

Research Paper

## 서울의 블랙카본 특성 연구

박종성\* · 송인호\* · 김현웅\* · 임형배\* · 박승명\* · 신선아\* · 신혜정\* · 이상보\* · 김정호\*\*

국립환경과학원 대기환경연구과\*, (주)에이피엠엔지니어링\*\*

### The Characteristics of Black Carbon of Seoul

Jongsung Park\* · Inho Song\* · Hyunwoong Kim\* · Hyungbae Lim\* ·  
Seungmyung Park\* · Suna Shin\* · Hyejoung Shin\* · Sangbo Lee\* · Jeongho Kim\*\*

Climate & Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research\*  
Research Center, APM Engineering Co. Ltd.\*\*

**요약:** 2018년 가을철(9월 5일~10일, 6일간) 수도권대기오염집중측정소에서 미세먼지와 함께 블랙카본(BC, black carbon)의 농도 및 코팅두께를 파악하였다. 가을철 PM<sub>10</sub>은  $23 \pm 12.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , PM<sub>2.5</sub>는  $12 \pm 5.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 다른 계절보다 낮은 수준이었다. Aethalometer로 측정한 BC는  $0.73 \pm 0.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , SOCEC로 측정한 EC(elemental carbon)는  $0.34 \pm 0.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , SP2로 측정한 rBC(refractory-BC)는  $0.32 \pm 0.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 측정방법에 따른 농도차이를 보여주었으나, 시계열 분포와 일 변동은 동일한 경향을 나타내었다. 수도권대기오염집중측정소에서 측정된 블랙카본은 자동차와 같은 일차오염원의 영향을 강하게 받았고, 주간과 야간의 출퇴근으로 인한 교통 혼잡 시간대에 높은 특징을 보였다. SP2로 측정한 PM<sub>1.0</sub> 단 일입자에 대한 블랙카본의 개수농도는 84 nm에서 최고치로 관측되었으며, 코팅두께는 43 nm로 산정되었다. 특히 블랙카본 입자의 직경이 작을수록 코팅두께는 증가하였고, 입자의 직경이 증가할수록 코팅두께는 작아지는 특성을 나타내었다.

**주요어:** PM<sub>2.5</sub>, 블랙카본, 코팅두께, SP2

First Author: Jongsung Park, Climate&Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research, seoul 03367, Korea, Tel: +82-2-3157-0370, E-mail: psofc@korea.kr, ORCID: 0000-0003-2341-3708

Corresponding Author: Jeongho Kim, Research Center, APM Engineering Co. Ltd. incheon 14449, Korea, Tel: +82-32-219-7700, E-mail: jeongho.kim@apm.co.kr, ORCID: 0000-0002-5027-0899

Co-Authors: Inho Song, Climate & Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research, seoul 03367, Korea, E-mail: onepeace00@korea.kr, ORCID: 0000-0003-3626-369X

Hyunwoong Kim, Climate & Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research, seoul 03367, Korea, E-mail: khw1659@korea.kr, ORCID: 0000-0001-9431-3718

Hyungbae Lim, Climate & Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research, seoul 03367, Korea, E-mail: lhb2435@korea.kr, ORCID: 0000-0002-9101-6950

Seungmyung Park, Climate & Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research, seoul 03367, Korea, E-mail: psm5555@korea.kr, ORCID: 0000-0003-3597-4465

Suna Shin, Climate & Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research, seoul 03367, Korea, E-mail: sunashin5@korea.kr, ORCID: 0000-0002-8305-4658

Hyejoung Shin, Climate & Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research, seoul 03367, Korea, E-mail: shjoung@korea.kr, ORCID: 0000-0002-5610-4103

Sangbo Lee, Climate & Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research, seoul 03367, Korea, E-mail: lhi1113@korea.kr, ORCID: 0000-0002-1682-4747

Received: 26 November, 2018. Revised: 31 January, 2019. Accepted: 6 February, 2019.

**Abstract:** The concentration and coating thickness of black carbon (BC) were measured along with fine dust in the fall of 2018, at the Seoul Metropolitan Area Intensive Monitoring Station (SIMS). In fall, the concentration of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> was  $23 \pm 12.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  and  $12 \pm 5.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectively, lower than that in other seasons. The BC level, measured using an Aethalometer, was  $0.73 \pm 0.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , while the levels of elemental carbon (EC) and refractory-BC (rBC), measured by semi-continuous carbon analyzer (SOCEC) and single particle soot photometer (SP2), were  $0.34 \pm 0.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$  and  $0.32 \pm 0.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectively. As such, the concentration level differed according to the measurement method, but its time-series distribution and diurnal variation showed the same trends.

The BC concentration at SIMS was primarily affected by automobiles with higher levels of BC during morning and evening commuting times due to increased traffic congestion. rBC, measured by SP2, had a peak concentration and coating thickness of 84 nm and 43 nm, respectively. Notably, the coating thickness had an inverse relationship with particle size.

**Keywords:** PM<sub>2.5</sub>, Black carbon, Coating thickness, SP2 (Single Particle Soot Photometer)

## I. 서론

내연기관 및 소각 등의 연소과정을 통해 배출되는 블랙카본(BC, Black Carbon) 및 검댕입자(Soot particle)는 빛을 산란시키기도 하지만 주로 흡수하여 보유하는 특성을 가지고 있어 지구기후복사에너지 균형에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Bond et al, 2013). 이와 같은 BC는 550 nm 파장에서 질량흡수단면(MACS, mass absorption cross section)이  $5 \text{ m}^2/\text{g}$ 으로 가시광선을 강하게 흡수하고(Bond & Bergstrom 2006), 고온에서도 매우 안정한 내화성(refractory) 특성을 보여 약 4,000 K에서 휘발된다(Schwarz et al, 2006). 또한 메탄올과 아세톤을 포함하는 유기 용매 및 물과 대기 중 에어로졸의 여러 성분에 불용성인 특징이 있다(Fung 1990). BC는 대기 중에서 화학적 반응이 매우 낮아 주요한 제거 기전은 습식 또는 건식 강하를 통해 이루어진다.

국제배출량 인벤토리를 살펴보면 산업부문과 경제활동을 통한 연소원에서 배출되는 BC는 코크스 제조(31%), 주거 및 난방 목재연료(18%), 석탄산업(14%), 디젤차량-도로(13%), 농업부문 소각(8%), 디젤차량-비도로(5%), 주거 및 난방 석탄연료(4%) 및 기타(5%)로서 산업부문을 제외하면 디젤차량에서 배출되는 비율이 상당히 높은 수준이다(Bond et al, 2004). 또한 전지구적 범위의 오염원을 고려한

경우에는 아프리카(1,690 Gg/yr) 다음으로 동아시아(1,550 Gg/yr)지역의 배출량이 높으며, 각각 아프리카는 오픈버닝(open burning)과 같은 초지 연소비율이 높은 반면에 동아시아는 산업부문의 석탄에서 배출되는 비율이 높은 특징이다(Bond et al, 2013).

도시지역에서는 BC 및 검댕입자의 오염원으로서 자동차를 주목할 수 있다. 자동차엔진에서 가솔린과 디젤기관 연료원의 주성분은 C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>, C<sub>12</sub>H<sub>26</sub>이며, 이론적인 완전연소 조건에서는 대부분 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O로 분해되지만 연료대비 산소가 부족하거나 연료와 산소의 불안정한 혼합으로 인한 불완전연소 조건에서는 탄화수소화합물이 유기 및 무기탄소와 같은 탄소성화합물로 배출된다. 특히 자동차와 같은 내연기관에서 직접적으로 배출된 탄소입자는 그 크기가 매우 작으며, 디젤자동차 후단에서는 약 50 nm 이하의 탄소입자가 배출되는 것으로 조사되었다. 이와 유사한 나노(nano) 수준의 카본블랙(carbon black) 입자가 증가하면 유전독성(DNA 손상)이 증가한다는 사례가 다수 보고되었다(Lim et al, 2010). 우리나라 서울의 도로변에서 BC를 측정된 연구사례를 통해 BC는 교통량과 비례하는 결과가 보고되었으며(Lee et al, 2007), 또한 다양한 상업시설 중에서도 화식요리에 기반한 상가에서 열원으로 사용하는 연료(가스, 등유 등)와 조리행위는 BC 및 검댕입자 배출량을 증가시킬 수 있다(Bond et al, 2004).

지난 수년간 우리나라의 고농도 미세먼지 사례는 주목할 만큼 증가하고 있으며(Nier 2017), 사회적 문제로 인식되고 있다. 서울시의 경우 미세먼지 예·경보를 통해 고농도 미세먼지에 대한 위험수준이 예측 및 지속되면 「2018년 미세먼지 종합대책」의 일환으로 차량 2부제를 실시하여 대기오염물질의 배출을 억제하는 등의 정책도 추진하고 있다. BC는 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)의 주요한 화학성분 중의 하나로서, 대기 중으로 배출된 BC의 표면에 다양한 화합물(황산염, 질산염 및 유기성분)이 부착하여 초미세먼지의 농도를 증가시키는 요인으로 작용하기 때문에, BC의 농도 및 입경분포를 파악하는 것은 고농도미세먼지 현상에 대한 BC의 기여율을 산정하는데 매우 중요하다(Lim et al. 2010). BC는 대기 에어로졸의 약 10% 이하로 여지를 이용한 직접적인 칭량 방법으로 분석할 수 없으며, 여지에 기반한 광학적 투과법과 열광학적방법 또는 레이저를 이용한 백열측정법과 같은 간접적인 측정방법으로 분석된다(Shiraiwa et al. 2010). 이와 같은 분석방법들 사이에는 에어로졸에 BC와 함께 존재하는 다른 화학적 성분들의 간섭으로 인해 편차가 발생하는데, 다양한 성분이 혼합되어 있는 에어로졸에서 BC가 다른 물질로 잘못 분류되거나, 다른 물질이 BC로 잘못 분류되기 때문에 파악되고 있다(Knox et al. 2009; Kondo et al. 2009). BC 분석방법들은 다른 화학적 성분이 제거된 것과 유사한 조건으로 배출되는 디젤의 순수한 BC 측정에서는 편차가 거의 없으나, BC 입자가 숙성(aging)되거나 생체소각(biomass burning)을 통해 배출되는 경우 다른 유기 및 무기물질의 혼합비율이 높기 때문에 간섭을 일으킬 수 있다(Chow et al. 2004; Hitznerberger et al. 2006).

현재 우리나라 대기오염물질 측정항목에는 BC가 포함되어 있지 않지만, 환경부에서 운영하고 있는 우리나라 권역별 대기오염집중측정소에서 1시간 간격으로 PM<sub>2.5</sub> 중의 유기탄소(OC, Organic Carbon)와 원소탄소(EC, Elemental Carbon) 및 블랙카본(BC, Black carbon)을 준 실시간으로 측정하고 있다(Park et al. 2015a). 이러한 탄소성화합물의 측정을 위해서 대기오염집중측정소에서는 여지에 기반한 열광학

적방법의 SOCEC (Sunset, USA)장비 및 광학적 투과법의 Aethalometer (Magee, USA)장비를 운영하여 한시간 단위의 농도를 제시하고 있으나, 인체의 유해도 평가와 생성기작 및 배출특성 연구에 유용한 입경에 대한 정보는 없는 실정이다.

최근 백령도와 제주도에서 BC 입자농도와 입경분포에 관한 연구가 진행된 바가 있으며, 이 연구에서는 여지에 기반한 간접적인 측정방법 이외에 레이저를 이용한 백열측정법을 적용하여 BC의 농도와 함께 입경분포를 제시하였다(Oh et al. 2014; Oh et al. 2015). 두 지역 모두 섬이라는 지리적 위치와 배경지역의 특성을 나타내기 때문에, 서울과 같은 도심지역에서 측정한 결과와 비교하면 그 차이와 특징을 파악할 수 있을 것이다.

그러므로 본 연구에서는 BC의 농도 및 입경분포를 파악하고자 서울 도심에 위치한 수도권대기오염집중측정소에서 가을철 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)와 BC를 연속 측정하였다. 동시에 광학적투과법, 열광학적방법 그리고 레이저 백열측정법을 통해 측정한 BC의 농도를 비교하여 측정방법간의 차이를 산정하였다. 특히 레이저 백열측정법을 통해 BC의 입경분포를 파악하였고, 입자의 체류시간에 따른 성장특성 및 배출기원에 따른 입자의 특징을 규명하는데 활용되는 BC입자의 코팅두께를 산정하여 제시하였으며, 고농도 미세먼지 사례에서 그 특징을 고찰하였다.

## II. 연구방법

### 1. 측정개요

본 연구는 서울시 은평구 불광동에 위치한 수도권 대기오염집중측정소(SIMS: Seoul metropolitan area intensive monitoring station)에서 SOCEC (Sunset, USA), Aethalometer (Magee, USA), SP2 (DMT, USA)를 이용하여 입자상탄소성분을 측정하였으며, 동시에 베타선흡수법을 이용한 BAM1020 (Meton, USA)을 이용하여 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>를 측정하였다. 측정사이트는 서울 북동부에 위치하며, Figure 1에 정확한 위치를 위성사진으로 나타내었다. SIMS의 지리적 입지(37.6105°N, 126.9336°E)는 동서로

Table 1. Daily weather conditions during the study period at SIMS.

Period (m/d/yyyy)	Temperature (°C)	Relative Humidity (%)	Wind Speed (m/s)	Wind Direction	Precipitation (mm)
9/5/2018 – 9/10/2018	20.6 ± 4.6	50.2 ± 10.6	1.33 ± 0.96	ESE	1.5 mm

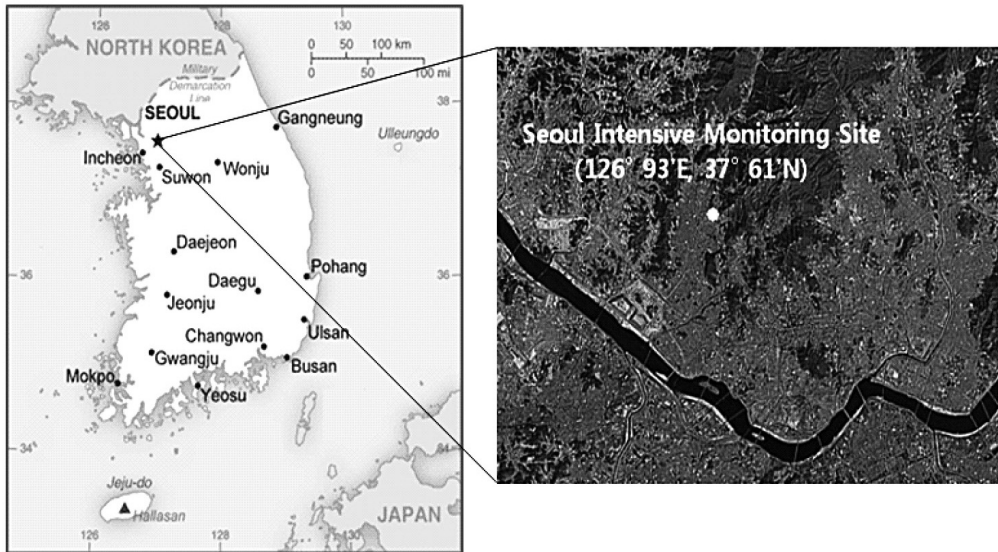


Figure 1. Image of SIMS location map (Google Earth Pro, Ver 7.3.2.5491, Aug. 2018).

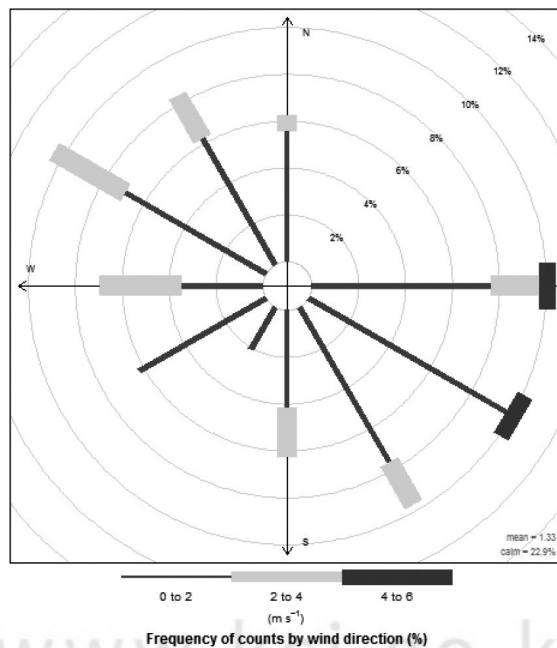


Figure 2. Plot of the Wind rose of study period at SIMS.

확연히 구분되며, 동쪽은 북한산국립공원 그리고 서쪽으로는 도심지가 위치한다. 또한 측정소 반경 100 m에는 구기터널방면에서 남서쪽의 불광역 방면으로 왕복 6차선의 진흥로가 있으며, 북서쪽 연신내 방면에서 남동쪽 흥은사거리 방면으로 왕복 6차선의 통일로가 관통하고 있다.

측정기간의 기상조건을 Table 1에 정리하여 나타냈다. 측정기간의 평균온도는  $20.6 \pm 4.6$  °C, 상대습도는  $50.2 \pm 10.6$  %인 가을 날씨를 보였다. Figure 2에는 측정소를 중심으로 바람장미를 나타내었으며, 풍속은 평균  $1.33 \pm 0.96$  m/s이었고, 풍향은 동남방면과 서북방면으로 기류가 유입되는 것으로 나타났다.

## 2. 측정 및 분석방법

### 1) 미세먼지 및 탄소성분 측정 및 분석기

Table 2에 각각의 측정장비에 대한 원리와 측정주기 및 사양을 정리하여 나타내었다. PM<sub>2.5</sub> 질량농도는 베타선흡수법을 이용하여 1시간 간격으로 측정하였고, SOCEC를 이용하여 PM<sub>2.5</sub> 중의 EC (elemental carbon)를 측정하였다. 그리고 Aethalometer를 이용하여 PM<sub>2.5</sub> 중의 BC를 측정하였다. 이 세 가지 방법은 모두 여지에 기반한 측정방법으로 각각 1시간 (PM<sub>2.5</sub>, SOCEC) 및 5분(Aethalometer) 간격의 측정주기를 가지는데 반해, SP2는 여지 없이 직접적으로 시료를 광학챔버로 유입시켜 실시간으로 측정한다. 또한 다른 장비는 모두 PM<sub>2.5</sub>의 벌크에어로졸

에 대한 측정을 실시하지만, SP2는 PM<sub>1.0</sub> 이하의 입자에 대하여 실시간으로 단일입자를 측정하는 차이점이 있다. Aethalometer로 측정된 BC는 BC로 표기하였으며, SP2로 측정된 BC는 선행 연구들에서 정의한 내화성(refractory)의 약자를 붙여 rBC로 나타내었다(Oh et al. 2015; Kondo et al. 2009; Schwaz et al. 2006)

### 2) PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub> 측정방법

1시간 간격으로 대기 중 미세먼지의 농도를 측정할 수 있는 베타선흡수법의 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub> 측정 장비는 장비의 신뢰성과 정확도를 확보하기 위하여 2014년 하반기부터 국가기준측정시스템(National Reference Method system, NRM) 구축에 따라 주기적인 정도 관리가 수행되고 있다(Park et al. 2017). 본 연구에서 사용한 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub> 측정장비의 정도관리는 자동측정장비와 함께 중량법 측정장비 3대 이상을 동시 측정하여 등가성평가를 수행하였으며, 중량법과 비교결과 선행회귀식의 기울기는 0.9~1.1 범위에 있었고, 절편은  $\pm 2.25$  이내로 평가기준을 만족하였다(NIER 2016).

### 3) SOCEC를 이용한 준실시간 유기 및 원소탄소 분석방법

1시간 간격으로 PM<sub>2.5</sub> 중의 유기탄소와 원소탄소 성분을 측정할 수 있는 열광학적투과도법(TOT, Thermal-Optical Transmittance method)의 SOCEC 장비는 대기 중의 미세먼지 시료를 석영여지에 포집

Table 2. Instrumentation of the BC and PM<sub>2.5</sub> Measurement at SIMS.

Instrument (manufacture)	Principle	Particle collection	Items	Sampling flow rate	Measurement interval
BAM1020 (MetOn)	$\beta$ -absorption	bulk aerosol	PM <sub>10</sub> mass	16.67 l/m	1 hr
BAM1020 (MetOn)	$\beta$ -absorption	bulk aerosol	PM <sub>2.5</sub> mass	16.67 l/m	1 hr
SOCEC (Sunset)	Thermal-optic NDIR absorption	bulk aerosol	PM <sub>2.5</sub> EC mass	5 l/m	1 hr
Aethalometer (Magee)	$\beta$ -attenuation	bulk aerosol	PM <sub>2.5</sub> BC mass	5 l/m	5 min
SP2 (DMT)	Laser induced incandescence	single particle	PM <sub>1.0</sub> rBC mass rBC size	120 ml/min	1 second (real-time)

한 후에 NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) 5040 protocol에 따라 온도를 200 °C~950 °C 범위에서 단계적으로 승온하여 탄소 성분을 유기탄소와 원소탄소로 분리하여 분석하는 방법이다(Han et al, 2013, Park et al, 2015a). 본 연구에서는 자당용액(sucrose, sigma-aldrich, 99.999%, USA)을 초순수로 희석하여 1.32 µg/µl 농도의 표준시료를 제조하였고, 10 µl 실린지를 이용하여 분취한 후에 시료채취 필터로 사용하는 석영여지를 준비하여 각각 0회, 1회, 2회, 3회, 4회씩 포말한 후 분석하여 검량선을 작성하였다(Park et al, 2015). 검량선에 대하여 산출된 1차 회귀직선의 기울기는 1.137, 절편은 0.018 그리고 결정계수(r<sup>2</sup>)은 0.9997로 유의한 값을 나타내었다. 장비의 검출한계는 0.4 µg/m<sup>3</sup>, 측정농도 범위는 0~40 µg/m<sup>3</sup>이며(Park et al, 2015), 본 연구에서는 SOCEC 장비로 분석된 성분 중에 원소탄소 성분의 농도를 이용하였다.

#### 4) Aethalometer를 이용한 준실시간 블랙카본 측정방법

5분 간격으로 PM<sub>2.5</sub> 중의 블랙카본을 측정하는 Aethalometer는 석영여지에 포집된 시료 중에 포함된 탄소성분의 흡수계수를 이용하여 블랙카본의 농도를 측정하는 방법이다. Aethalometer를 이용한 BC 측정결과 대기 중 BC입자의 질량흡수단면은 520~550 nm의 가시광선 파장범위에서 8~14 m<sup>2</sup>/g의 값을 가지며(Park et al, 2018), 측정파장에 따라 다양한 값을 나타낸다. 그 이유는 BC 입자의 오염원, 혼합 상태, 산란 코팅 셀 및 광흡수 파장에 따라 광흡수단면 값이 변화하기 때문인 것으로 파악되고 있다(Park et al, 2018). 본 연구에서 적용된 BC 흡수계수는 최초 Hansen 등(1984)이 제시한 β-attenuation 방법으로서 석영여지에 포집된 시료에 레이저를 조사하였을 때 근적외선의 880 nm 파장에서 얻어진 16.6 m<sup>2</sup>/g의 값을 적용하여 분석하였으며, 검출한계는 0.005 µg/m<sup>3</sup>, 측정범위는 0.01~100 µg/m<sup>3</sup>이다(Hansen et al, 1983).

#### 5) SP2를 이용한 실시간 단일입자중의 블랙카본 분석방법

SP2는 앞의 SOCEC와 Aethalometer 장비와는 달리 실시간으로 단일입자에 대한 블랙카본의 농도와 함께 입경분포를 측정할 수 있으며, 지상에서 모니터링용도 뿐만 아니라 항공관측을 통해 대기 상층에 존재하는 입자에 대한 블랙카본과 그 입경분포를 측정하는 곳에 활발하게 활용되고 있다(Baumgardner et al, 2004; Schwarz et al, 2006; Moteki et al, 2007). SP2는 BC 입자에 레이저를 쬐는점 이상의 고온에서 휘발할 때 발생하는 백열(Incandescence) 에너지가 BC 농도와 비례하는 특성을 이용하는 측정방법이다(Eckbreth AC, 1977; Melton LA, 1984; Stephens et al, 2003; Schwartz et al, 2006; Moteki et al, 2007; Oh et al, 2015).

TEM<sup>∞</sup> 모드의 레이저를 Nd:YAG (Neodymium: Yttrium Aluminum Garnet) crystal과 반사율 99.9999%의 coupler 사이에서 증폭하여 레이저 빔의 중심은 2,000 K 수준을 유지하기 때문에, 실시간으로 유입되는 입자가 레이저 빔을 통과할 때 광 에너지를 흡수하여 산란 및 백열 반응이 진행된다. 입자의 성분에 따른 끓는점 차이는 BC와 다른 성분 간의 시그널 시간차를 발생시키고, 이를 이용하여 측정된 입자들 중에서 BC입자를 분류할 수 있다(Oh et al, 2015; Schwartz et al, 2008; Moteki et al, 2007; Schwartz et al, 2006; Stephens et al, 2003). SP2를 이용한 입자의 측정 및 검출범위는 시료채취 유량 120 ml/m 조건에서 1~12,500 개/cc이며, 정밀도(precision)는 20 %, 정확도(accuracy)는 10 % 이내로 교정에 크게 의존하는 것으로 알려져 있다(Gysel et al, 2011; Laborde et al, 2012; USDOE, 2017).

그러므로, 본 연구에서는 정확한 BC 농도 산정을 위하여 Oh 등(2015)의 연구를 참고하여 다음과 같이 교정을 실시하였다. 밀도가 1.05 g/cm<sup>3</sup>인 표준입자(PSL, Poly Latex, Styrene, NIST, USA) 200 nm, 220 nm, 240 nm, 269 nm, 300 nm를 주입하여 입자의 산란신호를 측정하였으며, 해당 입자의 미 산란

(Mie-Scattering) 특성에 따른 산란 단면적과 산란 신호를 이용하여 대기시료의 입자 직경을 산출하기 위한 1차 회귀직선을 다음과 같이 산출하였다.

$$y = 1.55 \times 10^{-15} x, r^2 = 0.99 \text{ (Scatter high gain)}$$

$$y = 13.5 \times 10^{-15} x, r^2 = 0.99 \text{ (Scatter low gain)}$$

BC 입자의 백열강도를 교정하기 위하여 밀도가 1.20 g/cm<sup>3</sup>인 Aquadag (Aquadag, Aqueous Deflocculated Acheson Graphite, USA)을 이용하여 150 nm, 175 nm, 200 nm, 250 nm, 300 nm, 350 nm, 400 nm 입자의 백열강도를 측정하여 BC 질량과의 관계를 2차 회귀직선으로 산출하였으며, 이 값을 적용하여 BC 농도를 산출하였다.

$$y = 1.97 \times 10^{-4} x^2 + 1.20 x + 0.67 \text{ (Incandescence high gain)}$$

$$y = 18.94 \times 10^{-4} x^2 + 1.20 x + 0.71 \text{ (Incandescence low gain)}$$

### 3. rBC 입자의 코팅두께 산정

순수한 rBC는 다른 물질과 결합되어 있거나 다른 물질로 코팅되어 있지 않다. 그러나 rBC는 그 발생원에 따라서 유기 및 무기물질과 혼합될 수 있으며, 대기 중에서 체류시간이 길어질수록 숙성됨에 따라 입경이 커지며 성장할 수 있다. SP2는 고강도 레이저원을 이용하여 실시간으로 PM<sub>1.0</sub>(10 - 600 nm) 이하의 에어로졸 입자에 대한 산란 및 백열흡수 스펙트럼을 측정하여 블랙카본의 농도와 입경분포를 분석한다. 레이저가 조사되는 광학챔버에는 산란 및 백열 검출기가 있으며, 검출기에서 측정되는 단일입자에 대한 산

란광의 세기는 입자의 직경을 그리고 백열광은 rBC 입자의 질량과 비례한다. 이때에 단일 입자의 상태(rBC 입자의 혼합 상태 및 코팅두께)에 따라 측정되는 스펙트럼의 피크에 시간차이(lag time)가 발생하게 된다. 그러므로 단일입자에 대한 산란광의 피크와 백열광의 피크가 출현한 시간차가 클수록 코팅두께는 증가하며, 반대로 시간차가 작을수록 코팅두께는 작고, 순수한 rBC 입자를 나타낸다. 본 연구에서는 각각의 단일입자에 대한 피크의 시간차이를 산정하여 코팅두께를 분석하였다(Shiraiwa et al, 2010).

## III. 측정 및 분석결과

### 1. 미세먼지 농도 분포 현황

측정기간 미세먼지(PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>)에 대한 시계열 분포를 Figure 3에 나타내었으며, 이 측정값을 요약하여 Table 3에 정리하였다. 측정결과 주요 평균값을 살펴보면, PM<sub>10</sub>은 평균 23 ± 12.6 μg/m<sup>3</sup>이었고, PM<sub>2.5</sub>는 12 ± 5.8 μg/m<sup>3</sup>으로, PM<sub>10</sub>(50 μg/m<sup>3</sup>)과 PM<sub>2.5</sub>(25 μg/m<sup>3</sup>)의 연평균 기준치 이내로 나타났다. 최대 농도가 출현한 9월 6일에서 9월 7일 사이에는 PM<sub>10</sub>이 58 μg/m<sup>3</sup>, 그리고 PM<sub>2.5</sub>가 28 μg/m<sup>3</sup>으로, 측정기간 평균보다 2배 이상 높은 것으로 나타났다. 9월 10일 새벽에는 약한 강우(1.5 mm)가 출현하였으며, 강우에 의한 세정효과로 인하여 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 농도가 큰 폭으로 감소하였다.

2010년부터 2015년 까지 수도권대기오염집중측정소에서 관측된 PM<sub>2.5</sub> 농도는 겨울(29.3~47.9

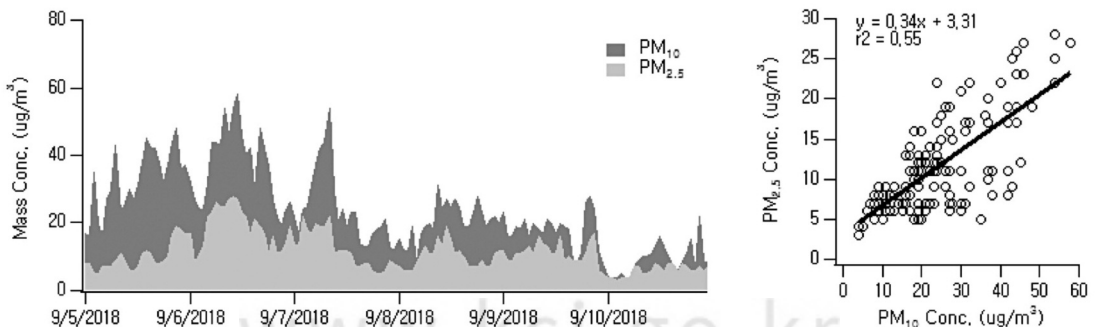


Figure 3. Time variation of PM concentrations (left) and scatter plot (right) at SIMS.

Table 3. Summary on concentrations of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>.

Items	Mean	S.D.	Max.	Min.
PM <sub>10</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	23.0	± 12.6	58.0	4.0
PM <sub>2.5</sub> (μg/m <sup>3</sup> )	12.0	± 5.8	28.0	3.0
Temp. (°C)	20.6	± 4.6	27.1	11.1
RH (%)	50.2	± 10.6	70.3	29.6

μg/m<sup>3</sup>) > 봄(24.5~44.8 μg/m<sup>3</sup>) > 가을(21.9~27.9 μg/m<sup>3</sup>) > 여름(19.2~36.1 μg/m<sup>3</sup>) 순이나, 최근에는 여름철의 PM<sub>2.5</sub>가 가을철보다 높은 경우들이 관측되고 있다(NIER 2016). 본 연구기간에 측정된 가을철 PM<sub>2.5</sub>는 과거 동일한 지점에서 측정된 평균농도보다 비교적 낮은 수준으로 판단되지만, 시계열 그래프를 살펴보면 9월 5일부터 7일에는 다른 기간보다 높은 분포를 나타내고 시시각각 변화하는 특성을 나타내고 있다. Figure 3의 산포도를 보면 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub>의 선형곡선의 기울기는 0.34(r<sup>2</sup>=0.55)를 나타내지만, PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 평균농도 비는 0.52로 차이를 보였다. 이러한 차이는 9월 5일에서 9월 7일 까지는 농도가 높았지만, 9월 10일 강우 이후에는 농도가 큰 폭으로 감소하여 PM<sub>10</sub>의 농도분포(4~58 μg/m<sup>3</sup>)와 PM<sub>2.5</sub>의 농도분포(3~28 μg/m<sup>3</sup>)의 편차가 크기 때문에 사료된다.

풍향 및 풍속을 고려한 측정기간의 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 농도분포를 Figure 4와 같이 오염장미 그래프로 나타내었다. PM<sub>10</sub>은 측정소를 기점으로 동남 방면으로부터 북쪽 방면까지 넓은 영역에서 기류가 유입될 때,

농도가 높게 나타났으나, PM<sub>2.5</sub>는 주로 남쪽 방면에서 기류가 유입될 때 높은 특성을 보였다. 이러한 차이는 조대입자의 오염원이 주로 북서 방면에 있음을 추정케 한다. 측정소를 기점으로 북동쪽으로는 북한산 국립공원이 위치함에 따라 해당 영역에서 기류가 유입되는 경우에는 농도가 낮고, 반대로 자동차와 같은 이동오염원과 상업 및 주거지가 분포한 동-남, 남-서, 북-서 방면에서 기류가 유입되는 경우에는 농도가 증가하는 경향을 보여주고 있다.

이와 같은 미세먼지(PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>)는 대기환경기준 물질로서 이온성분, 탄소성분, 금속성분으로 이루어져 있으며, 특히 PM<sub>2.5</sub>는 대기 중 이차 생성되는 무기 이온성분(NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)과 함께 유기 및 무기 탄소성분이 주요한 물질로 고려된다(NIER 2016). 그러므로 3절에서는 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>와 함께 블랙카본의 일 변동 특성과 PM<sub>2.5</sub>에 대한 기여율을 비교하여 고찰하였다.

## 2. EC, BC 및 rBC 농도 분포 특성

측정기간에 대한 EC, BC, rBC 측정결과를 정리하

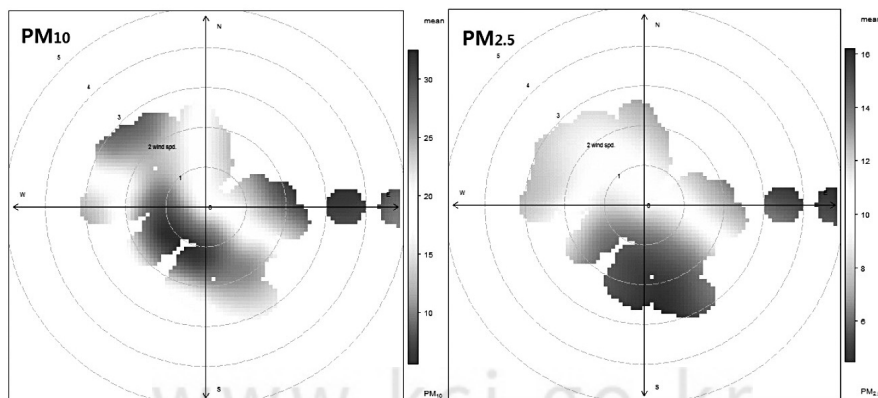
Figure 4. Pollution rose of PM<sub>10</sub> (left) and PM<sub>2.5</sub> (right) at SIMS.



Table 4. Summary on the carbon compounds as EC, BC and rBC

$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Mean	S.D.	Max.	Min.
EC (PM <sub>2.5</sub> )	0.34	$\pm 0.18$	0.98	0.06
BC (PM <sub>2.5</sub> )	0.73	$\pm 0.43$	2.23	0.10
rBC (PM <sub>1.0</sub> )	0.32	$\pm 0.18$	0.95	0.03

여 Table 4에 요약하였다. 측정기간 평균농도는 EC  $0.34 \pm 0.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , BC  $0.73 \pm 0.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , rBC  $0.32 \pm 0.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. Figure 5에 나타난 EC, BC 및 rBC에 대한 시계열 그래프를 보면 EC, BC, rBC가 절대농도 수준의 차이는 있으나, 매우 유사한 분포 경향을 보였다. 측정방법 간의 산포도를 고찰하면 rBC와 EC의 기울기는  $0.8(r^2 = 0.69)$ , rBC와 BC는  $0.37(r^2 = 0.84)$ , EC와 BC는  $0.39(r^2 = 0.87)$ 이었으며, 특히 EC와 rBC는 매우 유사한 농도 수준을 나타내고, BC는 EC와 rBC보다 약 2배 이상 높은 수준으로 파악되었다.

이와 같이 본 연구에서 장비 간에 나타난 농도의 차이는 1)분석 입자의 직경범위와 2) 서로 다른 분석 방법의 두 가지 관점에서 고찰할 수 있다. 먼저 장비 간의 분석입자 직경을 살펴보면, EC와 BC는 PM<sub>2.5</sub>

의 탄소성분을, rBC는 PM<sub>1.0</sub>의 단일입자에 대한 탄소성분을 측정된 값을 나타냄으로서, EC와 BC의 측정결과는 PM<sub>2.5</sub> 중의 탄소성분으로 PM<sub>1.0</sub>의 탄소성분을 측정하는 SP2 보다 농도가 같거나 높아야 한다. 현재 대기오염집중측정소에서는 대기환경기준 항목인 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)에 대한 화학적 성분을 분석하기 위하여 EC와 BC는 장비 전단에는 PM<sub>2.5</sub> 분립기가 설치되어 있으며(NIER 2016), rBC는 장비의 분석원리상 PM<sub>1.0</sub>보다 큰 입자는 분석할 수 없는 차이가 있다(USDOE 2017). 두 번째로 장비 상호간 분석 방법 측면에서 고찰하면, EC는 탄소성분의 열적휘발 후 산화를 통한 NDIR 분석, BC는 채취 시료 표면에 광학레이저를 투과하였을 때의 감쇄효과에 대한 탄소흡수계수를 적용한 분석, 그리고 rBC는 단일입자에 대한 레이저유도를 통한 탄소성분의 에너지 흡수

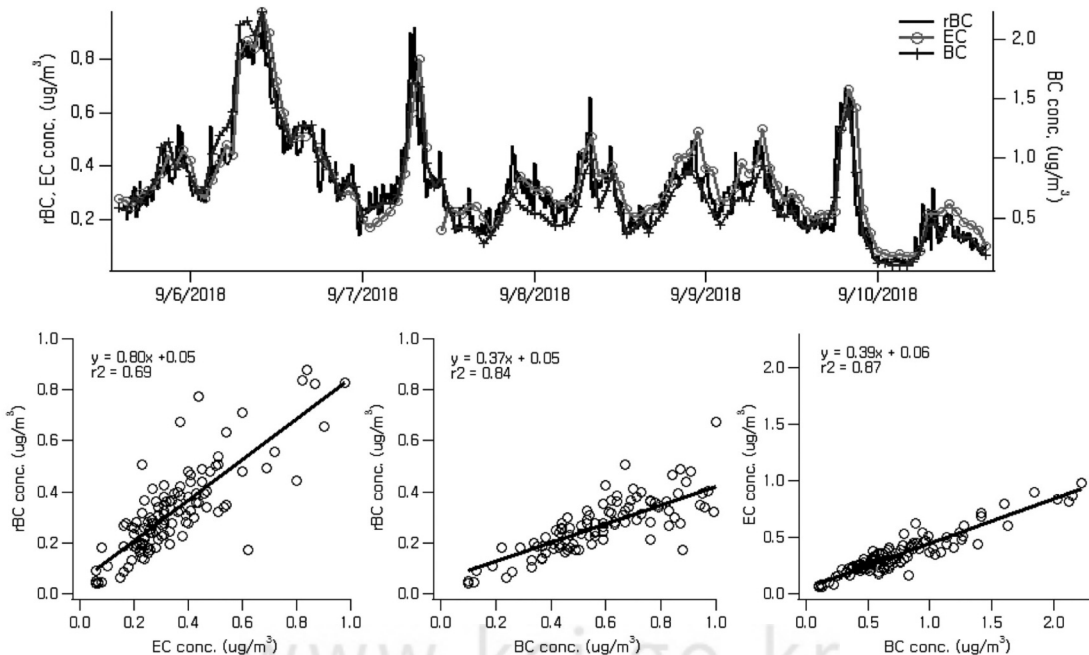


Figure 5. Time variation of carbon compounds (EC, BC and rBC) and its scattered plots at SIMS.

후 방출되는 복사열을 분석하는 방법을 가지므로 측정값에 편차를 가질 수 있다(Bond et al. 2013). EC와 BC는 여지에 에어로졸시료를 채취하는 방식은 같으나, 그 이후에 분석방법이 SOCEC장비의 EC는 포집된 에어로졸 시료를 고온의 단계적 승온 조건에서 유기성분을 휘발시킨 후에 여지에 남아 있는 탄소성분을 분석하기 때문에(Park et al. 2015a), Aethalometer의 BC와 같이 여지에 에어로졸시료를 채취한 후에 직접적으로 레이저(880 nm)를 조사하여 투과시킨 방법보다 측정되는 절대량에 차이가 발생하게 된다. 특히 SP2로 측정된 rBC의 경우 여지를 사용하지 않고 직접적으로 에어로졸 입자를 2,000 K로 증폭된 레이저 중심점으로 유입시키기 때문에 유기성분이 완전히 제거되고 순수한 탄소입자에 대한 성분을 분석할 수 있다. 그러므로 이러한 장비간의 측정 원리와 분석에 대한 고찰을 통해 본 연구에서 나타난 측정방법간의 농도의 편차를 충분히 설명할 수 있다.

2013년 5월 6일부터 5월 16일 까지 10일간 제주도에서 측정된 BC와 rBC의 평균농도는 각각  $0.69 \pm 0.48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $0.76 \pm 0.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로(Oh et al. 2015), BC는 유사한 농도수준이지만 rBC는 제주도가 서울보다 약 2배 가량 높은 특징을 나타내었다. 제주도 측정결과에서 rBC가 높게 나타난 원인은 측정기간 2차례의 고농도 미세먼지 사례의 영향으로, 고농도 기간(2013년 5월 11일~12일)의 역궤적 분석을 통해 중국으로부터 강하게 유입되는 오염물질의 효과인 것으로 제시되었다(Oh et al. 2015). 본 연구의 가을철 측

정결과는 장거리이동과 같은 외부 오염물질의 유입이 없었을 뿐만 아니라, PM<sub>10</sub>과 함께 PM<sub>2.5</sub>도 낮은 수준이었기 때문에 제주도 측정결과보다 낮은 농도를 나타낸 것으로 판단된다. 동일한 지점에서 측정된 사례를 고찰하면, 수도권대기오염집중측정소의 EC 농도(2010년~2015년)는 1.1~2.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  범위로서 겨울이 가장 높고 여름철이 가장 낮은 특성을 보이며(NIER 2016), 2016년도 연평균 EC 농도는 1.23  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 9월 평균은 1.07  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로(NIER 2017), 본 연구에서 측정된 EC의 평균값은 2016년 보다 낮은 수준이나, 측정기간이 6일로서 측정기간이 짧은 한계점을 가진다. 제주도(Oh et al. 2015) 및 수도권(NIER 2016)의 사례와 본 연구결과를 비교 고찰하면, 본 연구기간 중에 측정된 PM<sub>2.5</sub>는 낮은 수준인 동시에 PM<sub>2.5</sub>를 구성하는 탄소성분도 다른 계절보다 낮아, PM<sub>2.5</sub>의 EC와 PM<sub>1.0</sub>의 rBC의 농도가 거의 근소한 차이를 나타낸 것으로 판단되며, 추후 다양한 미세먼지 농도수준에서 측정을 수행하여 장비간의 차이를 정립할 필요가 있다.

풍향 및 풍속을 고려한 측정기간의 BC, EC 및 rBC에 대한 오염장미를 Figure 6에 나타내었다. 그 결과 BC와 EC는 절대농도의 수준 차이는 있지만 거의 같은 분포를 보여 측정방식에 따른 농도 수준차이는 존재하지만 같은 발생원 및 생성기작에서 배출된 성분인 것을 잘 나타내었다. 탄소성분의 오염장미 분포를 Figure 4의 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 오염장미와 비교해보면 PM<sub>10</sub>보다는 PM<sub>2.5</sub>와 유사한 특성을 나타내고 있다. EC, BC, rBC의 오염장미에서 BC의 농도가

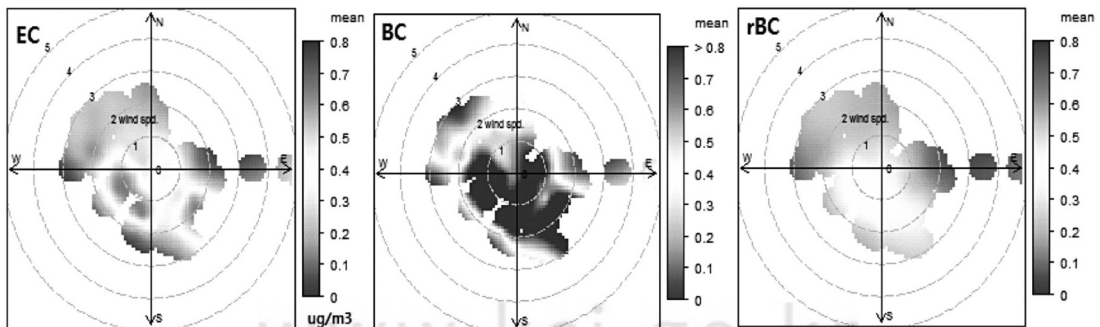


Figure 6. Pollution rose of EC (left), BC (middle) and rBC (right) at SIMS.

EC와 rBC보다 높기 때문에 BC의 오염장미는 EC와 rBC보다 풍향과 풍속에 따른 분포차이가 확연히 나타나고 있으며, 측정소를 중심으로 2 m/s 내의 풍속과 남동에서 남서 방향의 바람이 유입될 때에 농도가 증가한 것으로 나타나, 측정소 기준으로 남쪽 방향과 서쪽 방향에 위치한 진흥로와 통일로의 이동오염원으로부터 영향을 강하게 받은 것으로 판단된다.

### 3. 미세먼지와 EC, BC, rBC의 일 변동 특성

미세먼지(PM<sub>10</sub> 및 PM<sub>2.5</sub>)와 EC, BC, rBC의 일 변동 그래프를 작성하여 Figure 7에 나타내었다. PM<sub>10</sub>은 8~9시 31 µg/m<sup>3</sup>, PM<sub>2.5</sub>는 6~7시 15 µg/m<sup>3</sup> 수준으로 오전 교통 혼잡시간대에 일중 가장 높은 농도를 나타내는 분포를 보였다. Park 등(2015a)의 연구에서와 같이, 수도권측정소에서 관측된 EC 성분은 출퇴근 시간을 기점으로 한 뚜렷한 일 변동 특성을 나타냈다. EC, BC, rBC의 일 변동 그래프는 PM보다 뚜렷한 이산형(bi-modal) 분포를 나타냈고, 오전

6시부터 10시 그리고 오후 19시부터 21시에 피크를 나타내 오전과 오후 교통 혼잡시간대에 농도가 증가하는 것으로 파악된다. 미세먼지와 블랙카본의 일 변동 분포그래프를 통해, PM<sub>10</sub>보다 PM<sub>2.5</sub>와 블랙카본이 비교적 유사한 일 변동 분포를 나타내고 있어, 블랙카본이 주로 조대영역(2.5~10 µm)보다는 미세영역(~2.5 µm)에 분포하고 있음을 알 수 있다. 증가량을 파악하기 위하여 교통 혼잡 시간대와 이외의 시간대를 구분하여, Table 5에 정리하였다. 혼잡시간대와 비 혼잡시간대의 차이(증가율)는 PM<sub>2.5</sub> 3 µg/m<sup>3</sup>(+27%), EC 0.15 µg/m<sup>3</sup>(+52%), BC 0.35 µg/m<sup>3</sup>(+57%), rBC 0.15 µg/m<sup>3</sup>(+56%)로 나타났다. PM<sub>2.5</sub>의 농도수준은 약 27% 증가하였으나, 블랙카본의 탄소성분은 50% 이상 증가한 특징을 보여 자동차와 같은 이동오염원에서 배출된 탄소입자의 기여가 상대적으로 큰 비중을 차지하고 있는 것으로 사료된다(Park et al, 2015a).

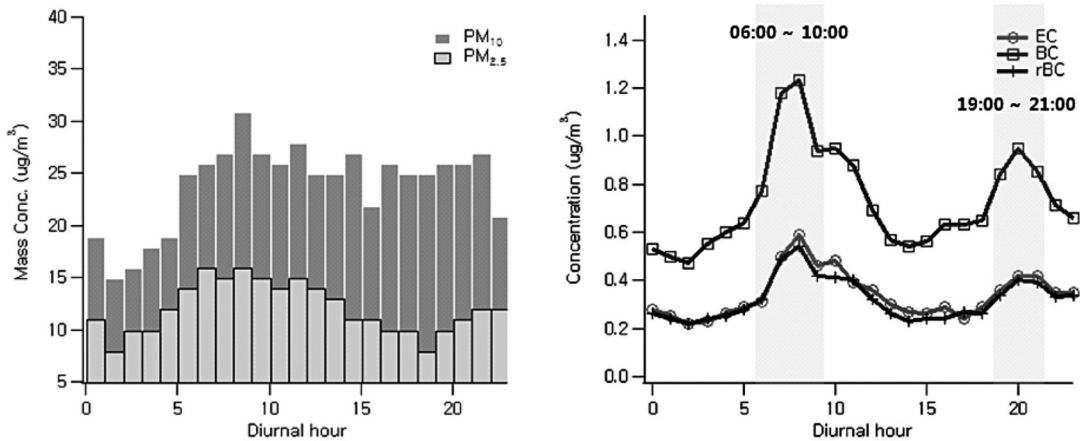


Figure 7. Diurnal variation of PM (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>) (left) and carbon compounds (EC, BC, rBC) (right)

Table 5. Summary on the PM<sub>2.5</sub>, EC, BC and rBC in case of the rush-hour and non rush-hour

Items	rush-hour*		non rush-hour	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.
PM <sub>2.5</sub>	14	± 2.33	11	± 2.02
EC	0.44	± 0.09	0.29	± 0.05
BC	0.96	± 0.16	0.61	± 0.10
rBC	0.42	± 0.06	0.27	± 0.04

\*rush-hour : 06:00 ~10:00; 19:00~21:00

#### 4. rBC의 입경분포 및 코팅두께 특성

블랙카본입자(BC)는 주로 연소를 통해 직접적으로 배출되는 특성을 가지므로, 그 입경분포가 매우 작은 영역에서 나타나며, 대기 중에서 숙성(aging)을 통해 더 큰 입자로 성장함에 따라 미세먼지 농도를 증가시킬 수 있다. SP2를 이용하여 측정된 rBC는 단일입자를 실시간으로 측정할 수 있어 rBC 입자의 입경을 분석할 수 있다. 측정기간 동안의 rBC의 개수농도분포에 대한 스펙트럼을 시계열로 Figure 8에 나타내었다. 시계열을 통해 분포를 살펴보면, 9월 6일 오전에 가장 높은 개수농도 분포를 보이고 있으며, 주간의 교통 혼잡시간(DT\_RH, DayTime\_Rush Hour)와 야간의 교통 혼잡시간(NT\_RH, NightTime\_Rush Hour)에 피크가 반복적으로 나타났다. rBC 개수농

도의 스펙트럼은 주로 40 nm~180 nm에서 고 농도 구간이 분포하는 것으로 파악된다. 블랙카본의 입경에 따른 평균 개수농도분포 및 유효밀도를 적용하여 산정한 평균 질량농도 분포와, rBC가 측정된 시간차를 이용하여 산정한 코팅두께를 각각 Figure 8에 나타내었다. 평균 rBC의 개수농도는 84 nm, 질량농도는 180 nm에서 최대 피크를 가지는 입경 분포를 나타내었다. 배경지역인 제주도에서 측정된 rBC의 개수농도는  $116 \pm 8$  nm, 질량농도는  $196 \pm 17$  nm 범위에서 피크를 가지는 입경분포로서(Oh et al, 2015), 본 연구에서 측정된 rBC의 입경분포는 입경이 작은 영역에서 나타난 것으로 볼 수 있다. 또한 국내외의 연구사례와 비교해 보면, 질량농도로 환산된 rBC의 입경분포는 150~230 nm 범위로서(Shiraiwa et al.

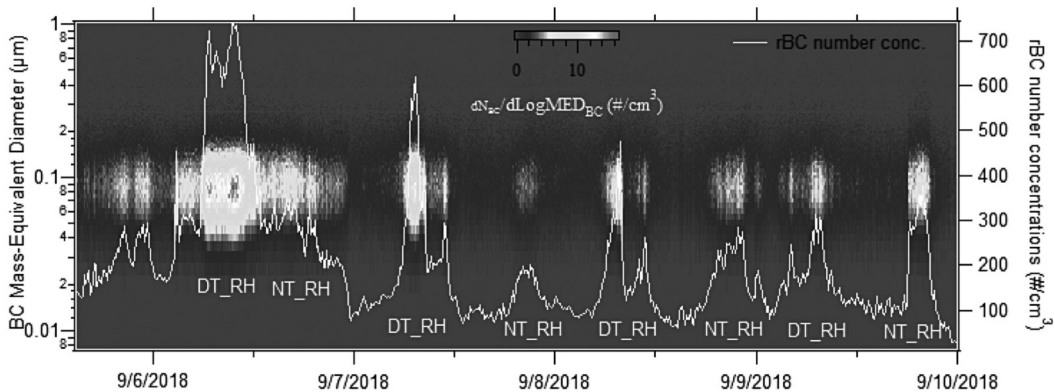


Figure 8. The rBC size distribution spectrum and number concentrations by SP2 at SIMS.

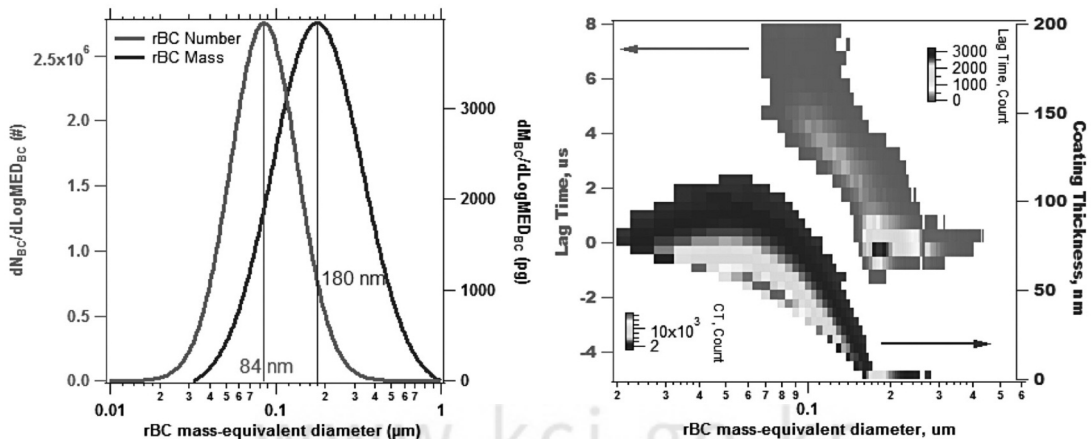


Figure 9. The rBC averaged size distribution (left) and coating thickness (right) at SIMS.

2010; Oh et al, 2014; Oh et al. 2015), 도시지역의 rBC입자가 산불과 같은 생체소각(biomass burning)에서 배출된 rBC보다 입경이 작은 쪽에서 나타나는 특성을 보이며, 이러한 입경분포의 차이는 블랙카본의 발생원의 특성에 좌우되는 것으로 조사되었다(Schwarz et al, 2008). 그러므로 서울에서 측정된 rBC의 주요기원으로 이동오염원의 자동차 내연기관을 고려하면, 이와 같은 발생원 및 지역적인 차이로 인하여 배경지역이면서 동시에 도시지역인 백령도(Oh et al, 2014)와 제주도(Oh et al, 2015)에서 측정된 입경보다 작은 영역에서 나타난 것으로 볼 수 있다.

대기 중으로 배출된 rBC 입자의 코팅두께에 대하여 산정하였다. Figure 9의 오른쪽 그림에서 왼쪽 축은 지연시간(lag time)을 나타내고 오른쪽 축은 코팅두께를 나타낸다. 지연시간은 rBC입자가 검출된 미소시간( $\mu$ s)을 의미한다. 순수한 rBC입자의 경우 지연시간이 0  $\mu$ s를 나타내며, rBC입자가 다른 화학적성분과 결합되어 있는 경우, 또는 코팅되어 있는 경우 순수한 rBC 입자가 검출되는 시간이 증가하게 된다. 즉, 지연시간이 증가할수록 코팅두께가 증가한다. 각각의 그림에서 스펙트럼은 rBC의 개수농도를 의미하며, x축은 rBC의 직경( $\mu$ m)을 표시한다. 수도권대기오염집중측정소에서 가을철 측정기간의 특성은 rBC 입경이 작을수록 지연시간이 길게 나타났고, 반대로 rBC 입경이 클수록 지연시간이 짧아져서 170 nm 부근과 그 이상에는 0  $\mu$ s에 수렴하는 것으로 산정되었다. 이것은 서울에서 측정된 블랙카본은 입경이 작을수록 코팅두께가 크며, 반대로 블랙카본의 입경이 클수록 코팅두께가 작아져, 블랙카본의 입경이 170 nm 이상에서는 코팅효과가 나타나지 않았음을 의미한다. 입경에 따른 코팅두께를 살펴보면, 수도권측정소에서 측정된 rBC 평균입경 84 nm에 대한 코팅두께는 43 nm이었고, 60 nm rBC입자의 코팅두께는 58 nm, 70 nm rBC 입자는 53 nm로 나타났다. 서울의 rBC 코팅 두께는 미국의 휴스턴 및 달라스와 같은 도시지역의  $20 \pm 10$  nm보다는 두껍고, 생체소각 사례의  $65 \pm 12$  nm보다 얇은 수준으로 파악된다(Schwarz et al, 2008). 여기에서 제시한 코

팅두께는 6일의 측정기간에 대한 평균값의 정보만을 제공하기 때문에 제한점이 있으며, 장기간에 걸친 측정을 수행하여 다양한 사례에서 코팅 두께의 변화 특성을 고찰할 필요가 있다.

## VI. 결론

서울지역의 미세먼지는 다양한 원인과 경로를 통해 생성 및 변화하기 때문에 이를 효과적으로 관리하기란 매우 어려운 사항이다(Part et al, 2015b; NIER, 2016). 본 연구에서는 가을철 수도권대기오염집중측정소에서 미세먼지( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ )와 EC, BC 및 rBC 단일입자에 대한 농도를 측정하고 코팅두께를 산정하였으며, 결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

1.  $PM_{10}$ 은 평균  $23 \pm 12.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고,  $PM_{2.5}$ 는  $12 \pm 5.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 연평균기준 및 동일한 지점에서 이전의 측정결과와 비교하였을 때에 비교적 낮은 수준이었으며,  $PM_{10}$ 과  $PM_{2.5}$ 의 농도분포는 기류의 유입 방향에 따라 서로 다른 특성을 나타내었다.
2. 서로 다른 측정방법을 이용한 탄소성분의 시계열 농도는 서로 유사한 분포 경향을 보였고, 농도수준은 각각 EC  $0.34 \pm 0.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , BC  $0.73 \pm 0.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , rBC  $0.32 \pm 0.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 BC > EC > rBC 순으로 나타났다. 열광학적방법(EC), 광학적투과법(BC) 그리고 레이저 백열측정법(rBC)을 통해 측정된 BC의 농도를 비교분석하여 측정방법 간 차이와 특징을 고찰하였다.
3. 미세먼지와 블랙카본의 일변동 분포를 분석한 결과, 교통 혼잡 시간대에 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 교통 혼잡 시간대에는  $PM_{2.5}$ 가 평상시의 30% 수준이 증가하였으며, 블랙카본은 약 50% 이상 증가하여, 자동차와 같은 이동오염원에 의한 영향으로  $PM_{2.5}$ 에 대한 블랙카본의 기여도가 크게 증가하는 것을 시사하였다.
4. 대기 중의 블랙카본입자의 코팅두께를 산정한 결과 rBC 입자의 입경이 작을수록 코팅두께가

증가하는 특성을 보였으며, 입경이 증가함에 따라 PM<sub>2.5</sub>의 농도증가에 영향을 줄 수 있는 요인으로 작용할 수 있다.

5. SP2는 높은 시간해상도를 가지며 입자에 대한 다양한 정보들을 포함하기 때문에 자료량이 방대하여 장기간 측정이 어려운 한계가 있다. 이를 극복하고 자료처리 능력을 배양하여 추후 장기간의 측정자료 및 분석결과가 얻어진다면, 시간에 따른 코팅두께의 변화 양상 및 증가비율, 코팅모양의 물리적인 특성들을 분석하여 입자의 성장 및 생성 기원을 추적할 수 있는 과학적인 근거자료 생산이 가능하리라 판단된다.

## 사 사

본 연구는 국립환경과학원의 지원을 받아 “장거리 이동오염물질 시험방법 및 대기환경가이드라인 마련 연구”의 일환으로 수행되었습니다.

## References

- Baungardner D, Kok G, Raga G. 2004. Warming of the Arctic lower stratosphere by light absorbing particles, *Geophys. Res. Lett.* 31(6).
- Bond TC, Streets DG, Yarber KF, Nelson SM, Woo JH, Klimont Z. 2004. A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion, *J. Geophys. Res.* 109, D14203.
- Bond TC, Bergstrom RW. 2006. Light Absorption by Carbonaceous Particles: An Investigative Review, *Aerosol science and technology.* 40(1): 27-67.
- Bond TC, Doherty SJ, Fahey DW, Forster PM, Berntsen T, Deangelo BJ, Flanner MG, Ghan S, Karcher B, Koch D, Kinne S, Kondo Y, Quinn PK, Sarofim MC, Schultz MG, Schulz M, Venkataraman C, Zhang H, Zhang S, Bellouin N, Guttikunda SK, Hopke PK, Jacobson MZ, Kaiser JW, Klimont Z, Lohmann U, Schwarz JP, Shindell D, Storelmo T, Warren SG, Zender CS. 2013. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment, *J. Geophys. Res. Atmos.* 118, 5380-5552.
- Chow JC, Watson JG, Chen LWA, Arnott WP, Moosmuller H, Fung K. 2004. Equivalence of Elemental Carbon by Thermal/Optical Reflectance and Transmittance with Different Temperature Protocols, *Environ. Sci. Technol.* 38(16): 4414-4422.
- Eckbreth AC. 1977. Effects of laser-modulated particulate incandescence on Raman scattering diagnostics, *Journal of Applied Physics* 48(11): 4473.
- Fung K. 1990. Particulate Carbon Speciation by MnO<sub>2</sub> Oxidation, *Aerosol science and technology.* 12(1): 122-127.
- Gysel M, Laborde M, Olfert JS, Subramanian R, Grohn AJ. 2011. Effective density of Aquadag and fullerene soot black carbon reference materials used for SP2 calibration, *Atmos. Meas. Tech.* 4, 2851-2858.
- Han JH, Bahng BJ, Lee MH, Yoon SC, Kim SW, Chang LS, Kang KS. 2015. Semi-continuous Measurement of PM<sub>2.5</sub> OC and EC at Gosan: Seasonal Variations and Characteristics of High-concentration Episodes, Korea, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.* 29(3): 237-250. [Korean Literature]
- Hansen ADA, Rosen HJ, Novakov T. 1983. The aethalometer -An instrument for the real-time measurement of optical absorption by aerosol particles, *Science of The Total Environment*, 36(JUN): 191-196.

- Hitzenberger R, Petzold A, Bauer H, Ctyroky P, Pournesmaeil P, Laskus L, Puxbaum H. 2006. Intercomparison of Thermal and Optical Measurement Methods for Elemental Carbon and Black Carbon at an Urban Location, *Environ. Sci. Technol.* 40(20): 6377-6383.
- Knox A, Evans GJ, Brook JR, Yao X, Jeong CH, Godri KJ, Sabaliauskas K, Slowik JG. 2009. Mass Absorption Cross-Section of Ambient Black Carbon Aerosol in Relation to Chemical Age, *Aerosol Science and Technology*, 43(6): 522-532.
- Kondo Y, Sahu L, Kuwata M, Miyazaki Y, Takegawa N, Moteki N, Imaru J, Han S, Nakayama T, Kim Oanh NT, Hu M, Kim YJ, Kita K. 2009. Stabilization of the mass absorption cross section of black carbon for filter-based absorption photometry by the use of a heated inlet, *Aerosol Sci. Technol.* 43(8): 741-756.
- Laborde M, Mertes P, Zieger P, Dommen J, Baltensperger U, Gysel M. 2012. Sensitivity of the Single Particle Soot Photometer to different black carbon types, *Atmos. Meas. Tech.* 5. 1031-1043.
- Lee SB, Bae GN, Park SM, Jung SG. 2007. black carbon pollution level at a roadside of seoul in spring, Korea, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.* 23(4): 466-477. [Korean Literature]
- Lim KT, Kim SJ, Kang MG. 2010. A Study on the Effects of Carbon Black to Reactive Oxygen Species and Inflammation Reaction, *Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA.* [Korean Literature]
- Melton LA. 1984. Soot diagnostics based on laser heating, *The Optical Society*, 23(13): 2201-2208.
- Moteki N, Kondo Y, Miyazaki Y, Takegawa N, Komazaki Y, Kurata G, Shirai T, Blake DR, Miyakawa T, Koike M. 2007. Evolution of mixing state of black carbon particles: aircraft measurements over the western Pacific in March 2004, *Geophys. Res. Lett.* 34, L11803.
- National Institute of Environmental Research. 2016. The study on the source contribution of pollutants and the characteristics of regional air parcel movement in the Korean Peninsula. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research. 2017. Supersite operation report in 2016. [Korean Literature]
- Oh J, Park JS, Ahn JY, Choi JS, Lim JH, Kim HJ, Han JS, Hong YD, Lee GW. 2014. Study on the Behavior of the Black Carbon at Baengnyeong Island of Korea Peninsular, Korea, *J. Korean Society of Urban Environment.* 14(2): 67-76. [Korean Literature]
- Oh J, Park JS, Lee SU, Ahn JY, Choi JS, Lee SD, Lee YH, Kim HJ, Hong YD, Kim JH, Hong JH, Kim JH, Kim SW, Lee GW. 2015. Characteristics of Black Carbon Particles in Ambient Air Using a Single Particle Soot Photometer(SP2) in May 2013, Jeju, Korea, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.* 31(3): 255-268. [Korean Literature]
- Park JS, Song IH, Park SM, Shin HJ, Hong YD. 2015a. The Characteristics and Seasonal Variations of OC and EC for PM<sub>2.5</sub> in Seoul Metropolitan Area in 2014, Korea, *J. Environ. Impact Assess.* 24(6): 578-592. [Korean Literature]
- Park JS, Song IH, Park SM, Shin HJ, Hong YD. 2015b. Study on the Characterization of

- High Concentration Event in Seoul Metropolitan Area in Spring of 2014 using Aerosol Mass Spectrometers, Korea, J. Korean Soc. Environ. Analysis. 18(1): 12-25. [Korean Literature]
- Park SM, Park JS, Song IH, Shin HJ, Hong YD, Kim JH. 2015. Characteristics of Oxygenated-VOCs and Oxidation of Organic Component in PM<sub>1.0</sub> at an Urban Site of Seoul during June, 2014, Korea, J. Korean Society of Urban Environment. 15(3): 207-218. [Korean Literature]
- Park SS, Yu GH, Lee SI, Bae MS. 2018. Aethalometer-based Estimate of Mass Absorption Cross Section of Black Carbon Particles at an Urban Site of Gwangju, J. Korean Soc. Atmos. Environ. 34(5): 727-734. [Korean Literature]
- Schwarz JP, Gao RS, Fahey DW, Thomson DS, Watts LA, Wilson JC, Reeves JM, Darbeheshti M, Baumgardner DG, Kok GL, Chung SH, Schulz M, Hendricks J, Lauer A, Karcher B, Slowik JG, Rosenlof KH, Thompson TL, Langford AO, Loewenstein M, Aikin KC. 2006. Single-particle measurements of midlatitude black carbon and light-scattering aerosols from the boundary layer to the lower stratosphere, J. Geophys. Res. 111, D16.
- Schwarz JP, Spackman JR, Fahey DW, Gao RS, Lohmann U, Stier P, Watts LA, Thomson DS, Lack DA, Pfister L, Mahoney MJ, Baumgardner D, Wilson JC, Reeves JM. 2008. Coatings and their enhancement of black carbon light absorption in the tropical atmosphere, J. Geophys. Res. Atmos. 113. D03203.
- Shiraiwa M, Kondo Y, Iwamoto T, Kita K. 2010. Amplification of Light Absorption of Black Carbon by Organic Coating, Aerosol Science and Technology, 44(1): 46-54.
- Stephens M, Turner N, Jon SB. 2003. Particle identification by laser-induced incandescence in a solidstate laser cavity, Appl. Opt. 42(19): 3726-3736.
- U.S. Department of Energ. 2017. Single-Particle Soot Photometer (SP2) Instrument Handbook, DOE/SC-ARM-TR-169.