순환로(11) - 동부간선도로(10) - 반포대교(9) - 마포대교(8) - 강변북로(7) - 홍지문터널 출구(6) - 홍지문터널 입구(5) - 정릉터널 출구(4) - 정릉터널 입구(3) - 길음램프(2) - KIST 후문(1))의 도로상 대기오염물질을 측정하였다. 그림 1의 영문자는 각

지점 사이의 구간을 나타낸다. 예를 들어 A 구간은 KIST 후문과 길음램프 사이를 뜻한다. 총 주행거리는 1회 측정시 약 43.8 km이었고, 차고지인 KIST에서 출발하여 내부순환로를 한 바퀴 순환하고 돌아오는데 평균적으로 60분 가량 소요되었으며, 측정 일시와 주요 지점별 통과시간을 표 1에 자세하게 나타냈다. 주행 시 ML의 앞차에서 배출되는 오염물질의 영향을 직접적으로 받을 가능성이 높으므로, 앞차와 수십 미터 이상의 거리를 가능한 유지하는 것을 원칙으로 주변 교통흐름에 맞추어 운행하였다.

본 연구에서는 내부순환로 구간을 KIST 내부도로, 내부순환로 진출입 지역, 터널지역, 강변지역 및 주거지역 등 지역적 특징에 따라 구분하였다. KIST 내부도로는 통행량이 매우 적고, 교통량이 많은 주변 도로(화랑로, 북부간선도로 등)와 100 m 이상 떨어져 있어 초미세입자 농도가 가장 낮을 것으로 예상하여

**Table 1. Summary of passed time at main spots.**

| No. | Main spot<br>(Sungsan direction) | Passed time (hh:mm:ss) |          |          | No. | Main spot<br>(Majang direction) | Passed time (hh:mm:ss) |          |          |
|-----|----------------------------------|------------------------|----------|----------|-----|---------------------------------|------------------------|----------|----------|
|     |                                  | Dec 3                  | Dec 7    | Dec 8    |     |                                 | Dec 3                  | Dec 7    | Dec 8    |
| 1   | KIST                             | 10:59:07               | 11:14:40 | 16:36:50 | 1   | KIST                            | 16:35:03               | 15:35:54 | 10:10:29 |
| 2   | Gilum Ramp                       | 11:08:12               | 11:26:43 | 16:46:36 | 12  | Wolgok Ramp                     | 16:42:05               | 15:44:26 | 10:17:47 |
| 3   | Jeongneung Tunnel Entrance       | 11:11:31               | 11:32:19 | 16:49:49 | 11  | Naebu Express Way               | 16:48:04               | 15:50:03 | 10:23:13 |
| 4   | Jeongneung Tunnel Exit           | 11:12:59               | 11:33:45 | 16:51:16 | 10  | Dongbu Express Way              | 16:49:59               | 15:51:17 | 10:25:28 |
| 5   | Hongjimun Tunnel Entrance        | 11:13:11               | 11:33:57 | 16:51:28 | 9   | Banpo Bridge                    | 16:56:13               | 16:06:28 | 10:31:48 |
| 6   | Hongjimun Tunnel Exit            | 11:14:47               | 11:35:38 | 16:53:03 | 8   | Mapo Bridge                     | 17:03:38               | 16:13:35 | 10:37:46 |
| 7   | Gangbyeon Express Way            | 11:22:26               | 11:42:59 | 17:01:00 | 7   | Gangbyeon Express Way           | 17:08:54               | 16:19:01 | 10:42:57 |
| 8   | Mapo Bridge                      | 11:31:55               | 11:46:52 | 17:05:57 | 6   | Hongjimun Tunnel Exit           | 17:16:31               | 16:27:24 | 10:57:12 |
| 9   | Banpo Bridge                     | 11:43:04               | 11:54:04 | 17:14:00 | 5   | Hongjimun Tunnel Entrance       | 17:19:37               | 16:29:14 | 11:01:06 |
| 10  | Dongbu Express Way               | 11:48:53               | 11:58:32 | 17:19:36 | 4   | Jeongneung Tunnel Exit          | 17:19:50               | 16:29:26 | 11:01:20 |
| 11  | Naebu Express Way                | 11:50:54               | 12:00:04 | 17:21:13 | 3   | Jeongneung Tunnel Entrance      | 17:21:24               | 16:31:05 | 11:02:54 |
| 12  | Wolgok Ramp                      | 11:56:32               | 12:05:35 | 17:27:12 | 2   | Gilum Ramp                      | 17:27:17               | 16:36:28 | 11:06:02 |
| 1   | KIST                             | 11:59:07               | 12:08:07 | 17:30:38 | 1   | KIST                            | 17:38:09               | 16:46:57 | 11:13:27 |
|     | Travelled time                   | 01:00:00               | 00:53:27 | 00:53:48 |     | Travelled time                  | 01:03:06               | 01:11:03 | 01:02:58 |

비교 지역으로 고려하였다. 내부순환로 진출입 구간인 길음램프와 월곡램프가 포함되어 있는 A, K 구간에서는 내부순환로 본선, 시내도로로 진출하기 위해 차선 수가 줄어드는 구간으로 정체가 빈번하게 나타난다. 터널지역인 C, D 구간은 각각 정릉터널과 홍지문터널을 나타내며, 두 터널은 복악산을 가로지르며 통과한다. 성산 방향의 경우 정릉터널 진입 직전까지 구간(B)은 오르막이고 두 터널은 내리막인데, 정릉터널은 경사도가 약 0.3%, 홍지문 터널은 약 2.2%로 정릉터널에 비해 가파르다. F~I 구간은 한강변 도로로서 강변북로(7)에서 내부순환로(11)까지를 나타낸다. 성산 방향을 기준으로 할 때, 좌측은 아파트, 빌라 등이 있는 주거지역이며, 우측은 한강변 휴게시설(산책로, 자전거 도로, 경기장, 공원 등)과 한강이 위치해 있다. B, E, J 구간은 전반적으로 주거지역과 매우 가까운 편으로 강변구간과는 다르게 고가도로로 이루어져 있으며, 내부순환로 본선 주변에 고층 아파트와 단독주택으로 구성된 주거지역이 인접해 있다.

서울도시고속도로 교통관리센터에서는 내부순환로 전구간을 나들목, 진출입램프, 터널 입출구 등의 27개 지점으로 나누어 총 26개 구간별로 교통량과 차속 자료를 수집하고 있다. 이에 본 연구에서는 서울도시고속도로 교통관리센터로부터 측정기간의 교통량 정보를 입수하여 내부순환로 구간별 시간 평균 교통량의 변화를 그림 2에 나타내었다. 2009년 12월 3, 7, 8일의 측정기간(3일) 동안 성산 방향과 마장 방향에 대한 시간당 교통량의 평균과 표준편차를 그림 2에 나타내었다. KIST 후문에서 길음램프 사이의 A 구간, 월곡램프에서 KIST 후문 사이의 K 구간은 내부순환로 진출입 구간이므로 교통량 데이터를 얻을 수 없었다. 전반적으로 성산 방향과 마장 방향 모두 교통량의 일변화 경향은 유사하였으며, 새벽 3~5시에 교통량이 가장 적었고, 출근 시간대인 7시에 급격히 증가하여 낮 시간 동안 교통량이 지속적으로 유지되었다. 이후 17시를 전후로 교통량이 감소하였으며, 22시 이후부터 새벽까지는 급격하게 감소하는 경향을 나타내었다. 양 방향에서 모두 강변도로인 F~I 구간의 교통량은 도로터널과 주거지역에 비해 많았으며, 성산 방면 10~12시 평균 교통량은 6,664대/h였고, 마장 방면 16~18시 평균 교통량은 6,544대/h였다. 터널지역은 성산, 마장 방면 각각 4174, 4394대/h로 관측되었으며, 주거지역은 각각 3214, 3303대/h

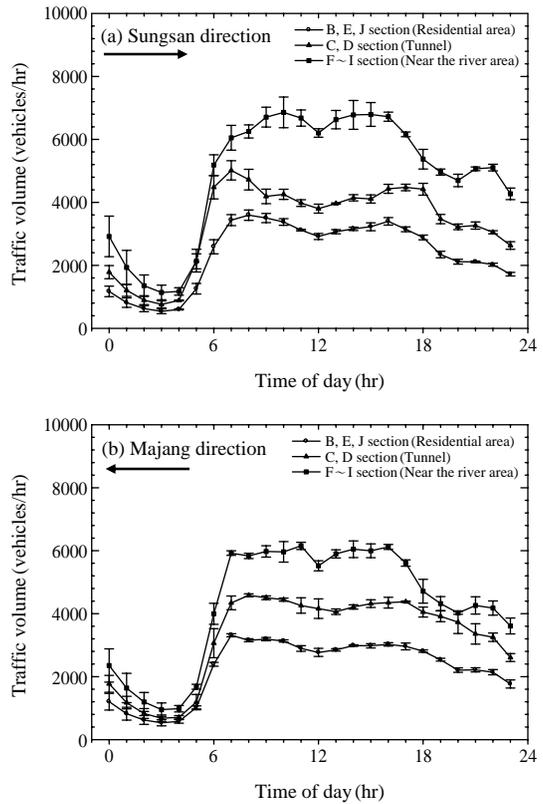


Fig. 2. Traffic volumes on the Naebu express way in Seoul, Korea.

로 나타났으며, 세 지역 중 교통량이 가장 적었다.

본 연구에서는 ML을 이용하여 2009년 12월 3, 7, 8일에 걸쳐 내부순환로를 주행하면서 매초마다 입자의 수 농도 및 입경분포를 측정하여 도로상 오염도의 공간분포 특징을 알아보았다. 이 때 ML 차량의 구간별 평균차속과 표준편차를 그림 3에 나타내었다. C 구간(정릉터널 입구-출구)과 D 구간(홍지문터널 입구-출구)에서는 GPS 데이터를 얻지 못하므로, 터널길이와 통과시간으로부터 평균차속을 구하여 일정하다고 가정하였다. ML 차량속도는 신호대기 교통체증으로 인한 정지상태부터 최고 103 km/h까지 큰 폭으로 변하였으며, 평균적으로 성산 방면은  $51 \pm 12$  km/h이었으며, 마장 방면은  $45 \pm 14$  km/h이었다. 측정 시 주변 교통흐름에 맞추어서 ML 차량을 운전하였으므로 주변 차량의 평균차속과 비슷한 수준일 것으로 생각한다. A 구간(KIST 후문-길음램프), K 구간(월곡램프

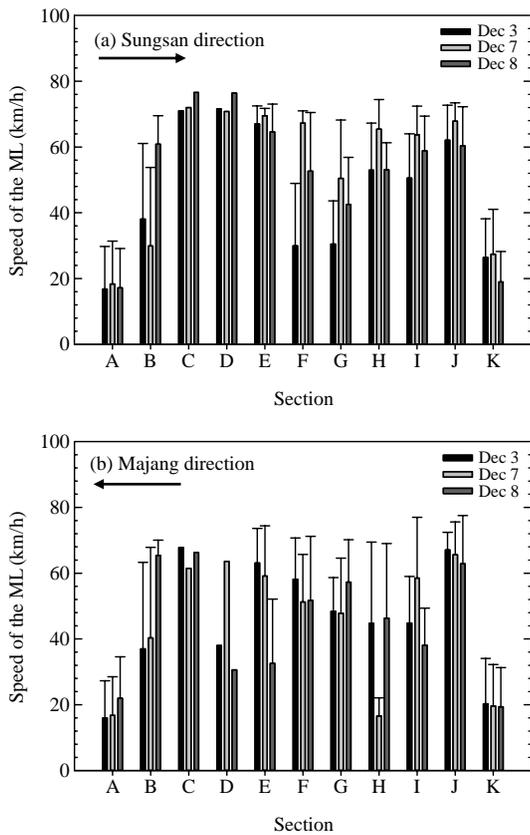


Fig. 3. Driving speed variations of the mobile laboratory on the Naebu express way in Seoul, Korea.

- KIST 후문)과 같은 내부순환로 진출입 구간은 병목 구간이므로 타 구간에 비해 평균차속이 가장 낮았으며, B 구간(길음램프- 정릉터널 입구)은 ML이 내부순환로에 진입하여 교통흐름을 따라잡기 위한 가속 구간이므로 표준편차가 크게 나타났다. 각 구간별 평균차속과 실제 주행시간대 구간별 교통량의 선형 상관관계수(R)는 성산, 마장 방면 각각 0.33, 0.19로 매우 낮아 직접적인 상관관계를 찾을 수는 없었다. 성산 방면 주행에서는 12월 3일 평균속도가  $47 \pm 14$  km/h로 7, 8일 각각  $55 \pm 11$  및  $53 \pm 11$  km/h에 비해 낮았으며, 마장 방면 주행에서는 3일간 평균속도가 각각  $46 \pm 14$ ,  $46 \pm 15$  및  $45 \pm 14$  km/h로 비슷하였다.

## 2.2 측정장비

본 연구팀에서는 ML 내부에 1초마다 5.6~560 nm

범위의 입경분포를 측정할 수 있는 fast mobility particle sizer (FMPS, TSI model 3091)와 5 nm 이상의 입자 수 농도를 매 1초마다 측정할 수 있는 condensation particle counter (CPC, Grimm model 5.403)를 설치하였으며, ML 차량 앞 유리창 바로 위, 지면으로부터 2 m 높이에 내경이 48 mm이고 길이가 1.6 m인 통합흡입관을 설치하여 진공펌프로 도로상 대기를 흡입하였다. CPC는 매초마다 유효숫자 4개의 농도를 출력하므로, 예를 들어  $100,000$ 개/cm<sup>3</sup> 수준의 경우 농도 분해능은 100개/cm<sup>3</sup>이다. FMPS의 경우 각 입경 채널별 노이즈는 입자 크기가 클수록 작아지는데 약 300개/cm<sup>3</sup> 이하 수준이다. ML이 50 km/h로 주행시 흡입구에서 등속샘플링 조건인 14 m/s로 공기시료가 흡입되어 통합흡입관에서 유속이 0.6 m/s가 되고 Reynolds 수가 1900 수준으로 내부 유동이 층류가 되도록 설계하였다. 이 때 내경이 150 mm로 확대된 챔버에서 유속을 0.1 m/s로 낮춘 후, 전도성 튜브를 이용하여 FMPS와 CPC의 샘플링 공기를 각각 10, 0.3 L/min으로 흡입하였다.

대기오염물질 모니터링 자료를 위치정보 및 운전 정보와 연동시킬 수 있도록 데이터 및 차량정보 처리 시스템을 구축하였다. GPS (Ascen, GPS741)를 이용하여 매 1초마다 위도, 경도, 차속, 차가속도 데이터를 받아서 저장하였고, ML 차속이 60 km/h일 때 공간해상도는 약 17 m였다. 도로상 대기오염물질을 측정하는 동안 동시에 기상장비 (weather transmitter, WXT520)를 이용하여 기상정보를 얻었으며, FMPS와 CPC의 경우 전용 소프트웨어를 이용하여 측정 데이터를 얻었고, GPS와 기상장비는 DAQ board로 데이터를 동시에 받아 노트북에 저장하였다. 기상장비 오류로 인해 서울시 종로구 송월동 AWS 데이터를 사용하였고, 2009년 12월 3, 7, 8일의 측정기간 중 오전/오후 평균 기온은 각각 4.5/5.0, 2.0/4.1, 1.3/3.6°C이었고, 평균 풍속은 각각 3.4/2.5, 1.3/3.2, 1.7/1.6 m/s이었다. 디지털 캠코더를 ML 차량 운전석과 조수석 사이에 설치하여, 도로상에서 측정하는 동안 도로 교통상황을 기록하였다. 본 연구에 사용한 모든 측정장비는 ML 차량 내부에 설치되었으며, 전력공급이 제한적이므로 ML 차량의 얼터네이터와 12 V 산업용 배터리 4개를 병렬로 연결하고 인버터를 통하여 220 V 전원으로 변환시킨 후 기기에 공급하였다. 12월 3일 오전의 FMPS 데이터와 12월 3일 11시 46분 이후 및 7일 오

전의 CPC 데이터는 통신 오류로 인해 손실되었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 내부순환로상 초미세입자 수 농도의 공간분포 특징

본 연구에서 측정된 내부순환로상 초미세입자의 수 농도는 그림 4에 나타난 12월 7일 마장 방향의 결과 예시와 같이 위치정보를 이용하여 지도상에 표시할 수 있으므로 초미세입자 오염도의 상세 공간분포 특징을 파악할 수 있다. 그림 4에서 GPS 측정값이 유실되는 터널 내부의 경우 차속이 일정하다고 가정하여 터널 밖의 위도 및 경도를 내삽하여 위치를 구하였다. 그림 5에 CPC 측정결과를 이용하여 내부순환로 구간별 입자 수 농도 분포를 box plot으로 나타내었다. 그림에서 중간값과 평균값을 박스 내부의 가는 수평선과 굵은 수평선으로 나타내었고, 25%와 75%의 백분위를 박스로 나타내었으며, 10%와 90% 백분위를 박스 밖의 수평선으로 나타내었다. 5% 미만과 95% 초과 데이터를 심볼로 나타내었다. KIST 내부도로는 통행량이 매우 적고, 교통량이 많은 도로(북부간선도로 및 화랑로)와 100 m 이상 떨어져 있으므로, 본 연구의 주행도로상 배경농도로 간주하여 각 구간별 입자 수 농도와 비교하기 위하여 내부순환로를 측정하기 전과 종료 직전 3분간 KIST 내부도로를 측정하였다. 그림 5에서 보듯이 모든 측정에서 KIST 내부도로상 입자의 평균 수 농도는 나머지 구간에 비하여 절반 이하 수준으로 낮았다. 터널지역인 C 또는 D 구간에서 전 구간 중 입자 수 농도 분포가 가장 넓게 나타났으며, 각 측정의 최고농도가 관찰된 것 이외에 나머지 구간의 농도 순위에서 일정한 경향성은 관찰되지 않았다.

측정기간 동안 성산/마장 방향으로 구간별 입자 수 농도 수준을 비교하면, C (368,662개/cm<sup>3</sup>) > D (334,737개/cm<sup>3</sup>) > B (139,137개/cm<sup>3</sup>) > I (133,669개/cm<sup>3</sup>), K (133,667개/cm<sup>3</sup>) > G (129,458개/cm<sup>3</sup>), A (129,406개/cm<sup>3</sup>) > J (127,149개/cm<sup>3</sup>) > E (125,249개/cm<sup>3</sup>) > F (123,112개/cm<sup>3</sup>) > H (118,366개/cm<sup>3</sup>)로 C, D 구간의 터널에서 가장 높은 수 농도가 측정되었으며, 이 외에 구간별 차이는 크지 않았다.

표 2에 성산 방면과 마장 방면의 구간별 초미세

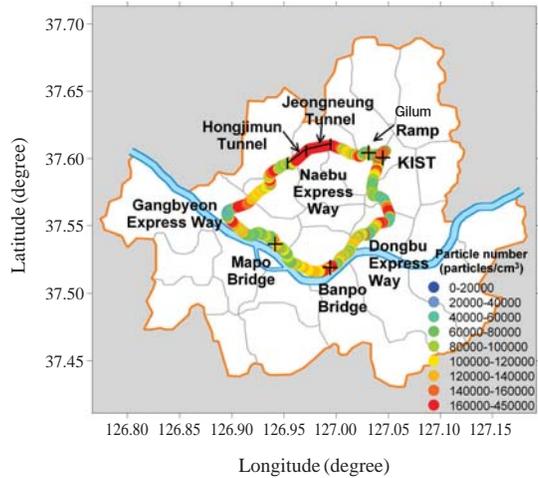
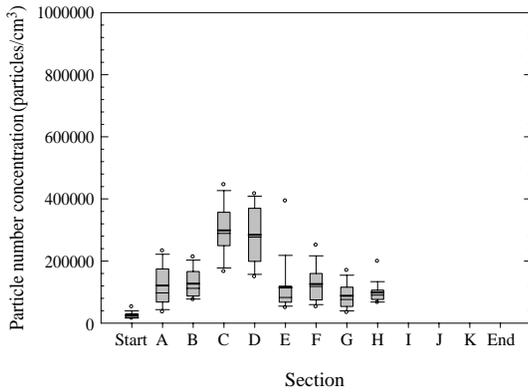
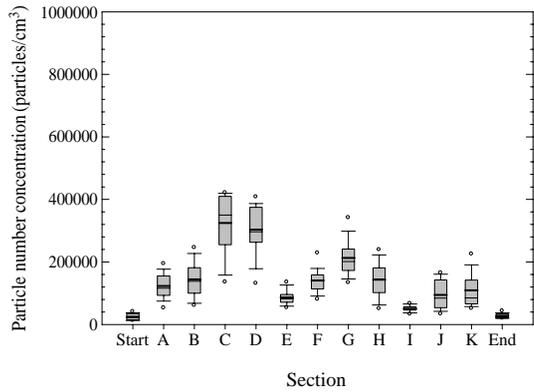


Fig. 4. Spatial distribution of ultrafine particles >5 nm on the Naebu express way in Seoul, Korea on 7 December 2009.

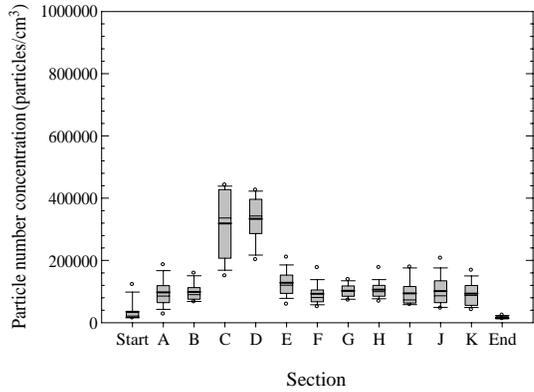
입자 수 농도의 평균과 표준편차를 함께 나타내었고, 이 구간별 평균을 이용하여 내부순환로상(B~J) 거리 가중 평균을 계산하면 입자 수 농도는 2009년 12월 3일 오전, 8일 오후 성산 방면의 경우 각각 137414, 151166개/cm<sup>3</sup>으로 나타났으며, 12월 3일 오후, 7일 오후, 8일 오전의 마장 방면의 경우 각각 144195, 127443 및 181044개/cm<sup>3</sup>으로 나타났다. 전반적으로 양방향 모두 입자 수 농도 변화 경향이 유사하게 나타났으며, 주행 방향 및 오전/오후에 따른 차이는 크지 않았다. 터널 구간을 제외한 내부순환로상 평균 입자 수 농도는 서울 기상을 대표하는 송월동에서 측정된 풍속과 R<sup>2</sup>=0.74인 양호한 음의 상관관계를 보였는데, 이는 풍속이 높을수록 희석효과가 커지기 때문이다. 표 2에서 12월 3일 오후 마장 방면에서 I 구간의 입자의 수 농도는 50,304개/cm<sup>3</sup>로 가장 낮았는데, 이 구간의 거리는 약 1.7 km로 짧고 당시 통과시간도 2분 이내로 짧아서 잠시 동안 저농도가 관측된 특이한 경우로 생각한다. 또한, 그림 3(b)에서 보듯이 마장 방면 H 구간의 경우 12월 7일은 정체가 심해 평균 차속이 나머지 두 날의 절반 이하 수준이었는데, 이 때 입자의 수 농도는 표 3에서 보듯이 차속이 높은 날의 약 70% 수준으로 낮았다(Kittelson et al., 2004).



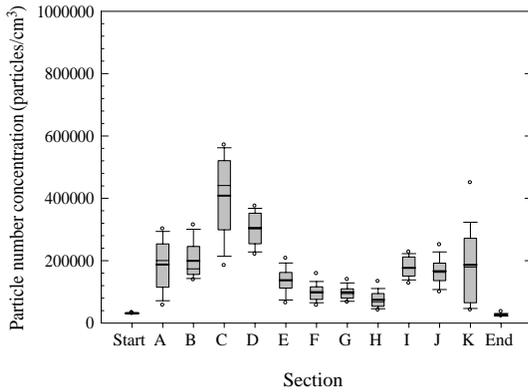
(a) December 3, Sungsan direction



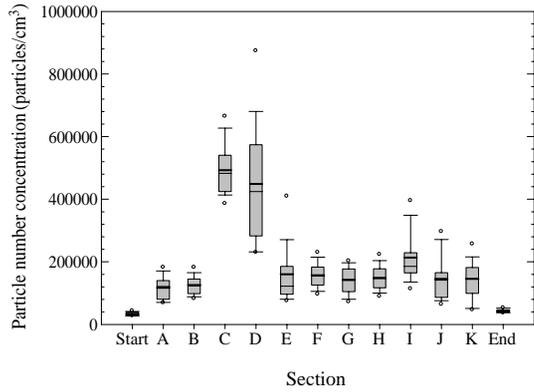
(b) December 3, Majang direction



(c) December 7, Majang direction



(d) December 8, Sungsan direction



(e) December 8, Majang direction

**Fig. 5. Box-whisker plot for variation of the particle number concentration measured by a CPC. Upper and lower boundaries of the box indicate the 25<sup>th</sup> and 75<sup>th</sup> percentiles, respectively. Thin and thick lines within the box mark median and mean values, respectively. Whiskers above and below the box indicate the 90<sup>th</sup> and 10<sup>th</sup> percentiles, respectively. 95<sup>th</sup> and 5<sup>th</sup> percentiles are shown as symbols.**

**Table 2. Statistics of particle number concentration measured by a CPC on 3, 7, and 8 December 2009.**

(unit: particles/cm<sup>3</sup>)

| Section | Sungsan direction |                   | Majang direction |                   |                   |
|---------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|
|         | Dec 3             | Dec 8             | Dec 3            | Dec 7             | Dec 8             |
| KIST    | 26,033 ± 9,797*   | 31,422 ± 1,119    | 24,776 ± 11,158  | 35,206 ± 31,612   | 33,477 ± 5,467    |
| A       | 121,595 ± 68,329  | 187,566 ± 81,770  | 123,338 ± 42,487 | 97,210 ± 50,155   | 117,321 ± 37,574  |
| B       | 127,123 ± 48,479  | 199,471 ± 59,205  | 144,476 ± 57,792 | 98,940 ± 29,739   | 125,675 ± 33,229  |
| C       | 298,722 ± 82,907  | 408,152 ± 124,604 | 324,697 ± 94,191 | 318,696 ± 111,576 | 493,045 ± 82,697  |
| D       | 284,349 ± 92,688  | 303,528 ± 50,794  | 303,151 ± 79,987 | 333,618 ± 71,764  | 449,037 ± 193,877 |
| E       | 114,819 ± 89,209  | 136,845 ± 41,408  | 86,253 ± 22,996  | 127,960 ± 47,415  | 160,369 ± 109,149 |
| F       | 125,815 ± 58,849  | 99,186 ± 29,236   | 140,743 ± 39,733 | 92,633 ± 38,307   | 157,181 ± 41,355  |
| G       | 91,259 ± 45,401   | 98,555 ± 25,943   | 212,887 ± 58,009 | 102,602 ± 21,967  | 141,989 ± 42,277  |
| H       | lost              | 74,652 ± 26,938   | 143,505 ± 56,700 | 106,339 ± 33,671  | 148,967 ± 41,208  |
| I       | lost              | 177,006 ± 32,447  | 50,304 ± 9,457   | 94,169 ± 41,630   | 213,196 ± 89,856  |
| J       | lost              | 166,488 ± 43,267  | 94,420 ± 45,984  | 101,775 ± 49,352  | 145,914 ± 70,711  |
| K       | lost              | 186,553 ± 122,056 | 109,245 ± 53,872 | 93,199 ± 41,029   | 145,671 ± 64,185  |

\* average ± standard deviation

**Table 3. Summary of the particle number concentrations averaged by sections on the Naebu express way.**

| Section                                      | Particle number concentration (× 10 <sup>3</sup> particles/cm <sup>3</sup> ) |           |           |            |                          |                       |
|--|--|-----------|-----------|------------|--------------------------|-----------------------|
|  | This study   |           |           |            | References               |                       |
|  | >5 nm  | 5.6~21 nm | 21~100 nm | 100~560 nm | 5.6~100 nm <sup>1)</sup> | >10 nm <sup>2)</sup>  |
| KIST   | 30 ± 5   | 5 ± 2     | 20 ± 5    | 7 ± 3      | 13 <sup>a</sup>          |                       |
| Entrance (A, K)                              | 130 ± 34   | 53 ± 20   | 81 ± 21   | 13 ± 3     | 25 <sup>b</sup>          | 133 ± 15 <sup>b</sup> |
| Residential area (B, E, J)                   | 128 ± 25   | 62 ± 16   | 66 ± 12   | 10 ± 3     |                          |                       |
| Along the Han river (F~I)                    | 124 ± 30   | 58 ± 28   | 63 ± 13   | 10 ± 2     |                          |                       |
| Naebu express way (B~J)                      | 148 ± 20   | 72 ± 15   | 81 ± 13   | 11 ± 2     |                          |                       |
| Tunnels (C, D)                               | 232 ± 46   | 192 ± 70  | 238 ± 58  | 24 ± 6     |                          |                       |
| Naebu express way excluding tunnels (B, E~J) | 126 ± 17   | 60 ± 12   | 65 ± 10   | 10 ± 2     | 74 <sup>c</sup>          | 140 ± 48 <sup>c</sup> |

“±” indicates standard deviations. Averages of traffic volume and driving speed in this study were 161,600 vehicles/day and 48 km/h, respectively. <sup>1)</sup>Hagler *et al.* (2010) (North Carolina, USA), Average of traffic volume and driving speed were <500~87000 vehicles/day and 40~91 km/h, respectively. <sup>2)</sup>Schneider *et al.* (2008) (Aachen, Germany) <sup>a</sup>urban background, <sup>b</sup>arterial road, <sup>c</sup>highway or motorway

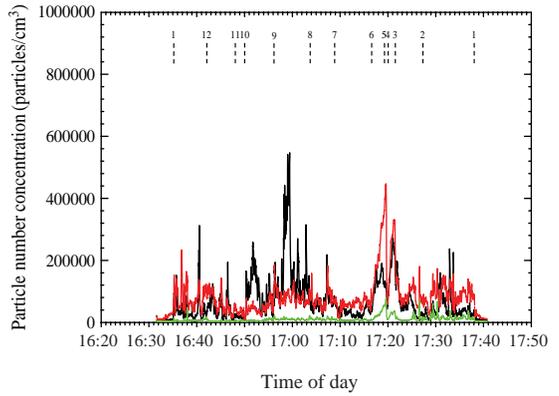
### 3. 2 내부순환로상 초미세입자 입경분포의 공간분포 특징

입경별 수 농도 변화를 살펴보기 위하여 5.6~560 nm 측정범위를 가진 FMPS 데이터를 각각 5.6~21, 21~100 및 100~560 nm 범위의 입자 수 농도로 구분하여 그림 6에 나타내었다. 전반적으로 입자의 수 농도가 짧은 시간 동안 큰 폭으로 변화였고, 100 nm 이하인 입자가 지배적이었다.

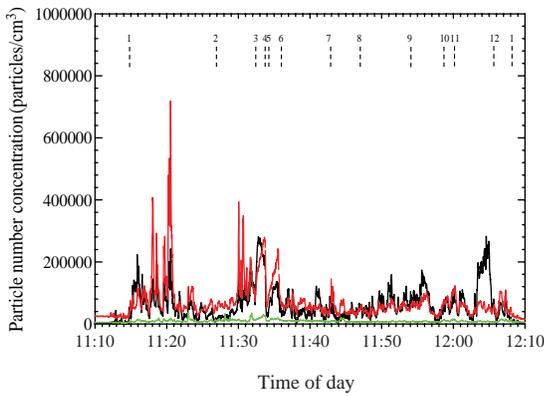
대부분의 구간에서 초미세입자는 그 경향이 매우 유사하나 그림 6(a)의 G~I 구간, (b)의 J 구간, (d)의 B, J 구간, (e)의 D~E 구간과 같이 21 nm 이하인 입자의 수 농도가 21~100 nm 범위의 입자 수 농도에 비해 매우 높게 나타나는 경향이 있었다. 이는 ML로

이동하면서 측정할 때 실제 도로상 오염도와 함께 교통량, 차속, 출발/정지, 지역적 환경 등의 영향으로 인해 21 nm 이하의 초미세입자 비율이 높아졌을 것으로 추정된다 (Lee *et al.*, 2011; Kittelson *et al.*, 2004; Zhu *et al.*, 2002). 본 연구에서는 측정자료가 많지 않아 이러한 상관성을 정확히 규명할 수 없었으며, 향후 추가적인 측정을 통해 이를 규명할 필요가 있다.

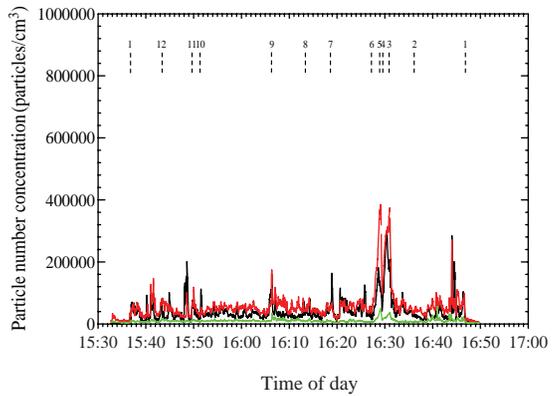
도로상에서 짧은 시간 동안 입자 수 농도의 변동이 컸는데, 이러한 변화를 주도하는 입자의 크기를 알아보기 위해서 그림 7에 FMPS로 매 1초마다 측정된 내부순환로 구간별 입경분포 변화를 나타내었다. x축은 시간, y축은 입경, color contour는 입자의 수 농도를 나타낸다. 전반적으로 100 nm 이하인 초미세



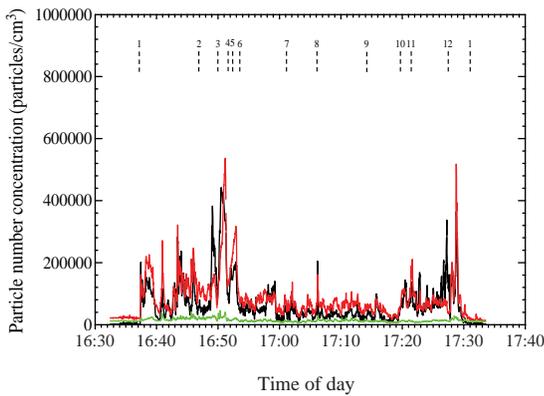
(a) December 3, Majang direction



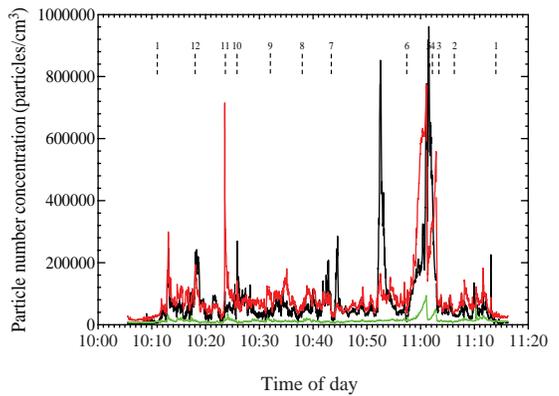
(b) December 7, Sungsan direction



(c) December 7, Majang direction



(d) December 8, Sungsan direction



(e) December 8, Majang direction

Fig. 6. Variation of the particle number concentration measured by an FMPS (<21 nm: black line, 21 ~ 100 nm: red line, >100 nm: green line).

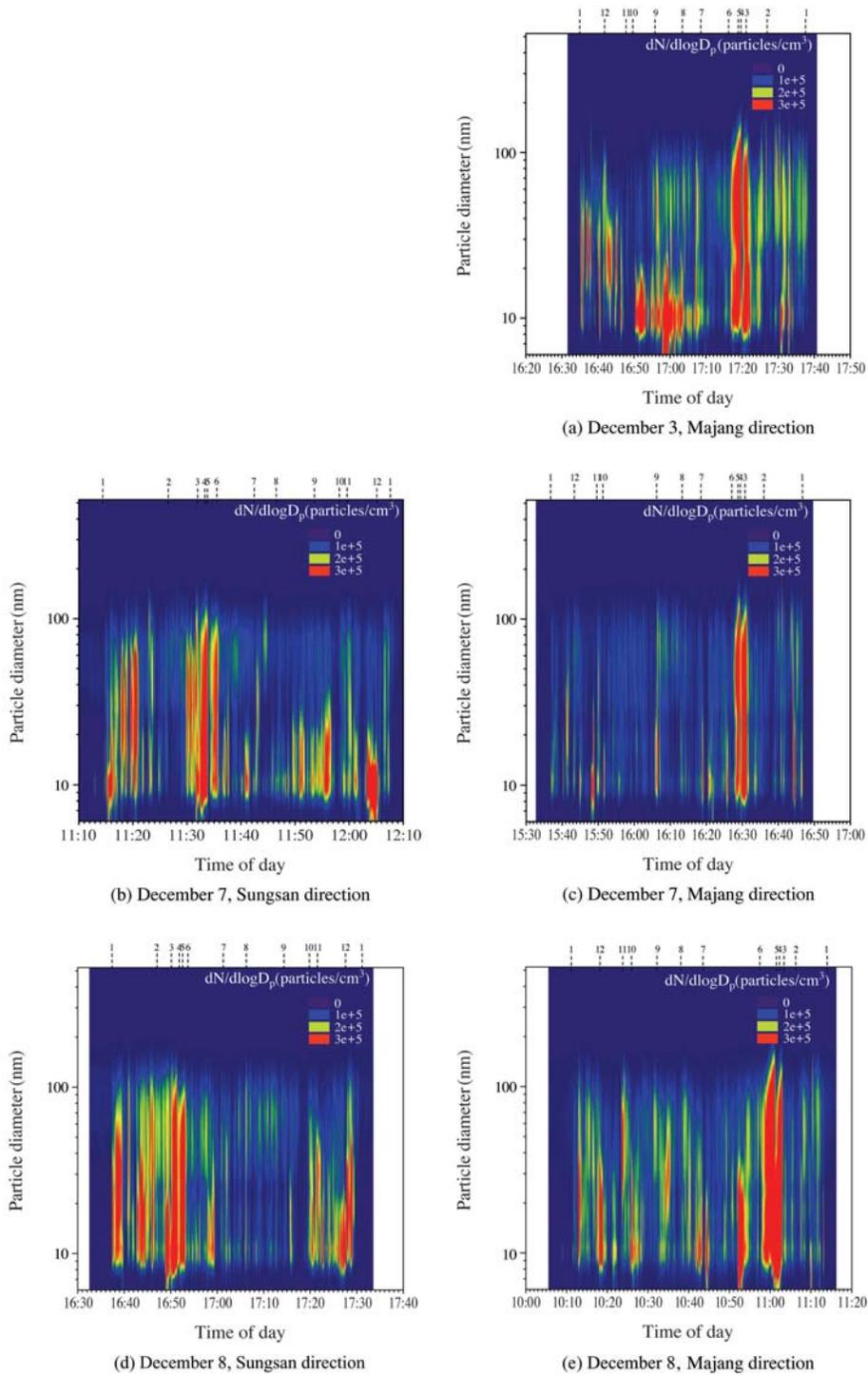


Fig. 7. Variation of the particle size distribution measured by an FMPS with diameter on the vertical axis and particle concentration ( $dN/d\log D_p$ ) represented by color contours.

입자가 높은 농도로 빈번하게 측정되었으며, KIST 내부도로에서는 가장 낮은 농도의 입경분포를 나타냈으며, 타구간과는 다르게 10 nm 근처의 모드 입경은 관측되지 않았고 40~60 nm 사이에서 모드입경이 발생하는 unimodal 형태의 입경분포가 나타났다. 이는 2007년 중국 베이징 Peking University Health Science Center (PKUHSC)의 캠퍼스에서 일반 대기를 측정하였을 때, 도로상 측정농도에 비해 10 nm 주변의 농도가 매우 낮았고, 40 nm 주변으로 모드입경이 나타난 것과 유사하다 (Westerdahl *et al.*, 2009).

C, D 구간에서는 10 nm와 50 nm 주변으로 모드입경이 발생하는 bimodal 형태의 입경분포가 특징적으로 나타났다. 또한, 앞서 언급한 바와 같이 전체 측정일 중 고농도의 초미세입자가 C, D 구간에서 지속적으로 측정되었고, 터널 입구에서 출구로 갈수록 고농도가 발생한 입경범위는 10~70 nm 범위에서 10~100 nm 정도로 점차 확대되었다. 이는 터널 내부에서 배출된 입자들이 차량흐름과 유동흐름에 따라 응집 (agglomeration)되어 출구 쪽에서 더 큰 입자로 성장했을 것으로 추정된다 (Park *et al.*, 2012).

12월 3일, 8일 마장 방면, 7일 성산 방면 주행 시 한강변 도로인 F~I 구간에서는 10 nm 근처에서 고농도의 모드입경이 측정되었고, 50 nm 주변에서 두 번째 모드입경이 나타났다 (그림 7(a), (b), (e)). 그림 6에서도 볼 수 있듯이 20 nm 이하인 입자의 비율이 전반적으로 높아졌으며, 수 농도의 변동폭이 매우 크고 변동도 빈번하게 발생하였다.

### 3.3 지역별 내부순환로상 초미세입자 오염 특징

그림 7에 나타낸 입경분포의 특징을 지역별로 상세히 살펴보기 위해 12월 7일 마장 방면 입경분포 데이터를 5가지 유사한 환경적 특징이 있는 구간별 (KIST 내부도로, 내부순환로 진출입 구간 (A, K), 터널 구간 (C, D), 한강변 도로 구간 (F~I)과 주거지역 구간 (B, E, J))로 평균과 표준편차를 구하여 그림 8에 나타내었다. KIST 내부도로의 입경분포를 나타낸 그림 8(a)를 보면, 다른 구간에 비해 수 농도가 가장 낮게 나타났으며, 40 nm 주변에서 모드입경이 나타나는 unimodal 형태의 입경분포를 나타냈다. KIST 후문에서 내부순환로 진출입 구간까지의 입경분포를 나타낸 그림 8(b)를 보면, 전체적으로 초미세입자 영역의 수 농도가 매우 높아졌고, 10 nm와 40 nm 주변에

서 두 개의 모드입경이 나타났다. KIST 내부도로와 달리 후문을 나서자마자 고농도의 입자가 측정되었고, 특히 도로상에서는 10 nm 주변 입자들이 점차 많이 나타났으며, 농도 변화가 매우 심하게 나타났다. 터널 내부의 입경분포를 나타낸 그림 8(c)를 보면, 터널 내부에서는 10 nm와 50 nm 모드입경을 가지는 bimodal 분포를 나타냈으며, 모든 구간 중에서 가장 높은 농도를 나타내었다. 대부분의 입경범위에서 표준편차도 매우 크게 나타났는데, 이는 전 범위에서 농도 변화가 매우 심하게 일어나는 것을 의미한다. 한강변 도로 구간의 입경분포를 나타낸 그림 8(d)를 보면, 터널 내부 입경분포와 비교하였을 때, 10 nm 주변 입자가 매우 높게 나타났다. 본 연구에서는 측정자료가 많지 않으므로, 추후 연구를 통해 이와 같은 현상을 더 자세하게 규명할 필요가 있다. 내부순환로 주변으로 고층의 아파트와 단독주택으로 구성된 주거지역이 있는 B, E, J 구간 평균 입경분포를 나타낸 그림 8(e)를 보면, 내부순환로 진출입 구간의 입경분포와 유사하게 나타났으며, 비슷한 수준의 농도로 관측되었다.

입자 수 농도의 각 구간별 평균값을 이용하고 거리를 가중치로 구한 각 지역별 입자 수 농도의 평균값을 각 측정일별로 계산하고 이를 이용하여 다시 총 측정기간 평균을 계산하여 기존 연구결과들과 함께 표 3에 나타내었다. 측정기간 동안 성산/마장 방면 전구간 (B~J)에서 5 nm 이상인 입자의 수 농도 평균값은 148,252개/cm<sup>3</sup>이었고, 희석이 제한되는 공간인 터널지역에서 농도는 232,000개/cm<sup>3</sup>로 가장 높아 나머지 구간들의 평균인 126,000개/cm<sup>3</sup>에 비해 1.8배 높았다. 한편 입자의 수 농도는 주거지역 (B, E, J 구간)의 경우 124,000개/cm<sup>3</sup>로 한강변 지역인 F~I 구간 (강변북로 - 마포대교 - 반포대교 - 동부간선도로)과 유사하였는데, 그림 2에서 보듯이 주거지역의 교통량은 한강변 지역 교통량의 절반 수준이지만 주거지역 도로의 폭이 상대적으로 좁고, 방음벽이나 인접한 고층 건물들로 둘러싸여 있어서 희석효과가 상대적으로 크지 않았기 때문인 것으로 추정된다.

터널을 제외한 내부순환로상 평균 입자 수 농도인 126,000개/cm<sup>3</sup>는 주행도로상 배경농도로 간주할 수 있는 KIST 내부도로의 평균 농도인 30,000개/cm<sup>3</sup>보다 약 4.2배 높았고, 2010년 10월 서울시 노원구 주요 도로의 전구간 평균인 55,570개/cm<sup>3</sup>보다 약 2.3

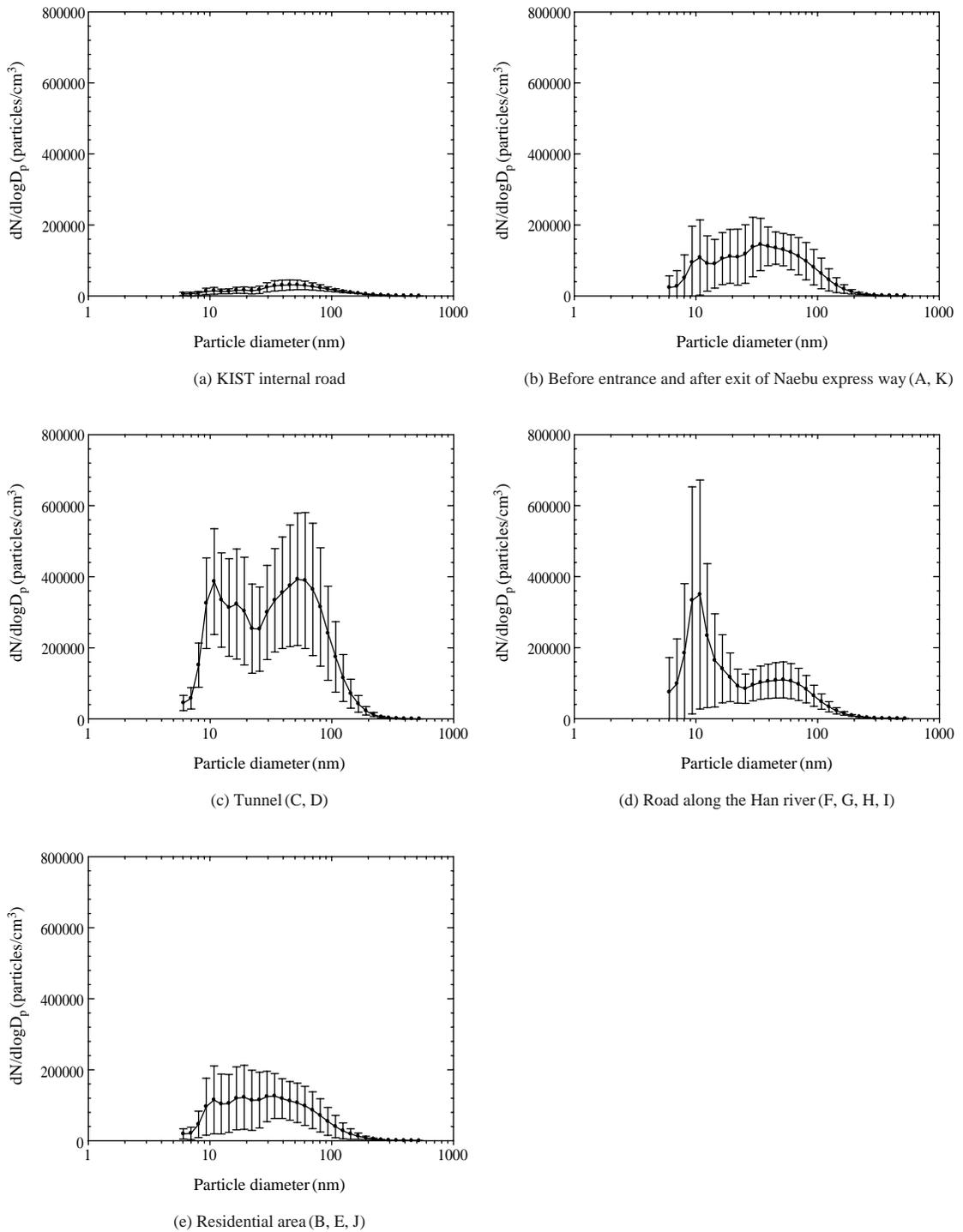


Fig. 8. On-road particle size distributions for each driving section with Majang direction measured on 7 December 2009.

**Table 4. Coefficients of determination ( $R^2$ ) for particle number concentrations measured by a CPC and an FMPS with distance in tunnels.**

| Size range | Sungsan direction |                 |       |      |       |      | Majang direction |      |       |      |       |      |
|------------|-------------------|-----------------|-------|------|-------|------|------------------|------|-------|------|-------|------|
|            | Dec 3             |                 | Dec 7 |      | Dec 8 |      | Dec 3            |      | Dec 7 |      | Dec 8 |      |
|            | J <sup>1)</sup>   | H <sup>2)</sup> | J     | H    | J     | H    | J                | H    | J     | H    | J     | H    |
| > 5 nm     | 0.72              | 0.94            | —     | —    | 0.98  | 0.92 | 0.89             | 0.91 | 0.76  | 0.99 | 0.49  | 0.92 |
| 5.6~21 nm  | —                 | —               | 0.08  | 0.87 | 0.63  | 0.75 | 0.88             | 0.25 | 0.38  | 0.71 | 0.80  | 0.65 |
| 21~100 nm  | —                 | —               | 0.94  | 0.98 | 0.97  | 0.99 | 0.95             | 0.97 | 0.90  | 0.96 | 0.89  | 0.94 |
| 100~560 nm | —                 | —               | 0.89  | 0.72 | 0.16  | 0.28 | 0.84             | 0.91 | 0.94  | 0.91 | 0.94  | 0.82 |
| 5.6~560 nm | —                 | —               | 0.59  | 0.97 | 0.95  | 0.95 | 0.94             | 0.94 | 0.74  | 0.97 | 0.43  | 0.92 |

<sup>1)</sup>Jeongneung Tunnel, <sup>2)</sup>Hongjimun Tunnel

배 높았다. 또한, 측정범위가 일치하지 않아서 직접적으로 비교하기는 어렵지만 표 3에 나타난 것과 같이 2009년 겨울철 서울시 내부순환로상 입자 수 농도는 2005년 6월 9일 교통체증이 심하게 발생한 오전 9시 42분부터 10시 17분까지 독일 Aachen의 시내 도로를 주행하면서 측정된 10 nm 이상의 입자 수 농도인 133,000개/cm<sup>3</sup>와 유사한 수준인 반면 (Schneider *et al.*, 2008), 미국 North Carolina의 Durham을 관통하는 고속도로에 인접한 지역의 오염도보다는 2배 가량 높았다 (Hagler *et al.*, 2010).

측정기간 동안 터널을 제외한 내부순환로 도로상에서 측정된 5.6~560 nm 범위인 입자의 평균 수 농도인 135,000개/cm<sup>3</sup> 중에서 100 nm 이하의 초미세입자는 평균적으로 약 125,000개/cm<sup>3</sup>로 100 nm 이상의 미세입자에 비해 13배 가량 높았고, 수 농도 변화를 주도하였다. 초미세입자는 다시 21 nm를 기준으로 5.6~21, 21~100 nm의 범위로 나타내었으며, 각각 평균적으로 60000, 65000개/cm<sup>3</sup>로 측정되었다. 또한, 측정방법의 차이 및 장비 특성 등의 차이로 인해 직접적인 수 농도 비교는 어렵지만, 서울시 서대문구 신촌동에 위치한 연세대학교 정문 도로변에서 SMPS (20~600 nm)로 측정된 3월 19~21일의 일평균 수 농도(확산 손실을 고려하지 않음)에 비해 초미세입자 (20~100 nm)의 경우 약 4배, 미세입자(100~600 nm)의 경우는 약 2배 높았다 (Bae *et al.*, 2007).

앞서 언급한 바와 같이 교통량이 매우 적고 큰 오염원이 없는 KIST 내부도로에서 5.6~21, 21~100 nm 범위의 입자 수 농도는 100~560 nm 범위인 입자 수 농도의 각각 0.7, 2.9배였는데, 내부순환로 전 구간에서는 각각 6.5, 7.4배로 KIST 내부도로에 비해 100 nm

이하의 초미세입자 비율이 더욱 높아졌다.

그림 6에서 보듯이 성산, 마장 방향의 정릉터널과 홍지문터널 모두 터널 입구에서 출구로 갈수록 대기 오염물질의 농도가 점차적으로 증가하다가 출구 직전에서 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 터널 출구를 통해 상대적으로 깨끗한 외부공기와 혼합되어 희석효과가 나타났을 것으로 추정된다 (Park *et al.*, 2012). 표 4에 성산, 마장 방향으로 5.6~560 nm 범위의 입경별 FMPS 데이터를 5.6~21, 21~100, 100~560 nm로 나누어 CPC로 측정된 입자 수 농도와 상관성을 살펴보았다. 터널 내부에서는 GPS 신호 통신이 불가하여 ML 차속 데이터를 얻을 수 없으므로 터널 진입 및 진출 시간을 이용하여 평균 차속으로 계산하였으며, 선형성을 살펴보기 위해 터널 출구 직전의 감소하는 농도 구간은 제외하였다. 터널의 종류, 주행방향과는 상관없이 21~100 nm 범위의 초미세입자 농도는 터널 입구로부터의 거리와 결정계수 ( $R^2$ )가 0.89~0.99 범위로 매우 높은 선형 상관성을 나타냈으며, 선형 회귀식의 기울기, 즉 단위 거리(m) 당 농도의 증가는 89.9~406.8 (평균 193)개/cm<sup>3</sup> 범위로 나타났다. 한편, 21 nm 이하의 입자 수 농도의 경우 0.08~0.88 범위로 모든 측정에서 21~100 nm 범위인 입자의  $R^2$ 보다 낮았다. 100 nm 이상의 미세입자의 경우 12월 8일 성산 방향 측정을 제외하고 터널입구로부터 거리와 결정계수가 0.72~0.94 범위인 높은 상관성을 나타냈는데, 단위 거리당 농도의 증가는 4.8~37.2개/cm<sup>3</sup> 범위였다. 이러한 21~560 nm 범위 입자의 단위 거리당 농도 증가율은 2011년 2월 8일 오후 측정결과인 117~192개/cm<sup>3</sup>와 유사한 수준이다 (Park *et al.*, 2012). 또한, FMPS로 측정된 5.6~

560 nm 범위의 입자와 CPC로 측정된 5 nm 이상의 입자는 매우 유사한 수준의 결정계수로 나타났으며, 21~100 nm 범위의 입자 수 농도가 전체 수 농도에서 높은 비율을 차지하므로 전반적으로 상관성을 결정하는 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 2009년 12월 3, 7, 8일에 이동형 대기오염 측정 시스템(ML)을 이용하여 서울시 자동차 전용도로인 내부순환로를 길음램프와 월곡램프를 기준으로 각각 성산 방면과 마장 방면으로 주행하면서 도로상 입자 수 농도 및 입경분포를 실시간으로 측정하였다. 이러한 측정을 통하여 겨울철 내부순환로 상 입자오염 특징을 파악하였고 공간분포 특징을 조사하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 전반적으로 입자 수 농도는 도로상에서 짧은 시간 동안 큰 폭으로 변화하였다. 모든 측정자료들 통해 내부순환로 도로상 5 nm 이상 입자의 평균 수 농도는 148,000개/cm<sup>3</sup>이었다. 내부순환로 전체 구간 중 터널구간(정릉터널, 홍지문터널)에서 최고농도가 측정되었으며, 평균 농도는 232,000개/cm<sup>3</sup>로 나머지 구간의 평균 농도인 126,000개/cm<sup>3</sup>에 비해 약 1.8배 높았다. 한편, 주변이 주거지역이면서 교통량이 상대적으로 적은 구간들의 도로상 입자의 수 농도는 한강변을 끼고 있으면서 교통량이 두 배 많은 지역(강변북로-동부간선도로 구간)의 농도와 유사하였는데, 이것은 한강변 지역의 경우 도로 폭이 넓고 지형상 트인 공간이어서 희석효과가 컸기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 자동차 전용도로상 초미세입자의 농도 수준은 주행도로상 배경지역으로 간주할 수 있는 KIST 내부도로의 농도인 30,000개/cm<sup>3</sup>에 비해 4.2배 이상 높았고, 기존 연구에서 측정된 서울시 주요 간선도로 도로변 및 노원구 도로상 농도에 비해 2배 이상 높았다. 이것은 자동차 전용도로상 대기오염이 일반 지상도로상 대기오염보다 더 높다는 것을 의미하며, 향후 강남구 등 교통밀집지역의 도로상 대기오염도와 비교하여 자동차가 실주행도로상 대기오염에 미치는 영향을 밝혀낼 필요가 있다.

둘째, 내부순환로상 입경분포는 수 농도와 마찬가지로 변동이 심하고 모드입경이 달라졌다. 특히 구간

별로 모드입경이 달라지거나 변동폭이 다르게 나타났다. KIST 내부도로에서 수 농도는 가장 낮았으며, 40~60 nm 사이에서 모드입경이 발생하는 unimodal 형태의 입경분포가 나타났다. 터널 내부에서는 10 nm와 50 nm 모드입경을 가지는 bimodal 형태의 입경분포를 나타냈으며, 터널 입구에서 출구 쪽으로 고농도가 발생한 입경범위는 10~70 nm 범위에서 10~100 nm로 넓어졌다. 한강변 도로에서는 터널과 비슷한 bimodal 형태였으나, 10 nm 주변 입자가 50 nm 주변 입자보다 평균적으로 3배 높았다. 내부순환로 진출입 구간과 주거지역 구간은 10 nm와 40 nm 주변에서 두 개의 모드입경을 가지는 bimodal 형태로 유사하게 나타났으며, 비슷한 농도 수준이었다.

셋째, 성산, 마장 방면의 정릉터널과 홍지문터널은 터널 입구에서 출구로 갈수록 입자 수 농도가 점차적으로 증가하였으며, 터널 출구 직전에 외부공기와 혼합으로 농도가 급격하게 감소하였을 것으로 추정된다. 21~100 nm 범위의 입자는 터널 거리에 따라 결정계수(R<sup>2</sup>)가 0.89~0.99 범위로 매우 높은 선형 상관성을 나타냈고 21 nm 이하의 입자 수 농도는 모든 측정자료에서 낮은 상관성을 나타냈다. 터널 내부의 오염물질 공간분포는 21~100 nm 범위의 입자 수 농도가 전체 수 농도에서 높은 비율을 차지하므로 전반적으로 상관성을 결정하는 것으로 생각된다.

넷째, 터널을 제외한 내부순환로 도로상 초미세입자의 평균 농도는 풍속이 빠를수록 낮아지는 경향을 보였으므로, 향후 풍속을 고려하여 도로상 대기오염도를 분석하는 연구가 필요하다고 생각된다.

향후 주기적인 정기측정 결과를 활용하여 내부순환로 도로상 대기오염도의 계절적인 영향 및 시계열 증감 경향을 분석할 계획이다.

본 연구와 같이 이동형 대기오염 측정 시스템을 이용하여 도로상 대기오염도 수준을 상세하게 파악할 수 있으며, 운전자와 도로상 작업자 및 도로변 주거지역의 입자상 오염물질 농도 저감을 위한 기초자료 및 환경정책 수립자료로 활용될 수 있을 것이다.

#### 감사의 글

이 연구는 환경부 Eco-STAR Project(무·저공해 자동차사업단) 및 Global Top Project(친환경자동차기

솔개발사업단)와 KIST 미래원천연구사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- Andre, M., R. Joumard, R. Vidon, P. Tassel, and P. Perret (2006) Real-world European driving cycles, for measuring pollutant emissions from high- and low-powered cars, *Atmos. Environ.*, 40(31), 5944-5953.
- Attfield, M.D., P.L. Schleiff, J.H. Lubin, A. Blair, P.A. Stewart, R. Vermeulen, J.B. Coble, and D.T. Silverman (2012) The diesel exhaust in miners study: A cohort mortality study with emphasis on lung cancer, *J. Natl. Cancer Inst.*, 104(11), 869-883.
- Bae, G.-N., S. Huh, S.-B. Lee, M. An, D. Park, and J. Hwang (2007) Ultrafine particle pollution level at the roadside of Seoul in spring, *Part. Aerosol Res.*, 3(1), 29-40. (in Korean with English abstract)
- Bae, G.-N., S.J. Lee, H.-C. Jin, S.-B. Lee, S.-J. Woo, S.-H. Lee, J.-Y. Kim, and D.-C. Shin (2009) Development of a mobile emission laboratory for evaluation of air pollution nearby traffic, 2009 Fall Conference of the Korean Soc. for Atmos. Environ., 231-232. (in Korean with English abstract)
- Cocker III, D.R., S.D. Shah, K. Johnson, and J.M. Norbeck (2004a) Development and application of a mobile laboratory for measuring emissions from diesel engines. 1. Regulated gaseous emissions, *Environ. Sci. Technol.*, 38(7), 2182-2189.
- Cocker III, D.R., S.D. Shah, K. Johnson, X. Zhum, J.W. Miller, and J.M. Norbeck (2004b) Development and application of a mobile laboratory for measuring emissions from diesel engines. 2. Sampling for toxics and particulate matter, *Environ. Sci. Technol.*, 38(24), 6809-6816.
- Hagler, G.S., E.D. Thoma, and R.W. Baldauf (2010) High-resolution mobile monitoring of carbon monoxide and ultrafine particle concentrations in a near-road environment, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 60(3), 328-336.
- Han, S., K.-H. Won, K.-W. Jang, Y.-M. Son, J.-S. Kim, J.-H. Hong, and Y.-W. Jung (2007) Development and application of real-time measurement system of salt loading for estimating the emission factor of resuspended dust from paved road, *Korean J. of Atmos. Environ.*, 23(5), 596-611.
- Joumard, R., M. Andre, R. Vidon, P. Tassel, and C. Pruvost (2000) Influence of driving cycles on unit emissions from passenger cars, *Atmos. Environ.*, 34(27), 4621-4628.
- Kim, M.-H., S.-G. Park, and S.-O. Baek (2002) Characteristics of atmospheric concentrations of volatile organic compounds at a heavy-traffic site in a large urban area, *Korean J. of Atmos. Environ.*, 18(2), 113-126. (in Korean with English abstract)
- Kittelson, D., J. Johnson, W. Watts, Q. Wei, M. Drayton, D. Paulsen, and N. Bukowiecki (2000) Diesel aerosol sampling in the atmosphere, *Society of Automotive Engineers Technical Paper Series*, No. 2000-01-2212, Warrendale, PA, USA.
- Kittelson, D., W.F. Watts, and J.P. Johnson (2004) Nanoparticle emissions on Minnesota highways, *Atmos. Environ.*, 38(1), 9-19.
- Kwon, O.-Y. and Y.S. An (2006) Temporal and spatial distributions of PM<sub>10</sub>, NO<sub>x</sub> and O<sub>3</sub> around the road, *Korean J. of Atmos. Environ.*, 22(4), 440-450. (in Korean with English abstract)
- Lee, J., M. Jung, Y. Jeong, and K. Cha (2008) Analysis of diesel nano-particle characteristics for different vehicle test mode in diesel passenger vehicle, *Trans. of KSAE*, 16(1), 114-120. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.-B. and G.-N. Bae (2010) Characteristics of air pollution at a junction area contaminated with vehicle emissions, *Trans. of KSAE*, 18(4), 48-53. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.-B., D.-H. Lee, S.J. Lee, H.-C. Jin, and G.-N. Bae (2011) Characteristics of spatial distribution of ultrafine particle number concentration on the roads of Nowon-gu, Seoul, *Part. Aerosol Res.*, 7(1), 21-30. (in Korean with English abstract)
- Lee, Y., C. Cho, G. Kim, J.Y. Jung, I. Song, and H. Jung (2008) On-road measurement of exhaust emissions by remote sensing device, *Proceeding of Korean Society of Automotive Engineers 30th Anniversary Conference*, 416-420. (in Korean with English abstract)
- Mills, N.L., H. Törnqvist, M.C. Gonzalez, E. Vink, S.D. Robinson, S. Söderberg, N.A. Boon, K. Donaldson, T. Sandström, A. Blomberg, and D.E. Newby (2007) Ischemic and thrombotic effects of dilute diesel-exhaust inhalation in men with coronary heart disease, *N. Engl. J. Med.*, 357(11), 1075-1082.
- Park, B.-E., S.-B. Lee, D.-H. Lee, S.J. Lee, D.-K. Woo, J.-H. Choi, H.-C. Jin, G.-N. Bae, and S.-T. Yun (2012)

- Spatial distribution of air pollution level inside roadway tunnels in urban area, Part. *Aerosol Res.*, 8(1), 17-28. (in Korean with English abstract)
- Park, S.-K., S.-D. Kim, and J.-H. Kim (1998) A study of concentration prediction of automobile air pollutant near the highway, *Korean J. of Atmos. Environ.*, 14(6), 607-620. (in Korean with English abstract)
- Park, Y.-H., J.-C. Kim, S.-I. Kwon, T.-W. Lee, and J.-T. Lee (2005) A study on the improvement in-use vehicle inspection & maintenance program by RSD (remote sensing detector), *Proceeding of Korean Society of Automotive Engineers 2005 Fall Conference*, 159-164. (in Korean with English abstract)
- Samet, J.M., S. Zeger, F. Dominici, and F.C. Curriereo (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*.
- Schneider, J., U. Kirchner, S. Borrmann, R. Vogt, and V. Scheer (2008) In situ measurements of particle number concentration, chemically resolved size distributions and black carbon content of traffic-related emissions on German motorways, rural roads and in city traffic, *Atmos. Environ.*, 42(18), 4257-4268.
- Silverman, D.T., C.M. Samanic, J.H. Lubin, A.E. Blair, P.A. Stewart, R. Vermeulen, J.B. Coble, N. Rothman, P.L. Schleiff, W.D. Travis, R.G. Ziegler, S. Wacholder, and M.D. Attfield (2012) The diesel exhaust in miners study: A nested case-control study of lung cancer and diesel exhaust, *J. Natl. Cancer Inst.*, 104(11), 855-868.
- Son, B.S. (1999) Development of strategies and methods for improving the mobility, accessibility, traffic safety and capacity of Naebu express way in Seoul (99-07), *Seoul Development Institute*, Seoul.
- Westerdahl, D., X. Wang, X. Pan, and K.M. Zhang (2009) Characterization of on-road vehicle emission factors and microenvironmental air quality in Beijing, China, *Atmos. Environ.*, 43(3), 697-705.
- Woo, D., S.-B. Lee, G.-N. Bae, and T. Kim (2008) Comparison of ultrafine particles monitored at a roadside using an SMPS and a TR-DMPS, *Korean J. of Atmos. Environ.*, 24(4), 404-414. (in Korean with English abstract)
- Zhu, Y., W.C. Hinds, S. Kim, and C. Sioutas (2002) Concentration and size distributions of ultrafine particles near a major highway, *J. Air & Waste Manag. Assoc.*, 52(9), 1032-1042.