

에디 공분산 플럭스 측정을 이용한 산업단지 내 CO₂ 배출량 정량화

최근재* · 정수종**†

*서울대학교 환경대학원 환경관리학과 박사과정, **서울대학교 환경대학원 환경관리학과 교수

Quantifying CO₂ emissions from an industrial complex using eddy covariance flux measurements

Choi, Geunjae* and Jeong, Sujong**†

*Ph.D. Candidate, Department of Environmental Planning, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University, Seoul, Korea

**Professor, Department of Environmental Planning, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University, Seoul, Korea

ABSTRACT

Industrial complexes are significant sources of anthropogenic CO₂ emissions, yet global emission inventories often struggle to capture the fine-scale spatiotemporal variability. This study quantifies CO₂ fluxes in the Sihwa National Industrial Complex (SIC), a major manufacturing cluster in southwestern Seoul, South Korea, using one year of continuous eddy covariance (EC) observations (Feb 2024 - Jan 2025). A fixed EC tower (14 m height) equipped with an open-path CO₂/H₂O analyzer and a 3D sonic anemometer provided high-frequency flux data, processed using IQR filtering, U* thresholding, and multi-scale gap-filling. Flux footprint modeling (FFP) was used to separate contributions from industrial and green areas. Our results show that industrial zones acted as persistent net CO₂ sources (mean: 228.3 tC km⁻² month⁻¹; max: 376.8 tC km⁻² month⁻¹), exhibiting strong diel and weekly cycles linked to operational and energy-use patterns. In contrast, adjacent green spaces functioned as seasonal CO₂ sinks (min: -136.7 tC km⁻² month⁻¹), particularly during the growing season. Compared to the ODIAC top-down inventory, EC-based emissions were lower—by up to 60%—across all months. This discrepancy reveals a fundamental limitation of inventory-based approaches: their reliance on static emission factors, coarse-resolution proxies (e.g., nightlight), and the absence of real-time, local activity data, which often leads to significant overestimation in complex environments like industrial zones. This study underscores the necessity of integrating ground-based flux observations into national and global emission accounting frameworks to improve the accuracy, transparency, and policy relevance of industrial CO₂ inventories.

Key words : Industrial CO₂ Emissions, Eddy Covariance, Emission Inventory, Footprint Modeling, Urban Carbon Flux, Top-Down vs Bottom-Up

1. 서론

산업단지는 전 세계적으로 이산화탄소(CO₂)를 포함한 온실가스(GHG)의 주요 배출원으로 간주되며, 이에 따라 기후 변화에 미치는 영향이 막대하다(IEA, 2022; IPCC,

2021). 산업단지 내 제조업 중심의 공정, 에너지 집약적인 생산 활동, 물류 및 수송 등 복합적인 인간 활동은 온실가스 배출을 유발하며, 대기 환경뿐만 아니라 국가 단위의 탄소중립 전략 이행에도 큰 영향을 미칠 수 있다(Seto et al., 2014). 특히, 고밀도 산업시설이 집중된 국가산업단지 와 같은 지역은 배출 특성이 복잡적이고 이질적이기 때문

†Corresponding author : sujong@snu.ac.kr (08826, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, Korea. Tel. +82-2-880-5664)

ORCID 최근재 0009-0000-2291-8881

정수종 0000-0003-4586-4534

에, 정밀한 시공간적 변동성이 반영된 배출량 산정이 필수적이다.

배출량을 추정하는 가장 일반적인 방식은 통계 기반 하향식(top-down) 인벤토리를 활용하는 것으로, 접근성이 용이하고 범용적이라는 장점이 있다. 그러나 실제 배출의 시공간적 변동성이나 미세 규모의 지역적 차이를 반영하기 어렵다는 한계가 존재하며, 특히, 산업단지와 같이 복합적 토지이용과 다양한 배출원이 혼재된 지역에서는 이러한 접근 방식이 배출량을 과소 또는 과대 추정할 가능성이 높다.

이에 반해, 에디 공분산(Eddy Covariance, 이하 EC) 기법을 활용하여 이산화탄소 플럭스(FCO_2)를 관측하는 것은 외부 배출계수나 모델에 의존하지 않으며, 일변동 및 계절변동을 포함한 배출의 실시간 동역학을 반영할 수 있다는 점에서, 산업단지와 같은 복잡한 환경의 실측 기반 배출량 분석에 유용하다(Baldocchi, 2014; Burba, 2013; Nemitz et al., 2018). 특히, 난류(turbulence)를 활용하여 지표면과 대기 간의 실제 이산화탄소 교환을 고해상도로 정량화할 수 있는 상향식(bottom-up) 접근 방법으로, 이산화탄소 배출량을 직접 추정할 수 있다는 장점을 가진다(Baldocchi, 2014; Burba, 2013).

그러나 국내에서는 수도권을 대상으로 한 도시 플럭스 분석 사례는 존재하나(Hong et al., 2023; Park et al., 2022), 산업단지 대상의 FCO_2 관측과 이를 기반으로 배출량을 정량화한 사례는 제한적이다.

이에 본 연구는 수도권 서남부에 위치한 시화국가산업단지(이하, 시화산단) 내에서 운영 중인 에디 공분산 기반 이산화탄소 플럭스 관측 타워를 활용하여 산업지역의 CO_2 배출 특성을 정량적으로 규명하고자 하였다. 특히, 관측된 데이터의 발자국(footprint, 이하 풋프린트) 분석을 수행하여 산업지역과 녹지지역의 영향을 공간적으로 구분하였으며, 이를 기반으로 배출량을 산출하였다.

본 연구는 다음과 같은 두 가지 주요 질문에 답하고자 한다. 첫째, 시화국가산업단지 내 산업지역에서 배출되는 이산화탄소의 양은 어느 정도이며, 계절에 따라 어떤 변화를 보이는가? 둘째, 동일 영향 반경 내 존재하는 녹지지역은 어느 정도의 이산화탄소를 흡수하며, 그 흡수량은 동일 영향 반경 내 산업 배출량을 얼마나 상쇄할 수 있는가?

본 연구는 시화국가산업단지 내에서 관측된 에디 공분산 플럭스 데이터를 활용하여, 산업지역과 녹지지역에서의 CO_2 동역학을 정량적으로 규명하는 것을 주요 목적으로 한다. 특히, 기존의 하향식 인벤토리 방식에서 간과될

수 있는 시간 및 공간적 배출 특성을 보완함으로써, 국내 온실가스 배출량 산정의 정밀도를 향상시키는 데 의의를 가진다.

본 연구의 결과는 국내에서 수행된 산업단지 대상 장기 고정 타워 기반 FCO_2 관측 사례로서, 향후 산업부문에서의 배출량 저감을 위한 공간별 관리 전략 수립에 중요한 과학적 근거로서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구방법

2.1. 연구 대상지

본 연구의 주요 대상지는 경기도 시흥시 시화 국가산업단지로, 수도권 서부 대도시권의 핵심 산업 허브이자 금속, 기계, 화학, 전기전자 등의 제조업 기반 중공업 중심의 기업들이 밀집되어 있는 고밀도 산업지역이다. 본 연구에서는 2024년 2월, 시화국가산업단지 내 희망공원 지역에 에디 공분산(Eddy Covariance, EC) 기반의 FCO_2 관측 타워를 설치하여 운영 중에 있다(Sihwa National Industrial Complex; SIC, 37.33645°N, 126.7173°E). 타워 반경 약 2 km 이내로는 산업지역이 약 70%, 녹지지역이 12%, 기타 18% 내외로 이루어져 있다. 산업지역의 경우 대규모 제조공장, 물류창고, 산업용 보일러 시설 등이 포함되어 있으며, 대부분이 연중 가동되는 고정 배출원으로 기능하고 있다.

타워 내 EC 시스템의 주요 센서부는 지면으로부터 약 14 m 높이에 위치해 있어, 주변 산업시설 지붕보다 높은 위치에서 표면과 대기 간 CO_2 교환을 안정적으로 관측할 수 있도록 설계되었다. EC 시스템은 주로 개회로(open-path) 방식의 CO_2/H_2O 분석기(LI-7500RS, LI-COR)와 3차원 초음파 풍속계(WindMaster Pro, Gill)로 이루어져 있다. 대기 CO_2 농도와 H_2O 를 측정하는 개방 경로 가스 분석기는 1년을 주기로 교정되었다. 3차원 초음파 풍속계는 3개의 직교 바람 구성 요소와 음속을 직접 측정하여 난류 운동을 10 Hz 이상의 해상도로 정밀하게 포착한다. 그 외, 데이터 처리는 SmartFlux 시스템을 통해 자동화되어 있으며, 배경 기상 정보 수집을 위해 Biomet 시스템을 병행 운영하였다. 해당 시스템에는 대기 온·습도 센서(Vaisala HMP155), 순복사 센서(Kipp & Zonen CNR4), 광합성 유효광양자(photosynthetically active radiation) 측정용 쿼터 센서(LI-190R), 강우량계(TE525M)가 포함되며, 전 데이터는 Campbell Scientific CR1000X 데이터 로거를 통해 저장되었다. 이러한 구성은 고난류 환경에서도 정확하고

안정적인 이산화탄소 플렉스 측정을 가능하게 하며, 산업 지역의 복잡한 배출 특성 분석에 필수적인 정밀성을 보장할 수 있다.

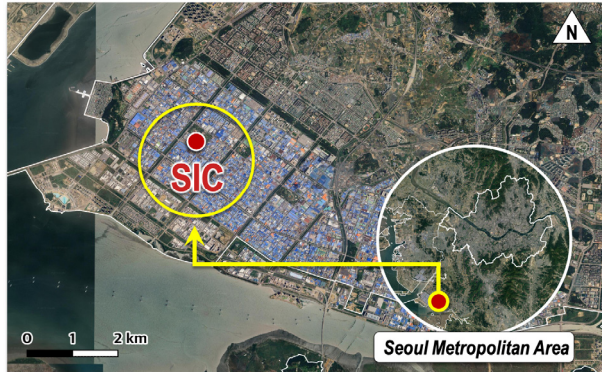


Fig. 1. Location of the Sihwa Industrial Complex (SIC) within the Seoul Metropolitan Area. The red dot marks the CO₂ flux monitoring site located in the SIC, on the western coast of South Korea. Continuous FCO₂ observations were conducted over approximately one year, from February 2024 to January 2025, to assess spatiotemporal carbon emission patterns in the industrial area

2.2. 데이터 처리 및 분석 방법

본 연구에서는 연속 관측이 이루어진 약 1년(2024년 2월~2025년 1월)간의 FCO₂ 데이터를 활용했다. 원시자료는 약 10HZ 단위로 수집되었으며, LI-COR사의 EddyPro 소프트웨어를 통해 사전 처리 과정을 거친 30분 평균 단위의 정규화된 FCO₂ 데이터로 변환하였다. 이후, 세 가지 단계를 거쳐 분석을 수행하였다:

(1) 데이터 품질 확보를 위한 사후 전처리, (2) FCO₂의 공간적 기원 분리, (3) 기원별 FCO₂의 정량화 및 비교 분석

2.2.1. 데이터 사후 전처리

에디 공분산(EC) 시스템을 통해 획득된 고해상도 플렉스 데이터는 복잡한 기상 조건, 센서 응답 특성, 야간 안정층 형성, 강우 간섭 등의 영향을 받아 다양한 수준의 노이즈, 이상값, 결측값을 내포하고 있어 과학적 해석에 적합한 수준의 정밀도와 신뢰성을 확보하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 데이터 품질을 확보하기 위해 국제 커뮤니

티(FluxNet, AmeriFlux)로부터 제안된 품질관리 절차(Lee et al., 2004; Papale et al., 2006)를 참조하여, 추가적인 사후 전처리를 수행하였다.

첫째, 통계 기반 이상값 제거를 위해 IQR (Inter-quartile Range) 필터를 적용하였다. IQR 필터는 플렉스 값의 분포 특성에 기반 한 이상값 탐지 기법으로, 센서 오류, 일시적 풍속 이상, 강수에 의한 오류, 전기적 노이즈로 인한 비정상적 급변값 등을 효과적으로 배제하여 플렉스 분포의 왜곡을 최소화하는 데 유용하다. IQR은 데이터의 75번째 백분위수(Q3)와 25번째 백분위수(Q1)의 차이로 계산되며, 일반적으로 $Q1 - 1.5 * IQR$ 미만 또는 $Q3 + 1.5 * IQR$ 초과 값을 이상값으로 간주한다.

둘째, U^* (friction velocity)는 지표면과 대기 사이의 운동량 교환을 나타내는 변수로, 통상 0.1-0.3 m/s 범위에서 사이트 특성에 따라 설정된다(AmeriFlux). 에디 공분산 기반 관측은 난류를 통해 수직 방향으로 전달되는 질량 및 에너지 흐름을 측정하는 것이므로, 충분한 난류 교환이 관측 조건으로 전제되어야 한다. 그러나 야간에는 안정적인 대기층이 형성되어 난류가 감소하거나 소멸함에 따라 관측값이 과소 추정될 위험이 있다(Aubinet et al., 2012). 이를 방지하기 위해, 본 연구에서는 U^* 필터링을 적용하여 일정 난류 임계값 이하의 자료를 제거하였다. 본 연구에서는 야간 플렉스 기반의 회귀 안정화 방법을 적용하여 U^* 의 임계값을 결정하였으며, 이를 반영하여 이산화탄소 플렉스 과소 모의로 인한 연구 결과의 오염을 방지하였다.

마지막으로, 본 연구에서는 플렉스 자료의 시간적 연속성과 통계적 일관성을 확보하기 위해 다층적인 결측값 보완(gap filling)을 수행하였다. 2시간 이내의 초단기 결측에 대해서는 선형 보간법(linear interpolation)을 활용하여 시간 간격 내 일관된 패턴을 유지하였다. 하루 내외의 단기 결측 구간에 대해서는 주요 기상인자(풍속, 일사량, 기온 등)와의 경험적 회귀모형을 기반으로 결측값을 추정하였다. 이를 위해 각 결측 구간에 인접한 유효 관측값을 수집한 후, 주야간 조건에 따라 생리 기반 모델을 구분하여 적용하였다. 야간에는 기온에 따른 생태계 호흡량의 지수적 반응을 설명하는 Lloyd-Taylor 함수 기반 모델을 이용하였으며, 주간에는 일사량 증가에 따른 FCO₂의 포화 반응을 반영하는 Michaelis-Menten 모델을 적용하였다. 다음으로, 회귀 기반으로 추정된 결측값이 실제 시계열의 패턴과 이질적일 가능성을 고려하여, Gaussian 필터를 이용한 스무딩 곡선을 생성하여 이를 활용한 보정 과정을 추가로 수행하였다. 이와 같은 접근은 생물·물리적 메커니

즘을 반영함으로써 단순 수학적 보간을 넘어선 생태학적 해석력을 확보하는 데 목적이 있다.

2.2.2. 공간적 기원 구분을 위한 풋프린트 분석

본 연구에서는 산업지역과 녹지지역에서 관측된 FCO_2 의 공간적 기원을 정량적으로 분리하기 위해 풋프린트 분석을 수행하였다. 이는 관측 타워에서 측정된 FCO_2 가 지표면의 어느 위치로부터 기원하였는지를 역 추정하는 과정으로, 플럭스의 근원지(source area)를 과학적으로 규명하는 데 핵심적인 기법이다. 이를 통해 동일한 측정 지점에서 수집된 플럭스 데이터라 하더라도, 해당 데이터가 산업지역으로부터 유입된 것인지 혹은 녹지지역에서 유래한 것인지를 구분할 수 있으며, 나아가 공간적 기원별 CO_2 배출 특성을 독립적으로 분석하는 기반을 제공한다. 본 연구에서는 대표적인 대기 확산 기반 모델인 FFP (Flux Footprint Model; Kljun et al., 2015)를 활용하여 FCO_2 에 대한 고해상도 풋프린트 분포를 산정하였다. FFP 모델은 Lagrangian 입자 분산 방식의 LPDM-B (Lagrangian Particle Dispersion Model-Backward)를 기반으로 하며, 마찰속도, 경계층 높이, 풍속, 풍향 등의 기상 변수와 지형 조건을 반영하여 측정 지점에 도달한 난류 플럭스의 기여 지역을 확률 밀도 함수 형태로 산출하기 때문에, 복잡 지형이나 이질적인 토지 피복 분포를 갖는 도시 환경에서도 유효한 것으로 검증된 바 있다.

2.3. 배출량 추정

본 연구에서는 에디 공분산(EC) 시스템으로 측정된 30분 평균 CO_2 플럭스(FCO_2 , 단위: $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) 데이터를 시간적으로 적분하여 일별, 월별, 연간 누적 배출량을 산정하였다. 플럭스 데이터의 단위를 결과 분석에 사용된 질량 기반의 배출량 단위로 변환하기 위해 다음 과정을 적용하였다.

우선, 시간 단위 환산을 위해 30분 플럭스를 하루(86,400초), 한 달(일수에 따라 상이) 단위로 적분하였으며, 면적 단위는 m^2 에서 km^2 로 변환하였다. 이후, CO_2 의 몰 수(μmol)를 질량 단위로 변환하기 위해 이산화탄소의 분자량(44.01 g mol^{-1})을 적용하였으며, 필요 시 탄소(C) 기준의 질량 단위로 환산하기 위해 탄소의 원자량(12.01 g mol^{-1})을 추가로 고려하였다. 이를 통해 플럭스 데이터를 ' $\text{tC km}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ' 또는 ' $\text{tC km}^{-2} \text{ month}^{-1}$ ' 등의 형태로 일관성 있게 표현하였다.

또한, 단순 누적뿐 아니라 풋프린트 분석 결과에 대한

공간 가중 평균을 수행하여 산업지역과 녹지지역으로 구분된 기여지역의 실제 영향 범위에 기초한 면적 보정을 수행하였다.

아울러, 누적 배출량 산정 시 플럭스 데이터의 시간적 결측(gap) 및 야간 저 추정 문제를 고려하여, 2.2절에서 수행한 다단계 보정 및 보간(gap-filling) 결과를 반영하였다. 특히, 야간 시간대의 플럭스 저평가를 방지하기 위해 적용된 U^* 필터링 조건 하에서 회귀 기반으로 보완된 자료만을 누적에 포함시켜, 배출량 추정의 정밀성과 신뢰도를 강화하였다. 결과적으로, 본 연구에서는 고정밀 플럭스 기반의 배출량 추정 체계를 구축하여, 토지이용 유형별(산업지역 vs. 녹지지역) 이산화탄소 배출 특성의 정량적 비교 분석이 가능하도록 하였다.

3. 결과

3.1. 산업단지 CO_2 배출의 시계열적 특성

SIC에 대한 이산화탄소 플럭스(FCO_2) 시계열 분석 결과, 연중 대부분의 기간에서 양(+)의 값을 유지하여 해당 지역이 지속적인 CO_2 순배출원(net CO_2 source)으로 기능하고 있음이 나타났다. FCO_2 는 겨울철에 최대값을 기록한 뒤, 식물 성장기의 진입과 함께 다소 감소하는 경향을 보였다(Fig. 2). 그러나 여름철에는 FCO_2 가 다시 증가하면서 이러한 감소 추세가 중단되었고, 이는 화석연료 기반 냉방 시스템의 사용 증가에 기인한 것으로 추정된다.

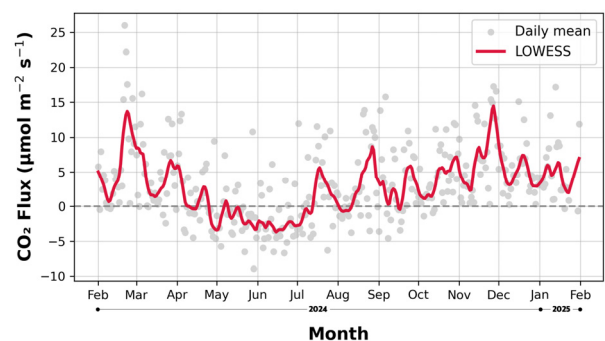


Fig. 2. Seasonal variation of CO_2 flux (FCO_2) in the Sihwa Industrial Complex (SIC) from February 2024 to February 2025. The gray dots represent daily mean FCO_2 values, while the red line indicates the smoothed trend using LOWESS

이러한 계절별 배출 패턴은 단순한 기상 변수만으로는 설명되기 어려우며, 산업활동과 에너지 소비 행태와 같은 인위적 요인들이 FCO₂ 변동에 주요한 영향을 미치고 있음을 시사한다. 전반적으로, 산업단지의 FCO₂는 사회·경제적 활동 주기에 의해 강하게 조절되는 특성을 보였는데, 이는 산업단지 내 산업지역의 이산화탄소 배출이 계절적 에너지 수요 구조와 밀접하게 연동되어 있음을 보여준다.

3.2. 산업지역과 녹지지역 간 비교

3.2.1. 계절별 이산화탄소 플렉스 변화

SIC 내 FCO₂의 계절별 분포는 산업지역과 녹지지역 간에 뚜렷한 구조적 차이가 나타났다(Fig. 3). 산업지역의 경우 전 계절에 걸쳐 FCO₂ 중앙값이 양(+)의 값을 유지하며 순배출원으로서의 일관된 특성을 보였다. 특히 여름과 가을철에는 플렉스의 중앙값이 뚜렷하게 상승하며, 해당 시기의 에너지 수요 증가(예: 냉방 수요) 및 산업활동 확대에 따른 배출량 증가 가능성을 시사한다. 산업지역의 플렉스 분포는 사분위 간 범위가 크데, 플렉스의 공간·시간적 변동성이 크고 다양한 인위적 요인에 영향을 받고 있음을 보여준다. 반면, 녹지지역은 전 계절에 걸쳐 FCO₂의 중앙값이 음(-)의 방향을 향하며, 특히 봄과 여름철에 그 흡수 경향이 강화되었다. 이는 광합성 활성이 극대화

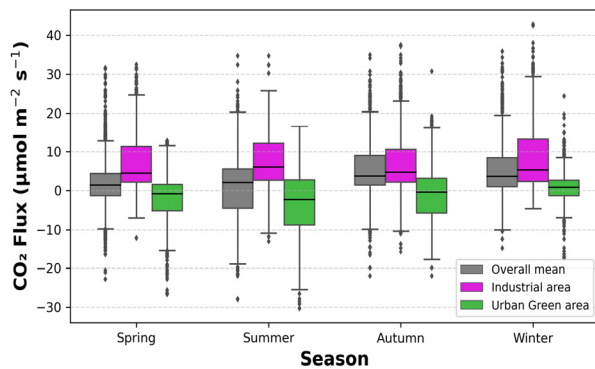


Fig. 3. Seasonal patterns of observed CO₂ flux (FCO₂) over industrial and green areas in the Sihwa Industrial Complex (SIC). Box plots represent the distribution of FCO₂ values by season for the industrial area (magenta), urban green area (green), and overall mean (gray)

되는 생장기(growing season)에 해당 지역이 대기 중 CO₂를 흡수하는 순흡수원(net sink)으로 기능하고 있음을 시사한다. 결론적으로, 산업지역의 플렉스는 에너지 수요와 산업 가동률 증가에 따라 여름철 및 가을철 고배출 특성을 나타냈다. 반면, 녹지지역은 생장기에 강한 CO₂ 흡수 경향을 보이며 계절 탄소 균형의 조절 인자로 기능하고 있음을 확인할 수 있다.

3.2.2. 요일(주중-주말)변화에 따른 산업지역과 녹지지역의 이산화탄소 플렉스 비교

산업지역과 도시 녹지지역의 FCO₂는 주중(weekday)과 주말(weekend)에 따라 뚜렷한 차이를 보였다(Fig. 4). 산업지역(industrial area)의 경우, 주중에 평균 FCO₂는 약 7.5 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 수준으로, 주말 대비 높은 값을 기록하였다. 플렉스 분포는 중앙값(median)이 양(+)의 값에 위치하며, 상위 사분위 수치가 20 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 이상까지 확장되어 고배출 사례가 빈번하게 발생함을 시사한다. 반면, 주말에는 평균 플렉스가 약 3.5 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 낮아졌고, 전체적인 빈도와 분산 역시 감소하였다. 이는 산업체의 평일 중심 가동, 물류 운송 및 에너지 수요의 증가가 주중 CO₂ 배출량 상승에 기여함을 시사한다.

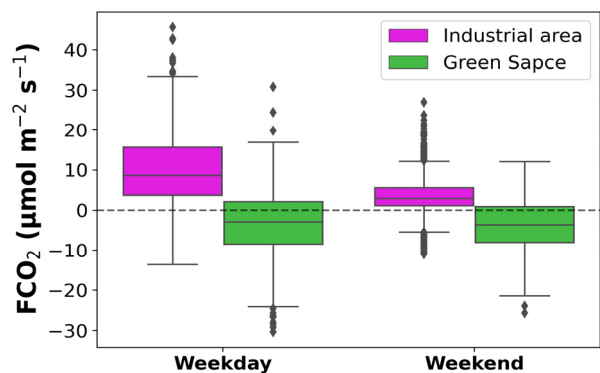


Fig. 4. Comparison of weekday and weekend CO₂ flux (FCO₂) distributions for industrial and green areas in the Sihwa Industrial Complex (SIC). Box plots show FCO₂ values for industrial (magenta) and green (green) areas, separated by weekday and weekend

한편, 녹지지역의 경우 주중과 주말 모두에서 FCO₂는 음(-)의 중앙값을 유지했다. 또한 산업지역에 비해 주중과 주말의 차이가 크지 않은 비교적 안정적인 분포를 보였다.

이는 산업단지 내 녹지지역의 CO₂ 플럭스가 요일에 따른 인간 활동 변화의 영향보다 광합성 및 호흡 등 생물생태학적 과정에 보다 큰 영향을 받은 결과라고 추정할 수 있다.

3.2.3. 산업지역과 녹지지역의 이산화탄소 플럭스 일변동 비교

산업지역과 녹지지역에서 관측된 FCO₂의 일변동은 각 지역의 에너지 소비 및 생물생태학적 과정에 따라 상이한 양상을 나타냈다. 산업지역의 경우, 일출 이후 오전 시간대부터 플럭스가 점진적으로 상승하여 약 10:00 ~ 14:00 사이 최대값에 도달하였으며, 이후 오후 늦게까지 일정 수준을 유지한 뒤 저녁 시간대부터 감소하였다. 이러한 패턴은 주간 시간대에 집중된 산업체의 운영 시간, 전력 소비 증가, 물류 활동 등이 복합적으로 작용하여 CO₂ 배출을 촉진한 결과로 해석된다. 평균 FCO₂는 정오 무렵 약 10 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 이상으로 정점에 이르렀으며, 전반적인 하루 플럭스는 일관된 양(+)의 값을 유지하였다. 특히 시간별 분산이 주간 시간대에 크게 확장되어 있어, 산업활동의 불균일성과 순간적 배출 스파이크가 플럭스 변동성에 큰 영향을 주고 있음을 시사한다. 반면, 녹지지역에서는 플럭스의 일변동이 생물학적 광주기에 따라 조절되는 명확한 흡수 중심 구조를 보였다. 일출 직후부터 FCO₂는 빠르게 감소하여 오전 ~ 정오 시간대에 최저값(-5 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 내외)을 기록했다(Fig. 5).

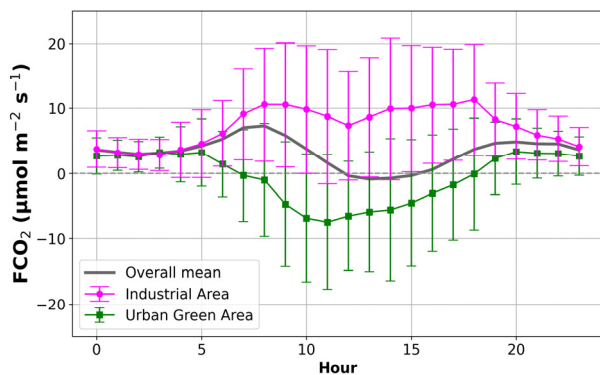


Fig. 5. Mean diurnal cycle of CO₂ flux (FCO₂) for industrial and green areas within the Sihwa Industrial Complex (SIC). The figure displays average hourly FCO₂ for the industrial area (magenta), urban green area (green), and the overall mean (gray). Error bars indicate standard deviations

이러한 상반된 일변동 패턴은 산업지역과 도시 녹지지역의 CO₂ 플럭스가 각각 인위적 에너지 활동 주기와 생물학적 광반응 주기에 의해 조절되고 있음을 명확히 보여준다. 산업지역에서는 주간 시간대의 에너지 집약적 활동이 CO₂ 배출을 주도하며, 도시 녹지지역에서는 낮 동안의 광합성 작용을 통해 CO₂를 흡수하는 순흡수원(net sink)으로 기능하고 있다.

3.3. 배출량 정량화 및 글로벌 상향식 인벤토리와의 비교

3.3.1. 관측 기반 월별 CO₂ 배출량 산정

본 연구에서는 에디 공분산 플럭스 타워의 연속 관측 (2021년 2월 ~ 2022년 1월) 데이터를 기반으로 시화국가 산업단지의 월평균 CO₂ 배출량을 정량화하였다. 순 CO₂ 플럭스(net FCO₂)는 월별로 집계되어 단위 면적당 탄소 질량($\text{tC km}^{-2} \text{month}^{-1}$) 단위로 변환되었다. 산업지역에서 기인한 배출량은 뚜렷한 계절성을 나타냈으며, 2021년 연평균 월별 배출량은 약 101.5 tC km^{-2} 로 추정되었다. 특히 겨울철 (1 ~ 2월)에는 169.7-200.8 $\text{tC km}^{-2} \text{month}^{-1}$ 로 상대적으로 높은 배출량을 보였고, 봄철(3 ~ 5월)에는 49.5 $\text{tC km}^{-2} \text{month}^{-1}$ 이하로 감소하는 패턴이 확인되었다. 이러한 시간적 변동성은 냉난방 에너지 수요 및 산업활동 수준의 계절적 변화와 관련이 있는 것으로 해석된다. 풋프린트 분석을 통해 플럭스 기여도를 산업지역과 녹지지역으로 구분한 결과, 두 지역 간 상이한 CO₂ 교환 특성이 관찰되었다. 산업지역은 연중 지속적인 순 CO₂ 배출원(net source)으로 작용하

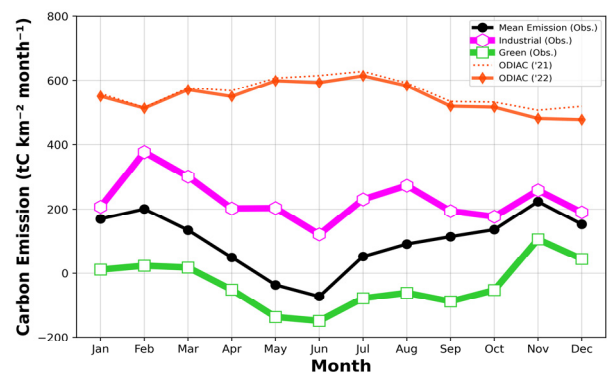


Fig. 6. Monthly comparison between eddy covariance observation-based CO₂ emissions and the ODIAC inventory for the Sihwa National Industrial Complex (February 2021 ~ January 2022)

여 최대 월 376.8 tC km⁻²(2월)의 배출량을 기록한 반면, 녹지지역은 특히 식생 성장기에 순 CO₂ 흡수(net sink) 경향을 보이며 최소 월 -136.7 tC km⁻²(5월)의 순 흡수량을 나타냈다. 이는 산업단지 내 녹지가 광합성 활동을 통해 일시적으로 탄소 흡수원으로 기능할 수 있음을 시사한다 (Fig. 6).

3.3.2. 관측 기반 배출량과 ODIAC 인벤토리 비교

관측 기반 월별 배출량 추정 결과를 전 지구적 화석연료 CO₂ 배출 인벤토리인 ODIAC (Open-source Data Inventory for Anthropogenic CO₂, 2021년 및 2022년 버전) 데이터와 비교하였다. 분석 결과, ODIAC 인벤토리는 연구 기간 전반에 걸쳐 관측 기반 배출량을 체계적으로 과대평가하는 경향을 보였다. 예를 들어, 2021년 1월의 경우 ODIAC은 558.3 tC km⁻² month⁻¹의 배출량을 제시하여 관측 기반 추정치(169.7 tC km⁻² month⁻¹)를 약 229% (388.6 tC km⁻² month⁻¹) 초과하였다. 이러한 과대평가가 경향은 모든 월에서 지속되었으며, 연평균 차이는 2021년에 약 461.0 tC km⁻² month⁻¹, 2022년에는 약 445.8 tC km⁻² month⁻¹로 산출되었다(Fig. 7).

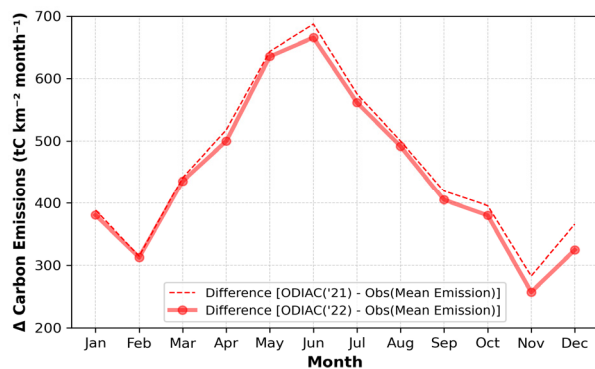


Fig. 7. Monthly differences between ODIAC-based and observed carbon emissions in the Sihwa Industrial Complex (SIC). Red lines indicate the difference between ODIAC estimates (2021 and 2022) and mean observed emissions

이러한 불일치는 ODIAC과 같은 상향식(bottom-up) 인벤토리 구축 방법론의 내재적 한계에서 기인할 수 있다. 인벤토리는 주로 국가 단위 통계, 야간 위성 조도(NTL: Nighttime Light)와 같은 대리 변수, 일반화된 배출 계수를 기반으로 배출량을 공간적으로 분배하므로, 연구 지역

과 같이 비표준화된 산업 구조를 가진 복잡한 환경에서의 국지적인 연료 사용 특성이나 미세 규모의 시간적 변동성을 정확히 반영하기 어렵다.

4. 결과 및 제언

본 연구는 수도권 서남부에 위치한 시화국가산업단지(SIC)를 대상으로, 에디 공분산(Eddy Covariance, EC) 기법을 활용하여 산업지역과 도시 녹지지역 간 CO₂ 플렉스의 시공간적 특성을 정량적으로 규명하였다. 약 1년간의 연속 관측 결과, SIC의 산업지역은 평균 228.3 tC km⁻² month⁻¹ (약 837.2 tCO₂ km⁻² month⁻¹) 수준의 지속적인 순배출 특성이 나타난 반면, 녹지지역은 생장기(growing season)를 중심으로 CO₂ 흡수(net sink) 경향이 뚜렷하게 관측되었다. 또한, 주간-야간 및 주중-주말을 기준의 비교 분석에서도 두 지역 간 플렉스의 구조적 차이가 일관되게 나타났다. 이는 시화국가산업단지(SIC) 산업지역과 녹지지역으로 구분되는 이질적인 토지이용 유형이 탄소 순환 메커니즘에 미치는 영향을 정량적으로 입증한 결과이다.

관측 기반 배출량 분석에서는 산업지역에서 최대 376.8 tC km⁻² month⁻¹ (약 12.4 tC km⁻² day⁻¹, 45.4 tCO₂ km⁻² day⁻¹)에 달하는 고배출 사례가 포착되었으며, 반대로 녹지지역에서는 생장기 동안 최대 -136.7 tC km⁻² month⁻¹ (약 -4.5 tC km⁻² day⁻¹, -16.5 tCO₂ km⁻² day⁻¹)의 탄소 흡수량이 관측되었다. 이러한 실측 결과는 글로벌 상향식 인벤토리와 비교했을 때, 인벤토리 방식이 계절성 및 토지이용 이질성을 충분히 반영하지 못함으로써 특정 조건에서 CO₂ 배출량을 과대 혹은 과소 추정할 가능성이 있음을 시사한다. 실제로 미국 인디애나폴리스 교외 지역을 대상으로 EC 기반 FCO₂를 고해상도 도시 인벤토리(Hestia)와 정량 비교한 연구에서도, 상향식 인벤토리가 여름철에는 EC 기반 추정보다 최대 9.1% 높게 나타나는 등 계절별 과대 추정이 보고된 바 있다(Wu et al., 2022) 이는 상향식 모델의 구조적 한계를 드러내며, 동시에 하향식 실측 기반 데이터의 필요성을 강조한다.

이러한 맥락에서, 본 연구에서 구축된 에디 공분산 기반 CO₂ 플렉스 관측 시스템은 기존 인벤토리의 정확성 검증 및 보정에 활용 가능한 신뢰도 높은 실측 자료(ground-truth data)를 제공한다. 이러한 데이터는 도시 및 산업지역의 배출량 산정 체계를 고도화하고, 과학적 근거에 기반한 탄소중립 정책 수립의 실효성을 제고하는 데 중요한 기초 자료로 활용될 수 있다. 특히 국내에서는 산업단지

단위의 고해상도 CO₂ 플럭스에 대한 실측 사례가 극히 제한적인 상황에서, 본 연구는 도시 산업지역의 탄소 특성을 정량적으로 규명한 선도적 사례로서 학술적 및 정책적 의의를 갖는다.

그럼에도 불구하고, 본 연구는 몇 가지 한계점을 수반한다. 첫째, 분석 대상 지역이 시화국가산업단지에 국한되어 있어, 결과의 일반화에는 신중한 접근이 필요하다. 둘째, 본 연구는 주로 이산화탄소(CO₂)에 집중되었으며, 산업단지에서 함께 배출되는 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O) 등 비이산화탄소 온실가스에 대한 통합적 분석은 이루어지지 않았다. 향후 연구에서는 다양한 온실가스에 대한 다종 동시 관측 체계를 구축하여 산업단지 전반의 온실가스 배출 특성을 보다 종합적으로 규명할 필요가 있다.

또한, 배출량 산정의 정밀도를 향상시키기 위해서는 다음과 같은 보완이 요구된다: (1) 사업장 단위의 직접 배출량 데이터 확보, (2) 연료 사용량 및 운영 활동에 대한 상세 정보 수집, (3) 하향식 및 상향식 방법론 간의 정량적 비교 분석. 이를 통해 도시 및 산업지역 탄소 모니터링 체계의 신뢰성과 예측력을 강화하고, 정량적 근거 기반의 지역 맞춤형 탄소중립 전략 수립에 실질적인 기여가 가능할 것으로 기대된다.

사사

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

Reference

- Aubinet M, Vesala T, Papale D. 2012. Eddy covariance: A practical guide to measurement and data analysis. Dordrecht: Springer Science & Business Media.
- Baldocchi D. 2014. Measuring fluxes of trace gases and energy between ecosystems and the atmosphere: the state and future of the eddy covariance method. *Global Change Biol* 20(12): 1212-1228. doi: 10.1111/gcb.12649
- Burba G. 2013. Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural and regulatory applications: A field book on measuring ecosystem gas exchange and areal emission rates. Lincoln: LI-COR Biosciences.
- Hong S-O, Kim J, Byun Y-H, Hong J, Hong J-W, Lee K, Park Y-S, Lee S-S, Kim Y-H. 2023. Intra-urban variations of the CO₂ fluxes at the surface-atmosphere interface in the Seoul Metropolitan Area. *Asia-Pac J Atmos Sci* 59(5): 781-795. doi: 10.1007/s13143-023-00324-6
- IEA. 2022. World Energy Outlook 2022. Paris: OECD Publishing. doi: 10.1787/3a469970-en
- IPCC. 2021. Climate Change 2021: The physical science basis. Cambridge and New York: Cambridge University Press. doi: 10.1017/9781009157896
- Kljun N, Calanca P, Rotach MW, Schmid HP. 2015. A simple two-dimensional parameterisation for Flux Footprint Prediction (FFP). *Geosci Model Dev* 8(11): 3695-3713. doi: 10.5194/gmd-8-3695-2015
- Lee X, Finnigan JJ, Paw U KT. 2004. Eddy-covariance measurement over tall vegetation. *Boundary Layer Meteorol* 110(1): 151-187.
- Nemitz E, Mammarella I, Ibrom A, Aurela M, Burba GG, Dengel S, Gielen B, Grelle A, Heinesch B, Herbst M, et al. 2018. Standardisation of eddy-covariance flux measurements of methane and nitrous oxide. *Int Agrophys* 32(4): 517-549. doi: 10.1515/intag-2017-0042
- Papale D, Reichstein M, Aubinet M, Canfora E, Bernhofer C, Kutsch W, Longdoz B, Rambal S, Valentini R, Vesala T, et al. 2006. Towards a standardized processing of net ecosystem exchange measured with eddy covariance technique: Algorithms and uncertainty estimation. *Biogeosciences* 3(4): 571-583. doi: 10.5194/bg-3-571-2006
- Park C, Jeong S, Park M-S, Park H, Yun J, Lee S-S, Park S-H. 2022. Spatiotemporal variations in urban CO₂ flux with land-use types in Seoul. *Carbon Balance Manage* 17(1): 3. doi: 10.1186/s13021-022-00206-w
- Seto KC, Dhakal S, Bigio A, Blanco H, Delgado GC, Dewar D, Huang L, Inostroza RE, Lei Y, Ramaswami A, et al. 2014. Human settlements, infrastructure, and spatial planning. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Cambridge and New York:

Cambridge University Press. p. 923-1000.

Wu K, Davis KJ, Miles NL, Richardson SJ, Lauvaux T, Sarmiento DP, Balashov NV, Keller K, Turnbull J, Gurney KR, et al. 2022. Source decomposition of eddy-covariance CO₂ flux measurements for evaluating a high-resolution urban CO₂ emissions inventory. *Environ Res Lett* 17(7): 074035. doi: 10.1088/1748-9326/ac7c29