

논문

2025년 3월 대한민국의 경북지역에서 발생한 대규모 산림 화재에 의한 대기질 영향 분석

Assessment of Air Quality Impacts from a Large-Scale Wildfire in Gyeongbuk, South Korea, in March 2025

마창진, 강공언^{1)*}

일본 후쿠오카여자대학교 환경과학과, ¹⁾원광보건대학교 보건의료행정과

Chang-Jin Ma, Gong-Unn Kang^{1)*}

Department of Environmental Science, Fukuoka Women's University, Fukuoka, Japan

¹⁾Department of Health and Medical Administration, Wonkwang Health Science University, Iksan, Republic of Korea

접수일 2025년 4월 8일
수정일 2025년 4월 27일
채택일 2025년 4월 30일

Received 8 April 2025
Revised 27 April 2025
Accepted 30 April 2025

*Corresponding author
Tel : +82-(0)63-840-1286
E-mail : gukang@wu.ac.kr

Abstract In March 2025, South Korea experienced massive wildfires in the Gyeongbuk region, resulting in the destruction of approximately 48,239 hectares of forested land. In this study, we aimed to evaluate the effects of various combustion by-products generated by the largest wildfire ever recorded in Korea had never experienced before on the surrounding and wide-area air quality. Specifically, the emissions of CO₂ and CH₄—two major greenhouse gases released during forest biomass combustion—were theoretically estimated. The average PM_{2.5} concentration in Andong City during the wildfire period was 119.05 μg/m³, and it significantly exceeded the daily average national air quality standard (35 μg/m³). The elemental concentration of PM₁₀ in Seosan, hundreds of kilometers away from the wildfire area, increased by 88.77%, and Pb, a heavy metal with well-known health risks, increased by 14.05%. In addition, the effect of wildfires in Gyeongbuk reached the west coast of Japan, and PM_{2.5} concentrations increased by 20.83% and 5.75% in Ishikawa and Shimane prefectures, respectively. The estimated emissions of CO, CO₂, and CH₄ from the Gyeongbuk wildfires amounted to approximately 0.22 Mt, 3.13 Mt, and 0.015 Mt, respectively. The amount of CO₂ released corresponds to the annual uptake of approximately 2.7 × 10⁷ trees with a trunk diameter of about 30 cm.

Key words: Wildfire, Air pollutants, PM_{2.5}, CO₂, Greenhouse gas, Element

1. 서 론

최근 20년간 전 세계 산불 발생 건수는 두 배 이상 증가하였으며, 규모 또한 커지고 있다. 미국 캘리포니아주의 경우, 최근 수십 년간 산불로 인한 산림 소실 면적이 172% 증가하였다. 올해 들어 LA에서는 2012년부터 2024년까지의 같은 시기와 비교하여, 약 40배나 많은 산불 경보가 발령되었다. 2025년 2월 일본 이와테현에서 발생한 대형 산불로 1명이 사망하고, 산림 2,900 ha가 소실되었다. 전 세계적으로는 2023년

캐나다에서 발생한 산불이 역대 최악으로 기록되었으며, 1,800만 ha 이상의 산림이 피해를 입었다. 또한, 2024년 6월 브라질 판타나우 습지에서는 산불 시즌이 아님에도 불구하고 단 한 달 만에 44만 ha의 토지가 소실되는 초대형 산불이 발생하였다.

국내에서도 2025년 3월, 경북 북동부지역에서 대규모 산불이 발생하여, 기존에 가장 피해가 컸던 2000년 동해안 산불(3만 ha 이상 소실)을 크게 능가하는 총 48,239 ha의 피해 면적을 기록하였다. 이러한 대형 산불 발생은 전 지구적인 기후변화와 밀접한 관련이 있

다는 분석이 제기되었으며(Abatzoglou and Williams, 2016), 최근에는 산불 발생 시기가 특정 계절에 국한되지 않고 연중 발생하는 추세로 전환되고 있다.

기후변화의 대표적인 특징은 평균 기온의 상승인데, 기온이 높아지면 식물과 토양의 수분이 빠르게 증발하여 산림이 건조해지고, 불이 붙기 쉬운 환경이 조성된다(Senande-Rivera *et al.*, 2025). 실제로 최근 수년간 미국 캘리포니아주와 그리스 등에서는 고온 현상과 함께 대형 산불이 빈번하게 발생하고 있다. Lee *et al.* (2012)은 우리나라에서도 과거 수십 년간 연평균 451건의 산불이 발생하여 3,760 ha의 피해가 발생했으며, 기상변화 등으로 산불의 발생 건수와 피해 면적이 다양하게 변화했다고 보고하였다.

또한, 기후변화는 지역별로 극단적인 기후 양상을 유발한다. 일부 지역에서는 장기간 가뭄이 지속되어 식물과 토양이 건조해지고, 이로 인해 산불 발생 위험이 높아진다. 반대로, 다른 지역에서는 이상 강수가 빈번하게 발생하여 식생이 급속도로 자라면서 시간이 지나 건조해지면 오히려 산불 연료로 작용하게 된다. 더불어 이상 기후는 대기 흐름에도 영향을 미쳐, 강풍 등 제트 기류를 동반한 기상현상의 발생 가능성을 높인다. 강풍은 불씨를 광범위하게 확산시켜 산불의 규모를 키우는 동시에 산불의 점화 가능성 또한 증가시킨다.

산불은 산림자원과 주택 등 인프라를 소실시키는 물리적 피해뿐만 아니라, 다량의 연기와 유해물질을 배출함으로써 인체 건강에 다양한 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 산불이 발생하면 입자상 물질($PM_{2.5}$ 및 PM_{10}), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO_2), 휘발성 유기화합물(VOCs) 등 다양한 대기오염물질이 방출된다. 이들 물질은 호흡기계, 심혈관계, 면역계를 포함한 다양한 생리적 시스템에 영향을 미치며, 특히 호흡기 질환을 유발하거나 기존 질환을 악화시킬 수 있다(Cascio, 2018). 이 가운데 $PM_{2.5}$ 는 입자의 크기가 매우 작아 폐포 깊숙이 침투할 수 있어, 천식, 만성폐쇄성폐질환(COPD), 폐렴 등의 질환과 밀접한 관련이 있는 것으로 보고되고 있다(Navarro *et al.*, 2016).

본 연구에서는 2025년 3월 경북지역에서 발생한 대규모 산불이 주변 지역의 대기질에 미친 영향을 분석하고, 산림 연소로 인한 지구온난화의 주요 원인물질인 CO_2 와 CH_4 의 배출량을 산정하였다.

2. 산불의 개요 및 대기질의 변화

2.1 산불의 개요

2025년 3월 22일 오전 11시 24분쯤, 경북 의성군 안평면 괴산리 야산 정상 부근에서 발생한 산불은 당시 초속 11 m 이상의 강풍에 의해 안동시, 청송군, 영양군, 영덕군 등으로 빠르게 확대되었다. 경상북도 재난안전대책본부에 따르면, 3월 30일 오전 8시 30분을 기준으로 산불로 인한 경북지역 사망자는 총 26명으로 집계되었으며, 지역별로는 영덕군 9명, 영양군 7명, 안동시와 청송군 각각 4명, 의성군 2명이었다. 이 산불로 인해 문화재, 농축산업, 농기계 분야에서도 광범위한 피해가 발생하였다. 사찰 5곳과 고택 12곳 등 총 25개의 문화재가 소실되었으며, 농작물 피해는 558 ha, 시설하우스 281동, 축사 51동, 농기계 1,369대가 불에 탔고, 돼지 24,470두도 폐사한 것으로 보고되었다.

그림 1은 2025년 3월 25일 위성사진으로, 최초 발화 지점에서 발생한 산불 연기가 서풍을 타고 동해 방향으로 이동하는 모습을 보여준다.

2.2 주요 대기오염물질의 농도 변화

산불 발생 시 주민들이 주의해야 할 것은 단순한 화염에 그치지 않는다. 산불 연기에는 입자상 물질(PM_{10} , $PM_{2.5}$)뿐만 아니라, 오존(O_3), 이산화질소(NO_2), 다환방향족탄화수소(PAHs) 등 다양한 유해대기오염물질이 포함되어 있어, 호흡기 및 심혈관계에 심각한 영향을 미칠 수 있다.

그림 2는 실시간 대기오염정보를 제공하는 빅데이터 플랫폼 어플리케이션(Kweather)을 통해 확인한 2025년 3월 27일 오전 4시 30분 시점의 전국 PM_{10} 농도 분포 현황을 나타낸 것이다. 해당 시점의 농도 분포

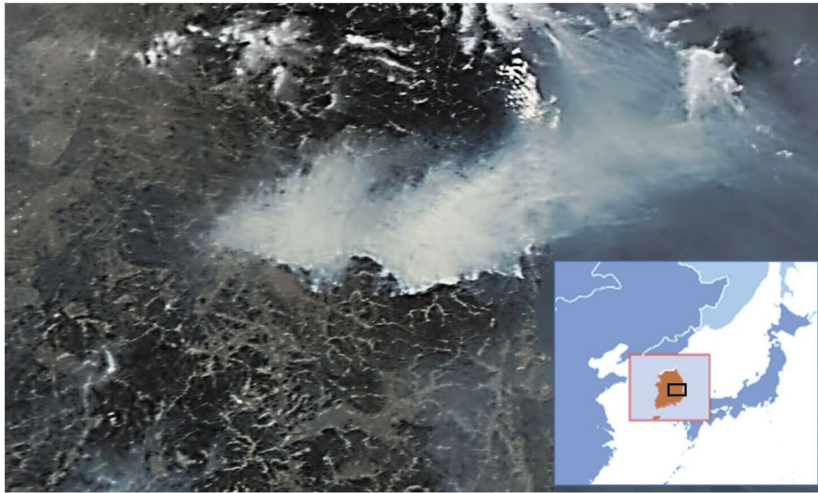


Fig. 1. Satellite image showing wildfire smoke moving toward the East Sea due to westerly winds (NASA Worldview/Reuters, 2025).

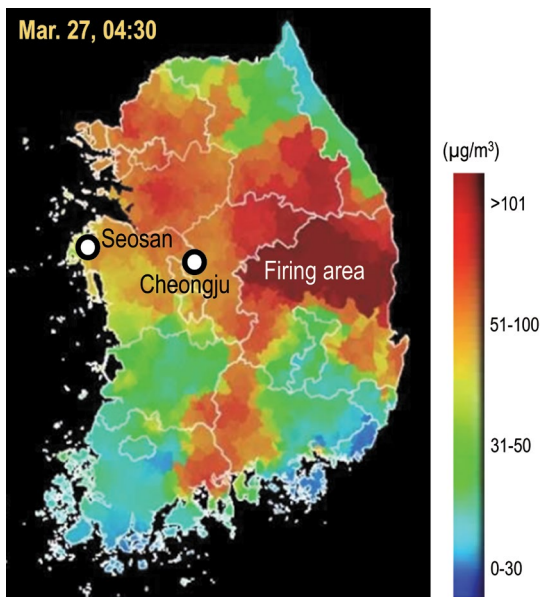


Fig. 2. PM₁₀ concentration map of South Korea at 04:30 AM on March 27, 2025 (Kweather, 2025).

는 산불 영향권 지역을 중심으로 미세먼지 농도가 급격히 증가했음을 시각적으로 보여주며, 산불로 인한 대기질 악화가 광범위하게 발생했음을 의미한다. 산불이 진행 중이던 경북지역뿐만 아니라, 인근 강원, 수도

권(서울·경기), 충북지역에 이르기까지 고농도의 PM₁₀이 광범위하게 관측되었음을 확인할 수 있다. 이는 산불로 인해 발생한 다량의 대기오염물질이 대기 흐름을 따라 수백 킬로미터 떨어진 지점까지 이동하며, 해당 지역 주민들에게도 건강 영향을 미칠 수 있음을 시사한다(Alexeeff *et al.*, 2025; Rappold *et al.*, 2017).

산불은 CO₂와 질소산화물(NO_x) 그리고 비메탄 탄화수소(NMHC)에 더해, CO 및 PM_{2.5}와 같은 주요 대기오염물질을 대기 중에 방출하는 것으로 알려져 있다(Guo *et al.*, 2020). 그림 3은 글로벌 산불정보시스템(GWIS, 2025)을 통해 수집된, 산불 발생 전후의 전국 CO 및 PM_{2.5} 배출량 분포를 시각화한 것이다. GWIS는 지역 및 국가 수준의 기존 자료를 통합하여 전세계 화재 발생 상황과 이에 따른 영향을 종합적으로 산출·제공하는 국제 플랫폼이다.

CO와 PM_{2.5} 모두 산불 발생 전 기간인 2025년 3월 11일부터 20일까지의 배출량에 비해, 산불이 진행 중이던 3월 22일부터 28일까지의 배출량이 현저하게 증가한 것으로 나타났다. CO는 무색·무취의 기체로, 강한 독성을 가진 대표적인 대기오염물질로 알려져 있다. 공기 중의 농도가 약 0.01%만 되어도 두통, 어지러

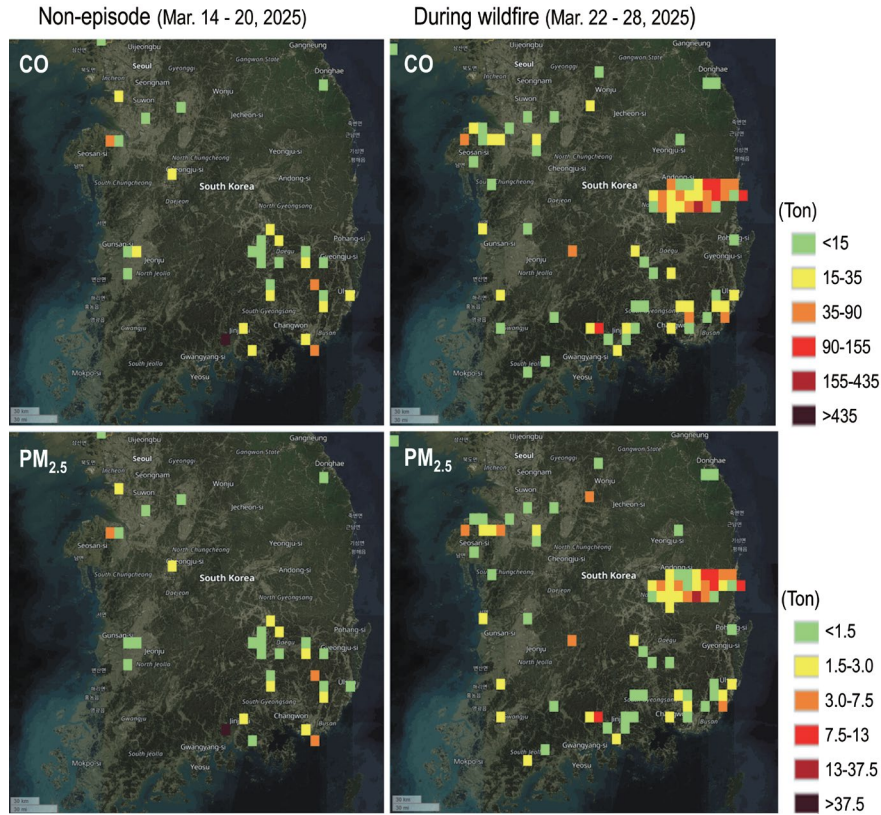


Fig. 3. Emission amount of carbon monoxide and PM_{2.5} on South Korea before (non-episode) and during the massive wildfire on March 2025 drawn through the Global Wildfire Information System (GWIS, 2025).

움 등의 증상을 유발할 수 있으며, 농도가 0.07~0.1% 수준인 환경에서 3시간 이상 노출될 경우 맥박 증가, 의식 장애 등의 중추신경계 영향이 보고되고 있다. 특히 농도가 0.51%에 도달하면 12분 내에 치명적인 결과를 초래할 수 있는 것으로 알려져 있다(JGKA, 2025).

산림화재는 일반적으로 지표화재(surface fire), 지중화재(ground fire), 수목화재(crown fire)의 세 가지 유형으로 분류된다. 지표화재는 키 작은 관목류, 초목류, 이끼류, 낙엽이나 식물 잔재(litter) 등 지표면에 존재하는 가연물이 연소되는 형태이다. 지중화재는 토양 내 유기물층(예: 토탄층이나 이탄층)이 연소되는 현상(Gooddo, 2022)으로, 지표화재와 달리 땅속에서 비교적 저온으로 불꽃을 일으키지 않으면서 연소

가 진행되는 특징을 가진다. 특히 지중화재는 지표화재의 진압 후에도 장시간 지속적으로 연소할 가능성이 높으며, 토양 내에서 산소 공급이 제한된 상태에서 저온의 불완전 연소가 일어나므로 CO나 기타 유해 연소물질의 배출량이 상대적으로 높은 것으로 알려져 있다(Japanese Fire Department Research Institute, 1992). 2017년 10월 미국 캘리포니아에서 발생한 대규모 산불 당시에는 시간당 약 2,040톤의 CO가 대기 중으로 방출된 것으로 보고되었다(Bela et al., 2022).

그림 3에 따르면, CO와 더불어 PM_{2.5} 역시 산불 발생지역에서 다량 배출된 것으로 나타났다. 경북지역에서 발생한 산불은 수목뿐만 아니라 인근 민가와 축사시설까지 확산되었으며, 이로 인해 건축자재를 포

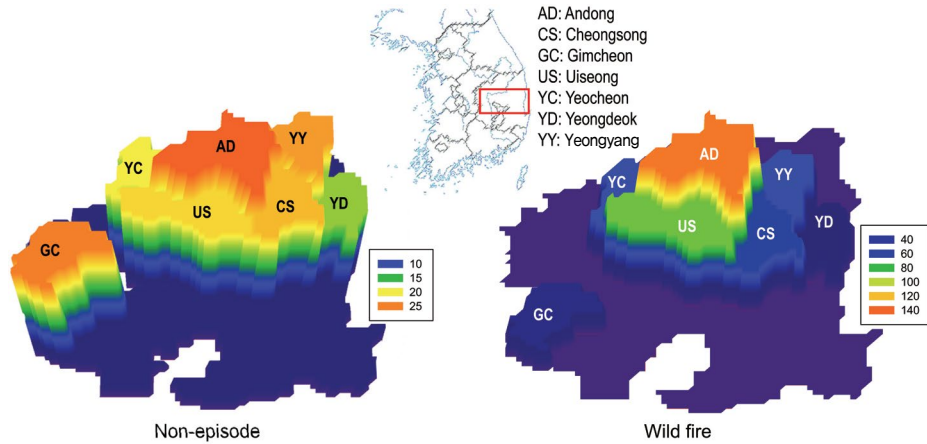


Fig. 4. Three-dimensional distribution of $PM_{2.5}$ concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) in Gyeongbuk, South Korea, in March 2025.

합한 다양한 석유화학제품의 연소가 추가적으로 발생한 것으로 판단된다. 이러한 비목재성 가연물의 연소는 산불 기원 배출물의 화학적 조성 변화에 영향을 미치며, 특히 다환방향족탄화수소(PAHs), 휘발성유기화합물(VOCs) 등 유해대기오염물질 농도의 상승에 기여할 수 있음을 시사한다.

도시지역에서 발생한 산불로 인해 배출된 $PM_{2.5}$ 는 다른 일반적인 배출원에서 발생한 $PM_{2.5}$ 에 비해 인체 건강에 최대 10배까지 더 해로운 것으로 보고되었다(IQAir, 2025). 이는 도시 산불의 경우 수목을 포함해 자동차, 플라스틱, 건축자재 등 다양한 인공물이 함께 연소되면서, 이 과정에서 발생한 그을음(soot)이나 재(ash)뿐만 아니라 납(Pb), 비소(As) 등 중금속류가 함께 대기 중으로 방출되기 때문이다. 앞서 언급한 2025년 3월 경북지역에서 발생한 대규모 산불 또한 다량의 시설하우스, 축사, 농기계 등 비목재성 구조물이 연소된 것으로 보고되었다. 이로 인해 해당 산불은 단순한 산림 화재를 넘어 도시형 복합화재의 특성을 일부 포함하고 있으며, 배출물의 독성과 건강 영향 측면에서 더욱 높은 수준의 주의가 요구됨을 시사한다.

본 연구에서는 경북 산불 영향지역 중 울곡동(김천시), 명륜동(안동시), 안계면사무소(의성군), 청송군, 영양군, 영해면(영덕군), 예천군 등 7곳의 대기질측정

소에서 관측된 $PM_{2.5}$ 농도를 바탕으로 3차원 농도 분포도(그림 4)를 작성하였다. 이들 측정소 중 울곡동 측정소는 산불 발생지역의 풍상지역으로, 김천시에 위치한다. 산불 발생 이전의 기간(2025년 3월 11일~20일) 동안 $PM_{2.5}$ 농도를 보면, 7개 측정소 중 영덕군이 $14.92 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 낮았고, 안동시가 $21.81 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았으며, 7개 지역의 평균농도는 $18.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 반면, 산불 지속 기간(3월 22일~28일) 동안 $PM_{2.5}$ 농도는 풍상지역인 김천시에서 $29.84 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 관측되었으며, 산불 영향권 6개 지역의 평균농도는 $57.65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 급격히 증가하였다. 이 중 안동시가 $119.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았으며, 의성군 $80.06 \mu\text{g}/\text{m}^3 >$ 청송군 $54.89 \mu\text{g}/\text{m}^3 >$ 예천군 $47.84 \mu\text{g}/\text{m}^3 >$ 영양군 $47.47 \mu\text{g}/\text{m}^3 >$ 영덕군 $24.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 순으로 나타났다.

표 1에는 $PM_{2.5}$ 농도와 더불어, 산불 전(Non-episode)과 산불 지속 기간(Wildfire) 동안 관측된 NO_2 및 CO 평균농도를 정리하였다. 7개 측정소의 평균농도에 의해 산출된 산불로 인한 농도 증가율은 $PM_{2.5}$ 205.82%, NO_2 12.14%, CO 49.48%를 보였다. 한편, 본 연구에서는 $PM_{2.5}$ 농도 평가에 있어서 기상청(KMA, 2025)의 황사관측 현황정보를 참고로 하여 황사의 영향은 배제하였다.

Table 1. Average concentrations of PM_{2.5}, NO₂, and CO before (non-episode) and during wildfires.

Sites	PM _{2.5} (µg/m ³)		NO ₂ (ppb)		CO (ppb)	
	Non-episode	Wildfire	Non-episode	Wildfire	Non-episode	Wildfire
Gimcheon	21.08	29.84	13.41	13.22	350.15	354.92
Andong	21.81	119.05	13.38	14.20	541.99	992.06
Uiseong	17.96	80.06	7.88	10.67	339.00	566.03
Cheongsong	18.70	54.89	11.06	9.44	278.77	336.19
Yeongyang	19.80	47.47	10.49	10.88	330.34	392.06
Yeongdeok	14.92	24.36	5.11	7.64	299.27	580.32
Yecheon	17.68	47.84	6.35	9.83	362.75	518.89
7-site average	18.85	57.65	9.67	10.84	357.47	534.35
% increase	205.82		12.14		49.48	

3. 산불의 광역 대기질 영향 평가

앞서 언급한 바와 같이, 본 연구 대상인 경북지역 산불이 확산 중이던 2025년 3월 27일 4시 30분 시점의 전국 PM₁₀ 농도 분포(그림 2)에 따르면, 산불 중심지인 안동시에서 수백 km 떨어진 중부 및 수도권 지역에서 고농도 PM₁₀이 관측되었다. 이는 경북지역 산불에 의한 광역적 대기오염의 가능성을 시사한다. 따라서, 본 연구에서는 국내 대기오염측정망 자료를 실시간으로 제공하는 에어코리아(AirKorea, 2025)의 데이터를 바탕으로, 경북지역 산불과 중부(충북 및 충남) 및 수도권 지역(인천)의 대기질 간의 관련성을 평가하였다. 그림 5에는 산불 발생 전(3월 2일~3월 6일)과 산불기간(3월 22일~3월 28일) 동안 산불 대상지역인 경북(G.B.)의 PM₁₀ (µg/m³) 농도와 인근 세 지역(충북 C.B., 충남 C.N., 인천 I.C.)의 농도 간 상관관계를 나타내었다. 단, 전국적으로 황사가 관측된 3월 25일과 3월 26일의 PM₁₀ 데이터는 평가에서 배제하였다.

그림 5에 나타낸 지역 간 상관계수(r)는 산불 발생 전 기간에는 0.34에서 0.78을 보인 반면, 산불기간 중에는 0.56에서 0.96으로 나타나 상대적으로 높은 상관성을 보였다. 특히, 충북과 충남 지역의 경우 상관계수(r)가 각각 0.95와 0.96으로 매우 강한 상관관계를 보여, 이 두 지역의 PM₁₀ 농도는 경북지역 산불의 영향을 크게 받았던 것으로 사료된다.

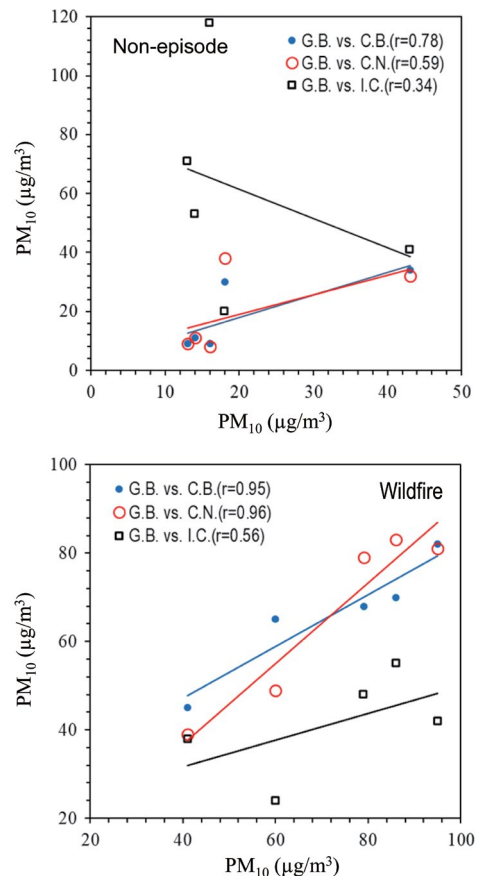


Fig. 5. Correlation between PM₁₀ concentrations (µg/m³) in Gyeongbuk and those in three neighboring regions (Chungbuk: C.B., Chungnam: C.N., and Incheon: I.C.) during the periods before the wildfire (top: Non-episode) and during the wildfire (bottom).

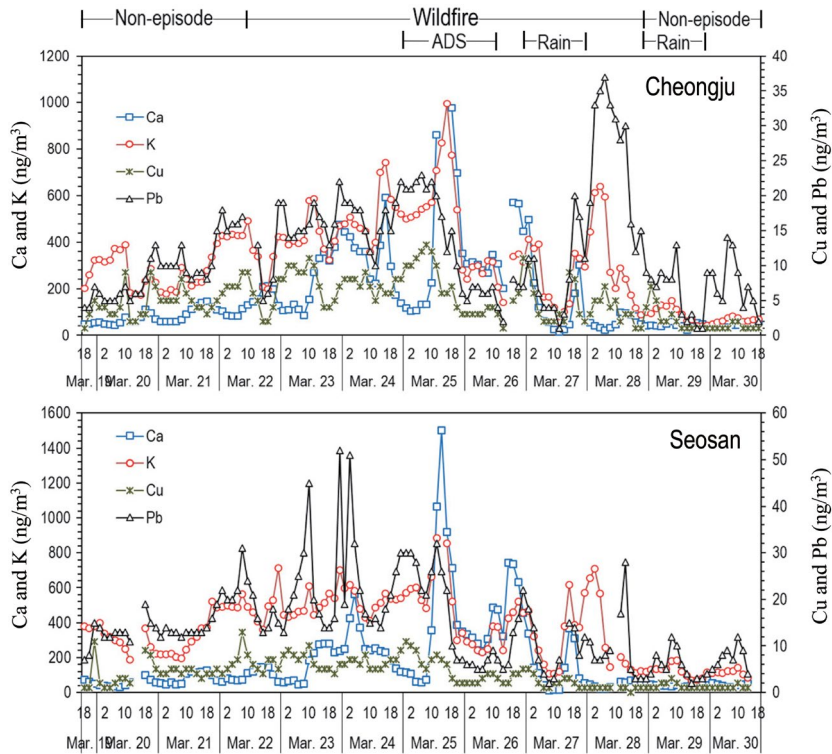


Fig. 6. Temporal variations in trace element concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) in PM_{10} measured at Cheongju and Seosan, Korea, in March 2025.

또한 본 연구에서는 전국 대기환경기준물질의 측정 자료를 실시간으로 제공하는 에어코리아(AirKorea, 2025)의 데이터를 이용하여, 2025년 3월 청주와 서산에서 포집된 PM_{10} 의 원소성분 중 칼슘(Ca), 칼륨(K), 구리(Cu), 납(P)의 시계열 농도 변화($\mu\text{g}/\text{m}^3$)를 그림 6에 정리하였다. Sparks and Wagner (2021)의 연구에 따르면, 도시를 포함한 산악지역의 산불 연기 중에는 Cu와 Pb 등 중금속 성분이 특이적으로 검출되는 경향이 보고된 바 있다.

그림 6에 따르면, 청주와 서산 두 지역 모두 산불이 최초 발생한 3월 22일부터 25일까지 모든 대상 원소 성분의 농도가 증가하였으며, 특히 Pb와 Ca의 농도 상승이 두드러졌다. 3월 25일에는 전국적으로 황사가 관측되어, 황사의 영향과 경북지역 산불의 영향이 중첩되었을 가능성이 있으며, 이로 인해 토양 유래 성분인

Ca와 K의 농도가 최고치를 기록하였다. 이 중 K는 대표적인 바이오매스 연소기원 성분으로 알려져 있으며, 황사가 관측된 3월 25일(3월 26일에 약화됨)을 제외한 대부분의 기간 동안 Ca보다 높은 농도를 보였다. 이는 청주와 서산 두 지역의 대기질이 경북지역 산불의 영향을 받았을 가능성을 시사한다. 한편, 중국 산둥반도 부근에서 동쪽으로 이동한 저기압의 영향으로 2025년 3월 27일과 29일에는 청주에서 각각 1.3 mm 및 1.5 mm, 서산에서는 각각 0.2 mm 및 0.6 mm의 강우가 관측되었다. 이 기간 동안의 소량 강우는 대기 중 입자상 물질에 대한 세정 효과(rain scavenging effect)를 유발하여 PM 농도 저하에 영향을 미친 것으로 판단된다.

2025년 3월 26일 오후 5시를 기준으로, 산불이 발생한 영덕군과 울진군을 포함한 경북지역 9개 시·군에

Table 2. Element concentrations in two areas (Cheongju and Seosan) located away from the wildfire region. (unit: ng/m³)

	Cheongju				Seosan			
	Ca	K	Cu	Pb	Ca	K	Cu	Pb
Non-episode ^a	77.78	263.59	4.48	8.11	68.24	309.04	4.04	13.24
ADS + wildfire	369.23	450.83	6.67	11.96	454.80	456.71	4.72	15.44
Wildfire without ADS ^b	156.14	323.31	5.14	14.14	128.82	373.18	4.04	15.10
Increased by wildfire (b-a)	78.36	59.71	0.66	6.03	60.58	64.14	0.00	1.86
<i>IR_W</i> (%)	100.75	22.65	14.67	74.36	88.77	20.76	0.06	14.05

건조경보가 발효되었으며, 해당일에는 강우가 관측되지 않았으나 전국 대부분 지역에서 강한 바람이 불었다. 특히, 일부 지역에서는 순간풍속이 15 m/s에 달하는 강풍이 관측되었다. 이 날은 전날 발생한 황사의 약한 영향권에 있었음에도 불구하고, 강한 바람의 영향으로 대기오염물질이 광범위하게 확산·희석되어 PM 농도는 상대적으로 낮은 수준을 기록한 것으로 사료된다.

2025년 3월 청주와 서산에서 포집된 PM₁₀ 시료를 분석한 결과, Ca, K, Cu, Pb의 농도(μg/m³)는 일부 기간 동안 산불의 영향으로 증가한 것으로 판단된다. 본 연구에서는 황사의 영향을 배제하고 산불만으로 인한 원소 농도의 증가율(*IR_W*, %)을 다음 식을 이용하여 산출하였으며, 그 결과를 표 2에 제시하였다.

$$IR_W(\%) = \frac{C_{FWA} - C_N}{C_N} \times 100$$

여기에서,

C_{FWA} : 산불이 발생한 기간 중 황사가 없었던 날의 원소 농도

C_N : 황사 및 산불 모두 발생하지 않은 평상시의 원소 농도

산불로 인한 원소 농도의 증가율은 청주에서 Ca 100.75%, K 22.65%, Cu 14.67%, Pb 74.36%였으며, 서산에서는 Ca 88.78%, K 20.76%, Cu 0.06%, Pb 14.06%로 산출되었다. 이러한 결과는 산불로 인해 다량의 대기오염물질이 배출되었으며, 이는 수백 km 떨어진 지역의 대기질에도 유의미한 영향을 미쳤음을 시사한다. 특히 산불지역과의 거리 차이에 따라 원소 농도의

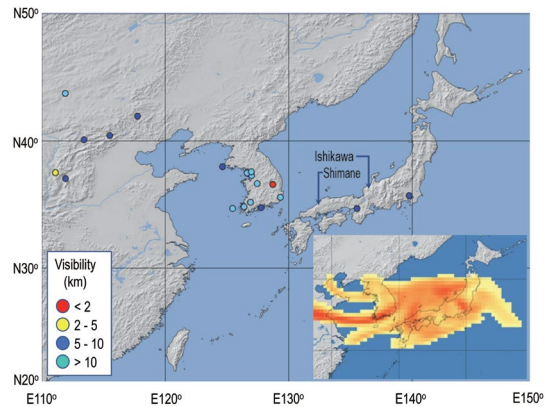


Fig. 7. Maps showing the observation points of Asian Dust Storms (ADS) over East Asia and the simulated transport pathway of the ADS on March 25, 2025 (JMA, 2025).

증가율에 차이가 나타났는데, 상대적으로 먼 서산에서의 증가율 범위는 0.06~88.77%를 보인 반면, 산불 지점에 가까운 청주의 경우 14.67~100.75%의 증가율을 보였다. 이는 산불의 영향이 지리적인 근접성에 따라 차등적으로 나타나며, 산불 발생지 인근 지역일수록 대기질에 대한 영향이 더 크다는 것을 보여준다.

앞서 제시한 그림 1의 위성사진에서 확인할 수 있듯이, 산불 연기는 발화지점에서 발생한 후 서풍의 영향으로 동해 방향으로 이동하였다. 실제로 3월 25일과 26일에는 약 10 m/s의 강한 서풍이 관측되었으며, 이로 인해 산불로부터 발생한 다량의 대기오염물질이 동해를 거쳐 일본의 서해안 지역까지 유입되었을 가능성이 있다.

그림 7에는 2025년 3월 25일 일본 기상청에서 제공한 황사(ADS) 관측지점과 황사 이동에 대한 시뮬레

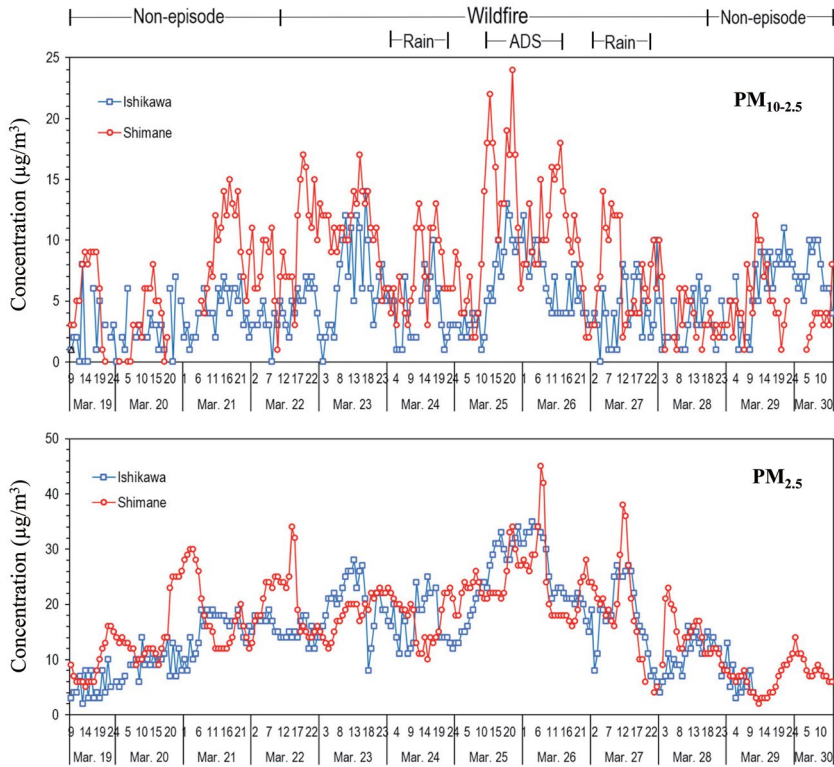


Fig. 8. Time-series variations of $PM_{10-2.5}$ and $PM_{2.5}$ concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) at two western costal sites (Ishikawa and Shimane Prefectures) in Japan in March 2025.

이선 결과(그림 우측 하단 참조)를 제시하였다. 여기에서 황사 관측지점은 가시거리 수준에 따라 서로 다른 색상으로 표기되어 있으며, 황사 이동 시뮬레이션 결과를 통해서도 경북지역의 산불 발생으로 인해 대기오염물질이 황사와 함께 일본 열도까지 도달했을 가능성이 큰 것으로 판단된다.

본 연구에서는 산불에 의해 발생한 대기오염물질의 장거리 이동을 평가하기 위해, 일본 서해안에 위치한 이시카와현과 시마네현(그림 7 참조) 소재 대기측정소의 $PM_{10-2.5}$ 및 $PM_{2.5}$ 농도의 시계열 변화를 그림 8에 제시하였다. 두 지역에서 측정된 입경별 대기입자 질량농도의 시계열 변화를 보면, 전체적으로 경북지역의 산불기간 동안 비교적 높은 경향을 보였다. 산불의 영향을 보다 정확하게 평가하기 위해서는 경북지역 산불로 인해 발생한 입자상 물질이 동해 상공을 이

동하는 데 소요되는 시간 정보가 필요하며, 또한 황사의 영향도 고려해야 한다. 그러나 해당 시기의 일본 서해안 지역 대기질은 경북지역 산불의 영향도 함께 받았을 가능성을 배제할 수 없다.

일본 서해안의 두 지역에서 입경별 대기입자 질량농도의 증가가 우리나라 경북지역의 대규모 산불로부터 어느 정도 영향을 받았는지를 정량적으로 산출하였으며, 그 결과를 표 3에 제시하였다. 정량적 평가에서는 황사의 영향을 받았을 기간을 배제한 후 경북지역의 산불 영향에 따른 증가율(IR_W , %)을 산출하였고, 그 방법은 앞서 설명한 산불만으로 인한 원소농도의 증가율(IR_W , %)과 동일하다. 산출 결과에 따르면, 조대입자인 $PM_{10-2.5}$ 농도는 이시카와와 시마네현에서 각각 39.99%와 14.10% 증가했으며, 초미세입자인 $PM_{2.5}$ 의 경우 각각 20.83%와 5.75% 증가한 것으

Table 3. PM concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) at two western coastal sites in Japan in March 2025.

	PM _{10-2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	Ishikawa	Shimane	Ishikawa	Shimane
Non-episode ^a	3.58	7.46	12.06	16.28
ADS + wildfire	8.13	13.13	30.46	27.33
Wildfire without ADS ^b	5.02	8.51	14.57	17.22
Wildfire (b-a)	1.43	1.05	2.51	0.94
Rate increased by wildfire (%)	39.99	14.10	20.83	5.75

로 나타났다. 지리적으로 경북지역과 위도상 상대적으로 가까운 이시카와현에서 더 높은 증가율이 관측된 것은, 강한 서풍의 영향으로 기류가 남쪽으로 크게 이동하지 않고 일본 서부 해안지역으로 직접 유입되었기 때문으로 사료된다. 일반적으로 입경이 큰 조대입자는 중력침강으로 인해 장거리 이동이 어려운 것으로 알려져 있으나, 본 연구에서는 두 지역 모두 상대적으로 입경이 큰 조대입자(PM_{10-2.5})에서 질량농도의 증가율이 더 크게 나타났다. Reid *et al.* (1998)은 브라질에서 바이오매스 연소 사례에서 항공기 관측결과를 통해 입자의 입경(D_p)이 $0.01 < D_p < 4 \mu\text{m}$ 범위를 가지며, 연기의 수명, 즉 대기 중 체류시간이 길수록 입자의 크기가 증가하는 경향이 있음을 보고하였다. 따라서, 본 연구에서도 경북지역의 산불로 인해 발생한 입자상 물질 중 입경이 큰 조대입자가 초기부터 다량 생성되었다기보다는 최초 생성된 작은 입자가 장거리 이동 과정에서 입자 간 물리적 흡착, 즉 균일반응에 의해 입경이 점차 증가한 것으로 사료된다.

이와 같은 산불의 광역적 영향 사례는 해외에서도 다수 보고된 바 있다. 예를 들어, 2015년 11월 4일 인도네시아에서 발생한 산불은 종식까지 수개월이 소요되었으며, NASA 위성 영상에서 산불 연기가 산맥이나 대륙, 해양을 넘어 확산하는 모습이 확인되었다. 미국 뉴멕시코주 엘버커키에서는 약 400 km 떨어진 지역의 산불로 인해 응급의료 요청이 발생하였고, 캐나다 퀘벡주에서 발생한 산불의 연기가 1,300 km 떨어진 미국 뉴욕주까지 이동한 사례도 보고된 바 있다 (The Japanese Economic Daily, 2015).

4. 경북지역 산불에 의한 온실가스의 배출량

4.1 온실가스 배출량의 산정

자연적 및 인위적 화재는 지구 탄소 순환(global carbon cycle)에 있어서 중요한 역할을 하며, CO₂ 및 CH₄ 등의 주요 온실가스(GHG)와 CO의 주요 배출원 중 하나이다(Adame *et al.*, 2018; Akagi *et al.*, 2011). van Wees *et al.* (2022)의 모델 기반 연구에 의하면, 산림, 초원, 관목지 및 농경지 화재를 포함하여 2002년부터 2020년까지 전 세계 화재로 인해 배출된 평균 탄소량은 $2.1 \pm 0.2 \text{ Pg C/year}$ 로 추정되었다. 또한 Yue and Gao (2018)는 산불로 인한 탄소의 배출량은 전체 자연 발생원의 37.8%, 자연 및 인위적 배출량을 합한 총량의 16.9%를 차지한다고 보고하였다.

본 연구에서는 2025년 3월 경북지역에서 발생한 대규모 산불로 인해 배출된 CO, CO₂, CH₄의 양(ton)을 이론적으로 산출하였다. 이를 위해 먼저 산불에 의해 소실된 총 산림 피해면적과 단위면적당 연소된 나무 중량, 그리고 나무중량 중 탄소함량비를 기반으로, 산불로 인해 연소된 전체 나무 중 포함된 탄소함량(W_c , kg)을 산정하였다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 다음과 같은 이론 산출식을 고안하여 적용하였다.

$$W_c (\text{kg}) = A_c \times 10^4 \times W_t \times C_f$$

여기에서,

A_c : 산불에 의해 소실된 산림면적($4.8 \times 10^4 \text{ ha}$)

10^4 : ha를 m^2 로 변환하기 위한 계수

W_t : 단위 소실 산림면적당 나무중량($4.5 \text{ kg}/\text{m}^2$) (Jeong and Kim, 2025)

Table 4. Estimated emissions of carbon compounds from wildfires in Gyeongbuk, South Korea, in March 2025.

Gases	W_c (kg)	F_c	MW_{TG}	AW_C	G_E (Mt)
CO		0.1	28		0.22
CO ₂	9.6×10^8	0.888	44	12	3.13
CH ₄		0.012	16		0.015

C_f : 나무중량(kg)당 탄소함량비(0.5) (Son *et al.*, 2014)

단, W_c 는 Jeong and Kim (2025)이 발표한 강릉시의 산림면적당 나무중량이며, 본 연구에서는 이 값을 전국 평균치로 가정하여 산출식에 적용하였다.

다음 단계로, 산불로 인해 연소된 총 나무 중 탄소 함량으로부터 CO, CO₂, CH₄의 배출량(G_E , ton)을 산정하기 위해, 본 연구에서는 다음의 산출식을 도출하였다.

$$G_E(\text{ton}) = W_c \times F_c \times \frac{MW_{TG}}{AW_C}$$

여기에서,

F_c : 총 탄소함량(W_c)에서 각각의 대상가스(CO, CO₂,

CH₄)로서 배출되는 탄소량 비율(US EPA, 1995)

MW_{TG} : 대상가스(CO, CO₂, CH₄)의 분자량

AW_C : 탄소의 원자량

표 4에는 G_E (ton) 산출에 필요한 입력 정보와 그 결과를 제시하였다. 산출 결과에 따르면, 2025년 3월 경북지역에서 발생한 대규모 산불로 인해 배출된 CO는 약 0.22 Mt, CO₂는 약 3.13 Mt, CH₄는 약 0.015 Mt으로 추정되었다. 이 중 대표적인 온실가스인 CO₂와 CH₄의 합계는 약 3.15 Mt으로, 이는 경상북도의 온실가스 배출량 5,805만 톤/년(Local Government tvU, 2022)의 약 5.4%에 해당한다. 이 결과는 경북지역의 대규모 산불이 온실가스 배출량 측면에서 상당한 규모의 영향을 미쳤음을 시사한다.

4.2 산불에 의해 배출된 CO₂와 수목에 의해 흡수되는 CO₂의 양적관계 평가

대기 중 CO₂ 농도 증가를 억제하여 지구 온난화를

방지하기 위해서는 전기자동차 보급이나 재생에너지 활용 등 CO₂의 배출 자체를 감소시키는 방식이 중요하다. 그러나 이에 못지않게 중요한 접근은 이미 대기 중에 배출된 CO₂를 흡수·제거하는 방법이다. 이러한 CO₂ 흡수원(carbon sink)으로 가장 주목받고 있는 것은 삼림이다. 수목은 광합성 과정을 통해 대기 중의 CO₂를 흡수하여 성장하며, 이 과정에서 지구 온난화 저감에 있어 핵심적인 역할을 수행한다.

본 연구에서는 앞서 이론적으로 산출한 산불에 의한 온실가스 배출량을 바탕으로, 산불로 인해 방출된 CO₂와 산림에 의해 흡수되는 CO₂ 간의 양적 관계를 정량적으로 평가하였다.

일본 공해건강피해보상예방협회(Japan Pollution Health Damage Compensation Prevention Association, 1995)에서 발간한 「대기정화 수목 매뉴얼」에 따르면, 여러 수종의 평균 CO₂ 흡수량은 2.6 kg CO₂/m²·year로 제시되어 있다. 이 값은 조사 대상이었던 10종류 수목의 광합성 속도와 계절 변동(휴면기, 착엽시기 등)을 고려하여, 수목의 잎면적 1 m²당 연간 총 CO₂ 흡수량을 추정한 수치이다. 즉, 광합성에 의해 흡수되는 연간 CO₂ 양 3.5 kg/m²에서 수목의 호흡작용으로 다시 외부로 방출되는 0.9 kg/m²를 차감하여 연간 순 흡수량(net absorption)을 2.6 kg/m²로 산정한 것이다.

앞서 언급한 바와 같이, 2025년 3월 경북지역에서 발생한 대규모 산불로 인한 CO₂의 배출량은 약 3.13 Mt으로 추정되었다. 본 연구에서는 삼림을 구성하는 여러 가지 수목 중 직경 30 cm 수목을 대표 수종으로 단순화하여 계산하였다. 기존 문헌에 따르면, 수종 및 수목의 높이를 고려할 때 직경 30 cm 수목 1그루의 총 잎면적은 44 m²로 보고되었다(Japan Pollution Health Damage Compensation Prevention Association, 1995). 이에 따라, 산불로 인해 배출된 CO₂는 직경 30 cm 수목 몇 그루가 1년간 흡수하는 CO₂ 양($A_{CO_2/tree}$)에 해당하는지를 다음 식으로 산출할 수 있다.

$$A_{CO_2/tree} = \frac{G_E \cdot CO_2(\text{kg})}{2.6 \text{ kg m}^{-2} \text{ year}^{-1} \cdot 44 \text{ m}^2}$$

산출 결과, 2025년 3월 경북지역에서 발생한 대규모

모 산불로 인해 배출된 CO₂의 양은 직경 약 30 cm의 수목 약 2.7×10^7 그루가 1년 동안 흡수하는 양에 해당하는 것으로 추정되었다. 예를 들어, 직경 30 cm까지 성장하는 데 약 20년이 소요되는 고로쇠나무(학명: *Acer mono*) (Naver Blog, 2025)의 성장 특성을 고려할 때, 대규모 산불은 단일 사건임에도 불구하고, 단기간에 막대한 생태 자원의 유실과 그로 인한 지구환경에 부정적 영향을 초래함을 단적으로 보여준다.

5. 결 론

산림화재는 전 세계적으로 빈번하게 발생하고 있으며, 특히 최근에는 대규모화 및 장기화되는 경향이 뚜렷해지면서 대재앙에 가까운 자연환경 손실로 이어지고 있다. 또한, 대규모 산림화재는 건강 위해성 가스과 에어로졸 입자를 대기 중에 대량으로 방출하여 건강에 위협을 가할 뿐만 아니라, 탄소 배출 저감 노력에도 부정적인 영향을 미친다.

본 연구에서는 2025년 3월 경북지역에서 발생한 대규모 산불이 주변 지역 대기질에 미친 영향을 평가하고, 산림 연소로 인한 주요 온실가스(CO₂, CH₄)의 이론적 배출량을 산출하였다. 산불이 진행된 기간 동안 안동시의 평균 PM_{2.5} 농도는 119.05 µg/m³로 인근 지역 중 가장 높은 수치를 보였으며, 의성군 80.06 µg/m³, 청송군 54.89 µg/m³, 예천군 47.84 µg/m³, 영양군 47.47 µg/m³로 모두 일평균 대기환경기준을 초과하였다. 또한, 경북지역 산불은 수백 km 떨어진 서산지역에도 영향을 미쳐 PM₁₀의 원소농도가 증가하였는데, 이 중 Ca는 88.77%, 건강 위해성이 높은 Pb는 14.05% 증가하였다. 산불의 영향은 일본 서해안 지역에도 미쳤으며, 이시카와와 시마네현의 PM_{2.5} 농도가 각각 20.83%와 5.75% 증가한 것으로 나타났다. 온실가스 배출량 분석 결과, CO는 약 0.22 Mt, CO₂는 약 3.13 Mt, CH₄는 약 0.015 Mt이 배출된 것으로 산정되었다. 이 중 CO₂ 약 3.126 Mt은 직경 약 30 cm의 수목 2.7×10^7 그루가 1년간 흡수하는 양에 해당하며, 이는 산불

이 단기간에 막대한 양의 탄소를 대기로 방출한다는 사실을 보여준다. 단, 보다 정확한 수목에 의한 연간 CO₂ 흡수량 산출을 위해서는, 실제 산불 피해지역의 주요 수종을 고려한 흡수계수를 사용해야 한다는 점이 향후 과제로 남는다.

산불은 일단 발생하면 단시간 내에 확산되어 진화가 어렵고, 광역적 규모로 번질 경우 인명 피해와 주택 및 재산 손실을 초래할 수 있다. 뿐만 아니라 삼림자원이 대량으로 소실되고, 대기 중으로 다량 배출된 입상 및 가스상 물질은 지구환경에 심각한 악영향을 미치며, 이를 복원하기 위해서는 많은 예산과 오랜 시간이 소요된다. 따라서 평상시 산불 예방을 위한 인식 제고 캠페인 강화와 함께, 보다 정교하고 효율적인 산불 감시 및 조기 대응 시스템 구축이 시급히 요구된다.

감사의 글

이 논문은 2025년도 원광보건대학교 교내연구비 지원에 의해서 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

The data from NASA Worldview/Reuters, Kweather (<https://www.kweather.co.kr>), the Global Wildfire Information System (GWIS) (<https://gwis.jrc.ec.europa.eu/>), the Japan Meteorological Agency (<https://www.data.jma.go.jp/env/kosa/fcst/>), and AirKorea (<https://www.airkorea.or.kr/web/>) provided important references for the data discussion and were highly helpful for data interpretation in this study.

References

- Abatzoglou, J.T., Williams, A.P. (2016) Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(42), 11770-11775. <https://doi.org/10.1073/pnas.1607171113>
- Adame, J.A., Lope, L., Hidalgo, P.J., Sorribas, M., Gutiérrez-Álvarez, I., Águila, A.D., Saiz-Lopez, A., Yela, M. (2018) Study of

- the exceptional meteorological conditions, trace gases and particulate matter measured during the 2017 forest fire in Doñana Natural Park, Spain, *Science of The Total Environment*, 645, 710-720. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.181>
- AirKorea (2025) National air quality information platform. <https://www.airkorea.or.kr/web/> (accessed on April 3, 2025).
- Akagi, S.K., Yokelson, R.J., Wiedinmyer, C., Alvarado, M.J., Reid, J.S., Karl, K., Crounse, J.D., Wennberg, P.O. (2011) Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 4039-4072. <https://doi.org/10.5194/acp-11-4039-2011>
- Alexeeff, S.E., Van Den Eeden, S.K., Deosaransingh, K., Sidney, S., Liao, N.S., Rana, J.S. (2025) Wildfire air pollution and rates of cardiovascular events and mortality in Northern California in 2018, *Journal of the American Heart Association*, 14(4), e036264. <https://www.ahajournals.org/doi/abs/10.1161/JAHA.124.036264>
- Bela, M.M., Kille, N., McKeen, S.A., Romero-Alvarez, J., Ahmadov, R., James, E., Pereira, G., Schmidt, C., Pierce, R.B., O'Neill, S.M., Zhang, X., Kondragunta, S., Wiedinmyer, C., Volkamer, R. (2022) Quantifying carbon monoxide emissions on the scale of large wildfires, *Geophysical Research Letters*, 49(3), e2021GL095831. <https://doi.org/10.1029/2021gl095831>
- Cascio, W.E. (2018) Wildland fire smoke and human health, *Science of The Total Environment*, 624, 586-595. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.086>
- Global Wildfire Information System (GWIS) (2025) Current situation viewer. https://gwis.jrc.ec.europa.eu/apps/gwis_current_situation/index.html (accessed on April 3, 2025).
- Gooddo (2022) What are forest fires? Explaining the relationship with global warming and causes of occurrence. https://gooddo.jp/magazine/climate-change/forest_fire/ (accessed on April 3, 2025).
- Guo, L., Ma, Y., Tigabu, M., Guo, X., Zheng, W., Guo, F. (2020) Emission of atmospheric pollutants during forest fire in boreal region of China, *Environmental Pollution*, 264, 114709. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114709>
- IQAir (2025) The Hidden Dangers of Wildfire Smoke in Urban Areas, Jan 18, 2025. https://www.iqair.com/jp/newsroom/hidden-dangers-of-urban-wildfire-smoke?%20srsltid=AfmBOopPfCuGCBoIAe-4fHws_bVsZ-EAFzguC30ust9liF0HhKyH6c3a (accessed on April 3, 2025).
- Japan Industrial Association of Gas and Kerosene Appliances (JGKA) (2025) Prevention of carbon monoxide poisoning. https://www.jgka.or.jp/gasusekiyu_riyou/anzen/co/index.html (accessed on April 3, 2025).
- Japan Meteorological Agency (JMA) (2025) Yellow Dust Information, <https://www.data.jma.go.jp/env/kosa/fcst/> (accessed on April 3, 2025).
- Japanese Fire Department Research Institute (1992) Fire department research materials. https://www.isad.or.jp/pdf/information_provision/information_provision/no29/8p.pdf (accessed on April 3, 2025).
- Japanese Pollution Health Damage Compensation Prevention Association (1995) Air purification manual of trees. https://www.pref.wakayama.lg.jp/prefg/032000/gakusyuu/program/tyugakko_d/fil/tyupro1-5.pdf (accessed on April 3, 2025).
- Jeong, M.S., Kim, J.H. (2025) Lack of forest roads, neglected trees... worst wildfire reveals critical gaps. *Hankook Ilbo*. March 31, 2025. <https://www.hankookilbo.com/News/Read/A2025033016510003375> (accessed on April 3, 2025).
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2025) Yellow dust observation values. <https://www.weather.go.kr/w/dust/dust-obs/values.do> (accessed on April 3, 2025).
- Kweather (2025) Weather & Air Bigdata Platform. https://www.kweather.co.kr/sub/airdata_n.php (accessed on April 3, 2025).
- Lee, M.W., Lee, S.Y., Lee, J.H. (2012) Study of the characteristics of forest fire based on statistics of forest fire in Korea, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 12(5), 185-192.
- Local Government tvU (2022) A carbon neutrality support center responding to climate change opens in north Gyeong-sang province, July 07, 2022. <https://www.thevoiceofus.co.kr/news/article.html?no=10453> (accessed on April 3, 2025).
- NASA Worldview/Reuters (2025) A satellite image showing smoke from fires burning in South Korea's Uiseong county. <https://www.theguardian.com/world/2025/mar/27/south-korea-fires-death-toll-rises-worst-in-history> (accessed on April 3, 2025).
- Navarro, K.M., Cisneros, R., O'Neill, S.M., Schweizer, D., Larkin, N.K., Balmes, J.R. (2016) Air quality impacts and intake fraction of PM_{2.5} during the 2013 Rim Megafire, *Environmental Science & Technology*, 50(21), 11965-11973. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02252>
- Naver blog (2025) Growth process of the gorosoe tree. <https://blog.naver.com/along10384/223731318615> (accessed on April 3, 2025).
- Rappold, A.G., Reyes, J., Pouliot, G., Cascio, W.E., Diaz-Sanchez, D. (2017) Community vulnerability to health impacts of wildland fire smoke exposure, *Environmental Science & Technology*, 51(12), 6674-6682. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02252>

- 1021/acc.est.6b06200
- Reid, J.S., Hobbs, P.V., Ferek, R.J., Blake, D.R., Martins, J.V., Dunlap, M.R., Liousse, C. (1998) Physical, chemical, and optical properties of regional hazes dominated by smoke in Brazil, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 103(D24), 32059-32080. <https://doi.org/10.1029/98JD01214>
- Senande-Rivera, M., Insua-Costa, D., Miguez-Macho, G. (2025) Climate change aggravated wildfire behavior in the Iberian Peninsula in recent years, *npj Climate and Atmospheric Science*, 8(19), 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41612-025-00906-3>
- Son, Y.M., Kim, L.H., Lee, K.H., Pyo, J.G., Kim, S.W., Hwang, J.S., Lee, S.J. (2014) Carbon emission factors and biomass allometric equations by species in Korea National Institute of Forest Science. <https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=TRKO201500013796&dbt=TRKO&rn> (accessed on April 3, 2025).
- Sparks, T.L., Wagner, J. (2021) Composition of particulate matter during a wildfire smoke episode in an urban area, *Aerosol Science and Technology*, 55(6), 734-747. <https://doi.org/10.1080/02786826.2021.1895429>
- The Japanese Economic Daily (2015) Wildfire Smoke Pollution Expanding Globally, Causing 340,000 Deaths Annually, November 14, 2015. <https://www.nikkei.com/article/DGXMZO93772630Z01C15A1000000/>
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (1995) *Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume I: Stationary Point and Area Sources, AP-42, Fifth Edition.*
- van Wees, D., van der Werf, G.R., Randerson, J.T., Rogers, B.M., Chen, Y., Veraverbeke, S., Giglio, L., Morton, D.C. (2022) Global biomass burning fuel consumption and emissions at 500 m spatial resolution based on the Global Fire Emissions Database (GFED), *Geoscientific Model Development*, 15, 8411-8437. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-8411-2022>
- Yue, X.L., Gao, Q.X. (2018) Contributions of natural systems and human activity to greenhouse gas emissions, *Advance in Climate Change Research*, 9(4), 243-252. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2018.12.003>

Authors Information

- 마창진 (일본 후쿠오카여자대학교 환경과학과 교수)
(ma@fwu.ac.jp)
- 강공언 (원광보건대학교 보건의료행정과 교수)
(gukang@wu.ac.kr)