

논문

고분해 태양 흡수분광간섭계를 이용한 온실기체 연직분포 산출 연구 - Part I: 이산화탄소

Retrieving the Vertical Profile of Greenhouse Gas Using Fourier Transform Spectrometer (FTS) - Part I: Carbon Dioxide (CO₂)

김민해, 오영석¹⁾, 안명환²⁾, 강민아²⁾, 시호연³⁾, 박록진, 김민아, 주상원¹⁾, 김상우*

서울대학교 지구환경과학부, ¹⁾국립기상과학원 지구대기감시연구과, ²⁾이화여자대학교 기후에너지시스템공학과, ³⁾덴마크 기상청

Man-Hae Kim, Young-Suk Oh¹⁾, Myoung-Hwan Ahn²⁾, Mina Kang²⁾, Hoyeon Shi³⁾, Rokjin Park, Mina Kim, Sangwon Joo¹⁾, Sang-Woo Kim*

School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea

¹⁾Global Atmospheric Watch and Research Division, National Institute of Meteorological Sciences (NIMS), Jeju-do, Republic of Korea

²⁾Department of Climate and Energy Systems Engineering, Ewha Womans University, Seoul, Republic of Korea

³⁾Danish Meteorological Institute, Copenhagen, Denmark

접수일 2024년 5월 28일
수정일 2024년 6월 7일
채택일 2024년 6월 7일

Received 28 May 2024
Revised 7 June 2024
Accepted 7 June 2024

*Corresponding author

Tel : +82-(0)2-880-6716

E-mail : sangwookim@snu.ac.kr

Abstract The Total Carbon Column Observing Network (TCCON) utilizes Fourier Transform Spectrometers (FTS) to provide the atmospheric column-average concentrations of greenhouse gases. While the retrieval process scales a priori gas profiles as input parameters, the FTS data itself enables the derivation of vertical profiles for these gases. This study focused on deriving and validating the vertical profile of carbon dioxide (CO₂) from FTS measurements at TCCON's Anmyeondo observation site. Accurate CO₂ profiles require improving the precision of a priori profiles, as their vertical structure persists through the retrieval algorithm. To achieve this, a new a priori profile simulated by the Goddard Earth Observing System-Chemistry (GEOS-Chem) model was adopted instead of the standard TCCON-provided profiles. Although the GEOS-Chem a priori profile exhibited greater differences from the TCCON profile in the comparison with airborne observations, its overall vertical shape appeared more representative of actual conditions. When the GEOS-Chem a priori profiles were employed, the retrieved CO₂ profiles achieved much better agreement with both surface in-situ measurements and airborne observations, particularly in the lowermost atmospheric layers near the ground. Notably, the discrepancy between the derived surface CO₂ values and in-situ readings was significantly reduced to 6.4 ± 8.7 ppm using the GEOS-Chem a priori profile, compared to 12.6 ± 9.5 ppm with the standard TCCON a priori profile. This study highlights the importance of using representative a priori profiles to precisely retrieve greenhouse gas vertical distributions from ground-based remote sensing measurements.

Key words: Greenhouse gas, CO₂ profile, Fourier Transform Spectrometer (FTS), A priori profile

1. 서론

화석연료 연소 등의 인위적 요인에 의해 배출된 온실기체(Greenhouse gas, GHG)는 지구의 기후시스템 변화를 유발하고 있으며, 20세기 중반 이후 관측된 급

격한 지구온난화의 주요 원인이 되고 있다(e.g., Yoro and Daramola, 2020; Meinshausen *et al.*, 2009; Lashof and Ajuja, 1990). 전 세계적인 경제 발전에 따른 화석연료 사용 증가로 인위적 온실기체의 배출량은 지속적으로 증가해 왔으며 2010년대 이후의 온실기체 총

배출량은 1970년대의 두 배 이상에 달하는 것으로 보고되고 있다(Olivier *et al.*, 2020). 이와 같이 지속적으로 증가하는 온실기체 농도의 능동적 감시 및 지구온난화에 미치는 영향 평가를 위해 세계기상기구(World Meteorological Organization; WMO)의 지구 대기감시 프로그램(Global Atmosphere Watch Programme; GAW)과 Advanced Global Atmospheric Gases Experiment (AGAGE) 등 온실기체 감시 국제 네트워크에서는 전 세계 주요 지점에서 지상 직접(in-situ) 관측을 수행하고 있으며(Lee *et al.*, 2020, 2019; Prinn *et al.*, 2018), Total Carbon Column Observing Network (TCCON)와 Collaborative Carbon Column Observing Network (COCCON)에서는 지상 기반 고분해 태양 흡수분광간섭계(Fourier Transform Spectrometer, FTS)를 활용하여 대기 기주 온실기체의 전량농도를 측정하고 있다(Frey *et al.*, 2019; Toon *et al.*, 2009).

TCCON은 지상 기반 FTS 국제 관측망으로 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 불화수소(HF), 일산화탄소(CO), 수증기(H₂O) 등의 전량농도(연직 기주 평균 농도)를 산출하고, 이를 통해 Orbiting Carbon Observatory (OCO-2, OCO-3), Greenhouse Gases Observing Satellites (GOSAT, GOSAT-2), Sentinel 5P TROPOMI, TanSat 등의 위성 관측자료의 검증에 위한 유용한 정보를 제공하고 있다. TCCON에서 사용하는 FTS는 태양 직달일사의 근적외 영역의 스펙트럼을 관측하는 기기로 다양한 온실기체의 흡수 밴드로부터 해당 온실기체의 전량농도(연직 평균 농도)를 산출한다. 기상청 안면도 기후변화감시소에서는 2014년 8월부터 TCCON 관측망에 참여하여, FTS 관측을 통해 온실기체 전량농도를 산출하고 있다(Oh *et al.*, 2018).

지상 FTS 관측으로 산출된 온실기체 전량농도는 대기의 연직 기주 평균 농도로 고도에 따른 농도 변화를 고려하지 못하는 한계가 있다. 온실기체의 지표면 농도와 전량농도뿐만 아니라 고도별 농도 분포는 위성 기반 온실기체 농도 산출 알고리즘의 개선과 관측

결과 검증, 기후-대기화학 모델의 입력 및 검증, 그리고 대도시/산업단지 지역의 온실기체 배출량과 거동 특성 파악 등에 유용하게 활용될 수 있다. 본 연구에서는 FTS 관측자료를 활용하여 대표적 온실기체 중 하나인 이산화탄소의 연직분포를 산출하였다. FTS 관측으로부터 이산화탄소 전량농도 산출에 필요한 선험적 프로파일(a priori profile)은 대기화학수송모델(GEOS-Chem) 모의 결과를 이용해 개선하였으며, 산출된 이산화탄소 연직분포는 지상 및 항공 관측 결과와 비교, 검증하였다.

2. 연구 방법

2.1 관측자료

본 연구에서는 기상청/국립기상과학원 안면도 기후변화감시소에 설치되어 운영 중인 FTS(Bruker IFS 125HR spectrometer) 관측자료를 사용하였다(Oh *et al.*, 2018). 본 연구에 사용된 FTS는 분광기를 통해 태양 직달일사를 2개로 분리하고, 분리된 빛의 광 경로 차이로 인한 간섭 작용으로 생성된 인터페로그램(interferogram)을 관측한 후에 이를 푸리에 변환(Fourier transform)하여 스펙트럼을 산출하며, 45 cm의 최대 광 경로 차이를 통해 0.02 cm⁻¹의 파장 분해능을 가진다. 감지기(detector)는 Indium-Gallium-Arsenide (InGaAs) detector와 Silicon (Si) diode detector가 사용되며 각각 3800~12800 cm⁻¹, 9000~25000 cm⁻¹의 파장 영역을 관측한다. TCCON의 기본 알고리즘에서는 이산화탄소의 전량농도 산출에 중심 파장 6220 cm⁻¹와 6339.5 cm⁻¹의 두 채널을 이용한다(Roche *et al.*, 2021; Oh *et al.*, 2018). 두 채널 모두 스펙트럼의 너비(width)는 80.0 cm⁻¹이다. 본 연구에서는 2020년 2월부터 2021년 12월까지의 관측자료를 사용하였다. FTS는 구름이 없고 맑은 낮 시간에만 관측이 가능하기 때문에 연속적인 관측이 어려워 관측 기간 확보된 총 50일의 자료를 이용하였다. 기상 조건에 따라 하루 중 관측 시간은 일정하지 않아 최소 약 2시간에서 최

대 약 7시간까지 관측이 수행되었으며 50일 동안 총 341시간의 자료를 확보하였다. FTS는 약 1~2분 간격으로 스펙트럼을 생산하지만 이산화탄소 전량농도 산출에 필요한 다른 입력자료와 검증에 사용된 관측자료의 시간 간격을 고려하여 본 연구에서는 FTS 스펙트럼 자료를 포함한 모든 자료를 1시간 평균하여 분석에 사용하였다.

FTS 관측과 더불어 안면도 기후변화감시소의 지상 직접 관측자료와 기상청 기상항공기를 이용한 항공 관측자료를 검증에 사용하였다(Li *et al.*, 2019). 지상 및 항공 관측은 공동감쇠분광기(Cavity Ring Down Spectroscopy, CRDS)를 이용하였으며 지상 관측은 1시간 간격으로, 항공 관측은 1초 간격으로 수행되었다(Wheeler *et al.*, 1998). 2020년과 2021년에 총 21회의 안면도 상공 항공 관측이 있었고, 이 중 FTS와의 동시 관측은 2021년 7월 31일과 10월 17일 두 차례로 FTS의 이산화탄소 연직분포 산출 결과 검증에 사용하였다.

2.2 대기화학수송모델

FTS 관측 결과로부터 이산화탄소의 전량농도를 산출하는 과정에 필요한 선형적 프로파일은 Goddard Earth Observing System-Chemistry (GEOS-Chem) 모델을 이용하였다. GEOS-Chem은 미국 항공우주국(NASA)과 하버드 대학에서 개발한 3차원 지구 대기화학-수송 모델로 자료 동화된 기상자료(The Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2; MERRA-2)를 사용하며, 오존-질소산화물-유기 화합물 및 에어로졸, 온실기체의 약 300가지의 광화학반응 메커니즘을 사용할 수 있는 장점이 있다(Nassar *et al.*, 2010). GEOS-Chem 모델은 이산화탄소 모의 관련하여, 인위적 화석연료 사용 및 시멘트 산업에서의 배출, 바이오매스 연소(Biomass burning)에 의한 배출, 생물연료 연소(Biofuel burning)에 의한 배출, 선박과 항공기 운송에 의한 배출 등 배출원뿐만 아니라 식생에서의 이산화탄소 교환, 해양에서의 이산화탄소 교환 등 흡수/배출 과정을 고려할 뿐만 아니라 일산화탄소(CO) 등을 통한 대기 중에서의 광화학

적 반응에 의한 이산화탄소의 생성 과정을 포함하고 있다(Hoesly *et al.*, 2018; Randerson *et al.*, 2018; Simone *et al.*, 2013; Messerschmidt *et al.*, 2012; Oda and Maksyutov, 2011; Takahashi *et al.*, 2009; Baker *et al.*, 2006). 본 연구에서는 1시간 간격으로 2°×2.5°의 수평 격자, 47개의 연직 층에서의 결과를 모의하였으며, 안면도 기후변화감시소를 포함한 격자의 연직 이산화탄소 프로파일을 이용하였다.

그림 1은 안면도 기후변화감시소를 포함하는 격자에서 2015년부터 2021년까지 GEOS-Chem으로 모의된 고도별 이산화탄소 농도의 연, 월 및 일평균 변동을 나타낸 것이다. 고도별 농도의 시계열과 함께 지상 직접 관측 결과와 모델의 최하층 모의값을 함께 나타내었다. 이산화탄소 농도는 그림 1(a)에서 확인할 수 있듯이 해마다 지속적으로 증가하였다. 이산화탄소 농도의 계절 변동성도 매우 뚜렷하여 식생에 의한 흡수가 활발한 6~9월 대류권에서 감소하고 10월부터 점차 증가하였다(그림 2b). 또한, 야간에는 고도 200 m 이하의 최하층 농도가 매우 높지만, 주간에는 낮은 값을 보였다(그림 2c). 이는 야간에 대기경계층 고도가 낮아지고 대기가 안정해지면서 지표면에서 배출된 이산화탄소의 연직 확산이 활발하지 않기 때문으로 판단된다. 주간에는 광합성에 의한 이산화탄소의 제거와 더불어 지표면 가열로 인한 대기경계층 성장 및 활발한 연직 수송으로 지표면 부근의 농도는 낮아지고 대략 지상 1 km 이하의 대기경계층 내 농도가 증가하는 것을 알 수 있다. GEOS-Chem의 최하층 모의 결과는 지상 직접 관측 결과를 비교해 전반적으로 약 5 ppm 정도 낮은 값을 보였다. 그러나 연, 월, 일변동 모두 변화 경향성은 잘 일치함을 확인할 수 있다.

2.3 이산화탄소 연직분포 산출 방법

본 연구에서는 TCCON의 표준 산출 소프트웨어인 GGG2020을 이용하여 FTS 관측으로 얻은 스펙트럼으로부터 이산화탄소 전량농도 및 연직분포를 산출하였다(Laughner *et al.*, 2023; Wunch *et al.*, 2011). GGG2020은 각 온실기체의 흡수 밴드 영역에서의 관측된 스펙트럼과 포워드 모델(forward model)을 통

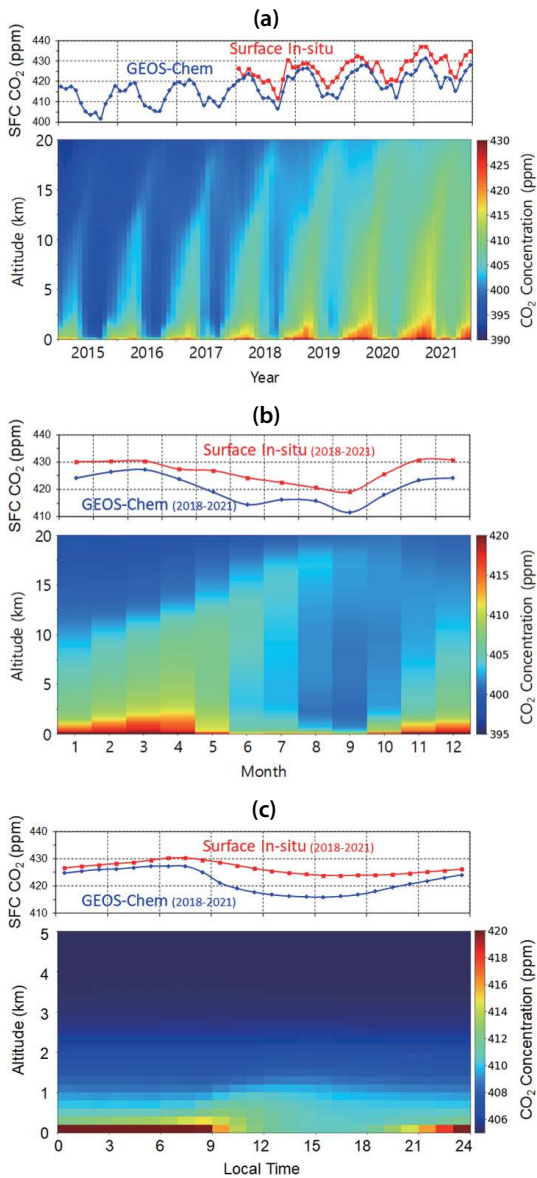


Fig. 1. GEOS-Chem simulated CO₂ concentration at Anmyeon from 2015 to 2021: (a) inter-annual, (b) monthly and (c) diurnal variation. The time series of surface in-situ observation (red) and surface values of GEOS-Chem simulation (blue) are shown together. The surface concentrations of GEOS-Chem in (b) and (c) are calculated from 2018 to 2021, the same period with in-situ measurements.

해 모의된 스펙트럼을 비교하고, 두 스펙트럼의 오차가 충분히 작아지도록 각 온실기체의 선형적 프로파

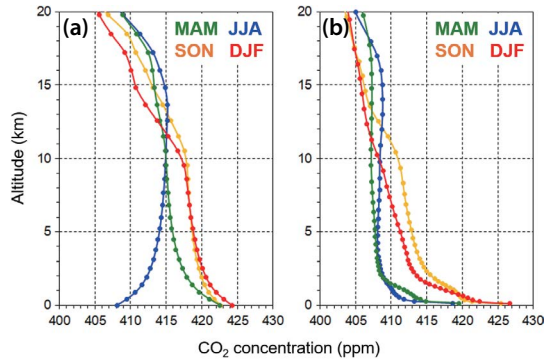


Fig. 2. Seasonal mean CO₂ profiles for (a) TCCON a priori and (b) GEOS-Chem at Anmyeon from 2020 to 2021.

일과 같은 입력자료를 수정하여 모의 스펙트럼을 업데이트한다. 모의 스펙트럼 계산을 위한 주요 입력자료는 온도, 습도, 기압 등의 기상자료와 태양 위치 정보 및 각 온실기체 농도 프로파일(선형적 프로파일)이며 최종적으로 업데이트된 온실기체 농도 프로파일로부터 전량농도를 산출하게 된다. 입력자료로 사용되는 기상자료는 선형적 프로파일에 비해 높은 정확도로 모의 가능하고 최종 산출 결과에 미치는 영향이 크지 않아 기상자료의 정확도에 의한 오차는 고려하지 않았다.

일반적으로 TCCON에서는 FTS 관측의 최종 산출물로 각 온실기체의 전량농도를 제공하지만, 산출 과정에서 온실기체의 연직분포가 사용되고 이를 수정/개선(scaling)하기 때문에 온실기체 연직분포 자료의 산출 또한 가능하다. 본 연구에서는 기존 GGG2020에서 사용하는 이산화탄소의 선형적 프로파일의 정확도를 확인하고 GEOS-Chem 모의 결과를 선형적 프로파일로 사용하여 이산화탄소 연직분포를 개선하고자 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 이산화탄소의 선형적 프로파일

TCCON에서는 배경대기 지역인 북태평양의 마우

나로아(Mauna Loa)와 남태평양의 사모아(Samoa)에서 플라스크 샘플링으로 관측된 이산화탄소 관측 결과의 월평균 값과 기상장을 이용하여 자체적으로 선형적 프로파일을 생산하고, 전 세계 FTS 주요 관측 지점들에서의 선형적 프로파일을 자체적으로 제공하고 있다(Laughner *et al.*, 2023). 기본적으로 두 배경대기 지역의 관측값과 기상장만을 이용하기 때문에 국지적인 농도 변화를 반영하기 어렵다는 단점이 있으나, 다른 관측 결과나 모델의 자료 확보 여부와 상관 없이 안정적인 선형적 프로파일을 실시간으로 제공할 수 있다는 장점이 있다. 안면도 기후변화감시소의 FTS 관측에 사용되고 있는 온실기체 선형적 프로파일은 지표면에서부터 70 km 고도까지 총 51개 층에서 3시간 간격으로 제공되며 관측 시각에서 가장 가까운 시각의 프로파일을 사용하였다.

TCCON의 선형적 프로파일은 위에서 언급한 것과 같이 국지적인 변동성을 고려하지 못하고 위도에 따른 전 지구 평균만을 고려하기 때문에 안면도에서의 선형적 프로파일을 GEOS-Chem 모의 결과와 비교해 그 차이를 살펴보았다. 그림 2는 2020년 2월부터 2021년 12월까지 FTS 관측이 수행된 기간의 TCCON 선형적 프로파일과 GEOS-Chem 모의 결과의 월평균 프로파일을 나타낸 것이다. 이산화탄소 전량농도 산출에는 70 km 고도까지의 선형적 프로파일이 사용되지만, 20 km 이상의 고도에서는 두 프로파일 사이의 오차가 약 5% 이하로 작을뿐더러 공기의 밀도가 낮아 전량농도 산출에 미치는 영향이 적기 때문에 20 km 이하의 고도만 나타내었다.

전반적으로 안면도에서의 TCCON 선형적 프로파일은 GEOS-Chem 모의 결과보다 대류권 및 하부 성층권에서 약 5~10 ppm 낮은 값을 보였다. 그러나 GEOS-Chem 모의 결과는 지표면 부근에서 더 높은 이산화탄소 농도를 보이며, 전체적으로 TCCON 선형적 프로파일보다 고도에 따른 농도 변화가 매우 뚜렷하게 나타났다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 TCCON의 선형적 프로파일은 해당 위도에서의 전 지구 평균적인 프로파일을 제공하고 지역적 특성을 반영하지

못해 고도에 따른 농도 변화가 상대적으로 작지만, GEOS-Chem은 안면도 부근의 인위적인 이산화탄소 배출을 더 잘 반영하기 때문으로 보인다. 두 프로파일 모두 대류권에서 여름과 가을에 이산화탄소 농도가 낮고 겨울과 봄에 높게 나타나는데 이는 식물의 광합성에 의한 영향으로 판단된다. 특히, TCCON 선형적 프로파일은 여름철 대류권에서 고도가 낮아질수록 이산화탄소 농도가 낮아져 국지적인 배출원을 고려하지 못하고 배경대기 농도에 가까운 값을 보였다.

TCCON 선형적 프로파일과 GEOS-Chem 모의 프로파일의 일변동은 큰 차이를 보였다(그림 3). 앞에서 언급한 바와 같이 GEOS-Chem 모의 결과는 주/야간 대기경계층 변화, 주간 광합성 및 대기확산에 의한 영향으로 뚜렷한 일변동을 보였다. 반면 TCCON의 선형적 프로파일은 일변동이 전혀 나타나지 않았으며, 고도 약 2 km 이상의 대기 상층보다 지표면 부근에서 약간 높은 값을 보이나 GEOS-Chem에 비해 고도에 따른 농도 변화도 매우 작게 나타났다. 특히, 동일 고도에서 시간에 따른 변화는 거의 나타나지 않아 하루 중 농도의 최댓값과 최솟값의 차이가 1 ppm 미만인

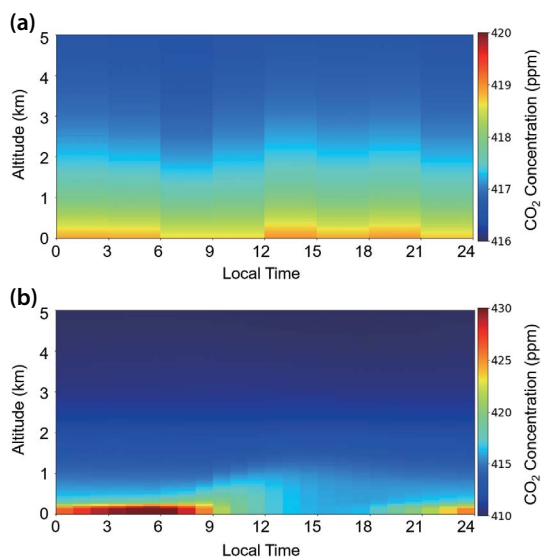


Fig. 3. Diurnal variation of CO₂ vertical profiles for (a) TCCON a priori and (b) GEOS-Chem at Anmyeon from 2020 to 2021. Note that the color scales are different.

경우가 대부분이었다. TCCON에서는 3시간 간격으로 24시간 동안의 선형적 프로파일을 제공하지만, 주간 태양의 직달일사를 관측하는 FTS의 특성상 야간의 선형적 프로파일을 사용하지는 않는다. 따라서 이러한 TCCON 선형적 프로파일의 약한 일변동 특성은 이산화탄소 전량농도 산출에 미치는 영향이 크지 않을 수 있다. 그러나 그림 1(c)와 그림 3(b)에서 보듯이 낮 동안에도 대기경계층 내 이산화탄소 농도는 유의미한 변동을 보이기 때문에 전량농도 및 연직분포 산출에 오차를 유발할 수 있다.

3.2 이산화탄소 연직분포 및 전량농도 산출 결과

TCCON에서 제공된 선형적 프로파일과 GEOS-Chem의 선형적 프로파일을 각각 이용하여 이산화탄소 연직분포 및 전량농도를 산출하였다. 그림 4는 2021년 1월 20일 11~15시의 선형적 프로파일과 FTS 관측 결과로부터 산출된 이산화탄소 연직분포를 평균하여 나타낸 것이다. 최종 산출된 이산화탄소 연직분포는 GGG2020을 실행하여 선형적 프로파일에 일정한 값(scale factor)을 곱한 형태로 나타나며 연직분포 형태는 유지된다. 그림 4의 사례에서는 최종 산출 결과가 TCCON 선형적 프로파일을 사용할 때 감소하고

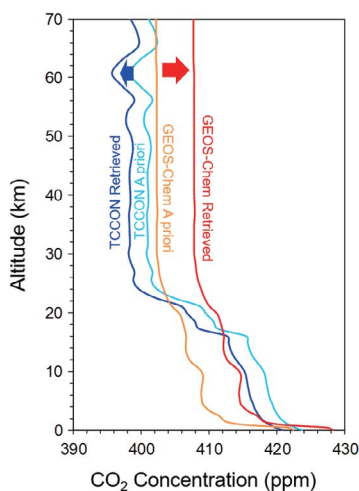


Fig. 4. A priori CO₂ profiles for TCCON (light blue) and GEOS-Chem (orange) at Anmyeon on January 20, 2021. Retrieved CO₂ profiles are shown in blue (TCCON) and red (GEOS-Chem).

GEOS-Chem 선형적 프로파일을 사용할 때는 증가하는 것을 볼 수 있다. 약 20 km 이상의 고도에서는 TCCON 선형적 프로파일과 GEOS-Chem 선형적 프로파일이 비슷한 값을 보이나 최종 산출된 프로파일은 그 차이가 10 ppm 이상으로 증가하였다. 반면, 약 15 km 이하의 고도에서는 두 선형적 프로파일 사이의 차이가 크게 나타났지만, 최종 산출된 프로파일은 매우 비슷하게 나타났다.

이산화탄소 연직분포와 함께 산출된 전량농도는 그림 5에 나타내었다. GEOS-Chem 선형적 프로파일에 비해 TCCON 선형적 프로파일의 이산화탄소 전량농도가 7~8 ppm 높게 나타났다. 이는 그림 4의 20 km 이하의 고도에서 보이는 두 선형적 프로파일의 농도 차이에 기인한 것으로 판단된다. 각 선형적 프로파일을 이용하여 최종 산출된 이산화탄소 전량농도는 선형적 프로파일에 상관없이 1 ppm 미만의 차이로 매우 유사한 값을 보였다. 그림 4에서 각각의 선형적 프로파일을 사용해 최종 산출된 프로파일을 살펴보면 약 20 km 이하의 고도에서는 비슷한 값을 갖는 것에 반해, 20 km 이상의 고도에서는 선형적 프로파일에 비해 차이가 증가한 것을 볼 수 있다. 즉, 성층권 이상 고도에서의 농도 차이가 크더라도 대류권의 농도 차이가 작으면 전량농도도 비슷한 값을 갖게 되는 것이다. 이를 통해 대기 하층의 이산화탄소 농도가 전량농도에 기여하는 정도가 크다는 것을 확인할 수 있으며, 이는 하층 공기의 밀도가 크기 때문이다.

해당 기간의 산출 결과에서 지표면에서의 값만을

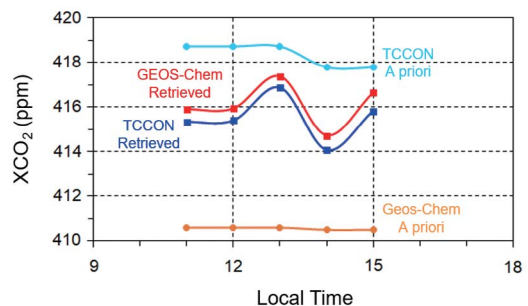


Fig. 5. XCO₂ at Anmyeon on January 20, 2021. The colors for each line are same with Fig. 4.

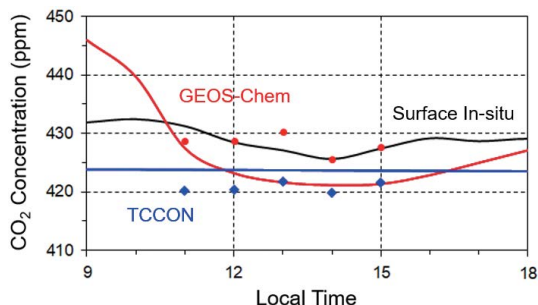


Fig. 6. Surface concentrations of CO₂ for same period in Fig. 5. Black line is in-situ measurements, blue and red lines are for TCCON and GEOS-Chem a priori profiles, respectively. Dots are surface CO₂ concentrations in retrieved profiles.

추출하여 지상 직접 관측자료와 비교한 결과를 그림 6에 나타내었다. GEOS-Chem 선형적 프로파일의 지표면 부근 농도는 지상 관측 결과와 비교적 유사한 시간 변동 경향을 보이지만 변동 폭이 더 크게 나타났고, TCCON 선형적 프로파일의 지표면 부근 농도는 일정한 값을 보였다. 각각의 선형적 프로파일과 FTS 관측 결과를 이용하여 최종 산출된 이산화탄소의 지표면 농도를 살펴보면 GEOS-Chem 선형적 프로파일을 이용한 결과는 지상 관측 결과와 평균 0.2 ppm의 오차로 매우 유사하게 나타났으나 TCCON 선형적 프로파일을 이용한 결과는 평균 2.2 ppm의 오차로 선형적 프로파일보다 지상 관측 결과와의 오차가 증가하였음을 확인할 수 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 TCCON 선형적 프로파일은 이산화탄소의 국지적 배출을 잘 고려하지 못하기 때문에 지표면 부근에서 상대적으로 더 큰 오차를 유발하는 것으로 판단된다.

그림 7은 2020년 2월부터 2021년 12월까지의 모든 관측 결과로부터 TCCON과 GEOS-Chem의 두 선형적 프로파일을 이용하여 최종 산출된 이산화탄소의 연직분포를 계절 평균하여 나타낸 것이다. 최종 산출 프로파일은 그림 2의 선형적 프로파일에 스케일 팩터가 곱해진 값으로 연직분포의 형태는 유지되어야 하지만, 그림 2는 주/야간 모든 프로파일의 평균인 반면 그림 7은 FST 관측이 수행된 주간의 결과만을 이용하였기 때문에 프로파일의 모양이 다르게 나타난다. 다

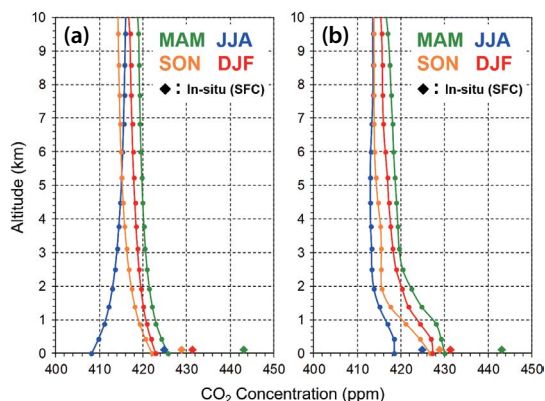


Fig. 7. Seasonal mean retrieved CO₂ profiles using (a) TCCON and (b) GEOS-Chem a priori profiles. Diamond dots at the bottom are CO₂ concentrations from surface in-situ measurements.

만, TCCON 선형적 프로파일은 주/야간 차이가 없어 그림 2(a)와 그림 7(a)는 유사하게 나타났다. 그림 2(b)에서 GEOS-Chem 선형적 프로파일의 일평균은 지표면 부근에서 급격하게 증가한 것과 달리, 주간의 선형적 프로파일만을 이용하여 산출된 그림 7(b)의 결과에서는 지표면 부근의 급격한 증가가 나타나지 않는다. 이는 모델 내에서 주간에 성장한 대기경계층 내부의 연직 확산을 통해 이산화탄소 농도가 일정한 것으로 모의하기 때문으로 보인다. 그림 2에서는 고도 약 1 km 이하의 지표면 부근을 제외한 상층에서 TCCON 선형적 프로파일이 GEOS-Chem 선형적 프로파일보다 높은 값을 보였지만 그림 7의 최종 산출 프로파일에서는 10 km 이하 대부분의 고도에서 비슷한 값을 보였다. 즉, 선형적 프로파일의 농도에 차이가 있더라도 전량농도를 산출하는 과정에서 스펙트럼 피팅을 통해 선형적 프로파일이 스케일링 되고, 기존의 연직분포 형태를 유지하되 대류권 내의 농도는 비슷하게 되도록 최종 연직분포가 산출되는 것이다. 두 선형적 프로파일을 사용한 최종 프로파일 모두 지표면 부근에서는 지상 관측 결과보다 낮은 값을 보였으나 GEOS-Chem 선형적 프로파일을 이용한 산출 결과가 지상 관측 결과의 오차가 상대적으로 작게 나타났다.

그림 8(a)는 관측된 모든 자료에 대해 산출 전 선형

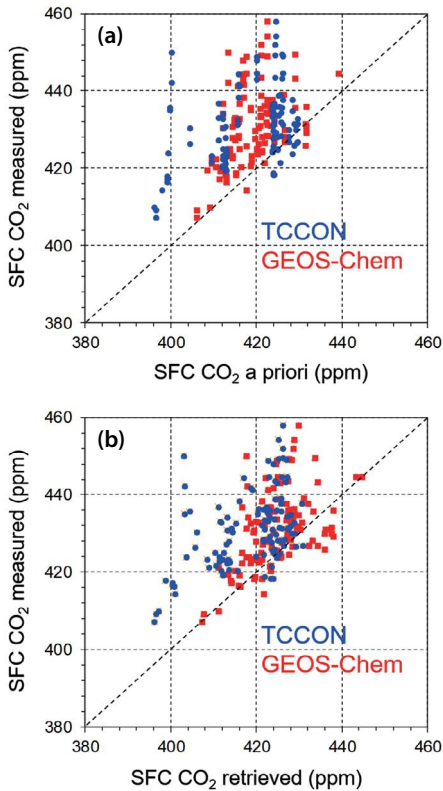


Fig. 8. Comparison of surface CO_2 concentration between (a) in-situ measurements and a priori profiles and between (b) in-situ measurements and retrieved profiles using TCCON (blue) and GEOS-Chem (red) a priori profiles.

적 프로파일의 지표면 농도와 지상 관측 결과를 비교한 것으로 TCCON과 GEOS-Chem 선형적 프로파일 모두 지상 관측 결과보다 낮게 나타났으며, 각각 평균 12.6 ± 10.5 ppm, 11.7 ± 9.0 ppm의 오차를 보였다. TCCON 선형적 프로파일을 이용하여 산출된 이산화탄소 프로파일의 지표면 농도와 지상 관측 결과를 비교하면 평균 12.6 ± 9.5 ppm의 오차를 보여 산출 전과 뚜렷한 차이가 없었다(그림 8b). 반면에 GEOS-Chem 선형적 프로파일을 이용한 경우에는 산출 후 지상 관측 결과와의 오차가 평균 6.4 ± 8.7 ppm으로 상대적으로 크게 감소하였음을 알 수 있었다(그림 8b). 이는 TCCON 선형적 프로파일보다 GEOS-Chem 선형적 프로파일을 이용하는 것이 지표면 부근 이산화탄소 농도 산출에 유리함을 의미한다.

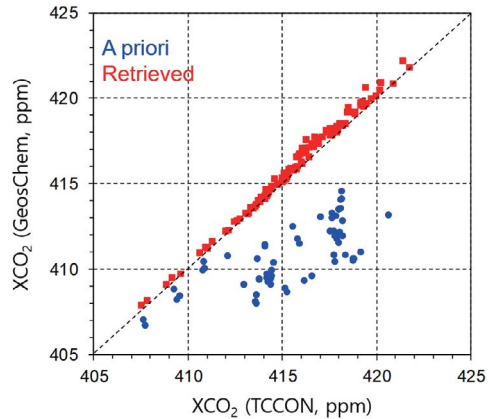


Fig. 9. Comparison of XCO_2 between TCCON and GEOS-Chem for a priori profiles (blue) and retrieved profiles (red).

두 선형적 프로파일을 이용하여 GGG2020 실행 전후의 전량농도를 비교한 결과를 그림 9에 나타내었다. TCCON 선형적 프로파일로부터 계산된 전량농도는 GEOS-Chem 선형적 프로파일의 전량농도보다 평균 4.7 ± 2.0 ppm 높게 나타났다. 이러한 차이는 20 km 이하의 거의 모든 고도에서 TCCON 선형적 프로파일의 농도가 더 높기 때문으로 판단된다(그림 2). 각각의 선형적 프로파일을 이용하여 최종 산출된 전량농도를 비교해 보면 평균 0.4 ± 0.3 ppm의 매우 작은 차이를 보였다. 이는 선형적 프로파일의 차이가 전량농도 산출 결과에 미치는 영향은 크지 않으며, 연직분포를 고려하지 않고 전량농도 산출만을 목적으로 한다면 TCCON의 경우와 같이 국지적인 배출원의 영향을 고려하지 않은 배경 대기의 선형적 프로파일도 유용하게 사용될 수 있음을 의미한다.

3.3 기상항공기 관측 결과와의 비교

산출된 이산화탄소 연직분포의 검증에 위해 기상항공기로 안면도 상공에서 관측한 결과와 비교하였다(그림 10). 두 관측 사례 모두 GEOS-Chem 선형적 프로파일이 TCCON 선형적 프로파일보다 낮은 값을 보이며, 특히 차이는 고도 3~4 km 이상의 상층에서 더 두드러졌다. 항공 관측 결과와 비교해도 GEOS-Chem 선형적 프로파일은 특히 상층에서 낮은 값을 보였다.

선행적 프로파일만을 비교하면 TCCON 선행적 프로파일이 항공 관측과 상대적으로 더 잘 일치하는 것으로 보이지만 연직분포의 형태는 GEOS-Chem 선행적 프로파일이 항공 관측 결과와 더 유사하게 나타났다. 특히 여름철(그림 10a)에는 TCCON 선행적 프로파일이 지표면 부근에서 감소하는 경향을 보여 항공 및 지상 관측 결과와 전혀 다른 양상을 보였다. 각각의 선행적 프로파일을 이용하여 최종 산출된 이산화탄소 연직분포를 살펴보면, TCCON 산출 결과는 선행적 프로파일과 비교해 큰 변화를 보이지 않지만, GEOS-Chem은 최종 산출 결과가 선행적 프로파일에 비해 크게 증가하여 항공 관측 결과와의 오차가 감소하는 것을 볼 수 있다. 2021년 7월 31일에는 고도 1~4 km 구간의 항공 관측값이 상층보다도 작아 산출된 프로파일과 차이를 보였으나 전반적으로 TCCON 산출 결과보다 GEOS-Chem 선행적 프로파일을 이용한 산출 결과가 항공 관측 및 지상 관측 결과와 상대적으로 더 잘 일치하였다(그림 10a). 2021년 10월 17일 사례의 경우, 두 산출 결과 모두 항공 관측과 유사하게 나타났으나 약 3 km 이하의 하층에서는 GEOS-Chem 선행적 프로파일을 이용한 산출 결과가 항공 관측 결과와 상대적으로 더 일치하였다(그림 10b). 그림 10(b)에서 지상 관측 결과는 항공 관측 및 산출 결과와 비

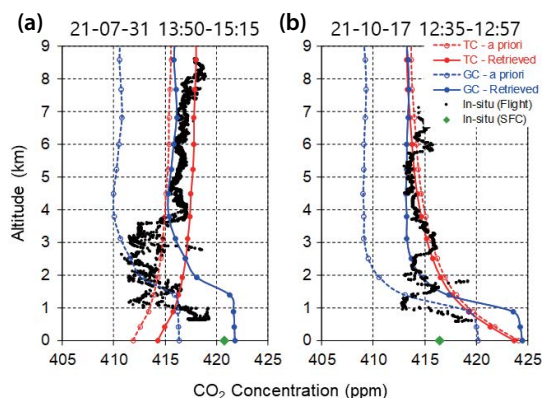


Fig. 10. A priori (dashed lines) and retrieved (solid lines) CO₂ profiles for TCCON (red) and GEOS-Chem (blue) with in-situ measurements from air craft (black dots) and surface (green dots) at Anmyeon (a) 13:50-15:15 LST, July 31, 2021 and (b) 12:35-12:57 LST, October 17, 2021.

교해 낮은 값을 보였는데, 이날 낮의 지상 관측값이 415 ppm에서 430 ppm까지 크게 변동한 것으로 보아 국지적인 영향이 있는 것으로 보인다.

항공 관측 결과와의 비교를 통해 선행적 프로파일의 농도가 실제 농도 분포와 오차가 발생하더라도 산출 과정에서 전량농도가 일치하도록 스케일링되기 때문에 항공 관측과 전체적으로 유사한 값을 갖게 됨을 알 수 있었다. 이는 정확한 이산화탄소의 연직분포 산출을 위해서는 선행적 프로파일의 고도별 농도 정확정보다는 연직분포 형태의 정확성이 더 중요하다는 것을 의미한다.

2020년과 2021년에는 기상항공기를 이용한 이산화탄소 농도의 연직분포 직접 관측이 다수 수행되었으나, 기상 조건 등의 영향으로 동시 관측된 FTS 자료 확보에 어려움이 있었다. FTS 관측이 없어 산출 결과 비교가 불가능한 항공 관측 사례에 대해서, 이산화탄소 연직분포 산출 및 검증은 어렵지만 FTS 관측이 있다고 가정했을 때의 산출 결과를 예상하여 GEOS-Chem 모의 결과와의 비교를 추가로 수행하였다. 그림 11은 각각 2020년 1월 12일과 3월 14일의 항공 관측 결과로 GEOS-Chem 선행적 프로파일은 모든 고도에서 항공 관측보다 낮지만 연직분포의 형태는 유사하게 나타났다. 그림 10의 결과에서 볼 수 있듯이 GEOS-Chem 선행적 프로파일은 항공 관측보다 낮은

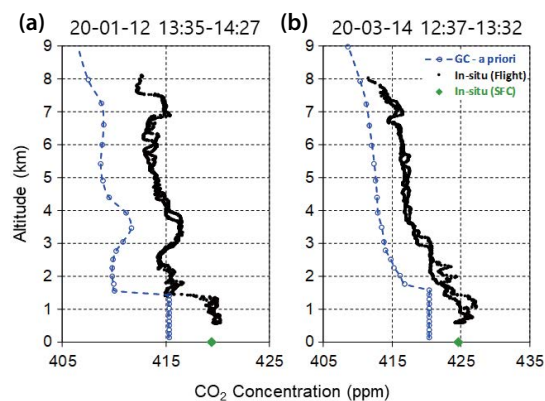


Fig. 11. Same with Fig. 9 but for (a) 13:35~14:27 LST, January 12, 2020 and (b) 12:37~13:32 LST, March 14, 2020. TCCON a priori profiles and FTS measurements are not available.

값을 보이지만 최종 산출된 이산화탄소 연직분포는 항공 관측과 비교적 잘 일치하였음을 확인하였고, 이를 통해 그림 11의 GEOS-Chem 선형적 프로파일도 FTS 관측이 수행되었다고 가정했을 때, 최종 산출될 이산화탄소 연직분포는 항공 관측과 유사하게 나타날 것으로 기대해 볼 수 있다.

4. 요약 및 결론

TCCON은 FTS를 이용한 온실기체 관측을 목적으로 하는 국제 관측망으로 각 기체의 연직 기주 평균 농도인 전량농도를 산출하여 제공한다. 본 연구에서는 국내 TCCON 관측소인 안면도 기후변화감시소의 FTS 관측자료로부터 이산화탄소의 전량농도에 추가하여 연직분포를 산출하고 이를 검증하였다. TCCON에서는 이산화탄소 전량농도 산출을 위해 자체적으로 선형적 프로파일을 생산/제공하지만, 배경 대기 지역의 관측자료를 기반으로 하기 때문에 국지적인 배출원의 영향을 제대로 고려하지 못하며, 특히 지표면 부근의 농도 분포에 오차가 크게 나타남을 확인하였다. TCCON 선형적 프로파일에 비해 GEOS-Chem 모의 결과는 지표면 부근의 배출원 영향이나 대기경계층의 일변화 등을 더 잘 반영하였다.

이산화탄소의 전량농도는 TCCON과 GEOS-Chem의 두 선형적 프로파일에 의한 차이가 거의 나타나지 않았다. 이는 선형적 프로파일의 연직분포 형태가 이산화탄소 전량농도 산출에 미치는 영향이 크지 않음을 의미한다. 따라서 현재 TCCON의 산출 방법과 같이 전량농도 산출만을 목적으로 한다면 배경 대기 지역 농도에 기반해 생산된 선형적 프로파일을 이용해도 무방하다고 볼 수 있다.

전량농도 산출에서 나아가 FTS 관측으로부터 이산화탄소의 연직분포를 산출하기 위해서는 선형적 프로파일의 정확도를 개선할 필요가 있다. 이를 위해 본 연구에서는 GEOS-Chem의 모의 결과를 이용하였다. GEOS-Chem의 모의 결과를 이용한 선형적 프로파일

은 지표면 부근을 제외한 대류권에서 TCCON 선형적 프로파일보다 낮은 값을 보였고, 항공 관측 결과와 비교해도 TCCON 선형적 프로파일보다 더 큰 차이를 보였다. 그러나 GEOS-Chem 선형적 프로파일은 항공 관측 결과와 연직분포 형태가 더 유사하였고, 최종 산출된 이산화탄소의 연직분포는 TCCON 선형적 프로파일을 사용할 때보다 항공 관측 결과와 더 잘 일치하였다.

TCCON의 알고리즘을 통해 최종 산출되는 이산화탄소 연직분포는 스펙트럼 피팅을 통해 선형적 프로파일의 모양은 유지하고 일정한 비율로 증감된 형태로 나타난다. 따라서 GEOS-Chem이 이산화탄소를 전체적으로 과소 모의하더라도 연직분포가 항공 관측과 유사하게 나타난다면, 이산화탄소 연직분포 산출을 위한 선형적 프로파일로 유용하게 사용할 수 있을 것이다. 그러나 본 연구 및 현재 TCCON에서 사용하는 방법은 산출에 사용하는 파장의 고도에 따른 민감도를 고려하지 못하는 한계가 있다. Roche *et al.* (2021)은 TCCON에서 이산화탄소 산출에 사용하는 두 개의 파장 외에 서로 다른 고도에서 민감도를 갖는 세 파장 영역을 추가로 이용하고 고도별로 다른 스케일 팩터를 적용하여 이산화탄소의 연직분포를 산출한 바 있다. 향후 안면도 기후변화감시소의 FTS 관측 결과에도 이러한 방법을 적용하여 연직분포 산출 방법을 개선할 수 있을 것이다. 또한, 이산화탄소 연직분포 산출 기술의 개선 및 결과 검증을 위해 다양한 기상 조건이나 계절에서 기상항공기와의 공동 관측이 필요할 것으로 보인다.

감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원의 기상업무지원 기술 개발연구 내역사업으로 기후·기후변화 예측기술 지원 및 활용연구의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다 (“기후변화 입체감시 기술개발” KMA2018-00324).

References

- Baker, D.F., Law, R.M., Gurney, K.R., Rayner, P., Peylin, P., Denning, A.S., Bousquet, P., Bruhwiler, L., Chen, Y.H., Ciais, P., Fung, I.Y., Heimann, M., John, J., Maki, T., Maksyutov, S., Masarie, K., Prather, M., Pak, B., Taguchi, S., Zhu, Z. (2006) TransCom 3 inversion intercomparison: Impact of transport model errors on the interannual variability of regional CO₂ fluxes, 1998-2003, *Global Biogeochemical Cycles*, 20(1), GB1002. <https://doi.org/10.1029/2004GB002439>
- Frey, M., Sha, M.K., Hase, F., Kiel, M., Blumenstock, T., Harig, R., Surawicz, G., Deutscher, N.M., Shiomi, K., Franklin, J.E., Bosch, H., Chen, J., Grutter, M., Ohyama, H., Sun, Y., Butz, A., Tsidu, G.M., Ene, D., Wunch, D., Cao, Z., Garcia, O., Ramonet, M., Vogel, F., Orphal, J. (2019) Building the Collaborative Carbon Column Observing Network (COCCON): long-term stability and ensemble performance of the EM27/SUN Fourier transform spectrometer, *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(3), 1513-1530. <https://doi.org/10.5194/amt-12-1513-2019>
- 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>
- Lashof, D.A., Ahuja, D.R. (1990) Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming, *Nature*, 344(6266), 529-531. <https://doi.org/10.1038/344529a0>
- Laughner, J.L., Roche, S., Kiel, M., Toon, G.C., Wunch, D., Baier, B.C., Biraud, S., Chen, H., Kivi, R., Laemmle, T., McKain, K., Quehe, P., Rousogonous, C., Stephens, B.B., Walker, K., Wennberg, P.O. (2023) A new algorithm to generate a priori trace gas profiles for the GGG2020 retrieval algorithm, *Atmospheric Measurement Techniques*, 16(5), 1121-1146. <https://doi.org/10.5194/amt-16-1121-2023>
- Lee, H., Han, S.O., Ryoo, S.B., Lee, J.S., Lee, G.W. (2019) The measurement of atmospheric CO₂ at KMA GAW regional stations, its characteristics, and comparisons with other East Asian sites, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(4), 2149-2163. <https://doi.org/10.5194/acp-19-2149-2019>
- Lee, H., Dlugokencky, E.J., Turnbull, J.C., Lee, S., Lehman, S.J., Miller, J.B., Petron, G., Lim, J.S., Lee, G.W., Lee, S.S., Park, Y.S. (2020) Observations of atmospheric ¹⁴CO₂ at Anmyeondo GAW station, South Korea: implications for fossil fuel CO₂ and emission ratios, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, 12033-12045. <https://doi.org/10.5194/acp-20-12033-2020>
- Li, S., Goo, T.Y., Moon, H., Labzovskii, L., Kenea, S.T., Oh, Y.S., Lee, H., Byun, Y.H. (2019) Airborne in-situ measurement of CO₂ and CH₄ in Korea: Case study of vertical distribution measured at Anmyeon-do in Winter, *Atmosphere*, 29(5), 511-523, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14191/Atmos.2019.29.5.511>
- Meinshausen, M., Meinshausen, N., Hare, W., Raper, S.C., Frieler, K., Knutti, R., Frame, D.J., Allen, M.R. (2009) Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2°C, *Nature*, 458(7242), 1158-1162. <https://doi.org/10.1038/nature08017>
- Messerschmidt, J., Parazoo, N., Deutscher, N.M., Roehl, C., Warneke, T., Wennberg, P.O., Wunch, D. (2012) Evaluation of atmosphere-biosphere exchange estimations with TCCON measurements, *Atmospheric Chemistry and Physics Discussion*, 12, 12759-12800. <https://doi.org/10.5194/acpd-12-12759-2012>
- Nassar, R., Jones, D.B., Suntharalingam, P., Chen, J.M., Andres, R.J., Wecht, K.J., Yantosca, R.M., Kulawik, S.S., Bowman, K.W., Worden, J.R., Machida, T., Matsueda, H. (2010) Modeling global atmospheric CO₂ with improved emission inventories and CO₂ production from the oxidation of other carbon species, *Geoscientific Model Development*, 3(2), 689-716. <https://doi.org/10.5194/gmd-3-689-2010>
- Oda, T., Maksyutov, S. (2011) A very high-resolution (1 km × 1 km) global fossil fuel CO₂ emission inventory derived using a point source database and satellite observations of nighttime lights, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(2), 543-556. <https://doi.org/10.5194/acp-11-543-2011>
- Oh, Y.S., Kenea, S.T., Goo, T.Y., Chung, K.S., Rhee, J.S., Ou, M.L., Byun, Y.H., Wennberg, P.O., Kiel, M., Digangi, J.P., Diskin, G.S., Velazco, V.A., Griffith, D.W. (2018) Characteristics of greenhouse gas concentrations derived from ground-based FTS spectra at Anmyeondo, South Korea, *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(4), 2361-2374. <https://doi.org/10.5194/amt-11-2361-2018>
- Olivier, J.G., Schure, K.M., Peters, J.A.H.W. (2020) Trends in global CO₂ and total greenhouse gas emissions: 2020 Report, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.

- Prinn, R.G., Weiss, R.F., Arduini, J., Arnold, T., DeWitt, H.L., Fraser, P.J., Ganesan, A.L., Gasore, J., Harth, C.M., Hermansen, O., Kim, J., Krummel, P.B., Li, S., Loh, Z.M., Lunder, C.R., Maione, M., Manning, A.J., Miller, B.R., Mitrevski, B., Muhle, J., O'Doherty, S., Park, S., Reimann, S., Rigby, M., Saito, T., Salameh, P.K., Schmidt, R., Simmonds, P.G., Paul Steele, L., Vollmer, M.K., Wang, R.H., Yao, B., Yokouchi, Y., Young, D., Zhou, L. (2018) History of chemically and radiatively important atmospheric gases from the Advanced Global Atmospheric Gases Experiment (AGAGE), *Earth System Science Data*, 10(2), 985-1018. <https://doi.org/10.5194/essd-10-985-2018>
- Randerson, J.T., van der Werf, G.R., Giglio, L., Collatz, G.J., Kasishtatla, P.S. (2018) Global Fire Emissions Database, Version 4, (GFEDv4), ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1293>
- Roche, S., Strong, K., Wunch, D., Mendonca, J., Sweeney, C., Baier, B., Biraud, S.C., Laughner, J.L., Toon, G.C., Connor, B.J. (2021) Retrieval of atmospheric CO₂ vertical profiles from ground-based near-infrared spectra, *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(4), 3087-3118. <https://doi.org/10.5194/amt-14-3087-2021>
- Simone, N., Stettler, M., Eastham, S., Barrett, S. (2013) Aviation Emissions Inventory Code (AEIC) User Manual (R1), Laboratory for Aviation and the Environment, Massachusetts Institute of Technology, Report No: LAE-2013-001-N.
- Takahashi, T., Sutherland, S.C., Wanninkhof, R., Sweeney, C., Feely, R.A., Chipman, D.W., Hales, B., Friederich, G., Chavez, F., Sabine, C., Watson, A., Bakker, D.C.E., Schuster, U., Metzl, N., Yoshikawa-Inoue, H., Ishii, M., Midorikawa, T., Nojiri, Y., Kortzinger, A., Steinhoff, T., Hoppema, M., Olafsson, J., Arnarson, T.S., Tilbrook, B., Johannessen, T., Olsen, A., Bellerby, R., Wong, C.S., Delille, B., Bates, N.R., de Baar, H.J. (2009) Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO₂, and net sea-air CO₂ flux over the global oceans, *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(8-10), 554-577. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.12.009>
- Toon, G., Blavier, J.F., Washenfelder, R., Wunch, D., Keppel-Aleks, G., Wennberg, P., Connor, B., Sherlock, V., Griffith, D., Deutscher, N., Notholt, J. (2009) Total column carbon observing network (TCCON), In *Hyperspectral Imaging and Sensing of the Environment* (p. JMA3), Optica Publishing Group. <https://doi.org/10.1364/FTS.2009JMA3>
- Wheeler, M.D., Newman, S.M., Orr-Ewing, A.J., Ashfold, M.N. (1998) Cavity ring-down spectroscopy, *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions*, 94(3), 337-351. <https://doi.org/10.1039/A707686J>
- Wunch, D., Toon, G.C., Blavier, J.F.L., Washenfelder, R.A., Notholt, J., Connor, B.J., Griffith, D.W.T., Sherlock, V., Wennberg, P.O. (2011) The total carbon column observing network, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1943), 2087-2112. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0240>
- Yoro, K.O., Daramola, M.O. (2020) CO₂ emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect, In *Advances in Carbon Capture*, Woodhead Publishing, pp. 3-28. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819657-1.00001-3>

Authors Information

- 김만해 (서울대학교 지구환경과학부 선임연구원)
(manhae@snu.ac.kr)
- 오영석 (국립기상과학원 지구대기감시연구과 연구사)
(ysoh306@korea.kr)
- 안명환 (이화여자대학교 기후에너지시스템공학과 교수)
(terryahn65@ewha.ac.kr)
- 강민아 (이화여자대학교 기후에너지시스템공학과 박사후연구원)
(mina@ewhain.net)
- 시호연 (덴마크 기상청 박사후연구원)
(drive.hoyeon@gmail.com)
- 박록진 (서울대학교 지구환경과학부 교수)
(rjpark@snu.ac.kr)
- 김민아 (서울대학교 지구환경과학부 박사과정)
(kma0603@snu.ac.kr)
- 주상원 (국립기상과학원 지구대기감시연구과 연구관)
(swjoo@korea.kr)
- 김상우 (서울대학교 지구환경과학부 교수)
(sangwookim@snu.ac.kr)