

논문

서울 PM_{2.5} 내 2차 유기탄소의 기여도와 주요 생성 요인

Contribution and Major Factors of Secondary Organic Carbon Formation in PM_{2.5} in Seoul

오승미, 박승명¹⁾, 허국영¹⁾, 김용표²⁾, 정창훈³⁾, 이지이*

이화여자대학교 환경공학과, ¹⁾국립환경과학원 대기환경연구과,
²⁾서울대학교 보건환경연구소, ³⁾경인여자대학교 보건의료행정학과

Seungmee Oh, Seung-Myung Park¹⁾, Gookyoung Heo¹⁾, Yong Pyo Kim²⁾,
Chang Hoon Jung³⁾, Ji Yi Lee*

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

¹⁾Air Quality Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea

²⁾Institute of Health and Environment, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea

³⁾Department of Health Management, Kyungin Women's University, Incheon, Republic of Korea

접수일 2026년 2월 25일
수정일 2026년 3월 10일
채택일 2026년 3월 11일

Received 25 February 2026

Revised 10 March 2026

Accepted 11 March 2026

*Corresponding author

Tel : +82-(0)2-3277-5945

E-mail : yijiyi@ewha.ac.kr

Abstract This study quantified the fraction of secondary organic carbon (SOC) within organic carbon (OC) in fine particles (PM_{2.5}) and investigated the characteristics of SOC formation and spatial origins of both SOC and primary organic carbon (POC) in PM_{2.5} in Seoul using hourly resolved atmospheric monitoring data in 2023. While PM_{2.5} and its major components such as NO₃⁻ and elemental carbon (EC) exhibited typical winter-high and summer-low seasonal patterns, OC maintained elevated levels across all seasons. Using the minimum R-squared (MRS) method, the annual average POC and SOC concentrations were estimated at 2.3 and 1.9 μg m⁻³, respectively, with SOC accounting for 45% of the total OC and peaking at 3.7 μg m⁻³ in July. During summer, SOC showed strong correlations with O₃ and O_x (i.e., sum of O₃ and NO₂) under high temperatures, indicating the dominant photochemical oxidation. In contrast, winter SOC was linked to elevated CO, NO₂, and high relative humidity, which suggests the importance of aqueous-phase reactions and the accumulation of primary emissions. Spatial analyses, including bivariate polar plots and concentration weighted trajectory (CWT) modeling, confirmed that summer SOC was dominantly formed locally from domestic precursors under stagnant conditions. In contrast, elevated winter and spring carbonaceous aerosol concentrations were significantly influenced by the long-range transport of pollutants from northeastern China across the Yellow Sea, coupled with regional aqueous chemistry. These findings highlight that effective mitigation of OC in PM_{2.5} in Seoul requires season-specific strategies: controlling local VOCs and oxidant levels to reduce summer photochemical SOC while addressing both regional transport and local precursor emissions in winter.

Key words: PM_{2.5}, Organic carbon (OC), Secondary organic carbon (SOC), O_x, Aqueous chemistry

1. 서론

지난 10년간 수도권에서는 경유차 배출가스 저감, 석탄 발전 감축, 계절 관리제 시행 등 다양한 대기질 관리 정책을 통해 초미세먼지 (PM_{2.5}) 농도가 뚜렷하게 감소하였다. 이에 따라 황산염, 질산염, 암모늄 등

PM_{2.5}의 주요 2차 무기이온과 원소탄소 (elemental carbon, EC) 농도 역시 전반적으로 감소하는 경향을 보여왔다 (Park *et al.*, 2020; Yeo *et al.*, 2019). 반면, 유기탄소 (organic carbon, OC)는 뚜렷한 감소 추세를 보이지 않고 일정 수준을 유지하고 있어, PM_{2.5} 내에서 차지하는 비중이 상대적으로 증가하는 양상이 관찰되고 있

다(NIER, 2024). 이러한 결과는 향후 PM_{2.5} 농도를 추가로 저감하기 위해서는 OC 관리가 핵심 과제가 될 수 있음을 시사한다.

OC는 배출원에서 직접 배출되는 1차 유기탄소(primary OC, POC)와 휘발성유기화합물(volatile organic compounds, VOCs) 등이 대기 중에서 산화 및 응축되며 생성되는 2차 유기탄소(secondary OC, SOC)로 구분된다(Seinfeld and Pandis, 2016). POC는 연료 전환, 연소 효율 개선, 배출 저감 장치 적용 등을 통해 직접적으로 관리가 가능하지만, SOC는 기상 조건과 산화제 농도, 전구물질 조성 등 다양한 요인의 영향을 받기 때문에 단순한 배출 규제로는 효과적인 저감에 한계가 있다. 특히 SOC 비중이 클수록, OC 저감을 위해서는 SOC 생성 메커니즘과 지배 요인에 대한 이해가 선행될 필요가 있다.

그러나 SOC는 대기 중에서 직접 측정하기 어렵기 때문에, OC와 EC 관측값을 활용하여 POC와 SOC를 분리해 추정하는 간접 추정 기법에 의존해 왔다. 이 중 EC 추적자 방법(EC tracer method)은 EC가 1차 연소 과정에 의해서만 배출되고 대기 중에서 추가 생성이 거의 없다는 가정에 기반하여, 최소 OC/EC 비율을 1차 배출 비율((OC/EC)_{pri})로 두고 POC와 SOC를 분리하는 방법으로 가장 널리 활용되어 왔다(Turpin and Huntzicker, 1995). 다만 실제 대기에서는 배출원 구성, 기상 조건, 시간대 등에 따라(OC/EC)_{pri}가 변화할 수 있어, 최소값과 같이 고정된 단일 값으로 가정할 경우 SOC 추정에 불확실성이 발생한다는 한계가 지적되어 왔다(Yoo *et al.*, 2022; Wu *et al.*, 2019; Wu and Yu, 2016).

이러한 한계를 보완하기 위해, 관측된 OC/EC 자료의 하위 구간에서 회귀식을 이용해(OC/EC)_{pri}를 산정하는 방법, EC와 SOC의 상관성을 최소화하는 OC/EC 비율을 찾는 최소 결정계수 방법(minimum R-squared method, MRS) 등 다양한 통계 기반 기법이 제안되었다(Wu and Yu, 2016; Millet *et al.*, 2005). 나아가 EC tracer 방법의 개념을 확장하여, 다중회귀분석(multiple linear regression, MLR)이나 베이저안 추론(Bayesian inference, BI)을 통해 PM_{2.5} 내 다른 화학 조성과

기상 인자를 함께 고려하는 SOC 추정 기법이 제시되었다(Liao *et al.*, 2023; Yuan *et al.*, 2006).

그러나, 국내에서는 OC와 EC 측정 결과를 통해 다양한 EC tracer 방법을 활용한 SOC 연구가 아직 충분히 축적되지 못한 실정이다(Han *et al.*, 2023; Yoo *et al.*, 2022). 이와 같은 여건을 고려할 때, MRS 기법은 EC tracer 방법을 기반으로 하여 OC 및 EC 관측 자료만으로도 SOC를 추정할 수 있다는 점에서 활용성이 높으며, 단순 최소값 기반(OC/EC)_{pri} 산정에 비해 SOC 추정의 오차가 작고 다양한 조건에서 상대적으로 안정적인 성능을 보이는 것으로 평가되고 있다(Wu and Yu, 2016).

특히 서울의 경우, 앞서 언급했듯이 EC와 2차 무기이온은 장기적으로 감소하는 반면 OC는 정체 또는 증가하는 경향이 있어, 효과적인 OC 및 PM_{2.5} 관리를 위해서는 OC 내 POC와 SOC의 기여도와 발생 특성을 정량적으로 평가할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 수도권 대기환경연구소에서 2023년 한 해 동안 1시간 해상도로 관측한 PM_{2.5} 및 화학 조성 자료를 이용하여, MRS 기반 EC 추적자 방법을 적용함으로써 POC와 SOC 농도를 분리하여 정량적으로 추정하고자 하였다. 나아가 SOC의 월별 및 일변화 특성을 분석하고, 주요 화학종 및 기상 인자와의 관계를 통해 SOC 생성의 주요 지배 요인과 계절별 및 시간대별 생성 메커니즘을 규명함으로써, 향후 수도권 지역의 OC 및 SOC 저감을 위한 과학적 근거를 제시하는 것을 연구 목적으로 하였다.

2. 연구 방법

2.1 연구 대상 지역

본 연구는 서울시 은평구 불광동에 위치한 수도권 대기환경연구소(37°36'N, 126°56'E, 해발 67 m)에서 2023년 1월 1일부터 12월 31일까지 1시간 해상도로 관측한 자료를 이용하였다. 해당 지점은 교통, 상업 및 주거, 난방, 산업 등 다양한 배출원이 혼재한 도심 지

역으로, 서울 전역의 대표성을 가지면서도 주변에 북한산 국립공원이 위치해 인근 산림으로부터의 생물기원 영향도 함께 반영되는 특징이 있다.

2.2 PM_{2.5} 화학 성분 및 기상 관측 자료

본 연구에서 분석에 사용한 자료는 PM_{2.5} 질량농도, 주요 이온 성분(SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺), 탄소 성분(OC, EC), 주요 기체상 성분(SO₂, NO₂, CO, O₃) 및 기상 자료(기온, 상대습도)이다. 모든 자료는 수도권 대기환경연구소에서 QA/QC 과정을 거쳐 산출된 1시간 평균 자료를 활용하였다. 측정 장비는 아래에 간단하게 설명하였고, 더욱 상세한 측정 정보는 국립환경과학원의 대기환경연구소 연간 운영결과 보고서(NIER, 2024) 등에서 확인할 수 있다.

PM_{2.5} 질량농도는 베타선 흡수법을 연속 측정기(Beta-ray Attenuation Monitor, BAM-1020, Met One Instruments Inc., USA)에 Very Sharp Cut Cyclone(VSCC)을 부착하여 유량 16.7 L min⁻¹으로 측정하였다. 주요 이온성분(SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺ 등)은 연속 이온 분석 장비(Ambient Ion Monitor, URG-9000D, URG Corp., USA)를 이용하였다. 탄소성분(OC, EC)은 National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH) 5040 프로토콜에 따라 열광학적 투과 방식의 반 연속 OC/EC 분석기(Sunset Laboratory Inc., USA)를 사용하여 측정하였다. 기체상 오염물질은 표준 자동 측정 장비로 측정되었다. SO₂는 자외선 형광법(Thermo 43iQ), NO₂는 화학 발광법(Thermo 42iQ), CO는 비분산 적외선 분석법(Thermo 48iQ), O₃는 자외선 광도법(Thermo 49iQ)으로 측정되었다.

2.3 SOC 추정 방법: MRS 방법

EC 추적자 방법은 OC가 1차 배출(POC)과 2차 생성(SOC)의 합으로 구성되고, EC는 오직 1차 연소 과정에서만 배출되며 대기 중에서 추가 생성이 거의 없다는 가정에 기반한다(Castro *et al.*, 1999; Turpin and Huntzicker, 1995). 이때, 1차 배출 직후 대기 중에서 산화 반응이 거의 진행되지 않은 상태에서의 OC/EC 비

율(OC/EC)_{pri}라 정의하고, 아래와 같은 수식을 통해 POC와 SOC를 계산한다.

$$POC = (OC/EC)_{pri} \times EC \quad (1)$$

$$SOC = OC - POC \quad (2)$$

실제 대기에서는 배출원 구성, 난방 등의 연료 연소(1차연소) 및 기상 조건 등에 따라(OC/EC)_{pri}가 시기별로 크게 달라질 수 있다. 본 연구에서는 이와 같은 변동성을 반영하고 보다 객관적인 값 선정을 위해, SOC와 EC 간의 상관관계수가 최소가 되는 조건에서(OC/EC)_{pri}를 도출하는 MRS 방법을 적용하였다(Wu and Yu, 2016; Millet *et al.*, 2005). MRS는 일정 범위(예: 0~15)로 가정한(OC/EC)_{pri} 값을 변화시키며 SOC를 계산하고, 각 경우에 대해 SOC와 EC 간의 결정계수(R²)를 산출한 뒤, R²가 최소가 되는(OC/EC)_{pri}를 최적값으로 선정한다. 특히 대도심 지역인 서울에서는 겨울철 난방 등의 연료 연소가 배출 특성과 OC/EC 비율에 큰 영향을 줄 것으로 판단하여, 2023년 월평균 기온이 약 10°C 이하인 11월부터 3월을 난방기, 4월부터 10월을 비난방기로 구분하여 각각 독립적으로 MRS 분석을 수행하였다.

2.4 장거리 수송 영향 분석

외부에서 유입되는 기류의 이동 경로를 추적하기 위해 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서 제공하는 HYSPLIT(Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델을 활용하였다(Stein *et al.*, 2015). 역궤적 산출을 위한 기상 입력 자료로는 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)의 GDAS(Global Data Assimilation System) 1°×1° 데이터를 사용하였다. 수용점인 서울 관측소를 도착 지점으로 설정하고, 지상 1000 m 높이에서 1시간 간격으로 72시간 역궤적을 산출하였다.

산출한 역궤적 자료를 바탕으로 POC와 SOC의 잠재적인 주요 배출 지역을 식별하기 위해 농도 가중치 궤적(Concentration Weighted Trajectory, CWT) 분석

을 수행하였다(Hsu *et al.*, 2003; Stohl, 1996; Seibert *et al.*, 1994). CWT 방법은 분석 대상 영역을 일정한 격자로 분할한 뒤, 각 격자를 통과하는 기단의 수용점 도달 시 농도를 가중 평균하여 해당 격자의 배출 기여도를 평가하는 방법이다. 특정 격자 (i, j)의 가중 평균 기여 농도인 C_{ij}는 다음 식 (3)과 같이 계산한다.

$$C_{ij} = \frac{\sum_{l=1}^M C_l \tau_{ijl}}{\sum_{l=1}^M \tau_{ijl}} \quad (3)$$

이때, l은 각 궤적을 의미하며, M은 전체 궤적의 수, C_l은 궤적 l이 수용점에 도달했을 때 관측된 오염물질의 1시간 평균 농도, τ_{ijl}는 궤적 l이 격자 (i, j)에 머문 시간을 의미한다. 본 연구에서는 CWT 모델링 및 시각화를 R 소프트웨어 버전 4.2.1에서 openair 패키지를 활용하여 수행하였다(Carlsaw and Ropkins, 2012).

3. 결과 및 고찰

3.1 서울 PM_{2.5} 및 화학 조성 특성

2023년 수도권 대기환경연구소 관측 자료를 이용하여 PM_{2.5}와 주요 화학 성분의 월별 특성을 분석하였다(표 1). 연평균 PM_{2.5} 농도는 26.1 ± 18.0 μg m⁻³로, 12월

부터 3월에 30 μg m⁻³를 초과하고 6월부터 10월에는 약 20 μg m⁻³ 수준으로 낮아지는 전형적인 겨울철 고농도 및 여름철 저농도 패턴을 보였다. NO₃⁻, NH₄⁺, EC도 PM_{2.5}와 유사한 월별 변화를 나타내었으며, 이는 겨울철 난방 및 연소 배출 증가와 대기 정체, 안정층 형성에 따른 질산암모늄의 축적 등이 겨울철 PM_{2.5} 고농도에 중요한 기여를 하고 있음을 시사한다(Bae *et al.*, 2023; Kim *et al.*, 2017).

반면 SO₄²⁻과 OC는 다른 성분들에 비해 계절 변동성이 작았다. SO₄²⁻ 농도는 선행 연구와 같이 여름에 겨울보다 약간 높은 수준을 보였으며, 이는 높은 상대 습도와 고온 및 강한 일사 조건에서 SO₂의 활발한 광화학 및 액상 산화 과정이 반영된 결과로 생각된다(Oh *et al.*, 2023; Lee *et al.*, 2022; Kim *et al.*, 2021; Seinfeld and Pandis, 2016). OC 농도는 대체로 겨울철에 높았으나 여름철에도 크게 감소하지 않았다. 특히 7월 OC 농도는 5.7 ± 3.7 μg m⁻³로 연중 가장 높았으며, 당시 PM_{2.5} 농도를 고려할 때 OC가 PM_{2.5} 질량농도의 약 27%를 차지하였다. 이는 겨울철(예: 1월 OC/PM_{2.5} = 14%)에 비해 상대적으로 높은 비율이며, 여름철에 OC가 PM_{2.5} 조성에서 차지하는 중요성이 증가함을 의미한다.

이러한 결과는 2023년 서울에서 PM_{2.5} 질량농도와 SO₄²⁻를 제외한 2차 무기이온, EC가 뚜렷한 겨울 고농

Table 1. Monthly mean concentrations (± standard deviation) of PM_{2.5}, SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺, OC, EC, POC, and SOC in Seoul, 2023 (unit: μg m⁻³).

Month	PM _{2.5}	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	OC	EC	POC	SOC
1	32.1 ± 23.2	2.5 ± 2.7	7.8 ± 8.2	3.0 ± 3.2	4.5 ± 2.4	1.2 ± 0.8	2.8 ± 1.4	1.7 ± 1.2
2	38.0 ± 21.1	3.8 ± 2.6	10.0 ± 8.0	4.2 ± 3.1	5.2 ± 2.1	1.3 ± 0.5	2.9 ± 1.2	2.3 ± 1.2
3	35.7 ± 21.7	3.5 ± 2.5	10.6 ± 9.9	4.0 ± 3.5	4.3 ± 2.1	1.1 ± 0.6	2.4 ± 1.2	1.9 ± 1.3
4	26.6 ± 18.4	2.1 ± 1.2	4.6 ± 4.6	1.9 ± 1.8	4.2 ± 4.6	1.1 ± 1.3	3.3 ± 4.2	0.9 ± 1.4
5	23.4 ± 12.2	2.7 ± 1.4	3.5 ± 4.0	1.9 ± 1.5	4.0 ± 2.3	0.8 ± 0.5	2.6 ± 1.7	1.3 ± 1.1
6	19.4 ± 8.2	3.3 ± 1.6	2.3 ± 2.2	1.7 ± 1.0	3.9 ± 1.9	0.7 ± 0.3	2.2 ± 0.9	1.7 ± 1.4
7	21.3 ± 11.0	3.9 ± 1.7	1.5 ± 1.8	1.8 ± 1.0	5.7 ± 3.7	0.6 ± 0.3	2.0 ± 1.0	3.7 ± 3.0
8	17.0 ± 6.1	3.3 ± 1.1	0.8 ± 0.9	1.2 ± 0.5	3.4 ± 1.7	0.5 ± 0.2	1.5 ± 0.7	1.9 ± 1.4
9	16.8 ± 11.6	2.8 ± 2.5	1.4 ± 2.5	1.3 ± 1.6	2.8 ± 1.1	0.5 ± 0.2	1.5 ± 0.6	1.3 ± 0.8
10	14.8 ± 8.2	1.3 ± 0.8	1.4 ± 1.6	0.7 ± 0.7	3.2 ± 1.5	0.6 ± 0.3	1.8 ± 0.8	1.3 ± 0.9
11	24.4 ± 16.8	1.8 ± 1.5	5.3 ± 5.5	2.2 ± 2.3	4.2 ± 1.7	0.6 ± 0.2	1.3 ± 0.5	2.9 ± 1.4
12	31.3 ± 16.6	2.2 ± 1.1	7.0 ± 5.6	3.1 ± 2.1	4.7 ± 2.0	0.7 ± 0.3	1.5 ± 0.6	3.2 ± 1.7
Average	26.1 ± 18.0	2.8 ± 2.0	5.1 ± 6.7	2.4 ± 2.4	4.2 ± 2.7	0.9 ± 0.7	2.3 ± 1.9	1.9 ± 1.7

도 및 여름 저농도 패턴을 보이는 반면, OC는 겨울과 여름 모두에서 높은 수준을 유지하며 계절 편차가 작다는 점을 보여준다. 이는 중국 도심 지역에서 보고된 여름철 OC 농도 패턴과는 차이를 보인다(Zhan *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2016). 중국의 경우 겨울철 난방용 화석연료 연소와 생물성 연소 등의 증가로 고농도의 OC가 관측되는 반면, 여름철에는 원활한 대기 확산 조건으로 인해 그 농도가 급감하는 경향이 나타난다. 이와 대조적으로 본 연구에서 확인된 서울의 여름철 OC 고농도 유지 현상은, 국외 장거리 수송 영향이 상대적으로 약한 시기임에도 불구하고 국내 배출원으로부터 기인한 VOCs와 대기 화학 반응이 OC 농도에 큰 영향을 줄 수 있음을 시사한다. 따라서 국내 배출 관리 정책을 통해 여름철 OC 농도를 저감할 경우 PM_{2.5} 연평균 농도 개선에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

3.2 MRS를 이용한 SOC 추정 결과

MRS 기법을 적용한 결과, 난방기(11~3월)와 비난방기(4~10월)의 1차 배출 비율((OC/EC)_{pri})은 각각 2.28과 3.27로 산출되었으며, 이는 측정된 전체 OC/EC 비율 데이터의 각각 하위 1.12%, 10.44%에 해당한다(표 2). 이러한 계절별(OC/EC)_{pri} 차이는 주요 배출원 구성 변화에 기인하는 것으로 보고된 바 있다(Wang *et al.*, 2022; Yoo *et al.*, 2022). 난방기에 해당 값과 백분위수가 낮은 것은 화석연료 연소 등 EC 배출 비중이 높은 연소 배출원이 지배적이기 때문이다. 실제 관측된 최저 비율인(OC/EC)_{min}는 난방기 0.58, 비난방기 1.58로 나타나, 난방기에 EC 배출 기여도가 상대적으로 높음을 뒷받침한다.

반면, 비난방기에(OC/EC)_{pri}가 3.27로 상대적으로 높게 산정되고 SOC 흡수 산출 빈도가 증가한 것은 배

출원 구성의 복잡성으로 인한 MRS 방법론의 통계적 특성에서 기인한 것으로 판단된다. Wu and Yu (2016)에 따르면, MRS 기법을 통해 정확한 1차 배출 비율을 도출하기 위해서는 연구 기간(OC/EC)_{pri}가 비교적 일정하게 유지되어야 한다. 그러나 비난방기에는 식생 및 유기용제 휘발 등 다수의 비연소 기원 배출이 혼재하여(Lee *et al.*, 2024; Kim *et al.*, 2022) 이러한 전제가 충족되기 어렵고, 결과적으로 산출되는(OC/EC)_{pri} 값이 상향 편향될 가능성이 있다. 즉, 실제 관측된 비율이 이 기준선(3.27)보다 낮아지는 구간에서는 수직적으로 흡수의 SOC가 도출될 수 있다. 본 연구에서는 이러한 흡수 SOC 값은 유의미한 2차 생성이 없는 상태로 해석하여 0으로 보정 후 분석을 수행하였다(Wu and Yu, 2016).

추정된 POC와 SOC의 월별 농도를 분석한 결과(표 1), 연평균 POC 농도는 $2.3 \pm 1.9 \mu\text{g m}^{-3}$ 로 PM_{2.5}, EC와 유사하게 겨울과 봄철에 증가하고 여름에 낮아지는 뚜렷한 경향을 보였다. 반면, SOC 농도는 연평균 $1.9 \pm 1.7 \mu\text{g m}^{-3}$ 로 전체 OC의 45%를 차지하였으며, 초겨울(11~12월)에 농도가 높긴 하나 여름철에 뚜렷한 감소를 나타내지 않았다. 7월, 8월과 11월, 12월에는 SOC 농도가 POC 농도보다 높았으며, 특히 7월 SOC 농도는 평균 $3.7 \pm 3.0 \mu\text{g m}^{-3}$ 로 연중 최고 농도를 보였다. 이는 겨울철에 명확하게 나타나는 배출활동(난방배출 등) 증가와 대기 정체에 의한 축적뿐만 아니라, 여름철에는 측정소 인근 북한산 등 산림 지역으로부터 배출되는 자연기원 휘발성유기화합물 및 유기용제 휘발 증가(Lee *et al.*, 2024; Kim *et al.*, 2022)와 활발한 광화학 반응 등이 SOC 생성에 크게 기여할 수 있음을 시사한다.

그림 1의 일변화 분석에서 POC는 EC와 유사한 경향을 보이며, 아침 7시부터 증가하여 10시 최고점을

Table 2. MRS results for heating and non-heating periods in Seoul, 2023.

Period	(OC/EC) _{min}	(OC/EC) _{pri}	Percentile	Total data points	Negative SOC cases
Heating (Nov.~Mar.)	0.58	2.28	1.12	2149	25
Non-heating (Apr.~Oct.)	1.58	3.27	10.44	2902	304

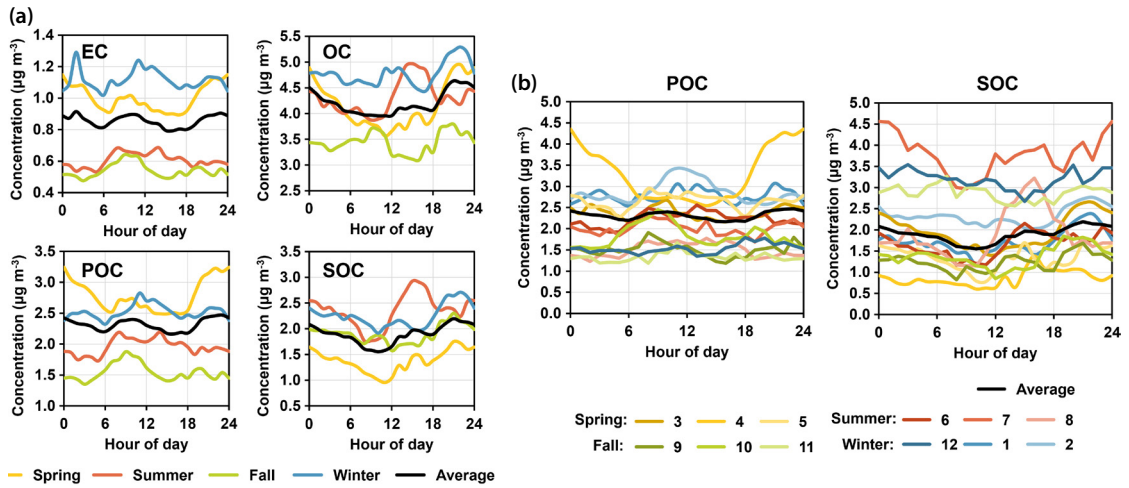


Fig. 1. (a) Seasonal diurnal variations of EC, OC, POC, and SOC; and (b) monthly diurnal variations of POC and SOC in Seoul, 2023.

찍고 감소한 뒤 19시부터 다시 증가하여 23시에 최고 점을 형성하였다. 이는 출퇴근 시간대 차량 배출의 영향이 반영된 결과로 해석된다. SOC는 평균적으로 10시에 최저값을 보인 뒤 증가하여 15시에 첫 번째 최고 점을 형성하고, 소폭 감소한 뒤 야간에 다시 증가하여 높은 수준을 유지하였다. 여름철, 특히 8월에는 15시경에 뚜렷한 피크가 명확히 보였는데, 이는 대기 중 오존 농도가 일사량이 최대에 달하는 14~16시경에 최고 농도를 보이는 일변화 경향과 일치하였다(Yeo and Kim, 2021). 따라서 강한 자외선과 고온 조건에서 활발해지는 광화학 반응이 SOC 생성에 크게 기여할 수 있음을 암시한다(Zhang *et al.*, 2018; Turpin and Huntzicher, 1995). 이러한 광화학 반응의 기여는 SO₄²⁻ 농도의 계절적 추이와도 잘 부합하였다. 여름철에는 강한 일사량에 의해 대기 중 OH 라디칼 농도가 증가하고, 이로 인한 SO₂의 산화 반응이 활발해져 SO₄²⁻의 생성이 촉진되는 경향을 보인다(Seinfeld and Pandis, 2016). 이와 유사하게, 여름철에 강화된 대기의 전반적인 광화학 산화능이 주간 SOC의 생성으로 이어졌을 것으로 판단된다. 18시 이후 야간에 SOC 농도가 증가하거나 유지되는 경향은, 주간에 생성된 SOC의 대기 정체에 의한 축적, 외부 유입, NO₃ 라디칼과의 야간 반응, 또

는 야간의 저온·고습도 조건에서 반휘발성유기화합물(semi volatile organic compounds, SVOCs)의 입자상 분배 증가 등으로 설명할 수 있다(Liu *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2018; Saffari *et al.*, 2016; Lin *et al.*, 2009).

3.3 SOC의 주요 생성 요인

SOC와 PM_{2.5} 질량농도, 주요 이온 성분(SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺), 탄소 성분(OC, EC), 주요 기체상 성분(SO₂, NO₂, CO, O₃, O_x (=O₃+NO₂)), 기상 자료(기온, 상대습도) 간 Pearson 상관계수를 분석하였다(그림 2(a)). 평균적으로 SOC는 OC와 강한 양의 상관관계(R=0.71)를 보였으며, CO 및 PM_{2.5}와는 중간 정도의 상관성(각각 R=0.49, R=0.46)을 나타냈다. 그 외 성분들과의 상관성은 비교적 약했으나, 계절별로 뚜렷한 차이가 관찰되었다. 봄, 가을, 겨울에는 SOC가 OC, CO, PM_{2.5} 외에도 NO₃⁻, NH₄⁺와 유의미한 양의 상관성을 보였으며, 특히 가을과 겨울에는 다른 계절보다 NO₂와의 상관성이 상대적으로 높게 나타났다. 반면, 여름철에는 다른 계절과 달리 SOC가 O₃와 유의미한 양의 상관(R=0.40)을 보여, 해당 시기 광화학 산화 반응의 기여가 두드러짐을 나타낸다(Liu *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2022; Turpin and Huntzicher, 1995).

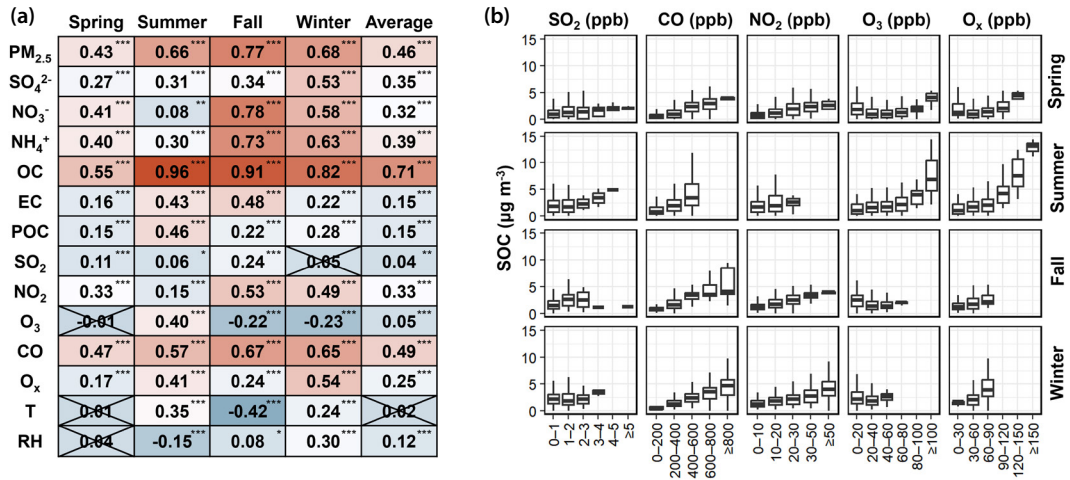


Fig. 2. (a) Seasonal Pearson correlations between SOC and PM_{2.5}, ionic species (SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺), carbonaceous species (OC, EC, POC), gaseous pollutants (SO₂, NO₂, O₃, CO, O_x), and meteorological parameters (temperature (T), relative humidity (RH)) (*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$; 'x' indicates not significant); and (b) SOC concentrations by gaseous pollutant concentration bins in Seoul, 2023.

주요 기체 성분 및 산화제 농도 구간에 따른 SOC 농도의 변화 양상을 분석한 결과(그림 2(b)), 모든 기체 성분의 농도가 증가함에 따라 SOC 농도도 전반적으로 상승하는 경향이 확인되었다. 특히 여름철에는 O₃ 및 O_x 농도 증가에 따른 SOC의 가파른 증가 경향이 두드러졌다. 구체적으로, O₃와 O_x가 낮은 농도 구간에서는 SOC가 완만하게 증가하다가 일정 농도 이상의 고농도 구간에서 급격히 증가하는 패턴이 뚜렷하게 관찰되었다. 이는 SOC가 O₃와 유사한 광화학적 생성 기작을 공유하거나, 대기 중 산화제 농도가 일정 수준 이상일 때 SOC 생성이 비선형적으로 촉진될 수 있음을 시사한다(Wang *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2018; Seinfeld and Pandis, 2016). 반면, 겨울철에는 O₃보다는 CO와 NO₂에 따른 SOC 농도 상승 경향이 상대적으로 뚜렷하게 나타났다. 이는 일사량이 적은 겨울철에는 기체상 광화학 반응보다는 대기 정체 조건이나 NO₂를 포함한 액상 화학 반응 등 다른 경로가 SOC 형성에 더 중요한 역할을 할 수 있음을 나타낸다(Lin *et al.*, 2020; Sun *et al.*, 2015).

기상 조건에 따른 SOC 생성 특성을 파악하기 위해 기온과 상대습도를 바탕으로 SOC 농도를 등농도(iso-

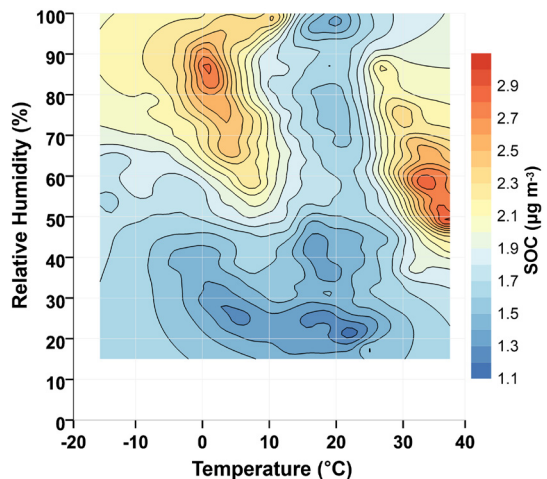


Fig. 3. Contour plot of SOC concentration as a function of temperature and relative humidity in Seoul, 2023.

concentration) 곡선으로 나타낸 결과(그림 3), SOC 고농도 현상이 발생하는 두 가지 뚜렷한 기상 조건이 확인되었다. 하나는 기온이 약 30°C 이상인 고온 조건이며, 다른 하나는 상대습도가 80% 이상인 고습 조건이다. 고온 조건은 주로 여름철에 해당하며, 강한 일사와 높은 기온이 대기 중 광화학 반응 속도를 높이고

VOCs 배출 및 산화를 촉진하여 SOC가 효율적으로 생성된 결과로 해석된다(Hu *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2022; Seinfeld and Pandis, 2016). 반면, 겨울철이나 이른 봄, 늦가을에 주로 나타나는 저온 고습 조건에서는 질산염과 황산염 등 흡습성 2차 무기 에어로졸이 수분을 흡수하여 에어로졸 입자 내 액상 수분(aerosol liquid water content)이 증가할 수 있다(Seinfeld and Pandis, 2016). 그림 2의 상관분석 결과, 겨울철에는 여름철에 비해 SOC와 질산염, 황산염 간의 상관성이 더 높게 나타나 이러한 흡습성 무기이온의 존재가 상대 습도 증가에 따른 에어로졸 수분 증가를 유도할 수 있을 것으로 생각된다. 이러한 입자 내 액상 수분의 증가는 에어로졸 표면에서의 이질계 반응(heterogeneous reaction) 및 액상 반응을 활성화하고 전구물질의 기체-입자상 분배를 강화하여 SOC의 축적을 유발할 수 있다(Lin *et al.*, 2020; Sun *et al.*, 2015).

종합하면, 여름철 SOC 농도 증가는 고온 및 고농도 O₃ 환경에서의 광화학 산화 과정과 밀접하게 연관된 것으로 판단된다. 반면, 겨울철 SOC 농도 증가는 기체 성분(CO, NO₂)과의 상관성 및 고습 조건에서의 농도 증가 패턴을 고려할 때, 1차 배출원의 영향, 대기 정체, 그리고 에어로졸 수분이 관여하는 액상 화학 반응이 복합적으로 작용하여 나타난 결과로 해석된다. 일사량이 부족한 겨울철 습도가 높은 환경에서는 NO₂가 대

기 산화능을 높이고 에어로졸 수분에 용해되어 SO₄²⁻, NO₃⁻ 등 2차 무기 에어로졸의 형성을 유발하는 것으로 보고되었다(Qui *et al.*, 2023; Cheng *et al.*, 2016). 또한, 이러한 환경에서 액상 산화 반응은 대기 중 수용성 유기 화합물의 산화 과정을 가속화하여 2차 유기 에어로졸의 형성을 촉진할 수 있음이 밝혀진 바 있다(Wang *et al.*, 2021; Zhan *et al.*, 2021; Jiang *et al.*, 2019). 본 연구에서 관측된 겨울철 고습 및 NO₂ 농도 증가에 동반된 SOC의 상승 양상 역시 에어로졸 수분 내 NO₂가 매개하는 액상 산화 반응 등이 기여했을 가능성을 시사한다.

3. 4 POC와 SOC의 공간 분포 및 장거리 수송 영향

POC와 SOC의 고농도 발생에 기여하는 국지적 요인과 잠재적인 장거리 수송 배출원의 특성을 파악하기 위해, 풍향 및 풍속에 따른 농도 분포를 나타내는 bivariate polar plot과 역궤적 기반의 CWT 분석을 계절별로 수행하였다. 먼저 polar plot 분석 결과(그림 4), POC는 사계절 모두 풍속이 2 m s⁻¹ 이하로 낮은 중심부에서 가장 높은 농도 분포를 보였다. 겨울철에는 동풍 계열의 바람이 4~6 m s⁻¹로 불 때도 높은 농도 분포를 보였다. 이는 POC의 경우 대부분 자동차 배기가스 등 도심 내 1차 배출원에 의한 국지적 오염원이 POC 농도를 결정짓는 주요 요인이며, 겨울철에는 일

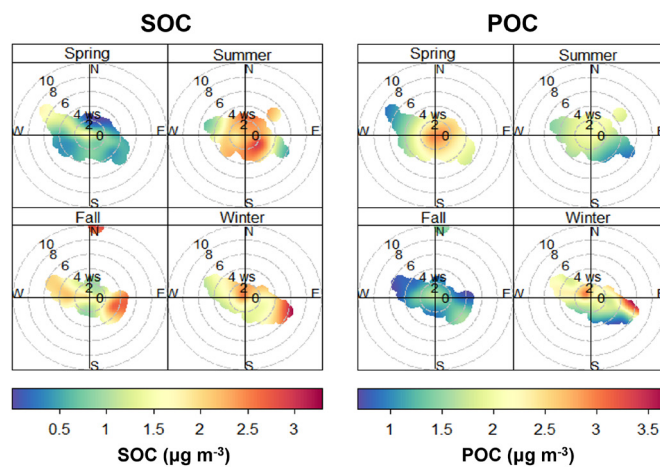


Fig. 4. Seasonal polar plots of SOC and POC in Seoul, 2023.

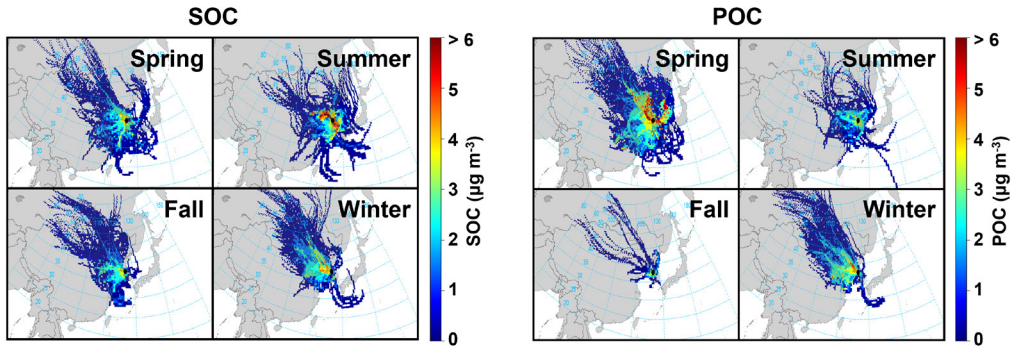


Fig. 5. Seasonal concentration-weighted trajectory (CWT) analysis results for the top 30% concentrations of SOC and POC in Seoul, 2023.

부 외부 유입에 의한 영향이 있을 수 있음을 나타낸다. 반면, SOC는 계절에 따라 상이한 공간 분포가 관찰되었는데, 여름철 SOC는 풍속이 낮은 정체 조건에서 중심부에 강한 고농도 영역을 형성하였다. 이는 여름철 고온 및 강한 일사 조건에서 대기 정체 시 활발한 국지적 광화학 반응을 통해 SOC가 효과적으로 생성 및 축적될 수 있음을 보여준다(Liu *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2022). 그 외의 계절에 SOC는 풍속이 낮은 중심부 국지 축적 외에도 북서풍과 동풍 계열로 특정 풍향에서 바람이 강하게 불어올 때도 농도가 상승하는 패턴을 보여, 국지적 생성과 더불어 외부 유입의 가능성을 나타냈다.

장거리 수송의 영향을 구체적으로 보기 위한 CWT 분석 결과(그림 5), 계절별로 기류의 이동 경로에 따라 POC와 SOC의 농도가 뚜렷한 차이를 보였다. 특히 겨울철에는 POC와 SOC 모두 중국 동북부 지역과 서해상에 걸쳐 높은 CWT 값이 분포하였다. 이는 동아시아 대륙에서 배출된 1차 오염물질(POC)과 SOC 전구물질(VOCs 등)이 북서 계절풍을 타고 서해를 거쳐 서울로 장거리 수송되었을 가능성을 보여준다. 따라서 겨울철 SOC 농도는 지역 내 액상 반응으로 인한 생성과 이러한 국외 유입 등에 의해 복합적으로 영향을 받는 것으로 판단된다. 반면, 여름철 CWT 결과는 국외 지역보다는 한반도 서남부를 포함한 국지적인 영역에 기여도가 집중된 양상을 보였다. 여름철에는 주

로 남풍 또는 남동풍 계열의 해양성 기단이 유입되며 오염된 동아시아 대륙으로부터의 장거리 수송 영향은 감소하고, 대신 한반도 내륙에서 배출된 전구물질이 대기 정체 조건에서 광화학 반응을 거쳐 SOC로 전환되는 국지적 기여가 지배적임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 수도권 대기환경연구소에서 2023년 1월부터 12월까지 실시간으로 연속 관측된 고해상도 대기 측정 자료를 바탕으로, EC 추적자 방법 중 MRS 방법을 적용하여 OC를 POC와 SOC로 정량적으로 분리하고, 시간별 변동 추이와 계절별 주요 생성 요인을 규명하였다.

PM_{2.5} 및 대부분의 주요 구성성분(NO₃⁻, EC 등)의 월평균 농도는 대체로 겨울철 고농도 및 여름철 저농도 패턴을 나타낸 반면, OC는 여름철에도 뚜렷한 감소 없이 연중 일정 수준 이상의 농도를 유지하였다. 특히 7월의 경우 OC가 PM_{2.5} 질량의 약 27%를 차지하였으며, 이 시기 SOC의 월평균 농도($3.7 \pm 3.0 \mu\text{g m}^{-3}$)는 연중 최고를 기록하여 전체 OC의 절반 이상을 차지하였다. 이는 외부 유입이 적은 여름철에도 국내 자체 배출 및 대기 화학 반응이 고농도 OC 발생에 핵심적인 역할을 할 수 있음을 시사한다.

SOC 생성 메커니즘은 계절에 따라 뚜렷한 차이를 나타냈다. 여름철 SOC 농도 증가는 고온 및 고농도 산화제(O₃, O_x) 조건과 양의 상관성을 보였으며, 외부 유입보다는 한반도 내륙의 대기 정체 조건에서 발생하는 국지적 광화학 산화 반응이 지배적인 원인으로 작용함을 확인하였다. 반면, 겨울철 및 이른 봄철의 SOC는 일사량보다는 상대습도 증가와 밀접한 관련이 있었으며, 중국 동북부 및 서해상을 거쳐 유입되는 장거리 수송된 기류의 영향이 복합적으로 작용한 것으로 분석되었다.

결론적으로, 서울 도심의 OC 농도를 효과적으로 저감하기 위해서는 1차 배출원 제어에 국한된 정책을 넘어, 계절별 특성을 반영한 SOC 관리 전략이 요구된다. 여름철에는 SOC의 주된 생성 경로인 광화학 반응 억제를 위한 VOCs와 O₃ 등 산화제 관리에 집중해야 하며, 겨울철에는 이질계 반응 및 액상 반응을 통한 SOC 생성과 관련된 전구물질의 제어와 함께 국외 유입을 고려한 대기질 협력 정책이 필요하다. 향후 연구에서는 산화반응의 중간물질인 산소화 VOCs (Oxygenated VOCs, OVOCs) 분석을 포함하여 VOCs로부터 OC가 생성되는 과정을 면밀히 살펴볼 필요가 있고, 또 다년간의 장기 관측 자료를 활용한 탄소성 에어로졸의 농도 변동 추이 분석과 한반도 내 다른 권역으로의 대상 지역 확장을 통해 보다 통합적이고 지역 맞춤형인 SOC 관리 방안을 도출할 필요가 있다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원(NIER-2025-04-02-030)과 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 미세먼지관리 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행되었습니다

References

Bae, M., Kang, Y.H., Kim, E., Kim, S., Kim, S. (2023) A multifaceted

approach to explain short-and long-term PM_{2.5} concentration changes in Northeast Asia in the month of January during 2016-2021, *Science of The Total Environment*, 880, 163309. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163309>

Carslaw, D.C., Ropkins, K. (2012) Openair-an R package for air quality data analysis, *Environmental Modelling & Software*, 27, 52-61. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.09.008>

Castro, L.M., Pio, C.A., Harrison, R.M., Smith, D.J.T. (1999) Carbonaceous aerosol in urban and rural European atmospheres: estimation of secondary organic carbon concentrations, *Atmospheric Environment*, 33(17), 2771-2781. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00331-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00331-8)

Cheng, Y., Zheng, G., Wei, C., Mu, Q., Zheng, B., Wang, Z., Gao, M., Zhang, Q., He, K., Carmichael, G., Pöschl, U., Su, H. (2016) Reactive nitrogen chemistry in aerosol water as a source of sulfate during haze events in China, *Science Advances*, 2(12), e1601530. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601530>

Han, Y.S., Eun, D.M., Lee, G., Gong, S.Y., Youn, J.S. (2023) Enhancement of PM_{2.5} source appointment in a large industrial city of Korea by applying the elemental carbon tracer method for positive matrix factorization (PMF) model, *Atmospheric Pollution Research*, 14(11), 101910. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101910>

Hsu, Y.K., Holsen, T.M., Hopke, P.K. (2003) Comparison of hybrid receptor models to locate PCB sources in Chicago, *Atmospheric Environment*, 37(4), 545-562. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00886-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00886-5)

Hu, Q., Moon, J., Kim, H. (2024) Understanding the Driving Forces of Summer PM₁ Composition in Seoul, Korea, with Explainable Machine Learning, *ACS ES&T Air*, 1(9), 960-972. <https://doi.org/10.1021/acsestair.3c00116>

Jiang, X., Tsona, N.T., Jia, L., Liu, S., Zhang, H., Xu, Y., Du, L. (2019) Secondary organic aerosol formation from photooxidation of furan: effects of NO_x and humidity, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(21), 13591-13609. <https://doi.org/10.5194/acp-19-13591-2019>

Kim, H., Zhang, Q., Bae, G.N., Kim, J.Y., Lee, S.B. (2017) Sources and atmospheric processing of winter aerosols in Seoul, Korea: insights from real-time measurements using a high-resolution aerosol mass spectrometer, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(3), 2009-2033. <https://doi.org/10.5194/acp-17-2009-2017>

Kim, N.K., Kim, I.S., Song, I.H., Park, S.M., Lim, H.B., Kim, Y.P., Shin, H.J., Lee, J.Y. (2021) Temporal variation of sulfate concentration in PM_{2.5} and major factors enhancing sulfate concentration in the atmosphere of Seoul, Korea,

- Air Quality, Atmosphere & Health, 14(7), 985-999. <https://doi.org/10.1007/s11869-021-00993-0>
- Kim, S.J., Lee, S.J., Lee, H.Y., Son, J.M., Lim, H.B., Kim, H.W., Shin, H.J., Lee, J.Y., Choi, S.D. (2022) Characteristics of volatile organic compounds in the metropolitan city of Seoul, South Korea: Diurnal variation, source identification, secondary formation of organic aerosol, and health risk, *Science of The Total Environment*, 838, 156344. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156344>
- Lee, A., Kim, Y.P., Kim, N.K., Jeong, H.J., Lee, J.Y., Jung, C.H. (2022) Study on the pH Dependence of the Contribution of Aqueous-Phase Sulfate in Aerosols Formation: On the Cases in Seoul, 2015, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(3), 323-340, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.3.323>
- Lee, J., Lee, M., Chang, L., Shin, S.A., Kim, K., Choi, Y., Lim, H., Choi, S.D., Lee, G. (2024) Assessment of VOCs emission inventory in Seoul through spatiotemporal observations using passive and online PAMS measurements, *Atmospheric Environment*, 338, 120857. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120857>
- Liao, K., Wang, Q., Wang, S., Yu, J.Z. (2023) Bayesian inference approach to quantify primary and secondary organic carbon in fine particulate matter using major species measurements, *Environmental Science & Technology*, 57(13), 5169-5179. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c09412>
- Lin, C., Huang, R.J., Xu, W., Duan, J., Zheng, Y., Chen, Q., Hu, W., Li, Y., Ni, H., Wu, Y., Zhang, R., Cao, J., O'Dowd, C. (2020) Comprehensive source apportionment of submicron aerosol in Shijiazhuang, China: Secondary aerosol formation and holiday effects, *ACS Earth and Space Chemistry*, 4(6), 947-957. <https://doi.org/10.1021/acs.earthspacechem.0c00109>
- Lin, P., Hu, M., Deng, Z., Slanina, J., Han, S., Kondo, Y., Takegawa, N., Miyazaki, Y., Zhao, Y., Sugimoto, N. (2009) Seasonal and diurnal variations of organic carbon in PM_{2.5} in Beijing and the estimation of secondary organic carbon, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D2). <https://doi.org/10.1029/2008JD010902>
- Liu, J., Zhang, F., Xu, W., Chen, L., Ren, J., Wang, Y. (2023) Contrasting the characteristics, sources, and evolution of organic aerosols between summer and winter in a megacity of China, *Science of The Total Environment*, 877, 162937. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162937>
- Liu, L., Hohaus, T., Franke, P., Lange, A.C., Tillmann, R., Fuchs, H., Tan, Z., Rohrer, F., Karydis, V., He, Q., Vardhan, V., Andres, S., Bohn, B., Holland, F., Winter, B., Wedel, S., Novelli, A., Hofzumahaus, A., Wahner, A., Kiendler-Scharr, A. (2024) Observational evidence reveals the significance of nocturnal chemistry in seasonal secondary organic aerosol formation, *npj Climate and Atmospheric Science*, 7(1), 207. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00747-6>
- Millet, D.B., Donahue, N.M., Pandis, S.N., Polidori, A., Stanier, C.O., Turpin, B.J., Goldstein, A.H. (2005) Atmospheric volatile organic compound measurements during the Pittsburgh Air Quality Study: Results, interpretation, and quantification of primary and secondary contributions, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D7). <https://doi.org/10.1029/2004JD004601>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2024) 2023 Annual Report of Air Quality Research Center, National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea. <https://dl.nanet.go.kr/search/searchInnerDetail.do?controlNo=MONO12025000036307> (accessed on Feb. 21, 2026).
- Oh, S., Kim, J.Y., Won, S.R., Kwon, S., Lee, S.J., Choi, S.D., Lee, J.Y., Shin, H.J. (2023) Comparison of the chemical characteristics and source apportionment of PM_{1.0} and PM_{2.5} using real-time air quality monitoring network data of air pollutants, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(4), 448-468, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.4.448>
- Park, E.H., Heo, J., Kim, H., Yi, S.M. (2020) Long term trends of chemical constituents and source contributions of PM_{2.5} in Seoul, *Chemosphere*, 251, 126371. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126371>
- Qiu, Y., Wu, Z., Man, R., Zong, T., Liu, Y., Meng, X., Chen, J., Chen, S., Yang, S., Yuan, B., Song, M., Kim, C., Ahn, J., Zhen, L., Lee, J., Hu, M. (2023) Secondary aerosol formation drives atmospheric particulate matter pollution over megacities (Beijing and Seoul) in East Asia, *Atmospheric Environment*, 301, 119702. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119702>
- Saffari, A., Hasheminassab, S., Shafer, M.M., Schauer, J.J., Chatila, T.A., Sioutas, C. (2016) Nighttime aqueous-phase secondary organic aerosols in Los Angeles and its implication for fine particulate matter composition and oxidative potential, *Atmospheric Environment*, 133, 112-122. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.03.022>
- Seibert, P., Kromp-Kolb, H., Baltensperger, U., Jost, D.T., Sch-

- wikowski, M. (1994) Trajectory analysis of high-alpine air pollution data, in Air pollution modeling and its application X. Edited by Gryning, S.E., Millán, M.M., Springer US, Boston, MA, 595-596. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1817-4_65
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2016) Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, U.S.A., pp. 700-742.
- Stein, A.F., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder, B.J., Cohen, M.D., Ngan, F. (2015) NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system, Bulletin of the American Meteorological Society, 96(12), 2059-2077. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>
- Stohl, A. (1996) Trajectory statistics-a new method to establish source-receptor relationships of air pollutants and its application to the transport of particulate sulfate in Europe, Atmospheric Environment, 30(4), 579-587. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00314-2](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00314-2)
- Sun, Y.L., Wang, Z.F., Du, W., Zhang, Q., Wang, Q.Q., Fu, P.Q., Pan, X.L., Li, J., Jayne, J., Worsnop, D.R. (2015) Long-term real-time measurements of aerosol particle composition in Beijing, China: Seasonal variations, meteorological effects, and source analysis, Atmospheric Chemistry and Physics, 15(17), 10149-10165. <https://doi.org/10.5194/acp-15-10149-2015>
- Turpin, B.J., Huntzicker, J.J. (1995) Identification of secondary organic aerosol episodes and quantitation of primary and secondary organic aerosol concentrations during SCAQS, Atmospheric Environment, 29(23), 3527-3544. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)00276-Q](https://doi.org/10.1016/1352-2310(94)00276-Q)
- Wang, F., Guo, Z., Lin, T., Rose, N.L. (2016) Seasonal variation of carbonaceous pollutants in PM_{2.5} at an urban 'super-site' in Shanghai, China, Chemosphere, 146, 238-244. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.12.036>
- Wang, J., Ye, J., Zhang, Q., Zhao, J., Wu, Y., Li, J., Liu, D., Li, W., Zhang, Y., Wu, C., Xie, C., Qin, Y., Lei, Y., Huang, X., Guo, J., Liu, P., Fu, P., Li, Y., Lee, H.C., Choi, H., Zhang, J., Liao, H., Chen, M., Sun, Y., Ge, X., Martin, S.T., Jacob, D.J. (2021) Aqueous production of secondary organic aerosol from fossil-fuel emissions in winter Beijing haze, Proceedings of the National Academy of Sciences, 118(8), e2022179118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2022179118>
- Wang, M., Duan, Y., Xu, W., Wang, Q., Zhang, Z., Yuan, Q., Li, X., Han, S., Tong, H., Huo, J., Chen, J., Gao, S., Wu, Z., Cui, L., Huang, Y., Xiu, G., Cao, J., Fu, Q., Lee, S.C. (2022) Measurement report: Characterisation and sources of the secondary organic carbon in a Chinese megacity over 5 years from 2016 to 2020, Atmospheric Chemistry and Physics, 22(19), 12789-12802. <https://doi.org/10.5194/acp-22-12789-2022>
- Wu, C., Wu, D., Yu, J.Z. (2019) Estimation and uncertainty analysis of secondary organic carbon using 1 year of hourly organic and elemental carbon data, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 124(5), 2774-2795. <https://doi.org/10.1029/2018JD029290>
- Wu, C., Yu, J.Z. (2016) Determination of primary combustion source organic carbon-to-elemental carbon (OC/EC) ratio using ambient OC and EC measurements: Secondary OC-EC correlation minimization method, Atmospheric Chemistry and Physics, 16(8), 5453-5465. <https://doi.org/10.5194/acp-16-5453-2016>
- Yeo, M.J., Im, Y.S., Yoo, S.S., Jeon, E.M., Kim, Y.P. (2019) Long-term trend of PM_{2.5} concentration in Seoul, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 35(4), 438-450, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.4.438>
- Yeo, M.J., Kim, Y.P. (2021) Long-term trends of surface ozone in Korea, Journal of Cleaner Production, 294, 125352. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125352>
- Yoo, H.Y., Kim, K.A., Kim, Y.P., Jung, C.H., Shin, H.J., Moon, K.J., Park, S.M., Lee, J.Y. (2022) Validation of SOC Estimation using OC and EC Concentration in PM_{2.5} Measured at Seoul, Aerosol and Air Quality Research, 22(4), 210388. <https://doi.org/10.4209/aaqr.210388>
- Yuan, Z., Lau, A.K.H., Zhang, H., Yu, J.Z., Louie, P.K., Fung, J.C. (2006) Identification and spatiotemporal variations of dominant PM₁₀ sources over Hong Kong, Atmospheric Environment, 40(10), 1803-1815. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.11.030>
- Zhan, B., Zhong, H., Chen, H., Chen, Y., Li, X., Wang, L., Wang, X., Mu, Y., Huang, R.-J., George, C., Chen, J. (2021) The roles of aqueous-phase chemistry and photochemical oxidation in oxygenated organic aerosols formation, Atmospheric Environment, 266, 118738. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118738>
- Zhan, Y., Xie, M., Zhao, W., Wang, T., Gao, D., Chen, P., Tian, J., Zhu, K., Li, S., Zhuang, B., Li, M., Luo, Y., Zhao, R. (2023) Quantifying the seasonal variations in and regional transport of PM_{2.5} in the Yangtze River Delta region, China: Characteristics, sources, and health risks, Atmospheric Chemistry and Physics, 23(17), 9837-9852. <https://doi.org/10.5194/acp-23-9837-2023>
- Zhang, C., Lu, X., Zhai, J., Chen, H., Yang, X., Zhang, Q., Zhao, Q., Fu, Q., Sha, F., Jin, J. (2018) Insights into the formation of secondary organic carbon in the summertime in urban Shanghai, Journal of Environmental Sciences, 72, 118-132. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.12.018>

Authors Information

오승미(이화여자대학교 환경공학과 박사과정 학생)
(5sm@ewha.ac.kr)

박승명(국립환경과학원 대기환경연구과 전문위원)
(psm5555@korea.kr)

허국영(국립환경과학원 대기환경연구과 환경연구관)
(gookyong@korea.kr)

김용표(이화여자대학교 명예교수, 현 서울대학교 보건환경연구소
연구원)(yongmy@snu.ac.kr)

정창훈(경인여자대학교 보건의료행정학과 교수)
(jch@kiwu.ac.kr)

이지이(이화여자대학교 환경공학과 교수)
(yijiyi@ewha.ac.kr)