

한반도 권역별 대기 중 입자상 탄소 특성 연구

Characteristics of Particulate Carbon in the Ambient Air in the Korean Peninsula

이영재 · 박미경 · 정선아 · 김선정 · 조미라 · 송인호 · 유영숙 · 임용재 · 김정훈
정해진 · 이상욱 · 최원준 · 안준영 · 이민희 · 강현정 · 박승명 · 서석준 · 정동희
현주경 · 박종성 · 황태경 · 홍유덕 · 홍지형 · 신혜정*

국립환경과학원 기후대기연구부 대기환경연구과

(2015년 5월 26일 접수, 2015년 7월 10일 수정, 2015년 7월 24일 채택)

Yeong-jae Lee, Mi-kyung Park, Sun-a Jung, Sun-jung Kim, Mi-ra Jo, In-ho Song,
Young-sook Lyu, Yong-jae Lim, Jung-hoon Kim, Hae-jin Jung, Sang-uk Lee,
Won-Jun Choi, Joon-young Ahn, Min-hee Lee, Hyun-jung Kang, Seung-myeong Park,
Seok-jun Seo, Dong-hee Jung, Joo-kyeong Hyun, Jong-sung Park, Tae-kyung Hwang,
You-deog Hong, Ji-hyung Hong and Hye-jung Shin*

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

(Received 26 May 2015, revised 10 July 2015, accepted 24 July 2015)

Abstract

Semi-continuous measurements of $PM_{2.5}$ mass, organic and elemental carbon were made for the period of January to October 2014, at six national air monitoring stations in Korea. OC and EC concentrations showed a clear seasonal variation with the highest in winter (January) and the lowest in summer (August). In winter, the high carbonaceous concentrations were likely influenced by increased fuel combustion from residential heating. OC and EC concentrations varied by monitoring stations with 5.9 and 1.7 $\mu g/m^3$ in Joongbu area, 4.2 and 1.2 $\mu g/m^3$ in Honam area, 4.0 and 1.3 $\mu g/m^3$ in Yeongnam area, 3.7 and 1.6 $\mu g/m^3$ in Seoul Metropolitan area, 3.0 and 0.8 $\mu g/m^3$ in Jeju Island, 2.9 and 0.7 $\mu g/m^3$ in Baengnyeong Island respectively. The concentrations of OC and EC comprised 9.6 ~ 15.5% and 2.4 ~ 4.7% of $PM_{2.5}$. Urban Joongbu area located adjacent to the intersection of several main roads showed the highest carbon concentration among six national air monitoring station. On the other hand, background Baengnyeong Island showed the lowest carbon concentration and the highest OC/EC ratio (4.5).

During the haze episode, OC and EC were enhanced with increase in $PM_{2.5}$ about 1.3 ~ 3 and 1.3 ~ 4.0 times respectively. The concentrations of OC, EC in the Asian dust case are about 1 ~ 2.4 times greater than in the non-dust case.

The origins of air mass pathways arriving at Seoul, using the backward trajectory analysis, can be mostly classi-

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-3157-0372, E-mail : shjoung@korea.kr

fied into 6 groups (Sector I Northern Korea including the sea of Okhotsk, Sector II Northern China including Mongolia, Sector III Southern China, Sector IV South Pacific area, Sector V Japan, Sector VI Southern Korea area). When an air mass originating from northern China and Mongolia, the OC concentrations were the most elevated, with a higher OC/EC ratio (2.4 ~ 3.3), and accounting for 17% of $PM_{2.5}$ mass on average.

Key words : Organic carbon (OC), Elemental carbon (EC), Carbon percentage

1. 서 론

대기 중 $PM_{2.5}$ 의 주요 구성성분은 이온, 탄소, 중금속 등이며, 탄소성분의 기여율은 지역별로 다르지만 약 10~47%인 것으로 보고되고 있다(NIER, 2013a). 탄소 입자는 유기탄소(Organic carbon, OC)와 원소탄소(Element Carbon, EC)로 이루어져 있다. 유기탄소는 화석 연료, 산업공정, 생물성 연소 등 다양한 배출원에서 배출되며 다환방향족탄화수소(PAHs)를 포함한 여러 종류의 유기물이 혼합되어 있는 형태로 인체에 유해한 영향을 미친다(Yang *et al.*, 2005). 원소탄소는 화석 연료와 생체 소각 등 불완전 연소로부터 직접 배출되며 비휘발성과 빛을 흡수하는 성질로 인하여 지구 온난화에 기여한다. 또한 원소탄소는 일차 대기오염의 지시자 역할을 하며 유기탄소는 대기 중 광화학반응을 통하여 이차 유기탄소(Secondary Organic Carbon)로 변환되기도 한다(Ramanathan and Carmichael, 2008). 미세먼지 저감을 위해서는 $PM_{2.5}$ 농도뿐만 아니라 이온, 탄소성분 등 구성성분의 특성 및 발생원을 규명하는 과정이 필요하다. 그간 탄소성분에 관한 연구는 유기탄소와 원소탄소에 관한 정량적인 연구(Bae *et al.*, 2013)를 중심으로 이루어졌고, Lee *et al.* (2009)은 PMF 모델을 이용하여 탄소성분을 열적 검출 특성(OC1, OC2, OC3, OC4, EC1, EC2, EC3)에 따라 분리 분석하여 배출원을 추정하기도 하였다. Park *et al.* (2014)은 PILS (the Particle Into Liquid Sampler)를 이용하여 유기탄소를 수용성유기탄소(Water-soluble organic carbon, WSOC)와 불용성유기탄소(Water-insoluble organic carbon, WISOC)로 나누어 연구하였다.

최근 중국의 급속한 경제발전은 풍하 방향에 위치한 우리나라의 미세먼지 증가에 영향을 주고 있으며 연무와 박무를 동반한 미세먼지 고농도 사례와 황사 시 미세먼지의 증가현상은 이와 무관하지 않다(NIER

2013b). 이를 규명하기 위해 공기궤적의 이동경로에 따른 미세먼지농도의 변동 특성에 관한 연구들이 진행되어 왔다. Han *et al.* (2013)은 황사 사례와 연무와 황사가 동시에 발생한 사례에 대해 탄소의 농도는 장거리 수송 시 인위적 배출의 영향이 더해졌을 가능성을 암시하였고, Lim *et al.* (2010)은 시베리아 지역 생체연소 영향을 받은 공기가 북경 근처를 경유하여 우리나라로 유입된 후 유기탄소의 농도가 증가하였다는 결과를 보고하였다.

본 연구에서는 환경부 국립환경과학원에서 구축하여 운영 중인 백령도, 수도권, 중부권, 호남권, 영남권, 제주도의 6개 권역별 대기오염집중측정소에서 측정된 $PM_{2.5}$ 질량농도와 $PM_{2.5}$ 내 유기탄소와 무기탄소의 특성을 파악하였다. 열광학적분석법으로 측정한 유기탄소 및 원소탄소의 시간적 변동 특성과 고농도 및 황사 사례 시 권역별 탄소성분 특성을 분석하였다. 또한 탄소성분의 공간적 변동 특성을 조사하여 우리나라 미세먼지 저감정책의 기초자료를 확보하였으며 수도권 대기질의 중요성을 감안하여 수도권지역 고농도 사례 시 유입 기류별 탄소성분의 특성을 상세 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1 측정 지점

한반도 권역별 탄소성분 분석은 그림 1의 수도권(SMA, Seoul Metropolitan Area, 불광동), 중부권(JA, Joongbu Area, 대전 문화동), 호남권(HA, Honam Area, 광주 오룡동), 백령도(BI, Baengnyeong Island, 인천 백령면 연화리), 제주도(JI, Jeju Island, 제주 애월읍), 영남권(YA, Yeongnam Area, 울산 성안동)에 설치되어있는 대기오염집중측정소에서 수행하였다. 권역별 대기오염집중측정소의 특징은 다음과 같다. 백령도와 제주도 대기오염집중측정소는 국가 배경지역의 대기질을

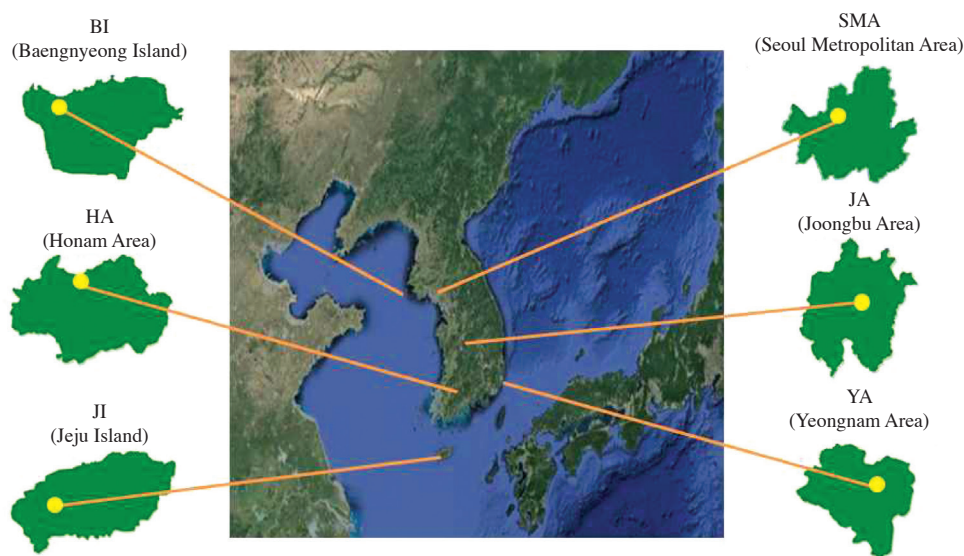


Fig. 1. Sampling locations of intensive atmospheric monitoring station.

파악하고 중국, 몽골 등 외부로부터 유입되는 장거리 이동 오염물질을 감시하는 등 우리나라 서해안지역 배경농도를 조사할 목적으로 운영하고 있다. 백령도 대기오염집중측정소는 우리나라 최서북단에 위치하고 있으며, 서울을 중심으로 서쪽으로 200 km 떨어져 있으며, 중국의 동해안으로부터 약 194 km에 위치하고 있어 중국의 영향을 직접 받으며 내부 배출원에 의한 영향은 거의 없는 지점이다. 제주도 대기오염집중측정소는 제주도 한라산 서쪽 산간지대(해발고도 600 m)에 위치하고 있고 북서쪽 해안으로부터 약 14 km 떨어져 있다. 측정소 서쪽 약 2.7 km, 남쪽 약 1.9 km에 각각 남북과 동서를 가로지르는 도로가 있고, 측정소 주변에 자체오염원이 없어 제주 측정소도 내부 배출원에 의한 영향은 거의 없는 지점이다. 수도권 대기오염집중측정소는 서울시 북서쪽 경계지점에 위치하고 있으며 측정소 북동쪽에는 북한산이 있고, 서쪽 270 m 지점, 남쪽 90 m 지점에 각각 도로가 있고, 측정소 주변은 주택가와 상가 등이 밀집해 있어 전형적인 도심지역을 대표하는 지점이다. 중부권 대기오염집중측정소(도로변)는 대전시 도심 남쪽에 위치하고 있고 주거 및 상업지역으로 둘러싸여 있으며, 왕복 6차선 교차로와 인접해 있어 도심지내 교통량의 영향을 파악하기 적합한 지점이다. 영남권 대기오염집중측정소는 동해안으로부

터 12 km 떨어져있고, 남쪽 약 10 km 거리에 석유화학 및 자동차 공업 단지가 위치하고 있다. 겨울철은 육풍의 영향으로 북서풍이 주풍향이며 여름철은 해풍으로 남동풍의 영향을 받고 있어 우리나라 내륙 지방 대기질 변화 특성 및 공업단지의 특성 파악이 가능한 지점이다. 호남권 대기오염집중측정소는 광주시의 도심 북쪽 끝에 위치하고 동쪽과 북쪽은 교외지역으로 농업지대와 산으로 둘러싸여 있고, 서쪽 약 2 km에 호남고속도로와 조립 금속, 비금속, 화학, 식품업종으로 구성되어 있는 약 600만 m²의 하남산업단지가 위치하고 있으며, 남쪽은 도심지역으로 구성되어 있어 농경지와 도시의 특성을 혼합적으로 파악할 수 있는 지점이다.

2.2 측정 방법

2.2.1 입자상 물질(PM_{2.5}, PM₁₀) 분석

권역별 대기오염집중측정소에서 2014년 1월부터 10월까지 입자상 물질(PM_{2.5}, PM₁₀)의 질량농도를 매시간 측정하였다. PM_{2.5}, PM₁₀ 질량농도를 측정하기 위하여 Met-One사의 BAM1020 장비를 이용하였다. 장비 내 ¹⁴C beta-ray 붕괴로부터 발산된 beta particle의 흡수 차이를 Lambert-Beers 법칙을 이용하여 입자의 질량 농도로 산출하는 beta-ray 흡수법으로 입자상 농도를 측정하였다. PM_{2.5} VSCC (Very Sharp Cut Cyclone)를 사

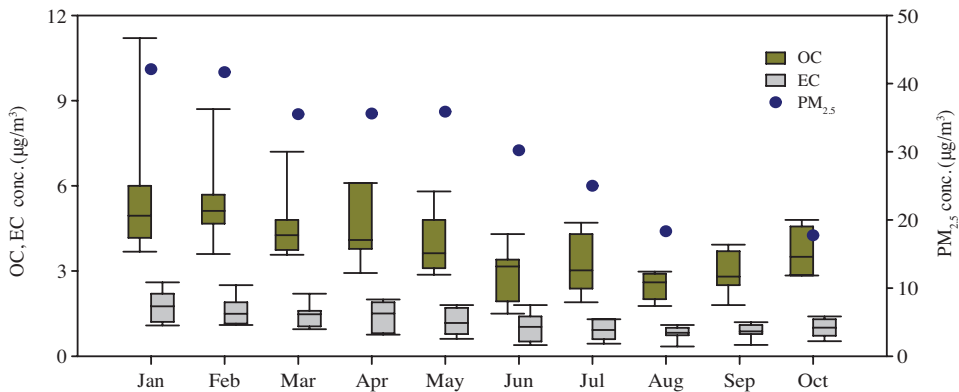


Fig. 2. Monthly variations of OC and EC concentrations.

용하여 16.7 L/min의 유량으로 42분간 유리섬유(Glass Fiber) 필터에 시료채취 후 8분간의 전·후의 Beta count 값을 측정한다. 측정 범위는 4.8~1000 µg/m³이며 분석 시 35%의 최적 상대습도를 유지하기 위해 유입부의 스마트히터 및 밴드히터가 작동된다.

2. 2. 2 탄소성분 분석 및 정도관리

탄소성분 자동측정기(Semi-continuous OC/EC carbon aerosol analyzer, Sunset Laboratory)로 PM_{2.5} 중 유기탄소와 원소탄소를 1시간 단위로 측정하였다. NIOSH protocol을 기초로 열광학적 분석법(Thermal/Optical transmittance method)과 비분산적외선분석법(Non-dispersive infrared method)을 이용하였다. 대기 중 입자상물질을 PM_{2.5} 인렛을 통해 8 L/min의 유량으로 석영 필터에 45분간 채취하고, NIOSH protocol을 적용하여 15분간 분석하였다. 유기탄소 분석을 위해 필터에 채취된 시료에 헬륨가스를 주입하여 오븐에서 840°C 까지 가열하여 휘발시키고, 휘발된 유기탄소는 산화오븐으로 이동되어 이산화탄소로 산화된다. 이산화탄소는 즉시 비분산 적외선 검출기에 의해 탄소농도로 측정된다. 유기탄소 분석 후 오븐은 550°C로 냉각되고 10% 산소가스(balance 90% He)를 주입하여 남아있는 원소탄소를 필터에서 산화시킨 후 유기탄소와 같은 방법으로 검출한다. 이때 레이저의 초기 투과도 값에 도달하는 지점을 원소탄소와 유기탄소의 분리지점(Split)으로 정의하며 유기탄소와 원소탄소로 구분되어 측정치에 자동 반영된다. 원소탄소 분석이 끝나면 내부표준물질인 5% 메탄가스(balance 95% He)를 사용하여

자동교정을 한다. 유기탄소는 Sucrose (4.207 µg/mL) 용액을 이용하여 교정하였으며, 분석의 검출한계는 0.4 µg/m³이다. 유기탄소와 원소탄소의 공시료(blank) 값은 각각 Hepa capsule filter (TSI Co.)를 시료유입부에 장착하여 미세먼지를 제거한 후 12시간 이상 측정된 값으로 보정하였고 자세한 분석방법은 Lee *et al.* (2014)과 같다.

3. 결과 및 고찰

3. 1 권역별 탄소성분 분포 특성

3. 1. 1 시공간적 농도분포 특성

6개 권역별 탄소 및 PM_{2.5} 평균농도를 그림 2에 제시하였다. 9월 PM_{2.5} 평균값은 측정기 정도관리로 인해 본 자료에는 수록하지 않았다. 유기탄소의 농도는 PM_{2.5} 농도와 유사한 경향이었다. 유기탄소의 평균농도는 1월 5.8±2.8 µg/m³, 2월 5.5±1.7 µg/m³로 겨울철에 가장 높게 나타났다. 겨울철은 황사 및 연무와 박무를 동반한 미세먼지 고농도 현상 및 국내·외 난방사용의 증가, 불특정 다수의 노천소각 등으로 탄소농도가 증가한 것으로 판단된다. 봄철에는 3월 4.6±1.3 µg/m³, 4월 4.5±1.3 µg/m³, 5월 4.0±1.1 µg/m³이었고, 여름철은 6월 2.9±1.0 µg/m³, 7월 3.2±1.1 µg/m³, 8월 2.5±0.5 µg/m³로 가장 낮은 농도를 보였다. 여름철의 경우 잦은 강우, 난방의 감소 등으로 인해 전반적으로 농도가 낮아진 것으로 판단되어지나, 7월의 경우 이례적으로 미

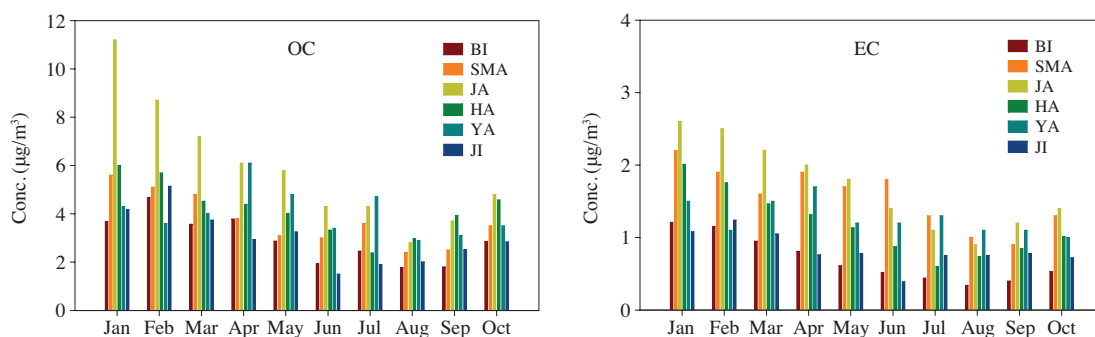


Fig. 3. Monthly variations of OC and EC concentrations at 6 sites.

세먼지 고농도 현상이 수도권권을 기준으로 8회가 발생하였고 강한 광화학 반응에 의한 유기탄소의 생성 등의 영향으로 고농도의 유기탄소가 관측되었다. 가을철은 9월 $2.9 \pm 0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 10월 $3.7 \pm 0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 원소탄소의 평균농도도 겨울철인 1월($1.8 \pm 0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 2월($1.6 \pm 0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)의 농도가 가장 높았고, 여름철인 8월($0.8 \pm 0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 9월($0.9 \pm 0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$)의 농도가 가장 낮았다.

권역별 탄소성분 농도를 살펴보면 유기탄소의 경우 중부권 5.9, 호남권 4.2, 영남권 4.0, 수도권 3.7, 제주도 3.0, 백령도 $2.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 중부권(도로변)이 가장 높고 백령도가 낮았다(그림 3). 자동차와 인구가 많은 수도권의 유기탄소 농도가 높을 것으로 예상하였으나 특히 겨울에 중부권의 농도가 두드러지게 높게 나타났다. 이는 중부권의 측정지점이 도심의 도로변에 위치하고 있어 자동차의 영향과 주변의 아파트 등 주거지역, 식당가 등에서 배출된 유기탄소의 영향을 직접 받기 때문인 것으로 판단된다. 권역별 월변동 특성을 살펴보면 7월과 8월의 경우 유기탄소 농도는 중부권($4.3, 2.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 영남권($4.7, 2.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이 더 높게 나타났다. 이는 영남권측정소의 위치가 울산시의 북쪽에 위치하여 있으며 여름철 주풍향인 남동풍에 의해 울산 동쪽 해안에 위치한 중공업단지, 남쪽의 미포국가산업단지, 용연 공업단지, 석유화학단지 그리고 울산 시내를 경유하는 기류의 영향을 많이 받기 때문인 것으로 판단된다(그림 5a).

원소탄소의 농도는 중부권(도로변) 1.7, 수도권 1.6, 영남권 1.3, 호남권 1.2, 제주도 0.8, 백령도 $0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 중부권과 수도권이 가장 높고 백령도와 제주도가 가장

Table 1. OC/EC ratios and percentage contribution of OC, EC in $\text{PM}_{2.5}$ at 6 sites.

Site	OC (%)	EC (%)	OC/EC	$\text{PM}_{2.5} (\mu\text{g}/\text{m}^3)$
BI	10.0	2.4	4.5	29
SMA	9.6	4.0	2.4	39
JA	15.5	4.5	3.4	38
HA	12.6	3.6	3.8	33
YA	14.9	4.7	3.2	27
JI	14.1	3.9	3.6	21

낮았다. 교통량이 많은 수도권과 도로변의 영향을 강하게 받는 중부권이 1차적인 배출에 의한 영향을 나타내는 원소탄소의 농도가 가장 높게 나타났다. 백령도와 제주도는 다른 측정지점과 달리 상대적으로 1차 오염원이 없어서 농도가 상대적으로 다른 지점보다 낮은 것으로 판단된다. 원소탄소의 월별 농도도 7월과 8월에 영남권 $1.3, 1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 수도권($1.3, 1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 중부권($1.1, 0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 호남권($0.6, 0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 제주도($0.7, 0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 백령도($0.4, 0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 높았다. 영남권의 경우 여름철에 공단지역으로부터 영향을 강하게 받고 있음을 알 수 있다.

3. 1. 2 유기탄소와 원소탄소 비율

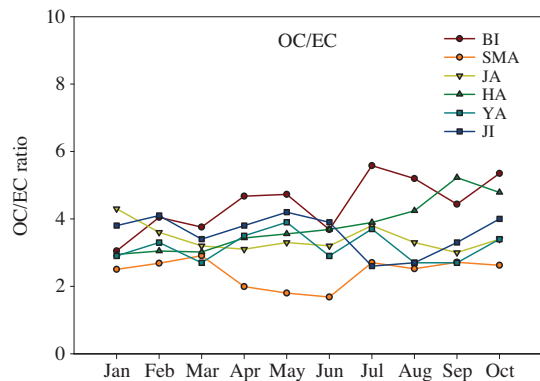
$\text{PM}_{2.5}$ 중 유기탄소가 차지하는 비율은 9.6~15.5%이고, 원소탄소의 비율은 2.4~4.7%이었다. 권역별 유기탄소와 원소탄소의 비율(OC/EC 비율)은 2.4~4.5 이었다(표 1). 각 권역별 유기탄소와 원소탄소의 비율은 중부권(도로변)이 15.5, 4.5%로 가장 높고 수도권이 9.6, 4.0%로 가장 낮았다. OC/EC 비율은 1차 배출원이 거의 없는 백령도가 4.5로 가장 높고, 교통량이 많은

Table 2. Literature values of OC/EC ratios and OC, EC concentrations for overseas stations.

Sampling site	OC/EC ratio	OC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	EC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Sampling period	Reference
This study	3.5	4.0	1.2	'14.1 ~ 10	—
China (Xiamen)	6.2	12.9	2.2	'09.4	Zhang <i>et al.</i> (2011)
China (Beijing)	2.9	16.9	5.9	'02.1 ~ '03.7	Feng <i>et al.</i> (2006)
China (Taiuan)	7.0	28.9	4.8	'05.12 ~ 06.2	Meng <i>et al.</i> (2007)
Belgium (Ghent)	4.1	4.1	1.0	'04.1 ~ '05.2	Viana <i>et al.</i> (2007)
Netherlands (Amsterdam)	2.9	5.3	1.8	'05.7 ~ '06.2	Viana <i>et al.</i> (2007)
Italy (Milan)	6.6	9.2	1.4	'02.8 ~ '03.12	Lonati <i>et al.</i> (2007)
Hungary (Budapest)	2.1	6.8	3.3	'02.4 ~ '02.5	Salma <i>et al.</i> (2004)

수도권은 1차 배출된 원소탄소의 농도가 높아 가장 낮게 나타났다. 대기 중에 배출되거나 생성된 탄소성분은 계절에 따라 지역별로 일정한 비율을 갖게 되며, OC/EC 비율은 주로 대도시는 낮고 교외 지역은 높게 나타난다. 선행연구에 따르면(표 2) 중국의 베이징 2.9 (Feng *et al.*, 2006), 네덜란드의 Amsterdam 2.9 (Viana *et al.*, 2007), 헝가리의 Budapest 3.1 (Salma *et al.*, 2004)과 같은 대도시 지역의 경우 우리나라 수도권, 중부권, 영남권 등과 유사한 OC/EC 비율을 나타내었다. 반면, 중국의 Xiamen 6.2 (Zhang *et al.*, 2011), Taiuan 7.0 (Meng *et al.*, 2007), 벨기에 Ghent 4.1 (Viana *et al.*, 2007), 이태리 Milan 6.6 (Lonati *et al.*, 2007)과 같은 교외지역의 측정결과는 최대 OC/EC 비율을 나타낸 백령도(4.5)보다 높은 결과를 보였다.

대기 중 원소탄소는 주로 연소발생원에서 대기 중으로 직접 배출되는 화석연료의 사용 특히 자동차 연소 배출물질과 관련이 깊고, 또한 식물의 탄소동화작용, 생물성 연소 등과 같은 1차 오염물질이 대부분이다 (Harrison and Grieken, 1998). 유기탄소는 고기구가 (Kang *et al.*, 2014), 농업잔재물 소각(Kim *et al.*, 2015) 등 연소 과정에 의해서 배출되는 입자 외에도 대기 중에서 광화학 반응에 의해서 2차적으로 생성되기도 한다. Turpin and Huntzicker (1995)는 OC/EC 비율이 2.5 이상일 때, Chow *et al.* (1996)은 2.0 이상일 때 각각 2차적으로 생성된 유기탄소가 영향을 주었을 것이라고 보고하고 있으나 이는 지역에 따라 다를 수 있다. 탄소 성분만을 고려하면 유기탄소는 백령도(81.2%) > 제주도(78.3%) > 호남권(78.1%) > 중부권(77.5%) > 영남권(76.1%) > 수도권(70.6%) 순이었고, 원소탄소는 수도권(29.4%) > 영남권(23.9%) > 중부권(22.5%) > 호남권(21.9%) > 제주도(21.7%) > 백령도(18.8%) 순으로 높

**Fig. 4. Monthly variations of OC/EC ratios.**

았다. 백령도와 제주도의 OC/EC 비율이 높은 것은 1차 오염원인 유기탄소가 낮고(그림 3), 국내·외에서 장거리 유입된 2차 유기탄소의 영향이 크기 때문인 것으로 사료된다. 선행연구에 따르면 제주도의 경우 1차 오염원보다 장거리 이동 오염물질의 영향을 강하게 받고 있는 것으로 보고되고 있으며(Han *et al.*, 2013; Lim *et al.*, 2010), 이러한 결과는 본 연구에서의 제주도의 높은 OC/EC 비율을 잘 뒷받침해 주고 있다.

권역별 OC/EC 비의 월별 변화는 그림 4와 같다. 지역별 특성은 다소 차이가 있으나 주로 겨울과 봄에는 원소탄소의 농도 증가로 인해 낮은 OC/EC 비율을 보인 반면 여름과 가을에는 OC/EC 비가 증가하였다(그림 2). 특히 백령도의 경우 7월과 8월에 OC/EC 비가 증가하였다. 백령도의 경우 주로 동풍이나 서풍계열의 강한 바람이 불 때 유기탄소와 원소탄소의 농도가 증가하는 경향을 나타내며(그림 5), 특히 여름철 농도증가는 장거리 이동으로 유입된 2차 생성 유기탄소의 영향을 받은 것으로 추정된다. 수도권의 경우 OC/EC 비

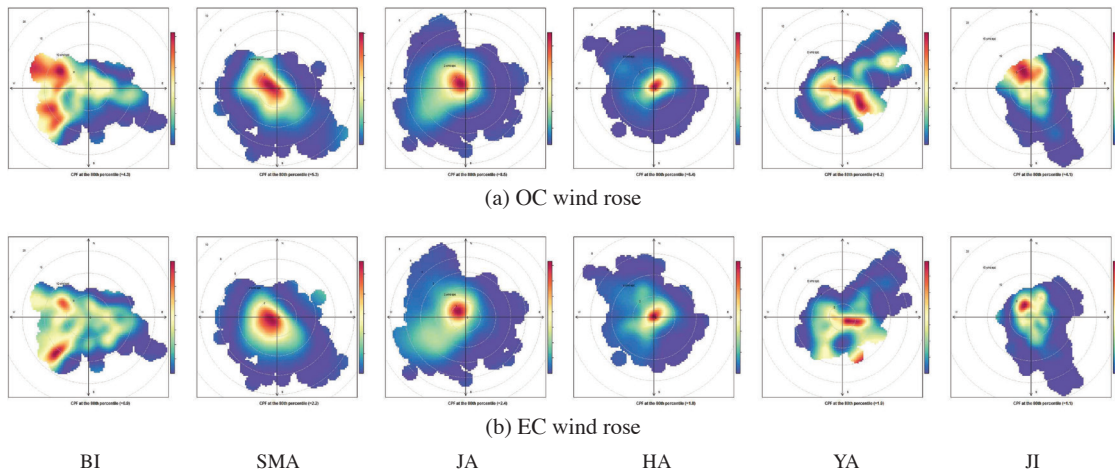


Fig. 5. Wind rose during the sampling period of OC (a) and EC (b) in 2014.

울은 4월(2.0), 5월(1.8), 6월(1.7)에 원소탄소의 농도 증가로 인해 상대적으로 낮았다(그림 3). 중부권(도로변)과 영남권은 월별 OC/EC의 비율이 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. 이는 중부권 측정소는 도로변에 위치하여 자동차의 영향을 직접 받고, 영남권의 경우는 울산 시내에 위치한 공단지역과 이를 왕래하는 자동차 등에서 배출된 원소탄소의 농도가 탄소농도를 주도하기 때문인 것으로 사료된다. 제주도의 경우 OC/EC 비율이 7월 2.6, 8월 2.7로 다른 월보다 낮았다. 이는 7월과 8월의 경우 남풍과 동남풍의 해풍이 우세하여 아시아 대륙으로부터의 장거리 이동의 영향이 줄었기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 이 기간의 유기탄소의 농도는 $1.9, 2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 원소탄소의 농도는 $0.8, 0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 유기탄소보다 원소탄소의 농도가 상대적으로 증가한 것도 여름철 OC/EC 비율의 증가 원인인 것으로 판단된다. 이와 더불어 여름철 휴가기간의 관광수요 증대로 인한 자동차 통행량이 증가하여 여름철 제주도의 원소탄소 증가에 기여하였을 것으로 추정된다.

권역별 원소탄소와 유기탄소의 오염원을 추정하기 위해서 오염장미도를 확인한 결과 대부분의 권역에서 북서풍 계열에서 탄소의 농도가 증가하는 경향이 유사하였다. 백령도의 경우 유기탄소는 남서풍에서 북서풍 계열의 강한 풍속이 불 때 농도가 높고, 원소탄소의 경우 서풍 계열뿐만 아니라 동풍 계열의 강한 풍속이 불 때 농도가 높은 것으로 나타나 백령도의 경우 내부적

인 배출보다는 주로 중국이나 우리나라 내륙의 탄소성분의 장거리 이동에 의한 영향을 많이 받는 것으로 판단된다. 수도권의 경우 국지적인 영향과 함께 도심의 중심을 통과한 남동풍과 중국대륙을 거쳐 온 북서풍의 영향이 있을 때 농도가 증가하였다. 중부권의 경우 도로변에 인접하게 위치하고 있어 국지적인 영향이 강하게 나타나는 특성을 보였으나 타 권역과 마찬가지로 서풍계열의 강한 바람이 불어올 때 농도가 증가하는 경향을 보여 장거리 이동의 영향도 받고 있음을 보여주었다. 영남권의 경우 타 지역과 상이하게 남동풍 계열에서 풍향일 때 높은 탄소성분 농도를 나타내어 측정소 남동쪽의 석유화학 및 자동차 산업단지의 영향을 강하게 받는 것으로 유추할 수 있다. 오염장미도로 분석한 배출원 추정 결과는 앞서 분석한 OC/EC 비율의 특성과 유사한 결과를 나타내었다.

3.2 권역별 고농도 사례 시 탄소성분 특성 분석

3.2.1 장거리 이동 고농도 사례 시 탄소성분 특성

2014년 2월 21일 ~ 3월 1일까지 발생한 미세먼지 고농도 사례결과를 그림 6에 제시하였다. 백령도부터 영향을 받은 본 사례는 수도권, 중부권(도로변), 호남권을 거쳐 영남권과 제주도에 영향을 준 후 한반도를 지나갔다. Shin *et al.* (2014)에 따르면 본 고농도 사례는 중국에서 장거리 이동한 오염물질이 한반도로 유입되었

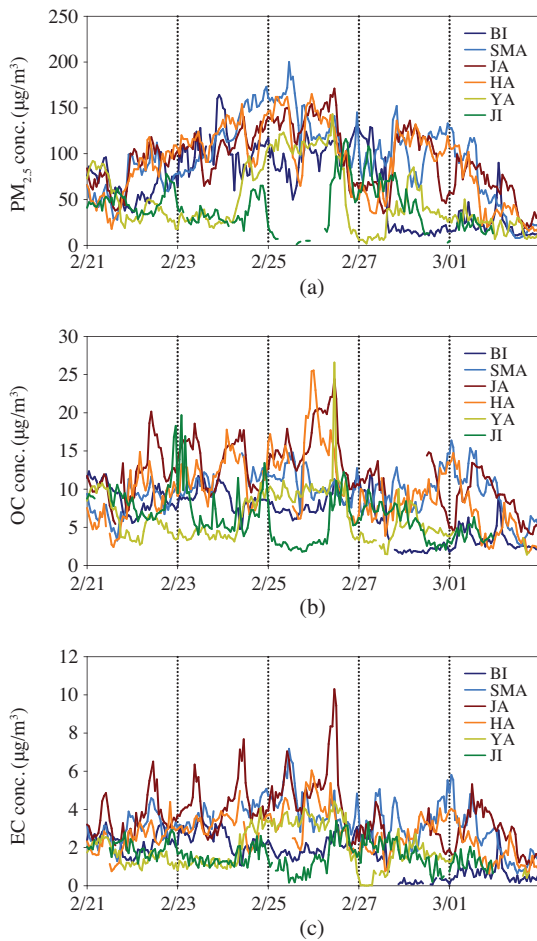


Fig. 6. Variations of $PM_{2.5}$ (a), OC (b), EC (c) during the haze episode.

고 27일 이후에는 국내에서 기류 정체로 인하여 10일 이상 고농도가 지속한 사례이다. 사례기간 중 $PM_{2.5}$ 는 25일 11시 수도권에서 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최고농도를 보였고, 유기탄소는 영남권에서 26일 11시 $26.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 원소탄소는 중부권에서 26일 11시 $4.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최고농도를 기록하였다. 탄소 농도는 $PM_{2.5}$ 와 유사한 농도변동을 보였으며(그림 6a), 측정지점별 $PM_{2.5}$ 와 탄소 농도의 상관계수는 유기탄소 $0.64 \sim 0.88$, 원소탄소 $0.80 \sim 0.91$ 로 유기탄소보다 원소탄소와의 상관계수가 높게 나타났다. 유기탄소는 26일 호남권(00시, $25.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 중부권(11시, $24.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 영남권(11시, $26.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에서 최대농도를 보였으나, 제주도는 고농도가 시작되는

23일에 최고농도가 나타났고, 수도권은 기류가 국내에서 정체하기 시작한 27일 이후인 3월 1일 01시에 외부 유입과 국내 배출의 영향이 더해져 $16.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최고농도를 기록하였다(그림 6b).

원소탄소의 최고농도는 백령도에서 2월 23일 13시 $3.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 제주도 27일 12시 $3.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 각각 나타났다. 백령도와 제주도의 경우는 에피소드 기간 동안 일정하게 고농도 현상을 보이다가 기류의 국내정체 시 농도가 다소 감소한 반면 다른 지역은 고농도 현상이 시작되면서 높아진 농도가 수도권 25일 12시 $6.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 중부권(도로변) 26일 11시 $10.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 호남권 25일 23시 $6.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 정점을 보이고 국내 체류기간에도 계속되었다. 반면 영남권에서는 다른 지역보다 다소 늦은 24일 오후부터 고농도가 시작되어 26일 11시 $4.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최대치를 보인 후 국내체류 기간까지 높은 농도를 유지한 후 낮아졌다. 중부권의 경우에는 사례기간 동안 오전에 농도 피크가 발생하는 특성을 보였는데(그림 6c) 이는 대기가 정체하면서 러시아워에 자동차 등에서 발생한 원소탄소의 영향을 받은 것으로 판단된다. 타 측정소와 달리 국내 정체 시 농도가 감소한 백령도와 제주도의 경우 앞서 분석한 결과와 동일하게 자체 배출원에 의한 영향이 타 지역보다 작기 때문인 것으로 판단된다. 또한 각 권역별, 성분별 상관관계 분석 결과 백령도의 경우 성분별 상관계수가 평균 0.90이고, 내륙에 위치한 수도권 등 4개 측정소의 경우 상관계수가 $0.83 \sim 0.89$, 제주의 경우 0.74로 나타나, 백령도를 거쳐 유입된 오염물질이 내륙을 거쳐 제주도까지 영향을 미치는 동안 내부적인 오염원 혹은 자체 배출의 영향을 받은 것으로 판단되었다.

그림 7은 고농도 사례 시와 평상시의 $PM_{2.5}$ 와 탄소 성분과의 관계를 보여주고 있다. 고농도 사례 시 $PM_{2.5}$ 는 전 권역에서 평상시보다 약 1.5~3.9배 증가하였으나, OC/EC 비는 $0.8 \sim 1.2$ 배로 평상시와 비슷하였다. 유기탄소는 평상시 권역별 평균농도인 $3.3 \sim 6.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 사례 시 $6.2 \sim 13.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 권역별로 1.3~3.0배 농도가 증가(수도권 3.0배, 호남권 2.7배, 백령도, 중부권, 영남권 1.9배, 제주도 1.3배)하였으나, 원소탄소는 평상시 평균농도 $0.8 \sim 1.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 사례 시 $1.7 \sim 4.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 권역별로 1.3~4.0배(중부권 4배, 수도권 3.7배, 호남권 3배, 영남권 2배, 백령도 1.8배, 제주도 1.3배) 증가하였다.

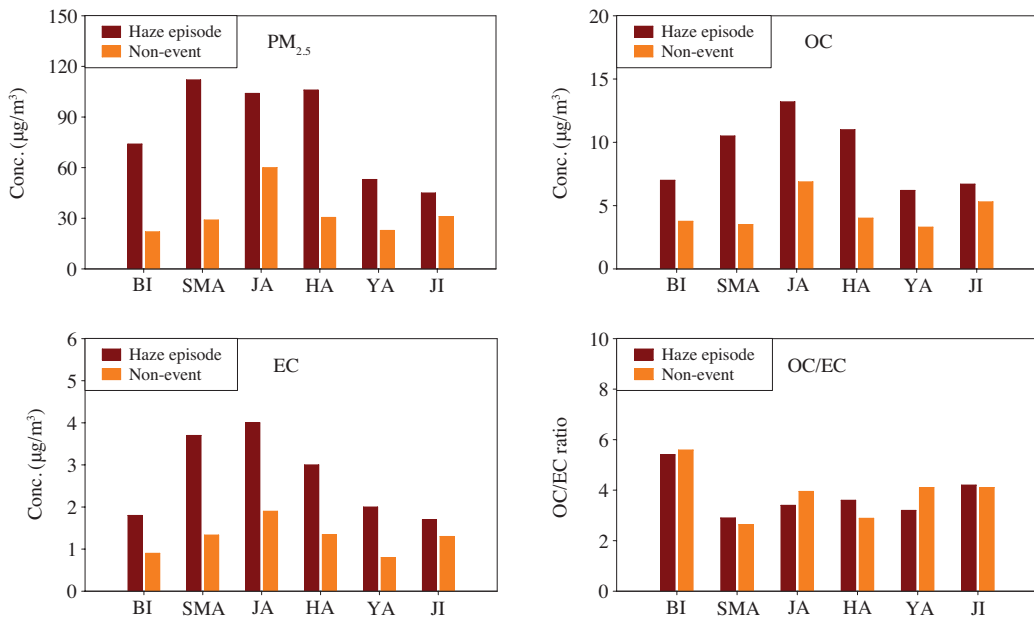


Fig. 7. Comparisons between haze episode and non-event of $PM_{2.5}$, OC, EC concentrations and OC/EC ratio.

3. 2. 2 황사 사례 시 탄소성분 특성

고비사막에서 발생한 황사는 베이징과 텐진을 거쳐 2014년 5월 26일 국내에 유입되기 시작하였다(그림 8). PM_{10} 기준으로 백령도부터 영향을 받기 시작하여 점차 수도권, 제주도, 중부권, 호남권, 영남권 순으로 확대되어 5월 30일까지 영향을 주었다(그림 9a). 유기탄소와 원소탄소의 농도는 황사에 의한 영향이 사라진 후 6월 1일까지 고농도가 지속된 후 감소하였다. 전 지역이 미세먼지 농도증가와 더불어 탄소농도가 상승하였다. 사례기간 동안 $PM_{2.5}$ 의 최대농도는 28일 백령도에서 $141 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 관측되었고(그림 9b), 수도권은 29일 $128 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 최대 농도를 보인 후 감소하였다. 사례기간 동안 유기탄소는 권역별로 9.2(중부권)~13.5(호남권) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 최고농도를 보였으며(그림 9c), 원소탄소는 권역별로 2.9(제주도)~5.1(중부권) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 최고 농도를 보인 후 전 권역에서 30일 오후부터 점차 감소하였다(그림 9d). 각 권역별, 성분별 상관관계 분석 결과 장거리 사례와 유사하게 백령도의 경우 성분별 상관관계수가 평균 0.87이고, 내륙에 위치한 수도권 등 4개 측정소의 경우 상관관계수가 0.61~0.76, 제주의 경우 0.66로 나타나, 황사 사례의 경우에도 황사가 백령도로 유입되어 타 측정소로 영향을 미치는 동안 내부적인

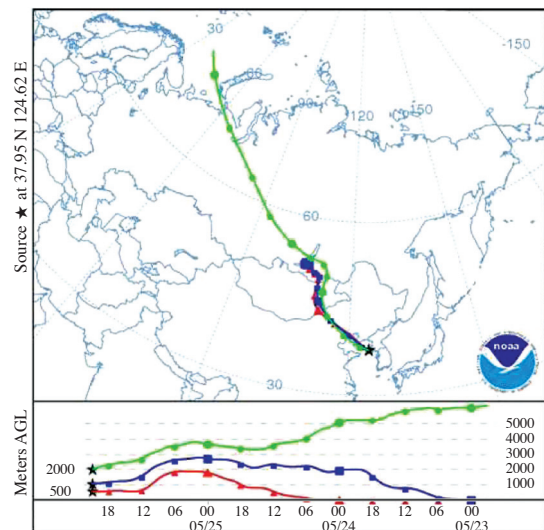


Fig. 8. The 3-day backward trajectories in Baengnyeong island (2014.5.26 06:00)

배출 등의 영향으로 오염물질 특성이 변화한 것으로 판단되었다.

황사기간 동안 평상시보다 PM_{10} 1.6~3.5배, $PM_{2.5}$ 1.1~2.7배 증가하였고, 유기탄소와 원소탄소는 각각 백

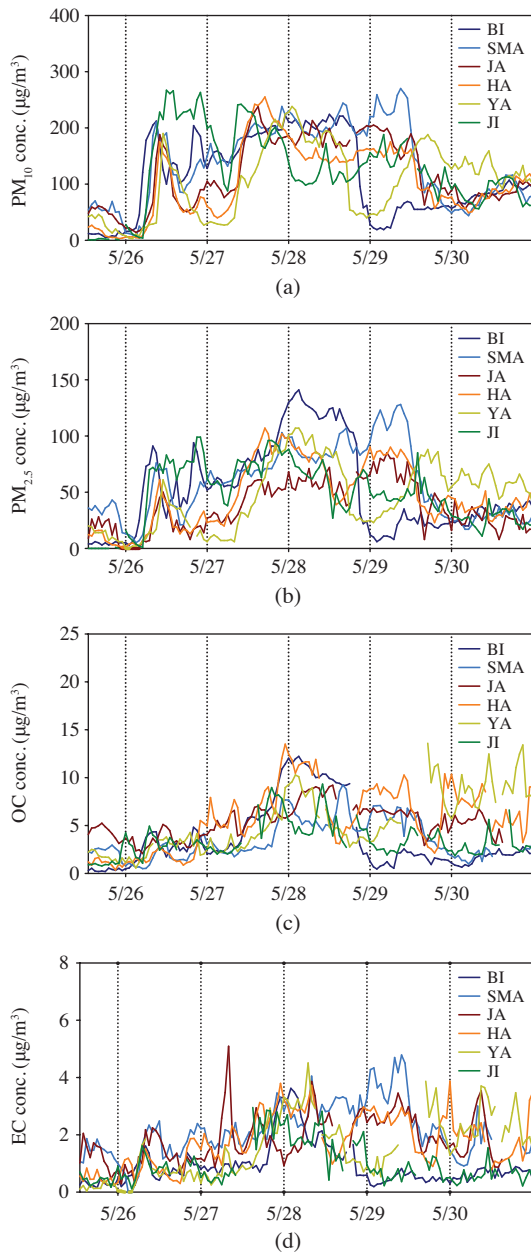


Fig. 9. Variations of $PM_{2.5}$ (a), EC (b), OC (c) concentrations during the Asian dust.

령도 2.0, 2.4배, 수도권 1.7, 1.7배, 중부권(도로변) 0.9, 1.0배, 호남권 1.8, 2.0배, 영남권 1.1, 1.7배, 제주도 1.3, 1.7배로 유기탄소보다 원소탄소의 증가폭이 크게 나타났다(그림 10). 선행 연구에 따르면 베이징 지역은 황

사의 영향을 직접적으로 받아 황사 시 $PM_{2.5}$ 중 유기탄소의 22.5%가 토양에서 기원하며(Zheng *et al.*, 2005), 황사 시에 중국기원의 인위적인 오염원과 발원지의 토양에서 기원한 유기탄소의 영향으로 영향지역의 유기탄소 농도가 평상시 대비 상대적으로 증가한다(Lim *et al.*, 2010). 본 황사 사례의 OC/EC 비는 백령도 0.6, 수도권 0.8, 중부권(도로변) 0.9, 호남권 0.9, 영남권 0.8, 제주도 0.8배로 평상시보다 오히려 OC/EC 비가 감소하는 특성을 보였다. 이번 황사 사례 시에 공기 궤적이 중국의 대도시인 베이징과 톈진을 거쳐 오면서 유기탄소보다 원소탄소의 절대량이 증가한 것으로 사료되어 OC/EC 비율은 오히려 평상시보다 감소한 것으로 판단된다.

3.3 수도권 대기질 고농도 사례 특징

3.3.1 고농도 사례별 탄소성분 특징

우리나라의 대표적인 대도시 대기질의 특징을 파악하기 위해 수도권에서 발생한 미세먼지 고농도 사례와 황사 사례에 대한 탄소성분 특성을 분석하였다. 표 3에 수도권에서 2014년 1월부터 10월까지 발생한 37회의 고농도 사례와 6회의 황사 사례에 대한 미세먼지와 탄소성분 분석결과를 제시하였다. 평상시 유기탄소와 원소탄소의 농도는 각각 $3.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 고농도 사례 시는 $7.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $3.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 탄소성분의 농도가 약 2배 이상 증가하였으며, 황사 사례 시에는 $5.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $2.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 미세먼지 고농도 사례 시가 황사 사례 시보다 유기탄소와 원소탄소의 농도 증가가 뚜렷하게 나타났다. OC/EC 비는 평상시 3.1에 비해 고농도 사례 시(2.5)와 황사 사례 시(2.2)에 감소하였다. $PM_{2.5}$ 중 유기탄소 및 원소탄소의 비율은 평상시 0.12, 0.05, 고농도 및 황사 시 동일하게 각각 0.08과 0.03으로 감소하였다. 평상시보다 고농도 사례 시나 황사 사례 시 탄소성분의 비율은 감소하였지만 절대량은 증가하였다. PM_{10} 은 고농도 사례 시에 $134 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 황사 사례 시 $170 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 농도는 낮았고 이와 반대로 $PM_{2.5}$ 는 고농도 사례 시에 $97 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 황사 사례 시($67 \mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 농도가 높았다.

3.3.2 유입 기류별 탄소 분석

2014년 1월부터 12월까지 수도권에서 발생한 고농도 사례별 유입 기류 분석을 수행하여 그림 11에 나타

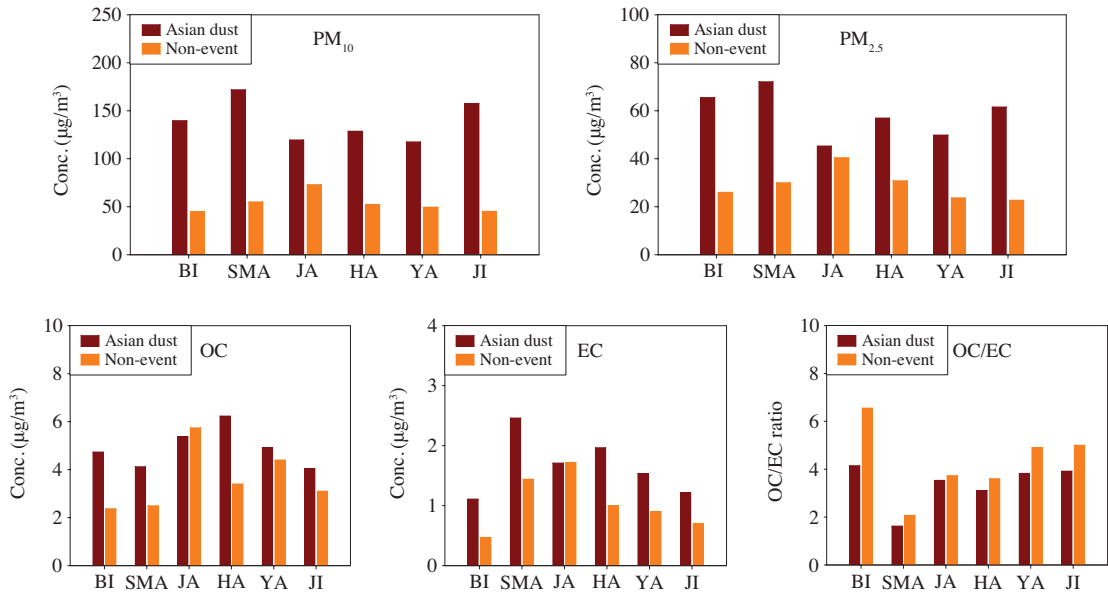


Fig. 10. Comparisons between Asian dust and non-event of $PM_{2.5}$, OC, EC concentrations and OC/EC ratio.

Table 3. $PM_{2.5}$, PM_{10} and carbon concentrations during haze episode and Asian dust.

Species	OC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	EC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	OC/EC ratio	OC/ $PM_{2.5}$ ratio	EC/ $PM_{2.5}$ ratio	$PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Haze episode	7.4	3.0	2.5	0.08	0.03	97	134
Asian dust	5.2	2.4	2.2	0.08	0.03	67	170
Non-event	3.3	1.4	3.1	0.12	0.05	29	47

내었다. 유입기류는 6개 권역으로 구분하여 72시간 역 궤적 분석을 수행하였다. 수도권으로 유입되는 기류방향에 따라 I권역은 북한 및 오후츠크해권, II권역은 북중국과 몽골권, III권역은 남중국권, IV권역은 남태평양권, V권역은 일본권, VI권역은 한반도 남부권역으로 구분하였다. II권역으로 유입되는 기류는 대체적으로 빠르게 수도권으로 유입되었고, III권역과 VI는 상대적으로 느리게 이동한 기류가 유입되는 특성을 보였다.

표 4에 유입기류 권역별 고농도 사례 발생 횟수 및 성분별 농도를 나타내었다. 북중국 및 몽골권을 통과한 기류의 II권역에서 고농도 발생 빈도수가 18회로 가장 많았고, PM_{10} 151, $PM_{2.5}$ 96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 미세먼지 농도 또한 가장 높았다. 남태평양을 경유한 기류인 IV 권역에서 발생한 고농도 사례의 경우 $PM_{2.5}$ 농도 71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 발생빈도가 6회로 가장 낮았다. 일본을 통과한 기류인 V권역에서는 고농도 사례가 발생하지 않았

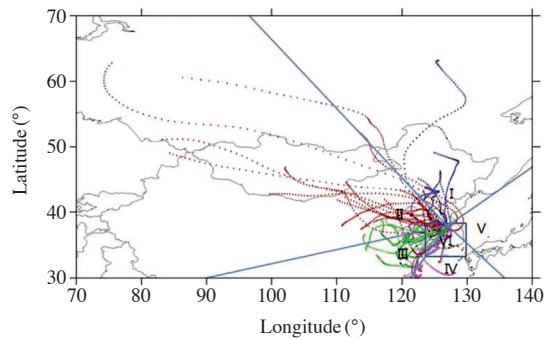


Fig. 11. Backward trajectories of air masses arriving in Seoul for 72 hours.

다. 유기탄소 농도는 북한을 통과하여 기류가 유입된 I 권역의 사례에서 9.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았다. 그림 12는 7월 25일 발생한 고농도 사례에 대한 국가기상위성센

Table 4. Concentrations of PM, OC and EC each wind-directions.

Wind direction	Count	PM _{2.5} (μg/m ³)	PM ₁₀ (μg/m ³)	PM _{2.5} /PM ₁₀ ratio	OC (μg/m ³)	EC (μg/m ³)	OC/EC ratio
I	6	77	144	0.53	9.8	3.0	3.3
II	18	96	151	0.64	7.5	3.1	2.4
III	10	93	135	0.69	4.6	2.3	2.0
IV	6	71	135	0.53	5.4	3.2	1.7
VI	6	86	132	0.65	6.1	2.8	2.2

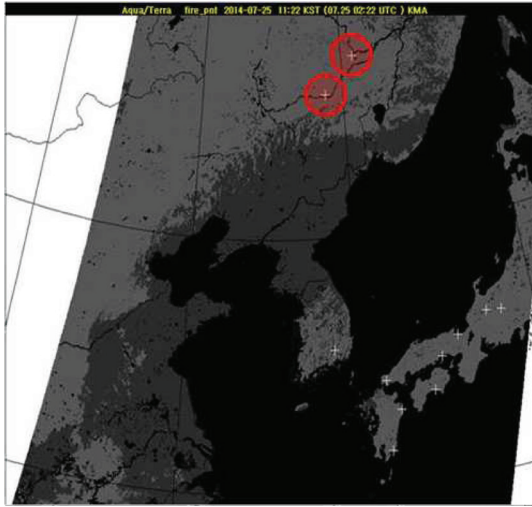


Fig. 12. Satellite picture of Aqua/Terra (MODIS).

터(<http://nmssc.kma.go.kr>)의 Aqua/Terra (MODIS) 산불 감지 위성영상 확인 결과를 보여주고 있다. 각 사례는 최소 2권역 이상 고농도 영향을 받았지만, 이번 사례는 유일하게 수도권에서만 관측된 유일한 고농도 사례로 중국의 하얼빈 근처에서 발생한 산불이 북한을 경유하여 우리나라로 유입되었을 가능성으로 인해 유기탄소 농도가 증가한 것으로 판단된다. OC/EC 비율도 I권역 사례 시 3.3으로 가장 높았고 II권역 2.4, VI권역 2.2, III권역 2.0, IV권역 1.7로 각각 조사되었다. I권역에 위치한 북한지역의 탄소성분의 발생량과 이로 인한 우리나라 오염도의 영향 여부는 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

그림 13에 유입경로별로 PM_{2.5} 중 유기탄소, 원소탄소, 이온성분에 대한 분율을 나타내었다. PM_{2.5} 중 유기탄소가 차지하는 분율은 권역별로 I(13%)>II&IV(8%)>VI(7%)>III(5%) 순이었고, 원소탄소의 분율은

IV(5%)>I(4%)>II&VI(3%)>III(2%) 순으로 나타났다. 앞서 언급한 바와 같이 PM_{2.5} 중 탄소성분이 I권역에서 가장 높은 것은 하얼빈 근처에서 발생한 산불의 영향이 포함되었을 것으로 사료된다. II권역(11%)의 경우 북경, 톈진 등 배출량이 많은 중국 대도시 지역이 위치하고 있어 이 지역을 경유한 기류가 빠르게 이동되어 높은 탄소 성분 농도를 보이는 것으로 판단된다. I권역과 II권역과 같이 중국내륙 혹은 북한 지역을 거쳐 기류가 빠르게 유입되는 경우 탄소성분의 농도와 분율이 증가하고 III권역, IV권역, VI권역과 같이 비교적 느린 기류의 유입이나, 우리나라 내륙의 영향을 받는 기류에서는 탄소성분 농도와 분율이 비교적 낮게 나타났다. 이러한 결과는 유입기류가 중국에서 한반도로 이동했을 때 더 높은 이온성분 농도를 보여준 제주 고산지역에서 수행한 선행연구 결과와 유사하다(Ko *et al.*, 2015).

4. 결 론

국립환경과학원에서 운영 중인 6개 권역별 대기오염집중측정소(백령도, 수도권, 중부권, 호남권, 영남권, 제주도)에서 2014년 1~10월까지 측정된 탄소성분 농도를 분석하여 우리나라 탄소성분의 시·공간적 분포 특성 및 고농도 사례 시 오염도 특성을 파악하였다.

탄소성분 농도는 겨울철 국내·외의 자동차 배출, 난방연료 사용 증가, 불특정 다수의 소각 등으로 인해 농도가 높았으며, 여름철의 잦은 강우 및 직접적인 배출의 감소로 인해 농도가 낮았다. 유기탄소의 지역별 농도는 중부권이 도로변에 위치해 있어 자동차 배출의 영향을 직접 받아 농도가 가장 높았고, 자체 배출원이 거의 없는 백령도가 가장 낮은 농도를 보였다. 7월과 8월의 경우 영남권의 탄소성분 농도가 다른 권역보다

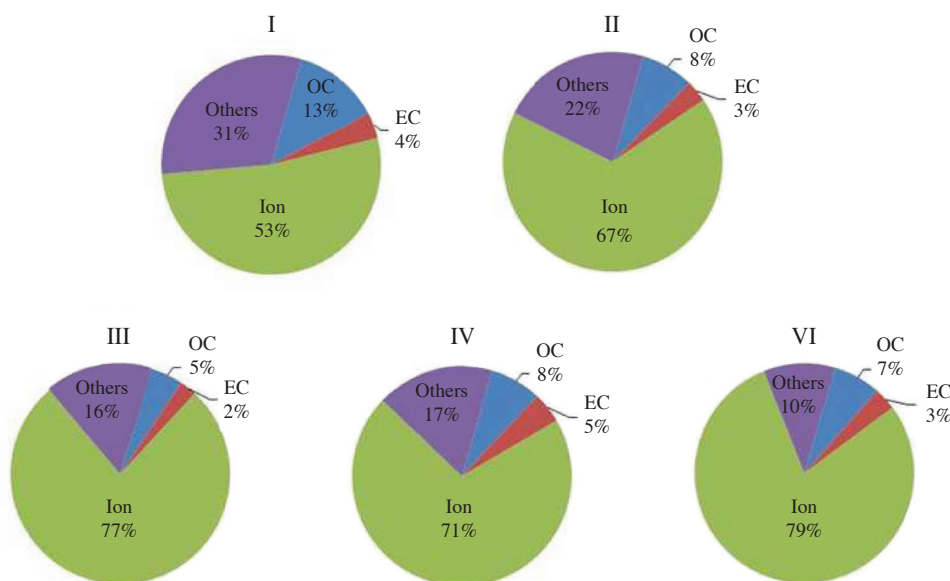


Fig. 13. Mass fractions (%) of OC, EC and ion on PM_{2.5} by each wind-directions.

높게 나타났다. 영남권의 남동쪽에 위치한 공업단지 등으로부터 배출되어진 탄소성분이 여름철 주풍인 남동풍으로 영남권 지역에 영향을 미친 것으로 판단된다. 백령도와 제주도는 1차 오염원이 없어 탄소성분 농도가 상대적으로 다른 지점보다 낮았으나, 강한 북서풍과 동풍의 영향으로 농도가 증가하는 경향을 보여 북서방향에 위치한 중국과 동쪽 방향에 위치한 수도권으로부터의 탄소성분 유입의 영향을 받는 것으로 나타났다.

PM_{2.5} 중 유기탄소가 차지하는 비율은 9.6~15.5%이고, 원소탄소의 비율은 2.4~4.7% 그리고 OC/EC 비율은 2.4~4.5이었다. OC/EC 비율은 1차 오염 배출이 거의 없어 원소탄소의 농도가 낮고 국내·외에서 유입된 2차 유기탄소의 영향으로 상대적으로 유기탄소의 농도가 높은 백령도가 4.5로 가장 높았고, 교통량이 많아 원소탄소의 농도가 높은 수도권이 2.4로 가장 낮았다. 자동차 등에 의해 원소탄소의 배출량이 많은 대도시는 OC/EC 비율이 낮고 1차 오염원이 적은 교외지역은 OC/EC 비율이 높게 보고된 외국의 사례와 유사한 결과를 보였다.

고농도 사례 시 OC/EC 비율은 0.8~1.2배로 평상시와 비슷하였으나 유기탄소 농도는 평상시보다 1.3~

3.0배 증가하고, 원소탄소 농도는 평상시보다 1.3~4.0배 증가하는 경향을 나타내어, 고농도 사례 시 원소탄소의 증가가 유기탄소 증가보다 뚜렷하였다. 황사 사례 시 탄소성분의 농도 절대량은 증가하였지만, OC/EC 비는 0.6~0.9로 오히려 감소하였다.

수도권으로 유입되는 기류의 경로별 탄소성분 특성을 살펴보면 하얼빈 근처에서 발생한 산불의 영향으로 판단되는 I권역에서 기류가 유입되는 경우 탄소성분의 농도가 가장 높았고(17%), 북경, 톈진 등 중국 내륙을 거쳐 빠르게 기류가 유입된 사례가 다음으로 높은 탄소성분 농도(11%)를 보였다. 중국 남부 지역에서 기류가 유입되는 III권역, 남태평양에서 기류가 유입되는 IV권역, 한반도 남부지역에서 정체한 기류의 영향을 받은 VI권역의 경우 비교적 낮은 탄소농도와 OC/EC 분율을 나타내었다.

본 연구는 우리나라 권역별 탄소성분 농도의 고해상도 측정결과를 장기간 분석한 최초의 분석 결과로 국내의 전반적인 탄소성분 특성에 대한 이해도가 높아질 것으로 판단된다. 또한 OC/EC 비율 및 유입기류별 탄소성분 특성 분석을 통하여 탄소성분에 대한 권역별 오염도 원인을 간접적으로 파악할 수 있어 향후 권역별 탄소성분에 대한 저감정책 수립을 위한 과학적인

근거로 활용할 수 있을 것이라 판단된다. 이와 더불어 탄소성분뿐만 아니라 $PM_{2.5}$ 중 다양한 성분 분석결과와 병행하면 $PM_{2.5}$ 성분에 대한 종합적인 이해에 바탕을 둔 대기질 저감정책의 근거자료로 활용될 것으로 사료된다.

References

- Bae, M.S., S.S. Park, and Y.J. Kim (2013) Characteristics of Carbonaceous Aerosols Measured at Gosan-Based on Analysis of Thermal Distribution by Carbon Analyzer and Compounds by GCMS, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 29(6), 722-733. (in Korean with English abstract)
- Chow, J.C., J.G. Waston, and Z. Lu, (1996) Descriptive analysis of $PM_{2.5}$ and PM_{10} and regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX, *Atmos. Environ.*, 30(12), 2079-2112.
- Feng, J.L., M. Hu, C.K. Chan, P.S. Lau, M. Fang, and L.Y. He (2006) A comparative study of the organic matter in $PM_{2.5}$ from three Chinese megacities in three different climatic zones, *Atmos. Environ.*, 40, 3983-3994.
- Han, J.H., B.J. Bahng, M.H. Lee, S.C. Yoon, S.W. Kim, L.S. Chang, and K.S. Kang (2013) Semi-continuous Measurements of $PM_{2.5}$ OC and EC at Gosan: High-concentration Episode, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 29(3), 237-250. (in Korean with English abstract)
- Harrison, R.M. and R.E. Grieken (1998) *Atmospheric Particles*, IUPAC series on Analytical and Physical Chemistry of Environmental Systems, John Wiley & Sons, Chichester-New York-Brisbane-Toronto-Singapore, Vol. 5.
- Kang, B.W., J.M. Jeon, and H.S. Lee (2014) A Study on the Source Profile Development for Fine Particles ($PM_{2.5}$) Emitted from Meat Cooking, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 30(1), 18-25. (in Korean with English abstract)
- Kim, H.S., J.S. Jung, J.H. Lee, and S.I. Lee (2015) Seasonal Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in $PM_{2.5}$ in Daejeon, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 31(1), 28-40. (in Korean with English abstract)
- Ko, H.J., E.H. Lim, J.M. Song, W.H. Kim, C.H. Kang, H.Y. Lee, and C.G. Lee (2015) Composition Variation of Atmospheric Fine Particulate Matters in Accordance with Air Mass Transport Pathways at Background Site of Korea in 2013, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 31(1), 15-27. (in Korean with English abstract)
- Lee, H.W., T.J. Lee, and D.S. Kim (2009) Identifying Ambient $PM_{2.5}$ Sources and Estimating their Contributions by Using PMF: Separation of Gasoline and Diesel Automobile Sources by Analyzing ECs and OCs, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 25(1), 75-89. (in Korean with English abstract)
- Lee, Y.J., J.H. Lim, S.A. Jung, M.R. Jo, S.J. Kim, M.K. Park, J.Y. Ann, Y.S. Lyu, W.J. Choi, Y.D. Hong, and J.S. Han (2014) Characteristics of PM Chemical Component during Haze Episode and Asian Dust at Gwang-Ju, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 30(5), 434-448. (in Korean with English abstract)
- Lim, S.H., M.H. Lee, and K.S. Kang (2010) Seasonal Variations of OC and EC in PM_{10} , $PM_{2.5}$ and $PM_{1.0}$ at Gosan Superstation on Jeju Island, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 26(5), 567-580. (in Korean with English abstract)
- Lonati, G., S. Ozgen, and M. Giugliano (2007) Primary and secondary carbonaceous species in $PM_{2.5}$ samples in Milan (Italy), *Atmos. Environ.*, 41, 4599-4610.
- Meng, Z.Y., X.M. Jiang, P. Yan, W.L. Lin, H.D. Zhang, and Y. Wang (2007) Characteristics and sources of $PM_{2.5}$ and carbonaceous species during winter in Taiyuan, China, *Atmos. Environ.*, 41(32), 6901-6908.
- NIER (2013a) Emission Sources and Behavior of $PM_{2.5}$ Organic Materials (IV).
- NIER (2013b) Study on the Composition of $PM_{2.5}$ in Urban and Rural area.
- Park, D.J., J.Y. Ann, H.J. Shin, and M.S. Bae (2014) Characteristics of $PM_{2.5}$ Carbonaceous Aerosol using PILS-TOC and GC/MS-TD in Seoul, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 30(5), 461-476. (in Korean with English abstract)
- Ramanathan, V. and G. Carmichael (2008) Global and regional climate changes due to black carbon, *Nature Geoscience*, 221-227.
- Salma, I., X. Chi, and W. Maenhaut (2004) Elemental and organic carbon in urban canyon and background environments in Budapest, Hungary, *Atmos. Environ.*, 38, 27-36.
- Shin, H.J., Y.J. Lim, J.H. Kim, H.J. Jung, S.M. Park, J.S. Park, I.H. Song, S.J. Seo, Y.D. Hong, and J.S. Han (2014) The characteristics of long term high PM episode

- occurred in Feb., 2014, J. Korean Soc. Urb. Environ., 14(3), 1-10.
- Turpin, B.J. and J.J. Huntzicker (1995) Identification of secondary aerosol episodes and secondary organic aerosol concentrations during SCAQS, Atmos. Environ., 29(23), 3527-3544.
- Viana, M., W. Maenhaut, H.H. ten Brink, X. Chi, E. Weijers, X. Querol, A. Alastuey, P. Mikuška, and Z. Večeřa (2007) Comparative analysis of organic and elemental carbon concentrations in carbonaceous aerosols in three European cities, Atmos. Environ., 41(28), 5972-5983.
- Yang, F., K. He, B. Ye, X. Chen, L. Cha, S.H. Cadle, T. Chan, and P.A. Mulawa (2005) One-year record of organic and elemental carbon in fine particles in downtown Beijing and Shanghai, Atmos. Chem. Phys., 1449-1457.
- Zhang, F., J. Zhao, J. Chen, J. Xu, and L. Xu (2011) Pollution characteristics of organic and elemental carbon in PM_{2.5} in Xiamen, China, J. Environ. Sci., 23(8), 1342-1349.
- Zheng, M., L.G. Salmon, J.J. Schauer, L. Zeng, C.S. Kiang, Y. Zhang, and G.R. Cass (2005) Seasonal trend in PM_{2.5} source contribution in Beijing, China, Atmos. Environ., 39(22), 3967-3976.