http://dx.doi.org/10.14577/kirua.2024.26.3.1

위성영상을 이용한 연안지역 염생식물 중심 블루카본 피복 분류 및 탄소호흡량 산정 연구
- 전남 무안군 광석길 일대를 대상으로 -

A Study on Classification of Halophytes-based Blue Carbon Cover and Estimation of Carbon Respiration Using Satellite Imagery
- Targeting the Gwangseok-gil Area in Muan-gun, Jeollanam-do -

박 재 찬* 남 진 보** 김 재 욱***
Park, Jae-Chan Nam, Jinvo Kim, Jae-Uk

Abstract

This study aims to estimate the cover classification and carbon respiration of halophytes based on the issues of utilising blue carbon in recent context of climate change. To address the aims, the study classified halophytes(*Triglochin maritimum L and Phragmites australis*), Intertidal(non-vegetated tidal flats) and Supratidal(sandy tidal flats) to measure carbon respiration and classify cover. The results are revealed that first, the carbon respiration in vegetated areas was less than that in non-vegetated areas. Second, the cover classification could be divided into halophyte communities(*Triglochin maritimum L, Phragmites australis*), Intertidal and Supratidal by NDWI(Moisture Index, Normalized Difference Water Index) Third, the total carbon respiration of blue carbon was calculated to be –0.0121 Ton km^2 hr^{-1} with halophyte communities at –0.0011 Ton km^2 hr^{-1}, Intertidal respiration at –0.0113 Ton km^2 hr^{-1} and Supratidal respiration at 0.0003 Ton km^2 hr^{-1}. As this challenge is a fundamental study that calculates the quantitative net carbon storage based on the blue carbon-based marine ecosystem, contributing to firstly, measuring the carbon respiration of cordgrass communities, reed communities, and non-vegetated tidal flats, which are potential blue carbon candidates in the study area, to establish representative values for carbon respiration, secondly, verifying the reliability of cover classification of native halophytes extracted through image classification technology, and thirdly, challenging to create a thematic map of carbon respiration, calculating the area and carbon respiration for each classification category.

주 요 어 : 기후변화, 블루카본, 탄소호흡, 토지피복, 주제도, 영상처리, 원격탐사
Keywords : Climate Change, Blue Carbon, Carbon Respiration, Land Cover Classification, Thematic Map, Image Processing, Remote Sensing

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

심각한 지구 온난화로 인해 국내뿐만 아니라 전 세계적으로 기후변화 대응은 가장 중요한 쟁점 중 하나가 되었으며, 이에 대한 대응을 위해 유엔 기본협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, 약칭 유엔기후변화협약, 또는 기후변화협약, UNFCCC, FCCC)이 1992년 UN 환경개발 회의에서 154개 당사국에 의해 공식 채택되어 1994년 3월 발효되었다. 2016년 COP23에서 195개국 만장일치로 채택하여 국가 감축목표(NDC)를 5년 주기로 이행 점검하고 5년마다 제출하기로 하였다. 이에 따라 국내 경우에도, 대한민국 2030 NDC를 설정했다. 그리고 대한민국은 2030 NDC와 2050 탄소중립을 위해 "제1차 국가탄소중립 녹색성장 기본계획(정부안)", 2021년 "탄소중립 녹색성장 기본법"(탄소중립 기본법)을 제정했다. 이에 대응하기 위해 다양한 탄소중립을 위한 시도가 이루어지고 있다. 그런데, 대부분 그린카본 관련 육지 생태계 분야의 탄소 저장·흡수의 정량적 자료들은 많이 연구되고 있다[1]. 그런데, 최근 해양 생태계를 기반으로 하는 블루카본 연구들이 활발히 진행되고 있고, 블루카본 기반 탄소 저장·흡수능력에 대해 집중적으로 연구가 진행되고 있는 추세이다.

블루카본이란, 세계 최대의 환경 국제기구 세계자연보전연맹(IUCN)의 2009년 보고서에 처음 등장한 개념으로 해양 생태계 탄소 흡수 속도는 육상 대비 최대 50배 빠르다(해양수산부, 2023)[2]. IPCC에서는 2013년 공식적인 탄소 감축원 IPCC 인벤토

* 국립목포대학교 조경·건축융복합협동과정 박사과정
** 국립목포대학교 도시계획 및 조경학부 부교수, 환경경영박사
(Corresponding author : School of Urban Planning and Landscape Architecture, Mokpo National University, jinvo.nam@gmail.com)
*** ㈜자연과공간 이사, 서울대학교 생태조경학 석사
이 논문은 2023년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00256330, 쿠로시오 해류로 인한 한반도 해양위기 대응기술 개발)

1) 박재찬 외 6인, 당종려(*Trachycapus fortunei*)의 염분 저항성 생육특징과 연안지역 확장성 연구, 한국도서연구, 35(4), 2023, pp.283-299.

리에 등재된 블루카본 즉, 맹그로브, 염습지, 해초대(Sea grass)[3] 이 주요 3가지를 인정하고 있다. 그런데, 잠재적 블루카본 자원은 확대되고 있으며, 이에 블루카본 인벤토리 등록과 인벤토리 후보군 연구, 그리고 탄소 저장 및 흡수의 잠재량 파악은 지속해서 연구되어야 한다. 국내외에서도 신규 블루카본 발굴을 위한 연구가 진행 중이다(황지원 외, 2021[4]; Chi et al., 2021[5]; 김종성, 2023; 권봉오, 2023; 박경덕, 2023; 박재찬, 2023). 그러나, 정확한 산정량 등을 측정하기 위한 공간정보 기반 구축 연구는 미비한 실정이다(정지애 외, 2023)[6]. 더욱이, 블루카본과 관련하여 핵심 자원인 갯벌은 한국 서, 남해안의 갯벌 염생식물 군락과 국제적으로 그 중요성이 인정되고 있는 매우 희귀한 자연이며, 그 규모에 있어서도 세계적으로 잘 알려진 네덜란드, 독일, 덴마크가 소유한 연안 갯벌의 규모와 비슷하다[7]. 또한 염생식물들은 각기 다른 탄소 흡수능력을 보이기에 블루카본 자원량을 객관화된 정량적 산출을 위해서는 염색식물의 종을 구분할 수 있는 서식지 맵핑이 필요하다는 주장이 제기되었다[8]. 더하여 최근 블루카본 연구에서는 탄소중립 쟁점에서 블루카본이 탄소배출권의 중요한 자원이 될 수 있다고 주장한다(김두원 외, 2022)[9]. 그런데, 이러한 중요성에도 불구하고 국내에서 정량적 자료 수집은 미비한 실정이며 체계적인 데이터 구축을 위해 기초 데이터 정립이 필요하다. 이를 위해 갯벌에서의 식생지역, 비식생지역 등 토지 구분이 선행되어야 한다. 국내에서는 갯벌은 해수부에서 제공하는 연안통합지도서비스와 환경부에서 제공하는 세분류 토지피복을 활용할 수 있으나, 갯벌을 단순히 통합하여 하나의 피복으로 분류하였다. 그런데, 해외에서는 갯벌을 세분류 구분(Intertidal Zoning)하여 제시하기도 한다. Kristensen과 Rabenhorst(2015)[10]의 연구에서는 갯벌의 조간대 구역(Tidal Zone)을 조간대 상부(Supratidal)와 해양지역(Marine Nearshore)으로 구분하였으며, 해양지역(Marine Nearshore)은 조간대(Intertidal), 얕은 조수대(shallow subtidal), 깊은 조수대(deep subtidal)로 구분하였고, 조간대(Intertidal)는 상부 조간대(high tide)와 하부 조간대(low tide)로 구분하였다. Zanella et al.(2018)[11]은 조간대 구조(Intertidal systems)를 개선하였으며, 이를 염생식물의 연구에 활용하기도 하였다.

이와 같이 갯벌을 구분(zoning)하는 것은 탄소중립의 쟁점에서 갯벌에서의 다양한 탄소중립 자원의 발굴과 탄소저장 능력에 대한 데이터 구축을 위한 기초 연구가 된다. 이는 강동환 외(2020)[12]의 주장과 같이 대기의 이산화탄소를 줄이기 위해 해양생태계 갯벌에서와 대기 사이에서의 이산화탄소 교환연구의 필요성을 다시 한번 제기한다. 이는 갯벌을 분류하여 분류된 구역에 탄소 호흡량의 정량적 데이터 구축이 선행되어야 함을 제시한다. 그런데, 국내에서 갯벌을 구분(zoning)하기 위한 데이터 활용이 제한적이기에 활용 가능한 데이터와 영상처리 기술을 활용하여 시도되어야 한다.

이에 본 연구에서는 LUCC(Land Use & Cover Classification)의 범주를 해양 생태계로 확대하여 새로운 분류 항목을 추가하는 기초 연구를 진행하였다. 분류 항목은 염생식물 군락(지채, 갈대), 비 식생 갯벌 조간대(intertidal), 사질성 갯벌(supratidal) 3가지로 구분(zoning)하였다. 그리고 이를 세분화하여 염생식물 군락은 지채, 갈대를 측정하였고, 비 식생 갯벌은 다시 조간대 하부(Intertidal-low), 조간대 상부(intertidal-high)로 구분하여 탄소 호흡량을 측정하였다. 그리고 위성영상 처리기술(Image Analysis for Remote Sensing)을 활용하여 이들 군락을 분류하고, 현장에서 측정된 탄소 호흡량을 대푯값으로 선정하여 분류한 영상 그리드(grid)값 속성 정보로 입력하여 탄소호흡량 주제도(Carbon Respiration Thematic Map)를 작성하였다.

이 탄소 호흡량 주제도에서는 인벤토리 후보군별로 탄소 호흡량을 Tier-3 수준의 기술을 이용하여, 지속적인 데이터 축적이 이루어질 경우 탄소 호흡량을 정량화하고 이를 예측하여 흡수량을 산정할 수 있다. 그리고 이 연구는 향후 블루카본 인벤토리 후보군들이 인벤토리에 등재될 경우, IPCC GL(Guide Lines)에서 제시된 데이터의 신뢰성과 정확성을 충족시키는 산출 근거로 활용될 수 있다. 이러한 연구의 배경으로, 본 연구의 목적은 다음과 같이 설정하였다.

첫째, 블루카본 탄소 인벤토리 후보군: 염생식물(지채, 갈대), 비 식생 갯벌 조간대(Intertidal), 사질성 갯벌(Supratidal), 총 3가지 유형으로 분류하여 탄소 호흡량을 측정하였다.

둘째, 위성영상을 활용하여 피복분류를 진행하였다.

셋째, 선정된 후보군의 탄소 호흡량을 바탕으로, 피복분류에 따른 탄소호흡량을 적용 및 산정하였다.

2. 연구 방법

본 연구는 최근 기후변화대응에 있어 블루카본 활용 쟁점을 기반으로 염생식물의 피복분류, 주제도 작성 및 탄소 호흡량을 산정하기 위함이다. 비식생 갯벌 조간대(Intertidal), 염생식물(Halophytes), 사질성 갯벌(Supratidal)을 분류하여 탄소 호흡량 측정, 피복도 분류. 그리고 탄소 호흡량을 산정하였다. 연구의 대상지는 전라남도 무안군 남성리 일대로 하였으며, 이 대상지

2) 해양수산부, 블루카본 추진전략, 2023.
3) 권봉오 외 3인, 2050 탄소중립을 위한 새로운 블루카본 후보군, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, 2021.
4) 황지원 외 3인, 2021 국내 주요 염생식물(갈대, 칠면초) 생산성 기반 블루카본 비중 고찰, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, 2021.
5) Chi, C · D Liu · Z Xie, Zonal simulations for soil organic carbon mapping in coastral wetlands, Ecological Indicators, 132(2021), 108291.
6) 정지애 외 4인, 금강 및 낙동강 하구, 연안의 블루카본 저장량 공간정보 비교, 대한원격탐사학회지 39(6-1), 2023, pp.1505-1515.
7) 이점숙, 2003, 갯벌의 염생식물, 한국과학기술단체총연합회, 과학과 기술.
8) 장민철 외 3인, 해양공간계획 적용을 위한 원격탐사 기반 갯벌 염생식물 분류 및 생태특성 분석, 한국해양환경·에너지학회지, 22(1), 2019, pp.34-46.
9) 김두원·남진보, 탄소중립 실현을 위한 탄소배출권과 블루카본의 최근 연구동향분석: 네트워크 인터페이스 및 토픽모델링분석을 중심으로 한국도서연구 34(4), 2022, pp.277-292.
10) Kristeensen, E, · M. C. Rabenhorst, Do marine rooted plants grow in sediment or soil? A critical appraisal on definitions, methodology and communication, Earth-Science Reviews, 145(2015), 2015, pp.1-8.
11) Zanella, A, C. et al., Aqueous humipedons-Tidal and subtidal humus systems and froms, Applied Soil Eecology, 122(2), 2018, pp.170-180.
12) 강동환 외 4인, 드론 관측을 통한 순천만 갯벌과 갈대밭 상부 대기의 이산화탄소 농도 분포 연구, 한국환경과학회지, 29(7), 2020, pp.703-713.

를 기반으로 2023년 12월부터 2024년 1월까지 연구를 수행하였다.

2.1 연구 방법 개요

본 연구의 탄소 호흡량 주제도 작성을 위한 탄소 호흡량 측정을 위한 피복 분류는 염생식물 비 식생 갯벌 조간대(Intertidal), 사질성 갯벌(Supratidal)로 총 3가지로 대분류하였다. 염생식물은 갯벌의 대표 염생 식물인 지채와 갈대를 선정하였고, 유력한 IPCC 블루카본 인벤토리 후보군인 비식생 갯벌은 비식생 갯벌 조간대와 사질성 갯벌로 분류하였다. 그리고 비 식생 갯벌 조간대는 조간대 상부(Intertidal-high), 조간대 하부(Intertidal-low)로 세분류하였다.

연구에 사용된 피복 분류는 <Fig. 1>과 같이 정의하고 도식화하였다. 피복 분류에 활용된 조간대 구분은 Zanella et al.(2018)[13]의 조간대 구조도(Intertidal systems)를 기초로 하여 본 연구대상지 특성을 고려하여 재구성하였다.

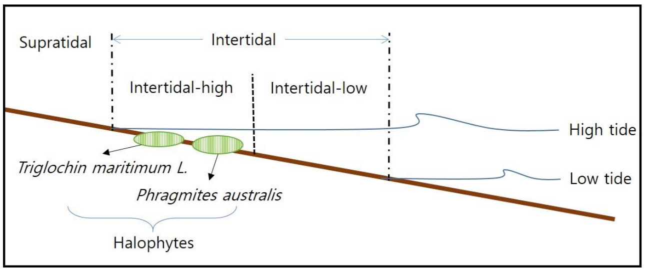

Fig. 1. Intertidal systems: Reorganized schematic representation of intertidal systems

염생식물 선정은 자연 염습지에서 자라는 염저항성이 있으며 대상지에서 자생하는 지채[14] 군락, 그리고 염저항성 식물인 갈대[15] 군락을 선정하였다. 이 연구에서 분류한 목록별 탄소 호흡량은 연구 대상지인 전라남도 무안군 청계면 남성리 일대(34°54'42.6"N 126°24'15.9"E)에서 2023년 12월에 측정하였다. 지채군락, 갈대군락의 탄소 흡수량을 3회 측정하였고, 사질성 갯벌은 1회 측정하고, 각 측정값의 평균값을 대푯값으로 산정하였다. 대상지 피복은 Sentinel-2A 영상을 이용해서 QGIS 3.28.15 버전으로 NDVI를 산출하고 대상지 현황을 반영하여 바다, 비 식생 갯벌 조간대, 염생식물 군락(지채, 갈대), 사질성 갯벌로 구분하였다. 분류된 피복도에 현장에서 측정된 탄소호흡량 대푯값을 적용하여 탄소호흡량 주제도(Thematic Map)를 완성하였다.

2.2 연구 과정 및 방법

조간대 구역(Intertidal Zoning)을 분류하고, IPCC 온실가스 인벤토리 후보군으로 기대되는 염생식물인 지채와 갈대를 선정하여 피복도 분류 항목을 선정하였다. 본 연구 대상지 조간대 구역에서 탄소호흡량을 측정하여 각각의 대푯값을 추출하였다. 위성영상(Sentinel-2)을 기초 자료로 하여 NDVI, NDWI(Moisture Index, Normalized Difference Water Index) 값을 적용하여 항목별 피복도를 분류하였다. 그리고 그 항목별 피복도 면적을 산출하였다. 이렇게 산출된 피복 분류 면적에 현장에서 측정된 단위당 탄소호흡량을 실제 계산된 면적으로 환산 적용하여 탄소호흡량을 산정하고, 그 주제도를 완성하였다.

본 연구 방법과 과정은 <Fig. 2>와 같이 진행하였다.

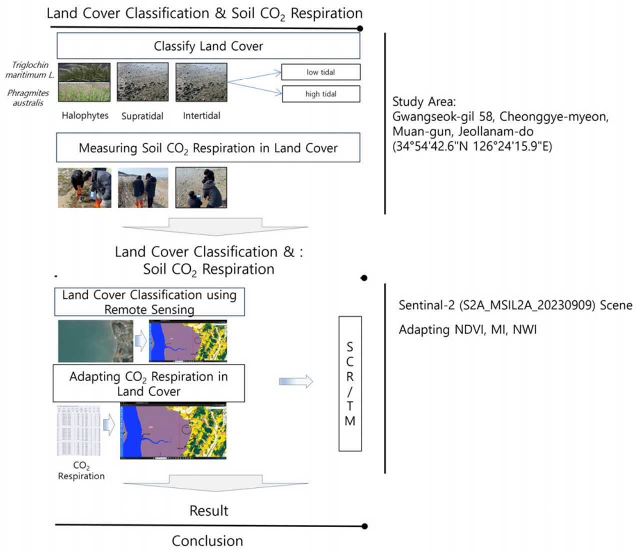

Fig. 2. Research process

(1) 연구 대상지

세계적으로 북해 연안(와덴해), 캐나다 동부 연안, 미국 동부 조지아주 연안, 아마존 구, 우리나라 서해안 갯벌이 세계 5대 갯벌(해양수산부, 2016)[16]로 인식되고 있다. 그리고 서해안 지역에 전체 갯벌 면적의 83.8%인 2,079.9km^{2}가 분포되어 있다(해양환경정보포털, 2024)[17]. 이중 전라남도 서부지역 중 영광군, 무안군, 신안군 갯벌이 전라남도 갯벌의 약 80%로 분포하고 있다. 이중 무안군 갯벌 면적이 147.6km^{2}로 전라남도 전체 면적 대비 약 14.1%이며, 신안군이 347.4km^{2}로 33.3%를 차지하고 있다(해양수산부, 2016)[18].

우리나라 서해안과 남해안 갯벌에서 블루카본 저장량은 퇴적물 내 유기탄소량과 갯벌의 면적이 지배적인 영향을 갖고 있으며, 서해안 갯벌 면적이 남해안보다 2~10배 이상 넓어서 블루카본 저장량이 높게 나타났다(박경덕 외, 2022)[19]. 이에 본 연구 대상지는 서해안 갯벌 중 가장 넓은 갯벌 면적을 보유한 신안군, 무안군 갯벌 가운데, 자생 염생식물 군락이 존재하고, 이산화탄소 측정을 위한 접근이 가능한 지역인 전라남도 무안군 남성리 일대를 연구 대상지로 선정하였다.

13) Zanella, A, C. et al., Aqueous humipedons-Tidal and subtidal humus systems and froms, Applied Soil Eecology, 122(2), 2018, pp.170-180.
14) 심현보·서석민·최병희, 경기만 연안지역의 염생식물 분포,환경생물학회지, 20(1), 2002, pp.25-34.
15) 신경미·안영희, 제부도 갯벌식생과 소산 식물상에 관한 연구, 환경환경생태학회지, 20(1), 2006, pp.52-69.
16) 국가해양생태계 종합조사-전남갯벌 현황분석 및 발전전략수립, 2016
17) 해양환경정보포털, http://www.meis.go.kr/mes/unescoinfo.do
18) 국가해양생태계 종합조사-전남갯벌 현황분석 및 발전전략수립, 2016
19) 박경덕 외 4인, 비식생 갯벌의 블루카본 저장량 산정 및 영향인자 분석, 국제환경과학지, 31(9), 2022, pp.767-779.

본 연구 대상지는 전라남도 무안군 청계면 남성리 일대(청계면 광석길 58, 34°54'42.6"N 126°24'15.9"E)이다<Fig. 3>.

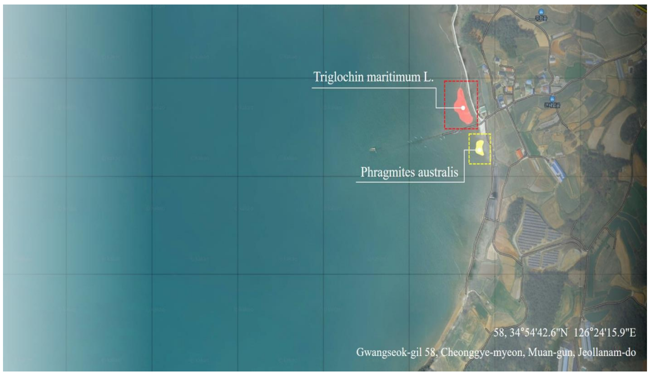

Fig. 3. Site Map: Gwangseok-gil 58, Cheonggye-myeon, Muan-gun, Jeollanam-do (earth.google.com)

이 지역 연안 갯벌은 지채, 갈대 등 국내 자생 염생식물들이 자라며, 비식생 갯벌의 토성 분포가 다양한 특성을 가진 지역이다. Sentinel-2의 영상 커버리지는 290 km^2이나 현장에서 탄소 흡수량 측정의 한계로 인해 1.2926 km^2 면적을 연구 대상지로 선정하였다.

(2) 분류 대상

① 지채 군락

지채(*Triglochin maritimum L.*)는 바닷가 갯벌에서 자라는 여러해살이풀로 우리나라 서해안, 서남해안에 나며 북반구 온대, 한대 지역에 분포하고, 많은 수염뿌리(국립생물자원관, 2024)[20]가 나며, 갯벌 토층에 조밀하게 분포하는 특징이 있다. 뿌리의 길이 밀도와 뿌리 양은 토양 이산화탄소 호흡량에 영향을 준다(Kochiieru 외, 2023)[21]. 지채 뿌리의 조밀한 형상이 탄소 흡수원으로의 가능성에 무게를 둔다.

② 갈대 군락

갈대(*Phragmites australis*)는 습지나 바닷가 개벌에서 자라는 벼목 벼과 여러해살이풀로, 우점하는 염습지에서는 최대 18,000Mg C km^2의 저장량을 보이며(이종민 외, 2018)[22], 한반도 갯벌 전역에 분포하는 토착종 염생식물이고 탄소 흡수원으로 잠재가치가 기대되는 식물이다.

③ 비식생 갯벌

현재 IPCC 온실가스 인벤토리에 등재된 해양생태계의 탄소 흡수원인 블루카본은 맹그로브, 염습지, 해초대로 한정되어 있고, 육상 생태계의 탄소 흡수원인 그린카본은 산림과 초지만 인정받고 있다. 그리고 우리나라 블루카본 후보군인 비식생 갯벌은 새로운 감축원으로 주목받고 있다(권봉오 외, 2021)[23]. 우리나라는 서해안 2,079.9km^2, 남해안 402.1km^2로 전국 갯벌 면적은 2,482km^2 (해양환경정보포털, 2024)[24]로 풍부한 탄소 흡수원 잠재 자원을 보유하고 있다. 비식생 갯벌과 같은 잠재적 블루카본 온실가스 감축원으로 인정받으려면, 그 근거를 제시하는 것이 중요하다(윤소라, 2023)[25]. 본 연구에서는 IPCC 가이드라인(GL, Guide Lines)에서 제시하는 Tier-3 수준의 공간 정보 기술(위성영상을 활용한 면적 산출)을 활용하여 근거를 제시한다. 그리고 새로운 블루카본 후보군으로 모색되는 비식생 갯벌을 Zanella et al.(2018) 연구의 Intertidal systems 모델에서 제시된 비 식생 갯벌 조간대 구역(Intertidal zoning)을 구분하여 분류하고, 각 구역별 탄소 호흡량을 측정하였다.

(3) 탄소 호흡량 측정

본 연구에서 토양 호흡량 측정 장비는 EGM-5 CO_2 가스 분석기, SRC-2 토양호흡 챔버(Table 1), 토양 수분 및 토양 온도 센서(Stevens Hydra Probe II- 물 모니터링 시스템 등을 이용하였다(Table 2). 호흡량 계산은 CO_2 측정 센서가 부착된 SRC-2 챔버(chamber)를 보조 측정 깃(collar)에 장착한 상태에서 60초 동안 1초 간격의 시간 변화에 따른 CO_2 호흡량을 측정하였다. 측정된 값 중 평균 임계값 근처의 값들을 평균 계상하여 결과 값을 도출했다. 탄소 호흡량 측정값의 신뢰도를 위하여 2023년 12월부터 2024년 1월 초까지 군락별 측정은 3회 반복 측정하고, 그 평균치를 계상하여 대푯값을 습득하였다. CO_2 유출 측정을 위한 단위 환산은 아래와 같이 진행하였다(EGM 5 Version 1.09, 2021)[26].

$$F_{CO_2}(gm^{-2}hr^{-1}) = dC/dT\,\mu mols/mols \times P/1013 \times 273/273+Tair \times 44.009g/22.414L \times Vm^3/Am^2 \times mol/umol \times 3600s/hr \times 10^3 L/m^3$$

dC/dT	:	전열 또는 2차식과 HOBO 상의식
$P/1013$	:	EGM-5에 의한 mbar로 측정된 P의 기압에 대한보정
$273/273+Tair$	:	℃센서를 사용자가 입력한 Tair로 공기온도보정
44.009/22.414L	:	STP에서 물부피의 이상기체상수
Vm^3/Am^2	:	월별 부착된 토양표면적

Table 1. Specification of EGM-5(Portable CO_2 Gas Analyzer), SRC-2

Instrument	Specification
	■ High precision, compact, non-dispersive infrared gas analyzer
	■ Accuracy:<1% over calibrated Co^2 range
	■ Co^2 ranges up to 100000ppm(10%)
	■ SRC-2 Soil Respiration Chamber
	:150 mm(Height) * 100 mm(Diameter), 1147ml, 78Cm^2

20) 국립생물자원관, http://species.nibr.go.kr/species/speciesDetail.do?ktsn=120000064226

21) Kochiieru, M. 외 3명, Trend for Soil Efflux in Grassland and Forest Land in Relation with Meteorological Conditions and Root Parameters, Sustainability, 15(9), 2023, 7193

22) 이종민 외 4명, 서남해안 갯벌 및 염습지 퇴적물의 잠재적 탄소저장량, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, 2019.

23) 권봉오 외 3명, 2050 탄소중립을 위한 새로운 블루카본 후보군, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, 2021.

24) 해양환경정보포털, https://www.meis.go.kr/portal/main.do

25) 윤소라, 연안 및 해양에서의 자연기반해법으로서 국내 블루카본 정책에 대한 검토, 환경법과 정책, 제31권 3호, 2023.

26) EGM-5 Version 1.09, 2021

Table 2. Specification of Stevens Hydra Probe II

Instrument	Specification
	■ Soil Moisture Range
	: 0~100%(dry to fully saturated)Accuracy:<1% over calibrated CO_2 range
	■ Soil Temperature Range
	: -10~+55℃

(4) 위성영상자료를 이용한 갯벌 피복분류

① 위성영상

경제적 비용과 효율성을 제외할 경우, 고해상도, 초고해상도 광학영상 및 항공기 탑재 LiDAR의 불확실성이 가장 낮고, 중해상도 광학 영상의 경우 높은 불확실성을 가지며, 현장조사를 통한 탄소 축적량 측정방법이 가장 정확한 방법이라고 한다. 하지만 각 연구의 특성을 고려한 원격탐사 기술 선택이 필요하다(박태진 외, 2011)[27]. 본 연구에서는 오픈소스 위성 영상들 중 비교적 고해상도급인 공간해상도 10m급 Sentinel-2 영상을 사용했고 <Table 3>, 이 영상의 13개 밴드들 중에 Band-2, 3, 4, 8, 11번 밴드를 활용하였다<Table 4>.

Table 3. Key Characteristics, Sentinel-2

Instrument	Specification
	■ Multi-spectral data with 13 bands in the visible, near infrared, and short wave infrared part of the spectrum
	■ Systematic global coverage of land surfaces from 56° S to 84° N, coastal waters, and all of the Mediterranean Sea
	■ Revisiting every 10 days under the same viewing angles. At high latitudes, Sentinel-2 swath overlap and some regions will be observed twice or more every 10 days, but with different viewing angles.
	■ Spatial resolution of 10 m, 20 m and 60 m
	■ 290 km field of view

Source: https://en.wikipedia.org/wiki/Sentinel-2#Overview

Table 4. Specification of Sentinel-2

Bands	Sentinel-2A*		Spatial resolution**
	Central wavelength	Bandwidth	
Band 2	492.4	66	10
Band 3	559.8	36	10
Band 4	664.6	31	10
Band 8	832.8	106	10
Band 11	1,613.7	91	20

Note: units *: mm, **: m / Band 2 – Blue, Band 3 – Green, Band 4 Red, Band 8 – NIR, Band 11 – SWIR

② 구분 방법

Sentinel-2 영상은 10m급 공간 해상도를 제공하여 비 식생 갯벌에서 의 지채, 갈대 군락 구분은 어려웠으나, NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)를 활용하면 염생식물 군락지 구분은 가능하였고, 이 방법은 염생식물 군락지 분류에는 유용하다(Wu 외, 2021)[28]. 본 연구에서는 NDVI, MI(Moisture Index), NDWI(Normalized Difference Water Index)를 이용하여 염생식물 군락을 구분하였다. 전체적인 영상 분류 방법과 과정은 <Fig. 4>와 같이 영상 정보를 전처리 진행(Pre-Processing)을 선행하고, 전처리 된 영상 정보를 활용하여 NDVI, MI, NDWI를 적용하여 현장에서 분류 검증을 진행 후, 이를 피복 분류하여 완성하였다. NDVI는 적색 파장의 엽록소 흡수와 함께 근적외선 파장의 녹색 잎의 산란을 표준화하여 식생의 활력을 평가하는 지수이다[29]. MI는 잎의 수분 함량에 대한 반사율 측정값이며, NDWI는 수역의 수분 함량과 관련된 변화를 모니터링하는 데 사용된다.

Sentinel-2 밴드를 이용한 각각의 지표 산출식은 아래와 같다[30) 31)].

$$NDVI = \frac{Band8 - Band4}{Band8 + Band4}$$

$$MI = \frac{Band11}{Band8}$$

$$NDWI = \frac{Band3 - Band8}{Band3 + Band8}$$

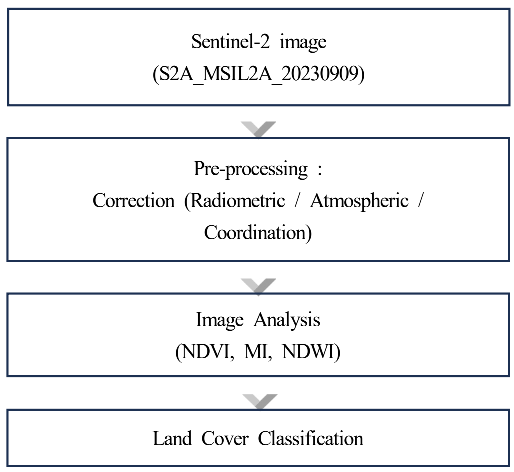

Fig. 4. Classification Methods

(5) 탄소 호흡량 산정 및 주제도 작성

분류된 피복도별로 현장에서 측정한 탄소 호흡량을 그리드 파일에 대푯값을 디지털 속성 정보(CO_2, 토양 온도, 대기 온도, 토양 수분율)를 대입시켜, 탄소 호흡량을 산정하고 주제도를 <Fig. 5>와 같은 방법으로 완성하였다.

27) 박태진 외 4명, REDD+ 모니터링 시스템 구축을 위한 원격탐사기술의 활용방안, 한국임학회지, 100(3), 2011, pp.315-326.

28) Wu et al., A Classification of Tidal FlatWetland Vegetation Combining Phenological Features with Google Earth Engine, Remote sensing, 13(3), 2021, pp.443.

29) https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/ndvi

30) https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/msi

31) https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/ndwi/

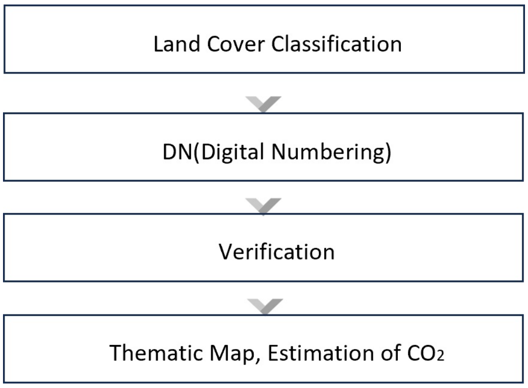

Fig. 5. The Process of Thematic Map of Carbon Respiration

3. 연구 결과

3.1 탄소 호흡량

(1) 지채/갈대 군락 탄소 호흡량

지채(*Triglochin maritimum L.*)와 갈대(*Phragmites australis*)군락의 탄소 호흡량은 평균 −0.044 g m^2 hr^{-1}로 측정되었다<Table 5, 6>.

Table 5. M5(SRC mode process 20,25 or 60,65)
Triglochin maritimum L. - carbon respiration

Mtypee	Plot No.	SRL Rate	Pressure	Tsoil	Tair	Msoil
Tag	value	(g m^2 hr^{-1})	milibars	C	C	% of Vol
M5	4	-0.044	1029.5	1.7	2.3	68.6
M5	4	-0.034	1029.6	1.8	2.3	68.4
Mean		-0.039	1029.5	1.8	2.3	68.5

Table 6. M5(SRC mode process 20,25 or 60,65)
Phragmites australis - carbon respiration

Mtypee	Plot No.	SRL Rate	Pressure	Tsoil	Tair	Msoil
Tag	value	(g m^2 hr^{-1})	milibars	C	C	% of Vol
M5	6	-0.046	1029.6	1.8	2.3	68.4
M5	6	-0.051	1029.6	1.8	2.3	68.4
Mean		-0.048	1029.6	1.8	2.3	68.4

지채의 탄소 호흡량은 −0.039 g m^2 hr^{-1}, 갈대의 탄소 호흡량은 −0.048 g m^2 hr^{-1}로 측정되었으며, 대기압(Pressure)은 평균 1029.5∼6, 토양온도(Tsoil)는 평균 1.8, Tair는 평균 2.3, 토양습도(Msoil)는 평균 68.4∼5로 측정되었다. 또한 이들은 비식생 갯벌 탄소 호흡량보다 높게 나타났으며, 토양온도(Tsoil)와 토양습도(Msoil)는 비식생 지역보다 낮게 나타났다. 대기압과 대기온도(Tair)는 의미있는 차이를 보이지 않았다. 염생식물(지채, 갈대) 군락 탄소 호흡량 대푯값은 지채와 갈대 군락의 평균값인 −0.044 g m^2 hr^{-1}를 적용하였다.

(2) 비식생 갯벌 탄소호흡량

비식생 갯벌 탄소호흡량은 조간대 하부(Intertidal − low)에서 −0.048 g m^2 hr^{-1}<Table 7>, 조간대 상부(Intertidal - high)에서 −0.040 g m^2 hr^{-1} <Table 8>, 그리고 사질성 갯벌(Supratidal)에서 0.023 g m^2 hr^{-1}으로 나타났다<Table 9>.

Table 7. M5(SRC mode process 20,25 or 60,65)
Intertidal-low - carbon respiration

Mtypee	Plot No.	SRL Rate	Pressure	Tsoil	Tair	Msoil
Tag	value	(g m^2 hr^{-1})	milibars	C	C	% of Vol
M5	1	-0.007	1029.1	2.1	2.3	81.4
M5	1	-0.089	1029.3	2.1	2.4	81.5
Mean		-0.048	1029.2	2.1	2.4	81.5

Table 8. M5(SRC mode process 20,25 or 60,65)
Inter tidal - high - carbon respiration

Mtypee	Plot No.	SRL Rate	Pressure	Tsoil	Tair	Msoil
Tag	value	(g m^2 hr^{-1})	milibars	C	C	% of Vol
M5	3	-0.035	1029.8	1.8	2.3	68.4
M5	3	-0.044	1029.8	1.8	2.3	68.4
Mean		-0.040	1029.8	1.8	2.3	68.4

Table 9. M5(SRC mode process 20,25 or 60,65)
Supratidal - carbon respiration

Mtypee	Plot No.	SRL Rate	Pressure	Tsoil	Tair	Msoil
Tag	value	(g m^2 hr^{-1})*	milibars	C	C	% of Vol
M5	5	0.0232	1029.6	1.7	2.3	59.5
M5	5	0.0234	1029.6	1.8	2.3	59.3
M5	5	0.0227	1029.5	1.7	2.3	59.2
Mean		0.023	1029.6	1.7	2.3	59.3

*0.0232, 0.0234, 0.0227을 소수점 네 번째 자리에서 반올림함.

비식생 갯벌 조간대(Intertidal) 보다 사질성 갯벌(Supratidal)에서의 토양 탄소 호흡량이 높게 측정 되었으며, 양(+)의 값을 나타냈다<Table 9>. 이는 동절기 기간에 비식생 갯벌의 활성도가 낮음에 기인한다. 다만 조간대 중에서도 조간대 하부에서 탄소 호흡량이 조간대 상부보다는 다소 낮게 측정됨을 알 수 있었다.

또한, 해수가 머무르는 시간이 길수록 토양 습도(Msoil)가 높게 나타났다. 그리고 토양 온도(Tsoil)와 토양 습도에 따라 탄소 호흡량이 상이하게 측정되었다. 이는 토양 온도와 토양 습도가 탄소 호흡량에 영향을 끼친다는 연구(정지선 외, 2014)[32]와 맥락을 같이한다. 반면, 대기압(Pressure)과 대기 온도(Tair)에서는 의미있는 차이를 발견하지 못하였다. 비식생 갯벌 조간대(Intertidal) 탄소 호흡량 대푯값은 평균값인 −0.029 g m^2 hr^{-1}, 사질성 갯벌(Supratidal) 탄소 호흡량 대푯값은 0.023 g m^2 hr^{-1}을 적용하였다.

32) 정지선 외 4명, 남한강 수변역식생의 토양탄소축적량과 토양호흡 특성, 한국환경바이오 저널, 32(4), 2014, pp.363-370.

3.2 탄소 호흡량 피복 분류

(1) 대상지 위성영상(True color image)

Fig. 6. True color image

Sentinel-2 영상의 Band-2, 3, 4 RGB를 이용하여 연구 대상지인 광석길 일대 비식생 갯벌지역과 사질성 갯벌 지역을 명확히 구분한 True Color를 적용하여 이미지를 <Fig. 6>과 같이 생성하였다. 10m급 공간 해상도를 가지는 영상으로 면적이 작은 지역을 표시하기에는 한계가 존재하지만, 실제 지형 상태를 구분하기에는 적합하였다.

(2) 대상지 피복도

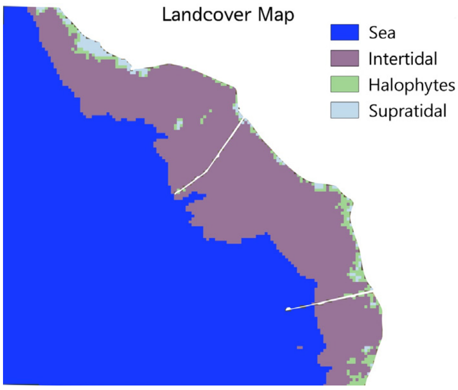

Fig. 7. Landcover Map: Landcover Classification

토지 피복도는 사질성 갯벌(Supratidal), 염생식물군락(지채, 갈대), 비식생 갯벌 조간대(Intertidal), 바다로 <Fig. 7>과 같이 분류할 수 있었다.

위성영상을 활용한 사질성 갯벌과 비식생 갯벌을 구분은 NDWI (Moisture Index, Normalized Difference Water Index)를 활용하였다. 이는 사질성 갯벌의 수분 함량이 낮아서 명확하게 분류되었다.

비식생 갯벌 내의 염생식물 군락은 일반적인 무감독 분류 (Unsupervised Classification)로는 쉽게 구분되지 않았다. 이러한 점은 저해상도를 활용한 산림 피복 분류시 에도 대두되는 유사한 문제점이다. 하지만 비식생 갯벌의 특성을 고려하여 NDVI 값을 적용해 분류할 수 있었다. 이는 염생식물 군락 특성상 초본류가 주를 이루는 광활한 갯벌에서 활용될 수 있는 새로운 분류 기법이 될 수 있다.

일반적으로 위성영상을 활용한 피복 분류시에는 공간 해상도 (Spatial Resolution)와 분광 해상도(Spectral Resolution)를 고려하여 영상을 선택한다. 하지만 우리나라 4계절 기후 특성과 갯벌의 간조, 만조대 특성을 고려하여 갯벌 지역을 분류할 때는 주기 해상도(Temporal Resolution) 확인이 필요하다. 또한 계절적 요인이 변수인 식생 분류 시에는 더욱더 그러하다.

분류 항목별 면적을 비교하면, 사질성 갯벌 면적이 0.0132km^{2}로 제일 적고, 비식생 갯벌 면적이 0.3856km^{2}로 제일 넓은 면적을 차지하였고, 염생식물 군락이 0.0251km^2 면적을 차지하였다. 이것은 무안 연안지역 일대가 기후 변화 대응으로써, 해양 탄소 흡수원인 블루카본 연구 대상지로 가치가 높음을 알 수 있었다.

3.3 탄소 호흡량 산정

(1) 염생식물(지채, 갈대) 군락, 비식생 갯벌, 사질성 갯벌 탄소 호흡량

Table 10. Adapted Value in Carbon Respiration

Classification	SRL Rate (g m^2 hr^{-1})
Intertidal	-0.029
Halophytes	-0.044
Supratidal	0.023

탄소 호흡량 산정시, 각 분류별 탄소 호흡량 대푯값은 비식생 갯벌, 염생식물 군락(지채, 갈대), 사질성 갯벌 각각, -0.029 g m^2 hr^{-1}, -0.044 g m^2 hr^{-1}, 0.023 g m^2 hr^{-1}을 적용하였다<Table 10>.

비식생 갯벌 조간대와 염생식물 군락에서 염생식물 군락이 음의 값을 나타내고, 상대적으로 작은 값을 나타내는 것은 동절기의 계절적 특성에 기인한다. 여름은 식생지역에서 양의 값이 크게 방출되는 경향과 맥락을 같이한다. 또한, 대기중의 이산화탄소를 흡수하는 양이 토양으로부터 배출하는 양보다 크다고 할 수 있다.

분류 항목별 탄소 호흡량 주제도 제작은, 피복 분류 특성상 그리드 속성 파일로, 이 파일 그리드 속성에 탄소 호흡량 대푯값을 입력하여(Digital Numbering) 제작하였다. 이렇게 제작된 주제도는 피복 분류와 동일한 주제도로 표시되나, 그리드 속성에는 현장에서 측정된 각 측정값들을 포함하고 있어서 분류 항목별 면적, 탄소 호흡량 등을 알 수 있다. 이 결과 연구대상지 분류별 면적과 탄소 호흡량은 아래 표와 같이 정리하였다 <Table 11>.

Table 11. Calculating carbon respiration in Intertidal, Halophytes and Supratidal

	Site area (km^2)	Area (km^2)	Carbon respiration (Ton km^2 hr^{-1})
Intertidal		0.3856	-0.0113
Halophytes		0.0251	-0.0011
Supratidal		0.0132	0.0003
Sum	1.2926	0.4239	-0.0121

연구대상지의 토지피복 항목별 산정된 면적은, 비식생 갯벌 조간대(Intertidal)는 0.3856km^2, 염생식물 군락은 0.0251km^2, 사질성 갯벌(Supratidal)은 0.0132km^{2}로 산출되었다. EMG-5 탄소호흡량은 g m^2 hr^{-1} 단위로 측정된다. 이렇게 측정된 탄소호흡량을 연구 대상지의 항목별로 단위면적당(km^2) 시간당(Hr) 톤(Ton)으로 환산하면, 비 식생 갯벌 조간대, 염생식물 군락(지채, 갈대), 사질성 갯벌 각각은 -0.0113 Ton km^2 hr^{-1}, -0.0011 Ton km^2 hr^{-1}, 0.0003 Ton km^2 hr^{-1}으로 계상되었다(Table 11).

연구 대상지 블루카본 인벤토리 후보군의 전체 탄소 호흡량은 -0.0121 Ton km^2 hr^{-1}로 음(-)의 값으로 산정되었다. 조간대 하부까지 현장 접근의 한계로 인하여 연구 대상지 규모가 소규모 면적이 되었고, 계절적 특성상 겨울철인 12～1월 측정값을 반영했기 때문에 전체 탄소 호흡량은 다소 낮은 값을 나타냈다. 또한 사질성 갯벌은 오히려 탄소 호흡량이 양(+)의 값을 나타냈다. 이는 사질성 갯벌의 특징을 잘 나타낸다. 그리고 비식생 갯벌과 염생식물 군락에서 탄소 호흡량 활동이 다소 낮게 진행되고 있음을 알 수 있었다. 토양 온도가 낮고, 광합성 활동이 활발히 일어나지 않는 겨울철 기간의 탄소 호흡 변화량임을 알 수 있었다.

위성영상 피복 분류를 활용하여 연구 대상지 현장에서 직접 측정한 탄소 호흡량을 단위 면적당 호흡량으로 환산하고, 해당 면적을 적용하여 정량적 산출을 할 수 있었다. 이러한 연구 결과는 탄소 흡수량 측정 기술 고도화를 위한 기초 연구로 발전시킬 수 있을 것이다. 또한 데이터의 신뢰성과 일관성을 높이기 위해서는 연간 및 시계열 단위로 탄소 호흡량을 측정해야 하고, 고해상도·초분광 위성영상을 이용한 토지 피복 분류, 그리고 대기 온도, 토양 온도와 광합성량, 엽록소 변화량 등을 함께 측정한 연구 분석이 필요하다.

4. 결론 및 제언

본 연구 결과로는 첫째, 식생지역인 지채 및 갈대 군락에서의 탄소호흡량이 비식생 지역보다 적게 나타났다. 또한 토양 온도(Msoi)값이 낮을수록 탄소 호흡량이 낮게 측정되었다. 둘째, 대상지 위성영상을 Sentinel-2 영상의 Band-2, 3, 4 RGB를 이용하여 피복도를 분류하였다. 피복도는 사질성 갯벌(Supratidal), 염생식물 군락(지채, 갈대), 비식생 갯벌 조간대(Intertidal), 바다로 분류할 수 있었다. 셋째, 염생식물 군락(지채, 갈대), 비식생 갯벌 조간대, 사질성 갯벌 탄소 호흡량을 해당 면적에 적용한 연구 대상지내의 블루카본 전체 탄소 호흡량은 -0.0121 Ton km^2 hr^{-1}, 비식생 갯벌 조간대는 -0.0113 Ton km^2 hr^{-1}, 염생식물 군락은 -0.0011 Ton km^2 hr^{-1}, 사질성 갯벌 호흡량은 0.0003 Ton km^2 hr^{-1}으로 계상되었다.

(1) 연구의 의의

본 연구는 블루카본 기반으로 정량적 순 탄소 저장량을 산출하는 기초 연구이며, 다음과 같은 의의를 가진다. 첫째, 블루카본 후보군이 될 수 있는 염생식물, 비식생 갯벌을 대상으로 IPCC에서 제시하는 Tier-3 기술을 적용하여 순 탄소 저장량을 산출하고, 해당 지역의 순 탄소 저장량의 경제적 가치를 인정하기 위한 차기 연구의 기초 연구로 의미가 있다. 이는 향후 국가간 탄소 크레딧 시장에서 거래되는 탄소배출권 대응에도 기여한다. 둘째, AFPLU 분류 기준만으로 토지이용(Land Use)별 순 탄소 저장량 산출은 데이터 추출의 정확성과 신뢰성에 다소 문제점이 있다는 인식하에 위성영상을 이용한 토지 피복 분류(Land Cover Classification) 기술을 활용하여 염생 식물 군락 주제도 작성은 의미가 있다. 셋째, 원격탐사 기술을 활용하여 블루카본 인벤토리 후보군을 피복 분류 한 점, 그리고 광범위하고 접근 한계를 갖는 해양 생태계 특성을 고려하면, 저비용으로 탄소 호흡량을 측정하여 연구 대상지의 전체 탄소 호흡량을 산정하는 기술 개발을 시도 한 점에는 의미가 있다.

(2) 연구의 한계 및 제언

상기에 제시된 연구의 의의임에도 불구하고, 본 연구의 한계점으로는 첫째, 탄소 호흡량은 연간 측정값을 기반으로 산출하여야 하나, 동절기인 12월, 1월 데이터라는 제한된 측정값으로 항목별 호흡량의 대푯값으로 활용하기에는 완전성과 적절성의 요건에는 미흡하고, 둘째, 위성영상을 활용한 피복 분류 결과와 분류된 결과를 실제 현장에서 측정한 측정값과 비교 분석하여 피복 분류 검증의 신뢰성을 높여야 하나, 현장 분류 검증을 GPS 좌표 및 육안 관찰만으로 실행한 것 점, 셋째, 초고해상도와 초분광 스펙트럼 위성영상을 활용한 피복 분류를 실시하여야 하나, 위성영상 기초 데이터 수집의 한계로 인해 오픈소스인 중 해상도급 위성영상만을 연구에 활용한 점 또한 연구의 한계로 남는다.

본 연구에서 측정된 탄소 호흡량은 연간 측정값을 기반으로 산출하여야 하고, 동절기에 측정된 데이터값을 대푯값으로 활용한 점은 미흡한 부분이 있으나, 계절적으로 동절기 측정값은 다른 계절에서의 광합성 활동을 고려할 때, 각 항목별 측정치의 기초 값으로 활용될 수 있다는 점에서는 의미를 가진다.

이와 같이 본 연구의 한계를 적시하며, 차기 유사 연구 방향의 개선점을 제시하면, 첫째, 향후 고해상도 및 초분광 영상을 활용한 신뢰성 높은 영상처리 방법을 연구 개발하고, 둘째, 지채, 갈대 이외에 국내 갯벌 및 연안에 서식하는 토종 염생식물을 확대 조사하고, 셋째, 이를 활용하여 블루카본 기반 인벤토리 후보군을 발굴하여 탄소 흡수원으로 활용될 수 있는 연구가 필요하다.

(3) 연구의 시사

우리나라 서남해안에 인접하는 농어촌의 지리적 특성상 많은 면적을 차지하는 식생 및 비식생 갯벌은 향후 탄소배출권(carbon credit) 및 카본상쇄(carbon off-set)가 쟁점으로 떠오를 시, 기후변화대응의 수단인 탄소 흡수원으로써의 무한 잠재력이 증명되었고, 이 연구 결과로 해당 지역의 사회적·경제적·환경적 가치 상승으로 주목받을 것을 기대한다.

참고문헌

1. 강동환 외 4인, 드론 관측을 통한 순천만 갯벌과 갈대밭 상부 대기의 이산화탄소 농도 분포 연구, 한국환경과학회지, 29(7), 2020.
2. 권봉오 외 3인, 2050 탄소중립을 위한 새로운 블루카본 후보군, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, 2021.
3. 김두원, 남진보, 탄소중립 실현을 위한 탄소배출권과 블루카본의 최근 연구동향분석: 네트워크 인터페이스 및 토픽모델링분석을 중심으로. 한국도서연구, 34(4), 2022.
4. 박경덕 외 4인, 비식생 갯벌의 블루카본 저장량 산정 및 영향인자 분석, 한국환경과학회지, 31(9), 2022.
5. 박재찬 외 6인, 당종려(Trachycapus fortunei)의 염분 저항성 생육특징과 연안지역 확장성 연구, 한국도서연구, 35(4), 2023.
6. 박태진 외 4인, REDD+ 모니터링 시스템 구축을 위한 원격탐사기술의 활용방안, 한국임학학회지, 100(3), 2011.
7. 신경미, 안영희, 제부도 갯벌식생과 소산 식물상에 관한 연구, 한국환경생태학회지, 20(1), 2006.
8. 심현보, 서석민, 최병희, 경기만 연안지역의 염생식물 분포, 환경생물학회지, 20(1), 2002.
9. 이점숙, 갯벌의 염생식물, 과학과 기술, 9, 2003.
10. 이종민 외 4명, 서남해안 갯벌 및 염습지 퇴적물의 잠재적 탄소저장량, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, 2019.
11. 윤소라, 연안 및 해양에서의 자연기반해법으로서 국내 블루카본 정책에 대한 검토, 환경법과 정책, 31(3), 2023.
12. 장민철 외 3인, 해양공간계획 적용을 위한 원격탐사 기반 갯벌 염생식물 분류 및 생태특성 분석, 한국해양환경·에너지학회지, 22(1), 2019.
13. 정지선 외 4명, 남한강 수변역식생의 토양탄소축적량과 토양호흡 특성, 한국환경바이오저널, 32(4), 2014.
14. 정지애 외 4인, 금강 및 낙동강 하구, 연안의 블루카본 저장량 공간정보 비교, 원격탐사학회지, 39(6-1), 2023.
15. 해양수산부, 국가해양생태계 종합조사-2016 조사연보, 전남 갯벌 현황 분석 및 발전 전략수립, 2016.
16. 해양수산부, 블루카본 추진전략, 2023.
17. 해양환경정보포털, http://www.meis.go.kr/mes/unescoinfo.do
18. 황지원 외 3인, 국내 주요 염생식물(갈대, 칠면초) 생산성 기반 블루카본 비중 고찰, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, 2021.
19. Chi, Y., Liu, D., & Xie, Z., Zonal simulations for soil organic carbon mapping in coastral wetlands, Ecological Indicators, 132, 2021.
20. EGM-5 Version 1.09, 2021.
21. Kristeensen, E., & Rabenhorst, M. C., Do marine rooted plants grow in sediment or soil? A critical appraisal on definitions, methodology and communication, Earth-Science Reviews, 145, 2015.
22. Mykola, K., et al., Trend for Soil Efflux in Grassland and Forest Land in Relation with Meteorological Conditions and Root Parameters, Sustainability, 15(9), 2023.
23. Wu, N. R., et al., A Classification of Tidal FlatWetland Vegetation Combining Phenological Features with Google Earth Engine, Remote Sensing, 13(3), 2021.
24. Zanella, A., et al., Aqueous humipedons-tidal and subtidal humus systems and froms, Applied Soil Ecology, 122, 2018.
25. http://species.nibr.go.kr/species/speciesDetail.do?ktsn=120000064226#; 국립생물자원관(2013), 한반도 생물자원포털.
26. https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/msi
27. https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/ndvi
28. https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/ndwi

접 수 일 자 : 2024. 01. 31
초 심 완 료 일 자 : 2024. 02. 15
재심(1차)완료일자 : 2024. 06. 24
재심(2차)완료일자 : 2024. 07. 30
게 재 확 정 일 자 : 2024. 07. 30