

ORIGINAL ARTICLE

비식생 갯벌 표층과 대기의 이산화탄소 플럭스 계절 변동 분석: 벌교 갯벌

박경덕 · 강동환* · 소윤환 · 조원기¹⁾ · 김병우²⁾

부경대학교 지질환경연구소, ¹⁾온실가스종합정보센터, ²⁾한국수자원공사 K-water 연구원

Seasonal Variation of Carbon Dioxide Flux between Soil Surface Layer and Atmosphere in Unvegetated Tidal Flat : Beolgyo Tidal Flat

Kyeong-deok Park, Dong-hwan Kang*, Yoon Hwan So, Won Gi Jo¹⁾, Byung-Woo Kim²⁾

Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

¹⁾*Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea, Cheongju 28166, Korea*

²⁾*K-water Institute, Korea Water Resources Corporation, Daejeon 34045, Korea*

Abstract

In this study, we analyzed seasonal variations in carbon dioxide fluxes, concentrations, and soil temperatures over three years in unvegetated tidal flats in the Beolgyo area. We also investigated the correlations between carbon dioxide fluxes and influencing factors. The average carbon dioxide flux was positive in summer and autumn but negative in winter and spring. A positive correlation was observed between carbon dioxide flux and soil temperature in spring whereas a negative correlation was noted in summer. In summer and autumn, as the soil temperature increased, the carbon dioxide flux decreased. In contrast, in spring and winter, as the soil temperature decreased, the carbon dioxide flux increased. Overall, this study reveals the significant influence of soil temperatures on carbon dioxide fluxes between the surface layer of the tidal flat and atmosphere.

Key words : Unvegetated tidal flat, Carbon dioxide flux, Soil temperature, Season

1. 서 론

갯벌(tidal flat)은 육상과 해양의 중간지대로서, 만조 시에는 해수에 잠겨 있다가 간조 시에 드러나는 퇴적지형이다(Koh, 2001). 갯벌은 식생의 여부에 따라 맹그로브 숲(mangrove forest), 해초 목초지(seagrass meadows), 염생습지(salt marsh), 비식생 갯벌(unvegetated tidal flat) 등으로 구분한다. 전 세계에 분포하는 갯벌 중 비식생 갯벌은 약 9% 정도이

며, 맹그로브 숲과 비슷한 면적을 보인다(Davidson and Finlayson, 2019). 전 세계에 분포하는 비식생 갯벌의 44%는 아시아 지역에 위치하며, 중국 동부와 대한민국 서해안 지역에서 가장 넓게 발달하였다(Murray et al., 2012).

비식생 갯벌은 표층에 서식하는 미세조류의 광합성 활동으로 지구온난화의 주요 원인인 대기 중 이산화탄소를 흡수 및 저장하고(MacIntyre et al., 1996; Decho, 2000; Lee et al., 2019), 또한 갯벌에 서식하는

Received 20 February, 2023; Revised 15 March, 2023;

Accepted 21 March, 2023

*Corresponding author : Dong-hwan Kang, Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan 48513, Korea
Phone : +82-51-629-7393
E-mail : dhkang@pknu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



Fig. 1. Location of unvegetated tidal flat in the study area.

미생물과 저서생물(benthos)에 의한 호흡 활동을 통해 이산화탄소를 대기 중으로 방출하기도 한다(Migné et al., 2011; Yu et al., 2018).

비식생 갯벌 관련 연구는 중국 동부와 대한민국에서 많이 수행되었다. 중국 동부의 비식생 갯벌을 대상으로 갯벌의 위도 및 지온에 따른 이산화탄소 플럭스 변화를 분석하였고(Lin et al., 2020), 대만 서부의 갯벌을 대상으로 계절과 썰 함량에 대한 이산화탄소 플럭스의 상관성을 연구하였다(Lin et al., 2021). 대한민국 순천만 지역의 갯벌, 논, 산림을 대상으로 이산화탄소 플럭스를 측정하고 토지 이용 용도별 이산화탄소 플럭스를 비교하였으며(Kang et al., 2011), 무안 갯벌을 대상으로 식생 및 비식생 지역에서 계절 및 지온에 의한 이산화탄소 플럭스 변동을 연구하였다(So et al., 2019). 유럽에서는 프랑스 동부 갯벌을 대상으로 조위와 지온, 퇴적물과 식생에 의한 이산화탄소 플럭스 변화를 연구하였다(Migné et al., 2016).

본 연구에서는 우리나라 남해안 벌교 지역의 비식생 갯벌에서 3년(2010~2012년) 동안 관측한 이산화탄소 플럭스와 농도, 지온 자료를 분석하여 갯벌과 대기 사이의 이산화탄소 흡수/방출에 대한 정량적인 평가를 수행하였다. 또한 계절별 이산화탄소 플럭스와 농도, 지온의 상관성을 분석하여 갯벌과 대기 사이의 이산화탄소 흡수/방출에 대한 계절 특성을 규명하였다.

2. 연구 방법

본 연구는 남해안의 여자만에 포함된 벌교 갯벌(전라남도 보성군 벌교읍 영등리)에서 수행하였으며, 관측 지역은 비식생 갯벌에 해당한다(Fig. 1). 벌교 갯벌에서 이산화탄소 플럭스와 농도, 지온에 대한 현장 관측은 10회(M1~M10) 동안 수행하였으며, 관측 시기는 봄(2회), 여름(4회), 가을(2회), 겨울(2회)이었다(Table 1). 현장 관측은 EGM-4를 이용하여 30개 지점에서 수행하였으며, EGM-4는 폐쇄형 역학 챔버 시스템(closed dynamic chamber system)으로서 챔버를 갯벌 표층에 고정하고 시간별 이산화탄소 농도를 측정하여 갯벌과 대기 사이의 이산화탄소 플럭스를 산정하는 장비이다(Kang et al., 2010; Kang et al., 2011). 갯벌 표층과 대기 사이의 이산화탄소 플럭스는 아래의 식 (1)과 같이 챔버 내에서 시간에 따른 이산화탄소 농도의 변화율(slope)을 이용하여 산정하고(Field et al., 1989), 이산화탄소 플럭스의 값이 음(-)이면 대기에서 갯벌로의 흡수(uptake)를, 양(+)이면 갯벌에서 대기로의 방출(emission)을 의미한다.

$$F = \frac{(C_t - C_i) V}{\Delta t A} \quad (1)$$

Table 1. Field observation date and compositions

Monitoring date	No.	Season	Measured composition	Measuring equipment
May 29, 2010	M1	Spring		
July 7, 2010	M2	Summer		
September 24, 2010	M3	Autumn	CO ₂ Flux (mgCO ₂ m ⁻² hr ⁻¹)	
November 19, 2010	M4	Autumn		
February 28, 2011	M5	Winter	CO ₂ concentration (ppm)	EGM-4 (Closed dynamic chamber system)
April 27, 2011	M6	Spring		
July 21, 2011	M7	Summer		
December 26, 2011	M8	Winter	Soil temperature (°C)	
June 4, 2012	M9	Summer		
July 24, 2012	M10	Summer		

여기서, F 는 이산화탄소 플럭스 [$ML^{-2}T^{-1}$], C_i 는 챔버 내 이산화탄소 초기 농도 [ML^{-3}], C_t 는 Δt 시간 경과 후의 챔버 내 이산화탄소 농도 [ML^{-3}], V 는 챔버의 체적 [L^3], Δt 는 측정 시간 간격 [T], A 는 챔버가 설치된 갯벌 표층의 표면적 [L^2] 이다.

갯벌 퇴적물 채취 및 이화학적 성분 분석은 6회(M1, M2, M4, M5, M6, M7) 동안 수행하였으며(Table 1), 분석 성분은 유기탄소량(soil organic carbon), 함수비(water content), 수소이온농도(pH), 산화환원전위(Eh) 등이었다. 갯벌 퇴적물 채취는 30개 지점에서 수행되었으며, 현장에서 갯벌 표층 하부 5 cm 이내의 깊이에서 채취하였다. 채취된 퇴적물은 시료 병에 담아서 냉장 보관하여 실험실로 운반하였다. 벌교 갯벌에서 채취된 퇴적물 시료는 실험실에서 건조하여(oven dry) 함수비(흙 입자의 중량에 대한 물의 중량의 비)를 측정하였으며, 건조된 토양을 전처리하여 pH 및 유기탄소량을 분석하였다. 퇴적물 시료 내 함수비, pH, Eh 성분은 토양오염공정시험법으로, 유기탄소량은 부경대학교 공동 실험실습관의 총유기탄소 분석기(TOC analyzer)를 이용하여 분석하였다.

벌교 갯벌 퇴적물의 이화학적 성분(유기탄소량, 함수비, pH, Eh)과 현장 관측 자료(이산화탄소 플럭스와 농도, 지온)에 대한 기술통계량, 상자수염그림, 상관성 분석을 수행하였다. 또한 이산화탄소 플럭스와 농도, 지온 자료는 전체, 계절별, 흡수 조건과 방출 조건으로 구분하여 세부적으로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 갯벌 퇴적물의 이화학적 특성

벌교 갯벌에서 채취된 퇴적물의 이화학적 성분에 대한 기술통계량을 산정하였다(Table 2). 퇴적물 내 유기탄소량의 평균은 1.04%, 표준편차는 0.13%로서 퇴적물 채취 지점별 유기탄소량의 차이를 보였다. 함수비의 범위는 33~184%로서 갯벌에서 공간적인 차이가 매우 크게 나타났으며, 이는 퇴적물의 입도(모래, 실트, 점토 등)와 갯벌의 지형 특성(퇴적물 채취 지점별 고도 차이)에 의한 것으로서 갯벌에서 퇴적물 내 물 함량이 공간적으로 매우 불균질함을 의미한다. pH의 평균은 7.56 정도이고 그 범위는 6.99~8.01로서 벌교 갯벌의 퇴적물 내에 함유된 물은 중성에 해당하고 시공간적으로 균질하게 분포하였다. Eh의 평균은 135.8 mV이고 그 범위는 98.0~173.3 mV로서 시공간적인 변동 폭이 넓었다.

갯벌 퇴적물의 이화학적 성분들에 대한 상자수염그림(box-whisker plot)을 작성하였다(Fig. 2). 갯벌 퇴적물 내 유기탄소량과 pH 성분은 관측 시기 동안 유사한 중위수와 범위를 나타내었으며, 벌교 갯벌 퇴적물에서는 유기탄소량과 pH 성분이 관측 시기 동안에는 그 변화가 크지 않았음을 의미한다. 함수비와 Eh 성분은 관측 시기 동안 중위수의 차이가 크고 범위도 넓게 나타났으며, 벌교 갯벌 퇴적물에서는 함수비와 Eh 성분이 관측 시기 동안에 변화가 나타났음을 의미한다.

갯벌 퇴적물의 이화학적 성분 사이의 상관계수를 산정하였다(Table 3). pH와 Eh 성분 사이의 상관계수는

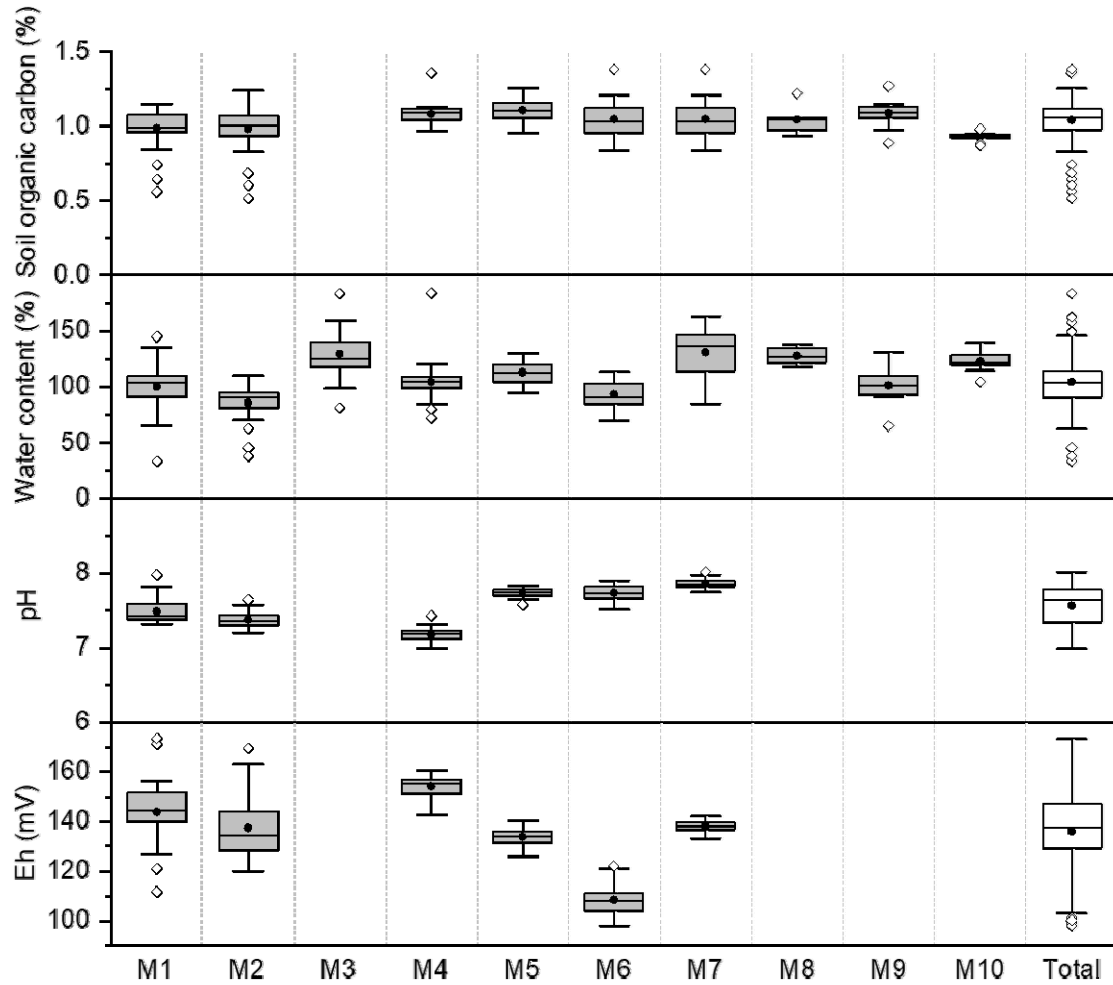


Fig. 2. Box whisker plots of physicochemical composition in tidal flat sediments by observation period.

-0.55이고, 나머지 성분 사이의 상관계수는 0.40 이하로 낮았다. 유기탄소량과 함수비의 상관계수는 0.31이며, pH와 함수비의 상관계수는 0.30이었다.

3.2. 갯벌과 대기의 이산화탄소 흡수/방출 특성

별교 갯벌에서 현장 관측된 이산화탄소 플럭스와 농도, 지온 성분의 전체 자료에 대한 기술통계량을 산정하였다(Table 4). 이산화탄소 플럭스의 평균은 $-25 \text{ mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{hr}^{-1}$ 로서 갯벌에서 이산화탄소 흡수량이 방출량보다 많았다. 이산화탄소 플럭스의 표준편차는 $101 \text{ mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{hr}^{-1}$, 최솟값은 $-316 \text{ mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{hr}^{-1}$,

최댓값은 $415 \text{ mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{hr}^{-1}$ 로서 시공간적인 변화가 많음을 알 수 있었다. 별교 갯벌 표층 대기에서 이산화탄소 농도의 평균은 387 ppm, 표준편차는 14 ppm 정도로서 연중 변화 폭이 크지는 않았다. 국내 배경 대기 중 이산화탄소 농도의 평균은 최근 10년 동안 400 ppm 이상으로 관측되었으며 지속적으로 증가하고 있다(NIMS, 2022). 별교 갯벌 표층 대기 중 이산화탄소 농도는 배경 대기에 비해 낮았으며, 이는 갯벌 표층에서 미세조류와 식물플랑크톤의 광합성 활동에 의한 대기 중 이산화탄소의 흡수가 발생하여 갯벌 표층 대기의 이산화탄소 농도가 감소한 것이다(MacIntyre et al., 1996; Decho, 2000; Montes-Hugo et al., 2003;

Table 2. Descriptive statistics for physicochemical composition of tidal flat sediments

	Avg.	Min.	Max.	S.D.	C.V.
Soil organic carbon (%)	1.04	0.52	1.38	0.13	0.12
Water content (%)	104	33	184	22.61	0.22
pH	7.56	6.99	8.01	0.26	0.03
Eh (mV)	135.8	98.0	173.3	16.20	0.12

Table 3. Correlation coefficients between physicochemical components of tidal flat sediments

	Soil organic carbon (%)	Water content (%)	pH	Eh (mV)
Soil organic carbon (%)				
Water content (%)	0.31			
pH	0.03	0.30		
Eh (mV)	-0.11	0.00	-0.55	

Table 4. Descriptive statistics of carbon dioxide flux and concentration, and soil temperature

Component	Avg.	Min.	Max.	S.D.	C.V.
Flux (mgCO ₂ m ⁻² hr ⁻¹)	-25	-316	415	101.20	-4.07
Concentration (ppm)	387	356	418	13.70	0.04
Soil temperature (°C)	21.6	0.8	34.6	8.53	0.39

Kang et al., 2014; Lee et al., 2019). 갯벌 퇴적물 내 지온의 범위는 0.8~34.6°C로서 계절 특성을 반영하고 있었으며, 표준편차는 8.5°C이었다.

벌교 갯벌에서 관측된 이산화탄소 플럭스와 농도, 지온 자료를 계절별로 구분하여 기술통계량을 산정하였다(Table 5). 이산화탄소 플럭스의 평균은 봄과 겨울에 음(-)의 값을, 여름과 가을에 양(+)의 값을 보였다. 봄과 겨울에는 갯벌 표층에서 대기 중 이산화탄소의 흡수량이 방출량보다 많고, 여름과 가을에는 이산화탄소의 방출량이 흡수량보다 많음을 의미한다. 벌교 갯벌에서는 봄에 대기 중 이산화탄소 흡수가 가장 활발하고, 가을에 갯벌에서 대기로 이산화탄소 방출이 가장 활발하였다. 벌교 갯벌 상부 대기의 이산화탄소 농도는 겨울이 가장 높고 여름이 가장 낮았으며, 이는 북반구 지역의 배경 대기에서 관측된 계절별 이산화탄소 농도 변화와 유사하였다(NIMS, 2022). 벌교 갯벌 표층 퇴적물 내 지온의 평균은 여름이 가장 높고 겨울이 가장 낮았으며, 이는 계절별 기온 변화에 의한 것이다.

벌교 갯벌에서 관측된 이산화탄소 플럭스를 흡수 조건(-)과 방출 조건(+)으로 구분하여 기술통계량을

산정하였다(Table 6). 갯벌 표층과 대기 사이의 이산화탄소 흡수량과 방출량은 시공간적으로 균일한 값을 나타내지 않으므로, 흡수 조건과 방출 조건으로 자료를 구분하여 분석하고자 하였다. 흡수 조건에서 이산화탄소 플럭스의 평균은 -93 mgCO₂m⁻²hr⁻¹, 방출 조건에서 이산화탄소 플럭스의 평균은 53 mgCO₂m⁻²hr⁻¹ 정도이었다. 흡수 조건과 방출 조건에서 이산화탄소 플럭스 평균의 절댓값은 흡수 조건이 높았으며, 이는 벌교 갯벌에서 대기 중 이산화탄소의 흡수량이 방출량보다 많았음을 의미한다. 이산화탄소 농도와 지온은 흡수 조건과 방출 조건에서 유사하게 나타났다.

벌교 갯벌에서 현장 관측된 이산화탄소 플럭스와 농도, 지온 성분의 관측 시기별 자료에 대한 상자수염그림을 작성하였다(Fig. 3). 관측 시기별 이산화탄소 플럭스는 흡수(-)와 방출(+)이 다양하게 나타났으며, 중위수(median)는 M6 시기를 제외하고는 모두 -50~50 mgCO₂m⁻²hr⁻¹ 범위로 나타났다. 이산화탄소 플럭스의 이상치(outlier)는 M3, M4, M7, M10 시기에 나타났으며, 대부분 큰 값들로서 방출량이 많았던 지점에 해당한다. 관측 시기 동안 이산화탄소 농도와

Table 5. Seasonal descriptive statistics of carbon dioxide flux and concentration, and soil temperature

Component	Season	Avg.	Min.	Max.	S.D.	C.V.
Flux (mgCO ₂ m ⁻² hr ⁻¹)	Spring	-117	-316	162	99.19	-0.85
	Summer	1	-240	415	106.86	110.10
	Autumn	30	-68	223	39.99	1.33
	Winter	-24	-104	30	36.90	-1.56
Concentration (ppm)	Spring	389	382	418	5.21	0.01
	Summer	377	356	398	10.04	0.03
	Autumn	388	372	415	14.23	0.04
	Winter	407	398	414	3.62	0.01
Soil temperature (°C)	Spring	22.8	19.4	25.9	1.50	0.07
	Summer	29.0	24.8	34.6	3.00	0.10
	Autumn	17.7	7.5	28.1	8.35	0.47
	Winter	7.7	0.8	9.6	2.76	0.36

Table 6. Descriptive statistics of carbon dioxide flux, concentration, and soil temperature considering uptake and emission conditions

Condition	Component	Avg.	Min.	Max.	S.D.	C.V.
Uptake	Flux (mgCO ₂ m ⁻² hr ⁻¹)	-93	-316	-0.42	75.49	-0.81
	Concentration (ppm)	386	356	418	14.58	0.04
	Soil temperature (°C)	22.6	0.8	34.6	8.43	0.37
Emission	Flux (mgCO ₂ m ⁻² hr ⁻¹)	53	0.42	415	64.06	1.21
	Concentration (ppm)	388	363	411	12.62	0.03
	Soil temperature (°C)	20.5	7.47	33.2	8.53	0.42

지온은 서로 반대의 경향성을 나타내었다. 이산화탄소 농도의 이상치는 M2, M3, M4, M6, M9 시기에 나타났으며, 특정 관측 지점에서 갯벌 표층의 미생물과 저서생물의 호흡 활동이 활발하여 이산화탄소의 방출량이 많았던 것으로 판단된다(Migné et al., 2011; Zhang et al., 2011; Yu et al., 2018). 갯벌 표층의 지온은 모든 관측 시기에 이상치가 나타나지 않았으며, 모든 관측 시기 동안 지온의 공간적인 차이가 크지 않았음을 의미한다.

별교 갯벌에서 현장 관측된 이산화탄소 플럭스와 농도, 지온 성분을 계절별, 흡수와 방출 조건으로 구분하여 상자수염그림을 작성하였다(Fig. 4). 이산화탄소 플럭스는 여름과 가을에 양(+)의 값이 많고, 봄과 겨울에 음(-)의 값이 많은 경향을 보였다. 이산화탄소 플럭스의 이상치는 여름과 가을에 많이 나타났으며, 이는 갯벌 표층과 대기 사이의 이산화탄소 흡수량과 방출량의 공간적인 불균질성이 봄과 겨울보다 여름과 가을에 매

우 높았기 때문이다. 갯벌 표층 대기에서 이산화탄소 농도의 계절 변동은 우리나라 배경 대기에서 관측된 이산화탄소 농도의 계절 특성과 유사하였으며(NIMS, 2022), 이산화탄소 농도의 이상치는 봄에 1개 지점에서 높게 나타났다. 이산화탄소 플럭스는 흡수 조건에서는 이상치가 없었으며, 방출 조건에서는 8개 지점에서 100 mgCO₂m⁻²hr⁻¹를 초과하는 값이 나타났다. 이산화탄소 농도는 흡수 조건과 방출 조건에서 중위수가 유사하였으며, 이산화탄소 농도는 흡수 조건과 방출 조건보다 계절 특성에 의해 지배적인 영향을 받은 것으로 판단된다. 지온의 중위수는 흡수 조건과 방출 조건에서 유사하였으며, 이상치는 흡수 조건에서 낮은 값으로 나타났다.

이산화탄소 플럭스와 농도, 지온 성분 사이의 상관계수를 전체 자료 및 계절별로 산정하였다(Table 7). 모든 관측 자료를 이용하여 산정한 이산화탄소 플럭스와 농도 및 플럭스와 지온의 상관계수는 매우 낮았으

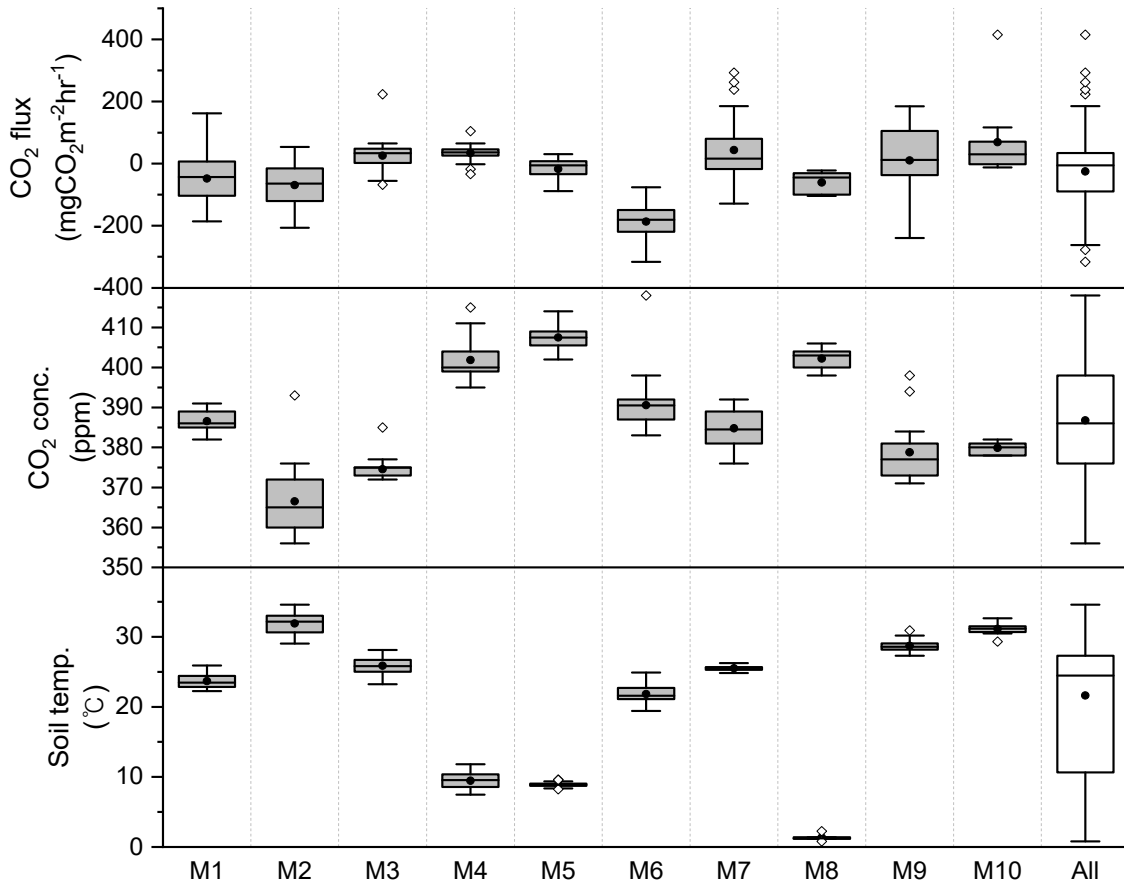


Fig. 3. Box whisker plots of carbon dioxide flux and concentration, and soil temperature by monitoring period.

며, 이산화탄소 농도와 지온의 상관계수는 -0.88로서 높게 나타났다. 관측 자료를 계절별로 구분하여 산정한 이산화탄소 플럭스와 농도의 상관계수는 봄과 여름에 각각 -0.36과 0.34로 나타났으며, 이산화탄소 플럭스와 지온의 상관계수는 봄과 겨울에 각각 0.49와 0.40으로 양의 상관성을 보였고 여름에는 -0.32로서 음의 상관성을 보였다. 벌교 갯벌에서 봄과 겨울에는 지온이 상승할수록 갯벌 표층에서 대기 중 이산화탄소 방출량이 증가하고, 여름에는 지온이 상승할수록 이산화탄소 방출량이 감소하는 것으로 나타났다. 기온이 상대적으로 낮은 겨울과 봄에는 기온이 상승할수록 생물에 의한 호흡 활동이 활발하므로 갯벌 표층에서 대기 중의 이산화탄소 방출량이 증가하고, 여름에는 기온이 25~30°C 이상이 되면 생물에 의한 호흡 활동이 감소하므로 갯벌 표

층에서 대기 중의 이산화탄소 방출량이 감소한 것으로 판단된다(Montes-Hugo et al., 2003; Zhang et al., 2011; Kang et al., 2014). 이산화탄소 농도와 지온의 상관계수는 여름과 가을에 각각 -0.76과 -0.97로서 음의 상관성이 높았으며, 겨울에는 0.56으로서 양의 상관성을 보였다. 우리나라 배경 대기 중 이산화탄소 농도는 여름에 낮고 겨울에 높은 특성을 나타내고 있으며(NIMS, 2022), 벌교 갯벌에서도 이와 유사한 계절 특성을 보였다.

이산화탄소 플럭스 자료를 흡수 조건(-)과 방출 조건(+)으로 구분하여 이산화탄소 플럭스와 농도, 지온 성분 사이의 상관계수를 산정하였다(Table 8). 이산화탄소 플럭스와 농도, 이산화탄소 플럭스와 지온의 상관계수는 흡수 조건과 방출 조건 모두에서 낮았으며, 방출

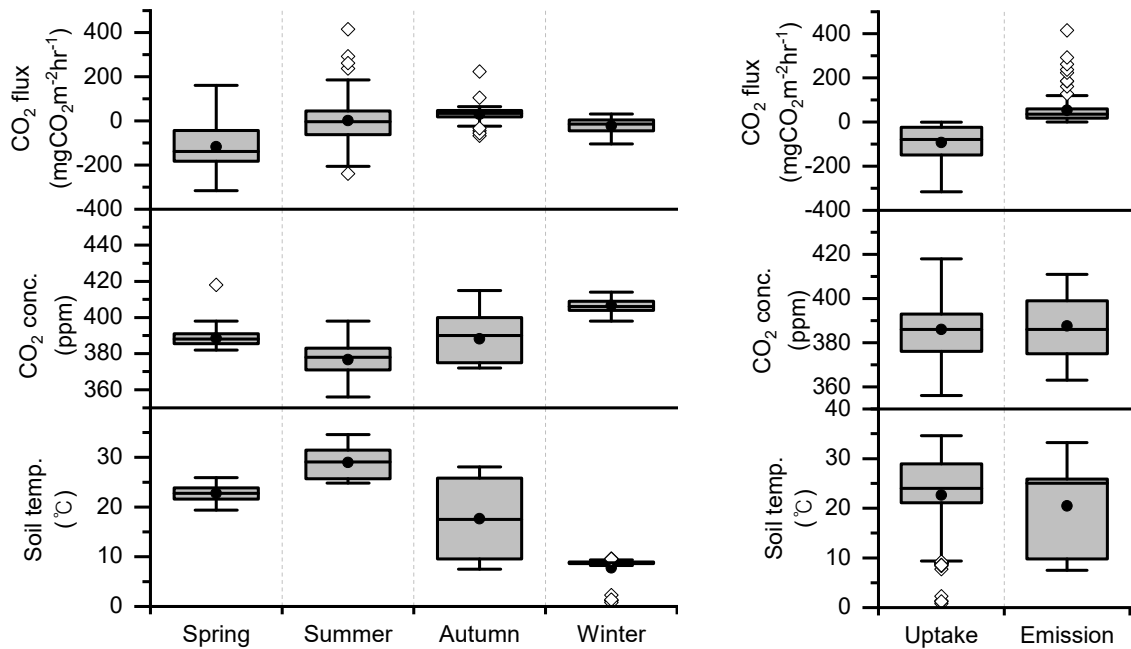


Fig. 4. Box whisker plots of carbon dioxide flux and concentration, and soil temperature (left : seasonal, right : uptake and emission conditions).

조건에서 이산화탄소 플럭스와 지온의 상관계수는 0.27로 나타났다. 기존 연구에서는 토양 생태계에서는 방출 조건에서 지온이 상승하면 이산화탄소의 방출량이 증가하였으며(Kim et al., 2014; Kang et al., 2019), 벌교 갯벌 표층에서 대기로의 이산화탄소 방출 조건에서는 토양 생태계에서 지온에 따른 이산화탄소 방출 특성과 유사하게 나타났다. 이산화탄소 농도와 지온의 상관계수는 흡수 조건과 방출 조건에서 각각 -0.86과 -0.91로서 높게 나타났으며, 이는 흡수 조건과 방출 조건 모두에서 지온이 상승할수록 이산화탄소 농도는 감소함을 의미한다.

4. 결론

본 연구에서는 벌교 지역의 비식생 갯벌에서 이산화탄소 플럭스와 농도, 지온 자료를 분석하여 갯벌 표층과 대기 사이의 이산화탄소 흡수와 방출에 대한 계절 변동을 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 벌교 갯벌에서 3년 동안 관측된 이산화탄소 플럭스

의 평균은 $-25 \text{ mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{hr}^{-1}$ 이고, 표준편차는 $101 \text{ mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{hr}^{-1}$, 범위는 $-316\sim 415 \text{ mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{hr}^{-1}$ 로서 시공간적인 변화가 많음을 알 수 있었다. 벌교 갯벌에서는 봄에 대기 중 이산화탄소 흡수가 가장 활발하고, 가을에 갯벌에서 대기로 이산화탄소 방출이 가장 활발하였다. 벌교 갯벌에서 이산화탄소 플럭스의 흡수 조건에서는 $-93 \text{ mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{hr}^{-1}$, 방출 조건에서는 $53 \text{ mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{hr}^{-1}$ 이었다. 벌교 갯벌에서는 이산화탄소 흡수량이 방출량보다 많음을 알 수 있었다.

2) 벌교 갯벌에서 관측 시기별 이산화탄소 플럭스의 흡수와 방출이 다양하게 나타났으며, 중위수는 M6 시기를 제외하고는 모두 $-50\sim 50 \text{ mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{hr}^{-1}$ 범위로 나타났다. 이산화탄소 플럭스의 이상치는 M3, M4, M7, M10 시기에 나타났으며, 대부분 큰 값들로서 방출량이 많았다. 벌교 갯벌 표층에서 이산화탄소 플럭스 관측 결과 여름과 가을에는 방출량이 많고, 겨울과 봄에는 흡수량이 많았다.

3) 벌교 갯벌에서 3년 동안 관측된 모든 자료를 이용한 이산화탄소 플럭스와 농도, 이산화탄소 플럭스와 지

Table 7. Correlation coefficient between carbon dioxide flux, concentration and soil temperature

Used data	Flux vs Concentration	Flux vs Soil temperature	Concentration vs Soil temperature
Spring	-0.36	0.49	-0.33
Summer	0.34	-0.32	-0.76
Autumn	0.08	-0.11	-0.97
Winter	-0.07	0.40	0.56

Table 8. Correlation coefficient between carbon dioxide flux, concentration, and soil temperature considering uptake and emission conditions

Condition	Flux vs Concentration	Flux vs Soil temperature	Concentration vs Soil temperature
Uptake	-0.01	-0.08	-0.86
Emission	-0.19	0.27	-0.91

온의 상관계수는 매우 낮았다. 관측 자료를 계절별로 구분하여 산정한 이산화탄소 플럭스와 지온의 상관계수는 봄과 겨울에 각각 0.49와 0.40, 여름에는 -0.32이었다. 벌교 갯벌에서 봄과 겨울에는 지온이 상승할수록 갯벌 표층에서 대기 중 이산화탄소 방출량이 증가하고, 여름에는 지온이 상승할수록 이산화탄소 방출량이 감소하는 것으로 나타났다. 기온이 상대적으로 낮은 겨울과 봄에는 기온이 상승할수록 생물에 의한 호흡 활동이 활발해지므로 갯벌 표층에서 대기 중 이산화탄소 방출량이 증가하고, 여름에는 기온이 25~30℃ 이상이면 생물에 의한 호흡 활동이 감소하므로 갯벌 표층에서 대기 중 이산화탄소 방출량이 감소한 것으로 나타났다.

4) 향후 후속 연구로는 관측 시기별, 계절별, 흡수/방출 조건을 고려하여 지온에 따른 이산화탄소 플럭스의 변동 함수를 추정하여 비식생 갯벌에서 지온에 따른 이산화탄소 플럭스의 계절 변동 특성을 정량적으로 규명하고자 한다.

감사의 글

본 논문은 “2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2020R1I1A1A01073860)” 및 “2021년도 교육부의 재원으로 한국기초과학지원연구원 국가연구시설장비진흥센터 사업(2021R1A6C101A415)”의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

Davidson, N. C., Finlayson, C. M., 2019, Updating global coastal wetland areas presented in Davidson and Finlayson (2018), *Mar. Freshw. Res.*, 70, 1195-1200.

Decho, A. W., 2000, Microbial biofilms in intertidal systems: an overview, *Cont. Shelf Res.*, 20, 1257-1273.

Field, C. B., Ball, J. T., Berry, J. A., 1989, Photosynthesis, principles and field techniques. In *Plant physiological ecology, field methods and instrumentation* (Pearcy, R. W., Ehleringer, J., Mooney, H. A., Rundel, P. W. eds.), Chapman and Hall, New York, 209-253.

Kang, D. H., Kwon, B. H., Kim, P. G., 2010, CO₂ Respiration Characteristics with Physicochemical Properties of Soils at the Coastal Ecosystem in Suncheon Bay, *J. Environ. Sci.*, 19(2), 217-227.

Kang, D. H., Kwon, B. H., Kim, P. S., 2014, Variation analysis of CO₂ concentrations at sunset before and after of summer season at the foreshore, *J. Environ. Sci.*, 23(3), 399-407.

Kang, D. H., Kwon, B. H., Yu, H. S., Kim, P. S., Kim, K. H., 2011, Seasonal and Spatial Variations of CO₂ Fluxes Between Surface and Atmosphere in Foreshore, Paddy Field and Woods Sites, *J. Environ. Sci.*, 20(8), 963-975.

Kang, D. H., So, Y. H., Kwon, B. H., Kim, P. S., 2019, Sensitivity analysis (Q₁₀) of carbon dioxide flux with soil temperature in the Grassplot, *J. Environ. Sci.*, 28(9), 785-795.

- Kim, P. S., Kwon, B. H., Kang, D. H., 2014, Response of soil CO₂ fluxes to seasonal variations in a Grassplot, 2014, *J. Environ. Sci.*, 23(6), 1131-1142.
- Koh, C. H., 2001, *Mudflats in Korea - Korean tidal flat: Environment, biology and human*, Seoul National University Publishing & Cultural Center, Seoul, Korea, 1073.
- Lee, J. M., Kwon, B. O., Kim, B., Noh, J., Hwang, K., Ryu, J., Park, J., Hong, S., Khim, J. S., 2019, Natural and anthropogenic signatures on sedimentary organic matters across varying intertidal habitats in the Korean waters, *Environ. Int.*, 133, 105166.
- Lin, W. J., Chiu, M. C., Lin, C. W., Lin, H. J., 2021, Effects of sediment characteristics on carbon dioxide fluxes based on interacting factors in unvegetated tidal flats, *Front. Mar. Sci.*, 8, 670180.
- Lin, W. J., Wu, J., Lin, H. J., 2020, Contribution of unvegetated tidal flats to coastal carbon flux, *Glob. Change Biol.*, 26, 3443-3454.
- MacIntyre, H. L., Geider, R. J., Miller, D. C., 1996, Microphytobenthos: The ecological role of the "secret garden" of unvegetated, shallow-water marine habitats. I. Distribution, abundance and primary production, *Estuaries*, 19, 186-201.
- Migné, A., Davoult, D., Spilmont, N., Ouisse, V., Boucherd, G., 2016, Spatial and temporal variability of CO₂ fluxes at the sediment-air interface in a tidal flat of a temperate lagoon (Arcachon Bay, France), *J. Sea Res.*, 109, 13-19.
- Migné, A., Ouisse, V., Hubas, C., Davoult, D., 2011, Freshwater seepages and ephemeral macroalgae proliferation in an intertidal bay: II. Effect on benthic biomass and metabolism, *Estuar. Coast Shelf Sci.*, 92, 161-168.
- Montes-Hugo, M. A., Alvarez-Borrego, S., 2003, Spatial and temporal variation of photosynthetic parameters of phytoplankton in a subtropical coastal lagoon, *Estuarine, Coastal and Shelf Sci.*, 56, 517-525.
- Murray, N. J., Phinn, S. R., Clemens, R. S., Roelfsema, C. M., Fuller, R. A., 2012, Continental scale mapping of tidal flats across East Asia using the landsat archive, *Remote Sens.*, 4, 3417-3426.
- NIMS, 2022, Report of global atmosphere watch 2021, National Institute of Meteorological Sciences, 330.
- So, Y. H., Kang, D. H., Kwon, B. H., Kim, B. S., 2019, Seasonal variations of CO₂ concentration and flux in vegetation and non-vegetation environments on the Muan tidal flat of Hampyong Bay, *J. Wet. Res.*, 21, 257-266.
- Yu, X., Ye, S., Olsson, L., Wei, M., Krauss, K. W., Brix, H., 2018, Ecosystem respiration in coastal tidal flats can be modelled from air temperature, plant biomass and inundation regime, *Biogeosci. Discuss.*, 1-26.
- Zhang, S., Wang, L., Hu, J., Zhang, W., Fu, X., Le, Y., Jin, F., 2011, Organic carbon accumulation capability of the typical tidal wetland soils in Chongming Dongtan, China, *J. Environ. Sci.*, 23(1), 87-94.

-
- Full-time Researcher. Kyeong-Deok Park
Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University
godsla6593@nate.com
 - Ph.D. Dong-Hwan Kang
Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University
dhkang@pknu.ac.kr
 - Full-time Researcher. Yoon-Hwan So
Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University
lunaace@naver.com
 - Associate Researcher. Won-Gi Jo
Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea
girwg@korea.kr
 - Principal Researcher. Byung-Woo Kim
K-water Institute, Korea Water Resources Corporation
bwkim@kwater.or.kr