



논문

대구지역 도로변 미세먼지 입경분포 특성

Characteristics of Particle Size Distribution at the Roadside of Daegu

조병윤*, 신상희, 정철수, 주명희, 윤민혜, 안정임, 배기수

대구광역시 보건환경연구원

Byoung-Yoon Cho*, Sang-Hee Shin, Cheol-Su Jung, Myeong-Hui Ju,
Min-Hye Yoon, Jeong-Eem Ahn, Gi-Soo Bae

Public Health and Environment Institute of Daegu Metropolitan City

접수일 2018년 11월 1일
수정일 2018년 12월 20일
채택일 2018년 12월 28일

Received 1 November 2018
Revised 20 December 2018
Accepted 28 December 2018

*Corresponding author
Tel : +82-(0)53-760-1329
E-mail : bycho99@korea.kr

Abstract It is known that ultrafine particle emitted from the roads contains a lot of harmful components to human health. In this study, number and mass concentration in roadside and residential sites were measured during winter of 2017 in Daegu. A NanoScan Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS, 10~420 nm) and Optical Particle Sizer (OPS, 0.3~10 μm) were used to measure the number concentration. A Dust aerosol monitor was used for particulate matter (PM) mass concentration monitoring. The concentration of ultrafine particles at the roadside was highly fluctuated for a short term. Aitken mode (0.01~0.1 μm) were higher than Accumulation mode (0.1~1 μm), which seem to be due to vehicle exhaust. The highest particle size distribution of the ultrafine particle on the roadside was 0.04~0.05 μm . Particle number concentration was the highest from 6:00 a.m to 9 a.m. in rush hour and the maximum was 0.03~0.04 μm , whereas the minimum particle number concentration was observed from 12 p.m to 6 p.m. The mass concentration of 0.3~0.4 μm was the highest in both roadside and residential area. Particles greater than 1 μm at the roadside was 20% higher than the residential area. A strong correlation was found between the mass and number concentration meter. The coefficient of determination (R^2) was 0.96.

Key words: NanoScan Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS), Optical Particle Size (OPS), Ultrafine particle, Roadside, Daegu

1. 서론

도시지역에서 발생하는 각종 먼지 중 도로에서 발생하는 미세먼지는 인체에 유해한 성분을 많이 축적하고 있는 것으로 알려져 있으며 지속적으로 교통량이 증가함에 따라 미세먼지 발생량도 증가하고 있다 (Baek and Koo, 2008). 미세먼지의 특성 중 입자크기는 오염원과 위해성을 평가할 때 가장 중요한 물리적 인자이다 (Thach *et al.*, 2010). 그중에 자동차 연소에 의해 배출되는 미세입자의 경우 100 nm 이하 크기의 초미세입자(Ultrafine Particle, UFP)가 대부분이므로, 마이크로미터 크기의 입자에 비해 상대적으로 입자의 표면적이 넓어 세포 속으로 침투하기 쉽고, 단위 질량

당 표면적이 커서 상대적으로 반응성이 크다. 또한, 입자의 크기가 매우 작아 장시간 부유할 수 있는 특징이 있다 (Oberdörster *et al.*, 2005; Gouriou *et al.*, 2004). 일반적으로, 미세먼지의 직경이 1~10 μm 영역은 기관지 기관에 침적되지만 1 μm 이하의 입자는 폐포까지 침적되어 단기간 노출은 알레르기와 천식을 악화시키며 장기간 노출될 때는 폐기능 감소, 심혈관 질환 유발 등으로 사망률을 증가시킬 수 있다 (Jung, 2014; Kim, 2014).

대기 중 입자상 물질은 입자의 크기, 조성, 생성원리에 따라 Nucleation mode (1~10 nm), Aitken mode (0.01~0.1 μm), Accumulation mode (0.1~1 μm), Coarse mode (1 μm 이상)로 나눌 수 있다. 입자 생성

의 물리적 과정은 기상반응 및 핵 생성 과정에서 생성된 Nucleation mode 입자들이 핵 표면에서 응축 성장하여 Aitken mode에서 나타나게 되며, 생성된 입자간의 반응과 입자내의 화학적 반응으로 생성된 입자가 Accumulation mode이다. Coarse mode는 주로 토양, 산업활동 및 도로의 비산먼지 등이 여기 속한다(Kulmala *et al.*, 2004).

대기오염물질 배출량 조사결과에 따르면, 대구시의 2014년 PM-2.5 총 발생량은 1,480톤이며 도로이동오염원에 의한 발생은 392톤으로 전체발생량의 26.4% 정도를 차지하고 있다(NIER, 2016). 따라서 도로에서 발생하는 미세먼지 저감을 위해 다양한 정책이 시행되고 있다. 2011년부터 도로 중앙 분리대에 설치된 살수 노즐을 이용하여 도로를 세척하는 ‘클린로드 시스템’을 선도적으로 운영하고 있으며 흡입청소차 운영 등을 통해 도로먼지를 효과적으로 제거하고 있다. 또한 2018년부터 도로재비산먼지 이동측정시스템을 도입하여 대구전역의 도로 미세먼지 현황 파악 및 도로 청소를 위한 기초자료를 수집하고 있으며, 미세먼지 발생량이 높은 노후 경유차의 조기폐차사업 추진과 전기자동차 구매 보조금 지급 등 다방면으로 노력하고 있다.

그러나 대구시 도로이동오염원에 의한 초미세입자에 대한 연구는 전무한 실정이며 다양한 정책을 추진하기에 앞서 현황파악이 선행되어야 할 것이다. 따라서 본 연구는 미세먼지 농도가 비교적 높은 겨울철에 도로변측정소와 도시대기측정소(주거지역)에 개수 및 질량농도 측정기를 설치하여 변동양상을 파악하였다. 측정 자료를 분석하여 대구시 도로변 미세먼지의 입경분포 특성, 시간별 농도변화, 질량농도 특성, 측정기간의 상관성 분석 등을 수행하였다.

2. 조사 방법

2.1 장소 및 기간

본 연구는 2017년 12월 13일(수)부터 23일(토)까지 총 11일 동안 이곡동 도로변 대기측정소와 대명동 도

시대기측정소(성명초등학교)에서 미세먼지 개수 및 질량농도를 측정하였다. 이곡동 도로변 대기측정소는 왕복 10차선(달구벌대로)에 위치하며 성서공단에 인접하여 출퇴근 차량 및 대형트럭이 지나다니는 교통량이 많은 지점이다. 대구시는 북서쪽에 공업단지가 밀집되어 있어 동절기 북서풍이 불었을 때 주거지역의 대기질에 악영향을 준다. 대명동측정소는 남구에 위치하여 주위에 두류공원과 인접한 주거지역으로서 공단의 영향을 파악할 수 있고, 80년대부터 설치·가동되고 있는 종합대기측정소로서 대구 대기질을 대표하는 지점이기도 하다.

2.2 측정기기

개수농도 측정기는 NanoScan SMPS(Scanning Mobility Particle Sizer, TSI model 3910)와 OPS(Optical Particle Sizer, TSI model 3330)를 사용하였고 질량농도측정기는 Dust trak(TSI model 8530)을 사용하였다(표 1). Nanoscan SMPS는 10~420 nm 입경을 13채널로 1분 간격으로 측정 가능하며 SMPS에 비해 부피가 작고 가벼워 이동성이 높은 장점이 있으나 측정 가능 입경범위가 작고 채널수가 적은 단점이 있다. 시스템의 측정원리는 대기 중의 미세입자를 펄프를 이용하여 채취하게 되는데, 시료 채취구에 설치된 사이클론을 통하여 0.55 μm 이상의 입자를 제거한 후 내부로 흡입된다. 유입된 입자들에 단극 하전기(Unipolar Charger)에서 (+)전하로 하전시킨 후 전기적 입경분류기(DMA, Differential Mobility Analyzer)의 전극봉에 (-)전하를 걸어주면 (+)전하를 띤 입자가 DMA 내부 전기장 내에서 입자의 전기적 이동도에 따라 한 가지 크기에 해당하는 입자만 분류되어 통과하게 된다. DMA에서 분리된 입자들은 응축핵 계수기(CPC, Condensation Particle Counter) 내부에서 이소프로필알코올(Isopropyl alcohol)을 이용하여 입자의 크기를 성장시켜서 광학검출기로 감지하여 입자의 개수농도를 계산한다.

OPS는 광학입자측정기로서 0.3~10 μm 입경을 12 구간으로 1초 간격으로 측정 가능하며 본 연구에서는 1분 간격 평균자료를 사용하였다. 측정원리로는

Table 1. Sampling sites and specifications of measurement instruments.

	NanoScan SMPS	OPS	Dust trak II
Model	TSI 3910	TSI 3330	TSI 8530
Sampling flow	0.75 ± 20% L/min	1.0 L/min	3.0 L/min
Particle size range	10~420 nm	0.3~10 µm	PM-2.5
Size channels	13	12	1
Sampling site	Roadside	Roadside, Residential	Roadside

광학 분석 체임버 내에서 외부 유입 공기(1.0 L/min) 및 외각유동(1.0 L/min)이 동시에 산란경에 의해 입경별 광도 값을 광도계로 측정하는 원리로 대기 중 개수농도를 산출한다(Bae *et al.*, 2016). NanoScan SMPS (이하 NanoScan)와 OPS를 동시에 가동 시 0.3~0.42 µm 영역의 데이터는 측정감도가 뛰어난 OPS 자료를 사용하였다.

Dust Trak은 광산란법(Light scattering method)을 사용하는 실시간 질량농도 측정기로서 본 연구에서는 PM-2.5를 측정하였으며 1초 간격 측정데이터를 1분 평균된 자료를 사용하였다. Dust trak은 도로재비산먼지 측정시스템에도 사용되고 있는 기기로, 실시간으로 변화되는 도로의 먼지농도를 확인하는데 적합하며 고농도에도 측정 가능하고 내구성이 뛰어나다. 기존 연구결과에 따르면, 광산란 방식은 반드시 입자가 아니더라도 빛의 투과에 간섭을 일으키는 물질에 감응하는 특성이 있어 농도가 과대평가 되는 경향이 있으므로 보정계수 0.38을 적용하여 비교 평가하였다(Wallace *et al.*, 2011).

공통적으로 3종의 측정기기의 앞단에는 실리카겔(Silica gel)을 설치하여 습도의 영향을 최소화하여 측정오차를 줄였다. 또한 측정기기의 상관성 분석을 위하여 도로변측정소에 설치된 β-ray 흡수법을 이용한 미세먼지 측정기기와 시간 자료를 비교분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 개수농도 특성 및 기상개황

2017년 12월 13일에서 24일까지 이곡동 도로변측정소에서 조사한 결과를 그림 1(a)에 나타내었다. 개

수농도의 경우 Aitken mode (0.01~0.1 µm), Accumulation mode (0.1~1 µm)로 구분하여 5분 간격으로 평균하였다. 전체적인 측정결과는 도로변의 특성상, 차량 운행 상황에 따라 개수 및 질량농도의 변화 폭이 크게 나타났으며 대체로 오전 출근 시간대에 높은 경향을 보였다. 일평균 개수농도는 Aitken mode의 경우 10,165~29,678개/cm³로 비교적 높고, 변동폭이 크게 나타났으며 Accumulation mode는 1,431~7,247개/cm³로 비교적 낮게 나타났다. 개수농도의 변화 폭이 크게 나타난 것은 자동차 배기가스에서 주로 배출된 초미세입자가 차량 통행 상황에 따라 대기질 상황이 급변했기 때문으로 판단된다. 이러한 경향은 대구시의 도심지인 남산동 도로변측정소에서 광산란 질량농도 측정기를 사용하여 측정한 결과와 유사하게 나타났다(Jo and Baek, 2012). Aitken mode, Accumulation mode, PM-2.5의 도로변측정의 전반적인 경향은 유사하게 나타나 개수 및 질량농도는 상관성 있는 결과가 나타났다.

측정기간 동안의 이곡동 도로변측정소 기상장비를 통한 기상상황을 그림 1(b)에 나타내었다. 도로변 측정소의 특성상 시료 채취구가 지표면에 인접하여 풍속이 0~2 m/s 정도로 낮은 편이었고 측정기간 중 강우는 없었다. 12월 23일에는 박무, 연무가 발생하였고 대기정체로 인해 풍속이 낮았으며, 일평균 측정값은 각각 Aitken mode 27,484개/cm³, Accumulation mode 6,039개/cm³, PM-2.5 71 µg/m³으로 개수 및 질량농도 모두 높게 나타났다. 16~17일은 풍속이 강해짐에 따라 개수 및 질량농도가 확연하게 감소하는 결과를 나타났다. 즉 17일에는 일평균 측정값이 Aitken mode 7,699개/cm³, Accumulation mode 1,431개/cm³, PM-2.5 14 µg/m³로 가장 낮게 나타났다.

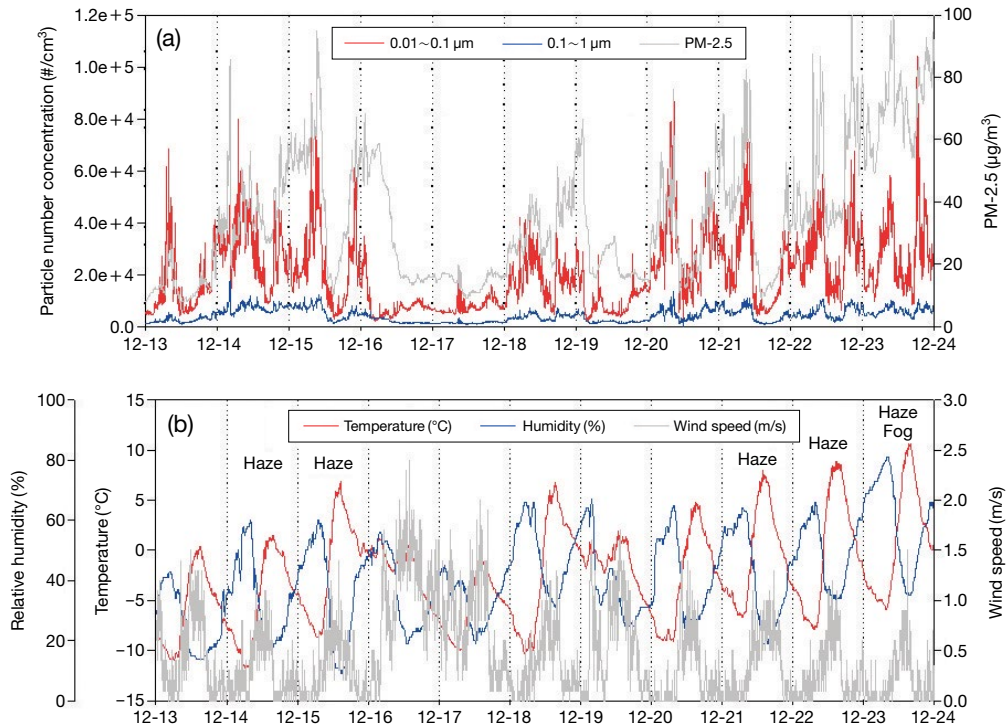


Fig. 1. Daily variation of the particle concentration and weather condition. (a) Comparison of particle number concentration with mass concentration at the roadside, (b) Weather condition measured at the roadside.

미세먼지는 각종 기상요인에 민감한 영향을 받으며, 그중 풍속이 증가하면 미세먼지 농도가 감소한다고 알려져 있다(Hwang *et al.*, 2009; Shin *et al.*, 2007). 본 연구에서는 풍속이 증가함에 따라 미세먼지의 질량농도 뿐만 아니라 초미세입자의 개수농도 또한 감소되는 결과가 나타났다. 이는 차량에서 배출된 나노 크기의 초미세입자까지도 바람에 의해 확산되어 농도가 낮아진 것으로 판단된다.

3.2 도로변 및 주거지역의 개수농도 분포 특성

도로변에서 NanoScan에 의해 측정된 $0.01 \sim 0.42 \mu\text{m}$ 영역의 입경별 개수농도 분포를 표현하기 쉬운 형태로 $dN/d\log d_p$ 하여 그림 2와 3에 나타내었다. 초미세입자의 입경분포는 $0.01 \mu\text{m}$ 부터 서서히 상승하여 $0.01 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 에서 완만한 상승-하락 곡선의 단일모드

형태로 나타났으며, $0.04 \sim 0.05 \mu\text{m}$ 에서 $28,098 \text{ 개}/\text{cm}^3$ 로 최대값을 보였고, 이후로는 지속적인 감소 추세를 나타냈다. 입경별 평균 개수농도의 표준편차는 도로 상황에 따라 급변하는 초미세입자의 특성으로 인해 크게 나타났다.

이러한 결과는 기존 도로변에서 SMPS를 이용해 측정한 초미세입자의 분포 특성과 유사하게 나타나, 대부분의 입자들은 $0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 의 입경영역에서 가장 집중적으로 나타났다. 최대입경은 연구에 따라 다소 다르게 나타났는데, 측정지점의 도로 특성에 따라 서울에서 측정한 Woo *et al.* (2013, 2008)의 경우 대부분은 $0.01 \sim 0.02 \mu\text{m}$ 에서 가장 높게 나타났고, Bae *et al.* (2007)의 경우 $0.05 \sim 0.06 \mu\text{m}$ 영역에서 높게 나타났다.

NanoScan SMPS를 사용한 본 연구는 기존 연구들에 사용된 SMPS에 비해 200 nm 이상 영역에서 다소

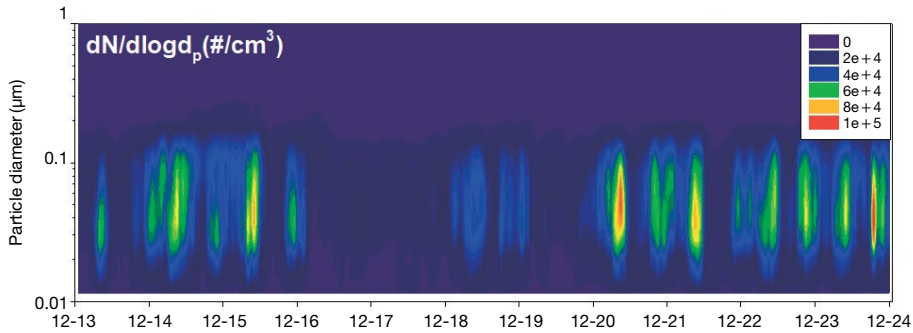


Fig. 2. Daily variation of the particle size distribution at the roadside measured by the NanoScan + OPS (0.01~1 μm).

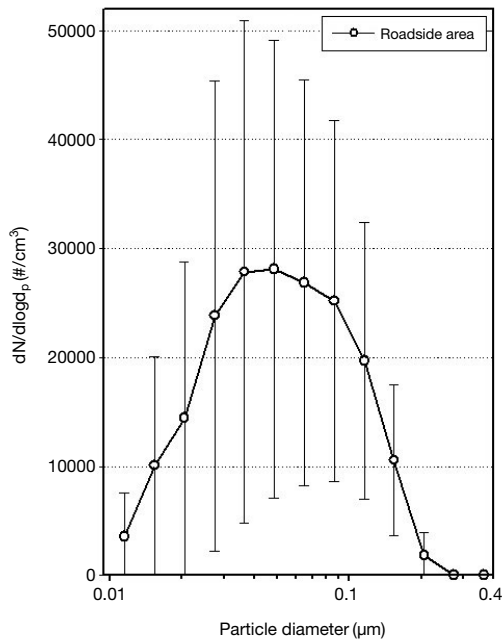


Fig. 3. Particle size distribution at the roadside measured by the NanoScan (0.01~0.42 μm).

낮은 감도를 나타냈는데 두 측정기기의 비교연구 결과(Hsiao *et al.*, 2016; Yamada *et al.*, 2015)를 보면 동일하게 이러한 차이가 나타난다. 하지만 10~100 nm 영역에 대해서는 SMPS와 입경분포가 매우 유사한 결과로 나타났다. 따라서 NanoScan SMPS의 이러한 단점을 보완하기 위해서는 OPS 측정을 병행하여 측정 데이터의 머징(merging)을 권장하고 있다.

도로변과 주거지역에서 같은 기간 동안 OPS (0.3~

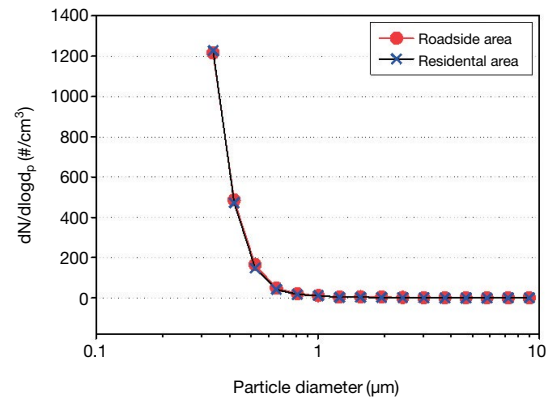


Fig. 4. Particle size distribution at the roadside and the residential sites measured by the OPS (0.3~10 μm).

10 μm)로 측정한 결과를 그림 4에 나타내었다. 도로변과 주거지역 모두 0.3 μm 이상 영역에서 단조감소 형태로, 입경이 커질수록 지속적으로 낮게 나타나는 경향을 유사하게 보였다. 1 μm 이상의 영역에서는 두 지역이 10개/ cm^3 이하로 그래프에서는 상대적으로 낮은 농도이므로 큰 차이가 없지만 질량농도로 환산하면 도로변과 주거지역 각각의 특성이 의미 있게 나타났다으며 뒤에서 다룰 예정이다.

3.3 도로변 개수농도의 시간별 분포 특성

도로변 입경분포 측정자료를 6시간 간격으로 (6~12시, 3시간 간격) 구분하여 그림 5에 나타내었다. 전체 시간대에서 0.01~0.2 μm 범위에 대부분 입경별 개수농도가 나타났으며 오전 6~9시대에 0.03~0.04

μm 구간에 42,612개/ cm^3 로 최대농도가 나타났다. 9~12시에는 6~9시에 비해 농도가 다소 낮아지며 최대농도가 0.03~0.09 μm 대로 원만한 곡선으로 나타났다. 12~18시 낮 시간대는 0.03~0.1 μm 에서 농도가 14,000~16,000개/ cm^3 로 6~9시 농도 대비 40% 수준으로 매우 낮게 나타났으며 저녁 시간대에 다시 높아졌다. 새벽 시간인 0~6시에는 전체시간의 중간 농도를 나타내었다.

상대적으로 높게 나타난 6~12시 사이의 개수농도 분포의 평균자료를 그림 6에 나타내었다. 6시부터 서

서히 상승하여 8~9시에 가장 높았으며 최대농도는 61,646개/ cm^3 로 나타났다. 9시 이후로는 지속적으로 감소하였으며 0.02~0.03 μm 영역부터 서서히 감소되는 경향을 보였다. 6~9시에 개수농도 분포가 가장 높게 나타난 것은 출근 시간 차량의 수가 많아진 영향 때문으로 판단된다. 또한, 차량 통행량이 많은 출근 시간과 퇴근 시간에 30~40 nm 구간의 농도가 가장 높게 나타난 것은 자동차 배기가스에서 직접적으로 발생하는 주요 입경으로 판단된다. 낮 시간 12~18시는 대기확산에 의해 풍속이 높아져 상대적으로 농도가 낮아진 것으로 보인다.

Bae *et al.* (2007)의 연구결과는 출근 시간(8~9시, 최대)과 퇴근 시간에 다시 상승하는 동일한 패턴이었으나 새벽 시간대(3~5시)에 가장 낮게 나타난 차이점이 있다. 이 점은 이곡동 도로변측정소가 성서공단과 고속도로에 인접한 지역적 특성으로 새벽 시간대에도 지속적인 차량 통행이 이루어지고 있으며, 새벽 시간 대기정체로 인해 낮 시간대에 비해 더 높게 나타난 것으로 판단된다.

3.4 도로변 및 주거지역의 질량농도 분포 특성

도로변과 주거지역의 질량농도 분포의 일변화와 평균자료를 그림 7, 8에 나타내었다. 도로변의 미세먼지 질량농도에 영향을 주는 주요 입경대는 0.1~0.2 μm , 0.3~0.4 μm , 2~10 μm 으로 나타났다. 특히, 대기정체 및 연무, 박무가 생긴 23일의 경우 0.3~0.4 μm

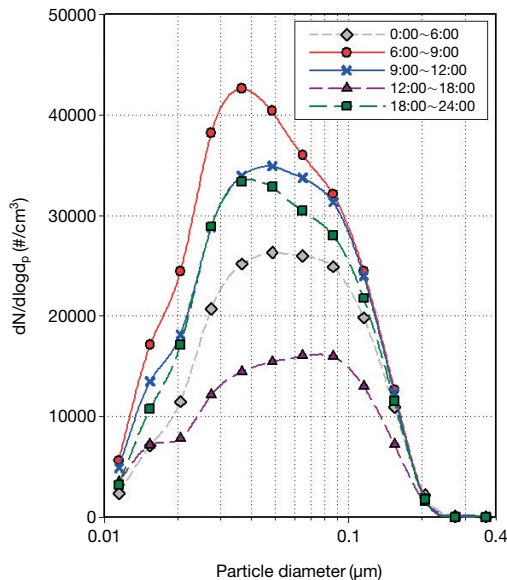


Fig. 5. Diurnal variation of the particle size distribution at the roadside measured by the NanoScan (0.01~0.42 μm).

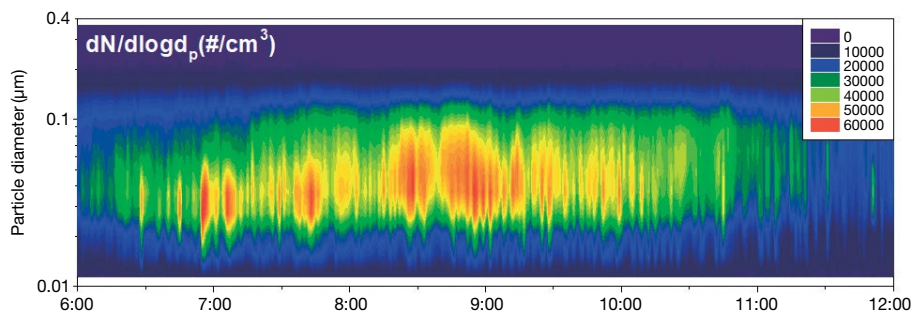


Fig. 6. Variation of the particle size distribution at the roadside measured by the NanoScan (AM 6:00~12:00).

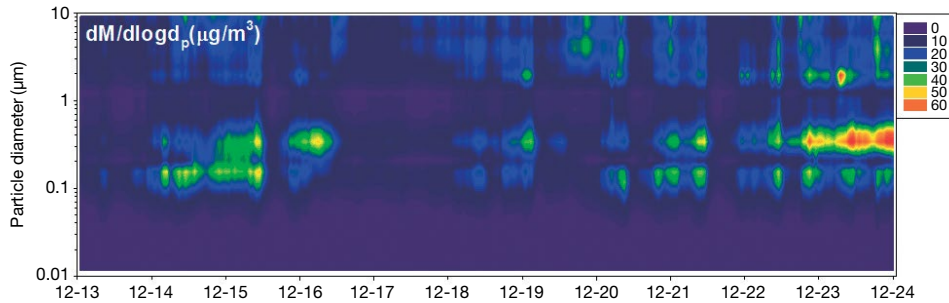


Fig. 7. Daily variation of the particle mass distribution at the roadside measured by the NanoScan + OPS (0.01~10 μm).

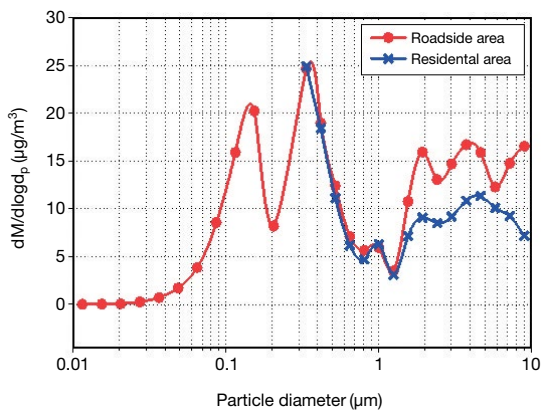


Fig. 8. Comparison of particle mass distributions measured by the NanoScan and the OPS.

에서 최대 $57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 농도까지 높아졌다. 입경분포가 $0.2 \mu\text{m}$ 에서 급격히 낮아진 것은 NanoScan ($0.01 \sim 0.42 \mu\text{m}$) 장비의 입경이 $0.2 \sim 0.42 \mu\text{m}$ 영역에서 감도가 낮은 특성상 농도가 과소평가 되었을 가능성이 있으며 $0.3 \mu\text{m}$ 이상의 직경에서는 OPS ($0.3 \sim 10 \mu\text{m}$) 측정 자료를 사용하였다.

도로변과 주거지역 모두 $0.3 \sim 1 \mu\text{m}$ 에서는 유사하게 나타났으며 $1 \mu\text{m}$ 이상의 전 구간에서 $5 \sim 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 가량 도로변이 주거지역에 비해 높게 나타났다. 두 지역은 $0.3 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 구간에는 약 $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도로 가장 높게 나타났으며 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 구간에서 약 $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 낮게 나타났다. $1 \mu\text{m}$ 이상 영역에서 $2 \mu\text{m}$, $4 \mu\text{m}$, $9 \mu\text{m}$ 에서 높게 나타났으며 전체 영역의 농도가 주거지역에 비해 20% 가량 높게 나타났다. $7 \sim 10 \mu\text{m}$ 구간에서

주거지역은 하락곡선인데 반해 도로변은 상승곡선으로 $10 \mu\text{m}$ 이상의 구간에서 더욱 높게 나타났을 가능성이 있다. 도로의 주요 미세먼지 발생원은 차량의 연소과정에서 생성되는 미세먼지와 도로표면의 타이어 마모, 각종 퇴적물이 차량에 의해 비산되는 재비산먼지로 나눌 수 있다. 본 연구의 $1 \mu\text{m}$ 이상 영역에서 도로변이 주거지역에 비해 높게 나타난 것은, 입경의 크기가 큰 도로재비산먼지의 영향을 받은 것으로 판단된다. 도로재비산먼지는 지각물질에 기인하는 자연적 성분 외에도 Cd, Pb, Cr 등 인체에 유해한 성분이 포함되어 있다(NIER, 2010).

타 연구결과와 비교해 보면 본 연구의 도로변 질량농도 분포는, Lee *et al.* (2012)의 분포와 같이 $0.3 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 영역에서 최대로 나타났으며 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 영역에서 낮게 나타나는 유사한 패턴이 나타났다. 본 연구 결과와 달리 주거지역이 도로변에 비해 높게 나타난 것은 측정시기가 달랐으며 지역의 특성에 따라 상이한 결과가 나타난 것으로 보인다.

3.5 측정기기의 호환성 검증

개수농도 측정기(NanoScan + OPS), 광산란 질량농도 측정기(Dust trak), β -ray 질량농도측정기의 측정기간 중 PM-10, PM-2.5의 1시간 농도자료를 그림 9에 나타내었다. 개수농도 측정기는 과거자료를 참고하여 일반적인 도시대기의 밀도인 $1.6 \text{ g}/\text{cm}^3$ 을 적용하여 두 기기의 개수농도를 질량농도로 변환하여 나타내었다(Karg *et al.*, 2003). 광산란 측정기는 기존 연구결과에

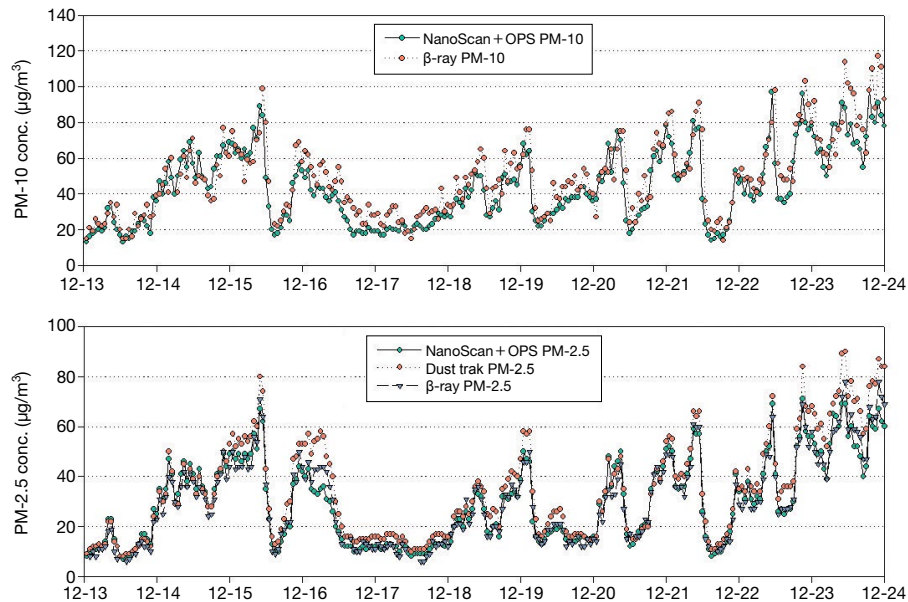


Fig. 9. Daily variation of particle mass concentration at the roadside for the NanoScan + OPS, Dust trak and the β -ray.

따르면 β -ray 측정기에 비해 농도가 과대평가 되는 경향이 있으므로 보정계수 0.38을 적용하여 비교하였다. 베타선 측정기는 이곡동 도로변측정소의 자료를 이용하였다. PM-10의 경우, β -ray와 NanoScan + OPS의 경향은 거의 유사하였으며 β -ray가 다소 높게 나타났다. PM-2.5의 경우, 3종류 기기의 농도 변화는 유사하게 나타났으며 일부 구간에서 Dust trak의 농도가 다소 높게 나타났다.

그림 10은 3종류의 측정기기의 상관성을 그래프로 나타내었다. PM-10의 NanoScan + OPS와 β -ray의 상관계수(R^2)는 0.80로 양호한 수준이었다. PM-2.5의 경우 NanoScan + OPS와 β -ray는 상관계수(R^2) 0.96, Dust trak와 β -ray는 상관계수 0.97, NanoScan + OPS와 Dust trak의 상관계수는 0.94로 모두 높게 나타났다. 농도순은 Dust trak > β -ray > NanoScan + OPS으로 광산란 장비가 가장 높게 나타났다. 개수농도 및 질량농도 측정기기의 상관계수가 높게 나타난 것으로 볼 때 초, 분단위로 데이터를 표출하는 실시간 측정기는 밀도와 보정계수를 적용시키면 기존 측정소의 β -ray 측정치와 매우 유사하여 신뢰성 높은 자료를

얻을 수 있었다.

Park *et al.* (2014)는 개수농도 측정기의 질량농도 측정 가능성을 평가한 결과 SMPS-APS와 β -ray의 상관계수 PM-10 $R^2 = 0.85$, PM-2.5 $R^2 = 0.77$ 로 나타내었다. PM-2.5의 상관성이 낮은 이유는 입자의 크기가 작을수록 습도의 영향을 많이 받아 습식성장으로 인한 오차가 크게 나타난 것으로 보았다. 본 연구에서는 시료채취구 앞단에 실리카겔을 설치하여 습도의 영향을 최소화하여 PM-2.5의 상관계수가 0.96으로 매우 높게 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 2017년 12월 13일에서 24일까지 대구지역의 도로변과 주거지역에서 개수농도 측정기 및 질량농도 측정기로 측정 분석하였다.

1) 대구시 도로변 측정 결과 입자 개수 및 질량농도의 변화 폭은 크게 나타났다. Aitken mode (0.01~0.1 μm)는 Accumulation mode (0.1~1 μm)에 비해 높게

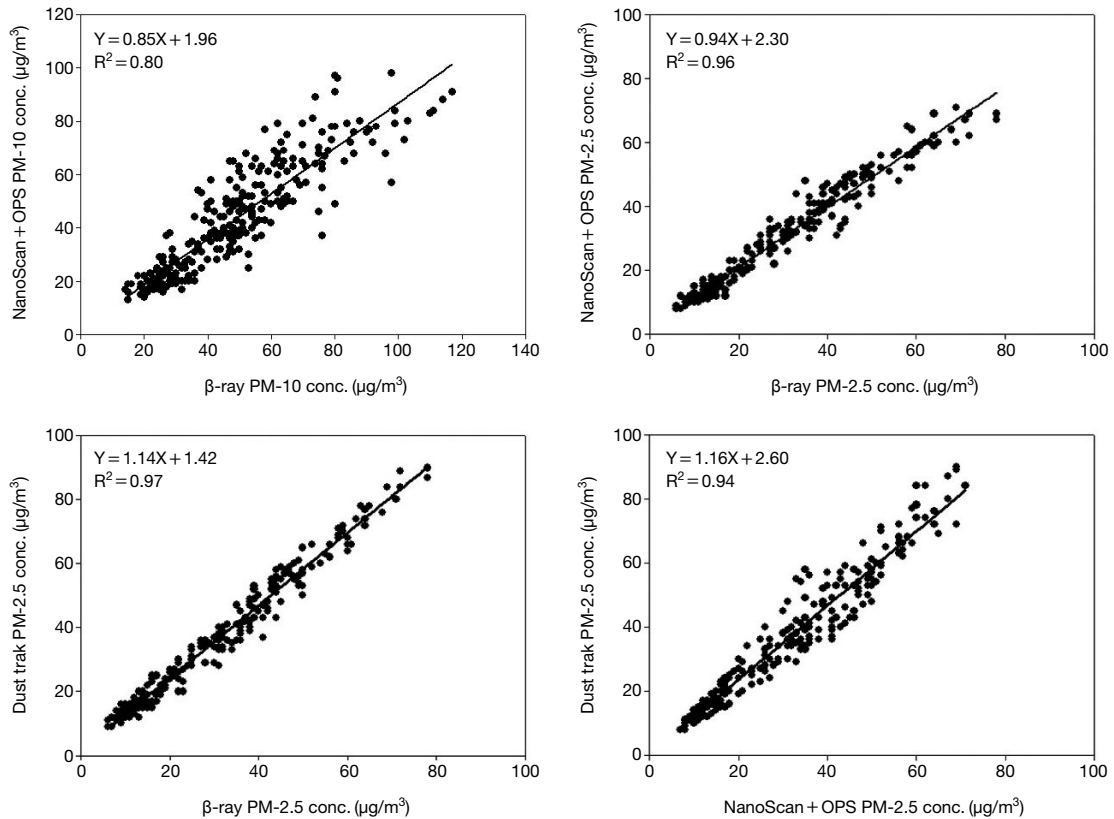


Fig. 10. Correlation analysis of mass concentration for the NanoScan + OPS, Dust trak and the β -ray.

나타났으며 이것은 도로변에서 배출되는 자동차 배기가스에 의해 $0.1 \mu\text{m}$ 이하의 농도가 높게 나타난 것으로 판단된다. 또한, 미세먼입자와 초미세입자 농도는 풍속이 증가할수록 감소함을 확인하였다. 이는 차량에서 배출된 나노 크기의 초미세입자까지도 바람에 의해 확산되어 농도가 낮아진 것으로 보인다.

2) NanoScan SMPS로 측정한 도로변의 개수농도분포의 경우 $0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 영역에서 대부분의 입경이 나타나 있으며 $0.04 \sim 0.05 \mu\text{m}$ 에서 최대치가 나타났다. 이것은 차량통행이 빈번한 대구 도로변대기의 일반적인 입경분포로 판단된다. OPS로 측정한 $0.3 \mu\text{m}$ 이상 영역에서는 도로변과 주거지역의 개수농도분포 측면에서 유사하게 나타났다.

3) 도로변의 시간별 초미세입자 입경분포는 출근 시간 차량의 통행이 많아지는 6~9시경에 가장 높았

으며 $0.03 \sim 0.04 \mu\text{m}$ 에서 최대로 나타났다. 반면 낮 시간인 12~18시에는 6~9시 농도 대비 40% 수준으로 가장 낮은 농도가 나타났다. 이는 대기확산에 의해 풍속이 높아져 상대적으로 농도가 낮아진 것으로 보인다. 퇴근 시간이 포함된 저녁 시간대에 다시 높아졌으며, 0~6시의 새벽 시간대에는 전체시간의 중간 농도를 나타냈다.

4) 도로변과 주거지역의 질량농도 분포를 비교하면 두 지역 모두 $0.3 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 구간의 농도가 가장 높게 나타났다. $1 \mu\text{m}$ 이상 영역에서는 $2 \mu\text{m}$, $4 \mu\text{m}$ 대에서 높게 나타났다. $1 \mu\text{m}$ 이상의 전 구간에서 도로변이 주거지역에 비해 20% 가량 높게 나타났다. 이는 도로위의 타이어 마모, 각종 퇴적물과 같은 도로재비산먼지의 영향으로 도로변이 높게 나타난 것으로 판단된다.

5) 도로변에서 측정한 3종 측정기기의 PM-2.5 상관

성을 비교하면 NanoScan + OPS와 β -ray는 상관계수 (R^2) 0.96, Dust trak와 β -ray는 상관계수 0.97, NanoScan + OPS와 Dust trak의 상관계수는 0.94로 모두 높게 나타났다. 농도순은 Dust trak > β -ray > NanoScan + OPS으로 광산란 장비가 가장 높게 나타났다.

본 연구에서는 대구시 도로변의 평균적인 개수 및 질량농도 분포 특성을 파악하고자 하였다. 차후에는 대구지역의 주거 및 공업지역의 개수농도 특성과 계절별 차이를 조사하여 농도 변화에 영향을 주는 요인을 파악해 대구시 미세먼지 저감 대책 수립을 위한 기초자료로 활용하였으면 한다.

감사의 글

이 논문은 2019년도 환경부 “환경분야 시험검사의 국제적 적합성 기반구축사업”의 일부 지원으로 완성되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Bae, G.N., Huh, S.Y., Lee, S.B., An, M.H., Park, D.H., Hwang, J.H. (2007) Ultrafine particle pollution level at the roadside of Seoul in spring, *Particle and Aerosol Research*, 3(1), 29-40. (in Korean with English abstract)
- Bae, M.S., Park, D.J., Lee, J.H., Ahn, J.Y., Lee, Y.J. (2016) Source analysis of size distribution and density estimation in PM_{2.5} - Part II, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(2), 158-166. (in Korean with English abstract)
- Baek, S.O., Koo, Y.S. (2008) Critical evaluation of and suggestions for a comprehensive project based on the special act on Seoul Metropolitan air quality improvement, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 24(1), 108-121. (in Korean with English abstract)
- Gouriou, F., Morin, J.P., Weill, M.E. (2004) On-road measurements of particle number concentrations and size distributions in urban and tunnel environments, *Atmospheric Environment*, 38, 2831-2840.
- Hsiao, T.C., Lee, Y.C., Chen, K.C., Ye, W.C., Sopajaree, K.J., Tsai, Y.I. (2016) Experimental comparison of two portable and real-time size distribution analyzers for nano/submicron aerosol measurements, *Aerosol and Air Quality Research*, 16, 919-929.
- Hwang, Y.J., Lee, S.J., Do, H.S., Lee, Y.K., Son, T.J., Kwon, T.G., Han, J.W., Kang, D.H., Kim, J.W. (2009) The analysis of PM₁₀ concentration and the evaluation of influences by meteorological factors in ambient air of Daegu area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 25(5), 459-471. (in Korean with English abstract)
- Jo, B.Y., Baek, S.O. (2012) Estimation of the effect of clean road system on the PM₁₀ concentration at a heavy traffic roadside - A case study for Daegu city -, *Particle and Aerosol Research*, 8(3), 111-120. (in Korean with English abstract)
- Jung, B.Y. (2014) Development of guideline for the preventive health damage caused by fine particle and yellow dust (Cardiovascular disease), Korea Center for Disease Control and Prevention.
- Karg, E., Ferron, G.A., Heyder, J. (2003) Estimating the density of aerosol particles, *Abstracts of the European Aerosol Conference*, S1251-S1252.
- Kim, C.W. (2014) Development of guideline for the prevention and management of particulate matter/Asian dust-induced health damage (Allergic diseases), Korea Center for Disease Control and Prevention.
- Kulmala, M., Vehkamäki, H., Petäjä, T., DalMaso, M., Lauri, A., Kerminen, V.-M., Birmili, W., McMurry, P.H. (2004) Formation and growth rates of ultrafine atmospheric particles: a review of observation, *Aerosol Science*, 35, 143-176.
- Lee, Y.K., Lee, K.J., Lee, J.S., Shin, E.S. (2012) Regional characteristics of particle size distribution of PM₁₀, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(6), 666-674. (in Korean with English abstract)
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2010) The Study on Composition and Environmental Evaluation of Road Resuspended dust by vehicle.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2016) 2014 National Air Pollutants Emission.
- Oberdörster, G., Oberdörster, E., Oberdörster, J. (2005) Nanotoxicology: An emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles, *Environmental Health Perspectives*, 113(7), 823-839.
- Park, J.S., Moon, K.J., Park, S.M., Song, I.H., Kim, H.J., Hong, Y.D., Han, J.S. (2014) Possibility of the PM₁₀ and PM_{2.5} concentration monitoring system using SMPS-APS combination, *Journal of Korean Society for Environ-*

- mental Analysis, 17(3), 161-172. (in Korean with English abstract)
- Shin, M.K., Lee, C.D., Ha, H.S., Choe, C.S., Kim, Y.H. (2007) The influence of meteorological factors on PM₁₀ concentration in Incheon, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 23(3), 322-331. (in Korean with English abstract)
- Thach, T.Q., Wong, C.M., Chan, K.P., Chau, Y.K., Thomas, G.N., Ou, C.Q., Yang, L., Peiris, J.S.M., Lam, T.H., Hedley, A.J. (2010) Air pollutants and health outcomes assessment of confounding by influenza, Atmospheric Environment, 44, 1437-1442.
- Wallace, L.A., Wheeler, A.J., Kearney, J., Van Ryswyk, K., You, H., Kulka, R.H., Rasmussen, P.E., Brook Jeff, R., Xu, X. (2011) Validation of continuous particle monitors for personal, indoor, and outdoor exposures, Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology, 21, 49-64.
- Woo, D.K., Lee, S.B., Bae, G.N., Kim, T.S. (2008) Comparison of ultrafine particles monitored at a roadside using an SMPS and a TR-DMPS, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 24(4), 404-414. (in Korean with English abstract)
- Woo, D.K., Lee, S.B., Lee, S.J., Kim, J.Y., Jin, H.C., Kim, T.S., Bae, G.N. (2013) Spatial distributions of on-road ultrafine particle number concentration on Naebu Express Way in Seoul during winter season, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 29(1), 10-26. (in Korean with English abstract)
- Yamada, M., Takaya, M., Ogura, I. (2015). Performance evaluation of newly developed portable aerosol sizers used for nanomaterial aerosol measurements, Industrial Health, 53, 511-516.

Authors Information

조병윤 (대구광역시 보건환경연구원 환경연구사)
 신상희 (대구광역시 보건환경연구원 환경연구관)
 정철수 (대구광역시 보건환경연구원 환경연구사)
 주명희 (대구광역시 보건환경연구원 환경연구사)
 윤민혜 (대구광역시 보건환경연구원 환경연구사)
 안정임 (대구광역시 보건환경연구원 환경연구사)
 배기수 (대구광역시 보건환경연구원 환경연구사)