

논문

위성관측자료 기반 동북아시아 대기 메테인(CH₄) 분포 특성 분석

Analysis of Methane (CH₄) Distribution in Northeast Asia Based on Satellite Measurement Data

구자호^{1),2)}, 이소정³⁾, 이태경¹⁾, 이동희¹⁾, 여민주¹⁾, 송환진^{2),4)}, 정수종⁵⁾, 홍재민^{5),*}

¹⁾연세대학교 대기과학과, ²⁾경북대학교 대기원격탐사연구소,

³⁾환경부 온실가스종합정보센터, ⁴⁾경북대학교 자연과학대학 천문대기과학전공,

⁵⁾서울대학교 환경대학원

접수일 2025년 8월 22일

수정일 2025년 9월 17일

채택일 2025년 9월 19일

Received 22 August 2025

Revised 17 September 2025

Accepted 19 September 2025

*Corresponding author

Tel : +82-(0)2-880-5643

E-mail : jmhong820@snu.ac.kr

Ja-Ho Koo^{1),2)}, So-Jeong Lee³⁾, Taegyung Lee¹⁾, Donghee Lee¹⁾, Min Ju Yeo¹⁾,
Hwan-Jin Song^{2),4)}, Sujong Jeong⁵⁾, Jaemin Hong^{5),*}

¹⁾Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Republic of Korea

²⁾Center for Atmospheric Remote Sensing, Kyungpook National University, Daegu, Republic of Korea

³⁾Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea, Cheongju, Republic of Korea

⁴⁾Department of Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, Daegu, Republic of Korea

⁵⁾Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea

Abstract We investigate methane distribution in Northeast Asia based on both nadir viewing Greenhouse-gases Observing SATellite (GOSAT) and limb-viewing Atmospheric Chemistry Experiment Fourier Transform Spectrometer (ACE-FTS) satellite measurements. Using climatological mean of GOSAT data, we found the latitudinal difference of methane mixing ratio: ~10 ppbv difference between South and North Korea and ~25 ppbv difference between East and Northeast China. Comparing to the methane provided from the climate modeling results of Coupled Model Intercomparison Project - phase 6 (CMIP6) during the historical period, methane from climate modeling data were lower than that from the GOSAT measurement, implying the necessity to correct methane emission in climate model. We also tried to see methane distribution in the Upper Troposphere and Lower Stratosphere (UTLS). As a result, we found that the lower latitudinal region (15 to 25°N) in Northeast Asia shows increasing methane up to ~20 km height, but higher latitudinal region (45 to 55°N) does only ~10 km height. When we estimated the correlation of methane between the surface and UTLS, we did not see any significant correlation, which is very different from the high correlation of carbon dioxide (CO₂) between the surface and UTLS. This pattern depicts that the characteristic of methane distribution is not very homogeneous in whole atmosphere, and increasing trend of methane is obvious near the surface, but not in the upper atmosphere. Our study reveals that the typical assumption for the spatial homogeneity of greenhouse gases should be carefully considered.

Key words: Methane, GOSAT, ACE-FTS, WDCGG, Northeast Asia

1. 서론

최근 전 지구 범위에서 나타나고 있는 급격한 기후 변화 양상의 가장 근원은 산업화 이후 폭증한 온실기체 배출에 의한 인위적인 온실효과가 강화된 부분이라 볼 수 있다. 이에 세계적으로 탄소중립(Carbon neu-

tralization) 또는 넷제로(net zero)라는 키워드를 중심으로 우리 사회의 온실기체 배출량을 줄이기 위해 노력하고자 여러 움직임들을 보여주고 있다(Kim *et al.*, 2025; Fankhauser *et al.*, 2022). 문제는 여전히 우리 사회에서 온실기체가 어디에서 주로 배출되고 어디에서 어떤 시공간적 특성을 보이는지에 대해 이해도가 높

지 않다는 점이다. 특히 국내에서는 미세먼지 및 관련 전구 물질의 상시 관측이 전국적으로 수백 군데 관측소에서 이루어지고 있지만(Yeo *et al.*, 2025; Lee *et al.*, 2022), 온실기체의 상시 관측망은 그에 비해 턱없이 부족한 형편이다. 온실기체는 대기 중 체류시간(residence time)이 길기 때문에 충분히 혼합될 수 있는 여지가 있으므로 반응성이 높은 대기화학 물질들에 비해 상대적으로 지역 규모에서 시공간 변동성을 크게 갖지는 않는 편이지만(Guo *et al.*, 2013), 그 배출원이 균일하지 않다는 점에서, 또 지구 시스템의 계절적인 변화에 따라 온실기체의 배출 및 소멸 현상이 달라질 수 있다는 점에서(Zhang *et al.*, 2022; Long *et al.*, 2010) 시기별, 지역별 차이가 충분히 나타날 수 있다. 이에 조밀한 관측망 구축이 시급하게 요구되는 상황인데, 그나마 이산화탄소라는 대표적인 온실기체에 대해서는 기본적인 상시 관측이 오래 수행된 편이나 또 다른 중요 온실기체인 메테인에 대해서는 그 관측 자체가 절대적으로 부족한 실정이다.

그러다보니 아직 대기 중 메테인의 시공간적 분포 특성에 대한 이해는 여전히 크게 부족한 상황이다. 전구 범위 평균 메테인의 장기 추이라는 가장 기본적인 특징조차도 이해도가 낮은 편인데, 수십 년간 증가 추이를 보이고 있는 중에 2000년대 초반 약 7~8년 정도 전 지구 평균 메테인 농도가 증가 추이를 멈추고 유독 정체되었다가(Turner *et al.*, 2019) 다시 급증하는(Nisbet *et al.*, 2019) 그 이유를 잘 설명하고 있지 못하기 때문이다. 이는 아직 메테인의 배출 및 소멸 과정에 대해 추가적인 연구가 수행될 필요성을 의미하며, 그러기 위해 메테인 관측망을 확충하고 넓히는 과정이 시급하게 요구되는 상황이다.

탄소중립 정책의 확장에 따라 최근 국내외에서 메테인의 관측 인프라를 확충하기 위한 노력이 높아지고 있는 분위기는 분명 고무적이다. 그러나 지상관측 만으로는 현재의 관측 공백을 모두 해결하기 쉽지 않은 상황이며, 특히 국가별로 제공되는 자료의 양적인 측면에 많은 차이를 보이는 것이 현실이다. 이런 점에서 위성관측을 이용한 메테인의 감시망 구축은 기존

관측 공백 지역의 한계를 극복한다는 점에서, 또 지상 관측으로 쉽게 확인하기 어려운 국지적인 고농도 사례를 포착할 수 있다는 점에서 큰 장점을 갖는다(Moon *et al.*, 2024; Kenea *et al.*, 2021). 실제로 최근에 위성관측자료를 이용하여 기존 지상관측 및 상향식 배출량 자료에서 전혀 확인하지 못하던 중국 일부 지역 광산에서의 고농도 메테인 특성을 발견한 사례가 이미 존재하는 등(Qin *et al.*, 2024) 위성 기반의 메테인 감시의 유의미성이 잘 드러나고 있다.

이러한 분위기에 발맞추어 현재 국제적으로 다양한 형태의 메테인 위성 연구 사업이 진행 및 계획 중에 있고(Duren *et al.*, 2025; Tanimoto *et al.*, 2025; Chan Miller *et al.*, 2024), 국내에서도 최근 관련 위성 계획이 추진 중에 있다(Kim *et al.*, 2024). 국내의 여러 위성 기반 메테인 연구 계획을 앞두고, 본 연구는 현 시점에서 활용할 수 있는 위성자료를 기반으로 한반도를 포함한 동북아시아 지역의 메테인이 나타내는 시공간 분포 특성을 살펴보고자 하였다. 특히 그동안 국내에서 크게 다루어지지 않은 분석을 통해 동북아시아 지역 메테인의 분포 특성을 좀 더 다각도로 살펴보고자 했다. 예컨대 일본 GOSAT (Greenhouse gases Observing SATellite) 위성에 탑재된 TANSO-FTS (Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observation - Fourier Transform Spectrometer) 센서를 통해 측정된 메테인 자료를 기후모델 결과와 비교해 보고자 하였으며 캐나다 SCISAT 위성에 탑재된 ACE-FTS (Atmospheric Chemistry Experiment - Fourier Transform Spectrometer) 센서 관측 자료가 제공하는 대류권 상층/성층권 하층(Upper troposphere and lower stratosphere, UTLS)에서의 메테인 분포 특성을 살펴보고자 했다. 이 두 위성 센서는 같은 푸리에 변환 분광계(Fourier Transform Spectrometer, FTS)이면서도 각각 수직으로 관측하는 nadir-viewing 방식 및 지구 대기를 비스듬하게 바라보며 관측하는 limb-viewing 관측 방식으로 구분된다는 점에서 복합 활용의 가치를 가진다고 볼 수 있다. 또한 지상에서 제공되는 메테인 농도 및 배출량 특성을 간단히 비교하여 동북아시아 메테인의

컬럼 혼합비 및 상층 혼합비 특성에 참고하고자 하였다. 이와 같은 내용들은 그동안 국내에서 크게 다루어진 바 없으므로 향후 한반도 및 동북아시아 지역을 대상으로 하는 메테인 특성 연구에 유의미한 참고자료가 될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 자료 및 방법

2.1 위성자료 분석

우선 그간 많은 선행 연구에서 다루어져 온 일본 GOSAT 위성에 탑재된 TANSO-FTS에서 제공하는 메테인의 컬럼 내 평균 혼합비(column-averaged mixing ratio, 이하 XCH_4) 자료가 활용되었다. GOSAT 위성 관측은 모니터링 대상 지역의 온실가스의 배출(emission)과 흡수(absorption)를 보다 정확히 측정하여 생태계와 지역별 탄소 균형(carbon balance)을 평가하는 것을 가장 큰 목적으로 하며, 이를 위해 탑재된 TANSO-FTS 센서가 관측한 지구 표면과 대기에서 반사·방출되는 적외선 파장 복사 자료를 이용, 산출 알고리즘을 통해 대기 중에 존재하는 이산화탄소 및 메테인의 양을 추정한다(Zhou *et al.*, 2016). TANSO-FTS 센서는 우주에서 연직 방향으로 지구 대기를 바라보며 관측하는 nadir-viewing 방식으로 운용되고 있는데, 본 연구는 2010년부터 2020년까지 10년간 약 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 공간 해상도로 제공되는 XCH_4 자료를(Lopez *et al.*, 2022) 연구에 활용하였다. 공간 해상도가 조밀하지 못하므로 결측 자료가 존재할 경우 분석에 공백이 크게 나타날 수 있다. 이 문제를 최소화하기 위한 목적으로 크리깅(Kriging) 기법을 이용, 결손 부분을 보완한 Level 3 자료가 별도로 제공되고 있는데 본 연구는 이 크리깅이 적용된 자료를 분석에 활용하였다.

또한 본 연구에서는 상층대기 메테인의 시공간 분포 분석을 위해 캐나다 SCISAT 위성에 탑재된 ACE-FTS 센서 관측으로 확보된 메테인의 혼합비 자료가 활용되었다. TANSO-FTS와는 다르게 ACE-FTS는 이동하는 방향으로 대기를 비스듬하게 바라보는 limb-

viewing 방식으로 운영되며 특히 태양 복사 신호를 좀 더 잘 이용하는 태양 엄폐법(solar occultation)을 활용한다. ACE-FTS는 극지에서 가까운 고위도 지역 관측에 유리하도록 고도 650 km에서 74° 경사각(inclination angle)으로 관측을 수행 중에 있긴 하나(Bernath, 2017; Bernath *et al.*, 2005), 1년간 관측 과정에서 중위도 및 적도 지역의 관측도 적지 않게 수행하기에 각 지역 상층대기의 평균적인 특성을 확인하는 과정에서 유용한 정보를 제공해 줄 수 있는 장점을 갖는다(Lee *et al.*, 2025; Koo *et al.*, 2017).

본 연구에서는 하루 최대 일출, 일몰 각각 15회 관측을 기반으로 마련된 ACE-FTS version 4.1/4.2 자료를(Bernath *et al.*, 2021) 2004년 2월부터 2022년 2월까지 범위에서 사용하였다. ACE-FTS 센서는 $750 \sim 4400 \text{ cm}^{-1}$ 의 적외선 영역에서 0.02 cm^{-1} 스펙트럼 해상도로 복사 관측을 수행하며 태양 엄폐법 관측의 장점에 의해 약 100~400의 높은 신호대잡음비(Signal to noise ratio; SNR)를 갖는 자료를 생산한다(Bernath, 2017; Bernath *et al.*, 2005). 그 결과 이 복사 관측에 기반하여 마련된 산출 알고리즘을 통해 약 44개의 기체상 물질 정보가 산출되고 있으며 다른 limb-viewing 위성들이 성층권에서만 주로 자료를 제공하는 것과 달리 ACE-FTS는 대류권 상층에서도 기체상 물질의 양적 정보를 제시해 주고 있다(Koo *et al.*, 2017). Version 4.1/4.2 자료는 이전 버전에 비해 기압과 온도 산출에 영향을 미치고 극성층권구름과 관련된 비현실적인 자료를 유발하는 이산화탄소의 초기장 정보도 개선되어 보다 더 정확한 자료를 산출하게 되었다(Boone *et al.*, 2020). 보다 품질 높은 자료의 사용을 위해서 ACE-FTS quality flag (Sheese *et al.*, 2015) 정보에 기반, 가장 품질이 우수하다는 의미의 quality flag 0 자료를 선택하여 분석에 활용하였다.

2.2 기후모델 및 재분석 자료

이 연구에서는 Coupled Model Intercomparison Project 6 (CMIP6)에 참여한 기후모델에서 생산한 메테인 자료도 활용하였다. CMIP6는 과거, 현재, 미래의

기후변화를 이해하는 것을 목적으로 하는 모델링 결과 비교 프로젝트로(Eying *et al.*, 2016), 전 세계 여러 연구 기관에서 운용 중인 기후모델이 참여하여 과거 및 미래 기후 시나리오 실험 결과를 공유하고 있다. CMIP6 모델 실험 자료는 산업화 이전 시기부터 2014년까지 계산값을 과거 기간(historical period)으로 정의하며, 이 기간에는 각 국가 및 기관에서 산정되는 배출량 자료를 입력자료로 하여 모델 자료를 생산한다(Hoesly *et al.*, 2018). 2015년부터는 미래로 정의하며, 현재로 정의한 배출량 자료를 바탕으로 미래 배출량을 추정하고, 기후변화 시나리오에 따라 다양한 실험이 수행된다.

본 연구는 위성자료와 기후모델의 메테인 값을 비교하기 위한 목적이므로 CMIP6의 과거 기간 실험을 활용하였다. 즉, TANSO-FTS 자료가 산출되는 기간과 겹치는 2010~2014년에 대해 분석을 수행하였으며 기후모델값을 TANSO-FTS의 공간 해상도에 맞추어 2.5°×2.5°로 내삽 후 분석하였다. 총 8개 모델(BCC-ESM1, CESM2-WACCM, CNRM-ESM2-1, GFDL-ESM4, GISS-E2-1-G, IPSL-CM5A2-INCA, MPI-ESM1-2-HAM, MRI-ESM2-0, 표 1)의 월평균 메테인 부피 혼합비(volume mixing ratio) 자료를 사용했으며 각 모델링 결과값 및 앙상블 평균(Multi Model Ensemble mean, MME) 값을 위성자료와 비교하였다.

TANSO-FTS는 메테인 정보를 컬럼 혼합비(XCH₄)로 제공하고 있기 때문에 비교를 위해 CMIP6 기후모델 자료 역시 XCH₄로 변환하여 활용하였다. 변환과

정은 Saeki *et al.* (2012)이 제안한 식(식 1)을 사용했으며, 이 식에서 n은 모델 내 고도층 번호, L은 모델에서 가장 높은 고도의 층 번호, CH₄ⁿ은 n층에서의 메테인 부피 혼합비, P_{surf}는 지표 기압, ΔP_n은 n층과 n+1층 사이 기압 차이를 의미한다.

$$XCH_4 = \sum_{n=1}^L CH_4^n \times \frac{\Delta P_n}{P_{surf}} \quad (1)$$

추가적으로, 재분석 자료에서 생산되는 XCH₄ 값 역시 연구에 활용하였는데, 전 지구 온실가스 재분석 자료인 Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) global greenhouse gas reanalysis (EGG4)에서 제공하는 XCH₄ 값을(Agustí-Panareda *et al.*, 2023) CMIP6 분석 기간인 2010~2014년에 맞추어 활용하였다. CAMS EGG4 재분석 자료는 유럽중기예보센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)의 자료 동화 기법을 통해 모델링 값이 위성관측자료와 동화되어 0.75°×0.75° 공간 해상도의 자료로 생산된다.

2.3 지상관측자료 분석

위성, 기후모델 및 재분석 자료 결과의 의미를 해석하는 과정에 참고하기 위해 동북아시아 지역 지상 상시감시망에서 측정된 메테인의 혼합비 자료도 활용하였다. 이 자료는 세계온실기체자료센터(World Data Center for Greenhouse Gases, WDCGG)에서 취득하였으며, 선행 연구를 참고하여(Kim *et al.*, 2015) 동북아 지역에서 5년 이상 장기 관측을 수행한 총 6개의

Table 1. List of CMIP6 climate models providing methane simulation.

Model name	Country	Operating institute
BCC-ESM1	China	Beijing Climate Center
CESM2-WACCM	USA	NCAR
CNRM-ESM2-1	France	Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) and Centre Européen de Recherche et Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS)
GFDL-ESM4	USA	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL)
GISS-E2-1-G	USA	NASA Goddard Institute for Space Studies (GISS)
IPSL-CM5A2-INCA	France	Institut Pierre Simon Laplace (IPSL)
MPI-ESM1-2-HAM	Germany	Max Planck Institut für Meteorologie (MPI)
MRI-ESM2-0	Japan	Meteorological Research Institute

관측소 자료를 살펴보았다. 한국의 안면도(관측소명 AMY, 북위 36.5도, 동경 126.3도), 중국의 Shandianzi(관측소명 SDZ, 북위 40.7도, 동경 117.1도), 대만의 Lulin, (관측소명 LLN, 북위 23.5도, 동경 120.9도), 몽골의 Ulaan Uul(관측소명 UUM, 북위 44.4도, 동경 111.1도), 일본의 Minamitorishima(관측소명 MNM, 북위 24.3도, 동경 154.0도), 일본의 Ryori(관측소명 RYO, 북위 39.0도, 동경 141.8도). 메테인 관측은 기체 크로마토그래피 방법 및 Cavity Ring-Down Spectroscopy (CRDS) 방법으로 측정되며 Agilent 6890N 및 Picarro 2301과 같은 기기를 이용하여 5~30초 간격으로 측정된 후 품질 검토 과정을 거쳐 최종적으로는 시간, 일, 월 평균값이 제공된다. 본 연구에서는 1990년 이후 최근까지 제공되는 모든 활용가능한 자료를 사용했으며, 자료를 최대한 활용하겠다는 목표를 우선시하였기에 관측소별 분석 기간에는 차이가 존재한다.

3. 결과 및 토론

3.1 동북아시아 지역 XCH₄ 분포 특성

먼저, 전구 범위에서 GOSAT 위성이 제공하는 XCH₄의 평균적인 특징을 살펴보았다(그림 1). 가장

높은 XCH₄ 값은 동남아시아 및 열대 아프리카 지역에서 나타나고 미국 동부 및 남아메리카 지역에서도 그 뒤를 이어 높은 농도를 보이고 있다. 이는 생물성 연소 및 산림 등에서의 생물학적 배출이 메테인의 고농도 현상과 관련 있음을 잘 보여준다. 물론 메테인의 배출은 농축산지역, 동토층과 같은 다른 자연적인 배출원 및 화석 연료와 관련한 산업지역과 같은 인위적인 배출원에서도 상당 부분 이루어지기 때문에 여러 지역에서 높은 농도를 부분적으로 보이고 있다. 10년 동안 장기 변화 추이를 보면(그림 1b) 전구 모든 지역에서 증가 추이를 일관되게 보이는 것이 확인되며 북반구 해양 지역에서 증가 추이가 가장 뚜렷하게 큰 모습도 확인된다. 실제 메테인은 수십 년간 꾸준히 증가 추이를 보이고 있음이 선행 연구를 통해 잘 알려져 있으며 2000년대 중후반에 잠시 그 증가 추이가 둔화되었다가 2010년대 들어서 다시 증가 추세가 급증하는 현상도 최근 일부 연구를 통해 발표되고 있다(Moon *et al.*, 2024). 다만 메테인의 장기 추이 특징에 대한 설명이 아직 이론적으로 완벽하진 않고 여전히 잘 모르는 부분이 많기에 추가적인 감시망 구축 및 세부 메커니즘에 대한 연구가 더 필요하다.

동북아시아 지역으로 초점을 맞추어도 메테인의 증가 추이는 여전히 뚜렷하게 관측된다(그림 2). 다만 GOSAT 위성 격자별로 2010~2020년 XCH₄의 평균

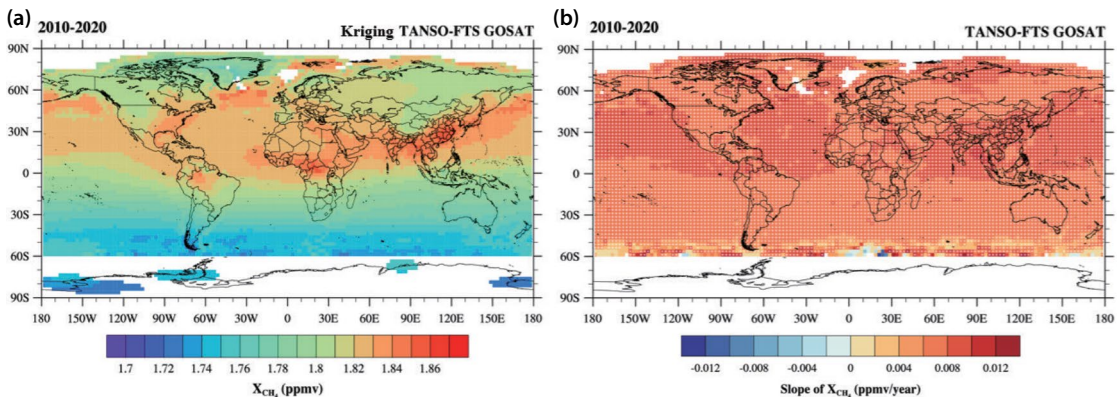


Fig. 1. Global map showing the property of columnar methane mixing ratio (XCH₄) of the GOSAT measurement from 2010 to 2020: (a) Climatological mean values and (b) long-term trends.

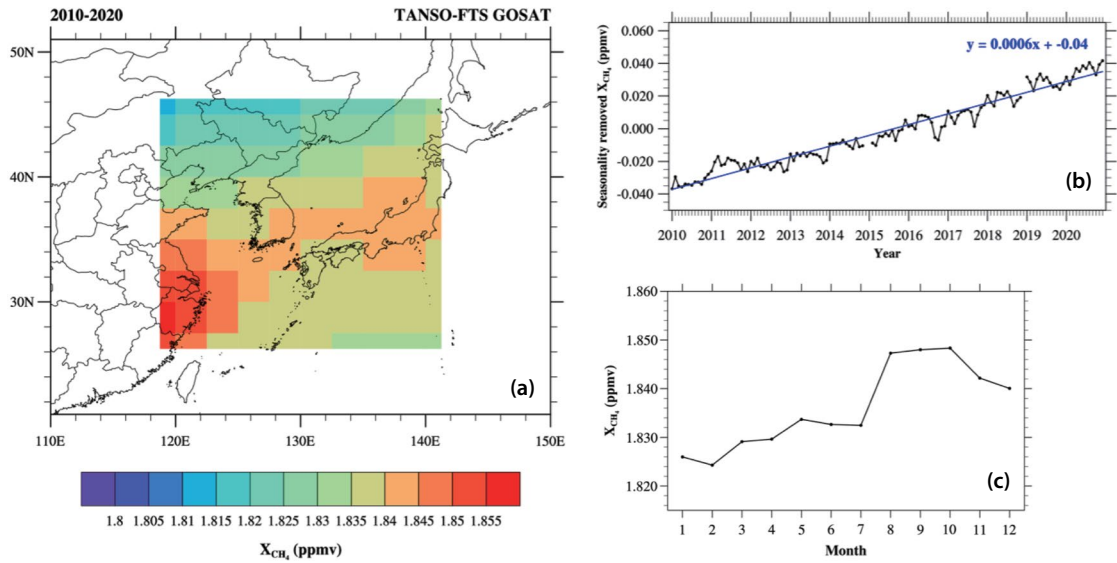


Fig. 2. (a) Spatial distribution of climatological mean XCH₄ in the target region of this study, (b) Long-term trends of regional mean XCH₄ in the target region, and (c) climatological mean XCH₄ monthly variation.

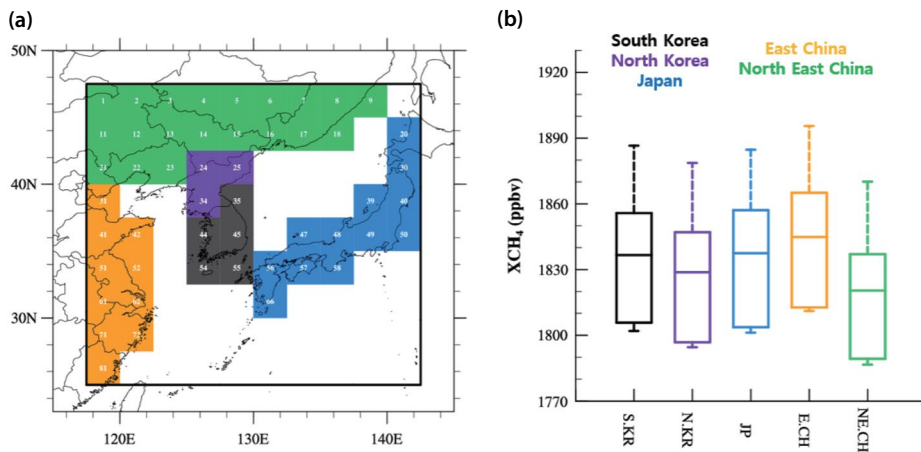


Fig. 3. (a) Each grid is classified to one of countries in East Asia: South Korea (black), North Korea (purple), Japan (blue), East China (orange), and Northeastern China (green). (b) Comparison of climatological mean XCH₄ for 5 countries.

농도를 살펴보면 한국, 중국, 일본 지역에서 차이를 보이는데 중국 남동부 지역에서 가장 높은 농도를, 중국 북동부 지역에서 가장 낮은 농도를 보이는 것이 확인된다(그림 2a). 월별 변동성의 경우 동북아시아 지역 전체 평균은 1, 2, 3월에 가장 낮은 값을, 8, 9, 10월에 가장 높은 수치를 보이고 있다.

조금 더 국가적인 특징을 살펴보고자 동북아시아 지역의 XCH₄ 분포를 한국(South Korea), 북한(North Korea), 일본(Japan, JP), 중국 동부(East China), 중국 북동부(Northeastern China) 5개 범위로 나누어 살펴 보았다(그림 3a). 이렇게 구분하여 평균 XCH₄를 비교해 보면 중국 동부 지역에서 가장 XCH₄가 높게 나타

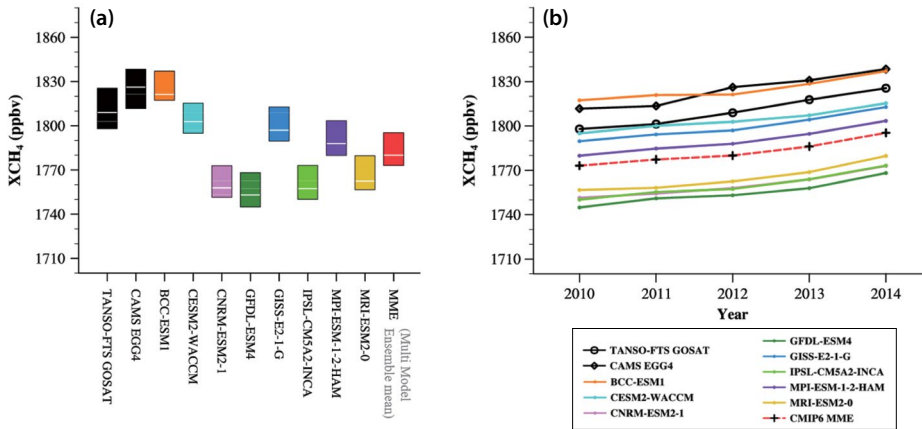


Fig. 4. (a) Comparison of XCH₄ in East Asia obtained from the GOSAT measurements with participating models in the CMIP6 and reanalysis data (CAMS EGG4): (a) mean values (2010~2014) and (b) annual variation from 2010 to 2014.

나고, 한국과 일본이 거의 비슷한 값을 뒤이어 보인다. 북한은 이보다도 낮은 XCH₄를 나타내고 중국 북동부 지역이 가장 낮은 값을 보이는데 중국 동부 지역과 비교하면 평균 농도가 약 30 ppbv 정도 낮음을 확인할 수 있다(그림 3b). 중국 내에서 메테인의 차이가 남북 방향으로 제법 뚜렷한 차이를 나타내는 부분은 미세먼지 같은 대기오염물질의 분포 특징과는 사뭇 다른 모습으로서 유의할 필요가 있어 보인다.

메테인은 온실기체로서 지구 기온 상승에 큰 영향을 미치는 중요한 기후변화 유발 물질이다. 이에 기후모델에서 어떻게 모의되고 있는지 살펴보는 과정도 중요하다고 볼 수 있다. 이런 측면에서 기후모델 비교연구(CMIP6)에 참여하여 메테인 농도값을 생산하는 여러 모델링 결과값을 GOSAT 위성의 XCH₄ 값과 비교해 보았다(그림 4). CMIP6 모델의 경우 2010~2014년 5년 평균을 이용하여 GOSAT 위성자료와의 비교를 수행하였다. 비교 결과, 모델별 차이가 제법 크게 나타나는 것이 확인되었는데 BCC-ESM1 모델이 동북아시아 지역의 XCH₄를 가장 높게, GFDL-ESM4 모델이 가장 낮게 모의하는 것을 확인하였다. 총 10개의 모델이 동북아 지역에서 보여주는 XCH₄ 평균값은 약 1750 ppbv에서 1830 ppbv의 범위를 보이며 GOSAT XCH₄의 평균은 대략 1810 ppbv를 보이는 점을 감안

하면 CMIP6 기후모델은 동북아시아 지역의 XCH₄를 다소 과소모의하는 것으로 보인다(그림 4a). 다만 정량적인 차이와는 다르게 2010년부터 2014년까지 연평균 XCH₄의 변화는 모두 GOSAT 자료와 마찬가지로 점진적인 증가 추이를 보임으로써 장기 변동성은 모두 일관되게 잘 표현하는 것을 확인할 수 있었다.

GOSAT 위성의 TANSO-FTS XCH₄ 자료 분석은 그동안 다양하게 수행되어 오면서 전구 및 지역별 메테인의 시공간 분포 및 변동성 이해에 크게 기여해왔다. 본 연구에서는 이 자료를 조금 더 세부적으로 나누어 봄으로써 같은 동북아시아 지역이라도 한국, 중국, 일본 지역의 XCH₄ 공간 분포 특징에 제법 차이가 있음을 확인하였고 기후모델과의 비교를 통해 기후모델의 과소모의 특성, 경년 변동성을 일관되게 표현하는 특징 등을 추가로 찾아낼 수 있었다. 메테인의 관측 및 모델링 자료가 다른 대기 성분 물질에 비해 상당히 부족한 만큼, 이들 추가 정보는 동북아시아 메테인 분포 현황 파악에 나름대로 유용하게 참고할 수 있을 것으로 기대된다.

3.2 동북아시아 지역 상층대기 메테인 분포 특성

Nadir-viewing 위성자료 분석에 이어 limb-viewing 위성자료를 활용, 동북아시아 지역 상층대기에서의 메

테인이 나타내는 시공간 분포 특성도 살펴보았다. 체류 수명(residence time)이 긴 온실기체는 전체 대기에 균등하게 분포하고 있는 것으로 보통 여겨지지만, 최근 연구들은 대기경계층 위 아래 정도 범위에서도 온실기체 농도 차이가 제법 크게 나타나는 것을 보여주고 있다(Park *et al.*, 2022a). 특히 메테인의 경우는 온실기체 중에서도 가장 체류 수명이 짧은 특성상 지역별 농도 차이도 꽤 강하게 나타내고 있는 것으로 확인되고 있다(Joo *et al.*, 2024; Chang *et al.*, 2022). 이는 그동안 지표 중심으로 살펴보아왔던 메테인의 특징들이 상층대기에도 그대로 나타나는지 확인할 필요성을 의미한다. 그러나 상층대기의 메테인 관측은 일부 집중 캠페인 시기 항공관측에 국한되고 있어서(Chang *et al.*, 2022; Park *et al.* 2022b) 이런 집중관측 자료로 장기 추이 같은 일반적인 특성을 살펴보기는 쉽지 않다.

이에 본 연구는 다소 공간 해상도는 충분하지 않아도 장기간 관측을 수행해온 limb-viewing 위성이 생산하는 상층대기 메테인 자료를 통해 동북아시아 지역 특성을 살펴보고자 한다. 앞서 소개했듯이 캐나다 SCISAT 위성에 탑재된 ACE-FTS 센서 관측을 통해 여러 탄화수소 물질의 농도 정보가 2004년부터 생산되어 오고 있다(Koo *et al.*, 2017). ACE-FTS는 고위도 지역을 조밀하게 관측하는 것으로 기획되었지만 중위도, 저위도 지역의 관측도 일부 수행하고 있기에 장기

간 평균 및 변동성 분석에는 충분히 유의미하며 실제로 여러 선행 연구들은 메테인 및 여러 대기 화학 성분들의 전구범위 분석에 ACE-FTS 자료를 활용해왔다(Holl *et al.*, 2016; Jones *et al.*, 2012). 이에 본 연구는 좀 더 동북아시아 지역에 초점을 두어 ACE-FTS의 메테인 자료를 분석해 보고자 한다.

우선 동북아시아 지역을 경도 30도, 위도 10도 범위의 직사각형 영역 8개로 나누어 ACE-FTS 분석 수행 범위를 지정하였다(그림 5a). 한국, 중국, 일본을 포함하는 지역은 고위도에서 차례대로 Southern Siberia (SS), Korean Peninsula (KP), Southern China (SC), South Asia (SA)로 구분하였고 조금 더 동쪽에 위치한 서태평양 지역은 고위도에서부터 Western Pacific (WP) 1, 2, 3, 4지역(WP1, WP2, WP3, WP4)으로 구분하여 지상에서 인위적 배출량이 높고 낮은 지역의 차이를 살펴보고자 하였다. ACE-FTS는 8 km 이상 고도에 대해 관측값을 제공하므로 대류권 상층과 성층권에서의 메테인 농도 변화 특징이 지표와 어떻게 관련성을 가지는지 살펴보기 위해 2.3절에서 언급한, 동북아시아 지역에서 장기간 온실기체 감시를 수행하는 6개 지표 관측소의(그림 5b) 메테인 관측값을 함께 활용하였다.

우선 ACE-FTS 관측이 제공하는 메테인 연직 분포 자료의 전체 및 계절별 평균을 비교해 보았다(그림 6).

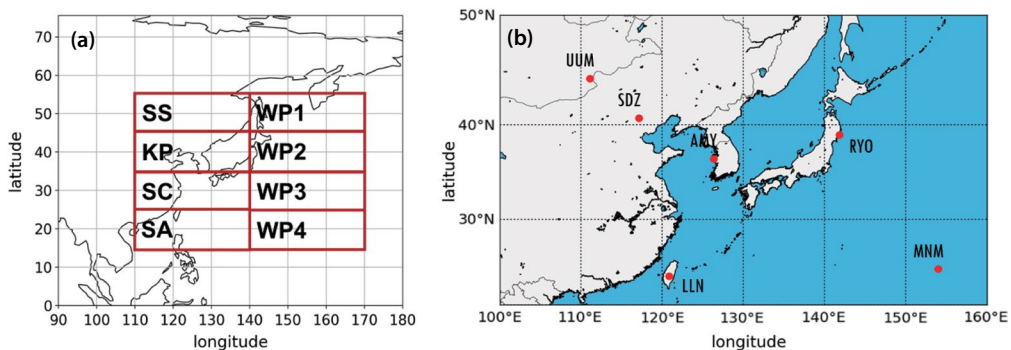


Fig. 5. (a) 8 box regions for the ACE-FTS data analysis such as Southern Siberia (SS), Korean peninsula (KP), Southern China (SC), South Asia (SA), and Western Pacific (WP). The numbering of WP box regions starts from the higher latitude (WP1) to the lower latitude (WP4). Each box regions has the spatial coverage with 30 degree longitude and 10 degree latitude. (b) Location of WDCGG sites such as Anmyeondo, Korea (AMY), Ulaan Uul, Mongolia (UUM), Shandianzi, China (SDZ), Lulin, Taiwan (LLN), Minamitorishima (MNM) and Ryori, Japan (RYO).

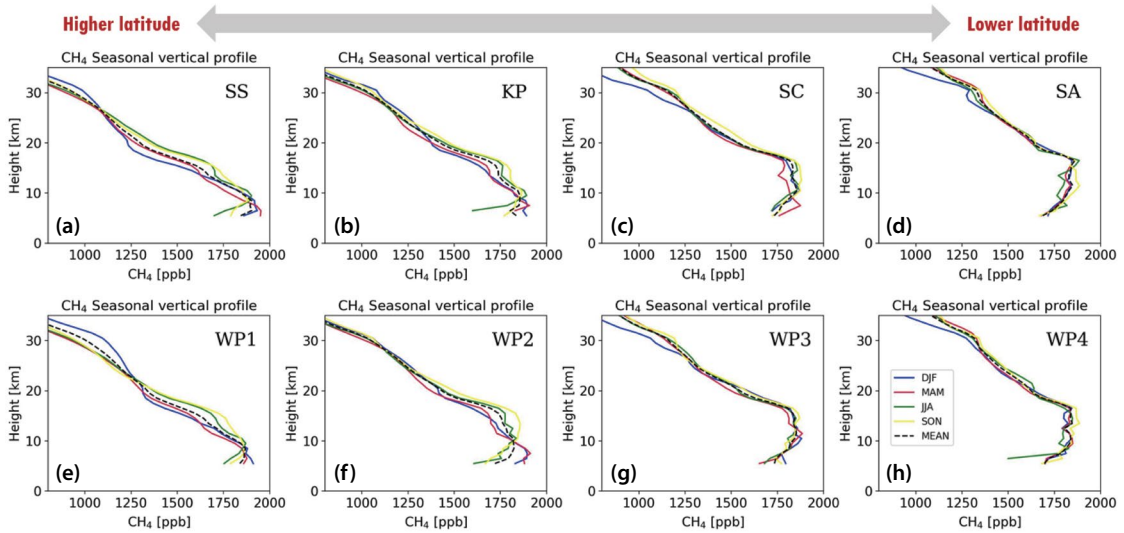


Fig. 6. Vertical profiles of climatological (2004~2022) and seasonal mean CH₄ mixing ratio: total mean (dash), December-January-February (DJF) mean (blue solid), March-April-May (MAM) mean (red mean), June-July-August (JJA) mean (green solid), and September-October-November (SON) mean (yellow solid). 8 regional patterns are compared: (a) SS, (b) KP, (c) SC, (d) SA, (e) WP1, (f) WP2, (g) WP3, and (h) WP4.

연직 분포는 고도 1 km 해상도로 ACE-FTS 자료에서 가장 우수한 품질이란 의미의 quality flag가 0인 값만 이용하여 계산되었다. 모든 지역에서 고도가 높아질수록 메테인의 혼합비가 감소하는 모습을 보였으며 계절적인 차이가 크게 나타나진 않지만 6, 7, 8월 여름의 경우 대류권 상층에서는 상대적으로 낮은 혼합비를, 성층권 하층에서는 높은 혼합비를 보이는데 이는 여름철 상대적으로 강하게 나타나는 대류현상에 의해 대류권 공기가 성층권으로 유입되는 부분을 보여주는 것으로 여겨진다. 같은 경도 범위에서 한국, 중국, 일본 지역과 서태평양 지역을 비교했을 때 메테인의 연직 분포 모양은 크게 차이를 보이지 않는데, XCH₄의 경우 나뉠 국가별 차이를 나타내는 것과는(그림 3) 다른 모습이다.

연직 구조에서 또 하나의 특징은 저위도 지역으로 갈수록 메테인의 고농도가 좀 더 높은 고도까지 유지되는 것으로서 SS, WP1과 같은 고위도에서는 대략 10 km 이상 고도에서 메테인의 감소가 발견되지만(그림 6a, 6e) SA와 WP4와 같은 저위도 지역에서는 무려 20

km까지도 메테인의 높은 혼합비가 유지되다가 그 이상 고도에서 감소가 나타난다(그림 6d, 6h). 이는 위도가 낮아짐에 따라 대류권계면이 높아지는 것과 자연스럽게 관련되는 현상으로서 지표에서 배출되는 메테인이 대류권 내에서는 비교적 유사한 혼합비를 균일하게 보이지만 대류권계면 위 성층권까지는 이어지지 못하는 것을 의미한다. 즉 메테인의 대기 중 수명이 다른 대기화학 물질들에 비해 상대적으로 긴 편에 속한다고 해도 성층권까지 유입될 수 있을 만큼 충분히 길지는 않다고 해석된다.

이어서 상층대기에서의 메테인 혼합비의 장기 추이를 2004년부터 2022년까지 연평균 관점에서 비교해 보았다(그림 7). 약 14 km 고도까지는 메테인의 장기 증가 추이가 모든 지역에서 잘 나타남에 비해 그보다 더 높은 성층권에서는 메테인의 증가 추이가 나타나지 않는 것이 확인된다. 또한, 고위도 지역에서는 메테인의 증가 추이가 약 14 km 높이까지만 확인되나(그림 7a, 7e) 제일 위도가 낮은 SA와 WP4 지역에서는(그림 7d, 7h) 20 km 고도에서도 메테인의 증가 추이

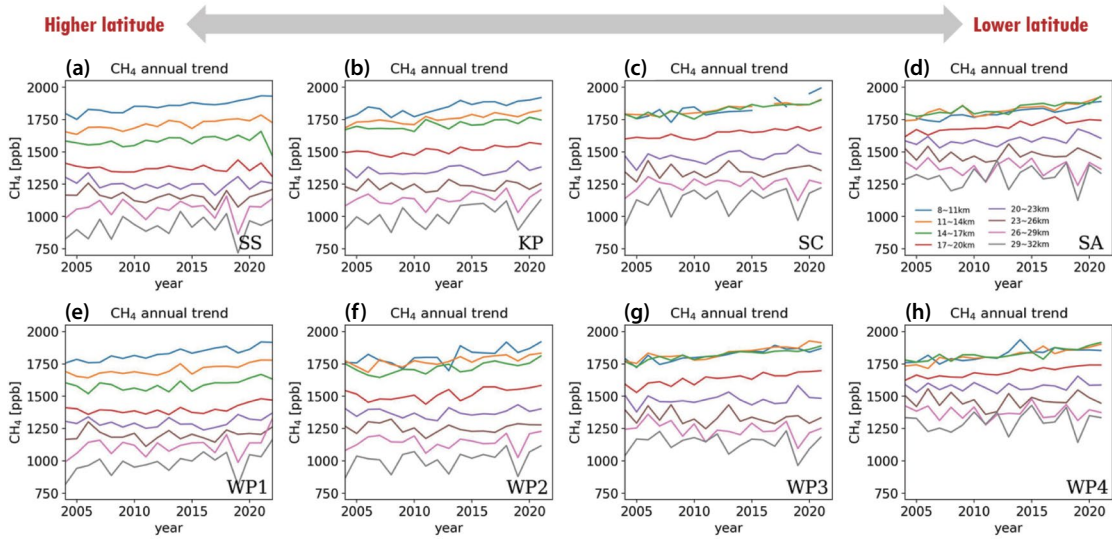


Fig. 7. Annual mean variation of ACE-FTS CH₄ mixing ratio from 2004 to 2022 in 8 box regions: (a) SS, (b) KP, (c) SC, (d) SA, (e) WP1, (f) WP2, (g) WP3, and (h) WP4. Total 8 altitude ranges are considered for this comparison: 8 to 11 km (blue), 11 to 14 km (orange), 14 to 17 km (green), 17 to 20 km (red), 20 to 23 km (purple), 23 to 26 km (brown), 26 to 29 km (pink), and 29 to 32 km (gray).

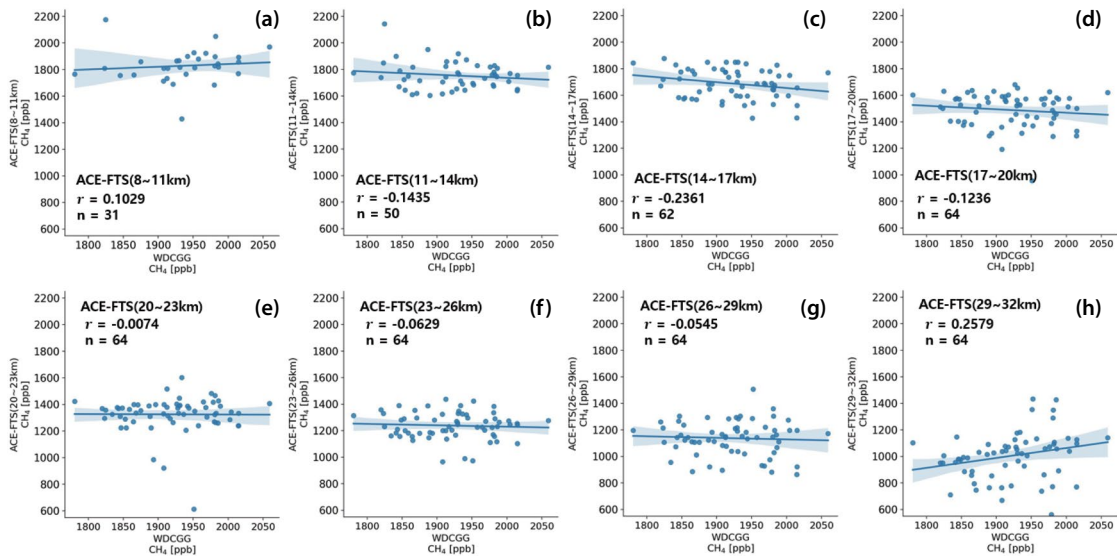


Fig. 8. Comparison between the surface CH₄ mixing ratio at the AMY site obtained from the WDCGG data archive and upper atmospheric mean CH₄ mixing ratio from the ACE-FTS measurement in the KP box region. Total 8 height ranges are considered: (a) 8 to 11 km, (b) 11 to 14 km, (c) 14 to 17 km, (d) 17 to 20 km, (e) 20 to 23 km, (f) 23 to 26 km, (g) 26 to 29 km, and (h) 29 to 32 km. This scatter-plot was produced only for cases having both WDCGG and ACE-FTS data are available.

가 나타나는 것이 확인된다. 이 역시 그림 6과 마찬가지로 메테인 농도 변화의 특징은 대류권에만 국한되

고 성층권까지 이어지지 않는다는 점을 보여주는 결과들이다. WDCGG에서 제공하는 지표 메테인 혼합

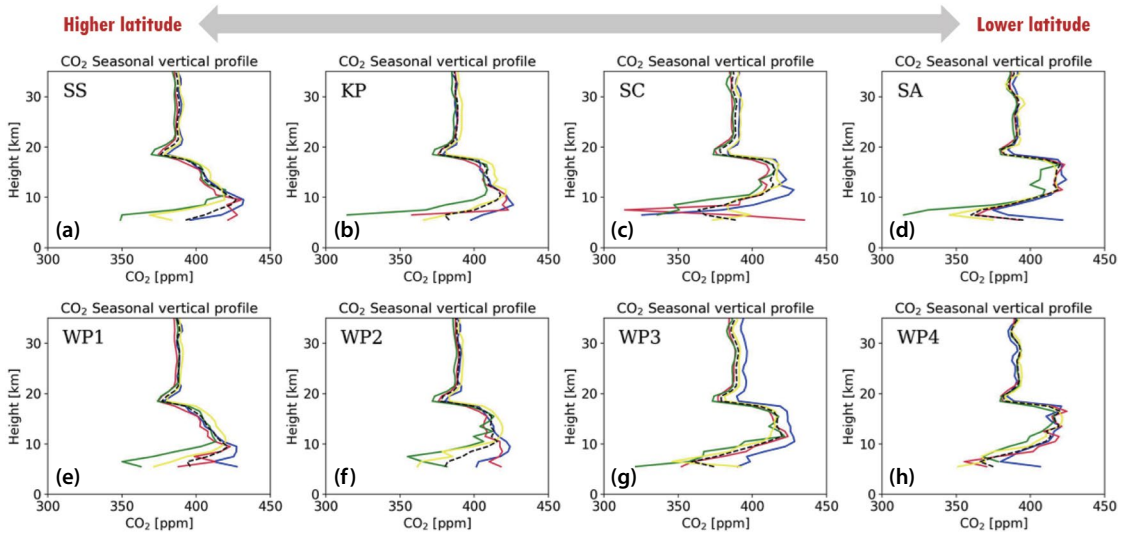


Fig. 9. Same with Fig. 6, but for CO₂.

비 자료를 이용하여 상층대기 메테인과의 상관성을 살펴보면 성층권은 물론이고 대류권계면 이하 대류권 상층의 메테인조차도 지표 메테인과 양적인 상관성을 나타내지 않음을 확인할 수 있다(그림 8).

지금까지 살펴본 메테인의 상층대기에서의 특성이 이산화탄소의 경우에도 유사하게 나타나는지를 비교해 보고자 같은 형태의 분석을 ACE-FTS 및 WDCGG의 이산화탄소 혼합비 자료를 이용하여 수행해 보았다. 참고로 ACE-FTS 자료에서 이산화탄소는 고도 20 km까지만 주어지고 그 위에는 a priori로만 처리되고 있기 때문에 20 km 고도까지만 분석 범위를 한정한다. 단 비교 목적으로 자료 자체는 메테인과 같은 고도 범위까지 다 제시하고자 한다. 메테인의 대기 중 체류수명이 이산화탄소에 비해 훨씬 짧기 때문에 같은 온실기체라 하더라도 시공간 분포 특성에 차이가 나타날 수 있는지를 보고자 함이 비교의 목적이 되는데, 이런 관점에서는 아산화질소(N₂O)와 같은 다른 온실기체 자료도 활용해 보면 도움이 될 수 있겠으나 메테인 및 이산화탄소에 비해 아산화질소 자료의 구축 정도는 상대적으로 빈약하기 때문에 본 연구에서는 고려하지 못하였다. 향후 다양한 종류의 온실기체에 대해서 분

석을 확장한다면 좀 더 유용한 정보를 얻을 수 있을 것이다.

먼저 그림 6과 유사하게 이산화탄소의 연직 분포를 살펴보면 그 형태가 메테인과는 다소 다르게 나타나는 것이 확인되는데(그림 9) 대류권에 비해 성층권에서 이산화탄소 혼합비가 낮게 나타나는 특징은 어느 정도 유사하지만 그 형태가 많이 다르게 나타난다. 고위도 지역에서는 메테인과 유사하게 대류권계면 위에서 점진적인 감소가 나타나는 편이지만 위도가 낮아지면서 오히려 10~20 km 구간의 이산화탄소가 10 km 아래의 혼합비보다 높게 나타나는 경향이 보인다. 이는 이산화탄소의 평균적인 수명이 메테인보다는 몇 배 더 크게 나타나는 것이 원인으로 보인다. 즉 성층권으로 유입된 이산화탄소가 소멸하지 않고 누적되면서 안정한 성층권 내에서 높은 혼합비를 유지하지만 대류권계면 아래 대류권에서는 강한 대류에 의해 이산화탄소의 혼합비가 되려 희석되면서 낮게 나타날 수 있는 것이다. 실제로 이산화탄소의 계절 평균 값이 성층권에서는 큰 차이를 보이지 않지만 11 km 아래 고도에서는 큰 차이를 보이며 특히 여름에 상당히 낮은 혼합비를 보이는 것을 통해 확인할 수 있다.

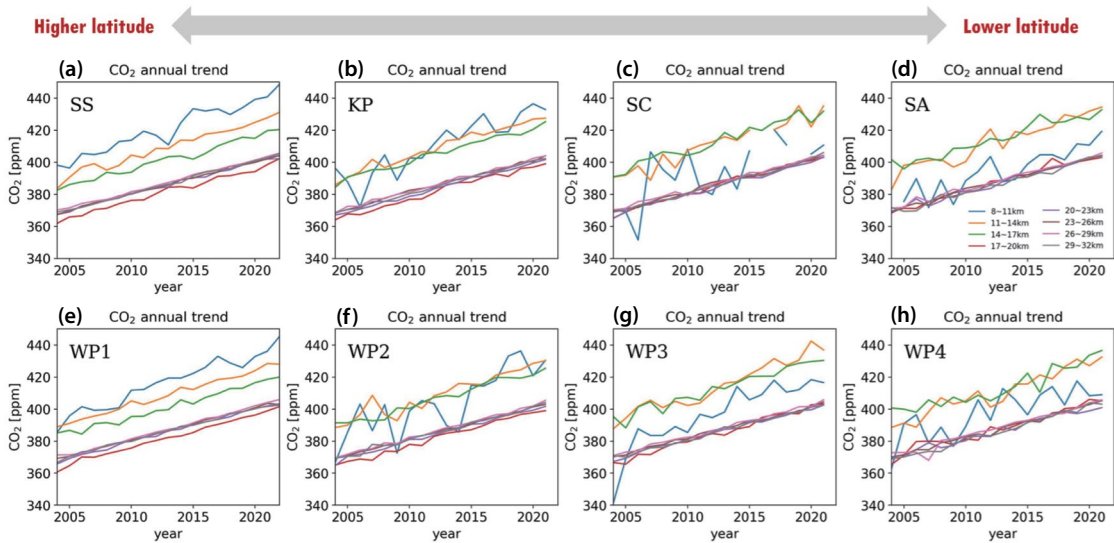


Fig. 10. Same with Fig. 7, but for CO₂.

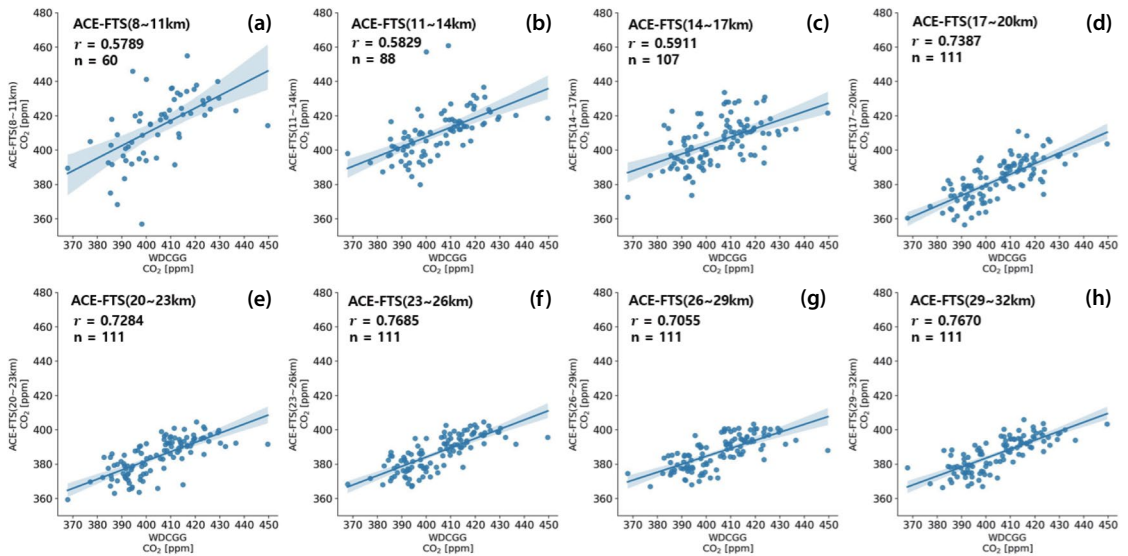


Fig. 11. Same with Fig. 8, but for CO₂.

상층대기의 이산화탄소 장기 추이도 메테인과는 다른 모습을 보인다. 이산화탄소는 지정한 8개 영역별로 경년 변동성의 차이는 다소 있을지언정 20 km 이하 모든 고도에서 일관된 증가 추이를 보이고 있다(그림 10). 이는 메테인이 대류권계면을 경계로 다른 장기 변

동성을 보여주고 있는 것과는(그림 7) 달리 이산화탄소는 상층대기 전체에서 유사한 경향을 갖고 있다는 것을 의미한다. 상관관계 분석을 통해서도 같은 결론을 얻을 수 있는데, 메테인의 지표 혼합비가 상층 혼합비와 특별한 상관성을 갖지 않는 것에 비해(그림 8),

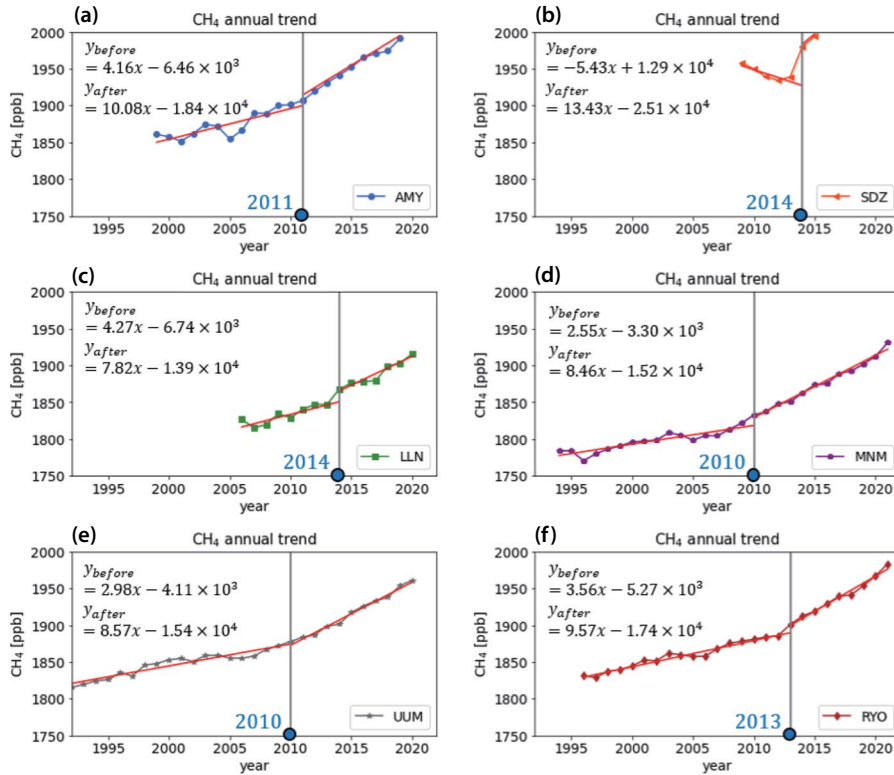


Fig. 12. Annual mean variation of CH₄ mixing ratio measured at 6 surface sites: (a) AMY, (b) SDZ, (c) LLN, (d) MNM, (e) UUM, and (f) RYO. At each site, the year showing the sudden trend change is also estimated by using Buishand range test in the package of R program language.

이산화탄소의 지표 혼합비는 상층 혼합비와 유의미한 양의 상관성을 나타내는 것을(그림 11) 확인할 수 있다. 비록 메테인 역시 대류권 하층에서는 지표와 마찬가지로 증가하는 추이를 갖고 있음이 확인되지만(그림 7) 지표에서 메테인이 증감 변동성이 상층에서 뚜렷하게 반영된다고 보기는 어렵다. 이는 배출 이후에 특별히 대기 중에서 화학적 과정을 거치지 않는 이산화탄소와는 달리 메테인은 대기 중에서 다른 화학과정에 개입하는데 그 과정이 고도별로 다르기 때문인 것으로 해석된다. 이렇듯 이산화탄소와 메테인은 대표적인 온실가스로 여겨지지만, 지표와 상층대기 변동성 사이 관련성에 있어서는 서로 다른 특성을 보여주고 있음이 확인된다.

3.3 동북아시아 지상 메테인 농도 및 배출 특성

지금까지 살펴본 위성자료 분석 결과 해석에 참고하기 위해, 지표 상시 관측망에서 보여주는 메테인과 이산화탄소의 장기 추이를 확인하고 상향식 배출량 인벤토리에서 제공하는 배출량 플렉스 정보들을 검토해 보았다. 장기 추이 계산은 널리 활용되는 Mann-Kendall test를 이용하여(예: Tunde *et al.*, 2022) 수행되었다. 그림 5에서 제시한 6개의 지표 관측소에서 측정된 자료를 이용, 연평균 메테인(그림 12)과 이산화탄소(그림 13) 혼합비의 장기 변동성을 살펴보면 6개 관측소 모두 메테인과 이산화탄소의 증가 추이를 보여주는 것이 잘 확인된다. 장기 추이 변동성의 일관성을 확인하고자 Buishand range test를 이용하여 장기추이가 크게 변화하는 시기를 찾아보았다. Buishand range

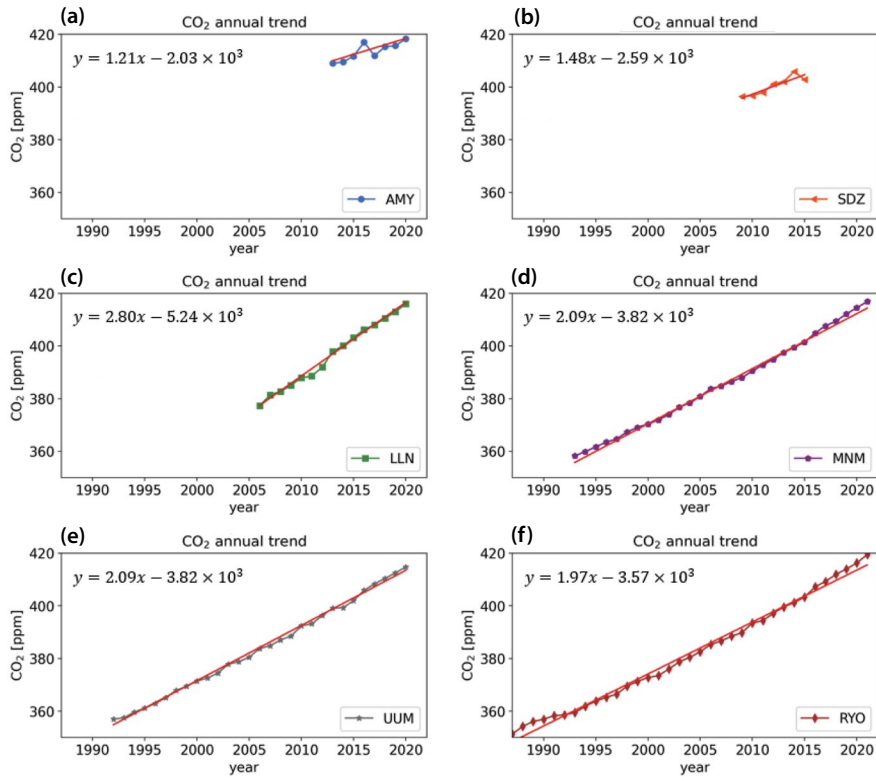


Fig. 13. Same with Fig. 12, but for CO₂.

test는 시계열 자료에서 경년 편차를 누적시킨 누적편차값의 최소, 최대값을 갖는 지점이 연속하게 나타나는 경우 그 두 지점의 중간을 급변점으로 파악하는 방법이다(Jaiswal *et al.*, 2015). 분석 결과, 이산화탄소는 증가율이 거의 일정하게 유지되는 편임에 반해(그림 13) 메테인은 2000년대에 비해 2010년대 증가 폭이 훨씬 더 가파르게 높아지는 것으로 나타난다(그림 12). 지상관측 메테인의 이런 2010년대 이후 가파른 증가 추세는 그러나 ACE-FTS 자료 분석에서는 확인되지 않는다(그림 7). 이는 앞서 서술한 바와 같이 지표 메테인 변동성이 상층 메테인 변동성과 상관성을 크게 갖지 않는 특성을 통해 설명이 가능할 것으로 보인다.

끝으로, 전구 범위의 온실기체 지상 감시망인 Advanced Global Atmospheric Gases Experiment (AGAGE)의 장기 관측 자료를 이용하여 상자모델링을 이용해

추정한 메테인 배출량(Western *et al.* 2025) 및 대기화학 물질들의 인위적 배출량 정보를 제공하는 Emissions Database for Global Atmospheric Research (EDGAR) 인벤토리(Crippa *et al.*, 2024)가 제공하는 메테인의 배출량의 경년 변동성을 살펴보았다(그림 14). 1970년부터 현재까지 한국, 중국, 일본의 메테인 배출량의 장기 추이가 크게 다르게 구분되는 것이 인상적인데 중국은 꾸준히 증가하는 추세, 한국과 북한은 비슷한 특성을 유지, 일본은 꾸준히 감소하는 특징을 보여주고 있다(그림 14a). Western *et al.* (2025)에서 제공한 이 메테인 배출량 정보의 의미를 좀 더 파악하고자 EDGAR 인벤토리 자료(EDGARv2024ghg) 분석 결과와 비교해 보았다. 두 배출량 자료가 제공되는 영역 범위가 달라서 직접적인 비교는 전구 범위에서만 가능했는데, 전구 범위에서 두 자료 모두 메테인의 증가 추이를 비슷하게 보여주는 것이 확인되었다. 다만,

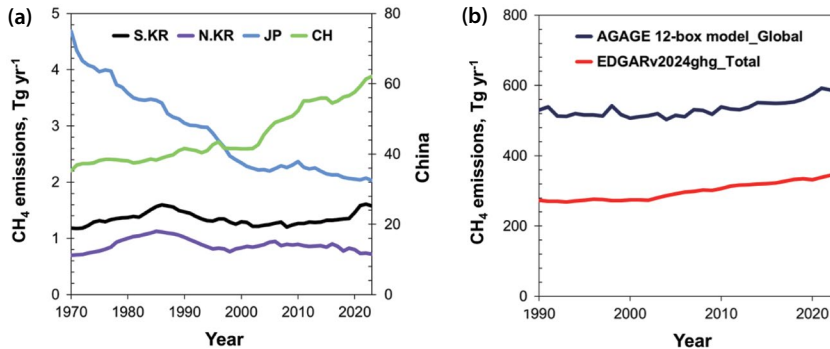


Fig. 14. (a) Annual methane emissions (unit: Tg/year) of South Korea (S.K.R, black), North Korea (N.K.R, purple), Japan (JP, light blue), and China (CH, yellow green) from 1970 to 2023 based on the EDGARv2024ghg dataset (Crippa *et al.*, 2024). (b) Comparison of global methane emissions between the EDGARv2024ghg dataset (red line) and the AGAGE 12-box model output from 1990 to 2023 (black line), provided from Western *et al.* (2025).

EDGAR 자료 메테인 배출량 증가 추이가 최근에 더 가파르게 나타나고 있는데 EDGAR는 인위적 배출원만 고려한다는 특징을 감안하면 EDGAR와 Western *et al.* (2025) 메테인 배출량 비율의 증가는 최근으로 오면서 메테인 증가에 인위적 배출원의 기여도가 더 커지는 것처럼 해석될 수도 있어 보인다. 다만 최근 연구 결과에 의하면 석유, 천연가스 분야의 배출은 1990년대 이후 감소하나 가축, 폐기물 처리장 및 광산에서의 메테인 배출량은 2006년 이후 늘어나고 있는 상황이다 (Chandra *et al.*, 2024). 이러한 메테인 배출량 장기 추이의 복잡한 특성을 현재로서는 완벽하게 이해하기 어렵기에, 추가 연구가 꾸준히 이어질 필요가 있어 보인다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 GOSAT이라는 nadir-viewing 위성에 탑재된 TANSO-FTS 센서 관측에서 얻어지는 메테인의 XCH₄ 값과 SCISAT이라는 limb-viewing 위성에 탑재된 ACE-FTS 센서 관측에서 얻어지는 대류권 상층 및 성층권에서의 메테인 혼합비 자료를 이용하여 한반도 및 동북아시아 지역에서 메테인이 보여주는 특성을 좀 더 다각도로 살펴보았다. 우선 XCH₄ 분석의 경우

이미 기존 연구들이 동북아시아 지역 XCH₄의 기본적인 시공간 특성을 GOSAT 및 OCO-2와 같은 위성자료에 기반하여 충분히 확인한 바 있으나, 본 연구에서는 국가별 평균을 구분해서 살펴보았을 때 제법 뚜렷한 차이를 확인할 수 있었다는 점을 보였고, 특히 중국의 경우 남쪽과 북쪽의 XCH₄ 크기가 꽤 차이난다는 점을 찾아낼 수 있었다. 또한 여러 기후모델링이 제시하는 XCH₄ 값과 비교하여 현재 기후모델에서 생산하는 XCH₄ 값의 품질이 동북아시아 범위에서 어떻게 나타나는지도 살펴보았다.

ACE-FTS 자료를 이용한 대류권 상층 및 성층권에서의 CH₄ 혼합비 특성 분석은 기존에 한반도/동북아시아 범위에서 별도로 수행된 바 없었던 것으로, 온실가스의 상층대기 특성에 대해 그간 인지하지 못했던 몇 가지 부분들을 새롭게 확인할 수 있었다. 메테인의 경우 대류권계면 아래와 위에서 장기 추이를 다르게 나타나는 것이 확인되었으며, 심지어 이 연구에서 다룬 8 km 고도 이상 상층대기의 메테인 혼합비는 지표 메테인 혼합비와 비교해 볼 때 크게 유의미한 상관성을 갖지 않는 것으로 확인되었다. 반면 이산화탄소는 지표 혼합비와 상층대기 혼합비 사이에 유의미한 상관성이 존재하는 것을 확인함으로써 같은 온실기체임에도 대기 전체적인 관점에서는 다른 분포 특성을 갖는 것을 살펴볼 수 있었다. 이는 흔히 우리가 갖고 있

는 온실기체에 대한 인식(대기 중 수명이 길어서 전 대기에 걸쳐 균일한 특성을 보인다는 인식)에 일부 변화를 가져갈 필요가 있음을 의미한다.

온실가스 감시 및 감축과 관련하여 메테인의 대기 중 시공간 특성 이해는 가장 기본적인 부분이지만 아직 우리가 모르는 부분이 많이 있음을 이 연구 결과가 잘 보여주고 있다 생각한다. 다른 온실가스에 비해서 메테인은 대기 중 체류시간이 짧다는 점과 다양한 배출원을 갖고 있다는 차이점을 갖고 있기에, 향후 메테인 관측망을 조밀하게 구축한다면 단순한 배경대기 감시를 넘어 잘 모르고 있던 시공간 분포 특징을 추가적으로 확인할 수도 있을 것으로 기대된다. 그리고 이런 목적을 수행하는 데 위성 기술 활용이 큰 기여를 할 수 있다는 점에서 향후 보다 더 적극적인 위성자료 생산 및 분석이 이루어져야 할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2025-01-02-032). 또한 본 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(RS-2023-00219830).

References

Agustí-Panareda, A., Barré, J., Massart, S., Inness, A., Aben, I., Ades, M., Baier, B.C., Balsamo, G., Borsdorff, T., Bousserez, N., Boussetta, S., Buchwitz, M., Cantarello, L., Crevoisier, C., Engelen, R., Eskes, G., Flemming, J., Garrigues, S., Hasekamp, O., Huijnen, V., Jones, L., Kipling, Z., Langerock, B., McNorton, J., Meilhac, N., Noël, S., Parrington, M., Peuch, V.-H., Ramonet, M., Razinger, M., Reuter, M., Ribas, R., Suttie, M., Sweeney, C., Tarniewicz, J., Wu, L. (2023) The CAMS greenhouse gas reanalysis from 2003 to 2020, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(6), 3829-3859. <https://doi.org/10.5194/acp-23-3829-2023>

Bernath, P.F. (2017) The atmospheric chemistry experiment (ACE), *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 186, 3-16. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2016.04.006>

Bernath, P.F., Crouse, J., Hughes, R.C., Boone, C.D. (2021) The Atmospheric Chemistry Experiment Fourier transform spectrometer (ACE-FTS) version 4.1 retrievals: Trends and seasonal distributions, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 259, 107409. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2020.107409>

Bernath, P.F., McElroy, C.T., Abrams, M.C., Boone, C.D., Butler, M., Camy-Peyret, C., Carleer, M., Clerbaux, C., Coheur, P.-F., Colin, R., DeCola, P., DeMazière, M., Drummond, J.R., Dufour, D., Evans, W.F.J., Fast, H., Fussen, D., Gilbert, K., Jennings, D.E., Llewellyn, E.J., Lowe, R.P., Mahieu, E., McConnell, J.C., McHugh, M., McLeod, S.D., Michaud, R., Midwinter, C., Nassar, R., Nichitiu, F., Nowlan, C., Rinsland, C.P., Rochon, Y.J., Rowlands, N., Semeniuk, K., Simon, P., Skelton, R., Sloan, J.J., Soucy, M.-A., Strong, K., Tremblay, P., Turnbull, D., Walker, K.A., Walkty, I., Wardle, D.A., Wehrle, V., Zander, R., Zou, J. (2005) Atmospheric Chemistry Experiment (ACE): Mission overview, *Geophysical Research Letters*, 32(15), L15S01. <https://doi.org/10.1029/2005GL022386>

Boone, C.D., Bernath, P.F., Cok, D., Jones, S.C., Steffen, J. (2020) Version 4 retrievals for the atmospheric chemistry experiment Fourier transform spectrometer (ACE-FTS) and imagers, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 247, 106939. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2020.106939>

Chan Miller, C., Roche, S., Wilzewski, J.S., Liu, X., Chance, K., Souri, A.H., Conway, E., Luo, B., Samra, J., Hawthorne, J., Sun, K., Staebell, C., Chulakadabba, A., Sargent, M., Benmergui, J.S., Franklin, J.E., Daube, B.C., Li, Y., Laughner, J.L., Baier, B.C., Gautam, R., Omara, M., Wofsy, S.C. (2024) Methane retrieval from MethaneAIR using the CO₂ proxy approach: a demonstration for the upcoming MethaneSAT mission, *Atmospheric Measurement Techniques*, 17, 5429-5454. <https://doi.org/10.5194/amt-17-5429-2024>

Chandra, N., Patra, P.K., Fujita, R., Höglund-Isaksson, L., Umezawa, T., Goto, D., Morimoto, S., Vaughn, B.H., Thomas Röckmann, T. (2024) Methane emissions decreased in fossil fuel exploitation and sustainably increased in microbial source sectors during 1990-2020, *Communications Earth & Environment*, 5, 147. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01286-x>

Chang, D.Y., Jeong, S., Oh, E., Sim, S., Kim, Y., Park, C., Park, H., Kim, J., Kim, J., Park, J.-S., Kim, H., Choi, J.-S. (2022) Finding

- the missing link in methane emission inventories using aircraft and mobile observations, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 58(2), 293-297. <https://doi.org/10.1007/s13143-021-00248-z>
- Crippa, M., Guizzardi, D., Pagani, F., Banja, M., Muntean, M., Schaaf, E., Monforti-Ferrario, F., Becker, W., Quadrelli, R., Riusque Martin, A., Taghavi-Moharamli, P., Köykkä, J., Grassi, G., Rossi, S., Melo, J., Oom, D., Branco, A., San-Miguel, J., Manca, G., Pisoni, E., Vignati, E., Pekar, F. (2024) GHG emissions of all world countries, Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/4002897>
- Duren, R., Cusworth, D., Ayasse, A., Howell, K., Diamond, A., Scarpelli, T., Kim, J., O'Neill, K., Lai-Norling, J., Thorpe, A., Zandbergen, S.R., Shaw, L., Keremedjiev, M., Guido, J., Giuliano, P., Goldstein, M., Nallapu, R., Barentsen, G., Thompson, D.R., Roth, K., Jensen, D., Eastwood, M., Reuland, F., Adams, T., Brandt, A., Kort, E.A., Mason, J., Green, R.O. (2025) The Carbon Mapper emissions monitoring system, *EGUsphere*, 2025, 1-41. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-2275>
- Eyring, V., Gleckler, P.J., Heinze, C., Stouffer, R.J., Taylor, K.E., Balaji, V., Guilyardi, E., Joussaume, S., Kindermann, S., Lawrence, B.N., Meehl, G.A., Righi, M., Williams, D.N. (2016) Towards improved and more routine Earth system model evaluation in CMIP, *Earth System Dynamics*, 7(4), 813-830. <https://doi.org/10.5194/esd-7-813-2016>
- Fankhauser, S., Smith, S.M., Allen, M., Axelsson, K., Hale, T., Hepburn, C., Kendall, J.M., Khosla, R., Lezaun, J., Mitchell-Larson, E., Obersteiner, M., Rajamani, L., Rickaby, R., Seddon, N., Wetzler, T. (2022) The meaning of net zero and how to get it right, *Nature Climate Change*, 12(1), 15-21. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01245-w>
- Guo, M., Wang, X.F., Li, J., Yi, K.P., Zhong, G.S., Wang, H.M., Tani, H. (2013) Spatial distribution of greenhouse gas concentrations in arid and semi-arid regions: A case study in East Asia, *Journal of Arid Environments*, 91, 119-128. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2013.01.001>
- Hoesly, R.M., Smith, S.J., Feng, L., Klimont, Z., Janssens-Maenhout, G., Pitkanen, T., Seibert, J.J., Vu, L., Andres, R.J., Bolt, R.M., Bond, T.C., Dawidowski, L., Kholod, N., Kurokawa, J.-i., Li, M., Liu, L., Lu, Z., Moura, M.C.P., O'Rourke, P.R., Zhang, Q. (2018) Historical (1750-2014) anthropogenic emissions of reactive gases and aerosols from the Community Emissions Data System (CEDS), *Geoscientific Model Development*, 11(1), 369-408. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-369-2018>
- Holl, G., Walker, K.A., Conway, S., Saitoh, N., Boone, C.D., Strong, K., Drummond, J.R. (2016) Methane cross-validation between three Fourier transform spectrometers: SCISAT ACE-FTS, GOSAT TANSO-FTS, and ground-based FTS measurements in the Canadian high Arctic, *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(5), 1961-1980. <https://doi.org/10.5194/amt-9-1961-2016>
- Jaiswal, R.K., Lohani, A.K., Tiwari, H.L. (2015) Statistical Analysis for Change Detection and Trend Assessment in Climatological Parameters, *Environmental Processes*, 2(4), 729-749. <https://doi.org/10.1007/s40710-015-0105-3>
- Jones, A., Walker, K.A., Jin, J.J., Taylor, J.R., Boone, C.D., Bernath, P.F., Brohede, S., Manney, G.L., McLeod, S., Hughes, R., Daffer, W.H. (2012) A trace gas climatology derived from the Atmospheric Chemistry Experiment Fourier Transform Spectrometer (ACE-FTS) data set, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(11), 5207-5220. <https://doi.org/10.5194/acp-12-5207-2012>
- Joo, J., Jeong, S., Shin, J., Chang, D.Y. (2024) Missing methane emissions from urban sewer networks, *Environmental Pollution*, 342, 123101. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.123101>
- Kenea, S.T., Lee, H., Joo, S., Li, S., Labzovskii, L.D., Chung, C.Y., Kim, Y.H. (2021) Interannual variability of atmospheric CH₄ and its driver over South Korea captured by integrated data in 2019, *Remote Sensing*, 13(12), 2266. <https://doi.org/10.3390/rs13122266>
- Kim, G.-N., Park, J.-P., Shin, J., Kim, T., Kim, N., Lee, J., Kim, D., Kim, H.M., Jercaianu, A., Lee, J., Lee, K., Lee, S., Hong, J., Lee, Y.-R., Jeong, S., Chang, D.Y., Park, H., Choi, Y.-J. (2024, August) NarSha: Pioneering the Korean microsatellite constellation for spaceborne methane monitoring. Paper presented at the Small Satellite Conference, Logan, Utah, United States.
- Kim, H., Lee, Y., Koo, J.-H., Yeo, M.J. (2025) Changes in future carbon dioxide emissions and contributing factors in Southeast Asia under the Shared Socioeconomic Pathways, *Energy for Sustainable Development*, 86, 101721. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2025.101721>
- Kim, H.S., Chung, Y.S., Tans, P.P., Dlugokencky, E.J. (2015) Decadal trends of atmospheric methane in East Asia from 1991 to 2013, *Air Quality, Atmosphere & Health*, 8(3), 293-298. <https://doi.org/10.1007/s11869-015-0331-x>
- Koo, J.H., Walker, K.A., Jones, A., Sheese, P.E., Boone, C.D., Bernath, P.F., Manney, G.L. (2017) Global climatology based on the ACE-FTS version 3.5 dataset: Addition of mesospheric levels and carbon-containing species in the UTLS, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 186, 52-62. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2016.07.003>
- Lee, D., Kim, J.-S., Walker, K., Sheese, P., Park, S.S., Choi, T., Park,

- M., Song, H.-J., Koo, J.-H. (2025) The Influence of Australian Bushfire on the Upper Tropospheric CO and Hydro-carbon Distribution in the South Pacific, *Remote Sensing*, 17(12), 2092. <https://doi.org/10.3390/rs17122092>
- Lee, T., Go, S., Lee, Y.G., Park, S.S., Park, J., Koo, J.-H. (2022) Temporal variability of surface air pollutants in megacities of South Korea, *Frontiers in Environmental Science*, 10, 915531. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.915531>
- Long, K.D., Flanagan, L.B., Cai, T. (2010) Diurnal and seasonal variation in methane emissions in a northern Canadian peatland measured by eddy covariance, *Global Change Biology*, 16(9), 2420-2435. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02083.x>
- Lopez, F.P.A., Zhou, G., Jing, G., Zhang, K., Tan, Y. (2022) XCO₂ and XCH₄ reconstruction using GOSAT satellite data based on EOF-algorithm, *Remote Sensing*, 14(11), 2622. <https://doi.org/10.3390/rs14112622>
- Moon, J., Shim, C., Seo, J., Han, J. (2024) Evaluation of Korean methane emission sources with satellite retrievals by spatial correlation analysis, *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(3), 296. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12449-w>
- Nisbet, E.G., Manning, M.R., Dlugokencky, E.J., Fisher, R.E., Lowry, D., Michel, S.E., Myhre, C.L., Platt, S.M., Allen, G., Bousquet, P., Brownlow, R., Cain, M., France, J.L., Hermansen, O., Hossaini, R., Jones, A.E., Levin, I., Manning, A.C., Myhre, G., Pyle, J.A., Vaughn, B.H., Warwick, N.J., White, J.W.C. (2019) Very strong atmospheric methane growth in the 4 years 2014-2017: Implications for the Paris Agreement, *Global Biogeochemical Cycles*, 33(3), 318-342. <https://doi.org/10.1029/2018GB006009>
- Park, C., Jeong, S., Park, H., Sim, S., Hong, J., Oh, E. (2022a) Comprehensive assessment of vertical variations in urban atmospheric CO₂ concentrations by using tall tower measurement and an atmospheric transport model, *Urban Climate*, 45, 101283. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101283>
- Park, H., Jeong, S., Park, H., Kim, Y., Park, C., Sim, S., Kim, J., Park, J., Kim, H., Choi, J. (2022b) Unexpected urban methane hotspots captured from aircraft observations, *ACS Earth and Space Chemistry*, 6(3), 755-765. <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.1c00431>
- Qin, K., Hu, W., He, Q., Lu, F., Cohen, J.B. (2024) Individual coal mine methane emissions constrained by eddy covariance measurements: low bias and missing sources, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24(5), 3009-3028. <https://doi.org/10.5194/acp-24-3009-2024>
- Saeki, T., Saito, R., Belikov, D., Maksyutov, S. (2012) Global high-resolution simulations of CO₂ and CH₄ using a NIES transport model to produce a priori concentrations for use in satellite data retrievals, *Geoscientific Model Development Discussions*, 5(3), 2215-2258. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-81-2013>
- Sheese, P.E., Boone, C.D., Walker, K.A. (2015) Detecting physically unrealistic outliers in ACE-FTS atmospheric measurements, *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(2), 741-750. <https://doi.org/10.5194/amt-8-741-2015>
- Tanimoto, H., Matsunaga, T., Someya, Y., Fujinawa, T., Ohyama, H., Morino, I., Yashiro, H., Sugita, T., Inomata, S., Müller, A., Saeki, T., Yoshida, Y., Niwa, Y., Saito, M., Noda, H., Yamashita, Y., Ikeda, K., Saigusa, N., Machida, T., Frey, M.M., Lim, H., Srivastava, P., Jin, Y., Shimizu, A., Nishizawa, T., Kanaya, Y., Sekiya, T., Patra, P., Takigawa, M., Bisht, J., Kasai, Y., Sato, T.O. (2025) The greenhouse gas observation mission with Global Observing SATellite for Greenhouse gases and Water cycle (GOSAT-GW): Objectives, conceptual framework and scientific contributions, *Progress in Earth and Planetary Science*, 12(1), 1-33. <https://doi.org/10.1186/s40645-024-00644-8>
- Tunde, O.L., Adewole, O.O., Alobid, M., Szűcs, I., Kassouri, Y. (2022) Sources and Sectoral Trend Analysis of CO₂ Emissions Data in Nigeria Using a Modified Mann-Kendall and Change Point Detection Approaches, *Energies*, 15(3), 766. <https://doi.org/10.3390/en15030766>
- Turner, A.J., Frankenberg, C., Kort, E.A. (2019) Interpreting contemporary trends in atmospheric methane, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(8), 2805-2813. <https://doi.org/10.1073/pnas.1814297116>
- Western, L.M., Rigby, M., Mühle, J., Krummel, P.B., Lunder, C.R., O'Doherty, S., Reimann, S., Vollmer, M.K., Young, D., Adam, B., Fraser, P.J., Ganesan, A.L., Harth, C.M., Hermansen, O., Kim, J., Langenfelds, R.L., Loh, Z.M., Mitrevski, B., Pitt, J.R., Salameh, P.K., Schmidt, R., Stanley, K., Stavert, A.R., Wang, H.-J., Weiss, R.F., Prinn, R.G. (2025) Global emissions and abundances of chemically and radiatively important trace gases from the AGAGE network, *Earth System Science Data Discussions*, 2025, 1-41. <https://doi.org/10.5194/essd-2025-348>
- Yeo, M.J., Lee, D., Kim, Y.P., Koo, J.H. (2025) Long-term visibility trend representing perceived air quality in the Republic of Korea, *Atmospheric Pollution Research*, 16(3), 102422. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2025.102422>
- Zhang, M., Cheng, Y., Bao, Y., Zhao, C., Wang, G., Zhang, Y., Song, Z., Wu, Z., Qiao, F. (2022) Seasonal to decadal spatio-temporal variations of the global ocean carbon sink, *Global Change Biology*, 28(5), 1786-1797. <https://doi.org/10.1111/gcb.15553>

org/10.1111/gcb.16031

Zhou, M., Dils, B., Wang, P., Detmers, R., Yoshida, Y., O'Dell, C.W., Feist, D.G., Velasco, V.A., Schneider, M., De Mazière, M. (2016) Validation of TANSO-FTS/GOSAT XCO₂ and XCH₄ glint mode retrievals using TCCON data from near-ocean sites, *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(3), 1415-1430. <https://doi.org/10.5194/amt-9-1415-2016>

Authors Information

구자호 (연세대학교 대기과학과 부교수)
(zach45@yonsei.ac.kr)

이소정 (환경부 온실가스종합정보센터 연구원)
(fig30@naver.com)

이태경 (연세대학교 대기과학과 박사과정 연구원)
(taegyung@yonsei.ac.kr)

이동희 (연세대학교 대기과학과 박사과정 연구원)
(awzsseed@yonsei.ac.kr)

여민주 (연세대학교 대기과학과 연구교수)
(mjyeo9@gmail.com)

송환진 (경북대학교 자연과학대학 천문대기과학전공 조교수)
(hwanjinsong@knu.ac.kr)

정수중 (서울대학교 환경대학원 교수)
(sujung@snu.ac.kr)

홍재민 (서울대학교 환경대학원 박사후연구원)
(jmhong820@snu.ac.kr)