



기술자료

열-광학 투과법을 이용한 준 실시간과 필터방법 사이의 탄소성분 농도 비교

A Comparison of Carbonaceous Components between Semi-continuous and Filter-based Measurements Using Thermal-optical Transmittance Method

유근혜, 박승식*, 정선아¹⁾, 조미라¹⁾, 임용재¹⁾, 이상일²⁾

전남대학교 환경에너지공학과, ¹⁾국립환경과학원 기후대기연구부 대기환경연구과,

²⁾한국표준과학연구원 가스분석센터

Geun-Hye Yu, Seung-Shik Park*, Sun A Jung¹⁾, Mi Ra Jo¹⁾, Yong Jae Lim¹⁾, Sang Il Lee²⁾

Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University

¹⁾Air Quality Research Division, Climate and Air Quality Research Department,

National Institute of Environmental Research

²⁾Center for Gas Analysis, Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS)

접수일 2019년 2월 18일

수정일 2019년 3월 27일

채택일 2019년 4월 5일

Received 18 February 2019

Revised 27 March 2019

Accepted 5 April 2019

*Corresponding author

Tel : +82-(0)62-530-1863

E-mail : park8162@chonnam.ac.kr

Abstract Carbonaceous aerosols contribute a significant fraction to $PM_{2.5}$ and play important roles in the radiative forcing of the Earth and in global climate change, accordingly requiring their accurate measurements. Highly time-resolved measurements of carbonaceous components in $PM_{2.5}$ have been made to better understand their emission characteristics and dynamics of secondary organic aerosol (SOA) formation. However, an accuracy of carbonaceous aerosol data from the high time-resolution measurements should be evaluated to provide accurate estimation of their emission sources, SOA dynamics, and the global climate forcing. In this study, hourly concentrations of organic and elemental carbon (OC and EC) in $PM_{2.5}$ were measured at the air pollution intensive monitoring station in Gwangju for two intensive observation periods (IOPs) (January 15~February 10 and March 11~April 08, 2018) using a semi-continuous carbon analyzer based on the NIOSH method 5040. Additionally, 24-hr filter samples during the two IOPs were collected and analyzed for OC and EC determination to evaluate the accuracy of the hourly OC and EC measurements. Diurnal averages of OC and EC were characterized by pronounced peaks in the morning and evening rush hours, indicating common sources of two carbon components. A comparison between semi-continuous and filter-based carbon measurements indicates that semi-continuous OC concentrations were approximately 27% lower than 24-hr integrated OC concentrations. While semi-continuous EC was approximately 1.0~1.2 times higher than 24-hr integrated EC. Lower concentrations of OC in the semi-continuous measurements were attributed to higher face velocity of air passing through the filters (111.1 vs. 20.1 cm/s), the different NIOSH temperature programs and residence times, or to OC-EC split time. The discrepancy for the EC data was likely attributed to the high detection limit of EC in the semi-continuous carbon analyzer, difference in the temperature programs, and the OC-EC split time. In conclusion, it is suggested that OC and EC from semi-continuous carbon analyzer need corrections to examine accurately the mass balance closure of $PM_{2.5}$ and to estimate the relative contribution of carbonaceous particles to the $PM_{2.5}$.

Key words: Carbonaceous aerosols, Semi-continuous carbon analyzer, Filter-based measurement, Thermal-optical transmittance method, Air face velocity

1. 서 론

대기 에어로졸 입자는 크게 탄소성분, 이온성분, 금속성분, 수분 등으로 이루어진 복잡한 혼합물로서 대기 오염 문제, 가시거리의 악화, 기후 변화 및 인간의 건강에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Ma *et al.*, 2018; Tan *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2018; Park *et al.*, 2006). 탄소성분은 다시 유기탄소(organic carbon, OC)와 원소탄소(elemental carbon, EC)로 분류할 수 있으며 (Seinfeld and Pandis, 2006; Park *et al.*, 2005a; Bae *et al.*, 2004), 직·간접적으로 태양의 복사 에너지를 흡수 또는 산란시킴으로써 지구의 기후에 영향을 미치는 물질들이다 (Seinfeld and Pandis, 2006). 공기 역학적 직경이 $2.5\ \mu\text{m}$ 보다 작은 입자상 물질인 $\text{PM}_{2.5}$ 의 화학적 조성은 1차 입자상 오염 물질들의 배출량, 기체상 전구물질들의 대기 농도, 2차 입자 생성, 기상 인자 등의 다양한 변수들에 의해 크게 영향을 받는다 (Yu *et al.*, 2019, 2018a, b, c; Park *et al.*, 2013a, b, 2005b). 이와 같은 변수들은 1시간 이내의 짧은 주기로 급격하게 변하므로 $\text{PM}_{2.5}$ 의 배출 오염원 특성, 동적 거동 특성, 대기 변환 과정 등을 깊이 있게 이해하기 위해서는 시간 분해도가 짧은 $\text{PM}_{2.5}$ 와 이들의 화학적 조성에 대한 자료가 필요하다 (Park *et al.*, 2013a, b, 2006, 2005a, b; Solomon and Sioutas, 2008; Weber *et al.*, 2003). 이런 이유로 인해 국내·외에서 $\text{PM}_{2.5}$ 의 주요 화학적 성분들에 대한 준 실시간 또는 실시간 측정이 활발하게 진행되고 있다 (Yu *et al.*, 2018a, b, c, d; Park *et al.*, 2006, 2005a, b). 그러나 준 실시간 측정기를 이용해 관측한 $\text{PM}_{2.5}$ 화학적 성분들의 조성 자료의 정확도가 충분하지 않은 것으로 보고되고 있다 (Park *et al.*, 2013a, 2005a, b; Bae *et al.*, 2004). 예를 들어, 미국 세인트루이스-중서부 대기오염집중측정소에서 수행한 결과에 의하면 준 실시간 탄소 측정기로 측정된 24시간 평균 OC와 EC 농도는 24시간 평균 필터 측정법(탄소 디누더 설치)에 의한 농도들보다 약 7%와 5% 낮게 평가되었다 (Bae *et al.*, 2004). 반면에 미국 볼티

모어 대기오염집중측정소에서 수행한 결과에서는 OC 농도는 준 실시간 방법이 필터 측정법(탄소 디누더 미 설치)보다 약 28% 높게 측정이 되었으나, EC 농도는 반대로 준 실시간 방법이 13% 낮게 조사되었다 (Park *et al.*, 2005a). 또한 광주 지역에서 Park *et al.* (2013a)이 수행한 연구에서는 준 실시간 측정 OC와 EC의 24시간 평균 농도는 필터 측정법(탄소 디누더 미 설치)을 이용해 측정한 이들의 농도보다 각각 약 27% 낮게 평가되었다. 이와 같은 탄소 입자 성분의 측정 결과는 측정 지점, 측정 방법, 분석 방법, 탄소 디누더 설치 여부 등에 따라 상당한 차이가 있으며, 동일한 장소에서 동일한 측정 장비로 수행한 비교 실험에서도 상이한 결과가 도출되는 것으로 보고되고 있다 (Bae *et al.*, 2004; Schauer *et al.*, 2003). 준 실시간 측정 장비를 통해 생산되는 화학적 성분들의 농도는 대기 오염물질들의 배출원 관리, 2차 오염물질들의 생성 기작을 이해하고 이들의 전구물질들의 관리를 효과적으로 수행하는데 매우 중요하므로 신뢰할 수 있는 준 실시간 측정 자료의 확보가 필요하다.

환경부 산하 국립환경과학원은 $\text{PM}_{2.5}$ 의 고농도 오염 현상, 2차 생성 과정, 장거리 수송의 영향 등을 조사하기 위하여 권역별로 대기오염집중측정소를 설치하여 운영 중에 있다 (Yu *et al.*, 2018a, b; NIER, 2016). 각 대기오염집중측정소에서는 $\text{PM}_{2.5}$ 와 화학적 성분들(탄소성분, 이온성분 및 원소성분)의 농도와 입자의 입경 분포를 5~60분 간격으로 측정하기 위하여 다양한 측정 장비들(베타게이지, 탄소성분 분석기, 이온성분 분석기, 온라인 금속성분 분석기, 조사이동입자 측정기 등)이 가동 중에 있다. 본 논문에서는 호남권 대기오염집중측정소에서 2018년 1월과 3월의 두 번의 집중 측정 기간 동안 준 실시간 탄소 측정기의 OC와 EC의 측정 정확도를 평가하였다. 준 실시간 탄소 측정기의 정확도 평가 결과는 $\text{PM}_{2.5}$ 의 주요 구성 물질인 OC와 EC의 1차 배출원 및 2차 생성 과정에 대한 이해도를 향상시켜 탄소 에어로졸 입자의 저감 대책 수립에 활용이 가능할 것이다.

2. 실험 방법

2.1 PM_{2.5}의 탄소성분 준 실시간 측정 및

시료 채취

PM_{2.5}의 주요 화학적 성분인 OC와 EC의 1시간 단위의 농도 측정은 광주광역시에 위치한 호남권 대기오염집중측정소(35.226°N, 126.849°E)에서 두 번의 집중 측정 기간(2018년 1월 15일~2월 10일, 3월 11일~4월 8일)을 통해 이루어졌다. 호남권 대기오염집중측정소와 주변 지역의 지리적 특성에 대한 설명은 국립환경과학원에서 발간하는 대기오염집중측정소 연간 운영보고서(NIER, 2016)와 연구 논문(Yu *et al.*, 2018b)에 상세히 기술되어 있다. 1시간 평균 OC와 EC의 농도는 NIOSH method 5040의 열-광학 투과도법(thermal-optical transmittance, TOT)을 이용한 준 실시간 탄소성분 분석기(4F-semi-continuous carbon field analyzer, Sunset Laboratory Inc., USA)를 사용하여 측정하였다. 준 실시간 탄소성분 분석기는 PM_{2.5} 사이클론을 통해 유입된 공기 시료를 장비 내부에 장착된 석영 섬유 여과지에 45분 동안 채취한다. 시료 채취 후 장비 내부에 남아있는 공기를 헬륨을 이용하여 완전히 배출시킨 후 채취 시료를 열-광학 투과도법을 이용하여 분석한다. 장비에서는 채취된 시료를 헬륨과 헬륨-산소 분위기에서 가열하면서 발생하는 탄소 물질을 산화 촉매(MnO₂)를 이용하여 CO₂로 전환시킨 후 NDIR 검출기로 정량화한다. 헬륨 분위기 조건에서 OC 분석을 위한 온도 프로그램은 다음 4단계(① 310°C, 70초, ② 480°C, 60초, ③ 615°C, 60초, ④ 840°C, 90초)로 이루어져 있다. 헬륨-산소 분위기 조건에서 EC 분석을 위한 온도 프로그램은 2단계(① 550°C, 35초, ② 850°C, 105초)로 구성되어 있다. HEPA 필터를 이용해 조사한 공시료(dynamic field blank)의 OC와 EC의 평균 농도는 1월에는 0.48±0.10과 0.00±0.01 µgC/m³이었으며, 3월에는 0.74±0.20과 0.00±0.01 µgC/m³이었다. 공시료의 평균 농도는 OC와 EC의 실제 농도를 계산하는데 보정하였다. 또한 수크로스(sucrose) 표준 용액(2.105~8.420 µgC/µL)에 대

한 탄소 측정기의 응답성을 매월 조사하여 탄소 보정 상수에 반영하였다. 준 실시간 탄소성분 분석기에 대한 자세한 설명은 국립환경과학원에서 발간하는 대기오염집중측정소 연간 운영보고서(NIER, 2016)에 나타나 있다.

준 실시간 탄소성분의 측정 외에도 동일한 장소와 동일한 기간에 24시간 간격의 PM_{2.5} 시료를 채취하였다. PM_{2.5}의 시료 채취는 PM_{2.5} 사이클론 샘플러(URG-2000-30EH)를 이용하여 익일 10:00에서 다음 날 09:50까지 이루어졌다. 시료 채취를 위하여 550°C에서 약 10시간 동안 전 처리한 47 mm 직경의 석영 여과지(Pallflex Tissuquartz 2500 QAO, Whatman)를 사용하였다. 시료 채취 중 석영 여과지에 기체상 유기 화합물의 흡수에 의한 측정 오차(positive artifact)를 최소화하기 위하여 PM_{2.5} 사이클론과 필터 팩 사이에 약 25 cm 길이의 탄소 함침 디누더(activated charcoal impregnated absorbent surfaces strip, Sunset Laboratory)를 설치하였다. 석영 여과지에 채취된 시료는 OC, EC, 수용성 유기성분, 그리고 이온성분(Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻)을 분석하는 데 사용하였다. 논문에서는 OC와 EC 분석 결과에 대해서만 논의하였다. 석영 여과지에 채취된 시료들로부터 OC와 EC 성분의 정량 분석은 NIOSH 프로토콜인 TOT 5040 방법(NIOSH, 1996)에 의하여 수행하였다. 헬륨 분위기 모드에서 OC 분석을 위한 온도 프로그램은 ① 310°C, 90초, ② 475°C, 70초, ③ 615°C, 70초, 그리고 ④ 870°C, 110초의 4단계로 구성되어 있으며, 열 분해된 OC(pyrolyzed OC)는 석영 여과지를 통한 펄스 He-Ne 다이오드 레이저 빔의 투과도를 모니터링하여 보정하였다. 헬륨-산소 모드에서 EC 분석을 위한 온도 프로그램은 6 단계(① 550°C, 45초, ② 625°C, 45초, ③ 700°C, 45초, ④ 775°C, 45초, ⑤ 850°C, 45초 및 ⑥ 870°C, 45초)로 구성되어 있다. OC와 EC의 분석은 총 여과지에서 1.5~3.0 cm²을, 나머지는 수용성 유기와 무기 이온성분들을 분석하는 데 사용하였다. OC 및 EC 농도의 분석 결과에 대한 바탕 시료의 배경 농도를 보정하기 위하여 현장 바탕 시료를 준비

하여 $PM_{2.5}$ 채취 시료의 분석 방법과 동일하게 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 준 실시간 측정 OC와 EC의 농도 변화

그림 1은 2018년 1월 15일~2월 10일(1월 집중 측정 기간, (a))과 3월 11일~4월 8일(3월 집중 측정 기간, (b))에 측정한 1시간 평균 OC와 EC 농도의 시간 변화를 보여준다. 탄소성분에 대한 시간별 농도 변화는 이들의 배출 오염 특성, 동적인 거동 특성 및 2차 생성에 대한 정보를 이해하는 데 도움이 된다. 예를 들어, 탄소성분의 배출 오염 특성의 경우에, 아침과 저녁 시간에 관측된 OC와 EC의 뚜렷한 농도 증가는 측정 지점 주변의 자동차 운행에 의한 영향으로 설명이 가능하다. 게다가, EC 농도와 비교해 OC 농도의 급격한 증가는 화석 연료의 연소뿐만 아니라 바이오

매스의 연소 연기에 의한 영향도 존재했음을 암시한다. 또한 짧은 시간 동안에 발생한 $PM_{2.5}$ 의 급격한 농도 증가에 대한 원인을 밝히는 데도 탄소성분의 시간별 농도 변화에 대한 정보가 중요하게 활용된다(Yu *et al.*, 2018c).

그림 2는 1월과 3월의 집중 측정 기간 중 OC와 EC 농도의 시간 변동 추이(diurnal cycle)를 보여준다. EC 입자의 경우, 1월과 3월에 뚜렷한 시간별 변동 특성, 즉, 아침시간에 최고 농도를 보인 후 시간이 지남에 따라 서서히 감소하다가 저녁시간에 다시 증가하는 일별 특성이 관측되었다. 아침과 저녁 출·퇴근 시간에 관측된 EC의 증가는 차량 운행의 증가와 안정한 대기 조건들에 기인하며, 낮 시간에 나타난 감소 현상은 차량 운행의 감소와 더불어 대기 확산의 향상에 기인한다. OC 입자의 경우에도 1월과 3월의 측정 기간 중 EC 입자의 시간별 농도 추이와 매우 유사하였다. 이것은 측정 지점에서 두 종류의 탄소성분은 유사한 오염 특성을 가졌음을 의미한다.

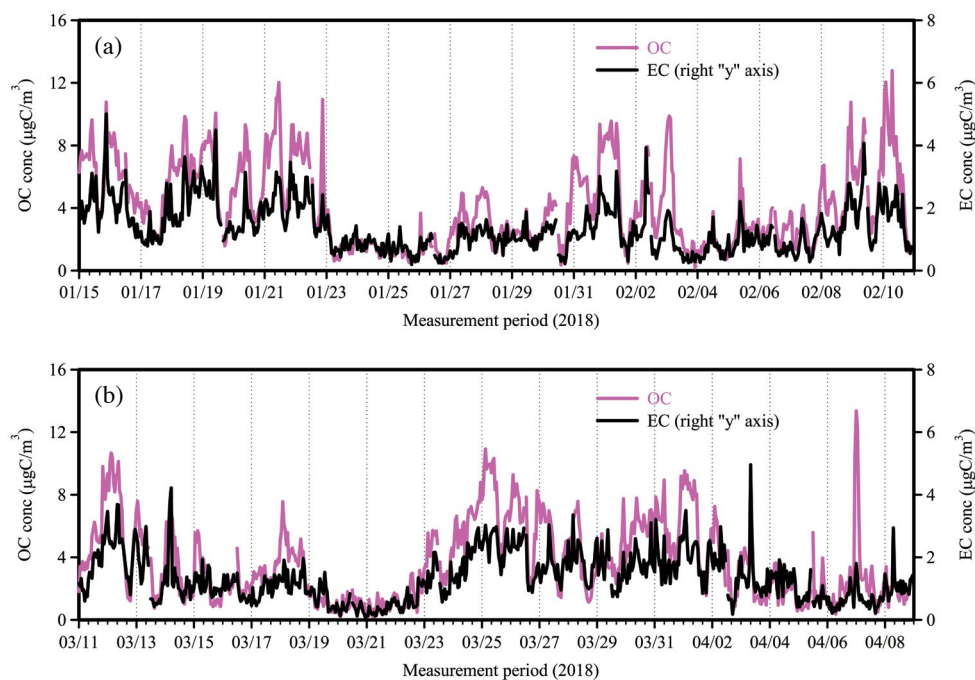


Fig. 1. Temporal variation of OC and EC concentrations during January and March intensive observation periods (IOPs).

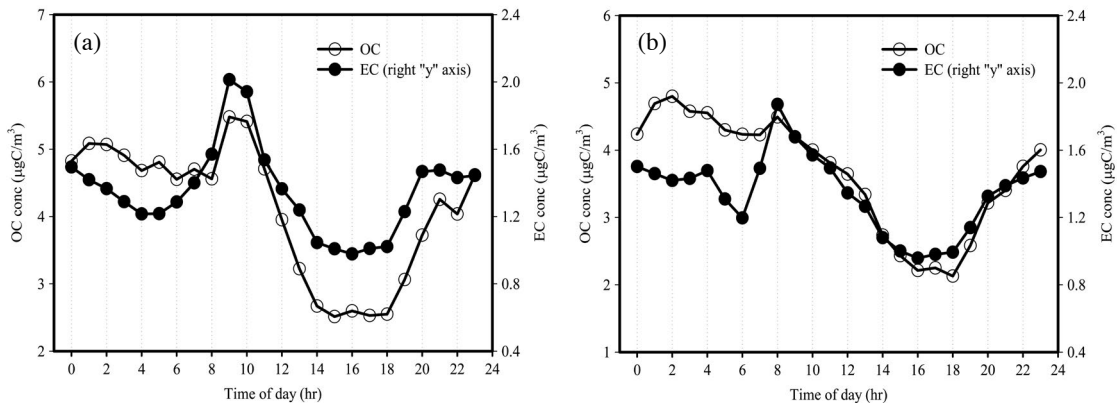


Fig. 2. Diurnal profiles of OC and EC concentrations during January and March IOPs.

3.2 측정 방법의 차이에 의한 OC와 EC 농도의 비교

탄소성분 농도에 대한 필터 측정법과 준 실시간 측정법 사이의 비교 결과에 의하면 두 방법 사이의 탄소성분의 농도 차이는 측정 지점, 측정 방법, 분석 방법 등에 따라 상당히 달랐다(Park *et al.*, 2013a, 2005a; Polidori *et al.*, 2006; Sullivan and Weber, 2006; Bae *et al.*, 2004; Schauer *et al.*, 2003). 그림 3과 4는 각각 2018년 1월과 3월에 측정된 필터 방식과 Sunset Lab의 준 실시간 방식의 OC와 EC 농도의 24시간 평균 자료를 비교한 것이다. Sunset Lab의 준 실시간 탄소 측정기의 OC와 EC 값들은 1시간의 측정 간격으로 필터 채취 방법과의 비교를 위하여 24시간 평균치를 계산하여 사용하였다. OC와 EC 농도의 두 방법 사이의 상관성(R^2)은 매우 높게 조사되었다. 그러나 OC와 EC 농도의 절대값은 두 방법 사이에 큰 차이가 있었다. 1월과 3월의 집중 측정 기간 중 OC 농도는 준 실시간 측정법이 필터 측정법보다 약 27% 낮게 평가된 반면에, EC 농도는 준 실시간 측정법이 필터 측정법보다 약 1.0~1.2배 높게 평가되었다. 이번 연구 결과는 동일한 측정 장소에서 Park *et al.* (2013a)이 수행한 결과와 상이하였다. 이들의 연구에서는 준 실시간 측정 OC와 EC의 농도는 탄소 함침 디누더가 설치되지 않은 필터 측정법의 농도들보다 각각 약 27% 낮게 평가되었다. 이와 같은 두 연구결과의 차이는 탄소 함침

디누더의 설치 여부에 기인한다.

결과적으로 본 측정에서 확인된 준 실시간 측정 OC 농도의 저평가(약 27%)는 화학적 조성 자료를 이용해 산정되는 $PM_{2.5}$ 농도의 저평가가 예상되므로 $PM_{2.5}$ 에 대한 탄소성분의 배출원, 대기 생성 과정, 저감방안 등의 정확한 평가를 위해서는 준 실시간 측정 OC와 EC 농도의 적절한 보정이 이루어져야 한다.

준 실시간 측정법과 필터법에서 얻어진 OC 농도의 차이를 야기하는 원인으로는 다음 사항들을 고려할 수 있다; 탄소 함침 디누더 설치 여부, 여과지를 통과하는 공기의 표면 유속(face velocity)의 차이, OC-EC 분기시간(split time) 차이, 온도 프로그램과 체류시간의 차이, 탄소성분 검출방법(NDIR/ CO_2 와 FID/ CH_4 방법) 등에 의해 기인된다. 만약 필터 상류부에 탄소 함침 디누더가 설치되지 않은 경우에는 시료 채취 중 석영 여과지에 상당한 양의 반-휘발성 유기화합물(semi-volatile organic compounds, SVOC)이 흡착될 가능성이 있기 때문에 OC 농도가 실제보다 높게 평가될 수 있다. 그러나 본 연구에서는 준 실시간 측정기와 필터 채취 방법에서 시료 채취 과정 중 발생할 수 있는 SVOC의 흡착에 의한 측정 오차를 최소화하기 위해 새 탄소 함침 디누더가 사용되었기 때문에 첫 번째 원인에 의한 측정 오차는 미미했을 것이다. 그러나 두 측정 방법에서 사용된 장비(Sunset Lab 준 실시간 탄소 측정기와 $PM_{2.5}$ 샘플러)의 경우, 석영 여

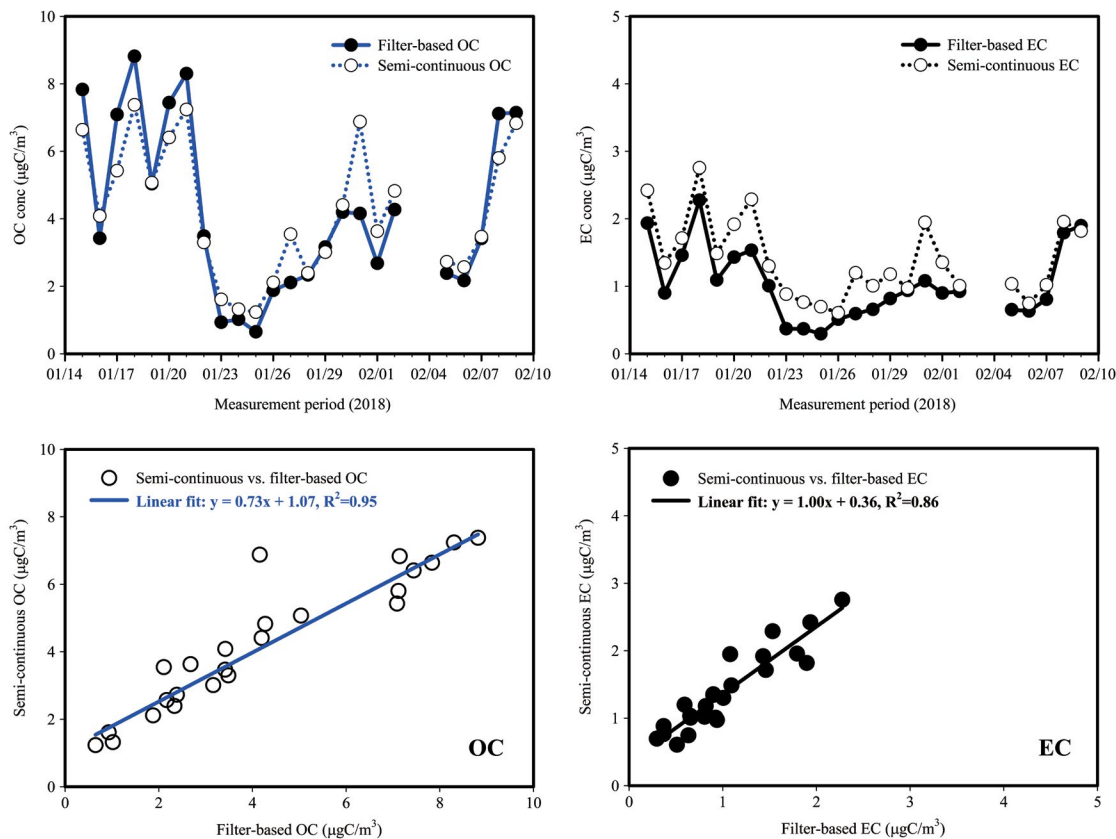


Fig. 3. Comparison of filter-based and semi-continuous OC and EC concentrations for January IOP.

과지를 통과하는 공기의 표면 유속이 상당한 달랐다. PM_{2.5} 샘플러에서 사용된 필터의 실제 공기통과 면적은 13.85 cm² (실제 시료채취 직경: 42 mm, 공기 유량: 16.7 L/min = 278.3 cm³/s, 표면 유속: 20.1 cm/s)이다. 반면, 준 실시간 탄소 측정기의 경우는 ~1.2 cm²의 시료채취면적으로 8 L/min (= 133.3 cm³/s)의 공기가 통과하므로 PM_{2.5} 샘플러의 석영 필터에 비하여 약 5.5 배의 표면 유속을 유지함으로써 여과지에서 입자의 “blow-off”에 의한 OC 입자의 손실 가능성이 있다. 그 결과 준 실시간 측정 OC 농도의 저평가가 발생하였을 것으로 추정한다. 게다가 두 방법의 측정 시간의 차이에 의한 유기물의 흡착 정도의 차이와 NDIR(준 실시간 방법)과 FID(필터법) 방법에 의한 탄소성분의 검출 방법의 차이가 준 실시간 측정 OC 농도의 저평

가를 야기한 원인으로 판단된다.

준 실시간 측정 EC 농도의 고평가는 분석을 위한 EC 온도 프로그램, OC-EC 분기시간과 탄소성분의 검출 방법의 차이에 의해 기인한 것으로 판단된다. 두 측정 방법에 의한 EC 농도의 측정 오차는 대기 중 EC 농도가 낮기 때문에 OC와 EC의 분기시간이 상당한 영향을 주었을 것이다. 따라서 앞에서 언급한 준 실시간 측정 OC 농도의 저평가는 EC 농도의 고평가를 야기한 한 원인이었을 것이다. 뿐만 아니라, 빛을 흡수하는 OC 물질로 알려진 갈색탄소 입자의 존재는 OC와 EC 입자의 분할을 복잡하게 하여 두 측정방법에 의한 EC의 농도의 불일치를 증가시켰을 것으로 판단한다 (Cheng *et al.*, 2011; Reisinger *et al.*, 2008).

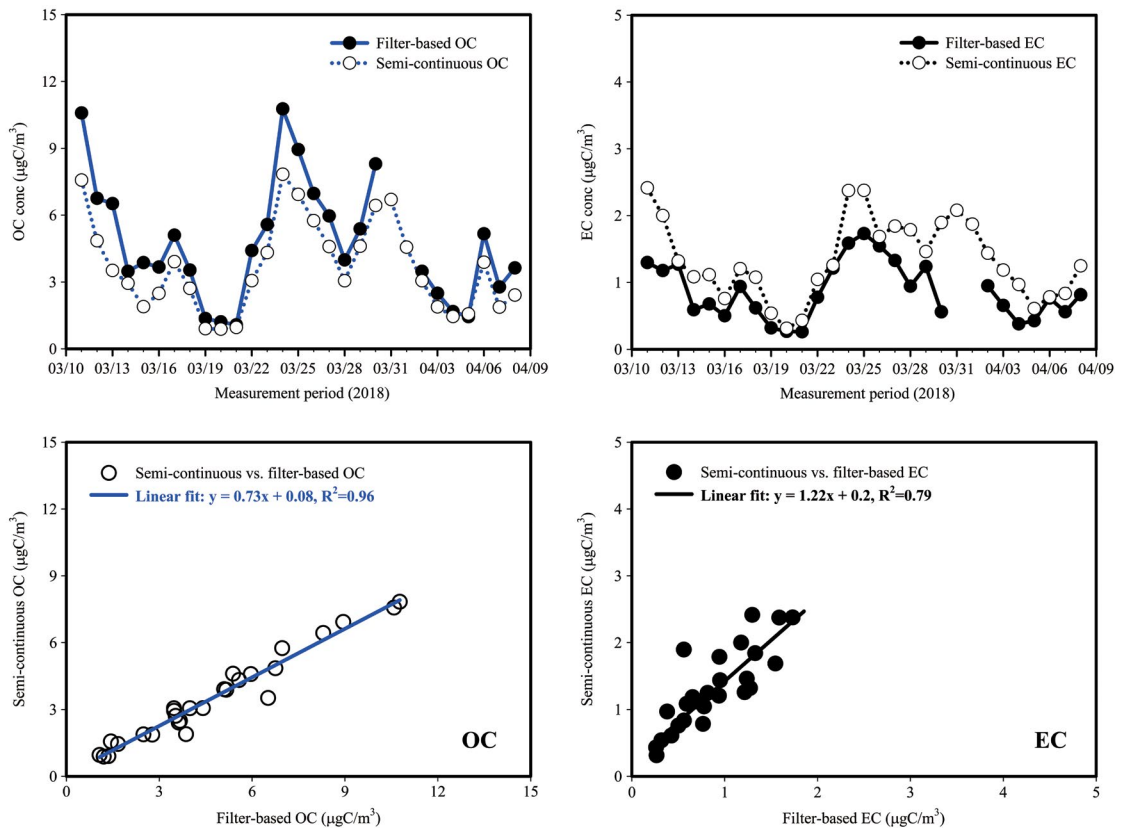


Fig. 4. Comparison of filter-based and semi-continuous OC and EC concentrations for March IOP.

4. 요약 및 결론

국립환경과학원 호남권 대기오염집중측정소에서 가동 중인 $PM_{2.5}$ 준 실시간 탄소측정기의 신뢰성을 조사하기 위하여 24시간 기준 필터 측정법의 탄소성분 분석결과와 비교하였다. 준 실시간 탄소측정기와 필터 분석법에 의한 탄소성분의 정량화는 열-광학 투과법에 기초를 두고 있으며 시료 채취 시 발생할 수 있는 SVOC 성분에 의한 OC의 과대평가를 최소화하기 위하여 여과지의 상류 쪽에 탄소 함침 디너더를 사용하였다.

두 번의 집중 측정 기간 중 얻어진 준 실시간 측정 자료에 의하면 OC와 EC 입자의 농도는 시간 변화에 따라 비슷한 거동 특성을 보여주었다. 즉, 아침 시간

에 최고 농도를 보인 후 시간이 지남에 따라 서서히 감소하다가 저녁 시간에 다시 증가하는 일별 특성이 관측되었다. 이것은 아침과 저녁 출·퇴근 시간에 증가된 차량 운행에 의한 탄소입자 배출량의 증가와 밀접한 관련이 있으며, 또한 안정한 기상 조건이 탄소 입자의 농도 증가에 기인하였던 한 원인이었을 것이다.

탄소성분에 대한 두 측정방법 사이의 비교에서 OC 농도는 준 실시간 측정법이 필터 측정법보다 약 1.3배 낮게 평가된 반면에, EC 농도는 준 실시간 측정법이 필터 측정법보다 약 1.0~1.2배 높게 평가되었다. 준 실시간 탄소측정기의 OC의 저평가는 필터를 통과하는 공기의 표면 유속이 필터법에 의한 유속보다 약 5.5배 높아서 필터로부터 OC 입자의 손실

(blow-off), 입자 채취시간의 차이에 의한 유기물의 흡착 정도의 차이, 탄소성분의 검출방법의 차이 등에 기인한 것으로 추정한다. 그리고 탄소성분 분석에 적용한 TOT 온도 프로그램의 차이 역시 탄소성분 농도의 측정 오차의 한 원인으로 작용하였을 것이다. 따라서 준 실시간 측정기로부터 생산한 OC 농도 자료는 PM_{2.5}에 대한 탄소성분의 배출원, 대기 생성 과정, 저감방안 등의 정확한 평가를 위해서는 준 실시간 OC와 EC 농도의 적절한 보정이 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다(NRF-2017R1D1A3A03000511). 논문에서 사용된 준 실시간 탄소성분 관측 자료는 국립환경과학원 호남권 대기오염집중측정소로부터 제공을 받아 수행하였습니다(NIER-2019-03-01-003).

References

- Bae, M.S., Schauer, J.J., DeMinter, J.T., Turner, J.R. (2004) Hourly and daily patterns of particle-phase organic and elemental carbon concentrations in the urban atmosphere, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 54(7), 823-833, DOI: 10.1080/10473289.2004.10470957.
- Cheng, Y., Zheng, M., He, K.B., Chen, Y., Yan, B., Russell, A.G., Shi, W., Jiao, Z., Sheng, G., Fu, J., Edgerton, E.S. (2011) Comparison of two thermal-optical methods for the determination of organic carbon and elemental carbon: Results from the southeastern United States, *Atmospheric Environment*, 45(11), 1913-1918, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2011.01.036.
- Ma, J., Chu, B., Liu, J., Liu, Y., Zhang, H., He, H. (2018) NO_x promotion of SO₂ conversion to sulfate: An important mechanism for the occurrence of heavy haze during winter in Beijing, *Environmental Pollution*, 233, 662-669, DOI: 10.1016/j.envpol.2017.10.103
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2016) 2015 annual report of intensive air quality monitoring station, NIER-GP2016-160.
- National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH) (1996) Method 5040 Issue 1: Elemental Carbon (Diesel Exhaust), NIOSH Manual of Analytical Methods, 4th ed., Cincinnati, OH.
- Park, S.S., Harrison, D., Pancras, P., Ondov, J. (2005a) Time resolved elemental and organic carbon measurements at the Baltimore Supersite in 2002, *Journal of Geophysical Research*, 110, D07S06, DOI: 10.1029/2004JD004610.
- Park, S.S., Ondov, J.M., Harrison, D., Nair, N.P. (2005b) Seasonal and shorter-term variations in particulate atmospheric nitrate in Baltimore, *Atmospheric Environment*, 39(11), 2011-2020, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2004.12.032.
- Park, S.S., Kleissl, J., Harrison, D., Kumar, V., Nair, N.P., Adam, M., Ondov, J., Parlange, M. (2006) Characteristics of PM_{2.5} episodes revealed by semi-continuous measurements at the Baltimore Supersite at Ponca St., *Aerosol Science and Technology*, 40(10), 845-860, DOI: 10.1080/02786820600796608.
- Park, S.S., Jung, S.A., Gong, B.J., Cho, S.Y., Lee, S.J. (2013a) Characteristics of PM_{2.5} haze episodes revealed by highly time-resolved measurements at an air pollution monitoring Supersite in Korea, *Aerosol and Air Quality Research*, 13, 957-976, DOI: 10.4209/aaqr.2012.07.0184.
- Park, S.-S., Kim, S.-J., Gong, B.-J., Cho, S.-Y., Kim, J.-C., Lee, S.J. (2013b) Investigation on a haze episode of fine particulate matter using semi-continuous chemical composition data, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(5), 642-655. (in Korean with English abstract), DOI: 10.5572/KOSAE.2013.29.5.642.
- Polidori, A., Turpin, B.J., Lim, H.-J., Cabada, J.C., Subramanian, R., Pandis, S.N., Robinson, A.L. (2006) Local and regional secondary organic aerosol: Insights from a year of semi-continuous carbon measurements at Pittsburgh, *Aerosol Science and Technology*, 40(10), 861-872, DOI: 10.1080/02786820600754649.
- Reisinger, P., Wonaschütz, A., Hitzemberger, R., Petzold, A., Bauer, H., Jankowski, N., Puxbaum, H., Chi, X., Maenhaut, W. (2008) Intercomparison of measurement techniques for black or elemental carbon under urban background conditions in wintertime: influence of biomass combustion, *Environmental Science and Technology*, 42(3), 884-889, DOI: 10.1021/es0715041.
- Schauer, J.J., Mader, B.T., DeMinter, J.T., Heidemann, G., Bae, M.S., Seinfeld, J.H., Flagan, R.C., Cary, R.A., Smith, D.,

- Huebert, B.J., Bertram, T., Howell, S., Kline, J.T., Quinn, P., Bates, T., Turpin, B., Lim, H.J., Yu, J.Z., Yang, H., Keywood, M.D. (2003) ACE-Asia intercomparison of a thermal-optical method for the determination of particle-phase organic and elemental carbon, *Environmental Science and Technology*, 37(5), 993-1001, DOI: 10.1021/es020622f.
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2006) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc.
- Solomon, P.A., Sioutas, C. (2008) Continuous and semicontinuous monitoring techniques for particulate matter mass and chemical components: A synthesis of findings from EPA's particulate matter supersites program and related studies, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 58(2), 164-195, DOI: 10.3155/1047-3289.58.2.164.
- Sullivan, A.P., Weber, R.J. (2006) Chemical characterization of the ambient organic aerosol soluble in water: 1. Isolation of hydrophilic and hydrophobic fractions with a XAD-8 resin, *Journal of Geophysical Research*, 111, D05314, DOI: 10.1029/2005JD006485.
- Tan, T., Hu, M., Li, M., Guo, Q., Wu, Y., Fang, X., Gu, F., Wang, Y., Wu, Z. (2018) New insight into PM_{2.5} pollution patterns in Beijing based on one-year measurement of chemical compositions, *Science of the Total Environment*, 621, 734-743, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.208.
- Weber, R., Bergin, M., Kiang, C.S., Chameides, W., Orsini, D., St, J.J., Chang, M., Bergin, M., Carrico, C., Lee, Y.N., Dasgupta, P., Slanina, J., Turpin, B., Edgerton, E., Hering, S., Allen, G., Solomon, P. (2003) Short-term temporal variation in PM_{2.5} mass and chemical composition during the Atlanta supersite experiment, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 53(1), 84-91.
- Yu, G.-H., Park, S.S., Park, J.S., Park, S.M., Song, I.H., Oh, J., Shin, H.J., Lee, M.D., Lim, H.B., Kim, H.W., Choi, J.Y. (2018a) Pollution characteristics of PM_{2.5} observed during winter and summer in Baengryeongdo and Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(1), 38-55. (in Korean with English abstract), DOI: 10.5572/KOSAE.2018.34.1.038.
- Yu, G.-H., Park, S.S., Ghim, Y.S., Shin, H.J., Lim, C.S., Ban, S.J., Yu, J.A., Kang, H.J., Seo, Y.K., Kang, K.S., Jo, M.R., Jung, S.A., Lee, M.H., Hwang, T.K., Kang, B.C., Kim, H.S. (2018b) Difference in chemical composition of PM_{2.5} and investigation of its causing factors between 2013 and 2015 in air pollution intensive monitoring stations, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(1), 16-37. (in Korean with English abstract), DOI: 10.5572/KOSAE.2018.34.1.016.
- Yu, G.-H., Park, S.S., Jung, S.A., Jo, M.R., Lim, Y.J., Shin, H.J., Lee, S.B., Ghim, Y.S. (2018c) Investigation on characteristics of high PM_{2.5} pollution occurred during October 2015 in Gwangju, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(4), 567-587. (in Korean with English abstract), DOI: 10.5572/KOSAE.2018.34.4.567.
- Yu, G.-H., Yu, J., Park, S. (2018d) Estimation of light absorption by brown carbon particles using multi-wavelength dual-spot aethalometer, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(2), 207-222. (in Korean with English abstract), DOI: 10.5572/KOSAE.2018.34.2.207.
- Yu, G.-H., Lee, B.-J., Park, S.S., Jung, S.A., Jo, M.R., Lim, Y.J., Kim, S. (2019) A case study of severe PM_{2.5} event in the Gwangju urban area during February 2014, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(2), 195-213. (in Korean with English abstract), DOI: 10.5572/KOSAE.2019.35.2.195.
- Zhang, R., Sun, X., Shi, A., Huang, Y., Yan, J., Nie, T., Yan, X., Li, X. (2018) Secondary inorganic aerosols formation during haze episodes at an urban site in Beijing, China, *Atmospheric Environment*, 177, 275-282, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2017.12.031.

Authors Information

유근혜 (전남대학교 환경에너지공학과 박사과정)
 박승식 (전남대학교 환경에너지공학과 교수)
 정선아 & 조미라 (국립환경과학원 호남권대기오염집중측정소 전문위원)
 임용재 (국립환경과학원 호남권대기오염집중측정소 소장 (환경 연구사))
 이상일 (한국표준과학연구원 가스분석센터 책임연구원)