

논문

대형 산불로 인한 에어로졸 조성 변화 및 구름응결핵에 미치는 영향 평가

Assessment of the Impacts of a Large-scale Wildfire on Aerosol Composition Changes and Cloud Condensation Nuclei

선대현, 송상근^{1),*}

(재)차세대수치예보모델개발사업단, ¹⁾제주대학교 지구해양과학과

Dae-Hyun Sun, Sang-Keun Song^{1),*}

Korea Institute of Atmospheric Prediction System (KIAPS), Seoul, Republic of Korea

¹⁾Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju, Republic of Korea

접수일 2024년 11월 15일
수정일 2024년 12월 4일
채택일 2024년 12월 4일

Received 15 November 2024
Revised 4 December 2024
Accepted 4 December 2024

*Corresponding author

Tel : +82-(0)64-754-3431

E-mail : songsk@jejunu.ac.kr

Abstract A large and severe wildfire occurred in the northeastern region of South Korea, near Uljin, from March 4 to 13, 2022, making it the largest wildfire episode in the past decade. We evaluated the impacts of this wildfire episode on aerosol chemical composition and cloud condensation nuclei (CCN) using the Weather Research and Forecast (WRF v3.8) and Community Multi-scale Air Quality (CMAQ v5.3.2) models. These analyses were conducted using simulations both with wildfire emissions (i.e., Total case) and without wildfire emissions (i.e., Base case). The mean concentrations of PM_{2.5} chemical components in the Total case were significantly higher than those in the Base case, with the largest increase (by a factor of 20) observed in primary organic aerosol (POA). This increase is due to the emission of large amounts of carbon components into the atmosphere under forest conditions in the wildfire area, leading to a significant increase in POA concentrations. In addition, the increased concentrations of PM_{2.5} components due to the wildfires in the Total case resulted in a substantial rise (up to 11 times at 40 nm) in the mean number concentrations of CCN compared to the Base case. This model study suggests that the increase in CCN, along with the large amounts of water vapor supplied by the sea breeze, can exert a significant impact on the growth of cloud droplets in the target area.

Key words: Large-scale wildfire, Aerosol composition, Primary organic aerosol, Cloud condensation nuclei, WRF, CMAQ

1. 서 론

산불과 같은 생물성 연소는 주로 대기 중 미세먼지 (PM), 1차 및 2차 유기 에어로졸 (primary (POA) and secondary organic aerosols (SOA)) 등의 주요 공급원이며, 연소과정에서 다량의 오염물질 (일산화탄소 (CO), 휘발성 유기화합물 (volatile organic compounds, VOC), 질소산화물 (NO_x)과 온실가스 (이산화탄소 (CO₂), 메탄 (CH₄) 등)를 배출하여 대기질을 악화시킨다 (Souri *et al.*, 2017; Vicente *et al.*, 2013). 또

한 대기 중 에어로졸은 구름응결핵 (cloud condensation nuclei, CCN) 역할을 하여 구름의 생성 및 성장을 촉진시켜 강수 발달에 영향을 주며, 지구의 복사 수지 및 대기 조성을 직·간접적으로 변화시킬 수 있다 (Tummon *et al.*, 2010; Posfai *et al.*, 2003). 또한 산불로 발생한 연기는 먼 지역까지 장거리 수송되어 그 지역의 대기질과 기후뿐만 아니라 인간의 건강에도 상당한 영향을 미칠 수 있다 (Cathcart *et al.*, 2016; Van der werf *et al.*, 2010; Andreae and Merlet, 2001).

산불 발생에 따른 대기오염물질이 지역 대기질에

미치는 영향에 관한 연구는 국내외로 다양한 관측 및 모델링 연구가 수행되어 왔다(Sharma *et al.*, 2022; Guan *et al.*, 2020; Kelly *et al.*, 2018). 예를 들어, 남아메리카 및 아프리카 지역에서 2000년에 발생한 산불로 인해 SOA의 연평균 농도를 최고 $3 \mu\text{g m}^{-3}$ 까지 증가시켰다는 연구 결과가 발표되었다(Kelly *et al.*, 2018). Guan *et al.* (2020)은 2011년 미국 남동부에서 발생한 산불이 월평균 $\text{PM}_{2.5}$ 농도를 약 $40 \mu\text{g m}^{-3}$ 정도 증가시켰으며, 이때 산불의 기여도가 약 45%를 차지한다고 밝혔다. 이 외에도 Sharma *et al.* (2022)에 의하면, 2017년 9월 미국 서부에서 발생한 산불 사례 시 1차 유기 탄소(primary organic carbon, POC)가 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 증가에 약 30% 이상 기여한 반면, SOA에 미치는 기여는 상대적으로 미미하였다.

산불이 대기질에 미치는 영향 외에도, 산불로 인한 배출 오염물질이 주변 지역의 CCN뿐만 아니라 강수에도 영향을 줄 수 있다는 여러 선행연구들이 보고되고 있다(Vara-vela *et al.*, 2018; Bougiatioti *et al.*, 2016; Tummon *et al.*, 2010; Martins *et al.*, 2009). 먼저, Tummon *et al.* (2010)은 지역기후모델(RegCM3, off-line 모델)을 활용하여 2001~2006년 동안 남부 아프리카에서 발생한 생물성 연소(산불 등)가 적도 주변 지역의 강수량을 10~50% 정도 증가시키는 데 기여하였음을 밝혔다. Martins *et al.* (2009)은 중규모 모델(BRAMS, off-line 모델)을 이용하여 2002년 9월 아마존 남서부 지역의 산불로 인해 증가한 에어로졸 및 CCN 수농도가 강수에 미치는 영향 가능성을 밝힌 바 있다. 또한 Bougiatioti *et al.* (2016)의 연구 결과, 2021년 지중해 연안 산불에 의해 $\geq 100 \text{ nm}$ 크기의 CCN 수농도가 약 150% 증가하였다. 또한 Vara-vela *et al.* (2018)의 연구에 따르면, 4일간의 브라질 산불 발생이 대기 중 CCN 수농도를 평균 약 600 particle/ cm^3 정도 증가시켰으며, 이때 산불 배출량이 수농도 증가에 미치는 기여도는 약 8% 정도였다. 한편, 산불 발생 시 에어로졸 및 CCN의 특성 변화를 이해하고 이에 대한 정확한 원인을 규명하기 위해서는 산불 발생 전후의 다양한 환경조건(기상조건, 오염물질 배출

량 등)에 대한 분석이 매우 중요하며, 효율적인 영향 평가 연구가 수행되어야 한다(Cho *et al.*, 2023, Pun *et al.*, 2006). 그러나, 기상-대기질 모델링을 통해 산불에 의한 대기오염물질의 확산, 화학적 생성반응, 강수에 미치는 영향 등을 정확하게 분석하는 것은 배출량의 불확실성, 강수 형성 메커니즘 및 오염물질 생성반응의 복잡성 등으로 인해 상당히 어렵다(Sun *et al.*, 2023; Garcia-Menedez *et al.*, 2014; Pun *et al.*, 2006).

앞서 언급한 바와 같이, 많은 선행연구에서 산불에 의한 배출 오염물질이 인근 대기질에 미치는 영향에 관한 수치모의 연구를 수행하여 왔다(Kang *et al.*, 2024; Lee *et al.*, 2022). 그러나 대부분 국외에서 발생한 산불이 장거리 수송되어 국내 대기환경에 미치는 영향에 초점을 맞추고 있다(Sun *et al.*, 2023; Kim *et al.*, 2022). 한편, 일부 국외 연구에서 산불로 인해 생성된 에어로졸이 CCN 및 강수 과정에 직·간접적으로 영향을 줄 수 있다는 연구 결과가 보고된 바 있다(Lu and Sokolik, 2013). 국내에서는 아직 이와 관련한 연구가 전혀 수행된 적이 없어, 산불 발생과 에어로졸, 구름, 강수와와의 관계를 이해하기에는 많은 어려움과 한계가 있다. 본 연구는 이전에 출판된 동반 논문(Sun *et al.*, 2023)의 후속 연구로서, 이전 논문에서는 최근 10년간 국내 산불 중 가장 큰 산불로 기록된 2022년 봄철 울진 사례를 대상으로 고해상도의 산불 배출량을 산정하였고, 이를 대기질 모델에 적용하여 산불이 미세먼지 및 CO 농도에 미치는 영향을 분석하였다. 한편, 본 연구에서는 울진 산불 발생에 의한 주변 지역 에어로졸의 화학조성 및 CCN 수농도 변화를 정량적으로 산출하고, 이러한 물질들이 강수에 미치는 영향 가능성을 다양한 기상조건(혼합비, 풍향 변화 등)의 분석을 통해 추정하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 대상지역, 연구 사례 및 방법

본 연구에서는 2002년 3월 경북 울진에서 발생한

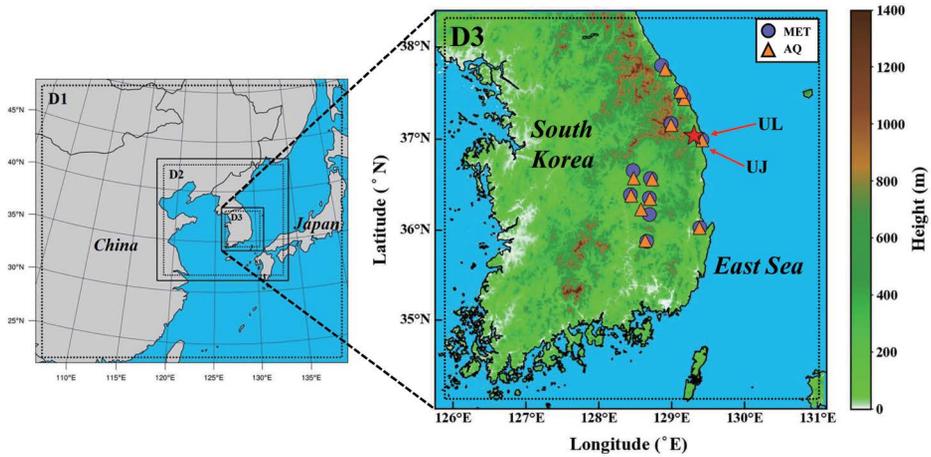


Fig. 1. Nested model domains for WRF (solid frame) and CMAQ (dotted frame) simulations and the geographical locations of a fire hotspot (red star), 12 sites for air quality (triangles, AQ), and 12 sites for meteorological variables (circles, MET) (Source: Sun *et al.*, 2023).

산불에 따른 에어로졸 조성 변화와 CCN에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구 사례는 3월 4일~13일간 총 213시간 지속된 초대형 산불 사례로, 총 14,140 ha의 산림면적이 소실되는 엄청난 피해를 입었다. 이는 우리나라 대형 산불 기준(≥24시간 지속 또는 산림면적 100 ha 소실)에 비해 피해 산림면적은 약 140배, 지속시간은 약 9배 초과한 수준이었다. 본 연구를 수행하기 위해 여러 기상요소(기온, 풍속, 상대습도)와 대기질(PM_{2.5}) 관측 자료를 이용하였으며, 산불 발생 주변 지역인 동해안과 일부 내륙지역에서 12곳의 기상관측 및 12곳의 대기질 지점을 선정하였다(그림 1). 일반적으로, 대상지역의 대기질 농도 변화는 인근 기상조건에 크게 영향을 받기 때문에, 보다 정확한 해석을 위해 기상관측 및 대기질 지점을 서로 가깝고 장애물(예, 높은 산)의 영향이 적은 지점으로 선정하였다(Song *et al.*, 2014). 먼저, 기상 관측자료는 종관 기상관측시스템(Automated Synoptic Observing System, ASOS)과 방재기상관측소(Automated Weather System, AWS)로부터 수집한 시간별 자료(기온, 풍속, 상대습도)를 사용하였다. 대기질 관측자료는 환경부 도시대기측정망의 시간별 PM_{2.5} 농도를 이용하였다. 특히, 산불에 의한 오염물질 및 CCN 변화와 기상조

건(예, 해풍, 수송, 혼합비 등)을 직접적으로 상호 연계하여 설명하기 위해, 태백산맥(평균 고도 약 800 m) 동쪽에 위치한 산불 발화점(해발고도 138 m) 인근의 도시대기측정망인 울진군(UJ) 지점과 이 지점에서 가장 가깝고(1 km 이내) 장애물의 영향을 적게 받는 울진 기상관측지점(UL)을 중점적으로 분석하였다. 산불 발생 동안 UJ 지점의 일평균 PM_{2.5} 농도는 99 μg m⁻³, 1시간 최고농도는 385 μg m⁻³을 기록하였다. 각 관측지점의 여러 가지 대기오염물질 농도 특성에 대한 설명은 선행논문(Sun *et al.*, 2023)에서 자세히 확인할 수 있다.

본 연구에서는 울진 산불로 인한 에어로졸의 조성 변화와 CCN에 미치는 영향을 분석하기 위해, 먼저 산불 사례 기간을 중심으로 기상모델을 수행하여 대상지역의 고해상도 기상장을 생성하였다. 이를 대기질 모델의 입력 자료로 활용하여 산불 배출량을 고려한 수치모의 실험(Total)과 고려하지 않은 실험(Base)으로 나누어 수행하였다. 최종적으로, Total과 Base 수치모의 실험의 결과(기상요소, 에어로졸 성분 농도, CCN 등)를 비교 분석하였다. 본 연구에 이용된 기상모델과 대기질 모델의 구성과 입력 자료에 대해서는 2.2절에 상세히 제시하였다. 이 외에도 모델의

예측정확도를 검증하기 위해, 전체 연구 기간에 대한 통계적 분석을 수행하였다. 이러한 분석은 주요 기상 요소(기온, 풍속, 상대습도, 기압, 일사, 강수량) 및 PM_{2.5}의 관측값과 모델값에 대한 평균 제곱근 오차(root mean square error, RMSE), 평균 편향 오차(mean bias error, MBE), 일치도 지수(index of agreement, IOA)를 계산하여 수행되었다.

2.2 모델 구성 및 입력 자료

본 연구에서는 울진 산불 사례의 기상장 수치모의를 위해 중규모 기상모델 WRF (Weather Research and Forecasting) version 3.8을 이용하였으며(<https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/>), 대기질 수치모의를 위해 CMAQ (Community Multi-scale Air Quality) version 5.3.2를 사용하였다(https://19january2021snapshot.epa.gov/cmaq/latest-version-cmaq532_.html). WRF 기상모델의 도메인(domain)은 동아시아 영역(D1, 27 km), 한반도 영역(D2, 9 km), 남한 영역(D3, 3 km)으로 총 3개 영역을 구성하였으며, 모델의 외부 및 내부 영역 사이의 feedback이 가능하도록 양방향 상호 동지 격자 시스템을 적용하였다. 또한 대기질 모델링에서는 WRF 모델의 기상장 경계 오차를 줄이고자 MCIP (Meteorological Chemistry Interface Processor, version 5.1) 과정을 통해 CMAQ 모델의 입력 자료 형태로 변환하여 사용하였다. CMAQ 모델의 연직 층은 29개로 설정하였으며, CB6r3 (Luecken *et al.*, 2019) 화학 메커니즘, AERO7 에어로졸 모듈을 사용하였다. 본 연구에 이용된 WRF v3.8 기상모델과 CMAQ v5.3.2 대기질 모델의 기본적인 특성 등 자세한 정보는 여러 선행연구에 잘 나타나 있다(Cho *et al.*, 2023; Sun *et al.*, 2023; Song *et al.*, 2022).

CMAQ 모델링에 필요한 기상장을 생성하기 위해 WRF 기상모델을 수행하였다. WRF 모델에 이용된 물리적 옵션 중 미세 물리 과정은 D1과 D2~D3 영역에 대해 각각 WSM3 (WRF Single-Moment 3-class, Hong *et al.*, 2004)과 WDM6 (WRF Double-Moment 6-class, Lim and Hong, 2010) scheme을 그리고 적은

모수화 과정은 D1과 D2 영역에 대해 Kain-Fritsch (Kain, 2004)을 적용하였다. 장파 및 단파 모수화 과정에 대해서는 각각 RRTM (Rapid Radiative Transfer Model, Mlawer *et al.*, 1997)과 Dudhia (Dudhia, 1989) scheme을 이용하였으며, 대기 경계층 모수화는 YSU (Yonsei University, Hong *et al.*, 2006) scheme을 사용하였다. 기상모델의 전체 수치모의 기간은 총 23일로 2022년 2월 24일 00 UTC~3월 19일 00 UTC이며, 이는 울진 산불 사례(3월 4일~13일)와 발생 전후 5일 그리고 72시간의 초기적응시간 (spin-up time)을 포함한다. 또한 기상모델 예측 성능 개선을 위해 3차원 변분자료동화와 넷징(관측 및 분석 넷징) 기법을 적용하였으며, 이에 대한 자세한 설명은 여러 선행연구에 제시되어 있다(Sun *et al.*, 2023; Cho *et al.*, 2021). 이 외에도 본 연구의 기상 모델링에 이용된 연직 층수 및 수평해상도, 초기 및 경계조건, 토지피복, 지형 고도 등의 자료 정보와 기상 및 대기질 모델의 구성에 관한 상세한 설명은 동반 논문(Sun *et al.*, 2023)에서 확인할 수 있다.

CMAQ 모델의 인위적 및 자연적 배출량 입력 자료에 대한 설명은 다음과 같다. 동아시아 영역(D1 및 D2) 인위적 배출량은 0.1°×0.1° 해상도의 EDGAR-HTAP (Emission Database for Global Atmospheric Research-Hemispheric Transport of Air Pollution) version 2 배출목록을 이용하였다(Janssens-Maenhout *et al.*, 2015). 남한 영역(D3) 인위적 배출량은 1 km×1 km 해상도의 CAPSS (Clean Air Policy Supporting System) 2016년 자료를 이용하였다(NIER, 2019) (<http://www.air.go.kr>). 또한 자연적 배출량은 모든 연구 도메인에 대해 MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature) version 2.1을 수행하여 모델링에 적용하였다(Guenther *et al.*, 2012). 이 외에도 고해상도 산불 배출량은 NCAR (National Center for Atmospheric Research)에서 제공하는 FINN (The Fire INventory from NCAR) version 1.5를 사용하였으며(Wiedinmyer *et al.*, 2011) (<https://www.acom.ucar.edu/Data/fire>), CMAQ 모델

의 입력 자료로 사용하기 위해 화학종 맵핑(mapping) 작업을 수행하였다. FINN은 위성 관측자료(화성 화재 관측) 기반으로 산정된 배출량으로, 관측 장비의 한계로 인해 결측치가 발생하여 연소면적이 다소 작게 산출되고, 작은 규모의 화재는 식별되지 않는 등 배출량에 불확실성이 존재한다. 본 연구에서는 이러한 불확실성을 일부 해소하고자 연소면적을 보정하고 재격자화하여 입력 자료를 구성하였다. FINN 배출량의 산정식, 화학종 맵핑(mapping), 연소면적 보정, 배출량 재격자화 등은 동반 논문(Sun *et al.*, 2023)에 상세히 기술되어 있다.

본 연구에서는 울진 산불로 인해 생성된 에어로졸이 CCN에 미치는 영향을 추정하기 위해, 산불 사레 전후로 CCN의 수농도 분포를 분석하고 이러한 CCN 변화를 통해 강수에 대한 영향을 간접적으로 살펴보았다. 본 연구에 이용된 CCN 수농도 산출식은 다음과 같다(Binkowski, 1999).

$$n(\ln D) = \frac{N}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma_g} \exp \left[-0.5 \left(\frac{\ln \frac{D}{D_g}}{\ln \sigma_g} \right)^2 \right] \quad (1)$$

여기서, $n(\ln D)$ 는 대수정규를 따르는 입자의 크기 분포(lognormal particle size distribution, particle/cm³), N 은 전체 수농도(total number concentration, particle/cm³), D 는 수농도를 계산하고자 하는 입자의 직경(particle diameter, nm), D_g 는 기하 평균 직경(geometric mean diameter, nm), σ_g 는 기하 표준 편차(geometric standard deviation)를 의미한다. 식 (1)의 항목들 중 N , D_g , σ_g 은 CMAQ의 시간별 모델 결과값을 사용하였으며, 특히 CCN에 해당하는 주요 입자 크기인 Aitken mode (mode i)를 선별적으로 이용하였다. D 의 경우, 여러 선행연구에서 주로 이용하고 있는 입자 크기(1~100 nm)의 CCN 수농도를 산출하여 분석하였다(Tummon *et al.*, 2010; Rose *et al.*, 2010; Binkowski, 1999).

3. 결과 및 토의

3.1 산불로 인한 에어로졸 조성 변화 분석

본 연구에서는 울진에서 발생한 대형 산불에 의한 에어로졸 농도 특성 및 화학조성 변화를 살펴보기 위해, 연구기간(2022년 2월 27일~3월 18일, spin-up time 제외) 동안 울진 도시 대기측정망 UJ 지점에서의 PM_{2.5} 관측 및 모의(Total 및 Base) 농도의 시계열을 비교하였다. 또한 Total 실험에 대해 PM_{2.5} 화학성분별(POA, SOA, SIA, EC, OTHER) 모의 농도의 특성을 분석하였다(그림 2). 먼저 두 실험의 PM_{2.5} 농도 변화를 보면, 전반적으로 Total 실험의 농도가 Base 실험에 비해 관측값의 시계열을 잘 따라가는 패턴을 보였다. 특히, 산불이 발생한 기간(3월 4일~13일) 동안 Total 실험의 PM_{2.5} 과소모의(MBE: -1.47 µg m⁻³)는 Base (MBE: -7.66 µg m⁻³)에 비해 크게 개선되어 관측값에 더 가깝게 모의된 것을 확인할 수 있었다. 이 외에도 산불 발생(3월 4일~13일)과 비발생 기간(2월 27일~3월 3일, 3월 14일~18일) 동안 PM_{2.5} 농도 변화에 대한 상세한 시·공간 분석은 Sun *et al.* (2023)의 동반 논문에 잘 나타나 있다.

그림 2에서 알 수 있듯이, 산불 발생 시 PM_{2.5} 화학성분별(POA, SOA, SIA, EC, OTHER) 모의 농도의 시계열은 PM_{2.5}의 모의 농도 패턴과 거의 유사하게 나타났다(특히, POA). 이 외에도 Total 실험의 PM_{2.5} 화학성분별 평균 농도는 Base 실험에 비해 각각 20배(POA), 11배(SOA), 1.2배(SIA), 2.9배(EC), 3.1배(OTHER) 정도 높게 추정되었다. 본 연구에서는 산불 발생에 따른 화학성분별 농도 특성을 보다 면밀히 파악하기 위해, 산불 발생 및 비발생 기간으로 구분하여 좀 더 상세히 분석하였다. 먼저 PM_{2.5} 성분별 평균 농도는 산불 발생 동안 비발생 기간에 비해 약 2배(SIA)~37배(POA) 정도 높은 수준이었다. 예를 들어, 산불 발생 기간에 5가지 화학성분(POA, SOA, SIA, EC, OTHER)의 평균 농도는 각각 20.8 µg m⁻³, 8.5 µg m⁻³, 13.7 µg m⁻³, 2.6 µg m⁻³, 15.5 µg m⁻³로, 1차 에어로졸 POA 성분이 가장 높은 농도를 보였다. 그러

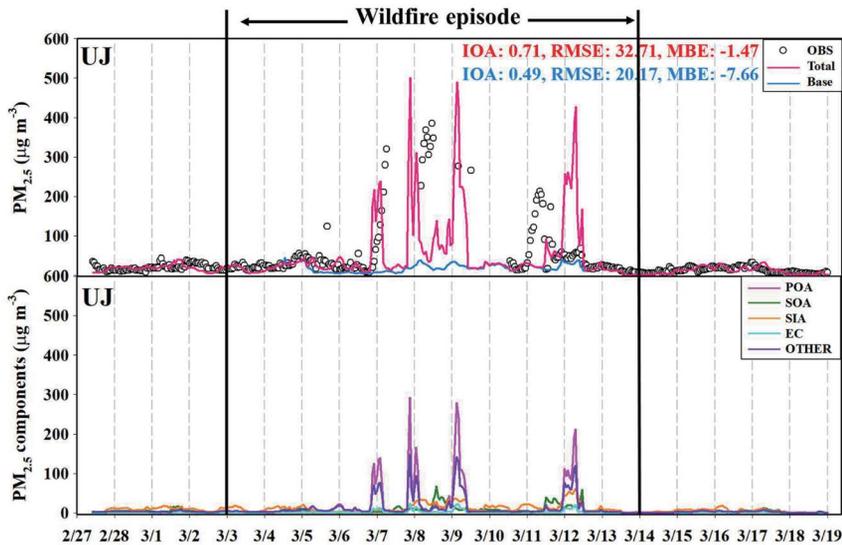


Fig. 2. Time series plot of the concentrations of the observed and model-predicted $PM_{2.5}$ for both Total and Base cases, including $PM_{2.5}$ chemical components for Total case only (primary organic aerosol (POA), secondary organic aerosol (SOA), secondary inorganic aerosol (SIA), elemental carbon (EC), and others (OTHER)), at the Ujin air quality monitoring site (UJ, Fig. 1) during the study period (February 27~March 18, 2022).

나 비발생 기간에는 성분별로 각각 $0.6 \mu\text{g m}^{-3}$, $3.7 \mu\text{g m}^{-3}$, $6.8 \mu\text{g m}^{-3}$, $0.5 \mu\text{g m}^{-3}$, $2.6 \mu\text{g m}^{-3}$ 로 낮은 수준이었으며, 산불 발생 기간과 달리 2차 에어로졸 성분(SIA와 SOA)의 농도가 상대적으로 더 높았다. 이 외에도 산불 발생 기간의 최고농도 역시 POA 성분이 약 $293 \mu\text{g m}^{-3}$ 로 가장 높고, 다음으로 OTHER 성분이 $148 \mu\text{g m}^{-3}$ 로 높았으며, 나머지 성분들은 $24 \mu\text{g m}^{-3}$ (EC)~ $67 \mu\text{g m}^{-3}$ (SOA)이었다. 반면, 비발생 기간에 5가지 성분의 최고농도는 대략 $20 \mu\text{g m}^{-3}$ 이하로 상당히 낮았다.

그림 3은 산불 발생 및 비발생 기간에 울진 대기측정망(UJ) 격자에서의 모의된 $PM_{2.5}$ 농도 중 각 성분의 농도가 차지하는 비율(%)을 나타낸다. 산불 발생 동안 $PM_{2.5}$ 농도에 대해 POA의 비중이 가장 높았으며(34.0%), 다음으로 OTHER(25.0%), SIA(22.4%), SOA(14.0%), EC(4.2%) 순이었다. 이와 달리 비발생 기간에는 SIA가 가장 높았고(48.0%), 다음으로 SOA(25.8%), OTHER(18.5%), POA(4.0%), EC(3.8%) 순이었다. 일반적으로, 산불은 상당한 양의 오염물질을 대기 중으로 배출하는 것은 사실이나(Gajendiran *et*

al., 2023; Jaffe *et al.*, 2020), 산불 발생지역의 식생 분포(산림 형태, 수목 종 등), 산불 진행 경과, 연소 조건 및 온도 등에 따라 배출되는 오염물질은 매우 다양하게 나타날 수 있다(Attiya and Jones, 2022; Sokolik *et al.*, 2019; Cruz *et al.*, 2018; Das *et al.*, 2017; Reisen *et al.*, 2015). 본 연구의 울진 산불은 넓은 면적에 엄청난 양의 산림/식생을 태우면서 다량의 탄소 성분을 대기 중으로 배출하여 1차 에어로졸인 POA 성분의 농도가 가장 높았으며, 이는 비발생 기간에 비해 증가 폭도 가장 크게 나타난 것으로 사료된다.

본 연구에서는 수치모델링에 대한 검증을 정량적으로 자세히 살펴보기 위해, 연구기간(2022년 2월 27일~3월 18일) 동안 대상지역 내 12개 기상관측지점 및 12개 대기질 측정소의 관측값과 모델값에 대한 통계적 분석(IOA, RMSE, MBE)을 수행하였다(표 1). 2.1절에서 언급한 바와 같이, 기상요소는 기온, 풍속, 상대습도, 기압, 일사, 강수량, 그리고 대기질은 $PM_{2.5}$ 농도 자료를 통계분석에 이용하였다. 먼저 연구기간 동안 대상지역 모든 관측지점에서 기온, 풍속, 상대습도, 기압, 일사, 강수량의 RMSE는 각각 2.21°C , 1.86

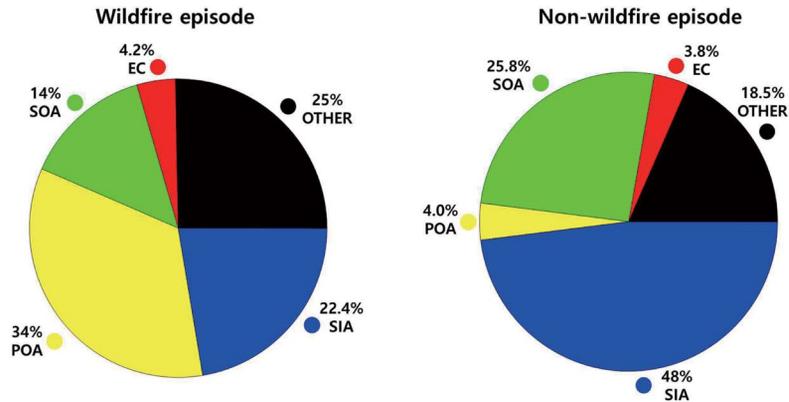


Fig. 3. The relative proportions (%) of five chemical components (POA, SOA, SIA, EC, and OTHER) in simulated PM_{2.5} mass concentrations at the Ujin air quality site (UJ) during the wildfire episode (March 4~13, 2022) and the non-wildfire episodes (February 27~March 3 and March 14~18, 2022).

Table 1. Statistical evaluation of the meteorological variables and PM_{2.5} concentrations between the observed and model-predicted values for the Total case. The results were compared at 12 sites for meteorological variables and 12 sites for PM_{2.5}, as shown in Fig. 1, during the study period (February 27~March 18, 2022).

Variable	Statistical parameter		
	IOA ^a	RMSE ^b	MBE ^c
Air temperature (°C)	0.95	2.21	-0.71
Wind speed (m s ⁻¹)	0.71	1.86	1.14
Relative humidity (%)	0.94	11.84	-0.03
Atmospheric pressure (hPa) ^d	0.99	4.41	-0.80
Solar radiation (MJ m ⁻²) ^d	0.96	0.38	0.01
Precipitation ^d	-	2.24	-1.06
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.

^dValues were calculated using the observed and model-predicted data from 8 available sites out of a total of 12 meteorological sites.

m s⁻¹, 11.8%, 4.41 hPa, 0.38 MJ m⁻², 2.24 mm로 모의되었다. PM_{2.5}의 경우, 대상지역 모든 관측지점에서 RMSE가 9.98 μg m⁻³ 정도로 나타났다. 또한 모든 관측지점에서의 기온, 상대습도, 기압, 강수량은 약한 과소모의 (MBE: -0.71°C, -0.03%, -0.80 hPa, -1.06 mm) 경향이 나타난 반면, 풍속, 일사 그리고 PM_{2.5}는 약한 과대모의 (MBE: 1.14 m s⁻¹, 0.01 MJ m⁻², 0.72 μg m⁻³) 경향을 보였다. 마지막으로, 여러 기상요소의

IOA는 각각 0.71 (풍속)~0.99 (기압)으로 상당히 높은 편이며, PM_{2.5}의 IOA는 0.84 정도였다. 대상지역의 이러한 통계분석 결과들은 여러 선행연구의 결과와 비교해 볼 때 서로 유사한 수준인 것으로 확인되었다 (Ko *et al.*, 2024; Kang *et al.*, 2023; Cho *et al.*, 2023; Song *et al.*, 2022). Song *et al.* (2022)의 연구에 따르면, 기온, 풍속, 상대습도와 PM_{2.5}의 RMSE는 각각 2.03~2.63°C, 1.48~1.78 m s⁻¹, 12.8~13.9%, 13.4~20.9 μg m⁻³로 나타났으며, IOA는 각각 0.89, 0.70, 0.84, 0.60 이상으로 산출되었다. 또한 Cho *et al.* (2023)의 연구결과에서 기온, 풍속, 상대습도, PM_{2.5}의 RMSE는 각각 2.15°C, 1.96 m s⁻¹, 16.5%, 12.4 μg m⁻³ 정도였고, IOA는 0.68 (풍속)~0.95 (기온)의 범위로 나타났다. 따라서 본 연구의 모델 검증을 종합해보면, 본 연구에서 수행한 수치모의 결과는 산불 발생에 따른 에어로졸 조성 변화를 분석하는 데 합리적인 것으로 사료되며, 또한 산불에 의해 생성된 오염물질이 CCN에 미치는 영향을 평가하는 데 보다 향상된 모의를 예상할 수 있다.

3.2 산불이 구름응결핵에 미치는 영향 분석

본 연구에서는 산불로 인해 생성된 대기오염물질 (에어로졸)이 구름응결핵 (CCN)에 미치는 영향을 분석하기 위해, 산불 발생에 따른 CCN의 수농도 변화

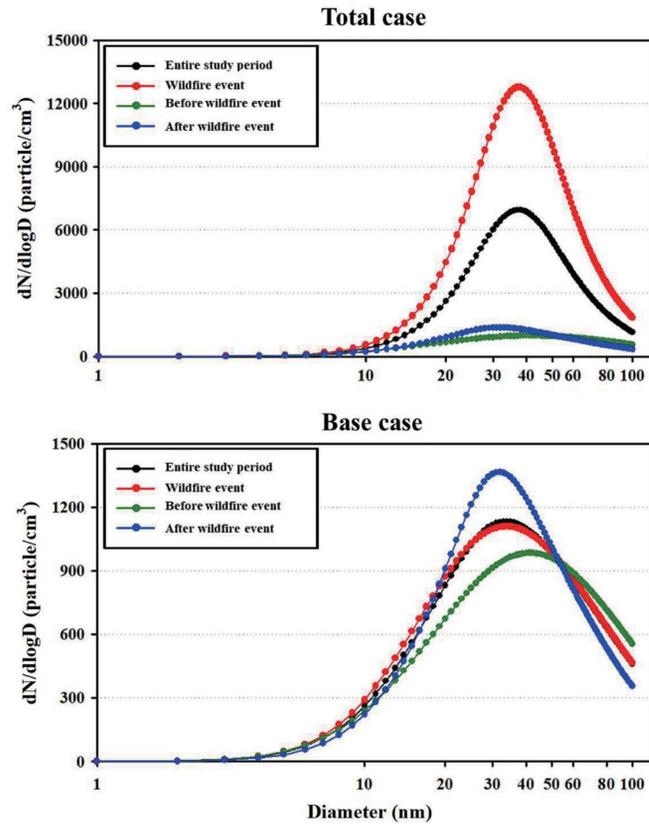


Fig. 4. Number size distributions of cloud condensation nuclei number concentrations ($\text{particle}/\text{cm}^3$) at the Uljin air quality site (UJ), averaged over the entire study period (black line), the wildfire episode (red line), before the wildfire episode (green line), and after the wildfire episode (blue line) for both Total and Base cases.

를 살펴보았다. 산불 발화점에 가장 가까이 위치한 울진 도시대기측정망(UJ)을 대상으로, Total 및 Base 실험에서의 에어로졸 입자 크기가 1~100 nm에 해당하는 것을 CCN 크기로 선정하여 수농도를 산출하였다(Rose *et al.*, 2010; Binkowski, 1999). 그림 4는 전체 연구기간을 산불 발생과 발생 이전 및 이후 기간으로 나누어, 각 기간별 Total 및 Base 실험의 CCN 평균 수농도 변화를 나타낸다. Total 실험 결과를 보면, 전반적으로 모두 30~40 nm 크기의 입자에서 CCN 수농도가 높게 산출되었으며, 특히 산불 발생 기간에는 40 nm 크기에서 가장 높았다(약 12,768 $\text{particle}/\text{cm}^3$). 이 외에도 전체 연구기간과 산불 발생 이전 및 이후에 각각 37 nm, 41 nm, 32 nm의 입자 크기에서 CCN

수농도가 가장 높았으며, 각각 6,941 $\text{particle}/\text{cm}^3$, 984 $\text{particle}/\text{cm}^3$, 1,366 $\text{particle}/\text{cm}^3$ 정도였다. Base 실험의 경우, 높은 CCN 수농도가 나타나는 입자의 크기는 Total 실험과 비슷하게 대략 30~40 nm였으나, 수농도의 크기는 상당한 차이(특히, 산불 발생 기간)를 보였다. 전체 연구기간 및 산불 발생 기간에 Total 실험의 평균 CCN 수농도(입자 크기 30~40 nm)는 Base 실험(각각 1,133 $\text{particle}/\text{cm}^3$, 1,111 $\text{particle}/\text{cm}^3$)보다 각각 6배와 11배로 매우 높게 추정되었다. 반면, 산불 발생 이전과 이후의 CCN 수농도는 두 실험 모두 비슷하게 나타났다(Base 실험: 각각 956 $\text{particle}/\text{cm}^3$, 1,355 $\text{particle}/\text{cm}^3$). 이와 같이 Total 실험에서의 매우 높은 수준의 CCN은 산불로 인한 대기오염물질

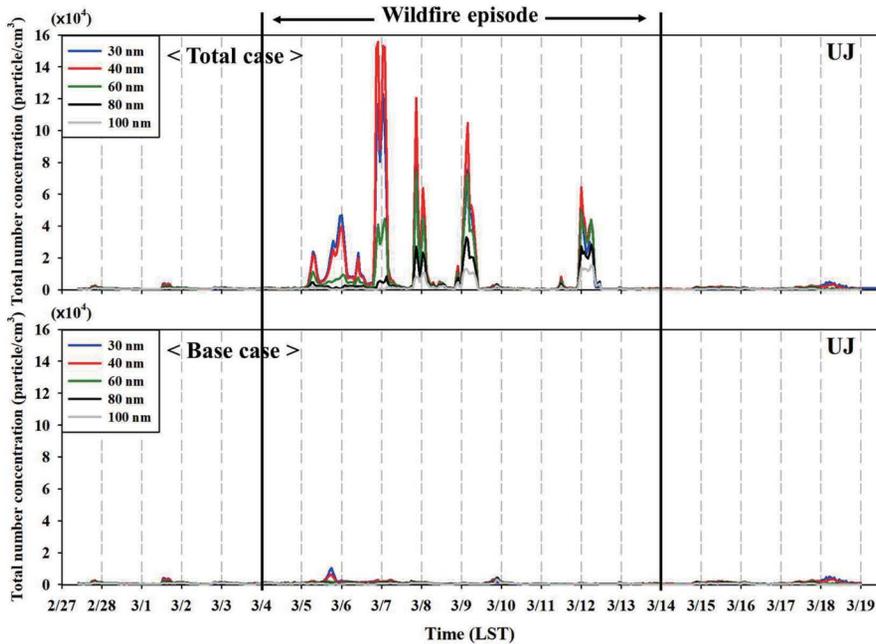


Fig. 5. Time series plot of cloud condensation nuclei number concentrations (particle/cm³) simulated at the UJin air quality site (UJ) for both Total and Base cases during the study period (February 27~March 18, 2022).

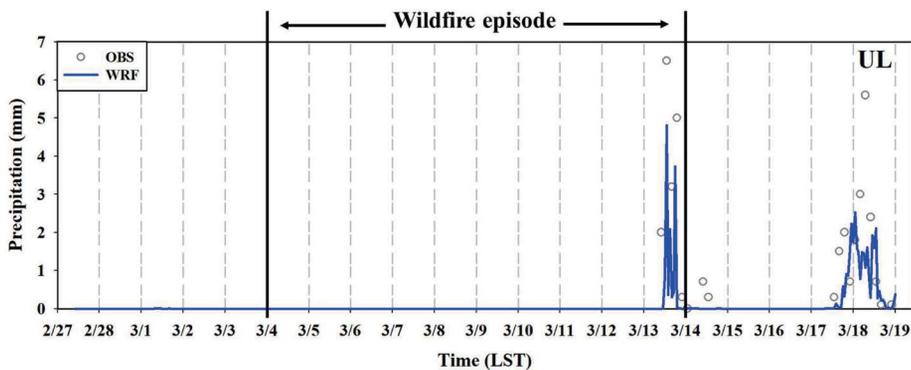


Fig. 6. Time series plot of the observed and model-predicted precipitation (mm) at the UJin meteorological site (UL) during the study period (February 27~March 18, 2022).

배출이 직접적으로 크게 영향을 준 것으로 사료되며, 이러한 결과는 일부 선행연구의 결과와 유사한 것으로 확인되었다(Bougiatioti *et al.*, 2016; Rose *et al.*, 2010).

앞에서 언급한 바와 같이, 울진 산불 사례에서는 에어로졸 입자 크기 30~40 nm에 해당하는 CCN의

평균 수농도가 가장 높게 나타났다. 입자 크기별 CCN 수농도의 시간적 변화를 보다 상세히 분석하기 위해, 전체 연구기간 동안 UJ 지점을 대상으로 Total 및 Base 실험의 입자 크기별 (30 nm, 40 nm, 60 nm, 80 nm, 100 nm) CCN 수농도의 시계열을 비교하였다 (그림 5). 먼저 Total 실험에서는 산불 발생 기간에 입

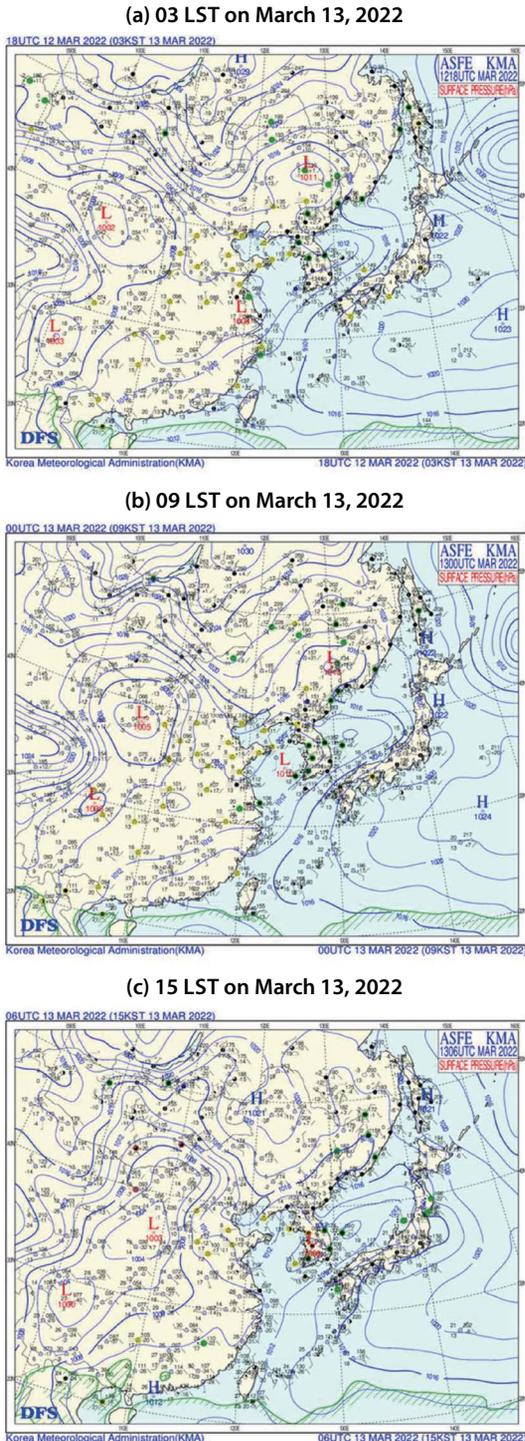


Fig. 7. Surface synoptic weather chart for East Asia, including the study area, on March 13, 2022 (a rainy day).

자 40 nm에서 총 CCN 수농도가 가장 높았으며(최고 1.5×10^5 particle/cm³), 다음으로 30 nm (최고 1.2×10^5 particle/cm³), 60 nm (최고 7.5×10^4 particle/cm³), 나머지 80~100 nm (최고 약 $\leq 3.0 \times 10^4$ particle/cm³) 순이었다. 산불 발생 기간의 이러한 수농도 증가 패턴은 그림 2의 PM_{2.5} 농도 패턴과 유사한 모습을 보였다. 한편, Base 실험의 CCN 수농도 패턴은 특정 시간대(예, 3월 5일 오후)를 제외하고 전반적으로 일정하며 매우 낮은 편이었다(약 1,000 particle/cm³ 이하). 특히, 산불 발생 기간의 Base 실험 결과가 Total 실험에 비해 상당히 낮은 수농도를 보였다. 두 실험 간의 수농도 차이는 산불 발생으로(Total 실험) 다량의 미세입자(예, 100 nm 이하의 CCN)가 대기 중으로 배출되었음을 의미한다. 또한 이러한 높은 CCN 환경 조건은 구름방울의 성장 및 수증기의 결빙 효율을 감소시킬 수 있다(Lu and Sokolik, 2013). 이는 결국 구름 및 강수발달 과정을 촉진시켜 비를 내리게 하는데 영향을 미칠 것으로 예상된다.

본 연구에서는 산불이 강수 형성에 미치는 잠재적 영향 가능성을 추정하기 위해, CCN 수농도 변화와 다양한 기상조건을 특성을 함께 살펴보았다. 이러한 분석은 산불 발화점 인근 울진 ASOS 지점(UL)을 대상으로 강수와 관련한 기상인자(풍계, 비습, 구름 및 수증기 혼합비 등) 및 지상 일기도를 이용하여 이루어졌다(그림 6~9). 여기서 관측자료가 없는 관계로 비습과 구름 및 수증기 혼합비 등의 자료는 모델링 결과를 이용하여 분석하였다. 본 연구의 울진 산불 사례는 2002년 3월 13일 오전에 내린 비로 인해 산불의 주불이 진화되었다는 보고가 있었기에, UL 지점에서 관측된 강수와 수치모의 결과를 비교하였다(그림 6). 3월 13일 오전 09시부터 처음 강수가 관측되었으며, 기상모델에서는 한 시간 후인 오전 10시부터 강수가 나타나기 시작하여 대체로 잘 모의된 모습을 보였다. 이후 최대 6.5 mm의 강수가 관측되었으며, 모델링에서는 최대 5 mm 정도의 강수가 모의되었다.

그림 6의 강수 발생에 대한 상세한 분석을 위해, UL 지점에서의 강수 발생 조건 중 하나인 해풍에 의

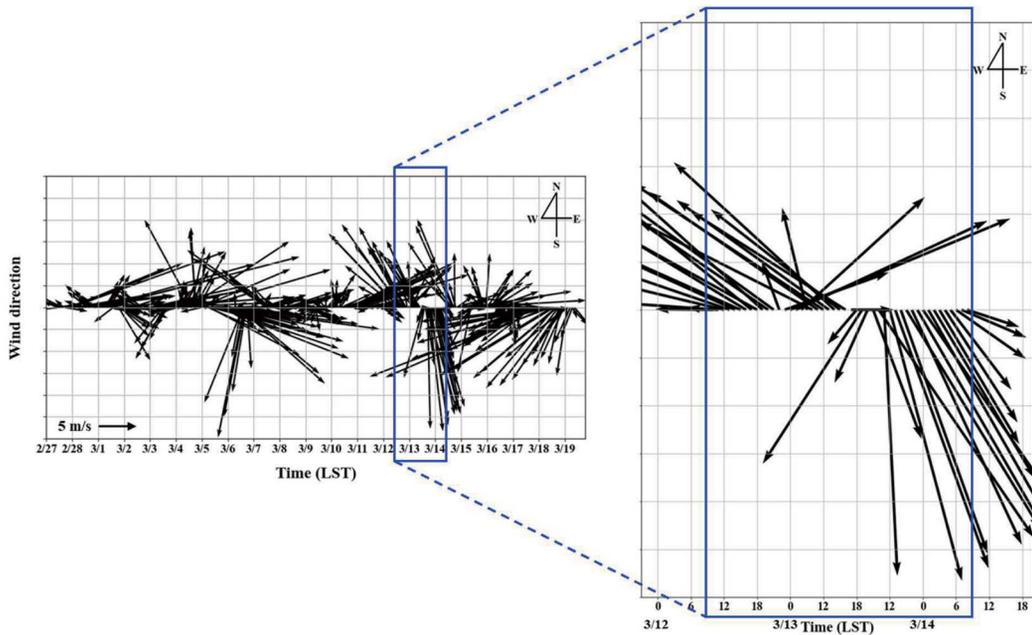


Fig. 8. Time series plot of simulated wind vectors at the Uljin meteorological site (UL) during the study period (February 27~March 18, 2022). The onset time of precipitation is 09:00 LST on March 13.

한 수증기 유입 가능성을 분석하였다. 먼저, 강수 발생 전후의 종관패턴을 확인하고자 강수 발생 시간을 포함하는 2002년 3월 13일 03시부터 15시까지 6시간 간격의 지상일기도를 분석하였다(그림 7). 3월 13일 03시에 중국 내륙 및 동부(난징 부근), 한반도 북부(길림 부근)에 저기압이 위치하고 일본 북동부(후쿠시마 부근)와 남동부에 고기압이 배치된 모습을 보이며, 해양으로부터 남-남동풍 계열의 바람이 UL 지점으로 유입되었다(그림 7(a)). 3월 13일 09시에는 중국 내륙과 동부에 위치하던 저기압이 서해로 이동하였으며, 고기압은 03시와 유사하게 분포하여 해양으로부터의 지속적인 남-남동풍 계열 바람이 유입될 수 있는 기상조건이 나타났다(그림 7(b)). 3월 13일 15시에는 우리나라 중심에 저기압, 북서 및 북동쪽에 고기압이 배치되어 북풍 계열 바람이 우리나라로 유입되는 종관규모 흐름이 나타났으며, 아울러 동해안에 인접한 UL 지점 부근에 나타난 저기압에 의해 해풍으로부터 수증기가 지속적으로 공급된 것으로 사료

된다.

대상지역 UL 지점에서의 풍계를 보면(그림 8), 강수 발생(2022년 3월 13일 09시)하기 약 10시간 전부터 남풍/남동풍 계열의 바람에 의해 동해안으로부터 다량의 수증기가 UL 및 주변지역으로 공급된 것으로 판단된다(관측과 모델링 둘 다 풍계 유사함). 이 때문에 비습(Q2)과 수증기 혼합비(Qvapor)가 증가하며, 수증기 공급에 의한 높은 상대습도, 낮은 기온에 의한 응결 속도 및 포화도 증가 등으로 인해 구름 혼합비(Qcloud)가 증가하는 모습을 보인 것으로 추정된다(그림 9). 또한 강수 발생 이후에도 북풍/북동풍 계열 바람에 의해 수증기가 지속적으로 유입되는 환경에서, 응결 및 수적 성장 등의 영향으로 강수 발생 이전까지 큰 변화가 없던 비 혼합비(Qrain)가 증가하고, 비습, 수증기 혼합비, 구름 혼합비가 감소하는 등 이러한 과정을 통해 강수가 발달된 것으로 추정된다. 한편, 3월 12일에 증가하는 모습을 보인 CCN 수농도는(그림 5) 작은 입자에 의해 가볍게 결빙되어 상대

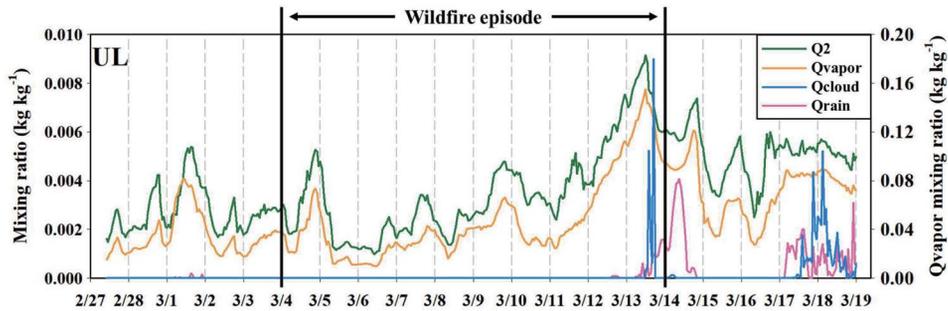


Fig. 9. Time series plot of simulated meteorological variables (specific humidity (Q2), water vapor mixing ratio (Qvapor), cloud water mixing ratio (Qcloud), and rain water mixing ratio (Qrain)) at the Uljin meteorological site (UL) during the study period (February 27~March 18, 2022).

적으로 낙하속도가 느려지고 풍하측으로 수송되는 등 대기 중 체류시간이 길어져 강수 형성에 즉시 관여하지 못하고, 풍하측 지역(UL 지점 인근)의 강수 형성에 영향을 미치기까지 시간 간격이 발생한 것으로 추정된다(Lu and Sokolik, 2013; Martins *et al.*, 2009). 결과적으로, 이러한 기상조건에서 산불에 의한 CCN 수농도 증가(Total: 12,768 particle/cm³, Base: 1,111 particle/cm³)가 응결핵을 증가시킴으로써 구름 혼합비 증가에 기여할 수 있으며, 충분한 수적 성장 과정을 통해 구름방울의 성장을 촉진시켜 잠재적으로 강수 형성에 추가적인 기여 가능성을 확인하였다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 최근 10년간 발생한 산불 중 가장 규모가 컸던 2022년 3월 울진 산불을 대상으로, 산불로 인한 에어로졸(PM_{2.5})의 화학적 조성 변화를 분석하고, 이러한 변화가 CCN에 미치는 영향을 평가하였다. 전반적으로, 산불 배출을 포함한 Total 실험에서 산불 발생으로 인한 PM_{2.5}의 질량 농도와 성분별(POA, SOA, SIA, EC, OTHER) 농도는 Base 실험과 비발생 기간에 비해 상당히 높게 나타났으며, 특히 POA 성분이 다른 성분들보다 훨씬 높은 수준이었다(Base에 비해 약 20배, 비발생 기간에 비해 약 37배). 이는 산불 발생지역의 산림 환경에 따라 다량의 탄소

성분이 대기 중으로 배출되어 1차 에어로졸의 농도와 증가 폭이 크게 나타난 것으로 사료된다. 또한 이 지역에서 산불로 인한 미세입자(PM_{2.5}) 농도 증가는 강수 발달과정에서 중요한 역할을 하는 CCN의 수농도 증가를 초래하였다. 전체 연구기간 및 산불 발생 동안 Total 실험의 CCN 평균 수농도는 Base 실험에 비해 각각 6배와 11배 정도 높게 추정되었다. 이 외에도 대상지역 주변으로 해풍을 따라 많은 양의 수증기가 지속적으로 공급되어 혼합비 증가 및 수적 성장을 초래하고, 산불로 인해 증가한 CCN과 함께 복합적으로 작용하여 결국 구름방울의 성장에 중요한 영향을 미친 것으로 사료된다.

기존의 국내 산불 관련 연구는 주로 대기오염물질의 농도 및 거동에 관한 연구에 국한되어 있어, 산불 발생 시 응결핵 및 강수 형성에 대한 정확한 이해가 부족한 실정이다. 이러한 점에서, 산불로 인해 생성된 에어로졸의 조성 변화와 CCN에 미치는 영향을 분석한 본 연구의 주요 결과는 향후 대기환경 조건에 따른 강수 발달 메커니즘을 이해하는 데 크게 기여할 것으로 기대되어 의미 있는 연구라 사료된다. 그러나 대상지역에서의 기상(비습, 혼합비 등) 및 대기질 관측망 부족과 연직 관측자료의 부재로 인해, 산불 발생 시 에어로졸 및 CCN 농도의 수평과 연직 분포를 입체적으로 해석하고 검증하는 데 어려움이 있었다. 또한 기상 및 대기질 모델 간의 피드백(feedback)을 반영하지 못하여 산불로 인해 생성된 미세입자 농도

증가가 강수에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는데 한계가 있었다. 향후, 대상지역 주변의 산불 배출량 산정의 불확실성을 줄이고 기상-대기질 피드백 효과를 고려한 온라인 (on-line) 결합 모델링 시스템을 적용한다면, 산불 발생 시 강수 형성에 미치는 영향을 보다 정확하게 해석할 수 있을 것이며, 이를 통해 보다 전문적인 산불대응 체제 구축과 정책 수립에 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2024학년도 제주대학교 교원성과지원 사업에 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>
- Attiya, A.A., Jones, B.G. (2022) Impact of smoke plumes transport on air quality in Sydney during extensive bushfires (2019) in New South Wales, Australia using remote sensing and ground data, *Remote Sensing*, 14(21), 5552. <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/21/5552>
- Binkowski, F.S. (1999) Aerosols in models-3 CMAQ, science algorithms of the EPA models-3 Community Multi-scale Air Quality (CMAQ) modeling system, National Exposure Research Laboratory, U.S. EPA, Research Triangle Park, NC, Chap. 10, EPA/600/R-99/030
- Bougiatioti, A., Bezantakos, S., Stavroulas, I., Kalivitis, N., Kokkalis, P., Biskos, G., Mihalopoulos, N., Papayannis, A., Nenes, A. (2016) Biomass-burning impact on CCN number, hygroscopicity and cloud formation during summertime in the eastern mediterranean, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(11), 7389-7409. <https://doi.org/10.5194/acp-16-7389-2016>
- Cathcart, H., Aherne, J., Jeffries, D.S., Scott, K.A. (2016) Critical loads of acidity for 90,000 lakes in Northern Saskatchewan: a novel approach for mapping regional sensitivity to acidic deposition, *Atmospheric Environment*, 146, 290-299. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.08.048>
- 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>
- Cruz, M., Gould, J., Hollis, J., McCaw, W. (2018) A hierarchical classification of wildland fire fuels for Australian vegetation types, *Firehouse*, 1(1), 13. <https://doi.org/10.3390/fire1010013>
- Das, S., Harshvardhan, H., Bian, H., Chin, M., Curci, G., Protonotariou, A.P., Mielonen, T., Zhang, K., Wang, H., Liu, X. (2017) Biomass burning aerosol transport and vertical distribution over the South African-Atlantic region, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(12), 6391-6415. <https://doi.org/10.1002/2016JD026421>
- Dudhia, J. (1989) Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a meso-scale 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)
- Gajendiran, K., Kandasamy, S., Narayanan, M. (2023) Influences of wildfire on the forest ecosystem and climate change: a comprehensive study, *Environmental Research*, 240(2), 117537. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117537>
- 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>
- Guan, S., Wong, D.C., Gao, Y., Zhang, T., Pouliot, G. (2020) Impact of wildfire on particulate matter in the Southeastern United States in november 2016, *Science of The Total Environment*, 724, 138354. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138354>
- 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 ver-

- sion 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>
- 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>
- Jaffe, D.A., O'Neill, S.M., Larkin, N.K., Holder, A.L., Peterson, D.L., Halofsky, J.E., Rappold, A.G. (2020) Wildfire and prescribed burning impacts on air quality in the United States, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 70(6), 583-615. <https://doi.org/10.1080/10962247.2020.1749731>
- 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>
- Kain, J.S. (2004) The kain-fritsch convective parameterization : an update, *Journal of Applied Meteorology*, 43(1), 170-181. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2)
- Kang, C.-Y., Song, S.-K., Moon, S.-H., Lim, Y.-K., Chang, K.-H., Chae, S. (2023) Effect of cloud seeding using hygroscopic aerosol particles on artificial rainfall enhancement and its sensitivity analysis in Spring 2021, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(3), 335-350, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.3.335>
- Kang, Y., Choi, H., Kim, Y., Im, J. (2024) Understanding the impact of forest fire on ambient air quality, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 40(1), 103-117, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.1.103>
- 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>
- 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>
- Ko, E.-A., Song, S.-K., Moon, S.-H., Shon, Z.-H., Kim, T., Lee, S.S. (2024) A case study on the impact of real-time land cover changes in the intertidal zone on coastal meteorological predictions using a coupled atmosphere-ocean model, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 136(2), 14. <https://doi.org/10.1007/s00703-024-01009-z>
- 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>
- 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/10.1175/2009MWR2968.1>
- Lu, Z., Sokolik, I.N. (2013) The effect of smoke emission amount on changes in cloud properties and precipitation: a case study of canadian boreal wildfires of 2007, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(20), 11-777. <https://doi.org/10.1002/2013JD019860>
- 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>
- Martins, J.A., Silva Dias, M.A.F.D., Goncalves, F.L.T. (2009) Impact of biomass burning aerosols on precipitation in the Amazon: a modeling case study, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D2). <https://doi.org/10.1029/2007JD009587>
- 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>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2019) 2016 National Air Pollutants Emission; No. 11-1480523-000883-10. <https://www.air.go.kr/>
- Pósfai, M., Simonics, R., Li, J., Hobbs, P.V., Buseck, P.R. (2003) Individual aerosol particles from biomass burning

- in Southern Africa: 1. compositions and size distributions of carbonaceous particles, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D13). <https://doi.org/10.1029/2002JD002291>
- 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>
- Reisen, F., Duran, S.M., Flannigan, M., Elliott, C., Rideout, K. (2015) Wildfire smoke and public health risk, *International Journal of Wildland Fire*, 24(8), 1029-1044. <https://doi.org/10.1071/WF15034>
- Rose, D., Nowak, A., Achtert, P., Wiedensohler, A., Hu, M., Shao, M., Zhang, Y., Andreae, M.O., Pöschl, U. (2010) Cloud condensation nuclei in polluted air and biomass burning smoke near the mega-city Guangzhou, China-Part 1: Size-resolved measurements and implications for the modeling of aerosol particle hygroscopicity and CCN activity, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(7), 3365-3383. <https://doi.org/10.5194/acp-10-3365-2010>
- Sharma, A., Valdes, A.C.F., Lee, Y. (2022) Impact of wildfires on meteorology and air quality (PM_{2.5} and O₃) over Western United States during September 2017, *Atmosphere*, 13(2), 262. <https://doi.org/10.3390/atmos13020262>
- Sokolik, I.N., Soja, A.J., DeMott, P.J., Winker, D. (2019) Progress and challenges in quantifying wildfire smoke emissions, their properties, transport, and atmospheric impacts, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(23), 13005-13025. <https://doi.org/10.1029/2018JD029878>
- 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>
- 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), 12-020. <https://doi.org/10.1002/2017JD026788>
- Sun, D.-H., Song, S.-K., Cho, S.-B., Moon, S.-H. (2023) Long-term trend analysis in biomass burning emissions and their impacts on aerosols and CO concentrations in South Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(3), 351-371, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.3.351>
- Tummon, F., Solmon, F., Lioussé, C., Tadross, M. (2010) Simulation of the direct and semidirect aerosol effects on the Southern Africa regional climate during the biomass burning season, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D19). <https://doi.org/10.1029/2009JD013738>
- Vara-Vela, A., de Fátima Andrade, M., Zhang, Y., Kumar, P., Ynoue, R.Y., Souto-Oliveira, C.E., Lopes, F.J.S., Landulfo, E. (2018) Modeling of Atmospheric Aerosol Properties in the Sao Paulo Metropolitan Area: Impact of Biomass Burning, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(17), 9935-9956. <https://doi.org/10.1029/2018JD028768>
- 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>
- Vicente, A., Alves, C., Calvo, A.I., Fernandes, A.P., Nunes, T., Monteiro, C., Almeida, S. M., Pio, C. (2013) Emission Factors and Detailed Chemical Composition of Smoke Particles from the 2010 Wildfire Season, *Atmospheric Environment*, 71, 295-303. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.01.062>
- Wiedinmyer, C., Akagi, S.K., Yokelson, R.J., Emmons, L.K., Al-Saadi, J.A., Orlando, J.J., Soja, A.J. (2011) The Fire INventory 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>

Authors Information

선대현 ((재)차세대수치예보모델개발사업단 자료동화실
검증진단팀 원급연구원) (dhsun@kiaps.org)

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