

Research Paper

서울지역의 PM_{2.5} 중 OC와 EC의 특성 및 계절적 변화에 관한 연구

박종성 · 송인호 · 박승명 · 신혜정 · 홍유덕

국립환경과학원 대기환경연구과

The Characteristics and Seasonal Variations of OC and EC for PM_{2.5} in Seoul Metropolitan Area in 2014

Jong Sung Park · In Ho Song · Seung Myung Park · Hyejung Shin · Youdeog Hong

Climate and Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research

요약 : 본 연구는 수도권 지역 OC와 EC의 지역적, 계절적 특성을 파악하기 위하여 서울 은평구 불광동에 위치한 수도권 대기오염집중측정소에서 2014년 1월부터 12월까지 1년간 Semi-Continuous OC/EC Analyzer (Sunset Laboratory INC., USA)를 사용하여 PM_{2.5} 중 OC와 EC를 측정하였다. 그 결과, 수도권 지역의 OC와 EC의 연평균 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)는 각각 4.1 ± 2.7 , 1.6 ± 1.0 으로 나타났다. 계절별로 살펴보면 봄: 4.0 ± 2.2 , 1.8 ± 0.8 ; 여름: 3.6 ± 2.7 , 1.4 ± 0.9 ; 가을: 3.6 ± 2.4 , 1.3 ± 0.9 ; 겨울: 5.2 ± 3.3 , 2.0 ± 1.3 으로 나타나 겨울 > 봄 > 여름 > 가을 순으로 높은 농도를 나타냈으며, OC/EC 비는 2.4 ~ 3.4 수준으로 여름이 가장 높고 봄이 가장 낮은 수준을 보였다. 시간별 OC, EC 농도 변화를 살펴보면, 출·퇴근시간인 아침과 저녁에 증가하는 경향을 보였으며, OC/EC 비 역시 출·퇴근시간대의 교통량 증가로 인한 EC농도 증가로 인해 급격히 낮아지는 현상을 보여 수도권 지역의 탄소성 입자 농도에 가장 큰 영향을 주는 것은 자동차와 같은 교통수단인 것으로 판단된다. 이번 연구를 통해 수도권 지역 탄소성분의 배출특성 및 계절별 특징, 농도 수준을 파악하고, 대기질 개선 정책의 효과적인 수립을 위한 과학적인 기초 자료의 제공이 가능할 것으로 판단된다.

주요어 : 수도권대기오염집중측정소, 유기탄소, 무기탄소, PM_{2.5}

Abstract : To investigate characteristics and seasonal variations of carbonaceous species for PM_{2.5} in Seoul metropolitan area, Korea, we measured organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) from January 2014 to December 2014 using a semi-continuous OC/EC Analyzer (Model-4, Sunset Lab.). Mean concentrations of OC and EC were estimated $4.1 \pm 2.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $1.6 \pm 1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. The annual averaged OC/EC ratio was 2.9 ± 2.7 . Concentrations of OC and EC

First Author: Jong Sung Park, Air Quality Research Division, National Institute of Environmental Research, Tel: 02-3157-0370, E-mail: psofc@korea.kr

Corresponding Author: Hyejung Shin, Air Quality Research Division, National Institute of Environmental Research, Tel: 02-3157-0372, E-mail: shjoung@korea.kr

Co-Authors: In Ho Song, Air Quality Research Division, National Institute of Environmental Research, Tel: 02-3157-0371, E-mail: onepeace00@korea.kr

Seung Myung Park, Air Quality Research Division, National Institute of Environmental Research, Tel: 02-3157-0370, E-mail: psm5555@korea.kr

Youdeog Hong, Air Quality Research Division, National Institute of Environmental Research, Tel: 032-560-7253, E-mail: ydhong3@korea.kr

Received : 2 November, 2015. Revised: 7 December, 2015. Accepted: 9 December, 2015.

comprised 13% and 5% of PM_{2.5} and the mass fraction of both was the highest in fall. OC and EC showed similar trend in seasonal variations. Concentrations of those showed a clear seasonal variation with the highest in winter and the lowest in summer. The correlations between the two were the best during the winter ($r^2 = 0.88$). As results of carbonaceous species analysis, the dominant factor in view of fine particle (PM_{2.5}) is primary emission source such as mobile, fossil fuel combustion during commute time(08:00~10:00 or 17:00~21:00) and winter season. Continuous monitoring of atmospheric carbonaceous species is essential to provide the science-based data to policy-maker establishing the air quality improvement policy.

Keywords : Seoul intensive atmospheric monitoring station; Organic Carbon; Elemental Carbon; PM_{2.5}

I. 서론

대기 중 부유하고 있는 에어로졸의 약 10 ~ 40% 를 차지하고 있는 탄소성분은 직접 또는 간접적으로 지구 복사 평형에 영향을 주어 지구 온난화 또는 냉각화를 유발하는 주요 물질이다(Solomon *et al.*, 2003; Andreae and Rosenfeld, 2008; Monks *et al.*, 2009; 한지현 등, 2013). 탄소성 유기분진은 시정거리(visibility) 감소, 기후 강제력(climate forcing) 등의 변화에 크게 기여하고, 인체에 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Raes *et al.*, 2000; Jacobson, 2001; Leck *et al.*, 2002; Hopke, 2009; Rattigan *et al.*, 2010).

탄소성 에어로졸은 크게 유기탄소(OC, organic carbon)와 원소탄소(EC, elemental carbon)로 구분할 수 있다. OC는 일반적으로 자연적 발생원에서 직접 배출되거나 VOCs 및 PAHs 같은 화합물 및 1차 생성 에어로졸이 O₃ 등과 같은 산화제와의 광·화학적 반응을 통해 2차 유기탄소(SOC, Secondary Organic Carbon)로 변환되며 발생한다(Kim *et al.*, 1998; Yang *et al.*, 2005; Szidat *et al.*, 2009). EC는 검댕(soot) 또는 흑연탄소(BC, black carbon)라고도 불리며 대부분 연소발생원에서 직접 배출되는 1차 오염물질로 화석 연료와 생체연소(biomass burning)에서 검댕의 형태로 배출된다(Mader *et al.*, 2003). 이러한 EC는 토양과 육상퇴적물에는 항상 존재하며(Schmidt and Noack, 2000), 빛을 흡수하는 특징을 가지고 있어 이산화탄소에 이어 지구 온난화에 기여도가 가장 높은 물질로 알려져 있다(Chow *et al.*, 2005; Han *et al.*, 2007; Ramanathan and Carmichael,

2008; 임세희 등, 2010). 또한 EC는 OC에 비해 대기 중에서의 체류시간이 길며, 인위적인 일차 배출원이 주발생원이라는 특성 때문에 중요한 대기오염 물질의 지표로 활용되고 있다(He *et al.*, 2004).

최근 한국, 중국을 포함한 동북아시아는 급격한 경제 성장과 산업화로 인해 인위적인 에어로졸 및 오염전구물질들이 빠르게 증가하고 있는 추세이다(Streets *et al.*, 2001; Streets *et al.*, 2003; Monks *et al.*, 2009). 특히 우리나라는 편서 계절풍의 풍향 방향에 위치한 지정학적 특성으로 동북아시아에서 인위적으로 배출된 에어로졸과 시베리아 또는 중국 동부 지역 등 동북아시아 지역에서의 생체소각에 의한 에어로졸 영향을 받고 있으며, 이들 에어로졸이 동북아시아 지역의 기후변화에 미치는 영향이 큰 것으로 보고되고 있다(Streets *et al.*, 2001; Yang *et al.*, 2005; Cao *et al.*, 2006; Choi and Chang, 2006; 한지현 등, 2013). 우리나라의 풍상층에 위치하고 있는 중국의 BC 배출량은 아시아 전체 배출량(2.54 Tg/yr)의 41.3%로 SO₂, NH₃에 이어 중국의 배출 기여도가 가장 높다(임세희 등, 2010). 따라서 탄소성 입자의 발생원 및 특징을 파악하기 위해서는 전 지구적 혹은 지역적인 기후변화에 대한 탄소성 입자의 역할과 특성을 파악하는 것이 필요하다.

선행연구들은 대부분 여지에 24시간 동안 시료를 채취하여 하루 단위로 탄소성분을 분석하였기 때문에 반휘발성 물질들의 질량농도를 정확히 측정하는데 한계가 있으며, 시간변화에 대한 측정자료를 도출하는 것이 불가능하였다(Pang *et al.*, 2001; 이시혜 등, 2008; 임세희 등, 2010). 또한 준 실시간 분석장

비를 사용한 경우에도 단기간의 분석결과로 인해 장기적인 농도변화 및 시간변화에 대한 대표성 있는 자료 획득에 어려움이 있었다(Bea *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2007; 한지현 등 2013). 따라서 본 연구에서는 2014년 1월부터 12월까지 1년간의 1시간 간격 준실시간 분석으로 탄소성 입자의 농도 특성 및 계절별, 시간별 특성을 파악하여 향후 수도권 지역 탄소성 입자 농도 저감을 위한 대기질 관리의 과학적인 근거자료를 제시하고자 하였다.

II. 연구방법

본 연구를 위해 서울시 은평구 불광동에 위치한 수도권 대기오염집중측정소(37° 36'N, 126° 56'E, 67 m a.s.l.)에서 2014년 1월 1일부터 12월 31일까지 1시간 간격으로 초미세먼지의 질량 및 탄소성분을 실시간 모니터링하였다. 다만, 수도권 지역의 탄소성분 농도에 대한 연구를 진행함에 있어서 불광동에 위치한 수도권측정소가 수도권 전지역을 대표할 수 있는지에 대한 제약점이 따르지만, 환경부에서 측정소를 설립할 당시 권역을 대표할 수 있는 지점을 선정하였기 때문에 지역 대표성은 확보하고 있는 것을 전제로 연구를 진행하였다.

PM_{2.5} 질량농도의 경우 β -ray 흡수법을 사용하는 BAM 1020(MetOne Ins., U.S.A)으로 측정하였고, PM_{2.5} 내 탄소성분 농도는 Semi-continuous OCEC analyzer(Sunset Lab., U.S.A)로 측정하였다. 보통

탄소 분석 방법은 크게 두 가지 방법이 사용되고 있는데, He-Ne 레이저 광선에 의해 조사되어 투과되는 정도를 이용하여 유기탄소와 원소탄소를 구분하는 TOT(Thermal-Optical Transmittance method) 법과 광선이 반사되는 정도로 구분하는 TOR(Thermal-Optical Reflectance method)법이 있다. TOT법이 TOR법보다 높은 OC의 분석 온도환경(850 °C)을 가지기 때문에 탄산염 분해에 의한 검출도 고려된다는 차이가 있다. 따라서 TOT법이 TOR법보다 OC의 농도는 높고, EC의 농도는 낮은 경향을 보이지만 TC(total carbon)의 경우 비슷한 농도를 나타낸다(Chow *et al.*, 2001).

본 연구에서 사용한 SOCEC 장비는 TOT법을 사용하며 분석 절차는 다음과 같다. 시료를 PM_{2.5} 유입구를 통해 8 LPM의 유량으로 45분간 석영여지에 채취한다. 그 후 여지를 Table 1과 같은 NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) 5040 protocol에 따라 온도를 크게 두 단계로 상승 및 하강시키는데, 우선 첫 번째 단계의 가열 구간에서 OC가 분석되어지고, 다음 단계에서 EC가 분석된다. OC는 순수 He 기체를 유동체로 사용하여 산소가 없는 조건으로 850°C 까지 순차적으로 가열함으로써 OC를 CO₂로 산화시켜 측정되며, EC는 이론상 OC가 제거된 여지를 O₂(10%)와 He(90%) 조건 하에서 온도를 낮췄다가 650 ~ 940 °C 까지 다시 순차적으로 가열하여 측정한다. 산소와 헬륨의 혼합가

Table 1. NIOSH 5040 parameter (temperature profile).

ProgramActivity	CarrierGas	Ramp Time(seconds)	ProgramTemperature (°C)
Oven Purge	Helium	10	Ambient
1st Ramp	Helium	60	250
2nd Ramp	Helium	60	500
3rd Ramp	Helium	60	650
4th Ramp	Helium	90	850
Cool for EC w/fan	Helium	30	-
Stabilize Temp	Helium	45	550
1st Ramp	Helium/Ox	90	650
2nd Ramp	Helium/Ox	90	775
3rd Ramp	Helium/Ox	120	940
External Std. Calibration and cool down	Cal gas+Helium/Ox	120	-

스가 주입됨과 동시에 여지의 레이저 투과도가 상승하기 시작하는데 이 시점부터 초기 레이저 투과도 값으로 돌아올 때까지 발생한 CO₂를 PC(Pyrolyzed organic Carbon)으로 정의한다. 투과도가 초기값으로 복원된 시점부터 EC가 CO₂로 산화되고 그때 발생한 CO₂를 정량한다. 마지막 단계로 메탄 5%와 헬륨 95%의 혼합기체를 주입하여 각 단계별로 측정된 CO₂에 대한 보정이 이루어진다(한지현 등, 2013; 이영재 등, 2015).

SOCEC는 동일한 석영여지로 연속 측정하는 것이기 때문에 이론상 OC와 EC가 모두 CO₂로 산화되었다 할지라도 시간이 지남에 따라 여지가 오염되어 레이저의 투과도가 저하되는 문제가 발생한다. 이를 위해 초기 레이저 값과 측정시의 레이저 투과율을 이용하여 레이저 보정 계수(laser correction factor)를 산출하는데, 이 값이 0.88 이하가 되면 여지의 교체가 권장되므로(Yu *et al.*, 2009), 본 연구에서는 보정계수가 0.88이 되면 여지를 교체하였다. 교체 후 최소 12시간 동안 HEPA 필터를 장착하여 산출된 배경농도 데이터를 상·하위 값을 제외하고 75%의 평균을 산출하여 측정 데이터의 배경농도로 처리하였다. 장비의 교정은 Sucrose 표준시료를 사용하여 매일 수행하였고, 3단계 농도수준에 대해 검량선의 결정인자를 0.99 이상으로 유지하였다. 이 장비의 측정농도 범위는 0 ~ 40 µg/m³이며, 검출한계는 0.4 µg/m³이다. 또한 시료유입구 전단에 디누더를 장착하여 가스상 탄소에 대한 영향을 제거하였으며, 입상 탄소의 영향을 다루기 때문에 강우 시 데이터는 무효처리하였다.

III. 연구결과 및 고찰

1. PM_{2.5}의 OC와 EC

PM_{2.5} 및 OC와 EC의 연평균농도는 각각 37.0 ± 27.9, 4.1 ± 2.7, 1.6 ± 1.0 µg/m³ 수준을 보였으며, OC/EC 비는 2.9 ± 2.7로 나타났다. 총 탄소성분(TC, TC = OC + EC)은 PM_{2.5}의 14.4 ~ 21.2%를 차지했으며, PM_{2.5} 중 OC와 EC의 함량비(mass fraction)는 각각 0.13 ± 0.06, 0.05 ± 0.03으로

나타났다. 탄소성분의 연평균 결과에 대한 상대표준 편차는 EC에 비하여 OC가 약 3.4% 높게 나타났다. 이유를 살펴보면, 첫째, EC는 연소과정에서의 1차 생성이 주 발생원이지만, OC는 EC와 같은 연소과정만 아니라 식물, 토양 및 해양 기원의 1차적 발생 요인과 2차적인 광화학반응으로 생성된 SOC 등 그 발생원이 다양하기 때문인 것으로 사료되며, (Sizdat *et al.*, 2009; 임세희 등, 2010) 둘째, OC는 표면 반응률(surface reactivity)이 큰 물질로 알려져 있어 대기 중에서의 생성 및 소멸 기작이 많이 발생하여 농도의 편차가 크게 나타난 것으로 추정된다(Maria *et al.*, 2004; Russell *et al.*, 2002).

선행 연구의 탄소성분 분석 결과를 Table 2에 제시하였다. 선행연구들은 대부분 본 연구기간보다 10년 이상 이전에 실행된 연구들로 현재 많은 대기환경 개선이 이루어진 수도권 농도 수준과의 비교는 무리가 있는 것으로 판단되었다. 환경부는 수도권의 대기오염물질 배출량 저감과 대기질의 점진적인 개선을 위하여 2002년에 '수도권 대기개선 특별 대책'을 수립하였고, 2003년에는 「수도권 대기환경 개선에 관한 특별법」을 제정하였다. 이후 특별법을 근거로 2005년 11월에 '제 1차 수도권 대기환경 관리 기본 계획'을 마련하여 대기환경 개선 대책을 꾸준히 추진하였으며, 그 결과 서울시 미세먼지 연평균 농도는 2001년 71 µg/m³의 수준에서 2013년 44 µg/m³로 크게 낮아졌다고 보고하였다(환경부, 2014). 본 연구기간의 수도권 PM_{2.5} 평균농도는 여름철 서울에서 선행된 연구 결과를 제외하면 가장 낮은 수준으로 나타났으며, OC와 EC의 농도 수준 또한 비교적 낮은 수준을 보였다. 하지만, PM_{2.5} 중 OC와 EC의 함량비는 중국 베이징과 홍콩 등 대도시 지역의 선행연구 결과와 비슷한 수준을 보였다.

OC/EC 비의 경우 2004년 서울과 중국의 대도시 지역의 연구결과와 유사하게 비교적 낮은 수준을 보여 다른 지역에 비해 대도시 지역이 교통수단에 의한 EC 배출이 많다는 것을 시사했다(Watson *et al.*, 1994). 2010년 수도권에서의 PM_{2.5} 배출원 기여도에 관한 선행연구 결과에 따르면, 이동오염원의 기여도가 23.9%로 2차 생성 황산염에 이어 두 번째로 높은

Table 2. Literature values of PM_{2.5}, OC, EC, mass fraction and OC/EC ratio for PM_{2.5} in other various location.

Site	Period	PM _{2.5}	OC	EC	OC/ PM _{2.5}	EC/ PM _{2.5}	OC/ EC	Reference
		μg/m ³						
Seoul, Korea	Mar. ~ May; 2014	45	4.0	1.8	0.10	0.04	2.4	This study (2015)
	Jun. ~ Aug.; 2014	32	3.6	1.4	0.13	0.05	3.4	
	Sep. ~ Nov.; 2014	25	3.6	1.3	0.16	0.06	3.2	
	Jan. ~ Feb., Dec.; 2014	45	5.2	2.0	0.13	0.05	2.7	
Ghent, Belgium	Jan.; 2004 ~ Feb.; 2005	-	4.1	1.0	-	-	4.1	Viana <i>et al.</i> (2007)
Amsterdam, Netherlands	July; 2005 ~ Feb.; 2006	-	5.3	1.8	-	-	2.9	
Budapest, Hungary	Apr.; 2002 ~ Jun.; 2002	-	6.8	3.3	-	-	2.1	Salma <i>et al.</i> (2004)
Seoul, Korea	June, 1994	-	10.0	7.6	-	-	-	Kim <i>et al.</i> (1999)
Cheju, Korea	July ~ Aug.; 1994	-	3.7	0.3	-	-	-	
Seoul, Korea	Nov.; 1999 ~ Dec.; 1999	-	15.2	7.3	-	-	2.1	Park <i>et al.</i> (2002)
Kwangju, Korea	June; 2000	-	7.6	4.9	-	-	1.6	
Seoul, Korea	Jan.; 2004	45	5.4	3.9	0.12	0.09	1.4	Park and Kim (2005)
	May; 2004	42	4.2	3.9	0.10	0.09	1.1	
	Aug.; 2004	30	8.7	2.1	0.29	0.12	4.1	
Beijing, China	Jun ~ July; 2002	89	10.7	5.7	0.12	0.06	2.2	Mo Dan <i>et al.</i> (2004)
	Dec.; 2002	136	36.7	15.2	0.27	0.11	3.5	
PRD, China	Jan. ~ Feb.; 2002	74	14.7	6.1	0.20	0.09	2.4	Gao <i>et al.</i> (2003)
HT, HongKong	Nov.; 2000 ~ Feb.; 2001	42	5.5	1.4	0.13	0.03	-	Ho <i>et al.</i> (2002)
PolyU, HongKong		53	9.5	5.8	0.18	0.11	-	
Kaohsiung, Taiwan	Nov.; 1998 ~ Apr.; 1999	70	10.4	4.0	0.15	0.06	2.6	Lin and Tai (2001)

것으로 나타났으며, 환경부는 2010년 PM_{2.5} 전체 배출량 중 자동차 등 이동오염원에서 49.2%로 가장 많이 배출되었다고 보고한바있어, 수도권 PM_{2.5}의 경우 자동차 배출 영향을 많이 받는다는 것을 뒷받침해 주었다(문광주 등, 2011; 환경부, 2014).

2. 계절별 OC, EC 특성

계절별 OC, EC 농도 및 기상 특성을 Table 3에 나타내었다. 봄과 겨울에는 북서풍이 각각 41.3%, 52.0%로 우세하였고, 여름과 가을에는 각각 36.6%, 41.8%로 남동풍이 우세하였다. 또한 여름에 연강수량의 55.6%에 해당하는 강우가 집중적으로 내렸으며, 풍속은 봄에 가장 강한 것으로 나타났다. 따라서 중국 북동부지역의 산업지역이나 아시아대륙의 사막, 고원지대 등에서 불어오는 강한 북서풍 계열의 바람이 우세한 봄철에 PM_{2.5} 50 μg/m³ 이상이 6시간 이상 지속된 고농도 사례가 연간 총 68회중 28회로 가장 빈번히 발생(41.2%)하였다.

PM_{2.5} 및 OC와 EC의 계절별 평균 농도를 살펴보면(Figure 1, 2), PM_{2.5}는 봄부터 겨울까지 각각 45, 32, 25, 45 μg/m³로 봄 = 겨울 > 여름 > 가을 순으로 나타났고, OC는 4.0, 3.6, 3.6, 5.2 μg/m³, EC는 1.8, 1.4, 1.3, 2.0 μg/m³로 겨울 > 봄 > 여름 > 가을의 순으로 나타났다. OC/EC 비는 봄, 여름, 가을, 겨울이 각각 2.4, 3.4, 3.2, 2.7 수준으로 여름이 가장 높고, 봄이 낮은 수준을 보였다. TC/PM_{2.5} 질량농도비는 가을(0.21)이 함량비가 가장 높고, 봄(0.14)이 가장 낮았으며, OC와 EC의 결정계수는 봄, 여름, 가을, 겨울 각각 0.47, 0.35, 0.68, 0.88로 겨울 > 가을 > 봄 > 여름 순으로 나타났다.

여름철은 OC/EC 비가 가장 높은 수준을 보였는데, 이는 높은 온도와 습도의 영향으로 인해 활발한 광화학 반응이 일어나 상당량의 OC가 2차 생성에 의해 발생한 것임을 추정할 수 있다(Gray *et al.*, 1985; Chow *et al.*, 1996). 또한, OC와 EC의 결정계수가 가장 낮게 나타났는데, 이는 여름철 OC와 EC의 배

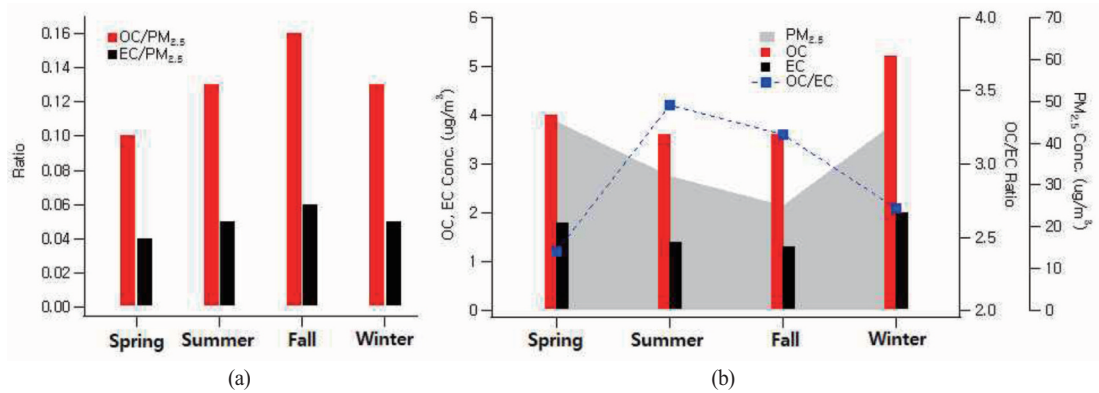


Figure 1. Seasonal (a) mass fraction of OC and EC in PM_{2.5} and (b) concentration of PM_{2.5}, OC, EC and OC/EC ratio in 2014.

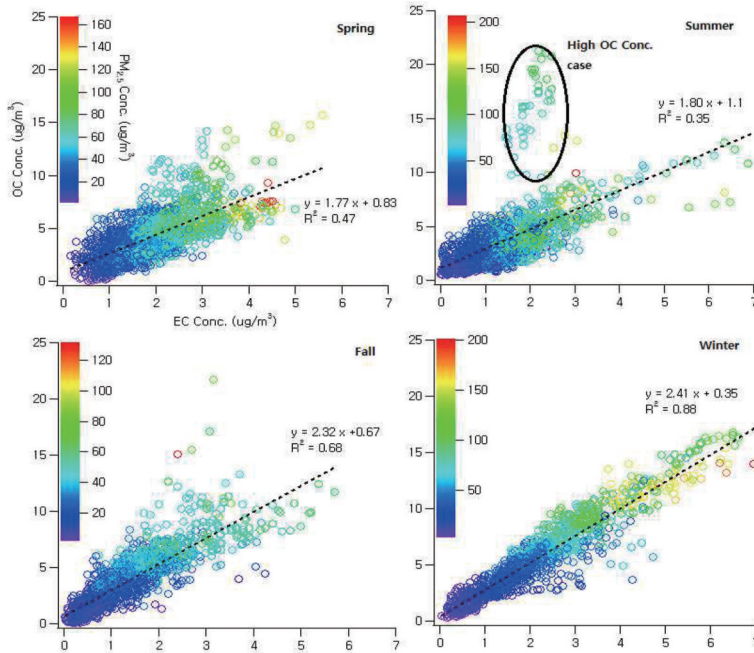


Figure 2. Seasonal correlation of OC and EC in PM_{2.5}.

출 특성이 다른 계절에 비해 다양하기 때문인 것으로 사료된다(Cao *et al.*, 2005; Yang *et al.*, 2005). 여름철은 연소에 의한 1차 배출과 북태평양 기단의 영향으로 인한 아시아대륙의 장거리 이동오염물질 영향이 감소한다. 또한, 풍향에 따른 해양기원의 1차 OC 농도가 산발적 증가할 가능성이 있다. Figure 2를 보면 여름철에 EC는 2 ~ 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준을 유지하지만 OC의 농도는 10 ~ 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준의 고농도가 지속된 사례가 나타났다. 이 사례는 PM₁₀ 농도 100

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 고농도가 발생한 기간으로 PM_{2.5} 농도가 약 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준을 유지한 경우로 높은 온도 조건하에서 광화학 반응의 전구물질 증가로 인해 OC 농도가 급격히 증가한 것으로 사료된다. 여름철 OC와 EC의 결정계수 회귀식의 절편이 1.1로 사계절 중 가장 높은 것은 EC의 배출 없이 OC가 일정 수준 존재하는 것을 의미하므로 이 또한 2차 생성 OC가 존재할 가능성을 시사한다(한지현 등, 2013).

겨울철은 OC, EC의 가장 높은 결정계수 및 농도

Table 3. Seasonal average concentration of OC, EC OC/EC ratio and mass fraction in PM_{2.5} and meteorological parameters in 2014.

Season	OC	EC	OC/EC	OC/PM _{2.5}	EC/PM _{2.5}	WS (m/s)	WD	RH (%)	Temp (°C)	Rain fall (mm)
	(μg/m ³)									
Spring	4.0 ± 2.2	1.8 ± 0.8	2.4 ± 1.2	0.10 ± 0.05	0.04 ± 0.02	2.0	NE (11.6%) SE (28.4%) SW (18.7%) NW (41.3%)	56.6	12.8	115.2
Summer	3.6 ± 2.7	1.4 ± 0.9	3.4 ± 4.5	0.13 ± 0.09	0.05 ± 0.04	1.7	NE (14.4%) SE (36.6%) SW (16.4%) NW (32.6%)	72.2	23.9	446.0
Fall	3.6 ± 2.4	1.3 ± 0.9	3.2 ± 2.7	0.16 ± 0.06	0.06 ± 0.03	1.7	NE (20.8%) SE (41.8%) SW (7.7%) NW (29.8%)	62.4	14.8	170.4
Winter	5.2 ± 3.3	2.0 ± 1.3	2.7 ± 0.8	0.13 ± 0.04	0.05 ± 0.02	1.7	NE (12.8%) SE (30.1%) SW (5.1%) NW (52.0%)	55.7	-0.7	70.6

수준을 보여주었는데, 이는 강한 북서풍의 영향으로 비교적 유사한 배출원에서 생성된 입자상 물질이 낮은 온도 조건 하에서 빠르게 이동하여 우리나라에 직접적으로 영향을 줌과 동시에 국내의 난방연료 연소와 같은 1차적인 배출 증가에 의한 영향으로 사료된다. 보통 1차 생성 OC와 2차 생성 OC를 정량적으로 구분하기 힘들기 때문에 EC를 1차 생성 OC의 지시자로 사용하며, 상관성이 높다는 것은 동일한 배출특성을 가지는 배출원의 영향을 많이 받았다는 것을 의미한다(임세희 등, 2010).

가을철은 여름에 이어 두 번째로 높은 OC/EC 비(3.2)를 나타냈다. 이는 시베리아 고기압과 북태평양 고기압의 공존으로 인해 대기가 정체되고, 비교적 온화한 온도와 청명한 대기 상태가 유지되어 2차 입자 생성이 유리한 조건과 함께 사계절 중 가장 낮은 EC 농도가 그 원인으로 사료된다(Gray *et al.*, 1986; Chow *et al.*, 1996; 임세희 등, 2010). 가을철은 1 m/s 이하의 약한 풍속이 38.9%로 사계절 중 가장 빈도수가 높게 나타났으며, 평균온도는 여름철에 이어 두 번째로 높은 14.8 °C로 분석되었다. 가을철은 가장 낮은 수준의 OC, EC 농도를 보였지만, PM_{2.5} 농도 수준이 계절 중 가장 낮았기 때문에 PM_{2.5} 질량에 대한 함량비는 가장 높은 것으로 나타났다.

봄철의 경우 앞서 언급한 바와 같이 황사와 같은 고농도 사례가 빈번히 발생하여 가장 높은 PM_{2.5} 농도를 나타내었으며, 그에 따라 PM_{2.5} 중 가장 낮은 OC, EC 함량비를 보였다. OC/EC 비는 2015년 봄철 고농도사례에 대한 선행연구의 결과와 같이 중국의 산업지역 및 주거지역에서 장거리 이동된 EC의 영향으로 가장 낮은 수준을 보였다(이영재 등, 2015).

Figure 3의 계절별 일변동 경향을 살펴보면, 07시부터 10시까지와 17시부터 21시까지의 출·퇴근시간에 OC와 EC 농도 모두 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 OC와 EC의 농도가 오후 시간대에 증가하는 시간이 계절별로 다르게 나타났는데, 여름철은 다른 계절보다 늦은 시간인 20시 이후에 농도가 올라가고, 겨울철은 이른 시간인 20시 이전에 피크를 보였다. 이는 계절에 따른 일몰 시간의 차이로 인해 퇴근시간이 여름에는 조금 더 늦게, 겨울에는 일찍 이뤄지기 때문으로 추정되나 확실한 원인을 파악하기 위해서는 추가적인 분석이 필요하다. 여름철 일변동 경향의 또 다른 특징은 오전에 OC 농도가 높아지는 시점인데, 다른 계절은 출근시간인 08시부터 10시 사이에 피크를 이루는 반면, 여름철은 보다 늦은 시간인 정오시간대(12 ~ 15시)에 높은 농도를 나타냈다. 이는 여름철 정오의 강한 태양광과 높은 온도로 인해 광화

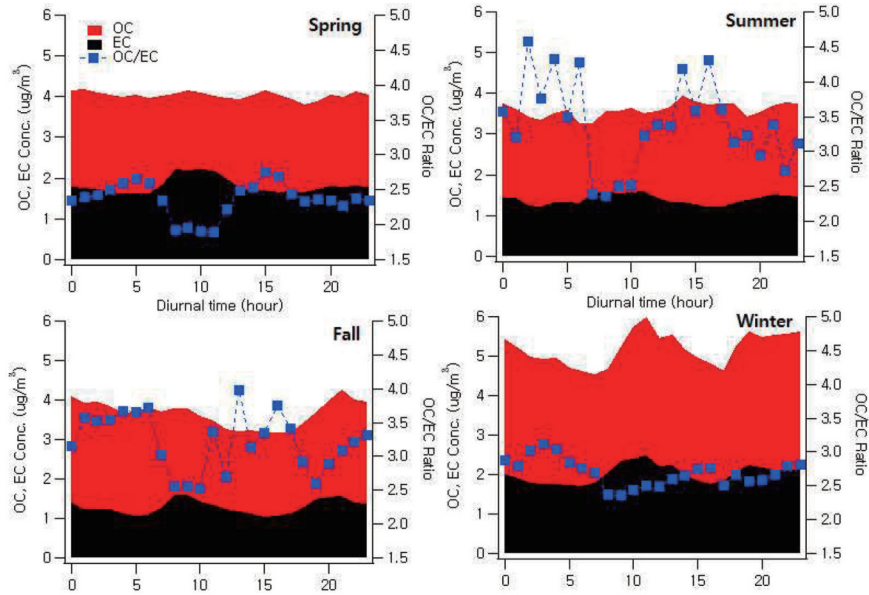
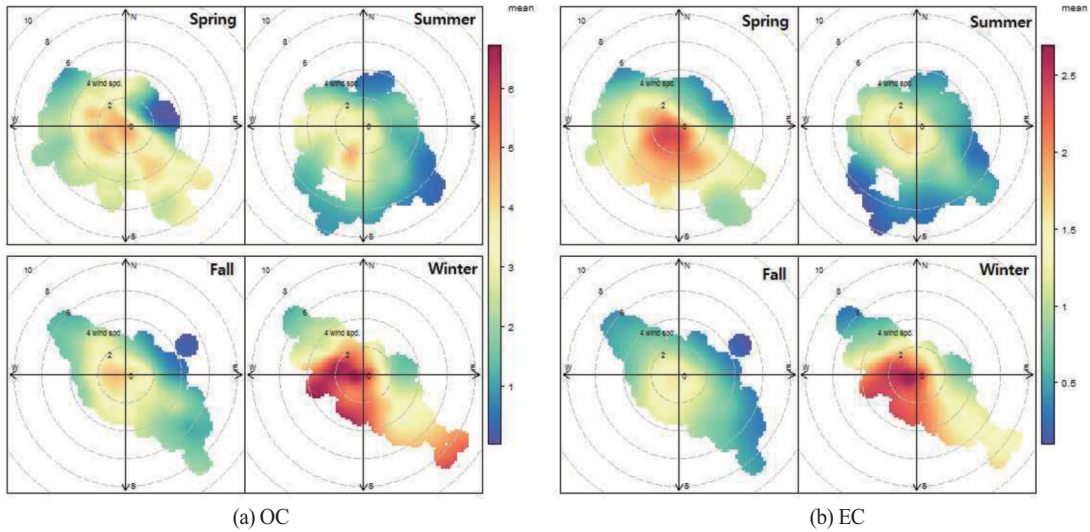


Figure 3. Diurnal time series of OC, EC and OC/EC ratio for each season in 2014.



(a) OC (b) EC
Figure 4. Seasonal wind rose polar plot of (a) OC and (b) EC in 2014.

학 반응이 활발히 일어나 2차 생성 OC의 농도가 증가하기 때문으로 사료된다.

OC/EC 비는 출·퇴근시간대에 급격히 낮아지는 것으로 나타났다. 이는, 수도권 및 대도시 지역의 대표적인 입자 배출원인 자동차에서 발생하는 EC가 급격히 증가하기 때문으로 사료되며, 수도권 지역의 탄소성 입자 농도에 가장 큰 영향을 주는 것은 자동차와 같은 교통수단인 것으로 판단된다.

Figure 4에 계절별 OC와 EC 농도의 풍배도를 나타내었다. OC, EC 농도 모두 남서풍일 때 OC, EC 농도가 높은 수준을 나타내었는데, 이는 측정소의 남쪽에 위치한 6차선 자동차 도로와 남서쪽에 위치한 도심지의 영향으로 사료되며, 북동풍일 경우 깨끗한 농도 수준을 보여주는 것은 북동쪽에 위치한 북한산의 영향으로 추정된다.

IV. 결론

국립환경과학원에서 운영 중인 서울시 은평구 불광동에 위치한 수도권 대기오염집중측정소에서 2014년 1월부터 12월까지 탄소성분 및 PM_{2.5} 질량농도를 연속 측정하였다. 서울 불광동의 OC와 EC의 평균농도는 각각 4.1 ± 2.7 , $1.6 \pm 1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준을 보였으며, OC/EC 비의 경우 교통수단에 의한 배출이 많은 수도권지역의 특징으로 인해 다른 지역에서 선행된 연구결과들과 비교 시 다소 낮은 수준인 2.9 ± 2.7 로 나타났다. OC와 EC의 계절별 평균 농도를 살펴보면, OC의 경우 봄부터 겨울까지 각각 4.0, 3.6, 3.6, 5.2로 나타났으며, EC의 경우 1.8, 1.4, 1.3, 2.0으로 겨울 > 봄 > 여름 ≥ 가을의 순으로 나타났다. OC/EC 비는 2.4 ~ 3.4 수준으로 여름이 가장 높고 봄이 가장 낮은 수준을 보였다.

계절별 특징을 살펴보면, 1) 여름철은 난방 시 배출되는 1차 배출원의 감소와 남동풍의 우세로 인한 동북아시아의 영향력 감소, 장마철 강우에 의한 세정효과 등의 영향으로 OC와 EC의 농도가 사계절 중 가장 낮은 수준을 보였으며, OC와 EC의 상관성 역시 가장 낮은 수준을 보여 탄소배출원 및 배출특성이 다양하다는 것을 시사했다. 또한, OC와 EC의 결정계수 회귀식에서 절편이 사계절 중 가장 높고, OC/EC의 비 역시 가장 높은 것으로 나타나 EC의 배출 없이 2차 생성 OC가 상당 부분 발생한 것으로 추정된다. 2) 겨울철은 강한 북서풍의 영향으로 아시아대륙의 오염물질이 빠르게 이동하여 우리나라에 직접적으로 영향을 줌과 동시에 국내의 난방연료 연소와 같은 1차적인 배출 증가에 의한 영향으로 OC와 EC 농도가 가장 높은 수준을 나타냈으며, OC와 EC의 상관성 역시 가장 높은 수준을 보여 비교적 동일한 배출특성을 가지는 배출원의 영향을 받은 것을 시사했다. 3) 가을철은 대기가 정체되고, 청명한 대기 상태가 유지되어 2차 입자 생성이 유리한 조건과 함께 사계절 중 가장 낮은 EC 농도로 인해 여름철 다음으로 높은 OC/EC 비를 나타내었다. 4) 봄철은 황사와 같은 고농도 사례가 빈번히 발생하여 가장 낮은 OC와 EC의 함량비와 중국의 산업지역 및 주거지역에서 장거리 이동된 EC

의 영향으로 가장 낮은 OC/EC 비를 나타냈다.

계절별 일변동 경향을 분석해보면, 출·퇴근시간인 아침과 저녁에 OC, EC 농도 모두 증가하는 경향을 보였다. 특히 퇴근시간대에 증가하는 탄소성분 농도를 살펴보면 여름에는 비교적 늦게, 겨울에는 비교적 일찍 증가하는 경향을 보여 여름과 겨울의 일몰시간의 차이로 인한 퇴근시간의 변화가 그 원인으로 추정된다. 또한, 여름철은 다른 계절이 출근시간대에 농도가 증가하는 경향을 보이는 것과는 다르게 보다 늦은 시간인 정오시간대에 높은 농도를 나타내어 활발한 광화학 반응에 의한 2차 생성 OC의 농도 증가가 그 원인으로 사료된다. OC/EC 비는 출·퇴근시간대의 교통량 증가로 인한 EC농도 증가로 인해 급격히 낮아지는 현상을 보여 수도권 지역의 탄소성 입자 농도에 가장 큰 영향을 주는 것은 자동차와 같은 교통수단인 것으로 판단된다.

편서풍대에 위치한 우리나라는 오염물질의 배출 기여도가 아시아 국가 중 최고 수준인 중국으로부터 직접적인 영향을 지속적으로 받고 있으며, 특히 서울은 높은 인구밀도와 많은 배출원이 밀집한 지역으로 오염물질의 장거리이동과 함께 자체 배출되는 오염물질도 많은 대표적인 지역이다. 이러한 오염물질 중 지구의 복사 평형에 영향을 주어 전 지구적인 기후변화를 야기하는 탄소성분의 효율적인 저감을 위해서는 배출원 및 특징을 파악하는 것이 우선시 되어야 할 것이다. 이번 연구를 통해 수도권 지역 탄소성분의 배출특성 및 계절별 특징, 농도 수준을 파악하고, 대기질 개선 정책의 효과적인 수립을 위한 과학적인 기초자료의 제공이 가능할 것으로 판단된다.

사사

본 연구는 환경부 “대기오염측정망 구축 운영” 예산을 지원받아 국립환경과학원의 대기오염집중측정소 운영 결과를 활용하여 수행되었습니다.

인용문헌

문광주, 박승명, 박종성, 송인호, 장성기, 김종춘,

- 이석조. 2011. 2010년도 서울시 대기 중 $PM_{2.5}$ 의 성분특성 및 발생원 추정에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 27(6), 711-722.
- 박진수, 김신도. 2005. 서울과 인천지역 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 중 2차생성 탄소성분 추정, 한국대기환경학회지, 21(1), 131-140.
- 이시혜, 김영성, 김상우, 윤순창. 2008. 서울과 고산의 에어로졸 화학성분과 광학특성의 계절 변화, 한국대기환경학회지, 24(4), 470-482.
- 이영재, 박미경, 정선아, 김선정, 조미라, 송인호, 유영숙, 임용재, 김정훈, 정해진, 이상욱, 최원준, 안준영, 이민희, 강현정, 박승명, 서석준, 정동희, 현주경, 박종성, 황태경, 홍유덕, 홍지형, 신혜정. 2015. 한반도 권역별 대기 중 입자상 탄소 특성 연구, 한국대기환경학회지, 31(4), 330-344.
- 임세희, 이미혜, 강경식. 2010. 제주도 고산 PM_{10} , $PM_{2.5}$, $PM_{1.0}$ 중 OC와 EC의 계절적 변화 특성, 한국대기환경학회지, 26(5), 567-580.
- 한지현, 방병조, 이미혜, 윤순창, 김상우, 장임석, 강경식. 2013. 준실시간 연속관측을 통한 제주 고산 $PM_{2.5}$ OC와 EC의 계절별 사례별 특성, 한국대기환경학회지, 29(3), 237-250.
- 환경부. 2014. 수도권 대기환경 개선 대책 그 성과와 미래.
- Andreae MO, Rosenfeld D. 2008. Aerosol-cloud-precipitation interaction. Part 1. The nature and sources of cloud-active aerosol, *Earth-Sci. Rev.*, 89(1-2), 13-41.
- Bea MS, Hong CS, Kim YJ, Han JS, Moon KJ, Kondo Y, Kamazaki Y, Miyazaki Y. 2007. Inter-comparison of two different thermal-optical elemental carbons and optical black carbon during ABC-EAR-EX2005, *Atmos. Environ.*, 41(13), 2791-2803.
- Chow JC, Watson JG, Lu Z, Lowenthal DH, Frazier CA, Solomon PA, Thuillier RH, Magliano K. 1996. Descriptive analysis of $PM_{2.5}$ and PM_{10} at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX, *Atmos. Environ.*, 30(12), 2079-2112.
- Chow JC, Watson JG, Crow D, Lowenthal DH, Merrifield T. 2001. Comparison of IMPROVE and NIOSH carbon measurement, *Aerosol Sci. Technol.*, 34(1), 23-34.
- Chow JC, Watson JG, Louie PK, Chen LW, Sin D. 2005. Comparison of $PM_{2.5}$ carbon measurement methods in Hong Kong, China, *Environ Pollut*, 137(2), 334-344.
- Coa JJ, Lee SC, Ho KF, Zhang XY, Zou SC, Fung K, Chow JC, Watson JG. 2003. Characteristics of carbonaceous aerosol in pearl River Delta Region, China during 2001 winter period, *Atmos. Environ.*, 37(11), 1451-1460.
- Dan M, Zhuang G, Li X, Tao H, Zhuang Y. 2004. The characteristics of carbonaceous species and their sources in $PM_{2.5}$ in Beijing, *Atmos. Environ.*, 38, 3443-3452.
- Gray HA, Cass GR, Huntzicker JJ, Heyerdahl EK, Rau JA. 1986. Characteristics of atmospheric organic and elemental carbon particle concentration in Los Angeles, *Environ. Sci. Technol.*, 20, 580-582.
- Han Y, Cao J, Chow JC, Watson JG, An Z, Jin Z, Fung K, Liu S. 2007. Evaluation of the thermal/optical reflectance method for discrimination between char- and soot-EC, *Chemosphere*, 69(4), 569-574.
- He Z, Kim YJ, Ogunjobi KO, Kim JE, Ryu SY. 2004. Carbonaceous aerosol characteristics of $PM_{2.5}$ particles in Northeastern Asia in summer 2002, *Atmos. Environ.*, 38(12), 1795-1800.
- Ho KF, Lee SC, jimmy CY, Zou SC, Fung K. 2002. Carbonaceous characteristic of atmospheric matter in Hong Kong, The

- Science of the Total Environment, 300, 59-67.
- Hopke P. 2009. Contemporary threats and air pollution, *Atmos. Environ.*, 43, 87-93.
- Jacobson M. 2001. Global direct radiative forcing due to multicomponent anthropogenic and natural aerosols, *J. Geophys. Res.*, 106 (D2), 1551-1568.
- Kim YP, Lee JH, Baik NJ, Kim JY, Shim SG, Kang CH. 1998. Summertime characteristics of aerosol composition at Cheju Island, Korea, *Atmos. Environ.*, 32(22), 3905-3915.
- Kim YP, Moon KC, Lee JH, Baik NJ. 1999. Concentrations of carbonaceous species in Particles at Seoul and Cheju in Korea, *Atmos. Environ.*, 33, 2751-2758.
- Leck C, Norman M, Bigg E, Hillamo R. 2002. Chemical composition and sources of high Arctic aerosol relevant for cloud formation, *J. Geophys. Res.*, 107(D12), 4135.
- Lee M, Song M, Moon KJ, Han JS, Lee G, Kim KR. 2007. Origins and chemical characteristics of fine aerosols during the northeastern Asia regional experiment (Atmospheric Brown Cloud-East Asia Regional Experiment 2005), *J. Geophys. Res.*, 112(D22), D22S29.
- Lin JJ, Tai HS. 2001. Concentrations and distributions of carbonaceous species in ambient particles in Kaohsiung city, Taiwan, *Atmos. Environ.*, 35, 2627-2636.
- Mader BT, Schauer JJ, Seinfeld JH, Flagan RC, Yu JZ, Yang H, Lim HJ, Turpin BJ, Deminter JT, Heidemann G, Bea MS, Quinn P, Bates T, Eatough DJ, Huebert BJ, Bertram T, Howell S. 2003. Sampling methods used for the collection of particle-phase organic and carbon during ACE-Asia, *Atmos. Environ.*, 37(11), 1435-1449.
- Maria SF, Gilles MK, Myneni SCB. 2004. Organic aerosol growth mechanisms and their climate-forcing implications, *Science*, 306 (5703), 1921, doi:10.1126/science.1103491.
- Monks PS, Granier C, Fuzzi S, Stohl A, Williams ML, Akimoto H, Amann M, Baklanov A, Baltensperger U, Bey I, Blake N, Blake RS, Carslaw K, Cooper OR, Dentener F, Fowler D, Fragkou E, Frost GJ, Generoso S, Ginoux P, Grewe V, Guenther A, Hansson HC, Henne S, Hjorth J, Hofzumahaus A, Huntrieser H, Isaksen ISA, Jenkin ME, Kaiser J, Kanakidou M, Klimont Z, Kulmala M, Laj P, Lawrence MG, Lee JD, Liousse C, Maione M, McFiggans G, Metzger A, Mieville A, Moussiopoulos N, Orlando JJ, O'Dowd CD, Palmer PI, Parrish DD, Petzold A, Platt U, Poschl U, Prevot ASH, Reeves CE, Reimann S, Rudich Y, Sellegri K, Steinbrecher R, Simpson D, ten Brink H, Theloke J, van der Werf GR, Vautard R, Vestreng V, Vlachokostas C, von Glasow R. 2009. Atmospheric composition change-global and regional air quality, *Atmos. Environ.*, 43(33), 5269-5350.
- Pang Y, Ren Y, Fida O, Robert H, Delbert E, William W. 2001. Semi-volatile species in PM_{2.5}: comparison of integrated and continuous samples for PM_{2.5} research or monitoring, *J. Air Waste manage. Assoc.*, 51(1), 25-36.
- Park SS, Kim YJ, Fung K. 2002. PM_{2.5} carbon measurement in two urban areas: Seoul and Kwangju, Korea, *Atmos. Environ.*, 36, 1287-1297.
- Raes F, Bates T, McGovern F, van Liedekerke M. 2000. The 2nd Aerosol Characterization

- Experiment(ACE-2): general overview and main results, *Tellus B.*, 52, 111-125.
- Ramanathan V, Carmichael G. 2008. Global and regional climate changes due to black carbon, *Nature Geoscience*, 1, 221-227.
- Rattigan O, Felton H, Bae M, Schwab J, Demerjian K. 2010. Multi-year hourly PM2.5 carbon measurements in New York: Diurnal, day of week and seasonal patterns, *Atmos. Environ.*, 44, 2043-2053.
- Russell LM, Maria SF, Myneni SCB. 2002. Mapping organic coatings on atmospheric particles, *Geophys. Res. Lett.*, 29(16), 1779, doi: 10.1029/2002GL014874.
- Salma I, Chi X, Maenhaut W. 2004. Elemental and organic carbon in urban canyon and background environments in Budapest, Hungary, *Atmos. Environ.*, 38, 27-36.
- Schmidt M, Noack A. 2000. Black carbon in soils and sediments: analysis, distribution, implications, and current challenges, *Global Biogeochem. Cycles*, 14(3), 777-793.
- Solomon P, Baumann K, Edgerton E, Tanner R, Eatough D, Modey W, Marin H, Savoie D, Natarajan S, Meyer MB, Norris G. 2003. Comparison of integrated samplers for mass and composition during the 1999 Atlanta Supersites project, *J. Geophys. Res.*, 108(D7), 8423, doi:10.1029/2001JD001218.
- Streets DG, Gupta S, Waldhoff ST, Wang MQ, Bond TC, Yiyun B. 2001. Black carbon emissions in China, *Atmos. Environ.*, 35(25), 4281-4296.
- Streets DG, Bond TC, Carmichael GR, Fernandes SD, Fu Q, He D, Kilmont Z, Nelson SM, Tsai NY, Wang MQ, Woo JH, Yarber KF. 2003. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000, *Geophys. Res.*, 108(D21), 8809, doi:10.1029/2002JD003093.
- Szidat S, Ruff M, Perron N, Wacker L, Synal HA, Hallquist M, Shannigrahi AS, Yttri KE, Dye C, Simpson D. 2009. Fossil and non-fossil sources of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) in Goteborg, Sweden, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 1521-1535.
- Viana M, Maenhaut W, ten Brink HH, Chi X, Weijers E, Querol X, Alastuey A, Mikušková P, Večerník Z. 2007. Comparative analysis of organic and elemental carbon concentrations in carbonaceous aerosols in three European cities, *Atmos. Environ.*, 41(28), 5972-5983.
- Watson JG, Chow JC, Lowenthal DH, Pritchett LC, Frazier CA. 1994. Differences in the carbon composition of source profiles for Diesel- and Gasoline-powered vehicles, *Atmos. Environ.*, 28(15), 2493-2505.
- Yang F, He K, Ye B, Chen X, Cha L, Cadle SH, Chan T, Mulawa PA. 2005. One-Year record of organic and elemental carbon in fine particles in downtown Beijing and Shanghai, *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 1449-1457.
- Yu XY, Cary RA, Laulainen NS. 2009. Primary and secondary organic carbon downwind of Mexico City, *Atmos. Chem. Phys.*, 9(18), 6793-6814.

References

- Andreae MO, Rosenfeld D. 2008. Aerosol-cloud-precipitation interaction. Part 1. The nature and sources of cloud-active aerosol, *Earth-Sci. Rev.*, 89(1-2), 13-41.
- Bea MS, Hong CS, Kim YJ, Han JS, Moon KJ, Kondo Y, Kamazaki Y, Miyazaki Y. 2007. Inter-comparison of two different thermal-

- optical elemental carbons and optical black carbon during ABC-EAR-EX2005, *Atmos. Environ.*, 41(13), 2791-2803.
- Chow JC, Watson JG, Lu Z, Lowenthal DH, Frazier CA, Solomon PA, Thuillier RH, Magliano K. 1996. Descriptive analysis of PM_{2.5} and PM₁₀ at regionally representative locations during SJVAQS/ AUSPEX, *Atmos. Environ.*, 30(12), 2079-2112.
- Chow JC, Watson JG, Crow D, Lowenthal DH, Merrifield T. 2001. Comparison of IMPROVE and NIOSH carbon measurement, *Aerosol Sci. Technol.*, 34(1), 23-34.
- Chow JC, Watson JG, Louie PK, Chen LW, Sin D. 2005. Comparison of PM_{2.5} carbon measurement methods in Hong Kong, China, *Environ Pollut*, 137(2), 334-344.
- Coa JJ, Lee SC, Ho KF, Zhang XY, Zou SC, Fung K, Chow JC, Watson JG. 2003. Characteristics of carbonaceous aerosol in pearl River Delta Region, China during 2001 winter period, *Atmos. Environ.*, 37(11), 1451-1460.
- Dan M, Zhuang G, Li X, Tao H, Zhuang Y. 2004. The characteristics of carbonaceous species and their sources in PM_{2.5} in Beijing, *Atmos. Environ.*, 38, 3443-3452.
- Gray HA, Cass GR, Huntzicker JJ, Heyerdahl EK, Rau JA. 1986. Characteristics of atmospheric organic and elemental carbon particle concentration in Los Angeles, *Environ. Sci, Technol.*, 20, 580-582.
- Han Y, Cao J, Chow JC, Watson JG, An Z, Jin Z, Fung K, Liu S. 2007. Evaluation of the thermal/optical reflectance method for discrimination between char- and soot-EC, *Chemosphere*, 69(4), 569-574.
- Han JH, Bahng BJ, Kim MH, Yoon SC, Kim SW, Chang LS, Kang KS. 2013. Semi-continuous Measurements of PM_{2.5} OC and EC at Gosan: Seasonal Variations and Characteristics of High-concentration Episodes, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 29(3), 237-250.
- He Z, Kim YJ, Ogunjobi KO, Kim JE, Ryu SY. 2004. Carbonaceous aerosol characteristics of PM_{2.5} particles in Northeastern Asia in summer 2002, *Atmos. Environ.*, 38(12), 1795-1800.
- Ho KF, Lee SC, jimmy CY, Zou SC, Fung K. 2002. Carbonaceous characteristic of atmospheric matter in Hong Kong, *The Science of the Total Environment*, 300, 59-67.
- Hopke P. 2009. Contemporary threats and air pollution, *Atmos. Environ.*, 43, 87-93.
- Jacobson M. 2001. Global direct radiative forcing due to multicomponent anthropogenic and natural aerosols, *J. Geophys. Res.*, 106 (D2), 1551-1568.
- Kim YP, Lee JH, Baik NJ, Kim JY, Shim SG, Kang CH. 1998. Summertime characteristics of aerosol composition at Cheju Island, Korea, *Atmos. Environ.*, 32(22), 3905-3915.
- Kim YP, Moon KC, Lee JH, Baik NJ. 1999. Concentrations of carbonaceous species in Particles at Seoul and Cheju in Korea, *Atmos. Environ.*, 33, 2751-2758.
- Leck C, Norman M, Bigg E, Hillamo R. 2002. Chemical composition and sources of high Arctic aerosol relevant for cloud formation, *J. Geophys. Res.*, 107(D12), 4135.
- Lee M, Song M, Moon KJ, Han JS, Lee G, Kim KR. 2007. Origins and chemical characteristics of fine aerosols during the northeastern Asia regional experiment (Atmospheric Brown Cloud-East Asia Regional Experiment 2005), *J. Geophys.*

- Res., 112(D22), D22S29.
- Lee SH, Ghim YS, Kim SW, Yoon SC. 2008. Seasonal Variations of Chemical Composition and Optical Properties of Aerosols at Seoul and Gosan, Korean J. of Atmos. Environ., 24(4), 470-482.
- Lee YJ, Park MK, Jung SA, Kim SJ, Jo MR, Song IH, Lyu YS, Lim YJ, Kim JH, Jung HJ, Lee SU, Choi WJ, Ahn JY, Lee MH, Kang HJ, Park SM, Seo SJ, Jung DH, Hyun JK, Park JS, Hwang TK, Hong YD, Hong JH, Shin HJ. 2015. Characteristics of Particulate Carbon in the Ambient Air in the Korean Peninsula, Korean J. of Atmos. Environ., 31(4), 330-344.
- Lim SH, Lee MH, Kang KS. 2010. Seasonal Variations of OC and EC in PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{1.0} at Gosan Superstation on Jeju Island, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 26(5), 567-580.
- Lin JJ, Tai HS. 2001. Concentrations and distributions of carbonaceous species in ambient particles in Kaohsiung city, Taiwan, Atmos. Environ., 35, 2627-2636.
- Mader BT, Schauer JJ, Seinfeld JH, Flagan RC, Yu JZ, Yang H, Lim HJ, Turpin BJ, Deminter JT, Heidemann G, Bea MS, Quinn P, Bates T, Eatough DJ, Huebert BJ, Bertram T, Howell S. 2003. Sampling methods used for the collection of particle-phase organic and carbon during ACE-Asia, Atmos. Environ., 37(11), 1435-1449.
- Maria SF, Gilles MK, Myneni SCB. 2004. Organic aerosol growth mechanisms and their climate-forcing implications, Science, 306 (5703), 1921, doi:10.1126/science. 1103491.
- Ministry of Environment. 2014. Seoul Metropolitan Air Quality Improvement Measures, Its achievements and future, 1-49.
- Monks PS, Granier C, Fuzzi S, Stohl A, Williams ML, Akimoto H, Amann M, Baklanov A, Baltensperger U, Bey I, Blake N, Blake RS, Carslaw K, Cooper OR, Dentener F, Fowler D, Fragkou E, Frost GJ, Generoso S, Ginoux P, Grewe V, Guenther A, Hansson HC, Henne S, Hjorth J, Hofzumahaus A, Huntrieser H, Isaksen ISA, Jenkin ME, Kaiser J, Kanakidou M, Klimont Z, Kulmala M, Laj P, Lawrence MG, Lee JD, Liousse C, Maione M, McFiggans G, Metzger A, Mieville A, Moussiopoulos N, Orlando JJ, O'Dowd CD, Palmer PI, Parrish DD, Petzold A, Platt U, Poschl U, Prevot ASH, Reeves CE, Reimann S, Rudich Y, Sellegri K, Steinbrecher R, Simpson D, ten Brink H, Theloke J, van der Werf GR, Vautard R, Vestreng V, Vlachokostas C, von Glasow R. 2009. Atmospheric composition change-global and regional air quality, Atmos. Environ., 43(33), 5269-5350.
- Moon KJ, Park SM, Park JS, Song IH, Jang SK, Kim JC, Lee SJ. 2011. Chemical Characteristics and Source Apportionment of PM_{2.5} in Seoul Metropolitan Area in 2010, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 27(6), 711-722.
- Pang Y, Ren Y, Fida O, Robert H, Delbert E, William W. 2001. Semi-volatile species in PM_{2.5}: comparison of integrated and continuous samples for PM_{2.5} research or monitoring, J. Air Waste manage. Assoc., 51(1), 25-36.
- Park JS, Kim SD. 2005. The Characteristics of Secondary Carbonaceous Species within PM₁₀ and P_{M2.5} in Seoul and Incheon Area, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 21(1), 131-140.

- Park SS, Kim YJ, Fung K. 2002. PM_{2.5} carbon measurement in two urban areas: Seoul and Kwangju, Korea, *Atmos. Environ.*, 36, 1287-1297.
- Raes F, Bates T, McGovern F, van Liedekerke M. 2000. The 2nd Aerosol Characterization Experiment(ACE-2): general overview and main results, *Tellus B.*, 52, 111-125.
- Ramanathan V, Carmichael G. 2008. Global and regional climate changes due to black carbon, *Nature Geoscience*, 1, 221-227.
- Rattigan O, Felton H, Bae M, Schwab J, Demerjian K. 2010. Multi-year hourly PM_{2.5} carbon measurements in New York: Diurnal, day of week and seasonal patterns, *Atmos. Environ.*, 44, 2043-2053.
- Russell LM, Maria SF, Myneni SCB. 2002. Mapping organic coatings on atmospheric particles, *Geophys. Res. Lett.*, 29(16), 1779, doi: 10.1029/2002GL014874.
- Salma I, Chi X, Maenhaut W. 2004. Elemental and organic carbon in urban canyon and background environments in Budapest, Hungary, *Atmos. Environ.*, 38, 27-36.
- Schmidt M, Noack A. 2000. Black carbon in soils and sediments: analysis, distribution, implications, and current challenges, *Global Biogeochem. Cycles*, 14(3), 777-793.
- Solomon P, Baumann K, Edgerton E, Tanner R, Eatiugh D, Modey W, Marin H, Savoie D, Natarajan S, Meyer MB, Norris G. 2003. Comparison of integrated samplers for mass and composition during the 1999 Atlanta Supersites project, *J. Geophys. Res.*, 108(D7), 8423, doi:10.1029/2001JD001218.
- Streets DG, Gupta S, Waldhoff ST, Wang MQ, Bond TC, Yiyun B. 2001. Black carbon emissions in China, *Atmos. Environ.*, 35(25), 4281-4296.
- Streets DG, Bond TC, Carmichael GR, Fernandes SD, Fu Q, He D, Kilmont Z, Nelson SM, Tsai NY, Wang MQ, Woo JH, Yarber KF. 2003. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000, *Geophys. Res.*, 108(D21), 8809, doi:10.1029/2002JD003093.
- Szidat S, Ruff M, Perron N, Wacker L, Synal HA, Hallqisit M, Shannigrahi AS, Yttri KE, Dye C, Simpson D. 2009. Fossil and non-fossil sources of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) in Goteborg, Sweden, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 1521-1535.
- Viana M, Maenhaut W, ten Brink HH, Chi X, Weijers E, Querol X, Alastuey A, Mikuška P, Veeršinka Z. 2007. Comparative analysis of organic and elemental carbon concentrations in carbonaceous aerosols in three European cities, *Atmos. Environ.*, 41(28), 5972-5983.
- Watson JG, Chow JC, Lowenthal DH, Pritchett LC, Frazier CA. 1994. Differences in the carbon composition of source profiles for Diesel- and Gasoline-powered vehicles, *Atmos. Environ.*, 28(15), 2493-2505.
- Yang F, He K, Ye B, Chen X, Cha L, Cadle SH, Chan T, Mulawa PA. 2005. One-Year record of organic and elemental carbon in fine particles in downtown Beijing and Shanghai, *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 1449-1457.
- Yu XY, Cary RA, Laulainen NS. 2009. Primary and secondary organic carbon downwind of Mexico City, *Atmos. Chem. Phys.*, 9(18), 6793-6814.