

## 지상 및 이동 관측 기반 도시규모 온실가스 순배출량 산정

곽경환<sup>1</sup>, 김연욱<sup>2</sup>, 김수연<sup>1</sup>, 최동원<sup>3</sup>, 고원석<sup>1</sup>, 김용찬<sup>1</sup>,  
최민서<sup>3</sup>, 전예지<sup>1</sup>, 박찬호<sup>4</sup>, 이현서<sup>4</sup>, 김재철<sup>5</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 환경학과

<sup>2</sup>강원대학교 환경의생명융합학과

<sup>3</sup>강원대학교 미세먼지통합관리학과

<sup>4</sup>강원대학교 환경융합학부

<sup>5</sup>주식회사 에어텍

이산화탄소 등 온실가스의 순배출량은 전 세계적으로 탄소중립 목표를 달성하는 데 중요한 지표가 된다. 현재까지 온실가스 배출량은 주로 통계적인 방법으로 추정하는데, 이는 상대적으로 시간과 노력이 많이 드는 편이다. 최근 몇몇 연구에서 온실가스 배출량과 흡수량을 거의 실시간으로 추정하기 위한 관측 기반 방법론(즉, 하향식 산정)을 시도하고 있다. 이러한 관측 기반 산정 방법은 공간 해상도가 충분하지 않거나 또는 충분히 넓은 범위를 포함하지 못한다는 한계가 있다. 따라서 본 연구는 전통적인 에디공분산 방법과 더불어 플렉스 기울기 방법을 이용한 도시 규모의 온실가스 순배출량을 산정하기 위한 방법을 개발하고자 한다. 대표적인 분지 지형인 춘천 지역은 지리적으로 연직 수송량에 비해 해발고도 300 m 이하에서 수평 수송량이 작다는 조건을 갖추고 있다. 이에 따라 도심의 특성과 상층 배경의 특성을 모니터링할 수 있는 CO<sub>2</sub> 측정 장비를 각각 설치하여 운영하고 있다. 이와 함께 춘천 하부 대기의 특성을 파악하기 위한 드론 연직 프로파일 관측을 꾸준히 수행하고 있다. 도심과 상층 간 두 지점의 농도 차이, 시간에 따라 변화하는 농도 프로파일, 난류 확산 특성을 나타내는 풍향과 풍속 프로파일 등 관측 자료를 활용하여 도시규모의 온실가스 순배출량을 산정하기 위한 방법론을 다각적으로 검토하였다. 이를 기반으로 춘천 지역의 도시 규모 CO<sub>2</sub> 순배출량을 산정하고 통계적 방법에 의한 CO<sub>2</sub> 배출량과 비교하였다. 아직 정확도를 높이기 위한 추가 연구가 필요함에도 불구하고 입체 관측을 통한 대표성을 가진 순배출량 산정의 가능성을 확인하였다.

Key words: 온실가스, 이산화탄소, 도시 규모, 관측 기반, 순배출량

※ 본 연구는 “한국환경산업기술원(KEITI)의 관측기반 온실가스 배출 공간정보 지도 개발사업(환경부)(RS-2023-00232066)”의 지원을 받아 수행되었습니다.

# WRF-CMAQ을 이용한 강원 영서 및 영동 지역 초미세먼지 기여도 분석

최동원<sup>1</sup>, 김태희<sup>1</sup>, 곽경환<sup>2</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 미세먼지통합관리학과

<sup>2</sup>강원대학교 환경학과

초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)는 자동차, 공장 등 산업활동으로 인해 배출된 대기오염물질이 대기 중에서 광화학 반응 등 화학 반응으로 인하여 생성되며 호흡기 질환 등 심각한 피해를 주고 있다. 세계보건기구(World Health Organization, WHO)에서는 2013년부터 PM<sub>2.5</sub>를 1급 발암물질로 지정하였으며, 이후로 국내에서는 지속적인 관심을 갖고 연구를 진행하고 있다. 하지만 강원특별자치도는 국내에서 청정지역이라는 인식이 있어 타 도시에 비해 연구가 미흡한 반면, 수도권 연평균 PM<sub>2.5</sub> 농도 수준에 비해 비슷하거나 더 높은 수준이다. 이러한 이유로 환경부에서는 강원특별자치도 내 PM<sub>2.5</sub> 발생 원인을 밝히고자 노력하고 있으며 이에 대한 적합한 대기질관리정책을 마련하고자 노력하고 있다. 강원특별자치도는 태백산맥을 기준으로 강원 영서 지역과 강원 영동 지역으로 나누어지며, 각각 배출 특성이 다르므로 이를 구분하여 분석해야 한다. 따라서 본 연구에서는 WRF-CMAQ의 BFM을 활용하여 강원 영서 지역과 강원 영동 지역을 대상으로 지역 및 대기오염물질별 배출 기여도를 분석한 후 강원특별자치도에서 발생하는 PM<sub>2.5</sub> 원인을 파악하고자 한다. 연구 기간은 2023년 2월이며, 연구 지역은 강원 영서 지역에 해당하는 춘천시, 홍천군, 원주시와 강원 영동 지역에 해당하는 속초시, 강릉시, 동해시, 삼척시이다. 본 연구에서 사용한 모델은 WRF(Weather Research and Forecasting) v3.6과 CMAQ(Community Multiscale Air Quality Model) v5.3.2이다. 수도권, 강원 영서 지역, 강원 영동 지역의 배출 기여도는 각 지역의 모든 대기오염물질 배출량을 100% 삭감하는 방법으로 산정하였다. 강원 영서 지역과 강원 영동 지역의 SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, VOCs, PM<sub>10</sub> 배출량을 100% 삭감하여 오염물질별 기여도를 분석하였다. 춘천시, 홍천군, 원주시 PM<sub>2.5</sub>에 대한 평균 배출기여도는 수도권 20.1%, 강원 영서 지역 19.0%, 그 외 지역 61.3%로 나타났다. 속초시, 강릉시, 동해시, 삼척시 PM<sub>2.5</sub>에 대한 평균 배출기여도는 수도권 9.8%, 강원 영서 지역 6.4%, 강원 영동 지역 9.7%, 그 외 지역 73.1%로 나타났다. 강원 지역 내 대기오염물질별 배출량에 따른 강원 지역 PM<sub>2.5</sub> 기여도를 분석한 결과, 강원 영서 지역과 강원 영동 지역에서 배출되는 NH<sub>3</sub>가 다른 물질에 비해 높았다. 본 연구는 이와 같은 결과가 지역 맞춤형 대기질관리정책을 수립하는 데 기초자료로 사용될 것으로 기대하고 있다

Key words: WRF-CMAQ, BFM, 초미세먼지, 강원특별자치도

※ 본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 미세먼지관리 특성화대학원 사업과 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원(NIER-2021-03-03-007)을 받아 수행하였으며 배출량 자료를 제공해주신 아주대학교 김순태 교수님께 감사드립니다.

## 서울 지하철 지하역사 내 PM<sub>2.5</sub> 농도 특성 및 주요 영향 요인

오혜련<sup>1</sup>, 박두선<sup>1,2,3</sup>, 고혜영<sup>2</sup>, 서지훈<sup>4</sup>, 이민석<sup>3,5</sup>, 최우석<sup>6</sup>

<sup>1</sup>경북대학교 지구과학교육과

<sup>2</sup>경북대학교 대기원격탐사연구소

<sup>3</sup>경북대학교 대기과학과 위험기상 교육연구팀

<sup>4</sup>한국과학기술연구원 기후·환경연구소

<sup>5</sup>서울대학교 기후테크센터

<sup>6</sup>세종대학교 인공지능데이터사이언스학과

UN 보고서에 따르면 2050년에 전 세계 인구의 2/3 이상이 도시에 거주할 것으로 예측되며, 이에 따라 도시 지역의 주요한 교통수단 중 하나인 지하철 관련 시설에서의 대기질 관리의 중요성 역시 커질 것으로 예상 된다. 서울의 경우, 지하철은 2016년 기준 하루 평균 약 740만 명의 승객을 수송하였으며 이는 전체 대중교통 이용의 38.9%를 차지했다. 따라서 우리나라는 다중이용시설인 지하철의 대기질 개선을 위해 “지하역사 공기질 개선 대책”을 3차례 시행했으며, 현재 2023년부터 2027년까지 4차 계획을 시행 중이다. 이 연구에서는 서울 지하철 지하역사의 전반적인 PM<sub>2.5</sub> (직경 2.5 μm 이하의 입자상 물질) 특성을 살펴보기 위해 2021년 4월부터 2023년 3월까지 1호선부터 8호선까지 총 247개 지하역사에서 관측된 PM<sub>2.5</sub> 농도를 분석하였다. 그 결과, 전체 역사의 약 3분의 1에 해당하는 85개의 지하역사에서 PM<sub>2.5</sub> 농도가 실외 공기질 기준인 35 μg/m<sup>3</sup> 를 초과하였다. 또한, 30개 지하역사(전체 역사의 약 12%)에서는 PM<sub>2.5</sub> 농도가 지하역사의 PM<sub>2.5</sub> 권장 유지 기준인 50 μg/m<sup>3</sup> 를 초과했다. 지하역사의 PM<sub>2.5</sub> 농도는 내부 요인과 외부 요인 모두에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다. 내부 요인(예: 지하 깊이, 승객 수, 운행 빈도)의 경우, 다양한 내부 요인이 복합적으로 작용하는 가운데 지하철 운행 빈도가 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화에 주요한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 한편, 외부 요인 측면에서는 각 지하역사와 가장 가까운 실외 관측소의 일평균 PM<sub>2.5</sub> 농도와 지하역사 PM<sub>2.5</sub> 농도 간에 양의 상관관계가 있으나 역사별로 편차가 크게 나타났다. 이는 지하역사의 대기질 개선을 위해, 오염도가 높은 역에서는 지하역사 자체의 배출 저감에 더 집중해야 하며, 상대적으로 덜 오염된 역사에서는 실외 대기질 개선이 필요함을 시사한다. 이 연구는 향후 지하역사의 효과적인 PM<sub>2.5</sub> 대기질 관리를 위한 정책 수립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

Key words: 실내 대기질, 서울, 지하철, PM<sub>2.5</sub>

※ 이 연구는 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2022R1I1A1A01070675), 환경부의 재원으로 수행된 「한국환경산업기술원의 관측기반 온실가스 공간정보지도 구축 기술개발사업(RS-2023-00232066)」, 기상청의 재원으로 수행된 「기후 및 기후변화 감시·예측정보 응용 기술개발사업(RS-2022-KM221312)」, 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구실사업(RS-2023-00207866)으로 수행되었습니다.

## Interpretation of spatiotemporal inputs in a vision transformer-based PM<sub>2.5</sub> estimation model for Seoul, Korea

박인규<sup>1</sup>, 허창희<sup>1,2</sup>, 오혜련<sup>3</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 지구환경과학부

<sup>2</sup>이화여자대학교 기후시스템공학과

<sup>3</sup>경북대학교 지구과학교육과

설명 가능한 인공지능(XAI) 방법이 신경망 모델의 의사결정 과정을 이해하기 위한 목적으로 여러 분야에서 사용되고 있다. 다만, 대기질 연구에서는 XAI 기법이 아직 활발히 적용되지 못한 상황이며, 더군다나 시공간 자료의 시각적 해석은 거의 다루어지지 않았다. 이 연구에서는 서울의 일 PM<sub>2.5</sub> 농도를 추정하는 vision transformer 모델에 다양한 XAI 기법을 적용해서 입력자료의 중요도를 시각적으로 해석하였다. 입력자료는 2008-2022년 겨울철 ERA5과 MERRA-2 재분석 자료이며, 6 시간 간격 지위고도, 풍속, 온도, 습도, PM<sub>2.5</sub> 농도, 에어로졸 광학 깊이(AOD)가 포함된다. 테스트 기간인 2018-2022년에 모델은 평균 편향 오차  $-0.2 \mu\text{g m}^{-3}$ , 평균 제곱근 오차  $8.16 \mu\text{g m}^{-3}$ , 상관계수 0.86의 성능을 나타냈다. 고농도 PM<sub>2.5</sub> ( $> 35 \mu\text{g m}^{-3}$ )에 대해서는 70.4%의 감지 확률과 21.4%의 오경보율을 나타냈다.

XAI 기법으로 Integrated gradient, occlusion, local interpretable model-agnostic explanation, Shapley additive explanation을 사용했다. 입력자료의 중요도 분석 결과, 대체로 한반도 주변에서 강한 시그널이 감지되었으며, 이 강도는 입력 시간에 따라 달라졌다. 고농도 사례에서는 풍속과 PM<sub>2.5</sub> 농도의 기여도가 컸지만, 지위고도, 습도, AOD의 기여도는 상대적으로 작았다. 저농도 사례에서는 고농도 사례와 전반적으로 반대로 나타났다. 그러나 사용한 XAI 방법에 따라 입력자료의 중요도가 달라서, 각 결과의 신뢰성을 정량적으로 검증하기 위해 deletion과 insertion 방법을 사용했다. 이 연구에서 도입한 신경망 모델의 시각화는 모델이 어떤 입력변수의 영향을 받아서 의사결정을 하는지 직관적으로 이해할 수 있으므로 모델 결과의 신뢰성 향상에 기여할 것으로 생각한다.

Key words: 대기질, PM<sub>2.5</sub>, Vision transformer (ViT), 설명 가능한 인공지능 (XAI)

※ 이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1A2B5B02001484).

## Using a Smog Chamber to Investigate Secondary Brown Carbon Formation during Photooxidation of Furanoids from Biomass Burning

Taekyu Joo<sup>1,2</sup>, Jo E. Machesky<sup>3</sup>, Linghan Zeng<sup>2</sup>, Tori Hass-Mitchell<sup>3</sup>,  
Rodney J. Weber<sup>2</sup>, Drew R. Gentner<sup>3</sup>, Nga Lee Ng<sup>2,4,5</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, Korea University

<sup>2</sup>School of Earth and Atmospheric Sciences, Georgia Institute of Technology

<sup>3</sup>Department of Chemical and Environmental Engineering, Yale University

<sup>4</sup>School of Chemical and Biomolecular Engineering, Georgia Institute of Technology

<sup>5</sup>School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology

Biomass burning is an important source of both primary and secondary organic aerosol (SOA), and recent studies demonstrate the importance of nontraditional volatile organic compounds, such as furanoids, as precursors of SOA formation. Here, we investigate SOA and brown carbon (BrC) formation from photooxidation of furfural, 2-methylfuran, and 3-methylfuran, which are the major furanoid species emitted from biomass burning. Experiments were performed in the Georgia Tech Environmental Chamber facility under two humidity conditions (RH < 5% & 50–60%) with (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> seeds in the presence of NO<sub>x</sub>. Dry furfural photooxidation showed the greatest BrC formation with more abundant reduced nitrogen-containing compounds (NOCs) in SOA. The NOCs were dominated by amines and amides generated from the reactions between carbonyls and ammonia/ammonium. Based on the identified products, we further proposed novel NOCs formation mechanisms that can contribute to BrC during photochemical aging of ambient biomass burning plumes.

Key words: Biomass burning, Brown Carbon, Climate Change, Secondary Organic Aerosol, Nitrogen-containing Compounds

## 다중규모 수치 모의를 이용한 도심 녹화의 폭염 완화 효과 분석

고원석<sup>1</sup>, 김연옥<sup>2</sup>,곽경환<sup>1</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 환경학과

<sup>2</sup>강원대학교 환경의생명융합학과

전 세계적으로 폭염 발생 일수가 증가하고 있으며 대한민국 또한 폭염 피해가 늘어나는 추세이다. 도심지역의 인공구조물 증가, 녹지 감소와 같은 토지피복 비율의 변화는 폭염을 강화시키는 원인으로 알려져 있다. 폭염을 완화시키기 위해 가로수, 지붕녹화와 같은 녹지를 조성하는 도심 녹화 사업을 추진하고 있다. 녹화에 의한 폭염 완화 효과는 수치 모의를 이용하여 사전에 분석될 수 있으며, 이러한 결과를 기반으로 효율적인 도심 녹화 계획을 수립할 수 있다. 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 모델은 도심지역의 복잡한 건물 구조를 반영하여 열 환경을 파악하는 데 사용되고 있다. 본 연구에서는 도로 협곡, 도심공원에 조성된 도심 녹화에 의한 폭염 완화 정도를 증산 냉각 효과와 공기역학적 효과 측면에서 종합적으로 평가할 것이다. 연구 대상 지역은 서울특별시 세종대로의 광화문 광장 일대이며, 연구 대상 일시는 2019년 8월 5일 00시부터 6일 23시까지이다. 수치 모델인 CFD(Computational Fluid Dynamcis) 모델을 활용하였으며, CFD 모델에 입력된 풍속, 풍향, 온도의 초기 및 경계조건은 WRF(Weather Research and Forecasting) 모델 모의 값을 이용했다. 녹화 유형을 수목(가로수, 도심공원 수목), 지붕 녹화로 나뉘고 대상 지역 수목의 LAI 측정을 통해 식생의 냉각 효과와 공기역학적 효과를 계산하여 CFD 모델에 적용하였다. 시나리오는 국토지리정보원과 환경공간정보 서비스에서 제공하는 식생, 지형, 지물 등을 반영하여 작성한 BASE, 수목을 식재하지 않은 No-Tree, BASE 시나리오에 지붕 녹화를 추가한 Green-Roof, BASE 시나리오와 가로수의 수는 같지만 가로수를 뺄뺄하게 재배치한 Dense-Tree 네 가지로 구분하였다. 도심공원은 여유 공간이 충분하기 때문에 높은 LAI의 수목을 뺄뺄하게 식재할 수 있어 폭염 완화 효과가 높게 나타났다. 도로 협곡과 도심공원 인근 건물에 조성된 지붕 녹화의 증산냉각력은 같았지만 도심공원 근처 건물에 조성하였을 때 가장 효과적이었다. 또한 도로 협곡에는 가로수의 수가 제한적일 수밖에 없었다. 이러한 제한적인 공간에서는 가로수를 뺄뺄하게 식재하는 것이 가장 효율적인 식재 방법임을 확인하였다. 본 연구에서는 도심 환경과 도심 녹화를 종합적으로 고려하여 폭염 완화 정도를 정량적으로 제시하였다. 이러한 결과는 효과적인 도심 녹화 계획을 수립하기 위한 기초자료가 될 것으로 기대된다.

Key words: 도시 녹화, 폭염 완화, 도로 협곡, 도심공원, 도시 녹화, 시나리오 연구

※ 이 성과는 정부(환경부)의 재원으로 한국환경산업기술원의 미세먼지관리 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.