

## 함평만 무안 지역 갯벌의 식생 및 비식생 환경에서 이산화탄소 농도와 플럭스의 계절 변동

소운환·강동환<sup>†</sup>·권병혁\*·김박사\*

부경대학교 환경연구소  
\*부경대학교 환경대기과학과

## Seasonal variations of CO<sub>2</sub> concentration and flux in vegetation and non-vegetation environments on the Muan tidal flat of Hampyeong Bay

Yoon Hwan So·Dong-hwan Kang<sup>†</sup>·Byung Hyuk Kwon\*·Park Sa Kim\*

*Environmental Research Institute, Pukyong National University, Korea*

*\*Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Korea*

(Received : 19 June 2019, Revised: 20 October 2019, Accepted: 20 October 2019)

### 요약

본 연구에서는 함평만에 속하는 무안 지역의 갯벌에서 갈대가 서식하는 식생 지역과 갈대가 없는 비식생 지역을 6개 지점씩 선정하여 저조시에 계절별로 이산화탄소 농도와 플럭스 및 지온의 변화를 관측하였다. 관측은 2012년 5월 30일(봄)과 8월 8일(여름), 2013년 1월 31일(겨울)에 각각 수행되었다. 관측 결과, 식생 지역의 이산화탄소 평균농도는 전체적으로 겨울에 가장 높았고 봄, 여름 순으로 나타났으며, 비식생 지역도 식생 지역과 같은 농도변화를 보였다. 식생 지역의 이산화탄소 플럭스는 봄과 여름에 모두 양(+)의 값으로 방출(emission)의 형태를 보이나, 겨울에는 반대로 흡수(uptake)하는 음(-)의 값으로 나타났다. 이산화탄소 플럭스의 평균값은 봄이 가장 높았으나 여름과 거의 유사하였고, 겨울은 낮은 음의 값으로 나타났다. 비식생 지역은 봄에 양의 값으로 방출의 형태를 보였고, 여름과 겨울에는 흡수하는 음의 값으로 나타났다. 평균값은 봄이 가장 높았고, 여름과 겨울의 차는 작게 나타났다. 연구지역 이산화탄소 플럭스의 계절적인 변화특성은 봄의 경우 식생과 비식생 지역 모두 호흡에 의한 방출이 우세하였으며, 여름은 식생 지역에서 방출이 우세하였고 비식생 지역은 식물플랑크톤의 광합성에 의한 흡수가 확인되었으나 매우 미미하였다. 겨울은 식생 지역에서 이산화탄소 플럭스의 변화가 거의 나타나지 않았으며, 비식생 지역은 흡수가 일부 확인되었으나 매우 미미하였다.

핵심용어 : 갯벌, 계절 변동, 이산화탄소 농도, 이산화탄소 플럭스

### Abstract

In this study, we selected 6 vegetation sites (reed community) and 6 non-vegetation sites (tidal flat) in the Muan tidal flat of Hampyeong Bay, and observed seasonal changes in carbon dioxide concentration, flux and soil temperature at low tide conditions. The study was conducted to identify the characteristics of seasonal changes in vegetation and non-vegetation areas through the data observed in May 30, August 8, 2012 and January 31, 2013. The average carbon dioxide concentration in the vegetation area was the highest in winter, followed by spring and summer, and the non-vegetation area showed the same concentration change as the vegetation area. The carbon dioxide flux in the vegetation area showed a positive (+) value in both spring and summer, but it was negative (-) in the winter. The average value of carbon dioxide flux was the highest in spring, but it was almost similar to summer, and winter was the lowest negative value. Non-vegetation areas showed positive emission in spring, and negative uptake in summer and winter; mean values were the highest in spring, and the difference between summer and winter was small. In summary of seasonal change characteristics of the research area, the emission of carbon dioxide was dominant in both areas in spring. In summer, carbon dioxide emission was dominant in the vegetation area, and the non-vegetation area was observed to uptake by photosynthesis of phytoplankton, but it was very small. In winter, changes in flux in both areas were very slight.

Key words : tidal flat, seasonal variation, carbon dioxide concentration, carbon dioxide flux

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
Environmental Research Institute, Pukyong national university, Korea  
E-mail: dhkang@pknu.ac.kr

## 1. 서 론

우리나라의 서해안과 남해안에 주로 분포하는 갯벌은 연안습지의 범주에 속하는 지역으로서, 육상환경과 해양환경이 서로 영향을 주며 교차하는 전이대이다. 갯벌과 같은 연안습지는 만조 시 해수의 영향을 직접 받으므로 전 지구적 기후변화로 야기되는 해수면 변동에 매우 민감하게 반응한다. 기후변화에 따른 해수면의 상승과 하강은 연안습지에 퇴적되는 퇴적물의 이화학적 성질을 변화시킬 뿐만 아니라 습지에 서식하는 동·식물상의 변화에도 영향을 미친다. 갯벌로 공급되는 퇴적물의 입도(grain size), 토양 유기탄소(soil organic carbon), 수소이온농도(pH), 산화환원전위(Eh), 염도(salinity) 등 이화학적 특성은 갯벌의 퇴적환경변화를 해석하는데 있어 필수적인 요소이다. 해수면의 상승 또는 하강에 의한 갯벌의 퇴적환경변화는 갯벌에 서식하는 동·식물상의 변화를 초래하여 갯벌에 저장될 수 있는 탄소의 양을 조절할 수 있으므로 연안습지 연구에 있어 매우 중요하다. 또한 연안습지는 산림이나 초지에 비해 면적은 좁으나 상대적으로 많은 양의 탄소를 저장하고 있으며, 자연적인 또는 인위적인 환경변화에 의해 습지 내에 저장되어 있던 탄소를 배출할 수 있기 때문에 연안습지에 대한 지속적인 관심과 연구는 매우 중요하다.

국내에서 이산화탄소, 아산화질소, 메탄 등을 비롯한 온실기체(GHG; green house gas)의 흡수와 방출을 대상으로 수행된 연구로는 Kim (2007), Kang et al. (2010), Kang et al. (2011), Kim and Na (2013), Lee et al. (2014) 등의 연구가 있다. 이 연구들은 토양호흡을 측정하는데 있어 가장 널리 이용되는 폐쇄형 정적 챔버법(closed static chamber)과 폐쇄형 역학 챔버법(closed dynamic chamber)을 이용하여 갯벌, 논, 산림환경 등에서 온실기체의 방출과 흡수를 측정하였다. 상기 연구 중에서 현장에서 가스를 포집한 후 포집된 가스를 직접 측정하거나 실험실로 옮겨 분석하는 폐쇄형 정적 챔버를 이용한 연구는 다음과 같다. Kim (2007)은 2006년 2월, 4월, 6월에 금강하구 연과 새만금 방조제 인근 갯벌에서 온실기체의 배출량을 측정하였으며, Kim and Na (2013)는 내륙습지와 인접한 갯벌에서의 온실기체 배출량의 변화를 비교 분석하였고, Lee et al. (2014)은 충남 태안 소근리 갯벌에서 3월, 6월, 8월에 메탄의 자연배출량을 측정하고 채취한 코어의 특성과 비교하여 계절에 따른 온실가스의 거동을 해석하였다. 폐쇄형 역학 챔버를 이용한 연구로는 Kang et al. (2010; 2011)의 연구가 있다. Kang et al. (2010; 2011)는 갯벌과 논 및 산림토양에서 이산화탄소 호흡율을 측정하고 각 토양의 이화학적 성질 분석을 통해 토양의 호흡율과 이화학적 성질 간의 함수적 관계를 산정하였고, 토양-대기 사이의 이산화탄소 플럭스와 영향인자 관측을 통해 계절/공간에 따른 불균질성을 비교 분석하였다. 폐쇄형 정적 챔버법은 기체 상태의 시료를 채취하기 위해 시료 채취용 주머니나 주사기 등 밀폐용기를 사용하므로 채취 과정이나 시료

채취 후 분석 전까지 주변 환경에 의한 오염이나 손실 등이 발생할 가능성이 있다. 폐쇄형 역학 챔버법은 현장에서 직접 챔버 내 기체의 시간에 따른 농도 변화로 플럭스를 측정하므로 시료 채취에 따른 오염이나 손실이 발생하지 않는 장점이 있으나, 측정시간(2~3분 내외)이 비교적 짧아 시간 규모에서 갯벌의 환경변화를 대표하는데 있어 부족함이 따를 수 있다. 두 가지 방법 모두 밀폐시킨 상태에서 정해진 시간 동안 내부의 기체 농도를 측정하므로 상승된 내부 기체에 의해 토양으로부터 대기로 확산이 저하되어 토양호흡이 과소평가됨이 지적된 바 있다(Suh et al., 2005). 국외에서는 미국, 일본, 중국 등을 비롯하여 바다와 인접하고 있는 많은 국가에서 연안습지의 탄소 저장과 방출에 대한 중요성을 인식하고 다양한 방법을 통해 연구를 수행하였으며, 현재도 많은 연구가 진행되고 있다. 연안습지에 속하는 갯벌(tidal flat), 염습지(salt marsh), 석호(lagoon), 연안 삼각주(coastal delta) 등의 환경에서 온실기체의 흡수와 방출과 관련된 대표적 연구로는 Hirota et al. (2007), Xu et al. (2014), Chen et al. (2015), Kelsey et al. (2016), Li et al. (2016) 등의 연구가 있다. Hirota et al. (2007)은 2003년 여름 나카우미 호수(Lake Nakaumi)의 모래 해안과 염습지에서 폐쇄형 정적 챔버법을 이용하여 이산화탄소와 메탄 및 아산화질소의 방출량을 측정하였으며, 이들 온실기체의 방출에 영향을 미치는 환경 인자를 조사하였다. Xu et al. (2014)은 2012년 9월부터 2013년 8월까지 다른 종류의 식생(갯끈풀, 나문재, 잔디)이 분포하는 중국 남동부 옌청(Yancheng) 연안 염습지에서 폐쇄형 정적 챔버를 이용한 이산화탄소와 메탄 및 아산화질소 플럭스의 계절 및 공간적 변동에 대한 연구를 수행하였다. Chen et al. (2015)은 2011년부터 2013년까지 황하강 삼각주의 습지에서 이산화탄소와 메탄 배출 플럭스의 계절별 변화 특성과 토지 이용 유형에 따른 변화 특성을 분석하였다. 그 외 Kelsey et al. (2016)은 알래스카 서부 유콘-커스코쿵(YK) 삼각주 중앙부에 위치한 습지지역에서 철재의 영향과 미세지형(micro-topography)에 따른 이산화탄소와 메탄 및 아산화질소 플럭스의 변화 및 기온, 습도, 식생특성 등의 물리적인 변화가 플럭스에 미치는 영향을 연구하였으며, Li et al. (2016)은 2006년 중국 북동부에 위치한 판진(Panjin) 갈대습지(reed wetland)에서 이산화탄소와 열 플럭스의 계절 및 갈대의 성장기와 비성장기에 따른 환경적 영향요인에 대한 연구를 수행하였다. 이 연구들은 연구목적이나 연구지역의 환경조건에 따라 폐쇄형 챔버를 이용하거나 현장에 관측타워를 설치하여 에디 공분산법(eddy-covariance method)을 이용한 관측을 수행하였다. 특히 관측타워를 이용한 Li et al. (2016)의 연구는 식생캐노피의 상부 바깥에 관측타워가 설치되어 식생의 광합성활동에 의한 이산화탄소의 흡수를 상대적으로 더 잘 반영하여 계절에 따른 이산화탄소의 변동양상이 챔버를 이용한 본 연구 및 국내·외 연구 결과와 상이한 결과가 확인되었다. 본 연구가 수행된 연안습지(갯벌)는 시간에 따라 조수의 영향을 받기 때문에 동

일한 환경 조건하에서 관측을 수행하기 위해서는 휴대가 간편하고, 이동에 용이하며, 측정 시간이 비교적 짧은 측정 방법이 필요하므로 폐쇄형 역학 챔버를 이용하여 연구를 수행하였다.

본 연구는 함평만 무안 갯벌의 갈대가 서식하는 식생 지역과 인접한 비식생 지역에서 각각 6개 지점을 선정하여 계절별로 저조(low-tide) 조건에서 폐쇄형 역학 챔버를 이용하여 이산화탄소 농도와 플럭스 및 지온의 변화를 관측하였다. 봄과 여름, 겨울에 각각 관측된 이산화탄소 농도와 플럭스 및 지온의 변화를 통해 계절에 따른 식생 지역과 비식생 지역의 이산화탄소 농도와 플럭스의 변화 특성을 비교 파악하여 이러한 변동에 영향을 미치는 요인을 규명하는데 목적이 있다.

## 2. 연구방법

### 2.1 연구 지역

연구가 수행된 무안 갯벌은 전국 최초로 지정된 갯벌 도립공원이며, 2008년 1월 랍사르 습지로 지정되었다. 연구 지역은 행정구역 상 전라남도 무안군 현경면에 속하며, 함평만의 입구부에서 남쪽인 내륙부로 만입된 육지와 인접한 지역에 위치하고 있다(Fig. 1). 무안 갯벌이 속한 함평만(함해만)의 입구는 좁고 안쪽이 넓은 전형적인 내만이며, 만의 길이는 약 17 km, 폭은 최대 약 1.8 km이며 만의 면적은

344 km<sup>2</sup>에 달한다.

무안 갯벌은 자연 침식된 토양과 사구의 영향으로 특수한 갯벌 지질을 이루고 있으며, 갯벌 가장자리에는 고도가 낮은 층적층과 수 m 높이의 해안절벽이 잘 발달되어 있다. 무안 갯벌은 모래와 펄 및 자갈 등으로 이루어져 있어 생물들에게 다양한 서식지를 제공하며, 얕은 수심과 복잡한 해안선, 조류의 영향으로 다양한 형태의 자연환경이 관찰된다. 무안 갯벌에 주로 분포하는 식물상으로는 갯잔디(*Zoysia sinica*), 칠면초(*Suaeda japonica*), 나문재(*Suaeda asparagoides*), 등이 있으며, 저서성 돌말류와 대형 저서동물 등이 확인된다(National Wetland Center, <http://www.wetland.go.kr>).

연구지역의 식생지역에 서식하는 갈대는 물이 흐르지 않는 정수역에 자라는 여러해살이 종의 풀로 벼과에 속하며, 염분에 강하여 우리나라의 갯벌과 같은 연안습지에 흔히 분포한다. 갈대는 가을이 지나 누렇게 변한 잎을 땅에 떨어뜨리지 않고 달고 있는 특징으로 인해 연구지역 내 지상생물량(above ground biomass)의 계절적인 변화에는 큰 영향을 미치지 않았다. 연구지역 갈대군락의 면적은 약 600 m<sup>2</sup>로 대규모 군락은 아니며, 갈대가 최대로 성장하였을 때 높이는 지상에서 약 2.0~2.5 m에 이른다. 관측 시 육안 상으로 판단된 갈대군락의 식생밀집도는 봄과 여름이 겨울에 비해 확연하게 높았으며, 군락의 높이는 계절에 따라 큰 차이는 보이지 않았으나 봄과 여름이 겨울에 비해 상대적으로 높았다.

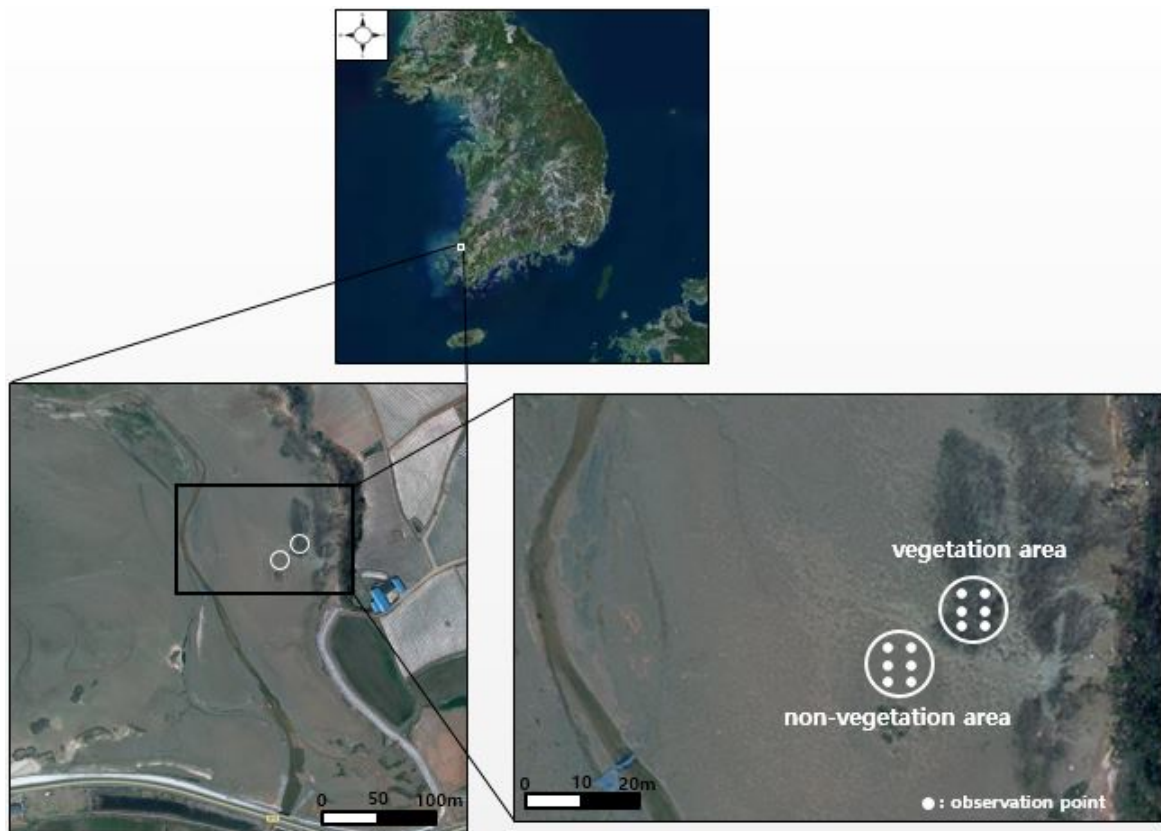


Fig. 1. Location maps of the Mu-an tidal flat, vegetation area and non-vegetation area.

2.2 연구 방법

본 연구에 사용된 갯벌과 대기 사이의 이산화탄소 플럭스를 측정하는 장비는 폐쇄형 역학 챔버 시스템(closed dynamic chamber system)으로, 본체(EGM-4, PP system USA)와 폐쇄형 챔버(SRC-1) 및 토양온도센서(STP-1)로 구성되어 있다(Fig. 2). 본체는 Environmental gas monitor (EGM-4, PP Systems)이며, 이산화탄소 측정을 위한 적외선가스분석기(infrared gas analyzer; IRGA)가 탑재되어 있다. 챔버는 Soil respiration chamber (SRC-1)로 폐쇄형 역학 챔버 시스템을 적용한 장비이며, 토양온도센서는 Soil temperature probe (STP-1)이고 토양의 표면에 probe를 꽂아 직접 측정한다. 이산화탄소의 측정은 적외선 기체 분석법을 이용하며, 마이크로프로세서의 제어를 통해 측정하므로 측정의 정확도가 높다. 또한, 주기적으로 자동 영점보정(auto-zeroing)을 수행하여 최적의 상태를 유지한다. 폐쇄형 역학 챔버법(closed dynamic chamber method)은 휴대가 간편하여 넓은 지역을 이동하면서 측정하는데 용이하고, 측정에 소요되는 시간이 짧아 이산화탄소 플럭스의 직접적인 관측에 있어서 가장 널리 이용되는 방법 중 하나이다(Luo and Zhou, 2006).

현장에서 챔버를 가동시켜 안정화(stabilization) 과정을 수행 후, 측정을 위해 토양 표면에 놓으면 토양에서 대기로 이산화탄소가 방출(emission) 되거나 대기에서 토양으로 이산화탄소가 흡수(uptake) 되면서, 챔버 내에서는 이산화탄소 농도의 변화가 발생한다. 시간 경과에 따른 챔버 내 이산화탄소 농도의 변화량을 측정하면, 식 (1)을 이용하여 이산화탄소 플럭스를 산정할 수 있다(Field et al., 1989).

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

여기서, F는 이산화탄소 플럭스[ML<sup>-2</sup>T<sup>-1</sup>], V는 챔버의 체적[L<sup>3</sup>], Δt는 이산화탄소 농도 측정 시간 간격[T], A는 챔버로 덮여 있는 토양의 표면적[L<sup>2</sup>], c<sub>i</sub>는 챔버 내 이산화탄소 초기 농도[ML<sup>-3</sup>] 및 c<sub>t</sub>는 Δt 시간 경과 후의 챔버 내 이산화탄소 농도[ML<sup>-3</sup>]이다.

다양한 종류의 식물상이 분포하는 무안 갯벌 중에서 현경면 815번 지방도 인근에 위치한 갈대가 서식하는 지역과 갈대가 서식하지 않는 인접 지역에서 2012년 5월 30일(이후 '봄'으로 표기), 8월 8일(이후 '여름'으로 표기), 2013년 1월 31일(이후 '겨울'로 표기)의 저조시에 각각 관측된 이산화탄소 농도와 플럭스 및 지온 자료를 바탕으로 식생 지역과 비식생 지역의 계절적인 변화특성을 파악하기 위해 연구를 수행하였다. 토양수분함량은 조수나 강우에 의해 영향을 받을 수 있으므로, 강우가 발생하지 않고 기상상황이 비교적 양호한 일자(5월 30일, 8월 8일, 1월 31일)의 저조시점을 선정하여 연구를 수행하였다.

연구지역인 무안 갯벌의 식생 지역과 비식생 지역에 대한 봄과 여름, 겨울의 현장 전경 및 식생 군락과 식생 군락 내

부에서 EGM-4를 이용하여 이산화탄소 플럭스 측정을 수행하는 사진을 Fig. 3에 나타내었다.

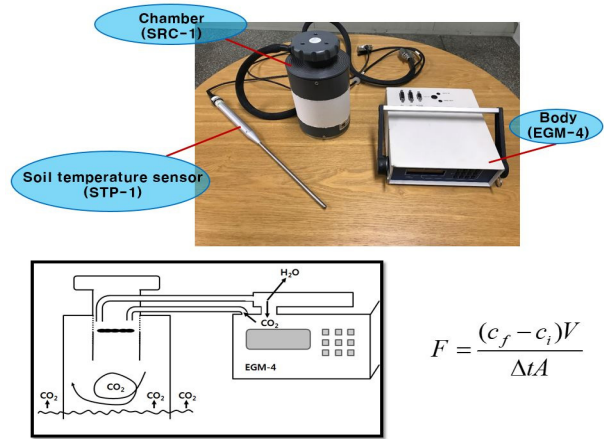


Fig. 2. Photographs of carbon dioxide flux observation equipments and internal structure diagram (Modified from Kim et al., 2014).

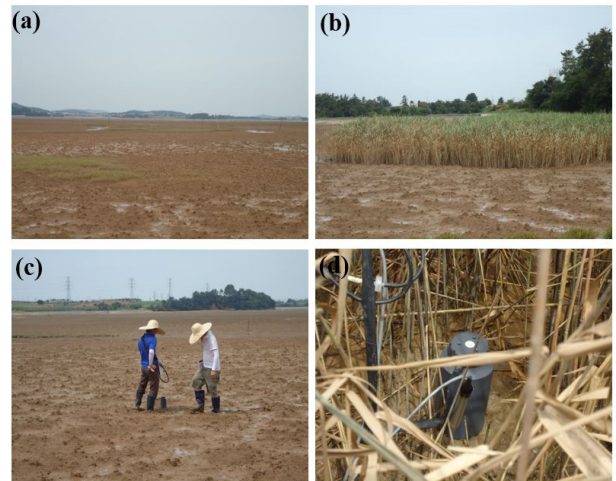


Fig. 3. Observation photographs of vegetation area and non-vegetation area in the Muan tidal flat. (a) non-vegetation area (tidal flat), (b) vegetation area (reed community), (c) CO<sub>2</sub> flux measurement of non-vegetation area, (d) CO<sub>2</sub> flux measurement of vegetation area.

3. 결과 및 고찰

3.1 무안 갯벌의 식생 및 비식생 지역에서 이산화탄소 플럭스 계절 변동

무안 갯벌의 갈대가 서식하는 식생 지역에서 6개 지점, 인접한 비식생 지역에서 6개 지점 씩 총 12개 지점에서 봄, 여름, 겨울에 관측된 이산화탄소 농도와 플럭스 및 지온 자료의 평균값과 최댓값 및 최솟값을 Table 1과 2에 정리하였다.

Table 1. Descriptive statistics quantities of soil temperature, carbon dioxide concentration and flux in vegetation area.

Season	Statistics	CO <sub>2</sub> concentration (ppm)	CO <sub>2</sub> Flux (mgCO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	Soil temperature (°C)
Spring (30, May, 2012)	Avg	421.48	0.26	22.28
	Min	402.00	0.02	20.80
	Max	463.83	0.82	24.23
Summer (8, August, 2012)	Avg	391.58	0.25	27.55
	Min	378.46	0.10	27.00
	Max	414.25	0.70	28.10
Winter (31, January, 2013)	Avg	413.65	-0.01	6.32
	Min	408.75	-0.05	5.80
	Max	422.58	0.03	6.90

Table 2. Descriptive statistics quantities of soil temperature, carbon dioxide concentration and flux in non vegetation area.

Season	Statistics	CO <sub>2</sub> concentration (ppm)	CO <sub>2</sub> Flux (mgCO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	Soil temperature (°C)
Spring (30, May, 2012)	Avg.	413.35	0.12	27.16
	Min	405.42	0.04	26.03
	Max	425.00	0.28	29.11
Summer (8, August, 2012)	Avg.	357.02	-0.05	30.49
	Min	351.21	-0.08	30.10
	Max	361.75	0.00	30.77
Winter (31, January, 2013)	Avg.	409.80	-0.06	7.55
	Min	405.04	-0.11	7.20
	Max	413.25	0.00	8.20

식생 지역에서 이산화탄소 플럭스는 봄과 여름에 모두 양(+)의 값으로 방출(emission)의 형태를 보이나, 겨울에는 반대로 흡수(uptake)하는 음(-)의 값으로 나타났다(Table 1). 이산화탄소 플럭스의 평균값은 봄이 가장 높았고, 겨울은 상대적으로 낮은 음의 값으로 나타났다. 최솟값은 겨울에 가장 낮았고 봄, 여름 순으로 나타났으며, 최댓값은 봄이 가장 높았고 여름, 겨울 순으로 나타났다. 이산화탄소 평균농도는 봄에 가장 높았고 겨울, 여름 순으로 나타났다. 최솟값은 여름에 가장 낮았으며 봄, 겨울 순으로 나타났고, 최댓값은 봄에 가장 높았으며 겨울, 여름 순으로 나타났다. 식생 지역에서 이산화탄소 농도의 최솟값 차는 여름과 겨울이 30.29 ppm이며, 최댓값의 차는 봄과 겨울이 41.25 ppm으로 나타났다.

비식생 지역의 이산화탄소 플럭스는 봄에 양의 값으로 방출의 형태를 보였고, 여름과 겨울에는 흡수하는 음의 값으로 나타났다. 이산화탄소 플럭스의 평균값은 봄이 0.12로 가장 높았고, 겨울과 여름 순이나 두 계절 간 평균값의 차는 0.01로 미미하게 나타났다. 최솟값은 겨울이 가장 낮았고 여름이 -0.08이며 봄은 0.04로 상대적으로 높게 나타났다. 최댓값은 봄이 0.28로 가장 높았고 여름, 겨울이 0.00으로 나타났다. 이산화탄소 평균농도는 식생 지역과 같이 봄에 가장 높았고 겨울, 여름 순으로 나타났다. 최솟값과 최댓값도 식생지역과 같은 양상으로 나타났다. 최솟값은 여름에 가장 낮았으며 봄, 겨울 순으로 나타났고, 최댓값은 봄에 가장 높았으며 겨울, 여름 순으로 나타났다. 비식생

지역에서 이산화탄소 농도의 최솟값 차는 여름과 겨울이 53.83 ppm으로 식생 지역에 비해 크게 나타났으며, 최댓값의 차는 봄과 겨울이 11.75 ppm으로 식생 지역에 비해 작게 나타났다. 계절변화에 따른 지온의 변화는 식생 지역과 비식생 지역 모두 유사한 양상으로 나타났다. 지온의 평균값, 최솟값, 최댓값은 모두 여름에 가장 크고 봄, 겨울 순으로 나타났다. 식생 지역과 비식생 지역 간 평균 지온의 차는 봄이 약 5° C 정도로 가장 크고, 여름이 약 2~3° C 정도이며 겨울이 약 1° C 정도로 나타났다. 모든 계절에서 식생 지역에 비해 비식생 지역에서 상대적으로 지온이 높았다.

무안 갯벌에서 식생 지역과 비식생 지역에 대한 계절별 이산화탄소 농도와 플럭스 및 지온의 변동을 Fig. 4~6에 나타내었다.

이산화탄소 플럭스는 식생 지역에서 봄에 가장 높은 방출(+)과 가장 낮은 분포범위를 보였고 여름과 겨울 순으로 나타났다. 특히 겨울은 일부 미미하게 흡수(-0.01 mgCO<sub>2</sub>m<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>~-0.05 mgCO<sub>2</sub>m<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>)를 보이기도 하나 대부분 시간 당 0.1 mg 이하의 낮은 이산화탄소 방출을 나타내었다(Fig. 5a). 비식생 지역의 이산화탄소 플럭스는 식생 지역과 같이 봄에 가장 높은 방출과 넓은 분포 범위를 보였으며, 상대적으로 겨울이 여름에 비해 더 높은 방출과 넓은 분포범위를 나타내었다(Fig. 5b). 여름과 겨울 모두 일부 미미하게 흡수를 보이기도 하나 전체적으로 시간 당 0.1 mg 이하의 낮은 이산화탄소 방출을 나타내었다. 이산화탄소 농도는 식생 지역과

비식생 지역이 유사한 분포양상을 보였다(Fig. 6). 두 지역 모두 여름에 이산화탄소 농도가 가장 낮았고 봄에 가장 높았으며, 변동 폭은 봄이 가장 넓게 나타났다. 여름의 이산화탄소 농도는 식생 지역에 비해 비식생 지역에서 더 낮았으며, 이산화탄소 농도의 분포 범위는 봄과 여름 모두 비식생 지역에 비해 식생 지역에서 더 넓게 나타났다. 지온은 두 지역 모두 여름에 가장 높고 겨울에 가장 낮았으며, 식생 지역에 비해 비식생 지역에서 더 높은 지온과 넓은 분포 범위를 나타내었다(Fig. 7). 갈대와 같은 식생 캐노피로 덮여있는 식생 지역과는 달리 비식생 지역은 태양복사에 의해 직접적으로 영향을 받기 때문에 모든 계절에서 상대적으로 더 높은 지온의 분포를 보이는 것이다(Yoon, 1999).

무안 갯벌보다 면적이 넓으며, 다양한 식생이 분포하는 옌청(Yancheng) 연안 염습지(coastal saline wetland)를 대상으로 수행된 Xu et al. (2014)의 연구에서는 식생이 자라는 갯벌은 여름이 겨울에 비해 3~5배 높은 이산화탄소 방출량을 보이고, 식생이 자라지 않는 갯벌은 계절변화와 관계없이 전체적으로 현저히 낮은 이산화탄소 방출량을 보였다. 본 연구 결과와 비교하면 무안 갯벌은 옌청(Yancheng) 연안염습지에 비해 이산화탄소 방출량은 현저히 낮게 확인되나, 겨울에 비해 봄과 여름에 상대적으로 높은 이산화탄소 방출량을 보이는 계절적인 경향성은 유사하게 나타났다. 식생 지역은 식생의 성장활동이 활발한 봄과 여름이 겨울에 비해 이산화탄소 방출량이 높고 변동 범위가 넓으며, 비식생

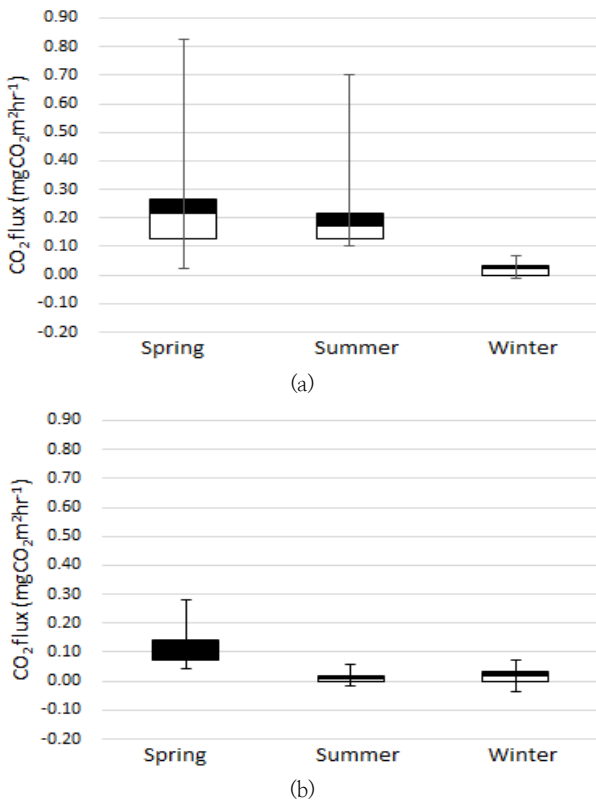


Fig. 4. Box-whisker plots of carbon dioxide flux in vegetation and non-vegetation area on the Muan tidal flat. (a) vegetation area, (b) non-vegetation area.

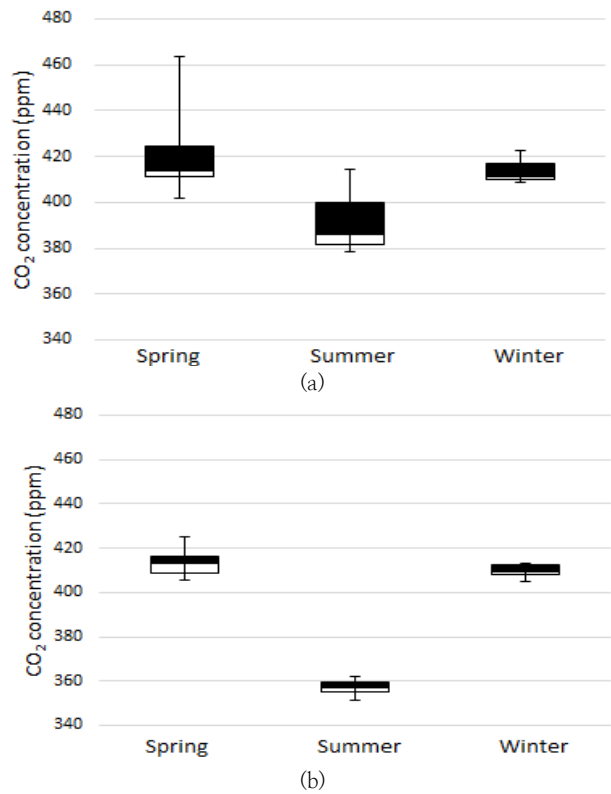


Fig. 5. Box-whisker plots of carbon dioxide concentrations in vegetation and non-vegetation area on the Muan tidal flat. (a) vegetation area, (b) non-vegetation area.

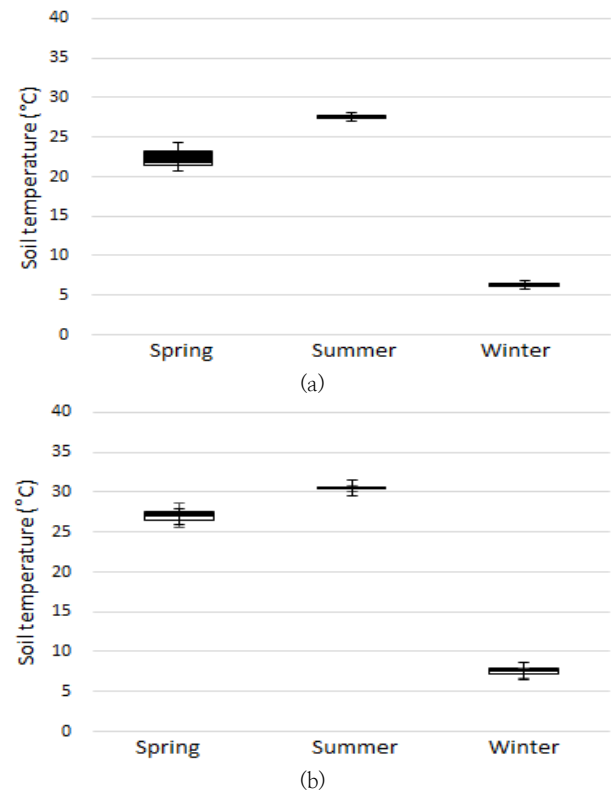


Fig. 6. Box-whisker plots of Soil temperature in vegetation and non-vegetation area on the Muan tidal flat. (a) vegetation area, (b) non-vegetation area.

지역은 상대적으로 이산화탄소 방출량이 낮고 변동 범위도 좁게 나타났다(Fig. 5a). 이산화탄소 최대방출량은 식생지역의 경우 봄에 가장 높았고 여름도 비교적 높게 나타났으며, 겨울은 방출량이 매우 미약하게 나타났다. 비식생 지역 역시 봄에 최대방출량을 보이며, 여름과 겨울은 광합성에 의한 흡수와 호흡으로 인한 방출이 일부 확인되나 정도는 매우 미약하였다(Fig. 5b). Xu et al. (2014)은 식생의 생장활동이 활발한 여름이 겨울에 비해 높은 이산화탄소 방출을 보이는 것은 기후적 요인(기온)과 지상 생물량(aboveground biomass)으로 해석하였다. 또한 이산화탄소 플럭스와 기온은 강한 양의 상관관계를 보이며, 식생이 활발하게 성장하는 여름의 높은 지상 생물량은 호흡활동을 하는 생물의 기질로 제공될 뿐 아니라 높은 기온은 분해활동을 활발히 하여 전체적인 탄소의 순환을 촉진한다고 보고하였다. 연구지역인 무안 갯벌은 갈대가 계절 변화에 따라 지상생물량(above-ground biomass)에 거의 영향을 주지 않는 특징으로 인해 확인한 차이는 보이지 않았으나, 계절에 따른 식생 지역과 비식생 지역의 이산화탄소 방출 경향은 동일하게 나타났다.

### 3.2 지온에 따른 이산화탄소 변동 분석

무안 갯벌의 식생 지역과 비식생 지역에 대한 계절별 이산화탄소 농도와 이산화탄소 플럭스, 이산화탄소 농도와 지온, 이산화탄소 플럭스와 지온에 대한 상관관계 분석을 수행하여 그 결과를 Table 3과 4에 나타내었다.

식생 지역에서 이산화탄소 농도와 플럭스의 관계는 양의 상관관계를 보이는 봄을 제외하고 여름, 겨울 모두 음의 상관관계를 보였으며, 특히 겨울에 -0.57로 가장 높은 상관계수를 나타내었다. 식생지역의 봄에 이산화탄소 농도와 플럭스의 관계가 양의 상관계수를 보이는 것은 갈대의 호흡활동과 갯벌에 서식하는 생물의 호흡활동으로 인해 지표 부근 이산화탄소 농도가 증가하면서 이산화탄소 플럭스가 방출(+) 조건으로 나타났기 때문이다. 여름과 겨울은 봄과 반대로 음의 상관계수를 보인다. 겨울은 이산화탄소 농도는 여름에 비해 높으나 낮은 지온에 의해 생물 활성도가 낮아서 이산화탄소 플럭스의 변화는 거의 일어나지 않아 음의 상관계수를 보이는 것으로 판단되며, 여름은 상관계수가 작아 상관성을 찾을 수 없었다. 이산화탄소 농도와 지온의 관계는 모든 계절에서 음의 상관관계를 보였으며, 특히 여름에 -0.66으로 가장 높은 음의 상관계수를 나타내었다. 봄과 여름에 이산화탄소 농도와 지온의 상관계수가 높게 나타나는 것은 갈대의 광합성 활동이 봄과 여름에 상대적으로 활발하여 지표 부근 이산화탄소 농도를 감소시킴으로 인해 지온은 높으나 이산화탄소 농도는 낮게 나타났기 때문이다(Kang et al., 2014). 이산화탄소 플럭스와 지온은 봄에 -0.97로 가장 높은 음의 상관관계를 보였으며, 여름과 겨울에는 낮은 양의 상관관계를 보였다. 온도가 증가하면 생물의 호흡활동 및 미생물의 분해활동이 활발해지면서 이산화탄소 농도가 증가하여 플럭스가 방출(+) 조건으로 나타나는 것이 일반적이다(Luo and Zhou, 2006), 본 연구에서는 지온이 높은 봄과 여름에 높은 음의 상

관관계를 보이거나 낮은 양의 상관관계로 나타났다. 이러한 결과는 저조 시 일시적인 관측방법과 상대적으로 적은 관측 횟수에 의해 연구지역의 시·공간적 대표성을 충분히 나타내기에 부족한 것으로 사료되며, 이후 연구에서 관측 횟수가 추가 되면 해석이 용이할 것으로 판단된다. 한편 본 연구와 환경조건이 유사한 갯벌에서 주요 온실기체의 방출량에 대해 연구한 논문(Kim and Na, 2013)에서는 온도 증가에 따라 온실가스 배출량의 변화가 나타나지 않은 사례가 보고된 바 있다.

비식생 지역에서 이산화탄소 농도와 플럭스의 관계는 봄과 겨울에 높은 양의 상관관계를 보였으며, 여름에는 낮은 음의 상관관계로 나타났다. 이산화탄소 농도와 플럭스가 봄과 겨울에 양의 상관계수를 보이는 것은 갯벌에 서식하는 생물의 호흡활동에 의해 지표 부근 이산화탄소 농도가 증가하면서 이산화탄소 플럭스가 방출(+) 조건으로 나타났기 때문이며, 여름은 이산화탄소 농도의 증가와 이산화탄소 플럭스의 증가 간 관계가 뚜렷하지 않았다. 이산화탄소 농도와 지온은 봄과 여름에 양의 상관관계를 보였으며, 겨울에는 음의 상관관계로 나타났다. 전체적으로 식생 지역에 비해 낮은 상관관계를 보이며 봄과 여름에 지온이 증가하면서 갯벌에 서식하는 생물의 호흡활동도 증가하여 지표 부근 대기의 이산화탄소 농도 증가가 나타난 것으로 판단된다. 겨울은 이산화탄소 농도와 지온 간의 관계가 뚜렷하지 않았다. 이산화탄소 플럭스와 지온은 봄과 여름, 겨울 모두 관계가 뚜렷하게 나타나지 않았다.

전체적으로 식생 지역이 비식생 지역에 비해 상대적으로 뚜렷하고 높은 양의 상관관계 또는 음의 상관관계를 나타내었으며, 이는 비식생 지역에 비해 식생 지역에서 광합성과 호흡활동에 의한 이산화탄소 농도와 플럭스의 증감 및 지온 간의 관계가 상대적으로 더 잘 반영되었음을 나타낸다.

Table 3. Correlation coefficients of soil temperature, carbon dioxide concentration and flux in vegetation area.

Season	CO <sub>2</sub> conc. - CO <sub>2</sub> flux	CO <sub>2</sub> conc. - Soil temp.	CO <sub>2</sub> flux - Soil temp.
Spring (30, May)	0.50	-0.56	-0.97
Summer (8, August)	-0.10	-0.66	0.13
Winter (31, January)	-0.57	-0.37	0.41

Table 4. Correlation coefficients of soil temperature, carbon dioxide concentration and flux in non vegetation area.

Season	CO <sub>2</sub> conc. - CO <sub>2</sub> flux	CO <sub>2</sub> conc. - Soil temp.	CO <sub>2</sub> flux - Soil temp.
Spring (30, May)	0.85	0.41	0.17
Summer (8, August)	-0.11	0.44	-0.14
Winter (31, January)	0.69	-0.36	0.12

지온에 대한 이산화탄소 플럭스의 회귀함수는 식생 지역의 봄에 뚜렷한 음의 관계를 보이는 것을 제외하고 상관성이 확인되지 않았다(Fig. 7). 식생 지역의 봄을 제외하고 모두 결정계수가 0.5보다 작으며, 식생 지역의 회귀함수 기울기가 상대적으로 비식생 지역에 비해 더 크게 나타났다. 일반적으로 지온이 증가하면 토양 내 미생물과 식생의 성장활동이 활발해지고 식생의 자가호흡이나 뿌리호흡 및 근권 미생물과 토양에 서식하는 생물의 호흡이 증가하게 되어 더 많은 이산화탄소의 방출이 일어나게 되나(Luo and Zhou, 2006), 전술한 바와 같이 본 연구 지역에서는 음의 지수함수를 보이는 식생 지역 봄의 경우를 제외하고 전체적으로 뚜렷한 관계가 확인되지 않았다. 식생 지역의 봄은 지온이 증가하면서 이산화탄소 플럭스가 감소하는 뚜렷한 음의 관계를 보인다. 이산화탄소 플럭스 증감에 영향을 미치는 요인은 온도, 토양 유기탄소, 토양 수분함량(soil moisture) 등이 있으며, 일반적으로 온도는 이산화탄소 플럭스와 양의 상관관계를 보이고 토양 수분함량은 공극을 채우고 있는 물이 과포화(>60%) 또는 미포화(60%) 시 토양 내 미생물의 활동이 규제되어 이산화탄소 플럭스와 음의 상관관계를 보인다(Luo and Zhou, 2006). 연구 지역은 토양 수분함량의 변화를 고려하지 않기 위해 모두 강우가 발생하지 않은 날의 저조시에 관측을 수행하였다. 또한 지온도 거의 동일한 시간에 측정하였으므로 온도와 토양 수분함량 외에 다른 요인의 영향으로 음의 관계를 보인 것으로 판단되나, 본 연구에서는 확인되지 않았다.

본 연구와 같은 이산화탄소 플럭스 측정방법을 적용한 Xu et al. (2014)의 연구에 따르면 기온과 이산화탄소 플럭스는 양의 관계를 보이는 지수함수로 나타났으며, 식생(갯끈풀, 나문재, 잔디)이 자라는 갯벌에서 기온이 증가함에 따라 이산화탄소 플럭스가 지수함수로 증가하는 경향이 뚜렷하게 잘 나타났다. 본 연구에서 도출된 결과가 Xu et al., (2014)의 연구결과(결정계수(R<sup>2</sup>)=0.68 이상의 온도와 이산화탄소 플럭스의 관계)와 다르게 나타난 것은 관측 샘플 수가 부족하여 식생 유무에 따른 특징과 연구지역의 대표성을 잘 나타내지 못한 것으로 판단되며, 이후 가을에 대한 관측 결과가

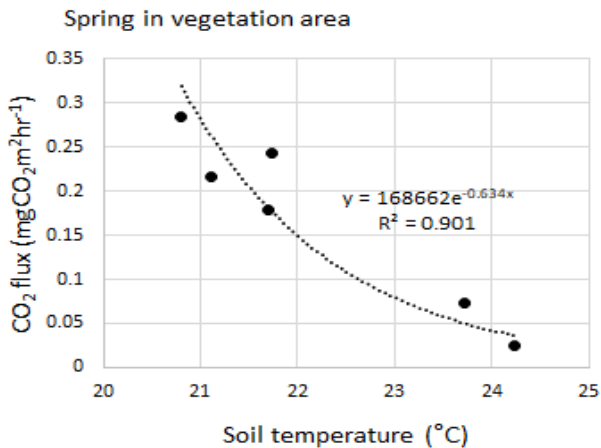


Fig. 7. Regression analysis graphs of carbon dioxide flux as a soil temperature on the Muan tidal flat.

추가되고 관측 샘플 수가 많아지면 계절변화에 따른 지온과 이산화탄소 플럭스 간의 관계를 보다 명확하게 해석하는 것이 용이할 것으로 판단된다.

지온에 대한 이산화탄소 농도의 회귀함수는 식생 지역의 경우 봄과 여름에서 상대적으로 뚜렷한 음의 관계를 지수함수로 나타냈다(Fig. 8). 지온이 높아짐에 따라 이산화탄소 농도는 낮아지며, 우리나라가 속한 북반구 지역의 여름에 낮고 겨울에 높은 대기 중 이산화탄소 농도 특성과 잘 일치한다(Lee et al., 2015). 비식생 지역은 봄과 여름에 지온이 증가함에 따라 이산화탄소 농도가 증가하였으며, 겨울에 비해 상대적으로 지온이 높은 봄과 여름에 갯벌에 서식하는 생물의 호흡으로 지표 부근 이산화탄소 농도가 증가하여 양의 관계를 보이는 것으로 판단되나 뚜렷하게 나타나지 않았다.

이산화탄소 농도에 대한 이산화탄소 플럭스의 회귀함수는 식생 지역의 경우 봄은 양의 관계를 가지는 지수함수로 나타났으며, 여름과 겨울은 약한 음의 관계를 가지는 선형함수로 나타났으며, 비식생 지역의 경우 봄과 겨울은 양의 관계를 가지는 지수함수와 선형함수로 나타났으며, 여름은 약한 음의 관계를 가지는 선형함수로 나타났다. 식생 지역과 비식생 지역의 봄에 기울기가 상대적으로 가장 크게 나타났다. 식생

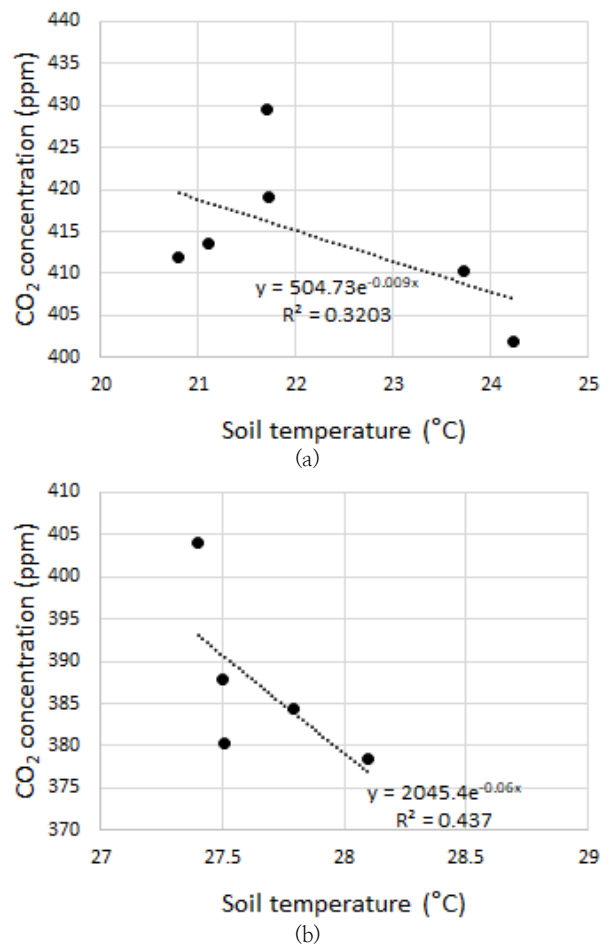


Fig. 8. Regression analysis graphs of carbon dioxide concentration as a soil temperature on the Muan tidal flat. (a) spring in vegetation area, (b) summer in vegetation area.



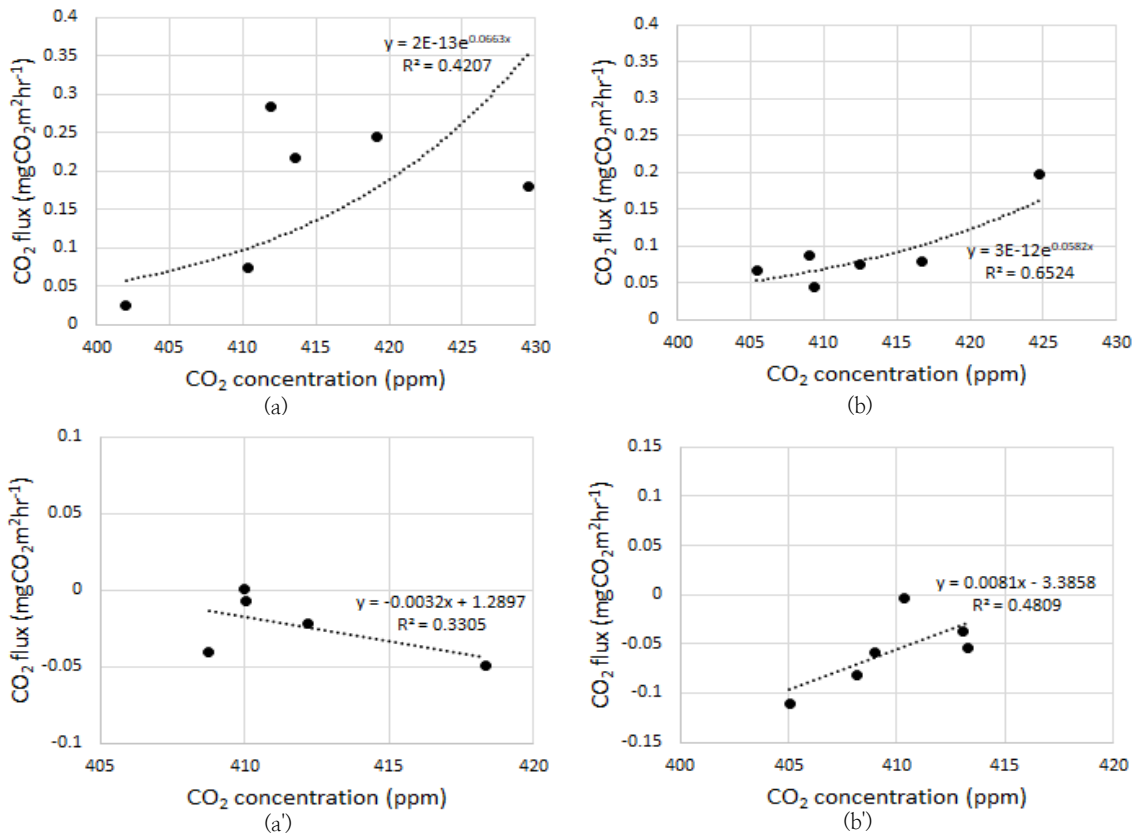


Fig. 9. Regression analysis graphs of carbon dioxide flux as a carbon dioxide concentration on the Muan tidal flat. (a) spring in vegetation area, (a') spring in non vegetation area, (b) winter in vegetation area, (b') winter in non vegetation area.

지역의 봄은 이산화탄소 농도가 증가하면서 이산화탄소 플럭스가 증가하며, 여름과 겨울은 반대로 이산화탄소 농도가 증가하면서 이산화탄소 플럭스가 감소하였다. 비식생 지역은 봄과 겨울에 이산화탄소 농도가 증가하면 이산화탄소 플럭스가 증가하며, 여름은 이산화탄소 농도가 증가하면 이산화탄소 플럭스가 감소하였으나 그 정도가 매우 약하게 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 2012년 봄(5월 30일), 여름(8월 8일), 2013년 겨울(1월 31일) 저조 시 무안 지역에서 갈대가 서식하는 갯벌과 인접하는 갈대가 서식하지 않는 갯벌에서 지온과 이산화탄소 농도 및 플럭스를 폐쇄형 역학 챔버를 이용하여 관측하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 봄은 식생 지역과 비식생 지역에서 호흡에 의한 이산화탄소의 방출이 우세하였고, 여름은 식생 지역에서만 이산화탄소의 방출이 우세하였다. 여름의 비식생 지역과 겨울의 식생 지역과 비식생 지역은 모두 호흡에 의한 이산화탄소의 방출과 광합성에 의한 이산화탄소의 흡수가 전체적으로 매우 미약하게 나타났다.

2) 식생 지역과 비식생 지역에서 봄과 여름(특히 봄)이 겨울에 비해 이산화탄소 플럭스가 높게 나타나는 것은 지온이 높은 봄과 여름에 활발한 갈대의 호흡활동 및 갯벌에서 서식

하는 생물의 호흡활동에 의해 지표 부근 이산화탄소 농도가 상승하면서 플럭스가 방출 조건(+)으로 나타났기 때문이다.

3) 식생 지역이 비식생 지역에 비해 상대적으로 뚜렷한 양의 상관관계 또는 음의 상관관계를 나타내었으며, 식생 지역이 비식생 지역에 비해 광합성과 호흡활동에 의한 이산화탄소 농도와 플럭스의 증감 및 지온 간의 관계가 상대적으로 더 잘 반영되었음을 나타낸다.

#### 사 사

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행되었습니다(NRF-2016R1A6A3A11932747).

#### References

Chen, QF, Ma, JJ, Zhao, CS. and Li, RB, (2015), The spatial and temporal variation characteristics of CH4 and CO2 emission flux under different land use types in the Yellow River delta wetland, *J. of Geoscience and Environment Protection*, 3, pp. 26-32. [DOI:<http://dx.doi.org/10.4236/gep.2015.36005>]  
 Field, CB, Ball, JT, Berry, JA, (1989), *Photosynthesis*,

- Principles And Field Techniques. In Plant Physiological Ecology, Field Methods And Instrumentation* (Percy, R. W., Ehleringer, J., Mooney, H. A., Rundel, P. W.), Chapman and Hall, New York, US, pp. 209–253.
- Hirota, M, Senga, Y, Seike, Y, Nohara, S, Kunii, H, (2007), Fluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide in two contrastive fringing zones of coastal lagoon, Lake Nakaumi, Japan, *Chemosphere*, 68, pp. 597–603. [doi:10.1016/j.chemosphere.2007.01.002]
- Inglett, KS, Inglett, PW, Reddy, KR, Osborne, TZ, (2012), Temperature sensitivity of greenhouse gas production in wetland soils of different vegetation, *Biogeochemistry*, 108, pp. 77–90. [DOI:10.1007/s10533-011-9573-3]
- Kim, DS, (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. of Korean Society for Atmospheric Environment(KOSAE)*, 23(2), pp. 225–241. [DOI:10.5572/KOSAE.2007.23.2.225] [Korean Literature]
- Kim, DS, Na, US, (2013), Characteristics of greenhouse gas emissions from freshwater wetland and tidal flat in Korea, *J. of Korean Society for Atmospheric Environment(KOSAE)*, 29(2), pp. 171–185. [DOI: http://dx.doi.org/10.5572/KOSAE.2013.29.2.171] [Korean Literature]
- Kang, DH, Kwon, BH, Kim, PG, (2010), CO<sub>2</sub> respiration characteristics with physicochemical properties of soils at the coastal ecosystem in Suncheon Bay, *J. Env. Sci. Int.*, 19(2), pp. 217–227. [DOI:10.1016/S1001-0742(07)60035-7] [Korean Literature]
- Kang, DH, Kwon, BH, Yu, HS, Kim, PS, Kim, GH, (2011), Seasonal and spatial variations of CO<sub>2</sub> fluxes between surface and atmosphere in foreshore, paddy field and woods sites, *J. Env. Sci. Int.*, 20(8), pp. 963–975. [DOI:http://dx.doi.org/10.5322/JES.2011.20.8.963] [Korean Literature]
- Kang, DH, Kwon, BH, Kim, PS, (2014), Variation Analysis of CO<sub>2</sub> concentrations at sunset before and after of summer season at the foreshore, *J. Env. Sci. Int.*, 23(3), pp. 399–407. [DOI:http://dx.doi.org/10.5322/JESI.2014.23.3.399] [Korean Literature]
- Kelsey, KC, Leffler, AJ, Beard, KH, Schmutz, JA, Choi, RT, and Welker, JM, (2016), Interactions among vegetation, climate, and herbivory control greenhouse gas fluxes in a subarctic coastal wetland, *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 121, pp. 2960–2975, [doi:10.1002/2016JG003546]
- Lee, EH, Lim, JH, Lee, JS, (2010), A review on soil respiration measurement and its application in Korea, *Korean J. of Agricultural and Forest Meteorology*, 12(4), pp. 264–276. [DOI:10.5532/KJAFM.2010.12.4.264] [Korean Literature]
- Lee, JH, Jeong, KS, Woo, HJ, Kang, J, Lee, DH, Jang, S, Kim, SR, (2014), Evaluation of basin-specific CH<sub>4</sub> emission flux from intertidal flat sediments of Sogeun-ri, Taean, mid-west Korea, *J. of Wetlands Research*, 16(2), pp. 281–291. [DOI:10.17663/JWR.2014.16.2.281] [Korean Literature]
- Lee, SH, Kim, J, Cho, HK, Goo, TY, Ou, ML, Lee, JH, Yokota, T, (2015), Comparison of atmospheric carbon dioxide concentration trend and accuracy from GOSAT and AIRS data over the Korean peninsula, *Korean J. of Remote Sensing*, 31(6), pp. 549–560. [DOI:http://dx.doi.org/10.7780/kjrs.2015.31.6.5] [Korean Literature]
- Li, X., Jia, Q, Liu, J, (2016), Seasonal variations in heat and carbon dioxide fluxes observed over a reed wetland in northeast China, *Atmospheric Environment*, 127, pp. 6–13. [DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.11.058]
- Luo, Y, Zhou, X, (2006), *Soil Respiration And The Environment*, ELSEVIER, 305pp.
- National Institute of Environmental Research, National Wetland Center, <http://www.wetland.go.kr>
- Suh, SU, Min, YK, Lee, JS, (2005), Seasonal variation of contribution of leaf-litter decomposition rate in soil respiration in temperate deciduous forest, *Korean J. of Agricultural and Forest Meteorology*, 7(1), pp. 57–66. [DOI:http://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200516610519542.page] [Korean Literature]
- Yoon, JI, (1999), *Agrometeorology*, ARCHE PUBLISHING HOUSE, 338pp. [Korean Literature]
- Xu, X, Zou, X, Cao, L, Zhamangulova, N, Zhao, Y, Tang, D, Liu, D, (2014), Seasonal and spatial dynamics of greenhouse gas emissions under various vegetation covers in a coastal saline wetland in southeast China, *Ecological Engineering*, 73, pp. 469–477. [DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.087]

#### 〈저자소개〉

##### Yoon Hwan So

Pukyong National University  
Researcher / lunaace@naver.com

##### Byung Hyuk Kwon

Pukyong National University  
Professor / bhkwon@pknu.ac.kr

##### Park Sa Kim

Pukyong National University  
Researcher / withlord56@naver.com

##### Dong-hwan Kang

Pukyong national university  
Research fellow / dhkang@pknu.ac.kr