

ORIGINAL ARTICLE

## 드론 관측을 통한 순천만 갯벌과 갈대밭 상부 대기의 이산화탄소 농도 분포 연구

강동환 · 조원기 · 윤연수<sup>1)</sup> · 유훈선<sup>2)</sup> · 장선웅<sup>3)\*</sup> · 김동립<sup>4)</sup> · 박정환<sup>5)</sup> · 송영철<sup>6)</sup> · 최용재<sup>7)</sup>

부경대학교 지질환경연구소, <sup>1)</sup>상지지오테크, <sup>2)</sup>(주)이산친환경연구원, <sup>3)</sup>(주)아이랩기술개발, <sup>4)</sup>대운초등학교, <sup>5)</sup>서창초등학교, <sup>6)</sup>성산초등학교, <sup>7)</sup>가남초등학교

### Research for Carbon Dioxide Fluctuation using Drone above the Mud Flat and Reed Beds in the Suncheon Bay

Dong-hwan Kang, Won Gi Jo, Yeon Su Yun<sup>1)</sup>, Hun Sun Yu<sup>2)</sup>, Seon Woong Jang<sup>3)\*</sup>, Dong Lib Kim<sup>4)</sup>, Jeong Hwan Park<sup>5)</sup>, Young Chul Song<sup>6)</sup>, Yong Jae Choi<sup>7)</sup>

*Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan 48547, Korea*

<sup>1)</sup>*Sangjigeotec Co., Ltd., Busan 48058, Korea*

<sup>2)</sup>*e-San Eco-friendly Lab Co., Ltd., Damyang 57309, Korea*

<sup>3)</sup>*Iremtech. Co. Ltd., Busan 46097, Korea*

<sup>4)</sup>*Daeun Elementary School, Yangsan 50525, Korea*

<sup>5)</sup>*Seochang Elementary School, Yangsan 50528, Korea*

<sup>6)</sup>*Sungsan Elementary School, Yangsan 50607, Korea*

<sup>7)</sup>*Ganam Elementary School, Yangsan 50658, Korea*

#### Abstract

In this study, carbon dioxide concentration and air temperature at different elevations were observed and analyzed in the upper atmosphere of mud flat and reed beds at low tide in Suncheon Bay. The carbon dioxide concentration and air temperature sensors were mounted on the drone, and the carbon dioxide concentration and air temperature by altitude (5 m, 10 m, 20 m, 40 m) at five points in the tidal flat and reed beds were observed in the morning and afternoon. The carbon dioxide concentrations in the upper atmosphere of the tidal flat ranged from 453.0 to 460.2 ppm in the morning and 441.6 to 449.7 ppm in the afternoon. The carbon dioxide concentrations in the upper atmosphere of the reed beds ranged from 448.9 to 452.4 ppm in the morning and 446.0 to 454.4 ppm in the afternoon. The carbon dioxide concentrations in the upper atmosphere of the tidal flat was higher in the morning than in the afternoon, and the carbon dioxide concentration decreased as the altitude increased. The carbon dioxide concentration in the upper atmosphere of the reed beds was similar in the morning and afternoon at all altitudes, and the carbon dioxide concentration decreased as the altitude increased. The correlation coefficient between carbon dioxide concentration and air temperature observed in the tidal flat in the morning was  $-0.54 \sim -0.77$ , and the correlation coefficient between carbon dioxide concentration and air temperature observed in the afternoon was  $0.56 \sim 0.80$ .

Received 24 March, 2020; Revised 3 June, 2020;

Accepted 3 June, 2020

\*Corresponding author: Seon Woong Jang, Iremtech. Co. Ltd., Busan 46097, Korea

Phone : +82-51-723-3531

E-mail : bearsd@naver.com

© 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.

The correlation coefficient between carbon dioxide concentration and temperature observed in the morning in the reed field was low, below 0.3, and the correlation coefficient between carbon dioxide concentration and air temperature observed in the afternoon was 0.35 ~ 0.77. In the upper atmosphere of the tidal flats and reed beds, the linear function was suitable for the change of carbon dioxide concentration as a temperature, and the coefficient of determination of the estimated linear function was higher in the afternoon than in the morning. Through this study, it was confirmed that the carbon dioxide concentration in the upper atmosphere of the tidal flat and the reed beds was different, and the increase rate of carbon dioxide concentration in the upper atmosphere of the tidal flat and the reed beds was higher in the afternoon than in the morning.

**Key words** : Suncheon Bay, Mud flat, Reed beds, Drone, Carbon dioxide, Air temperature

## 1. 서론

전지구적 기후변화와 인간의 활동으로 인해 대기 중 이산화탄소가 증가하여 지구온난화가 진행되고 있다. 해양과 연안습지는 대기 중 이산화탄소를 흡수하여 저장하는 능력이 매우 높은 것으로 보고되었다(IPCC, 2001). 갯벌에서는 염생식물과 식물플랑크톤의 활동을 통해 대기 중 이산화탄소를 흡수하고(Guarini et al., 1997; Zhou et al., 2009), 또한 갯벌 생물의 호흡과 미생물에 의한 토양유기탄소의 분해로 이산화탄소를 대기로 배출하기도 한다(Brevik and Homburg, 2004; Guo et al., 2009; Zhang et al., 2011). 지구온난화로 인해 증가하는 대기의 이산화탄소를 저감할 수 있는 방안을 마련하기 위해서는 연안습지에서 갯벌과 대기 사이의 이산화탄소 교환 연구가 필요하다.

국내에서는 2000년대 이후부터 서해안과 남해안 갯벌의 표층에서 이산화탄소 농도와 플럭스 관측이 수행되었다(Kim, 2007; Kang et al., 2008; Kang et al., 2010; Kang et al., 2011; Kang et al., 2014; So et al., 2019). Kim(2007)은 금강 하구 지역의 하구언 주변 갯벌과 습지로부터 온실기체(메탄, 이산화탄소, 아산화질소)의 배출량과 플럭스(Flux)를 폐쇄형 챔버법(Enclosure chamber technique)으로 관측하고, 온실기체의 플럭스와 토양의 물리화학적 성질의 상관성을 분석하였다. Kang et al.(2008)은 고흥만에서 간척사업에 의해 형성된 인공습지에서 퇴적물의 유기탄소량과 대기 중 이산화탄소량을 관측하여 봄과 여름에 토양유기탄소와 이산화탄소 농도의 변동 특성을 연구하였다. Kang et al.(2010)은 순천만의 해동면 농주리 일대의 복합적인 연안생태계(갯벌, 논, 산림)에서 토양의 이화학적 성질과 이산화탄소 플럭스의 상관성을 분석하였다. Kang et al.(2011)은

순천만의 갯벌, 논, 산림 지역에서 지표와 대기 사이의 이산화탄소 플럭스와 영향인자들을 관측하여 계절 및 공간적인 변동을 분석하고 토양의 이화학적 성질과 이산화탄소 플럭스의 상관성을 파악하였다. Kang et al.(2014)은 순천만 갯벌에서 여름철 일몰 전후 이산화탄소 농도와 기온을 연속적으로 관측하여 갯벌에서 기온과 이산화탄소 농도의 상관성을 분석하고, 일몰 전후 갯벌의 광합성 활동과 증산에 의한 갯벌 표층 대기의 이산화탄소 변동 특성을 구명하였다. So et al.(2019)은 함평만 무안 갯벌에서 갈대가 서식하는 식생 지역과 갯벌로 구성된 비식생 지역에서 봄, 여름, 겨울에 이산화탄소 농도와 플럭스를 관측하였으며, 식생과 비식생 지역에서의 이산화탄소 농도와 플럭스의 계절 변동을 비교하고 이러한 변동에 영향을 미치는 요인을 구명하였다. 국내에서 수행된 갯벌과 대기 사이의 이산화탄소 플럭스 관측은 폐쇄형 역학 챔버(Closed dynamic chamber)를 이용하였으며, 이러한 연구의 결과들은 갯벌 표층에서 수십 cm 정도의 공간에서 교환되는 이산화탄소의 수직적인 변화만을 파악할 수 있었다. 향후에는 갯벌 표층에서부터 상부 수십 m 높이의 이산화탄소 농도를 관측하여 수 km<sup>2</sup> 규모의 갯벌에서 갯벌과 대기 사이 이산화탄소 농도의 수직적인 변화를 분석할 필요가 있다.

국내에서 드론을 활용하여 연안습지의 염생식물 탐지 및 대기 중 이산화탄소 측정 관련 연구는 최근에 몇몇 연구자에 의해 수행되었다(Kim et al., 2016; Kim et al., 2017; Lee et al., 2017; Kim et al., 2018; Kim et al., 2019). Kim et al.(2019)은 조간대(Tidal flat)에서 썰물 시기에 드론을 활용하여 잘피 서식지의 RGB, 다중분광, 초분광 영상을 취득하고 잘피의 위치자료를 활용하여 잘피의 분광반사자료를 산출하였으며, 산출된 자료와 알고리즘(SAM, MF, BE)을 활용하여 잘피 탐지의 적정성을

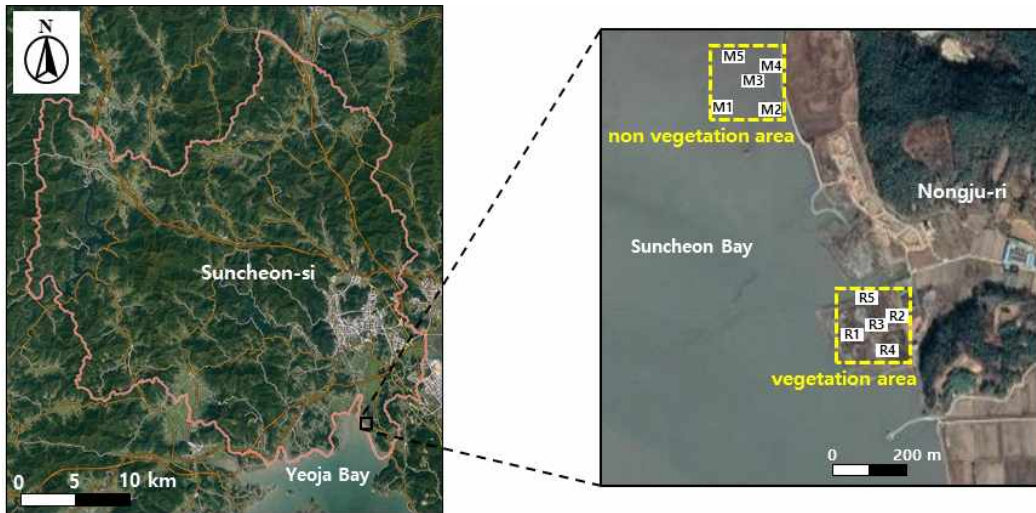


Fig. 1. Research area and drone monitoring points.

분석하였다. Kim(2018)는 드론을 이용한 대기환경정보(기온, 습도, 미세먼지, 이산화탄소)를 수집할 수 있는 장치를 개발하여 지표에서 1 km 높이까지 측정하였으며 다양한 산업에서의 활용 가능성을 제시하였다. Kim and Park(2015)는 드론을 이용한 이동식 다항목(미세먼지, 이산화탄소, 이산화황, 일산화탄소, 이산화질소, 오존, 방사능, 기온, 습도) 공기질 측정 장치를 개발하여 사람의 접근이 어려운 높은 건물이나 굴뚝의 대기질을 정확하고 신속하게 측정하고 휴대폰의 어플리케이션과 실시간으로 연계하는 무인관측 시스템을 개발하였다. Lee et al.(2017)은 위치 정보(GPS)를 장착한 드론을 이용하여 갯벌 퇴적물을 채취하는 장치를 개발하였으며, 개발된 장치는 자유낙하하면서 갯벌의 표층 퇴적물에 박히면서 시료를 채취하는 방식으로 갯벌에서 시료 채취의 안정성과 정확성을 향상시켰다. Kim et al.(2017)은 드론 항공의 초분광영상을 이용하여 염생식물의 분포를 분석하여 데이터베이스화하여 갯벌에서 염생식물의 분류 시스템을 개발하였다. 국외에서 드론을 활용한 연안습지 관련 연구는 2000년도 이후에 수행되고 있으며, Klemas(2015)는 드론(UAV)을 이용한 연안습지의 지형 탐사와 다양한 환경 조사(홍수, 산불, 기름 유출 등)에 관한 내용을 정리하였다. Boon and Tesfamichael(2006)은 저고도 비행 드론의 다중분광센서를 이용한 습지 식생의 완전한(Integrity) 분포 영상을 구현하고자 하였다. Duffy

et al.(2018)은 고해상도(~4 mm/pixel) 광학 센서가 장착된 무게 7 kg 이하의 경량(Lightweight) 드론을 이용하여 조간대의 해초지(Seagrass meadows)에 대한 공간적인 분포를 연구하였다.

기존에 국내에서 수행된 드론 관련 연구 사례들은 대기 중 이산화탄소 측정, 퇴적물 채취, 염생식물 탐지 및 분류 등이 수행되었으며, 갯벌과 식생 지역에서 드론을 활용한 이산화탄소의 공간적인 분포를 연구한 사례는 없었다. 국외에서도 드론을 활용한 연안습지 관련 연구들은 주로 조간대에서 염생 식생의 종류와 분포 특성을 파악하는 것이었으며, 연안습지에서 갯벌과 식생 지역에서 이산화탄소의 분포 및 특성을 연구한 바는 없는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 2019년 3월 26~27일 동안 순천만 갯벌(Mud flat) 및 갈대밭(Reed beds) 지역에서 썰물 시에 드론을 활용하여 이산화탄소 농도와 기온을 관측하였으며, 연안습지에서 이산화탄소 농도의 공간(수평/수직) 분포를 분석하였다.

## 2. 재료 및 방법

순천만에서 드론을 활용한 이산화탄소 농도와 기온 관측은 갯벌과 갈대밭 지역에서 동일한 방법으로 수행하였으며, 갯벌과 갈대밭 지역의 관측 규모는 각각

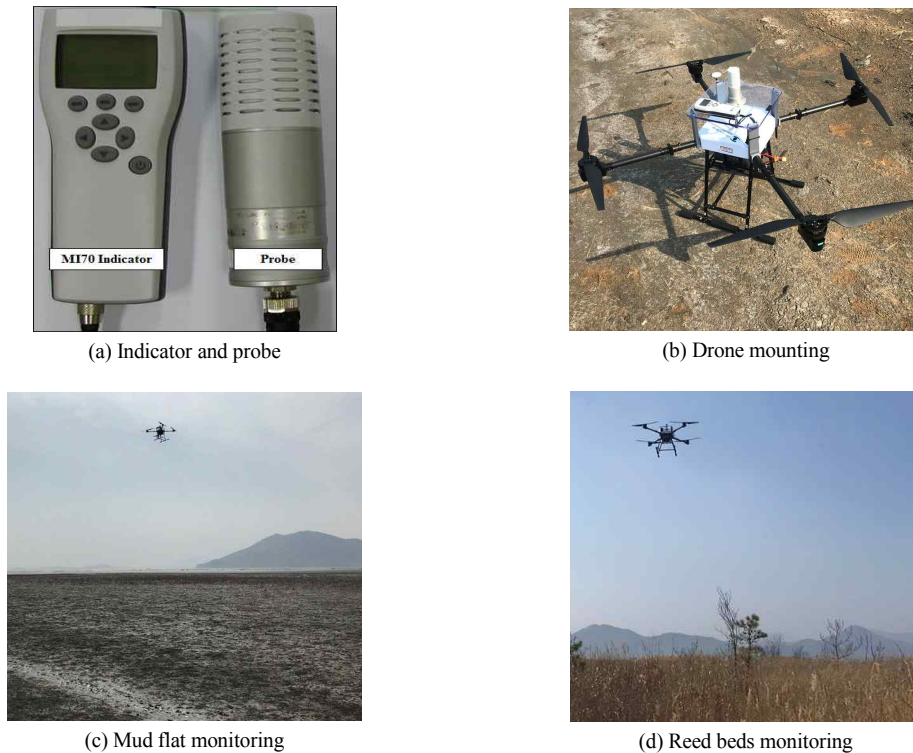


Fig. 2. Carbon dioxide monitoring used drone at mud flat and reed beds in the Suncheon Bay.

200×200 m 정도이었다(Fig. 1). 수직 관측은 수평 관측 지점에서 동일한 조건으로 반복 관측하였으며, 갯벌 표면과 갈대밭 캐노피의 상부 5 m, 10 m, 20 m, 40 m 지점에서 이산화탄소 농도와 기온을 측정하였다. 순천만 갯벌과 갈대밭 지역에서 각각 20개 지점씩 관측하였으며, 1개 지점의 관측 시간은 2분 정도이고 관측 자료는 5초 간격으로 관측 지점 당 24개 자료를 저장하였다. 이상의 조건으로 순천만 갯벌과 갈대밭에서 각각 오전과 오후에 동일한 조건으로 반복 측정하였으며, 금회 관측 시에 오전에는 썰물 시기(9~12시 정도)이고 오후에는 밀물 시기(13~16시 정도)에 해당하였다.

본 연구에서 연안습지의 대기 중 이산화탄소 농도와 기온은 GMP343 (VAISALA) 측정기를 이용하여 관측하였으며, GMP343은 기체 포집을 하지 않고 프로브(Probe)에서 공기를 흡입하여 비분산형 적외선 분석(Non-dispersive infrared, NDIR) 방법으로 이산화탄소 농도를 측정하고 MI70 indicator를 통해 실시간으로 저

장한다(Kang et al., 2014). 현장에서 드론의 상부에 GMP343을 탑재하고 이산화탄소 농도와 기온의 측정 간격을 5초로 세팅한 후 순천만 갯벌과 갈대밭 지역에서 드론 비행을 통해 대기 중 이산화탄소 농도와 기온을 측정하였으며, 드론 비행(1개 지역 당 약 30분 정도 소요)이 완료된 후에 MI70 indicator를 노트북에 연결하여 관측된 자료를 저장하였다(Fig. 2). 갯벌과 갈대밭 지역에서 이산화탄소 농도와 기온을 관측하기 위해 GMP343 측정기를 탑재한 드론은 쿼드콥터(Quadcopter) 형태로 효율성과 안정성이 높아 일반적으로 가장 널리 사용되고 있다. 드론의 크기는 대각선 길이가 1.2 m이고 자체중량은 12 kg으로 일반적인 드론보다 프레임과 프로펠러가 크고, 최대이륙중량이 48 kg으로 무거운 하중을 장착하고 이륙하기에 적합하다. 배터리는 현재 드론 배터리 중 가장 안정성이 뛰어난 리튬폴리머(LiPo) 22,000 mAh 2개를 사용하였으며 드론 탑재 장치를 제외한 기체의 총 비행시간은 약 40분 정도이다.

**Table 1.** Average and standard deviation of carbon dioxide concentration (ppm) on mud flat

Measured time (hr)	Measured height (m)	Measured point				
		M1	M2	M3	M4	M5
A.M.	5	460.2±0.9	458.9±0.6	456.9±1.2	456.2±1.6	455.0±0.9
	10	459.3±1.5	458.6±1.4	456.4±1.5	456.0±1.2	454.7±1.2
	20	459.2±0.7	457.8±1.2	455.8±1.6	454.2±1.1	453.0±1.5
	40	458.0±1.5	456.6±1.3	454.1±1.0	454.0±1.5	453.3±1.4
P.M.	5	449.7±1.5	445.3±1.8	444.5±0.6	443.2±0.9	444.3±1.3
	10	448.5±1.5	444.8±1.4	444.6±1.5	443.6±1.2	443.4±1.2
	20	446.8±1.5	443.2±0.7	443.9±1.1	443.3±1.6	443.5±1.5
	40	446.4±1.4	441.6±1.3	442.9±1.3	442.6±1.3	444.4±1.1

**Table 2.** Average and standard deviation of carbon dioxide concentration (ppm) on reed beds

Measured time (hr)	Measured height (m)	Measured point				
		R1	R2	R3	R4	R5
A.M.	5	452.2±1.2	451.7±1.3	450.6±1.1	451.4±1.2	452.4±0.9
	10	452.0±1.6	450.8±1.1	451.9±1.1	450.1±1.3	451.3±0.9
	20	450.9±1.5	450.1±1.3	451.3±0.9	449.7±1.9	451.0±1.1
	40	450.6±1.6	450.3±1.4	451.7±1.1	449.2±0.6	448.9±1.5
P.M.	5	454.4±1.3	448.5±1.5	448.5±1.3	447.5±1.4	448.8±1.0
	10	453.8±1.0	448.1±1.4	448.1±1.3	447.2±0.9	448.1±1.2
	20	451.4±1.4	446.8±1.6	447.0±1.6	446.4±1.3	448.7±0.7
	40	449.3±1.6	446.9±1.1	446.0±1.1	446.4±1.5	448.5±1.0

순천만 갯벌과 갈대밭 지역의 20개 지점에서 관측된 이산화탄소 농도와 기온 자료 값에 대한 평균과 표준편차를 산정하고 상자수염그림(Box-whisker plots)을 작성하였으며, 또한 이산화탄소 농도와 기온의 관측 고도별 상관계수를 산정하고 20개 지점에서 산정된 이산화탄소 농도와 기온의 평균을 이용하여 기온에 대한 이산화탄소 농도의 회귀함수를 추정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 순천만 갯벌과 갈대밭에서 이산화탄소 농도의 수평/수직 분포

순천만 갯벌과 갈대밭에서 드론을 이용하여 갯벌 표면으로부터 높이(5 m, 10 m, 20 m, 40 m)에 따른 이산화탄소 농도를 관측하였으며, 5개 지점의 4개 높이에서 각각 18회 관측한 이산화탄소 농도의 평균과 표준편차는

Table 1과 2에 정리하였다. 갯벌에서 오전에 관측한 이산화탄소 농도의 평균은 453.0~460.2 ppm, 표준편차는 0.6~1.6 ppm 범위로 나타났다. 갯벌에서 오후에 관측한 이산화탄소 농도의 평균은 441.6~449.7 ppm, 표준편차는 0.6~1.8 ppm 범위로 나타났다. 갯벌에서는 이산화탄소 농도의 평균은 오전이 오후보다 10 ppm 이상 높았으며, 표준편차는 오전과 오후에 유사하게 나타났다. 광합성 활동이 일어나는 생태계에서 대기 중 이산화탄소 농도는 일출(Sunrise) 이후부터 일몰(Sunset) 이전까지 증가하고(So et al., 2017), 이러한 이유로 본 연구에서도 갯벌 상부 대기의 이산화탄소 농도는 오전이 오후보다 높았다. 갯벌에서 오전과 오후에 관측한 고도별 평균 이산화탄소 농도는 관측 고도 5 m에서 455.0~460.2 ppm 및 443.2~449.7 ppm, 관측 고도 10 m에서 454.7~459.3 ppm 및 443.4~448.5 ppm, 관측 고도 20 m에서 453.0~459.2 ppm 및 443.2~446.8 ppm, 관측 고도

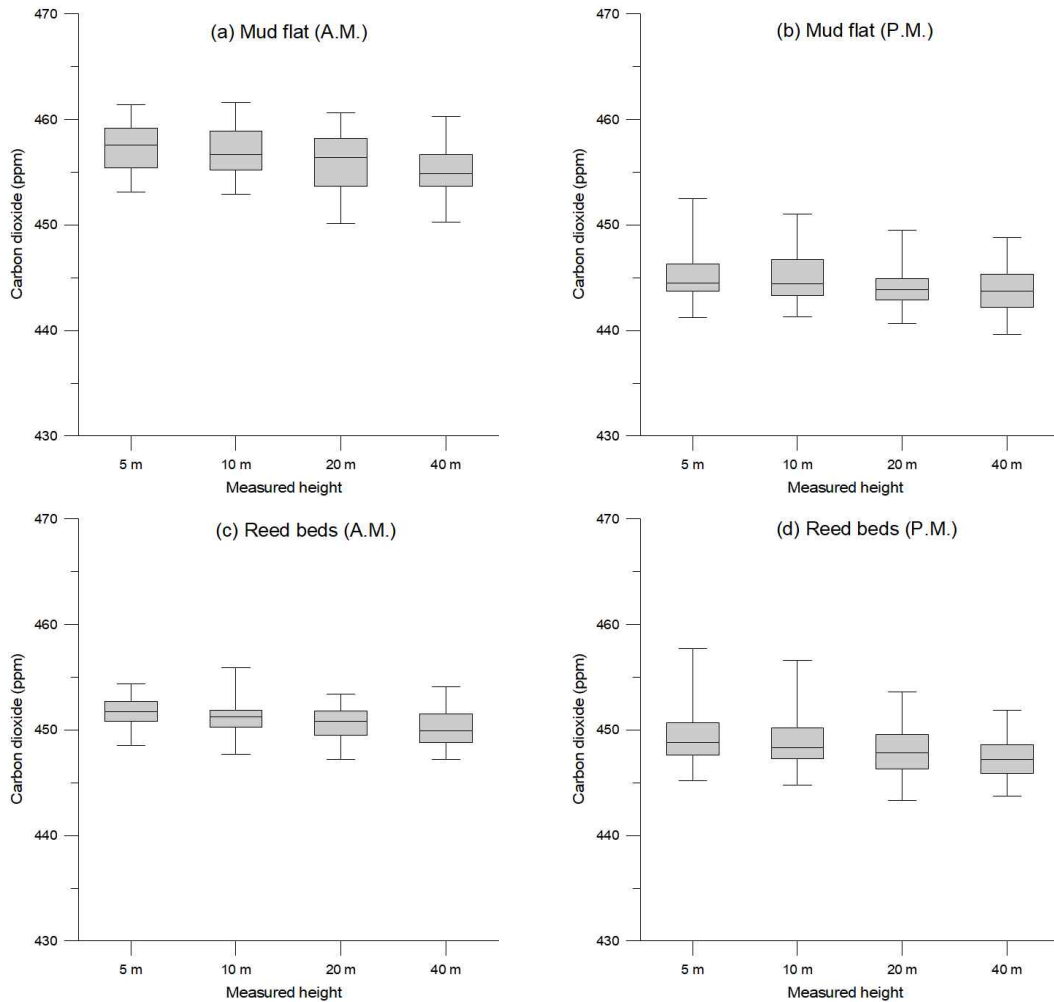


Fig. 3. Box-whisker plots for carbon dioxide concentration with height monitored A.M. and P.M. at mud flat and reed beds in the Suncheon Bay.

40 m에서 453.3~458.0 ppm 및 441.6~446.4 ppm 정도로 나타났다. 갯벌 상부 대기에서 이산화탄소 농도는 모든 관측 고도에서 오전이 오후보다 높았다.

갈대밭에서 오전에 관측한 이산화탄소 농도의 평균은 448.9~452.4 ppm, 표준편차는 0.6~1.9 ppm 범위로 나타났다. 갈대밭에서 오후에 관측한 이산화탄소 농도의 평균은 446.0~454.4 ppm, 표준편차는 0.7~1.6 ppm 정도로 나타났다. 갈대밭에서 관측한 이산화탄소 농도의 평균과 표준편차는 오전과 오후에 유사하게 나타났다. 갈대밭에서 오전과 오후에 관측한 고도별 평균 이산화탄

소 농도는 관측 고도 5 m에서 450.6~452.4 ppm 및 447.5~454.4 ppm, 관측 고도 10 m에서 450.1~452.0 ppm 및 447.2~453.8 ppm, 관측 고도 20 m에서 449.7~451.3 ppm 및 446.4~451.4 ppm, 관측 고도 40 m에서 448.9~451.7 ppm 및 446.0~449.3 ppm 정도로 나타났다. 갈대밭 상부 대기에서 이산화탄소 농도는 모든 고도에서 오전과 오후에 유사하게 나타났으며, 이산화탄소 농도의 범위는 오전보다 오후에 크게 나타나고 고도가 높아질수록 그 차이가 줄어들었다.

순천만 갯벌과 갈대밭에서 관측 높이와 시간에 따른

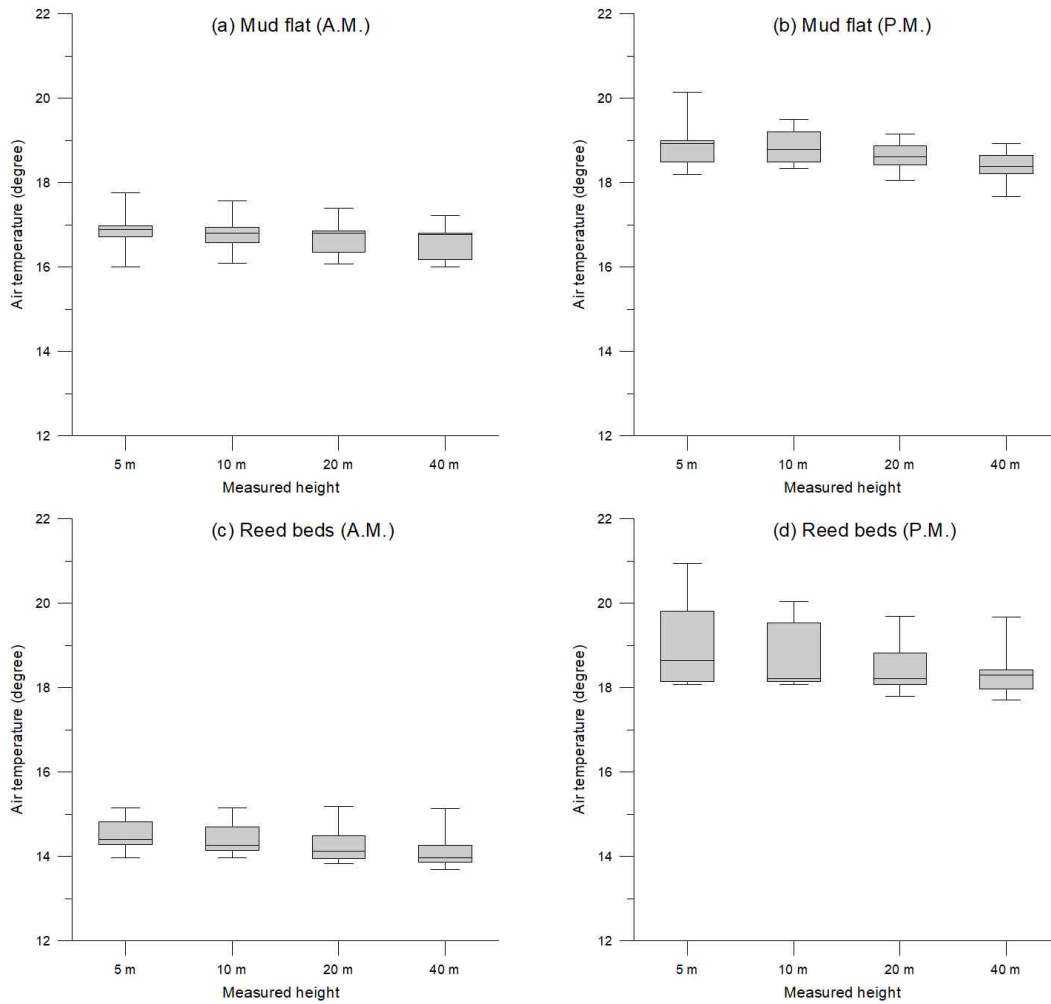


Fig. 4. Box-whisker plots for air temperature with height monitored A.M. and P.M. at mud flat and reed beds in the Suncheon Bay.

이산화탄소 농도의 변화 경향을 파악하기 위해 전체 자료를 이용하여 상자수염그림을 작성하였다(Fig. 3). 갯벌에서 이산화탄소 농도는 모든 관측 고도에서 오전이 오후보다 높았으며, 관측 고도가 높아질수록 이산화탄소 농도가 감소하는 경향을 보였다(Fig. 3의 (a)와 (b)). 갈대밭에서 이산화탄소 농도는 모든 관측 고도에서 오전과 오후에 유사하였으며, 관측 고도가 높아질수록 이산화탄소 농도가 감소하는 경향을 보였다(Fig. 3의 (c)와 (d)). 기존의 연구에서는 갯벌과 잔디밭에서 광합성 활동으로 인해 표층(캐노피)에서 상부 대기로 갈수록(수 m 규모)

이산화탄소 농도는 증가하였으며(Rasse et al., 2002; Kang et al., 2014; So et al., 2017), 본 연구에서는 갯벌과 갈대밭에서 관측 고도가 높아질수록 이산화탄소 농도가 감소하였다. 이는 수직적인 관측 범위의 차이로 인한 것으로 판단되며, 갯벌 표층에서 수 m 높이에서는 광합성에 의한 영향이 지배적이어서 고도가 높아질수록 이산화탄소 농도가 감소하지만 10 m 이상의 고도에서는 주변 대기에서 유입되는 이산화탄소의 혼합(Mixing) 효과로 인해 고도가 높아질수록 이산화탄소 농도가 감소한 것으로 판단된다.

**Table 3.** Correlation coefficients between air temperature and carbon dioxide concentration for same height at mud flat and reed beds in the Suncheon Bay

	5 m	10 m	20 m	40 m
M(am)	-0.54	-0.62	-0.77	-0.75
M(pm)	0.80	0.65	0.56	0.70
R(am)	0.07	0.19	0.23	-0.27
R(pm)	0.77	0.65	0.52	0.35

순천만 갯벌과 갈대밭에서 관측 높이와 시간에 따른 기온의 변화 경향을 파악하기 위해 전체 자료를 이용하여 상자수염그림을 작성하였다(Fig. 4). 갯벌과 갈대밭에서 기온은 오전보다 오후에 높았으며, 관측 고도가 높아질수록 기온은 감소하는 경향을 보였다. 갯벌 표면에 근접할수록 기온이 상승하는 이유는 태양 복사에너지가 갯벌 표면에서 흡수 혹은 반사되고, 또한 반사되는 지구 복사에너지에 의한 기온 상승효과도 갯벌 표면에서 더욱 높게 나타나기 때문이다(Kim, 2010; Kang et al., 2014). 오전과 오후의 기온 차는 갯벌보다 갈대밭 상부 대기에서 높았으며, 이는 공기(갈대밭)보다 토양(갯벌)의 열용량(Heat capacity)이 매우 높기 때문이다(Yoon, 2003; Kim, 2010).

### 3.2. 순천만 갯벌과 갈대밭에서 기온에 따른 이산화탄소 농도 변화

순천만 갯벌과 갈대밭에서 오전과 오후에 관측된 기온과 이산화탄소 농도 자료를 이용하여 4가지 경우(갯벌 오전, 갯벌 오후, 갈대밭 오전, 갈대밭 오후)의 고도별 상관계수를 산정하였다(Table 3). 갯벌에서 오전에 관측한 이산화탄소 농도와 기온의 상관계수는  $-0.54 \sim -0.77$  정도로서 높았으며, 모든 고도에서 음의 상관성을 보였다. 오전에는 갯벌 대기의 온도가 높아질수록 이산화탄소 농도는 감소하는 경향을 보였으며, 오전에는 기온이 상승하면서 갯벌 대기의 이산화탄소가 확산되고 또한 일출 이후에는 갯벌의 식물플랑크톤에 의한 광합성 활동이 시작되면서 이산화탄소 농도가 점점 낮아지기 때문이다(Pinckney and Zingmark, 1991; Guarini et al., 1997; Kang et al., 2014). 갯벌에서 오후에 관측한 이산화탄소 농도와 기온의 상관계수는  $0.56 \sim 0.80$ 으로 높았으며, 모든 고도에서 양의 상관성을 보였다. 오후에는 기온이 상승할수록 갯벌에 서식하는 생물의 호흡량이 증가하므로

갯벌 대기의 이산화탄소 농도가 증가하게 된다(Zhou et al., 2009; Kang et al., 2010; Kang et al., 2011; Kang et al., 2014). 갈대밭에서 오전에 관측한 이산화탄소 농도와 기온의 상관계수는 낮았으며, 오후에 관측한 이산화탄소 농도와 기온의 상관계수는  $0.35 \sim 0.77$  정도로 나타났다. 갈대밭에서 오후에 관측한 자료에서 산정한 상관계수는 고도가 높아질수록 낮아졌으며, 이는 관측 고도가 높아질수록 갈대밭 캐노피에서의 이격거리가 증가하므로 갈대밭의 광합성과 호흡에 의한 영향성이 감소하였기 때문이다. 갈대밭에서 오후에 관측한 이산화탄소 농도와 기온의 상관계수가 양의 상관성을 보인 것은 기온이 상승할수록 갈대밭에서 갈대의 뿌리 호흡에 의한 이산화탄소 방출량이 증가하였기 때문으로 판단된다(Zhang et al., 2011). 갈대밭에서는 오후에 기온이 상승하면서 광합성도 활발하게 발생하지만, 관측 시기 동안에는 갈대밭에서 호흡에 의한 이산화탄소 방출량이 광합성에 의한 이산화탄소 흡수량보다 많았던 것으로 판단된다.

순천만 갯벌과 갈대밭에서 오전과 오후에 관측된 기온과 이산화탄소 농도의 관측 지점별 평균을 이용하여 4가지 경우(갯벌 오전, 갯벌 오후, 갈대밭 오전, 갈대밭 오후)의 기온에 따른 이산화탄소 농도의 회귀함수를 추정하였다(Fig. 5). 갯벌에서 오전에 관측한 기온에 대한 이산화탄소 농도 함수는 기울기가 음인 선형함수로 추정되었으며, 결정계수는  $0.3589$ 이고 기울기는  $-2.8285$  정도이다(Fig. 5(a)). 갯벌에서 오후에 관측한 기온에 대한 이산화탄소 농도 함수는 기울기가 양인 선형함수로 추정되었으며, 결정계수는  $0.7215$ 로서 매우 높고 기울기는  $3.8159$  정도이다(Fig. 5(b)). 갈대밭에서 오전에 관측한 기온에 대한 이산화탄소 농도 함수는 기울기가 양인 선형함수로 추정되었으며, 결정계수는  $0.0526$ 으로서 낮고 기울기는  $0.4822$  정도이다(Fig. 5(c)). 갈대밭에서 오후에



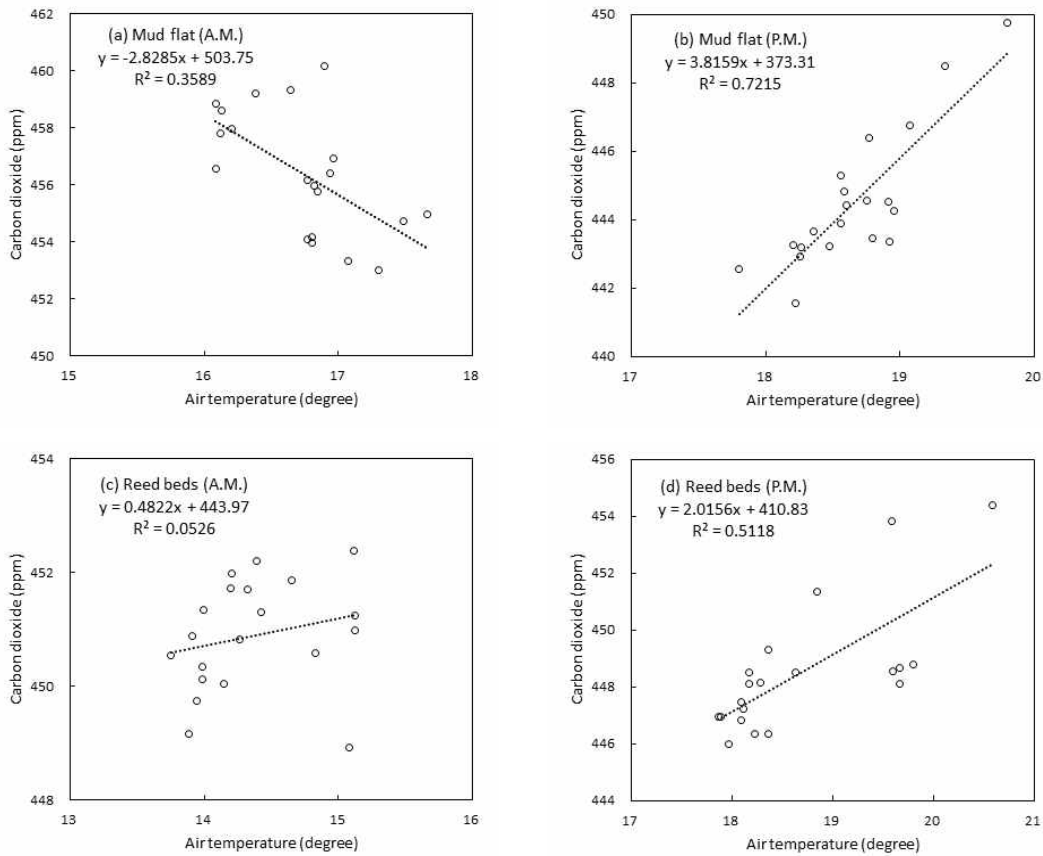


Fig. 5. Linear regression functions of carbon dioxide concentration as air temperature at mud flat and reed beds in the Suncheon Bay.

관측한 기온에 대한 이산화탄소 농도 함수는 기울기가 양인 선형함수로 추정되었으며, 결정계수는 0.5118로서 높고 기울기는 2.0156 정도이다(Fig. 5(d)). 갯벌과 갈대밭에서 기온에 대한 이산화탄소 농도 선형함수의 결정계수는 오전보다 오후에 관측한 자료에서 높았으며, 이는 오전보다는 오후에 더욱 가열된 지표에서 대기로 공기의 흐름이 원활하여 기온 상승에 따른 지표에서 대기로 이산화탄소의 전달 속도가 높아졌기 때문으로 판단된다. 갯벌과 갈대밭에서 오후에 관측한 자료에서 추정된 회귀 함수에 의하면, 본 관측 시기 동안에는 기온이 1°C 상승할 때 이산화탄소 농도는 갯벌에서 3.82 ppm 갈대밭에서 2.02 ppm 정도 증가하는 것으로 추정되었다(Fig. 5의 (b) and (d)).

#### 4. 결론

순천만 갯벌과 갈대밭에서 이산화탄소 농도의 수평/수직 분포 특성에 대한 연구를 수행하였으며, 본 연구를 통해 도출된 결과를 다음과 같이 요약하였다.

1. 순천만에서 드론을 이용하여 관측한 갯벌에서 이산화탄소 농도의 평균은 오전에 453.0~460.2 ppm, 오후에 441.6~449.7 ppm 정도로서 갯벌 상부 대기에서 이산화탄소 농도의 평균은 오전이 오후보다 10 ppm 이상 높았다. 갈대밭 상부 대기에서 관측한 이산화탄소 농도의 평균은 오전에 448.9~452.4 ppm, 오후에 446.0~454.4 ppm 정도로 나타났다.
2. 갯벌 상부 대기에서 이산화탄소 농도는 모든 관측

고도에서 오전이 오후보다 높았으며, 관측 고도가 높아 질수록 이산화탄소 농도가 감소하는 경향을 보였다. 갈대밭에서는 모든 관측 고도에서 이산화탄소 농도가 오전과 오후에 유사하였으며, 관측 고도가 높아질수록 이산화탄소 농도가 감소하였다.

3. 갯벌에서 오전에 관측한 고도별 이산화탄소 농도와 기온의 상관계수는  $-0.54 \sim -0.77$  정도로서, 기온이 높아질수록 이산화탄소 농도는 감소하였다. 갯벌에서 오후에 관측한 고도별 이산화탄소 농도와 기온의 상관계수는  $0.56 \sim 0.80$  정도로서, 오후에는 기온이 상승할수록 생물의 호흡량이 증가하여 갯벌 대기의 이산화탄소 농도가 증가한 것으로 판단된다.

4. 갈대밭에서 오전에 관측한 고도별 이산화탄소 농도와 기온의 상관계수는 0.3 이하로 낮았으며, 오후에는 상관계수가  $0.35 \sim 0.77$  정도로 나타났다. 오후에는 기온이 상승할수록 갈대밭에서 뿌리 호흡에 의한 이산화탄소 방출량이 광합성량보다 많았기 때문에 대기 중 이산화탄소 농도가 증가한 것으로 판단된다.

5. 갯벌에서 기온에 대한 이산화탄소 농도 함수 추정 결과, 오전에는 감소하는 선형함수이고 오후에는 증가하는 선형함수가 적합한 것으로 나타났다. 갈대밭에서 기온에 대한 이산화탄소 농도 함수 추정 결과, 오전과 오후 모두 증가하는 선형함수가 적합한 것으로 나타났다. 갯벌과 갈대밭에서 관측된 자료에서 추정된 선형함수의 결정계수는 오전보다 오후에 높았으며, 결정계수가 높았던 오후 관측 자료의 선형함수에서는 기온이  $1^\circ\text{C}$  상승하면 이산화탄소 농도는 갯벌 상부 대기에서는  $3.82 \text{ ppm}$ , 갈대밭 상부 대기에서는  $2.02 \text{ ppm}$  정도 증가하는 것으로 추정되었다.

6. 본 연구에서는 갯벌과 갈대밭에서 각각 1일 동안 오전과 오후에 드론을 이용하여 이산화탄소 농도 변화를 관측하였으나, 향후에는 연간 4회(봄, 여름, 가을, 겨울)에 걸쳐 3일 이상의 집중관측에 의한 갯벌과 갈대밭 상부 대기의 이산화탄소 농도의 계절별 특성 분석을 수행하고자 한다.

### 감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2020R11

1A1A01073860).

### REFERENCE

- Boon, M. A., Tesfamichael, S., 2006, Wetland vegetation integrity assessment with low altitude multispectral UAV imagery, Commission VI, WG VI/4.
- Brevik, E. C., Homburg, J. A., 2004, A 5000 year record of carbon sequestration from a coastal lagoon and wetland complex, Southern California, USA, *Catena*, 57, 221-232.
- Duffy, J. P., Pratt, L., Anderson, K., Land, P. E., Shutler, J. D., 2018, Spatial assessment of intertidal seagrass meadows using optical imaging systems and a lightweight drone, *Estuar., Coast. Shelf Sci.*, 200, 169-180.
- Guarini, J. M., Blanchard, G. F., Gros, Ph., Harrison, S. J., 1997, Modelling the mud surface temperature on intertidal flats to investigate the spatio-temporal dynamics of the benthic microalgal photosynthetic capacity, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 153, 25-36.
- Guo, H., Noormets, A., Zhao, B., Chen, J., Sun, G., Gu, Y., Li, B., Chen, J., 2009, Tidal effects on net ecosystem exchange of carbon in an estuarine wetland, *Agr. Forest Meteorol.*, 149, 1820-1828.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001, Third assessment report, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- Kang, D. H., Kim, S. S., Kwon, B. H., Kim, I. K., 2008, Observations of variations in soil organic carbon and carbon dioxide in the constructed wetland at Goheung Bay, *J. Fish. Mar. Sci. Edu.*, 20, 58-67.
- Kang, D. H., Kwon, B. H., Kim, P. G., 2010, CO<sub>2</sub> respiration characteristics with physicochemical properties of soils at the coastal ecosystem in Suncheon Bay, *J. Environ. Sci.*, 19, 217-227.
- Kang, D. H., Kwon, B. H., Kim, P. S., 2014, Variation analysis of CO<sub>2</sub> concentrations at sunset before and after of summer season at the foreshore, *J. Environ. Sci. Intern.*, 23, 399-407.
- Kang, D. H., Kwon, B. H., Yu, H. S., Kim, P. S., Kim, G. H., 2011, Seasonal and spatial variations of CO<sub>2</sub> fluxes between surface and atmosphere in foreshore, paddy field and woods sites, *J. Environ. Sci. Intern.*, 20, 963-975.

- Kim, B. S., Hwang, S. D., 2017, Halophyte classification system through hyperspectral imaging technique, Patent, 10-1744662, 18.
- Kim, D. S., 2007, Greenhouse gas (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O) emissions from estuarine tidal and wetland and their characteristics, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 23, 225-241.
- Kim, H. J., Park, H. B., 2015, Mobile multi-atmosphere measuring device development and its measuring method using drone, Patent, 10-2015-0119379, 10.
- Kim, J. G., 2010, *The climate near the ground : 7nd edition*, Sigma Press, Seoul, 779.
- Kim, N. H., 2018, Development of atmospheric environment information collection system using drone, *Smart Media J.*, 7, 44-51.
- Kim, T. S., 2019, An Analysis on appropriateness of seagrass detection using images from a drone, Master's degree, University of Seoul, 62.
- Klemas, V. V., 2015, Coastal and environmental remote sensing from unmanned aerial vehicles: An overview, *J. Coastal Research*, 31, 1260-1267.
- Lee, J. H., Woo, H. J., Jung, G. S., 2017, Coastal sediment sampling device using drone, Patent, 10-1736496, 16.
- Pinckney, J., Zingmark, R. G., 1991, Effects of tidal stage and sun angle on intertidal benthic microalgal productivity, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 76, 81-89.
- Rasse, D. P., Stolaki, S., Peresta, G., Drake, B. G., 2002, Patterns of canopy-air CO<sub>2</sub> concentration in a brackish wetland: analysis of a decade of measurements and the simulated effects on the vegetation, *Agr. Forest Meteorol.*, 114, 59-73.
- So, Y. H., Kang, D. H., Kim, I. K., Kim, B. W., Yoon, H. J., Kim, S. H., Son, Y. S., Shin, J. H., Ahn, J. W., 2017, Vertical variations analysis of air temperature and CO<sub>2</sub> concentration in the grassplots, *J. Environ. Sci. Intern.*, 26, 147-157.
- So, Y. H., Kang, D. H., Kwon, B. H., Kim, P. S., 2019, Seasonal variations of CO<sub>2</sub> concentration and flux in vegetation and non-vegetation environments on the Muan tidal flat of Hampyong Bay, *J. Wetlands Research*, 21, 257-266.
- Yoon, I. H., 2003, *Introduction to Micrometeorology*, Sigma Press, Seoul, 428.
- Zhang, S., Wang, L., Hu, J., Zhang, W., Fu, X., Le, Y., Jin, F., 2011, Organic carbon accumulation capability of thw typical tidal wetland soils in Chongming Dongtan, China, *Jouranal of Environmental Sciences*, 23, 87-94.
- Zhou, L., Zhou, G., Jia, Q., 2009, Annual cycle of CO<sub>2</sub> exchange over a reed (*Phragmites australis*) wetland in Northeast China, *Aquatic Botany*, 91, 91-98.

- 
- Ph.D. Dong-hwan Kang  
Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University  
dhkang@pknu.ac.kr
  - Full-time Researcher. Won-Gi Jo  
Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University  
sgm999@naver.com
  - President. Yeon-Su Yun  
Sangjigeotec Co., Ltd.  
ysyoon1966@naver.com
  - Research Director. Hun-Sun Yu  
e-San Eco-friendly Lab Co., Ltd.  
yuhunsun75@gmail.com
  - President. Seon-Woong Jang  
Iremtech Co., Ltd.,  
bearsd@naver.com
  - Teacher. Dong-Lib Kim  
Daeun Elementary School  
reodf@daum.net
  - Teacher. Jeong-Hwan Park  
Seochang Elementary School  
asirl@naver.com
  - Teacher. Young-Chul Song  
Sungsan Elementary School  
syc74@hanmail.net
  - Teacher. Yong-Jae Choi  
Ganam Elementary School  
cyj0107@nate.com