

## 기후 분과 / 기후 3-1

남한 지역 CH<sub>4</sub> 배출량 Mass Balance 역모델링 정확도 평가문정혁<sup>1</sup>, 정수종<sup>2</sup><sup>1</sup>서울대학교 환경계획연구소<sup>2</sup>서울대학교 환경대학원

CH<sub>4</sub>는 기후변화를 유발하는 주요 온실가스로, CO<sub>2</sub> 대비 높은 Global Warming Potential (GWP)을 지니고 있어 배출량 감축 시 온실 효과 저감에 기여할 잠재력이 크다. 대기 중 CH<sub>4</sub> 농도 저감을 위해서는 정확한 배출원 파악이 필수적이며, 이를 위한 배출량 산정 방법은 크게 bottom-up과 top-down 방식으로 구분된다. Bottom-up 방식은 배출원을 직접 조사하는 방식으로 배출원별 세부 정보를 산출할 수 있으나, 배출원 누락으로 인한 불확실성이 존재한다. 이러한 한계를 보완하기 위해 최근에는 관측 자료를 이용한 top-down 방식의 역모델링이 활용되고 있으며, 그중 Mass Balance 기법은 낮은 계산 비용과 높은 효율성을 바탕으로 다양한 배출량 추정 연구에 널리 활용되고 있다. 그러나 기존의 CH<sub>4</sub>에 대한 Mass Balance 연구는 관측 기반의 연구에 집중되어 있으며, Chemical Transport Model (CTM)을 활용한 연구는 상대적으로 부족하다. 따라서, CTM 기반 Mass Balance 역모델링을 수행하기 위해서는 방법론의 정확도를 검증하는 과정이 선행되어야 한다. 특히 역모델링 결과는 배경 농도, 기상 조건, 관측 자료의 정확도 등 여러 요인의 영향을 받기 때문에, 실제 관측 자료를 활용한 연구로는 방법론을 정확히 검증하는 데 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 CTM 기반의 가상 실험을 구성하여, 국내 CH<sub>4</sub> 배출량 보정을 위한 Mass Balance 역모델링 기법의 정확도를 정량적으로 평가하고자 하였다. 이를 위해 TROPOMI XCH<sub>4</sub> 자료로 가상의 관측 자료를 생성하였고, CTM으로 CMAQ 모델을 활용하였다. 생성된 관측 자료와 CMAQ 모의 결과를 비교하여 Mass Balance 역모델링을 수행하였다. 그 결과, Mass Balance 역모델링 과정에서 관측과 모델의 단순 농도 비율을 이용한 보정보다 enhancement 비율을 활용했을 때 배출량 추정 오차를 효과적으로 줄일 수 있었으며, 이 과정에서 정확한 배경 농도 산정의 중요성이 확인되었다. 추가적으로, 역모델링 정확도는 기상 조건, 관측 자료의 해상도 및 정확도에 의존함을 정량적으로 평가하였다. 본 연구의 결과는 국내를 대상으로 CH<sub>4</sub> Mass Balance 역모델링의 적용 가능성을 검증하였으며, 향후 실제 관측 자료를 활용한 CH<sub>4</sub> 배출량 추정 연구의 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords:** CH<sub>4</sub>, 역모델링, 배출량 추정, CMAQ, TROPOMI XCH<sub>4</sub>

※ 본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 관측기반 온실가스 공간정보지도 구축 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다. (RS-2023-00232066)

기후 분과 / 기후 3-2

# 다중 위성 관측 자료와 인공지능 기법을 활용한 전 지구 이산화탄소 농도 추정

이종혁<sup>1</sup>, 정수중<sup>1,2</sup>, 김영준<sup>3</sup>, 노순아<sup>4</sup>, 김지연<sup>4</sup>, 진형아<sup>4</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 환경계획연구소

<sup>2</sup>서울대학교 환경대학원

<sup>3</sup>한국수자원공사

<sup>4</sup>국립환경과학원

효과적으로 기후변화에 대응하기 위해서는 기후변화에 큰 영향을 미치는 이산화탄소 농도의 정확한 모니터링이 필수적이다. 현재 운용 중인 이산화탄소 관측 위성은 정확한 농도 측정이 가능하지만, 관측 범위가 매우 좁고, 구름에 의한 관측 간섭 등의 한계로 인하여 활용할 수 있는 자료의 시·공간적 공백이 발생하는 한계가 있다.

본 연구에서는 이러한 관측 공백의 한계를 극복하고자, 다중 위성 관측 자료와 인공지능 기법을 활용하여 전 지구 이산화탄소 농도를 추정하는 새로운 접근법을 제안하였다. 특히, Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) 위성에서 측정하는 이산화탄소 농도의 높은 정확성과, 넓은 관측 범위를 갖는 Sentinel-5 Precursor (Sentinel-5P) 위성에서 측정하는 대기오염물질(이산화질소, 일산화탄소) 농도 정보를 인공지능 기술로 융합하여 두 위성의 장점을 극대화하는 시너지 효과를 구현한 것이 본 접근법의 핵심이다. 인공지능 모델을 구축하여 2018년 5월부터 2023년 12월까지 0.25도 해상도의 전 지구 일별 이산화탄소 농도 자료를 재구성하였으며, Total Carbon Column Observing Network (TCCON) 지상 관측 자료를 활용한 검증 결과 약 95%에 달하는 높은 정확도를 나타냈다. CarbonTracker 및 Copernicus Atmospheric Monitoring Service (CAMS) 모델 자료 및 OCO-2/3, Greenhouse gases Observing SATellite (GOSAT) 위성 자료와도 높은 일치도를 확인하였다.

본 연구는 다중 위성 관측과 인공지능 기술의 융합을 통해, 전 지구 이산화탄소 농도를 일 단위로 추정한 최초의 사례로서, 기존 위성이 관측하지 못하는 지역에서도 신뢰도가 높은 이산화탄소 자료 생산이 가능함을 보여준다. 이는 전 지구 탄소 순환의 이해 및 이산화탄소 모니터링 체계 강화 등에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 본 발표에서는 제안한 새로운 접근 방식에 대한 자세한 설명, 검증 결과 및 활용 가능성 등을 보다 자세히 논의할 예정이다. 해당 연구 결과는 2025년 8월 'Journal of Geophysical Research: Atmospheres' 저널에 출판되었음을 밝힌다.

**Keywords:** 다중 위성 관측, 인공지능, 관측공백 보완, 기후변화 대응

※ 본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 관측기반 온실가스 공간정보지도 구축 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다 (RS-2023-00232066)

기후 분과 / 기후 3-3

## 폭염이 건물 에너지 분야 일별 탄소 배출에 미치는 영향

장동영, 정수종

서울대학교 환경대학원

지구온난화가 심화되면서 폭염의 빈도와 강도가 지속적으로 증가하고 있다. 이는 건물의 냉방 수요 단기간 지속적으로 증가시키며, 이는 에너지 수요와 에너지 사용으로 발생하는 이산화탄소 (CO<sub>2</sub>) 배출량의 급격한 증가에 기여한다. 이같은 폭염의 증가에 대비를 위해서는 일별 온도변화에 민감하게 반응하는 에너지 수요예측과 그로 발생하는 CO<sub>2</sub>배출량 추정을 통한 대비가 필요하다. 하지만, 현재의 인벤토리의 건물의 배출량 산정은 연단위로 이뤄지며, 약 2년여 정도의 지체된 결과로, 대응하기가 어렵다. 따라서 본 연구는 한국 건물 부문의 일별온도변화를 반영한 에너지 수요와 그로 발생되는 배출량의 변화 추정이 가능한 기온-에너지-탄소(TEC) 모델을 개발하였다. TEC 모델은 머신러닝 기법을 적용하여 건물 유형(주거용, 상업·공공용)과 에너지원(화석연료, 전력)별 일별기온 민감도를 반영하였다. 분석 결과, 폭염 기간 동안 주거용 건물의 냉방 관련 CO<sub>2</sub> 배출은 2010-2020년 평균 대비 24% 이상 증가하였으며, 하루 약 2만5천 톤에 해당하는 추가 배출이 발생하였다. 상업·공공용 건물에서도 하루 약 1만 톤의 배출 증가가 확인되었다. 이 연구는 폭염이 단기적 에너지 수요 급증으로 인한 CO<sub>2</sub> 배출을 크게 증폭시켜 기후변화 악순환을 강화한다는 점을 실증적으로 제시한다. 따라서 기후변화에 따른 폭염 대응을 중심으로 한 단기 적응 전략과 장기적 탄소중립 정책을 연계하는 것은 필수적이며, 이는 에너지 안보 확보와 지속가능한 도시 계획을 뒷받침하는 핵심 기반이 될 것이다.

**Keywords:** 폭염, 건물에너지, 탄소배출량

※ 본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 관측기반 온실가스 공간정보지도 구축 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다 (RS-2023-00232066)

기후 분과 / 기후 3-4

## 기후변화로 인한 가뭄 발생에 따른 총일차생산량 변화와 외부 강제력 영향 분석

김병희, 감종훈

포항공과대학교 환경공학부

기후변화는 전 지구 물 순환과 탄소 순환에 급격한 변화를 초래하며, 특히 가뭄 현상의 빈도와 강도 증가는 육상 생태계의 생산성과 탄소 흡수 능력에 큰 위협이 된다. 기상학적 가뭄은 장기간 누적 강수량 부족으로 인해 토양 수분을 감소시키고, 이는 식생의 생리활동에 직접적인 스트레스로 작용하여 식생 성장을 저해한다. 가뭄으로 인한 토양 수분 부족은 식생의 광합성 효율에 영향을 미쳐 식생의 총 1차 생산량(Gross Primary Production, GPP)에 변화를 준다. GPP는 식생이 광합성을 통해 대기 중 이산화탄소를 흡수하는 능력의 변화를 이해할 수 있는 주요 지표이며, 이를 통해 식생 성장 저해로 인한 대기-육지의 탄소 순환 변화를 이해할 수 있다.

본 연구에서는 기후 변화로 인한 가뭄의 발생에 따른 GPP의 변화를 정량적으로 살펴보고자 한다. 이에 본 연구에서는 위성 기반 MODIS(MODerate resolution Imaging Spectroradiometer)의 GPP 산출물과 강수 재분석자료를 활용하여, 최근 수십 년간 전 세계 주요 6대륙(북미, 남미, 유럽, 아프리카, 아시아, 오세아니아)에서 식생이 활발히 성장하는 봄-여름철 가뭄 발생 시 GPP의 변화를 분석하였다. 이를 토대로 Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) 다중모델앙상블의 과거 기후 재현 실험(historical) 결과와 비교하였다. 또한, CMIP6의 개별 강제력 실험(GHG, aerosol, natural forcing)을 활용하여 대륙별 가뭄 발생 패턴과 GPP 변화에 대한 외부 강제력의 기여도를 분석하였다. 이를 통해 개별 강제력에 가뭄 및 GPP의 변화가 민감한 지역을 특정하고 대륙별 토지피복에 대한 특징을 같이 고려하여 분석하였다. 그 결과, 가뭄이 심해질수록 GPP의 민감도는 강제력과 지역의 토지피복에 따라 달라지는 것을 확인하였다. 특히, 에어로졸 강제력은 북미 대륙을 제외한 5개 대륙에서 극심한 가뭄임에도 GPP가 증가하는 결과를 보였으며, 상대적으로 목초지 영역이 우세한 아프리카와 오세아니아 지역에서 GPP 증가 경향이 큰 것이 확인되었다. 본 연구 결과는 다양한 외부 강제력이 가뭄 및 GPP의 변동성에 미치는 상대적인 영향이 대륙 간 큰 차이를 나타내는 것을 확인하였으며, 이러한 결과는 향후 기후 변화 대응 전략 수립 및 육상 생태계 관리에 중요한 과학적 근거를 제공할 것으로 기대된다.

**Keywords:** 가뭄, 대기-육지 탄소 순환, 총일차생산량, CMIP6, 외부강제력

기후 분과 / 기후 3-5

## 다중 관측 기반 서울 이산화탄소 배출량 인버스 모델링과 정책적 활용 가능성

심소정, 정수중

서울대학교 환경대학원

전 세계적인 탄소중립 달성을 위해서는 대규모 배출원인 도시에서의 정확한 이산화탄소배출량 추정이 필수적이다. 기존의 상향식 접근법은 사회·경제 활동 자료에 기반하나, 불확실성이 크고 관측값과의 불일치가 빈번하다. 이를 보완하기 위해 본 연구에서는 서울을 대상으로 지상 및 위성 관측 자료와 대기수송모형을 결합한 베이지안 인버스 모델링을 수행하였다. 우선 ODIAC 배출량 자료를 시간·공간적으로 보정하여 사전 배출량(prior)을 구축하고, 서울 내 5개 지상 관측소와 OCO-2 및 OCO-3 위성의 XCO<sub>2</sub> 자료를 활용하여 사후 배출량(posterior)을 산출하였다. 배경 농도는 지상 관측의 하위 분위값과 위성 주변 영역의 중앙값을 이용해 정의하였다. 또한 WRF-STILT와 WRF-XSTILT 모형을 통해 관측지점별 기여도를 계산하였으며, 사전 배출량 및 관측의 불확실성은 공간·시간 상관성을 고려하여 오차 공분산 행렬로 반영하였다. 2021년 12월 결과에 따르면, 인버스 모델링을 통해 배출량의 시·공간 변동성이 크게 향상되었고, 관측과의 적합도 역시 개선되어 평균 절대 오차가 12 ppm에서 7 ppm으로 감소하였다. 지상 관측만 활용할 경우 관측망 인근에서 불확실성 감소가 두드러졌으며, 위성 자료는 지상망의 사각지대를 보완하였다. 특히 OCO-3는 서울을 집중적으로 관측하여 OCO-2보다 높은 불확실성 감소 효과를 보였다. 또한 인버스 결과는 서울시 자체 인벤토리보다 높은 배출량을 제시하였으며, 이는 배출원의 누락 또는 과소 보고 가능성을 시사한다. 나아가 COVID-19 시기 전후 배출량 변화를 분석한 결과, 팬데믹 기간 동안 감소했던 지역에서 2021년에 뚜렷한 반등이 확인되었다. 본 연구는 고해상도 인버스 모델링을 통해 도시 배출량 추정의 정확도를 개선하고, 지상·위성 관측을 통합 활용하는 것이 효과적임을 보여준다. 이를 통해 탄소중립 정책 수립 및 평가에 활용 가능한 과학적 근거를 제공할 수 있으며, 향후 국가 단위로 확장 적용하여 글로벌 규모 인버스 모델링의 입력자료 개선에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords:** 이산화탄소 배출량 추정, 베이지안 인버스 모델링, 지상 및 위성 관측, 탄소중립 정책 활용

※ 본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 관측기반 온실가스 공간정보지도 구축 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다 (RS-2023-00232066).

## Opposing Amazon ecosystem responses to hemispheric stratospheric aerosol injection

Danbi Lee<sup>1,2</sup>, Hyung-Jeon Kang<sup>2</sup>, and Jong-Seong Kug<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Division of Environmental Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology

<sup>2</sup>School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

---

Stratospheric aerosol injection (SAI) has recently been suggested as a potential geoengineering measure to mitigate predicted global warming. While SAI is known to significantly affect terrestrial ecosystems, studies of its impacts on the largest tropical forest on Earth, the Amazon rainforest, remain limited. Here, we assess the responses of Amazonian vegetation and ecosystems under diverse SAI strategies using simulations with the Community Earth System Model version 2 (CESM2). Our results show that the Amazon terrestrial ecosystem exhibits opposite responses depending on the hemisphere of SAI. Northern Hemisphere (Southern Hemisphere) SAI drives a southward (northward) shift of the ITCZ, leading to increased (decreased) Amazon precipitation and thereby enhanced (reduced) vegetation growth. These opposing responses extend to the ecosystem state, with Northern Hemisphere injections reducing aridity and enhancing resilience across the Amazon. Overall, our findings highlight the high sensitivity of Amazon terrestrial ecosystems to the hemisphere of injection, which should be carefully considered in the context of future geoengineering governance.

**Keywords:** Stratospheric aerosol injection, Amazon, Terrestrial ecosystem, Earth System Model