



논문

남한지역 biomass burning 배출의 장기추세 분석과 에어로졸 및 CO 농도에 미치는 영향 연구

Long-term Trend Analysis in Biomass Burning Emissions and Their Impacts on Aerosols and CO Concentrations in South Korea

선대현¹⁾, 송상근^{1),2),*}, 조성빈¹⁾, 문수환³⁾

¹⁾제주대학교 지구해양융합학부 지구해양전공, ²⁾제주대학교 지구해양과학과, ³⁾국립기상과학원 기상응용연구부

Dae-Hyun Sun¹⁾, Sang-Keun Song^{1),2),*}, Seong-Bin Cho¹⁾, Soo-Hwan Moon³⁾

¹⁾Faculty of Earth and Marine Convergence/Earth and Marine Science Major, Jeju National University, Jeju 63243, Republic of Korea

²⁾Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju 63243, Republic of Korea

³⁾Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju 63568, Republic of Korea

접수일 2023년 5월 23일
수정일 2023년 6월 1일
채택일 2023년 6월 2일

Received 23 May 2023
Revised 1 June 2023
Accepted 2 June 2023

*Corresponding author
Tel : +82-(0)64-754-3431
E-mail : songsk@jejunu.ac.kr

Abstract The long-term trends in biomass burning (BB) and its emissions and wildfires in South Korea over the past 20 years (2002~2021) were analyzed using the Fire INventory from National Center for Atmospheric Research (FINN) and statistical data provided by the National Institute of Forest Science (NIFoS), respectively. The contributions of BB emissions to aerosol and CO concentrations were also assessed during the severe wildfire event (near Uljin, March 4~13, 2022) using the Community Multi-scale Air Quality (CMAQ) modeling system with brute-force method (BFM). The long-term analysis of BB and wildfire occurrences showed statistically upward trends during the study period, whereas the air pollutant emissions (CO, PM₁₀, PM_{2.5}, OC, and BC) due to the FINN BB showed no significant trends. In addition, the mean contributions of BB emissions to CO and aerosols (PM₁₀, PM_{2.5}, and secondary organic aerosol (SOA)) reached approximately 10%, 13%, 19%, and 29%, respectively, within the main influence area of wildfires. Largest contributions of BB emissions to their concentrations (77%, 68%, 78%, and 57%) were predicted at areas (e.g., Uljin) closest to the fire hotspot. As a result of vertical analysis, the increased PM_{2.5} concentration due to BB emissions was likely to be moved to inland regions owing to meteorological conditions, such as daytime sea breezes and planetary boundary layer.

Key words: Biomass burning emissions, Long-term trend, FINN inventory, Transport, Aerosol, CO

1. 서론

일반적으로, 바이오매스 연소 (biomass burning, BB)는 유기물, 농작물의 잔재, 산림, 초원 등이 자연적 발화 또는 인간활동에 의한 인위적 발화로 연소되는 것을 의미하며, 이 중 산불에 의한 식생 연소가 상당한 부분을 차지하고 있다(Kim, 2011). BB는 연소과정에서 주로 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄) 등 온실가스

뿐만 아니라, 많은 양의 입자상(미세먼지(PM)) 및 가스상 오염물질(일산화탄소(CO), 질소산화물(NO_x) 등)을 대기로 배출한다(Chan, 2017; Souri *et al.*, 2017; Lee, 2012; Streets *et al.*, 2003). 이러한 오염물질은 대기 중 복사 및 구름 형성의 변화를 통해 대기의 화학조성을 직접적으로 변화시킬 수 있으며, 장거리 수송을 통해 지역에 국한되지 않고 멀리 떨어진 지역의 기후 변화나 인간 건강에도 영향을 미칠 수 있다(Van der

Werf *et al.*, 2010; Duncan *et al.*, 2003; Andreae and Merlet, 2001; Galanter *et al.*, 2000).

BB의 장기추세 및 이들의 배출물질이 대기환경에 미치는 영향 연구는 다각적인(배출량, 기상조건 등) 측면에서 많은 연구가 수행되어왔다(Kelly *et al.*, 2018; Bhardwaj *et al.*, 2016; Lee, 2012; Sung *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2010). Sung *et al.* (2010)은 1991~2008년 동안 한반도 내에서 발생한 산불의 횟수는 큰 경년 변동성을 보였으나 점차 증가하는 추세를 밝힌 바 있다. Zhang *et al.* (2010)은 2007년 미국 남동부에서 발생한 BB가 PM_{2.5} 농도에 미치는 기여도는 연평균 13% 정도이며, 특히 겨울과 봄에 각각 27%, 15%로 높게 나타났음을 밝혔다. 또한 Kelly *et al.* (2018)에 의하면, 2000년에 남아메리카 열대림지역 및 아프리카 콩고지역에서 발생한 BB가 이 지역의 연평균 SOA (secondary organic aerosol) 농도를 약 1~3 $\mu\text{g m}^{-3}$ 정도 증가시켰다는 연구 결과가 있었다. 이외에도, 위성자료를 이용해 BB가 지역 대기질에 미치는 영향을 분석한 결과, 약 10년간 동북아시아의 BB 발생횟수와 연평균 AOD (aerosol optical depth)와의 상관성이 매우 높게 ($r=0.89$) 나타나 BB 배출이 대기환경에 미치는 직접적인 영향을 확인할 수 있었다(Lee, 2012).

대기 중 BB에 의한 대기오염 현황 파악, 영향 및 원인을 명확히 규명하기 위해서는, BB 발생 전후의 기상 특성 분석과 오염물질(CO, PM 등)의 정확한 배출량 산정이 매우 중요하며, 이에 따른 효율적인 대기질 평가가 수행되어야 한다. 그러나, 기상-대기질 모델링을 통해 BB에 의해 배출된 대기오염물질의 수송, 영향 및 기여도를 정확하게 분석하는 것은 다양한 관측망 부족, 배출량 및 수치모의의 불확실성, 복잡한 비선형(nonlinear) 화학반응 등 여러 가지 오차 또는 불확실성을 포함하고 있어 매우 복잡하고 어렵다(Cho *et al.*, 2023; Garcia-Menendez *et al.*, 2014; Pun *et al.*, 2006). 이러한 문제 중 배출량 산정의 불확실성은 대기질 모의 결과에 직접적으로 영향을 주는 요소 중 하나로, BB가 지역 대기질에 미치는 영향을 보다 정확하게 평가하기 위해서는 고해상도의 BB 배출량 입력자료가

필요하다. 많은 선행 연구에서 위성 관측자료 기반의 FINN (Fire INventoty from NCAR), GFED (Global Fire Emissions Database), 그리고 GFAS (Global Fire Assimilation System) 자료가 대기질 모델의 BB 배출 입력자료로 사용되어왔다(Vongruang *et al.*, 2017; Kaiser *et al.*, 2012; Wiedinmyer *et al.*, 2011; Giglio *et al.*, 2010; Van der Werf *et al.*, 2010).

BB에 의한 대기질 영향 평가에 있어 배출량 외에도 대상지역의 기상조건(대기확산, 장거리 수송 등)은 매우 중요하며, 여러 선행 연구에서 BB 배출물질의 장거리 수송이 풍하측 지역의 대기오염물질 농도 상승에 직접적인 영향을 미친다는 것을 밝혔다(Lin *et al.*, 2023; Kim *et al.*, 2022; Lee *et al.*, 2022; Park *et al.*, 2009). 과거 2003년 4~6월에 발생한 시베리아의 극심한 BB가 오존(O₃) 농도에 미치는 영향을 분석한 결과, 대상지역인 시베리아에서는 최고농도 24 ppb, 풍하측 지역인 한반도, 일본, 만주에서는 3~10 ppb 정도의 농도 증가가 나타났다(Park *et al.*, 2009). 또한 2020년 4월 중국과 몽골지역의 BB에 의한 오염물질이 장거리 수송되어 우리나라 남한 전역의 PM₁₀ 농도(일평균)를 최대 40~80%까지 증가시킨 연구 결과가 발표되었다(Lee *et al.*, 2022). 최근 Lin *et al.* (2023)에 따르면, 2018년 3월 인도차이나반도에서 발생한 BB 배출물질이 장거리 수송되어 중국 남부지역(상층 2~4 km)의 대기오염물질(CO, PM_{2.5}, O₃) 농도를 각각 32%, 46%, 34% 정도 증가시켰다. 이외에도, 우리나라에서 발생한 산불(2020년 안동지역)이 주변 O₃ 농도를 미미하게(약 1.3 ppb) 증가시켰음을 보여주었다(Kim *et al.*, 2022).

앞서 언급하였듯이, 기상-대기질 모델을 이용하여 BB에 의한 오염물질이 주변 대기질에 미치는 영향에 관한 연구들은 많이 수행되어왔다. 하지만 대부분의 많은 연구는 국외에서 발생한 대규모 산불이 지역 대기질 및 기후변화에 미치는 영향을 분석한 내용이었다. 한편, 우리나라에서는 최근 20년간(2002~2021년) 총 9,080회의 산불 발생과 연간 약 1,130 ha의 면적이 소실되는 등 엄청난 피해가 있음에도 불구하고, 현재

까지 국내에서 발생한 산불 발생의 장기추세 및 BB 배출(산불 포함)이 주변 대기질에 미치는 영향에 관한 연구는 거의 수행된 바 없다(Kim *et al.*, 2022). 이외에도, BB 배출량과 오염물질(예, $PM_{2.5}$) 농도의 비선형적(nonlinear) 2차 생성반응으로 인해 지역 대기질의 특성 변화를 정확하게 이해하는 데 어려움이 있어 이와 관련된 다양한 관측 및 고해상도 수치모의 연구가 요구되는 실정이다. 이에 기초연구로서, 먼저 최근 20년간(2002~2021년) 남한지역의 BB 배출 및 산불 발생에 관한 장기변화 추세를 살펴보았다. 또한 최근 10년 이내 발생한 가장 큰 규모의 올진 산불 사례를 대상으로 고해상도의 BB 배출량을 구축하고, 이를 기상-대기질 모델에 적용하여 지역 에어로졸(예, PM_{10} , $PM_{2.5}$) 및 CO 농도에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 대상지역, 자료 및 방법

연구 대상지역인 우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸여 있으며, 전 국토 면적의 70% 이상이 산으로 이루어져 있다. 대부분 단순림의 밀도가 높아 BB 및 산불의 확산에 취약한 지리·지형적 특징을 지닌다(Song and Park, 2021). 또한 우리나라는 동북아시아 대규모 배출원(예, 중국)의 풍하측에 위치하고 있으므로, 외부로부터 유입(수송)되는 오염물질이 국내 대기환경에 큰 영향을 미칠 수 있다(Oh *et al.*, 2015; Lee *et al.*, 2013; Song *et al.*, 2010). 본 연구에서는 최근 20년간(2002~2021년) 우리나라에서 발생한 BB와 산불의 장기변화 추세를 분석하기 위해, FINN 배출목록을 통한 BB 발생횟수(발생일수), 연소면적 그리고 BB에 의한 대기오염물질의 배출량 자료를 이용하였다. 또한 통계청(Korean Statistical Information Service, KOSIS) 및 국립산림과학원(National Institute of Forest Science, NIFoS)에서 제공하는 산불 발생일수(NIFoS, 2022)와 산불 발생현황 자료를 이용하였다.

전체 연구 기간(2002~2021년) 동안 우리나라 남한

지역에서의 BB와 산불 발생 및 연소면적의 연평균 증가율을 산정하기 위하여 비매개변수적 통계 방법인 Mann-Kendall (M-K) 검정법을 적용하였다(Kendall, 1975; Mann, 1945). M-K 검정은 증가와 감소 추세를 반복하는 시계열자료의 경향성을 분석하기 위해 주로 이용되는 방법이며, 선형 추세의 기울기(slope, 평균 증가율)를 추정하기 위해 널리 사용되는 방법이다(Song *et al.*, 2019; Anttila and Tuovinen, 2010; Carslaw, 2005). 다른 통계적 검정 방법과 달리, 표본자료의 특성에 민감하지 않고 결측치를 포함한 자료에 대해서도 적용이 가능한 장점이 있다. 또한 M-K 검정에서는 P-value 값이 유의수준 α 이하일 때 연평균 증가율의 경향성이 통계적으로 유의하다는 것을 의미하며, 본 연구에서는 5% 유의수준을 이용하였다.

본 연구에서는 최근 발생한 올진 산불 사례(2022년 3월 4일~13일)를 대상으로 BB 배출이 에어로졸 및 CO 농도에 미치는 영향을 상세하게 분석하기 위해, 남한지역에서 각각 12개의 대기질 및 기상 관측지점을 선정하였다(그림 1). 각 기상 및 대기질 관측지점은 보다 정확한 자료 해석을 위해 대부분 해발고도 약 100 m 내외에 위치하며 주위에 산맥의 영향을 최대한 적게 받는 지점으로 선정하였다. 대기질 관측자료는 환경부 도시대기측정망의 시간별 대기오염물질(CO , PM_{10} , $PM_{2.5}$ 등) 농도 자료를 이용하였다. 일반적으로 지역 대기질은 주변 기상조건에 의해 크게 좌우되므로 대상지역 대기오염물질 농도의 시·공간적 특성을 보다 정확하게 해석하기 위해, 기상 관측지점을 대기질 관측지점과 최대한 가깝고 장애물의 영향을 적게 받는 곳으로 선정하였다(Cho *et al.*, 2021; Song *et al.*, 2014). 시간별 기상 관측자료(기온, 풍속, 상대습도)는 종관기상관측시스템 ASOS (Automated Synoptic Observing System) 8개 지점과 방재기상관측소 AWS (Automated Weather System) 4개 지점으로부터 수집되었다. 특히, 산불 발화점(37.03°E, 129.30°N, 해발 138 m)에서 가장 가까운 올진 도시대기측정망(U) 및 올진 ASOS (UL) 지점과 발화점과 멀리 떨어진(남서쪽으로 약 90 km) 의성 도시대기측정망(ES) 및 의

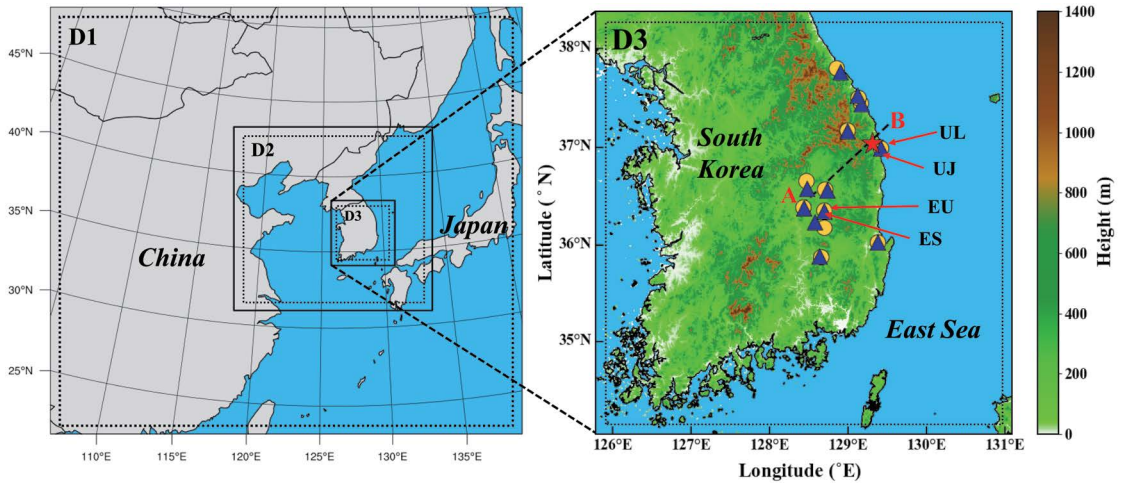


Fig. 1. Nested model domains for WRF (solid frame) and CMAQ (dotted frame) simulations and the geographical locations of 12 sites for air quality (triangles), 12 sites for meteorological variables (circles), and the fire hotspot (red star). A-B (black dotted) in D3 indicates the vertical cross-sectional line.

성 ASOS (EU) 지점을 대상으로 분석을 수행하였다. UJ 및 UL 지점은 서로 약 1 km 떨어진 거리에 있고 동해안에 인접하면서 내륙으로는 서쪽방향으로 태백산맥이 위치하고 있다. ES 및 EU 지점 또한 서로 가까운 (1 km 이내) 거리에 있고 산맥의 영향을 덜 받으며, 낮에 해풍 발생 시(연구 기간 동안 북동풍 계열 약 20%) 발화점의 풍하측에 위치하고 있어 인근 내륙의 다른 관측지점에 비해 상대적으로 산불의 영향을 크게 받은 지점이다.

수치모의를 위한 올진 산불 사례(2022년 3월 4일~13일)는 최근 10년 이내 발생한 산불 중 가장 큰 시·공간적 규모(14,140 ha 소실, 213시간 지속)의 사례로, 산불이 발생한 10일 동안 발화점 인근 UJ 지점에서 CO, PM₁₀, PM_{2.5}의 일평균(및 1시간) 최고농도는 각각 1.3 ppm (3.8 ppm), 247 $\mu\text{g m}^{-3}$ (821 $\mu\text{g m}^{-3}$), 99 $\mu\text{g m}^{-3}$ (385 $\mu\text{g m}^{-3}$)을 기록하였다. 이러한 농도는 산불 발생 이전의 10일(2022년 2월 23일~3월 3일)에 비해 약 3.6~6.5배 높은 수치이며, 특히 PM₁₀과 PM_{2.5}는 2022년 대기환경기준치(24시간 평균 100 $\mu\text{g m}^{-3}$ 과 35 $\mu\text{g m}^{-3}$)의 약 4.9배와 2.8배를 기록하였다. 본 연구에서는 이러한 극심한 산불 사례에 대해 고해상도 FINN

배출량을 적용하여 기상-대기질 수치모의를 수행하였으며, 이용된 기상 및 대기질 모델의 상세한 구성에 대해서는 2.2절에 제시하였다. 또한 대기질 모델의 BFM (Brute Force Method) 기법을 적용하여 산불 배출이 지역 대기질(PM₁₀, PM_{2.5}, CO)에 미치는 기여도를 평가하기 위해, 산불에 의한 대기오염물질 배출량을 적용한 실험(Total)과 적용하지 않은 실험(Base) 사이의 농도 차이를 비교하였다(Total 농도-Base 농도). BFM 기법은 많은 선행 연구에서 널리 사용되고 있는 방법으로서, 다양한 배출량 조절 실험을 통해 오염물질에 미치는 기여도(%)를 쉽게 확인할 수 있는 장점이 있다(Baek *et al.*, 2022; Song *et al.*, 2022; Nam *et al.*, 2019; Uranishi *et al.*, 2019). 이외에도, 모델의 예측 정확도를 평가하기 위해, 수치모의 기간 동안 각각 12개 관측지점의 대기오염물질 농도와 기상요소에 대해 통계적 분석을 수행하였다(그림 1의 관측지점). 즉, 대기오염물질 농도와 기상요소의 각 관측값과 모델값에 대해 IOA (index of agreement), RMSE (root mean square error) 및 MBE (mean bias error)를 계산하여 분석에 이용하였다.

2.2 모델 구성 및 입력자료

본 연구에 이용된 기상 및 대기질 모델은 각각 미국 NCAR (National Center of Atmospheric Research)와 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)에서 공동 개발한 WRF (Weather Research and Forecasting, version 3.8) 모델 및 미국 EPA (Environmental Protection Agency)에서 개발한 CMAQ (Community Multiscale Air Quality, version 5.3.2) 모델이다. WRF 모델은 완전 압축성 비정수계 (fully compressible non-hydrostatic) 방정식을 이용한 모델로서, Arakawa-C 격자체계를 수평 격자로, Eulerian 질량 좌표계를 연직 격자로 사용한다 (Skamarock and Klemp, 2008). CMAQ 모델은 대기오염물질의 수송, 침적, 이류, 확산, 혼합 등의 물리·화학적 과정을 관련 모듈을 통해 다양한 규모에서 시간별로 모의할 수 있는 3차원 (Eulerian) 광화학 수송모델이다 (Byun and Schere, 2006; Byun and Ching, 1999).

WRF 모델의 수치모의 영역은 총 3개의 영역 즉, 동

아시아(D1, 수평해상도 27 km), 한반도(D2, 9 km), 남한영역(D3, 3 km)으로 구성하였으며(그림 1), 양방향 상호 등지 격자계(two-way interacting nested grid system)를 적용하여 모델의 외부와 내부 영역 간의 feedback이 가능하게 하였다. 또한 WRF 기상장 경계에서의 오차를 줄이기 위해, MCIP (Meteorological Chemistry Interface Processor, version 5.1) 과정에서 동서남북 각각 3개 격자를 제거한 후 CMAQ 모델의 입력자료 형태로 변환하였다. 본 연구에 이용된 WRF와 CMAQ 모델의 연직 층은 각각 30개와 29개로 설정하였으며, 상세한 격자 정보 및 물리적 옵션은 표 1에 제시하였다. 이외에도, WRF 모델의 초기 및 경계 조건은 NCEP GDAS/FNL (Global Data Assimilation System/Final analyses) 0.25°×0.25° 해상도의 재분석 자료(6시간 간격)를 이용하였다. 토지피복과 지형고도는 MODIS-IGBP (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer-International Geosphere Biosphere Program) 21 Category land-use 30초 자료 (Friedl *et al.*,

Table 1. Details of the grids and physical options used in the WRF and CMAQ models.

[A] WRF model

	D1	D2	D3
Horizontal grid	127 × 115	160 × 148	154 × 157
Horizontal resolution (km)	27	9	3
Vertical layers	30	30	30
Initial & boundary conditions	NCEP GDAS/FNL 0.25°		
Microphysics	WSM3 for D1 (Hong <i>et al.</i> , 2004)	WDM6 for D2~D3 (Lim and Hong, 2010)	
Radiation (long/short wave)	RRTM (Mlawer <i>et al.</i> , 1997)/Dudhia (Dudhia, 1989)		
Planetary boundary layer	YSU (Hong <i>et al.</i> , 2006)		
Land surface	Noah LSM (Chen and Dudhia, 2001)		

[B] CMAQ model

	D1	D2	D3
Horizontal grid	124 × 112	157 × 145	151 × 154
Horizontal resolution (km)	27	9	3
Vertical layers	29	29	29
Chemical mechanism	Cb6r3_aq		
Aerosol module	AERO7		
Gas-phase chemistry	Euler Backward Iterative (EBI) solver		
3-D advection	WRF_CONS		
Diffusion (horizontal/vertical)	Multiscale/ACM2_M3Dry		

2010)와 GMTED 2010 (Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010) 30초 자료 (Danielson and Gesch, 2011)를 각각 사용하였다. 본 연구에서 CMAQ 모델링을 위해 이용한 초기 및 경계조건은 모델 내 대기오염물질 프로파일 자료(연직 44개 층에 대해 CO, NO₂, 에어로졸 화학성분 등 200여 종)를 통해 생성되며 (Wang *et al.*, 2002; Gipson, 1999; Stockwell *et al.*, 1990), 화학메커니즘은 CB6r3 (Carbon Bond 6, Luecken *et al.*, 2019), 그리고 에어로졸 산정 모듈로는 AERO7을 이용하였다.

본 연구의 수치모델링 기간은 올진 산불(2022년 3월 4일~13일) 전후 5일과 초기적응시간(spun-up time) 72시간을 고려하여 2022년 2월 24일 00 UTC부터 3월 19일 00 UTC까지 총 23일 수행하였으며, 초기적응시간을 제외한 2월 27일~3월 18일에 대해 전반적인 분석을 수행하였다. 모델의 예측정확도 향상을 위해 3차원 변분자료동화(Three-dimensional variational analysis, 3DVAR) 기법을 적용하여 기상모델의 초기장을 개선하였으며(Routray *et al.*, 2010; Sugimoto *et al.*, 2009), 지표와 상층의 기상요소(기온, 바람 성분, 수증기 혼합비)에 대해 관측넷징(D1~D3) 및 분석넷징(D1) 기법을 적용하였다(Sommerfeld *et al.*, 2019; Jeon *et al.*, 2015). 이러한 기상장의 개선을 통한 대기질 수치모의의 정확도 향상은 기존 선행 연구에서 다양하게 보고 되어왔다(Cho *et al.*, 2023, 2021; Desroziers and Ivanov, 2001).

CMAQ 모델링을 위해 동아시아영역(D1과 D2, 그림 1)의 인위적 배출량은 EDGAR-HTAP (Emission Database for Global Atmospheric Research-Hemispheric Transport of Air Pollution) version 2 (0.1° × 0.1° 수평해상도) 배출목록(Janssens-Maenhout *et al.*, 2015), 남한영역(D3, 제주 제외)의 인위적 배출량은 환경부에서 제공하는 CAPSS (Clean Air Policy Supporting System) 2016년 자료(1 km × 1 km 해상도)를 이용하였다(NIER, 2019) (<http://www.air.go.kr>). 모든 연구 도메인에 대한 자연적 배출량은 MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature) ver-

sion 2.1을 통해 산정된 결과를 이용하였다(Guenther *et al.*, 2012). 이외에도, 고해상도 BB 배출량은 미국 NCAR에서 제공하는 FINN version 1.5를 이용하여 산출하였다(Wiedinmyer *et al.*, 2011) (<https://www.acom.ucar.edu/Data/fire>). FINN에서는 NASA 극궤도 위성(Terra와 Aqua)의 MODIS 센서에서 관측되는 전 지구 영역의 활성 화재에 대한 대기오염물질 배출량을 1 km × 1 km 공간 해상도로 산정하여 일별로 제공하고 있다. 여기서 활성 화재는 MODIS 열 아노말리(thermal anomalies) 알고리즘에 의해 지면에서 주변보다 훨씬 뜨거운 지역(1 km 픽셀의 중심)을 식별하여 표시된다(Lee *et al.*, 2020; Giglio *et al.*, 2018). 다음은 FINN의 대기오염물질(CO, PM₁₀, PM_{2.5}, OC, BC 등) 배출량을 산정하는 계산식을 나타낸다.

$$E_i = A(x,t) \times B(x) \times FB \times ef_i \quad (1)$$

여기서 E_i 는 종 i 의 배출량(가스상: mole day⁻¹, 입상: kg day⁻¹), A 는 위치 x 와 시간 t 에서의 연소면적(m²), B 는 위치 x 에서의 연소효율(g m⁻²), FB 는 화재로 인해 연소된 바이오매스의 비율, ef_i 는 종 i 의 배출계수(g kg⁻¹)를 의미한다(Wiedinmyer *et al.*, 2011). 본 연구에서는 MOZART v4 화학 메커니즘으로 구성된 FINN 배출량을 CB6r3 화학 메커니즘(CMAQ v5.3.2에 이용)으로 전환하기 위해 동일 화학종끼리의 맵핑(mapping) 작업을 수행하였다(Choi *et al.*, 2016; Tai *et al.*, 2008). 또한 FINN에서는 위성관측 장비의 한계로 인한 활성 화재 관측의 결측 때문에 연소면적을 다소 작게 산출하므로(Wiedinmyer *et al.*, 2011), 이에 대한 수치모의의 불확실성을 줄이고자 Arcgis 프로그램을 이용하여 실제의 연소면적과 가깝게 보정하였다. 본 연구에서의 배출량 입력자료는 각 배출량의 합을 계산 프로그램(MATLAB, Python 등)을 통해 각 연구 도메인에 맞춰 재격자화하였다(Cho *et al.*, 2023, 2021; Baek *et al.*, 2022; Song *et al.*, 2022). 그림 2는 올진 산불 사례 시(2022년 3월 4일~13일) 남한영역에서의 CO와 PM_{2.5}의 인위적 및 FINN BB 배출량(kg day⁻¹)의 공간분포를 나타낸다. 두 물질의 인위적 배출량은 주

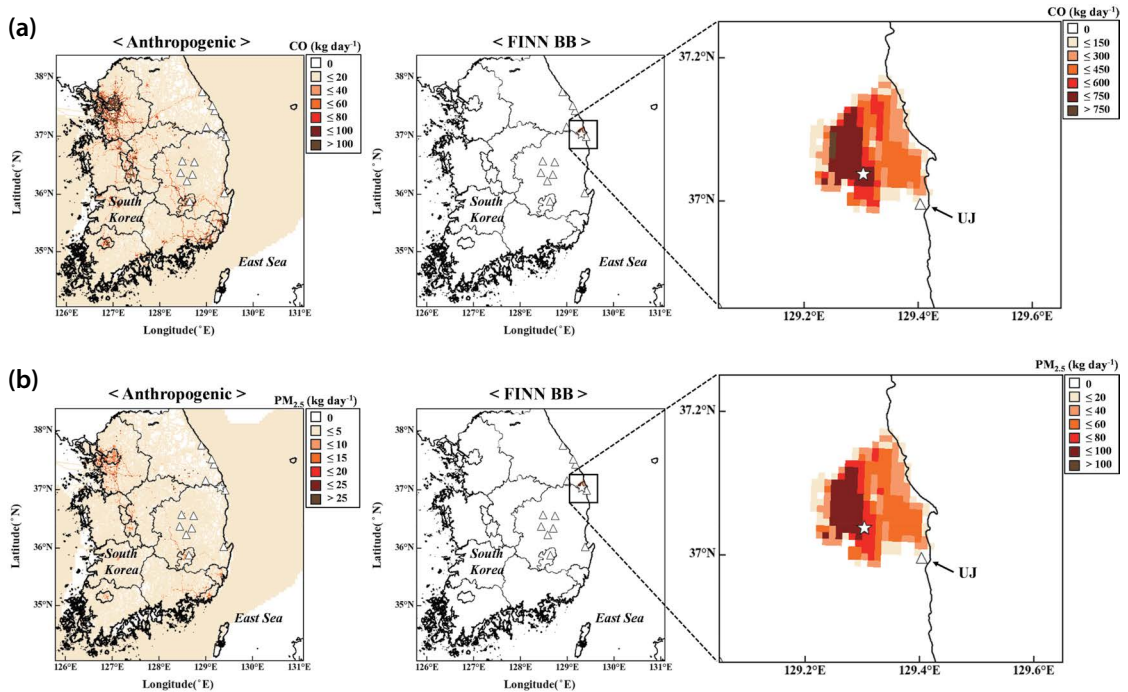


Fig. 2. Spatial distributions of emissions (kg day^{-1}) in the 3 km model domain (D3): anthropogenic and FINN biomass burning (BB) emissions of (a) CO and (b) $\text{PM}_{2.5}$.

로 수도권을 포함한 대도시와 이동오염원(예, 도로)에 집중된 모습을 보였으며(그림2(a)와 그림2(c)), FINN BB 배출량은 산발 발화점 인근(UJ 지점 포함)에서 지배적으로 많은 양이 분포하였다(그림 2(b)와 그림 2(d)).

3. 결과 및 토의

3.1 Biomass burning 및 배출량 장기변화 추세

본 연구에서는 우리나라에서 발생한 BB와 산발의 장기추세를 파악하기 위해, 최근 20년간(2002~2021년) BB(FINN 배출목록) 및 산발(통계청 및 국립산림과학원)의 연간 발생횟수, 발생일수, 총 연소면적에 대한 연변화 추세(그림 3)와 물질별(CO, PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, OC, BC) FINN 배출량의 연변화를 분석하였다(그림 4). 그림 3(a)를 보면, FINN에서 나타난 BB 발생횟수,

발생일수 및 연소면적은 전반적으로 점차 증가하는 추세였으며, 부분적으로 증가와 감소를 반복하는 경향이었다. M-K 검정을 통해 BB의 발생횟수, 발생일수, 연소면적의 연평균 증가율을 계산한 결과, 발생횟수와 발생일수는 각각 +15.6회/yr, +2.4일/yr로 증가 추세를 보였고(P-value = 0.0006, 0.034), 총 연소면적의 경우 연평균 추세는 미세한 증가를 보이나 통계적으로 유의하지 않았다(P-value = 0.538). FINN BB의 연간 발생횟수는 2002년에 가장 적고(312회) 2018년에 가장 많았으며(823회), 연간 발생일수 및 총 연소면적은 2002년에 가장 작고(95일, 23,202 ha) 2021년에 가장 크게 나타났다(179일, 54,811 ha). 2002년에 가장 낮은 수치를 보인 것은 최근 20년(2002~2021년) 동안의 평균 강수량(약 1,362 mm)에 비해 상대적으로 많은 강수량(약 1,519 mm, 2002년)이 주요 원인 중 하나로 사료된다(그림 제외). 이외에도, 총 20년간 BB의 발생횟수당 연소면적은 평균 69 ha/회이며(최고:

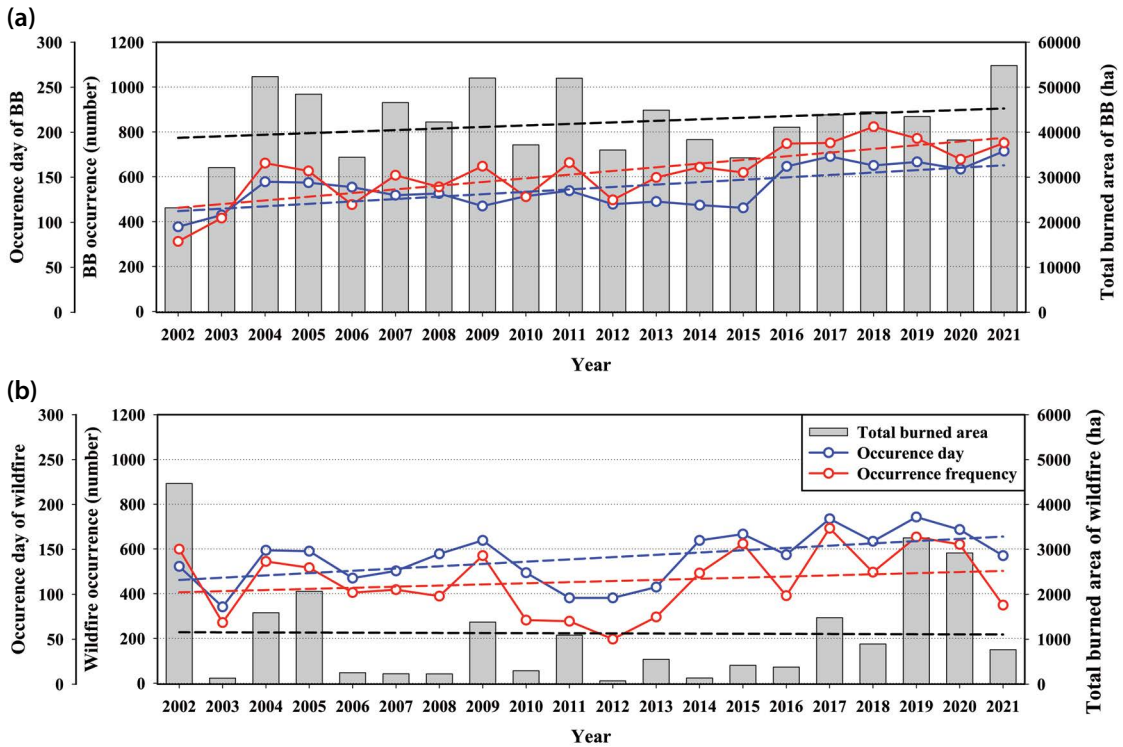


Fig. 3. Annual trends in occurrence frequency (red line), occurrence day (blue line), and total burned area (gray bar) of (a) biomass burning (BB) provided by the FINN inventory and (b) wildfires provided by the KOSIS and NIFoS over South Korea during 2002~2021. Dashed lines indicate the slopes of long-term trend for occurrence frequency, occurrence day, and total burned area, respectively.

2009년에 80 ha/회, 최소: 2018년에 54 ha/회), 이들의 연평균 증가율(M-K 검정)은 연소면적에 비해 발생횟수의 증가율이 더 크기 때문에 약한 감소 추세(-1.2 ha/회/yr, P-value = 0.003)가 나타났다.

우리나라 BB의 큰 비중을 차지하는 산불의 연간 발생 및 총 연소면적은 BB에 비해 전반적으로 큰 폭의 증감이 나타났으며, 최대 및 최소가 나타난 연도가 각각 달랐다(그림 3(b)). 산불의 연간 발생횟수는 2012년에 가장 적고(197회) 2017년에 가장 많았으며(692회), 연간 발생일수는 2003년에 가장 적고(86일) 2019년에 가장 많았다(186일). 연간 연소면적을 보면, 2012년에 가장 작았고(72 ha) 2002년에 가장 크게 나타났다(4,467 ha). 또한 2002년에는 산불 발생횟수당 연소면적도 7.5 ha/회로 가장 컸으며, 이는 전체 20년 평균(2.2 ha/회)에 비해 약 3배가 넘는 수준이었다(최소:

2014년에 0.3 ha/회). M-K 검정 결과, 산불 발생일수는 +2.4일/yr로 증가하는 추세를 보였으나(P-value = 0.047), 발생횟수, 연소면적 그리고 발생횟수당 연소면적의 연평균 증가율은 통계적으로 유의한 경향이 나타나지 않았다(P-value = 0.496, 0.538, 0.558). 그림 3(b)에 나타난 것처럼, 2017년의 많은 산불 발생횟수는 20년간(2002~2021년)의 평균 강수량(약 1,362 mm)에 비해 상대적으로 적은 강수량(약 962 mm, 2017년)에 의한 것으로 사료된다(그림 제외). 또한 2002년을 비롯하여 2019년과 2020년의 연소면적이 크게 나타난 것은 국내의 대형 산불로 기록된 청양·예산(2002년), 고성·강릉·인제(2019년), 안동지역(2020년) 산불과 밀접한 연관이 있는 것으로 사료된다(www.forest.go.kr). 이외에도, 연구 기간 동안 우리나라 산불의 월변화를 분석한 결과, 봄과 겨울의 건조한 날씨와 적은 강수량

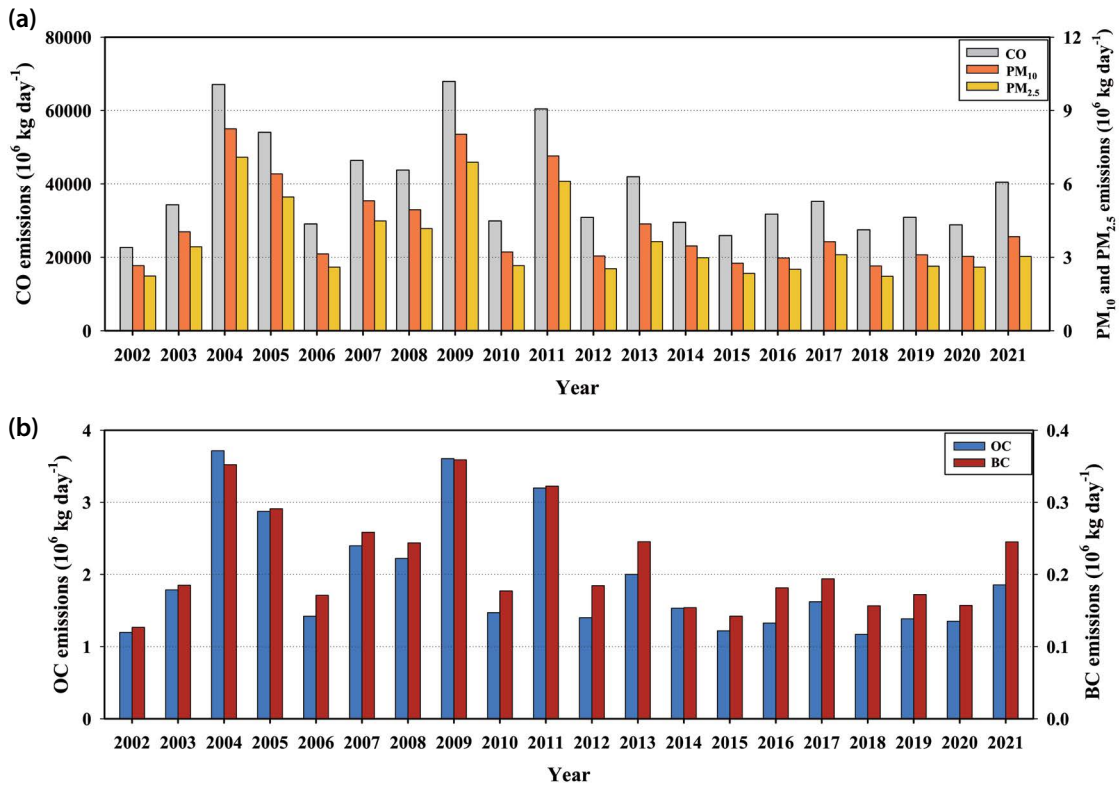


Fig. 4. Yearly variations in biomass burning (BB) emissions for (a) CO, PM₁₀, and PM_{2.5} and (b) OC and BC provided by the FINN inventory over South Korea during 2002~2021.

등으로 인해 봄철(3~4월)에 가장 많이 산불이 발생하였고(총 3,290회), 이때 산불로 인한 연소면적이 가장 크게(약 11,645 ha) 나타났다(그림 제외).

그림 4는 최근 20년간(2002~2021년) 남한지역 FINN BB 배출량(CO, PM₁₀, PM_{2.5}, OC, BC)의 연변화를 나타낸다. 전반적으로, 5가지 오염물질의 연간 배출량은 모두 증감을 반복하다가 점차 감소하는 경향이었으며, 특히 2011년 이후부터는 상대적으로 감소 패턴이 뚜렷하게 나타났다. 또한 5가지 오염물질의 BB 배출량은 2009년에 가장 많고 2002년에 가장 적었으며, 2009년이 2002년에 비해 약 3배 정도 많았다. 2002년에 오염물질의 배출량이 적은 이유는 그림 3(a)에서처럼 낮은 BB 발생빈도 및 적은 연소면적이 주요 원인이고, 2009년을 포함해서 2004년과 2011년에 배출량이 많은 이유는 상대적으로 높은 BB 발생빈

도와 큰 연소면적(그림 3(a))이 원인인 것으로 사료된다. 한편, 2011년 이후부터 오염물질의 배출량 감소 패턴은 그림 3(a)에 나타난 BB의 발생횟수와 발생일수의 증가 추세와는 다른 양상이었다. Korea Forest Service (KFS, 2022)에 따르면, 최근으로 올수록 산불 발생에 따른 진화 정책 및 예방, 진화 장비 기술개발, 산불확산예측시스템 구축·운영 등 효과적인 산불 대응 및 감시체제로 인해 BB의 발생빈도가 증가했음에도 불구하고 오염물질의 배출량은 다소 감소한 것으로 사료된다.

3.2 Biomass burning이 에어로졸 및 CO 농도에 미치는 영향

3.2.1 시계열 및 공간분포 분석

본 연구에서는 올진 산불 사례 시 FINN BB 배출량

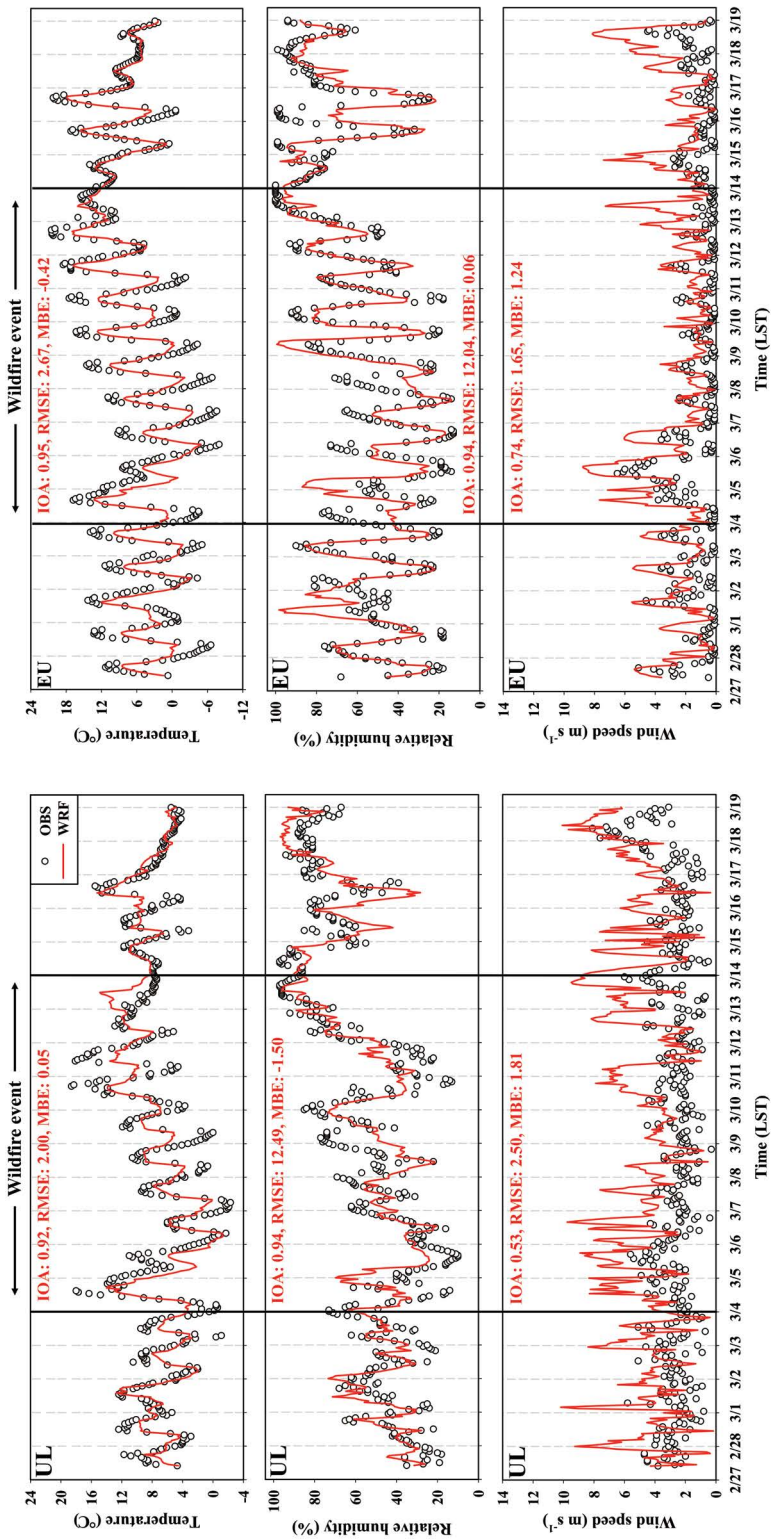


Fig. 5. Time series plot of the observed and model-simulated meteorological variables (temperature, relative humidity, and wind speed) at two meteorological monitoring sites (UL and EU, Fig. 1) during the simulation period (February 27~March 18, 2022).

이 오염물질 농도에 미치는 영향을 분석하기 앞서 먼저 기상 및 대기질 모델의 예측정확도를 평가하였다. 그림 5는 수치모의 기간(2022년 2월 27일~3월 18일) 동안 울진 ASOS 지점(UL)과 의성 ASOS 지점(EU)을 대상으로 기상요소(기온, 상대습도, 풍속)의 관측값과 모델값의 비교를 나타낸다. 전반적으로, 두 지점의 기상 수치모의 결과에서 기온과 상대습도는 관측값의 변화(증감) 패턴을 잘 따르고 있으며(둘 다 0.92 이상의 높은 IOA, 각각 2.7°C 및 12.5% 이하의 RMSE), 풍속에 비해(0.53~0.74의 IOA, 1.65~2.5 m s⁻¹의 RMSE) 상대적으로 관측값에 가깝게 모의되었다. 또한 두 지점에서 기온과 상대습도는 관측값에 비해 약한 과대모의 또는 과소모의가 나타난 반면, 풍속의 경우 상대적으로 강한 과대모의 경향이었다. 풍속에 대한 과대모의가 큰 이유는 UL 관측지점이 동해안에 인접해 있어 지속적인 해풍의 영향과 주변의 높은 산(태백산맥 평균 약 800 m)의 영향을 받고 있으며, 또한 EU 관측지점의 해발고도(82 m)와 수치모델상에서 해당격자의 해발고도(201 m) 간의 오차 등에 의해 불확실성이 커진 것으로 추정된다.

수치모의에 대한 정량적 검증을 보다 자세히 살펴보기 위해, 전체 기상 및 대기질 관측지점(각각 12지점)에서의 모델값과 관측값 사이의 통계적(IOA, RMSE, MBE) 분석을 수행하였다(표 2). 모든 지점에서 기상요소(기온, 상대습도, 풍속)의 IOA는 각각 0.95, 0.94, 0.71로 높은 편이며, RMSE는 2.21°C, 11.84%, 1.86 m s⁻¹으로 나타났다. 또한 CO를 제외한 PM₁₀과 PM_{2.5}의 IOA는 0.75 이상의 수준이며(CO IOA: 0.47), 3가지 오염물질(CO, PM₁₀, PM_{2.5})의 RMSE는 각각 0.32 ppm, 22.0 µg m⁻³, 9.98 µg m⁻³으로 나타났다. 또한 모든 지점에서 기온, 상대습도, PM₁₀은 약한 과소모의(평균 MBE: -0.71°C, -0.03%, -4.38 µg m⁻³), CO는 강한 과소모의가 나타난 반면(-0.27 ppm), 풍속은 대체로 강한 과대모의(1.14 m s⁻¹), PM_{2.5}는 약한 과대모의(+0.72 µg m⁻³)가 나타났다. 이러한 통계적 검증 결과들은 여러 선행 연구의 결과와 대체로 유사한 수준으로 나타났는데(Cho *et al.*, 2023; Kim *et al.*, 2022; Song *et al.*,

Table 2. Statistical evaluation of the meteorological variables (air temperature, wind speed, and relative humidity) and air quality (CO, PM₁₀, and PM_{2.5}) between the observed and model-simulated values for Total case. The results were compared at several monitoring sites (12 sites for meteorological variables and 12 sites for air quality, as shown in Fig. 1) during the entire simulation period (February 27~March 18, 2022).

Variable	Statistical parameter		
	IOA ^a	RMSE ^b	MBE ^c
Temp (°C)	0.95	2.21	-0.71
WS (m s ⁻¹)	0.71	1.86	1.14
RH (%)	0.94	11.84	-0.03
CO (ppm)	0.47	0.32	-0.27
PM ₁₀ (µg m ⁻³)	0.75	22.03	-4.38
PM _{2.5} (µg m ⁻³)	0.84	9.98	0.72

^aIOA: index of agreement.

^bRMSE: root mean square error.

^cMBE: mean bias error.

2022; Sourì *et al.*, 2017), 이는 본 연구의 기상-대기질 수치모의 결과가 지역 대기오염 농도에 미치는 산불의 영향을 합리적으로 진단할 수 있음을 보여준다.

그림 6은 수치모의 기간 동안 울진과 의성 도시대기측정망(UJ와 ES)을 대상으로 CO, PM₁₀, PM_{2.5}의 관측농도와 Total(BB 배출량 포함) 및 Base(BB 배출량 제외) 실험의 모의 결과를 나타낸다. 전체 기간을 산불 발생일(3월 4일~13일)과 비발생일(2월 27일~3월 3일, 3월 14일~18일)로 구분하였을 때, 울진 UJ 지점에서 관측된 산불 발생일의 CO, PM₁₀, PM_{2.5}의 평균 농도는 각각 0.7 ppm, 114 µg m⁻³, 62 µg m⁻³으로 나타나 비발생일의 평균농도(0.4 ppm, 32 µg m⁻³, 17 µg m⁻³)에 비해 약 1.8~3.6배 더 높은 수준이었다. 또한 산불 발생일의 최고농도는 각각 3.8 ppm, 821 µg m⁻³, 385 µg m⁻³을 기록한 반면, 비발생일에는 각각 0.6 ppm, 111 µg m⁻³, 43 µg m⁻³으로 나타났다. 한편, ES 지점에서는 산불 발생일과 비발생일의 농도 차이가 크지 않았다. 이러한 관측농도를 두 실험(Total 및 Base)의 농도와 비교해 보면, 울진 UJ 지점에서 Total 실험 결과(0.63~0.72의 IOA)가 Base(0.35~0.49의 IOA)에 비해 관측값에 훨씬 가깝게 향상된 모의를 보였으나, ES 지점은 두 실험 간 농도 차이가 크지 않았다. 즉, 산

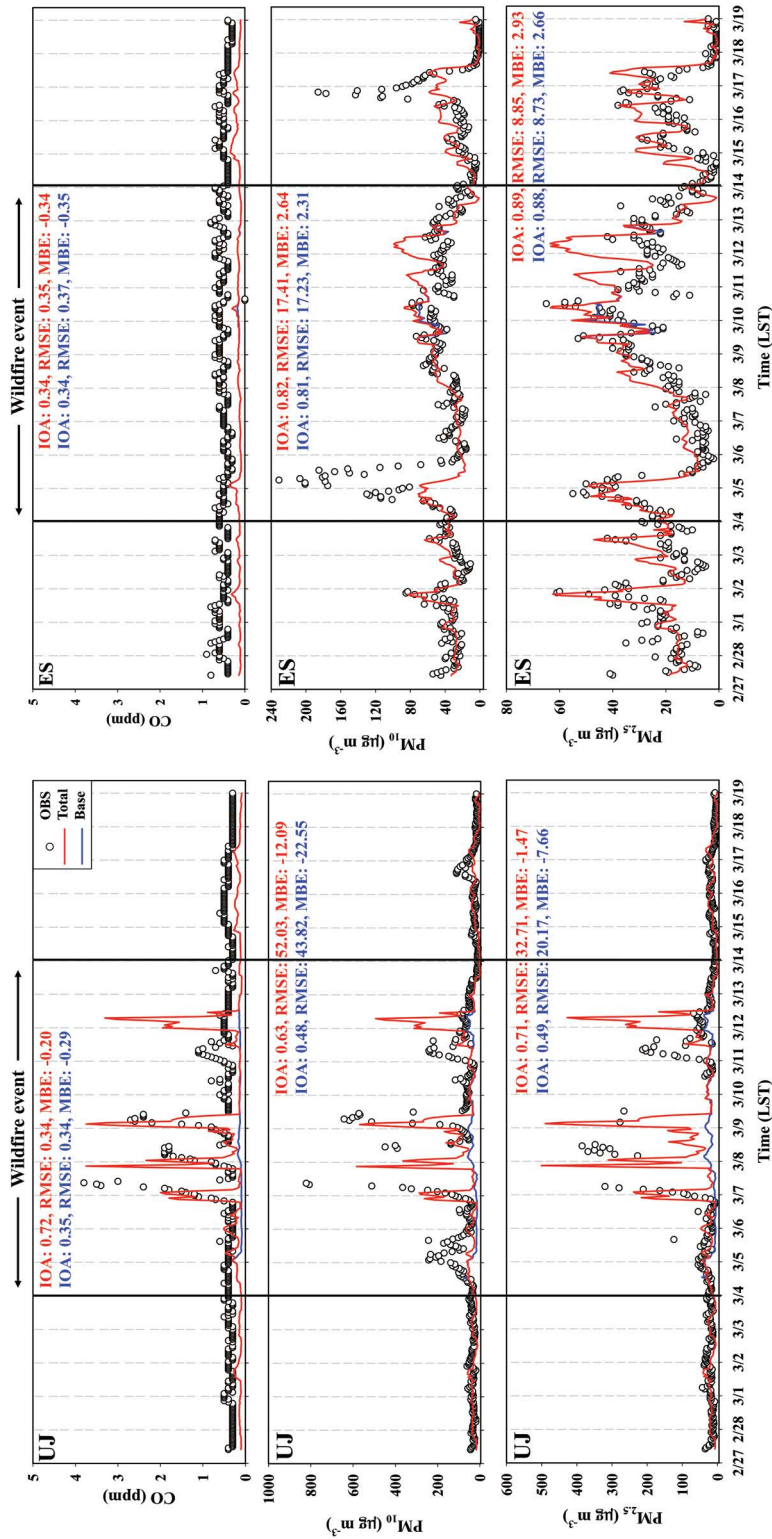


Fig. 6. Time series plot of the concentrations of the observed and model-simulated CO, PM₁₀ and PM_{2.5} at two air quality monitoring sites (UJ and ES, Fig. 1) for Total and Base cases during the simulation period (February 27~March 18, 2022).

불 발화점 인근의 UJ 지점과 달리 ES 지점은 산불에 의한 영향이 미미한 것으로 사료된다. 예를 들어, 산불 발생일 동안 UJ 지점에 대해 Total 실험의 CO, PM₁₀, PM_{2.5} 농도는 각각 0.1~3.8 ppm, 0.4~583 μg m⁻³, 0.2~500 μg m⁻³ 범위였으며, Base 실험에서는 0.1~0.3 ppm, 0.4~75 μg m⁻³, 0.2~45 μg m⁻³으로 나타나 Total 실험에서 상대적으로 관측값(0.3~3.8 ppm, 7.0~821 μg m⁻³, 5.0~385 μg m⁻³)과 매우 유사하였다.

특징적으로(그림 6), Total 실험(CO, PM₁₀, PM_{2.5} 농도)을 통해 Base 실험의 심각한 과소모의(3월 6일 야간~9일 주간의 UJ 지점)와 약한 과소모의(3월 10일 오전 ES 지점)가 상당히 관측값과 가깝게 개선되었다. 이것은 산불 발생에 따른 고해상도 BB 배출량(그림 2)이 대기질 모의 정확도에 유의한 영향을 주었음을 의미한다. 한편, Total 및 Base 실험 모두 UJ 지점에서 관측된 3월 11일의 고농도(모든 오염물질에 대해) 패턴, ES 지점의 3월 5일과 16일의 고농도(PM₁₀에 대해) 패턴을 제대로 모의하지 못하였다. 이러한 원인은 기상장 모의 및 BB 배출량의 불확실성뿐만 아니라 관측지점 위치와 모델 영역 격자(grid) 공간의 차이 등 복합적인 영향이라 추정된다(Cho *et al.*, 2021; Han *et al.*, 2021; Oh *et al.*, 2010). 따라서 보다 정확한 원인 규명을 위해서는 향후 다양한 기상조건 및 배출량 민감도 분석 등 고해상도의 상세 수치모의 연구가 필요하다고 사료된다.

본 연구에서는 울진 산불이 대기오염물질 농도에 미치는 영향을 공간적으로 파악하기 위해, 산불 발생일(3월 4일~13일)의 오염물질(CO, PM₁₀, PM_{2.5}, SOA) 농도와 FINN BB 배출량이 각 오염물질 농도에 미치는 영향 및 기여도를 분석하였다(그림 7). 전반적으로, 3가지 오염물질(CO, PM₁₀, PM_{2.5})의 공간 평균 농도는 BB 배출량의 영향으로 산불 발화점 주변에서 집중적으로 최고값이 나타났으며, 다음으로 CO는 수도권 인근, PM₁₀과 PM_{2.5}는 경기도와 충남 사이의 평택당진항 부근에서 높게 나타났다. 이외에도, 3가지 오염물질 모두 남해 여수 및 울산 주변 지역에서도 다소 높은 농도를 보였으나, SOA는 산불 발화점 주변 외에

는 고농도가 나타나지 않았다. 한편, 본 연구의 산불 사례는 북서/서풍 계열의 주풍(약 54%) 영향과 태백산맥(평균 고도 약 800 m)에 가로막혀 산불에 의한 대기오염물질의 거동이 내륙보다는 주로 동해상으로 확산되는 모습을 보였다. 산불의 주요 영향 범위(그림 7의 점선 사각형) 내에서 BB 배출이 각 오염물질(CO, PM₁₀, PM_{2.5}, SOA)의 농도에 미치는 영향(기여도, %)을 보면(Total-Base), 평균적으로 0.03 ppm (10%), 6.0 μg m⁻³ (13%), 5.3 μg m⁻³ (19%), 2.0 μg m⁻³ (29%)으로 추정되었다. 특히, 산불 발화점에 가장 가까운 UJ 지점에서의 영향 농도 및 기여도는 각각 0.3 ppm (77%), 48.9 μg m⁻³ (68%), 43.1 μg m⁻³ (79%), 4.8 μg m⁻³ (57%)으로 매우 높은 수준이었다. 이와 같이 산불에 의한 대기질 영향의 공간분포는 대상지역의 고유 기상조건, 배출량, 지리·지형적 특성 등 복합적인 영향이 크게 작용하는 것으로 볼 수 있다(Kang *et al.*, 2012).

3.2.2 연직분포 분석

3.2.1절의 분석에서 알 수 있듯이, 본 연구의 울진 산불 사례는 북서/서풍 계열의 주풍으로 인해 우리나라 동해안 주변에서 산불에 의한 영향이 가장 크게 나타난 반면, 내륙지역에 미치는 영향은 미미하였다. 하지만 낮 동안 해풍(동쪽 → 서쪽)이 강하게 불어 들어온다면 산불의 영향은 우리나라 내륙지역까지 확산될 가능성이 있을 것이다. 따라서 국지순환(예, 해륙풍)에 따른 산불의 영향을 보다 입체적으로 분석하기 위해, 산불에 의한 영향이 가장 큰 3월 9일(02시~17시)을 선정하여 두 실험 간 PM_{2.5} 농도 차이(Total-Base)의 연직분포를 살펴보았다(그림 8). 그림에서 보이는 A-B는 산불 발화점을 지나는 단면의 위치(그림 1의 점선)를 나타내며, 검정 실선은 모델에서 산정한 대기 경계층 고도를 의미한다. 전반적으로, 3월 9일 02시부터 11시까지 시간이 지남에 따라 점차 내륙(A 방향)으로 확산되는 모습이었으며, 이후 14시를 지나 17시에 다시 동해상(B 방향)으로 빠져나가는 모습이 확인되었다. 이외에도, 울진 산불 발생이 PM₁₀과 CO 농도에 미치는 영향 및 연직분포는 각 시간대별 PM_{2.5}에

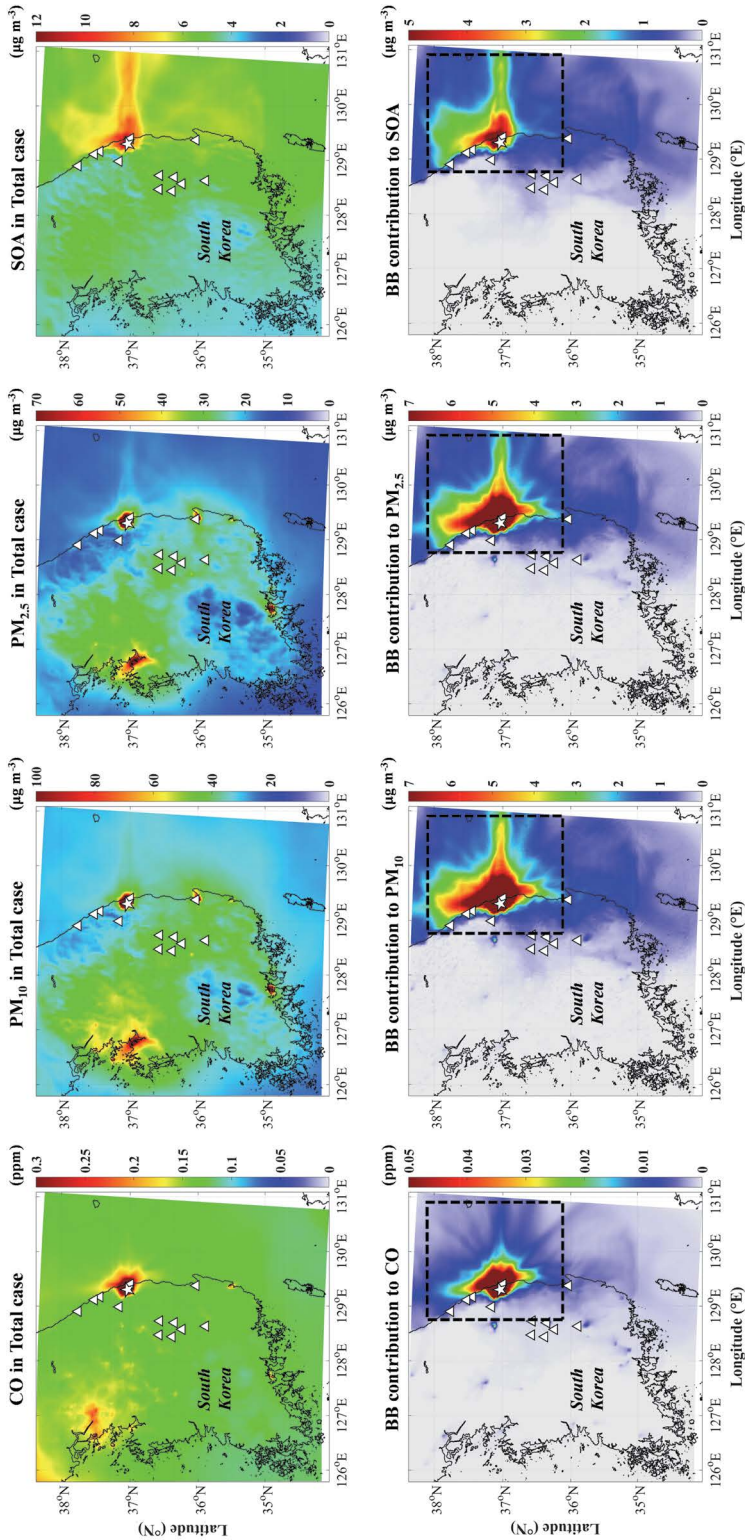


Fig. 7. Spatial distributions of CO (ppm), PM₁₀, PM_{2.5}, and secondary organic aerosol (SOA) (μg m⁻³) concentrations in Total case and the contributions of biomass burning (BB) emissions to their concentrations averaged over the wildfire period (March 4~13, 2022) for each grid in the 3 km model domain (D3). Dotted rectangles indicate the main influence areas of wildfires.

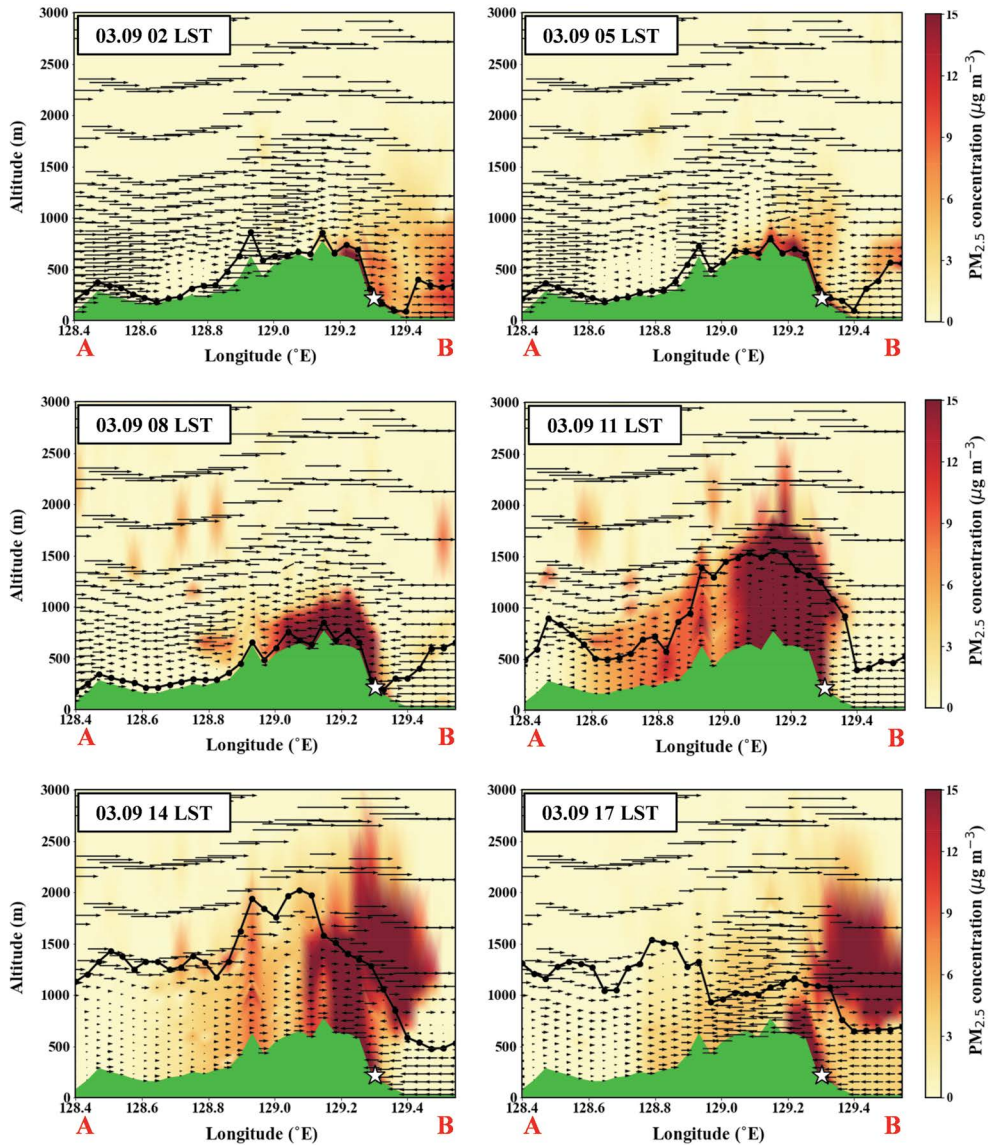


Fig. 8. Vertical distributions of the difference in PM_{2.5} concentrations between Total and Base cases (Total-Base) and wind vectors (m s^{-1} , arrows) simulated by the WRF-CMAQ modeling system on March 9, 2022 along the line AB (Fig. 1). The black thick line indicates the planetary boundary layer (PBL) height.

대한 패턴과 유사하게 나타났다(그림 제외).

시간대별로 자세히 보면, 먼저 02시와 05시에는 산불의 영향으로 인해 PM_{2.5} 농도 증가(Total-Base)가 주로 산불 발화점과 주변 산맥에서 나타났다, 지표 부근과 상층 모두 야간 육풍의 영향을 지배적으로 받

는 모습이였다. 또한 이른 아침에 내륙의 상대적으로 낮은 기온으로 인해 대기경계층이 발달하지 못해 고도가 매우 낮았으며, 이로 인해 농도의 연직 이류 및 확산이 다소 약해진 것으로 사료된다. 이후 08시에는 농도 증가 분포가 산맥을 넘어 일부 지표 부근의 내륙

으로 이동하기 시작하고, 상층으로는 약 1,200 m 고도까지 산불의 영향이 확산되는 모습이었다. 이는 산불 발화점 인근에서 해풍(동풍)과 상층의 종관풍(서풍)이 만나면서 해풍전선이 발달하고, 이때 차가운 해풍이 육지의 더운 공기를 밀어 올리면서 농도가 연직으로 확산된 것으로 사료된다(Park *et al.*, 2011). 오전 11시에는 일사에 의해 대기경계층(대기혼합층)이 높게 발달하여 PM_{2.5}의 농도 증가가 약 2,000 m 고도까지 분포하였으며(15 µg m⁻³ 이상), 산 사면을 따라 내륙(A 방향)으로 더욱 깊숙이 확산된 모습을 보였다(지표 부근 5~15 µg m⁻³). 오후 14시에는 산 정상과 상층에서의 서풍이 강화되면서 상층 부근의 농도 증가 패턴이 동쪽으로 일부 빠져나가는 모습을 보였다. 또한 11시에 내륙 깊숙한 지역까지(128.6°E~129.1°E) 나타났던 농도 증가가 14시에는 대기경계층의 발달(고도 1,200~1,800 m)로 인해 연직 혼합되어 상대적으로 농도 증가의 크기가 줄어든 것으로 사료된다(지표 부근 2~7 µg m⁻³). 마지막으로, 17시에는 산불 발화점의 왼쪽 산맥 부근에서 부는 상층 종관풍(서풍)의 강화로 인해 PM_{2.5}의 연직농도 분포는 동해상으로 많이 확산된 모습을 보였으며, 산맥 부근에서 농도 증가의 크기는 14시에 비해 약간 줄어든 것으로 나타났다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 최근 20년간(2002~2021년) 우리나라에서 발생한 BB와 산불의 장기변화 추세를 살펴보고, 최근 10년 이내 가장 큰 시·공간적 규모로 발생한 울진 산불 사례(2022년 3월 4일~13일)에 대해 고해상도 BB 배출량이 대기오염물질 농도에 미치는 영향을 분석하였다. 전반적으로, 지난 20년간 BB의 발생횟수, 발생일수 그리고 산불의 발생일수는 증가하는 추세(각각 +15.6회/yr, +2.4일/yr, +2.4일/yr)이고 통계적으로 유의하였으나, BB와 산불의 연소면적과 산불의 발생횟수는 통계적으로 유의한 추세가 나타나지 않았다. 또한 연구 기간 동안 FINN BB에 의한 대

기오염물질의 배출량 연변화는 점차 감소하는 경향을 보였으나 뚜렷한 추세를 찾을 수가 없었다.

울진 산불 사례 시 대기오염물질(CO, PM₁₀, PM_{2.5}, SOA) 농도의 공간분포를 보면, 모든 오염물질은 산불 발화점 주변에서 가장 높은 농도가 나타났으며, 이외에도 CO는 수도권 인근, PM₁₀과 PM_{2.5}는 평택당진항 부근에서 높게 나타났다(다만 SOA는 산불 발화점 주변에서만 고농도). CMAQ-BFM 모의 결과를 보면, 산불의 주요 영향 범위 내에서 BB 배출량이 대기오염물질에 미치는 영향 농도는 평균적으로 0.03 ppm(CO), 6.0 µg m⁻³(PM₁₀), 5.3 µg m⁻³(PM_{2.5}), 2.0 µg m⁻³(SOA)이었으며, 기여도는 각각 10%, 13%, 19%, 29%로 추정되었다. 산불 발화점 부근(UJ지점)에서는 BB에 의한 기여도가 매우 높게 나타났다(각각 77%, 68%, 78%, 57%). 이와 같은 공간분포는 산불 발생일 동안 발화점 인근에 배출된 엄청난 양의 오염물질이 주요 원인 중 하나이며, 아울러 오염물질이 북서/서풍 바람의 지배적 영향과 태백산맥에 가로막혀 내륙으로의 확산이 저지되고 주로 동해상으로 수송되어 간 것으로 사료된다. 한편, 낮 동안 동해안에서 내륙 쪽으로 해풍이 불어오는 경우 산불에 의해 배출되는 오염물질이 태백산맥을 지나 내륙지역으로 일부 확산되는 모습을 확인하였으며, 농도 증가에 미치는 영향 또한 무시할 수 없는 수준이었다.

우리나라에서 해마다 발생하고 있는 산불은 대기질 및 건강 영향뿐만 아니라 막대한 사회적·경제적 피해를 초래하고 있다. 이러한 점에서 볼 때, 본 연구에서 살펴본 남한지역의 BB 및 산불 발생의 장기추세 및 대기질 영향 평가 결과는 대상지역의 대기오염 실태 및 원인을 규명하는 데 일조할 것으로 기대되는 바 의미 있는 연구라 사료된다. 본 연구를 통해 대규모 산불이 에어로졸과 CO 농도에 미치는 영향에 대해 보다 다양한 측면에서 살펴보고자 하였으나, 산불 발화점 인근의 대기질 측정망의 부족과 지상 및 고층 관측 자료의 한계로 인해 산불로 인한 오염물질 농도의 수평·연직 분포와 기여도를 정확하게 해석하는 데 다소 어려움이 있었다. 향후 이러한 한계점을 보완하고 대

상지역에 적합한 BB 배출량을 구축하여 다양한 사례 연구를 수행한다면, BB 배출로 인한 지역 대기질 영향 평가와 효과적인 산불 대응체제를 구축하는 데 있어 보다 신뢰성 있는 정보를 제공할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2023학년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었음.

References

- Andreae, M.O., Merlet, P. (2001) Emission of Trace Gases and Aerosols from Biomass Burning, *Global Biogeochemical Cycles*, 15(4), 955-966. <https://doi.org/10.1029/2000GB001382>
- Anttila, P., Tuovinen, J.P. (2010) Trends of Primary and Secondary Pollutant Concentrations in Finland in 1994-2007, *Atmospheric Environment*, 44(1), 30-41. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.09.041>
- Baek, J.-Y., Song, S.-K., Han, S.-B., Cho, S.-B. (2022) Contributions of Emissions and Atmospheric Physical and Chemical Process to High PM_{2.5} Concentrations on Jeju Island during Spring 2018, *Journal of Environmental Science International*, 31(7), 637-652, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/JESI.2022.31.7.637>
- Bhardwaj, P., Naja, M., Kumar, R., Chandola, H.C. (2016) Seasonal, Interannual, and Long-term Variabilities in Biomass Burning Activity over South Asia, *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 4397-4410. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5629-6>
- Byun, D., Ching, J.K.S. (1999) Science Algorithms of The EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System, U.S. Environmental Protection Agency (US EPA), EPA/600/R-99, 30.
- Byun, D., Schere, K.L. (2006) Review of The Governing Equations, Computational Algorithms, and Other Components of The Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System, *Applied Mechanics Reviews*, 59(2), 51-77. <https://doi.org/10.1115/1.2128636>
- Carslaw, D.C. (2005) Evidence of an Increasing NO₂/NO_x Emissions Ratio from Road Traffic Emissions, *Atmospheric Environment*, 39, 4793-4802. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.06.023>
- Chan, K.L. (2017) Biomass Burning Sources and Their Contributions to the Local Air Quality in Hong Kong, *Science of The Total Environment*, 596, 212-221. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.091>
- Chen, F., Dudhia, J. (2001) Coupling an Advanced Land Surface-Hydrology Model with the Penn State-NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity, *Monthly Weather Review*, 129(4), 569-585. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2)
- Cho, S.B., Song, S.K., Moon, S.H. (2021) Effect of Analysis Nudging Data Assimilation on the PM_{2.5} Concentration Simulation during a Haze Event in the Seoul Metropolitan Area in 2019, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(2), 231-247, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.2.231>
- Cho, S.B., Song, S.K., Shon, Z.H., Moon, S.H. (2023) Evaluation of Air Quality Simulation with a Coupled Atmosphere-ocean Model: A Case Study on Natural Marine and Biogenic Emissions, *Science of The Total Environment*, 882, 163021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163021>
- Choi, Y., Jeon, W., Roy, A., Souril, A.H., Diao, L., Pan, S., Eslami, E. (2016) CMAQ Modeling Archive for Exceptional Events Analyses, Final report to the Texas Commission on Environmental Quality (TCEQ).
- Danielson, J.J., Gesch, D.B. (2011) Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010) (USGS Numbered Series No. 2011-1073), Open-File Report.
- Desroziers, G., Ivanov, S. (2001) Diagnosis and Adaptive Tuning of Observation-Error Parameters in a Variational Assimilation, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 127(574), 1433-1452. <https://doi.org/10.1002/qj.49712757417>
- Dudhia, J. (1989) Numerical Study of Convection Observed during the Winter Monsoon Experiment using a Mesoscale Two-dimensional Model, *Journal of Atmospheric Sciences*, 46(20), 3077-3107. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1989\)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2)
- Duncan, B.N., Martin, R.V., Staudt, A.C., Yevich, R., Logan, J.A. (2003) Interannual and Seasonal Variability of Biomass Burning Emissions Constrained by Satellite Observations, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D2), ACH-1. <https://doi.org/10.1029/2002JD002378>
- Friedl, M.A., Sulla-Menashe, D., Tan, B., Schneider, A., Ramankutty, N., Sibley, A., Huang, X. (2010) MODIS Collection

- 5 Global Land Cover: Algorithm Refinements and Characterization of New Datasets, *Remote Sensing of Environment*, 114(1), 168-182. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.016>
- Galanter, M., Levy, H., Carmichael, G.R. (2000) Impacts of Biomass Burning on Tropospheric CO, NO_x, and O₃, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D5), 6633-6653. <https://doi.org/10.1029/1999JD901113>
- Garcia-Menendez, F., Hu, Y., Odman, M.T. (2014) Simulating Smoke Transport from Wildland Fires with a Regional-scale Air Quality Model: Sensitivity to Spatiotemporal Allocation of Fire Emissions, *Science of The Total Environment*, 493, 544-553. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.108>
- Giglio, L., Randerson, J.T., Van der Werf, G.R., Kasibhatla, P.S., Colatz, G.J., Morton, D.C., DeFries, R.S. (2010) Assessing Variability and Long-term Trends in Burned Area by Merging Multiple Satellite Fire Products, *Biogeosciences*, 7(3), 1171-1186. <https://doi.org/10.5194/bg-7-1171-2010>
- Giglio, L., Schroeder, W., Hall, J.V., Justice, C.O. (2018) MODIS Collection 6 Active Fire Product User's Guide Revision B, Department of Geographical Sciences, University of Maryland, 9. <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/find-data/near-real-time/firms/mcd14dl-nrt>
- Gipson, G.L. (1999) The Initial Concentration and Boundary Condition Processors. Science Algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System, US Environmental Protection Agency Report, EPA-600/R-99/030, 12-1.
- Guenther, A.B., Jiang, X., Heald, C.L., Sakulyanontvittaya, T., Duhl, T.A., Emmons, L.K., Wang, X. (2012) The Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature version 2.1 (MEGAN2.1): An Extended and Updated Framework for Modeling Biogenic Emissions, *Geoscientific Model Development*, 5(6), 1471-1492. <https://doi.org/10.5194/gmd-5-1471-2012>
- Han, S.B., Song, S.K., Shon, Z.H., Kang, Y.H., Bang, J.H., 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. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129369>
- Hong, S.Y., Dudhia, J., Chen, S.H. (2004) A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation, *Monthly Weather Review*, 132(1), 103-120. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2)
- Hong, S.Y., Noh, Y., Dudhia, J. (2006) A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes, *Monthly Weather Review*, 134(9), 2318-2341. <https://doi.org/10.1175/MWR3199.1>
- Janssens-Maenhout, G., Crippa, M., Guizzardi, D., Dentener, F., Muntean, M., Pouliot, G., Keating, T., Zhang, Q., Kurokawa, J., Wankmüller, R., Denier van der Gon, H., Kuenen, J.J.P., Klimont, Z., Frost, G., Darras, S., Koffi, B., Li, M. (2015) HTAP_v2.2: a Mosaic of Regional and Global Emission Grid Maps for 2008 and 2010 to Study Hemispheric Transport of Air Pollution, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(19), 11411-11432. <https://doi.org/10.5194/acp-15-11411-2015>
- Jeon, W., Choi, Y., Lee, H.W., Lee, S.H., Yoo, J.W., Park, J., Lee, H.J. (2015) A Quantitative Analysis of Grid Nudging Effect on Each Process of PM_{2.5} Production in the Korean Peninsula, *Atmospheric Environment*, 122, 763-774. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.10.050>
- Kaiser, J.W., Heil, A., Andreae, M.O., Benedetti, A., Chubarova, N., Jones, L., Morcrette, J.-J., Razinger, M., Schultz, M.G., Suttle, M., Van Der Werf, G.R. (2012) Biomass Burning Emissions Estimated with a Global Fire Assimilation System based on Observed Fire Radiative Power, *Biogeosciences*, 9(1), 527-554. <https://doi.org/10.5194/bg-9-527-2012>
- Kang, J.E., Song, S.K., Lee, H.W., Kim, Y.K. (2012) The Influence of Meteorological Conditions and Complex Topography on Ozone Concentrations in a Valley Area near Coastal Metropolitan Cities, *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, 23(1), 25-38. [https://doi.org/10.3319/TAO.2011.06.30.02\(A\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2011.06.30.02(A))
- Kelly, J.M., Doherty, R.M., O'Connor, F.M., Mann, G.W. (2018) The Impact of Biogenic, Anthropogenic, and Biomass Burning Volatile Organic Compound Emissions on Regional and Seasonal Variations in Secondary Organic Aerosol, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(10), 7393-7422. <https://doi.org/10.5194/acp-18-7393-2018>
- Kendall, M. (1975) Rank Correlation Methods, 4th Ed., Charles Griffin, U.K., 202pp.
- Kim, D., Jeon, W., Park, J., Mun, J., Choi, H., Kim, C.H., Lee, H.J., Jo, H.Y. (2022) A Numerical Analysis of the Changes in O₃ Concentration in a Wildfire Plume, *Remote Sensing*, 14(18), 4549. <https://doi.org/10.3390/rs14184549>
- Kim, D.Y. (2011) Analysis of Air Pollutants Emissions from Biomass Burning in Seoul Metropolitan Area, Gyeonggi Research Institute.
- Korea Forest Service (KFS) (2022) 2022 K-Fire Prevention Comprehensive Plan. <http://forest.go.kr/>

- Lee, J., Park, M., Jung, D., Park, S. (2020) A Study on Wildfire Disaster Response based on Cases of International Disaster Safety Management Systems, *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, 40(3), 345-352, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.12652/KSCE.2020.40.3.0345>
- Lee, J.H., Cho, J.H., Kim, H.S. (2022) Analysis of the Contribution of Biomass Burning Emissions in East Asia to the PM₁₀ and Radiation Energy Budget in Korea, *Journal of the Korean Earth Science Society*, 43(2), 265-282, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5467/JKESS.2022.43.2.265>
- Lee, K.H. (2012) Impact of Northeast Asian Biomass Burning Activities on Regional Atmospheric Environment, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, (in Korean with English abstract), 15(1), 184-196.
- Lee, S., Ho, C.H., Lee, Y.G., Choi, H.J., Song, C.K. (2013) Influence of Transboundary Air Pollutants from China on the High-PM₁₀ Episode in Seoul, Korea for the Period October 16-20, 2008, *Atmospheric Environment*, 77, 430-439. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.05.006>
- Lim, K.S.S., Hong, S.Y. (2010) Development of an Effective Double-moment Cloud Microphysics Scheme with Prognostic Cloud Condensation Nuclei (CCN) for Weather and Climate Models, *Monthly Weather Review*, 138(5), 1587-1612. <https://doi.org/10.1175/2009MWR.2968.1>
- Lin, C.Y., Chen, W.C., Chien, Y.Y., Chou, C.C., Liu, C.Y., Ziereis, H., Schlager, H., Förster, E., Obersteiner, F., Krüger, O.O., Holanda, B.A., Pöhlker, M.L., Kaiser, K., Schneider, J., Bohn, B., Pfeilsticker, K., Weyland, B., Hernández, M.D.A., Burrows, J.P. (2023) Effects of Transport on a Biomass Burning Plume from Indochina during EMERG-Asia Identified by WRF-Chem, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(4), 2627-2647. <https://doi.org/10.5194/acp-23-2627-2023>
- Luecken, D.J., Yarwood, G., Hutzell, W.T. (2019) Multipollutant Modeling of Ozone, Reactive Nitrogen and HAPs across the Continental US with CMAQ-CB6, *Atmospheric Environment*, 201, 62-72, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.11.060>
- Mann, H. (1945) Nonparametric Tests Against Trend, *Econometrica*, 13(3), 245-259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Mlawer, E.J., Taubman, S.J., Brown, P.D., Iacono, M.J., Clough, S.A. (1997) Radiative Transfer for Inhomogeneous Atmospheres: RRTM, a Validated Correlated-k Model for the Longwave, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14), 16663-16682. <https://doi.org/10.1029/97JD00237>
- Nam, K.P., Lee, H.S., Lee, J.J., Park, H.J., Choi, J.Y., Lee, D.G. (2019) A Study on the Method of Calculation of Domestic and Foreign Contribution on PM_{2.5} using Brute-Force Method, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(1), 86-96, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.1.086>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2019) 2016 National Air Pollutants Emission; No. 11-1480523-000883-10. <https://www.air.go.kr/>
- National Institute of Forest Science (NIFoS) (2022) 2021 Forest Disaster White Paper; No. 11-1400377-001422-01. <http://www.nifos.go.kr/>
- Oh, H.R., Ho, C.H., Kim, J., Chen, D., Lee, S., Choi, Y.S., Chang, L.S., Song, C.K. (2015) Long-range Transport of Air Pollutants Originating in China: A Possible Major Cause of Multi-day High-PM₁₀ Episodes during Cold Season in Seoul, Korea, *Atmospheric Environment*, 109, 23-30. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.03.005>
- Oh, I.B., Kim, Y.K., Hwang, M.K., Kim, C.H., Kim, S., Song, S.K. (2010) Elevated Ozone Layers over the Seoul Metropolitan Region in Korea: Evidence for Long-range Ozone Transport from Eastern China and its Contribution to Surface Concentrations, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(2), 203-220. <https://doi.org/10.1175/2009JAMC2213.1>
- Park, R., Jeong, J., Yun, D. (2009) A Study of the Effects of Siberian Wildfires on Ozone Concentrations over East Asia in Spring 2003, *Atmosphere*, 19(3), 227-235.
- Park, S.Y., Lee, H.W., Lee, S.H., Lee, K.O., Ji, H.E. (2011) Impact of the Variation of Sea Breeze Penetration due to Terrain Complexity on PBL Development, *Journal of Environmental Science International*, 20(2), 275-289, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/JES.2011.20.2.275>
- Pun, B.K., Seigneur, C., Vijayaraghavan, K., Wu, S.Y., Chen, S.Y., Knipping, E.M., Kumar, N. (2006) Modeling Regional Haze in the BRAVO Study using CMAQ-MADRID: 1. Model Evaluation, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D6). <https://doi.org/10.1029/2004JD005608>
- Routray, A., Mohanty, U.C., Niyogi, D., Rizvi, S.R.H., Osuri, K.K. (2010) Simulation of Heavy Rainfall Events over Indian Monsoon Region using WRF-3DVAR Data Assimilation System, *Meteorology and Atmospheric Phys-*

- ics, 106, 107-125. <https://doi.org/10.1007/s00703-009-0054-3>
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B. (2008) A Time-split Nonhydrostatic Atmospheric Model for Weather Research and Forecasting Applications, *Journal of Computational Physics*, 227(7), 3465-3485. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.01.037>
- Sommerfeld, M., Dörenkämper, M., Steinfeld, G., Crawford, C. (2019) Improving mesoscale wind speed forecasts using lidar-based observation nudging for airborne wind energy systems, *Wind Energy Science*, 4(4), 563-580. <https://doi.org/10.5194/wes-4-563-2019>
- Song, B., Park, K. (2021) Temperature Trend Analysis Associated with Land-cover Changes using Time-series Data (1980-2019) from 38 Weather Stations in South Korea, *Sustainable Cities and Society*, 65, 102615. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102615>
- Song, S.K., Han, S.B., Kim, S.W. (2014) Analysis of Meteorological Characteristics Related to Changes in Atmospheric Environment on Jeju Island during 2010-2012, *Journal of Environmental Science International*, 23(11), 1889-1907, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/JESI.2014.23.11.1889>
- Song, S.K., Shon, Z.H., Bae, M.S., Cho, S.B., Moon, S.H., Kim, H.S., Son, Y.B., Lee, C.R. (2022) Effects of Natural and Anthropogenic Emissions on the Composition and Toxicity of Aerosols in the Marine Atmosphere, *Science of The Total Environment*, 806, 150928. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150928>
- Song, S.-K., Shon, Z.-H., Choi, Y.-N., Son, Y.-B., Kang, M., Han, S.-B., Bae, M.-S. (2019) Global Trend Analysis in Primary and Secondary Production of Marine Aerosol and Aerosol Optical Depth during 2000-2015, *Chemosphere*, 224, 417-427. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.152>
- Song, S.K., Shon, Z.H., Kim, Y.K., Kang, Y.H., Oh, I.B., Jung, C.H. (2010) Influence of Ship Emissions on Ozone Concentrations around Coastal Areas during Summer Season, *Atmospheric Environment*, 44(5), 713-723. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.11.010>
- Souri, A.H., Choi, Y., Jeon, W., Kochanski, A.K., Diao, L., Mandel, J., Bhawe, P.V., Pan, S. (2017) Quantifying the Impact of Biomass Burning Emissions on Major Inorganic Aerosols and their Precursors in the US, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(21), 12020-12041. <https://doi.org/10.1002/2017JD026788>
- Stockwell, W.R., Middleton, P., Chang, J.S., Tang, X. (1990) The Second Generation Regional Acid Deposition Model Chemical Mechanism for Regional Air Quality Modeling, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 95(D10), 16343-16367. <https://doi.org/10.1029/JD095iD10p16343>
- Streets, D.G., Bond, T.C., Carmichael, G.R., Fernandes, S.D., Fu, Q., He, D., Klimont, Z., Nelson, S.M., Tsai, N.Y., Wang, M.Q., Woo, J.-H., Yarber, K.F. (2003) An Inventory of Gaseous and Primary Aerosol Emissions in Asia in the year 2000, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D21). <https://doi.org/10.1029/2002JD003093>
- Sugimoto, S., Crook, N.A., Sun, J., Xiao, Q., Barker, D.M. (2009) An Examination of WRF 3DVAR Radar Data Assimilation on its Capability in Retrieving Unobserved Variables and Forecasting Precipitation through Observing System Simulation Experiments, *Monthly Weather Review*, 137(11), 4011-4029. <https://doi.org/10.1175/2009MWR2839.1>
- Sung, M.K., Lim, G.H., Choi, E.H., Lee, Y.Y., Won, M.S., Koo, K.S. (2010) Climate Change over Korea and its Relation to the Forest Fire Occurrence, *Atmosphere*, 20(1), 27-35, (in Korean with English abstract).
- Tai, E., Jimenez, M., Nopmongcol, O., Wilson, G., Mansell, G., Koo, B., Yarwood, G. (2008) Boundary Conditions and Fire Emissions Modeling, Prepared for Texas Commission on Environmental Quality. September.
- Uranishi, K., Ikemori, F., Shimadera, H., Kondo, A., Sugata, S. (2019) Impact of Field Biomass Burning on Local Pollution and Long-Range Transport of PM_{2.5} in North-east Asia, *Environmental Pollution*, 244, 414-422. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.09.061>
- Van der Werf, G.R., Randerson, J.T., Giglio, L., Collatz, G.J., Mu, M., Kasibhatla, P.S., Morton, D.C., Defries, R.S., Jin, Y., van Leeuwen, T.T. (2010) Global Fire Emissions and the Contribution of Deforestation, Savanna, Forest, Agricultural, and Peat Fires (1997-2009), *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(23), 11707-11735. <https://doi.org/10.5194/acp-10-11707-2010>
- Vongruang, P., Wongwises, P., Pimonsree, S. (2017) Assessment of Fire Emission Inventories for Simulating Particulate Matter in Upper Southeast Asia using WRF-CMAQ, *Atmospheric Pollution Research*, 8(5), 921-929. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2017.03.004>
- Wang, X., Hu, Y., Russell, A., Mauzerall, D., Zhang, Y. (2002) Using Models3/CMAQ to Simulate Regional Air Quality in China, In 2002 Models-3 User's Workshop. EPA, Research Triangle Park.
- Wiedinmyer, C., Akagi, S.K., Yokelson, R.J., Emmons, L.K., Al-Saadi, J.A., Orlando, J.J., Soja, A.J. (2011) The Fire INven-

tory from NCAR (FINN): A High Resolution Global Model to Estimate the Emissions from Open Burning, *Geoscientific Model Development*, 4(3), 625-641. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-625-2011>

Zhang, X., Hecobian, A., Zheng, M., Frank, N.H., Weber, R.J. (2010) Biomass Burning Impact on PM_{2.5} over the South-eastern US during 2007: Integrating Chemically Speciated FRM Filter Measurements, MODIS Fire Counts and PMF Analysis, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(14), 6839-6853. <https://doi.org/10.5194/acp-10-6839-2010>

Authors Information

선대현 (제주대학교 지구해양융합학부 지구해양전공 석사과정)
(tjseogus9@jejunu.ac.kr)

송상근 (제주대학교 지구해양과학과 교수)
(songsk@jejunu.ac.kr)

조성빈 (제주대학교 지구해양융합학부 지구해양전공 석박사통합
과정) (cho2285@jejunu.ac.kr)

문수환 (국립기상과학원 기상응용연구부 연구원)
(shmoon9677@korea.kr)