

논문

동아시아 에어로졸 광학 깊이의 장기변동 특성과 기후변화 요인 분석 Long-term Variations of Aerosol Optical Depth and their Associations with Climate Change over East Asia

이나미¹⁾, 김철희^{1),2),*}

¹⁾부산대학교 대기환경과학과, ²⁾부산대학교 환경연구원

Na-Mi Lee¹⁾, Cheol-Hee Kim^{1),2),*}

¹⁾Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan, Republic of Korea

²⁾Institute of Environment Studies, Pusan National University, Busan, Republic of Korea

접수일 2021년 11월 3일
수정일 2021년 11월 30일
채택일 2021년 12월 10일

Received 3 November 2021
Revised 30 November 2021
Accepted 10 December 2021

*Corresponding author
Tel : +82-(0)51-510-3687
E-mail : chkim2@pusan.ac.kr

Abstract Long-term variabilities of particulate matters (PM) over the past 20 years (Feb. 2000~Dec. 2020) in East Asia were analyzed based on the Empirical Orthogonal Function (EOF) analysis, and interpreted their relationships associated with climate factors. As an index of PM, the Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) aerosol optical depth (AOD) was employed, and two climatological indices, East Asian Winter Monsoon Index (EAWMI) and Sea Ice Extent (SIE), were used over the same period to investigate the PM-climate associations. The results showed that monthly AOD variability in East Asia was primarily driven by natural aerosols, and secondarily by anthropogenic aerosols with higher variabilities at around BTH (Beijing-Tianjin-Hebei) and YRD (Yangtze River Delta) region in China. Inter-annual variations of wintertime (December, January, and February) AOD clearly showed that anthropogenic aerosol-driven variability was predominant in controlling the AOD in East Asia, following the same tendencies of Chinese emission reduction plans, such as increasing until around 2013 and then decreasing since then, and temporal lower variations in 2008. In AOD-climate analysis, the AOD-EAWMI associations implied that the enhanced East Asian winter monsoon has a considerable impact on the AOD by controlling the air pollutant ventilation. The correlation between EAWMI vs. Arctic SIE over the Kara-Barents Sea showed the negative correlation during the same period, suggesting that AOD in East Asia could be also increased in response to the weakened EAWMI and enhanced arctic SIE, under the premise of ongoing climate change in East Asia.

Key words: Aerosol optical depth, Empirical orthogonal function, East Asian winter monsoon index, Arctic sea ice concentration

1. 서론

기후변화와 미세먼지의 관련성 연구는 오늘날 기후 변화시대를 살아가는 우리 사회의 매우 중요한 대기 환경 이슈 중 하나이다. 기후변화 문제는 현재에도 전 지구적 자연재난차원에서 활발히 연구되고 있으며, 입자상 오염물질인 (초)미세먼지는 호흡기 질환 등 인체 유해성을 유발하는 가장 대표적인 대기오염물질로서 매우 중대하게 다루어지고 있다(Kheirbek *et al.*, 2013; Mar *et al.*, 2006). 미세먼지에 관한 OECD (Org-

anization for Economic Cooperation and Development) 보고서에 따르면 한국, 중국, 일본을 포함한 동아시아에서는 WHO 연평균 기준인 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하는 초미세먼지에 노출되어 있으며, 이로 인한 사망자 수는 1990년 이후 지속적으로 증가하여 연간 약 30만 명에 이르는 것으로 추정하고 있다(Kauffmann and Saffirio, 2020). 우리나라를 포함한 동아시아 많은 나라에서도 미세먼지의 개선 정책을 수립하여 시행하고 있으며, 각국의 배출량 감소 정책으로 인해 동아시아의 연평균 미세먼지 농도는 최근 감소 추세에 있다.

국내에서도 초미세먼지 연평균 농도는 꾸준히 감소되고 있는 추세이나, 반면 초고농도 미세먼지 발생 횟수는 최근에도 여전히 지속되고 있으며 (Lee *et al.*, 2018), 이러한 추세 속에 미세먼지 근본 발생원인을 규명하기 위한 연구 중 하나로써 기상·기후변화-미세먼지 관련성 연구 또한 매우 활발해지는 추세이다.

전 지구적 기후변화와 미세먼지 농도 추세와의 연관성 연구는 외국에서 주로 활발하게 수행되었다. Hong *et al.* (2019)은 기후변화 대표농도경로 (Representative Concentration Pathway, RCP) 4.5 시나리오 (RCP4.5)를 적용하여, 향후 2046~2050년 중국 전역을 포함한 동아시아에서 정체성 대기 조건이 연간 5.6% 증가함을 보임으로써 기후변화가 지속된다면 우리나라에도 기후변화에 의해 정체성 대기 상층 발생 조건이 증가하게 되어 고농도 초미세먼지 발생 횟수 또한 증가할 수 있음을 시사하였다. 아울러 기후변화 진행에 따른 북극 해빙 현상과 미세먼지 관련성 연구 또한 매우 활발하였는데, 북극 온난화에 의해 북극 진동 (arctic oscillation, AO)을 유발하거나 북극 해빙을 변화시켜 유라시아 대륙 한파와 성층권 극 소용돌이 (polar vortex)의 변동을 가져오게 되면, 북반구 겨울 몬순 강도 혹은 시베리아 고기압 강도의 변화를 촉발하게 되므로 (Bei *et al.*, 2018; Wu *et al.*, 2018; Long *et al.*, 2016; Fu *et al.*, 2014), 미세먼지의 농도 또한 결국 몬순 순환 혹은 시베리아 강도 변화의 직·간접적인 영향을 받게 된다. 그 예로 Zhao *et al.* (2018a)은 시베리아 고기압이 약한 기간 (2013년 1월)과 강한 기간 (2016년 1월)을 비교하여 북극 온난화로 인해 북극 해빙이 감소하고 이로 인해 변화된 시베리아 고기압이 North China Plains (NCP)의 에어로졸 변화에 상당한 영향을 줄 수 있음을 제시하였으며, Yin and Wang (2017)은 지구 온난화에 따른 동대서양-서러시아에서 발생한 AO의 위상 변화가 대기 순환 변동을 유발하여 2016년 12월 중국의 YRD (Yangze River Delta) 지역의 연무일수 변동에 상당한 영향을 미치는 것으로 분석된 바 있다.

동아시아에서는 주로 몬순 순환과 지역 규모 미세

먼지 농도의 시간 변동과의 연관성이 많이 연구되었다. 이는 동아시아 미세먼지의 장기 변동 특성은 동아시아 몬순 강도와 연관이 되며, 또 동아시아 몬순의 변동성은 근본적으로 기후변화에서 유래하는 것으로 보았기 때문이다 (Zhang *et al.*, 2018; Cai *et al.*, 2017). 동아시아에서는 지구 온난화와 북극 해빙 감소 그리고 정년 주기의 엘니뇨 등의 영향을 받게 되면 동아시아 몬순 순환은 주풍 혹은 지표 풍속을 강화시켜 결국 동아시아 미세먼지의 수평 확산과 수송 과정을 좌우하게 된다. 그 예로 Liu *et al.* (2011)은 2002년과 2003년 7월 동아시아 남부 (23°~32°N, 105°~120°E)와 북부 (35°~44°N, 115°~130°E) 지역을 대상으로 에어로졸 광학 깊이 (Aerosol Optical Depth, AOD)의 시공간적 변동 특성을 인도 여름 몬순 강도와 연관시켜 분석한 바 있다.

국내에서도 미세먼지 농도와 동아시아 겨울 몬순 패턴과의 연관성을 조사하여, 기후변화에 의한 우리나라 미세먼지 농도 조절 효과를 논의한 바 있다 (Lee *et al.*, 2018). 또한 기후변화에 의한 북극 해빙 감소, 특히 카라-바렌츠 해역의 해빙의 감소로 인하여 우랄 지역 상공의 대기 블로킹 (blocking)을 유발하고 그 결과 동아시아 겨울 몬순을 변화시켜 우리나라 미세먼지 농도를 조절할 수 있음을 보였다 (Kim *et al.*, 2019). 이러한 기후변화-미세먼지 상호관계들, 즉 기후변화, 엘니뇨 현상, 북극 해빙, AO, 동아시아 몬순 순환 강도의 변화 및 풍속을 포함한 주요 기상·기후 변수들과 이에 따른 미세먼지 농도의 조절과정은 매우 다양하게 연관되어 있다고 볼 수 있다 (그림 1).

이상에서 소개한 지금까지의 기후변화-미세먼지 관련 선행 연구들은 대부분이 사례 발생 기간의 단기적 고농도 미세먼지 사례이거나 동아시아 전체가 아닌 제한된 지역을 대상으로 수행한 연구가 많으며, 장기적이고 광역적인 기후변화-미세먼지 연관성을 분석한 경우는 매우 적은 실정이다. 국내의 대기환경·기후 연관성 연구 또한 상당한 상관관계가 존재할 수 있음을 언급하면서도 동아시아 미세먼지의 광역적 변동에 대한 기후 영향분석 연구는 그리 많지 않다. 이는

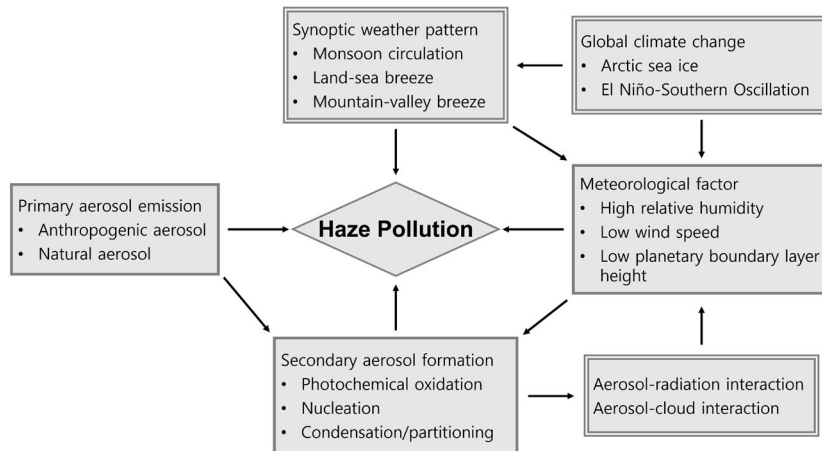


Fig. 1. Schematic of the controlling factors involved in haze pollution.

수집 가능한 미세먼지 측정 자료가 자료 특성상 기후 변동 시간 규모, 즉 20년 정도 이상의 장기 변동을 커버할 만한 광역적이고 연속적인 측정 자료 수집이 거의 불가능할 뿐만 아니라, 제한된 자료 축적량, 즉 우리나라에 국한된 대기질 농도 특성을 동아시아 전체 기후변화와 연관시키기에는 상당한 주의가 필요하기 때문이다.

본 연구에서는 우선 동아시아 전체를 대상으로 장기적이고 연속적인 미세먼지 특성 자료를 수집하고, 장기 변동 특성을 기후변화와 연관시켜 분석하였다. 먼저 동아시아 전역의 장기간의 미세먼지 특성을 반영할 수 있는 위성 자료인 에어로졸 광학 깊이(Aerosol Optical Depth, AOD)를 수집하여 동아시아 월별 AOD의 20년간 전체 공간 변동 추세를 분석하였다. 본 연구의 분석 기간은 2000년 2월~2020년 12월까지로서 총 20년 이상을 커버하며, 특히 통계함수인 경험적 직교함수(Empirical Orthogonal Function)를 적용하여 동아시아 미세먼지의 20년간 시간 및 공간 변동 특성을 통계적으로 분석하였다. 또한 AOD 변동성이 피크를 보이는 계절을 추가 선별하여 그 장기변동 추세를 기후변화 요인과 연관시켜 해석하였고, 기후변화 추세를 대표할 수 있는 인자로는 북극(카라-바렌츠) 해역의 해빙 지수와 동아시아 겨울 몬순 지수를

이용하였다. 본 연구는 미세먼지의 초고농도 발생 여러 인자들 중에서 기후변화 관점에서 다양한 기후인자별 미세먼지 조절 효과를 이해하는 기초 연구로서, 향후 기후변화-미세먼지 연관성 연구의 기초자료로 활용될 수 있기를 기대해 본다.

2. 자료, 분석 영역, 연구 방법

2.1 자료 및 분석 영역

본 연구는 과거 20년간 동아시아 지역을 대상으로 수집된 AOD 위성 자료를 기반으로 하였다. 사용된 동아시아 AOD 자료는 Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 센서에서 측정한 자료이며, MODIS는 미국 NASA (National Aeronautics and Space Administration)의 Terra (EOS AM)와 Aqua (EOS PM) 극궤도 위성에 탑재되어 있다. 참고로 Terra는 2000년 2월부터, Aqua는 2002년 7월부터 자료 수집이 가능하다(Remer *et al.*, 2005). 본 연구에 사용된 AOD의 시공간 자료 특성은 MODIS Collection 6의 MOD08_M3과 MYD04_M3 product를 병합하여 사용한 월평균 자료이고 공간 해상도는 $1^\circ \times 1^\circ$ 이다(Platnick *et al.*, 2015). 에어로졸 변동 추세를 파악하기

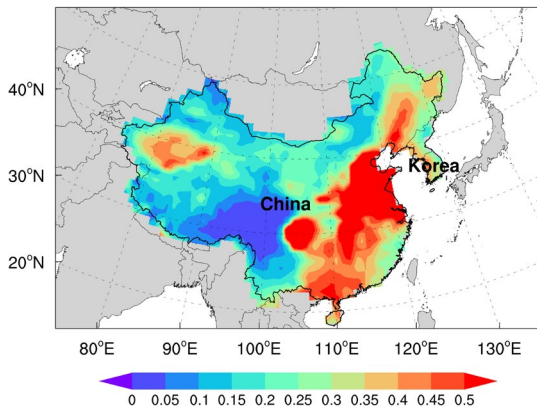


Fig. 2. Study area and spatial distribution of MODIS-AOD averaged over 20 years (from Feb. 2001 to Dec. 2020) in East Asia.

위해 분석한 변수는 Dark Target Deep Blue (DTDB) 550 nm AOD이며, 원시 자료는 LAADS (Atmosphere Archive and Distribution System) DAAC (Distributed Active Archive Center) 웹사이트 (<http://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)에서 제공받았다. 그림 2에 본 연구의 AOD 분석 영역을 나타내었고, 20년간 (2000년 2월~2020년 12월) 평균 AOD 공간 분포 또한 제시되어 있다. 그림 2에서 알 수 있듯이 중국과 한국에서 0.5 이상의 높은 평균 AOD 값을 보이며, 두 지역 모두 미세먼지 농도가 높은 지역으로 확인된다.

AOD와 기상·기후학적 영향과의 연관성을 살펴보기 위하여 동아시아 겨울 몬순 지수 (East Asian Winter Monsoon Index, EAWMI)와 북극 해빙 농도 (Sea Ice Concentration, SIC) 자료를 이용하였다. EAWMI를 도출하기 위하여 유럽 중기예보센터 (European Centre for Medium-Range Weather Forecast, ECMWF)에서 제공하는 ERA5 (ECMWF Re-Analysis 5) 자료에서 300 hPa 동서 바람 자료를 추출하여 이용하였다. ERA5는 ECMWF의 5세대 고해상도 재분석 자료로서, $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 의 수평 해상도를 가지며 1950년 1월 이후부터 자료 활용이 가능하다. ERA5 재분석 자료와 기존 ERA-Interim 재분석 자료의 차이점은, 두 자료 모두 IFS (Integrated Forecast System)를 통해 Four-

dimensional Variational Data Assimilation (4DVar) 자료동화 방법을 사용하였지만, ERA5는 4DVar 자료동화와 더불어 앙상블 기법을 추가 적용했다는 점에서 ERA-Interim 재분석 결과와 구별된다. 또한 ERA5는 ERA-Interim보다 더 높은 공간 해상도 ($0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$)와 시간 해상도 (1시간)를 가진 자료이므로, 더 상세한 재분석 자료를 수집할 수 있다 (Hersbach *et al.*, 2020; Mun *et al.*, 2020). 본 연구에서는 EAWMI 자료를 생산하기 위하여 ERA5의 300 hPa pressure level에서의 동서 바람 성분 (U300)을 사용하였다. 또한 북극의 해빙 변화가 동아시아 겨울 몬순에 미치는 영향을 알아보기 위하여 사용한 SIC 자료는 영국 해들리 센터 (Met Office Hadley Centre)의 HadISST.2.2.2.0 자료로서 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 수평 해상도를 가지며 1850년부터 최근까지의 자료 수집이 가능하다 (Titchner and Rayner, 2014). 본 연구에서는 영국 해들리 센터의 웹사이트 (<https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadisst2/data/download.html>)에서 SIC 자료를 수집하였으며, AOD 자료 분석 기간, 즉 최근 20년 기간과 일치시켰다.

2.2 연구 방법

먼저 월별, 연별 동아시아 AOD의 전체 변동 추세를 분석하기 위하여 본 연구에서는 통계적 분석 기법인 경험적 직교함수 (Empirical Orthogonal Function, EOF)를 활용하였다. EOF 분석기법은 원자료를 독립적인 여러 개의 EOF 모드로 분해하고 분해된 모드별 공간분포와 아울러 해당 공간분포의 시계열 특성을 동시에 분석하는 방법이다. 이때 분해되는 각 EOF 모드들의 분산을 모두 합하면 원자료의 총 분산과 동일하게 되며, 총 분산이 상대적으로 높은 EOF 주요 모드는 분산 크기에 비례하여 원자료의 시간적·공간적 변동성을 설명한다고 할 수 있다. 본 연구에서는 또한 EOF 분석 전처리 과정에서 기후 (장기) 변동을 제거하지 않고 추세를 해석한다는 점에서 장기경향 제거 과정 (detrending process)을 수행하지 않았으며 단지 분석 기간 원래값에서 총 기후 평균값을 뺀 편차 (아노말리) 값을 입력자료로 사용하였다. EOF 프로그램

은 미국 UCAR에서 제공하는 NCL 프로그램 내 eofunc 원시코드 (<https://www.ncl.ucar.edu/Document/Functions/Built-in/eofunc.shtml>)를 그대로 활용하였다.

또한 동아시아의 AOD 장기 변동성에 대한 기후 요인을 살펴보기 위하여 AOD의 첫 번째 주성분(Principal Component, PC)과 EAWMI 및 해빙지수(Sea Ice Extent, SIE)와의 상관성을 계산하였다. 이때 SIE는 SIC를 단순 지수화한 값으로서, 본 연구에서는 카라바렌츠 해역의 SIC가 15%를 초과하는 격자의 총면적으로 정의하여 사용하였다. 또 본 연구에서 상관 분석(correlation analysis)은 일반적으로 사용되는 피어슨 상관계수(Pearson correlation coefficient)를 사용하였다. 동아시아 겨울 몬순의 강도는 Jhun and Lee (2004)에 의해 제시된 EAWMI 지표, 즉 시베리아 고기압의 변동성이 크게 나타나는 두 지역에서의 300 hPa 동서바람의 차이로 정의된 지표를 그대로 사용하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 AOD 변동 추세

동아시아 에어로졸의 시공간 변동추세를 살펴보기 위하여, 월별 AOD의 EOF 분석 결과(분석 레이어 수 = 12개월 × 20년)를 그림 3에 나타내었다. 좌우 패널은 각각 EOF 모드별 주성분(principal component, PC) 공간 분포와 그 시계열로서, 총 분산의 약 69.7%를 설명할 수 있는 4개의 주성분 모드(제1~제4모드)까지 분석하였다(이하 주성분 생략). 각 모드별 주요 시공간 변동 특성은 다음과 같다.

제1모드는 동아시아 PC 중에서 가장 지배적인 AOD 변동 추세로 해석할 수 있으며, 전체 동아시아 AOD 변동성의 약 40.7%를 설명한다. 공간 분포 특징은, 중국 북서부와 Taklamakan 사막 주변, 그리고 중동 일부 지역에서 가장 강한 변동성을 보이며, 동시에 한반도에서도 상당한 시그널을 보였다(그림 3a). 이는 Lee and Kim (2018) 등 선행 연구에서도 분석하였

듯이 중국 북서 지역과 고비사막 서쪽 일부 지역의 AOD 변동이 한반도 AOD 변동과 연관성이 있는 것으로 해석할 수 있다. 제1모드의 시계열(그림 3a)에서는 강한 연주기를 가지며, 계절적으로는 특히 봄철에 피크를 갖는 것으로 나타났다. 이러한 특징으로부터 본 연구에서는 동아시아 AOD 변동의 제1모드를 황사 등 자연 발생 에어로졸에 의한 변동성으로 해석하였다(Sun *et al.*, 2001; Zhang *et al.*, 1997). 그러나 제1모드의 시계열 변동성은 우리나라의 황사 발생뿐만 아니라 Taklamakan 사막 등 중앙아시아 에어로졸 특성까지 포함하고 있으므로, 보다 상세한 변동 강약에 대한 동아시아 공간 분포 혹은 주기 분석은 더 많은 사례 분석을 통해 자연 발생적 미세먼지 변동 특성 연구가 필요할 것으로 판단된다.

전체 동아시아 AOD 변동성의 약 14.0%를 설명하고 있는 제2모드는 동북아시아 지역을 중심으로 나타났다(그림 3b). 공간적으로 변동성이 가장 큰 지역은 중국 북동부 지역임을 알 수 있으며, 특히 최근까지 인위적 대기오염물질 배출량이 가장 높은 베이징-톈진-허베이 성(Beijing-Tianjin-Hebei, BTH) 지역과 장강 삼각주(Yangtze River Delta, YRD) 지역을 포함하는 중국 동부 연안 지역에 걸쳐서 강한 변동성을 보였다(Zhong *et al.*, 2017; Han *et al.*, 2014; Chan and Yao, 2008). 또한 한반도에서도 동일한 변동 부호의 시그널을 보임에 따라(그림 3b), 중국 고 배출지역인 BTH와 YRD 지역에서 배출된 미세먼지 혹은 그 전구물질이 장거리 수송하여 한반도 에어로졸 농도에도 영향을 미칠 수 있는 요인으로 해석하였다(Lee *et al.*, 2019).

본 연구에서 제2모드를 동북아시아에서의 인위적 배출에 의한 에어로졸 생성 과정과 연관시켜 해석한 것은 동북아시아에서의 인위적 배출량 공간 분포(Woo *et al.*, 2018)와 유사할 뿐만 아니라, 해당 주성분의 시계열 특성에서도 그 연관성을 확인할 수 있었기 때문이다. 즉, 그림 3의 제2모드 시계열 특성은 여름과 겨울에 강한 양(+)의 피크를 가지는 반년 주기를 보이며, 이 결과로부터 겨울철(초)미세먼지의 1차 직접 배출과 활발한 2차 생성 기작, 그리고 YRD를 중심

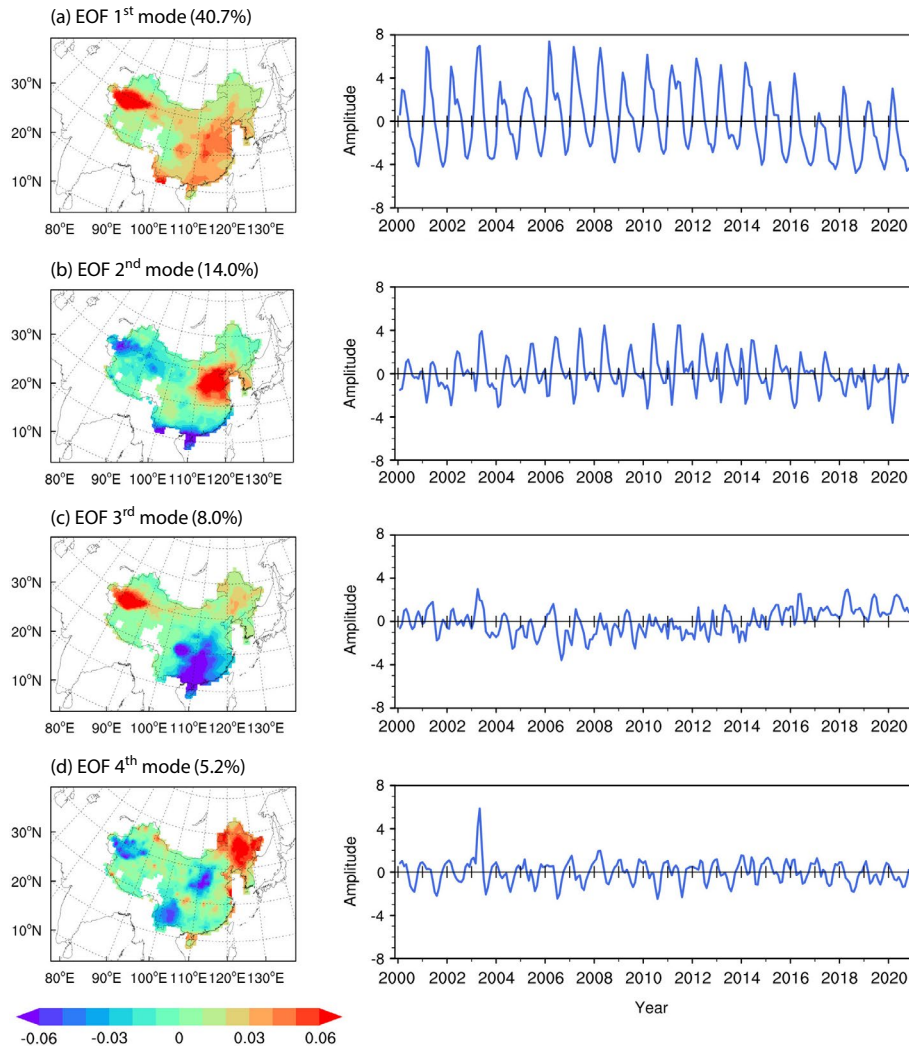


Fig. 3. Four major principle components of monthly-based MODIS-AOD anomalies generated from empirical orthogonal function (EOF) analysis during Feb. 2001~Dec. 2020.

으로 여름철 광화학 반응으로 생성되는 2차 미세먼지에 의해 두 번째 피크가 발생할 수 있는 것으로 이해할 수 있으며, 계절적으로 볼 때 여름철보다는 상대적으로 미세먼지 혹은 그 전구물질의 배출량이 많은 겨울철에 더 강한 피크를 보인다는 점에서 인위적 에어로졸의 영향이 매우 강한 것으로 해석하였다. 또한 제 2모드의 시계열 진폭이 2008년에 정점을 이루며, 2013년 이후 AOD 변동성이 눈에 띄게 감소하는 경향

은 Woo *et al.* (2018)의 중국 고 배출지역 시계열 경향과 정확히 일치한다는 점에서 본 연구에서는 제2모드를 자연 배출 과정보다는 인위적인 AOD 변동성에 더 기인하는 것으로 판단하였다. 우리나라의 경우 한반도 강원권 등 동부보다는 서쪽에서 동일한 부호를 보였다는 점 또한 인위적 배출에 의한 (초)미세먼지 배출·생성 과정과 장거리 이동 영향의 동서 간 차이로 해석할 수 있을 것으로 판단된다.

제3모드는 총 분산의 8.0%이며 이 모드에서는 우리나라보다는 남중국 고 배출지역인 주강 삼각주(Pearl River Delta, PRD) 지역과 연관되어 나타났다(그림 3c). PRD 지역은 BTH와 YRD 지역과 함께 중국 3대 고 배출지역으로 불리며, 중국 화중지역(Central China, CC)과 그 남쪽 일부 지역 또한 제3모드에서는 강한 시그널을 가지는 공간분포를 보였다(Li and Wang, 2015; Tie and Cao, 2009). 제3모드의 시계열에서는 하나의 특정 주기를 보이지는 않고, 겨울에 피크를 갖는 연주기와 여름과 가을에 피크를 갖는 반년 주기가 혼재되어 나타났다(그림 3c). 중국 PRD 지역은 우리나라보다는 중국 연구자들에 의한 많은 선행 연구가 있으며, 겨울철뿐만 아니라, 여름철 오존 농도와 연관되어 나타나므로, 본 연구에서는 선행 연구 조사 등 자세한 추가 연구는 수행하지 않았다.

제4모드는 총 분산의 5.2%를 설명하며, 동북 3성(랴오닝성, 지린성, 헤이룽장성)을 포함한 만주 지역과 중국 북부 지역에서 공간 분포 변동성이 크게 나타났다(그림 3d). 그림에서 나타났듯이 생물성 연소(biomass burning) 및 도시화로 인해 대기오염물질 배출량이 높은 중국 북동부 지역과 인위적 에어로졸이 높은 Fenwei Plain 지역에서 서로 반대의 시그널을 보였고, 주성분 시계열은 지배적인 특정 주기 또한 보이지 않고, 봄, 가을, 겨울철 피크가 혼돈되어 나타났다. 최근 위성 자료를 통해 볼 때 동북 3성 등 중국 북동쪽 지역에서는 10월 하반기와 11월 상반기에 주기적으로 농작물 혹은 농업 잔재물 소각 등의 배출량 특성을 보이는 곳으로 알려져 있으며(Zhao *et al.*, 2020; Shen *et al.*, 2007), 이러한 특징은 제4모드의 변동과 연관되어 나타난 것으로 해석하였다. 본 연구에서는 자료 부족 등으로 러시아 전역은 분석 대상에서 제외하였으나 2000년 초반을 포함한 개별 AOD 자료로부터 당시 러시아 산불 발생 지역인 러시아 남동부 일부 지역이 포함되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 제4모드는 생물성 연소과정에 의한 AOD 상승과 깊은 연관성을 보였다는 점과 산불 영향으로 국내에서도 영향이 많았던 2000년 초반에 피크를 보였던 본 모드의 시계열

특징과 일치한다는 점에서 독립된 중요한 미세먼지 발생 모드로 해석할 수 있을 것으로 판단된다(그림 3d). 그러나 분산 고유값(eigen value)이 전체 변동성의 10% 이하로서 상대적으로 낮은 설명력을 보이고 있어서, 본 연구의 제4모드 해석의 통계적 불확실성은 상당히 높은 것으로 판단하였다.

이상의 EOF 주성분 분석으로 동아시아 AOD의 모드별 공간분포와 시계열 특성을 살펴보았다. 그림 3은 동아시아 AOD의 변화 경향을 모든 계절을 포함하여 살펴본 것으로, 이는 계절 변동성 강도 또한 본 연구에서는 중요한 분석 요소로 고려하였기 때문이다. 그 결과 인위적 에어로졸의 피크가 겨울철에 모두 나타나는 것을 재차 확인하였으며, 이는 우리나라 겨울철(초)미세먼지의 화학성분 중에서 무기성분인 질산염 성분비가 높으며 그 질량 농도 또한 다른 계절에 비해 월등하게 높게 나타난다는 점에서 인위적 배출량에 의한 겨울철 미세먼지 농도 상승이 AOD의 주 변동 원인으로 해석하였다.

그러나 본 연구에서는 이상의 시계열 특성을 계절 변동이 아닌 경년 변동(혹은 그 이상의 장기 기후 변동) 특성과 연관시키기 위한 추가적인 분석을 수행하였다. 분석 자료를 인위적 에어로졸의 경년 변동성(혹은 그 이상의 장기 변동성)이 큰 계절인 겨울철에만 한정하고, 연 변동 특성을 살펴보았다. 즉, 12월, 1월, 2월 AOD를 개별 추출한 후, 각 월평균 AOD에 대해 EOF 분석을 월별로 수행하였다. 그림 4는 20년간 인위적 배출량이 가장 많은 계절인 겨울철 각 개별 월평균(12월, 1월, 2월) AOD에 대한 EOF 분석 결과를 제시한 그림이다(분석 레이어 수=각 월별 20년씩). 그 결과 모든 계절을 포함한 경우(그림 3)의 결과와는 다소 상이한 특성을 보였다. 예를 들어 그림 3a, 즉 모든 계절을 포함한 제1모드(자연 배출 변동이 우세한 모드)는 겨울철 인위적 배출량 특성과 무관하므로, 겨울철에 한정된 EOF 분석결과에서는 제외된 것으로 나타났다. 참고로 본 연구에서는 겨울철 월별 제1모드만을 분석하였고, 제2모드 이상의 변동성은 추가로 연구할 예정이다.

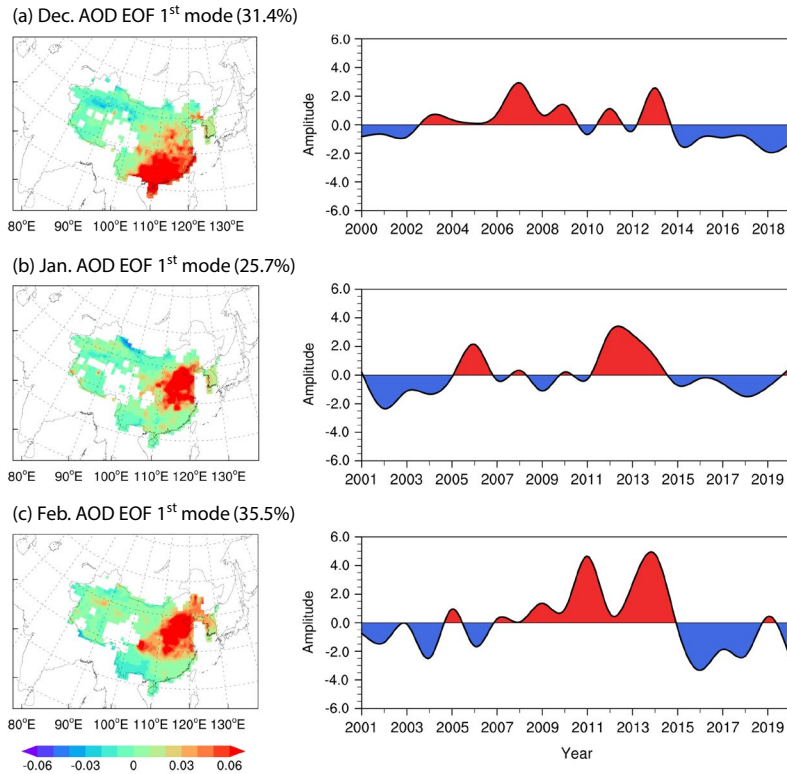


Fig. 4. The 1st principle components of wintertime (Dec., Jan., and Feb.) aerosol optical depth (AOD PC1), and their time series for three month: (a) December, (b) January, and (c) February, during 2000~2020.

겨울철 각 월(12, 1, 2월)별 제1모드(이하 PC1)의 변동성을 살펴보면, 12월의 경우 PRD 지역과 CC 지역을 중심으로 강한 시그널을 보였으며(그림 4a), 1월과 2월에는 인위적 에어로졸 배출량이 많은 BTH 지역과 YRD 지역을 포함한 중국 동부 지역에서 강한 변동성을 보였다(그림 4b와 c). 각 월별 PC1의 시계열을 살펴보면, 세 모드에서 공통적으로 AOD가 증가하다가 2013년 전후를 기점으로 감소하는 동일한 경향을 확인할 수 있다(그림 3b). 이는 중국의 배출량 저감 정책, 즉 2013년 9월부터 시행한 ‘대기오염 방지 행동 계획’에 기인한 동북아시아 미세먼지 농도 저감 영향으로 해석된다(Xu *et al.*, 2018). 그림 4a와 4b에서는 일시적인 변동성도 나타났는데, 2008년에 나타난 미세먼지의 소폭 감소는 베이징 올림픽 기간 전후에 시행된 중국 대기오염 배출량 저감 정책에 의한 것으로

판단되며 이는 주로 BTH 지역의 1차 미세먼지 배출 저감 효과뿐만 아니라 그 전구물질인 SO₂ 배출량 감축에 의한 황산염과 같은 2차 미세먼지 감소로도 연결된 것이 PC1에 반영된 것으로 추정된다. 그림 4c의 경우 엘니뇨 기간인 2003년, 2005년, 2007년 2019년에 AOD의 소폭의 증가 추세가 반영된 것으로 해석하였으며 이는 엘니뇨 현상에 의한 동아시아 겨울 몬순의 약화 현상과도 연관된 것으로 추정하였고(Yu *et al.*, 2019; Zhao *et al.*, 2018b), 그림 4b와 4c에서는 2020년 1월 코로나 발생 시점 이후에 AOD가 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 전체적으로 세 모드의 월별 차이는 크지 않은 것으로 해석하였으며, 모두 겨울철 특징을 대부분 반영하는 것으로 해석하였다.

겨울철 AOD의 PC1별 시계열 특성을 크게 지배하

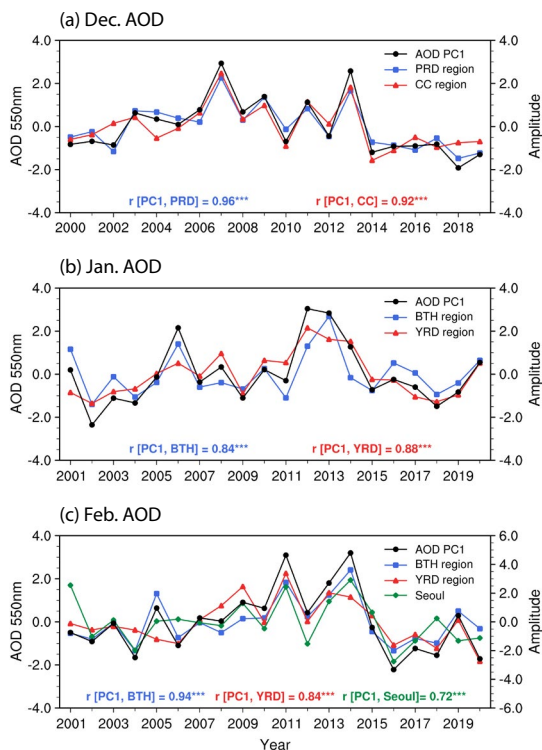


Fig. 5. Annual variations of the 1st principle components of wintertime aerosol optical depth (AOD PC1) and MODIS-AOD time series in selected cities for three months: (a) December, (b) January, and (c) February, during 2000~2020.

는 주요 상세 지역을 살펴보기 위하여 각 월(12월, 1월, 2월)별 PC1 시계열과 각 소지역(PRD 지역, CC 지역, BTH 지역, YRD 지역, 서울 지역 전체 변동)간 상관관계를 파악하였다. 이때 각 소지역은 PC1에 국한하지 않은 원시자료의 변동성(즉 월평균을 제외한 아노말리의 연변화 경향)을 그대로 사용하였다. 그림 5는 각 월(12월, 1월, 2월)별 AOD의 PC1과 소지역별 AOD 연변화와의 시계열 상관성을 함께 제시한 그림이다. 그 결과 동아시아의 12월 AOD의 PC1과 PRD, PC1과 CC 지역 연변화 경향과의 상관계수는 각각 약 0.96, 0.92로 상대적으로 높게 나타났으며, 1월에는 PC1과 BTH, PC1과 YRD 지역과의 상관계수는 각각 약 0.84, 0.88, 그리고 2월에는 PC1과 세 지역(BTH, YRD, 서울 지역) 간 상관계수가 약 0.94, 0.84, 0.72로

높게 나타났다. 따라서 통계적으로 볼 때, 12월 동아시아 AOD PC1의 변동성은 PRD 지역의 높은 미세먼지에 의해 유도되는 것으로 해석되며 1월에는 YRD 지역, 2월에는 BTH 지역의 영향을 가장 크게 받는 것으로 해석하였다. 관련 선행 연구에서도 이상의 세 지역(PRD, YRD, BTH)에서 연중 상당한 수준의 중국 미세먼지 농도를 보고한 바 있으며(Lee *et al.*, 2019; Zhong *et al.*, 2017; Li and Wang, 2015; Tie and Cao, 2009), 따라서 본 연구 결과는 겨울철, 특히 월별 고농도 사례 분석 시, 지역 간 상관성 연구에 중요한 참고자료가 될 수 있을 것으로 기대한다.

3.2 AOD와 주요 기후 요인과의 관계

겨울철 동아시아 미세먼지-몬순 관계는 여러 선행 연구에서 밝힌 바 있으며(Zou *et al.*, 2017), 동아시아 몬순 순환 강도에 의해 유도되는 북서풍의 세기에 의해 조절될 수 있다는 것이 주로 언급되었다. 선행 연구 결과를 구체적으로 요약하면, 동아시아 몬순 순환이 강화되면 겨울철 북서풍이 강화되고, 강화된 북서풍이 환기 효과(ventilation effect)를 더욱 활성화시켜서 결국 동아시아 대기오염물질이 감소될 수 있다고 보았다. 최근에는 이와 상반된 분석 결과도 보고되었는데, 몬순 순환이 강화되면 대류권 중층에서는 북서풍이 편서풍과 수렴하여 대류권 중하층으로 하강 운동을 유도하여, 대기경계층 상부에서의 entrainment가 약화되어 대기경계층 성장이 감소하거나, 혹은 대류권 하층에 역전층이 발생하여 지표 미세먼지가 축적되어 농도가 상승할 수도 있음도 보고된 바 있다(Wu *et al.*, 2018). 본 연구에서는 이러한 상반된 두 이론 중에서 동아시아에서는 어떤 기작이 우세한지 확인하기 위하여 동아시아 겨울 몬순의 강도와 연관된 몇 가지 기후인자로부터 미세먼지 조절 기작을 알아 보았다.

먼저 동아시아 월별 AOD의 PC1과 EAWMI의 상관성을 각 월별로 분석하였다. EAWMI의 계산은 선행 연구 결과를 그대로 이용하였다. 그림 6a는 2000년부터 2020년까지 평균한 300 hpa 동서 바람장을 나타

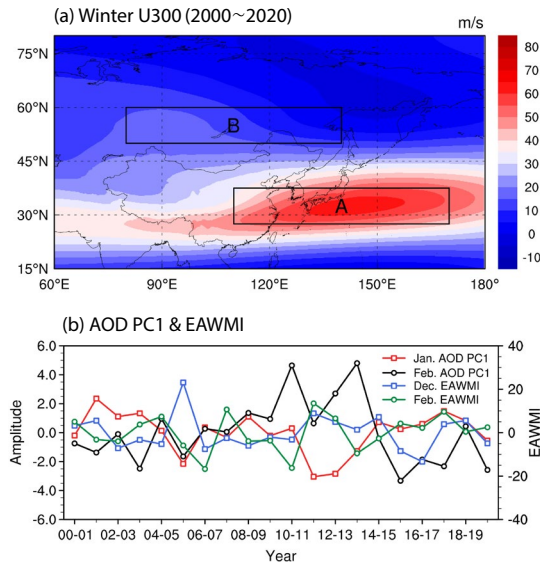


Fig. 6. (a) Distribution of wintertime 300 hPa zonal wind speeds in East Asia and (b) time series of the 1st principle component of wintertime aerosol optical depth (AOD PC1) and East Asian winter monsoon index (EAWMI).

낸 그림으로서, 본 연구에서는 시베리아 고기압의 변동성이 크게 나타나는 지역, 즉 그림 6a의 A (27.5°~37.5°N, 110°~170°E)와 B (50°~60°N, 80°~140°E) 두 지점에서의 300 hPa 동서 바람의 세기의 차이를 이용하여 EAWMI를 아래와 같이 최종 산출하였다 (Jhun and Lee, 2004).

$$EAWMI = U300_A - U300_B$$

여기서 U300은 300 hPa pressure level에서의 동서 바람 성분을 나타내며, 아래 첨자 A, B는 그림 6a의 사각형 영역을 각각 나타낸다. 이렇게 계산된 EAWMI와 겨울철 각 월별 AOD PC1과의 월별 상관관계는 표 1에 요약하였다. 그 결과 12월의 EAWMI와 1월의 AOD PC1, 그리고 2월의 EAWMI와 2월의 AOD PC1의 상관관계는 90% 이상 신뢰구간에서 유의미한 음(-)의 상관관계수($R = -0.43$, $R = -0.42$)를 보였으며, 따라서 EAWMI가 증가하는 경우, 즉 북서풍이 강해지면 미세먼지 농도가 감소함을 의미한다. 그림 7은 유의성이 확인되는 12월 EAWMI와 1월 AOD PC1, 그

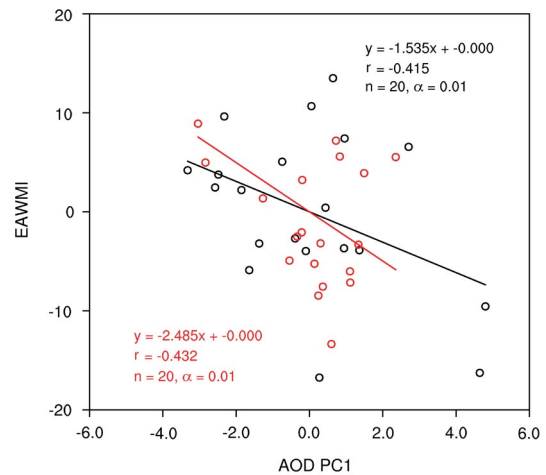


Fig. 7. Scatter diagram of 1st principle component of February aerosol optical depth (AOD PC1) versus February East Asian Winter Monsoon (EAWMI) (black), and January AOD PC1 versus December EAWMI (red).

리고 2월 EAWMI와 2월 AOD PC1의 음(-)의 상관관계를 나타낸 그림이며, 이에 따른 연 시계열 변화는 그림 6b에 나타내었다. 이 결과로 판단해 볼 때, 본 연구에서는 동아시아 겨울 몬순의 강화가 대류권 하층에 역전층을 생성시켜 지표 미세먼지 농도를 증가시키는 효과보다는 강화된 풍속에 의한 환기 효과가 더 효과적으로 오염물질을 조절한다는 선행 연구 결과 (Zou *et al.*, 2017)에 더 부합되는 것을 확인하였다.

이러한 동아시아 몬순 순환을 조절할 수 있는 하나의 요소는 기후변화에 따른 북극 온난화 과정으로 귀결된다. 즉, 기후변화에 따른 북극 온난화는 북극 해빙의 감소로 이어지며, 이는 동아시아 겨울철 몬순의 강도에 영향을 주는 주요 인자로 작용하며, 그 결과 겨울철 미세먼지 농도를 감소시킬 수 있음이 최근 연구에서 제안된 바 있다 (Francis *et al.*, 2017). 즉, 북극 해빙이 지구 온난화에 의해 감소하면 바다의 열이 대기 로 방출되어 극 제트기류가 약해지게 되며, 그 결과 동유럽과 러시아 서부의 제트기류 마루(ridge)가 강화되어 차가운 공기가 중앙아시아와 동아시아를 통과 하면서 동아시아 겨울 몬순이 강화되고, 그 결과 수평 환기 효과가 증가하여 미세먼지 농도를 줄이게 된다

(Francis *et al.*, 2017). 본 연구에서는 Francis *et al.* (2017)의 이론, 즉 북극 해빙이 동아시아 겨울 몬순을 통해 에어로졸 변동성에 미치는 인과관계를 살펴보기 위하여 가을~초겨울철(10월, 11월, 12월) SIE와 겨울철 동아시아 EAWMI 간의 상관성을 분석하였다.

먼저 본 연구에서 겨울철 EAWMI와 북극 해빙 농도, 즉 SIC와의 상관성을 조사한 결과, 선행 연구에서 밝혀진 바와 같이 동아시아 겨울철 AOD가 카라-바렌츠 해역의 SIC와 연관성이 가장 높은 것으로 나타났다(그림 8a). 이에 따라 카라-바렌츠 해역(그림 8a의

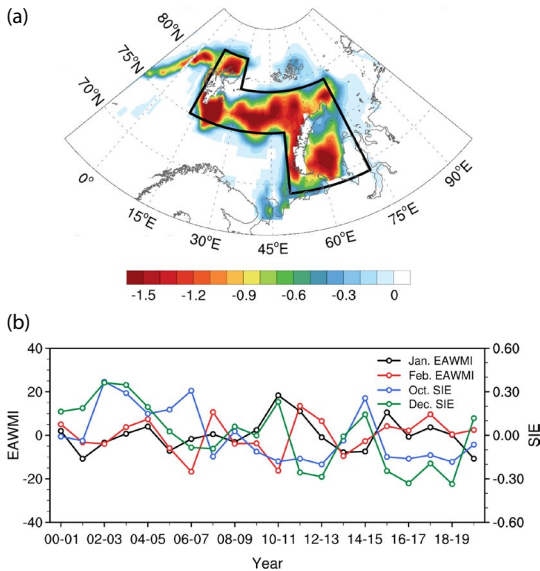


Fig. 8. (a) Regression map of East Asian winter monsoon index (EAWMI) versus Sea Ice Concentrations (SIC), and (b) time series of EAWMI and Barents-Kara Sea Ice Extent (SIE) for selected months.

검은색 영역)의 가을~초겨울철 SIC를 추출하여 SIE로 환산한 후 EAWMI와의 상관성을 계산하였다. 여기서 겨울철이 아닌 가을~초겨울철 SIC를 사용한 이유는 겨울철 SIC는 연변화가 거의 전무할 뿐 아니라 많은 선행 연구에서 도출한 결론, 즉 당해 직전 계절의 SIC 변화가 동아시아 해당 계절의 에어로졸 농도에 직접적으로 영향을 주는 종관 기상 패턴을 유도한다는 결론에 기반하였다(Li *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2019).

표 1에 과거 20년(2000년 12월~2020년 2월) 자료를 대상으로 EAWMI와 카라-바렌츠 해역의 SIE와의 상관관계를 월별로 요약하였다. 그 결과 카라-바렌츠 해역의 10월 SIE와 1월의 EAWMI, 10월의 SIE와 2월의 EAWMI, 그리고 12월의 SIE와 2월의 EAWMI에서 상관성이 90%와 85% 신뢰구간에서 유의미하게 나타났다으며, 각 지수 간 상관계수는 각각 -0.38, -0.34, -0.33으로서 모두 음(-)의 상관관계를 보였다(표 1). 이 결과는 카라-바렌츠 해역의 SIE가 감소하면(지구 온난화 가속으로 해빙이 손실되면), EAWMI는 모두 증가함을 의미한다(그림 9). 즉 북극 온난화로 인해 카라-바렌츠 해역의 해빙이 줄어들 경우, 바다에서 대기로의 열 유속(heat flux)이 증가하여 북극 온난화가 더 가속화되고 극 제트기류의 강도가 약해지면서 차가운 공기가 중앙아시아와 동아시아에 하강하고 그 결과 EAWMI가 증가한다는 연구 결과(Francis *et al.*, 2017)와 동일한 맥락으로 해석된다.

표 2는 최근 10년간, 즉 2010년부터 2020년까지의 카라-바렌츠 해역의 SIE와 EAWMI 간의 최근 상관관

Table 1. Correlation Coefficients between SIE vs. EAWMI, and EAWMI vs. AOD PC1 during 2000~2020.

SIE vs. EAWMI				EAWMI vs. AOD			
EAWMI	SIE			AOD	EAWMI		
	(Oct)	(Nov)	(Dec)		(Dec)	(Jan)	(Feb)
(Dec)	-0.01	0.04	-0.07	(Dec)	-0.02	-	-
(Jan)	-0.38*	-0.24	-0.19	(Jan)	-0.43*	-0.12	-
(Feb)	-0.34***	-0.25	-0.33**	(Feb)	0.03	0.21	-0.42*

Used are monthly-basis wintertime (Dec, Jan, and Feb) data, and the subscripts (***), (**), (*) and (**) denote the confidence levels of 99%, 95%, 90%, and 85%, respectively.

Table 2. The same as Table 1, except for 2010~2020.

SIE vs. EAWMI				EAWMI vs. AOD			
EAWM	SIE			AOD	EAWMI		
	(Oct)	(Nov)	(Dec)		(Dec)	(Jan)	(Feb)
(Dec)	0.26	0.29*	0.01	(Dec)	0.21	–	–
(Jan)	-0.54**	-0.12	-0.10	(Jan)	-0.34***	-0.01	–
(Feb)	-0.22	-0.42*	-0.68***	(Feb)	0.34***	0.15	-0.61***

Used are monthly-basis wintertime (Dec, Jan, and Feb) data, and the subscripts (***), (**), (*) and (**) denote the confidence levels of 99%, 95%, 90%, and 85%, respectively.

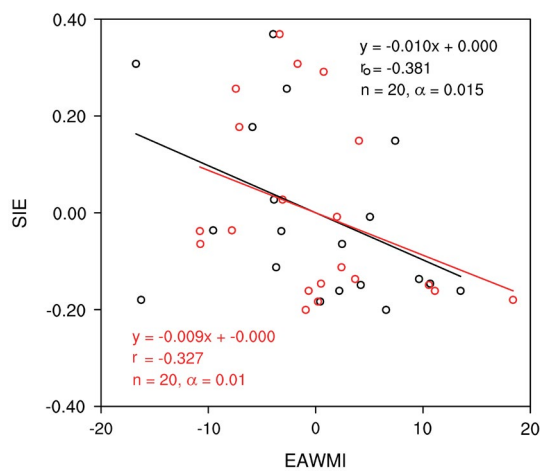


Fig. 9. Scatter diagram of January East Asian Winter Monsoon Index (EAWMI) versus October Barents-Kara Sea Ice Extent (SIE) (black), and February EAWMI versus December Barents-Kara SIE (red).

계를 계산한 결과이다. 20년 전체 기간 상관계수(표 1)와 비교해 보면, 이러한 SIE-EAWMI의 상관관계는 북극 온난화가 더 활발히 진행될수록, 즉 최근으로 올수록 이러한 음(-)의 상관 경향은 더 뚜렷해지는 것으로 나타났다(표 2). 특히 최근 10년간 10월의 SIE와 1월의 EAWMI, 그리고 12월의 SIE와 2월의 EAWMI 간의 음(-)의 상관계수는 더 높아진 것으로 확인하였고, 이 결과로부터 북극 온난화 현상에 따른 동아시아 겨울 몬순 조절 효과는 시간이 갈수록 더 강해지는 것으로 판단된다.

이상에서 겨울철 동아시아 AOD와 몇 가지 기후인자와의 관련성을 살펴보았다. 결론적으로 10월과 12

월의 카라-바렌츠 해역의 SIE가 1월과 2월의 EAWMI에 영향을 주게 되고 그 결과 2월의 AOD가 작아진다는 사실, 즉 북극 온난화가 가속되어 10월과 12월의 SIE가 감소하면, 극 제트기류의 강도가 약해져 1월과 2월의 동아시아 몬순 강도를 오히려 증가시키게 되고 이로 인해 북서풍속이 강화되어 동아시아의 AOD가 감소될 수 있다는 사실을 본 연구에서 확인하였고, 이러한 관계는 최근 더 뚜렷해지는 추세를 확인하였다.

본 연구의 결과는 통계분석을 토대로 기후변화-미세먼지 연관성을 연구한 것으로서, SIC-EAWMI 및 EAWMI-AOD와의 상관 계수가 0.38과 -0.43을 넘지 않으므로 두 기작을 연결하면 SIC-AOD와의 상관계수는 0.15를 넘지 않는다(표 1). 또한 일부 선행 연구에서는 SIE 지수와 동아시아 AOD와의 상관성이 연구자에 따라 상이한 결론이 도출되기도 하였다. 예를 들어, Kim *et al.* (2019)은 12월과 1월의 카라-바렌츠 해빙 감소가 우리나라 1월의 미세먼지를 증가시키는 결과를 보였으나, Mori *et al.* (2019)는 유라시아 지역의 경우 1월의 미세먼지 농도는 오히려 감소하는 결과를 보였다. 또 9월의 해빙 감소는 12월 및 1월의 해빙 감소에 비해 미세먼지 조절 경향이 반대로 확인되는 등, 해빙 감소가 시작되는 계절(혹은 월)에 따라 상이한 미세먼지 농도 조절 방향을 보이는 것으로 밝힌 바 있어서(Kim *et al.*, 2019), 향후 추가적인 연구는 계속 필요해 보인다. 또한 여러 선행 연구의 대상 영역이 동아시아가 아닌 유라시아 등 본 연구 대상 영역과 정확히 일치하지 않는다는 점도 유의할 사항이며, 따

라서 동아시아 지역에서의 상세 관측 정보의 확보와 이를 바탕으로 심도있는 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

또 하나의 기후변화와 연관된 흥미로운 사실은 우리나라 수도권 지표 풍속은 지속적으로 감소하고 있다는 사실이다(Kim *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2017). 약한 풍속 즉, 정체성 고기압의 잦은 출현은 필연적으로 기후변화와 연관될 수 있으며, 이는 기후변화에 의해 우리나라 미세먼지의 수평 확산에 불리한 조건이 되어 미세먼지의 초고농도 발생횟수를 증가시킬 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 우리나라 봄과 가을철 잦은 이동성 고저기압의 정체 횟수 증가 경향 감시와 기후변화와의 연관성 연구 또한 매우 필요할 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 기후-미세먼지의 연관성을 분석하기 위하여, 과거 20년간(2000년 2월부터 2020년 12월) 동아시아 AOD의 동아시아 에어로졸의 장기 변동 특성과 기후 요인과의 연관성 해석을 시도하였다. 먼저 AOD의 변동 특성을 살펴보기 위하여 EOF 분석을 수행한 후 주요 모드별 변동 특성과 추세를 분석하였고, 인위적 에어로졸 변동성 모드를 더 자세히 살펴보기 위하여 겨울철 각 월별 AOD의 변동 추세를 추가 분석하였고, 나아가 동아시아 겨울철 AOD 장기 변동성과 기후 요인과의 상관성을 분석하였다. 이때 기후 인자로는 카라-바렌츠 해역의 SIE와 EAWMI를 이용하였다.

먼저 20년간 동아시아 AOD의 전체 계절에 대한 EOF 분석 결과, 제1모드는 자연적 에어로졸 발생에 의한 영향이 우세하였고, 제2모드는 인위적 에어로졸의 영향이 두드러지는 것으로 나타났다. 제3모드는 중국의 YRD 지역을 중심으로, 그리고 제4모드는 바이오매스 연소 및 도시화로 인한 대기오염물질 배출과 관련된 것으로 해석하였다.

월별 AOD에 대한 EOF 분석에서 인위적 에어로졸의 피크가 공통적으로 나타나는 겨울철 AOD만을 월(12월, 1월, 2월)별로 추출하여 각 월평균 AOD에 대해 개별 EOF 분석을 수행한 결과, 12월의 경우 PRD 지역과 CC 지역에서, 1월과 2월에는 BTH 지역과 YRD 지역을 포함한 중국 동부 지역에서 강한 변동성이 나타났다. 겨울철 각 월별 시계열에서는 공통적으로 AOD가 증가하다가 2013년 전후를 기점으로 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타났고 이는 2013년 중국의 대기오염 방지 행동 계획에 의한 12, 1, 2월 미세먼지 농도 저감의 영향으로 판단하였다. 2008년 12월, 2009년 1월에 나타난 소폭의 미세먼지 감소 또한 베이징 올림픽 기간 전후에 시행된 중국의 대기오염물질 배출량 저감 정책 시행 기간과 일치함을 확인하였으며, 2003년, 2005년, 2007년, 2019년 2월의 약간의 에어로졸 증가 추세는 엘니뇨 현상과 동아시아 겨울 몬순 약화 현상에 기인한 것으로 해석하였다.

겨울철 각 월(12월, 1월, 2월)별 AOD PC1과 EAWMI의 상관성을 살펴본 결과 12월의 EAWMI와 1월의 제1 주성분 모드(PC1), 2월의 EAWMI와 2월의 PC1 간 상관관계가 10% 이하의 유의수준으로 유의미한 음(-)의 상관관계($R = -0.43$, $R = -0.42$)를 보였으며, 이는 동아시아 겨울 몬순의 강화로 북서풍속이 강화되어 활성화된 환기 효과에 의해 동아시아 미세먼지의 감소 효과가 유도된 것으로 판단하였다. 또한 카라-바렌츠 해역의 가을~초겨울철 SIE와 EAWMI 간의 상관관계를 각 월별로 계산해 본 결과 10월의 SIE와 1월의 EAWMI, 10월의 SIE와 2월의 EAWMI, 그리고 12월의 SIE와 2월의 EAWMI 간의 상관계수가 각각 -0.38 , -0.34 , -0.33 으로 유의미한 음(-)의 상관관계를 보였다. 이러한 결과는 북극 온난화 → 카라-바렌츠 해역 SIE 감소 → 바다에서 대기로의 열 유속(heat flux) 증가 → 북극 온난화 가속화 → 극 제트기류 약화 → 동아시아에 차가운 공기 하강 → 동아시아 겨울 몬순 강도 강화 → 북서풍속 강화 → 환기 효과의 강화로 이어지는 것으로 해석하였다. 특히 최근(2010년 이후) SIE와 EAWMI의 음(-)의 상관관계는 더욱 강화

되는 것을 확인하였고, 이를 통해 최근의 북극 온난화 현상에 따른 동아시아 겨울 몬순 조절 효과는 시간에 따라 더 뚜렷해질 것으로 전망된다.

이상에서 동아시아 AOD의 변동 특성과 미세먼지-기후요인과의 연관성, 특히 겨울철 미세먼지 조절 효과를 기후요인으로 설명하였다. 그러나 본 연구는 동아시아 AOD에 대한 인위적 대기오염물질 배출 효과에 따른 대기화학적 영향은 논의하지 않고 순수한 기후요인과의 관계를 통계적으로 조사한 결과이므로 북극 해빙-동아시아 겨울 몬순-동아시아 에어로졸 변동성의 관계를 정확히 식별하여 정량적으로 그 상관성을 연결하는 연구 결과는 아니다. 그럼에도 불구하고 북극 온난화가 급격히 진행된 2010년 이후 동아시아 에어로졸과 기후요인과의 상관성이 뚜렷해지고 있다는 점을 감안하면, 결국 지구 온난화가 심화되면서 기후변화 요인에 따른 동아시아 미세먼지의 시공간적 특성이 상당 부분 조절될 수 있음을 확인하였다. 따라서 우리나라 고농도 미세먼지 문제를 근본적으로 개선하기 위하여 자체 배출량 개선 혹은 동아시아 주변 지역과의 기여도 분석과 병행하여, 기상·기후변화에 따른 영향 연구 또한 매우 심도있게 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2020R1A6A1A03044834)입니다. 본 논문을 세심하게 심사해 주신 심사위원분들께 감사드립니다.

References

- Bei, N., Zhao, L., Wu, J., Li, X., Feng, T., Li, G. (2018) Impacts of sea-land and mountain-valley circulations on the air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH): A case study, *Environmental Pollution*, 234, 429-438. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.066>
- Cai, W., Li, K., Liao, H., Wang, H., Wu, L. (2017) Weather conditions conducive to Beijing severe haze more frequent under climate change, *Nature Climate Change*, 7(4), 257-262. <https://doi.org/10.1038/nclimate3249>
- Chan, C.K., Yao, X. (2008) Air pollution in mega cities in China, *Atmospheric Environment*, 42(1), 1-42. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.09.003>
- Francis, J.A., Vavrus, S.J., Cohen, J. (2017) Amplified Arctic warming and mid latitude weather: new perspectives on emerging connections, *WIREs Climate Change*, 8(5), e474. <https://doi.org/10.1002/wcc.474>
- Fu, G.Q., Xu, W.Y., Yang, R.F., Li, J.B., Zhao, C.S. (2014) The distribution and trends of fog and haze in the North China Plain over the past 30 years, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(21), 11949-11958. <https://doi.org/10.5194/acp-14-11949-2014>
- Han, L., Zhou, W., Li, W., Li, L. (2014) Impact of urbanization level on urban air quality: A case of fine particles (PM_{2.5}) in Chinese cities, *Environmental Pollution*, 194, 163-170. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.07.022>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., Thépaut, J.N. (2020) The ERA5 global reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hong, C., Zhang, Q., Zhang, Y., Davis, S.J., Tong, D., Zheng, Y., Liu, Z., Guan, D., He, K., Schellnhuber, H.J. (2019) Impacts of climate change on future air quality and human health in China, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 116(35), 17193-17200. <https://doi.org/10.1073/pnas.1812881116>
- Jhun, J.-G., Lee, E.-J. (2004) A new East Asian winter monsoon index and associated characteristics of the winter monsoon, *Journal of Climate*, 17(4), 711-726. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<0711:ANEAWM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<0711:ANEAWM>2.0.CO;2)
- Kauffmann, C., Saffirio, C. (2020) Study of International Regulatory Co-operation (IRC) arrangements for air quality: The cases of the Convention on Long-Range Trans-

- boundary Air Pollution, the Canada-United States Air Quality Agreement, and co-operation in North East Asia. <https://doi.org/10.1787/dc34d5e3-en>
- Kheirbek, I., Wheeler, K., Walters, S., Kass, D., Matte, T. (2013) PM_{2.5} and ozone health impacts and disparities in New York City: sensitivity to spatial and temporal resolution, *Air Quality, Atmosphere Health*, 6(2), 473-486. <https://doi.org/10.1007/s11869-012-0185-4>
- Kim, H.-C., Kim, S., Kim, B.-U., Jin, C.-S., Hong, S., Park, R., Son, S.-W., Bae, C., Bae, M.-A., Song, C.-K., Stein, A. (2017) Recent increase of surface particulate matter concentrations in the Seoul Metropolitan Area, Korea, *Scientific Reports*, 7, 4710. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05092-8>
- Kim, J.-H., Kim, M.-K., Ho, C.-H., Park, R.J., Kim, M.J., Lim, J., Kim, S.-J., Song, C.-K. (2019) Possible link between arctic sea ice and January PM₁₀ concentrations in South Korea, *Atmosphere*, 10(10), 619. <https://doi.org/10.3390/atmos10100619>
- Lee, H.-J., Jeong, Y.-M., Kim, S.-T., Lee, W.-S. (2018) Atmospheric Circulation Patterns Associated with Particulate Matter over South Korea and Their Future Projection, *Journal of Climate Change Research*, 9(4), 423-433. <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2018.9.4.423>
- Lee, S., Kim, J., Choi, M., Hong, J., Lim, H., Eck, T.F., Holben, B.N., Ahn, J.-Y., Kim, J., Koo, J.-H. (2019) Analysis of long-range transboundary transport (LRTT) effect on Korean aerosol pollution during the KORUS-AQ campaign, *Atmospheric Environment*, 204, 53-67. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.02.020>
- Li, F., Wan, X., Wang, H., Orsolini, Y.J., Cong, Z., Gao, Y., Kang, S. (2020) Arctic sea-ice loss intensifies aerosol transport to the Tibetan Plateau, *Nature Climate Change*, 10(11), 1037-1044. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0881-2>
- Li, L., Wang, Y. (2015) What drives the aerosol distribution in Guangdong - the most developed province in Southern China?, *Scientific Reports*, 4(1), 5972. <https://doi.org/10.1038/srep05972>
- Liu, X., Yan, L., Yang, P., Yin, Z.-Y., North, G.R. (2011) Influence of Indian Summer Monsoon on Aerosol Loading in East Asia, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(3), 523-533. <https://doi.org/10.1175/2010jamc2414.1>
- Long, X., Tie, X., Cao, J., Huang, R., Feng, T., Li, N., Zhao, S., Tian, J., Li, G., Zhang, Q. (2016) Impact of crop field burning and mountains on heavy haze in the North China Plain: a case study, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(15), 9675-9691. <https://doi.org/10.5194/acp-16-9675-2016>
- Mar, T.F., Ito, K., Koenig, J.Q., Larson, T.V., Eatough, D.J., Henry, R.C., Kim, E., Laden, F., Lall, R., Neas, L., Stölzel, M., Paatero, P., Hopke, P.K., Thurston, G.D. (2006) PM source apportionment and health effects. 3. Investigation of inter-method variations in associations between estimated source contributions of PM_{2.5} and daily mortality in Phoenix, AZ, *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 16(4), 311-320. <https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500465>
- Mori, M., Kosaka, Y., Watanabe, M., Nakamura, H., Kimoto, M. (2019) A reconciled estimate of the influence of Arctic sea-ice loss on recent Eurasian cooling, *Nature Climate Change*, 9, 123-129. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0379-3>
- Mun, J., Jeon, W., Lee, H.W. (2020) Impact of Different Meteorological Initializations on WRF Simulation During the KORUS-AQ Campaign, *Journal of Environmental Science International*, 29(1), 33-44. <https://doi.org/10.5322/JESI.2020.29.1.33>
- Platnick, S., King, M., Meyer, K., Wind, G., Amarasinghe, N., Marchant, B., Ridgway, B. (2015) MODIS Atmosphere L3 Monthly Product, NASA MODIS Adaptive Processing System, Goddard Space Flight Center, USA. https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD08_M3.061
- Remer, L.A., Kaufman, Y.J., Tanre, D., Mattoo, S., Chu, D.A., Martins, J.V., Li, R.R., Ichoku, C., Levy, R.C., Kleidman, R.G., Eck, T.F., Vermote, E., Holben, B.N. (2005) The MODIS Aerosol Algorithm, Products, and Validation, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 62(4), 947-973. <https://doi.org/10.1175/jas3385.1>
- Shen, Z.X., Cao, J.J., Arimoto, R., Zhang, R.J., Jie, D.M., Liu, S.X., Zhu, C.S. (2007) Chemical composition and source characterization of spring aerosol over Horqin sand land in northeastern China, *Journal of Geophysical Research*, 112(D14). <https://doi.org/10.1029/2006jd007991>
- Sun, J., Zhang, M., Liu, T. (2001) Spatial and temporal characteristics of dust storms in China and its surrounding regions, 1960-1999: Relations to source area and climate, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D10), 10325-10333. <https://doi.org/10.1029/2000jd900665>
- Tie, X., Cao, J. (2009) Aerosol pollution in China: Present and future impact on environment, *Particulate*, 7(6), 426-431. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2009.09.003>
- Titchner, H.A., Rayner, N.A. (2014) The Met Office Hadley Centre sea ice and sea surface temperature data set, version 2: 1. Sea ice concentrations, *Journal of Geophysical*

- Research: Atmospheres, 119, 2864-2889. <http://doi.org/10.1002/2013JD020316>
- Woo, J.-H., Bu, C., Kim, J., Ghim, Y.S., Kim, Y. (2018) Analysis of regional and inter-annual changes of air pollutants emissions in China, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(1), 87-100. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.1.087>
- Wu, J., Zha, J., Zhao, D. (2017) Evaluating the effects of land use and cover change on the decrease of surface wind speed over China in recent 30 years using a statistical downscaling method, *Climate Dynamics*, 48, 131-149. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3065-z>
- Wu, J., Bei, N., Li, X., Cao, J., Feng, T., Wang, Y., Tie, X., Li, G. (2018) Widespread air pollutants of the North China Plain during the Asian summer monsoon season: a case study, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(12), 8491-8504. <https://doi.org/10.5194/acp-18-8491-2018>
- Xu, L.-H., Kim, H.-T., Namkung, J. (2018) The Status of Air Pollutant Emissions and Policy in China, *Journal of Energy & Climate Change*, 13(1), 23-32. <https://data.doi.or.kr/10.22728/jecc.2018.13.1.023>
- Yin, Z., Wang, H. (2017) Role of atmospheric circulations in haze pollution in December 2016, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(18), 11673-11681. <https://doi.org/10.5194/acp-17-11673-2017>
- Yu, X., Wang, Z., Zhang, H., Zhao, S. (2019) Impacts of different types and intensities of El Niño events on winter aerosols over China, *Science of The Total Environment*, 655, 766-780. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.090>
- Zhang, X., Zhong, J., Wang, J., Wang, Y., Liu, Y. (2018) The inter-decadal worsening of weather conditions affecting aerosol pollution in the Beijing area in relation to climate warming, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(8), 5991-5999. <https://doi.org/10.5194/acp-18-5991-2018>
- Zhang, X.Y., Arimoto, R., An, Z.S. (1997) Dust emission from Chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D23), 28041-28047. <https://doi.org/10.1029/97jd02300>
- Zhao, H., Che, H., Zhang, L., Gui, K., Ma, Y., Wang, Y., Wang, H., Zheng, Y., Zhang, X. (2020) How aerosol transport from the North China plain contributes to air quality in northeast China, *Science of The Total Environment*, 738, 139555. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139555>
- Zhao, S., Zhang, H., Xie, B. (2018a) The effects of El Niño - Southern Oscillation on the winter haze pollution of China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(3), 1863-1877. <https://doi.org/10.5194/acp-18-1863-2018>
- Zhao, S., Feng, T., Tie, X., Long, X., Li, G., Cao, J., Zhou, W., An, Z. (2018b) Impact of climate change on Siberian High and wintertime air pollution in China in past two decades, *Earth's Future*, 6(2), 118-133. <https://doi.org/10.1002/2017EF000682>
- Zhong, S., Qian, Y., Zhao, C., Leung, R., Wang, H., Yang, B., Fan, J., Yan, H., Yang, X.-Q., Liu, D. (2017) Urbanization-induced urban heat island and aerosol effects on climate extremes in the Yangtze River Delta region of China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(8), 5439-5457. <https://doi.org/10.5194/acp-17-5439-2017>
- Zou, Y., Wang, Y., Zhang, Y., Koo, J.-H. (2017) Arctic sea ice, Eurasia snow, and extreme winter haze in China, *Science Advances*, 3(3), e1602751. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5351983/pdf/1602751.pdf>

Authors Information

이나미 (부산대학교 대기환경과학과 대학원 석사과정)
김철희 (부산대학교 대기환경과학과 교수)