

## 입경 분포 원인 분석 및 PM<sub>2.5</sub> 밀도 추정 -Part II

### Source Analysis of Size Distribution and Density Estimation in PM<sub>2.5</sub> - Part II

배민석\* · 박다정 · 이정훈<sup>1)</sup> · 안준영<sup>2)</sup> · 이영재<sup>2)</sup>

목포대학교 환경공학과, <sup>1)</sup>한국기술교육대학교 기계공학부, <sup>2)</sup>국립환경과학원 대기환경연구과

(2016년 1월 17일 접수, 2016년 2월 6일 수정, 2016년 2월 12일 채택)

Min-Suk Bae\*, Da-Jeong Park, Jeonghoon Lee<sup>1)</sup>, Joon-Young Ahn<sup>2)</sup>  
and Yeong-Jae Lee<sup>2)</sup>

*Department of Environmental Engineering, Mokpo National University*

<sup>1)</sup>*School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education*

<sup>2)</sup>*National Institute of Environmental Research, Air Quality Research Division*

(Received 17 January 2016, revised 6 February 2016, accepted 12 February 2016)

#### Abstract

To characterize the features of particle apparent density, continuous measurements of particle number size distributions from optical particle sizer (OPS) and 24 hr integrated particle mass concentrations from filter based sampler were conducted at the National institute of environmental research NamBu Supersite (NNBS, 35.22°N, 126.84°E) in Gwangju for 16 days from Nov. 4 in 2014. Source apportionment model was carried out by applying Positive Matrix Factorization (PMF) to particle size distribution data. Three different distributions related to primary and secondary sources were investigated by the diurnal patterns of identified factors. Density estimated by gaussian model has been calculated as 1.69 g/cm<sup>3</sup> with 95% confidence bounds (1.57~1.81 g/cm<sup>3</sup>).

**Key words :** PMF, OPS, Size distribution, Density

#### 1. 서 론

대기 분진의 입경, 면적, 수농도 등 물리적 성상 및 화학적 성상은 인체에 직접 또는 간접적으로 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Cassee *et al.*, 2013; Kraus

*et al.*, 2011). 하지만 건강과 관련된 분진의 물리적, 화학적 특성은 일차 배출 종류 및 이차 노화 정도에 따라 매우 다양하게 나타나(Franck *et al.*, 2011), 모든 특성에 따른 영향을 명확히 규명하기에는 한계가 있다. 이에 복잡하게 나타나는 분진의 물리, 화학적 특성을 대변하는 척도로 분진 밀도(density)에 대한 연구가 진행되었다(Pitz *et al.*, 2008). 분진 밀도는 분진의 크기, 형태, 다공성 등의 물리적 특성을 대변할 뿐만 아니라, 무기성분, 유기성분, 중금속, 원소탄소로 이루어진 분진

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)61-450-2485, E-mail : minsbae@hotmail.com

의 화학적 특성을 동시에 내포하고 있고, 밀도 변화에 따른 입자 생성 특성을 이해하는 척도로 이용되고 있다(Hu *et al.*, 2012; Schmid *et al.*, 2007). 이와 같이 분진 밀도를 이해하는 것은 건강에 대한 영향 및 대기 중 발생 원인을 이해하는데 매우 중요하다.

과거 연구에 의하면 겨울철 PM<sub>1.8</sub>의 밀도가 1.61 g/cm<sup>3</sup> (Hu *et al.*, 2012)로 분석되었고, 계절적으로 겨울철 PM<sub>2.5</sub> 1.41 g/cm<sup>3</sup>, 여름철 1.60 g/cm<sup>3</sup> (Liu *et al.*, 2015), 1.36~1.55 g/cm<sup>3</sup> (Yin *et al.*, 2015) 등으로 나타나 약 1.4에서 1.6 g/cm<sup>3</sup> 사이로 보고되었다. 밀도 분석법은, 분진의 부피 및 무게를 동시에 분석하여 밀도를 분석하는 방법(DeCarlo *et al.*, 2004), 가능한 모든 화학종을 분석하여 분진 밀도를 계산하는 방법(Hasheminassab *et al.*, 2014; Levy *et al.*, 2013) 등이 있다. 화학종을 통한 밀도 추정법은, 주 이온성분인 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>의 밀도를 1.75 g/cm<sup>3</sup>, 이외 다른 이온성분의 밀도를 2.0 g/cm<sup>3</sup>, 원소탄소 2.0 g/cm<sup>3</sup>, 유기 성분 1.2 g/cm<sup>3</sup>, 중금속 2.8 g/cm<sup>3</sup>로 가정하여 계산한다(Hu *et al.*, 2012; Hussein *et al.*, 2008; McMurphy *et al.*, 2002). 하지만, 화학종을 통한 밀도 추정법은 organic mass/organic carbon (OM/OC) 등을 가정해야 하고, 제한된 개별 유기성분 분석에 비해 불확실성이 상대적으로 크며, 개별 화학종 분석에 많은 시간과 노력이 필요하다. 이에 상대적으로 접근하기 용이한 분진 밀도를 추정하는 방법이 요구된다.

최근, 광학 입자 측정기(optical particle sizer, OPS)를 이용한 분진 수농도를 측정하여, 부피 농도 및 밀도를 가정한 질량 농도를 산출하는 연구가 보고되고 있다(Park *et al.*, 2016). OPS는 운용이 용이하고, 휴대하기 간편하여, 차량에 의한 도로 오염원 농도 측정(Castellini *et al.*, 2014), 해염입자 입경 분포(Cooper *et al.*, 2014), 차량 필터 효율 측정(Xu *et al.*, 2014) 등 여러 연구 분야에서 이용되고 있다. 이에, 본 연구에서는 OPS로 분석된 부피 농도를 positive matrix factorization (PMF)를 이용하여 입경 분포에 따른 원인을 분석하였다. 또한, 가우시안 모델을 이용하여 입경크기 분진의 부피 농도를 산출하고, 유기탄소, 원소탄소, 및 이온성분과 비교를 통해 분석 농도의 정확성 및 필터 중량법에 의한 분진 무게를 분석하여 분진의 밀도를 분석하여 값을 산출하였다.

## 2. 방 법

### 2.1 측정 장소

광학 입자 계수기를 이용하여 대기 중 입경별 원인 및 밀도를 측정하고자, 국립환경과학원 남부권 대기오염집중측정소(National institute of environmental research NamBu Supersite, NNBS, 35.22°N, 126.84°E) 3층에서 2014년 11월 4일부터 2014년 11월 19일까지 16일간 측정이 이루어졌다. 본 측정소는 광주광역시 북쪽에 위치해 있으며, 북쪽으로 직선거리 11 km 거리에 용두산이 위치해 있고, 남동쪽 18 km으로 무등산, 그리고 북서쪽 18 km 지점에 팔암산으로 둘러싸인 곳으로, 광역적으로 남쪽 광주시에서 인위적 성분과, 서쪽 광주하남 산업단지, 중국발 장거리 오염물질 등 다양한 오염원의 영향을 받을 수 있는 곳이다. 지역적으로는 측정소 북쪽으로 수미터 거리에 첨단과기도가 있고, 서쪽 약 2 km 지점에 호남고속도로가 위치하고 있어, 출퇴근시 풍향에 따른 차량의 영향을 직접적으로 받는 위치에 있다(그림 1).

### 2.2 측정 장비

본 연구에 사용한 측정 장비는 크게 3부분으로 나눌 수 있다. 첫째, OPS, 둘째, 탄소 디누더(Carbon Denuder)를 포함한 여과지 포집 장치, 마지막으로 Particle into Liquid Sampler- Total Organic Carbon (PILS-TOC) 시스템이다(Park *et al.*, 2014). OPS는 광학 분석 챔버 내에서 외부 유입 공기(1.0 lpm) 및 외각유동(1.0 lpm)이 동시에 산란경에 의해 입경별 광도 값을 광도계의 측정하는 원리로 대기 중 수농도를 산출한다. 본 연구에서는 0.3 μm에서 10.0 μm 사이 12개 채널에서 분진의 수농도를 측정하여 부피 농도로 환산하였다. 여과지 포집 장치는, Y 분배기에 의해 옥상 유입 공기를 한쪽은 OPS 방향, 다른 한쪽은 여과지포집장치 방향으로 유입하였다. 여과지포집장치 방향으로 유입된 외부 공기는 탄소 디누더에 의해 가스상 물질 등을 제거한 후, PM<sub>2.5</sub> 사이클론(URG-2000-30ENYF, URG Corp., USA)을 통해 여과지팩(URG-2000-30F, URG Corp., USA)에 장착된 테프론 여과지(PTFE, R2PJ047, Pall Corp., USA)와 석영 여과지(Pallflex, 2500QATUP, Pall Corp., USA)에 PM<sub>2.5</sub> 분진을 각각 동시에 포집하

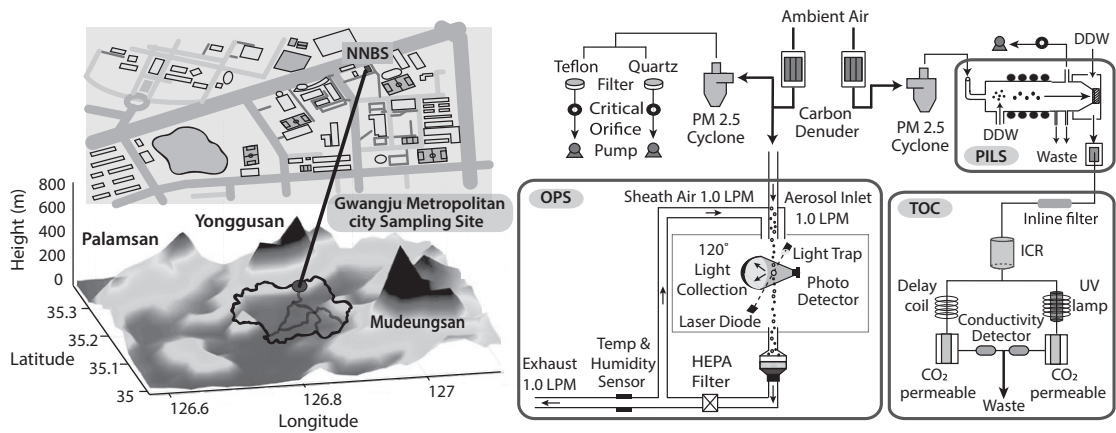


Fig. 1. Schematic diagram of the sampling site and methods with Optical Particle Sizer (OPS).

였다. 탄소여과지 (8 inch 2 × 14 strips, Sunset Inc., USA) 는 밀봉된 상태에서 보관하여 현장에서 1주일 간격으로 교체하였다. 밀봉 테프론 여과지 및 450°C (12 Hr) 의 강열 보관된 석영 여과지 또한 페트리디쉬에 사용 전까지 냉장 보관하였다. 유량은 오리피스에 의해 일정 유지되었고, 측정기간 동안 건공기 유량측정기 (Dry Gas Test Meter, Bios Defender 510, MesaLabs, USA) 에 의해 매일 재확인하였다. PILS 방향으로의 유입된 공기는 탄소 디누더, PM<sub>2.5</sub> 사이클론을 거쳐 PILS로 유입되었다. Park *et al.* (2014)에 PILS-TOC에 대한 자세한 운영 방법을 나타내었다.

### 2.3 여과지 분석

테프론 및 석영 여과지로부터 포집된 분진에 대하여 중량법에 의한 질량 농도, 이온성분, organic carbon (OC) 및 elemental carbon (EC), 및 수용성 유기탄소를 분석하였다. 본 연구에서는 중량법에 의한 질량 농도와 이온성분, OC 및 EC의 농도만 나타내었다. OC와 EC 는 National Institute of Occupational Safety & Health (NIOSH) 5040 프로토콜(protocol)을 기초로 한 탄소분석기 (Carbon Aerosol Analyzer, Sunset laboratory Inc., USA)를 이용하였다 (Bae *et al.*, 2013). 분석방법을 간략히 나타내면 다음과 같다. 1.5 cm<sup>2</sup>로 절단된 여과지에 단당(sucrose)을 이용한 외부 표준물질 및 5% CH<sub>4</sub> 내부 표준물질을 분석하였으며, 재차분석에 의해 100 ± 2.00% 이내의 정확도(target/actual)를 확보하였다.

이온성분은 석영 여과지에 포집된 시료를 앞에서 설명한 방법을 이용해 35 mL의 초순수액으로 추출하여 Ion Chromatography (IC Metrohm 883, Switzerland)로 분석하였다 (Cho *et al.*, 2015). 음이온 F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>과 양이온 Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>의 총 10가지의 이온 성분을 현장 공시로 분석을 통해 배경농도를 보정하여 분석하였다. 간략히, 음이온은 Metrohm Metrosep A Supp-5 칼럼, 0.7 mL/min 유속, 250 µL 주입량, 3.2 mM Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> & 1.0 mM NaHCO<sub>3</sub> 용리액 조건으로 분석하였고, 양이온은 Metrohm Metrosep C4-250 칼럼, 0.6 mL/min 유속, 250 µL 주입량, 5 mM HNO<sub>3</sub> 용리액 조건으로 분석하였다. 본 연구에서는 주 이온성분인 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 그리고 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 성분만 나타내었다.

마지막으로 테프론에 포집된 분진은 분석 전후로 데시게이터 내에서 12시간 동안 항냉 후, 최저 1 µg 해상도 전자저울 (DM, Sartorius Corp, Germany)로 최소 3번 이상 분석하여, 연속 3번 측정값의 차이가 5 µg 이내의 평균값을 최종적으로 나타내었다.

### 2.4 통계 모델

본 연구에서 사용한 PMF 모델 (Paatero, 1997)은 2차원 행렬로 구성된 모집단의 원인 기여도를, 계산된 오염원 분류표에 의해 정량적으로 least-squares minimization (LSM)에 의해 계산하는 방법이다. Chemical Mass Balance (CMB) 모델과 비교해 볼 때, 오염원 분류표가 필요하지 않은 장점이 있으나, 모델 수행에 따른 입력

자료의 수가 최소 100개 이상 필요하고(Zhang *et al.*, 2009), 계산된 오염원 분류표 해석에 모델 수행자의 많은 결과 해석 경험이 필요하다. PMF 모델은 (1) 일반적으로 분석 총 질량 농도에 대한 원인 기여량 추정 등에 많이 이용되고(Jeong and Hwang, 2015), (2) 분진 질량계(aerosol mass spectrometer, AMS) 등과 같은 질량 파편의 기원 분석(Lee *et al.*, 2015b), 그리고 (3) 분진 입경 분포별 원인 분석(Liu *et al.*, 2014) 등 많은 연구 분야에서 사용되고 있다. 본 연구에서는 미국 EPA에서 제공한 PMF 모델(Ver. 5.0, EPA, USA)을 이용하여 OPS로 측정된 부피 농도의 입경 분포별 원인을 분석하였다. 또한, MATLAB(Ver. R2015b, MathWorks, USA) 프로그램 중 가우시안 모델을 이용하여, 측정된 입경별 부피 농도에 대한 분진의 밀도를 계산하였다.

### 3. 결과 및 토론

#### 3.1 관측 결과

대기 중 입경별 원인 및 밀도를 측정하고자 NNBS에서 2014년 11월 4일부터 16일간 측정된 OPS 부피 농

도, 질량 농도, 유기탄소, 무기탄소, 이온성분 및 상관관계를 그림 2에 나타내었다. OPS를 이용하여 0.3 μm에서 10.0 μm까지 12채널의 입경별 수농도를 측정하여, 본 연구에서는 0.3~2.5 μm 입경 사이의 농도를 나타내었다. 본 연구에 사용된 OPS는 optical particle counter(OPC)와 비교 측정 및 black carbon(BC)과의 입경별 일평균 상관관계를 통해 측정의 정확, 정밀성을 선연구에서 나타내었다(Park *et al.*, 2016). 측정 결과, 0.3~0.5 μm 사이에서 최빈수로 측정되었고, 일평균 부피 농도(nL/m<sup>3</sup>)는 전체평균 12.26±7.23 nL/m<sup>3</sup>로 나타났다. 그림 2(a)는 관측 기간 동안 OPS로 측정된 부피 농도 및 테프론 여과지 중량법으로 분석된 질량 농도 변화를 나타낸 것이다. 관측 기간 동안, 부피 농도 및 질량 농도가 같은 경향성으로 증감을 나타내었다. 2014년 11월 6일에서 11월 11일까지 자료 중에서 7일을 제외하고 모두 평균값 이상 나타났으며, 이 기간 동안 PM<sub>2.5</sub> 질량 농도는 평균 45.10 μg/m<sup>3</sup>로 나타났다. 그림 2(b)는 OPS 0.3~2.5 μm에서 측정된 부피 농도와 중량법으로 분석된 질량 농도의 상관관계를 나타낸 것이다. 두 측정값의 상관관계를 보면, 기울기가 2.40으로 분석되어, 높은 상관관계 결정계수(r<sup>2</sup>=0.97)와 함께 OPS의

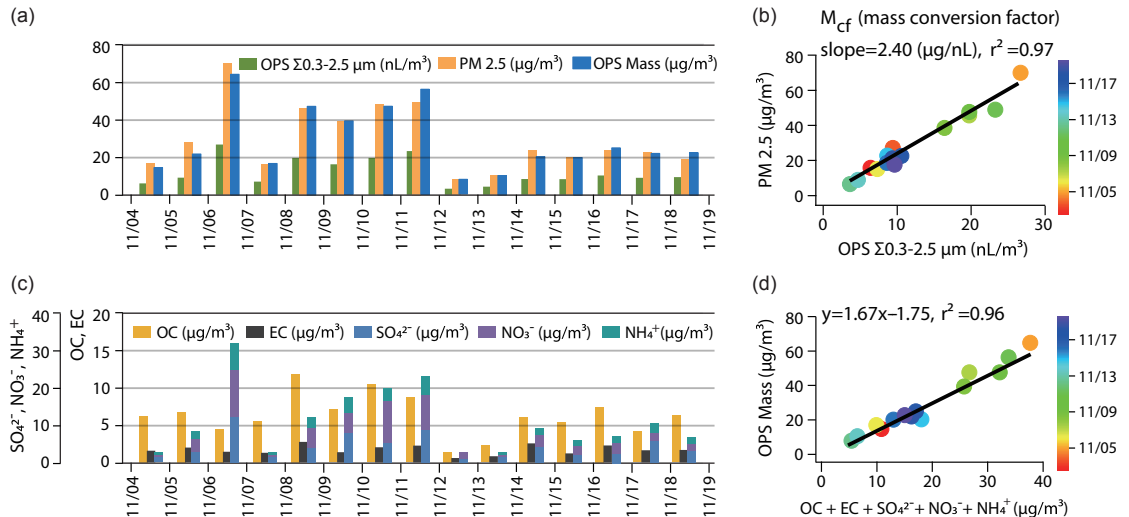


Fig. 2. (a) Time series of volume concentrations measured by OPS, mass concentrations by gravity method, & mass concentrations estimated from OPS, (b) pairwise correlation scatterplots between mass concentrations by gravity method and volume concentration by OPS colored by sampling dates, (c) time series of OC, EC & ions, and (d) pairwise correlation scatterplots between (b) mass concentrations estimated from OPS and mass concentration by sum of ions, OC, and EC colored by sampling dates.

부피 농도가 질량 농도보다 낮게 나타났다. OPS는 Mie 산란원리에 의해 광도계로 수농도를 산출하는 측정 기술을 바탕으로, 최대 16채널까지 대기를 측정하여, 분진 밀도 가정 하에 질량 농도를 산출한다. 이에 그림 2(b)에서 나타난 기울기는 OPS 부피 농도로부터 PM<sub>2.5</sub> 질량 농도로 변환할 수 있는 실제 질량 환산 값(Mass conversion factor, Mcf)을 의미한다.

그림 2(c)는 관측 기간 동안의 OC, EC, 누적 이온성분(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)의 질량 농도 변화를 나타낸 것이다. 관측 기간 동안, 위에서 나타낸 OPS 부피 농도 및 질량 농도와 같은 경향성을 나타냈다. 이온성분의 경우 황산염이온이 평균 4.16±3.19 μg/m<sup>3</sup>로 나타났으며, 암모늄 이온과의 상관관계 결정계수(r<sup>2</sup>)가 0.92로 질산염과의 상관관계 결정계수(r<sup>2</sup>=0.81)보다 높게 나타나 황산염암모늄이 주 이온 화학성분으로 분석되었고, 음이온, 양이온의 분석 이온 발란스의 상관관계 결정계수는 0.97로 높은 분석 신뢰성을 나타냈다(Cho *et al.*, 2015). 그림 2(d)는 OC, EC, 그리고 이온성분(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)의 질량 농도의 합과 그림 2(b)의 Mcf로부터 계산된 OPS 질량 농도의 상관관계를 나타낸 것이다. 분석 결과, 기울기 1.67과 함께 상관관계 결정계수가 0.96으로 높게 나타나 Mcf를 이용한 환산 질량 농도가 PM<sub>2.5</sub>의 주성분과 함께 질량 농도를 대표할 수 있음을 의미한다. 기울기 1.67은 OM/OC 및 중금속을 포함한 미분석 단일 원소 등을 고려하면, 1.0에 가까울 것으로 사료된다.

### 3.2 입경 분포 원인분석

그림 3은 OPS로 측정된 부피 농도 입경 분포(dV/dlogdp, cm<sup>-3</sup>) 및 입경 분포 PMF 모델 결과를 나타낸 것이다. 간략히, OPS 0.3 μm~10.0 μm 입경에서 두 모드를 나타내었다. 첫 번째 모드는 시작점인 0.3~0.4 μm에서 OPS 평균 32 dV/dlogdp, cm<sup>-3</sup>로 나타났고, 두 번째 모드는 1.5~2.0 μm에서 평균 7.9 dV/dlogdp, cm<sup>-3</sup>로 측정되었다.

11월 4일부터 5분 간격으로 측정된 시계열 총 데이터 수 4,365개를 이용하여, 불확실성 및 Q값 등을 고려한 PMF 모델을 분석하였다. 모델 결과, 총 3개의 통계적으로 유의한 원인 입경 분포를 확인할 수 있다. 첫 번째 PMF 원인 입경 분포(Factor 1)는 0.3 μm 입경에서 단일 모드로 분석되었고, 이후 점차적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 두 번째 PMF 원인 입경 분포(Factor 2)는 2.5 μm 입경에서 단일 모드로 분석되었고, 마지막 원인 입경 분포(Factor 3)은 작은 입경에서 점차적으로 증가하다가 10 μm 입경에서 최대 단일 모드로 나타났다(그림 3(b)). 그림 3(c~e)는 PMF로 분석된 원인 입경 분포를 전체 평균값으로 정규화 하여, 원인 입경 분포별 일평균 농도로 나타내었다. Factor 1의 일평균은 그림 3(c)에서 볼 수 있듯이 강한 일변화농도 변이가 나타남을 알 수 있다. 일평균 Factor 1은 새벽 6시경 이후 갑자기 증가하기 시작하여 오전 7~8시경 모드를 나타냈다. 이후 점차적으로 감소하기 시작하여, 오후 2시 40분경 최소값을 나타낸 이후, 점차적으로 증가하

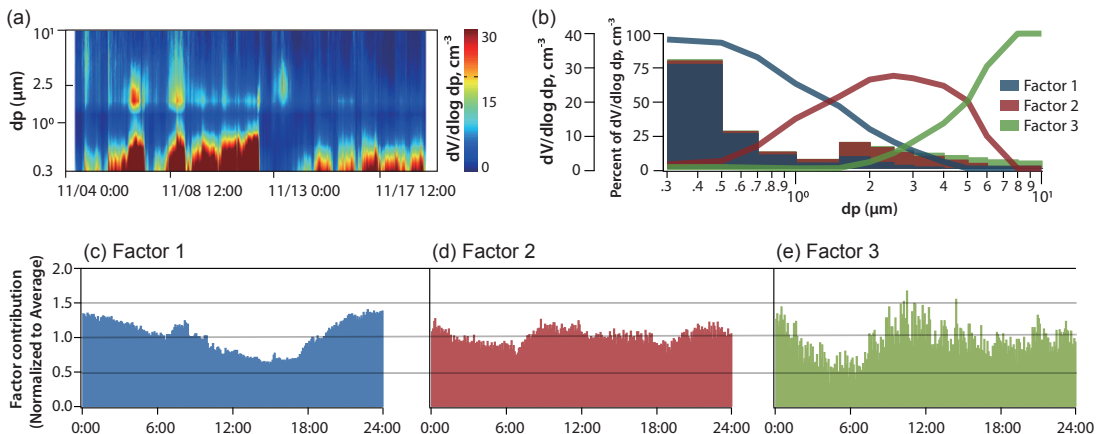


Fig. 3. Evolution of particle volume concentrations and size distributions with factors by positive matrix factorization (PMF) model.

기 시작하여, 자정 무렵 일중 최대값을 나타냈다. 이는 차량 이동 시간대와 깊은 상관성이 있을 것으로 사료된다. 본 측정소 북쪽으로 침단과기로 및 서쪽 지점에 호남고속도로가 위치하고 있기 때문이다. 농도 증가 현상은 야간 기온 역전, 주위 산업체 배출, 또는 주변 농업 지역에서의 소각 등을 고려한 원인인 오전시간의 지역적 자동차 배기가스에 의한 주원인이 복합적으로 나타나고 있으리라 사료된다. Factor 1과 비슷한 경향의 블랙카본 농도 변이를 천안지역의 선행연구에서 찾아볼 수 있다(Lee *et al.*, 2015a). 이에, Factor 1은 일차 분진(primary aerosols)과 관련이 있으며, 이차 분진(secondary aerosols)과는 관련성이 적을 것으로 판단된다. 2.5 μm 및 10 μm 입경에서 단일 모드를 나타낸 Factor 2와 Factor 3의 일평균을 살펴보면, Factor 1과는 다른 분포의 일변화농도 변이가 나타났다. 오전 6시 이후 점차적으로 증가하기 시작하여, 낮 시간대에 넓은 모드를 나타냈다. 이후 점차적으로 감소하기 시작하여, 오후 6시 두 번째 최소값을 나타낸 이후, 점차적으로 증가하기 시작하여, Factor 1과 비슷한 경향으로 자정 무렵 최대값을 나타냈다. 낮 시간대 증가현상은 일차 분진보다는 이차 분진과 관련성이 깊을 것으로 사료되며, 야간 시간대 증가 현상은 기온역전 등 Fac-

tor 1과 유사한 영향을 받았을 것으로 판단된다. 이에 입경 분포 원인과 관련 화학적 성분과의 상관관계를 후속 연구를 통해 심도 있게 진행할 예정이다.

### 3.3 분진 밀도 분석

그림 3에서 나타낸 바와 같이 OPS로 측정된 부피 농도 입경 분포( $dV/d\log dp, \text{cm}^{-3}$ )는 측정 시작점인 0.3~0.4 μm와 1.5~2.0 μm에서 두 모드를 나타내고 있으며(bi-modal), 0.3 μm 이하의 입경 범위에서는 분진 부피 농도를 관측할 수 없다. 일반적으로 대기 중 부피 및 질량 농도의 모드는 0.2~0.4 μm 사이에서 나타나는 것으로 알려져 있다(Ham *et al.*, 2011; Hand *et al.*, 2002). 이에 OPS를 이용하여 PM<sub>2.5</sub>의 밀도를 계산하고자, 1) 입경 0.3 μm 이하에서는 가우시안 분포로 가정하여, 모델 부피 농도(그림 4(a))를 산정하고, 2) 이를 중량법으로 분석된 질량 농도를 고려하여 밀도를 계산하였다(그림 4(b)). 사용된 가우시안 모델 식은 다음 (1)과 같다.

$$f_m = \alpha \times \exp(-((dp - \gamma)/\beta)^2) \tag{1}$$

여기서  $f_m$ 는 0.3 μm 이하의 계산된 분진 부피( $dV/d\log dp, \text{cm}^{-3}$ )이며,  $dp$ 는 0.3 μm 이하의 입경 범위에서

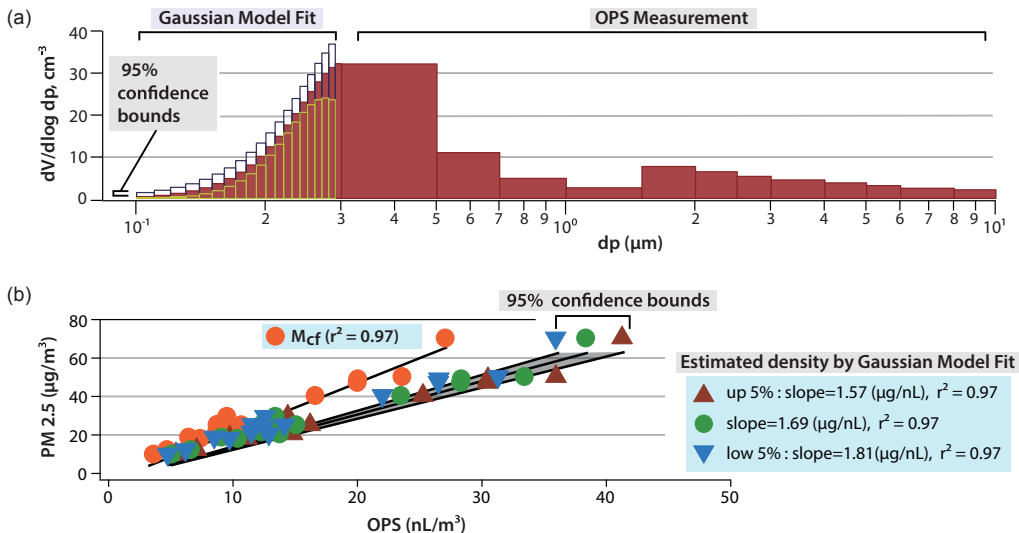


Fig. 4. (a) Size distributions with Gaussuan Model fit and OPS measurement and (b) density estimated from pairwise correlation scatterplots between mass concentrations measured by gravity method and reconstructed volume concentrations reconstructed by gaussian model fit.

의 분진 입경을 나타내며,  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\beta$ 는 계산에 의한 통계 모델 계산 상수로 각각 32.79, 0.30, 0.10이다.

가우시안 모델에 의해 계산된 0.05  $\mu\text{m}$ 에서 0.3  $\mu\text{m}$ 까지의 로그 정규화 모델 부피 농도( $dV/d\log dp$ ,  $\text{cm}^{-3}$ )를 구하여, 모델 부피 농도( $\text{nL}/\text{m}^3$ )를 계산하였다. 여기에, OPS 측정 부피 농도( $\text{nL}/\text{m}^3$ )와의 합으로 총 부피 농도를 산출하였다. 최종 밀도( $\rho$ )는 중량법으로 분석된 질량 농도( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )에서 총 부피 농도의 비율로 나타났다.

$$\rho = TF_{\text{mass}} / (\sum f_{\text{mv}} + \sum f_{\text{av}}) \quad (2)$$

여기서  $\rho$ 는 추산된 분진 밀도( $\text{kg}/\text{L}$ )를 나타내고,  $\sum f_{\text{mv}}$ 는  $f_{\text{m}}$ 으로부터의 0.3  $\mu\text{m}$  이하의 총 부피( $\text{nL}/\text{m}^3$ ),  $\sum f_{\text{av}}$ 는 OPS로 관측된 실제 총 부피( $\text{nL}/\text{m}^3$ ), 마지막으로  $TF_{\text{mass}}$ 는 테프론 여과지로부터 분석된  $\text{PM}_{2.5}$  질량 농도( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )를 나타낸다. 가우시안 모델에 의해 계산된 부피 농도를 95% 신뢰성과 함께 그림 4(a)에 나타내었다.

그림 4(b)는 OPS 부피 농도와 가우시안 모델 부피 농도의 합과, 중량법으로 분석된 질량 농도의 상관관계를 95% 신뢰도와 함께 나타낸 것이다. 상관관계를 보면, 기울기가 1.69 ( $r^2=0.97$ )으로 나타나, 분진의 밀도를 1.69  $\text{g}/\text{cm}^3$ 로 예측할 수 있다. 95% 신뢰도에 따른 오차 범위를 고려하면 최소 1.57에서 최대 1.81  $\text{g}/\text{cm}^3$ 까지 계산되었다. 이는 항공기 엔진에서 배출되는 20 nm 크기의 분진에 대한 유효 밀도(effective density)와도 매우 유사하다(Abegglen *et al.*, 2015). 따라서, 향후 최종 계산된 밀도는 측정 지역 내 분진의 형태와 같은 물리적 특성 및 화학적 특성을 동시에 이해하는데 도움이 될 수 있으리라 사료된다. 또한, 본 연구에서 제시한 방법을 이용하여, 밀도의 시계열 변화를 계산한다면 대기 중에서 일어나는 물리 화학적 변이를 이해하는 척도로 사용할 수 있으리라 판단한다.

## 4. 결 론

본 연구는 국립환경과학원 남부권 대기오염집중측정소에서 2014년 11월 4일부터 16일간 측정된 OPS 부피 농도, 여과지 중량법 질량 농도를 통해 PMF를 이용하여 입경 분포에 따른 원인 분석 및 가우시안 모델을 이용하여 분진의 밀도를 산출하였다. PMF 모델 결과,

0.3  $\mu\text{m}$ , 2.5  $\mu\text{m}$ , 그리고 10  $\mu\text{m}$  입경에서 모드를 나타내는 세 가지 원인 입경 분포로 분석되었다. 일평균 원인 분석 결과, Factor 1은 일차 오염원과 깊은 관련이 있으며, Factor 2와 3은 2차 물질과 관련성이 깊을 것으로 판단된다. 또한, 가우시안 모델에 의한 밀도 분석 결과 측정 기간 중 대기 분진의 밀도를 95% 신뢰도와 함께 최소 1.57에서 최대 1.81  $\text{g}/\text{cm}^3$  사이에서 1.69  $\text{g}/\text{cm}^3$ 로 분석되었다. 향후 PMF 모델과 함께 원인별 밀도 추정 및 밀도 시계열 변화를 계산하여 대기 중에서 복잡하게 일어나는 물리 화학적 특성을 대변하는 척도로 이용될 수 있으리라 판단한다.

## 감사의 글

본 논문은 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2013R1A1A2065686)을 받아 수행된 일반 연구사업 연구 결과입니다.

## References

- Abegglen, M., L. Durdina, B.T. Brem, J. Wang, T. Rindlisbacher, J.C. Corbin, U. Lohmann, and B. Sierau (2015) Effective density and mass-mobility exponents of particulate matter in aircraft turbine exhaust : Dependence on engine thrust and particle size, *J. Aerosol Sci.*, 88, 135-147.
- Bae, M.S., S.S. Park, and Y.J. Kim (2013) Characteristics of carbonaceous aerosols measured at Gosan- Based on analysis of thermal distribution by carbon analyzer and organic compounds by GCMS, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 29(6), 722-733. (in Korean with English Abstract)
- Cassee, F.R., M.E. Heroux, M.E. Gerlofs-Nijland, and F.J. Kelly (2013) Particulate matter beyond mass: recent health evidence on the role of fractions, chemical constituents and sources of emission, *Inhal. Toxicol.*, 25(14), 802-812.
- Castellini, S., B. Moroni, and D. Cappelletti (2014) PMetro: Measurement of urban aerosols on a mobile platform, *Meas.*, 49(1), 99-106.
- Cho, I.H., D.J. Park, and M.S. Bae (2015) Time Resolved Analysis of Water Soluble Organic Carbon by Aerosol-

- into-Mist System, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 31(6), 497-507. (in Korean with English Abstract)
- Cooper, G., J. Foster, L. Galbraith, S. Jain, A. Neukermans, and B. Ormond (2014) Preliminary results for salt aerosol production intended for marine cloud brightening, using effervescent spray atomization, *Phil. Trans. R. Soc. A*, 372, 20140055.
- DeCarlo, P.F., J.G. Slowik, D.R. Worsnop, P. Davidovits, and J.L. Jimenez (2004) Particle morphology and density characterization by combined mobility and aerodynamic diameter measurements. Part 1 Theory, *Aerosol Sci. Technol.*, 38(12), 1185-1205.
- Franck, U., S. Odeh, A. Wiedensohler, B. Wehner, and O. Herbarth (2011) The effect of particle size on cardiovascular disorders: the smaller the worse, *Sci. Total Environ.*, 409(20), 4217-4221.
- Ham, W.A. and M.J. Kleeman (2011) Size-resolved source apportionment of carbonaceous particulate matter in urban and rural sites in central California, *Atmos. Environ.*, 45(24), 3988-3995.
- Hand, J.L., S.M. Kreidenweis, N. Kreisberg, S. Hering, M. Stolzenburg, W. Dick, and P.H. McMurry (2002) Comparisons of aerosol properties measured by impactors and light scattering from individual particles: refractive index, number and volume concentrations, and size distributions, *Atmos. Environ.*, 36(11), 1853-1861.
- Hasheminassab, S., P. Pakbin, R.J. Delfino, J.J. Schauer, and C. Sioutas (2014) Diurnal and seasonal trends in the apparent density of ambient fine and coarse particles in Los Angeles, *Environ. Pollut.*, 187, 1-9.
- Hu, M., J. Peng, K. Sun, D. Yue, S. Guo, A. Wiedensohler, and Z. Wu (2012) Estimation of size-resolved ambient particle density based on the measurement of aerosol number, mass, and chemical size distributions in the Winter in Beijing, *Environ. Sci. Technol.*, 46(18), 9941-9947.
- Hussein, T., C. Johansson, H. Karlsson, and H.C. Hansson (2008) Factors affecting nontailpipe aerosol particle emissions from paved roads: on-road measurements in Stockholm, Sweden, *Atmos. Environ.*, 42(4), 688-702.
- Jeong, Y.J. and I.J. Hwang (2015) Source Apportionment of PM<sub>2.5</sub> in Gyeongsan Using the PMF Model, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 31(6), 508-519. (in Korean with English Abstract)
- Kraus, U., S. Breitner, J. Schnelle-Kreis, J. Cyrus, T. Lanki, R. Ruckerl, A. Schneider, I. Bruske, J.W. Gu, R. Devlin, H.E. Wichmann, R. Zimmermann, and A. Peters (2011) Particle-associated organic compounds and symptoms in myocardial infarction survivors, *Inhal. Toxicol.*, 23(7), 431-447.
- Lee, J., B. Jeong, D.J. Park, and M.S. Bae (2015a) A Study of Black Carbon Measurement in Metropolitan Area and Suburban Area of the Korean Peninsula Performed during Pre KORUS-AQ Campaign, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 31(5), 472-481. (in Korean with English Abstract)
- Lee, T., J. Choi, G. Lee, J. Ahn, J.S. Park, S.A. Atwood, M. Schurman, Y. Choi, Y. Chung, and J.L. Collett Jr, (2015b) Characterization of aerosol composition, concentrations, and sources at Baengnyeong Island, Korea using an aerosol mass spectrometer, *Atmos. Environ.*, 120, 297-306.
- Lee, Y., M. Park, S. Jung, S. Kim, M. Jo, I. Song, Y. Lyu, Y. Lim, J. Kim, H. Jung, S. Lee, W. Choi, J. Ahn, M. Lee, H. Kang, S. Park, S. Seo, D. Jung, J. Hyun, J. Park, T. Hwang, Y. Hong, J. Hong, and H. Shin (2015) Characteristics of Particulate Carbon in the Ambient Air in the Korean Peninsula, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 31(4), 330-344. (in Korean with English Abstract)
- Levy, M.E., R.Y. Zhang, A.F. Khalizov, J. Zheng, D.R. Collins, C.R. Glen, Y. Wang, X.Y. Yu, W. Luke, J.T. Jayne, and E. Olaguer (2013) Measurements of submicron aerosols in Houston, Texas during the 2009 SHARP field campaign. *J. Geophys. Res. D: Atmos.*, 118, 10518-10534.
- Liu, Z., B. Hu, D. Ji, Y. Wang, M. Wang, and Y. Wang (2015) Diurnal and seasonal variation of the PM<sub>2.5</sub> apparent particle density in Beijing, China, *Atmos. Environ.*, 120, 328-338.
- Liu, Z., B. Hu, Q. Liu, Y. Sun, and Y.S. Wang (2014) Source apportionment of urban fine particle number concentration during summertime in Beijing, *Atmos. Environ.*, 96, 359-369.
- McMurry, P.H., X. Wang, K. Park, and K. Ehara (2002) The relationship between mass and mobility for atmospheric particles: a new technique for measuring particle density, *Aerosol Sci. Technol.*, 36(2), 227-238.
- Paatero, P. (1997) Least squares formulation of robust non-negative factor analysis, *Chemom. Intell. Lab. Syst.*, 37(1), 23-35.
- Park, D.J., J.Y. Ahn, H.J. Shin, and M.S. Bae (2014) Char-



- acteristics of  $PM_{2.5}$  Carbonaceous Aerosol using PILSTOC and GC/MS-TD in Seoul, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 30(5), 461-476. (in Korean with English Abstract)
- Park, D.J., K.Y. Lee, K. Park, and M.S. Bae (2016) Diurnal Size Distributions of Black Carbon by comparison of Optical Particulate Measurements - Part I, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 32(1), 1-8. (in Korean with English Abstract)
- Pitz, M., O. Schmid, J. Heinrich, W. Birmili, J.R. Maguhn, R. Zimmermann, H.E. Wichmann, A. Peters, and J. Cyrys (2008) Seasonal and diurnal variation of  $PM_{2.5}$  apparent particle density in urban air in Augsburg, Germany, *Environ. Sci. Technol.*, 42(14), 5087-5093.
- Schmid, O., E. Karg, D.E. Hagen, P.D. Whitefield, and G.A. Ferron (2007) On the effective density of non-spherical particles as derived from combined measurements of aerodynamic and mobility equivalent size, *J. Aerosol Sci.*, 38(4), 431-443.
- Xu, B., Y. Wu, Z. Lin, and Z. Chen (2014) Investigation of Air Humidity Affecting Filtration Efficiency and Pressure Drop of Vehicle Cabin Air Filters, *Aerosol Air Qual. Res.*, 14(3), 1066-1073.
- Yin, Z., X. Ye, S. Jiang, Y. Tao, Y. Shi, X. Yang, and J. Chen (2015) Size-resolved effective density of urban aerosols in Shanghai, *Atmos. Environ.*, 100, 133-140.
- Zhang, Y., R.J. Sheesley, M.S. Bae, and J.J. Schauer (2009) Sensitivity of a molecular marker based positive matrix factorization model to the number of receptor observations, *Atmos. Environ.*, 43(32), 4951-4958.