

논문

최근 10년 한반도 안면도와 전 지구 이산화탄소 증가율 비교 분석

Analysis of Carbon Dioxide Growth Rate Observed at Anmyeon-do, Korea, and Globally over the Last Decade

이선란*, 신대근, 주상원, 서원익, 김수민

국립기상과학원 지구대기감시연구과

Sunran Lee* (formerly published as Shanlan Li), Daegeun Shin, Sangwon Joo, Wonick Seo, Sumin Kim

Global Atmosphere Watch and Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Seogwipo, Republic of Korea

접수일 2024년 9월 20일
수정일 2024년 10월 17일
채택일 2024년 10월 17일

Received 20 September 2024
Revised 17 October 2024
Accepted 17 October 2024

*Corresponding author
Tel: +82-(0)64-780-6658
E-mail: sunranlee@korea.kr

Abstract Variability in the annual growth rate of carbon dioxide (CO₂) on both global and regional scales is associated with changes in terrestrial carbon sinks. This study presents a comparative analysis of the year-to-year variability in CO₂ growth rates over the last decade from 2013 to 2023 in the Anmyeon-do (AMY: 36.53°N, 126.32°E, South Korea) regional background station and globally recent decade. We first investigated the influence of the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) on CO₂ growth rates. During the strong El Niño event of 2015/2016, both the AMY and global CO₂ growth rates increased by over 10% compared to the last decade average. Conversely, the subsequent La Niña event of 2021/2022 led to a decline of more than 10% in both AMY and global CO₂ growth rates, indicating a similar response of CO₂ growth rates at AMY to ENSO impact as observed globally. The study also focused on the years 2017 and 2019, which exhibited significant year-to-year variability in CO₂ growth rates at AMY relative to the global. In 2017, the global annual CO₂ growth rate aligned with the last decade average, whereas the AMY experienced a 40% reduction, representing a notably larger decrease. Conversely, in 2019, while the global CO₂ growth rate remained consistent with last decade average, AMY recorded a 22% increase. To explore this pronounced year to year variability, we analyzed the optimized terrestrial Net Ecosystem Exchange (NEE) of CO₂ from the NOAA CarbonTracker model. In 2017, the biosphere CO₂ uptake around the Korean Peninsula was 0.27 PgC, the highest in the last decade, while in 2019, it dropped to 0.14 PgC, approximately half of the 2017 level. These findings suggest that the CO₂ growth rates observed in AMY are highly sensitive to terrestrial changes due to temperature and drought conditions around the Korean Peninsula, highlighting the imperative for long-term monitoring to understand the impact of regional climatic characteristics on the carbon cycle amid ongoing climate change.

Key words: Growth rate, Carbon dioxide, Anmyeon-do, Korea, Terrestrial carbon sink

1. 서론

인위적인 이산화탄소(CO₂) 배출의 약 55%는 육상 생태계와 해양에 의해 흡수되며(Friedlingstein *et al.*, 2022) 나머지는 대기 중에 잔류하게 된다. 전 지구 평균 CO₂ 증가율의 장기 및 경년 변동성(Year-to-Year)은 인간활동에 따른 배출의 변화와 육상생태계에 의한 CO₂의 흡수/소멸에 영향을 받는다. 이때 CO₂의

흡수는 일정하지 않고 엘니뇨 남방 진동(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)의 변동성과 아주 잘 일치한다고 보고되고 있다(Fang *et al.*, 2017; Hashimoto *et al.*, 2004). ENSO는 적도지역의 탄소 순환뿐 아니라 최대 수개월의 지연이 있지만 극지방의 탄소 순환에도 영향을 준다(Das *et al.*, 2022). 최근, CO₂ 증가율의 변동성은 전 지구적 규모에서 ENSO와 함께 열대지역의 평균 기온과 수분의 변동과 크게 연관되는 것으

로 밝혀졌다(Liu *et al.*, 2023; Liao *et al.*, 2021; Fang *et al.*, 2017). 향후 엘니뇨에 의한 가뭄 현상과 기후변화에 의한 온도 상승에 따른 CO₂의 변동성은 전 지구적인 탄소 순환 측면에서 주목을 받고 있다.

탄소 순환(특히, 흡수원)에 대한 정확한 이해와 정량적인 추정에는 온실가스 배출량을 모니터링하고 미래 탄소 순환 - 기후 되먹임 예측의 큰 불확실성을 줄이기 위한 핵심 사항이다. 최근에는 전 지구적인 기후변화가 순수한 육지 탄소 흡수량의 증가에 따라 일부 완화되었다고 보고하고 있다(Ruehr *et al.*, 2023; Ballantyne *et al.*, 2017). CO₂의 흡수량은 1960년에 연간 1.2 PgC에서 2010년 연간 3.1 PgC로 2배 이상 증가했고 이런 추세는 기후변화의 되먹임 작용이 아닌 이산화탄소 비료(fertilization) 효과에 의한 광합성 증가로 알려졌으며, 기후변화에 따른 고온 현상이 주로 높은 위도에서 낮은 위도를 억제하여 일어난 것으로 밝혀졌다(Keenan *et al.*, 2016). CO₂ 농도의 증가에 따른 식물 광합성 증가가 역설적으로 21세기 지구온난화를 뚜렷하게 억제하였지만(Ruehr *et al.*, 2023), 대기 중 CO₂ 농도는 지속적으로 증가하고 있기에 향후 탄소 순환의 변동에 대해 지속적으로 모니터링할 필요가 있다. 이는 CO₂ 증가가 지구온난화 및 기후변화 되먹임을 정량적으로 평가할 수 있는 기회를 제공할 뿐 아니라 육상생태계 흡수 증가에 따른 기후변화의 영향을 조사할 수 있는 계기를 제공한다.

전 지구적인 탄소 순환에 비해 지역적인 탄소 순환은 더 많은 불확실성을 가지고 있고 뚜렷한 지역적인 특성을 보인다(van der Woude *et al.*, 2023; Piao *et al.*, 2020; Parazoo *et al.*, 2016; Graven *et al.*, 2013). 최근 미국의 동부와 서부지역에서 연구한 결과를 살펴보면 수분이 제한적인 서부지역은 기후변화의 영향이 식생의 성장에 부정적인 영향을 주었지만, 동부지역은 전 지구적인 패턴과 유사하게 CO₂ 비료 효과에 따라 탄소의 흡수가 증가하면서 기후변화에 긍정적인 영향을 보였다(Hogan *et al.*, 2024). 이는 육지 탄소 균형은 건조 및 기후변화에 따른 열스트레스에 따라 지역적으로 많이 달라지는 것을 의미한다. 가뭄과 폭염은 지역

적으로 토지 탄소 흡수의 급격한 감소를 유발하는 것으로 나타났다(Ciais *et al.*, 2005). 전 세계 대부분 지역에서 물 부족으로 인해 광합성이 제한되고 있으며, 특히, 2022년 유럽지역에서 발생한 극한 가뭄으로 인해 유럽지역의 육상 식생에 의한 탄소의 흡수가 현저하게 감소하였다(van der Woude *et al.*, 2023). 이는 CO₂의 계절 특성 및 연 증가율에 영향을 주는 탄소 흡수의 변화가 온도와 가뭄에 민감하게 반응하는 것을 의미한다(Humphrey *et al.*, 2018; Keenan *et al.*, 2013). WMO의 기후변화보고서에 따르면 향후 5년(2024~2028년) 사이 적어도 한 해에 일시적으로 산업화 이전 대비 1.5°C를 초과할 가능성은 80%로, 가능성이 0에 가까웠던 2015년 이후로 꾸준히 증가하였다(WMO, 2024). 이는 영구적으로 1.5°C의 목표를 위반하지 않았지만, 가장 따뜻한 2023년을 제치고 새로운 온도 기록을 세울 가능성이 86%에 이른다. 현재 급격한 기후변화에 따른 지역적인 탄소 순환의 영향을 이해하는 것이 어느 때보다 중요한 시기이다.

한반도의 장기적인 CO₂ 배경농도의 변동성 및 그에 따른 탄소 순환을 이해하기 위하여 기상청(국립기상과학원)에서는 매년 지구대기감시보고서를 발간한다(KMA, 2024). 보고서에서는 각 지상관측소에서 생산되는 온실가스의 장기 변동성 추이를 수록함으로써 한반도에서의 탄소 순환을 이해하는 데 중요한 정보를 제공한다. 안면도 지구대기감시소에서 지난 20년(1999~2017)간 연속 관측한 CO₂의 농도는 우리나라 인위적인 배출량 변화뿐 아니라 CO₂ 흡수 증가에 따른 한반도 지역적인 탄소 순환의 변화도 감지할 수 있었다(Yun *et al.*, 2020). 본 연구는 안면도에서 최근 10년(2013~2023년)간 관측한 CO₂ 증가율의 변동성과 전 지구의 증가율을 비교 및 분석하고자 한다. 안면도 증가율의 경년 변동성이 전 지구적인 CO₂의 증가율과 비슷한 혹은 다른 경향을 보이는 사례에 대해서 살펴보고, 경년 변동성에 미치는 ENSO 영향, 지역적인 온도와 가뭄에 따른 생태계 흡수 변동성과의 상관성을 살펴봄으로써 우리나라에서 관측한 CO₂ 농도 증감 사례에 영향을 주는 주 원인을 알아보았다. 이 연

구는 우리나라 더 나아가 아시아지역 생태계의 탄소 흡수를 견인하는 주요 동인을 식별하는 데 기초자료를 제공할 뿐 아니라 탄소 중립 실현을 위한 한반도 지역에 적합한 생태계 관리의 전략 수립을 위한 과학적인 정보를 제공할 것이다.

2. 방 법

2.1 안면도 관측소 및 관측 방법

안면도 지구대기감시소 (36.53°N, 126.32°E)는 한반도의 서쪽 해안가에 위치하여 있고, 서울에서 남서쪽으로 약 130 km 떨어져 있다. 또한, 반경 100 km 이내에는 반도체 산업이 존재하며, 35 km 이내에 국내 최대 규모의 석탄 화력발전소가 있다. 지역적으로 여러 가지 농작물 경작의 농업활동이 활발하다 (Lee *et al.*, 2019). 계절에 따른 기상의 영향을 살펴보면 겨울~봄철은 시베리아 고기압의 영향으로 북풍 계열의 바람이 우세하여 주로 아시아대륙의 장거리 수송의 영향이 강화된다. CO₂의 자연적인 흡수가 강화되는 여름철은 아시아 몬순의 영향으로 남풍 계열의 바람이 우세하여 해양에서 기원하는 잘 희석된 배경농도의 관측이 유리하다. 가을철은 오호츠크기단의 영향으로 동풍이 우세하여 계절에 따라 다양한 기원의 CO₂ 농도 관측이 가능하다 (Lee *et al.*, 2023).

여름철 안면도에서 관측한 CO₂의 농도에 영향을 주는 여름철 식생의 지역적인 분포를 파악하기 위하여 Korea Integrated Model (KIM)-Stochastic Time-Inverted Lagrangian Transport (STILT) 모델로 계산한 대표적인 여름철 (2020년 7월 평균) 풋프린트 (Footprint)를 그림 1에 나타냈다 (Kenea *et al.*, 2023). 안면도는 주로 한반도, 일본 남부지역과 중국 동부, 동북부 일부 지역의 영향이 제일 강하게 나타나고 있다. 제한적으로 몽골 서부의 영향도 있을 것으로 추정되지만 그 빈도가 약한 것으로 추정된다.

안면도에서는 1999년부터 비분산적외선 (Non-Dispersive Infrared analyzer, NDIR) 방법으로 CO₂의 관측을 시작하였고, 2012년부터 공동감쇠분광기

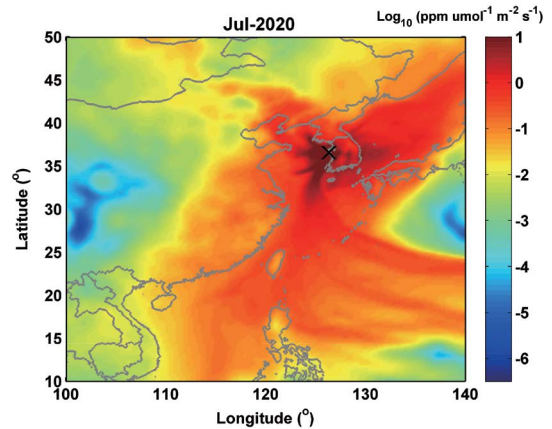


Fig. 1. Three-days backward trajectories footprint for July 2020, calculated using the Korean Integrated Model (KIM)-Stochastic Time-Inverted Lagrangian Transport (STILT) model, arriving at Anmyeon-do station (marked with an X at 36.53°N, 126.32°E).

(Cavity-Ring Down Spectroscopy, CRDS)로 5초 간격의 관측자료를 수집하기 시작하였다. 두 관측 장비는 2012년 동시 관측을 수행하여 연속성 등에 대한 검증을 마무리하였다 (Lee *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2014). 시료 입구는 20 m 높이의 타워에 설치되어 있으며 대기 시료는 영하 80°C의 냉동기 (CT-90)를 거쳐 대부분의 수분(약 0.004% 수증기 함유)을 제거한 후 관측 장비에 주입된다. 안면도 장비는 WMO-X2019 척도의 표준 가스를 적용하여 2주의 간격으로 검·교정을 수행하고 있고, 장비의 수분희석 효과 및 정밀도 등을 고려한 전체 불확도는 약 0.12 ppm이다 (Lee *et al.*, 2019). 관측의 시스템 구성과 한반도 CO₂ 배경농도의 특성은 Lee *et al.* (2019)에 자세히 소개되어 있다.

2.2 CO₂의 배경농도 산출 및 월/연별 증가율 계산

CO₂의 월/연별 증가율을 계산하기 위하여 CO₂의 배경농도를 활용하였다. 안면도를 포함한 지구대기감시소에서 수집된 원시 자료 (Level 0, L0)는 다음 단계를 거쳐 배경농도 (Level 3, L3)를 산출한다. 첫째, 관측 장비의 변수 및 계측 한계 등에 따라 자동품질관리가 수행되며 최종 L1 자료가 생성된다. 둘째, 자동 품질관리에서 선별된 L1 자료에서 플래깅되지 못한 자료를

분석자가 수동 품질관리를 수행하여 최종 확정하여 과학적인 분석이 가능한 L2 자료로 분류한다. 셋째, 배경농도를 선별한다. 관측소 주변의 인위적/자연적 배출이 포함될 경우 지역 규모에서 대표성을 나타내기가 어렵기에 통계적인 방법을 이용하여 이산화탄소의 배경농도를 선별한다. 각 관측소 특성과 자료 분석을 통해 자체적으로 개발한 방법(NIMS 필터링: National Institute Meteorological Sciences)으로 L3 자료를 생산한다. NIMS 필터링 방법은 관측자료에서 시공간적인 변동성이 적은 자료만을 선별하는 방법이며 관측소의 특징에 맞게 기준을 정립한다. 시간 표준편차, 연속값의 차이와 30일 이동중앙값과의 차이를 경험적으로 결정하여 배경대기를 선별하는 방법이다(Seo *et al.*, 2021). 넷째, NIMS 필터링을 거친 일평균 배경 자료는 지역의 영향을 받는 단기 변동성을 포함하고 있다. 이 단기 변동성을 제거하여 몇 주 이상의 시간에 걸쳐 일어나는 CO₂의 대표적인 배경농도를 분석하기 위하여 아래와 같은 추가적인 디지털 필터링(digital filtering) 방법을 사용한다. 우선, NIMS 필터링된 일평균을 이용하여 장기추세를 설명하는 다항식함수와 연변동성을 설명하는 고조파(harmonics)로 구성된 적합함수(수식 1)를 계산하여 커브 피팅된 일별 배경농도 자료를 산정한다(Masarie and Tans, 1995). 다음 적합함수로 계산한 일평균 자료와 NIMS 필터링에 의해 구한 일평균 자료와의 차이를 푸리에 변환하여 주파수 영역으로 이동한 다음 저역통과필터(수식 2)를 이용하여 고주파 성분을 제거한 후 역 푸리에 변환을 한다. 역 변환된 값에 적합함수를 더하면 몇 주 이상의 주기 성분만을 갖는 필터링된 CO₂ 농도가 구해진다(Thoning *et al.*, 1989). 배경농도 산출에 사용한 적합함수(수식 1)와 저역통과필터 함수(수식 2)는 다음과 같다.

$$f(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \sum_{k=1}^4 [b_{2k-1} \sin(\frac{2\pi k}{T} t) + b_{2k} \cos(\frac{2\pi k}{T} t)] \quad (1)$$

$$H(f) = \exp[-\ln(2) * (\frac{f}{f_c})^6] \quad (2)$$

수식 (1)의 t 는 일 단위의 시간, T 는 365.25일이며, a_1 는 경년주기 파라미터, b_k 는 연주기 파라미터이며, k 는 1에서 4로 증가하는 고조파 항이다. 수식 (2)의 f 는 주파수이며 f_c 는 차단 주파수이다. 북반구의 균일한 대기 혼합이 2~3개월 이내에 일어나기 때문에 차단 주파수로 사용한 값은 80 day/cycle이다. 한반도 기후 변화감시소(안면도, 제주도 고산, 울릉도-독도)의 CO₂ 배경농도를 산출하는 자세한 기준, 단계 및 방법은 Seo *et al.* (2021)에 자세히 서술하였다.

본 연구에서는 CO₂ 농도의 장기적인 변동 추세뿐만 아니라 단기적인 요인(예, 기상 및 지역적인 광합성의 변화)에 의한 농도의 변동성을 파악하기 위하여 CO₂ 월별 증가율을 계산하여 분석하였다. CO₂의 월별 증가율은 배출과 흡수 변동성 및 ESNO와 같은 기후 사건이 대기 중 CO₂의 농도에 반영되는 시간을 감안하여 아래와 같이 계산하였다(Das *et al.*, 2022; Patra *et al.*, 2005).

$$GR_m = GR_{m+6} - GR_{m-6} \quad (3)$$

GR_m 은 m 월의 CO₂ 증가율이다. 예를 들면 2013년 7월의 이산화탄소 월 증가율은 2014년 1월과 해당 연도의 1월 이산화탄소 농도 평균값과의 차이로 산정한다. 위와 같이 산출한 최근 10년간의 월평균 증가율 자료를 로컬회귀 필터링(Locally Weighted Scatterplot Smoothing, LOWESS) 방법으로 다시 처리한다. 이는 특정 달에 일어날 수 있는 비정상적인 변동과 같은 노이즈를 제거하여 좀 더 안정적인 이산화탄소 농도의 증가 추세를 보기 위함이다(Patra *et al.*, 2005). 기상청에서 정기적으로 발간하는 지구대기감시보고서의 경우 전년도 대비 절대적인 연평균 증가값으로 당해 연도 연평균 증가율을 보고하고 있다(KMA, 2024). 하지만 본 연구에서는 단기적인 요인(기상 및 지역 변화)에 의한 변동성을 함께 이해하고자 위에 제시한 방법으로 산출한 월별 증가율을 이용하여 연평균 증가율을 계산하였다. 또한 제2절 방법론에서 서술한 장비의 수분회석 효과 및 정밀도 등을 반영한 전체 관측 불확도(0.12 ppm)를 연평균 증가율의 불확도로 간주하여

분석하였다. 전 지구 CO₂의 연평균 증가율은 NOAA에서 보고하는 값을 사용하였다(Lan *et al.*, 2024). 전 지구 연평균 증가율은 40여 개의 해양배경대기 관측소에서 관측한 자료에서 가장 최근의 12월과 1월의 평균에서 1년 전에 측정된 동일한 12~1월 평균을 빼서 결정한다. 전 지구 증가율의 불확도는 붓스트랩(bootstrap) 방법으로 100개의 관측소자료를 무작위로 선별하여 계산한 증가율의 1-σ이다(Ballantyne *et al.*, 2012).

3. 결과 및 토의

3.1 전 지구 CO₂의 대기 중 잔류율 분석

인위적인 배출과, 육상생태계 탄소 흡수의 변화는 대기 중에 축적되는 CO₂ 양에 영향을 주고, 궁극적으로 대기 중 CO₂ 농도의 증가율의 변동에 반영된다. 전 지구 CO₂ 증가율은 적도지역 열대우림의 탄소 흡수 변화에 즉각적으로 반응하고 다음으로 중-고위도 지역의 영향을 받는 것으로 알고 있다(Rayner *et al.*, 2015). 인위적인 배출량과 육상생태계의 탄소 흡수능력의 변화를 전 지구적인 관점에서 살펴보기 위하여 전 지구의 CO₂의 잔류율(Airborne Fraction)에 대해서 분석하였다. CO₂의 대기 중 잔류율은 인간 활동으

로 배출된 이산화탄소 중 해양과 식생의 흡수 제거를 거친 후 대기 중에 남아 있는 비율을 나타내며 아래 수식 (4~6)에 따라 계산하였다. 자세한 방법은 Gloor *et al.* (2010)에서 서술하였다.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = F_{\text{anthro}} - F_{\text{sink}} \tag{4}$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \alpha F_{\text{anthro}} \tag{5}$$

M은 대기 중에 있는 이산화탄소의 질량, α는 대기 잔류율(Airborne Fraction)이며 F_{anthro}는 인위적인 온실가스 배출량으로 화석연료 배출량, 토지 사용에 따른 배출량의 합으로 표현한다. 즉 대기 중 이산화탄소 농도의 변동은 인위적 배출량과 흡수의 차이로 해석된다. F_{sink}는 육상생태계와 해양의 흡수량을 나타낸다. 수식 (4)에서 수식 (5)를 빼면 수식 (6)을 얻는다

$$\alpha = 1 - (F_{\text{sink}} / F_{\text{anthro}}) \tag{6}$$

그림 2에 최근 20년 Global Carbon Project (GCP) (Friedlingstein *et al.*, 2022)에서 보고한 화석연료의 배출량과 수식 (6)에 따라 계산한 CO₂의 대기 중 잔류율을 제시하였다. CO₂의 인위적인 배출량, 식생과 해양에 의한 흡수량은 GCP에서 보고한 값으로 계산하였다. GCP의 자료는 2021년까지 공개되어 있기에

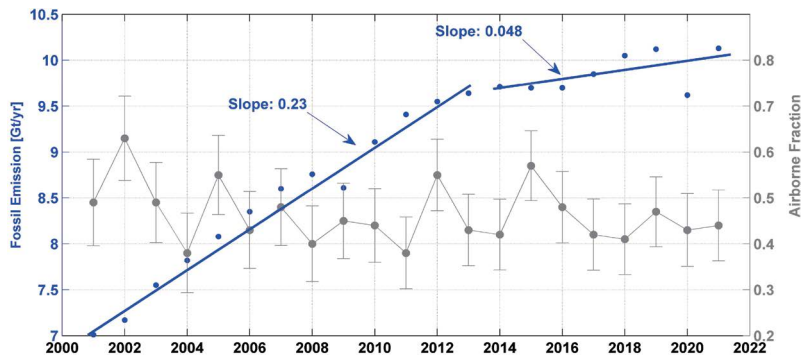


Fig. 2. Global Fossil Fuel emissions (blue dots) and the airborne fraction of CO₂ (gray dotted lines and with 1-sigma error) remaining in the atmosphere each year. The uncertainties of airborne fraction were propagated from 1-sigma error of anthropogenic emission and sinks from ocean and land. The blue lines indicate the long-term increasing trends during the periods 2001~2013 and 2014~2021, respectively, with marked linear regression slope in the increasing trend of fossil fuel emission between two periods. The airborne fraction was calculated using anthropogenic emissions, sinks from biosphere and ocean, as reported by the Global Carbon Project (GCP) (<https://globalcarbonproject.org>).

최종 2021년까지 제시하였다.

최근 10년의 추세를 분석하기 위하여 2000년 전체 20년간 화석연료의 배출량과 수식 (6)에 의하여 계산한 CO₂의 대기 중 잔류율을 그림 2에 도시하였다. 2000년대부터 약 45±8%의 CO₂가 대기 중에 잔류하고 있는 것으로 추정된다. Keenan *et al.* (2016)에 의하면 2000년 초반부터 약 10년(2002~2014) 화석연료의 빠른 증가 추세에도 불구하고 대기 중 잔류율이 통계적으로 유의미하게 감소했고, 이는 고위도지역에서의 CO₂의 fertilization에 의해 발생한 식생의 흡수 증가로 일어난 것으로 보고하고 있다. 이렇게 강화된 CO₂의 흡수 증가로 인해 대기 중 CO₂ 증가율의 둔화로 이어지기도 했다(Keenan *et al.*, 2016). 이는 고위도지역의 온도변화가 식생 흡수의 증가를 야기하여 전 지구 이산화탄소의 증가율 감소로 이어졌음을 시사한다. 일부 연구 결과는 2000년대 초반 10년은 온난화가 일시적으로 둔화되면서 식물 및 토양의 호흡 활동이 감소하여 육상생태계가 더 많은 탄소를 흡수하게 되었다고 발표하였다(Ballantyne *et al.*, 2017).

약 2013/2014년부터 화석연료의 배출량은 그 전 10년에 비해 증가 추세가 5배 이상 둔화된 것으로 나타났다지만 CO₂의 대기 중 잔류율은 2000년대 초반 10년에 비해 뚜렷한 감소 추세를 보이지 않고 있다(그림 2). 2015/2016년 엘니뇨가 발생했던 시기 CO₂의 잔류율이 일시적으로 크게 증가하여 약 55±8% 이상을 보이다가 그 이후 평균 약 45±8% 수준을 유지하는 것을

볼 수 있다. 이는 인위적인 화석연료의 배출이 감소했지만 전 지구적으로 유의미한 탄소 흡수의 증가가 발생하지 않았거나 혹은 감소했을 가능성을 시사한다. 최근 10년 전 지구 탄소 흡수의 정량적인 평가는 향후 전 지구 식생 모델을 이용하여 살펴볼 필요가 있다.

3.2 최근 전 지구 및 안면도 이산화탄소 변동성 분석

그림 3은 안면도에서 2013년부터 2023년까지 관측한 L2 시간 자료와 위 방법론 2.2에 의해서 산출된 커브피팅된 L3 일별 배경농도를 보여주고 있다. 안면도는 주변 및 지역적인 오염원의 영향으로 빈번한 오염 이벤트 농도를 보여주고 있다. 그림 4는 전 지구와 안면도에서 10년간 관측한 CO₂ 배경농도의 계절 변동성과 증가 추세를 보여주고 있다. 전 지구의 CO₂ 농도는 NOAA에서 약 40여 개의 해양 배경농도 관측소에서 채취한 플라스크 분석자료를 활용하였다(Masarie and Tans, 1995). 안면도와 전 지구의 평균 CO₂ 농도는 여름철에 낮고 봄철에 높은 비슷한 계절 변동성을 보이지만 안면도에서 관측한 배경농도는 전 지구 평균보다 높고 계절 변동성 폭도 큰 것으로 나타났다. 특히 여름철은 비슷한 수준이지만 봄, 가을, 겨울철은 큰 차이를 보인다. 이는 안면도가 인구밀도가 높은 북반구 중위도에 위치하여 있고, 육상생태계가 발달했기에 배경농도가 높고 계절 변동성도 큰 것으로 알려져 있다(Nevison *et al.*, 2008).

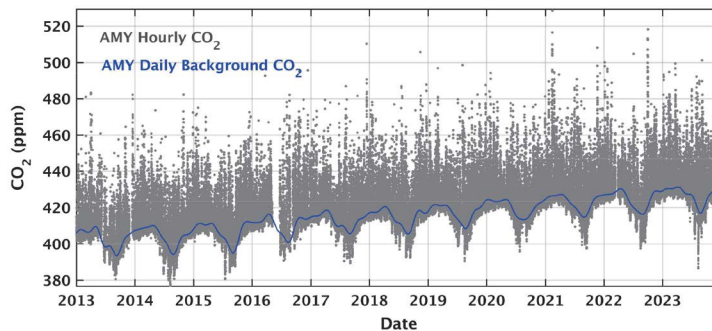


Fig. 3. Time-series of the hourly (gray dots) and curve fitted (blue line) dry mole fraction of CO₂ observed at Anmyeon-do from 2013 to 2023.

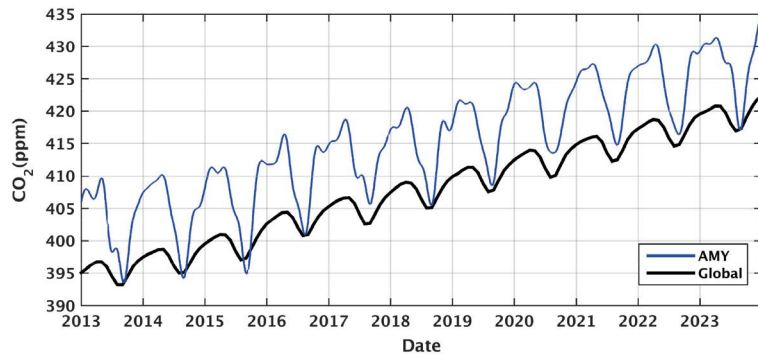


Fig. 4. Time-series of the daily mean dry mole fraction of CO₂ observed at Anmyeon-do (blue line) and compared to global values (black line) from 2013 to 2023. The global data were obtained from <http://gml.noaa.gov/ccgg/trends/data.html>.

2023년 안면도에서 관측한 CO₂의 연평균 농도는 427.57 ppm으로 2013년 평균 농도 403.26 ppm에 비해 약 6.0% 증가하였으며 평균 약 2.43 ppm/year의 증가율을 보이고 있다. 2023년 전 지구의 평균 농도는 약 419.32 ppm이며, 2013년 395.40 ppm으로 기록되고 있다. 안면도에서 관측한 CO₂의 변화와 비슷하게 약 6.0% 증가하였으며 평균 약 2.39 ppm/year의 증가율을 보이고 있다. 안면도의 배경농도는 전 지구에 비해 높지만 최근 10년 CO₂의 평균 증가율은 아주 비슷한 수준의 증가 속도를 보여주고 있다. 지역배경대기 관측소에서 관측한 CO₂ 증가율의 경년 변동성은 지역적인 CO₂ 플럭스의 변화에 의해 단기적인 변동성을 보인다. 하지만 10년 평균 증가율은 배출과 흡수에 의한 전 지구 대기 혼합의 균질화에 의해 비슷한 수준을 보일 수 있음을 제시한다. 3.3절에서 안면도 CO₂ 증가율의 단기 변동성을 견인하는 원인에 대해서 자세히 분석하고자 한다.

3.3 안면도 이산화탄소의 증가율 변동 원인 분석

3.3.1 ENSO의 영향

전 지구 CO₂ 농도의 증가율은 열대지역 식생 흡수의 변동에 즉각적으로 반응하는 것으로 알려져 있다 (Rayner *et al.*, 2015). 엘니뇨 남방 진동 (ENSO)은 주로 열대지역의 기후에 영향을 주는 중요한 기후 사건이다. 열대 육상생물권은 엘니뇨 (El Niño) 기간 건조

한 환경에 따른 호흡 증가로 탄소 흡수량이 감소하지만 라니냐 (La Niña)의 해에는 시원하고 습윤한 환경에서 육상생태계의 생산량 증가로 탄소 흡수가 증가하는 것으로 알려져 있다 (Liao *et al.*, 2021; Chatterjee *et al.*, 2017; Fang *et al.*, 2017). 2015/2016년은 대표적인 강한 엘니뇨에 의한 건조기후가 뚜렷했던 시기로 건조기후에서 탄소 순환의 변동성을 연구하는 대표적인 사례로 간주되고 있다 (Betts *et al.*, 2018). 이 시기는 높은 기온에 따른 토양/식생 호흡이 증가하고 결과적으로 전 지구의 이산화탄소 농도가 크게 증가하였다. 또한 건조한 기후 때문에 산불에 의한 배출이 증가되었고 이는 미국항공우주국 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) OCO-3 위성자료에서도 뚜렷하게 관측되었다 (Chatterjee *et al.*, 2017). NOAA에서 2016년 보고한 전 지구의 증가율은 2.83 ± 0.08 ppm, 안면도의 연평균 증가율은 2.76 ± 0.12 ppm으로 아주 비슷한 수준으로 전체 10년 평균 증가율 (약 2.40 ppm/year)에 비해 10% 이상 증가한 수준이다 (그림 5). 전 지구의 증가율은 중위도에 위치한 안면도보다 좀 더 열대지역의 식생의 영향을 크게 받고 있으며 ENSO의 영향도 주로 열대우림에서 즉각적으로 나타나는 것을 알 수 있지만 (Rayner *et al.*, 2015) 높은 증가율을 보인 안면도지역도 엘니뇨의 영향을 받고 있음을 시사한다 (Seo *et al.*, 2021).

2021/2022년은 강한 라니냐가 발생한 시기이다.

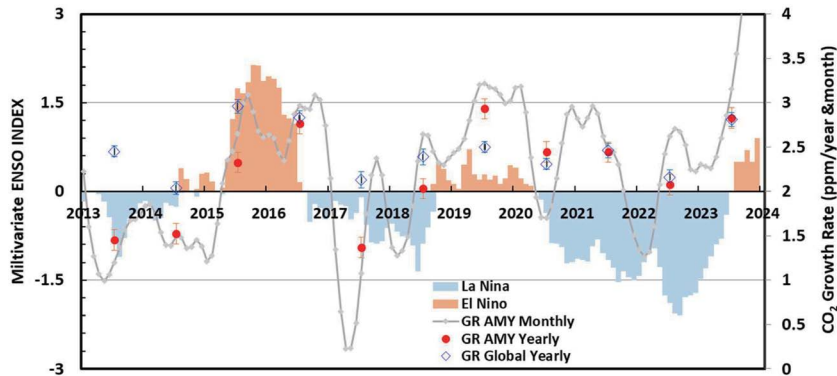


Fig. 5. Monthly (gray dotted line) and yearly (red circles) CO₂ growth rate (ppm/yr) at Anmyeon-do, compared to the Global annual growth rate (blue diamonds) with uncertainties. The multivariate El Niño Southern Oscillation (ENSO) index is shown in the shaded box plot, with orange and sky blue indicating positive and negative ENSO indices, respectively. The ENSO indices were obtained from <https://www.psl.noaa.gov/enso/mei>.

2022년도 전 지구 증가율은 2.20 ± 0.08 ppm이고 안면도에서의 연간 증가율은 2.07 ± 0.12 ppm으로 안면도에서 2.76 ± 0.12 ppm을 보였던 2016년 엘니뇨에 해에 비해 큰 폭으로 감소하였고 전체 10년 평균에 비해서도 약 10% 이상 비슷하게 감소하였다. 라니냐는 열대 지역의 광합성 증가를 통한 CO₂ 농도의 감소를 야기하지만 이 효과는 기존 여러 연구 결과에서 보고하듯이 적도지역뿐 아니라 중위도지역에도 영향을 주는 기후 사건임을 보여준다(Das *et al.*, 2022). 엘니뇨와 라니냐의 기후학적인 사건이 발생한 해에 안면도와 전 지구 증가율은 아주 비슷한 증가 및 감소 패턴을 보이고 있으며 이는 전 지구뿐 아니라 지역적인 탄소 순환에 영향을 주는 중요한 요인임을 알 수 있다.

3.3.2 2017/2019년 이산화탄소의 증감 사례 분석

전 지구와 안면도의 CO₂의 연평균 증가율의 차이를 그림 6에 도시하였다. 안면도에서 전 지구에 비해 높은 증가율을 보인 연도는 2019년이지만 더 낮은 증가율을 보인 시기는 2013/2014년이었고 다음으로 2017년인 것으로 보인다. Keenan *et al.* (2016)의 연구에서는 2002년부터 2014년까지 전 지구 이산화탄소 증가율의 감소는 유라시아 등 고위도지역에서 기후변화에 따른 고온 현상이 주로 높은 위도에서 낮은 기온을 억제하여 식생 흡수를 강화하여 일어난 것으로 보

고하고 있다. 그림 7에서 보이듯이 2013/2014년 한반도 주변의 식생 흡수가 2017년에 비해 크게 강화되는 경향은 나타나지 않고 있다. 여름철 안면도를 포함한 동북아시아지역에서는 상당히 낮은 CO₂ 농도가 관측되며 이는 중국 북부와 러시아 등 고위도지역의 강한 식생 흡수의 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Shim *et al.*, 2013). 고위도지역의 식생 흡수 변화와 안면도 CO₂ 변동성과의 상관성 분석은 이 연구의 범위를 벗어나기에 향후 동아시아에 위치한 GAW 배경농도 관측소의 자료를 종합하여 분석해볼 필요가 있다. 본 연구에서는 2017년과 2019년의 사례를 집중적으로 살펴보고자 한다. 2017년 전 지구의 CO₂의 증가율은 2.14 ± 0.09 ppm, 안면도는 1.36 ± 0.12 ppm으로 안면도는 최근 10년 평균 증가율에 비해 약 40% 감소하여 큰 경년 변동성을 보이고 있다. 2019년의 경우 전 지구 CO₂의 증가율은 최근 10년 평균과 비슷한 수준이지만 안면도는 2.93 ± 0.12 ppm 최근 10년에 비해 약 22% 높은 증가를 보이고 있다. 이산화탄소 증가율의 경년 변동성은 주로 식생 흡수의 변동성에 의해 일어난다(Keenan *et al.*, 2016). 안면도에서 관측한 증가율의 변화 폭이 전 지구에 비해 크다는 것은 좀 더 지역적인 특성을 반영함을 지시한다.

그림 7은 2012년부터 2023년까지 NOAA 탄소추적 시스템(CarbonTracker model, CT2022)(Jacobson *et*

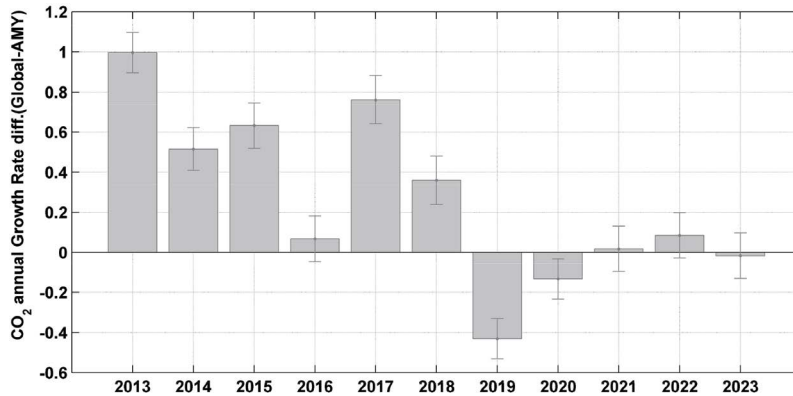


Fig. 6. The difference in annual average CO₂ growth rate (ppm/yr) observed at Global and Anmyeon-do. Propagated uncertainties were represented by error bar. Global growth rate uncertainties were sourced from reported value (Lan *et al.*, 2024), while observational uncertainties were applied to the data from Anmyeon-do.

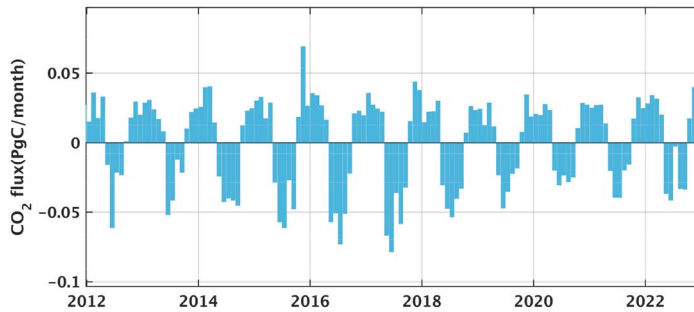


Fig. 7. The CT model optimized monthly CO₂ flux (PgC/month) in the land biosphere across the latitude range of 32~42°N and longitude range of 120~130°E. The optimized flux data were obtained from NOAA (<http://carbontracker.noaa.gov>).

al., 2023)에서 최적화한 육상생태계 이산화탄소 Net Ecosystem Exchange (NEE)를 한반도를 포함한 위경도 범위 (33~42°N, 120~130°E)에서 계산한 월별 CO₂ 플럭스이다. 여름철에는 식생의 흡수가 강화되기에 음의 값을 나타내며 음의 절대값이 클수록 식생의 흡수가 더 강화되는 것을 의미한다. 한반도에서는 5월부터 식생의 흡수가 시작되어 9월까지 지속되고 그 외 계절에는 주로 호흡에 의한 배출로 양의 값을 보이고 있다(그림 7). 전체 약 10년간 한반도에서 식생의 흡수가 제일 강한 시기는 2017년이며 5~9월까지 약 0.27 PgC의 흡수가 발생하였다. 하지만 2019년 흡수량은 약 0.14 PgC로 2017년의 절반 수준으로 감소한 것으로 나타났다. 그림 8은 2017년과 2019년 식생 흡

수가 강하게 발생한 5~9월까지 탄소추적 시스템에서 최적화한 NEE의 최근 10년(2012~2022)에 대한 아노말리를 제시하였다. 식생의 흡수의 변화가 한반도를 중심으로 크게 나타났으며 2017년은 한반도의 식생 흡수가 강화된 반면 2019년은 좀 더 배출이 강화되는 양의 값으로 나타났다(그림 8).

2019년 우리나라 연평균 기온은 엘니뇨가 발생한 2016년에 이어서 두 번째로 높았으며, 누적 강수량도 평년 대비 적은 것으로 기록되었다. 2019년 안면도에서 관측한 CH₄의 증가율도 이례적으로 높았고 토양 수분과 온도에 따른 미생물기반의 CH₄ 배출이 증가했던 한 해이기도 했다(Kenea *et al.*, 2021). 그림 9는 ECMWF ERA5 재분석자료 2 m 높이 기온의 2019년

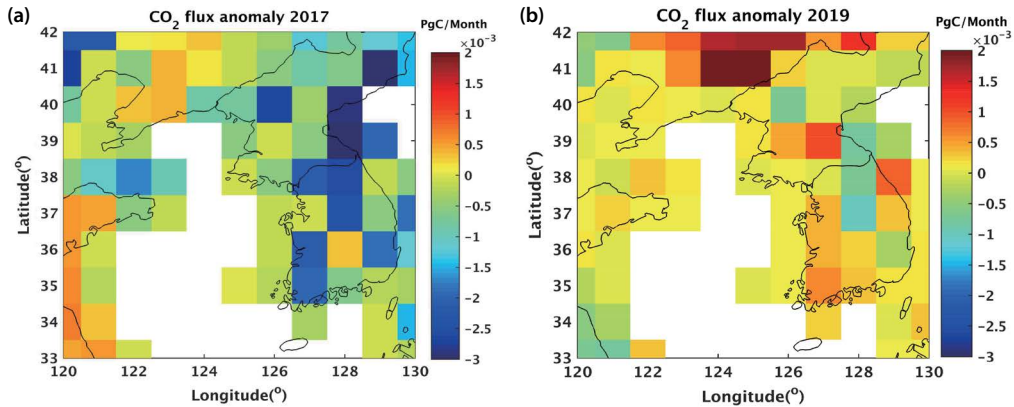


Fig. 8. The CT model optimized the total CO₂ flux (PgC/month) anomaly relative to 2012~2022 in the land biosphere within the latitude range of 32~42°N and longitude range of 120~130°E, for (a) May to September 2017 and (b) May to September 2019. The optimized flux data were obtained from NOAA (<http://carbontracker.noaa.gov>).

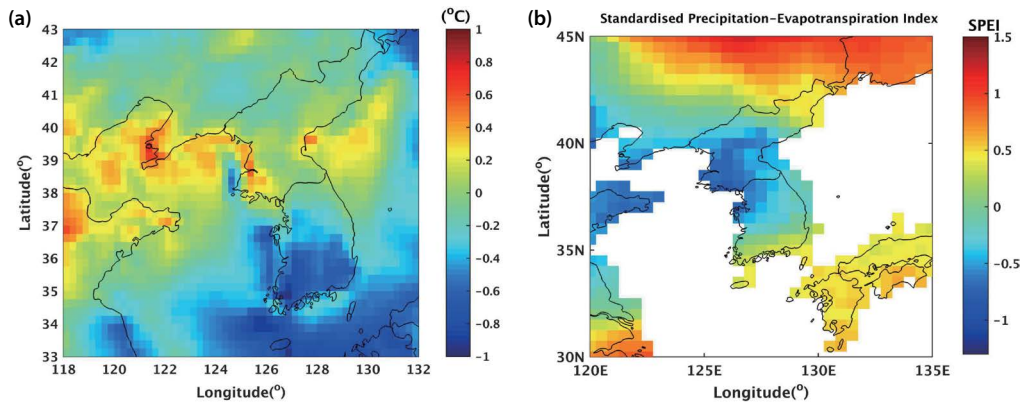


Fig. 9. (a) ECMWF ERA5 derived reanalysis data for 2 m temperature anomaly for 2019, relative to the period 2012~2022. (b) Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) for 2019, obtained from <https://spei.csic.es> (last accessed: 2024/8/26) within the latitude range of 32~42°N and longitude range of 120~130°E.

아노말리와 2019년 가뭄 지수 (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index, SPEI)를 각각 도시하였다 (Beguería *et al.*, 2014, 2010; Vicente-Serrano *et al.*, 2010). 한반도 지역에서 북한 지역과 중국 요동, 산둥반도를 중심으로 온도의 증가가 분명하게 나타나고 있다. 강수량과 증발량으로 추정된 가뭄 지수를 살펴보면 한국 남쪽 일부 지역을 제외한 북부 및 북한 지역과 중국 요동, 산둥반도는 극한 가뭄 (SPEI < -1.2)의 형태를 보이고 있다. 육상생태계의 탄소 흡수의 변화는 온도와 가뭄에 민감하게 반응하기에 2019년 국지적

인 지역의 기상 특성은 그 지역의 탄소 흡수를 변화시키고 궁극적으로 증가율의 경년 변동성에 반영되었음을 시사한다. 향후 급격한 기후변화에 따른 지역적인 기온 상승 및 가뭄 현상이 발생함에 따라 지역 배경대 기관측소에서의 CO₂ 변화추세에 대한 장기적이고 면밀한 모니터링이 필요하다.

4. 요약 및 결론

전 지구와 지역적인 CO₂ 농도의 변동성을 살펴보

기 위하여 본 연구에서는 전 지구와 한반도 배경대기 관측소 안면도에서 관측한 CO₂의 증가율을 함께 분석하였다.

안면도에서 관측한 대기 중 CO₂는 전 지구와 마찬가지로 적도지역에서 발생한 ENSO의 영향과 밀접하게 연계되어 있음을 확인하였다. 2015/2016년 엘니뇨 기간 높은 기온과 극한 가뭄에 따라 전 지구와 안면도의 CO₂ 연간 증가율은 각각 2.83 ± 0.09 ppm/year와 2.76 ± 0.12 ppm/year로 불확도 내에서 비슷한 수준으로 관측되었으며 최근 10년 평균인 약 2.4 ppm/year에 비해 약 10% 이상 증가하였다. 2021/2022 라니냐 기간 안면도와 전 지구에서 관측한 CO₂의 연간 증가율은 각각 2.07 ± 0.12 , 2.20 ± 0.09 ppm/year로 관측되어 최근 10년 평균에 비해 모두 약 10% 이상 감소하였다. 중위도에 위치한 안면도의 지역적인 CO₂ 증가율도 전 지구 증가율과 비슷하게 ENSO의 영향에 반응하는 것으로 나타났다.

ENSO 기후 사건이 발생하지 않은 기간 전 지구와 안면도의 연평균 CO₂ 증가율이 큰 차이를 보인 2017년과 2019년 두 시기에 대해서 분석하였다. CO₂ 증가율의 경년 변동성은 주로 육상생태계의 흡수 변화와 연계되는 것으로 알려져 있다(Keenan *et al.*, 2016). 2017년 전 지구의 CO₂의 증가율은 2.14 ± 0.09 ppm, 안면도는 1.37 ± 0.12 ppm으로 안면도는 최근 10년 평균 증가율에 비해 약 40% 감소한 경년 변동성을 보이고 있다. 2019년의 경우 전 지구 CO₂의 증가율은 최근 10년 평균과 비슷한 수준이지만 안면도는 최근 10년에 비해 약 22% 높은 증가를 보이고 있다. CO₂ 증가율의 경년 변동성은 주로 식생 흡수의 변동성에 의해 일어난다(Keenan *et al.*, 2016). 안면도 지구대기감시소에서 관측한 증가율의 변화 폭이 전 지구에 비해 크다는 것은 좀 더 지역적인 특성을 반영할 수 있다. NOAA 탄소추적시스템에서 최적화된 NEE 플렉스를 살펴보면 최근 10년 한반도 주변의 2017년 흡수 강도는 최근 10년 중 0.27 PgC로 가장 크게 나타났고 2019년은 0.14 PgC로 2017년의 절반 수준으로 감소하였다. 안면도에서 관측한 CO₂의 증가율은 그 주변의 기후

조건(온도, 가뭄)에 따른 식생의 변화에 민감하게 반응하는 것으로 나타났다.

향후 기후변화에 따른 온도 상승이 전 지구뿐 아니라 지역적인 CO₂의 농도에 미치는 영향을 이해하고, 더 나아가 탄소 중립을 위한 정확한 지역적인 생태 관리를 위한 전략 수립이 필요하다.

감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 “기후변화 입체감시 기술개발연구(KMA2018-00324)”의 지원으로 수행되었습니다. 최적화된 CarbonTracker NEE 결과는 NOAA, GML, Boulder, Colorado, USA에서 제공 및 아래 홈페이지에서 다운로드하여 사용하였습니다(<http://carbontracker.noaa.gov>).

References

- Ballantyne, A., Smith, W., Anderegg, W., Kauppi, P., Sarmiento, J., Tans, P., Shevliakova, E., Pan, Y., Poulter, B., Anav, A., Friedlingstein, P., Houghton, R., Running, S. (2017) Accelerating net terrestrial carbon uptake during the warming hiatus due to reduced respiration, *Nature Climate Change*, 7(2), 148-152. <https://doi.org/10.1038/nclimate3204>
- Ballantyne, A.P., Alden, C.B., Miller, J.B., Tans, P.P., White, J.W.C. (2012) Increase in observed net carbon dioxide uptake by land and oceans during the past 50 years, *Nature*, 488, 70-72. <https://doi.org/10.1038/nature11299>
- Beguería, S., Vicente-Serrano, S.M., Angulo-Martínez, M. (2010) A multiscalar global drought dataset: the SPEIbase: a new gridded product for the analysis of drought variability and impacts, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(10), 1351-1354.
- Beguería, S., Vicente Serrano, S.M., Reig-Gracia, F., Latorre Garcés, B. (2014) Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring, *International Journal of Climatology*, 34, 3001-3023. <https://doi.org/10.1002/joc.3887>
- Betts, R.A., Jones, C.D., Knight, J.R., Keeling, R.F., Kennedy, J.J.,

- Wiltshire, A.J., Andrew, R.M., Aragão, L.E.O.C. (2018) A successful prediction of the record CO₂ rise associated with the 2015/2016 El Niño, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 373(1760). <https://doi.org/10.1098/rstb.2017.0301>
- Chatterjee, A., Gierach, M.M., Sutton, A.J., Feely, R.A., Crisp, D., Eldering, A., Gunson, M.R., O'Dell, C.W., Stephens, B.B., Schimel, D.S. (2017) Influence of El Niño on atmospheric CO₂ over the tropical Pacific Ocean: Findings from NASA's OCO-2 mission, *Science*, 358(6360). <https://doi.org/10.1126/science.aam5776>
- Ciais, P., Reichstein, M., Viovy, N., Granier, A., Ogée, J., Allard, V., Aubinet, M., Buchmann, N., Bernhofer, C., Carrara, A. (2005) Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003, *Nature*, 437(7058), 529-533.
- Das, C., Kunchala, R.K., Chandra, N., Chmura, L., Nęcki, J., Patra, P.K. (2022) Meridional Propagation of Carbon Dioxide (CO₂) Growth Rate and Flux Anomalies From the Tropics Due to ENSO, *Geophysical Research Letters*, 49(19), 1-9. <https://doi.org/10.1029/2022GL100105>
- Fang, Y., Michalak, A.M., Schwalm, C.R., Huntzinger, D.N., Berry, J.A., Ciais, P., Piao, S., Poulter, B., Fisher, J.B., Cook, R.B., Hayes, D., Huang, M., Ito, A., Jain, A., Lei, H., Lu, C., Mao, J., Parazoo, N.C., Peng, S., ..., Yang, J. (2017) Global land carbon sink response to temperature and precipitation varies with ENSO phase, *Environmental Research Letters*, 12(6). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6e8e>
- Friedlingstein, P., Jones, M.W., Sullivan, M.O., Andrew, R.M., Bakker, D.C.E., Hauck, J., Le Quééré, C., Peters, G.P., Peters, W. (2022) *Global Carbon Budget 2021*. 1917-2005.
- Gloor, M., Sarmiento, J.L., Gruber, N. (2010) What can be learned about carbon cycle climate feedbacks from the CO₂ airborne fraction? *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(16), 7739-7751.
- Graven, H.D., Keeling, R.F., Piper, S.C., Patra, P.K., Stephens, B.B., Wofsy, S.C., Welp, L.R., Sweeney, C., Tans, P.P., Kelley, J.J., Daube, B.C., Kort, E.A., Santoni, G.W., Bent, J.D. (2013) Enhanced seasonal exchange of CO₂ by Northern ecosystems since 1960, *Science*, 341(6150), 1085-1089. <https://doi.org/10.1126/science.1239207>
- Hashimoto, H., Nemani, R.R., White, M.A., Jolly, W.M., Piper, S.C., Keeling, C.D., Myneni, R.B., Running, S.W. (2004) El Niño-Southern Oscillation-induced variability in terrestrial carbon cycling, *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 109(23), 1-8. <https://doi.org/10.1029/2004JD004959>
- Hogan, J.A., Domke, G.M., Zhu, K., Johnson, D.J., Lichstein, J.W. (2024) Climate change determines the sign of productivity trends in US forests, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121(4), e2311132121.
- Humphrey, V., Zscheischler, J., Ciais, P., Gudmundsson, L., Sitoh, S., Seneviratne, S.I. (2018) Sensitivity of atmospheric CO₂ growth rate to observed changes in terrestrial water storage, *Nature*, 560(7720), 628-631. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0424-4>
- Jacobson, A.R., Schuldt, K.N., Tans, P., Arlyn Andrews, Miller, J.B., Oda, T., Mund, J., Weir, B., Ott, L., Aalto, T., Abshire, J.B., Aikin, K., Aoki, S., Apadula, F., Arnold, S., Baier, B., Bartzyel, J., Beyersdorf, A., Biermann, T., ..., Zimnoch, M. (2023) CarbonTracker CT2022, NOAA Global Monitoring Laboratory. <https://doi.org/10.25925/Z1GJ-3254>
- Keenan, T.F., Hollinger, D.Y., Bohrer, G., Dragoni, D., Munger, J.W., Schmid, H.P., Richardson, A.D. (2013) Increase in forest water-use efficiency as atmospheric carbon dioxide concentrations rise, *Nature*, 499(7458), 324-327. <https://doi.org/10.1038/nature12291>
- Keenan, T.F., Prentice, I.C., Canadell, J.G., Williams, C.A., Wang, H., Raupach, M., Collatz, G.J. (2016) Recent pause in the growth rate of atmospheric CO₂ due to enhanced terrestrial carbon uptake, *Nature Communications*, 7, 1-9. <https://doi.org/10.1038/ncomms13428>
- Kenea, S.T., Lee, H., Joo, S., Belorid, M., Li, S., Labzovskii, L.D., Park, S. (2023) Characteristics of STILT footprints driven by KIM model simulated meteorological fields: implication for developing near real-time footprints, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 17(1), 14.
- 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.
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2024) Report of Global Atmosphere Watch 2023.
- Lan, X., Tans, P., Thoning, K.W. (2024) Trends in globally-averaged CO₂ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. Version 2024-08 <https://doi.org/10.15138/9N0H-ZH07>
- 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.
- Lee, H., Seo, W., Li, S., Lee, S., Kenea, S.T., Joo, S. (2023) Measurement report: Atmospheric CH₄ at regional stations of the Korea Meteorological Administration-Global Atmosphere Watch Programme: measurement, characteristics, and long-term changes of its drivers, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(12), 7141-7159.
- Li, S., Park, S., Park, M.-K., Jo, C.O., Kim, J.-Y., Kim, J.-Y., Kim, K.-R.

- (2014) Statistical Back Trajectory Analysis for Estimation of CO₂ Emission Source Regions, *Atmosphere*, 24(2), 245-251, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14191/atmos.2014.24.2.245>
- Liao, E., Resplandy, L., Liu, J., Bowman, K.W. (2021) Future Weakening of the ENSO Ocean Carbon Buffer Under Anthropogenic Forcing, *Geophysical Research Letters*, 48(18), 1-11. <https://doi.org/10.1029/2021GL094021>
- Liu, L., Ciais, P., Wu, M., Padrón, R.S., Friedlingstein, P., Schwaab, J., Gudmundsson, L., Seneviratne, S.I. (2023) Increasingly negative tropical water–interannual CO₂ growth rate coupling, *Nature*, 618(7966), 755-760. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06056-x>
- Masarie, K.A., Tans, P.P. (1995) Extension and integration of atmospheric carbon dioxide data into a globally consistent measurement record, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 100(D6), 11593-11610.
- Nevison, C.D., Mahowald, N.M., Doney, S.C., Lima, I.D., Van der Werf, G.R., Randerson, J.T., Baker, D.F., Kasibhatla, P., McKinley, G.A. (2008) Contribution of ocean, fossil fuel, land biosphere, and biomass burning carbon fluxes to seasonal and interannual variability in atmospheric CO₂, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113(G1).
- Parazoo, N.C., Commane, R., Wofsy, S.C., Koven, C.D., Sweeney, C., Lawrence, D.M., Lindaas, J., Chang, R.Y.W., Miller, C.E. (2016) Detecting regional patterns of changing CO₂ flux in Alaska, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(28), 7733-7738. <https://doi.org/10.1073/pnas.1601085113>
- Patra, P.K., Maksyutov, S., Nakazawa, T. (2005) Analysis of atmospheric CO₂ growth rates at Mauna Loa using CO₂ fluxes derived from an inverse model, *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 57(5), 357-365.
- Piao, S., Wang, X., Wang, K., Li, X., Bastos, A., Canadell, J.G., Ciais, P., Friedlingstein, P., Sitch, S. (2020) Interannual variation of terrestrial carbon cycle: Issues and perspectives, *Global Change Biology*, 26(1), 300-318. <https://doi.org/10.1111/gcb.14884>
- Rayner, P.J., Stavert, A., Scholze, M., Ahlström, A., Allison, C.E., Law, R.M. (2015) Recent changes in the global and regional carbon cycle: analysis of first-order diagnostics, *Biogeosciences*, 12(3), 835-844.
- Ruehr, S., Keenan, T.F., Williams, C., Zhou, Y., Lu, X., Bastos, A., Canadell, J.G., Prentice, I.C., Sitch, S., Terrer, C. (2023) Evidence and attribution of the enhanced land carbon sink, *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(8), 518-534. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00456-3>
- Seo, W., Lee, H., Kim, Y.-H. (2021) Revision of 22-year Records of Atmospheric Baseline CO₂ in South Korea: Application of the WMO X2019 CO₂ Scale and a New Baseline Selection Method (NIMS Filter), *Atmosphere, Korean Meteorological Society*, 31, 1-14, (in Korean with English abstract).
- Shim, C., Lee, J., Wang, Y. (2013) Effect of continental sources and sinks on the seasonal and latitudinal gradient of atmospheric carbon dioxide over East Asia, *Atmospheric Environment*, 79, 853-860. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.07.055>
- Thoning, K.W., Tans, P.P., Komhyr, W.D. (1989) Atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa Observatory: 2. Analysis of the NOAA GMCC data, 1974-1985, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 94(D6), 8549-8565.
- van der Woude, A.M., Peters, W., Joetzer, E., Lafont, S., Koren, G., Ciais, P., Ramonet, M., Xu, Y., Bastos, A., Botía, S., Sitch, S., de Kok, R., Kneuer, T., Kubistin, D., Jacotot, A., Loubet, B., Herig-Coimbra, P.H., Loustau, D., Lujikx, I.T. (2023) Temperature extremes of 2022 reduced carbon uptake by forests in Europe, *Nature Communications*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41851-0>
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., López-Moreno, J.I. (2010) A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index, *Journal of Climate*, 23(7), 1696-1718.
- World Meteorological Organization (WMO) (2024) World Meteorological Organization Global Annual to Decadal Climate Update 2024-2028.
- Yun, J., Jeong, S., Ho, C., Park, H., Liu, J., Lee, H., Sitch, S., Friedlingstein, P., Lienert, S., Lombardozzi, D. (2020) Enhanced regional terrestrial carbon uptake over Korea revealed by atmospheric CO₂ measurements from 1999 to 2017, *Global Change Biology*, 26(6), 3368-3383.

Authors Information

- 이선란 (국립기상과학원 지구대기감시연구과 연구원)
(sunranlee@korea.kr)
- 신대근 (국립기상과학원 지구대기감시연구과 기상연구사)
(shingeun@korea.kr)
- 주상원 (국립기상과학원 지구대기감시연구과 기상연구관)
(swjoo@korea.kr)
- 서원익 (국립기상과학원 지구대기감시연구과 연구원)
(wiseo@korea.kr)
- 김수민 (국립기상과학원 지구대기감시연구과 기상연구관)
(sulla@korea.kr)