



논문

안면도에서 측정된 PM_{2.5} 내 탄소성분의 열광학적 분포 특성 연구

Characteristics of Temperature-Resolved OC and EC Fractions in PM_{2.5} Measured at Anmyeon Island in Korea

장유운, 이지이^{1),*}

국립환경과학원 기후대기연구부 대기환경연구과

¹⁾이화여자대학교 환경공학과

Yu Woon Chang, Ji Yi Lee^{1),*}

Honam area Air Pollution Intensive Monitoring Site, Department of Air Quality Research, Climate and Air Quality Research Division, National Institute of Environmental Research, Gwangju, Republic of Korea

¹⁾Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University, Seoul, Republic of Korea

접수일 2019년 10월 4일
 수정일 2019년 10월 15일
 채택일 2019년 10월 15일

Received 4 October 2019
 Revised 15 October 2019
 Accepted 15 October 2019

*Corresponding author
 Tel : +82-(0)2-3277-5945
 E-mail : yijiyi@ewha.ac.kr

Abstract Carbon fractions can be classified as organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) by thermal-optical definition. In the NIOSH protocol, OC is divided by four OC fractions (OC1~OC4) and OP is determined when transmission of laser light attains its original intensity after oxygen was added to the combustion atmosphere. EC is divided by six EC fractions (EC1~EC6). In this study, to understand the characteristics of carbon fractions in PM_{2.5}, especially, the characteristics of temperature-resolved OC and EC fractions at Anmyeon Island which is a background area in Korea, routine measurements of OC and EC with other carbon fractions (WSOC and HULIS-C) and organic speciations were carried out during two years. Among temperature-resolved OC and EC fractions, we found that OP had distinct seasonal characteristics. OP concentrations decreased in summer, while, increased in fall. The split points by the transmission correction between OC and EC had four different characteristics during the sampling period. The split points were mainly located in OC4 fraction region in the summer samples and this might be related to the high oxidation condition of PM_{2.5} sample during summer. OP had significant correlation with HULIS-C ($r^2=0.52$, $P<.01$) in summer. But in the other season, OP has significant correlation with HULIS-C ($r^2=0.85$, $P<.01$) and Levoglucosan ($r^2=0.46$, $P<.01$). When principle component analysis (PCA) was applied to the measurement, OP was extracted in factor 1 accounted for 28% of total variance (83%). In factor 1, OP was extracted with high loading of HULIS-C and Levoglucosan which are indicators of biomass burning. So, we could understand that OP in PM_{2.5} was mainly formed by the biomass burning process.

Key words: Carbon fractions, OP, Anmyeon Island, PM_{2.5}

1. 서론

입자직경이 매우 작은 초미세먼지 (Particulate matter less than 2.5 μm in aerodynamic diameter, PM_{2.5})는 폐포 속에 깊게 침투하여 신경계를 마비시키는 등 인체 내에서 더 큰 피해를 입히는 것으로 보고되고 있다 (WHO, 2006). 일반적으로 PM_{2.5}의 화학조성은 황

산염 및 질산염, 무기이온, 중금속을 포함한 무기성분과 탄소성분으로 구성된 유기성분과 무기탄소, 그리고 수분으로 구성된다 (Seinfeld and Pankow, 2003). 이때, 탄소성분은 열광학적 분석방법에 의해 유기탄소와 원소탄소로 분류할 수 있으며 (Seinfeld and Pandis, 2006), 기후변화에 직, 간접적인 영향 (태양빛의 흡수 및 산란, 구름응결핵 작용)을 미치는 것으로 보

고되고 있다(Ghim *et al.*, 2005; IPCC, 1992).

PM_{2.5} 내 탄소성분을 측정하는 프로토콜은 크게 3가지로 나누어지는데, 미국의 DRI (Desert Research Institute)에서 제시한 IMPROVE (Interagency Monitoring of Protected Visual Environments)의 열광학적 반사율(Thermal optical reflectance, TOR)을 이용한 방법과 미국의 NIOSH (National Institute of Occupational Safety and Health)에서 제시한 열광학적 투과율(Thermal optical transmittance, TOT)을 이용한 방법, 그리고 유럽에서 탄화보정을 위해 투과율을 이용한 열광학적 분석 프로토콜인 EUSAAR (European Supersites for Atmospheric Aerosol Research)이 일반적으로 사용되고 있다(Karanasiou *et al.*, 2015; Cavalli *et al.*, 2010; Chow *et al.*, 2001).

Birch and Cary (1996)에서 제시한 TOT 분석방법은 헬륨 대기 상태에서 오븐 온도를 870°C까지 단계적으로 올리면서 탄소가 이산화탄소로 전환되는 구간을 OC라고 정의하였고, 이 단계가 끝나면 헬륨에 2% 산소를 혼합시킨 대기 상태에서 탄소가 산소가스에 의해 이산화탄소로 전환되는데, 이러한 과정 중에 산소가 없는 대기상태에서 미처 연소되지 않은 OC의 일부분이 탄화(Charring)되어 빛의 투과율을 감소시키게 된다. 이 구간에서 발생한 탄소는 산소가스가 주입되는 대기상태에서 연소가 이루어지는데, 빛의 투과율이 감소되었다가 서서히 증가하여 초기 투과율과 같아지는 이 시점을 OC와 EC를 나누는 구간(Split point, 분기점)으로 하여 그 이후부분을 EC로서 정의한다. 이때, 산소 대기상태에서 빛의 투과율이 감소했다 원래 초기값으로 복원될 때까지의 상태에서 탄화에 의해 발생한 탄소성분을 열분해된 유기탄소(Organic pyrolysis fraction, OP)라고 정의한다.

탄화는 유기화합물의 함량과 유형, 분석의 온도 단계, 각 온도 단계에서의 체류시간, 특정 무기 성분의 존재 여부 등 다양한 요소에 따라 다르게 형성되며, 각 온도 단계에서의 체류시간을 연장하면 OP의 형성을 감소시킬 수 있다고 제안하였다(Yu *et al.*, 2002). 한편, Yu *et al.* (2002)에서는 수용성 유기탄소(Water

soluble organic carbon, WSOC)의 존재가 탄화 생성에 큰 영향(13~66%)을 미친다고 제안하였다. 또한, Chow *et al.* (2001)과 Fung *et al.* (2002)에서는 산화철과 같은 광물성분이 헬륨 대기상태의 고온에서 산소를 제공하고 일부 OP나 EC를 산화시킬 수 있다고 하였으며, 이 경우 투과율(또는 반사율)이 분석 초기값에 도달하여 분기점이 OC4 구간에서 발생되는데 이를 “early split”이라 하였다. Khan *et al.* (2012)에서는 토양이나 도로먼지가 포함된 시료 내 존재하는 금속 산화물에 의해 고온에서 산화가 증가하여 헬륨 대기상태의 불활성모드에서 광 흡수 탄소(Light absorbing carbon) 화합물의 조기 진화를 유발할 수 있다고 제안하였다. 이러한 특성 때문에 Chow *et al.* (2004)과 Querol *et al.* (2012)에서는 높은 함량의 철산화물이 예상되는 지역의 시료는 OC와 EC의 분기점에 대해 주의 깊게 조사해야 한다고 제안하였다. 금속성분뿐만 아니라 PM_{2.5} 내 NH₄HSO₄의 존재 또한 탄화에 영향을 주어 OP 생성을 증가시킨다고 보고되고 있으며(Yu *et al.*, 2002), Novakov and Corrigan (1995)에서는 목재류의 연소에서 배출된 시료에서 풍부한 K와 Na은 EC의 분해 온도를 변화시키고 조기 산화를 유발할 수 있다고 보고하였다. 다른 한편으로, 도로변에서 측정된 시료는 OP를 거의 생성하지 않을 수 있는데, 이것은 PAHs와 같은 비 열분해 유기물질을 함유하는 높은 디젤 성분에 기인할 수 있다고 보고하였다(Khan *et al.*, 2012).

이러한 탄화에 의한 OP의 생성으로 인해 OC와 EC를 구분하는 데 있어서 매우 복잡하고 불확실도가 크다(Cheng *et al.*, 2011). 현재 대기환경분야에서는 OC와 EC 농도를 결정하는 데 있어서 OP의 생성으로 인한 불확실성을 줄이고자, OP를 최소한으로 생성할 수 있는 최적의 열적 방법을 찾는 연구들이 많이 진행되고 있다(Yang and Yu, 2002).

OP의 생성 원인 및 특성을 파악하기 위해서는 PM_{2.5} 시료를 분석할 때 생성되는 탄소의 열광학적 분포(Temperature-resolved carbon fractions, TRCs) 특성을 파악하여야 한다. TRCs는 PM_{2.5} 내 성분들의 서

로 다른 물리화학적 성질 때문에 시공간적으로 또는 지역과 계절, 다양한 발생원에 따라 다른 농도와 비율을 나타내는 것으로 보고가 되고 있다 (Zhu *et al.*, 2014; Cheng *et al.*, 2011; Kim and Hopke, 2005, 2004; Cao *et al.*, 2005; Chow *et al.*, 2004). 현재까지 IMPROVE의 TOR 분석방법을 적용하여 TRCs의 분포 특성을 연구한 기존 연구결과들은 많지만 (Zhu *et al.*, 2014; Cheng *et al.*, 2011; Kim and Hopke, 2005, 2004; Cao *et al.*, 2005; Chow *et al.*, 2004) NIOSH의 TOT 분석방법을 적용한 사례를 바탕으로 TRCs 분포를 파악한 연구는 제한적이다.

최근 탄소성분에 대한 국내 연구결과들을 살펴보면, Kim *et al.* (2015)에서는 도심지역에서 NIOSH와 IMPROVE 프로토콜을 이용하여 OC와 EC 측정값을 비교분석하여 국내 대기 시료의 특성에 적합하고 통일된 표준 분석 프로토콜 개발의 필요성을 제시하였고, Oh *et al.* (2018)에서는 배경지역에서 NIOSH와 IMPROVE, EUSAAR 프로토콜을 이용한 탄소 분석결과를 비교하여 우리나라 대기 오염 현실에 맞는 탄소 분석법에 대한 선정 방법을 제안하였다. 그리고 OC와 EC 외에 다른 탄소성분에 대한 연구들도 많이 진행되고 있는데, Son and Park (2019)에서는 국내 도심지역에서 OC 내 존재하는 WSOC의 크기 분포와 생

성과정을 파악하였고, Son *et al.* (2015)에서는 WSOC의 상당한 부분을 차지하고 있는 HULIS-C (Humic-like substance-carbon)의 화학 특성 및 생성과정을 조사하였다. 또한, Bae *et al.* (2013)에서는 OC와 EC, 유기성분을 이용하여 배경지역의 대기 특성 및 유기물질의 생성과정을 연구하였으며, Lim *et al.* (2016)에서는 도심지역에서 다환방향족탄화수소 (Polycyclic aromatic hydrocarbon, PAHs)의 낮밤 분포 특성을, Kim *et al.* (2018)에서는 배경지역에서 n-Alkanes의 월별 농도 분포 특성을 연구하였다. 이처럼 탄소성분 및 유기성분에 대한 특성을 연구한 선행 연구결과들은 많지만, WSOC나 HULIS-C와 같은 탄소성분과 유기성분과 같은 다양한 성분들을 이용하여 TRCs와 OP의 특성을 연구한 사례는 매우 제한적이다.

본 연구에서는 배경지역인 안면도 기후변화감시소에서 2년에 걸쳐 상시 측정된 PM_{2.5} 시료를 통해 NIOSH의 TOT 분석방법을 적용하여 OC와 EC를 분석하였고, TRCs의 분포를 통해 각 성분들의 계절적 특성을 파악하였다. 또한, OC와 EC 외에 함께 수행된 PM_{2.5} 내 다른 탄소성분 및 유기성분들을 이용하여 상관분석과 주성분분석을 통해서 OP와 관련된 배출특성을 밝히고자 본 연구를 진행하였다.

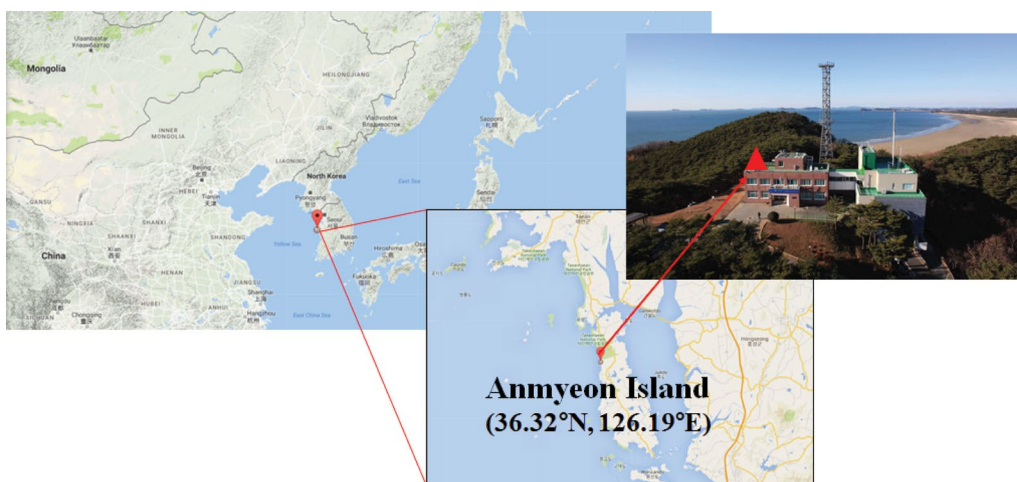


Fig. 1 . Location of sampling site at Anmyeon Island.

2. 실험 방법

2.1 시료채취

안면도 대기 중 PM_{2.5} 시료는 충청남도 태안군 안면읍에 위치한 안면도 기상청 기후변화감시소(36.32° N, 126.19°E, 해발고도 46 m)의 옥상(지상으로부터 9 m)에서 PM_{2.5} 시료들을 채취하였다(그림 1). 측정지점은 주변에 바다와 산간지형으로 둘러싸여 있는 배경지역의 특성을 나타낸다. 시료의 채취기간은 2015년 6월 3일부터 2017년 5월 26일까지 약 6일마다 1번씩 24시간 동안 상시 채취하였고, 총 117개 PM_{2.5} 시료들을 채취하였다. PM_{2.5} 시료는 고유량 PM_{2.5} 공기채취기(PM_{2.5} high volume air sampler, TE-5005BLX, TISCH, USA)를 사용하여 약 1.1 m³ min⁻¹ 유량으로 채취하였다. 시료채취를 위하여 사용된 여과지는 석영섬유여과지(Quartz fiber filter, 20.3 cm × 25.4 cm, Pall life science)로, 사용 전 12시간 이상 550°C 이상에서 가열하여 여과지의 불순물을 최소화하였고, 시료 채취 후에는 탄소성분들의 휘발 등 시료의 손실 영향을 최소화하기 위해 -20°C에서 냉동 보관하였다. 또한, 시료는 수분의 영향을 최소화하기 위하여 분석 전 데시케이터 내에서 24시간 보관하였다.

2.2 OC와 EC 분석

본 연구에서는 PM_{2.5} 시료 내 OC와 EC의 분석을 위해 시료를 1.5 cm²로 잘라 Sunset의 OCEC 분석기(Model 5L)를 이용하여 분석하였고, NIOSH의 TOT 분석방법을 적용하였다(NIOSH, 1996). 본 연구에서 온도별로 단계를 나눠 분석된 OC는 각각 OC1(310°C)와 OC2(475°C), OC3(615°C), OC4(870°C)이고, EC는 EC1(550°C)과 EC2(625°C), EC3(700°C), EC4(775°C), EC5(850°C), EC6(870°C)이다. 그래서 OC농도는 각 OC를 더한 값에서 OP를 더해진 값으로, EC

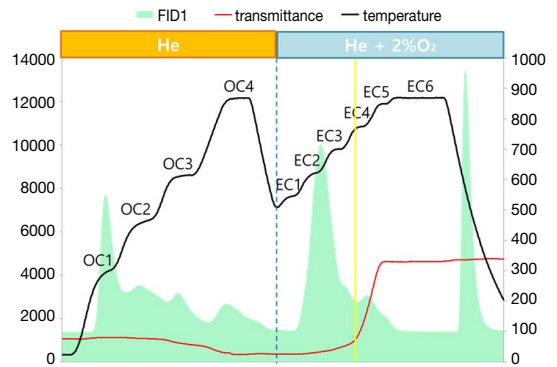


Fig. 2. Thermogram of TRCs analyzed by NIOSH(TOT) method.

Table 1. QA/QC of OC, EC, WSOC, HULIS-C and individual organic compounds.

	Standard	Recovery (%)	FB ¹	RSD(%)
OC		93 ± 2	0.62 ± 0.34	8 ± 4
EC	Sucrose	-	0.00 ± 0.04	15 ± 8
WSOC		95 ± 1	1.38 ± 0.25	0.4 ± 0.1
HULIS-C	SRFA ²	94 ± 2	0.80 ± 0.23	0.6 ± 0.6
	NAFA ³	92 ± 2		
Compounds	r ² of calibration curve	Recovery (%)	Concentration (ng/μL)	
			FB	MDL ⁴
PAHs	0.995~1.000	85~115	N.D ⁵	0.003~0.014
n-Alkanes	0.997~1.000	75~129	0.14 ± 0.01	0.006~0.038
n-Alkanoic acids	0.998~1.000	71~126	0.51 ± 0.28	0.024~0.179
Dicarboxylic acids	0.980~1.000	63~112	N.D	0.011~0.293
Sugars	0.996~1.000	74~113	N.D	0.041~0.122

Field blank¹ = unit: OC and EC (μg cm⁻³), WSOC and HULIS-C (ppm)

SRFA² = Suwannee river fulvic acid (International humic substances society)

NAFA³ = Nordic aqueous fulvic acid

MDL⁴ = Method detection limit

N.D⁵ = Not detected

농도는 각 EC를 더한 값에 OP를 빼준 값으로 정의하였다. 본 연구의 TOT 분석방법에 의한 온도 그래프(Thermogram)는 그림 2에 제시하였다.

OC와 EC 분석에 대한 정도관리(Quality assurance and quality control, QA/QC)를 실시하였다(표 1). 분석결과의 정확도는 Sucrose 표준시료 일정량을 공시료에 주입하여 분석한 결과로 평가하였고, 정밀도는 동일 시료를 3번 반복, 분석한 결과의 상대표준편차(Relative standard deviation, RSD)로 제시하였다. 바탕시험 값(Blank test, BK)은 평균 시료의 OC와 EC 값의 4% 이하였다.

2.3 PM_{2.5} 내 다른 탄소성분 및 유기성분 분석

2.3.1 WSOC와 HULIS-C

코니칼 튜브에 PM_{2.5} 시료와 3차 증류수(18 mΩ)를 넣고 초음파 추출과정을 거친 후 주사기 필터(0.2 μm PTFE membrane, hydrophilic, Pall science)를 이용하여 추출액을 여과시켰다. 이 추출액을 TOC Analyzer(Sievers M9, General electric power & water analytical instruments, USA)로 WSOC를 분석하였고, OC에서 WSOC를 제외한 값을 불용성 유기탄소(Water insoluble organic carbon, WISOC)로 정의하였다. HULIS-C의 전처리 및 분석방법은 Lee *et al.* (2016)에서 제시한 고체상 추출법(Solid phase extraction, SPE)을 적용시켰으며, SPE에 사용한 카트리지는 Waters 사의 Oasis HLB (Hydrophilic lipophilic balanced, 30 μm, 60 mg/cartridge, Waters, USA)이다.

2.3.2 유기성분

PM_{2.5} 시료에서 다섯 그룹의 유기성분을 분석하는 과정에 대해서는 Choi *et al.* (2016)에 제시되어 있다. 간단하게 설명하면, 시료와 용매를 유리병에 넣고 추출 및 여과, 농축과정을 거쳐 최종적으로 추출된 용액을 이용하여 무극성 성분들은 바로 가스크로마토그래피-질량분석기(GC-MS, Gas chromatography 7890A-mass spectrometer 5975C, Agilent, USA)로 분석하였고, 극성성분들은 유도체화 과정을 거친 후 분석하였

다. 본 연구에서 정성 및 정량한 유기성분들은 다섯 그룹의 77종(PAHs 14종, n-Alkanes 17종, Dicarboxylic acids 19종, n-Alkanoic acids 17종과 Sugars 10종)이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 TRCs의 분포 특성

안면도에서 측정된 계절별 TRCs의 농도 분포를 그림 3에 각각(a) OC와(b) EC 분율로 나타내었다. 다른 계절에 비해 여름에 TRCs 농도가 비교적 낮은 것을 확인할 수 있었으며, 특히 OP와 EC1-3의 농도가 뚜렷하게 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 다른 계절

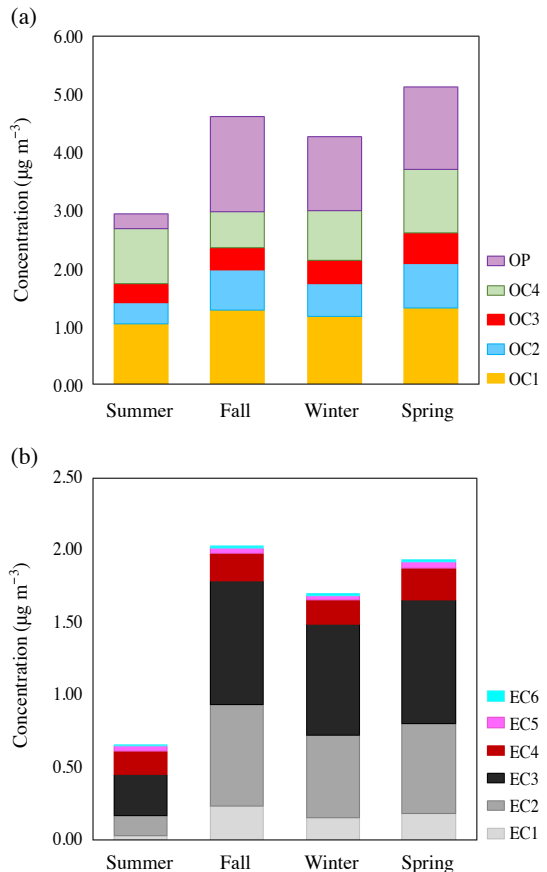


Fig. 3. Seasonal variation of temperature-resolved (a) OC fraction, (b) EC fractions in PM_{2.5}.

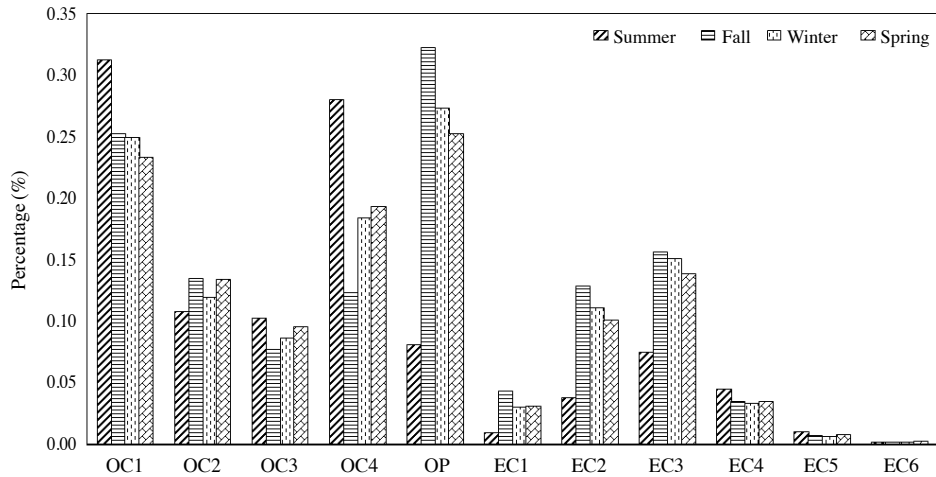


Fig. 4. Abundances (mass fraction of total carbon) of TRCs in PM_{2.5} at Anmyeon Island.

에 비해 여름이 난방연소에 의한 영향이 적어서 다른 계절에 비해 EC의 농도가 낮아지는 것으로 판단된다.

그림 4는 총 탄소(Total carbon, TC) 내 각 온도 단계별 분율의 기여율을 계절적으로 나타낸 그래프이다. OC 분율 중 OC1의 비율은 여름에만 증가하는 경향을 보였고, OC2와 OC3은 모든 계절에 비슷한 정도를 나타내었으며, OP는 여름에 가장 감소하고 가을에 가장 많이 증가하는 경향을 보였다. 이와는, 반대로 OC4의 비율은 가을에 감소하고 여름에 증가하는 경향을 보였다. 여름에 OP의 특성에 대한 내용은 3.2절에서 보다 자세하게 다루었다. OC1과 EC4~5의 비율은 다른 계절에는 유사하였으나 여름에만 높아지는 경향을 보였다. 그림 3과 그림 4를 비교하였을 때, OC1은 모든 계절에 비슷한 농도 분포를 가졌으나 TC 내 기여율은 여름에 증가하였으며, TRCs의 농도가 전체적으로 감소하는 시기인 여름에 OC1의 농도가 다른 계절과 유사한 현상을 확인하였다. 본 연구에서는 고유량 PM_{2.5} 공기채취기를 이용하여 시료를 채취를 진행하였으며, 시료 채취 전 단계에서 디누너 필터를 장착하지 않았다. OC1의 비율이 여름철에 증가하는 이러한 현상은 여름철 OC1를 구성하는 반휘발성 유기탄소에 대한 영향이 나타난 것으로 판단된다.

EC의 경우, EC1에서 OP를 뺀 분율을 char-EC라고

하고 EC2와 EC3를 더한 값을 soot-EC라고 한다. char-EC는 석탄연소 또는 식생연소(Biomass burning, 바이오매스 연소)에서 주로 배출되며, soot-EC는 차량의 고온연소에서 주로 배출되는 것으로 보고되고 있다(Lim *et al.*, 2012; Han *et al.*, 2009). TOR 분석 방법에서 EC1은 580°C, EC2는 740°C, EC3은 840°C에서 단계적으로 연소된다. 즉, 높은 온도에서 연소되는 EC일수록 차량의 고온연소에서 주로 배출되는 EC에 가깝다. 본 연구의 EC의 분율을 보면, 낮은 온도에서 연소되는 EC1~3보다 상대적으로 높은 온도에서 연소되는 EC4~5의 비율(그림 4)이 여름철에 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 비난방기간인 여름철에 석탄연소 또는 식생연소의 영향보다 차량의 연소에 의한 영향이 지배적이기 때문이라 판단된다.

3.2 OP의 계절적 특성

NIOSH의 TOT 분석방법에서 OP는 OC 분석과정에서 투과율이 감소했다가 다시 증가하여 초기와 같아지는 시점에서 분기점이 결정되었을 때 산정되어진다. 본 연구에서는 이러한 OP가 어느 탄소분율 단계에서 주로 결정되는지에 대해서 알아보았다(그림 5). 그림 5는 OP를 결정하는 분기점이 어느 탄소 분율에서 발생하였는지를 4개로 분류하여 보여주고 있다.

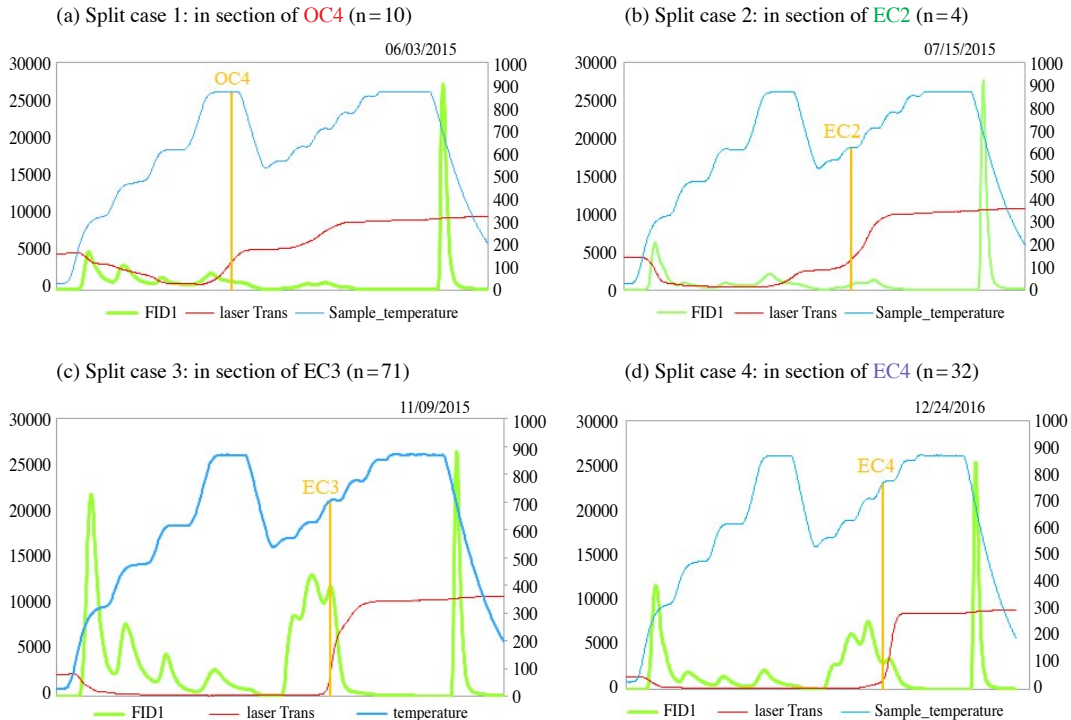


Fig. 5. Four cases of split point of OC and EC by thermal-optical definition.

총 117개의 $PM_{2.5}$ 시료 중 107개의 시료는 EC 구간에서 분기점이 결정되었지만, 나머지 10개의 시료에서는 EC 구간이 아닌 OC 구간에서 분기점이 결정되는 경우가 있었으며, 이러한 경우 OP의 농도는 음수로 산정된다. 본 연구에서는 OP가 음수로 산정된 10개 시료 중 7개의 시료가 여름에 발생한 것으로 확인되었다. 이러한 현상은 기존 연구결과들에서 나타났지만, 과학적인 이유가 명확하게 밝혀지지 않았다. 현재까지 제안된 내용으로는 OC 영역에서 산화금속과 이온들에 의해 EC 산화가 이루어졌거나, 또는 일부 금속성분들이 EC에 대해 촉매 역할을 한다고 보고하고 있다. 최근 Alejandro and Heinz (2017)에 따르면 산화가 많이 된 유기에어로졸(Organic aerosol, OA)의 경우 높은 온도에서 열분해되고, 일차유기탄소(Primary organic carbon, POC)의 경우 상대적으로 낮은 온도에서 열분해되는 경향이 있는 것으로 보고되고 있다. 따라서, 그림 4의 여름철 OC4의 비율이 다른 계절에

비해 높은 이유는 산화가 많이 된 OA가 OC4 온도조건에서 많이 열분해되었기 때문이라 예상되며, 이것은 OA의 산화가 많이 일어날 수 있는 조건인 여름철에 $PM_{2.5}$ 에 나타난 특성 때문이라 판단되었다. 또한, 여름철 산화된 OA가 고온 조건에서 열분해될 때 나온 산소가 OC4 온도구간인 헬륨 대기 상대에서 OP와 반응하여 CO_2 로 산화되어 빠져나오고, 고온에서 OP의 산화로 인해 레이저 투과율이 증가하여 이로 인해 OC4 구간에서 분기점이 형성될 것으로 판단된다. 이러한 복합적인 원인으로 인해 여름철에는 EC 구간이 아닌 OC 구간에서 분기점이 이루어져 OP가 음수값으로 측정된 원인이 된 것으로 판단된다.

3.3 OP와 다른 탄소성분들, 유기성분들과의 상관 분석

OP의 화학적 특성을 파악하고자, OC를 구성하는 다른 탄소성분들(WSOC, WISOC, HULIS-C) 및 배출

Table 2. Correlation of OP with WSOC, WISOC, HULIS-C and organic compounds during summer and other season.

	Correlation with OP (r^2)		Indicator	Reference
	Summer	Other season		
WSOC	0.25**	0.77**	primary emission and secondary formation	Mayol-Bracero <i>et al.</i> , 2002; Laskin <i>et al.</i> , 2015
WISOC	0.11	0.59**	fossil fuel combustion	Simoneit <i>et al.</i> , 2004; Miyazaki <i>et al.</i> , 2006
HULIS-C	0.52**	0.85**	biomass burning and secondary formation	El Haddad <i>et al.</i> , 2009; Lin <i>et al.</i> , 2010;
PAHs	0.00	0.11**	fossil fuel combustion	Bi <i>et al.</i> , 2003; Fang <i>et al.</i> , 2010
Plant wax of n-Alkanes	0.03	0.25**	biogenic emission	Simoneit <i>et al.</i> , 1991
Fossil fuel of n-Alkanes	0.00	0.40**	fossil fuel combustion	
C3-DCAs	0.03	0.23**	secondary formation	Pavuluri <i>et al.</i> , 2010
C4-DCAs	0.03	0.36**		
C16-AAs	0.08	0.53**	biogenic emission and anthropogenic emission	Rogge <i>et al.</i> , 1993
C18-AAs	0.48**	0.36**		
Levoglucosan	0.11	0.46**	biomass burning	Simoneit <i>et al.</i> , 1999

**P < .01

원 및 이차생성의 지표로 사용되고 있는 유기성분들과의 상관성 분석을 실시하였다. 유기성분은 화석연료 연소의 지표로 사용되고 있는 PAHs 그룹의 전체 농도와 n-Alkanes에서 식물의 잎 표면의 지표로 사용되고 있는 Plant wax 농도와 화석연료(Fossil fuel) 농도(Lin and Lee, 2004)로 구분하여 적용하였다. 또한, Dicarboxylic acids 그룹에서 이차생성의 지표로 사용되고 있는 Malonic acid (C3-DCAs)와 Succinic acid (C4-DCAs)를 선정하였고, n-Alkanoic acids 성분들 중에서는 가장 높은 농도를 보이는 Palmitic acid (C16-AAs)와 Stearic acid (C18-AAs)를 선정하였다. 마지막으로 Sugars 그룹에서 식생연소의 지표로 사용되고 있는 Levoglucosan을 선정하였으며, OP의 생성특성이 달랐던 여름철과 다른 계절의 상관성을 비교해 보기 위해 여름과 여름을 제외한 다른 세 계절의 상관분석을 실시하여 표 2에 제시하였다.

여름철 OP는 OC와 WSOC, HULIS-C와 같이 이차생성의 배출특성을 가진 성분들과 상관성을 보였는데, 특히 식생연소와 이차생성의 지표로 사용되고 있는 HULIS-C와는 유의미한 상관성($r^2=0.52$, $P<.01$)을 보였다. 반면, 개별 유기성분 중 식생연소의 지표로

사용되고 있는 Levoglucosan ($r^2=0.11$)과는 상관성이 낮은 것으로 보아, 여름철에는 식생연소의 배출특성보다 이차생성에 의한 영향이 더 관계가 있을 것으로 보인다. 이것은 앞 절에서 설명했었던 OA의 산화가 많이 이루어지는 여름철 대기 특성 때문에 OC4의 비율이 다른 계절에 비해 높아지는 근거가 될 수 있을 것이라 예상된다.

여름을 제외한 다른 계절에서 OP는 다른 성분들과도 상관성이 높았는데, 특히 HULIS-C ($r^2=0.85$, $P<.01$)와 강한 상관성을 보였으며, 여름과 다르게 Levoglucosan ($r^2=0.46$, $P<.01$)과도 유의미한 상관성을 갖는 것을 확인할 수 있었다. 여름과 다른 계절에서 OP의 상관성을 확인해 보았을 때, 공통적으로 HULIS-C와 관련이 있는 것을 확인할 수 있었으며, 이 결과들을 통해 안면도 지역의 OP는 주로 HULIS-C와 비슷한 배출특성을 가질 것으로 판단된다. 특히, 여름철엔 이차생성의 특성, 다른 계절에는 식생연소의 배출특성을 나타내는 것으로 보인다.

3.4 주성분분석을 통한 OP의 생성특성 파악

OP의 배출특성을 좀 더 명확하게 파악하고자, 대기

Table 3. Principal component analysis of OP with other carbon fractions and individual organic compounds.

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
C16-AAs	.818			
Levogluconan	.765			
C18-AAs	.764			
OP	.751			
HULIS-C	.663			
EC		.884		
Plant wax of n-Alkanes		.825		
OC		.733		
WISOC		.696		
WSOC		.659		
WSOC-(HULIS-C)		.644		
C3-DCAs			.882	
C4-DCAs			.849	
PAHs				.878
Fossil fuel of n-Alkanes				.807
Eigen value	4.2	4.0	2.3	1.9
Variance (%)	28	27	15	13
Estimated sources	biomass burning			

오염물질의 오염원 추정에 사용되고 있는 다변량 통계기법인 주성분분석을 이용하여 안면도 대기 중 PM_{2.5} 내 탄소성분들의 배출원 기여도를 평가하였다. 주성분분석은 상관성이 높은 여러 인자들 사이의 바탕이 되는 공통 인자(Factor)를 추출해 내는 통계방법으로 본 연구에서는 SPSS statistics 23 프로그램을 이용하였고, 고유치(Eigen value)가 1.0 이상을 기준으로 주성분 수를 결정하였다. 또한, 각 인자에 대한 물리적 해석을 용이하기 위해 Varimax 회전법을 이용하여 요인적재량을 산출하였다. 주성분분석에 이용한 성분들은 3.3절의 상관분석에서 선정한 성분과 OC와 EC, WSOC에서 HULIS-C를 제외한 농도를 추가해서 분석하였다(표 3). 본 연구에서 4개의 주요인이 추출되었고, 이들은 전체의 83%를 설명하였다. 본 연구에서 주요 발생원을 파악하고자 하는 성분인 OP는 요인 1에 추출되었으며, 총 분산의 28%를 설명할 수 있었다. 또한, 요인 1에는 HULIS-C 및 Levogluconan과 같은 성분들이 주요성분으로서 추출되었으며, 이들은 앞절에서 설명한 바와 같이 식생연소의 지표로 사용되고 있다(Lin *et al.*, 2010; Simoneit *et al.*, 1999). 즉, 안

면도 대기 중 PM_{2.5} 내 탄소성분 중 OP를 형성하는 비율은 주로 식생연소에 의해 형성된 탄소성분들로 구성되어 있는 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

2015년 6월 3일부터 2017년 5월 26일까지 약 6일 간격으로 안면도 기후변화감시소에서 상시 측정된 PM_{2.5} 시료를 이용하여 탄소성분의 열광학적 분포 특성에 대해 연구를 진행하였다.

TRCs의 계절별 분포를 보면 OC1의 비율은 여름에 만 증가하는 경향을 보였고, OC2와 OC3은 모든 계절에 비슷한 정도를 나타내었으며, OC4와 OP는 계절적 분포가 서로 반대되는 특성을 나타내었다. OC1은 반휘발성 유기탄소에 의한 특성 때문에 여름에만 비율이 높아지는 것으로 해석하였으며, OC4의 비율이 여름에 높아지는 이유는 3.2절에서 여름철 OA의 산화에 의한 특성 때문에 상대적으로 낮은 온도보다 OC4 구간과 같이 고온에서 열분해되기 때문이라고 해석하였다. EC4-5는 여름에만 증가하는 경향을 보였는데 이것은 비난방기간의 배출특성인 차량의 연소와 관련이 있을 것으로 해석하였다. 본 연구에서 분석한 TRCs 성분들은 계절 또는 발생원이나 계절, 대기조건 등에 따라 분포 특성이 다르다는 기존 연구결과들을 바탕으로 해석할 수 있었다.

OP가 OC 구간에서 분기점이 되는 early split 경우, 다른 계절에 비해 여름철에 많은 빈도수를 가졌으며, OA의 산화가 많이 이루어지는 여름철에 OC4의 높은 온도조건에서 많이 열분해가 되기 때문이고, 또한 산화된 OA가 고온에서 열분해될 때 나온 산소가 OC4의 높은 온도조건에서 EC나 OP와 반응하여 CO₂로 빠져나와 레이저 투과율이 증가하기 때문으로 판단되었다. 이러한 특성 때문에 OP는 EC 구간이 아닌 OC4 구간에서 early split이 형성될 것으로 판단된다.

여름과 다른 계절에 OP의 생성특성을 파악하기 위하여 동시에 분석되어진 WSOC와 WISOC, HULIS-

C, 유기성분들과의 상관분석을 실시하였다. 여름철에는 OP가 이차생성과 식생연소의 지표로 사용되고 있는 HULIS-C ($r^2=0.52$, $P<.01$)만이 유의미한 상관성을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 반면, 다른 계절에는 OP가 HULIS-C ($r^2=0.85$, $P<.01$)와 더불어 식생연소의 지표인 Levoglucosan ($r^2=0.46$, $P<.01$)과도 유의미한 상관성을 보였다. 주성분분석 결과에서도 OP는 HULIS-C 및 Levoglucosan과 함께 전체 분산 중 28%를 설명하는 요인 1에 추출되었다. 따라서 안면도 대기 중 PM_{2.5} 내 생성되는 OP는 여름철에는 식생연소에 의한 배출특성이 적을 것으로 보이지만, 다른 계절에는 주로 식생연소에 의한 배출특성과 관련이 높을 것으로 예상된다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 기상산업진흥원(CATER 2014-3190), 2019년도 국립환경과학원(NIER-2019-03-01-003), 2017년도 정부(과학기술정보통신부, 환경부, 보건복지부)의 재원으로 한국연구재단-미세먼지국가전략프로젝트사업(2017M3D8A1092015)의 지원을 받아 수행하였음.

References

- Alejandro, K., Heinz, B. (2017) Characterizing particulate emissions from wood burning appliances including secondary organic aerosol formation potential, *Journal of Aerosol Science*, 114, 21-30, <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.08.014>.
- Bae, M.S., Park, S.S., Kim, Y.J. (2013) Characteristics of Carbonaceous Aerosols Measured at Gosan - Based on Analysis of Thermal Distribution by Carbon Analyzer and Organic Compounds by GCMS, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(6), 722-733, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2013.29.6.722>.
- Bi, X., Sheng, G., Peng, P.A., Chen, Y., Zhang, Z., Fu, J. (2003) Distribution of particulate-and vapor-phase n-alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons in urban atmosphere of Guangzhou, China, *Atmospheric Environment*, 37(2), 289-298, [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00832-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00832-4).
- Birch, M.E., Cary, R.A. (1996) Elemental Carbon-Based Method for Monitoring Occupational Exposures to Particulate Diesel Exhaust, *Aerosol Science and Technology*, 25(3), 221-241, <https://doi.org/10.1080/02786829608965393>.
- Cao, J.J., Wu, F., Chow, J.C., Lee, S.C., Li, Y., Chen, S.W., An, Z.S., Fung, K.K., Watson, J.G., Zhu, C.S., Liu, S.X. (2005) Characterization and source apportionment of atmospheric organic and elemental carbon during fall and winter of 2003 in Xi'an, China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5, 3127-3137, <https://doi.org/10.5194/acp-5-3127-2005>.
- Cavalli, F., Viana, M., Yttri, K.E., Genberg, J., Putaud, J.P. (2010) Toward a standardised thermal optical protocol for measuring atmospheric organic and elemental carbon: the EUSAAR protocol, *Atmospheric Measurement Techniques*, 3, 79-89, <https://doi.org/10.5194/amt-3-79-2010>.
- Choi, N.R., Lee, S.P., Lee, J.Y., Jung, C.H., Kim, Y.P. (2016) Speciation and source identification of organic compounds in PM₁₀ over Seoul, South Korea, *Chemosphere*, 144, 1589-1596, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.10.041>.
- Chow, J.C., Watson, J.G., Crow, D., Lowenthal, D.H., Merrifield, T. (2001) Comparison of IMPROVE and NIOSH Carbon Measurements, *Aerosol Science and Technology*, 34(1), 23-34.
- Chow, J.C., Watson, J.G., Chen, L.W., Arnott, W.P., Moosmüller, H., Fung, K. (2004) Equivalence of elemental carbon thermal/optical reflectance and transmittance with different temperature protocols, *Environmental Science and Technology*, 38, 4414-4422, <https://doi.org/10.1021/es034936u>.
- Chow, J.C., Watson, J.G., Kuhns, H., Etyemezian, V., Lowenthal, D.H., Crow, D., Kohl, S.D., Engelbrecht, J.P., Green, M.C. (2004) Source profiles for industrial, mobile, and area sources in the Big Bend Regional Aerosol Visibility and Observational study, *Chemosphere*, 54(2), 185-208, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2003.07.004>.
- Cheng, Y., Zheng, M., He, K., Chen, Y., Yan, B., Russell, A.G., Shi, W., Jiao, Z., Sheng, G., Fu, J., Edgerton, E.S. (2011) Comparison of two thermal-optical methods for the determination of organic carbon and elemental carbon:

- Results from the southeastern United States, *Atmospheric Environment*, 45(11), 1913-1918, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.01.036>.
- El Haddad, I., Marchand, N., Dron, J., Temime-Roussel, B., Quivet, E., Wortham, H., Jaffrezom, J.L., Baduel, C., Voisin, D., Besombes, J.L., Gille, G. (2009) Comprehensive primary particulate organic characterization of vehicular exhaust emissions in France, *Atmospheric Environment*, 43(39), 6190-6198, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.09.001>.
- Fang, G.C., Huang, J.H., Huang, Y.L. (2010) Polycyclic aromatic hydrocarbons pollutants in the Asian atmosphere during 2001-2009, *Environment*, 11, 207-215, <https://doi.org/10.1080/15275922.2010.495934>.
- Fung, K.K., Chow, J.C., Watson, J.G. (2002) Evaluation of OC=EC speciation by thermal manganese dioxide oxidation and the IMPROVE method, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 52, 1333-1341, <https://doi.org/10.1080/10473289.2002.10470867>.
- Ghim, Y.S., Moon, K.C., Lee, S.H., Kim, Y.P. (2005) Visibility trends in Korea during past two decades, *Journal of the Air and Waste Management Association*, 55(1), 73-82, <https://doi.org/10.1080/10473289.2005.10464599>.
- Han Y.M., Lee, S.C., Cao, J.J., Ho, K.F., An, Z.S. (2009) Spatial distribution and seasonal variation of char-EC and soot-EC in the atmosphere over China, *Atmospheric Environment*, 43(38), 6066-6073, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.08.018>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (1992) The supplementary report to the IPCC scientific assessment, Cambridge University Press, 25-46.
- Karanasiou, A., Minguillón, M.C., Viana, M., Alastuey, A., Putaud, J.P., Maenhaut, W., Panteliadis, P., MoErik, G., Favez, O., Kuhlbusch, T.A.J. (2015) Thermal-optical analysis for the measurement of elemental carbon (EC) and organic carbon (OC) in ambient air a literature review, *Atmospheric Measurement Technology*, 8, 9649-9712, <https://doi.org/10.5194/amt-8-9649-2015>.
- Khan, B., Hays, M.D., Geron, C., Jetter, J. (2012) Differences in the OC=EC ratios that characterize ambient and source aerosols due to thermal-optical analysis, *Aerosol Science and Technology*, 46, 127-137, <https://doi.org/10.1080/02786826.2011.609194>.
- Kim, E., Hopke, P.K. (2004) Source Apportionment of Fine Particles in Washington, DC, Utilizing Temperature-Resolved Carbon Fractions, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 54(7), 773-785, <https://doi.org/10.1080/10473289.2004.10470948>.
- Kim, E., Hopke, P.K. (2005) Improving Source Apportionment of Fine Particles in the Eastern United States Utilizing Temperature-Resolved Carbon Fractions, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 55(10), 1456-1463, <https://doi.org/10.1080/10473289.2005.10464748>.
- Kim, H.S., Jung, J.S., Lee, J.H., Lee, S.I. (2015) Comparison of OC and EC Measurement Results Determined by Thermal-optical Analysis Protocols, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(5), 449-460, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2015.31.5.449>.
- Kim, K.A., Lee, Y.S., Kim, E.S., Jung, C.H., Kim, Y.P., Lee, J.Y. (2018) Monthly Variation of n-alkanes concentration in PM_{2.5} of the Anmyeon Island, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(1), 166-17. (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.1.166>.
- Laskin, A., Laskin, J., Nizkorodov, S.A. (2015) Chemistry of atmospheric brown carbon, *Chemical reviews*, 115(10), 4335-4382, <https://doi.org/10.1021/cr5006167>.
- Lee, S.P. (2016) Temporal trend of Humic Like Substances-Carbon (HULIS-C) concentration in PM_{2.5} and major factor determining their concentrations in Seoul, Master's degree, Department of Renewable Energy Convergence, Chosun University, 14-16.
- Lim, H.B., Kim, Y.P., Lee, J.Y. (2016) Day and night distribution of gas and particle phases Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) concentrations in the atmosphere of Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(4), 408-421. (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2016.32.4.408>.
- Lim, S., Lee, M., Lee, G., Kim, S., Yoon, S., Kang, K. (2012) Ionic and carbonaceous compositions of PM₁₀, PM_{2.5} and PM_{1.0} at Gosan ABC Superstation and their ratios as source signature, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(4), 2007-2024, <https://doi.org/10.5194/acp-12-2007-2012>.
- Lin, P., Engling, G., Yu, J.Z. (2010) Humic-like substances in fresh emissions of rice straw burning and in ambient aerosols in the Pearl River Delta Region, China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(14), 6487-6500, <https://doi.org/10.5194/acp-10-6487-2010>.
- Mayol-Bracero, O.L., Guyon, P., Graham, B., Roberts, G., Andreae, M.O., Decesari, S., Facchini, M.C., Fuzzi, S., Artaxo, P. (2002) Water soluble organic compounds in biomass burning aerosols over Amazonia 2. Apportionment of the chemical composition and importance of the polyacidic fraction, *Journal of Geophysical Research*,

- 107(D20), 59(1-15), <https://doi.org/10.1029/2001JD000522>.
- Miyazaki, Y., Kondo, Y., Takegawa, N., Komazaki, Y., Fukuda, M., Kawamura, K., Mochida, M., Okuzawa, K., Weber, R.J. (2006) Time resolved measurements of water soluble organic carbon in Tokyo, *Journal of Geophysical Research*, 111(D23), <https://doi.org/10.1029/2006JD007125>.
- National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH) (1996) Elemental Carbon (Diesel Exhaust). In NIOSH Manual of Analytical Methods. National Institute of Occupational Safety and Health, Cincinnati, OH.
- Novakov, T., Corrigan, C.E. (1995) Thermal characterization of biomass smoke particles, *Microchimica Acta*, 119, 157-166.
- Oh, S.H., Park, D.J., Cho, J.H., Han, Y.J., Bae, M.S. (2018) Intercomparison of Carbonaceous Analytical Results using NIOSH5040, IMPROVE_A, EUSAAR2 Protocols, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(3), 447-456, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.3.447>.
- Pavuluri, C.M., Kawamura, K., Swaminathan, T. (2010) Water soluble organic carbon, dicarboxylic acids, ketoacids, and α dicarbonyls in the tropical Indian aerosols, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 115, <https://doi.org/10.1029/2009JD012661>.
- Querol, X., Moreno, T., Karanasiou, A., Reche, C., Alastuey, A., Viana, M., Font, O., Gil, J., de Miguel, E., Capdevila, M. (2012) Variability of levels and composition of PM₁₀ and PM_{2.5} in the Barcelona metro system, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12, 5055-5076, <https://doi.org/10.5194/acp-12-5055-2012>.
- Rogge, W.F., Monica, A., Mazurek, M.A., Hildemann, L.M., Cass, G.R., Simoneit, B.R.T. (1993) Quantification of urban organic aerosols at a molecular level: identification, abundance and seasonal variation, *Atmospheric Environment*, 27(8), 1309-1330, [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(93\)90257-Y](https://doi.org/10.1016/0960-1686(93)90257-Y).
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2006) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc.
- Seinfeld, J.H., Pankow, J.F. (2003) Organic atmospheric particulate material. *Annual Review of Physical Chemistry*, 54(1), 121-140.
- Simoneit, B.R.T., Sheng, G., Chen, X., Fu, J., Zhang, J., Xu, Y. (1991) Molecular marker study of extractable organic matter in aerosol from urban areas of China, *Atmospheric Environment*, 25(10), 2111-2129, [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(91\)90088-O](https://doi.org/10.1016/0960-1686(91)90088-O).
- Simoneit, B.R.T., Schauer, J.J., Nolte, G., Oros, D.R., Elias, V.O., Fraser, M.P., Rogge, W.F., Cass, G.R. (1999) Levoglucosan, a tracer for cellulose in biomass burning and atmospheric particles, *Atmospheric Environment*, 33(2), 173-182, [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00145-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00145-9).
- Simoneit, B.R.T., Kobayashi, M., Mochida, M., Kawamura, K., Lee, M., Lim, H.J., Turpin, B.J., Komazaki, Y. (2004) Composition and major sources of organic compounds of aerosol particulate matter sampled during the ACE-Asia campaign, *Journal of Geophysical Research*, 109(D19), <https://doi.org/10.1029/2004JD004598>.
- Son, S.C., Bae, M.S., Park, S.S. (2015) Chemical Characteristics and Formation Pathways of Humic Like Substances (HULIS) in PM_{2.5} in an Urban Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(3), 239-254. (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2015.31.3.239>.
- Son, S.C., Park, S.S. (2019) Mass Size Distributions of Water-soluble Aerosol Particles during High Fine Particulate Matter Episode over Gwangju in November 2018, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(4), 423-437. (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.4.423>.
- World Health Organization (WHO) (2006) Health Risks of Particulate Matter From Long range Trans boundary Air Pollution, WHO Regional Office for Europe, <https://doi.org/10.1021/es025672z>.
- Yang, H., Yu, J.Z. (2002) Uncertainties in Charring Correction in the Analysis of Elemental and Organic Carbon in Atmospheric Particles by Thermal/Optical Methods, *Environmental Science and Technology*, 36(23), 5199-5204, <https://doi.org/10.1021/es015540q>.
- Yu, J.Z., Xu, J., Yang, H. (2002) Charring Characteristics of Atmospheric Organic Particulate Matter in Thermal Analysis, *Environmental Science and Technology*, 36(4), 754-761.
- Zhu, C.S., Cao, J.J., Tsai, C.J., Shen, Z.X., Han, Y.M., Liu, S.X., Zhao, Z.Z. (2014) Comparison and implications of PM_{2.5} carbon fractions in different environments, *Science of the Total Environment*, 466, 203-209, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.029>.

Authors Information

장유운 (국립환경과학원 호남권대기오염집중측정소 전문위원)
이지이 (이화여자대학교 환경공학과 교수)