

한국의 봄철 PM₁₀ 농도의 경년 변동성에 영향을 미치는 대기 패턴 및 프로세스 규명

한창옥* · 임아영** · 이은걸***†

*경희대학교 기후사회과학융합학과 석사과정, **경희대학교 기후사회과학융합학과 박사과정,
***경희대학교 지리학과(기후사회과학융합학과 겸임) 교수

Identification of atmospheric patterns and processes affecting springtime PM₁₀ interannual variability in South Korea

Han, Changok* · Im, Ahyeong** and Lee, Eungul***†

*Master's Student, Dept. of Climate-Social Science Convergence, Kyung Hee University, Seoul, Korea

**Ph.D. Student, Dept. of Climate-Social Science Convergence, Kyung Hee University, Seoul, Korea

***Professor, Dept. of Geography (Climate-Social Science Convergence), Kyung Hee University, Seoul, Korea

ABSTRACT

Springtime PM₁₀ concentrations in South Korea pose a critical threat to public health and socioeconomic stability, which can be intensified by Asian Dust and anthropogenic emissions. While previous studies have examined wintertime atmospheric patterns affecting PM₁₀ concentrations, the physical mechanisms linked to land - atmosphere interactions during spring remain largely unexplored. This study investigated the dominant synoptic patterns and the associated land and atmospheric processes, regulating inter-annual variability of spring PM₁₀ concentrations (2003 - 2024) using data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis v.5 (ERA5) and Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS). The results revealed that high spring PM₁₀ concentrations in Korea were significantly associated with anticyclonic anomalies over the Amur River basin in far eastern Russia. The anticyclonic pattern induced the weakening of prevailing westerlies by easterly wind anomalies over the Korean Peninsula, promoting atmospheric stagnation and suppressing pollutant dispersion. The anomalous anticyclonic pattern was statistically and physically linked to snow cover reduction in the Amur River basin. The decreased surface albedo with reducing snow cover enhanced solar radiation absorption and thus greater heat transfer to the atmosphere through sensible and latent heat fluxes. Consequently, the increased atmospheric heating could lead to thermal expansion of the lower - to - middle troposphere thereby raising geopotential height and inducing the anticyclonic anomaly. By incorporating the atmospheric processes linked to land surface conditions, this research advances the understanding of climate and air quality interactions and offers a robust scientific foundation for developing early warning systems and evidence-based adaptation policies for springtime air quality management.

Key words : PM₁₀, Synoptic Pattern, Land-Atmosphere Interaction, Snow Cover Change, Atmospheric Stagnation, South Korea

1. 서론

미세먼지(particulate matter, PM)는 대기오염물질을 구성하는 주요 성분으로, 대기 중에 부유하는 직경이 매우

작은 입자를 의미한다. 이러한 미세먼지는 황사, 대기오염 등 다양한 발생원에 의해 생성되며, 입자 크기에 따라 직경이 10 μm 이하인 미세먼지(PM₁₀)와 2.5 μm 이하인 초미세먼지(PM_{2.5})로 구분된다(National Air Emission

†Corresponding author : eungul.lee@khu.ac.kr (626, Space 21, 26, Kyungheedaero-ro, Dongdaemun-gu, Seoul, 02447, Korea. Tel. +82-2-961-9268)

ORCID 한창옥 0009-0009-6635-8041 이은걸 0000-0002-1887-1870
임아영 0000-0003-3717-7013

Inventory and Research Center, 2025). 미세먼지는 건강뿐만 아니라, 산업 및 경제 전반에 걸쳐 복합적인 피해를 초래한다. 한국은 2020년 기준 OECD 국가 중 가장 높은 미세먼지 농도를 기록하였으며(Statistics Korea, 2024), 2060년에는 인구 대비 대기오염 관련 사망자가 가장 많이 발생할 것으로 전망된 바 있다(OECD, 2016). 건강 측면에서 미세먼지는 퇴행성 질환 및 호흡기·심혈관계 질환을 악화시키고(Bang and Choi, 2024), 우울증과 자살 등 정신건강에도 부정적인 영향을 미치는 것으로 보고되었다(Lee, Jung, et al., 2019; Liu et al., 2021). 아울러 반도체와 같은 정밀 산업의 불량률 증가와 생산비용 상승을 유발할 뿐만 아니라, 교통 및 항공 운항에 제약을 가하고 야외 활동 감소로 인한 소비 패턴 변화를 유발하여 산업 전반에 막대한 경제적 손실을 초래하는 것으로 알려져 있다(KEI, 2023). OECD (2016)는 이러한 사회·경제적 피해를 종합하여, 2060년 한국에서 최대 약 30조 원 규모의 피해가 발생할 것으로 전망하였다.

이러한 위험성은 실제 고농도 사례에서 더욱 뚜렷하게 나타났다. 2019년 3월 한국 전역에서 고농도 미세먼지가 연속적으로 발생하였으며, 특히 3월 4~5일에는 서울을 포함한 여러 지역의 PM_{2.5} 및 PM₁₀ 농도가 각각 99.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 144.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 상승하였다. 같은 해 1월 11~15일에도 평균 PM_{2.5} 농도가 약 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 달하는 고농도 현상이 지속되었으며, 13~14일에는 PM_{2.5} 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM₁₀ 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 매우 높은 농도가 관측되었다(Allabakash et al., 2022). Oh et al. (2024)은 2019년 미세먼지 노출로 인한 초과 사망자가 약 1,039명에 달하는 것으로 추정하여, 단기 고농도 노출의 치명적인 건강 영향을 규명하였다.

이처럼 미세먼지는 단순한 대기 부유입자를 넘어, 실질적인 건강 피해와 사회경제적 손실, 나아가 사망 위험 증가를 초래하는 중대한 환경 위험 요인으로 인식되고 있다. 따라서 고농도 미세먼지 발생의 주된 원인을 정량적으로 규명하는 것은 향후 효과적인 대기질 개선 정책 수립과 피해 저감을 위해 필수적이다.

국외의 여러 선행 연구들은 고농도 미세먼지의 발생 원인이 지역별로 상이하게 나타남을 보여준다. 인도 델리의 경우, 도심 배출원 외에 추수기마다 농촌 지역의 농업 잔재물 소각에서 배출된 연기가 대도시 스모그를 악화시키는 주된 요인으로 보고되었다(Bikkina et al., 2019). 2014년 영국·서유럽 고농도 사례를 분석한 연구에서는, 유럽 대륙에서 형성된 오염 물질이 남풍을 타고 영국으로 유입되면서 고농도를 유발한 것으로 해석하였다(Vieno et al.,

2016). 한편, 미국 서부에서는 산업 및 교통 배출 저감 노력으로 미세먼지 평균 농도는 개선되었으나, 최근 대형 산불의 빈도가 증가함에 따라 산불 연기가 특정 시기의 극한 고농도 발생을 지배하는 경향이 확인되었다(McClure and Jaffe, 2018). 이러한 사례들은 미세먼지 고농도 현상이 각 지역의 배출원 구조와 기후 조건에 따라서 다른 원인을 가짐을 시사하며, 특정 지역의 고농도 사례를 이해하기 위해서는 해당 지역의 배출 특성과 대기 순환 환경을 종합적으로 고려할 필요가 있음을 보여준다.

국내 선행연구들은 한국의 고농도 미세먼지가 국내외 배출원뿐만 아니라 확산에 불리한 기상 조건(약한 풍속, 정체성 고기압 등)의 복합적 상호작용에 기인한다고 보고하였다(Han et al., 2021; Lee, Choi, et al., 2019; Park, 2016). 따라서 한국의 미세먼지 고농도 원인 규명을 위해서는 국내 미세먼지 배출량뿐만 아니라 국외 유입량 및 종관 규모 대기 순환 패턴을 통합적으로 고려해야 한다(Han et al., 2021; Park, 2016). 그러나 기존 연구들은 주로 배출량 산정에 집중되어 있어, 미세먼지 농도를 조절하는 순환 패턴과 대기 조건 등 기후학적 요인에 대한 정량적 분석은 상대적으로 부족한 실정이다(Kim et al., 2021; Ku et al., 2021; Lee et al., 2018; Wie and Moon, 2017).

Wie and Moon (2017)은 한국의 PM₁₀ 농도는 서풍 및 고기압 시스템의 영향을 받으며, 특히 고기압성 순환과 서풍에 의한 수송이 결합되어 국외 유입과 국지적 축적이 동시에 강화될 때 고농도가 발생한다고 설명하였다. Lee et al. (2018)은 겨울철 고농도 사례 분석을 통해, 한반도 주변에 고기압성 편차가 지속될 경우 하층 북서풍이 약화되고 대기 정체가 유발되어 PM₁₀ 축적을 가중시키는 메커니즘을 제시하였다. Kim et al. (2021)은 북대서양진동(North Atlantic Oscillation, NAO)과 같은 원격 상관 패턴이 시베리아 고기압을 약화시켜 북풍을 감소시키고, 결과적으로 대기 정체를 유발하여 겨울철 고농도 PM₁₀ 발생 환경을 조성한다고 언급하였다. Ku et al. (2021) 역시 정체성 고기압과 수직적으로 안정된 대기 상태가 동반되는 패턴에서 PM₁₀ 농도가 높게 나타남을 확인하였다.

미세먼지 농도를 정확히 예측하기 위해서는 대기 패턴의 형성 원인에 대한 정량적 분석이 필수적이다. 그러나 선행 연구들은 주로 대기 패턴과 미세먼지 농도 간의 통계적 연관성 규명에 초점을 맞추었다(Ku et al., 2021; Lee et al., 2018; Wie and Moon, 2017). 분석 시기 또한 1월(Kim et al., 2021)이나 겨울철(Ku et al., 2021; Lee et al.,

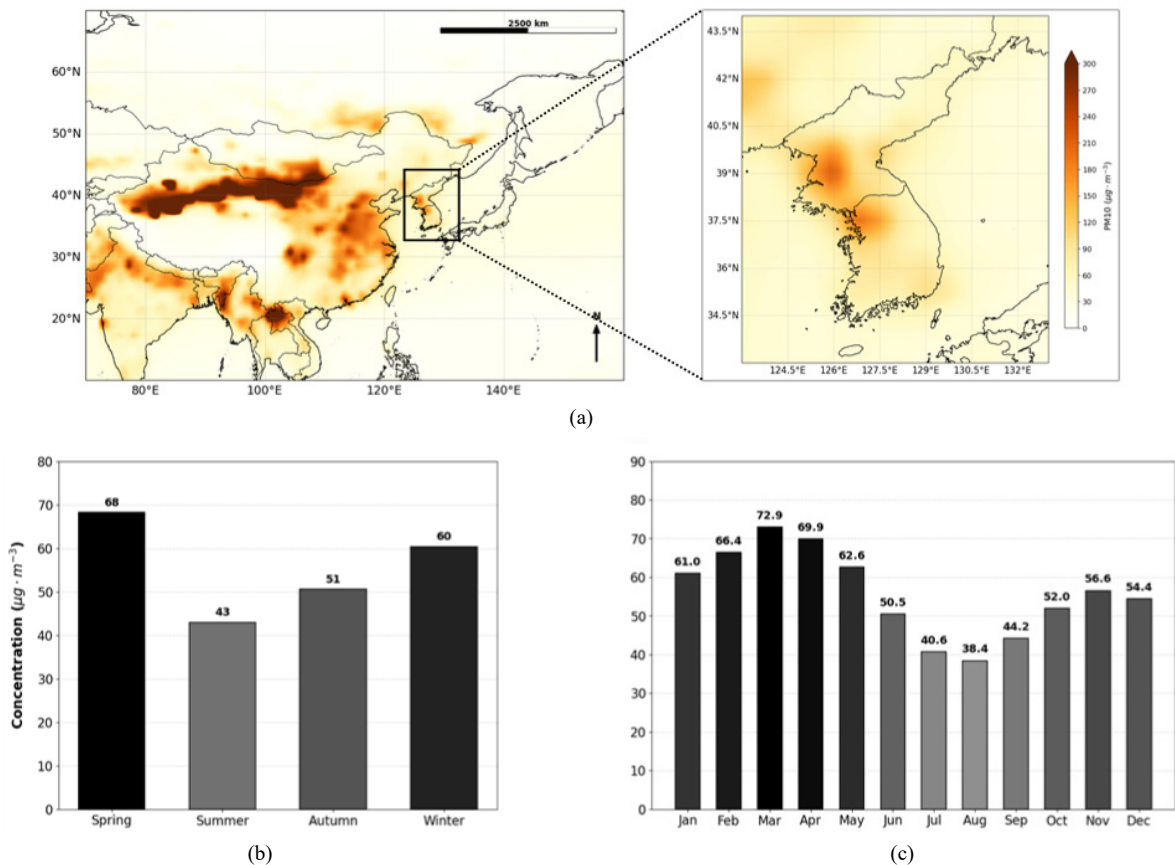


Fig. 1. (a) Spatial distribution of spring mean PM₁₀ concentrations over the study area (10–70°N, 70–160°E; left panel) and the Korean Peninsula (right panel), derived from CAMS reanalysis data for the period of 2003–2024. (b) Seasonal and (c) monthly means of PM₁₀ concentrations in South Korea, derived from the same dataset and period ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)

2018; Wie and Moon, 2017)에 국한되어, 한국에서 미세먼지 농도가 가장 높은 봄철(Fig. 1(b))을 대상으로 한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다. 특히 봄철은 중국과 몽골의 사막·황토지대에서 발원한 황사가 한국으로 유입되는 시기로, 다른 계절과는 구분되는 대기질 특성을 보인다(Kim et al., 2010). Kim et al. (2006)은 황사가 발생할 때, PM_{2.5}보다 PM₁₀ 농도의 증가폭이 현저히 큼을 보고하였으며, 이는 황사 입자가 주로 PM₁₀ 영역에 분포함을 시사한다. 이에 본 연구는 한국 봄철 PM₁₀을 대상으로, 농도 변동성과 연관된 대기 패턴을 분석하고, 해당 패턴의 형성 프로세스를 제시하고자 한다.

2. 연구자료 및 방법

2.1. 연구지역

본 연구는 동아시아 지역(10 ~ 70°N, 70 ~ 160°E)을 대상으로, 한국의 봄철 PM₁₀ 농도 변동에 기여하는 대기 패턴을 분석하였다(Jung et al., 2019; Lee et al., 2011, 2018). 이 지역은 지리적으로 유라시아 대륙의 동쪽 가장 자리와 서태평양의 경계에 위치하며(Fig. 1(a)), 대륙성 기후와 해양성 기후가 교차하는 몬순 기후의 지배적인 영향을 받는다. 연구 영역 내에는 티베트 고원, 몽골 고원 등 복잡한 지형적 요소가 포함되어 있어 대기 순환의 변동성이 크게 나타난다(Yang et al., 2020). 기후학적 관점에서 봄철은 겨울철 동아시아 대기 순환을 지배하던 시베리아 고기압의 세력이 점차 약화되고, 이동성 고기압과 온대저

기압이 한반도를 빈번하게 통과하는 시기이다. 이러한 기압계의 변동은 동아시아 지역의 바람에 영향을 주며, 대기오염물질의 수송에 영향을 줄 수 있다. 한국은 지리적으로 동아시아의 풍하측에 위치하여, 중국 북부 및 몽골의 건조 지역(고비 사막, 내몽골 고원 등)에서 발원한 황사가 편서풍을 타고 유입되는 주요 경로상에 놓여 있다 (Laurent et al., 2005, Fig. A1(a)). 그러나 봄철의 대기 순환은 단순한 서풍 수송에 국한되지 않으며, 종관 규모의 기압 배치에 따라 복합적인 양상을 띤다. 특히 북태평양 부근에 형성되는 기압계의 변동은 한반도 주변의 동서 바람장 변화를 유도하는 주요 인자로 작용한다. 해당 지역의 고기압성 혹은 저기압성 순환 발달은 한반도 상공의 서풍을 약화하거나 강화시켜, 오염물질의 환기성을 결정하고 대기 정체 및 고농도 PM₁₀ 사례 발생에 기여할 수 있다(Yun and Yoo, 2019). 따라서 본 연구에서는 이러한 지리적 및 기후적 특성을 고려하여 동아시아의 종관규모 대기 패턴과 한반도 PM₁₀ 농도 간의 역학적 상호작용을 분석하고, 해당 패턴의 형성 프로세스를 규명하고자 한다.

2.2. 연구자료

한국의 봄철 PM₁₀ 농도를 분석하기 위해 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)의 Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) 재분석 자료를 활용하였다. CAMS의 PM₁₀ 자료는 위성 및 지상 관측 자료를 대기 모델과 결합한 자료 동화 기법을 통해 산출되며, 지표면 PM₁₀ 농도에 대해 0.75°×0.75°의 공간 해상도와 3시간 간격의 시간 해상도로 제공한다 (Inness et al., 2019). Ryu and Min (2021)은 CAMS, TCR-2, MERRA-2 등 다양한 재분석 자료를 비교한 결과, CAMS가 한국의 PM₁₀ 장기 변동성과 시공간적 분포를 가장 우수하게 재현한다고 보고한 바 있다. 이에 따라 본 연구는 한국의 PM₁₀ 농도 분석을 위한 자료로 CAMS를 채택하였다. 분석 영역은 한국(33.09~38.45°N, 124.54~131.06°E)으로 설정하였으며, 해당 영역에 대한 면적가중 평균을 통해 PM₁₀ 농도를 산출하였다. 분석 기간은 CAMS 재분석 자료의 가용 기간인 2003년부터 2024년까지로 설정하였으며, 월별 PM₁₀ 농도 자료를 이용하여 봄철 평균 농도를 산출하였다.

한국 봄철 PM₁₀ 농도 변동성을 주도하는 대기 패턴 및 프로세스를 분석하기 위해, ECMWF에서 제공하는 5세대 기후 재분석 자료인 ERA5의 월평균 자료를 활용하였다.

ERA5는 관측 자료와 대기 모델을 통합하여 생산된 고해상도(0.25°×0.25°)의 전지구 재분석 자료이다(Hersbach et al., 2020). 특히, ERA5는 동아시아 몬순 지역의 시공간적 변동성을 다룬 재분석 자료 대비(NCEP-DOE, JRA55)가 장 정확하게 재현하는 것으로 보고된 바 있다(Kim and Lee, 2022).

본 연구에서는 선행 연구들에 기반하여 봄철 대기질 변동의 핵심 인자인 수평적 대기 순환에 초점을 맞추었다. Kim et al. (2022)은 한국의 3월 고농도 사례 분석에서 풍속이 대기경계층 높이보다 농도와의 상관성이 약 2배 더 높음을 확인하였다. Wang, Han, et al. (2023)은 기후 변수 민감도 분석을 통해, 풍속의 변화가 유발하는 오염물질의 수평적 확산 효과가 대기경계층 높이 변화에 따른 연직 혼합 효과보다 오염 농도 저감에 더 결정적인 역할을 수행함을 정량적으로 입증한 바 있다. 이에 따라 PM₁₀ 농도 변동과 상관성이 높은 수평적 대기 순환을 중심으로 대기 패턴을 파악하기 위해 동서바람(*u*-wind), 남북바람(*v*-wind), 지위고도를 분석 변수로 선정하였다. 이때 대류권 하층(850 hPa, 700 hPa), 중층(500 hPa), 상층(300 hPa) 기압면을 분석하여 고도별 순환의 특징을 구분하였다. 다만, 티베트 고원의 경우 해발고도가 높아 해당 지역의 850 hPa 및 700 hPa 등압면 자료는 실제 대기가 아닌, 지표면 기압과 온도를 기반으로 연직 외삽된 값이다(ECMWF, 2023, 2024). 본 연구에서는 대규모 기압 배치의 공간적 연속성을 파악하기 위해 지형 마스킹 없이 분석에 포함하였으나, 해당 영역의 결과 해석 시 이 점을 고려하였다.

다음으로, 지표-대기 프로세스에 기반한 PM₁₀ 농도 변동 원인을 규명하기 위해 2 m 기온, 지표 잠열 및 현열 플럭스, 지표 순 단파 복사 및 순 장파 복사, 눈 피복도 자료를 사용하였다. 여기서 잠열과 현열 플럭스는 지표에서 대기로 향하는 방향이 양의 값을 갖도록 -1을 곱하여 분석에 적용하였다.

2.3. 연구방법

2.3.1. CAMS PM₁₀ 데이터 검증 및 선형 추세 제거

한국환경공단은 에어코리아(AirKorea, 2025)를 통해 전국 관측망에서 수집된 PM₁₀ 실측 자료를 제공하고 있다. 이 자료는 실제 대기질 상태를 반영한다는 이점이 있으나, 측망망이 서울 및 주요 대도시 지역 중심으로 편중되어 있어 공간적 분포의 불균형이 존재한다. 이로 인해 관측 자료만으로는 한국 전역의 균질한 시공간적 농도 패턴

을 규명하는 데 제약을 가진다. 따라서 본 연구에서는 관측 자료의 공간적 불균형을 보완하고, 격자 단위의 연속적인 데이터를 확보하기 위해 CAMS PM₁₀ 재분석 자료를 활용하였다. 먼저 CAMS 자료의 신뢰성을 검증하기 위해, 2003년부터 2024년까지의 에어코리아 관측 자료와 CAMS 재분석 자료 간 피어슨 상관분석을 수행하였다.

다음으로, 기후학적 요인에 의한 농도 변동성을 파악하기 위해 장기적인 변동 추세를 제거하고자 하였다. 이를 위해 연도별 시계열 자료 $y_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 에 대해 다음과 같은 선형 추세 제거식을 적용하였다(식 1):

$$y_i = \beta t_i + \alpha + \epsilon_i \quad (1)$$

여기서 t_i 는 연도(2003~2024년), β 는 추세선의 기울기, y 절편, ϵ_i 는 잔차항을 의미한다. 기울기 β 는 시계열 자료와 시간 인덱스 간 공분산을 시간 인덱스의 분산으로 나눈 값으로, 그 수식은 다음과 같다(식 2):

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} \quad (2)$$

\bar{t} 는 시간 인덱스의 평균, \bar{y} 는 시계열 자료의 평균을 의미한다. 산출된 기울기 β 를 이용하여 기존 시계열에서 선형 추세를 제거하되, 시계열의 평균적인 수준을 보존하기 위한 평균 중심화 방식을 적용한다(식 3):

$$y_i^{detrended} = y_i - \beta(t_i - \bar{t}) \quad (3)$$

또한, PM₁₀ 자료와 일관성을 유지하기 위해, 모든 기후 변수에 동일한 추세 제거 기법을 적용하였다. 이를 통해 미세먼지 배출 감축 등으로 인한 장기적인 추세를 제거한 후, 기후 요인과 PM₁₀ 변동성 간의 연관성을 분석하였다.

2.3.2. 한국의 봄철 PM₁₀ 농도 변동성에 영향을 미치는 종관 대기 패턴 분석

고농도 PM₁₀ 발생 시 나타나는 종관 대기 패턴을 파악하기 위해, PM₁₀ 농도와 대기 변수 간의 합성편차분석을 수행하였다. 분석 대상으로는 전체 연구 기간(2003~2024년, 총 22년) 중 봄철 PM₁₀ 농도가 상·하위 25%에 해

당하는 각각 5개 연도를 선정하였다. 이들 연도 간의 850 hPa, 700 hPa, 500 hPa, 300 hPa 지위고도 평균 차이를 산출하였으며, 분석 결과의 통계적 유의성은 t -검정을 통해 90% 신뢰수준에서 검증하였다. 또한, 특정 대기 패턴이 한국의 봄철 PM₁₀ 농도 상승을 유도하는 역학적 메커니즘을 분석하기 위해, PM₁₀ 농도와 동서바람(u -wind) 간 상관분석 및 합성편차분석을 추가적으로 수행하였다.

2.3.3. PM₁₀ 변동의 종관 패턴 형성 요인

지표면 상태는 대기에 비해 상대적으로 변화 속도가 느려, 대기 순환에 지속적인 열적 강제력을 제공하는 조건으로 작용한다(Seneviratne et al., 2010; Shukla, 1998). 이러한 지표면 상태의 지속성은 계절 규모의 종관 대기 패턴이 형성되고 유지되는 기작을 설명하는 데 유용하다. 본 연구에서는 한국의 봄철 PM₁₀ 농도 변동성을 유발하는 종관 대기 패턴의 형성 원인을 지표-대기 상호작용 프로세스 관점에서 규명하고자 하였다. 이를 위해, 합성편차분석 결과 대류권 하층과 중층의 지위고도가 공통적으로 유의한 차이를 보인 지역을 대기 패턴 형성 지역으로 설정하고, 해당 영역의 지위고도와 지표 변수들 간의 상관분석을 수행하였다. 나아가 지표-대기 간 연직 프로세스를 규명하기 위해, 지위고도와 유의한 상관성을 보이는 변수와 1000~200 hPa 기온, 지위고도, 소용돌이도 간 연직 상관분석을 실시하였다. 모든 분석의 통계적 유의성은 t -검정을 통해 90% 신뢰수준에서 검정하였다.

3. 연구결과

3.1. CAMS PM₁₀ 데이터 검증

본 연구에서는 CAMS PM₁₀ 재분석 자료의 적합성을 평가하기 위해, 2003년부터 2024년까지의 에어코리아의 관측 PM₁₀ 자료와 비교 검증을 수행하였다. 검증 지표로는 연평균 PM₁₀ 농도를 사용하였으며, 두 자료 간 변동 경향성의 선형적 관계를 파악하기 위해 각 연도의 연평균 농도 편차에 대한 피어슨 상관분석을 실시하였다(Fig. 2). 분석 결과 CAMS 자료의 기간 평균 농도($69.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$)는 관측값($46.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 대비 약 49% 높게 나타나, 연평균 관측값에 있어서는 차이를 보였다. 하지만, 두 자료의 경년 변동성 간의 상관관계수(r)는 0.95 ($p < 0.01$)로 매우 높게 산출되었다. 선형 추세를 제거한 자료에 대한 상관관계수는 0.7 ($p < 0.01$)로, 추세 제거 전보다 수치는 다소 감소하였

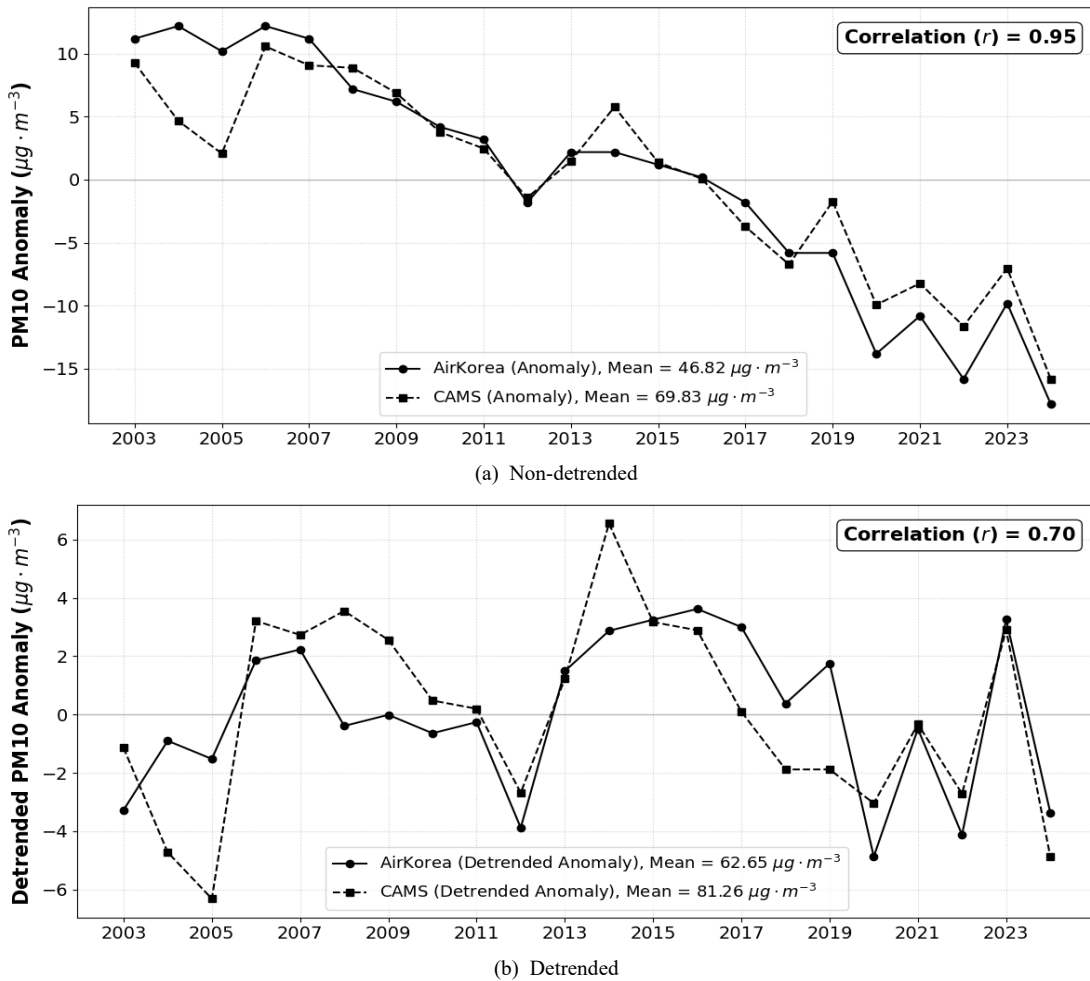


Fig. 2. Time series of (a) non-detrended and (b) detrended annual mean PM₁₀ concentration anomalies in South Korea from 2003 to 2024. Anomalies are calculated by subtracting the climatological mean of the 22-year period from each year's concentration. The solid line indicates AirKorea observational data, and the dashed line indicates CAMS reanalysis data. The correlation coefficient between the two datasets is presented in the upper right corner

으나 여전히 통계적으로 유의한 양의 상관관계를 유지함을 보여준다. 이는 CAMS 재분석 자료는 절대적인 농도 수치에는 차이가 있으나, 한국 PM₁₀ 농도의 장기추세 뿐만 아니라 경년 변동 패턴 또한 신뢰할 수 있는 수준으로 재현하고 있음을 시사한다.

3.2. 한국의 봄철 PM₁₀ 농도 변동성에 영향을 미치는 종관 대기 패턴 분석

한국의 봄철 PM₁₀ 농도 변동성을 주도하는 종관 대기 패턴을 규명하기 위해, 4개 기압면(850, 700, 500, 300

hPa)의 지위고도장에 대해 합성편차분석을 수행하였다. 분석 대상 연도는 전체 연구 기간(2003~2024년) 중 CAMS의 봄철 PM₁₀ 농도 시계열에서, 기후학적 요인에 의한 경년 변동성 분석을 위해 선형 추세를 제거한 후, 상위 25%에 해당하는 해와 하위 25%에 해당하는 해를 각각 5개년씩 선정하였다(Fig. 3). 선정된 고농도 해는 2003, 2008, 2014, 2016, 2023년이며, 저농도 해는 2004, 2005, 2018, 2020, 2022년으로, 대기 질 개선 정책에 따른 장기적인 농도 감소 추세에도 불구하고 고농도 해에 최근 연도가 포함되는 등 연구 기간 전반에 걸쳐 고르게 분포하였다. 이는 본 연구의 사례 선정이 특정 시기의 배출량 특

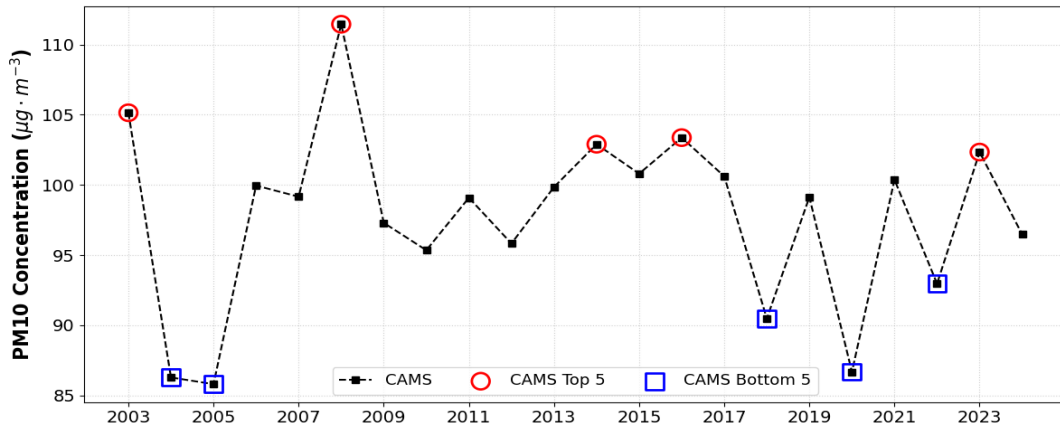


Fig. 3. Time series of detrended springtime mean PM₁₀ concentration in South Korea from 2003 to 2024. The years corresponding to the highest (Top 5) and lowest (Bottom 5) concentrations are highlighted by red circles and blue squares, respectively. The high-concentration years are identified as 2003, 2008, 2014, 2016, and 2023, while the low-concentration years include 2004, 2005, 2018, 2020, and 2022

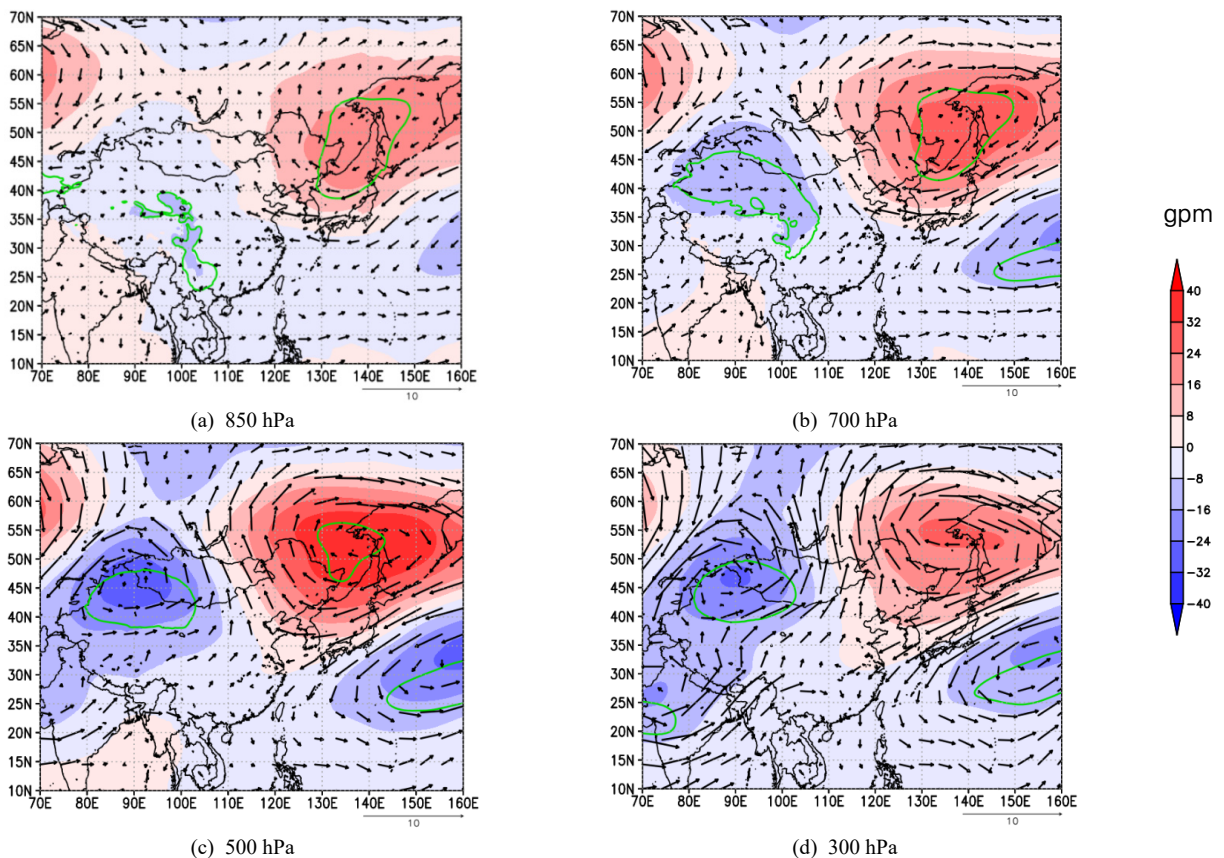


Fig. 4. Composite differences of geopotential height (gpm) and wind field (m/s) at (a) 850 hPa, (b) 700 hPa, (c) 500 hPa, and (d) 300 hPa between years with the highest and lowest 25% of springtime PM₁₀ concentrations in South Korea. Regions statistically significant at the 90% confidence level are indicated by green contours

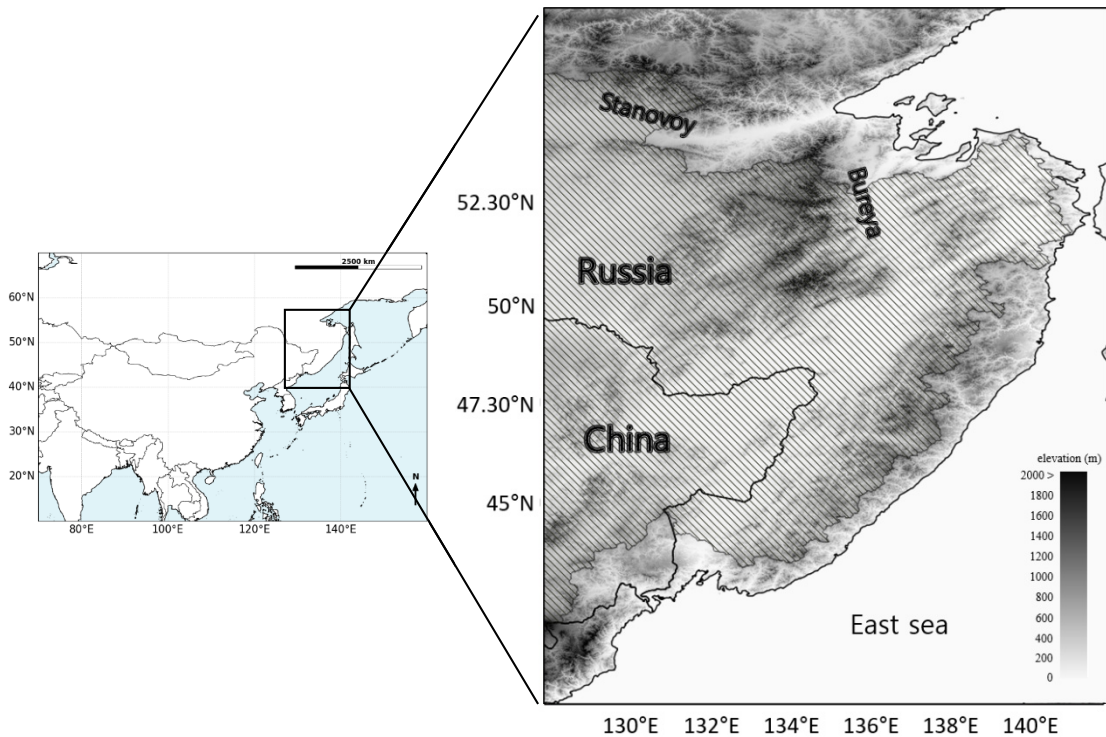


Fig. 5. Topography and geographical location of the Amur River basin. The hatched area indicates the boundary of the basin

성에 편중되지 않고, 기후적 변동성에 기인한 고농도 사례를 적절히 반영하고 있음을 시사한다. 이들 연도 간의 지위고도 합성편차 분석 결과(Fig. 4), 고농도 PM₁₀ 발생 시 대류권 하층부터 상층까지 연직적으로 유사한 기압 배치 특성이 확인되었다.

주요 황사 발원지인 중국 북서부 및 몽골 남서부(타클라마칸 및 고비 사막지역)와 북서태평양 영역에서는 음의 지위고도 편차가 나타났다. 일반적으로 황사 발원지의 저기압성 편차는 서풍을 강화시켜 한국으로 향하는 황사 수송량을 증가시키며, 북서태평양의 저기압성 순환은 한국으로 동풍을 유입시켜 서풍 풍속을 감소시킴으로써 PM₁₀ 농도 상승에 기여할 수 있다. 그러나 이러한 패턴들은 대기 하층(850 hPa)에서 편차가 미약하며, 특히 티베트 고원과 같은 고지대 영역은 외삽된 값으로서 물리적 해석의 신뢰도가 낮아 지표 PM₁₀ 농도 변동을 직접적으로 설명하는 데에는 한계가 있다.

반면, 대기 전 층에 걸쳐 가장 뚜렷하게 나타난 핵심 패턴은 러시아 아무르강(Amur River) 유역의 양의 지위고도 편차이다. 부레야 산맥(Bureya range)과 스타노보이 산맥(Stanovoy range)을 포함하는 이 지역(Fig. 5)(Lasserre, 2003)에서의

고기압성 편차 발달은 한국의 고농도 PM₁₀ 발생과 밀접한 관련이 있다. 구체적으로, 아무르강 유역에 고기압성 편차가 강화되면 그 주변으로 시계 방향의 대기 순환이 발달한다. 이 순환의 남단에 위치한 한반도 상공에는 강한 동풍 편차가 유도되며, 이는 중위도 탁월풍인 편서풍(Fig. A1(a))을 상쇄하여 풍속 감소를 초래한다. 결과적으로 대기 정체가 심화되어 오염물질의 확산이 억제됨에 따라, 한국의 봄철 PM₁₀ 농도가 크게 증가할 수 있다.

서풍 감소로 인한 PM₁₀ 농도 증가 메커니즘을 검증하기 위해, 한국 봄철 PM₁₀ 농도와 대류권 하층 및 중층의 동서바람(*u*-wind) 간 상관분석 및 합성편차분석을 수행하였다(Fig. 6). 상관분석 결과(Fig. 6(a), Fig. 6(b)), 대기 하층(850 hPa) 및 중층(500 hPa) 모두에서 한국 전역에 걸쳐 통계적으로 유의한 음의 상관관계가 나타났다. 양의 *u*-wind 값이 서풍임을 고려할 때, 이는 서풍의 약화가 봄철 PM₁₀ 농도 증가와 연관됨을 시사한다. 합성편차분석 결과(Fig. 6(c), Fig. 6(d)) 역시, 고농도 PM₁₀이 나타났던 해에 두 고도대 모두 한국에서 유의한 음의 *u*-wind 편차(동풍 편차)가 나타났다.

이러한 결과는 봄철 서풍의 약화가 전반적인 풍속 감소

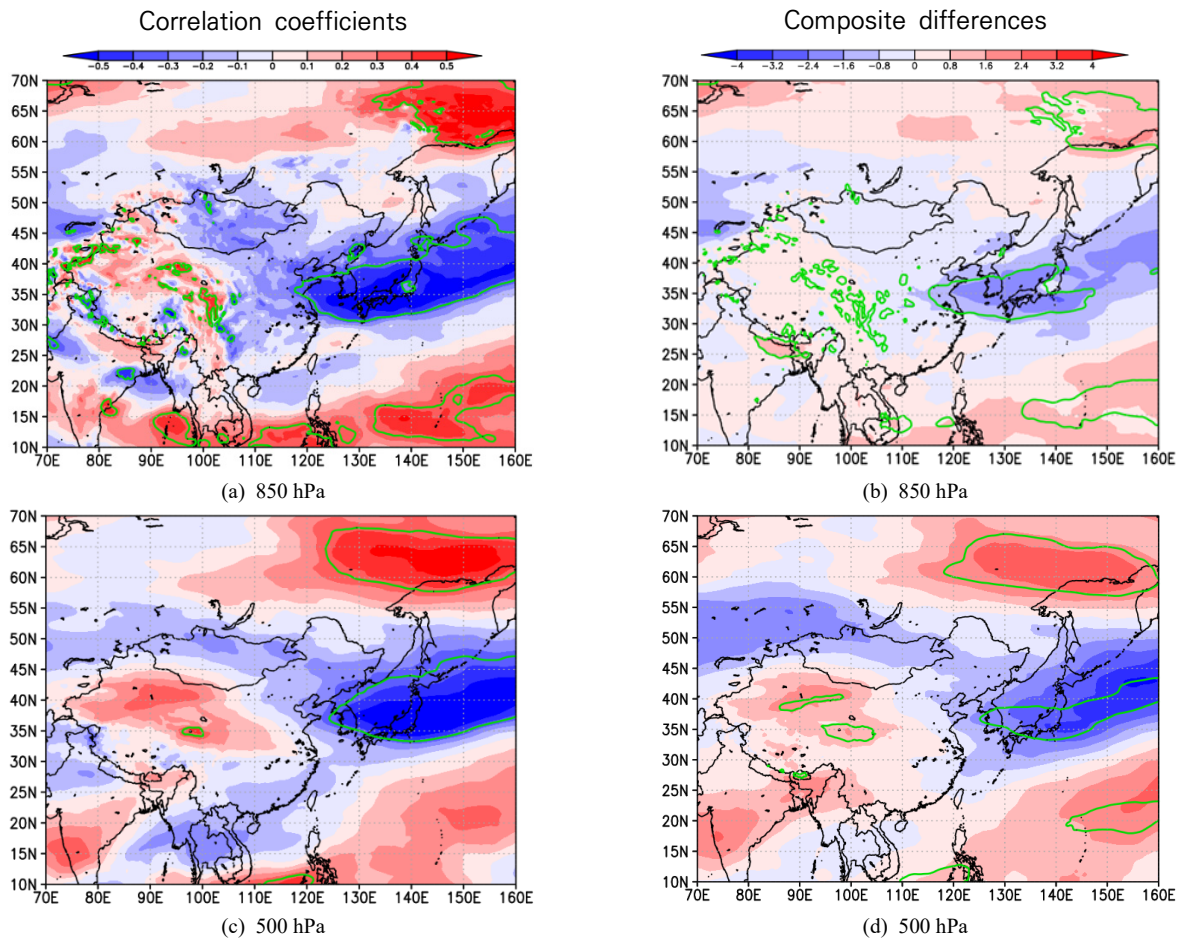


Fig. 6. Spatial distribution of correlation coefficients between the spring mean PM₁₀ concentration time series in South Korea and zonal wind (*u*-wind) at (a) 850 hPa and (b) 500 hPa. (c) and (d) are the same as (a) and (b) but represent composite differences. Regions statistically significant at the 90% confidence level are indicated by green contours

로 이어져, 대기 정체 조건을 형성함을 뒷받침한다. 대기 정체 조건이 형성되면 국내 배출 오염물질과 국외 유입 황사 및 미세먼지의 수평적 확산이 억제되며, 대기 중 체류 시간이 길어짐에 따라 고농도 PM₁₀ 사례가 빈번해지는 결과를 초래한다.

이에 본 연구에서는 한국의 봄철 PM₁₀ 농도 변동에 영향을 주는 주요 대기 패턴으로서 아무르강 유역의 고기압성 편차에 주목하였다. 나아가, 해당 기압 패턴이 실제 PM₁₀ 농도의 공간적 분포와 경년 변동성에 미치는 영향을 정량적으로 확인하기 위해, 아무르강 유역 지위고도가 높았던 해와 낮았던 해를 기준으로 한반도 전역의 PM₁₀ 농도 합성편차를 추가로 분석하였다. 그 결과, 고기압성 편차가 강한 해에는 한반도 전역, 특히 서해안과 수도권을

중심으로 유의미한 양의 농도 편차가 나타남을 확인하였다(자세한 내용은 부록 A2 참조). 이는 해당 대기 패턴이 국지적인 농도 상승을 넘어, 한반도 전체의 대기질 변동성을 구조적으로 결정짓는 지배적인 요인임을 시사한다.

3.3. PM₁₀ 변동의 종관 대기 패턴 형성 요인

아무르강 유역의 종관 대기 패턴의 형성 원인을 규명하기 위해, 지표-대기 프로세스에 기반한 연관성 분석을 수행하였다. 먼저, 대기 하층과 중층 지위고도의 합성편차분석 결과에서 공통적으로 유의한 양의 편차가 나타난 지역(Fig. 4(a), Fig. 4(b), Fig. 4(c)의 초록색 실선 지역)을 추출하였다. 해당 영역에서 가장 강한 편차가 나타난 500

Table 1. Correlation coefficients (r) between the 500 hPa geopotential height time series over the Amur River basin and time series of PM₁₀ in Korea, and surface variables over Amur River basin (snow cover, shortwave radiation, latent heat flux, sensible heat flux, and 2 m air temperature) during spring. The asterisks ** and * denote statistical significance at the 95% and 90% confidence levels, respectively

| | PM ₁₀ in Korea | Snow cover | Short wave | Latent heat | Sensible heat | 2 m temperature |
|---------------------|---------------------------|------------|------------|-------------|---------------|-----------------|
| Geopotential height | 0.59** | -0.77** | 0.61** | 0.42* | 0.43* | 0.82** |

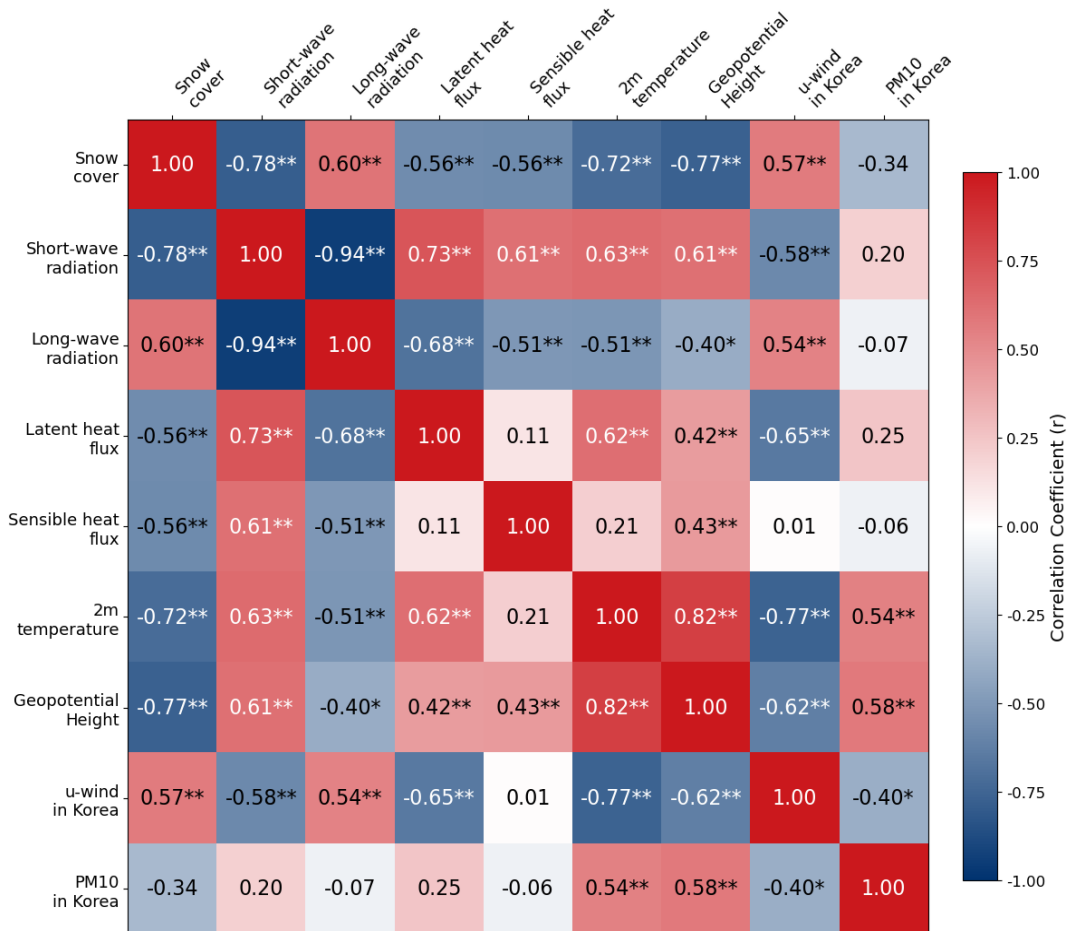


Fig. 7. Pearson correlation matrix among the following variables (from left to right, top to bottom): snow cover in the Amur River basin, shortwave radiation flux, longwave radiation flux, latent heat flux, sensible heat flux, 2 m air temperature, 500 hPa geopotential height, and u -wind and PM₁₀ concentration over South Korea. The values in each cell represent correlation coefficients (r). The asterisks ** and * denote statistical significance at the 95% and 90% confidence levels, respectively

hPa의 지위고도와 주요 지표 변수(단파복사, 잠열, 현열, 2 m 기온, 눈 피복도) 간 면적 평균 시계열의 상관분석을 진행하였고, 추가로, 아무르강 유역의 기압이 한국의 대기 질에 미치는 영향을 파악하기 위해 한국 봄철 PM₁₀ 농도

와의 상관성을 함께 분석하였다(Table 1). 그 결과 지위고도는 한국의 PM₁₀ 농도와 통계적으로 유의한 양의 상관성을 보였다. 이는 아무르강 유역의 고기압 발달이 한국 봄철의 고농도 PM₁₀ 발생에 기여할 수 있음을 시사한다. 지

표 요소와의 상관성 분석에서는 지표 단파복사, 잠열 및 현열 플럭스, 2 m 기온과 뚜렷한 양의 상관관계를 보였다. 반면, 눈 피복도와는 유의한 음의 상관관계를 나타냈다. 특히, 봄철임에도 눈 피복도가 지위고도와 높은 상관성을 보이는 것은 아무르강 유역에 위치한 스타노보이 산맥 및 부레야 산맥의 지형적 특성에 기인한다(Fig. 5). 두 산맥은 해발 고도 1000 ~ 2000 m에 이르는 고지대를 형성하고 있어(Bednorz and Wibig, 2017), 봄철까지도 설원이 유지되는 특성을 가진다. 이러한 지형적 특징으로 인해 해당 지역의 눈 피복도는 지표 알베도 변화를 통해 지표 에너지 수지 및 대기 패턴 형성에 직접적인 영향을 미치는 주요 지표 인자로 작용할 수 있다.

아무르강 유역의 눈 피복도 변화가 대기 순환 변동을 통해 한국의 PM₁₀ 농도에 영향을 미치는 프로세스를 규명하기 위해, 여러 변수들 간 상관행렬 분석을 실시하였다(Fig. 7). 분석 결과, 눈-알베도 피드백에 기인한 지표 가열이 대기 순환의 변화를 유도하는 과정을 확인할 수 있었다. 구체적으로, 아무르강 유역의 눈 피복도는 지표 순 단파복사와 통계적으로 유의한 음의 상관관계를, 순 장파복사와는 유의한 양의 상관관계를 보였다. 이는 눈 피복도가 감소함에 따라 지표 알베도가 낮아지면서 지표로 유입되는 태양 복사 에너지가 증가함을 의미한다. 흡수된 에너지의 증가는 지표를 가열시킴으로써 지표에서 대기로 방출되는 장파복사 또한 증가하게 된다. 이러한 지표 에너지 수지의 변화는 지표-대기 간 열 플럭스 변동으로 이어진다. 눈 피복도는 잠열 및 현열 플럭스와 통계적으로 유의한 음의 상관관계를 보였는데, 이는 눈 피복 감소로 인한 지표 흡수 에너지의 증가가 증발산 및 난류 혼합을 촉진하여 대기로의 열 수송을 강화하기 때문이다. 결과적으로 2 m 기온이 상승하며, 이러한 가열 효과는 대기 두께를 팽창시켜 지위고도 상승을 유도한다. 이는 아무르강 유역의 고기압성 순환을 강화하는 역학적 요인으로 작용하며, 한반도 주변의 대기 흐름을 변화시켜 한국의 대기 순환에 영향을 미친다. 아무르강 유역의 눈 피복도는 한국의 *u*-wind와 유의한 양의 상관관계를, PM₁₀ 농도와는 음의 상관관계를 보였다. 이는 눈 피복 감소에 따라 강화된 아무르강 유역의 고기압성 순환이 한반도 상공에 동풍 편차를 유도함에 기인한다. 결과적으로 서풍이 약화되어 대기 정체가 발생하고, 환기 효과의 감소가 PM₁₀ 농도 상승으로 이어지는 것으로 분석된다.

추가적으로, 아무르강 유역의 눈 피복도와 대기 패턴 변화 간의 물리적 선후 관계를 규명하고자 시차 상관분석

을 수행하였다. 분석에는 선행 변수로서 전년도 12월부터 당해 2월까지의 겨울철 평균 눈 피복도를, 후행 변수로서 3월부터 5월까지의 봄철 500 hPa 지위고도를 사용하였다. 분석 결과, 겨울철 눈 피복도와 이듬해 봄철 지위고도 간에는 통계적으로 유의한 음의 상관관계($r = -0.495$, $p < 0.05$)가 확인되어, 겨울철 눈 부족이 봄철 고기압 편차 발달에 선행함을 보였다. 반면, 겨울철 지위고도와 봄철 눈 피복도 간의 상관성은 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다($r = 0.144$).

앞선 분석을 통해 눈 피복도 감소에 따른 지표 열적 강제력이 지위고도 변동을 유발함이 확인되었다. 이에, 지표면의 열적 효과가 대기 상층으로 전파되어 형성하는 연직 구조를 파악하고자, 1000 hPa에서 200 hPa에 이르는 대류권 전층을 대상으로 연직 상관분석을 수행하였다. Fig. 8은 러시아의 아무르강 유역을 포함하는 북위 46 ~ 56°N 범위에서 남북으로 평균한 기온, 지위고도, 소용돌이도와 아무르강 유역의 눈 피복도 간 연직 상관분석 결과를 보여준다. 아무르강 유역(129 ~ 143°E) 범위에서 기온은 대기 하층부터 300 hPa 고도까지 눈 피복도와 통계적으로 유의한 음의 상관관계를 보였다. 지위고도 역시 동일한 경도 범위에서 강한 음의 상관관계를 보였으며, 소용돌이도의 경우 아무르강 유역을 포함하는 120 ~ 150°E 영역에서 뚜렷한 양의 상관관계를 보였다.

이는 아무르강 유역에서 지표의 눈 피복도 감소가 중층 대기의 고기압성 편차를 강화하는 수직적 메커니즘으로 작용함을 보여준다. 눈 피복도가 감소하면 알베도가 낮아져 지표에 유입되는 단파복사가 증가하고, 가열된 지표로부터 상향 장파복사도 함께 증가한다. 이에 따라 하층 대기의 가열이 대류권 상층까지 전파되어 전반적인 기온 상승을 유발한다. 이와 같은 대류권의 기온 상승은 대기 두께를 팽창시켜 지위고도 상승을 유발하며, 이는 눈 피복도와 지위고도 간에 확인된 아무르강 유역의 뚜렷한 음의 상관관계와 일치한다. 또한, 소용돌이도는 음의 값일 때 고기압성 회전을 의미하므로, 눈 피복도와 소용돌이도 간의 양의 상관성은 눈 피복 감소가 소용돌이도의 감소(고기압성 회전의 강화)를 초래함을 의미한다. 즉, 아무르강 유역의 눈 피복 감소는 알베도 감소와 지표 가열을 유도하고, 이로 인한 대기 두께의 팽창이 대기 중층 및 상층 지위고도 상승 및 고기압성 순환을 강화시킨다. 이러한 열역학적 기작은 한국의 봄철 고농도 PM₁₀ 발생을 유발하는 중관 대기 패턴의 원인으로서 눈 피복도가 주요 지표 요인으로 작용함을 보여준다.

한편, 아무르강 유역의 고기압성 편차가 국지적인 지표면 피드백(눈 피복 감소)뿐만 아니라 대규모 대기 원격 상관에 의해 강화될 가능성 또한 배제할 수 없다. 선행 연구들은 원격지에서의 대기 강제력이 파동 전파를 통해 동아시아

시아 상공의 순환장에 영향을 미칠 수 있음을 지속적으로 보고해왔다. 예를 들어, Kim et al. (2024)은 선형 경압 모델(LBM) 실험을 통해 풍상 측인 바렌츠-카라 해에서의 대기 강제력이 동아시아 지역에 고기압성 편차를 유도하

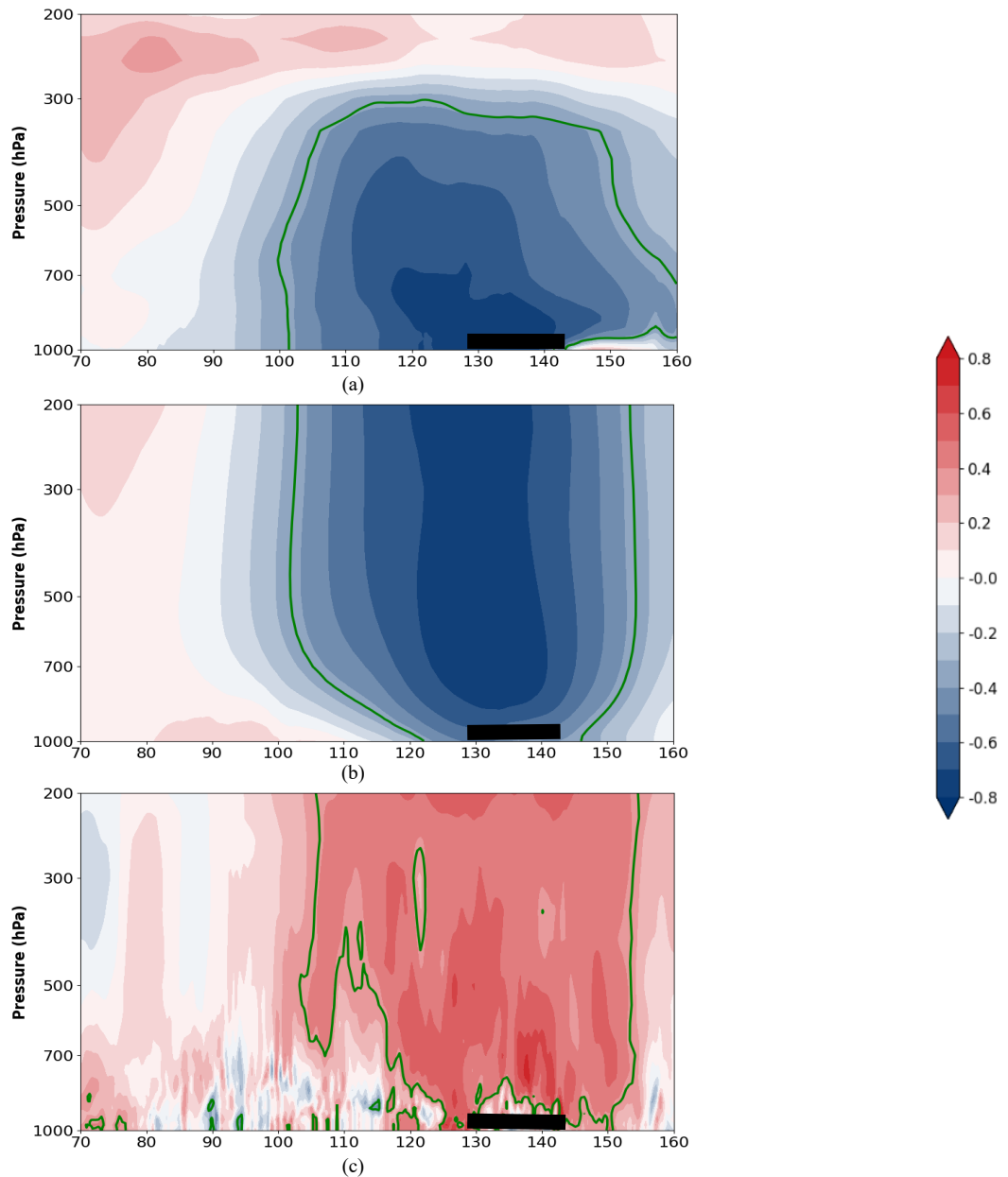


Fig. 8. Vertical cross sections of correlation coefficients between the area-averaged spring snow cover in the Amur River basin and (a) air temperature, (b) geopotential height, and (c) vorticity, averaged over the latitude band of 46–56°N. Black bars indicate the longitude range of the Amur River basin (129–143°E). Regions statistically significant at the 90% confidence level are indicated by green contours

는 주요 원인을 규명하였다. 또한, Wie and Moon (2017)과 Wang, Chen, et al. (2023) 등 다수의 연구에서는 기후 진동 지수와 같은 대규모 원격 상관 요소가 미세먼지 농도의 장기적 변동성을 설명하는 데 유용한 예측 인자임을 제시한 바 있다. 이에 본 연구에서는 해당 기압 패

턴과 북반구의 주요 기후 변동 지수(ENSO, AO, NAO, PDO, IOD, PNA) 간의 관련성을 추가로 분석하였다. 그 결과, ENSO를 중심으로한 열대 태평양의 해수면 온도 변동이 아무르강 유역의 기압 형성에 기여할 수 있음이 확인되었다. 즉, 대규모 원격 상관 패턴이 종관 기압계 형성

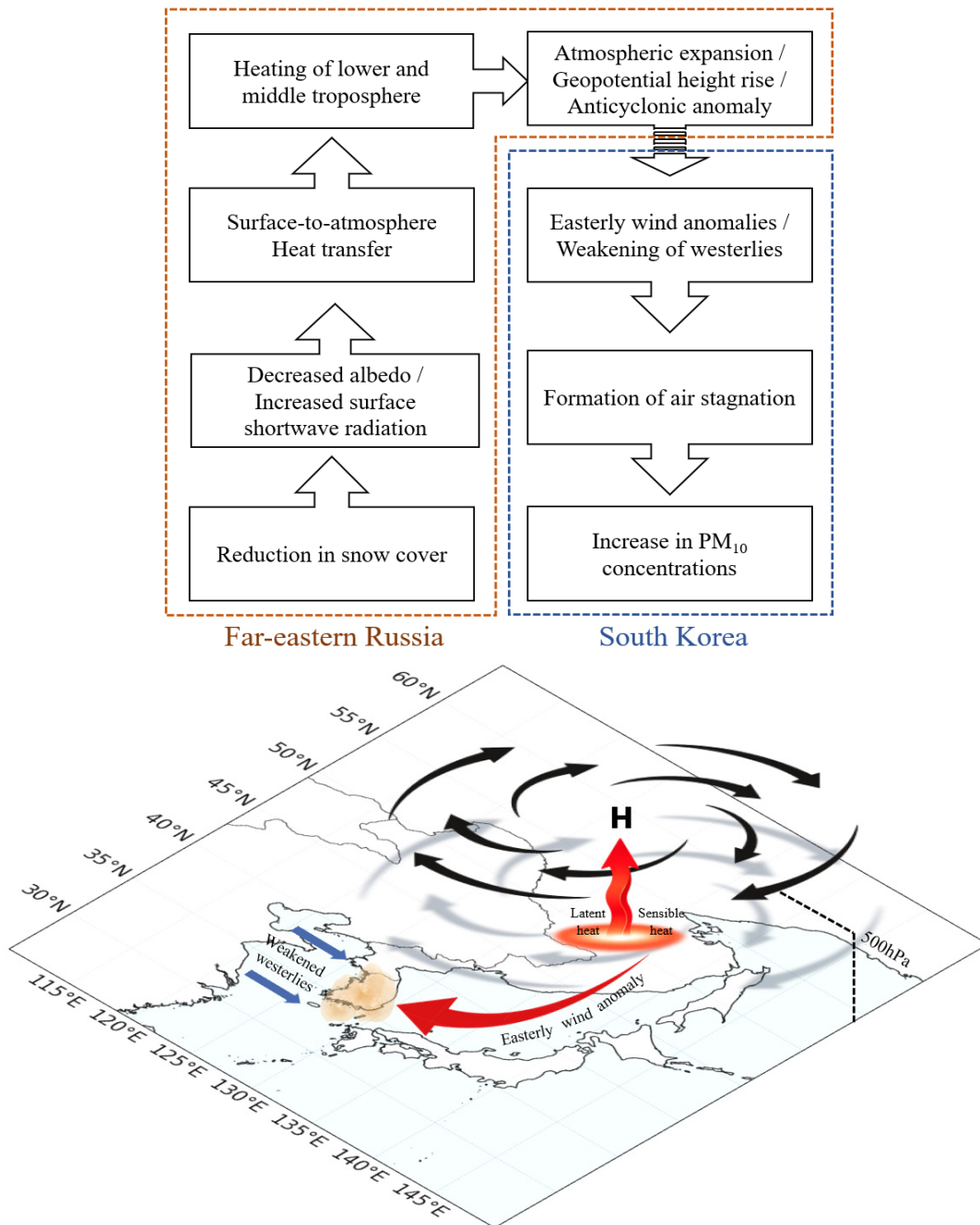


Fig. 9. Schematic diagram of mechanisms related to increased PM₁₀ concentrations in South Korea during springtime

의 배경적 조건을 제공하고, 그 위에서 국지적인 눈 피복 감소 효과가 결합되어 한반도의 대기 정체 현상을 더욱 강화시키는 복합적인 메커니즘이 작용하는 것으로 해석된다. 자세한 분석 결과는 부록 A3에 첨부하였다.

4. 결론

본 연구에서는 한국의 봄철 PM₁₀ 농도 변동성에 영향을 미치는 대기 패턴을 분석하고, 그 원인이 되는 지표-대기 프로세스 기반 메커니즘을 제시하였다(Fig. 9).

분석 결과, 한국의 봄철 고농도 PM₁₀ 발생을 유발하는 가장 지배적인 종관 대기 패턴은 러시아 아무르강 유역의 양의 지위고도 편차로 확인되었다. 아무르강 유역에 고기압성 편차가 강화될 경우, 시계 방향의 대기 순환이 발달하여 그 남단에 위치한 한반도에 동풍 편차를 유도한다. 이러한 동풍 편차는 봄철의 탁월풍인 서풍을 상쇄시키는 작용을 하며, 결과적으로 풍속 감소 및 대기 정체를 심화시킨다. 이는 오염물질의 확산을 억제하고 대기 중 체류 시간을 증가시켜, 고농도 PM₁₀ 현상이 발생하기 유리한 조건을 형성한다.

이러한 종관 대기 패턴을 형성하는 요인으로는 아무르강 유역의 눈 피복 변화가 확인되었다. 본 연구는 지표-대기 프로세스에 기반하여, 눈 피복도 감소가 대기 패턴을 변화시키는 열역학적 메커니즘을 제시하였다. 봄철 해당 지역의 눈 피복도 감소는 지표면 알베도를 낮추어 태양 단파복사 흡수량을 증가시킨다. 지표에 축적된 열에너지는 현열 및 잠열 플럭스의 형태로 대기에 전달되어 하층 대기의 기온 상승을 유발하며, 이는 대기의 팽창을 통해 대기 중층의 지위고도를 상승시키는 역할을 한다. 즉, 눈 피복도 감소에 따른 지표 가열이 아무르강 유역의 고기압성 패턴을 강화하고, 이것이 종관 대기 흐름을 변형시켜 한반도의 대기 확산을 저하시키는 주요 요인으로 작용함을 확인하였다. 아울러, 이러한 지표 피드백 과정은 독립적으로 작용하기보다, ENSO와 같은 대규모 기후 변동성이 형성한 대기 순환위에서 고기압성 편차를 더욱 증폭시키는 복합적인 메커니즘에 기인하는 것으로 분석된다.

하지만 본 연구에서 제시한 기후학적 메커니즘은 선형적 방법론과 자료의 시간적 해상도 측면에서 다음과 같은 한계를 갖는다. 연구 방법론이 상관분석 및 합성편차분석 등 선형적 통계 기법에 기반하였기에, PM₁₀ 농도와 기후 변수 간 물리적 인과관계를 명확히 규명하는 데에는 한계가 있다. 또한 월평균 자료의 사용은 수일간 지속되는 단

기 고농도 사례의 급격한 변동성과 세부적인 종관 역학적 기작을 평활화시킬 수 있다는 한계를 지닌다. 따라서 향후 연구에서는 Granger Causality Test나 Convergent Cross Mapping과 같은 인과성 분석 기법을 적용함으로써, 본 연구에서 제시한 메커니즘의 인과관계를 더욱 정밀하게 규명할 필요가 있다. 또한 기후모델 실험을 통하여 제트기류의 변동이나 파동 전파 등 대기 역학적 메커니즘을 검증할 필요가 있다. 아울러 일별 및 시간별 고해상도 PM₁₀ 자료를 활용한 후속 연구를 통해, 본 연구에서 규명한 거시적 대기 패턴 위에서 작동하는 단기 고농도 사례의 발생 기작을 추가적으로 규명한다면 평활화 편향을 최소화하고 예측력을 증진시킬 수 있을 것이다.

본 연구에서 도출된 정량적 분석 결과는 현행 대기질 예보 시스템을 보완하는 데 있어 기후학적 근거를 제공한다. 본 연구의 결과는 한국의 봄철 PM₁₀ 변동성을 예측하는 데 한국의 지역적 요소뿐 아니라, 아무르강 유역의 눈 피복도 변화와 같은 선행 기후 신호를 종합적으로 고려해야 함을 시사한다. 특히 눈 피복도는 계절적 조기 경보 시스템의 예측 인자로 활용될 수 있으며, 이를 기반으로 배출원 관리 및 취약계층 보호 등 선제적인 저감 대책을 수립하는 데 기여할 수 있다. 또한, 이는 기후변화에 따른 눈 피복 변화가 대기질에 미치는 영향을 이해하고, 인접 국가 간 데이터 공유 및 공동 대응을 위한 과학적 근거를 제공한다.

사사

이 논문은 2025년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 인문사회분야 중견연구지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2024S1A5A2A0102004313).

Reference

- AirKorea. 2025. About Airkorea; [accessed 2025 Dec 7] https://airkorea.or.kr/web/contents/contentView/?pMENU_NO=91&cntnts_no=1
- Allabakash S, Lim S, Chong KS, Yamada TJ. 2022. Particulate matter concentrations over South Korea: Impact of meteorology and other pollutants. *Remote Sens* 14(19): 4849. doi: 10.3390/rs14194849
- Bang EJ, Choi YH. 2024. Recent understanding in

- particular matter-mediated aging and age-related diseases (in Korean with English abstract). *J Life Sci* 34(1): 68-77. doi: 10.5352/JLS.2024.34.1.68
- Bednorz E, Wibig J. 2017. Circulation patterns governing October snowfalls in Southern Siberia. *Theor Appl Climatol* 128(1): 129-139. doi: 10.1007/s00704-015-1696-3
- Bikkina S, Andersson A, Kirillova EN, Holmstrand H, Tiwari S, Srivastava AK, Gustafsson Ö. 2019. Air quality in megacity Delhi affected by countryside biomass burning. *Nat Sustainability* 2(3): 200-205. doi: 10.1038/s41893-019-0219-0
- ECMWF. 2023. IFS documentation - Cy48r1: Part III: Dynamics and numerical procedures. Reading, UK: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.
- ECMWF. 2024. IFS documentation - Cy49r1: Part VI: Technical and computational procedures. Reading, UK: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.
- Han SB, Song SK, Shon ZH, Kang YH, Bang JH, Oh I. 2021. Comprehensive study of a long-lasting severe haze in Seoul megacity and its impacts on fine particulate matter and health. *Chemosphere* 268: 129369. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.129369
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, Hirahara S, Horányi A, Muñoz-Sabater J, Thépaut JN. 2020. The ERA5 global reanalysis. *Q J R Meteorol Soc* 146(730): 1999-2049. doi: 10.1002/qj.3803
- Inness A, Ades M, Agustí-Panareda A, Barré J, Benedictow A, Blechschmidt AM, Suttie M. 2019. The CAMS reanalysis of atmospheric composition. *Atmos Chem Phys* 19(6): 3515-3556. doi: 10.5194/acp-19-3515-2019
- Jung MI, Son SW, Kim HC, Kim SW, Park RJ, Chen D. 2019. Contrasting synoptic weather patterns between non-dust high particulate matter events and Asian dust events in Seoul, South Korea. *Atmos Environ* 214: 116864. doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.116864
- Kim DR, Kim JS, Ban SJ. 2010. A study on the characteristics of soil in the Asian dust source regions of Mongolia (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Atmos Environ* 26(6): 606-615. doi: 10.5572/KOSAE.2010.26.6.606
- Kim JH, Kim MK, Kim SJ, Kim JH, Yeh SW, Lee SH, Lee Y. 2024. Arctic/North Atlantic atmospheric variability causes Severe PM₁₀ events in South Korea. *Sci Total Environ* 914: 169714. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.169714
- Kim JH, Kim SJ, Youn D, Kim MK, Kim JH, Kim J, Noh E. 2021. Impact of North Atlantic-East Asian teleconnections on extremely high January PM₁₀ cases in Korea. *Environ Pollut* 290: 118051. doi: 10.1016/j.envpol.2021.118051
- Kim KH, Kang CH, Lee JH, Choi KC, Youn YH, Hong SM. 2006. Investigation of airborne lead concentrations in relation to Asian Dust events and air mass transport pathways. *J Aerosol Sci* 37(12): 1809-1825. doi: 10.1016/j.jaerosci.2006.07.006
- Kim M, Lee E. 2022. Validation and comparison of climate reanalysis data in the East Asian monsoon region. *Atmosphere* 13(10): 1589. doi: 10.3390/atmos13101589
- Kim YU, Do HS, Kim JH, Kwak KH, Ahn J, Kim H. 2022. Applicability study of atmospheric circulation and ventilation indices to analysis of PM_{2.5} episode in March 2018. *J Korean Soc Atmos Environ* 38(4): 542-556. doi: 10.5572/KOSAE.2022.38.4.542
- Korea Environment Institute (KEI). 2023. Social, health, and economic damages caused by particulate matter. Sejong, Korea: Korea Environment Institute.
- Ku HY, Noh N, Jeong JH, Koo JH, Choi W, Kim BM, Ban SJ. 2021. Classification of large-scale circulation patterns and their spatio-temporal variability during High-PM₁₀ events over the Korean Peninsula. *Atmos Environ* 262: 118632. doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118632
- Lasserre F. 2003. The Amur River border. Once a symbol of conflict, could it turn into a water resource stake? *Cybergeo: Eur J Geogr* doi: 10.4000/cybergeo.3769
- Laurent B, Marticorena B, Bergametti G, Chazette P, Maignan F, Schmechtig C. 2005. Simulation of the mineral dust emission frequencies from desert areas of

- China and Mongolia using an aerodynamic roughness length map derived from the POLDER/ADEOS-1 surface products. *J Geophys Res: Atmos* 110(D18): D18S04. doi: 10.1029/2004JD005013
- Lee D, Choi JY, Myoung J, Kim O, Park J, Shin HJ, Nam KP. 2019. Analysis of a severe PM_{2.5} episode in the Seoul Metropolitan area in South Korea from 27 February to 7 March 2019: Focused on estimation of domestic and foreign contribution. *Atmosphere* 10(12): 756. doi: 10.3390/atmos10120756
- Lee H, Jung J, Myung W, Baek JH, Kang JM, Kim DK, Kim H. 2019. Association between dust storm occurrence and risk of suicide: Case-crossover analysis of the Korean national death database. *Environ Int* 133: 105146. doi: 10.1016/j.envint.2019.105146
- Lee HJ, Jeong Y, Kim ST, Lee WS. 2018. Atmospheric circulation patterns associated with particulate matter over South Korea and their future projection (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 9(4): 423-433. doi: 10.15531/KSCCR.2018.9.4.423
- Lee SM, Ho CH, Choi YS. 2011. High-PM₁₀ concentration episodes in Seoul, Korea: Background sources and related meteorological conditions. *Atmos Environ* 45(39): 7240-7247. doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.08.071
- Liu Q, Wang W, Gu X, Deng F, Wang X, Lin H, Guo X, Wu S. 2021. Association between particulate matter air pollution and risk of depression and suicide: A systematic review and meta-analysis. *Environ Sci Pollut Res* 28: 9029-9049. doi: 10.1007/s11356-021-12357-3
- McClure CD, Jaffe DA. 2018. US particulate matter air quality improves except in wildfire-prone areas. *Proc Natl Acad Sci* 115(31): 7901-7906. doi: 10.1073/pnas.1804353115
- National Air Emission Inventory and Research Center. 2025. Sources of particulate matter; [accessed 2025 Dec 7]. <https://www.air.go.kr/contents/view.do?contentsId=9&menuId=41>
- OECD. 2016. The economic consequences of outdoor air pollution. Paris, France: OECD.
- Oh J, Lim YH, Han C, Lee DW, Myung J, Hong YC, Bae HJ. 2024. Mortality burden due to short-term exposure to fine particulate matter in Korea. *J Preventive Med Public Health* 57(2): 185. doi: 10.3961/jpmph.23.514
- Park IS. 2016. What is the fundamental reason for high concentration of particulate matters in the Seoul Metropolitan Area? (in Korean). *J Korean Soc Atmos Environ* 32(3): 352-353.
- Ryu YH, Min SK. 2021. Long-term evaluation of atmospheric composition reanalyses from CAMS, TCR-2, and MERRA-2 over South Korea: Insights into applications, implications, and limitations. *Atmos Environ* 246: 118062. doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.118062
- Seneviratne SI, Corti T, Davin EL, Hirschi M, Jaeger EB, Lehner I, Orlowsky B, Teuling AJ. 2010. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Sci Rev* 99(3-4): 125-161. doi: 10.1016/j.earscirev.2010.02.004
- Shukla J. 1998. Predictability in the midst of chaos: A scientific basis for climate forecasting. *Science* 282(5389): 728-731. doi: 10.1126/science.282.5389.728
- Statistics Korea. 2024. Korea's safety report 2023. Daejeon, Korea: Ministry of Data and Statistics.
- Vieno M, Heal MR, Twigg MM, MacKenzie IA, Braban CF, Lingard JJN, Reis S. 2016. The UK particulate matter air pollution episode of March-April 2014: more than Saharan dust. *Environ Res Lett* 11(4): 044004. doi: 10.1088/1748-9326/11/4/044004
- Wang J, Han J, Li T, Wu T, Fang C. 2023. Impact analysis of meteorological variables on PM_{2.5} pollution in the most polluted cities in China. *Heliyon* 9: e17609. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e17609.
- Wang N, Chen J, Zhang Y, Xu Y, Yu W. 2023. The spatiotemporal characteristics and driving factors of dust emissions in East Asia (2000-2021). *Remote Sens* 15(2): 410. doi: 10.3390/rs15020410
- Wie J, Moon BK. 2017. ENSO-related PM₁₀ variability on

the Korean Peninsula. *Atmos Environ* 167: 426-433.

doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.08.058

Yang H, Shen X, Yao J, Wen Q. 2020. Portraying the impact of the Tibetan Plateau on global climate. *J Clim* 33(9): 3565-3583. doi: 10.1175/JCLI-D-18-0734.1

Yun SG, Yoo C. 2019. The effects of spring and winter blocking on PM₁₀ concentration in Korea. *Atmosphere* 10(7): 410. doi: 10.3390/atmos10070410

부록

A1. 아무르강 유역 대기 패턴 변동성의 유의성 분석

본 연구에서는 합성편차 분석(Fig. 4)에서 도출된 기압 패턴의 기후학적 유의성을 파악하기 위해, 2003년부터 2024년까지 ERA5 재분석 자료를 활용하여 봄철(3~5월) 지위고도의 평균과 표준편차를 분석하였다(Fig. A1). 우선 지위고도 평균(Fig. A1(a))을 살펴보면, 대륙권 전층에 걸쳐 저위도에서 고위도로 갈수록 지위고도가 낮아지는 전형적 중위도 기압 패턴이 확인된다. 이는 본 연구에서 사용한 재분석 자료가 동아시아의 일반적인 기후 특성을 잘 모의하고 있음을 보여준다. 다음으로 기압계의 경년 변동성을 나타내는 표준편차 분석(Fig. A1(b)) 결과, 지역별로 뚜렷한 차이가 확인되었다. Fig. 4의 합성편차 분석에서 저기압성 편차가 나타났던 몽골 서쪽 지역은 상대적으로 낮은 표준편차를 보였다. 이는 해당 지역의 저기압성 편차가 자연적인 변동폭 내에서 발생한 일시적 현상일 가능성을 시사한다. 반면, 본 연구의 핵심 관심 지역인 아무르강 유역과 호호츠크해 인근에서 가장 큰 표준편차를 보였다. 구체적으로 500 hPa 고도에서 이 지역의 표준편차는 약 80~100 gpm에 달하며, 이는 주변 지역에 비해 월등히 높은 수치이다. 주목할 점은 표준편차가 가장 크게 나타난 이 영역이, 본 연구의 고농도 PM₁₀ 시 유의미한 고기압성 편차가 나타난 영역(Fig. 4)과 공간적으로 일치한다는 것이다. 이는 아무르강 유역이 기후학적으로 대기 순환의 변화가 매우 역동적인 곳임을 의미하며, 이곳에서의 기압 변동이 한반도의 대기 순환 및 대기질을 결정짓는 조절 인자일 가능성을 시사한다. 이러한 높은 변동성은 아무르강 유역의 눈 피복 변동이나 인접한 호호츠크해의 해빙 변화와 같은 지표면 열적 강제력이 기압계의 불안정성을 증폭시킨 결과로 해석된다. 따라서 본 연구에서 도출된 아무르강 유역의 고기압성 편차는 우연한 신호가 아니라, 동아시아 기후 시스템의 가장 지배적인 변동 모드와 밀접하게 연관된 현상임을 확인하였다.

A2. 아무르강 유역 지위고도 변동에 따른 한국 봄철 PM₁₀ 합성편차 분석 결과

본 분석은 연구의 핵심 대기 패턴인 아무르강 유역의 지위고도 변동이 한국의 실제 PM₁₀ 농도 분포에 미치는 영향을 공간적으로 규명하기 위해 수행되었다. 분석을 위

해 2003년부터 2024년까지 아무르강 유역의 봄철 500 hPa 지위고도 시계열에서 선형 추세를 제거한 후, 상위 25%에 해당하는 5개 해(2003, 2008, 2014, 2020, 2021)와 하위 25%에 해당하는 5개 해(2004, 2005, 2010, 2013, 2022)를 선정하여 두 그룹 간의 PM₁₀ 합성편차를 계산하였다(Fig. A2).

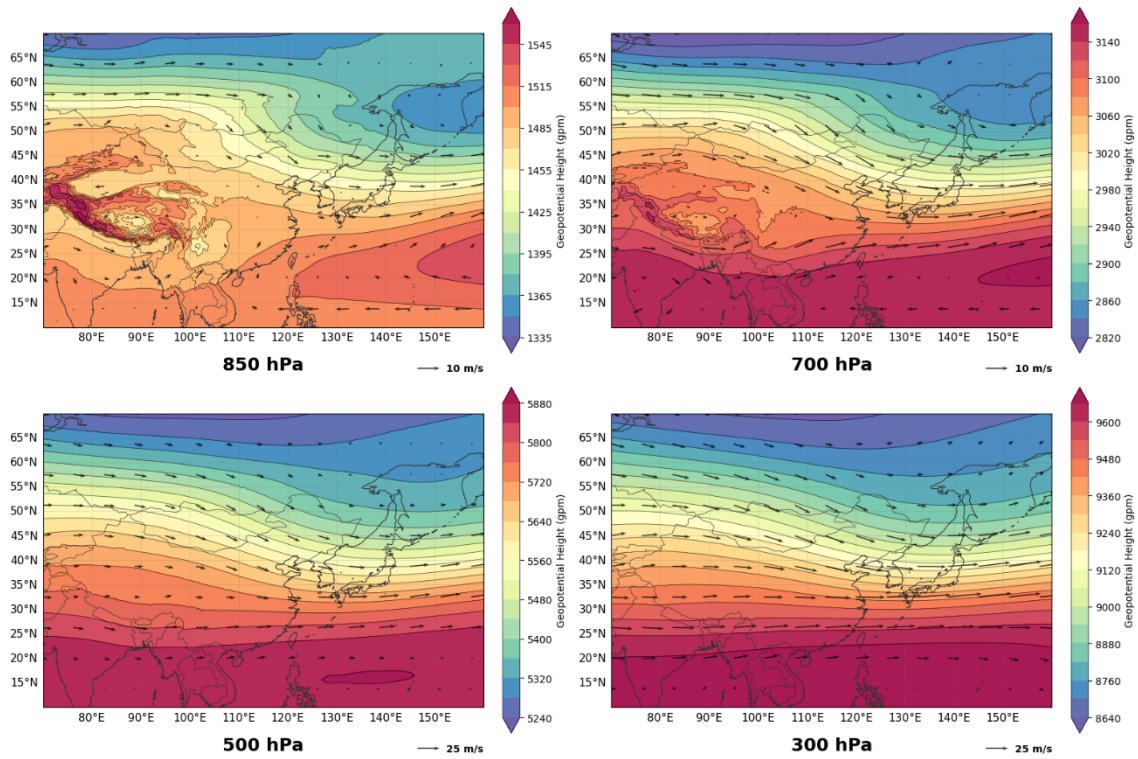
분석 결과, 아무르강 유역에 고기압성 편차가 발달한 해에는 그렇지 않은 해에 비해 한반도 전역에서 양의 PM₁₀ 농도 편차가 나타났다. 특히, 수도권(서울, 경기) 및 서해안 지역에서 최대 15~21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 달하는 강한 양의 편차가 관측되었다. 이는 지리적으로 중국 등 국외 배출원과 인접한 서쪽 지역이 편서풍 약화에 따른 대기 정체 효과와 외부 유입 오염물질의 축적 영향을 더 민감하게 받기 때문으로 해석된다. 또한, 북한의 평양 인근 지역에서도 높은 농도 편차가 확인되었는데, 이는 해당 지역의 높은 1차 에너지 의존도(석탄, 생물성 연소 등)로 인한 자체 배출량이 대기 정체 시 심각한 고농도 현상으로 이어지기 때문인 것으로 추정된다.

결론적으로, Fig. A2의 결과는 아무르강 유역의 고기압성 순환이 한국의 평균적인 PM₁₀ 농도 레벨을 상승시킬 뿐만 아니라, 지역별 고농도 발생 강도를 결정짓는 변동성의 주요 조절 인자임을 보여준다.

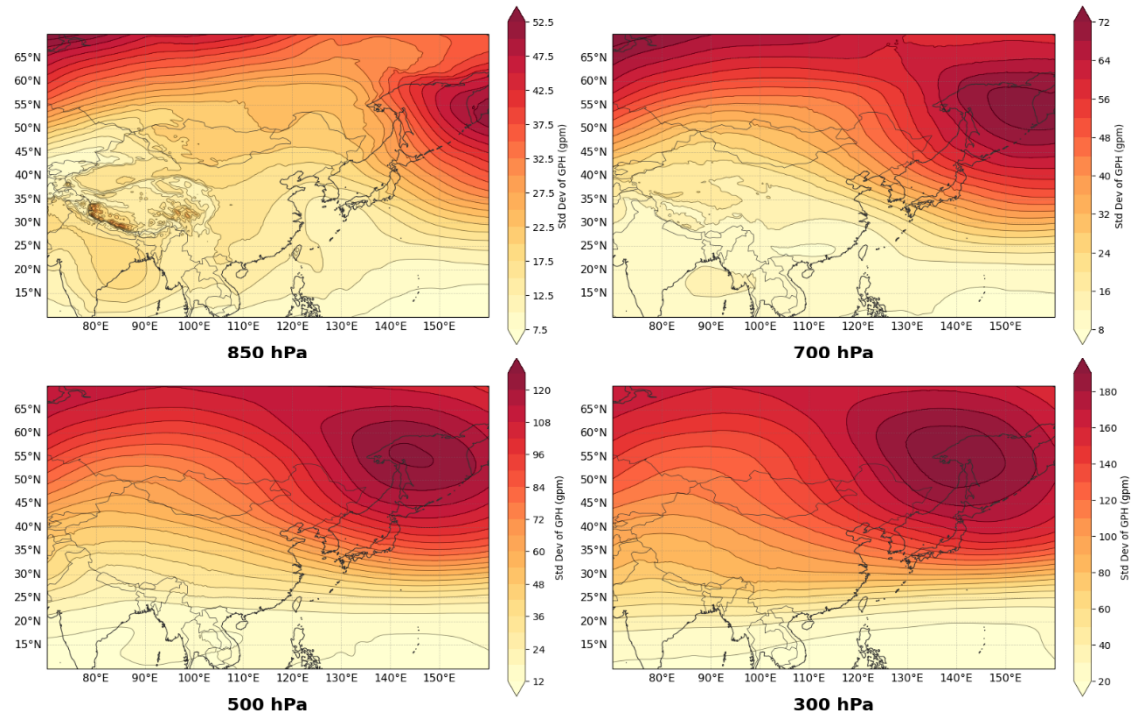
A3. 동아시아 대기 순환 패턴과 대규모 기후 변동성 간의 원격 상관성 분석

본 연구에서 도출된 고농도 PM₁₀ 사례 시의 종관 대기 패턴은 아무르강 유역의 고기압성 편차이다. 이 편차와 함께 몽골 서부에 저기압성 편차를 형성하면서 동고서저형 기압 배치가 나타난다(Fig. 4(c)). 이러한 패턴이 눈 피복도와 같은 지표 피드백뿐만 아니라 대규모 원격 상관에 의해 유도될 가능성을 조사하기 위해 추가 분석을 수행하였다. 우선, 한국의 봄철 PM₁₀ 농도 변동성을 주도하는 기압 패턴의 기후학적 변동 모드를 추출하기 위해, 연구 기간(2003~2024년) 동안 동아시아 영역(10~70°N, 70~160°E)의 봄철 500 hPa 지위고도 장에 대해 경험적 직교함수(Empirical Orthogonal Function, EOF) 분석을 수행하였다. 분석 결과, 동아시아 대기 순환을 설명하는 4개의 주요 모드가 산출되었다(Fig. A3).

다음으로, 산출된 EOF 모드 중 고농도 PM₁₀ 발생 시의 핵심 대기 패턴인 동고서저 형태(Fig. 4(c))를 가장 잘 대



(a) Climatological mean of springtime geopotential height and wind



(b) Standard deviation of springtime geopotential height

Fig. A1. Spatial distributions of (a) climatological mean of geopotential height (gpm) and wind field (m/s) and (b) standard deviation of geopotential height (gpm) at 850, 700, 500, and 300 hPa during springtime

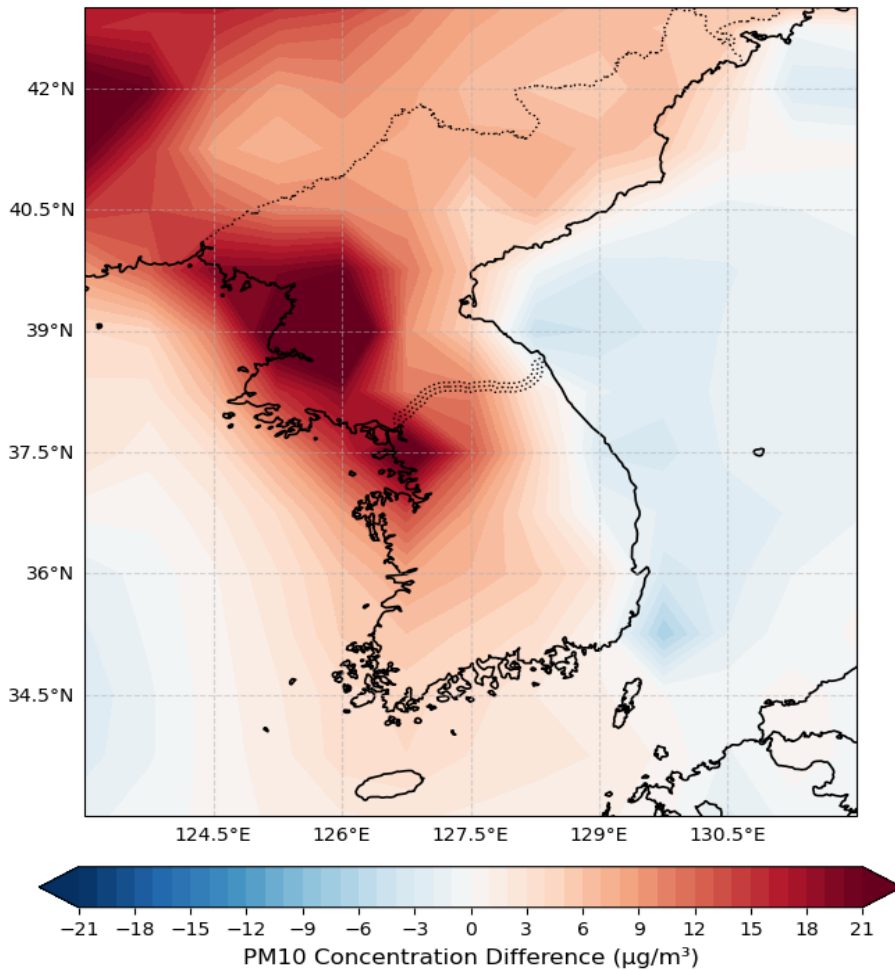


Fig. A2. Composite difference of spring PM₁₀ concentrations over the Korean Peninsula between the years with the highest 25% (2003, 2008, 2014, 2020, and 2021) and lowest 25% (2004, 2005, 2010, 2013, and 2022) of 500 hPa geopotential height in the Amur River basin. The positive values indicate increased PM₁₀ concentrations during the high years of geopotential height

변하는 모드를 선정하기 위해 패턴 상관분석을 실시하였다(Table A1). 분석 결과, 전체 분산의 10.76%를 차지하는 EOF 제4모드가 본 연구의 합성편차 패턴과 통계적으로 유의한 음의 상관관계($r = -0.572, p < 0.1$)를 보이는 것으로 확인되었다. 이에 따라 EOF4의 시계열(PC4) 부호를 반전시켜 해당 기압 패턴의 강도를 나타내는 대리 변수로 정의하고 분석에 활용하였다.

정의된 대리 변수와 북반구의 주요 기후 진동 지수 6종(ENSO, AO, NAO, PDO, IOD, PNA) 간의 상관분석을 통해 대규모 기후 진동이 한국의 고농도 PM₁₀ 유발 기압 패턴에 미치는 영향을 평가하였다(Table A2).

그 결과, ENSO (Nino3.4) 지수와 통계적으로 유의한

음의 상관성이 확인되었다. 이는 라니냐(La Niña) 시기에 해당하는 음의 ENSO 위상이 강할수록, 동아시아 지역에 동고서저형 기압 패턴이 발달할 확률이 높아짐을 시사한다. 즉, 열대 태평양의 해수면 온도 변동이 원격 상관을 통해 중위도 대기형성에 영향을 미치고, 이것이 아무르강 유역의 고기압성 편차 및 몽골 서부의 저기압성 편차를 강화하여 한반도의 대기 정체 및 고농도 PM₁₀ 발생을 유도하는 선행 요인으로 작용할 가능성이 있음을 뒷받침한다.

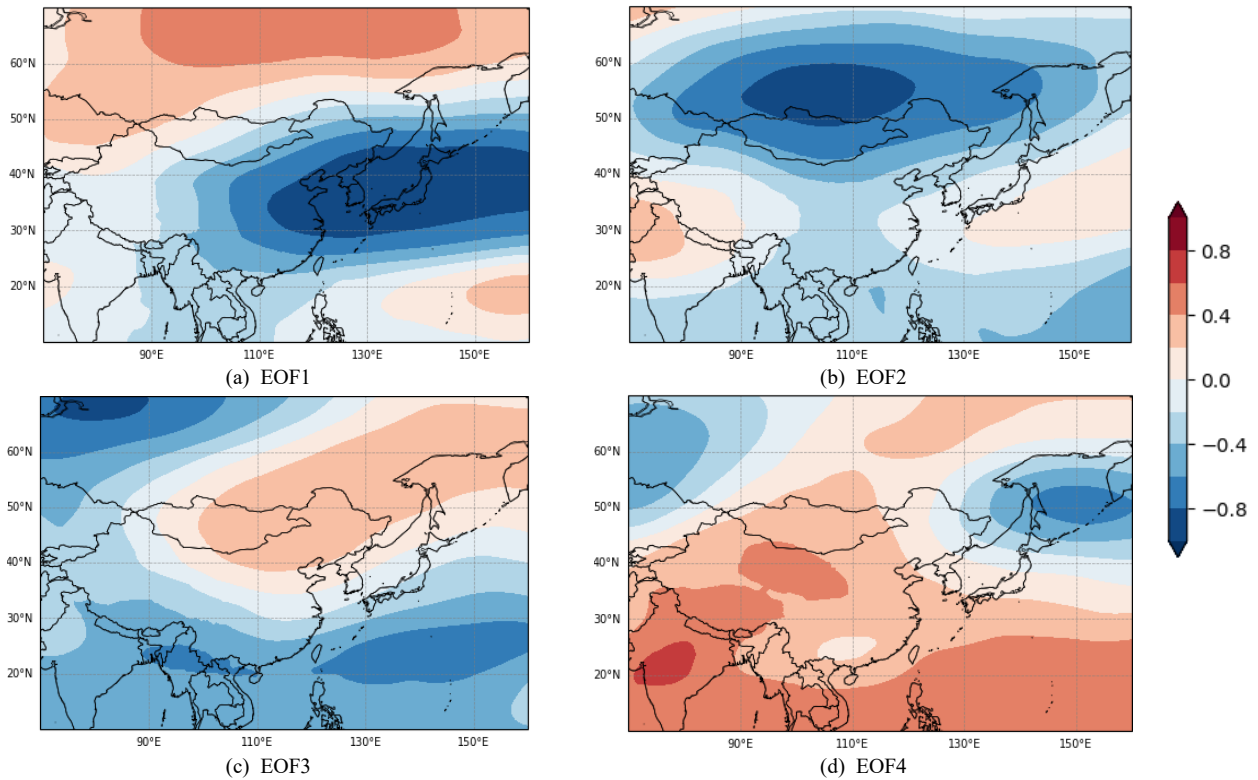


Fig. A3. Spatial patterns of the first four Empirical Orthogonal Functions (EOF) derived from 500 hPa geopotential height over East Asia (10–70°N, 70–160°E), which account for 30.23%, 21.47%, 15.01%, and 10.76% of the total variance, respectively. Regions with positive (negative) values, shaded in red (blue), represent geopotential height variations that are positively (negatively) correlated with the corresponding principal component time series

Table A1. Pattern correlation coefficients between the spatial pattern shown in Fig. 4c and the four leading EOF modes. The asterisk * denotes statistical significance at the 90% confidence level, determined using a Monte Carlo simulation ($N = 1,000$) based on phase randomization (Bretherton et al., 1999)

| | EOF1 | EOF2 | EOF3 | EOF4 |
|-----------------------------|--------|--------|-------|---------|
| Eastern high western low | -0.064 | -0.313 | 0.531 | -0.572* |

Table A2. Correlation coefficients between the sign-reversed principal component of the fourth EOF mode (PC4) and six climate oscillation indices. The asterisk * denotes statistical significance at the 90% confidence level

| | ENSO | AO | NAO | PDO | IOD | PNA |
|-----|--------|-------|--------|--------|-------|-------|
| PC4 | -0.43* | 0.242 | -0.219 | -0.310 | 0.051 | 0.094 |