

지상 기반 온실가스 관측망 TCCON과 COCCON의 CO₂ 및 CH₄ 산출물 교차 검증

박선영¹⁾ · 박주선^{2)*} · 이한림^{1),3)} · 홍현기⁴⁾ · 신선아⁴⁾

¹⁾노바스콥(주), ²⁾부산대학교 환경연구원,

³⁾국립부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보시스템공학전공,

⁴⁾국립환경과학원 환경위성센터

(접수일: 2026년 4월 23일, 수정일: 2026년 6월 30일, 게재확정일: 2026년 7월 13일)

Comparative Assessment of CO₂ and CH₄ from Ground-Based Greenhouse Gas Observation Networks: TCCON and COCCON

Seonyeong Park¹⁾, Juseon Bak^{2)*}, Hanlim Lee^{1),3)}, Hyunkee Hong⁴⁾, and Sun-A Shin⁴⁾

¹⁾NovaScope Co., Ltd, Busan, Korea

²⁾Institute of Environmental Studies, Pusan National University, Busan, Korea

³⁾Major of Spatial Information Engineering, Division of Earth Environmental System Sciences, Pukyong National University, Busan, Korea

⁴⁾Environmental Satellite Center, National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea

(Manuscript received 23 April 2026; revised 30 June 2026; accepted 13 July 2026)

Abstract This study evaluates the consistency of carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) observations between the fixed ground-based Total Carbon Column Observing Network (TCCON) and the portable COllaborative Carbon Column Observing Network (COCCON). A long-term analysis from 2005 to 2025 indicates an increase in CO₂ from approximately 380 to 430 ppm and in CH₄ from 1,750 to 1,900 ppb. Notably, CH₄ concentrations are higher over Asia than over America and Europe. Intercomparisons between TCCON and COCCON measurements suggest that water vapor interference likely accounts for a portion of the differences ($\pm 0.2\%$ for CO₂ and $\pm 0.3\%$ for CH₄) under high humidity conditions (H₂O > 4,000 ppm). Given the stringent target accuracy requirements for greenhouse gas monitoring ($\sim 0.12\%$ for CO₂ and $\sim 0.22\%$ for CH₄), these humidity-induced deviations represent a substantial contribution to measurement uncertainty. Furthermore, CH₄ exhibits a weaker correlation with its a priori information compared to CO₂, indicating greater atmospheric variability. This suggests that refining a priori profiles could further improve CH₄ retrieval accuracy. In conclusion, COCCON shows a high level of consistency with TCCON observations across the collocated sites examined in this study, highlighting its potential as a complementary greenhouse-gas observing network. Nevertheless, further improvements in the treatment of water vapor interference and a priori information may help reduce the remaining retrieval differences.

Key words: CO₂, CH₄, TCCON, COCCON, Comparative assessment

*Corresponding Author: Juseon Bak, Institute of Environmental Studies, Pusan National University, Busan 46241, Korea.
Phone: +82-51-510-3541
E-mail: juseonbak@pusan.ac.kr

1. 서 론

이산화탄소(CO₂)와 메탄(CH₄)은 전 지구적 기후변화를 유발하는 데 있어 가장 중요한 인위적 온실가스이며, 이들 기체의 배출을 효과적으로 관리하기 위한 과학적 정책 수립을 위해서는 신뢰성 있는 장기 모니터링 관측자료의 확보가 필수적이다(Olsen and Randerson, 2004; Wunch et al., 2011a). 대기 조성 관측은 일반적으로 in-situ 지상 및 항공 관측, 지상 기반 원격탐사, 위성 관측으로 구성된 다층적 관측 체계를 통해 수행되며, 각 관측 체계는 정확도와 시·공간적 대표성 측면에서 상호 보완적인 역할을 수행한다. 특히 CO₂와 CH₄는 대기 중 수명이 길고 전 지구적으로 잘 혼합되는 특성을 지니므로 장기간에 걸친 전 지구적 관측이 요구된다. 이러한 측면에서 위성 관측은 전 지구적 공간 대표성을 제공하는 핵심적인 관측 수단으로 기능한다(Yokota et al., 2009; Eldering et al., 2017; Hu et al., 2018; Chan Miller et al., 2024).

위성 관측 기반으로 산출되는 건조공기 물분율(X_{gas})인 XCO₂와 XCH₄는 Global Climate Observing System (GCOS)에서 지정한 핵심 기후변수(Essential Climate Variables, ECVs)에 해당한다. GCOS는 기후 연구에 활용 가능한 수준을 확보하기 위해 XCO₂에 대해 0.5 ppm, XCH₄에 대해 10 ppb의 산출 정확도와, 각각 연간 0.5 ppm yr⁻¹ 및 3 ppb yr⁻¹의 추세 오차 기준을 제시하고 있다(Wunch et al., 2015; GCOS, 2016; Buchwitz et al., 2017). 따라서 온실가스 산출 알고리즘 개발은 매우 높은 정확도가 요구되는 분야로, 이러한 요구 수준을 충족하기 위한 알고리즘 개선과 정교한 오차 특성 관리가 필수적이다. 이와 더불어, 위성 관측의 정확도와 장기 안정성을 독립적으로 평가·보증하기 위한 지상 기반 원격 검증 장비의 개발과 운영이 중요하다.

지상 기반 원격탐사는 고분해능 푸리에 변환 적외선(Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) 분광기를 이용하여 태양 복사가 대기를 통과하면서 나타나는 흡수 스펙트럼을 분석함으로써 주요 온실기체의 전층 평균 건조공기 물분율을 산출하며, 위성 관측의 한계를 보완하고 공간 대표성과 관측 개념이 상이한 관측 체계 간의 차이를 연결하는 역할을 수행한다(Deutscher et al., 2010; Wunch et al., 2010). 이 중 Total Carbon Column Observing Network (TCCON) 관측망은 매우 높은 정확도와 장기적 일관성을 바탕으로 전 지구적 온실가스 관측의 표준으로 널리 인정되고 있다(Wunch et al., 2011a, 2011b; Laughner et al., 2024). 그러나 TCCON은 장비의 규모가 크고 설치 비용이 높아 관측 네트워크 확장에 한계가 있다(Frey et al., 2019; Sha et al., 2020). 반면, Collaborative

Carbon Column Observing Network (COCCON)은 소형화된 FTIR 장비를 기반으로 상대적으로 낮은 비용과 높은 기동성을 제공함으로써, 전 지구적 관측망 확장 측면에서 잠재적인 대안으로 주목받고 있다(Gisi et al., 2012; Hase et al., 2016).

다만 CO₂와 CH₄ 관측은 미세한 장기 변화 추세를 정량적으로 파악하는 것이 핵심 목표이기 때문에, 다른 대기 성분에 비해 관측 정확도와 관측망 간 일관성에 대한 요구 수준이 매우 엄격하다(Wunch et al., 2015). 따라서 COCCON이 TCCON 수준의 정밀도와 안정성을 어느 정도까지 재현할 수 있는지, 그리고 두 관측망 간 측정값이 전 지구적 규모에서 얼마나 일관되게 유지되는지를 체계적으로 평가하는 것은 COCCON의 활용 가능성과 한계를 판단하는 데 필수적이다(Frey et al., 2015; Sha et al., 2020; Alberti et al., 2022; Herkommer et al., 2024).

본 연구는 국내 환경위성센터에서 추진 중인 온실가스 대상 초소형 위성과 지상 원격 검증 도구 개발을 지원하기 위한 사전 연구로써, 전 지구 TCCON 및 COCCON 관측망을 활용하여 CO₂ 및 CH₄ 관측의 정밀도와 일관성을 정량적으로 비교·평가하는 것을 목적으로 한다.

2. 연구 자료 및 방법

2.1 지상 기반 TCCON 및 COCCON 관측망 개요

앞서, TCCON과 COCCON FTIR 시스템의 주요 분광 및 기기 특성을 Table 1에 요약하였다. TCCON은 고정식 FTIR 분광기를 이용하여 태양 직달광의 흡수 스펙트럼을 관측하고, 이를 통해 CO₂, CH₄ 등 전층 평균 건조공기 물분율을 산출하는 지상 기반 원격탐사 관측망이다(Wunch et al., 2011a). TCCON은 엄격한 기기 교정과 표준화된 자료 처리 절차를 기반으로 매우 높은 절대 정확도와 장기적 일관성을 유지하고 있으며(Wunch et al., 2011a, 2015), 위성 온실가스 산출물의 검증자료로 널리 활용되고 있다(Morino et al., 2011; Wunch et al., 2017). 이와 더불어, TCCON은 GCOS가 요구하는 온실가스 관측 정확도 기준을 충족하는 대표적인 지상 관측 체계로 평가되고 있다(Wunch et al., 2011a). 다만, 고정식 고분해능 장비의 설치 및 운영에 따른 높은 비용과 복잡성으로 인해, 관측소의 공간적 확장에는 구조적인 제약이 존재한다(Frey et al., 2019; Sha et al., 2020).

COCCON은 Karlsruhe Institute of Technology (KIT)가 Bruker Optics와의 협업을 통해 개발한 지상 기반 원격관측 장비 네트워크로, 높은 이동성과 비용 효율성을 바탕으로 TCCON을 보완하고 온실가스 관측의 공간적 확장성을 제공하는 것을 목표로 한다(Frey et

Table 1. Comparison of spectral characteristics between TCCON and COCCON FTIR instruments.

	TCCON	COCCON
Institution	Caltech	KIT
Spectrometer	Bruker IFS 125HR (standard) 120HR	Bruker EM27/SUN
Spectral range	3,800~11,000 cm^{-1} ($\approx 0.9\sim 2.5 \mu\text{m}$)	4,000~11,000 cm^{-1} ($\approx 0.9\sim 2.5 \mu\text{m}$)
Spectral resolution	High-resolution (0.02 cm^{-1})	Low-resolution (0.5 cm^{-1})
Sampling rate	$\approx 0.007\sim 0.01 \text{ cm}^{-1}$	$\approx 0.2\sim 0.25 \text{ cm}^{-1}$
Retrieval algorithm	GGG (GFIT)	PROFFAST
N of stations (26.04.01)	34	37
References	Wunch et al. (2015) Laughner et al. (2024)	Frey et al. (2019) Herkommer et al. (2024)

al., 2019; Alberti et al., 2022; Herkommer et al., 2024). COCCON은 휴대형 푸리에 변환 적외선 분광기인 EM27/SUN을 기반으로 구축되었으며(Gisi et al., 2012; Hase et al., 2016), 장비의 이동성과 운용 유연성을 통해 고정식 관측소 중심으로 운영되는 TCCON이 포착하기 어려운 국지적 배출 특성과 공간적 이질성을 보완하는 역할을 수행해 왔다. 특히 대도시, 산업 지역, 선박 플랫폼 등 특정 배출원이 존재하는 지역에서의 집중 관측 캠페인에 효과적으로 활용되어 왔다(Hase et al., 2015; Klappenbach et al., 2015; Luther et al., 2019; Vogel et al., 2019). 관측 자료의 신뢰성과 관측망 내 일관성을 확보하기 위해 COCCON은 KIT에서 정의한 공통 기기 구성과 표준화된 자료 처리 절차를 적용하고 있다.

TCCON의 산출 알고리즘은 GGG 소프트웨어를 기반으로 하며, 최신버전인 GGG2020은 이전 버전인 GGG2014에 비해 a priori 프로파일 및 분광 데이터베이스 등 주요 산출요소가 개선되었다. 특히 a priori 프로파일 생성에 사용되는 ginput 모델은 GEOS 기상 재분석 자료를 기반으로 대기 수증, 지연 시간, 그리고 성층권 화학 과정을 반영하여 매우 정밀한 연직 분포를 제공한다(Laughner et al., 2023).

COCCON의 산출 알고리즘은 PROFFAST를 기반으로 하며, 저분광 해상도 관측 특성을 보완하면서 TCCON과 공통된 산출 기반 위에서 운영되도록 개발되었다(Herkommer et al., 2024). 특히 TCCON의 ginput 모델이 COCCON에 공유되어 적용된다(Laughner et al., 2024). 또한, 두 관측망의 산출은 분광 피팅 과정에서 관측 스펙트럼과 모의 스펙트럼 간 잔차(residual)를 최소화하도록 각 기체별 스케일링 계수를 최적화

하고, 이를 a priori 프로파일에 적용한 뒤 적산하여 전층 컬럼 농도를 산출하는 동일한 물리적 방법론을 따른다(Laughner et al., 2024; Herkommer et al., 2024). 다만, 분광 해상도의 근본적인 차이로 인해 자료처리 과정 및 산출특성에 차이가 있다. 첫째, 기기 선형 함수(ILS)의 결정 및 검증 방식이 다르다. TCCON은 0.02 cm^{-1} 의 고해상도 장비를 사용하므로, 광경로차(OPD)가 긴 구간에서의 변조 효율(modulation efficiency)을 산정하기 위해 저압 가스 셀을 이용한 정밀한 ILS 관측을 수행한다(Herkommer et al., 2024). 반면, COCCON은 0.5 cm^{-1} 의 저해상도 기기를 사용하므로 동일 수준이 고 OPD 간섭계 정보를 확보할 수 없어 TCCON과 동일한 수준의 세밀한 ILS 관측이 제한된다(Herkommer et al., 2024). 둘째, 분광 해상도의 차이는 근본적으로 각 기기가 수집할 수 있는 분광 정보량 자체에 차이를 발생시킨다. 이는 대기에 대한 연직 민감도와 오차 전파양상을 다르게 만들며, 결과적으로 목표 기체의 분광 특성에 따라 스펙트럼 피팅 정확도가 달라진다(Herkommer et al., 2024). 그러나 COCCON은 TCCON과 연동된 공통 기준 기기와의 비교 관측을 통해 물리적 한계로 인한 편향을 체계적으로 교정할 수 있는 구조를 갖추고 있다(Herkommer et al., 2024).

2.2 전 지구 관측소 분포 및 동시 관측 자료

TCCON을 구성하는 고정식 FTIR 분광기는 2004년 미국 위스콘신주 Park Falls에 첫 번째 관측소가 설치된 이후 전 지구적으로 확장되어 왔으며, 현재 약 34개의 관측소가 운영 중이다. 한편, COCCON은 2014년 이후 휴대용 FTIR 기반의 관측을 본격적으로 시

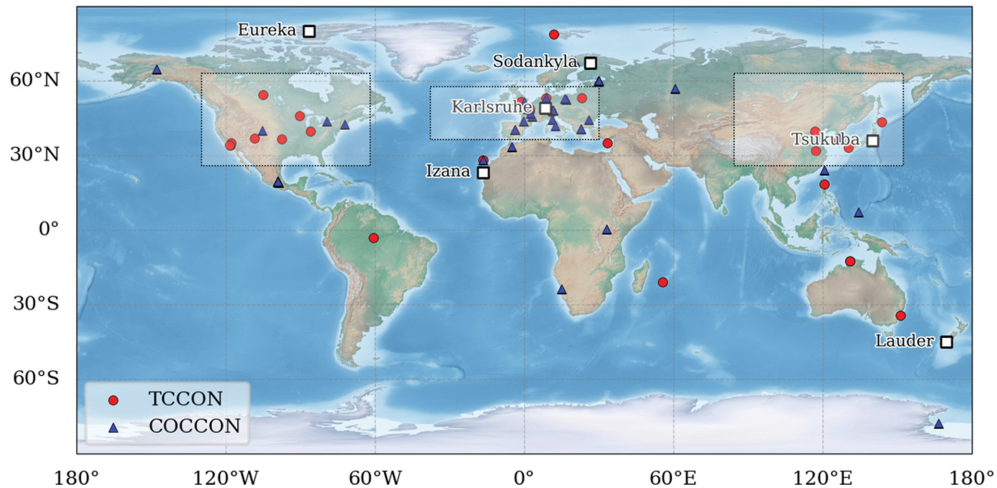


Fig. 1. Global distribution of TCCON (red circles) and COCCON (blue triangles) sites as of April 2026. Labeled sites indicate locations with concurrent TCCON and COCCON observations.

작하였고, 현재 37개 이상의 기기가 전 운영되고 있다. Figure 1은 2026년 4월 기준 TCCON과 COCCON 관측소의 전 지구적 분포를 제시한다.

본 연구에서 TCCON-COCCON 동시 관측 자료 비교에 활용 가능한 관측소는 총 4개로, 핀란드의 Sodankylä, 독일의 Karlsruhe, 일본의 Tsukuba, 스페인의 Izaña이다. 뉴질랜드의 Lauder 관측소의 경우 동시 관측이 수행되었으나 남반구에 위치하고 있어 북반구 중심의 본 연구 분석 대상에서 제외하였으며, 캐나다의 Eureka 관측소는 두 관측 장비가 모두 설치되어 있으나 공통 기간에 수행된 유효 관측 자료가 존재하지 않아 분석에서 제외하였다.

본 연구에서는 표준 데이터베이스에서 배포하는 Level 2 산출물을 사용하였다. TCCON과 COCCON의 Level 2 자료는 각 데이터 센터에서 표준화된 품질관리 절차를 거쳐 배포되므로(Herkommer et al., 2024; Laughner et al., 2024), 본 연구에서는 별도의 추가 필터링 없이 배포된 자료를 그대로 사용하였다.

TCCON과 COCCON의 동시 관측 자료 비교를 위해 시간 매칭 기준을 다음과 같이 설정하였다. 두 관측 자료가 같은 날에 측정된 자료를 동시 관측으로 정의하였으며, 이를 기반으로 일평균값을 산출하였다. 일평균값은 개별 관측값들을 현지 시간 기준 일일 단위로 평균하여 산출하였으며, 월평균값은 일평균값을 월 단위로 다시 평균하였다. 월별 최소 5일 이상의 유효 자료를 포함하는 경우만 최종 비교 분석을 위한 월평균값으로 산출하여 분석의 통계적 안정성을 확보하였다.

본 연구에서 사용된 자료의 처리 버전은 다음과 같

다. TCCON 자료는 모든 관측소에서 GGG2020 버전의 산출물을 사용하였다. COCCON 자료의 경우, Karlsruhe, Tsukuba, Izaña 관측소는 GGG2020 버전을 적용하였으나, Sodankylä 관측소는 공개 자료가 GGG2014 버전으로만 제공되므로 이를 사용하였다.

2.3 관측망 간 일치도 분석 방법

TCCON과 COCCON 관측망 간 산출물의 일치도를 정량적으로 평가하기 위해, 동시 관측 기간의 월평균 자료를 대상으로 선형 회귀 분석을 수행하였다. TCCON 관측 값을 기준 값, COCCON 관측 값을 비교 값으로 설정하였으며, 평가지표로 결정계수(R^2), 평균 제곱근 오차(RMSE), 평균 오차(MB)를 계산하였다.

결정계수는 두 관측망이 계절 변동 및 장기 추세 등 시간적 변동 패턴을 얼마나 유사하게 추종하는지를 나타낸다. RMSE는 개별 데이터 쌍 간 절대 오차의 크기를 나타내며 다음과 같이 정의된다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}$$

여기서 x_i , y_i 는 각각 i 번째 달의 TCCON, COCCON 월평균 값이며, N 은 비교에 사용된 월평균 자료의 개수로, 2.2절에서 정의한 ‘월별 최소 5일 이상의 유효 자료를 포함하는 달’의 수와 일치한다. MB는 두 관측망 간 산출 값의 평균 차이를 나타내는 지표로, 한 관측망의 값이 다른 관측망에 비해 전반적으로 높거나 낮게 산출되는 편이의 방향과 크기를 정량화 한다. 모든 통계 분석은 관측소별로 독립적으로 수행하여,

관측소별 환경 특성 및 기기 특성에 따른 일치도 경향을 비교하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 산출물별 배경 농도 및 계절성 비교

본격적인 교차 비교에 앞서, 분석 대상 기체인 CO_2 와 CH_4 의 시·공간적 특성을 파악할 필요가 있다. Figure 2는 Fig. 1에 제시된 장비 분포 지도에서 북반구 관측소를 대륙별(America, Europe, Asia)로 구분하여 산출한 일평균 XCO_2 (상단) 및 XCH_4 (하단)의 시계열을 제시한다. 두 기체 모두 전 기간에 걸쳐 뚜렷한 장기 증가 추세를 보이며, 대륙 간 절대 농도 수준과 계절 변동성에서 일부 차이가 나타난다. XCO_2 는 세 대륙에서 유사한 계절 주기와 진폭을 나타내며, 대륙 간 위상 및 진폭 차이는 시각적으로 크게 구분되지는 않는다. 이는 CO_2 의 대기 중 수명이 길어 북반구에서 비교적 잘 혼합되어 나타나기 때문이며, 동시에 식생의 광합성 및 호흡 활동에 따른 생물권-대기 간 교환의 계절성이 주요한 영향을 미치기 때문으로 해석된다. 반면, XCH_4 는 XCO_2 에 비해 계절 변동 폭이 상대적으로 작고 완만한 패턴을 보이지만, 대륙별 배경 농도 수준의 차이는 보다 뚜렷하게 나타난다. 특히 Asia에서는 America와 Europe에 비해 각각 평균 약 38 ppb 및 37 ppb 높은 농도가 구분되었다. 그러나 중국(Xianghe, Hefei)과 일본(Saga, Tsukuba, Rikubetsu) 등 관측소가 위치한 지역 자체가 CH_4 고배출 지역이 아님을 고려할 때, 이러한 상대적 높음은 중국 내 다른 고배출 지역에서 발생한 CH_4 가 대기 중으로 확산되어 일부 반영된 결과로 이해할 수 있다.

3.2 관측망 간 상호 일관성 평가

TCCON과 COCCON 관측망에서 사용되는 장비는 약 1분 간격의 높은 시간 해상도로 관측을 수행하지만, 태양 직달광 스펙트럼을 이용하는 관측 방식의 특성상 구름이 존재할 경우 정상적인 자료 획득이 어렵다. 또한 일중 관측에서는 태양 천정각(solar zenith angle, SZA)의 변화에 따라 분광 품질이 영향을 받을 수 있다(Hachmeister et al., 2025). Figure 3은 2023년 Karlsruhe 관측소에서 수행된 TCCON과 COCCON의 동시 관측일에 대한 XCO_2 와 XCH_4 의 일중 변화를 보여준다. 파란색 계열은 겨울철(2월)의 사례일을, 붉은색 계열은 여름철(8월)의 사례일을 나타낸다.

일반적으로 원시 산출 질량 농도는 공기질량(air mass) 효과와 기기적 요인의 영향으로 SZA 변화와 연관된 일변화를 나타내는 것으로 알려져 있다. 그러나 본 자료에 사용된 두 관측망의 산출물에는 모두 후처리 보정이 적용되어 있어 이러한 경향이 뚜렷하게 나타나지 않는다. 또한 두 관측망 간 자료 처리 기준의 차이로 인해 유효 산출 자료가 존재하는 시간 범위에 차이가 발생하며, 특히 태양 고도가 낮은 겨울철에는 시간에 따른 노이즈 변동성이 상대적으로 크게 나타나는 경향이 확인된다.

이에 따라 본 연구에서는 일변동성에 의한 오차를 최소화하고 두 자료를 일관되게 비교하기 위해, 공통적으로 안정적인 관측이 확보되는 시간대인 10~15시(현지 시각 기준)의 평균값을 대표 값으로 정의하여 분석에 활용하였다.

Figure 4는 공통 관측이 수행된 4개 관측소를 대상으로, 2014년부터 2024년까지의 월별 관측 일수를 연도와 월의 함수로 나타낸 히트맵이다. 그림의 상단은 TCCON, 하단은 COCCON의 자료를 각각 제시한다.

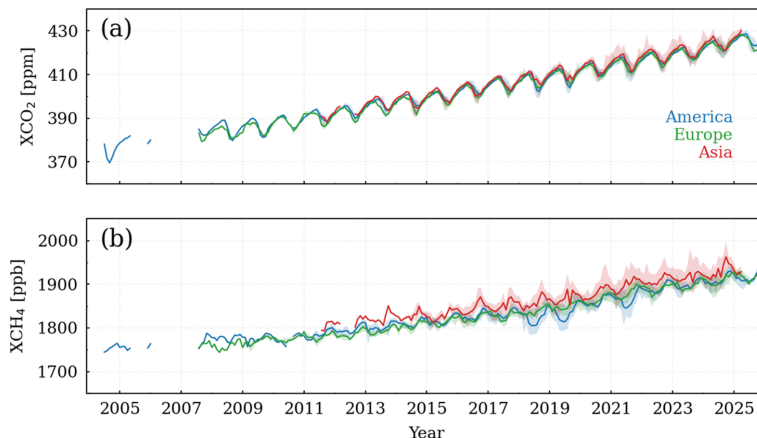


Fig. 2. Monthly mean time series of XCO_2 (a) and XCH_4 (b), over the three continental regions shown in Fig. 1, based on TCCON observations alone (2005~2013) and combined TCCON and COCCON observations (2014~2025).

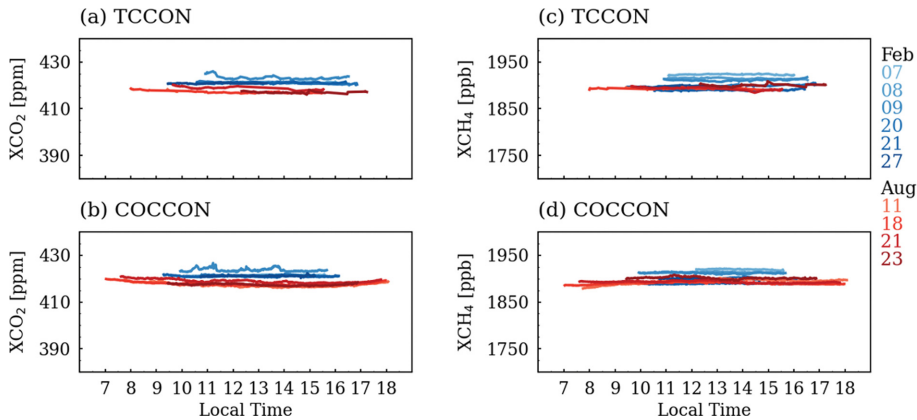


Fig. 3. Diurnal variations of XCO₂ (a, b) and XCH₄ (c, d) at the Karlsruhe site observed by TCCON (a, c) and COCCON (b, d) on coincident observation days in 2023. Blue lines represent winter cases (February); red lines represent summer cases (August).

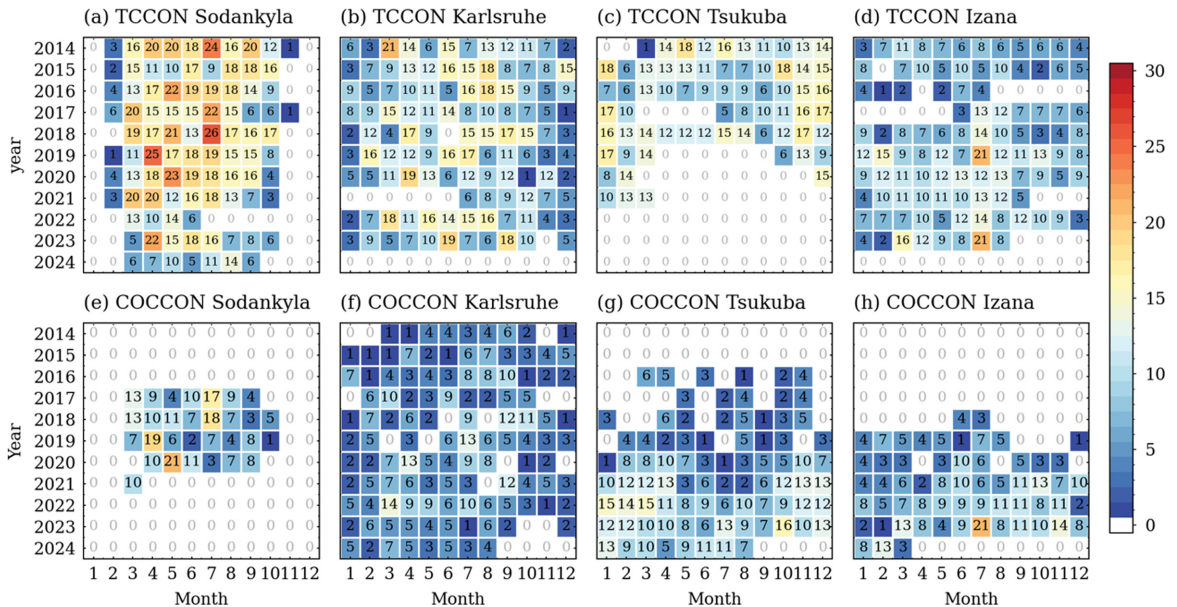


Fig. 4. Heat maps of the number of monthly observation days as a function of month and year for TCCON (a-d) and COCCON (e-h) at the four co-located sites.

고정형 네트워크인 TCCON은 대부분의 관측소에서 월 15~25일 이상의 안정적인 관측을 수행한 반면, 이동형 장비인 COCCON의 월별 자료 가용성은 상대적으로 낮다.

Figure 5는 공통 관측이 수행된 4개 관측소를 대상으로 월평균 XCO₂(좌) 및 XCH₄(우) 농도를 1:1 비교한 산점도이다. 두 기체 모두 대부분의 관측소에서 계절에 따른 편이는 뚜렷하게 나타나지 않았으며, 자료가 1:1 기준선에 근접하게 분포하여 두 관측망 간 선형성이 매우 높고 편이가 크지 않음을 확인하였다. 그

러나 Sodankylä 관측소에서는 XCO₂의 경우 RMSE = 0.99 ppm, MB = -0.94 ± 0.31 ppm으로, COCCON이 TCCON에 비해 계절과 무관하게 일관된 음의 편이를 보였다. 한편 XCH₄의 경우 약 $R^2 = 0.90$ 으로 다른 관측소에 비해 상대적으로 낮은 설명력을 보였으며, RMSE = 8.48 ppb, MB = 6.72 ± 5.27 ppb로 COCCON이 TCCON에 비해 일관되게 높은 양의 편이가 확인되었다. 또한 다른 관측소에서는 두 장비 간 월평균 농도의 최대~최소 범위가 유사하게 나타난 반면, Sodankylä의 XCH₄에서는 COCCON의 변동 범위가 상

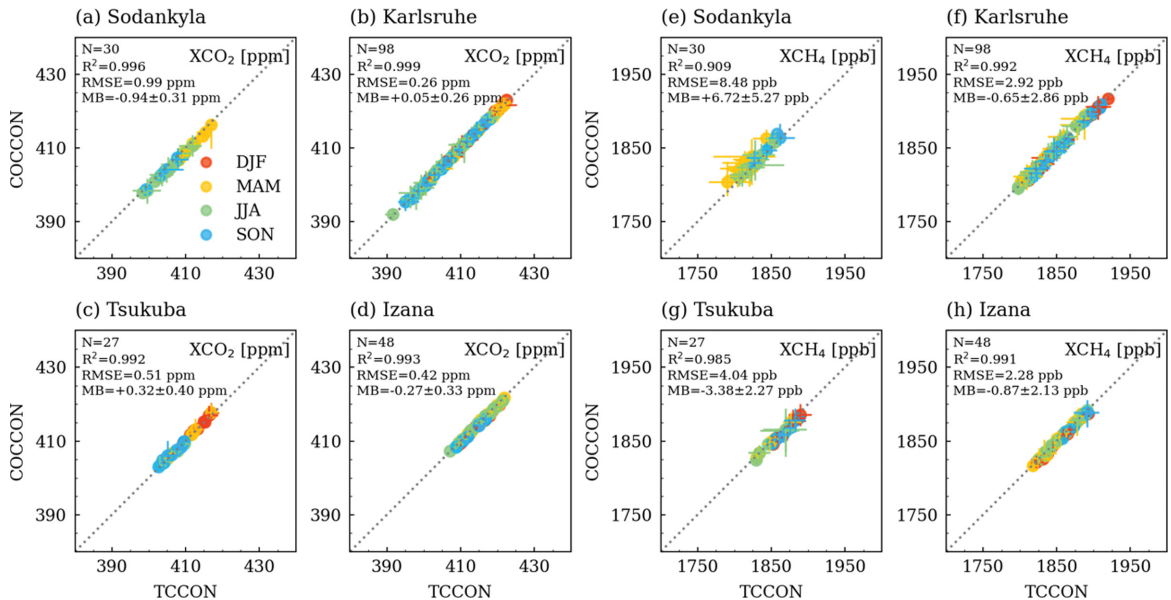


Fig. 5. Site-by-site comparisons of XCO₂ (a-d) and XCH₄ (e-h) between TCCON (x-axis) and COCCON (y-axis) at the four co-located sites. Markers denote monthly mean values, and crossbars indicate the corresponding monthly minimum and maximum values. The diagonal line denotes the 1:1 relationship. The coefficient of determination (R^2), root-mean-square error (RMSE), and mean bias (MB; COCCON-TCCON) are given in each panel.

대적으로 좁게 나타났다.

Sodankylä를 제외한 나머지 관측소에서는 두 관측망의 자료가 일평균 및 월평균 수준에서 매우 높은 일치도를 보였다. 다음 3.3~3.5절에서는 산출 결과에 미치는 a priori의 영향, 관측 기하 조건, 그리고 수증기 간섭 효과에 따른 영향을 단계적으로 분석한다.

3.3 A priori와 산출 컬럼 농도의 상관성

본 절에서는 3.2 절에서 TCCON과 COCCON 간 높은 일치도를 보인 관측소들을 대상으로 TCCON 산출 컬럼과 a priori 간의 전반적인 상관성을 분석하였다 (Fig. 6). 반면 두 관측망 간 농도 차이가 나타난 Sodankylä 관측소에 대해서는 그 원인을 a priori의 관점에서 해석하기 위해 보다 상세한 분석을 수행하였다 (Fig. 7).

Figure 6에 따르면, Karlsruhe, Tsukuba, Izaña 관측소의 XCO₂ 산출 컬럼은 a priori와 높은 일치도를 보였으며, ginput 기반 a priori가 XCO₂의 일변동과 계절성뿐만 아니라 장기적인 증가 추세까지 잘 반영하는 것으로 나타났다. 반면 XCH₄ 산출 컬럼은 a priori와 비교적 독립적인 변동 특성을 보였다. 특히 Karlsruhe와 Izaña의 최근 관측 자료에서는 산출 컬럼이 a priori보다 더 높게 나타났는데, 이는 ginput이 예측한 장기 증가율보다 대기 중 XCH₄의 실제 증가 속도가 더 빠

른 것으로 해석할 수 있다. 이러한 차이는 ginput 기반 a priori가 전 지구적 배경 농도의 장기 추세를 반영하도록 설계되어 있어, 지역적인 배출원에 의해 발생하는 XCH₄의 변동성을 충분히 포착하지 못하는 데서 기인하는 것으로 보인다.

한편, COCCON은 TCCON과의 산출 일관성을 확보하기 위해 동일한 ginput 기반 a priori를 사용하므로, Fig. 6의 TCCON 분석 결과는 COCCON 자료에도 유사하게 나타난다. 그러나 Sodankylä 관측소의 경우, XCO₂와 XCH₄ 모두에서 TCCON과 COCCON 간 a priori 값에 차이가 나타난다 (Fig. 7). 이러한 차이는 두 네트워크에서 사용된 ginput 버전의 차이에서 기인한 것으로 판단된다. 즉, TCCON과 COCCON은 각각 GGG2020과 GGG2014 기반의 a priori가 적용되었다. XCO₂의 경우, 두 네트워크 간 계절 변동 경향은 유사하게 나타나지만, COCCON의 a priori가 TCCON에 비해 전반적으로 약 0.98 ppm 낮게 나타나 (MB = -0.98 ± 0.28 ppm) 일정한 offset을 보였다. 반면 XCH₄는 COCCON의 a priori가 전반적으로 과대 산출되었으며 (MB = 7.07 ± 5.73 ppb), 그 차이는 계절에 따라 변동성을 보였고 특히 3월과 4월에 두드러졌다. 이러한 a priori의 차이는 Figs. 5a, e에서 확인된 Sodankylä 관측소의 두 관측망 간 산출 값 차이를 유발한 주된 원인으로 해석할 수 있다.

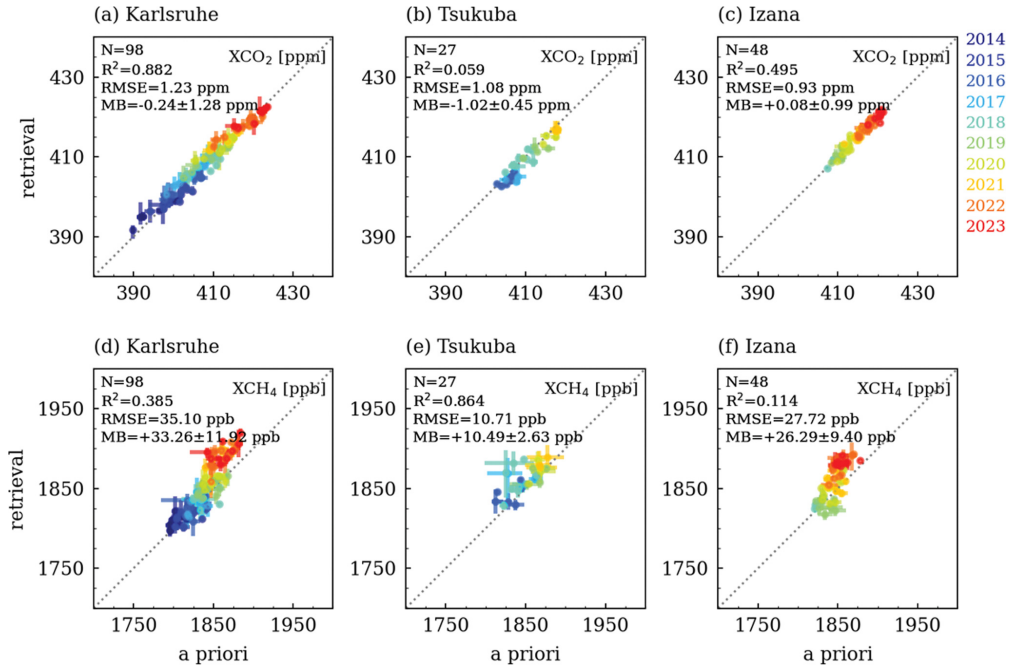


Fig. 6. Comparison between a priori and retrieved XCO₂ (a-c) and XCH₄ (d-f) from TCCON observations at Karlsruhe, Tsukuba, and Izaña. Different colors represent individual years (2014–2023). Marker and crossbar definitions, the 1:1 line, and the statistical metrics are the same as those in Fig. 5.

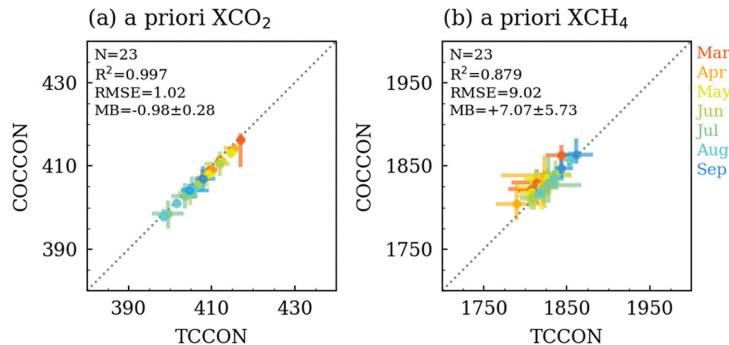


Fig. 7. Comparison of the a priori XCO₂ (a) and XCH₄ (b) used in TCCON (x-axis) and COCCON (y-axis) retrievals at the Sodankylä site during 2017–2019. Different colors represent individual months (March–September). Marker and crossbar definitions, the 1:1 line, and the statistical metrics are the same as those in Fig. 5.

3.4 관측 기하 의존성 분석

적당량 기반 TCCON 및 COCCON 관측에서는 SZA에 따른 공기 질량 의존성(air mass dependence, AMD)이 존재하며, 이는 분광학적 불확실성, 비선형 흡수 특성, 그리고 기기 특성 등에 의해 발생한다. 네트워크 전반에 걸쳐 이러한 AMD의 영향을 완화하기 위한 경험적 보정이 공통적으로 적용되고 있으나, 보정 후에도 잔여 의존성이 나타날 가능성이 존재한다

(Hachmeister et al., 2025).

본 연구에서는 이러한 잔여 의존성을 평가하기 위해, 유효 관측일 수가 가장 많은 Karlsruhe 관측소의 자료를 선정하여 SZA 변화에 따른 산출 농도의 변동성을 분석하였다(Fig. 8). 특히 온실가스 농도 자체의 자연적인 계절 변동성 및 장기 증가 추세가 SZA 오차 분석에 미치는 영향을 최소화하기 위해 분석 기간을 2023년으로 제한하였다. 파란색 계열은 겨울철(2

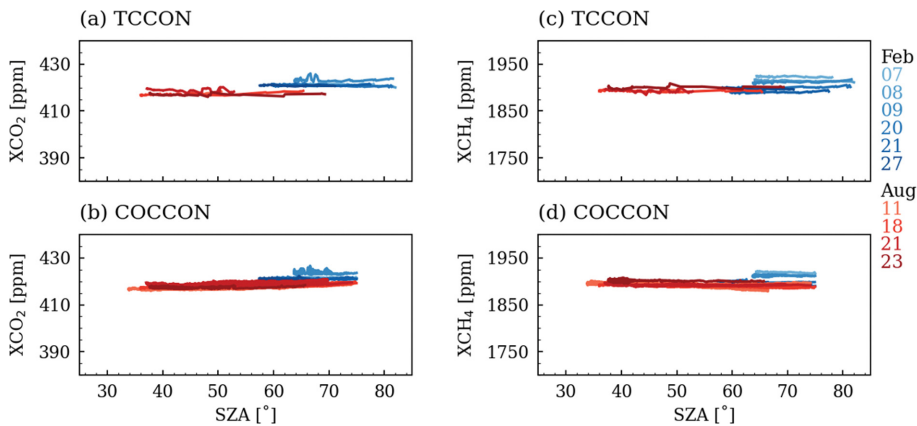


Fig. 8. XCO₂ (a, b) and XCH₄ (c, d) as a function of SZA at the Karlsruhe site measured by TCCON (a, c) and COCCON (b, d), respectively. Different shades of blue and red represent individual observation days in February 2023 and August 2023, as listed on the right.

월)의 사례일을, 붉은색 계열은 여름철(8월)의 사례일을 나타낸다.

분석 결과, 해당 기간 동안 SZA 변화에 따른 산출 농도의 뚜렷한 변동성이나 편향은 보이지 않았다. 경험적 보정이 적용된 TCCON 및 COCCON 산출물 모두 SZA의 변화와 무관하게 안정적인 농도 분포를 유지하였으며, 유의미한 잔여 의존성은 존재하지 않음을 확인하였다. 이는 현재 두 네트워크에 적용되고 있는 AMD 보정 알고리즘이 관측 기하학적 오차를 잘 제거하고 있음을 시사한다.

3.5 수증기 간섭 효과 분석

수증기(H₂O) 흡수선은 근적외선 영역 전반에 걸쳐 넓게 분포하며, 특히 XCO₂ 및 XCH₄ 산출에 있어 주요 간섭 기체로 작용한다(Schneider et al., 2010; Yoshida et al., 2013). 또한 수증기는 온도와 압력에 따라 흡수선의 강도와 선 폭이 민감하게 변화하며, 수증기 자체의 계절 및 일변동성도 크기 때문에 정확한 산출이 어렵다(Klappenbach et al., 2022; Trisna et al., 2025). 이러한 수증기의 특성은 분광 해상도가 서로 다른 TCCON과 COCCON 간 수증기 산출 결과에 차

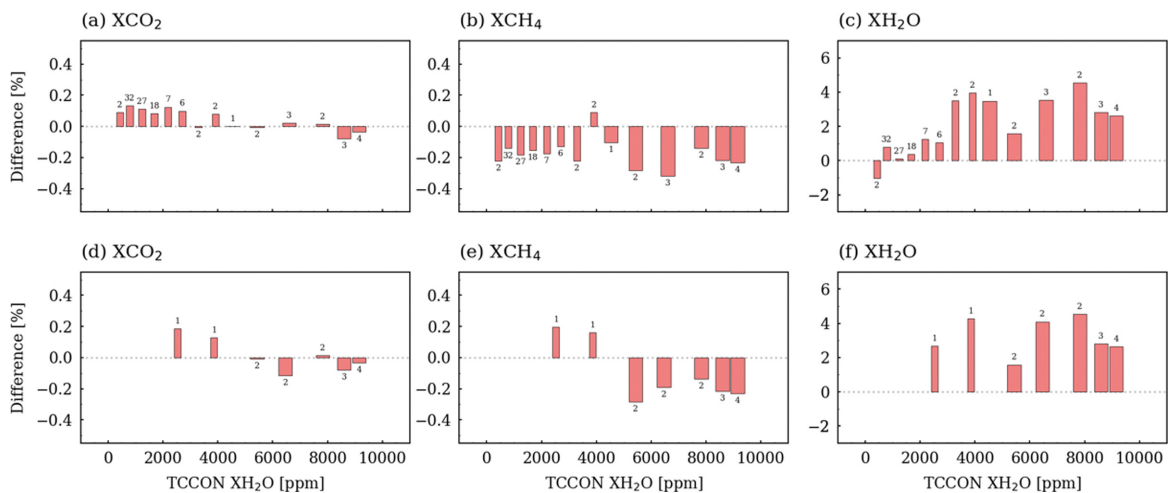


Fig. 9. Relative differences (COCCON-TCCON) in XCO₂, XCH₄, and XH₂O as a function of TCCON XH₂O at the Tsukuba site during 2016–2021. Panels (a–c) include all matched observations, whereas panels (d–f) include only summer observations (June, July, and August). Bars represent the mean relative difference for each TCCON XH₂O bin. Numbers above the bars indicate the number of matched observations in each bin.

이를 유발할 수 있으며, 이는 XCO₂ 및 XCH₄ 산출에 전가될 가능성이 존재한다. 특히 XCH₄ 산출에 주로 활용되는 1.6 μm 대역은 수증기 흡수선과 직접적으로 중첩되어 있어 간섭 효과가 더욱 크게 나타날 수 있다(Frankenberget al., 2008; Sussmann et al., 2011).

이에 본 연구에서는 수증기 간섭에 따른 두 관측망 간의 일관성을 검토하기 위해, 여름철 수증기 농도가 약 10,000 ppm까지 증가하는 Tsukuba 관측소의 자료를 분석하였다. Figure 9는 COCCON과 TCCON 관측값의 상대적 차이(COCCON-TCCON)를 XCO₂와 XCH₄에 대해 TCCON XH₂O 구간별로 나타낸 것이다.

분석 결과, 계절에 관계없이 모든 매칭 관측치를 포함한 경우(Figs. 9a, b)에서도 고수증기 조건에서 두 대상 기체 모두 COCCON의 음의 편향이 나타났으며, 이러한 수증기 간섭 효과는 여름철(6~8월) 관측만을 대상으로 한 경우(Figs. 9b, e)에서 더욱 뚜렷하게 확인되었다. 구체적으로, XCO₂의 경우 두 기기 간 산출값의 상대 차이는 수증기 농도 4,000 ppm을 기준으로 구분되며, 4,000 ppm 이하에서는 약 -0.2% 내외, 4,000 ppm 이상에서는 약 0.15% 수준의 편향을 나타냈다. XCH₄의 경우에도 4,000 ppm 이하에서는 약 0.2% 수준의 차이를 보였으나, 4,000 ppm 이상에서는 약 -0.3% 수준의 음의 편향으로 전환되는 뚜렷한 구간적 특성을 나타냈다. 다만 적당량 관측 기반 자료의 특성상 여름철 관측 샘플 수가 상대적으로 제한되어 있어 수증기 간섭 효과를 통계적으로 일반화하기에는 한계가 존재한다. 그럼에도 불구하고 XH₂O 자체에서도 TCCON과 COCCON 간의 뚜렷한 편향이 확인되며(Figs. 9c, f), 이는 수증기가 XCO₂ 및 XCH₄ 산출 과정에 공통적으로 영향을 미치는 변수라는 점에서 수증기 효과를 완전히 배제하기 어렵다.

4. 결 론

본 연구에서는 지상 기반 온실가스 원격관측의 고정형 표준 네트워크인 TCCON과 이동형 표준 네트워크인 COCCON 간의 상호 일관성을 평가하였다. 북반구 관측소 자료를 기반으로 온실가스 모니터링의 주요 대상인 CO₂ 및 CH₄의 장기 변동성을 대륙별로 분석한 결과, 2005년부터 2025년까지 XCO₂는 약 380 ppm에서 430 ppm 수준으로 증가하였으며, XCH₄ 또한 약 1,750 ppb에서 1,900 ppb 수준으로 증가하는 경향을 보였다.

특히 아시아 지역에서 XCH₄ 농도가 상대적으로 높게 나타났으나, 현재 아시아 내 관측소가 한국, 중국, 일본 일부 국가에 제한적이어서 공간적 대표성을 확보하기 위해서는 향후 관측 공백 지역에 대한 네트워크 확충이 필수적이다. 이러한 관측 공백을 해소하기

위해서는 구축 비용이 상대적으로 낮고 이동이 가능한 COCCON 관측망의 확대가 효과적인 대안이 될 수 있다.

두 관측망 간의 산출물 일관성을 비교한 결과, COCCON은 대부분의 조건에서 TCCON과 매우 높은 일치도를 유지함을 확인하였다. 특히 관측 기하학적 오차를 유발하는 주요 요인인 SZA에 따른 공기 질량의존성(AMD)을 평가한 결과, SZA 변화에 따른 산출농도의 뚜렷한 변동성이나 잔여 의존성은 관찰되지 않았다. 이는 현재 적용 중인 경험적 보정 알고리즘이 관측 기하학적 오차를 잘 제거하고 있음을 의미한다.

다만, 기기 분해능 차이(고해상도 TCCON vs 저해상도 COCCON)에 따른 특정 조건에서의 한계점도 확인되었다. 수증기 농도 4,000 ppm 이상의 고수증기 환경에서는 수증기 간섭 효과로 인해 CO₂ 약 $\pm 0.2\%$, CH₄ 약 $\pm 0.3\%$ 수준의 편차가 발생하였다. 이는 TCCON GGG2020 최신 버전에서 보고된 목표 오차 수준(각각 약 0.12% 및 0.22%, Herkommer et al., 2024)과 비교할 때 무시하기 어려운 크기이며, 여름철 고수증기 환경이 빈번한 국내 관측 조건에서는 수증기 간섭 효과를 정교하게 보정할 수 있는 알고리즘 개발의 필요성을 지시한다. 또한, CH₄는 CO₂에 비해 a priori와 산출 결과 간의 상관성이 상대적으로 낮게 나타나 관측으로부터 독립적인 정보가 강하게 반영되고 있음을 확인하였다. 이는 CH₄의 대기 중 지역적·단기적 변동성이 존재함을 지시하며, 동시에 a priori 프로파일의 품질 개선을 통해 산출 정확도를 추가로 향상시킬 수 있는 여지가 있음을 보여준다.

특히 본 연구에서 확인된 TCCON과 COCCON 간의 높은 일치도는 두 관측망을 상호 보완적으로 활용할 수 있음을 보여주며, 현재 제한적인 온실가스 관측망의 공간적 한계를 보완하고 지역 규모의 온실가스 변동성 및 배출원 연구를 지원할 수 있는 기반을 제공한다. 그러나 고수증기 환경에서의 분광 간섭 효과와 CH₄ 산출의 a priori 민감도는 관측 정확도 및 장기 안정성에 영향을 미칠 수 있는 주요 요인으로, 향후 국내 독자 장비 개발 과정에서 고수증기 조건에 대한 보정 체계 마련과 CH₄ a priori 프로파일 개선을 포함한 알고리즘 정교화가 필수적이다.

향후 국내에서 TCCON 또는 이와 동등한 성능의 관측소 자료가 충분히 축적되면, 본 연구에서 평가한 두 관측망 간의 일관성과 성능 특성을 국내 지역 조건에서 직접 검증할 수 있을 것으로 기대된다. 이는 지역 규모의 온실가스 변동성 및 배출원 연구를 심화시키고, 국내 독자 관측장비 개발 및 성능 검증의 과학적 기초를 제공할 수 있을 것이다. 본 연구에서 수행한 TCCON-COCCON 상호 일관성 분석 결과는 향후 국내 독자 장비 개발, 성능 검증 및 지상 검증 관

측망 구축을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다. 또한 본 연구는 향후 온실가스 위성자료 검증에 COCCON 관측자료를 활용할 수 있는 가능성을 제시한다.

감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심사위원께 감사를 드립니다. 이 연구는 국립환경과학원 원격장비를 이용한 위성 검증 도구 개발(III)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Alberti, C., and Coauthors, 2022: Improved calibration procedures for the EM27/SUN spectrometers of the Collaborative Carbon Column Observing Network (COCCON). *Atmos. Meas. Tech.*, **15**, 2433-2463, doi:10.5194/amt-15-2433-2022.
- Buchwitz, M., and Coauthors, 2017: Global satellite observations of column-averaged carbon dioxide and methane: The GHG-CCI XCO₂ and XCH₄ CRDP3 data set. *Remote Sens. Environ.*, **203**, 276-295, doi:10.1016/j.rse.2016.12.027.
- Chan Miller, C., and Coauthors, 2024: Methane retrieval from MethaneAIR using the CO₂ proxy approach: a demonstration for the upcoming MethaneSAT mission. *Atmos. Meas. Tech.*, **17**, 5429-5454, doi:10.5194/amt-17-5429-2024.
- Deutscher, N. M., and Coauthors, 2010: Total column CO₂ measurements at Darwin, Australia – site description and calibration against in situ aircraft profiles. *Atmos. Meas. Tech.*, **3**, 947-958, doi:10.5194/amt-3-947-2010.
- Eldering, A., and Coauthors, 2017: The Orbiting Carbon Observatory-2 early science investigations of regional carbon dioxide fluxes. *Science*, **358**, eaam5745, doi:10.1126/science.aam5745.
- Frankenberg, C., and Coauthors, 2008: Tropical methane emissions: A revised view from SCIAMACHY onboard ENVISAT. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L15811, doi:10.1029/2008GL034300.
- Frey, M., F. Hase, T. Blumenstock, J. Groß, M. Kiel, G. Mengistu Tsidu, K. Schäfer, M. K. Sha, and J. Orphal, 2015: Calibration and instrumental line shape characterization of a set of portable FTIR spectrometers for detecting greenhouse gas emissions. *Atmos. Meas. Tech.*, **8**, 3047-3057, doi:10.5194/amt-8-3047-2015.
- _____, and Coauthors, 2019: Building the Collaborative Carbon Column Observing Network (COCCON): long-term stability and ensemble performance of the EM27/SUN Fourier transform spectrometer. *Atmos. Meas. Tech.*, **12**, 1513-1530, doi:10.5194/amt-12-1513-2019.
- GCOS, 2016: The Global Observing System for Climate: Implementation Needs. World Meteorological Organization, GCOS-200, Geneva, Switzerland.
- Gisi, M., F. Hase, S. Dohe, T. Blumenstock, A. Simon, and A. Keens, 2012: XCO₂-measurements with a tabletop FTS using solar absorption spectroscopy. *Atmos. Meas. Tech.*, **5**, 2969-2980, doi:10.5194/amt-5-2969-2012.
- Hachmeister, J., D. Wunch, E. McGee, K. Strong, R. Kivi, J. Notholt, T. Warneke, and M. Buschmann, 2025: Reduction of airmass-dependent biases in TCCON XCH₄ retrievals during polar vortex conditions. *Atmos. Meas. Tech.*, **18**, 7105-7128, doi:10.5194/amt-18-7105-2025.
- Hase, F., and Coauthors, 2015: Application of portable FTIR spectrometers for detecting greenhouse gas emissions of the major city Berlin. *Atmos. Meas. Tech.*, **8**, 3059-3068, doi:10.5194/amt-8-3059-2015.
- _____, M. Frey, M. Kiel, T. Blumenstock, R. Harig, A. Keens, and J. Orphal, 2016: Addition of a channel for XCO observations to a portable FTIR spectrometer for greenhouse gas measurements. *Atmos. Meas. Tech.*, **9**, 2303-2313, doi:10.5194/amt-9-2303-2016.
- Herkommer, B., and Coauthors, 2024: Using a portable FTIR spectrometer to evaluate the consistency of Total Carbon Column Observing Network (TCCON) measurements on a global scale: the Collaborative Carbon Column Observing Network (COCCON) travel standard. *Atmos. Meas. Tech.*, **17**, 3467-3494, doi:10.5194/amt-17-3467-2024.
- Hu, H., J. Landgraf, R. Detmers, T. Borsdorff, J. Aan de Brugh, I. Aben, A. Butz, and O. Hasekamp, 2018: Toward global mapping of methane with TROPOMI: First results and validation. *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 3682-3689, doi:10.1002/2018GL077259.
- Klappenbach, F., M. Bertleff, J. Kostinek, F. Hase, T. Blumenstock, A. Agusti-Panareda, M. Razinger, and A. Butz, 2015: Accurate mobile remote sensing of XCO₂ and XCH₄ latitudinal transects from aboard a research vessel. *Atmos. Meas. Tech.*, **8**, 5023-5038, doi:10.5194/amt-8-5023-2015.
- _____, and Coauthors, 2022: Retrieval of greenhouse gases from GOSAT and GOSAT-2 using the FOCAL height-resolved retrieval algorithm. *Atmos. Meas. Tech.*,

- 15, 3401-3437, doi:10.5194/amt-15-3401-2022.
- Laughner, J., and Coauthors, 2023: A new algorithm to generate a priori trace gas profiles for the GGG2020 retrieval algorithm. *Atmos. Meas. Tech.*, **16**, 1121-1146, doi:10.5194/amt-16-1121-2023.
- _____, and Coauthors, 2024: The Total Carbon Column Observing Network's GGG2020 data version. *Earth Syst. Sci. Data*, **16**, 2197-2260, doi:10.5194/essd-16-2197-2024.
- Luther, A., and Coauthors, 2019: Quantifying CH₄ emissions from hard coal mines using mobile sun-viewing Fourier transform spectrometry. *Atmos. Meas. Tech.*, **12**, 5217-5230, doi:10.5194/amt-12-5217-2019.
- Morino, I., and Coauthors, 2011: Preliminary validation of column-averaged volume mixing ratios of carbon dioxide and methane retrieved from GOSAT short-wavelength infrared spectra. *Atmos. Meas. Tech.*, **4**, 1061-1076, doi:10.5194/amt-4-1061-2011.
- Olsen, S. C., and J. T. Randerson, 2004: Differences between surface and column atmospheric CO₂ and implications for carbon cycle research. *J. Geophys. Res.*, **109**, D02301, doi:10.1029/2003JD003968.
- Schneider, M., E. Sepúlveda, O. García, F. Hase, and T. Blumenstock, 2010: Remote sensing of water vapour profiles in the framework of the Total Carbon Column Observing Network (TCCON). *Atmos. Meas. Tech.*, **3**, 1785-1795, doi:10.5194/amt-3-1785-2010.
- Sha, M. K., and Coauthors, 2020: Intercomparison of low- and high-resolution infrared spectrometers for ground-based solar remote sensing measurements of total column concentrations of CO₂, CH₄, and CO. *Atmos. Meas. Tech.*, **13**, 4791-4839, doi:10.5194/amt-13-4791-2020.
- Sussmann, R., F. Forster, M. Rettinger, and N. Jones, 2011: Strategy for high-accuracy-and-precision retrieval of atmospheric methane from the mid-infrared FTIR network. *Atmos. Meas. Tech.*, **4**, 1943-1964, doi:10.5194/amt-4-1943-2011.
- Trisna, B. A., M. Park, S. Kim, S. Park, and J. Lee, 2025: Instrument Line Shape Calibration and Comparison with TCCON Measurements for Greenhouse Gas Monitoring at a New COCCON Site in Korea. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **61**, 14, doi:10.1007/s13143-025-00397-5
- Vogel, F. R., and Coauthors, 2019: XCO₂ in an emission hot-spot region: the COCCON Paris campaign 2015. *Atmos. Chem. Phys.*, **19**, 3271-3285, doi:10.5194/acp-19-3271-2019.
- Wunch, D., and Coauthors, 2010: Calibration of the Total Carbon Column Observing Network using aircraft profile data. *Atmos. Meas. Tech.*, **3**, 1351-1362, doi:10.5194/amt-3-1351-2010.
- _____, G. C. Toon, J.-F. L. Blavier, R. A. Washenfelder, J. Notholt, B. J. Connor, D. W. T. Griffith, V. Sherlock, and P. O. Wennberg, 2011a: The Total Carbon Column Observing Network. *Phil. Trans. R. Soc. A*, **369**, 2087-2112, doi:10.1098/rsta.2010.0240.
- _____, and Coauthors, 2011b: A method for evaluating bias in global measurements of CO₂ total columns from space. *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 12317-12337, doi:10.5194/acp-11-12317-2011.
- _____, G. C. Toon, V. Sherlock, N. M. Deutscher, C. Liu, D. G. Feist, and P. O. Wennberg, 2015: The Total Carbon Column Observing Network's GGG2014 Data Version. *California Institute of Technology*, doi:10.14291/tcccon.ggg2014.documentation.R0/1221662.
- _____, and Coauthors, 2017: Comparisons of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) XCO₂ measurements with TCCON. *Atmos. Meas. Tech.*, **10**, 2209-2238, doi:10.5194/amt-10-2209-2017.
- Yokota, T., Y. Yoshida, N. Eguchi, Y. Ota, T. Tanaka, H. Watanabe, and S. Maksyutov, 2009: Global concentrations of CO₂ and CH₄ retrieved from GOSAT: First preliminary results. *SOLA*, **5**, 160-163, doi:10.2151/sola.2009-041.
- Yoshida, Y., and Coauthors, 2013: Improvement of the retrieval algorithm for GOSAT SWIR XCO₂ and XCH₄ and their validation using TCCON data. *Atmos. Meas. Tech.*, **6**, 1533-1547, doi:10.5194/amt-6-1533-2013.