

논문

산불 발생이 주변 대기질에 미치는 영향에 대한 이해 Understanding the Impact of Forest Fire on Ambient Air Quality

강유진, 최현영, 김예진, 임정호*

울산과학기술원 지구환경도시건설공학과

Yoojin Kang, Hyunyoung Choi, Yejin Kim, Jungho Im*

Department of Civil Urban Earth and Environmental Engineering,
Ulsan National Institute of Science and Technology, Ulsan, Republic of Korea

접수일 2023년 10월 23일
수정일 2023년 11월 28일
채택일 2023년 12월 20일

Received 23 October 2023
Revised 28 November 2023
Accepted 20 December 2023

*Corresponding author
Tel : +82-(0)52-217-2824
E-mail : ersgis@unist.ac.kr

Abstract In 2022, significant large fire events occurred in Uljin and Gangneung, resulting in a damaged area exceeding 23,000 ha. Large forest fires release substantial amounts of air pollutants into the atmosphere, leading to a significant degradation of air quality. Therefore, it is imperative to analyze the consequences of forest fires to assess their impact on the surrounding environment. This study aims to investigate various substances emitted during the Uljin and Gangneung forest fires and enhance our understanding of their effects on the atmosphere and the Earth's surface. To accomplish this goal, this study leverages satellite data, numerical weather models, and ground-level *in-situ* observations. The impact on the ground is influenced by a combined effect of multiple factors such as meteorological conditions and topography. Among these factors, the direction and speed of the wind, as well as the height of the atmospheric boundary layer, were the most significant. Specifically, while wind plays a crucial role in the transport of air pollutants, ground-level concentrations are heavily dependent on the height of the planetary boundary layer. Consequently, a diurnal cycle is observed instead of a continuous high concentration. In addition, an inverse relationship between NO₂ and O₃ concentrations was identified, attributed to the dramatic increase in NO₂ levels and the effects of photochemical reactions.

Key words: Wildfire, Uljin, Gangneung, Ground-level air pollution, PBLH

1. 서론

최근 들어 온도 상승과 건조한 기후의 영향으로 산불 발생이 잦아지면서, 매년 대형 산불로 인한 피해가 보고되고 있다(Sokolik *et al.*, 2019). 근 5년간 한국에서도 매년 약 800~24,800 ha에 해당하는 면적이 산불로 인한 피해를 경험하였고, 2022년에는 울진과 강릉에서 합산 23,000 ha를 넘는 대형 산불이 발생하여 막대한 피해를 기록하였다(NIFOS, 2022). 산불은 방대한 양의 대기오염물질을 대기 중으로 방출하고 주변의 대기질을 크게 악화시킨다(Kang *et al.*, 2022). 뿐만 아니라 산불로 인해 배출된 온실가스 및 에어로졸은

복사 수지에도 영향을 주어 기후변화에도 영향을 줄 수 있다(Das *et al.*, 2017). 따라서, 산불로 인해 발생한 결과를 분석하는 것은 주변 환경 및 인체 건강에 미친 영향 평가를 위해서도 매우 중요한 요소이다.

산불 발생 시 배출되는 주요 물질로는 이산화탄소, 일산화탄소를 비롯한 온실가스가 가장 큰 비중을 차지하며, 이외에도 이산화질소, 오존 등 다양한 종류의 대기오염물질들이 포함되어 있다(Sokolik *et al.*, 2019; Das *et al.*, 2017). 산불이 상당한 양의 대기오염물질을 배출하는 것은 명백한 사실이나, 어떤 구성 성분으로 얼마만큼의 양을 배출하며, 이것이 어느 정도의 영향력을 가지는지는 매우 다양하게 나타날 수 있다. 같은

면적의 산불이 발생하더라도 산불이 발생한 곳의 식생 분포, 산불 진행 경과, 연소 조건 등에 따라서 배출되는 물질은 상당히 많이 달라지게 된다 (Attiya and Jones, 2022; Sokolik *et al.*, 2019). 예를 들어, 온도가 높고 완전 연소가 우세할 경우에는 이산화탄소, 이산화질소, 이산화황을 많이 배출하며, 불완전 연소가 일어나는 경우에는 일산화탄소를 대량 배출하는 등 매우 다양한 경우가 존재한다 (Das *et al.*, 2017).

같은 종류와 양의 물질이 배출된다고 가정하더라도, 물질들의 이동 양상은 기상 상황에 따라 매우 달라지게 된다 (Menut *et al.*, 2018). 강한 바람이 동반될 경우 장거리 이동을 통해 해양 및 대륙 간에도 영향을 미칠 수 있으며, 수직 방향 확산 양상에 따라서 지상에 막대한 영향을 끼칠 수도 있다 (Attiya and Jones, 2022). 선행 연구에 따르면 2003년에 시베리아에서 발생한 대형 산불은 대륙을 지나 북동 태평양 영역까지 영향력을 주었으며, 중국에서 발생한 산불들도 일본까지 영향을 미치는 것으로 연구된 바 있다 (Uranishi *et al.*, 2019; Jaffe *et al.*, 2004). 뿐만 아니라, 배출된 물질의 농도는 대기 중에서 화학 반응 혹은 강수로 인한 세정 등을 통하여 변할 수 있어 이를 정확히 파악하기는 매우 어렵다 (Liu *et al.*, 2009).

산불로 인한 복잡한 배출량과 배출 이동 양상에 대해서 파악하고자 대기화학수송모델 및 대기확산모델을 통해서 많은 연구들이 활발히 진행되어왔다 (Yaragunta *et al.*, 2020; Sokolik *et al.*, 2019; Zeng *et al.*, 2008). 위성 기반 산불 탐지 산출물로부터 정보를 추출하여 대규모 영향에 대해 분석하거나, CO₂, CO, PM과 같이 주요 물질의 배출과 이동, 그 추세 등에 대해 많은 연구들이 수행되었다 (Attiya and Jones, 2022; Zhang *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2020; Montealegre-Gracia *et al.*, 2017). 그러나 대한민국을 대상으로 한 연구는 거의 수행된 바가 없으며, 2022년 울진에서 발생한 산불은 역사상 대한민국에서 발생한 가장 큰 규모의 대형 재난임에도 불구하고 지상 대기질에의 영향에 대한 연구 결과가 많지 않다. 대표적으로는 WRF-CMAQ 모델을 이용한 에어로졸 및 CO 농도에 미치는

영향 평가에 관한 연구가 있다 (Sun *et al.*, 2023). 해당 연구에서는 배출량을 산정하고 지상 관측소와의 상호 비교를 수행하였으며, 연직 분포 등에 대해서 분석하였다. 그러나 배출량과 실제 지상 및 대기에 미친 영향은 다르게 나타날 수 있어, 위성 및 지상 관측 장비에서의 변화를 통하여 산불 배출로 인한 영향을 분석할 필요가 있다. 또한, 위에서 언급한 바와 같이 대형 산불로 배출되는 물질 및 변화는 당시의 상황에 따라 다양하게 나타나므로 에어로졸 및 CO를 넘어, 가능한 다양한 물질에 대해서 다각적으로 접근할 필요가 있다.

본 연구에서는 한국에서 발생한 울진·강릉 대형 산불 사례를 통하여 산불 발생 시 배출되는 물질들(CO, NO₂, SO₂, O₃, PM_{2.5}, PM₁₀)에 대해서 파악하고, 그 물질들이 대기 및 지상에 미치는 영향에 대한 이해를 제고하고자 하였다. 본 목적을 위하여 기상 자료와 지상 관측소에서의 농도 변화를 통하여 지상에 미치는 영향력을 분석하고, TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) 위성 자료를 활용하여 대기 중에서의 농도 변화를 파악하였다.

2. 연구 자료 및 방법

2.1 연구 사례

본 연구는 한국에서 가장 규모가 큰 산불인 2022년 3월에 울진·강릉에서 발생한 대형 산불 사례를 대상으로 진행하였다(그림 1). 울진 산불은 울진군 북면 두천리(중심 위도 37.0682°, 경도 129.3085°)에서 3월 4일 11시 17분부터 13일 9시까지 열흘간 진행되었으며, 약 18,330 ha의 면적을 태웠다. 강릉 산불은 옥계면 남양리(중심 위도 37.5545°, 경도 129.0543°)에서 3월 5일 1시 8분부터 8일 19시까지 나흘간 진행되었으며, 약 4,690 ha의 면적을 태운 것으로 보고되었다. 울진과 강릉 산불이 발생한 곳은 모두 소나무가 우세한 지역으로, 산불이 강하고 빠르게 번지기 쉬운 조건을 갖추고 있어 피해가 막심하였다(Baek *et al.*, 2022).

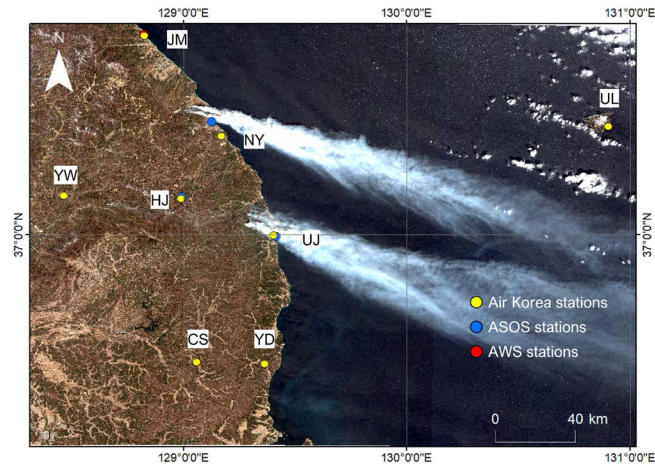


Fig. 1. Study area and the specific locations designated for *in-situ* observations. The Air Korea, ASOS, and AWS stations are denoted by yellow, blue, and red circular markers, respectively. The backdrop comprises a true color composite image from the Sentinel-2 Multi-Spectral Instrument collected on March 5, 2022.

2.2 연구 자료

본 연구에서는 산불 발생 위치 및 영향에 대해 관찰하고자 Sentinel-2 MSI (Multi Spectral Instrument) 영상을 활용하였다. MSI는 파장에 따라 10 m, 20 m, 60 m 공간 해상도로 13개 채널에 대한 정보를 제공한다. 본 연구에서는 산불 발생으로 인하여 배출되는 연무의 영향을 파악하고자 가시광 정보를 이용하여 합성된 True Color Image 레이어가 제공되는 10 m 자료를 활용하였다. 산불 발생 이후부터 4월 4일까지 구름 영향을 받지 않은 이미지 중 산불로 인한 연무의 영향이 가장 두드러졌던 3월 5일 영상을 활용하였으며, ESA Copernicus (<https://scihub.copernicus.eu/>)에서 대기 및 지형 보정이 적용된 L2A (Level-2A) 자료를 다운받았다.

산불 발생 후 대기 중의 농도 변화 관찰을 위해서 TROPOMI 자료를 활용하였다. TROPOMI 센서는 Sentinel-5P 위성에 탑재되어 대기 중의 미량 기체 및 에어로졸 등에 관한 정보를 전구 영역에 대해서 제공하고 있다. 본 연구에서는 산불로부터 배출될 수 있는 CO, CH₄, NO₂, O₃, SO₂ 연직 컬럼 농도 산출물을 활용하였으며, 추가 분석을 위해서 AI (Aerosol index)와 ALH (Aerosol layer height) 자료도 이용하였다. 본 자

료는 NASA Earth Data (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>)에서 다운받았으며, 각 산출물별로 공간 해상도에 대한 정보는 표 1과 같다.

대기뿐만 아니라 지상에서의 농도 변화를 관찰하기 위해서 Air Korea (<https://www.airkorea.or.kr/web>)에서 제공되는 관측소 기반 지상 농도 자료를 활용하였다. 관측소에서는 1분 간격으로 측정된 값을 평균하여 1시간 간격으로 CO, NO₂, O₃, SO₂, PM_{2.5} 및 PM₁₀ 정보를 제공하고 있다. 본 연구에서는 울진 및 강릉 산불 발생 위치 주변에 위치하고 있는 주문진읍 (Jumunjin, JM), 남양동1 (Namyang, NY), 영월읍 (Yeongwol, YW), 황지동 (Hwangji, HJ), 울진군 (Uljin, UJ), 청송읍 (Cheongsong, CS), 영덕읍 (Yeongdeok, YD), 울릉읍 (Ulleng, UL) 8개 관측소 정보를 활용하였다(표 2). 남양동1 및 청송읍 관측소는 건물 옥상에 설치되어 있으며, 주문진읍, 영월읍, 황지동, 울진군, 영덕읍 및 울릉읍 관측소는 지상에 설치되어 있으므로 지상에서 10 m 이내 정도의 높이에 위치할 것으로 가정하였다.

산불로부터 배출된 물질들의 이동 방향 및 양상을 파악하기 위한 자료로 기상청에서 제공되는 국지예보 모델 (Local Data Assimilation and Prediction System,

Table 1. Primary data sources employed in the analysis along with the associated spatial resolution.

Source	Variable (abbreviation)	Spatial resolution
Sentinel-2 MSI	True Color Image (TCI)	10 m × 10 m
Sentinel-5P TROPOMI	Carbon Monoxide CO Column (CO)	5.5 km × 7 km
	Methane (CH ₄)	5.5 km × 7 km
	Tropospheric NO ₂ (NO ₂)	5.5 km × 3.5 km
	Total Ozone Column (O ₃)	5.5 km × 3.5 km
	Surphur Dioxide SO ₂ (SO ₂)	5.5 km × 3.5 km
	Aerosol Index (AI)	5.5 km × 3.5 km
	Aerosol Layer Height (ALH)	5.5 km × 3.5 km
Air Korea	CO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ , PM _{2.5} , PM ₁₀	–
LDAPS	U-component wind (U) V-component wind (V) Planetary Boundary Layer Height (PBLH)	1.5 km × 1.5 km
ASOS / AWS	Wind direction Wind speed	–
SRTM	Digital Elevation Model	90 m × 90 m

Table 2. Geographical coordinates (i.e., latitude and longitude) of eight Air Korea stations, along with the distances from the Uljin and Donghae fires.

Name	Latitude (°)	Longitude (°)	Distance from Uljin fire (km)	Distance from Donghae fire (km)
UJ	36.9972	129.4029	10.49	58.38
NY	37.4426	129.1684	35.29	14.11
HJ	37.1629	128.9867	29.73	35.21
JM	37.8937	128.8230	84.04	36.03
YW	37.1740	128.4625	75.54	62.34
CS	36.4293	129.0564	61.45	100.67
YD	36.4201	129.3638	58.20	105.21
UL	37.4841	130.9056	145.62	163.47

LDAPS), 종관기상관측 (Automated Synoptic Observing System, ASOS), 방재기상관측 (Automatic Weather Stations, AWS) 자료를 활용하였다. LDAPS는 1.5 km의 공간 해상도로 연직으로 약 40 km까지 70개 층의 정보를 제공하고 있다. 3시간 간격으로 전지구모델에서 경계장을 제공받아, 하루에 3시간 간격으로 48시간에 대해 8회 예측을 수행한다. 본 연구에서는 기상청 기상자료개방포털 (<https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>)에서 단일면 분석장에서 제공되는 바람 (U-component of wind, V-component of wind)과 대기경계층 높이 (Planetary Boundary Layer Height, PBLH)

변수를 활용하였다. ASOS와 AWS는 지상에서 기온, 강수, 바람, 습도 기압 등의 날씨를 관측하며, 본 연구에서는 1시간 간격으로 제공되는 바람 방향과 속력 자료를 사용하였다.

대기오염물질의 확산에 있어서 지형적 요인을 고려해 주기 위하여 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)에서 제공되는 수치 표고 모델 (Digital Elevation Model, DEM) 자료를 사용하였다. DEM은 US Geological Survey EarthExplorer를 통해서 약 90 m 공간 해상도로 제공되는 3 arc-seconds 자료를 다운받았다 (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

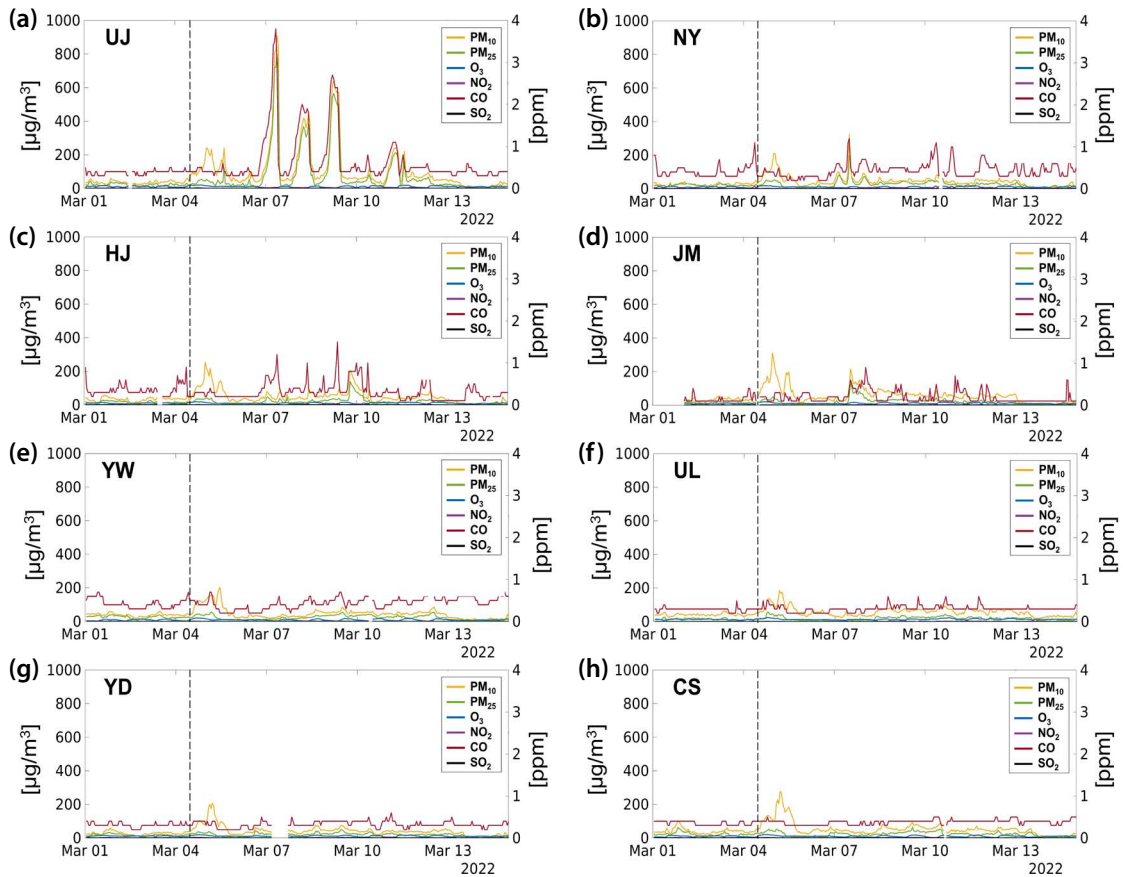


Fig. 2. Temporal variations of two particulate matter concentrations (PM_{10} and $PM_{2.5}$) and four gaseous air pollutants (O_3 , NO_2 , CO , and SO_2) in eight Air Korea stations from March 1 to March 15. The units for PM_{10} and $PM_{2.5}$ are expressed in $\mu g/m^3$, while gaseous air pollutant concentrations are denoted in parts per million (ppm). The ignition time for the Uljin fire is indicated by a dashed black line.

2.3 연구 방법

산불 발생이 주변 대기질에 미친 영향을 파악하기 위해서 지상 및 대기에서의 시간에 따른 대기오염물질 농도 변화를 파악하였다. 이후, 산불로 인한 영향이 눈에 띄는 관측소들을 중점적으로 분석하였다. 각 관측소별로 나타난 공통적인 특징을 찾아내고, 이에 대한 가능 요인을 파악하기 위하여 고도 자료, 지상에서의 기상 관측소 및 LDAPS 수치모델 자료를 활용하였다. 울진 산불 발생 위치와 각 관측소 사이의 거리 및 고도는 점과 점 사이를 잇는 가장 가까운 직선을 기준으로 계산하였으며, 분석에 사용된 모든 기상 요인들은 관측소 위치에서 가장 가까운 값을 이용하였다. 분

석에 대한 근거를 제시하기 위하여 National ocean and atmospheric administration에서 개발한 HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델의 궤적 결과를 활용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 산불 발생 위치 주변의 지상 대기질 농도 관측소 오염물질 변화

그림 2는 대형 산불 발생 전인 3월 1일부터 15일간의 지상 대기오염물질 농도의 변화를 보여준다. 대형

산불 발생 위치와 근접한 울진군, 황지동, 남양동, 주문진을 관측소에서는 산불 발생 전 대비 최대 26배 정도의 눈에 띄는 대기오염물질 농도의 증가가 관찰되었다. 반면, 대형 산불 위치로부터 비교적 먼 거리에 위치한 영월읍, 청송읍, 영덕읍, 울릉읍 관측소에서는 산불 발생 직후인 3월 5일을 제외하면 대기오염물질의 농도 변화가 크지 않았다. 그림 1에 따르면 산불 발생 직후 연무가 가장 우세한 날짜인 3월 5일의 연무는 동해 쪽으로 널리 확산되었으므로 영월읍, 청송읍, 영덕읍 관측소에 큰 영향력을 미치지 못하였으며, 울릉도에도 직접적인 영향을 주지 않았으므로 울릉읍 관측소의 농도 변화가 크지 않았던 것으로 보인다.

규모의 차이는 존재하지만, 3월 5일에 공통적으로 모든 관측소에서 $184 \sim 276 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 순간 PM_{10} 농도를 기록한 것을 통하여 지상 수준의 대기에 미친 피해가 막대했음을 알 수 있었다. 각 관측소에서의 최초 peak 시점과 해당 시점에서의 최고 PM_{10} 농도는 표 3과 같다. 울진 산불이 3월 4일 11시 이후 발생하였으며, 당시 PBLH가 높은 상황이었기 때문에 지상에서의 PM_{10} 농도가 즉시 상승하지 않았으나 시간이 지남에 따라 연무가 활발히 발생하고 PBLH가 낮아지면서 대부분의 관측소에서 3월 4일 밤에서 3월 5일 새벽에 순간적으로 최고 농도를 나타낸 것으로 보인다(그림 3). 선행 연구에 따르면 산불의 강도가 강할수록 PM_{10} 의 배출량도 뚜렷하게 증가하는 경향이 있다(An and Choi, 2021). 일반적으로 산불 발생 초기에는 화염과 함께 강하게 연소가 일어나며, 울진에서도 이와 같이 순간적으로 PM_{10} 농도가 상승한 것으로 보인다(Junghenn Noyes *et al.*, 2022). 울진 산불에서 거리가 먼 관측소들에서 최초 peak 시점이 다소 늦게 나타났으나 주문진을 관측소는 울진 산불로부터의 거리가 멀었음에도 불구하고 가장 빠르게 peak를 기록하였으며, 농도도 매우 높게 나타났다. 이는 3월 4일 22시 이후 강원도 강릉 성산(중심 위도 37.77° , 경도 129.02°)에서 발생한 산불로 인한 중첩 영향일 것으로 판단된다.

3월 1일에서 3월 4일까지 산불이 발생하지 않았을

Table 3. First PM_{10} peak time and its concentration for each Air Korea station.

Name	Peak time (Date, Time in KST)	Distance from Uljin fire (km)	PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
JM	March 04, 23:00	10.49	311
HJ	March 05, 00:00	35.29	254
NY	March 05, 01:00	29.73	212
UJ	March 05, 01:00	84.04	242
UL	March 05, 04:00	75.54	184
CS	March 05, 05:00	61.45	276
UD	March 05, 05:00	58.20	207
YW	March 05, 11:00	145.62	202

때의 수준에 비해서 농도의 변화가 가장 큰 물질은 CO , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 였으며, 농도의 변화가 비교적 적은 O_3 , NO_2 , SO_2 에 대해서는 3.3절에서 별도로 분석을 진행하였다. 해당 물질들은 산불 발생 시 배출되는 물질 중 대부분을 차지하는 것으로 알려져 있다(Junghenn Noyes *et al.*, 2022; Menut *et al.*, 2018). 특히, 소나무(침엽수종) 잎의 정유는 terpene (테르펜)으로 주로 구성되어 화염이 오래 지속되게 하고 연소 시 산소의 부족이나 온도가 낮을 경우 불완전연소로 인하여 CO 를 방출하게 한다고 알려져 있으며, 이러한 사실과 잘 일치하고 있다(Park and Lee, 2010). 산불로 인한 영향력이 가장 컸던 울진 관측소에서 CO , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 에 대한 각각의 최고 농도는 3.8 ppm, $910 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $803 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다. 이는 각각 AirKorea 기준에 따르면 ‘보통’, ‘매우 나쁨’, ‘매우 나쁨’ 수준에 해당한다. 울진 산불 진행 기간인 총 214시간 동안 무려 48 및 53시간 이상이 ‘매우 나쁨’ 수준에 해당하는 PM_{10} 및 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 값에 노출되었다. 환경부에서는 기상조건 등을 고려하여 권역별로 대기자동측정소 시간평균농도를 이용하여 PM_{10} $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상, $\text{PM}_{2.5}$ $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 2시간 지속될 경우 경보를 발령하게 된다. 울진 산불 진행 기간 동안 울진 관측소에서는 경보 발령 기준을 초과하는 수준의 고농도 미세먼지가 수 차례 발생하였으며, 이는 영유아, 노인, 폐질환 혹은 심장질환자와 같은 민감군뿐만 아니라 일반인 역시 실외활동 자체가 권고될 만큼 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 특히, 장기적

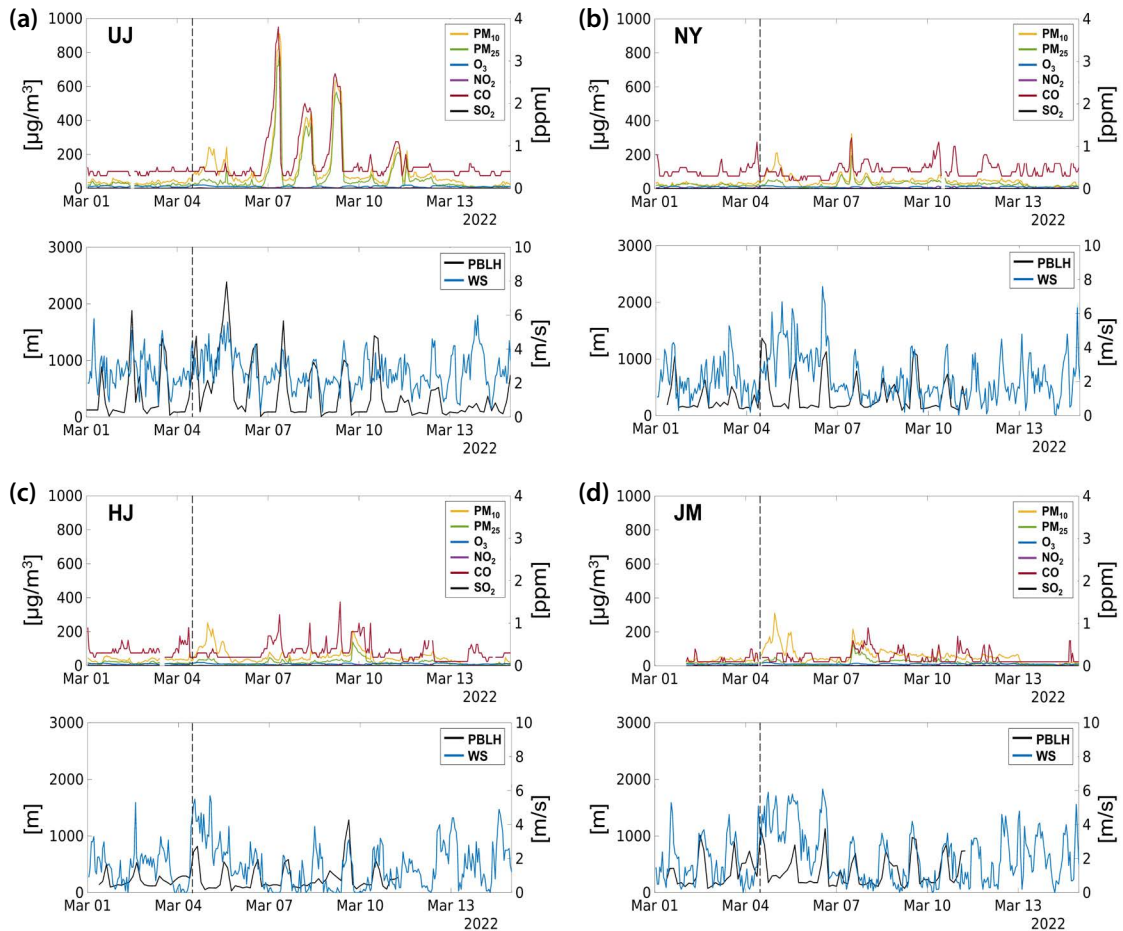


Fig. 3. (a~d) Temporal variations of air pollutants and ambient atmospheric conditions at four major Air Korea stations from March 1 to March 15. The units of measurement for particulate matter, gaseous air pollutants, planetary boundary layer height (PBLH), and wind speed (WS) are presented in $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ppm, m, and m/s, respectively. The ignition time for the Uljin fire is indicated by a black dashed line.

측면에서는 건강 위해가 더 높은 $\text{PM}_{2.5}$ 의 경우 평균 농도가 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가할 때마다 모든 질병, 심폐질환, 폐암의 사망률이 각각 유의하게 4%, 6%, 8% 증가한다고 알려진 바 있는 만큼 인체 건강에 막대한 영향을 줄 수 있다(Yang, 2019; Pope Iii *et al.*, 2002).

3.2 산불 발생에 의한 영향이 큰 주요

관측소에서의 오염물질 변화 양상 파악

산불로 인한 영향이 컸던 울진군, 황지동, 남양동, 주문진읍 4개 관측소에 대하여 관측소별 대기오염물

질농도의 시계열 변화는 그림 3과 같다. 산불로 인한 영향을 가장 직접적으로 받은 울진 관측소에서는 다른 관측소와 구분되는 변화가 관찰되었다. 3월 5일 일 시적인 PM_{10} 농도의 상승 이후, 3월 7일을 기점으로 3일간 일변화 주기를 그리며 매우 높은 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, CO 농도의 변화가 나타났다. 고농도 현상이 지속적으로 유지되지 않고 일변화 주기성을 가지는 이유는 대기경계층 높이와 깊은 연관이 있었다. 대기경계층 높이가 낮아지면 지상에서의 대기오염물질 농도가 상승하고, 반대로 대기경계층 높이가 높아지면 대기오염

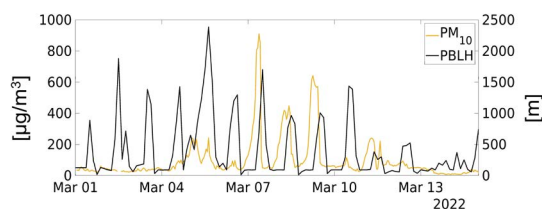


Fig. 4. Temporal variations of PM_{10} and planetary boundary layer height (PBLH) at the UJ station. The units for PM_{10} and PBLH are denoted in $\mu g/m^3$ and m, respectively.

물질 농도가 감소하는 명백한 관계가 나타났다(그림 4). 3월 7일 0시에 PBLH가 최소 수준으로 낮아진 이후에는 농도가 점차 증가하는 경향이 발견되다가, PBLH가 다시 높아지기 시작하는 시점부터는 농도가 다시 낮아졌다. 따라서, PBLH와 PM_{10} 농도 사이에는 각각 오후에 최대치, 밤에 최대치를 나타내는 경향으로 인하여 약 반나절의 시간 지연을 가진 관계로 나타났다. 산불로부터 배출된 연무의 대부분은 대기경계층 아래에 분포하게 되므로, 지상에서의 대기오염물질 농도가 이에 깊게 연관된 것으로 보인다(Peterson *et al.*, 2014). 대기경계층 높이는 낮에는 상승하고, 밤에는 감소하는 패턴이 있다(Han *et al.*, 2023). 대기경계층 높이가 높을 때에는 대기 중 연직 순환이 활발하게 발생하므로 지상 수준의 대기오염물질의 농도는 감소하기 쉬운 조건이 되지만, 대기경계층 높이가 낮은 밤에는 반대의 경향이 나타난다(Peterson *et al.*, 2014).

반면에 황지동, 남양동, 주문진읍 관측소에서는 비교적 유사한 시계열 변화 패턴이 관찰되었다. 세 관측소에서의 CO는 저농도 수준을 유지하다가 3월 7일을 기점으로 다시 농도가 증가하는 패턴이 관찰되었다. PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 는 남양동과 주문진읍 관측소에서 유사한 패턴이 관찰되었으며, 황지동 관측소는 두 관측소와 다소 다른 점이 관찰되었다. 남양동과 주문진읍에서의 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 는 CO와 마찬가지로 3월 7일을 기점으로 농도가 증가하는 패턴이 관찰되었으나, 황지동 관측소에서는 3월 10일이 기점이 되었다.

3월 4일 이후 3월 7일까지 대기오염물질 농도가 낮

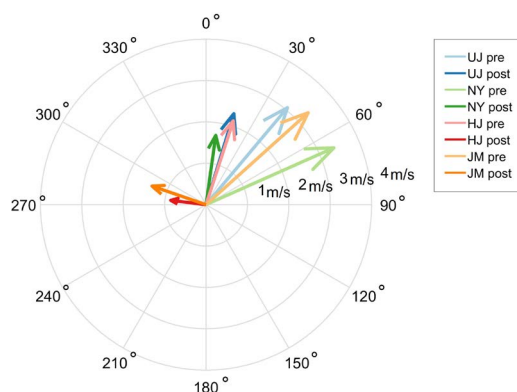


Fig. 5. Average wind direction and speed for four Air Korea stations (UJ, NY, HJ, and JM). The term “pre” designates the average values from March 4 to March 6, while “post” refers to the average values calculated between March 7 and 9.

게 유지된 현상에는 바람의 방향과 세기, 그리고 대기 경계층 높이의 영향이 컸을 것으로 분석되었다. 당시의 기상 상황을 분석하기 위하여 각 대기오염물질 관측소에서 가장 가까이 위치한 기상 관측소에서의 바람 정보를 활용하였다. 각 대기오염물질 관측소에서 바람 정보를 3월 4일부터 6일까지 3일간 평균하였을 때, 3월 7일부터 9일까지 3일 동안의 바람 정보와 대비하여 바람의 속력이 확연히 빠르고 남서풍이 우세하였음을 확인할 수 있었다(그림 5). 즉, 3월 4일부터 6일 동안의 바람은 산불 위치로부터 내륙이 아닌 바다 쪽으로 불고 있었으며, 당시의 빠른 바람 속도와 결합하여 내륙에 위치한 지상 관측소의 농도가 낮게 유지될 수 있었다. 반면에 3월 7일부터는 바람의 방향이 점차 바뀌고 세기가 약해지면서 배출된 오염물질의 영향이 내륙의 지상에 서서히 미치기 시작했을 것으로 분석되었다. 뿐만 아니라, 3월 4일부터 6일까지의 대기경계층 높이는 유독 높게 유지되었는데, 대기경계층 높이가 높으면 낮을 때에 비하여 배출된 대기오염물질들이 대기 중으로 확산되기 쉬운 조건이 되므로 지상에 미치는 영향력을 다소 감소하게 만들 수 있다(그림 3).

황지동 관측소에서 세 관측소에 비해서 두 번째 피크가 3월 10일로 다소 늦은 까닭은 지형적 요인도 기

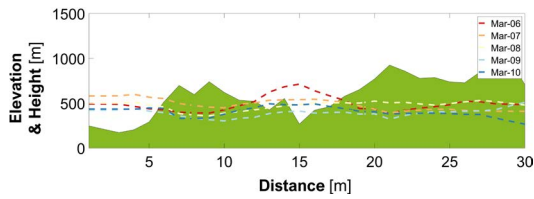


Fig. 6. Elevation and planetary boundary layer height (PBLH) variations spanning from the Uljin fire location on the left to the HJ Air Korea station on the right.

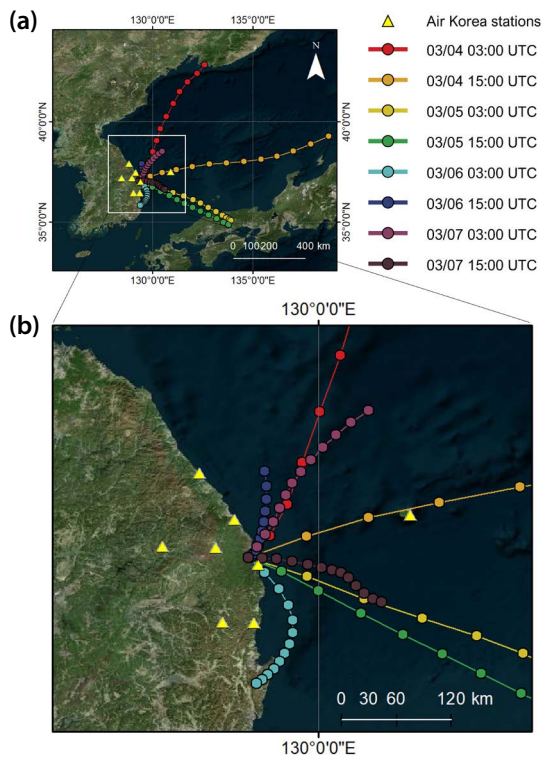


Fig. 7. (a) Forward air trajectory results from Mar 04, 2022 to Mar 07, 2022. (b) The zoomed image of (a). The time interval between points is one hour.

여했을 것으로 분석되었다. 울진 산불 위치에서 황지동 위치까지의 거리는 멀지 않은 편이지만 황지동 관측소 위치가 꽤 높은 곳에 위치하고 있으며 점점 더 높아지는 형태를 띠고 있었다(표 3). 게다가 울진 산불 위치로부터 서쪽으로 고도가 급격하게 높아지는 구간이 존재하고 있으며, 낮은 대기경계층 높이의 영

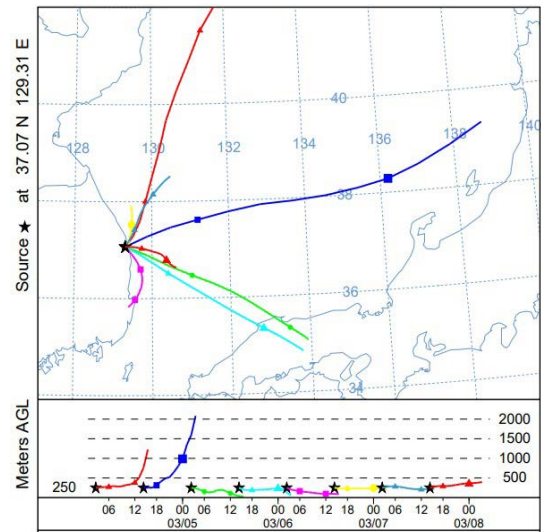


Fig. 8. Forward air trajectory results with vertical distribution from Mar 04, 2022 to Mar 08, 2022. The time interval between points is six hours.

향으로 인하여 대기오염물질이 쉽게 확산되지 못하도록 작용했을 것으로 분석되었다(그림 6).

위 결과에 대한 근거를 제시하고자 HYSPLIT 모델의 궤적 결과를 추출하였으며, Global Data Assimilation System 기상장을 활용하여 산불 발생 직후인 3월 4일 03 UTC부터 매 12시간마다 최대 12시간의 HYSPLIT forward trajectory 모델링을 수행하였다. 시작 고도는 산불 발생지의 고도를 고려하여 250 m로 설정하였다.

모델의 결과를 1시간 간격의 점 자료로 추출하여 분석한 결과, 3월 5일까지는 해양으로 빠르게 이동하는 반면 3월 6일부터는 내륙 주변에서 비교적 느리게 이동하면서 육상 쪽으로의 영향도 일부 있는 것으로 나타났다(그림 7). 이는 앞서, 지상 관측소에서 바람 및 대기경계층 높이 정보를 이용하여 분석한 바와 잘 일치하고 있다. 또한, 이동 방향 아래에 위치한 관측소는 울진 및 울릉 관측소였으며, 타 관측소에 비해서 울진 관측소에서 눈에 띄는 농도의 변화가 나타난 것을 뒷받침하고 있다. 울진 관측소와 달리 울릉 관측소에서 농도의 변화가 작았던 이유는 산불 발생지로

부터의 거리가 멀어 해양 위를 이동하면서 습식 세정 등의 효과에 영향을 받을 수 있고, 해당 이동 궤적이 연직 방향으로 상승하면서 직접 영향을 행사하지 않았기 때문이다(그림 8).

3.3 오염물질별 관측소에 미친 영향 분석

위 결과를 통하여 물질별로 관측소에 영향력을 미치는 경향성이 다르게 나타났으며, 물질별 농도 범위가 매우 상이하였기 때문에 물질별 농도 변화를 관찰하였다. CO, PM₁₀, PM_{2.5}는 울진군 관측소에서 눈에 띄는 증가가 관찰되었던 반면에 SO₂는 황지동 관측소에 가장 영향을 많이 준 것으로 나타났다.

SO₂는 화산 활동이나 산불 같은 자연적인 원인에 의해 배출될 수 있으나, 주로 화석 연료의 연소, 황산 제조, 석유 정제와 같은 인간 활동에 의한 배출원에서 유래한다(Lee *et al.*, 2011). 환경운동연합에 따르면 2023년 3월 국내 석탄화력발전소의 분포를 조사한 결

과, 강원도에는 동해, 북평, 그리고 삼척그린파워 발전소가 운영 중인 것을 확인하였다(<http://kfem.or.kr/?p=232067>). 3월 4일부터 6일까지는 서풍 계열의 풍향이 지속되었으나, 3월 7일부터는 동풍 계열의 바람이 우세하여 황지동 관측소가 산불 발원지와 석탄발전소의 풍하 지역에 위치하게 되었다(그림 5). 이러한 기상 조건 변화와 발전소 분포가 황지동 지역에서 SO₂ 농도 상승의 원인으로 추정된다.

O₃는 전반적으로 모든 관측소에서 유사한 시계열 농도 변화 패턴을 보여주었고, 산불 발생 직후인 3월 4일부터 일변화 사이클을 무시하면서 약 3일간 고농도를 유지하였다. O₃가 산불 직후 3일간 높은 농도를 유지했던 것과는 반대의 패턴이 NO₂에서 발견되었다. NO₂는 오히려 산불 발생 직후인 3월 4일 이후 약 2일간 저농도를 유지하다가 O₃가 정상 사이클을 회복하는 시기와 동시에 고농도 현상이 나타났다. O₃는 햇빛이 존재할 때 질소산화물과 휘발성 유기화합물의

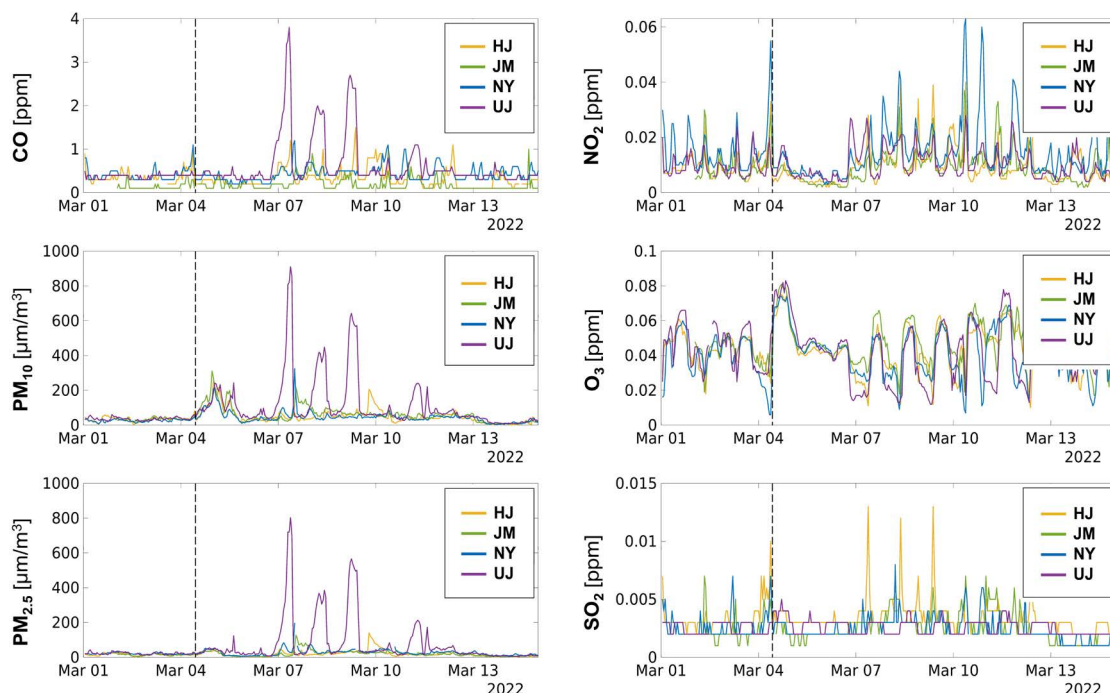


Fig. 9. Substance-specific temporal variations of air pollutant concentration at the four Air Korea stations. The ignition time for the UJ fire is indicated by a black dashed line.

상호 작용으로 형성된다(Jaffe *et al.*, 2004). 특히, NO₂ 농도가 낮은 조건에서는 NO₂의 증가가 O₃의 증가와 비례하며, 반대로 VOC 농도가 낮은 조건에서는 NO₂의 증가가 O₃ 농도의 증가로 즉시 이어지지 않고 오히려 VOC의 농도에 비례한다(Shon *et al.*, 2010). 소나무는 다른 수종에 비해 테르펜류의 휘발성 물질을 많이 함유하고 있어, 올진 산불 발생 당시 상당한 양의 VOC가 방출되었을 것으로 보인다. 3월 4일 오전에 산불이 발생하면서 NO₂ 농도가 급증하였고, 이에 따라 대기 중 상당한 양의 O₃ 전구물질이 분포하게 되면서 광화학 반응이 활발히 일어나 NO₂ 급증 이후 O₃ 농도 역시 급격히 증가한 것으로 보인다. 3월 5일부터는 PBLH가 상대적으로 높아지고 서풍계열 바람이 강하게 불면서 산불에 의해 직접 배출된 1차 대기오염 물질이 동해 쪽으로 이동 및 확산하여 이틀간 NO₂ 농도가 매우 낮아지는 양상이 나타났다(그림 9). 그로 인해 내륙에서는 O₃를 생성 및 분해할 수 있는 질소 산화물이 부족해지면서 해당 기간 동안 O₃가 일변화 주기를 무시하고 지속적인 고농도를 유지한 것으로 보인다. 3월 7일부터는 반대로 동풍계열 바람이 불기 시작하며 대기오염물질이 내륙방향으로 이동해오며 NO₂ 농도가 재차 증가하는 양상을 발견하였다. 따라서, O₃도 생성과 분해가 활발하게 일어날 수 있는 조건이 충족되면서 일변화 주기를 회복한 것으로 판단된다.

3. 4 TROPOMI를 통한 대기 중에서의 오염물질 변화

TROPOMI 센서를 통하여 대기 중에서의 오염물질 배출로 인한 변화를 관찰하고자 하였으나 AI, NO₂ 관련 산출물 외에는 관심 지역 내 지속적인 결측이 발생하거나 산불로 인한 배출 분석에 활용하기에 적합한 값을 산출하지 못하였다. TROPOMI 센서는 전층과 대류권 농도로 나누어 O₃ 자료를 생산하지만, 대류권 농도 자료의 경우 기후 변화의 영향을 크게 받는 지역인 위도 -20에서 20도 사이의 열대 지역에 대해서만 제공되므로 연구 지역에서는 전층 O₃ 농도 자료만이

가용하였다(Kang *et al.*, 2021). 전층 O₃ 농도 자료는 오존층이 위치하고 있어 전체 대기 중 O₃의 90%가 위치하는 성층권 농도를 포함하는 값으로, 산불로 인한 배출 분석에 활용하기에는 어려움이 있었다. SO₂의 경우 산출 과정에서 AI가 2보다 클 때 에어로졸의 흡수로 인해 영향을 받아 정확도가 저하되는 것으로 알려져 있다(ESA, 2023). 따라서, 함께 제공되는 권장 품질 지표 적용 시 산불 발생으로 인하여 에어로졸 양이 급증하였던 해당 시기와 지역에서 유효한 값을 산출하지 못하여 산불로 인한 배출 분석에는 사용하지 않았다. 산불 배출 시 폭발적인 에어로졸 농도 증가 등의 이유로 분석에 가용한 자료 획득이 어려운 부분은 향후 기술적으로 개선되어야 할 필요가 있다.

AI는 입자상 물질의 영향 범위에 대한 간접적인 관찰에서 중요한 지표로 활용되었다. 3월 4일 11시에 올진에서 발생한 산불을 시작으로 동일 날짜의 영상에서 올진 산불 발원지의 인근의 AI 값이 6 이상으로 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었다(그림 10). AI가 1 이상인 경우, 흡수성 에어로졸 입자들이 존재한다고 판단할 수 있다(Torres *et al.*, 2020). 3월 5일에 강릉에서도 산불이 발생한 뒤, 두 지역에서 모두 높은 AI 값이 관찰되었다. 3월 8일에는 강릉 산불이 먼저 진화되어 AI 값이 주변 지역과 유사한 수준으로 회복되었으나, 올진 산불은 11일까지 지속적으로 높은 AI 값을 보였다. 3월 12일부터는 두 지역의 산불이 대부분 진화되어, 산불 발생 지역의 AI 값이 주변 지역과 크게 다르지 않았다. 특히 3월 5일까지는 서풍이 주로 지배적이어서 에어로졸이 해양 쪽으로 이동하였으나, 6일부터 내륙의 풍속이 줄어들면서 에어로졸이 내륙으로도 확산되기 시작하였다. 이러한 결과는 대기질 관측소에서의 대기오염물질 농도 변화와 상응하는 결과를 보여준다.

NO₂의 경우에도 각각 3월 4일과 5일에 발생한 올진 및 강릉 산불과 기상 조건의 영향으로 뚜렷한 확산 양상을 확인할 수 있었다(그림 11). 3월 5일 이후부터는 AI처럼 산불 발생지로부터 뚜렷한 연무의 영향을 파악하기는 어려웠으나 발생지를 중심으로 주변 대기

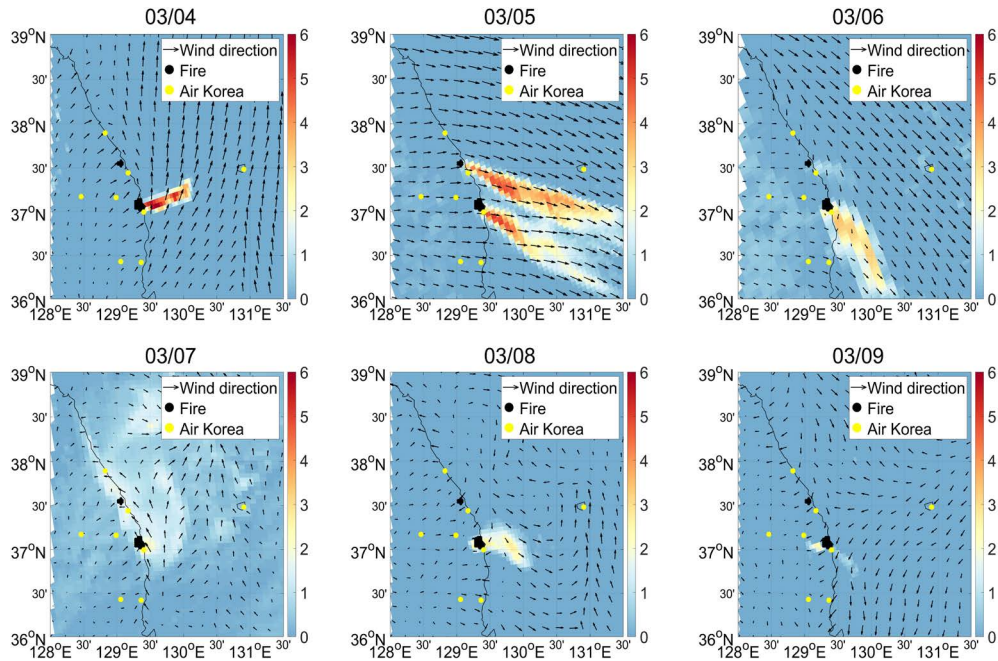


Fig. 10. Spatial distribution of the aerosol index from March 4 to March 9. The wind direction is calculated from LDAPS u and v vector data (U and V).

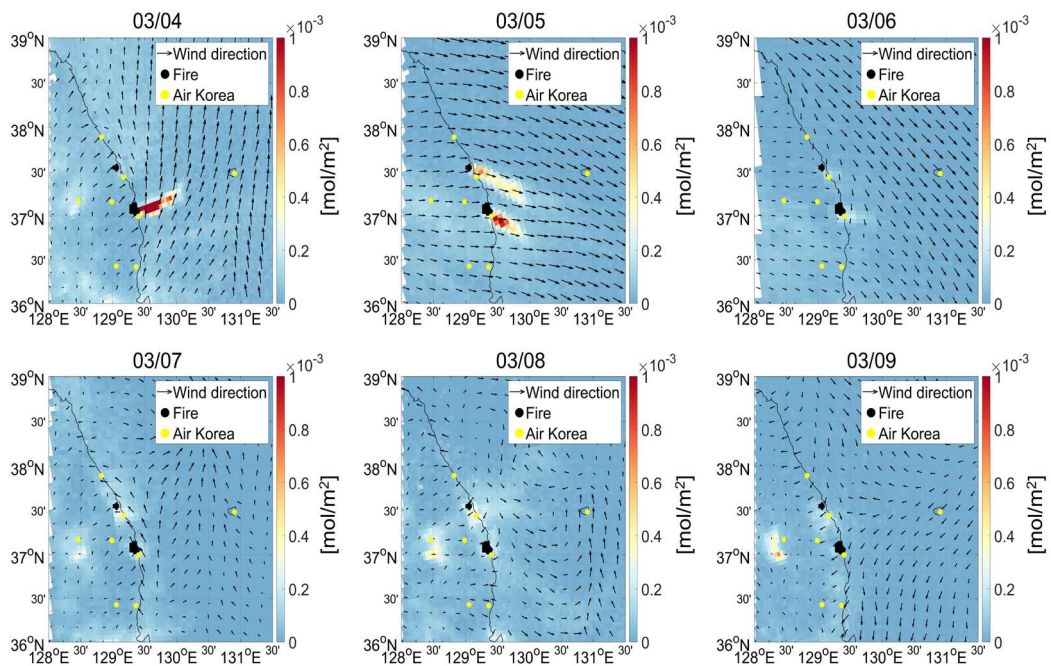


Fig. 11. Spatial distribution of NO_2 vertical column density from March 4 to March 9. The wind direction is calculated from LDAPS u and v vector data (U and V).

일대보다 고농도가 관측되었으므로 산불로부터 NO₂가 배출되었다는 사실을 확인할 수 있었다. 앞서 Air Korea 관측소에서 PM₁₀, PM_{2.5}에 비해서 농도의 증가가 크지 않았던 것과 함께 해석하면 NO₂ 배출 자체가 입자상 물질에 비하면 상대적으로 많지 않아 대기와 지상에 미친 영향력이 적었던 것으로 보인다. 이와 더불어 NO₂의 체류시간은 짧게는 수 시간에서 길게는 수 일(~5일)까지 정도인 단기체류 대기오염물질로, 산불 발생 직후 발원지 근처에서 발생한 강한 풍속의 기상 상황을 고려하였을 때 NO₂는 대기 중 빠르게 확산되어 소멸된 것으로 보인다 (Kang *et al.*, 2021; Seo *et al.*, 2020; Shah *et al.*, 2020).

4. 결 론

본 연구에서는 2022년 3월 한국에서 발생한 역사적 대형 산불인 울진 및 동해 산불을 사례로 하여 대형 산불 발생이 주변 대기질에 미치는 영향에 대해서 분석하였다. 대형 산불로부터 방출된 대기오염물질이 지상에 미치는 영향은 기상 조건, 지형 조건 등의 다양한 원인들의 복합적 효과로 나타났으나, 가장 밀접한 요소는 바람의 방향, 속도, 대기경계층 높이임을 확인하였다. 특히, 바람의 방향은 대기오염물질의 이동에 대해 관여하지만, 지상에서의 농도는 대기경계층 높이에 크게 의존하고 있음을 알 수 있었다. 이로 인하여 지속적으로 고농도가 유지되기보다 일변화 주기에 따른 농도의 변화가 나타났다. 또한, NO₂ 농도의 폭발적 증가와 광화학 반응 등의 결과로, NO₂와 O₃ 농도 사이에서 상반되는 관계도 발견되었다.

본 연구에서는 산불 발생으로부터의 배출 이후의 영향 범위와 상대적인 배출량에 대해 분석하였다. 추후 산불 발생 위치에서의 연료나 산불의 세기 등에 따른 배출 자체에 대한 분석도 함께 진행할 경우, 대기오염 물질별로의 절대적인 배출량에 대한 분석도 보완될 수 있을 것으로 보인다. 또한, 지상 관측소와 TROPOMI 위성 자료를 통하여 산불 영향 범위를 관찰하고 분석

하였으나, 산불로 인해 배출되는 상당한 양의 VOC에 대해 다루지 못하였으며, 오염물질의 수송이나 연직 분포 등에 대해 분석하기에는 한계가 있었다. 본 연구에서 발견된 사실을 기반으로 대기 확산 모델링을 통한 추가 분석을 진행한다면 산불 발생 시 대기질에 미치는 영향에 대해 보완할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 환경보전디지털 조사기반 구축기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다 (2021003330001 (NTIS: 1485019478)).

References

- An, S.G., Choi, K.H. (2021) Effect of Forest Fire on Fine Particulate Matter Concentration in Coastal Cities of Gangwon-do, South Korea, *Journal of the Association of Korean Geographers*, 10(3), 391-400.
- 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>
- Baek, S., Lim, J., Kim, W. (2022) Analysis on the Fire Progression and Severity Variation of the Massive Forest Fire Occurred in Uljin, Korea, 2022, *Forests*, 13(12), 2185. <https://www.mdpi.com/1999-4907/13/12/2185>
- 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>
- European Space Agency (ESA) (2023) S5P ATBD of the Sulfur dioxide product, 1-75. <https://sentinel.esa.int/documents/247904/2476257/Sentinel-5P-ATBD-SO2-TROPOMI> (accessed on Sep. 9, 2023).
- Han, S., Hao, T., Yang, X., Yang, Y., Luo, Z., Zhang, Y., Tang, Y., Lu, M.

- (2023) Land-sea difference of the planetary boundary layer structure and its influence on PM_{2.5} - Observation and numerical simulation, *Science of The Total Environment*, 858, 159881. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159881>
- Jaffe, D., Bertschi, I., Jaeglé, L., Novelli, P., Reid, J.S., Tanimoto, H., Vingarzan, R., Westphal, D.L. (2004) Long-range transport of Siberian biomass burning emissions and impact on surface ozone in western North America, *Geophysical Research Letters*, 31(16). <https://doi.org/10.1029/2004GL020093>
- Junghenn Noyes, K.T., Kahn, R.A., Limbacher, J.A., Li, Z. (2022) Canadian and Alaskan wildfire smoke particle properties, their evolution, and controlling factors, from satellite observations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(15), 10267-10290. <https://doi.org/10.5194/acp-22-10267-2022>
- Kang, Y., Choi, H., Im, J., Park, S., Shin, M., Song, C.-K., Kim, S. (2021) Estimation of surface-level NO₂ and O₃ concentrations using TROPOMI data and machine learning over East Asia, *Environmental Pollution*, 288, 117711.
- Kang, Y., Jang, E., Im, J., Kwon, C. (2022) A deep learning model using geostationary satellite data for forest fire detection with reduced detection latency, *GIScience & Remote Sensing*, 59(1), 2019-2035. <https://doi.org/10.1080/15481603.2022.2143872>
- Lee, Y.-S., Choi, S.-D., Kwon, H.-O., Kim, C.-S., Son, H.-S., Ye, J. (2011) Temporal and Spatial Distribution of Sulfur Dioxide in Ulsan, Korea, *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis*, 14(4), 249-256.
- Liu, Y., Kahn, R.A., Chaloulakou, A., Koutrakis, P. (2009) Analysis of the impact of the forest fires in August 2007 on air quality of Athens using multi-sensor aerosol remote sensing data, meteorology and surface observations, *Atmospheric Environment*, 43(21), 3310-3318. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.04.010>
- Menut, L., Flamant, C., Turquety, S., Deroubaix, A., Chazette, P., Meynadier, R. (2018) Impact of biomass burning on pollutant surface concentrations in megacities of the Gulf of Guinea, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(4), 2687-2707. <https://doi.org/10.5194/acp-18-2687-2018>
- Montealegre-Gracia, A.L., Lamelas-Gracia, M.T., García-Martín, A., de la Riva-Fernández, J., Escribano-Bernal, F. (2017) Using low-density discrete Airborne Laser Scanning data to assess the potential carbon dioxide emission in case of a fire event in a Mediterranean pine forest, *GIScience & Remote Sensing*, 54(5), 721-740. <https://doi.org/10.1080/15481603.2017.1320863>
- National Institute of Forest Science (NIFOS) (2022) 2022 Statistical Yearbook of Forest Fire. https://www.forest.go.kr/kfswweb/cop/bbs/selectBoardList.do?sessionId=ZdqOOWWCtza0qPXq6DxbF6805N6wXhG1v3Erf4X28tRFe1VvzGNk2dkdCIfE20.frswas01_servlet_engine5?bbsId=BBSMSTR_1008&pageUnit=10&pageIndex=1&searchtitle=title&searchcont=&searchkey=&searchwriter=&searchWrd=%EC%82%B0%EB%B6%88%ED%86%B5%EA%B3%84&ctgryLrcls=&ctgryMdcls=&ctgrySmcls=&ntcStartDt=&ntcEndDt=&mn=NKFS_06_09_05 (accessed on Oct. 23, 2023).
- Park, Y., Lee, H. (2010) Thermal characteristics of Living Leaves in *Pinus Densiflora* with Heat Flux, *Korean Society of Hazard Mitigation*, 10(5), 75-82.
- Peterson, D., Hyer, E., Wang, J. (2014) Quantifying the potential for high-altitude smoke injection in the North American boreal forest using the standard MODIS fire products and subpixel-based methods, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(6), 3401-3419. <https://doi.org/10.1002/2013JD021067>
- Pope Iii, C.A., Burnett, R.T., Thun, M.J., Calle, E.E., Krewski, D., Ito, K., Thurston, G.D. (2002) Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution, *Jama*, 287(9), 1132-1141.
- Seo, J.H., Yoon, J.M., Choo, G.H., Kim, D.R., Lee, D.W. (2020) Long-term Trend Analysis of NO_x and SO_x over in East Asia Using OMI Satellite Data and National Emission Inventories (2005-2015), *Korean Journal of Remote Sensing*, 36(2), 121-137.
- Shah, V., Jacob, D.J., Li, K., Silvern, R.F., Zhai, S., Liu, M., Lin, J., Zhang, Q. (2020) Effect of changing NO_x lifetime on the seasonality and long-term trends of satellite-observed tropospheric NO₂ columns over China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(3), 1483-1495.
- Shon, Z.-H., Song, S.-K., Lee, G. (2010) Photochemical Analysis of Ozone Levels in the Gulf of Gwangyang in the Spring and Summer of 2009, *Journal of Korean Society for atmospheric Environment*, 26(2), 161-176.
- 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>
- 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.
- Torres, O., Jethva, H., Ahn, C., Jaross, G., Loyola, D.G. (2020) TROPOMI aerosol products: evaluation and observations of synoptic-scale carbonaceous aerosol plumes during 2018-2020, *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(12), 6789-6806. <https://doi.org/10.5194/amt-13-6789-2020>
- 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 Northeast Asia, *Environmental Pollution*, 244, 414-422. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.09.061>
- Yang, W.H. (2019) Changes in Air Pollutant Concentrations Due to Climate Change and the Health Effect of Exposure to Particulate Matter, *Korea Institute for Health and Social Affairs*, 2019(3), 20-31.
- Yarragunta, Y., Srivastava, S., Mitra, D., Chandola, H.C. (2020) Influence of forest fire episodes on the distribution of gaseous air pollutants over Uttarakhand, India, *GIScience & Remote Sensing*, 57(2), 190-206. <https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1712100>
- Zeng, T., Wang, Y., Yoshida, Y., Tian, D., Russell, A.G., Barnard, W.R. (2008) Impacts of Prescribed Fires on Air Quality over the Southeastern United States in Spring Based on Modeling and Ground/Satellite Measurements, *Environmental Science & Technology*, 42(22), 8401-8406. <https://doi.org/10.1021/es800363d>
- Zhang, L., Ding, S., Qian, W., Zhao, A., Zhao, S., Yang, Y., Weng, G., Tao, M., Chen, H., Zhao, S., Wang, Z. (2022) The Impact of Long-Range Transport of Biomass Burning Emissions in Southeast Asia on Southern China, *Atmosphere*, 13(7), 1029. <https://www.mdpi.com/2073-4433/13/7/1029>
- Zhang, T., de Jong, M.C., Wooster, M.J., Xu, W., Wang, L. (2020) Trends in eastern China agricultural fire emissions derived from a combination of geostationary (Himawari) and polar (VIIRS) orbiter fire radiative power products, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(17), 10687-10705. <https://doi.org/10.5194/acp-20-10687-2020>

Authors Information

- 강유진 (울산과학기술원 지구환경도시건설공학과 박사후연구원) (kangyj@unist.ac.kr)
- 최현영 (울산과학기술원 지구환경도시건설공학과 석박사통합과정생) (hyong56@unist.ac.kr)
- 김예진 (울산과학기술원 지구환경도시건설공학과 석박사통합과정생) (happykimmy@unist.ac.kr)
- 임정호 (울산과학기술원 지구환경도시건설공학과 교수) (ersgis@unist.ac.kr)