

논문

장기간 측정된 백령도 및 서울 블랙카본 추이 분석을 통한 국내/국외 기여도 분석

Analysis of Long-Term Trends in Black Carbon at Baengnyeongdo and Seoul: Evaluating Regional Contributions

전종벽[†], 심지해[†], 서석준^{1)*}, 박준현¹⁾, 변명화¹⁾

한국외국어대학교 환경학과, ¹⁾국립환경과학원 대기환경연구과

Jongbyeok Jun[†], Jihae Shim[†], Seok-Jun Seo^{1)*}, Junhyun Park¹⁾,
Myoung-hwa Byun¹⁾

Department of Environmental Studies, Hankuk University of Foreign Studies,
Gyeonggi-do, Republic of Korea

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

접수일 2025년 2월 16일
수정일 2025년 3월 27일
채택일 2025년 5월 6일

Received 16 February 2025
Revised 27 March 2025
Accepted 6 May 2025

[†]These two authors contributed equally to this work as co-first authors.

*Corresponding author
Tel : +82-41-920-0200
E-mail : vince007@korea.kr

Abstract This study analyzes the long-term trends and source contributions of black carbon (BC) in South Korea using Aethalometer measurements collected from Baengnyeongdo and Seoul between 2018 and 2022. Seasonal and annual variations in BC absorption coefficients were evaluated, and meteorological conditions such as wind speed and temperature were considered to interpret pollutant accumulation characteristics. To identify potential source regions, backward trajectory analysis was conducted using the Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPPLIT) model, and high-concentration episodes were further examined through Potential Source Contribution Function (PSCF) analysis. The results revealed that both Baengnyeongdo and Seoul were influenced by a combination of domestic emissions and transboundary transport. In particular, air masses originating from eastern China contributed significantly to elevated BC levels in both regions during winter, with PSCF values exceeding 0.7. Baengnyeongdo exhibited lower overall BC absorption coefficients, reflecting the absence of significant local sources in its surroundings. In contrast, Seoul showed consistently higher BC levels, which can be attributed not only to urban emissions but also to its meteorological and topographical characteristics—specifically lower wind speeds and temperatures—that favor pollutant accumulation. These findings suggest that BC pollution in both regions is driven by the combined effects of regional inflow and local emissions, with relative contributions varying seasonally and spatially. Effective air quality management in South Korea requires a dual approach that strengthens domestic emission reduction efforts while also addressing transboundary pollution through international cooperation.

Key words: Black carbon, Long-term trends, Backward trajectory, PSCF, Air quality

1. 서론

대기 중 미세먼자 (Particulate Matter, PM)는 기후 변화와 대기오염에 중요한 영향을 미치는 요소 중 하나이다. 그중 블랙카본 (Black Carbon, BC)은 화석연료와 식생소각에서 발생하는 초미세먼지 (PM_{2.5})의 주요 구성 성분으로, 이산화탄소 (CO₂)나 메탄 (CH₄)

과 같은 온실가스에 비해 대기체류시간은 짧지만, 강력한 복사 효과로 인해 태양 복사 에너지를 흡수하고 기후 시스템에 영향을 미친다 (Lim *et al.*, 2019; Park *et al.*, 2018a; Wang *et al.*, 2017; Bond *et al.*, 2013). BC의 복사강제력 (Global Warming Potential, GWP)은 약 0.4 W m⁻²로 평가되며 (IPCC, 2013), 구름과 상호작용하여 시정을 악화시키고, 눈과 빙하 표면에 침적되어

반사율을 낮추고 용해를 촉진한다(Wang *et al.*, 2020; Ramanathan and Carmichael, 2008). 이러한 특성으로 인해 BC는 단기 체류 기후변화 유발물질(Short-lived Climate Pollutant)로 분류되며, 기후변화와 대기오염을 동시에 악화시킬 수 있다(Boucher *et al.*, 2013; Janssen *et al.*, 2012, 2011).

동아시아는 인위적 BC 배출이 집중된 지역으로, Bond *et al.* (2013)은 Speciated Pollutant Emissions Wizard (SPEW), Greenhouse Gas and Air Pollution Interactions and Synergies (GAINS), REanalysis of the TROposphere (RETRO) 세 가지 배출 인벤토리를 토대로 분석을 진행하여 전 세계적으로 아프리카(1,690 Gg yr⁻¹)에 이어 동아시아(1,550 Gg yr⁻¹)의 인위적 BC 배출량이 높으며, 그중 약 25%가 중국에서 발생함을 확인하였다(Klimont *et al.*, 2017; Bond *et al.*, 2013; Ramanathan and Carmichael, 2008; Cooke *et al.*, 1999). 우리나라는 지리적으로 중국의 편서풍 하류에 위치하여 아시아 대륙에서 유입되는 오염물질의 장거리 영향을 크게 받으며(Chung and Yoon, 1996), 특히 중국의 주요 배출원이 인접한 동부 지역에 집중되어 있어, 매년 봄 황사와 에어로졸이 편서풍을 타고 한반도로 유입되며 주기적으로 피해를 입힌다(Park *et al.*, 2018a; Yu *et al.*, 2018a).

BC에 대한 관심이 높아짐에 따라 국내에서도 다양한 분석 연구가 이루어졌으며, 특히 열광학적 방법과 광학적 투과법을 기반으로 다양한 장비와 기법이 활용되었다(Lim *et al.*, 2019). Lee *et al.* (2014)은 MAAP (Multi Angle Absorption Photometer)을 사용하여 충남 천안시 병천면에서 BC 농도를 측정하고, 대기 에어로졸의 특성을 분석해 교외지역에서의 BC 농도 특

성과 대기오염 분석에 기여하였으며, 국내 BC 연구에 중요한 기초 자료로 활용되었다. Park *et al.* (2018a)은 에어로졸 입자의 광흡수계수를 측정하여 BC의 질량 흡수단면(mass absorption cross section, MAC) 값을 조사하였으며, 이 연구를 통해 국내 BC 농도 측정의 정확도를 높이고, BC 특성 분석에 기여하였다. Park and Han (2022)은 Aethalometer를 사용하여 PM_{2.5} 시료를 채취한 후, 탄소 성분과 이온 성분을 분석하여 BC 농도에 대한 배출원 기여도를 평가하였다.

또한 특정 시기와 지역을 중심으로 BC 흡수계수를 통한 분석이 선행되어 왔으나(표 1), 서울과 백령도와 같은 도시 및 외곽 지역 간의 장기적인 BC 흡수계수 연구는 부족한 실정이다. 본 연구는 이러한 한계를 보완하고자, 서울과 백령도의 대기오염집중측정소에서 측정된 BC 흡수계수를 바탕으로 연도별 및 계절별 특성을 분석하였다. 연구 기간에는 Coronavirus Disease-19 (COVID-19) 시기가 포함되어 있어, 팬데믹 전후의 변화를 종합적으로 살펴보았다. 또한, 서울과 백령도의 역궤적 분석을 통해 BC 흡수계수의 기여도를 분석하고 주요 기여원을 확인하며, 이를 바탕으로 장거리 이동 경로와 BC 흡수계수 변화의 상관관계를 파악하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1 측정 지역 및 기간

본 연구에서는 2018년 1월부터 2022년 12월까지 백령도(37.96°N, 124.63°E)와 서울 불광동(37.61°N, 126.93°E)에 위치한 대기오염집중측정소에서 Aetha-

Table 1. Prior research based on absorption coefficient analysis.

Site	Period	Instrument	BC (Mm ⁻¹)	Reference
Cheonan	2015.05.20~2015.05.23	MAAP	6.19	Lee <i>et al.</i> , 2015a
Seongbuk-gu, Seoul	2015.05.20~2015.05.23	MAAP	13.82	Lee <i>et al.</i> , 2015a
Eunpyeong-gu, Seoul	2018.09.05~2018.09.10	AE-33	12.1	Park <i>et al.</i> , 2019
Gwangju	2019	AE-33	8.3	Park and Han, 2022
Yeongam-gun, Jeollanam-do	2021.11.03~2021.12.03	AE-33	8.8	Park <i>et al.</i> , 2022

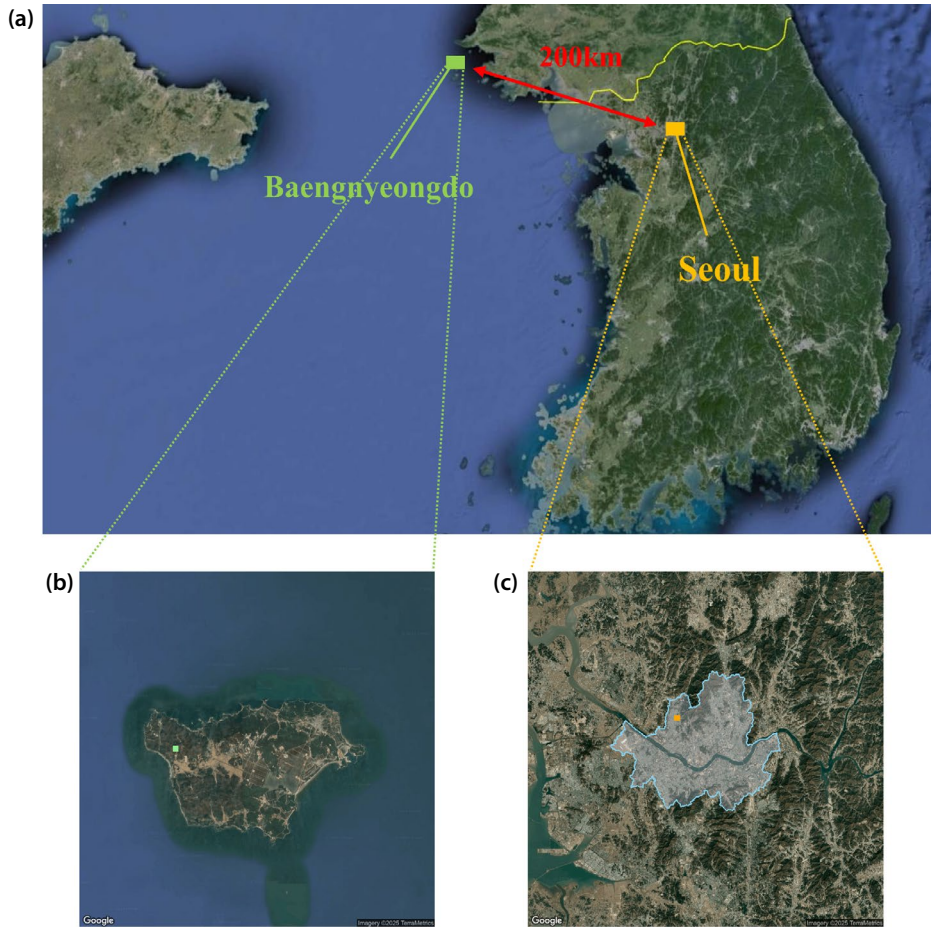


Fig. 1. (a) Locations of intensive monitoring stations in Baengnyeongdo and Seoul. (b) Baengnyeongdo (37.96°N, 124.63°E). (c) Seoul (37.61°N, 126.93°E).

lometer로 측정된 BC 자료를 활용하여 두 지역의 BC 흡수계수 특성을 분석하였다(그림 1). 백령도는 인천항으로부터 약 178 km 떨어진 최북서단에 위치한 섬으로 내부 배출원의 영향이 적어 제주도, 울릉도와 함께 국가 배경 지역 농도를 파악하기 위해 운영되고 있으며, 중국 산둥반도에서 동쪽으로 약 180 km 떨어져 있어 국외에서의 장거리 이동을 통해 유입되는 외부 오염물질을 분석하는 데 유리한 지리적 위치를 지닌다. 백령도의 동쪽으로는 북한과 매우 인접해 있으나, 편서풍의 영향으로 직접적인 영향을 받지 않는다(Kang *et al.*, 2024; Ban *et al.*, 2018). 서울은 백령도와

약 200 km 떨어져 있으며, 측정소 인근에는 북동쪽으로는 북한산이 위치해 있으며, 서쪽으로는 불광역과 주변 상업지구 등으로 인해 유동인구가 높고 인구가 밀집되어 있다. 또한 다양한 산업시설이 존재해 여러 대기오염 배출원이 복합적으로 작용하여 대기 조성이 매우 복잡하다. 이 측정소는 국지적 배출원에 의한 오염 영향을 평가하고, 도시 지역에서 발생하는 고농도 오염 사례를 조사하기 위해 운영되고 있다(Park *et al.*, 2019; Lee *et al.*, 2015b).

측정 기간 동안의 기상 조건은 기상청 기상자료 개방 포털의 방재 기상 관측(AWS)에서 제공된 시간 자

료를 활용하였다. AWS는 세밀한 기상자료를 제공하며, 특정 지역의 기상 변화를 반영하는 데 적합하다. 백령도의 AWS 데이터의 경우 동일지점에서 측정되었으나, 서울의 경우 대기오염집중측정소에서 북쪽으로 약 4 km 거리의 은평구 진관동(37.61°N, 126.94°E)에서 측정되었다.

2.2 측정 장비

본 연구에서는 Aethalometer의 880 nm 파장에서 측정된 광흡수계수를 분석에 사용하였다. Aethalometer는 대표적인 필터 기반 흡수 광도계(filter-based absorption photometer)로, 이와 유사한 장비로는 MAA, TAP (Tricolor Absorption Photometer), PSAP (Particle Soot Absorption Photometer) 등이 있으며, 해당 측정 장비는 석영 필터에 축적된 BC 입자가 필터를 통과하는 빛의 감쇄 변화를 기반으로 BC 질량 농도를 산출하는 장비이다(Park *et al.*, 2019; Lee, 2018; Lee *et al.*, 2015a). BC는 근자외선(400 nm)부터 근적외선(900 nm) 파장 범위에서 태양 복사를 강하게 흡수하지만, 약한 파장 의존성을 가진다(Park *et al.*, 2024; Park *et al.*, 2020; Andreae and Gelencsér, 2006). 따라서 Aethalometer를 이용한 파장별 BC의 흡수계수 값은 정확한 값이 아니므로, 본 연구에서는 BC의 흡수계수를 제조사에서 제안하는 880 nm 파장에서 측정된 값을 기준으로 사용하였다(Drinovec *et al.*, 2020, 2015; Park *et al.*, 2018a; Kirchstetter *et al.*, 2004). 백령도 측정소는 2018년 1월부터 2020년 12월까지 AE31 모델을 사용하여 BC 흡수계수를 측정하였으며, 2021년 1월부터는 AE33 모델로 변경하여 측정하였다. 서울 측정소는 2018년 1월부터 2020년 6월까지 AE31 모델을 사용하였으며, 이후 AE33 모델로 변경하여 측정하였다. 연구에 사용된 AE31 모델은 single-spot Aethalometer로 7개의 파장(370, 470, 520, 590, 660, 880, 950 nm)에서 동시에 측정하며, AE33 모델은 dual-spot Aethalometer로 동일한 7개의 파장에서 측정된다. AE31은 단일 지점(single-spot) 방식으로 필터를 통과하는 광감쇠(attenuation)를 이용하여 BC 흡수계수를 측정하지만,

필터 적재 효과(filter loading effect)로 인해 BC 흡수계수가 과소 추정될 수 있으며, 보정을 위해 후처리 과정이 필요하다(Drinovec *et al.*, 2015; Weingartner *et al.*, 2003). AE33은 이중지점(dual-spot) 방식을 적용하여 필터의 두 개 지점에서 동시에 감쇠를 측정하고, 실시간 보정알고리즘을 통해 필터 적재 효과를 자동으로 보정할 수 있는 장점이 있다(Drinovec *et al.*, 2015).

2.3 역궤적 분석

본 연구에서는 고농도 사례의 BC의 유입 경로를 파악하기 위해 NOAA의 HYbrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) 모델을 활용하였다. 이 모델은 Lagrangian과 Eulerian 계산 방식을 통해 기단의 이동과 침강 등을 계산할 수 있다. 2018년부터 2022년까지의 기간 동안 유입 기류의 역궤적 결과를 도출하여 주요 기류의 발생 빈도와 이동 경로를 분석하였다. 백령도와 서울을 기준으로 72시간 동안 1시간 간격으로 500 m 고도에서 역궤적 분석을 수행하였다. 이 과정에서 Global Data Assimilation System 1 (GDAS1)의 1°×1° 해상도 기상자료를 사용하였다. 이 분석은 대기 중 입자의 이동 경로를 세밀하게 추적할 수 있으며, BC의 기원을 명확하게 파악하는 데 중요한 정보를 제공한다(Ban *et al.*, 2018; Stein *et al.*, 2015; Jung *et al.*, 2013; Draxler and Hess, 1998; Klemm *et al.*, 1994).

PSCF (Potential source contribution function) 분석은 특정 지역에서 측정된 대기 오염물질의 기원지를 추정하는 데 활용되는 기법으로, 역궤적 분석과 통계적 확률 기법을 결합하여 오염원이 발원한 지역을 식별하는 데 유용하다(Li *et al.*, 2022; Choi and Ghim, 2021; Shen *et al.*, 2021; Choi *et al.*, 2020a; Deng *et al.*, 2020; Li and Hwang, 2015).

PSCF 값은 아래의 수식을 기반으로 계산되었다.

$$PSCF_{ij} = \frac{\sum m_{ij}}{\sum n_{ij}} \quad (1)$$

여기서 $\sum m_{ij}$ 는 특정 격자(i, j)를 통과한 endpoint 중 흡수계수 경계값을 초과한 경우의 수, $\sum n_{ij}$ 는 해당 격자를 통과한 endpoint의 수를 의미하며, $PSCF_{ij}$ 값이 높을수록 해당 지역이 오염물질의 주요 기여원일 가능성이 크다는 것을 의미한다. 또한, 본 연구에서는 가중치 함수(Weight Function, W_{ij})를 적용하여 낮은 데이터 샘플 수로 인해 발생할 수 있는 과대평가 문제를 특정 백분위 값(T)을 통해 보정하였다(Choi *et al.*, 2020a; Guo *et al.*, 2015). 여기서 T 는 전체 관측값 중 상위 25%에 해당하는 BC 흡수계수 값을 의미하며, 이 값을 초과하는 경우를 고농도 사례로 정의하여 PSCF 계산 시 m_{ij} 값에 포함하였다.

이러한 방식은 불균형한 데이터 분포 하에서 유의미한 오염원 발생 구간을 효과적으로 식별하며, 과도한 저농도 사례의 영향을 방지한다.

$$W(n_{ij}) = \begin{cases} 1.0, & n_{ij} > T^{0.7} \\ 0.7, & T^{0.56} < n_{ij} \leq T^{0.7} \\ 0.42, & T^{0.42} < n_{ij} \leq T^{0.56} \\ 0.17, & n_{ij} \leq T^{0.42} \end{cases} \quad (2)$$

3. 결과 및 토론

3.1 연도별 BC 흡수계수 추이 분석

본 연구에서는 장기간 측정된 BC 흡수계수를 바탕으로 국내외 기여도를 분석하고자 2018년부터 2022년까지의 연평균 자료를 활용하여 연도별 변동 특성을 파악하였으며(그림 2, 표 2), 해당 기간 동안 COVID-19 팬데믹이 BC 흡수계수에 미친 영향을 고찰하고자 하였다. 분석 기간 전체 평균에서 배경 지역인 백령도

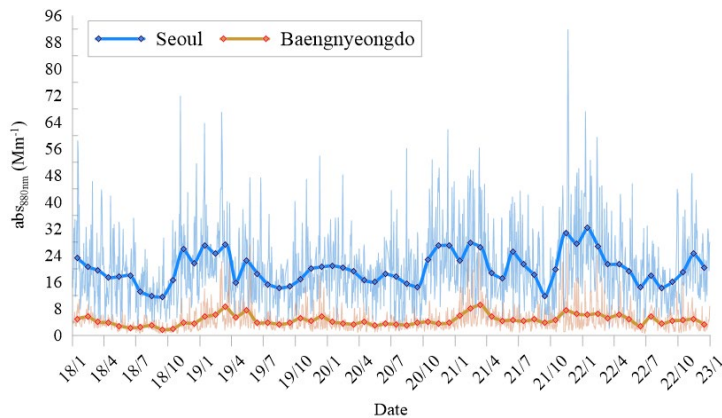


Fig. 2. Time-series of daily average absorption coefficient at 880 nm measured at Seoul and Baengnyeongdo. Thick lines indicated monthly average of absorption coefficient at 880 nm wavelength.

Table 2. Annual average, standard deviation, maximum, and minimum absorption coefficient at 880 nm in Seoul and Baengnyeongdo.

Year	Baengnyeongdo			Seoul		
	Mean \pm Std	Max	Min	Mean \pm Std	Max	Min
2018	3.34 \pm 1.18	5.58	1.71	18.09 \pm 4.48	25.88	11.54
2019	5.27 \pm 1.62	8.50	3.33	19.78 \pm 4.66	27.21	14.23
2020	3.59 \pm 0.38	4.14	2.93	19.63 \pm 4.15	26.94	14.55
2021	5.78 \pm 1.72	9.20	3.79	22.25 \pm 5.47	30.85	11.84
2022	4.83 \pm 1.25	6.54	2.66	20.62 \pm 5.21	32.23	14.27

의 BC 흡수계수는 $4.56 \pm 1.06 \text{ Mm}^{-1}$ 로 주요 배출원이 적어 낮은 값을 보였으나, 서울에서는 $20.07 \pm 1.52 \text{ Mm}^{-1}$ 로 백령도보다 상당히 높은 수준을 나타냈다.

백령도의 2019년 연평균 BC 흡수계수는 5.27 Mm^{-1} 로 2020년보다 높았으나, 서울의 2019년 연평균 BC 흡수계수는 19.78 Mm^{-1} 로 COVID-19 팬데믹이 시작된 2020년과 유사한 수준을 유지하였다. COVID-19 팬데믹은 2019년 12월 1일 중국 우한에서 시작되었으며, 2020년 2월 23일부터 정부의 외출 통제 및 이동 제한 등의 방역 조치가 시행되면서, 2020년 백령도와 서울의 연평균 BC 흡수계수는 각각 3.59 Mm^{-1} , 19.63 Mm^{-1} 로 2019년 대비 감소하는 경향을 보였다(Evangelidou *et al.*, 2021; Im *et al.*, 2021; Jia *et al.*, 2021; Xu *et al.*, 2020). 환경부 대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System, CAPSS)의 부문별 배출량에 따르면, 2019년부터 2020년까지 에너지 산업 연소, 비산업 연소, 제조업 연소 부문의 배출량은 각각 9 ton yr^{-1} , 4 ton yr^{-1} , 14 ton yr^{-1} 증가한 것으로 나타났다. 도로이동오염원과 비도로오염원에서는 각각 $1,349 \text{ ton yr}^{-1}$, 211 ton yr^{-1} 감소하여 전체 배출량 저감에 일정 부분 기여하였으나, 2020년 BC 배출량 감소에 큰 영향을 주지 않은 것으로 판단된다. COVID-19로 인한 산업 활동 규제로 공장 가동에 따른 배출이 감소할 것으로 예상되었으나, 실제로는 고정 연소 부문의 배출량이 증가하였으며, 재택근무 및 외출 자제로 인한 가정 내 연소 활동 또한 BC 배출 증가에 영향을 미친 것으로 해석된다. 이는 서울의 교통 및 운송 수단의 배출 감소가 전체 BC 배출 저감에 결정적인 영향을 미치지 않았음을 확인하였다. 2021년에는 COVID-19 팬데믹이 완화되면서 경제 활동이 재개되었으며, 백령도의 연평균 BC 흡수계수는 $5.78 \pm 1.72 \text{ Mm}^{-1}$, 서울은 $22.25 \pm 5.47 \text{ Mm}^{-1}$ 로 나타났으며, 2021년이 전체 기간 중 가장 높은 값을 기록하였다. 이 시기에는 백신 접종 확대와 방역 조치 완화가 이루어지면서 경제 활동이 점진적으로 재개되었으며, 이 과정에서 산업 및 난방 부문의 에너지 소비가 증가하고 제조업 가동률이 회복된 것으로 판단된다(Dai *et al.*, 2024; Popovicheva *et*

al., 2024; Liu *et al.*, 2023). 경제 활동의 회복세가 이어지면서 BC 흡수계수는 증가하는 경향을 보였으나, 2022년에는 델타 변이 바이러스의 확산으로 경제 활동이 다소 위축되었으며, 백령도와 서울의 연평균 BC 흡수계수는 각각 4.83 Mm^{-1} , 20.62 Mm^{-1} 로 전년 대비 감소하는 추세를 나타냈다.

한편, 2018년 백령도와 서울의 연평균 BC 흡수계수는 각각 3.34 Mm^{-1} , 18.09 Mm^{-1} 로 모든 연도 중 가장 낮은 값을 기록하였으며, 서울은 백령도보다 약 5.42배 높은 수준을 보였다. 또한, 2018년 서울과 백령도의 연평균 BC 흡수계수는 COVID-19 팬데믹이 시작된 2020년보다 낮은 것으로 나타났다. 이를 바탕으로 BC의 연도별 변동성을 보다 면밀히 분석하기 위해 CAPSS 자료를 검토한 결과, 서울특별시의 BC 배출량은 2016년에는 571 ton yr^{-1} 였으며 이후 지속적으로 증가하여 2018년에는 $1,638 \text{ ton yr}^{-1}$ 를 기록하며 전체 연도 중 가장 배출이 높게 나타났다. 이후 2020년 968 ton yr^{-1} , 2022년 611 ton yr^{-1} 로 꾸준히 감소하는 추세를 보였다. 이는 BC 배출량이 BC 흡수계수 변화에 영향을 미치는 중요한 요인이지만, 기상 조건 및 대기 이동과 같은 다양한 요인에 의해 배출량과 흡수계수 간의 관계가 선형적으로 나타나지 않을 수 있음을 시사한다(Seinfeld and Pandis, 2016). 따라서, 원인을 보다 정확히 규명하기 위해 추가적인 세부 분석을 진행하였다.

3.2 계절별 BC 흡수계수 추이 분석

2018년부터 2022년까지 백령도에서 관측된 평균 BC 흡수계수는 겨울($5.40 \pm 4.51 \text{ Mm}^{-1}$) > 봄($5.25 \pm 4.37 \text{ Mm}^{-1}$) > 가을($4.12 \pm 3.66 \text{ Mm}^{-1}$) > 여름($3.51 \pm 2.31 \text{ Mm}^{-1}$) 순으로 나타났다(표 3).

백령도에서의 겨울철 BC 흡수계수는 서울보다 약 4.5배 낮았으나, 풍속은 서울보다 약 4.1배 높았으며, 계절별 변동성에서 가장 높은 값을 보였다. 겨울철 백령도의 평균 풍속은 4.16 m s^{-1} 로, 주로 남쪽에서 기류가 유입될 때 BC 흡수계수가 증가하였으며, 특히 남서풍일 때 더욱 증가하는 경향을 나타냈다(그림 3).

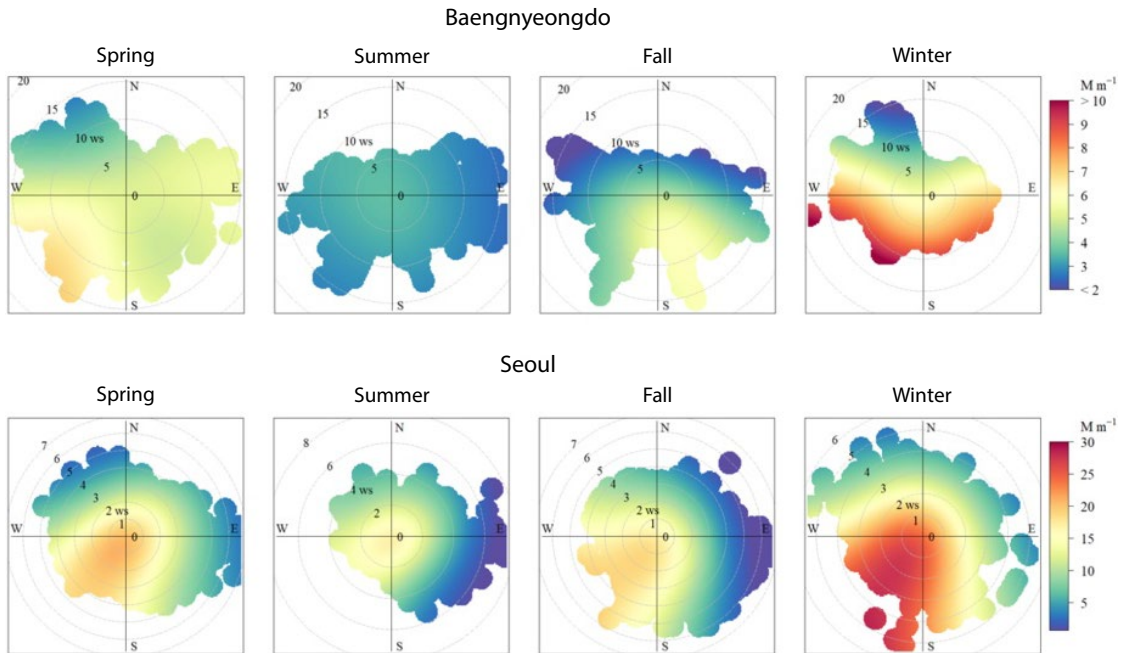


Fig. 3. Seasonal polar plot of absorption coefficient at 880 nm wavelength, wind direction, and wind speed from 2018 to 2022.

Table 3. Seasonal variation in absorption coefficient at 880 nm, temperature, and wind speed in Seoul and Baengnyeongdo.

Region	Season	Spring	Summer	Fall	Winter
Baengnyeongdo	abs880nm (Mm^{-1})	5.25 ± 4.37	3.51 ± 2.31	4.12 ± 3.66	5.40 ± 4.51
	Temperature ($^{\circ}C$)	9.61 ± 4.75	22.1 ± 3.47	14.7 ± 5.57	0.62 ± 4.44
	Wind speed ($m s^{-1}$)	4.75 ± 2.55	3.73 ± 2.18	3.64 ± 2.31	4.16 ± 2.35
Seoul	abs880nm (Mm^{-1})	19.8 ± 12.5	17.0 ± 11.7	19.5 ± 13.7	24.2 ± 14.2
	Temperature ($^{\circ}C$)	11.3 ± 7.11	24.1 ± 4.31	13.1 ± 8.02	-2.41 ± 6.54
	Wind speed ($m s^{-1}$)	1.09 ± 0.99	0.97 ± 0.87	0.88 ± 0.95	0.79 ± 0.89

이는 중국 동부 지역에서 배출된 BC가 백령도로 장거리 수송될 가능성을 시사한다(Oh *et al.*, 2015; Lin *et al.*, 2008). 또한, 남쪽에서 기여하는 국내 배출원의 영향도 배제할 수 없으며, 난방을 포함한 화석연료 연소 증가에 따라 BC 흡수계수 증가에 영향을 미친 것으로 분석되었다(Lee *et al.*, 2022). 겨울철과 봄철의 평균 BC 흡수계수는 유사한 수준을 보였으나, 계절에 따른 공간적 분포 차이가 뚜렷하게 나타났다. 봄철에는 남서쪽에서 유입된 기류의 영향으로 BC 흡수계수가 높게 나타났으며, 평균 풍속과 기온은 각각 $4.75 m s^{-1}$,

$9.61^{\circ}C$ 로, 기온은 겨울철에 비해 약 15.5배 높은 수준이었다. BC 흡수계수는 온도, 풍속이 낮을 때 증가하는 경향을 보이며, 풍속이 증가할수록 공기의 혼합이 더욱 활발해지고, BC 이외의 입자와 혼합되면서 BC의 흡수계수가 감소하는 경향을 나타낸다(Lee *et al.*, 2022; Lee *et al.*, 2014). 이러한 점을 고려할 때, 봄철의 기상 조건이 BC 흡수계수 증가에 유리하게 작용한 것으로 판단된다.

백령도의 여름철 BC 흡수계수는 겨울철과 약 1.54배 차이로 낮았으며, 가을철에는 여름철보다 약 1.17

배 증가하는 경향을 보였다. 여름철과 가을철 평균 풍속은 서울보다 약 3.85~4.14배 정도 높았으며(각각 3.73 m s^{-1} , 3.64 m s^{-1}), 오염물질의 확산과 이동에 유리한 조건을 형성하였다. 여름철에는 남서풍의 영향을 받았으며, 가을철에는 남동풍의 영향을 받았을 가능성이 높다. 이는 여름철 강수량 증가로 인하여 전체적으로 입자 농도 자체가 낮아졌으며(Lee *et al.*, 2014), 대기 확산 효과로 인해 BC 흡수계수가 낮게 관측된 것으로 판단된다(Lee *et al.*, 2022; Yu *et al.*, 2018b).

서울은 인구 밀집으로 인한 교통 및 난방 활동이 활발한 도심 특성과 인근 산업단지 배출원의 영향을 받는 지역으로, 다른 지역에 비해 높은 BC 흡수계수를 보이며 계절별 BC의 변동성 또한 뚜렷하게 확인되었다(Yu *et al.*, 2018b; Park *et al.*, 2013). 겨울철에는 남서쪽으로부터 유입된 대기의 영향으로 BC 흡수계수가 증가하였으며, 서울에서 관측된 평균 BC 흡수계수는 겨울($24.2 \pm 14.2 \text{ Mm}^{-1}$) > 봄($19.8 \pm 12.5 \text{ Mm}^{-1}$) > 가을($19.5 \pm 13.7 \text{ Mm}^{-1}$) > 여름($17.0 \pm 11.7 \text{ Mm}^{-1}$) 순으로 나타났다. 이는 백령도 대비 약 3.8~4.9배 높은 수준으로, 서울의 높은 BC 흡수계수는 도심 내 국지적 배출원과 인근 산업단지 배출원의 복합적 영향에 기인한 것으로 판단된다(Park *et al.*, 2018b). CAPSS에 따르면, 국내의 2018년부터 2022년 배출원 중 비도로이동오염원의 평균 배출량이 52.3%로 가장 높았으며, 도로이동오염원(22.7%), 생물성 연소(17.2%), 에너지 산업 연소(3.3%) 등 다양한 배출원이 확인되었다. 특히 비도로이동오염원의 배출 기여율은 50% 이상을 차지하며, 주요 배출원으로 확인되었다. 서울의 겨울철 평균 풍속은 0.78 m s^{-1} 로 백령도보다 약 5.3배 낮았으며, 기온 역시 -2.41°C 로 3.03°C 낮은 수준이었다. 이러한 정체된 기상 조건에서는 오염물질의 확산이 제한되고, 실제로 남서풍이 유입될 때 BC 흡수계수가 증가하는 경향을 보였다. 이는 도시 내에서 배출된 BC가 대기 정체로 인해 축적되면서 대기질 악화에 영향을 미칠 수 있음을 시사하며(Choi *et al.*, 2016; Oh *et al.*, 2015), 겨울철 난방 사용으로 인한 높은 배출량은 BC 흡수계수에 중요한 영향을 미친 것으로 확인되었

다(Yu *et al.*, 2018b; Park *et al.*, 2013). 봄철 평균 풍속과 기온은 각각 1.09 m s^{-1} , 11.3°C 로 겨울철과 동일하게 남서풍으로 BC 흡수계수가 유입되는 경향을 보였다. 이는 봄철 꽃샘추위로 인한 난방 사용이 있었다는 것을 시사한다(Lee *et al.*, 2014). 또한, 봄철과 가을철 BC 흡수계수는 유사한 수치를 보였으며, 가을철 평균 풍속과 기온은 각각 0.88 m s^{-1} , 13.1°C 로, 가을철 기온이 봄철과 유사하여 난방 사용이 일찍 시작됨에 따라 두 계절의 BC 흡수계수가 유사한 결과를 나타낸 것으로 해석된다. 여름철 BC 흡수계수는 겨울철에 비해 약 1.42배 낮았으며, 이는 백령도와 마찬가지로 강수로 인한 오염물질 세정 효과가 대기 중 흡수계수 변화에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다(Choi *et al.*, 2020b; Bond *et al.*, 2013; Kuwata *et al.*, 2007). 그뿐만 아니라, 여름철 서울의 BC 흡수계수는 백령도의 여름철 평균에 비해 약 4.84배 높은 수준을 나타내며, 계절별 변동성이 낮은 여름철에도 두 지역 간 BC 흡수계수 차이가 명확히 확인되었다. 종합적으로, 백령도는 기상 조건과 장거리 대기 이동의 영향을 주로 받는 반면, 서울은 국지적 배출원과 대기 정체에 따른 BC 흡수계수의 누적 증가가 주요한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 도시 지역과 배경 지역 간 BC 흡수계수 형성 메커니즘이 뚜렷이 구분됨을 시사하며, 향후 지역별 특성을 고려한 맞춤형 대기질 관리 전략의 수립이 필요함을 보여준다.

3.3 역궤적 분석

다음으로 전체기간에 대해 HYSPLIT 모델을 활용하여 역궤적 분석을 수행하였다. 이를 통해 주요 오염물질 유입지역을 파악하고자 백령도에서 72시간 동안의 역궤적을 계산하였으며, 연구영역을 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 로 나누어 매시간 종결점(end point)을 기준으로 각 행정구역별 발자국 빈도수를 계산하였다. 주요 행정구역은 중국 동부, 중국 북부, 중국 북동부, 몽골, 북한, 한국으로 나누어 분석을 진행하였다(그림 4).

백령도는 중국 북부로부터의 유입이 평균 36.7%로 가장 높았으며, 중국 북동부(25.8%)의 유입 빈도수가

다음으로 높게 관찰되었다(표 4). 이어 몽골(13.6%)과 중국 동부(12.5%)는 유사한 수준을 보였으며, 이어 북한(8.26%)과 남한(3.16%) 순으로 확인되었다. 전반적으로 백령도에서는 국외의 유입이 88.6%로 상당히



Fig. 4. The analysis was conducted by dividing the major administrative regions into six regions: blue is South Korea, red is North Korea, brown is Northeast China (Heilongjiang, Jilin, Liaoning), orange is North China (Beijing, Hebei, Nei Mongol, Shanxi, Tianjin), green is East China (Anhui, Fujian, Jiangsu, Jiangxi, Shandong, Shanghai, Zhejiang), and purple is Mongolia.

높았던 반면, 한반도로부터의 유입은 11.4%로 상대적으로 낮은 분율을 보였다. 서울의 경우, 중국 북부의 분율이 평균 26.68%로 가장 높았으며, 다음으로 중국 북동부(20.87%), 한국(20.77%), 북한(16.76%), 몽골(9.23%), 중국 동부(5.69%) 순으로 관찰되었다. 서울은 국외의 유입 분율이 62.47%에 달해 한반도 외 지역의 기여를 간과할 수 없는 수준이었으며, 한반도의 유입 분율은 37.5%로 백령도에 비해 상대적으로 높았다. 또한, 서울에서는 중국 및 한반도로부터의 유입 분율이 백령도보다 높았던 반면, 몽골로부터의 유입 분율은 백령도 대비 4.39% 낮았다.

그러나 단순 빈도수만으로는 국내의 고농도 기여를 입증하기에 근거가 부족하므로, 백령도와 서울에서 전체 기간의 상위 25% (백령도 5.7 Mm⁻¹, 서울 26 Mm⁻¹)에 대해 연도별 역궤적 경로 분석을 추가로 수행하였다. 고농도 발생 시 경로를 보다 명확하게 파악하기 위해, 각 격자의 빈도수가 10 미만인 경우는 제외하였으며, 빈도수는 log로 변환하여 그림 5에 제시하였다.

연도별 역궤적 분석 결과, 2018년 백령도는 다른 연도에 비해 중국 동부로부터의 유입이 현저히 적었으며, 국내 배출의 영향도 적게 받은 것으로 확인하였다(표 5). 이는 본 연구의 연도별 BC 흡수계수 분석에서

Table 4. Proportions of major regions classified through backward trajectory analysis in Seoul and Baengnyeongdo over the entire period.

Region	Year	East China	North China	Northeast China	Mongolia	North Korea	South Korea
Baengnyeongdo	2018	10.43	36.32	27.63	13.57	8.2	3.85
	2019	12.8	39.43	26.34	10.99	7.67	2.77
	2020	10.33	36.79	28.01	14.71	7.93	2.23
	2021	15.55	35.33	20.24	14.17	10.01	4.69
	2022	13.27	35.43	26.89	14.66	7.49	2.26
	Total (%)	12.48	36.66	25.82	13.62	8.26	3.16
Seoul	2018	4.12	25.94	25.51	10.06	16.65	17.72
	2019	5.78	26.23	21	7.51	18.98	20.5
	2020	5.16	30.38	21.05	10.3	14.37	18.74
	2021	8.39	22.99	16.16	8.74	15.79	27.93
	2022	5	27.87	20.62	9.55	18	18.96
	Total (%)	5.69	26.68	20.87	9.23	16.76	20.77

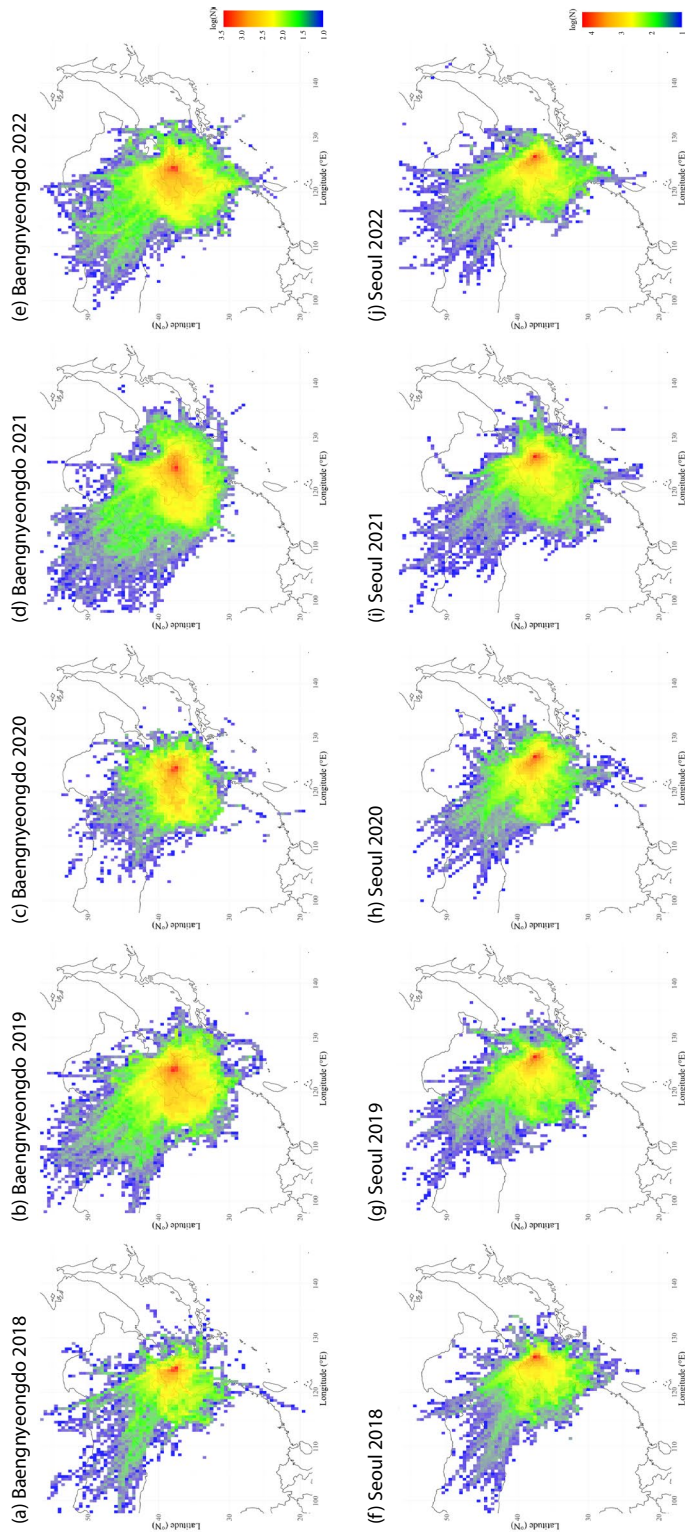


Fig. 5. Annual back-trajectory graphs for the top 25% (Baengnyeongdo 5.7 Mm^{-1} , Seoul 26 Mm^{-1}) of absorption coefficients in Baengnyeongdo and Seoul. Excluding cases excluding grids with frequencies less than 10. (a)~(e) are for Baengnyeongdo from 2018 to 2022. (f)~(j) are for Seoul from 2018 to 2022.

2018년의 흡수계수 값이 다른 연도에 비해 낮게 나타난 결과가 다른 기간에 비해 적은 중국 동부 및 국내 배출의 유입으로 인한 영향으로 시사된다. 이에 반해 2018년 몽골에서의 유입은 전체 연도 중 가장 높은 비율을 보였다. Regional Emission inventory in Asia version 3 (REASv3)에 따르면, 몽골의 BC 배출량은 2015년 2.9 ton yr^{-1} 로 추정되며(Kurokawa and Ohara, 2020), 이는 CAPSS의 2018~2022년 국내 평균배출량과 비교했을 때 약 4.4배 낮은 수준이다. 또한, 몽골에서 한반도까지의 거리와 경로상 중국을 거친다는 것을 고려하였을 때, 몽골에서의 배출은 국내 BC 흡수계수에 큰 영향을 미치지 않음을 시사한다. 반면, 2019년에는 BC 흡수계수가 약 1.93 Mm^{-1} 상승하였으며, 그림 5b에서 확인된 바와 같이, 국외 유입이 증가했음을 알 수 있었다. 특히 중국 동부의 유입 빈도수가 15.91%로 2018년보다 증가하였으며, 이는 중국 동부에서의 배출이 국내 BC 흡수계수에 상당한 영향을 미쳤음을 시사한다. 2021년 백령도에서 중국 동부로부터의 유입 빈도수는 32.03%로 전체 연도 중 가장 높았으며, 2020년 대비 3.03% 증가하였다. 이는 연도별 BC 흡수계수 분석에서 2021년의 값이 2020년보다 상승한 결과와 관련이 있는 것으로 해석된다(그림 5d). 2022년 백령도에서는 중국 북동부로부터의 유입 빈도수가 21.36%로 전체 연도 중 가장 높았으며, 2021

년 대비 4.40% 증가하였다. 그러나 2022년의 BC 흡수계수는 2021년보다 감소하여 중국 북동부 유입 경로의 증가는 고농도 BC 발생에 직접적인 영향을 미치지 않았음을 확인하였다(그림 5e). 2019년과 비교하여 2020년 백령도의 평균 BC 흡수계수는 1.68 Mm^{-1} 감소하였으며, 국외 유입 비율도 약 3.3% 낮아졌다. 특히 2020년은 COVID-19 확산에 따른 중국 내 산업 활동 위축과 이동 제한 조치가 시행되었으며, 이로 인해 중국의 주요 배출원이 일시적으로 감소한 것으로 해석할 수 있다. 따라서 BC 흡수계수의 감소는 단순한 기상 조건 변화보다는, 중국발 배출 자체의 실질적 감소가 영향을 미쳤을 가능성이 높다.

서울 역시 백령도와 마찬가지로 2018년에 BC 흡수계수가 가장 낮았으며, 표 5를 통해 중국 동부의 유입 빈도수가 다른 연도에 비해 가장 낮은 것을 확인하였다. 이는 백령도뿐만 아니라 서울에서도 중국 동부에서의 배출 영향이 상당히 높음을 시사한다(그림 5f, 표 2). 서울의 2019년과 2020년 BC 흡수계수가 비슷한 수준을 유지하였으며, 한국의 유입 빈도수가 2019년에 비해 국외 유입 비율이 약 0.53% 감소한 반면, 한국의 배출 영향이 약 4.29% 증가한 점을 고려할 때, 국내 배출 영향이 증가하면서 BC 흡수계수의 변화가 크지 않았으며, 국내의 COVID-19 팬데믹 동안의 외출 규제는 BC 흡수계수 감소에 유의미한 영향을 미치지

Table 5. Regional contribution to the reverse trajectory for the top 25% of absorption coefficients.

Region	Year	East China	North China	Northeast China	Mongolia	North Korea	South Korea
Baengnyeongdo	2018	22.83	32.04	17.17	19.65	5.31	3.01
	2019	29.83	34.97	15.72	7.82	6.90	4.75
	2020	29.05	27.74	19.71	8.61	9.49	5.40
	2021	32.03	24.32	16.96	8.27	12.54	5.89
	2022	28.13	27.30	21.36	10.31	9.56	3.34
	Total (%)	29.20	29.02	17.97	9.91	9.23	4.67
Seoul	2018	9.02	21.39	12.37	10.95	21.39	24.87
	2019	15.91	20.43	15.19	4.79	21.70	21.97
	2020	11.50	21.21	13.78	9.32	17.94	26.26
	2021	17.72	10.25	11.79	5.08	21.11	34.05
	2022	10.46	21.36	17.79	8.72	21.62	20.05
	Total (%)	13.34	18.44	14.24	7.46	20.78	25.73

않았음을 시사한다. 2021년도에는 국외 유입보다 한반도에서의 배출 영향이 55.16%로 더 높게 나타났으며, 동시에 국외 유입 비율 중 중국 동부에서의 유입 비율이 가장 높았고, 이는 백령도와 동일한 결과를 보였다. 2019년과 비교하였을 때 2021년의 중국 동부에서의 유입 비율은 크게 변하지 않았으나, 우리나라의 배출 영향이 크게 증가하였으며, 2021년 연평균 BC 흡수계수의 증가 또한 서울에서의 고농도가 국내 배출 영향이 높음을 시사한다(표 2).

고농도 빈도수 분석을 통해 백령도에서는 중국 동부와 북부의 유입이 주요 경로로 나타난 반면, 서울에서는 한반도 내 유입이 국외 유입보다 더 큰 비중을 차지하여 지역 간 차이가 뚜렷하다. 전체 기간의 유입 빈도수와 비교했을 때 고농도 발생 시 백령도는 국외 유입이 약 6.75% 증가한 반면, 서울은 국외 유입이 약 8.98% 감소하였다. 백령도는 국외 유입의 영향이, 서

울은 국내 배출의 영향이 더 커졌음을 알 수 있다. 이는 고농도 BC 발생 시 백령도는 중국 동부의 영향을 받았으며, 서울은 국내 배출의 영향을 더 많이 받았음을 보여준다. 특히 백령도의 경우, 고농도 사례에서 반복적으로 중국 동부 지역으로부터 유입된 경로가 관측되었으며, 이는 이 지역이 주요 국외 기여 지역일 가능성을 시사한다. 이에 따라 본 연구는 이러한 장거리 유입의 배경을 보다 구체적으로 이해하기 위해 중국 동부의 주요 배출원과 배출 특성에 대한 심층 분석을 수행하였다.

3.4 PSCF 분석

각 연구 지역에서의 고농도 기여도를 세부적으로 분석하기 위해 역궤적 데이터와 흡수계수 데이터로 서울과 백령도에 대한 PSCF 분석을 수행하였으며, 이를 통해 오염물질이 유입되는 주요 기여원을 평가하였다.

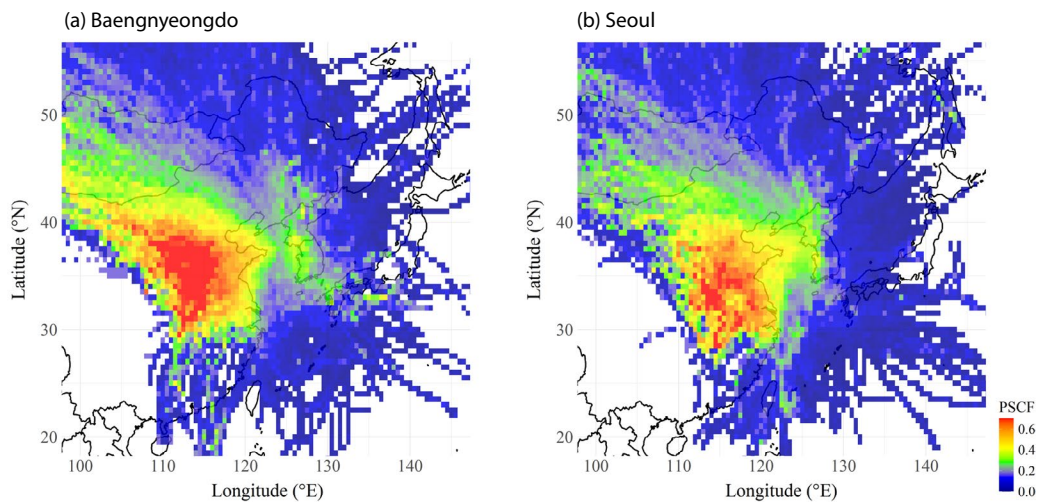


Fig. 6. Top 25th percentile PSCF analysis result graph. The legend ranges from 0.0~0.7, with values above 0.7 shown in red. (a) Analysis results at Baengnyeongdo. (b) Analysis results in Seoul.

Table 6. PSCF average and standard deviation for each region in Seoul and Baengnyeongdo.

Region	East China	North China	Northeast China	Mongolia	North Korea	South Korea
Seoul	0.53 ± 0.12	0.24 ± 0.12	0.21 ± 0.08	0.20 ± 0.05	0.32 ± 0.05	0.28 ± 0.09
Baengnyeongdo	0.51 ± 0.15	0.26 ± 0.17	0.20 ± 0.06	0.22 ± 0.07	0.28 ± 0.06	0.28 ± 0.05

각 지역의 전체 기간 중 상위 25% 고농도 사례에 대한 PSCF 분석 결과를 그림 6a, b에 제시하였으며, 유입 지역별 PSCF 값의 평균과 표준편차는 표 6에 정리하였다. 서울과 백령도 모두 유사한 공간 분포를 보였으며, 특히 중국 동부에서 높은 PSCF 값(서울 0.53, 백령도 0.51)을 보였다. 이는 해당 지역이 두 관측 지점 모두에 대해 BC 유입의 주요 기여 지역임을 시사한다. 중국의 주요 BC 배출원이 한국과 인접한 동부 지역에 집중되어 있으며, 이러한 입지적 특성으로 인해 중국 발 오염물질이 유입되면서 BC 흡수계수가 증가하는 경향을 보였다(Im *et al.*, 2021; Kanaya *et al.*, 2020; Choi *et al.*, 2016). 다른 지역에 대해서도 낮지 않은 PSCF 값을 보였으나, 유입 빈도수에 비해 중국 동부가 상당히 높은 값을 보였다(표 6). 중국 동부의 높은 PSCF 값은 단순한 지리적 인접성뿐 아니라, 해당 지역의 높은 배출량과 산업적 특성이 복합적으로 작용한 결과로 해석된다. 중국 동부는 양쯔강 삼각주(Yangtze River Delta)와 산둥반도를 포함하는 지역으로, 상하이, 난징, 항저우, 자싱 등 대규모 산업단지과 석탄 기반의 화력발전소가 밀집해 있다. 상하이의 2017년 평균 BC 농도는 $2.19 \mu\text{g m}^{-3}$ 이며, 화력발전과 산업 활동이 각각 53.3%와 29.5%를 차지하였다(Wei *et al.*, 2020). 산둥은 동부 지역 중 가장 높은 에너지 소비량($397.46 \times 10^6 \text{ tce}$)을 기록하며, 산업 부문이 67.8%를 차지해 철강, 석유화학, 시멘트 생산 등 고배출 산업이 집중되어 있다(Lu *et al.*, 2019). 난징과 항저우, 자싱 역시 비슷한 산업 구조를 보이며, 이들 도시에서의 평균 BC 농도는 $1.8 \sim 3.5 \mu\text{g m}^{-3}$ 수준으로, 국

내 관측 값에 영향을 줄 수 있는 수준이다(Shen *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2014).

이처럼 고배출 산업이 밀집된 지역에서 배출된 BC는 겨울철의 대기 정체와 결합하여 장거리 이동 가능성이 높아지며, 실제로 북서풍 및 서풍을 따라 한반도까지 이송된다. 특히 백령도는 산둥 지역과의 직선거리가 약 180km로 가까워, 직접적인 영향을 받기 쉬운 위치에 있다(Ban *et al.*, 2018). 이는 본 연구의 역궤적 분석 결과와도 일치하며, 서울과 백령도의 높은 PSCF 값에 중국 동부 배출원이 결정적인 역할을 하고 있음을 시사한다.

결과적으로, 중국 동부 지역에서 나타난 높은 PSCF 값은 대규모 산업 및 화력발전애 따른 높은 배출량과 오염물질이 대기 이동 경로를 통해 효과적으로 한반도로 전달될 수 있는 기상 및 지리적 조건이 복합적으로 작용한 결과임을 확인할 수 있었다. 이러한 영향의 계절적 변동성을 보다 구체적으로 파악하기 위해, 계절별 PSCF 분석도 함께 수행하였다(그림 7, 표 7).

계절별 PSCF 분석 결과, 서울의 PSCF 값은 전체 유입 지역에 대해 겨울(0.40 ± 0.16), 가을(0.29 ± 0.13), 봄(0.26 ± 0.14), 여름(0.17 ± 0.08) 순으로 나타났으며, 백령도는 겨울(0.44 ± 0.20), 봄(0.34 ± 0.07), 가을(0.28 ± 0.17), 여름(0.18 ± 0.05) 순으로 나타났다(표 7). 여름철에는 서울과 백령도 모두 모든 유입 지역에서 가장 낮은 PSCF 값을 보이며 앞선 계절별 분석에서 설명한 계절적 특성이 본 분석에서도 동일하게 영향을 미쳤음을 시사한다. 유입 지역 중 중국 동부의 PSCF 값이 전 계절에서 가장 높았으며, 특히 겨울철에

Table 7. Seasonal PSCF average for each region in Seoul and Baengnyeongdo.

Region	Season	East China	North China	Northeast China	Mongolia	North Korea	South Korea
Baengnyeongdo	Spring	0.49	0.35	0.27	0.32	0.32	0.31
	Summer	0.27	0.18	0.11	0.14	0.19	0.19
	Fall	0.61	0.17	0.16	0.09	0.28	0.34
	Winter	0.76	0.29	0.25	0.25	0.42	0.66
Seoul	Spring	0.54	0.19	0.15	0.13	0.26	0.30
	Summer	0.28	0.12	0.17	0.04	0.23	0.19
	Fall	0.53	0.21	0.20	0.15	0.34	0.29
	Winter	0.72	0.30	0.30	0.24	0.42	0.44

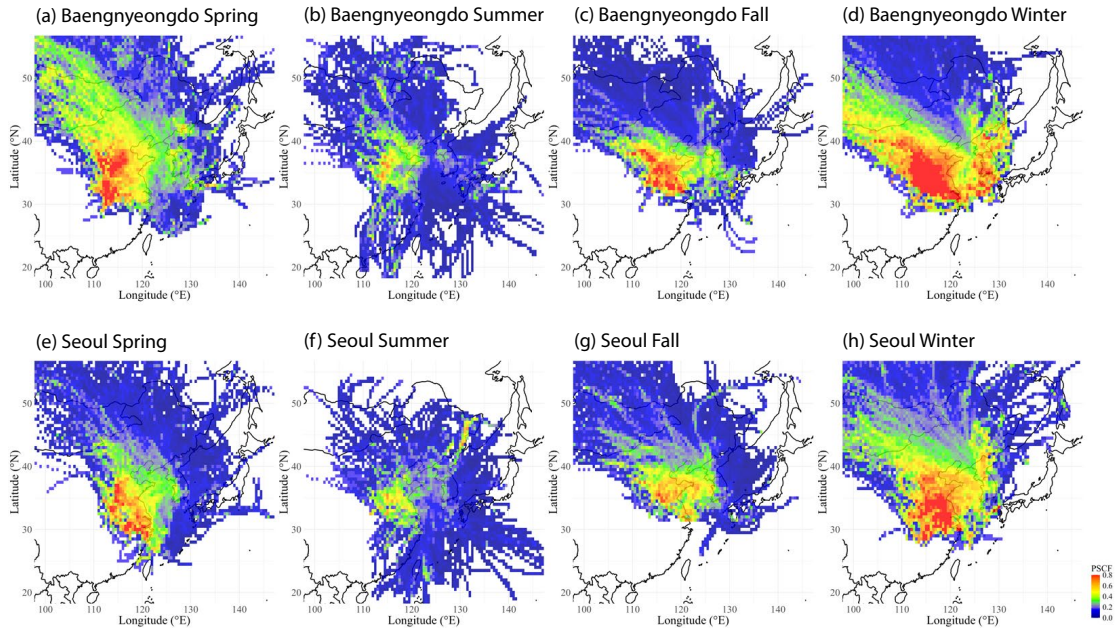


Fig. 7. Graphs of seasonal PSCF analysis results. (a)~(d) analysis results from Baengnyeongdo by season. The legend ranges from 0.0~0.8, with values above 0.8 shown in red. (e)~(h) analysis results from Seoul by season.

는 서울과 백령도에서 각각 0.72, 0.76으로 가장 높은 값을 기록하였다(그림 7d, h). 겨울철에는 중국 동부 지역에서의 석탄 연소 증가와 대기 정체 현상으로 인해 장거리 이동 가능성이 높아지면서 BC 흡수계수에 대한 영향이 더욱 뚜렷하게 나타났으며, 이러한 결과는 겨울철 북서풍이 중국 동부로부터 한반도로 BC를 수송하는 주요 기류로 작용한다는 선행 연구와 일치한다(Kanaya *et al.*, 2020). 중국 동부의 대규모 산업 활동과 화력발전소에 의한 배출량은 계절에 따라 변동될 수 있으며, 겨울철에는 난방 수요 증가에 따라 석탄 연소가 더욱 활발해져 BC 배출량이 증가하는 경향을 보인다(Shen *et al.*, 2015; Zhuang *et al.*, 2014). 이러한 계절적 요인은 국내 대기질에 미치는 영향을 증폭시키거나 완화하는 데 중요한 역할을 할 수 있다.

겨울철 백령도에서는 중국 동부 다음으로 우리나라의 PSCF 값이 0.66으로 높게 나타났으며, 이는 전반적으로 북쪽에서 유입된 BC로 인해 백령도에서 흡수계수가 증가하는 경향과 일치한다(그림 3, 그림 7d). 서

울의 겨울철 PSCF 값은 0.44로 백령도 대비 낮은 수준이었으나 다른 계절에 비해서는 상대적으로 높은 값으로, 국내 주요 BC 배출원의 영향이 반영된 결과로 해석된다. 한편, 서울의 겨울철 북동풍 유입 경로에 대한 PSCF 분석 결과는 본 연구의 계절별 BC 흡수계수 추이 분석과 상이한 결과를 나타냈다. 계절별 BC 흡수계수 추이 분석은 단일 지점의 풍향 및 풍속 데이터에 기반하고 있으며, 겨울철 남서풍의 풍속이 낮고 측정소 뒤편에 위치한 북한산의 지형적 영향으로 인해 북동풍의 영향이 분석에 반영되지 않았다는 것으로 사료된다(그림 3, 그림 7h, 표 7).

백령도와 서울에서 관측된 국내의 높은 BC 흡수계수는 인구 밀집도와 교통량이 많은 도심의 특성뿐만 아니라, 인근 산업단지에서 배출된 오염물질의 영향을 시사하며(Yu *et al.*, 2018b; Park *et al.*, 2013), 특히 남서쪽에서의 높은 BC 흡수계수는 충청남도 및 시화 산업단지 등에서 배출된 오염물질의 영향이 작용했을 가능성을 보여준다. 2018년 굴뚝원격감시체계(Tele-

Monitoring System, TMS) 자료에 따르면, 충청남도는 약 75,825톤의 대기오염물질을 배출하여 전국 배출량의 약 23%를 차지하였다. 이 지역에는 태안, 당진, 영흥 등 대형 화력발전소와 대산석유화학단지, 석문국가산업단지 등 주요 산업 배출원이 밀집해 있으며, BC 흡수계수 증가는 중국 동부에서의 장거리 이동뿐만 아니라 서부 지역의 배출이 복합적으로 기여했음을 뒷받침한다(Lee *et al.*, 2021; Ju *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2017; Oh, 2007).

또한, 서울과 백령도의 유입 경로 중 북한의 PSCF 값은 모두 0.42로 비교적 높은 수준을 보였다. 북한의 BC 배출량은 공식 통계가 부족하나, Mix Emission Inventory 기반 동아시아 지역 대기오염물질 배출량 자료에 따르면 2010년 기준 연간 약 14,000톤으로 추정되었으며(Choi *et al.*, 2020a; Li *et al.*, 2017), 주요 배출원은 난방 및 전력 생산을 위한 석탄 연소와 산업 부문이며, 석탄 연소 비율이 매우 높아 겨울철 BC 흡수계수가 증가하는 특징을 보인다(Wang *et al.*, 2014). 서울과 백령도의 PSCF 값은 계절에 따라 뚜렷한 차이를 보였으며, 이러한 변화 양상은 계절별 BC 흡수계수 추이 분석과 유사한 경향을 나타냈다.

4. 결 론

본 연구는 2018년부터 2022년까지 서울과 백령도에서 측정된 BC 흡수계수 자료를 활용하여 연도별 및 계절별 변화 특성을 분석하고, 역궤적 및 PSCF 분석을 통해 국내외 배출원의 기여도를 정량적으로 평가하였다. 연도별 분석 결과, CAPSS 배출량 자료에 따르면 국내 BC 배출량은 점진적으로 감소하는 경향을 보였으나, 본 연구의 BC 흡수계수는 해마다 뚜렷한 변동성이 나타나며 상이한 결과를 나타내었다. 계절별로는 겨울철에 난방 및 대기 정체의 영향으로 농도가 가장 높았으며, 여름철에는 강수에 따른 세정 효과로 가장 낮은 수준을 기록하였다. 또한, 서울과 백령도는 유입 경로 및 지형적 조건의 차이로 인해 주요 기여

요인과 기상 영향 양상이 서로 다르게 나타났다. 이는 단순한 배출량 변화만으로 오염 실태를 충분히 설명할 수 없으며, 국내 배출뿐 아니라 국외 유입의 복합적인 영향이 BC 흡수계수 변화에 지속적으로 작용하고 있음을 시사한다.

이러한 해석의 한계를 보완하기 위해 수행한 역궤적 분석에서 백령도는 중국 동부 및 북동부를 포함한 국외 유입의 영향이 두드러졌으며, 서울은 상대적으로 한반도 내에서 체류하는 기류의 비중이 더 높게 나타났다. 고농도 시에는 이러한 경향이 더욱 뚜렷하게 나타났으며, PSCF 분석 결과에서도 두 지역 모두 중국 동부에서 PSCF 값이 0.5를 초과하며 공통적인 주요 기여 지역으로 도출되었다. 특히 겨울철에는 양 지역 모두에서 한반도의 교통 및 난방 관련 배출과 서해안 산업 지역으로부터의 기류 유입이 확인되었으며, 특히 중국 동부는 PSCF 값이 0.7을 초과하며 상당히 높은 영향을 미친 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 국외 유입이 중요한 역할을 함과 동시에, 국내 배출원이 농도 변화에 일정 수준 영향을 미치고 있음을 시사하며, 장거리 수송과 국내 배출의 복합적 작용을 함께 고려한 동북아 협력 기반의 공동 감축 전략이 필요함을 보여준다.

이를 통해 장거리 이동과 국내 배출이 복합적으로 작용함을 정량적으로 규명하였으며, 특히 겨울철에는 중국 동부의 산업 및 난방 배출이 주요한 기여 요인으로 작용하고 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 향후 국가 간 대기오염 저감 정책 수립을 위한 과학적 근거를 제공할 수 있으며, 특히 중국과의 협력을 통한 국제적 대기질 개선 노력이 필요함을 시사한다. 또한, BC 배출 저감을 위한 국내 정책 마련과 지역별 대응 전략 수립, 계절적 특성을 고려한 감시체계 강화가 요구되며, 배출원의 변화에 대응할 수 있는 실시간 모니터링과 정책 효과에 대한 지속적인 평가도 병행되어야 한다. 더불어 서해안 일대의 주요 고정 배출원이 고농도 사례에 일정 부분 기여하고 있는 만큼, 이에 대한 정량적 영향 분석과 장기 저감 조치의 효과를 추적할 수 있는 관측체계도 함께 구축할 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 국립환경과학원에서 주최한 제3회 대학(원)생 미세먼지 연구 아이디어 공모전으로 수행되었습니다(NIER-2024-03-00-005).

References

- Andreae, M.O., Gelencsér, A. (2006) Black carbon or brown carbon? The nature of light-absorbing carbonaceous aerosols, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(10), 3131-3148. <https://doi.org/10.5194/acp-6-3131-2006>
- Ban, J., Park, T., Park, S.M., Shin, H.-J., Lim, Y.-J., Choi, J., Lee, M.-D., Lee, S.-B., Kim, J., Lee, T. (2018) The Ionic Composition and Acidity of PM_{2.5} at Baengnyeong Island during the High Concentration Episodes (2013-2014), *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(6), 780-791. <https://doi.org/10.5572/kosae.2018.34.6.780>
- Bond, T.C., Doherty, S.J., Fahey, D.W., Forster, P.M., Berntsen, T., DeAngelo, B.J., Flanner, M.G., Ghan, S., Kärcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P.K., Sarofim, M.C., Schultz, M.G., Schulz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S., Bellouin, N., Guttikunda, S.K., Hopke, P.K., Jacobson, M.Z., Kaiser, J.W., Klimont, Z., Lohmann, U., Schwarz, J.P., Shindell, D., Storelvmo, T., Warren, S.G., Zender, C.S. (2013) Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(11), 5380-5552.
- Boucher, O., Randall, D., Artaxo, P., Bretherton, C., Feingold, G., Forster, P., Kerminen, V.-M., Kondo, Y., Liao, H., Lohmann, U., Rasch, P., Satheesh, S.K., Sherwood, S., Stevens, B., Zhang, X.Y. (2013) *Clouds and Aerosols, Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Edited by T.F. Stocker et al., Cambridge University Press, 571-657.
- Choi, J.-S., Kim, J.-H., Lee, T.-H., Choi, Y.-J., Park, T.-H., Oh, J., Park, J.-S., Ahn, J.-Y., Jeon, H.-E., Koo, Y.-S., Kim, S.-D., Hong, Y.-D., Hong, J.-H. (2016) A Study on Chemical Characteristics of Aerosol Composition at West Inflow Regions in the Korean Peninsula I. Characteristics of PM Concentration and Chemical Components, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(5), 469-484. <https://doi.org/10.5572/kosae.2016.32.5.469>
- Choi, Y., Ghim, Y.S. (2021) Variations in major aerosol components from long-term measurement of columnar aerosol optical properties at a SKYNET site downwind of Seoul, Korea, *Atmospheric Environment*, 245, 117991.
- Choi, Y., Kanaya, Y., Park, S.-M., Matsuki, A., Sadanaga, Y., Kim, S.-W., Uno, I., Pan, X., Lee, M., Kim, H., Jung, D.H. (2020a) Regional variability in black carbon and carbon monoxide ratio from long-term observations over East Asia: assessment of representativeness for black carbon (BC) and carbon monoxide (CO) emission inventories, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(1), 83-98. <https://doi.org/10.5194/acp-20-83-2020>
- Choi, Y., Kanaya, Y., Takigawa, M., Zhu, C., Park, S.M., Matsuki, A., Sadanaga, Y., Kim, S., Pan X., Pisso, I. (2020b) Investigation of the wet removal rate of black carbon in East Asia: validation of a below- and in-cloud wet removal scheme in FLEXible PARTicle (FLEXPART) model v10.4, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(21), 13655-13670.
- Chung, Y.-S., Yoon, M.B. (1996) On The Occurrence of Yellow Sand and Atmospheric Loadings, *Atmospheric Environment*, 30(13), 2387-2397.
- Cooke, W.F., Liousse, C., Cachier, H., Feichter, J. (1999) Construction of a 1 × 1 fossil fuel emission data set for carbonaceous aerosol and implementation and radiative impact in the ECHAM4 model, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D18), 22137-22162.
- Dai, Y., Wang, J., Wang, H., Cui, S., Zhang, Y., Li, H., Wu, Y., Wang, M., Aruffo, E., Ge, X. (2024) Measurement report: Characteristics of airborne black-carbon-containing particles during the 2021 summer COVID-19 lockdown in a typical Yangtze River Delta city, China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24, 9733-9748. <https://doi.org/10.5194/acp-24-9733-2024>
- Deng, J., Guo, H., Zhang, H., Zhu, J., Wang, X., Fu, P. (2020) Source apportionment of black carbon aerosols from light absorption observation and source-oriented modeling: an implication in a coastal city in China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(22), 14419-14435.
- Draxler, R.R., Hess, G.D. (1998) An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories, *Australian Meteorological Magazine*, 47(4), 295-308.
- Drinovec, L., Močnik, G., Zotter, P., Prévôt, A.S.H., Ruckstuhl, C., Coz, E., Hansen, A.D.A. (2015) The "dual-spot" Aethalometer: an improved measurement of aerosol black carbon with real-time loading compensation, *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(5), 1965-1979. <https://doi.org/10.5194/amt-8-1965-2015>
- Drinovec, L., Sciare, J., Stavroulas, I., Bezantakos, S., Pikridas, M.,

- Unga, F., Savvides, C., Višić, B., Remškar, M., Močnik, G. (2020) A new optical-based technique for real-time measurements of mineral dust concentration in PM₁₀ using a virtual impactor, *Atmospheric Measurement Techniques*, 13, 3799-3813. <https://doi.org/10.5194/amt-2019-506>
- Evangelio, N., Platt, S.M., Eckhardt, S., Lund Myhre, C., Laj, P., Alados-Arboledas, L., Backman, J., Brem, B.T., Fiebig, M., Flentje, H., Marinoni, A., Pandolfi, M., Yus-Diez, J., Prats, N., Putaud, J.P., Sellegri, K., Sorribas, M., Eleftheriadis, K., Vratolis, S., Wiedensohler, A. (2021) Changes in black carbon emissions over Europe due to COVID-19 lockdowns, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(4), 2675-2692. <https://doi.org/10.5194/acp-21-2675-2021>
- Guo, Q., Hu, M., Guo, S., Wu, Z., Hu, W., Peng, J., Hu, W., Wu, Y., Yuan, B., Zhang, Q., Song, Y. (2015) The identification of source regions of black carbon at a receptor site off the eastern coast of China, *Atmospheric Environment*, 100, 78-84.
- Im, D.-Y., Lee, T.-J., Jo, Y.-M., Kim, D.-S. (2021) Temporal Analyses of PM Data, Estimation of the Past Unmonitored PM_{2.5} Data, and Assessment of the COVID-19 Effect at the Background Areas in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(4), 670-690. <https://doi.org/10.5572/kosae.2021.37.4.670>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013) *Climate Change 2013: the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Vol. 9781107057. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.016>
- Janssen, N.A.H., Gerlofs-Nijland, M.E., Lanki, T., Salonen, R.O., Cassee, F., Hoek, G. (2012) Health effects of black carbon, Copenhagen, Denmark.
- Janssen, N.A.H., Hoek, G., Simic-Lawson, M., Fischer, P., van Bree, L., ten Brink, H., Keuken, M., Atkinson, R.W., Anderson, H.R., Brunekreef, B., Cassee, F.R. (2011) Black Carbon as an Additional Indicator of the Adverse Health Effects of Airborne Particles Compared with PM₁₀ and PM_{2.5}, *Environmental Health Perspectives*, 119(12), 1691-1699. <https://doi.org/10.1289/ehp.1003369>
- Jia, M., Evangelio, N., Eckhardt, S., Huang, X., Gao, J., Ding, A., Stohl, A. (2021) Black carbon emission reduction due to COVID-19 lockdown in China, *Geophysical Research Letters*, 48(8), e2021GL093243.
- Ju, S., Yu, G.-H., Park, S., Lee, J., Lee, S., Jee, J., Lee, K., Lee, M. (2020) Pollution Characteristics of PM_{2.5} Measured during Fall at a Seosan Site in Chungcheong Province, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(3), 329-345. <https://doi.org/10.5572/kosae.2020.36.3.329>
- Jung, W.-S., Park, J.-K., Lee, B.-R., Kim, E.-B. (2013) Analysis on the PM₁₀ Transportation Route in Gimhae Region Using the HYSPLIT Model, *Journal of the Environmental Sciences International*, 22(8), 1043-1052. <https://doi.org/10.5322/jesi.2013.22.8.1043>
- Kanaya, Y., Yamaji, K., Miyakawa, T., Taketani, F., Zhu, C., Choi, Y., Komazaki, Y., Ikeda, K., Kondo, Y., Klimont, Z. (2020) Rapid reduction in black carbon emissions from China: evidence from 2009-2019 observations on Fukue Island, Japan, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(11), 6339-6356.
- Kang, Y.-H., Kim, E., Kim, S. (2024) Adjusting Chinese elemental carbon emissions and estimating their impacts on ambient concentrations in South Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 40(2), 193-208. <https://doi.org/10.5572/kosae.2024.40.2.193>
- Kim, S., Kim, O., Kim, B.-U., Kim, H.C. (2017) Impact of Emissions from Major Point Sources in Chungcheongnam-do on Surface Fine Particulate Matter Concentration in the Surrounding Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(2), 159-173. <https://doi.org/10.5572/kosae.2017.33.2.159>
- Kirchstetter, T.W., Novakov, T., Hobbs, P.V. (2004) Evidence that the spectral dependence of light absorption by aerosols is affected by organic carbon, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D21), D21208. <https://doi.org/10.1029/2004jd004999>
- Klemm, O., Bachmeier, A.S., Talbot, R.W., Klemm, K.I. (1994) Fog chemistry at the New England coast: influence of air mass history, *Atmospheric Environment*, 28(6), 1181-1188.
- Klimont, Z., Kupiainen, K., Heyes, C., Purohit, P., Cofala, J., Rafaj, P., Borken-Kleefeld, J., Schöpp, W. (2017) Global anthropogenic emissions of particulate matter including black carbon, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(14), 8681-8723.
- Kurokawa, J., Ohara, T. (2020) Long-term historical trends in air pollutant emissions in Asia: Regional Emission inventory in ASia (REAS) version 3, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(21), 12761-12793.
- Kuwata, M., Kondo, Y., Mochida, M., Takegawa, N., Kawamura, K. (2007) Dependence of CCN activity of less volatile particles on the amount of coating observed in Tokyo, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 112(D11). <https://doi.org/10.1029/2006jd007758>
- Lee, H.-Y., Kim, N.-K., Jo, M.-J., Lee, S.-J., Choi, J.-S., Kang, K.-S.,

- Choi, S.-D. (2022) Characteristics of PM_{2.5} Pollution and Long-range Atmospheric Transport in Background Areas (Baengnyeong and Jeju Islands), *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(4), 524-541. <https://doi.org/10.5572/kosae.2022.38.4.524>
- Lee, J. (2018) Black Carbon Measurement using a Drone, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(3), 486-492. <https://doi.org/10.5572/kosae.2018.34.3.486>
- Lee, J., Jeong, B., Park, D.-J., Bae, M.-S. (2015a) A Study of Black Carbon Measurement in Metropolitan Area and Suburban Area of the Korean Peninsula Performed during Pre KORea-US Air Quality Study (KORUS-AQ) Campaign, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(5), 472-481. <https://doi.org/10.5572/kosae.2015.31.5.472>
- Lee, K.W., Han, S.C., Lee, J. (2014) Measurement of Black Carbon Concentration in Rural Area, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, 38(1), 17-24. <https://doi.org/10.3795/ksme-b.2014.38.1.017>
- Lee, S., Hong, H., Kim, C.H., Hwang, E.Y., Yoon, S.H., Lee, S.S., Noh, S., Kim, J.B. (2021) Characteristic Analysis of Urban Air Pollution of Northwest Cities in ChungNam, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(4), 561-577. <https://doi.org/10.5572/kosae.2021.37.4.561>
- Lee, Y., Park, M., Jung, S., Kim, S., Jo, M., Song, I., Lyu, Y., Lim, Y., Kim, J., Jung, H., Lee, S., Choi, W.-J., Ahn, J., Lee, M., Kang, H., Park, S., Seo, S., Jung, D., Hyun, J., Park, J. (2015b) Characteristics of Particulate Carbon in the Ambient Air in the Korean Peninsula, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(4), 330-344. <https://doi.org/10.5572/kosae.2015.31.4.330>
- Li, K.C., Hwang, I. (2015) Characteristics of PM_{2.5} in Gyeongsan Using Statistical Analysis, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(6), 520-529. <https://doi.org/10.5572/kosae.2015.31.6.520>
- Li, M., Zhang, Q., Kurokawa, J., Woo, J.-H., He, K., Lu, Z., Ohara, T., Song, Y., Streets, D.G., Carmichael, G.R., Cheng, Y., Hong, C., Huo, H., Jiang, X., Kang, S., Liu, F., Su, H., Zheng, B. (2017) MIX: a mosaic Asian anthropogenic emission inventory under the international collaboration framework of the MICS-Asia and HTAP, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(2), 935-963. <https://doi.org/10.5194/acp-17-935-2017>
- Li, W., Liu, X., Duan, F., Qu, Y., An, J. (2022) A one-year study on black carbon in urban Beijing: Concentrations, sources and implications on visibility, *Atmospheric Pollution Research*, 13(2), 101307.
- Lim, S., Kang, Y., Lee, M., Yoo, H.-J., Lee, S.-S., Lee, G.-H. (2019) Mass Concentration and Size Distribution of Refractory Black Carbon in Seoul during Summer, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(6), 713-725. <https://doi.org/10.5572/kosae.2019.35.6.713>
- Lin, M., Oki, T., Bengtsson, M., Kanae, S., Holloway, T., Streets, D.G. (2008) Long-range transport of acidifying substances in East Asia—Part II: Source—receptor relationships, *Atmospheric Environment*, 42(24), 5956-5967. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.03.039>
- Liu, X., Hadiatullah, H., Schnelle-Kreis, J., Xu, Y., Yue, M., Zhang, X., Querol, X., Cao, X., Bendl, J., Cyrus, J., Jakobi, G., Philipp, A., Munkel, C., Zimmermann, R., Adam, T. (2023) Levels and drivers of urban black carbon and health risk assessment during pre- and COVID19 lockdown in Augsburg, Germany, *Environmental Pollution*, 316, 120529-120529. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120529>
- Lu, Y., Wang, Q.G., Zhang, X., Qian, Y., Qian, X. (2019) China's black carbon emission from fossil fuel consumption in 2015, 2020, and 2030, *Atmospheric Environment*, 212, 201-207.
- Oh, J., Park, J., Lee, S., Ahn, J., Choi, J., Lee, S., Lee, Y., Kim, H., Hong, Y., Hong, J., Kim, J., Kim, S., Lee, G.-W. (2015) Characteristics of Black Carbon Particles in Ambient Air Using a Single Particle Soot Photometer (SP2) in May 2013, Jeju, Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(3), 255-268. <https://doi.org/10.5572/kosae.2015.31.3.255>
- Oh, S.-W. (2007) Concentrations of Atmospheric Fine Particles Measured during 2005 in Chungnam, Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 23(1), 132-140. <https://doi.org/10.5572/kosae.2007.23.1.132>
- Park, E., Kim, M.-H., Han, J., Yoo, H.-J., Yang, S.-H., Kim, S., Kim, Y.-A., Won, D., Kim, S.-W. (2024) Light-absorption Properties of Fresh Biomass Burning Aerosols Observed at the Anmyeondo Global Atmosphere Watch (GAW) Regional Station: A Case Study in April 2023, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 40(6), 614-627. <https://doi.org/10.5572/kosae.2024.40.6.614>
- Park, J.-S., Song, I.-H., Kim, H.-W., Lim, H.-B., Park, S.-M., Shin, S.-N., Shin, H.-J., Lee, S.-B., Kim, J.-H. (2019) The Characteristics of Black Carbon of Seoul, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 28(2), 113-128. <https://doi.org/10.14249/eia.2019.28.2.113>
- Park, S., Han, S. (2022) Source Apportionment of Black Carbon in

- PM_{2.5} Observed Using a Real-time Seven-wavelength Aethalometer at an Urban Site of Gwangju, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(5), 653-668. <https://doi.org/10.5572/kosae.2022.38.5.653>
- Park, S., Lee, K., Lee, M. (2020) Light Absorption of PM_{2.5} Observed during Fall at a Seosan Site in Chungchoeng Province, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(3), 404-413. <https://doi.org/10.5572/kosae.2020.36.3.404>
- Park, S.-S., Yu, G.-H., Lee, S.-I., Bae, M.-S. (2018a) Aethalometer-based Estimate of Mass Absorption Cross Section of Black Carbon Particles at an Urban Site of Gwangju, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(5), 727-734. <https://doi.org/10.5572/kosae.2018.34.5.727>
- Park, S.-W., Kim, S.-Y., Gong, B.-J., Lee, K.-H., Cho, S.-Y., Kim, J.-C., Lee, S.-J. (2013) Investigation on a Haze Episode of Fine Particulate Matter using Semi-continuous Chemical Composition Data, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(5), 642-655. <https://doi.org/10.5572/kosae.2013.29.5.642>
- Park, T., Ban, J., Kang, S., Ghim, Y.S., Shin, H.-J., Park, J.S., Park, S.M., Moon, K.J., Lim, Y.-J., Lee, M.-D., Lee, S.-B., Kim, J., Kim, S.T., Bae, C.H., Lee, Y., Lee, T. (2018b) Chemical Characteristics of PM₁ using Aerosol Mass Spectrometer at Baengnyeong Island and Seoul Metropolitan Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(3), 430-446. <https://doi.org/10.5572/kosae.2018.34.3.430>
- Park, T.-E., Han, J.-U., Park, S. (2022) Chemical Composition in PM_{2.5} at an Urban Site in Gwangju and a Pier Site in Youngam in Late Fall and Influence of Shipping Activities at the Pier Site on Light Absorption Properties of Aerosol Particles, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(6), 781-801. <https://doi.org/10.5572/kosae.2022.38.6.781>
- Popovicheva, O.B., Chichaeva, M.A., Kovach, R.G., Zhdanova, E.Y., Stepanenko, V.M., Varentsov, A., Kasimov, N.S. (2024) Impact of wave Covid-19 responses on black carbon air pollution in Moscow megacity background, *Aerosol and Air Quality Research*, 24(4), 230266.
- Ramanathan, V., Carmichael, G. (2008) Global and regional climate changes due to black carbon, *Nature Geoscience*, 1(4), 221-227.
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2016) *Atmospheric chemistry and physics : from air pollution to climate change*. Hoboken, Nj: Wiley.
- Shen, L., Li, L., Lü, S., Zhang, X., Liu, J., An, J., Zhang, G., Wu, B., Wang, F. (2015) Characteristics of black carbon aerosol in Jiaxing, China during autumn 2013, *Particuology*, 20, 10-15. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2014.08.002>
- Shen, L., Wang, H., Kong, X., Zhang, C., Shi, S., Zhu, B. (2021) Characterization of black carbon aerosol in the Yangtze River Delta, China: Seasonal variation and source apportionment, *Atmospheric Pollution Research*, 12(1), 195-209.
- 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.
- Wang, J., Zhang, Q., Chen, M., Collier, S., Zhou, S., Ge, X., Xu, J., Shi, J., Xie, C., Hu, J., Ge, S., Sun, Y., Coe, H. (2017) First chemical characterization of refractory black carbon aerosols and associated coatings over the Tibetan Plateau (4730 m asl), *Environmental Science & Technology*, 51(24), 14072-14082.
- Wang, Q., Li, L., Zhou, J., Ye, J., Dai, W., Liu, H., Zhang, Y., Zhang, R., Tian, J., Chen, Y., Wu, Y., Ran, W., Cao, J. (2020) Measurement report: Source and mixing state of black carbon aerosol in the North China Plain: implications for radiative effect, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(23), 15427-15442.
- Wang, R., Tao, S., Shen, H., Huang, Y., Chen, H., Balkanski, Y., Boucher, O., Ciais, P., Shen, G., Li, W., Zhang, Y., Chen, Y., Lin, N., Su, S., Li, B., Liu, J., Liu, W. (2014) Trend in Global Black Carbon Emissions from 1960 to 2007, *Environmental Science & Technology*, 48(12), 6780-6787. <https://doi.org/10.1021/es5021422>
- Wei, C., Wang, M.H., Fu, Q.Y., Dai, C., Huang, R., Bao, Q. (2020) Temporal characteristics and potential sources of black carbon in megacity Shanghai, China, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(9), e2019JD031827.
- Weingartner, E., Saathoff, H., Schnaiter, M., Streit, N., Bitnar, B., Baltensperger, U. (2003) Absorption of light by soot particles: determination of the absorption coefficient by means of aethalometers, *Journal of Aerosol Science*, 34(10), 1445-1463.
- Xu, L., Zhang, J., Sun, X., Xu, S., Shan, M., Yuan, Q., Liu, L., Du, Z., Liu, D., XU, D., Song, C., Liu, B., Lu, G., Shi, Z., Li, W. (2020) Variation in concentration and sources of black carbon in a megacity of China during the COVID-19 pandemic, *Geophysical Research Letters*, 47(23), e2020GL090444.
- Yu, G.-H., Park, S.-S., Park, J.S., Park, S.M., Song, I.H., Oh, J., Shin, H.J., Lee, M.D., Lim, H.B., Kim, H.W., Choi, J.Y. (2018b) Pollution Characteristics of PM_{2.5} Observed during

Winter and Summer in Baengryeongdo and Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(1), 38-55. <https://doi.org/10.5572/kosae.2018.34.1.038>

Yu, G.-H., Yu, J.-M., Park, S.-S. (2018a) Estimation of Light Absorption by Brown Carbon Particles using Multi-wavelength Dual-spot Aethalometer, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(2), 207-222. <https://doi.org/10.5572/kosae.2018.34.2.207>

Zhuang, B.L., Wang, T.J., Liu, J., Li, S., Xie, M., Yang, X.Q., Fu, C.B., Sun, J.N., Yin, C.Q., Liao, J.B., Zhu, J.L., Zhang, Y. (2014) Continuous measurement of black carbon aerosol in urban Nanjing of Yangtze River Delta, China, *Atmospheric Environment* (1994), 89, 415-424. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.02.052>

Authors Information

전종벽 (한국외국어대학교 환경학과 석사과정)
(jbjjang96@hufs.ac.kr)

심지혜 (한국외국어대학교 환경학과 학부생)
(wlgo339@hufs.ac.kr)

서석준 (국립환경과학원 대기환경연구과 연구사)
(vince007@korea.kr)

박준현 (국립환경과학원 대기환경연구과 연구원)
(pjh4456@korea.kr)

변명화 (국립환경과학원 대기환경연구과 연구원)
(bmh3901@korea.kr)