

ORIGINAL ARTICLE

비식생 갯벌의 블루카본 저장량 산정 및 영향인자 분석

박경덕 · 강동환* · 조원기 · 소윤환 · 김병우¹⁾

부경대학교 지질환경연구소 ¹⁾한국수자원공사 K-water 연구원

Calculation of Blue Carbon Stock and Analysis of Influencing Factors in Bare Tidal Flats

Kyeong-deok Park, Dong-hwan Kang*, Won Gi Jo, Yoon Hwan So, Byung-Woo Kim¹⁾

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

¹⁾*K-water Institute, Korea Water Resources Corporation, Daejeon 34045, Korea*

Abstract

In this study, sediment cores were sampled from tidal flats (six sites) in the west and south coastal wetlands, the blue carbon stock in the tidal flat sediments was calculated, and the blue carbon stock characteristics and influencing factors were analyzed. The sediment particle size of the west coastal tidal flats was larger than that of the south coastal tidal flats, and the organic carbon content in the south coastal tidal flats was more than twice that of the west coastal tidal flats. Blue carbon stock per unit area was 28.4~36.8 Mg/h_a on the west coastal tidal flats and 69.8~89.8 Mg/h_a on the south coastal tidal flats, which was more than twice higher in the south coastal tidal flats than in the west coastal tidal flats. The total amount of blue carbon stock in the tidal flats was the highest in Suncheon Bay tidal flats at 153,626 Mg, and followed by Gomso Bay tidal flats at 141,750 Mg, Hampyeong Bay tidal flats at 58,420 Mg, Dongdae Bay tidal flats at 44,900 Mg, Cheonsu Bay tidal flats at 36,880 Mg, and Jinhae Bay tidal flats at 26,205 Mg. Blue carbon stock per unit area was higher in the south coastal tidal flats, but the total amount of blue carbon stock in the tidal flats was higher in the west coast. The slope of the regression function of blue carbon stock with respect to the organic carbon content in the tidal flat sediments was estimated to be about 0.05 to 0.07, and the slope of the regression function was higher in the west coastal tidal flats than in the south coastal tidal flats.

Key words : Bare tidal flats, Blue carbon, Organic carbon, Dry bulk density, Sediment particle size

1. 서론

블루카본(blue carbon)은 바다와 해안의 생태계에 의해 흡수 및 저장된 탄소이며(Macreadie et al., 2019), 주로 해양과 연안습지의 미세조류와 해조류 등 식물의 광합성에 의해 대기 중의 탄소가 해양 환경으로 저장된다(Barnes et al., 2019; Queiros et al., 2019).

갯벌을 포함하는 연안습지는 블루카본의 저장소로서 지구온난화의 주요 요소인 대기 중 이산화탄소를 감소시키는 역할을 한다(McLeod et al., 2011; Fourqurean et al., 2012; Wylie et al., 2016; Macreadie et al., 2017a).

한국에서 갯벌 퇴적물 내 유기탄소 함량을 분석한 사례는 주로 갯벌에서 유기물 분포(You et al., 2003;

Received 29 June, 2022; Revised 17 August, 2022;

Accepted 25 August, 2022

*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.

Park et al., 2009; Park et al., 2013)와 계절에 따른 유기물 함량 변화(Park et al., 2006; Kim and Kim, 2008) 등에 집중되어 있으며, 블루카본 저장 관련 연구는 2020년대 이후부터 본격적으로 시작되었다. Kim et al.(2022)은 염생 습지(seagrass meadow)를 대상으로 토질에 따른 블루카본 저장량을 비교하였다. Lee et al.(2021)의 연구에서는 국내 21개 갯벌을 대상으로 위치와 토질, 식생(seagrass meadow) 및 비식생에 따른 블루카본 저장량을 비교하였다.

국외에서 수행된 블루카본 관련 연구에서는 비식생 갯벌보다는 맹그로브 숲(mangrove forest), 해초 목초지(seagrass meadows) 등 식생 갯벌에 주목하고 있다. Macreadie et al.(2017b)와 St. Laurent et al.(2020)은 호주 남동부와 미국 델라웨어(Delaware)에 위치한 습지의 탄소 저장량을 분석하였다. Peteet et al.(2020)은 미국 New York 주의 Hudson River 하구 습지를 대상으로 기후 및 인위적인 요소에 의한 탄소 저장 특성을 분석하였다. Greiner et al.(2013)과 Oreska et al.(2016)와 Oreska et al.(2017)은 미국 버지니아(Virginia) 주와 델라웨어(Delaware) 주에 위치한 해초 목초지의 블루카본 저장량을 분석하였으며, Stankovic et al.(2021)은 동남아시아 7개 국가에 위치한 해초 목초지를 대상으로 블루카본 저장량을 분석하였다. Thorhaug et al.(2017)은 멕시코만의 해초 목초지를 대상으로 인위적인 영향에 의한 블루카본 저장량을 분석하였다. Lavery et al.(2013)은 호주에 위치한 해초 목초지를 대상으로 식물종에 의한 블루카본 저장 특성을 비교하였다. 맹그로브 숲 관련 연구는 주로 열대 지역에서 수행하였다. Alongi et al.(2016)은 인도네시아 전역의 맹그로브 숲과 습지(seagrass)를 대상으로 식생 특성에 따른 블루카본 저장량을 비교하였다. Asplund et al.(2021)은 마다가스카(Madagascar)의 Tsimipaika Bay를 대상으로 맹그로브 숲과 습지(seagrass)의 블루카본 저장량을 비교하였다. 식생 갯벌 지역은 육지의 숲(한대, 온대, 열대 지역)과 비교하여 높은 탄소 저장 능력(carbon burial rate)을 가지는 것으로 입증되었다(Mcleod et al., 2011).

우리나라의 갯벌은 서해안에 약 1,900 km², 남해안에 약 600 km² 넓이의 갯벌이 형성되어 있다(Lee et al., 2021). 한국의 갯벌은 위치에 따라 퇴적물의 입도분포와 서식하는 식생의 종류도 다양하다(Lee et al., 2019a). 한국의 갯벌은 식생 지역의 비율이 0.003% 정

도로 비중이 매우 적다(Lee et al., 2021). 비식생 지역에서는 미세조류의 광합성 작용에 의해 블루카본이 갯벌 퇴적물에 축적된다(MacIntyre et al., 1996; Decho, 2000; Lee et al., 2019b). 국내 연구에서는 식생뿐만 아니라 비식생 지역에서의 블루카본 저장량 산정에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 우리나라 서해안과 남해안의 대표적인 비식생 갯벌 6개소에서 채취된 퇴적물 코어 내 블루카본 저장량을 산정하여 시공간적 분포 특성을 분석하고, 블루카본 저장량의 주요 영향인자를 구명하였다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 갯벌의 블루카본 저장량을 산정하였으며, 대한민국 갯벌의 분포 및 대표성을 고려하여 서해안 3개 갯벌(천수만, 곰소만, 함평만)과 남해안 3개 갯벌(순천만, 동대만, 진해만)을 선정하였다(Fig. 1). 천수만 갯벌은 서해안면도 동쪽 내만에 위치한 약 10 km² 규모의 혼성 퇴적물로 이루어진 갯벌이며(MOF, 2019), 방조제 건설로 인한 조류 변화로 1990년대부터 퇴적환경이 변화하였다(Koh, 2001; Woo et al., 2005). 곰소만 갯벌은 전라북도 고창군과 부안군 사이의 만에 형성된 약 50 km² 규모의 갯벌이며(Koh, 2001), 2000년대 이후 매립 등에 의한 해안선의 변형과 양식장의 영향 등으로 인해 모래의 함량이 증가하는 등 퇴적상이 변화한 지역이다(Chang et al., 2007). 함평만 갯벌은 전라남도 함평군과 무안군에 위치한 약 20 km² 규모의 갯벌이며(MOF, 2019), 주변에 육지와 연결된 큰 하천이 존재하지 않아 육지의 영향이 거의 없는 지역이다(Koh, 2001; Kang et al., 2009; Oh et al., 2017). 순천만 갯벌은 세계 5대 연안습지로서 전라남도 여수반도와 고흥반도로 둘러싸인 약 22 km² 규모의 갯벌이며(Koh, 2001), 사니질 갯벌과 갈대밭이 발달되어 있고, 다양한 저서동물 및 미생물이 서식하고 있다(Jang and Cheong, 2010; Kim et al., 2011). 동대만 갯벌은 남해군에 위치한 약 5 km² 규모의 갯벌이며, 펄과 모래가 혼재되어 있고, 거머리말 서식지가 넓게 퍼져 있다(Kim et al., 2006). 진해만 갯벌은 경상남도 남단의 해안선의 굴곡이 심한 곳에 위치한 약 3 km² 규모의 갯벌이며, 1970년대 공업단지 발달 및 인구 증가에 의한 영향을 받았던 지역이다(Lee et al., 2020).

갯벌 퇴적물 시료는 해안선으로부터 약 100~200 m

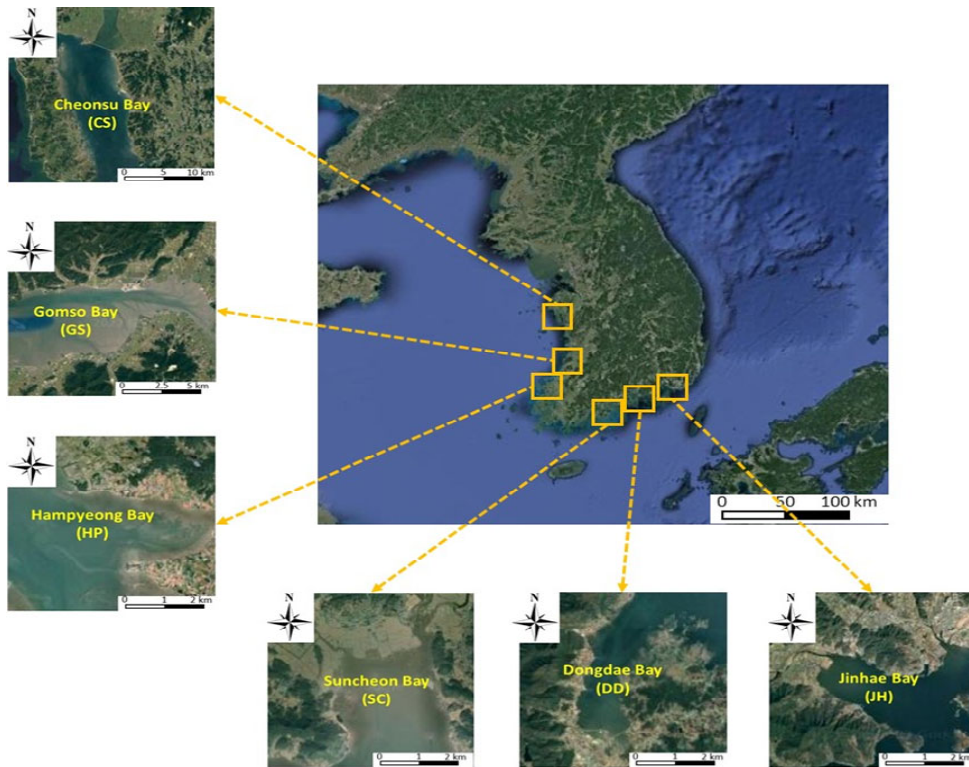


Fig. 1. Location map of bare tidal flats investigated in this study.

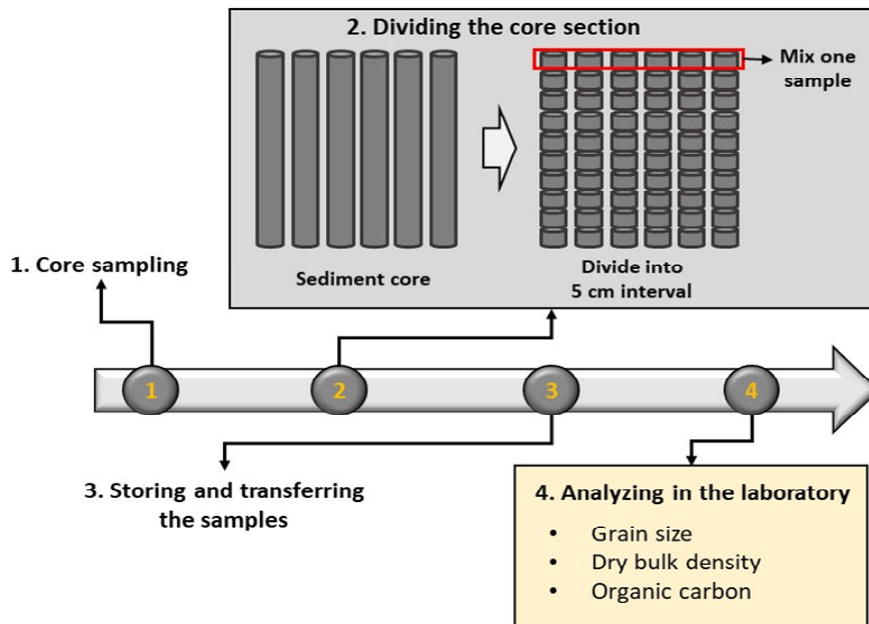


Fig. 2. Procedures of sediment core sampling and laboratory analysis.

$$\text{Dry bulk density (g/cm}^3\text{)} = \frac{\text{Mass of the dry sample (g)}}{\text{Volume (cm}^3\text{)}} \quad (1)$$

$$\text{Soil carbon density (g/cm}^3\text{)} = \text{Dry bulk density (g/cm}^3\text{)} \times \frac{\text{Organic carbon content (\%)}}{100} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Amount carbon in core section (g/cm}^2\text{)} \\ = \text{Soil carbon density (g/cm}^3\text{)} \times \text{Thickness interval (cm)} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{Blue carbon stock per unit area (Mg/ha)} \\ = \sum_{i=1}^n (\text{Blue carbon in core section})_i \times \frac{100,000,000 \text{ cm}^2/\text{ha}}{1,000,000 \text{ g/Mg}} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{Blue carbon stock (Mg)} \\ = \text{Blue carbon stock per unit area (Mg/ha)} \times \text{Tidal flat area (km}^2\text{)} \times \frac{100 \text{ ha}}{1 \text{ km}^2} \end{aligned} \quad (5)$$

범위에서 채취하였다. 각 갯벌에 대한 퇴적물 코어는 갯벌 내 6개 지점에서 Benefits 12.42 Multisampler (Eijkkelkamp, Netherlands) 장비를 이용하여 지표면 하부 50 cm 심도까지 채취하였다. 채취된 6개의 코어는 5 cm 간격으로 절단한 후 심도 구간별로 6개 시료를 혼합하여 심도별 퇴적물 시료를 확보하였으며, 심도별 퇴적물 시료는 냉장/암소 보관하면서 실험실로 운반하였다(Fig. 2). 퇴적물의 입도는 Mastersizer 3000 입도분석기(Malvern Panalytical, UK)를 이용하여 습식법으로 분석하였으며, 입도분석 결과에 따라 모래(0.0625~2 mm)와 펄(실트 4~62.5 μm , 점토 4 μm 이하)의 비율을 산정한 후 모래질 갯벌(모래 함량 90% 이상), 펄 갯벌(펄 함량 90% 이상), 혼성 갯벌로 분류한다. 건조밀도는 건조 전 퇴적물 시료의 부피와 건조기에서 105°C로 완전히 건조한 후의 무게를 이용하여 식 (1)과 같이 표현한다(Hu et al., 2022). 유기탄소량 분석을 위해 퇴적물 시료를 건조하고 분말한 시료(0.1 g)에 중크롬산칼륨(0.1 N, 10 ml)과 황산(5 ml)을 첨가하여 90~100°C에서 30분간 가열한 후, 인산(1 ml)과 초순수(10 ml), 페로인 지시약(2방울)을 첨가하고 황산암모늄 제2철 용액(0.1 N)으로 적정하여 분석한다(MOF, 2013).

갯벌의 블루카본 저장량은 퇴적물 코어 내 유기탄소량과 건조밀도를 이용하여 산정한다(Howard et al., 2014). 퇴적물 코어의 심도별(5 cm 간격) 토양탄소밀도(soil carbon density)는 건조밀도와 유기탄소량의 곱으로 산정한다(식 2). 심도별 블루카본 저장량(amount

carbon in core section)은 해당 심도의 토양탄소밀도에 퇴적물 코어 두께(5 cm)를 곱하여 산정한다(식 3). 단위면적당 블루카본 저장량(blue carbon stock per unit area)은 심도별 블루카본 저장량을 모두 더하여 산정하고(식 4), 갯벌 전체의 블루카본 저장량(blue carbon stock)은 단위면적당 블루카본 저장량과 갯벌 면적의 곱으로 산정한다(식 5).

3. 결과 및 고찰

3.1. 갯벌 퇴적물 분석 결과

갯벌에서 채취된 퇴적물 시료의 입도, 건조밀도, 유기탄소량에 대한 실내 분석 결과를 이용하여 서해안과 남해안 갯벌별 상자수염그림(box-whisker plots)을 작성하였다(Fig. 3). 서해안 갯벌 퇴적물의 입도 범위는 천수만 갯벌 26.7~97.7 μm , 곰소만 갯벌 46.8~314.5 μm , 함평만 갯벌 108.8~642.9 μm 로 나타났다. 서해안 갯벌 퇴적물의 입도는 26.7~642.9 μm 범위에었으며, 남쪽(함평만 갯벌)에서 북쪽(천수만 갯벌)으로 갈수록 입도는 감소하고 펄(mud) 함량은 증가하는 경향을 보였다. 남해안 갯벌 퇴적물의 입도 범위는 순천만 갯벌 11.6~40.8 μm , 동대만 갯벌 53.0~173.1 μm , 진해만 갯벌 66.5~309.7 μm 로 나타났다. 서해안 갯벌 퇴적물의 입도는 11.6~309.7 μm 범위에었으며, 동쪽(진해만 갯벌)에서 서쪽(순천만 갯벌)으로 갈수록 입도는 감소하고 펄 함량은 증가하는 경향을 보였다. 갯벌 퇴적물의 입도는 서해안 갯벌이 남해안 갯벌보다 2배 정도 큰 것으로 나타났다.

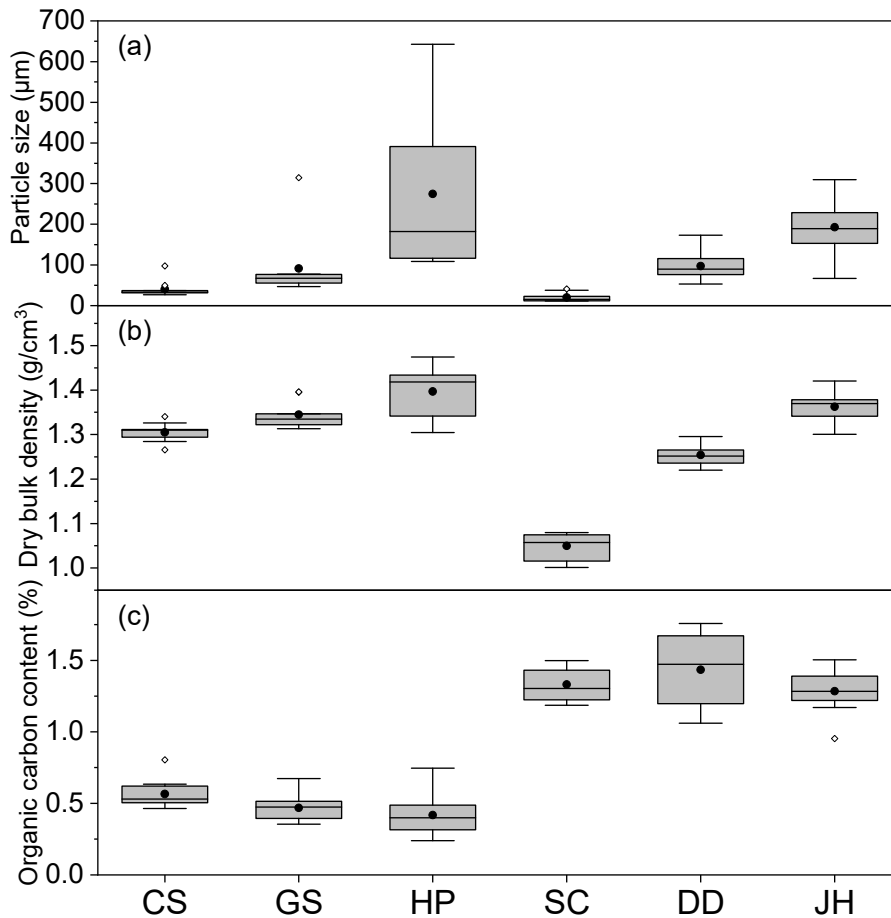


Fig. 3. Box-whisker plots of sediment particle size, dry bulk density, organic carbon content in cores sampled from bare tidal flats.

갯벌 퇴적물의 건조밀도 평균은 서해안의 천수만 (1.305 g/cm³), 곰소만(1.345 g/cm³), 함평만(1.397 g/cm³) 갯벌에서는 유사하였으며, 남해안에서는 순천만(1.050 g/cm³), 동대만(1.254 g/cm³), 진해만(1.363 g/cm³) 갯벌별 건조밀도의 차가 서해안보다 3배 정도로 나타났다(Fig. 3). 갯벌 퇴적물의 건조밀도는 전체적으로는 남해안이 서해안보다 낮았으며, 6개 갯벌 퇴적물 내 점토 함량(천수만 4.7~6.5%, 곰소만 2.2~3.8%, 함평만 2.4~4.9%, 순천만 8.4~11.1%, 동대만 5.6~8.4%, 진해만 2.2~4.4%)이 높을수록 건조밀도는 낮았다. 이는 퇴적물 내 점토(clay) 함량이 증가할수록 건조밀도가 급격히 감소하기 때문이다(Flemming and Delafontaine, 2000; Verstaeten and Poesen, 2001).

서해안과 남해안 6개 갯벌의 퇴적물 내 유기탄소량 평균(범위)은 천수만 0.565% (0.464~0.804%), 곰소만 0.468% (0.359~0.674%), 함평만 0.417% (0.239~0.745%), 순천만 1.331% (1.186~1.499%), 동대만 1.434% (1.060~1.758%), 진해만 1.284% (0.953~1.505%)로 나타났다(Fig. 3). 본 연구에서는 갯벌 퇴적물 내 유기탄소량은 남해안이 서해안보다 2배 이상 높게 나타났으며, 전반적으로 갯벌의 퇴적물 내 펄 함량이 많을수록 유기탄소량이 높게 나타났다. 기존의 연구에서도 갯벌 퇴적물 내 유기탄소량은 펄 함량이 많을수록 높게 나타나며, 이는 퇴적물 입자의 크기가 작을수록 비표면적이 넓어져 유기물의 흡착량이 증가하기 때문이다(Burone et al., 2003; Serrano et al., 2016;

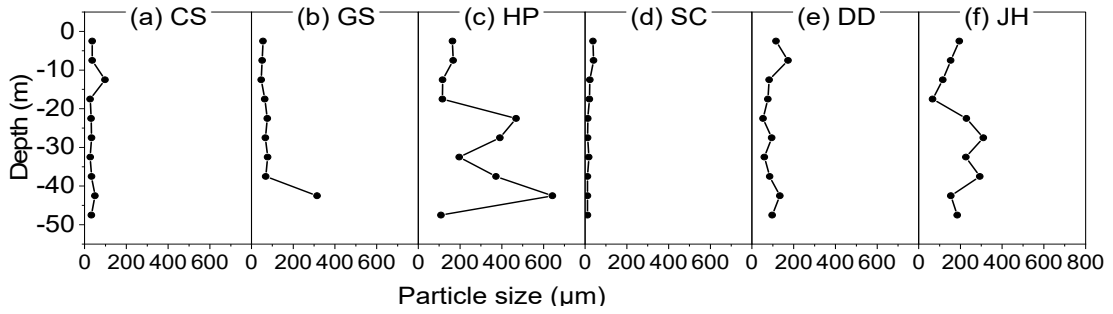


Fig. 4. Particle size distribution by depth of tidal flat sediments.

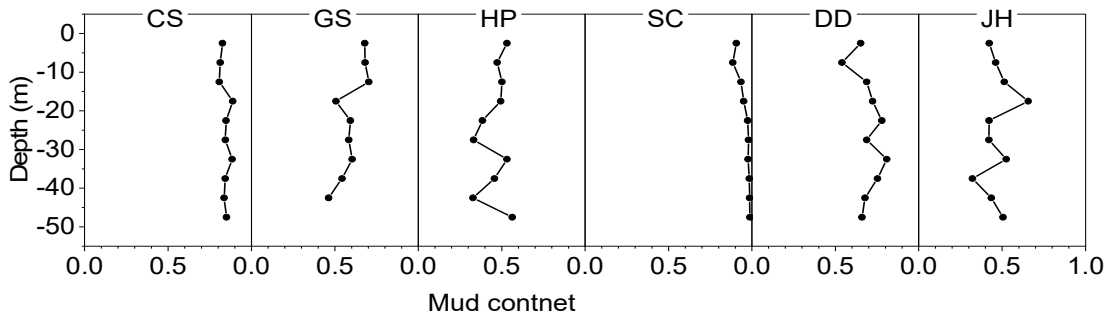


Fig. 5. Mud content distribution by depth of tidal flat sediments.

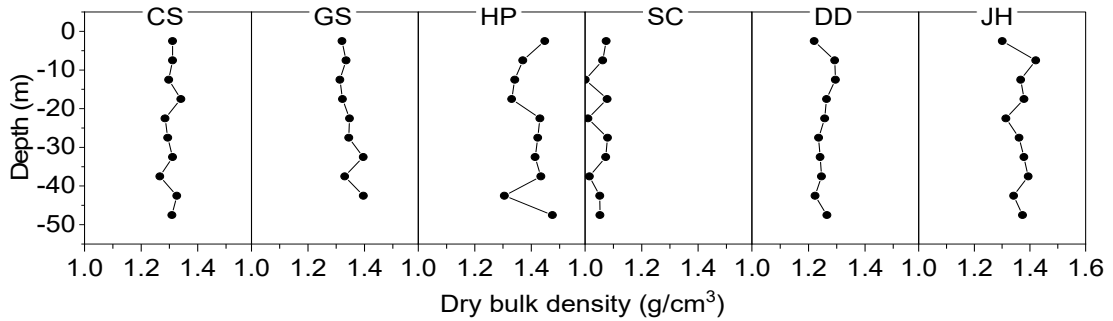


Fig. 6. Dry bulk density distribution by depth of tidal flat sediments.

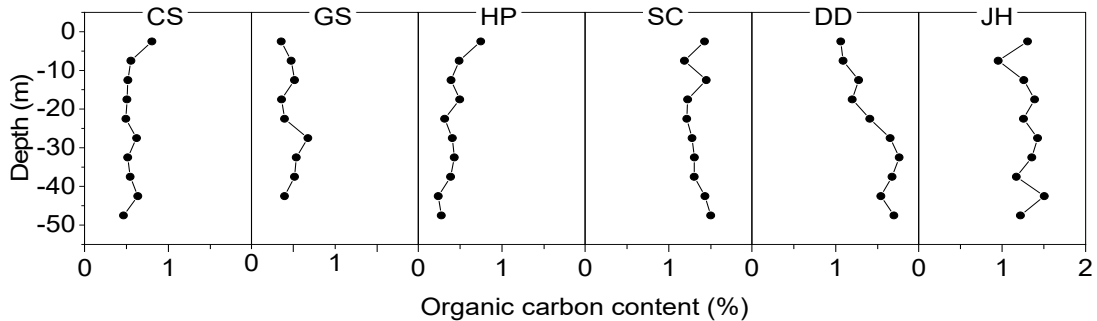


Fig. 7. Organic carbon content distribution by depth of tidal flat sediments.

Postlethwaite et al., 2018; Lee et al., 2021).

갯벌 퇴적물의 입도와 펄 함량, 건조밀도, 유기탄소량 성분 등에 대한 심도별 분포 그래프를 작성하였다(Fig. 4~7). 천수만과 순천만 갯벌에서는 심도별 입도가 유사하였으며, 나머지 4개 갯벌에서는 심도별 입도의 변화가 다양하게 나타났다(Fig. 4). 갯벌 퇴적물 내 펄 함량은 천수만과 순천만 갯벌 퇴적물의 모든 심도에서 매우 높게 나타났으며, 나머지 4개 갯벌에서는 퇴적물 내 펄 함량의 심도별 변화가 다양하게 나타났다(Fig. 5). 갯벌 퇴적물의 건조밀도는 순천만의 모든 심도에서 가장 낮았으며, 함평만의 심도별 건조밀도의 변화가 크게 나타났다(Fig. 6). 갯벌 퇴적물 내 유기탄소량의 심도별 변화는 함평만과 동대만에서 크게 나타났으며, 나머지 4개 갯벌에서는 심도별 유기탄소량의 변화가 작았다(Fig. 7). 함평만 갯벌은 심도가 깊어질수록 유기탄소량이 감소하고 동대만 갯벌에서는 심도가 깊어질수록 증가하는 분포를 보였다. 본 연구를 통해 동일한 갯벌 지역에서도 과거 퇴적 당시의 퇴적환경에 의해 퇴적물의 입도와 펄 함량, 건조밀도, 유기탄소량이 다양하게 나타남을 알 수 있었다.

3.2. 블루카본 저장량 분석

본 연구에서는 갯벌 퇴적물 심도별 블루카본 저장량을 건조밀도와 유기탄소량을 이용하여 산정하였다(Fig. 8). 모든 갯벌에서 블루카본 저장량의 심도별 변화 경향은 남해안 갯벌에서는 심도가 깊어질수록 약간 증가하였으며, 서해안 갯벌에서는 심도에 따라 증가하거나 감소하는 경향을 보이지는 않았다. 이는 동일 지역에서도 갯벌 퇴적물이 생성될 당시의 다양한 퇴적환경(식생/비식생, 외부/내부 기원 유기물 유입, 기후 등)에 따른 블루카본 저장 특성이 반영된 것으로 판단된다(Howard et al., 2014). 서해안에서 채취된 갯벌 퇴적물 코어 내 블루카본 저장량의 평균(범위)은 천수만 0.037 g/cm² (0.030~0.053 g/cm²), 곰소만 0.032 g/cm² (0.023~0.045 g/cm²), 함평만 0.029 g/cm² (0.016~0.054 g/cm²) 순으로 나타났으며, 갯벌 퇴적물 내 유기탄소량이 많을수록 블루카본 저장량도 높았다(Fig. 7과 8). 남해안에서 채취된 갯벌 퇴적물 코어 내 블루카본 저장량의 평균(범위)은 동대만 0.090 g/cm² (0.065~0.109 g/cm²), 진해만 0.087 g/cm² (0.068~0.101 g/cm²), 순천만 0.070 g/cm² (0.061~0.079 g/cm²) 순으로 나타났으며, 서해안과 동

일하게 갯벌 퇴적물 내 유기탄소량이 많을수록 블루카본 저장량도 높았다(Fig. 7-8). 블루카본 저장량은 남해안 갯벌이 서해안 갯벌보다 높았으며, 남해안 갯벌은 주로 반폐쇄형 만에 위치하여 유기물의 축적이 서해안보다 많기 때문이다(Lee et al., 2021).

갯벌 코어시료의 퇴적층 심도별 블루카본 저장량을 이용하여 단위면적당 블루카본 저장량(organic carbon stock per unit area)과 갯벌 전체의 블루카본 저장량(organic carbon stock)을 산정하였다(Table. 1). 단위면적당 블루카본 저장량은 서해안 갯벌에서 28.4~36.8 Mg/ha, 남해안 갯벌에서 69.8~89.8 Mg/ha 정도로서 남해안 갯벌이 서해안 갯벌보다 2배 이상 높았으며, 이는 갯벌 퇴적물의 펄 함량이 많아서 유기물 함량이 높았기 때문이다. 국내 갯벌에서 수행된 Lee et al.(2021)의 연구에서도 펄 함량이 높은 강화도, 영종도, 시흥, 여자만, 순천만 갯벌에서 높은 블루카본 저장량을 보였으며, 또한 남해안 갯벌이 서해안 갯벌보다 블루카본 저장량이 전반적으로 높았다. 갯벌 전체의 블루카본 저장량은 순천만 갯벌에서 153,626 Mg로 가장 높고, 곰소만 갯벌 141,750 Mg, 함평만 갯벌 58,420 Mg, 동대만 갯벌 44,900 Mg, 천수만 갯벌 36,880 Mg, 진해만 갯벌 26,205 Mg의 순으로 나타났다. 단위면적당 블루카본 저장량은 남해안이 서해안보다 2배 이상 높았으나 갯벌의 면적은 서해안이 남해안보다 2~10배 이상 넓어서, 갯벌 전체의 블루카본 저장량은 서해안이 남해안보다 높게 나타났다.

국내와 국외에서 수행된 비식생 갯벌 퇴적물 내 블루카본 산정 연구 결과와 본 연구의 결과를 Table 2에 정리하였다. 중국에서는 식생 지역과 비식생 갯벌 지역에서 블루카본 저장 특성 비교를 위해 블루카본 저장량 산정 연구를 수행하였다(Yu et al., 2012; Mao et al., 2018; Hu et al., 2022). 중국의 비식생 갯벌 퇴적물 내 블루카본 저장량은 16~70 Mg/ha 정도로서, 본 연구에서 산정된 갯벌 퇴적물 내 블루카본 저장량(서해안 갯벌 28~37 Mg/ha, 남해안 갯벌 70~90 Mg/ha)과 유사하게 나타났다. 미국의 버지니아 해안 갯벌 퇴적물 내 블루카본 저장량은 45.1 Mg/ha 정도로서, 이는 서해안 갯벌보다는 높고 남해안 갯벌보다는 낮았다(Oreska et al., 2016). 본 연구와 기존의 국내/국외 연구 결과에 의하면, 갯벌 퇴적물 내 블루카본 저장량은 퇴적물 입도 특성에 의한 영향성이 높음을 알 수 있었다.

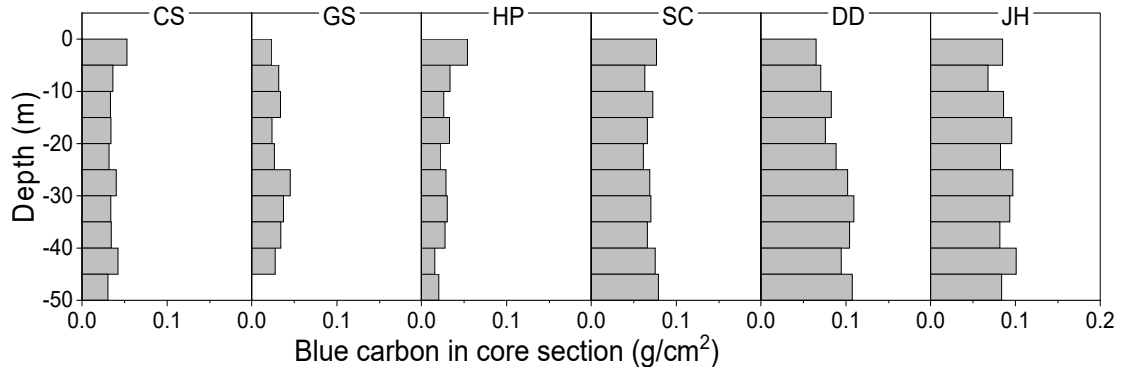


Fig. 8. Blue carbon in core section distribution by depth of tidal flat sediments.

Table 1. Blue carbon stocks of cores sampled in bare tidal flats

Location	Blue carbon stock per unit area (Mg/ha)	Area (km ²)	Blue carbon stock (Mg)
Chonsu Bay	36.9	101)	36,880
Gomso Bay	28.4	502)	141,750
Hampyeong Bay	29.2	201)	58,420
Suncheon Bay	69.8	222)	153,626
Dongdae Bay	89.8	53)	44,900
Jinhae Bay	87.4	34)	26,205

1) MOF(2019); 2) Koh et al.(2001); 3) Kim et al.(2006); 4) Lee et al.(2020)

Table 2. A case study of blue carbon stock in tidal flat sediments

Location	Soil type	Core depth (cm)	Blue carbon stock per unit area (Mg/ha)	Reference
Liaohe Delta (China)	mud	30	34.8	Mao et al. (2018)
Yellow River Delta (China)	-	30	15.8~16.5	Yu et al. (2012)
Ximen Island (China)	mud	100	69.5	Hu et al. (2022)
Virginia coast (United states)	sand/mixed	12	45.1	Oreska et al. (2016)
West Sea (South Korea)	Mud/Mixed	100	1~145	Lee et al. (2021)
South Sea (South Korea)	Mud/Mixed		4~144	
West Sea (South Korea)	mixed	50	28.4~36.8	This study
South Sea (South Korea)	mixed/mud		69.8~89.8	

Table 3. Correlation coefficients between blue carbon stocks and influencing factors in bare tidal flat sediments

Site	Particle size (μm)	Content (%)				Bulk density (g/cm^3)	Organic carbon content (%)
		Sand	Silt	Clay	Mud		
CS	-0.018	0.342	-0.339	-0.225	-0.317	0.195	0.996
GS	-0.184	-0.088	0.068	0.793	0.116	0.192	0.995
HP	-0.491	-0.272	0.434	0.313	0.426	0.258	0.995
SC	-0.067	-0.145	0.147	0.128	0.145	0.207	0.942
DD	-0.434	-0.543	0.544	0.442	0.540	-0.231	0.995
JH	-0.016	-0.303	0.255	0.411	0.274	-0.334	0.980

3.3. 블루카본 저장량의 영향인자 분석

심도별 블루카본 저장량과 입도, 퇴적물 함량, 건조 밀도, 유기탄소량 간의 상관계수를 산정하여 블루카본 저장량에 대한 영향인자를 분석하였다(Table 3). 퇴적물의 평균 입경이 크고 모래의 함량이 높을수록 블루카본 저장량은 감소하는 음의 상관성을 보였다. 천수만을 제외한 5개 갯벌에서는 펄 함량이 높을수록 블루카본 저장량이 증가하는 양의 상관성을 보였으며, 이는 기존의 연구에서 퇴적물의 입도가 작고 펄 함량이 높은 갯벌에서 유기탄소량이 높다는 결과와 일치한다(Flemming and Delafontaine, 2000; Serrano et al., 2016; Lee et al., 2021). 건조밀도와 블루카본 저장량의 상관성은 낮았으며, 동대만과 진해만에서는 음의 상관성을 나머지 4개 갯벌에서는 양의 상관성을 보였다. 유기탄소량과 블루카본 저장량의 상관계수는 모든 갯벌에서 0.94 이상으로서 매우 높은 상관성을 보였으며, 이는 갯벌 퇴적물 내 블루카본 저장량이 유기탄소량에 의해 결정됨을 의미한다. 갯벌 퇴적물 내 블루카본은 갯벌 외부로부터 유입되어 퇴적물에 저장되는 탄소(allochthonous carbon) 및 갯벌 내부에서 식물의 광합성과 생물의 분해를 통해 퇴적물에 저장되는 탄소(autochthonous carbon)로 구성된다(Howard et al., 2014). 본 연구에서는 갯벌 외부와 내부 기원의 블루카본 저장 특성을 구분하지는 않았지만, 향후 연구에서는 갯벌 퇴적물 내 블루카본 저장 기작을 외부와 내부 기원으로 구분하여 구명하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

갯벌 퇴적물 내 유기탄소량에 대한 블루카본 저장량의 회귀함수 추정하였다(Fig. 9). 추정된 회귀함수의 기울기는 순천만 갯벌에서는 0.05 정도로서 가장 낮았으며 함평만 갯벌에서는 0.07 이상으로서 가장 높았다. 회귀함수의 기울기는 서해안 갯벌이 남해안 갯벌보다 높게 나타났으며, 이는 갯벌 퇴적물 내 유기탄소량의 변화에 따른 블루카본 저장량의 민감도가 서해안이 남해안보다 높다는 것이다. 회귀함수 기울기의 의미는 동일 환경의 갯벌 퇴적물 내 유기탄소량이 1% 증가하면 블루카본 저장량은 서해안 갯벌에서 0.066~0.072 g/cm^2 , 남해안 갯벌에서 0.050~0.062 g/cm^2 정도로 많아질 수 있다는 것이다. 본 연구를 통해 우리나라 서해안과 남해안 갯벌에서 블루카본 저장량은 유기탄소량에 의해 지배적인 영향을 받고 있음을 알 수 있었으며, 본 연구에서 조사된 서해안과 남해안의 6개 갯벌 지역에서는 유기탄소량만으로도 갯벌 퇴적물 내에 저장된 블루카본의 양을 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 서해안과 남해안 환경을 대표하는 6개 갯벌 퇴적물 내 블루카본 저장량을 산정하여 블루카본 저장량의 영향인자를 분석하였다.

갯벌 퇴적물의 입도는 남해안이 서해안보다 점토 함량이 높고 건조밀도는 낮았으며, 유기탄소량은 남해안이 서해안보다 2배 이상 많았다. 6개 갯벌의 심도별 입도와 유기탄소량 분포는 다양하게 나타났으며, 이는 동일 지역에서도 퇴적 당시의 퇴적환경에 따라 다양한 입도와

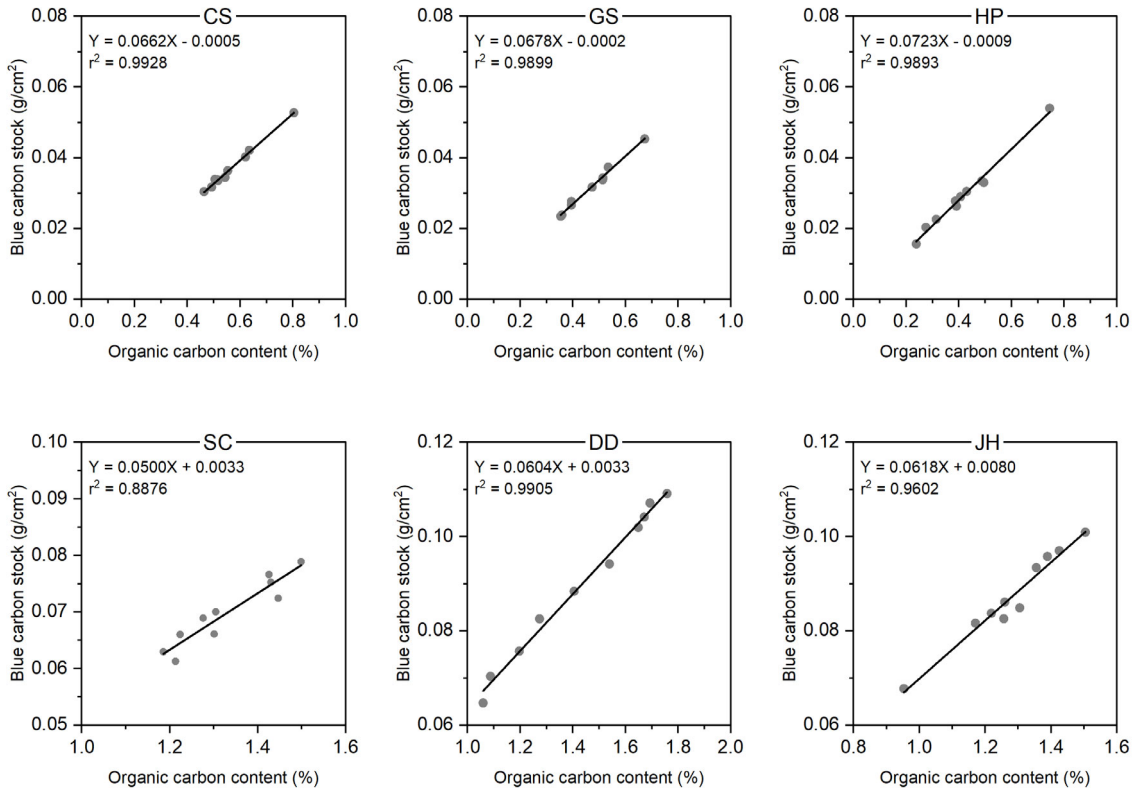


Fig. 9. Regression functions of blue carbon storage according to organic carbon content in bare tidal flat sediments.

유기탄소량이 형성되었기 때문이다.

단위면적당 블루카본 저장량은 서해안 갯벌에서 28.4~36.8 Mg/ha, 남해안 갯벌에서 69.8~89.8 Mg/ha 정도로서 남해안 갯벌이 서해안 갯벌보다 2배 이상 높았으나, 갯벌의 면적은 서해안이 남해안보다 2~10배 이상 넓어서 갯벌 전체의 블루카본 저장량은 서해안이 남해안보다 높게 나타났다. 우리나라 서해안과 남해안 갯벌에서 블루카본 저장량은 퇴적물 내 유기탄소량과 갯벌의 면적이 지배적인 영향을 가짐을 알 수 있었다.

유기탄소량과 블루카본 저장량의 상관계수는 모든 갯벌에서 0.94 이상으로서 매우 높았으며, 이는 갯벌 퇴적물 내 블루카본 저장량이 유기탄소량에 의해 결정됨을 의미한다. 갯벌 퇴적물 내 유기탄소량에 대한 블루카본 저장량의 회귀함수 기울기는 0.05~0.07 정도이고 서해안 갯벌이 남해안 갯벌보다 높게 나타났으며, 이는 갯벌 퇴적물 내 유기탄소량의 변화에 따른 블루카본 저장량의 민감도가 서해안이 남해안보다 높다는 것을

의미한다.

본 연구를 통해 우리나라 서해안과 남해안 갯벌에서 블루카본 저장량은 유기탄소량에 의해 지배적인 영향을 받고 있음을 알 수 있었으며, 본 연구에서 조사된 서해안과 남해안의 6개 갯벌 지역에서는 유기탄소량만으로도 갯벌 퇴적물 내에 저장된 블루카본의 양을 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

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

- Alongi, D. M., Murdiyarsa, D., Fourqurean, J. W., Kauffman, J. B., Hutahaean, A., Crooks, S., Lovelock, C. E., Howard, J., Herr, D., Fortes, M., Pidgeon, E., Wagey, T., 2016, Indonesia's blue carbon: a globally significant and vulnerable sink for seagrass and mangrove carbon, *Wetl. Ecol. Manag.*, 24, 3-13.
- Asplund, M. E., Dahl, M., Ismail, R. O., Arias-Ortiz, A., Deyanova, D., Franco, J. N., Hammar, L., Hoamby, A. I., Linderholm, H. W., Lyimo, L. D., Perry, D., Rasmussen, L. M., Ridgway, S. N., Gispert, G. S., D'Agata, S., Glass, L., Mahafina, J. A., Ramahery, V., Masque, P., Bjork, M., Gullstrom, M., 2021, Dynamics and fate of blue carbon in a mangrove-seagrass seascape: Influence of landscape configuration and land-use change, *Landsc. Ecol.*, 36, 1489-1509.
- Barnes, D. K. A., Sands, C. J., Richardson, A., Smith, N., 2019, Extremes in benthic ecosystem services: Blue carbon natural capital shallower than 1000 m in isolated, small, and young ascension island's EEZ., *Front. Mar. Sci.*, 6, 663.
- Burone, L., Muniz, P., Pires-Vanin, A. M. S., Rodrigues, M., 2003, Spatial distribution of organic matter in the surface sediments of Ubatuba Bay (Southeastern - Brazil), *An. Acad. Bras. Cienc.*, 75, 77-90.
- Chang, J. H., Ryu, S. O., Jo, Y. J., 2007, Long-term variation of tidal-flat sediments in Gomsu Bay, West Coast of Korea, *The Journal of The Korean Earth Science Society*, 28, 357-366.
- Decho, A. W., 2000, Microbial biofilms in intertidal systems: an overview, *Cont. Shelf Res.*, 20, 1257-1273.
- Flemming, B. W., Delafontaine, M. T., 2000, Mass physical properties of muddy intertidal sediments some applications: misapplications and non-applications, *Cont. Shelf Res.*, 20, 1179-1197.
- Fourqurean, J. W., Duarte, C. M., Kennedy, H., Marba, N., Holmer, M., Mateo, M. A., Apostolaki, E. T., Kendrick, G. A., Krause-Jensen, D., McGlathery, K. J., Serrano, O., 2012, Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock, *Nat. Geosci.*, 5, 505-509.
- Greiner, J. T., McGlathery, K. J., Gunnell, J., McKee, B. A., 2013, Seagrass restoration enhances "Blue carbon" sequestration in coastal waters, *PLOS One*, 8, e72469.
- Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., Telszewski, M., Pidgeon, E., 2014, Coastal blue carbon: Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses, Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, and International Union for Conservation of Nature, Arlington, VA, USA, 180.
- Hu, J., Loh, P. S., Pradit, S., Le, T. P. Q., Oeurng, C., Mohamed, C. A. R., Lee, C. W., Lu, X., Anshari, G. Z., Kandasamy, S., Wang, J., Li, Z., Qin, H., Ji, L., Guo, J., 2022, Assessing the effect of age and geomorphic setting on organic carbon accumulation in high-latitude human-planted mangroves, *Forests*, 13, 105.
- Jang, S. G., Cheong, C. J., 2010, Characteristics of grain size and organic matters in the tidal flat sediments of the Suncheon Bay, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Eng.*, 13, 198-205.
- Kang, M. R., Lim, D. I., Jang, P. G., Kim, G. B., Kang, Y. S., 2009, Tidal variations of nutrient concentration in Hampyeong Bay, West coast of Korea, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Eng.*, 12, 202-208.
- Kim, K. H., Kim, D., 2008, Seasonal and spatial variations of nutrient fluxes in the intertidal flat of Keunso Bay, the Yellow Sea, *Ocean Polar Res.*, 30, 225-238.
- Kim, M. S., Lee, S. M., Shin, K. H., 2006, Seasonal nitrogen dynamics of *Zostera marina* inhabited in Dongdae Bay and Ojiri, *Korean J. Environ. Biol.*, 24, 186-194.
- Kim, S. H., Suonan, Z., Qin, L. Z., Kim, H., Park, J. I., Kim, Y. K., Lee, S., Kim, S. G., Kang, C. K., Lee, K. S., 2022, Variability in blue carbon storage related to biogeochemical factors in seagrass meadows off the coast of the Korean peninsula, *Sci. Total Environ.*, 813, 152680.
- Kim, Y., Park, J. E., Lee, J., Hong, M., Roh, Y., 2011, Metal reduction and biomineralization by bacteria enriched from intertidal flat sediments, Suncheon Bay, Korea, *J. Geol. Soc. Korea*, 47, 19-30.
- Koh, C. H., 2001, Mudflats in Korea - Korean tidal flat: Environment, biology and human, Seoul National University Publishing & Cultural Center, Seoul, Korea, 1073.
- Lavery, P. S., Mateo, M. A., Serrano, O., Rozaimi, M., 2013, Variability in the carbon storage of seagrass habitats and its implications for global estimates of blue carbon ecosystem service, *PloS One*, 8, e73748.
- Lee, J., Kim, B., Noh, J., Lee, C., Kwon, I., Kwon, B. O., Ryu, J., Park, J., Hong, S., Lee, S., Kim, S. G., Song, S., Yoon, H. J., Yim, J., Nam, J., Choi, K., Khim, J. S., 2021, The first national scale evaluation of organic carbon stocks and sequestration rates of coastal

- sediments along the West Sea, South Sea, and East Sea of South Korea. *Sci. Total Environ.*, 793, 148568.
- Lee, M., Kim, S., Jung, H., 2019a, Distribution patterns of halophytes in the coastal area in Korea, *KSO*, 24, 139-159.
- Lee, J. M., Kwon, B. O., Kim, B., Noh, J., Hwang, K., Ryu, J., Park, J., Hong, S., Khim, J. S., 2019b, Natural and anthropogenic signatures on sedimentary organic matters across varying intertidal habitats in the Korean waters. *Environ. Int.*, 133, 105166.
- Lee, S. H., Min, J. W., Yu, T. S., Han, K. H., 2020, Seasonal fluctuation in abundance and species composition of fish collected by a fyke net in coastal waters off Jinhae bay, *Bull. Natl. Inst. Ocean. Fish.*, 13, 82-87.
- 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.
- Macreadie, P. I., Nielsen, D. A., Kelleway, J. J., Atwood, T. B., Seymour, J. R., Petrou, K., Connolly, R. M., Thomson, A. C. G., Trevathan-Tackett, S. M., Ralph, P. J., 2017a, Can we manage coastal ecosystems to sequester more blue carbon? *Front. Ecol. Environ.*, 15, 206-213.
- Macreadie, P. I., Ollivier, Q. R., Kelleway, J. J., Serrano, O., Carnell, P. E., Ewers Lewis, C. J., Atwood, T. B., Sanderman, J., Baldock, J., Connolly, R. M., Duarte, C. M., Lavery, P. S., Steven, A., Lovelock, C. E., 2017b, Carbon sequestration by Australian tidal marshes. *Scientific Reports*, 7, 44071.
- Macreadie, P. I., Anton, A., Raven, J. A., Beaumont, N., Connolly, R. M., Friess, D. A., Kelleway, J. J., Kennedy, H., Kuwae, T., Lavery, P. S., Lovelock, C. E., Smale, D. A., Apostolaki, E. T., Atwood, T. B., Baldock, J., Bianchi, T. S., Chmura, G. L., Eyre, B. D., Fourqurean, J. W., Hall-Spencer, J. M., Huxham, M., Hendriks, I. E., Krause-Jensen, D., Laffoley, D., Luisetti, T., Marba, N., Masque, P., McGlathery, K. J. J., Magonigal, P., Murdiyarso, D., Russell, B. D., Santos, R., Serrano, O., Silliman, B. R., Kenta Watanabe, K., Duarte, C. M., 2019, The future of Blue Carbon science. *Nat. Commun.*, 10, 3998.
- Mao, R., Ye, S. Y., Zhang, X. H., 2018, Soil-aggregate-associated organic carbon along vegetation zones in tidal salt marshes in the Liaohhe delta, *Clean*, 46, 1800049.
- McLeod, E., Chmura, G. L., Bouillon, S., Salm, R., Bjork, M., Duarte, C. M., Lovelock, C. E., Schlesinger, W. H., Silliman, B. R., 2011, A Blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *Front. Ecol. Environ.*, 9, 552-560.
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF), 2013, Korean standard methods for marine environment, <https://www.law.go.kr/admRulLsInfoP.do?admRulSeq=2000000109042> [Accessed on 6 April 2022].
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF), 2019, 2018 Mudflat area survey results report. 11-1192000-000193-13, MOF, Sejong, Korea, 308.
- Oh, J. H., Kim, D. J., Lee, H., 2017, Use of a drone for mapping and time series image acquisition of tidal zones, *J. Korean Inst. Intell. Syst.*, 27, 119-125.
- Oreska, M. P. J., McGlathery, K. J., Porter, J. H., 2016, Seagrass blue carbon spatial patterns at the meadow-scale, *PLoS One*, 12, e0176630.
- Oreska, M. P. J., Wilkinson, G. M., McGlathery, K. J., Bost, M., McKee, B. A., 2017, Non-seagrass carbon contributions to seagrass sediment blue carbon, *Limnol. Oceanogr.*, 63, S3-S18.
- Park, J. H., Lee, C. D., Jung, J. T., Kim, J. H., 2013, Study on the characteristic of the tidal flat sediment in Incheon Coastal area (I) - Sedimentary environments and organic matters distribution, *J. Korean Soc. Environ. Technol.*, 14, 20-27.
- Park, J. K., Kim, E. S., Kim, K. T., Cho, S. R., Park, Y. C., 2006, Organic carbon behavior and distribution in the Mankyong River Estuary, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Eng.*, 9, 131-140.
- Park, J. K., Kim, E. S., Kim, K. T., Cho, S. R., Song, T. Y., Yoo, J. K., Kim, S. S., Park, Y. C., 2009, Characteristics in organic carbon distribution in the Seamangeum area during the construction of artificial sea dike, Korea. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Eng.*, 12, 75-83.
- Peteet D., Nichols, J., Pederson, D., Kenna, T., Chang, C., Newton, B., Vincent, S., 2020, Climate and anthropogenic controls on blue carbon sequestration in Hudson River tidal marsh, Piermont, New York, *Environ. Res. Lett.*, 15, 065001.
- Postlethwaite, V. R., McGowan, A. E., Kohfeld, K. E., Robinson, C. L. K., Pellatt, M. G., 2018, Low blue carbon storage in eelgrass (*Zostera marina*) meadows on the Pacific Coast of Canada, *PLoS ONE*, 13, e0198348.
- Queiros, A. M., Stephens, N., Widdicombe, S., Tait, K., McCoy, S. J., Ingels, J., Ruhl, S., Airs, R., Beesley, A., Carnovale, G., Cazenave, P., Dashfield, S., Hua, E., Jones, M., Lindeque, P., McNeill, C. L., Nunes, J., Parry, H., Pascoe, C., Widdicombe, C., Smyth, T., Atkinson, A., Krause-Jensen, D., Somerfield, P. J.,

- 2019, Connected macroalgal-sediment systems blue carbon and foodwebs in the deep coastal ocean, *Ecol. Monogr.*, 89, e01366.
- Serrano, O., Lavery, P. S., Duarte, C. M., Kendrick, G. A., Calafat, A., York, P. H., Steven, A., Macreadie, P. I., 2016, Can mud (silt and clay) concentration be used to predict soil organic carbon content within seagrass ecosystems, *Biogeosciences*, 13, 4915-4926.
- St. Laurent, K. A., Hribar, D. J., Carlson, A. J., Crawford, C. M., Siok, D., 2020, Assessing coastal carbon variability in two Delaware tidal marshes, *J. Coast. Conserv.*, 24, 65.
- Stankovic, M, Ambo-Rappe, R., Carly, F., Dangan-Galon, F., Fortes, M. D., Hossain, M. S., Kiswara, W., Luong, C. V., Minh-Thu, P., Mishra, A. K., Noiraksar, T., Nurdin, N., Panyawai, J., Rattanachot, E., Rozaimi, M., Htun, U. S., Prathep, A., 2021, Quantification of blue carbon in seagrass ecosystems of Southeast Asia and their potential for climate change mitigation, *Sci. Total Environ.*, 783, 146858.
- Thorhaug, A., Poulos, H. M., Lopez-Portillo, J., Ku, T. C. W., Berlyn, G. P., 2017, Seagrass blue carbon dynamics in the Gulf of Mexico Stocks, losses from anthropogenic disturbance, and gains through seagrass restoration, *Sci. Total Environ.*, 605-606, 626-636.
- Verstaeten, G., Poesen, J., 2001, Variability of dry sediment bulk density between and within retention ponds and its impact on the calculation of sediment yields, *Earth Surf. Process Landf.*, 26, 675-394.
- Woo, H. J., Choi, J. U., Ryu, J. H., Chi, S. H., Kim, S. R., 2005, Sedimentary environments in the Hwangdo tidal flat, Cheonsu Bay, *Journal of Wetlands Research*, 7, 53-67.
- Wylie, L., Sutton-Grier, A. E., Moore, A., 2016, Keys to successful blue carbon projects: Lessons learned from global case studies, *Mar. Policy*, 65, 76-84.
- You, S. J., Kim, J. G., Cho, E. I., 2003, Characteristics of particle composition and organic matter distribution for tidal flat sediments in the Saemankeum area, *KOSFAS*, 36, 49-54.
- Yu, J., Wang, Y., Li, Y., Dong, H., Zhou, D., Han, G., Wu, H., Wang, G., Mao, P., Gao, Y., 2012, Soil organic carbon storage changes in coastal wetlands of the modern Yellow River Delta from 2000 to 2009, *Biogeosciences*, 9, 2325-2331.
-
- 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. Won-Gi Jo
Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University
brilliantwg@gmail.com
 - Researcher. Yoon-Hwan So
Institute of Environmental Geosciences, Pukyong National University
lunaace@naver.com
 - Principal Researcher. Byung-Woo Kim
K-water institute, Korea Water Resources Corporation
bwkim@kwater.or.kr