

광학 입자 측정기 비교 측정에 의한 입경별 일평균 블랙카본 분석 - Part I

Diurnal Size Distributions of Black Carbon by Comparison of Optical Particulate Measurements - Part I

박다정 · 이광열¹⁾ · 박기홍¹⁾ · 배민석*

목포대학교 환경공학과, ¹⁾광주과학기술원 환경공학부

(2015년 12월 16일 접수, 2015년 12월 22일 수정, 2015년 12월 29일 채택)

Da-Jeong Park, Kwang-Yul Lee¹⁾, Kihong Park¹⁾ and Min-Suk Bae*

Department of Environmental Engineering, Mokpo National University

¹⁾*School of Environmental Science and Engineering, Gwangju Institute of Science and
Technology, Gwangju, Korea*

(Received 16 December 2015, revised 22 December 2015, accepted 29 December 2015)

Abstract

Optical particle sizer (OPS), optical particle counter (OPC), and aethalometer were deployed to measure the particle number concentrations from 0.3 to 10.0 μm and black carbon (BC) concentrations. Comparisons of particle number concentrations measured by OPS and OPC were conducted to evaluate the performance of the each optical instrument at the Gwangju sampling site (35.23°N, 126.84°E) for 14 days from Dec. 27 in 2014. Although a good correlation ($r^2=0.99$) between the OPS and OPC was observed for both the particle number and volume concentrations, different relationships by BC concentrations can be associated with the intensities by different light scattering angles. In addition, based on diurnal patterns of size distributions in 24 hr running correlation coefficient determination, BC concentrations were highly related to the particles less than 0.3 μm observed in the morning traffic hour.

Key words : OPC, OPS, BC, Size distribution

1. 서 론

대기 중 입자의 속성은 크게 물리 및 화학적 특성으로 분류할 수 있다. 일반적으로 물리적 특성 측면에서 입자의 입경 분포에 따른 수농도를 측정할 뿐만 아니

라, 직접 또는 간접적으로 관련된 화학 성분 분석에 관한 연구 또한 활발히 진행되고 있다(Ruths *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2013). 입자의 입경별 수농도를 측정하기 위해서 일반적으로 Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)가 널리 사용되어 왔다(Kang *et al.*, 2011; Bae and Oh, 2010; Shi *et al.*, 2001). Differential Mobility Analyzer (DMA), Electrostatic Classifier (EC), 그리고 Condensation Particle Counter (CPC)로 구성된 SMPS

*Corresponding author.

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

는 DMA와 EC에서 입경별로 분리된 입자를 CPC에서 최종적으로 수농도를 측정함으로써 수 nm에서 수백 nm까지 입경별 수농도를 분석한다. 한편, CPC는 SMPS로부터 분리된 입자의 수농도를 전체 입경에 대한 총 수농도로 독립적으로 분석할 수 있다(Bae *et al.*, 2014). 간략히, CPC의 측정원리는 입자를 응축핵으로 butanol (Agarwal and Sem, 1980) 또는 water (Hering and Stolzenburg, 2005)를 이용하여 큰 입경으로 성장시킨 다음, 성장 입자의 광산란 강도를 측정하여 수농도를 산출한다. CPC의 분석 효율은 유량 및 입경 분포와 관련된 확산손실(diffusion loss) 외에 입자의 입경별 화학적 성분 등에 따라 분석 효율이 다르게 나타나는 것으로 알려져 있다(Bae *et al.*, 2014). 한편, 수백 nm 이상의 입경을 측정하는 방법은, 유입 입자의 광산란 강도를 통해 공기역학적 직경을 측정된 aerodynamic particle sizer (APS)가 널리 이용되고 있다(Shen *et al.*, 2002).

이후, 수백 nm 이상의 입경분포를 측정하는 방법으로 Optical Particle Sizer (OPS) 또는 Optical Particle Counter (OPC)가 개발되었다. OPC를 이용한 선행 연구로, 국내에서는 서울시 입경 원인에 대한 연구가 진행되어 보고되었고(Jung *et al.*, 2003), 미국 집중측정소에서도 다단포집기로 분석된 입경별 농도 비교 측정 연구(Watson *et al.*, 2008) 등 OPC를 이용한 입경분포에 대한 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다(Belosi *et al.*, 2013; Burkart *et al.*, 2010; Cuccia *et al.*, 2010). OPS 및 OPC의 기본 측정원리는 입경 산란 측정법으로 동일하지만, 개발 회사에 의해 각각 OPS (TSI Inc., USA), OPC (Grimm Aerosol Technik Co., Germany)로 명명되었다. 하지만, 입경분포를 측정하는 산란경의 각도 및 유입 유량 등은 서로 상이하여, 본 연구에서는 비교 측정을 통해 OPS 및 OPC의 성능을 평가하고자 한다. 이와 더불어 aethalometer (Hansen *et al.*, 1984)를 이용하여 Black Carbon (BC) 질량농도를 측정하여 BC의 입경분포를 분석하였다.

2. 방 법

2.1 비교 측정 및 분석 방법

대기 중 OPS 및 OPC를 이용하여 입경분포를 측정

하고자 광주과학기술원 삼성동(35.23°N, 126.84°E) 3층에서 2014년 12월 27일부터 2015년 1월 9일까지 14일간 측정이 이루어졌다. 본 측정소는 광주광역시외도심 북쪽 끝에 위치해 있고, 동쪽은 교외 및 농업지역, 서쪽 및 남쪽은 산업, 도심지역이 위치해 있고, 측정소 서쪽 약 2 km 지점에 호남고속도로가 위치해 있다(그림 1).

본 연구에 사용한 장비는 (1) OPS (3330, TSI Inc., USA), (2) 2대의 OPC (107 & 1.108, Grimm Aerosol Technik Co., Germany), (3) aethalometer (MicroAeth, Aethlabs, USA), 그리고 (4) NanoScan SMPS (3910, TSI Inc., USA)로 총 5대가 측정기간 동안 동시에 운용되었다. 본 연구는 OPC, OPS (Model 1.108), 그리고 aethalometer를 이용한 입경분포 및 BC를 비교 및 평가하였다. 간략히, 6.0 liter per minute (lpm)의 펌프 압력에 의해 직경 5.5 cm의 관으로 유입된 공기는 40 cm 길이의 확산건조기(diffusion dryer)를 거쳐 (1) aethalometer 및 NanoScan SMPS, 그리고 (2) OPS 및 OPC로 각각 분리되어 측정되었다. 실리카겔로 충전된 확산건조기는 파과점에 도달하기 전, 3일마다 교체되어 수분에 의한 농도 측정 간섭현상을 최소화하였다.

OPS는 1.0 lpm으로 유입된 공기가 내부 HEPA 필터에 의해 유입 입자가 제거된 1.0 lpm의 외각유동(sheath flow)과 함께 광도계로 측정된다. 외각유동은 유입 입자의 확산 손실을 최소화하고, 유입 분진을 일렬화하여 측정 효율을 높이는 역할을 한다(그림 1). 최종적으로 광도계로 측정된 입경 산란계수는 Mie 산란 원리에 의해 수농도로 산출된다. 0.3 μm 에서 10.0 μm 사이의 분진을 16개 채널의 분진 수농도로 최대 $3.0 \times 10^6 \text{ \#}/\text{L}$ 를 분석할 수 있어, 일반 대기를 측정 분석하는데 많이 이용되고 있으나, 질량농도로 환산하기 위해서는 분진의 밀도를 가정해야 한다. 본 연구에서는 5분의 시간 간격으로 측정하여, 수농도 및 부피농도를 나타내었으며, 이를 OPC 및 BC 결과와 비교 분석하였다. OPC는 1.2 lpm 유량 하에, HEPA 필터를 통과한 약 0.4 lpm의 외각유동을 통해 유입 분진을 광도계로 측정한다. 0.3 μm 에서 10.0 μm 사이의 분진을 12개 채널의 분진 수농도로 최대 $2.0 \times 10^7 \text{ \#}/\text{L}$ 까지 OPS와 같은 5분의 시간 간격으로 측정하여, 수농도 및 부피농도를 나타내어 분석하였다. 위에서 간략히 나타냈듯이, OPS와 OPC는 같은 분석 원리를 나타내지만, 입경분포를

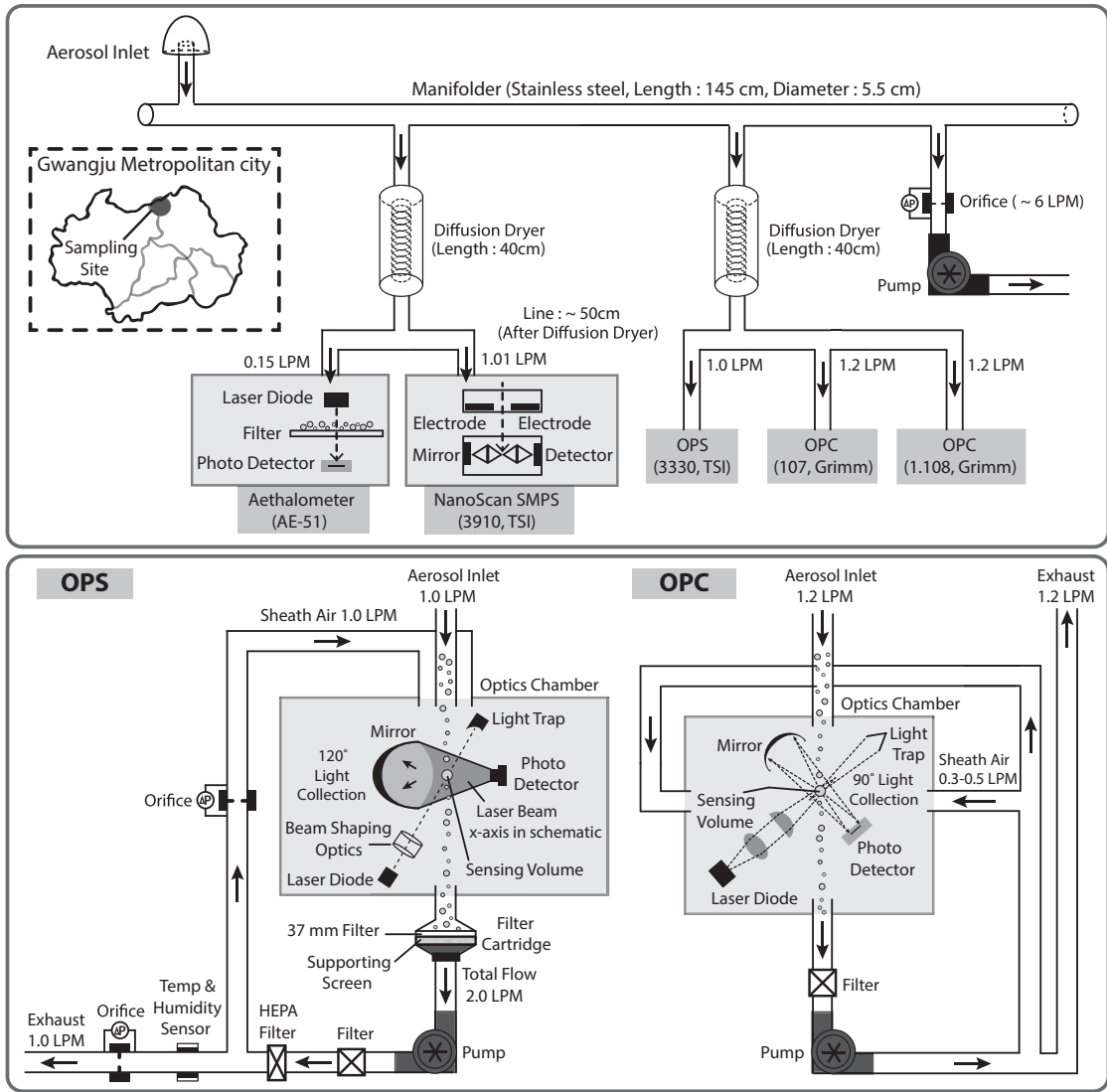


Fig. 1. Schematic diagram of the sampling methods with Optical Particle Counter (OPC) and Optical Particle Sizer (OPS).

측정하는 산란각 및 외각유동을 포함한 유량은 서로 상이하하다. 산란각을 측정하기 위한 산란경은 입경에 의해 산란된 빛의 산란강도를 측정하는 데 매우 중요한 요소이며, 산란각에 의해 입자 측정 효율이 결정된다. 즉, 정확한 입자의 산란강도 측정은 산란경의 재산란 강도 측정과 관련이 있다. OPS는 약 120°의 산란각에 의한 산란 광도를 측정하며, OPC는 약 90°의 산란각에 의한 산란 광도를 측정하여 입경별 수농도를 산

출한다. OPS의 경우 별도의 내장 필터 포집에 의해 중량법에 의한 분진의 질량농도를 분석하여 밀도를 산출할 수 있는 장점이 있으나, 저용량(1.0 lpm)의 유입유량에 따른 장시간 포집에 의해서만 분석이 가능하다는 단점이 있다. 이에 본 연구에서는 별도의 밀도 분석 없이 수농도 및 부피농도를 측정하여 BC 농도와 함께 나타내었다. 참고로, 두 분석기기 모두 측정 전 6개월 이내 교정을 실시하였다.

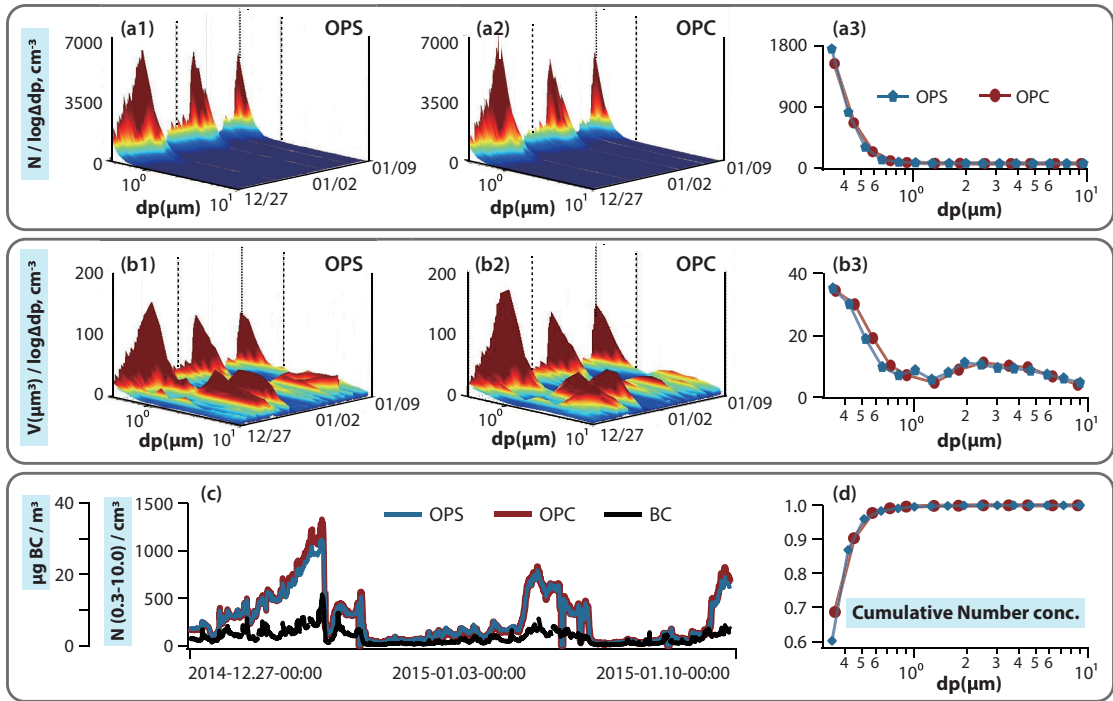


Fig. 2. Evolution of particle size distributions and (a) number concentrations using OPS & OPC ($dN/d\log D_p$, $1/cm^3$), (b) volume concentrations using OPS & OPC ($dV/d\log D_p$, $1/cm^3$), (c) time series traces for the number and black carbon concentrations ($\mu g/m^3$), and (d) cumulative distributions by number concentrations.

소형 aethalometer에 의해 측정된 BC는 필터에 포집된 유입 분진의 흡수계수를 측정하여 환산 질량농도를 분석한다(Jung and Park, 2010). 하지만, 필터에 포집된 입자의 필터 포화 현상 및 필터 교환 등에 의한 질량농도의 불확실성이 대두되고 있어(Fialho *et al.*, 2014), 흡수 및 산란계수를 모두 측정하는 기술(Multiangle Absorption Photometer, MAAP) 등 다양한 측정 기술이 개발되어 대기 중 BC 농도를 산출하고 있다(Lee *et al.*, 2015). 본 연구에서는 aethalometer를 이용하여 별도의 흡수계수의 보정 없이 OPS 및 OPC와의 상관관계를 분석하여 나타내었다.

3. 결과 및 토의

그림 2는 관측 기간 동안 OPS 및 OPC를 이용하여 $0.3 \mu m$ 에서 $10.0 \mu m$ 사이의 분진을 수농도 및 부피농도를 나타낸 결과이다. 수농도($\#/cm^3$)를 살펴보면,

OPS의 경우 전체평균 $269 \pm 248 \#/cm^3$ 로 측정되었다. $0.3 \sim 0.374 \mu m$ 에서 평균 $167 \#/cm^3$ 의 최빈수로 측정되었고, 이후 감소하여 $8.031 \sim 10.0 \mu m$ 에서 $< 0.01 \#/cm^3$ 으로 최소값을 나타냈으며, OPC의 경우 $0.3 \sim 0.4 \mu m$ 에서 평균 $190 \#/cm^3$ 의 최빈수로 측정되었고, $7.5 \sim 10.0 \mu m$ 에서 OPS와 같은 수농도 범위의 최소값을 나타냈다(그림 2(a3)). 부피농도 입경 분포($dV/d\log D_p$, $1/cm^3$)를 살펴보면, OPS 및 OPC 모두에서 $0.3 \mu m$ 와 $10.0 \mu m$ 전체 입경 사이에서 두 모드를 나타내었다. 첫 번째 모드는 시작점인 $0.3 \sim 0.374 \mu m$ 에서 OPS 평균 $3.34 nL/m^3$ ($35 dV/d\log D_p$, $1/cm^3$)으로 나타났고, 두 번째 모드는 $1.732 \sim 2.156 \mu m$ 에서 평균 $0.91 nL/m^3$ ($9.54 dV/d\log D_p$, $1/cm^3$)으로 측정되었다(그림 2(b3)). $0.3 \mu m$ 에서 $10.0 \mu m$ 의 부피농도 평균은 $15.72 \pm 12.04 nL/m^3$ 으로 측정되었으며, 분진의 밀도를 $1.5 \sim 2.5 kg/L$ 로 가정 시, 관측 기간 동안의 평균 PM_{10} 의 농도는 $24 \sim 39 \mu g/m^3$ 사이로 추정할 수 있다.

그림 2(c)는 관측 기간 동안의 OPS, OPC로 분석된

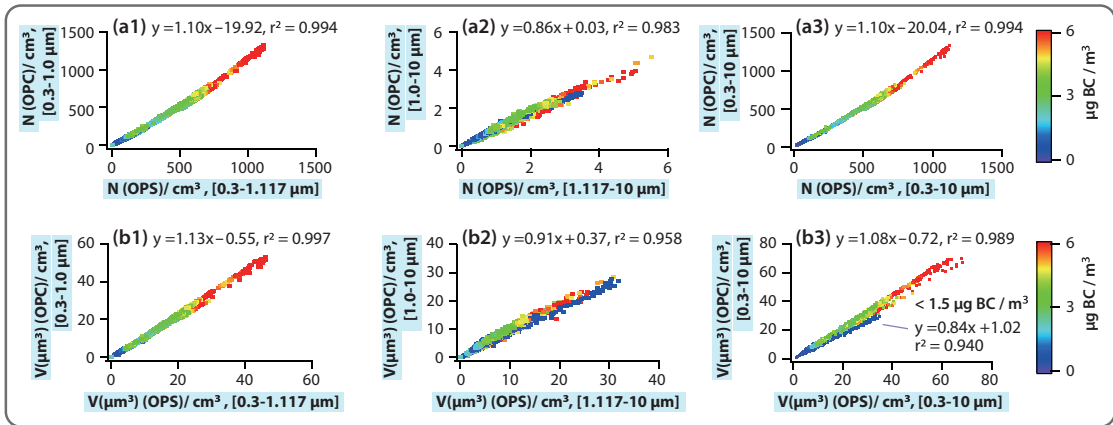


Fig. 3. Pairwise correlation scatterplots between (a) number concentrations by OPS & OPC colored by BC, and (b) volume concentrations by OPS & OPC colored by BC.

수농도 및 aethalometer로 분석된 BC의 농도변화를 나타낸 것이다. 관측 기간 동안, 수농도 및 BC 농도 모두 2014년 12월 30일과 2015년 1월 5일, 그리고 1월 9일에 고농도 현상이 나타났다. 이에, BC 농도와 관련된 OPS와 OPC의 상관관계를 비교 분석하여 다음에 나타났다.

그림 3은 OPS로 측정된 수농도와 OPC로 측정된 수농도의 상관관계 그래프를 BC 농도와 함께 나타낸 것이다. 입경 분포를 OPS 0.3~1.117 μm와 OPC 0.3~1.0 μm, 그리고 OPS 1.117~10.0 μm와 OPC 1.0~10.0 μm 수농도의 농도범위에 따라 각각 나누어 분석하였다. 분석 결과, OPS 0.3~1.117 μm와 OPC 0.3~1.0 μm 수농도 분석 조건에서, OPS의 수농도는 최고 1,113 #/cm³ (평균 266 #/cm³)으로 나타났으며, OPC는 최고 1,326 #/cm³ (평균 272 #/cm³)으로, OPC의 평균값이 약 3% 높게 분석되었다. 두 측정값의 상관관계를 보면, 기울기가 1.10 ($r^2=0.994$)으로 분석되어 OPC의 수농도가 높게 나타났으며, 부피농도 분석 조건도 마찬가지로 기울기가 1.13 ($r^2=0.997$)으로 분석되어, OPS 0.3~1.117 μm와 OPC 0.3~1.0 μm 분석 조건에서는 OPC가 높게 분석되었다. OPS 1.117~10.0 μm와 OPC 1.0~10.0 μm 수농도 분석 결과는, OPS의 수농도는 최고 5.5 #/cm³ (평균 1.1 #/cm³)으로 나타났으며, OPC는 최고 4.7 #/cm³ (평균 1.0 #/cm³)으로 나타났다. OPS의 평균값이 위 작은 입경 비교 결과와는 다르게

약간 높게 분석되었다. 두 측정값의 상관관계를 보면, 기울기가 0.86 ($r^2=0.983$)으로 나타나 OPS의 수농도가 높게 나타났으며, 부피농도도 기울기가 0.91 ($r^2=0.958$)로 분석되어, OPS 1.117~10.0 μm와 OPC 1.0~10.0 μm 분석 조건에서는 OPS가 높게 분석되었다. 전 입경 범위(0.3~10.0 μm)를 분석하면, 높은 상관관계 결정계수($r^2=0.994$)와 함께 기울기 1.10로 OPC의 수농도가 높게 나타났으며, 기울기가 1.08 ($r^2=0.989$)로 부피농도 역시 OPC가 최종적으로 높게 나타났다.

OPS의 작은 입경 분포의 수농도 비교 범위가 1.117 μm로 OPC에 비해 0.117 μm 넓음에도 불구하고, OPC가 높게 분석된 높은 원인으로는, 첫째, 보정 값의 불확실성을 들 수 있다. 두 측정기기 모두 6개월 이내 입경별 보정을 수행했음에도 불구하고, 보관기간 또는 관측시간에 따른 보정 값의 불확실성이 상대적으로 다르게 나타났을 가능성이 있다. 둘째, 만약, 보정 값이 변하지 않고 일정하게 유지됐다고 가정하면, 화학적 조성에 따른 작은 입경 크기에서 산란각 측정 효율이 다르게 나타났을 가능성이 있다. 그림 3(b3)은 OPS로 측정된 부피농도와 OPC로 측정된 부피농도의 상관관계 그래프를 BC 농도변이에 따른 색과 함께 나타낸 것이다. BC의 농도가 1.5 μg/m³ 이하인 경우 두 측정값의 기울기는 0.84 ($r^2=0.940$)로 OPS가 높게 나타난 반면, BC의 농도가 1.5 μg/m³ 이상인 경우 기울기는 1.10 ($r^2=0.978$)로 OPC가 높게 계산되었다. OPS 및 OPC

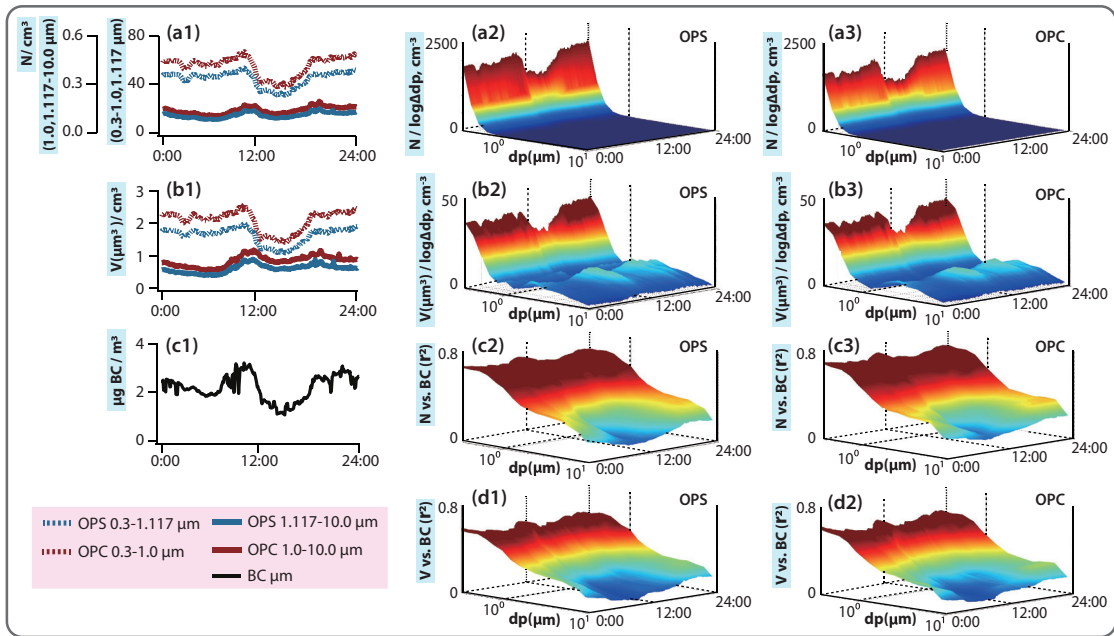


Fig. 4. Diurnal patterns of (a) particle number and (b) volume concentrations, (c) diurnal patterns of correlation coefficient determinations between particle number & BC, and (d) volume and BC concentrations measured by OPS & OPC.

가 흡수계수를 측정하지 않는 것을 감안할 때, BC를 포함한 전체 입자성분에 대해 서로 다른 산란경에 의한 다른 산란 값을 산출했을 가능성이 있다. 일반적으로 기기 보정 시 NaCl 등과 같은 단일 화학성분에 의해 수행된다는 점을 감안할 때, 작은 입경크기(고 수농도)에서 OPS 및 OPC 농도 차이의 원인으로 화학적 조성에 따른 산란각 측정 효율이 다르게 나타날 가능성이 크다고 판단한다.

그림 4는 관측 기간 동안의 OPS 및 OPC로 측정된 수농도 및 부피농도를 입경별 일평균 농도로 나타낸 것이다. 일평균 OPS 및 OPC의 수농도는 입경 0.3~1.117 μm에서 각각 31.08~53.34 #/cm³, 37.81~66.75 #/cm³까지 다양하게 나타났다. 그림 4(a1~3)에서 볼 수 있듯이 강한 일변화농도 변이가 나타남을 알 수 있다. 일평균 수농도는 새벽 5시경 이후 점차적으로 증가하기 시작하여 오전 10시경 최대값을 나타냈다. 입경별 일평균 농도 분포를 살펴보면 0.3 μm에서 일평균 최대값을 나타냈고, 이후 급격히 감소하는 경향이 OPS 및 OPC 모두에서 동일하게 나타났다. 일평균 OPC

0.3~1.0 μm와 1.0~10 μm 부피농도는 각각 1.41~2.57 nL/m³, 0.54~1.17 nL/m³까지 다양하게 나타났다. 일평균 수농도와 동일하게 강한 일변화 부피농도 변이가 나타남을 알 수 있다. 즉, 일평균 부피농도는 새벽 5시경부터 증가하기 시작하여 오전 10시경 입경 0.3~10.0 μm에서 최대값 3.69 nL/m³으로 분석되었다. 분진의 밀도를 1.5~2.5 kg/L로 가정 시, 일평균 최대값은 5.54~9.23 μg/m³으로 계산되었다. 이를 BC 농도와 비교 분석하여 나타내었다. 일평균 BC 농도를 살펴보면 오후 3시경에 최저값인 1.06 μg/m³으로 나타났으며, 오전 10시경 일평균 수농도 및 부피농도와 동일하게 최대 3.21 μg/m³으로 관측되었다. 전체 평균값은 2.19 ± 0.53 μg/m³으로 나타났다.

BC의 입경분포를 분석하여 그림 4(c, d)에 나타냈다. 간략히, (1) BC와 수농도 및 부피농도의 24시간 연속 상관관계 결정계수(24 hr running r²)를 계산하여, (2) 이를 입경별 일평균 상관관계 결정계수(Diurnal patterns of Size distributions in 24 hr Running Correlation coefficient Determination, DSRCD)로 최종 계산하였

다. OPS, OPC 수농도 및 BC의 분석 결과, 입경 0.3 μm 에서 DSRCD 평균 0.64 및 0.66으로 최대값을 나타냈다. 이후 두 측정기기 모두에서 입경별 DSRCD 평균값이 감소하기 시작하여, 10 μm 에서 0.15 및 0.16으로 최소값을 나타냈다. 입경 0.3 μm 에서 상대적으로 높은 상관관계 결정계수가 나타나는 것으로 보아, BC의 입경 분포가 0.3 μm 또는 0.3 μm 이하에서 존재할 가능성이 크다고 판단된다. 좀 더 자세히, 입경 0.3 μm 에서 일 중 시간별 DSRCD를 보면, OPS 및 OPC가 각각 오전 10시 25분에 0.68 및 0.71로 최대값을 나타냈고, 이후 감소하기 시작하여 오후 5시 20분경에 0.60 및 0.62로 최소값을 나타냈다. 이는 차량 이동 시간대와 깊은 상관성이 있을 것으로 사료된다. 또한, 동시간대인 오후 5시 20분경 입경 10.0 μm 에서 전체 최소값을 나타내어, BC와의 상관성이 거의 없음을 알 수 있다. OPS 및 OPC 부피농도 및 BC의 DSRCD 결과를 살펴보면, 입경 0.3 μm 에서 각각 0.53 및 0.55로 최대값을 나타냈고, 10 μm 에서 0.10 및 0.11으로 최소값을 나타냈다. 수농도 DSRCD 결과와 비교해 볼 때, 상관관계 결정계수가 다소 낮게 분석되었지만, 입경별 경향성은 유사하게 나타났다. 일 중 시간별 DSRCD를 보면, OPS 및 OPC가 각각 오전 10시 25분에 0.56 및 0.59로 최대값을 나타냈고, 이후 감소하기 시작하여 오후 5시 20분경에 최소값을 나타냈다. 결과, BC는 0.3 μm 또는 0.3 μm 이하에서 오전 10시 25분경에 수농도 및 부피농도와 상관성이 매우 높음을 알 수 있다. 향후 동시간대의 추가적인 화학적 분석을 통해, 교통과 관련한 측정소 유입에 따른 원인을 좀 더 명확히 밝힐 수 있으리라 판단한다.

4. 결 론

본 연구는 광주과학기술원에서 2014년 12월 27일부터 2015년 1월 9일까지 14일간 OPS 및 OPC를 이용하여 0.3 μm 에서 10.0 μm 사이 분진의 수농도 및 부피농도를 비교 분석하였다. 그 결과, 높은 상관관계 결정계수($r^2=0.99$)와 함께 기울기 1.10으로 OPC의 수농도가 높게 나타났으며, 기울기가 1.08($r^2=0.99$)로 부피농도 역시 OPC가 최종적으로 높게 나타났다. BC 농도에 따른 OPS 및 OPC로 측정된 부피농도의 상관관계를 살

펴볼 때, 화학적 조성에 따른 작은 입경 크기에서 산란 각 측정 효율이 다르게 나타났을 가능성이 있다. 입경별 일평균 상관관계 결정계수를 분석한 결과, BC는 0.3 μm 이하에서 오전 10시 25분경에 수농도 및 부피농도와 상관성이 매우 높은 것을 알 수 있어, 향후 유기물 등의 구체적인 화학적 분석을 통해, 교통 및 이와 관련된 측정소 유입에 따른 여러 원인을 좀 더 명확히 밝힐 수 있으리라 판단한다.

감사의 글

본 논문은 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2013R1A1A2065686)을 받아 수행된 일반 연구사업 연구 결과입니다. 또한, 본 논문은 목포대학교 공학교육혁신센터의 “현실참여 공학교육”의 재정적 지원을 받았습니다.

References

- Agarwal, J.K. and G.J. Sem (1980) Continuous flow, single-particle-counting condensation nucleus counter, *Aerosol Sci. Technol.*, 11(4), 343-357.
- Bae, M.S. and J.S. Oh (2010) Comparison of Nano Particle Size Distributions by Different Measurement Techniques, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 26(2), 219-233.
- Bae, M.S., D.J. Park, S.S. Park, and W.N. Chen (2014) Inter-comparison of Number Concentrations by CPCs using Generated Particles in Chamber, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 30(6), 619-630.
- Belosi, F., G. Santachiara, and F. Prodi (2013) Performance Evaluation of Four Commercial Optical Particle Counters, *Atmos. Clim. Sci.*, 3, 41-46.
- Burkart, J., G. Steiner, G. Reischl, H. Moshhammer, M. Neuberger, and R. Hitzinger (2010) Characterizing the performance of two optical particle counters (Grimm OPC1.108 and OPC1.109) under urban aerosol conditions. *J. Aerosol Sci.*, 41(10), 953-962.
- Cuccia, E., V. Bernardoni, D. Massabo, P. Prati, G. Valli, and R. Vecchi (2010) An alternative way to determine the size distribution of airborne particulate matter, *Atmos. Environ.*, 44(27), 3304-3313.

- Fialho, P., M. Cerqueira, C. Pio, J. Cardoso, T. Nunes, D. Custódio, C. Alves, S.M. Almeida, M. Almeida-Silva, M. Reis, and F. Rocha (2014) The application of a multi-wavelength Aethalometer to estimate iron dust and black carbon concentrations in the marine boundary layer of Cape Verde, *Atmos. Environ.*, 97, 136-143.
- Hansen, A.D.A., H. Rosen, and T. Novakov (1984) The aethalometer - an instrument for the real-time measurement of optical absorption by aerosol particles, *Sci. Total Environ.*, 36, 191-196.
- Hering, S.V. and M.R. Stolzenburg (2005) A Method for Particle Size Amplification by Water Condensation in a Laminar, Thermally Diffusive Flow, *Aerosol Sci. Technol.*, 39(5), 428-436.
- Jung, C.H., Y. Chun, and B.C. Choi (2003) Characteristics of Aerosol Size Distribution from OPC Measurement in Seoul, 2001, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 19(5), 515-528.
- Jung, J.H. and S.S. Park (2010) Characteristics of Black Carbon in PM_{2.5} Observed in Gwangju for Year 2008 and Examination of Filter Loading Effect, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 26(4), 392-402.
- Kang, E., W.H. Brune, S.W. Kim, S.C. Yoon, M.H. Jung, and M. Lee (2011) A Preliminary PAM Measurement of Ambient Air at Gosan, Jeju to Study the Secondary Aerosol Forming Potential, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 27(5), 534-544.
- Lee, J., B. Jeong, D.J. Park, and M.S. Bae (2015) 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.
- Li, Y.J., B.Y.L. Lee, J.Z. Yu, N.L. Ng, and C.K. Chan (2013) Evaluating the degree of oxygenation of organic aerosol during foggy and hazy days in Hong Kong using high-resolution time-of-flight aerosol mass spectrometry (HR-ToF-AMS), *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 8739-8753.
- Ruths, M., C. Bismarck-Osten, and S. Weber (2014) Measuring and modelling the local-scale spatio-temporal variation of urban particle number size distributions and black carbon, *Atmos. Environ.*, 96, 37-49.
- Shen, S., P. Jaques, Y. Zhu, M. Geller, and C. Sioutas (2002) Evaluation of the SMPS-APS system as a continuous monitor for measuring PM_{2.5}, PM₁₀ and coarse (PM_{2.5-10}) concentrations, *Atmos. Environ.*, 36(2), 3939-3950.
- Shi, J.P., R. Harrison, and D. Evans (2001) Comparison of ambient particle surface area measurement by epiphaniometer and SMPS/APS, *Atmos. Environ.*, 35(35), 6193-6200.
- Watson, J., J. Chow, D. Lowenthal, and K. Magliano (2008) Estimating aerosol light scattering at the Fresno Supersite, *Atmos. Environ.*, 42(6), 1186-1196.