

한강권역 내륙습지 토양의 이화학적 특성 및 크리깅 기법을 활용한 탄소 저장량 추정

나현주* · 양안희* · 이두희** · 이정관** · 임정철*** · 이종명**** · 전진명***** · 이계한***** · 김현준*****†

*전남대학교 임학과 석사과정, **전남대학교 임학과 박사과정, ***국립생태원 탄소흡수연구팀 팀장, ****(주)산림정보 산림환경정보팀 이사, *****(주)우림앤알 FR사업본부 부장, *****전남대학교 산림자원학과 교수, *****전남대학교 산림자원학과 부교수

Physicochemical properties of inland wetland soils in the Han River basin and estimation of carbon storage using the kriging method

Na, Hyeon-Ju* · Yang, An-Hee* · Lee, Du-Hee** · Lee, Jeong-Gwan** · Lim, Jeong-Cheol*** · Lee, JongMyoung**** · Jeon, JinMyeong***** · Lee, Kye-Han***** and Kim, Hyun-Jun*****†

*Master's Program, Department of Forest Resources, Chonnam National University, Gwangju, Korea

**Ph.D Program, Depart of Forest Resources, Chonnam National University, Gwangju, Korea

***Team Leader, Carbon Absorption Research Team, National Institute of Ecology, Seocheon, Korea

****Director, Forest Environmental Information Team, Forest Information Co., Ltd, Guri, Korea

*****Department Head, FR Business Division, Woorimnr Co., Ltd, Seoul, Korea

*****Professor, Department of Forest Resources, Chonnam National University, Gwangju, Korea

*****Associate Professor, Department of Forest Resources, Chonnam National University, Gwangju, Korea

ABSTRACT

As global efforts toward carbon neutrality accelerate, awareness of the critical role of natural ecosystems as carbon sinks has increased. Wetlands, although they cover only 5 - 8% of the Earth's land surface, are estimated to store approximately 20 - 30% of global soil carbon, making them highly effective carbon reservoirs. Despite their importance, inland wetlands in South Korea remain underrepresented in national carbon assessments. This study quantified soil carbon storage in the inland wetlands of the Han River Basin. A total of 250 sampling sites were selected using conditional Latin hypercube sampling, and soil samples were collected across four depth intervals(0 - 10 cm, 10 - 30 cm, 30 - 60 cm, 60 - 100 cm). The physicochemical properties of soils were analyzed by depth to support accurate estimation. The relationships among soil physicochemical properties and carbon storage were examined, and the spatial distribution of soil carbon stocks was predicted using ordinary kriging. Results demonstrated variations in carbon storage likely associated with differences in soil conditions and vegetation cover. Prior studies suggested that long-term ecosystem restoration and vegetation management significantly enhance the carbon sequestration potential of wetland soils. The findings of this study provide essential baseline data for improving the accuracy of South Korea's national greenhouse gas inventory and for the development of country-specific emission factors. Applying this methodology to other major watersheds, such as the Yeongsan and Nakdong Rivers, may further support systematic assessment and management of carbon storage across Korea's inland wetland ecosystems.

Key words : Soil Carbon Storage, Soil Depth Layering, Geospatial Estimation, Greenhouse Gas Inventory

†Corresponding author : hjkim0837@jnu.ac.kr (61186, 77 Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju, Korea. Tel. +82-62-530-2082)

ORCID 나현주 0009-0008-0719-489X
양안희 0009-0008-1207-6092
이두희 0009-0002-8744-7245
이정관 0000-0002-6491-3947
임정철 0000-0002-2009-4230

이종명 0009-0000-2569-2419
전진명 0009-0006-3842-2956
이계한 0000-0003-4470-1290
김현준 0000-0002-7373-1643

1. 서론

최근 기후변화가 가속화되면서 전 세계적으로 탄소중립 실현을 위한 정책적 노력이 강화되고 있다. 우리나라도 2030년까지 2018년 대비 온실가스 배출량을 40% 감축하겠다는 국가 감축 목표를 수립하였다(Ministry of Environment, 2021). 이에 따라 탄소흡수원의 확보와 체계적인 관리가 중요한 기후 대응 전략으로 부상하고 있다. 특히, 자연 생태계는 대기 중 이산화탄소를 흡수하고, 토양 내 탄소를 장기적으로 저장하는 기능을 갖추고 있어 주요 탄소 저장고로 인식되고 있다(Temmink et al., 2022). 이 중 습지는 단위면적당 탄소 저장 능력이 가장 우수한 생태계 중 하나로, 전 세계 육상 면적의 5~8%에 불과하지만, 전체 토양 탄소의 약 20~30%를 저장하고 있다(Mitsch and Gosselink, 2015; Nahlik and Fennessy, 2016). IPCC는 토양 탄소 저장 및 배출량의 정밀 산정의 중요성을 강조하며, 국가 차원의 토양 지도 구축과 유형별 국가 계수 개발을 통한 온실가스 인벤토리 정교화를 권고하고 있다(IPCC, 2006).

여러 선진국에서는 이미 습지를 독립적인 토지이용 유형으로 분류하여, 온실가스 인벤토리 산정 방법에 적용하고 있다. 미국, 캐나다, 독일, 노르웨이 등은 IPCC 가이드 라인 Tier 2 이상의 산정 방법을 개발하여 자국 내 습지의 탄소 저장 기여도를 체계적으로 정량화하여 습지를 체계적으로 평가하고 있다(Lee et al., 2023). 반면, 국내에서는 습지의 탄소 저장 기능에 대한 연구가 부족하다. 특히, 계류지와 저류지로 구성된 내륙습지는 저류지의 메탄(CH₄)에 대한 연구만 진행된 사례가 있어 습지를 온실가스 배출원으로 분류하고 있다(Lee et al., 2023). 따라서 국내 내륙습지의 탄소 저장 능력을 정량화하고 기초자료를 확보하는 것은 향후 국가 온실가스 인벤토리 고도화를 위한 선결 과제이다.

습지의 탄소 저장 기능 평가 방법을 Tier 2 수준으로 고도화하기 위해서는 단순한 면적 기반의 접근을 넘어 토양 특성과 같은 근본적인 저장 메커니즘에 대한 이해가 선행되어야 한다(Bridgham et al., 2006). 토양의 탄소 저장 능력은 식생 및 미생물 군집의 생물학적 활동뿐 아니라, 토양의 이화학적 특성까지 밀접한 관련이 있다(Solly et al., 2020). 특히, 습지와 같이 수문학적 요인이 강하게 작용하는 생태계에서는 토양의 입경분포, pH, 양이온치환용량(CEC) 등 이화학적 특성이 유기물의 분해 및 축적 과정에 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Liu et al.,

2022). 한편, 단일 지점의 분석만으로는 습지 전체의 탄소 저장량을 대표하기 어렵다. 이에 따라 습지 탄소 저장량을 보다 정밀하게 파악하기 위해서는 단순한 평균값 계산을 넘어 지점 간 공간적 상관성과 분포 경향성을 반영한 예측 기법의 활용이 필요하다. 이러한 맥락에서, 생태계 공간 자료 분석에 널리 활용되는 Ordinary Kriging 기법은 주목할 만한 방법론으로 제시되고 있다. 이 기법은 주변 지점과의 통계적 상관관계를 바탕으로 미측정 지점의 값을 예측하는 보간법으로, 복잡하고 불균질한 공간 분포 특성을 지닌 생태계의 탄소 저장량을 정량화하는데 효과적인 도구로 평가되고 있다(Cressie, 1988). 여러 선행연구에서는 본 기법을 활용하여 산림지와 습지의 공간적 탄소 저장량 변이를 정량적으로 해석하고 지도화하였다(Beltrán-Dávalos et al., 2022; Park et al., 2012; Zhang et al., 2020).

따라서, 본 연구는 국내 내륙습지의 토양 탄소 저장 능력을 정량화하고자 진행되었다. (1) 한강권역 내륙습지를 대상으로 토양의 이화학적 특성 분석, (2) 탄소 저장량과 이화학적 인자 간의 상관분석을 통해 연관성을 파악하고, (3) Ordinary Kriging 기법을 활용한 연구 대상지 전체의 토양 탄소 저장량을 공간적으로 추정하는 3단계로 구성되었다. 본 연구의 결과는 향후 국내 내륙습지에 대한 온실가스 인벤토리 산정을 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구 대상지 및 시료 채취

국내 내륙습지는 한강, 영산강·금강, 낙동강의 3대 수계 권역으로 나뉘며, 본 연구는 한강권역을 대상으로 수행되었다(Fig. 1(a)). 한강권역은 경기도, 강원도, 충청남북도 일부에 걸쳐 분포한다. 연구 대상지 내에서 조건부 라틴 하이퍼 큐브 표본 추출 방법(Conditional Latin Hypercube Sampling, cLHS)을 통해 총 250개 조사지를 선정하였다. cLHS는 관심 변수들의 분포와 상호 관계를 고려하여 표본 지점을 공간적으로 균등하고 통계적으로 대표성 있게 배치할 수 있는 확률 기반의 표본 추출 방법이다(McKay et al., 1979). 각 조사지는 중심을 기준으로 정북(0°), 120°, 240°의 3방향으로 11.3 m 위치에 부표본점을 설정하였다(Fig. 1(b)). 현장조사 및 토양시료 채취는 위 4개의 표본점 중에서 중심표본점을 포함한 3개의 표본점에서 진행되었다.

현장 조사는 2024년 4월부터 2024년 8월까지 실시되었

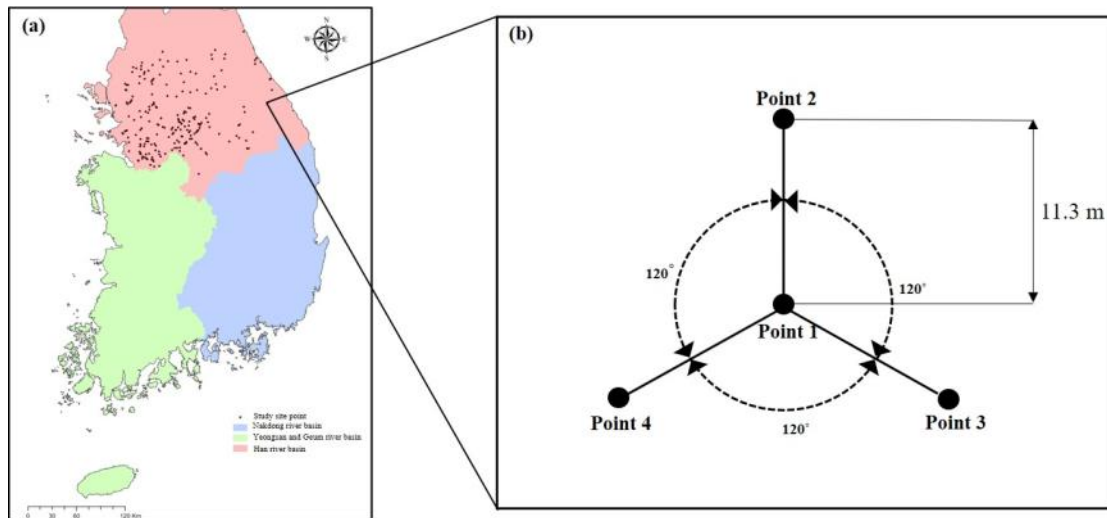


Fig. 1. Location of study sites (a) and sampling points (b)

다. 토양 시료는 원통형 토양시료채취기(400 cm³)를 이용하여 0 ~ 10 cm, 10 ~ 30 cm, 30 ~ 60 cm, 60 ~ 100 cm 깊이에서 토양 시료를 채취하였다. 단, 지하수가 올라와서 채취가 불가능한 경우 채취가 가능한 깊이까지 토양 시료를 채취하였다. 모든 시료는 지퍼백에 밀봉하여 실험실로 운반하였다. 토양 시료는 0 ~ 10 cm에서 750점, 10 ~ 30 cm에서 748점, 30 ~ 60 cm에서 649점, 60 ~ 100 cm에서 364점을 채취하였다.

2.2. 토양의 이화학적 특성 분석

토양 시료는 75℃ 오븐에서 72시간 건조 후 무게를 측정하였다. 2 mm체로 걸러 석력과 세토로 분리하여 석력 함량을 산출하였다. 이후 세토의 건중량과 부피비를 이용하여 용적밀도를 계산하였다. 토양 입경 분포는 비중계법으로 모래, 미사, 점토의 함량을 측정하여 USDA 토양 입경 분포 기준에 따라 토성을 구분하였다(Kalra and Maynard, 1991). 세토 중 일부는 화학성 분석용 시료로 조제하였다. CEC는 초산완충용액(pH 2.31)을 사용하여 세토와 초산완충용액을 1:10 비율로 혼합한 후, pH meter (pH meter, Sartorius, Germany)로 base pH를 측정하여 brown법으로 CEC를 산출하였다. pH와 전기전도도(EC)는 세토:증류수(1:5) 혼합액을 사용하여 pH meter (pH meter, Sartorius, Germany)와 EC meter (EC meter, Hanna instruments, Korea)로 각각 측정하였다. 탄소와 질소 농도는 대용량 원소분석기(Max Elemental Analyzer, Elementar Analysensysteme GmbH, Germany)로 측정하였다. 토양의

탄소 저장량($C_{storage}$)은 토심, 용적밀도, 탄소 농도를 변수로 하는 식 (1)을 이용하여 산정하였다(IPCC, 2006).

$$C_{storage} (Mg C/ha) = \frac{Soildepth(m) \times bulk\ density(kg/m^3) \times C(\%) \times 10,000}{1,000} \quad (1)$$

2.3. 토양의 이화학성 통계 및 탄소 저장량의 추정

SAS 9.4의 일원 분산 분석을 이용하여 토심 간 토양 이화학성 차이를 분석한 후 $P < 0.05$ 수준에서 검정하였다. 토심별 유의성이 있는 경우 Duncan's multiple range test를 수행하여 각 토심간의 평균을 비교하였다($P < 0.05$). 탄소 저장량에 영향을 미치는 이화학적 인자를 선별하기 위해 0 ~ 30 cm 깊이의 토양을 대상으로 Pearson 상관분석을 실시하여, 유의한 상관관계를 보인 이화학적 인자들을 선별하였다($P < 0.05$). 선별된 인자를 대상으로 회귀분석을 통해 각 인자가 탄소 저장량에 미치는 설명력을 평가하였다. 이는 표토층(0 ~ 30 cm)이 유기물의 유입과 분해가 활발하게 이루어지는 층위로 단기적인 탄소 저장 변화에 민감하게 반응하여 토양 관리를 통해 탄소 저장 능력을 효과적으로 향상시킬 수 있는 핵심 대상이기 때문이다(Batjes, 1996).

한강권역 내륙습지 토양의 탄소 저장량의 공간적 분포를 예측하고자 ArcGIS PRO 3.2의 Geostatistics 도구를 이용하여 한강권역의 토양 탄소 저장량 추정을 위한 Ordinary Kriging을 수행하였다. 이를 위해 환경부가 제공

Table 1. Soil physical properties by depth

Depth (cm)	Coarse Fragment (%)	Bulk density (g/cm ³)	Soil particle distribution (%)			Soil texture distribution (%)								N (sites)
			Sand	Silt	Clay	Sand	Sandy loam	loamy Sand	Silty loam	Loam	Clay loam	Silt	Sandy clay loam	
0 ~ 10	12.68 ^b ±0.91	1.08 ^c ±0.01	70.51 ±1.54	22.54 ±1.30	6.95 ±0.31	33.20	26.80	19.20	14.40	6.40	0.40	0.00	0.00	250
10 ~ 30	17.11 ^a ±1.07	1.19 ^b ±0.01	73.27 ±1.51	19.97 ±1.26	6.77 ±0.31	36.40	24.40	21.60	11.20	5.60	0.40	0.40	0.00	250
30 ~ 60	17.94 ^a ±1.13	1.24 ^a ±0.01	72.23 ±1.57	20.34 ±1.31	6.93 ±0.33	34.07	26.99	20.35	11.50	6.19	0.44	0.44	0.00	226
60 ~ 100	17.75 ^a ±1.60	1.28 ^a ±0.02	74.07 ±2.32	19.62 ±1.98	6.46 ±0.50	39.72	23.40	17.73	7.80	9.93	0.00	0.71	0.71	141

하는 습지지도도를 기반으로 습지 토양 경계를 추출하였다. 거리에 따라 상관성이 급격히 감소하는 특성을 반영하기 위해 Kernel function은 지수형(Exponential)을 선택하였으며, 공간 변동성을 유연하게 설명하기 위해서 Variogram model은 Stable을 적용하였다(Isaaks and Srivastava, 1989).

3. 결과 및 고찰

3.1. 토양 탄소의 수직적 분포

3.1.1. 토양의 이화학적 특성 분석

본 연구에서 토심별 석력 함량은 0 ~ 10 cm에서 12.68±0.91%, 10 ~ 30 cm에서 17.11±1.07%, 30 ~ 60 cm에서 17.94±1.13%, 60 ~ 100 cm에서 17.75±1.60%로 나타났다(Table 1). 이와 같이 석력함량은 0 ~ 10 cm에서 다른 깊이보다 유의하게 낮았다($P < 0.05$). 이는 표토층(0 ~ 10 cm)이 풍화와 침식에 따른 활발한 입자 분해와 수계에 의해 유입된 토양 입자의 축적 때문인 것으로 판단된다(Sharmeen and Willgoose, 2006). 일반적으로 석력 함량이 증가할수록 탄소 농도는 감소하는 경향을 보이며, 이는 유기물 분해를 제한하여 탄소 저장에 부정적인 요인으로 작용하기 때문이다.

토심별 용적밀도는 0 ~ 10 cm에서 1.08±0.01 g/cm³, 10 ~ 30 cm에서 1.19±0.01 g/cm³, 30 ~ 60 cm에서 1.24±0.01 g/cm³, 60 ~ 100 cm에서 1.28±0.02 g/cm³로 나타났다(Table 1). 이는 일반적인 습지 토양의 용적밀도 범위에 해당한다(1.0 ~ 1.5 g/cm³; Reddy et al., 2013). 또한, 토심이 깊어질수록 용적밀도는 유의하게 증가하였다($P < 0.05$). 이러한 경향은 토심이 깊어질수록 유기물 함량과 생물학적 활동

이 점차 감소함에 따라 토양 입자 간 압축이 심화된 데에 기인한 것으로 판단된다(Whalley et al., 1995). 용적밀도는 토양 입자와 공극의 비율을 반영하는 물리적 특성으로, 밀도가 높을수록 뿌리 활착과 수분 이동이 제한되어 식생의 생장 및 토양 생물 활동에 영향을 미친다(Reddy et al., 2013).

토심별 모래 함량은 0 ~ 10 cm에서 70.51±1.54%, 10 ~ 30 cm에서 73.27±1.51%, 30 ~ 60 cm에서 72.23±1.57%, 60 ~ 100 cm에서 74.07±2.32%로 나타났다(Table 1). 미사 함량은 0 ~ 10 cm에서 22.54±1.30%, 10 ~ 30 cm에서 19.97±1.26%, 30 ~ 60 cm에서 20.34±1.31%, 60 ~ 100 cm에서 19.62±1.98%를 보였다. 점토 함량은 0 ~ 10 cm에서 6.95±0.31%, 10 ~ 30 cm에서 6.77±0.31%, 30 ~ 60 cm에서 6.93±0.33%, 60 ~ 100 cm에서 6.46±0.50%로 나타났다. 토심별 모래·미사·점토 함량은 유의한 차이를 보이지 않았다($P > 0.05$). 토성 분류 결과, 모든 토심에서 사토가 우세하게 분포하였으며, 그 외에 사양토, 양질사토, 미사질양토, 양토, 식양토, 미사토, 사질식양토도 분포하는 것으로 나타났다. 국내 하천 퇴적토양의 특성을 분석한 연구에서도 모래 함량이 우세하게 분포하였다(Zhang et al., 2011).

CEC는 0 ~ 10 cm에서 12.72±0.26 cmol⁺/kg, 10 ~ 30 cm에서 12.26±0.27 cmol⁺/kg, 30 ~ 60 cm에서 12.07±0.25 cmol⁺/kg, 60 ~ 100 cm에서 12.09±0.23 cmol⁺/kg로 나타났으나 유의한 차이는 없었다(Table 2; $P > 0.05$). 일반적으로 CEC는 토양 내 점토와 유기물 함량에 영향을 받아 표토에서 더 높은 값을 나타내는 경향이 있다(Brady and Weil, 2008). 그러나 본 연구에서는 토심별 점토 함량이 유사하였으며 습지는 우천시 유기물이 용탈되기 쉬운 환경적 특성을 가진다. 이러한 조건은 표토의 유기물 축적

Table 2. Soil chemical properties by depth

Depth (cm)	CEC (cmol^+/kg)	pH	EC (dS/cm)	Carbon concentration (%)	Nitrogen concentration (%)
0 ~ 10	12.72±0.26	6.56±0.03	0.61±0.02	1.14 ^a ±0.06	0.10 ^a ±0.01
10 ~ 30	12.26±0.27	6.62±0.03	0.54±0.02	0.82 ^b ±0.04	0.07 ^b ±0.00
30 ~ 60	12.07±0.25	6.62±0.03	0.54±0.03	0.70 ^b ±0.04	0.06 ^{bc} ±0.00
60 ~ 100	12.09±0.23	6.59±0.03	0.52±0.03	0.57 ^b ±0.04	0.05 ^c ±0.00

을 제한하여 토심별 CEC 값의 유의한 차이가 나타나지 않은 것으로 판단된다.

pH는 0 ~ 10 cm에서 6.56±0.03, 10 ~ 30 cm에서 6.62±0.03, 30 ~ 60 cm에서 6.59±0.03, 60 ~ 100 cm에서 6.59±0.03으로 나타났으며 이는 일반적인 습지의 pH (6.0 ~ 8.0; Seybold et al., 2002)와 유사한 값이다(Table 2). 그러나 토심별 유의한 차이는 없었다($P > 0.05$). 일반적으로 표토는 유기물 분해에 따른 산성화로 인해 pH가 감소하는 경향이 있다(Hong et al., 2019). 한편 한강권역 습지에서는 높은 수분함량과 우천시 범람 등의 영향으로 유기물 분해가 원활하지 않아 토심별로 유의한 차이가 나타나지 않은 것으로 판단된다(Zhou et al., 2019).

토심별 EC는 0 ~ 10 cm에서 0.61±0.02 dS/cm, 10 ~ 30 cm에서 0.54±0.02 dS/cm, 30 ~ 60 cm에서 0.54±0.03 dS/cm, 60 ~ 100 cm에서 0.52±0.03 dS/cm로 나타났으나 유의한 차이는 없었다(Table 2; $P > 0.05$). 이러한 결과는 CEC와 마찬가지로 점토 함량이 토심별 유의한 차이를 보이지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 일반적으로 EC와 점토 함량은 강한 상관관계를 가지며, 이는 음전하를 띠는 점토 입자가 양전하를 띤 이온을 흡착하는 성질에 기인한다(Fowler et al., 2014). 한편, 본 연구 대상지의 EC는 Yoo et al. (2022)이 제시한 내륙습지의 EC범위(1 ~ 1.3 dS/cm)보다 다소 낮은 수준이다. 이는 Yoo et al. (2022)의 연구에는 물영아리오름, 무제치늪 등 유기물이 풍부한 산지습지가 다수 포함된 반면, 본 연구 대상지의 토양은 모래 함량이 높아 투수성이 높고 이로 인해 용탈이 활발히 일어나 이온 농도가 낮아진 것으로 판단된다(Fowler et al., 2014).

토심별 탄소 함량은 0 ~ 10 cm에서 1.14±0.06%, 10 ~ 30 cm에서 0.82±0.04%, 30 ~ 60 cm에서 0.70±0.04%, 60 ~ 100 cm에서 0.57±0.04%로 나타났(Table 2). 토심별 질소 함량은 0 ~ 10 cm에서 0.10±0.01%, 10 ~ 30 cm에서 0.07±0.00, 30 ~ 60 cm에서 0.06±0.00%, 60 ~ 100 cm에서 0.05±0.00%로 나타났(Table 2). 탄소와 질소 함량 모두 토심이 깊어질수록 통계적으로 유의하게 감소하였다($P < 0.05$). 이

는 토심이 깊어질수록 유기물 함량이 감소하기 때문으로 판단된다(Lee et al., 2009). 일반적으로 유기물 함량이 높을수록 토양의 탄소와 질소 함량이 증가하는 경향이 있다(Brady and Weil, 2008). 유기물은 토양 내 탄소와 질소의 공급원으로, 지표면에서는 유기물의 공급 및 축적이 상대적으로 활발하지만, 토심이 깊어질수록 유기물과 미생물 활동이 감소하여 탄소와 질소 공급이 제한된다(Jobbágy and Jackson, 2000).

3.1.2. 토양의 이화학적 인자와 탄소 저장량 간 상관성

상관분석 결과 석력함량, 용적밀도, 모래·미사·점토 함량, CEC, EC의 인자들이 토양 탄소 저장량과 유의한 상관관계를 나타냈다(Table 3; $P < 0.05$). 석력함량은 탄소 저장량과 부의 상관관계를 보였다. 이는 석력함량이 증가하면 미세입자 기반의 무기질 토양의 공간이 줄어들어 식물 생장과 유기물 분해가 제한되기 때문으로 판단된다. 용적밀도도 탄소 저장량과 부의 상관관계를 보였으며 이는 일반적으로 탄소 함량이 높은 토양일수록 용적밀도가 낮은 특성이 반영된 결과로 해석된다(Conforti et al., 2016). 모래 함량은 탄소 저장량과 부의 상관관계를, 미사와 점토 함량은 양의 상관관계를 나타냈다. 이는 세립질 입자가 토양 내 유기물을 분해로부터 보호하는 역할을 하기 때문이다(Six et al., 2002). 미사와 점토는 표면적이 넓고 음전하를 띠어 유기물과 잘 결합하며 토양 내 미세입단 구조를 형성하여 유기물을 미생물로부터 격리시켜 유기물이 빠르게 분해되지 않고 오랜 기간 안정적으로 저장되도록 한다(Six et al., 2002). 또한 CEC와 EC는 토양 탄소 저장량과 정의 상관관계를 보였다. 이는 두 인자가 토양 내 이온 보유 특성을 나타내는 지표로 점토 함량과 유기물 함량에 의해 영향을 받기 때문으로 판단된다(Six et al., 2002). 일반적으로 CEC와 EC가 높은 토양은 탄소의 흡착과 보유 능력이 우수한 환경을 나타내며 이는 토양의 탄소 저장 능력을 증진시키는 요인으로 작용할 수 있다(Aprile and Lorandi, 2012).

Table 3. Pearson correlation coefficients between soil physicochemical properties and carbon storage

	Carbon storage	Coarse fragment	Bulk density	Sand	Silt	Clay	CEC	pH	EC
Carbon storage	1								
Coarse fragment	-0.45995***	1							
Bulk density	-0.43064***	0.13365*	1						
Sand	-0.40969***	0.51219***	-0.06110	1					
Silt	0.40161**	-0.51705***	0.06323	-0.86171***	1				
Clay	0.37582***	-0.40494***	0.04156	-0.10899	0.79646***	1			
CEC	0.45846***	-0.13056*	-0.22683**	-0.10899	0.12029	0.0416	1		
pH	-0.10705	0.02303	0.03784	-0.11949	-0.10212	-0.17474*	0.39285***	1	
EC	0.24232**	-0.19600*	-0.06540	-0.37560***	0.38096***	0.28929***	0.46771***	0.30483***	1

* Values are significant at $P < 0.05$ significant level

** Values are significant at $P < 0.01$ significant level

*** Values are significant at $P < 0.0001$ significant level

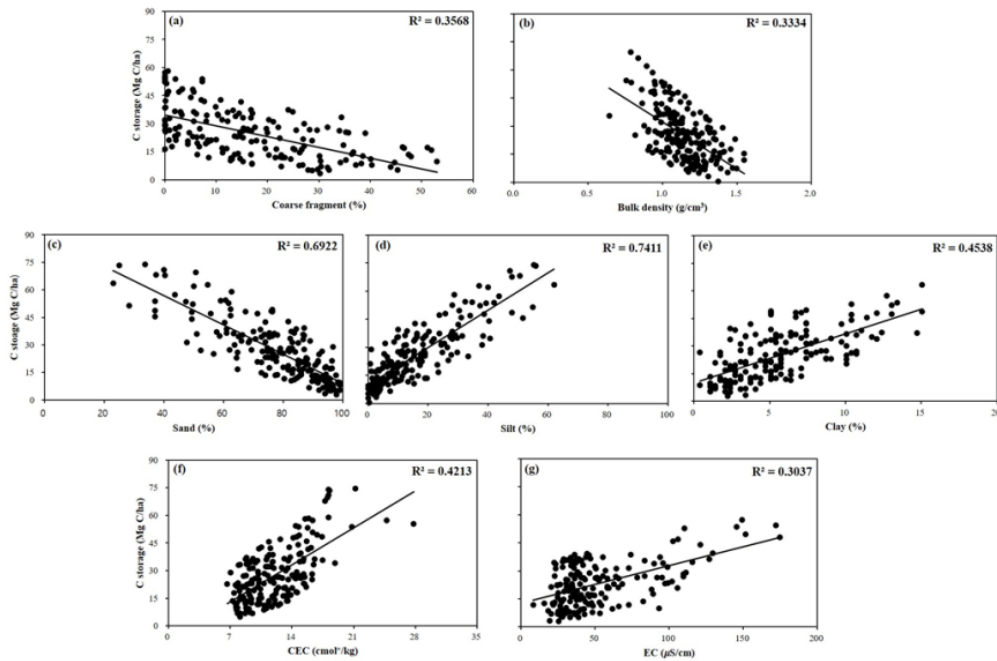


Fig. 2. Relationships between soil carbon storage in the 0 ~ 30 cm layer and selected physicochemical properties with outliers excluded. Scatter plots show the correlation between carbon storage and each soil parameter: (a) coarse fragment, (b) bulk density, (c) sand, (d) silt, (e) clay, (f) CEC, (g) EC. Regression lines and coefficients of determination (R^2) are presented to indicate the strength of association

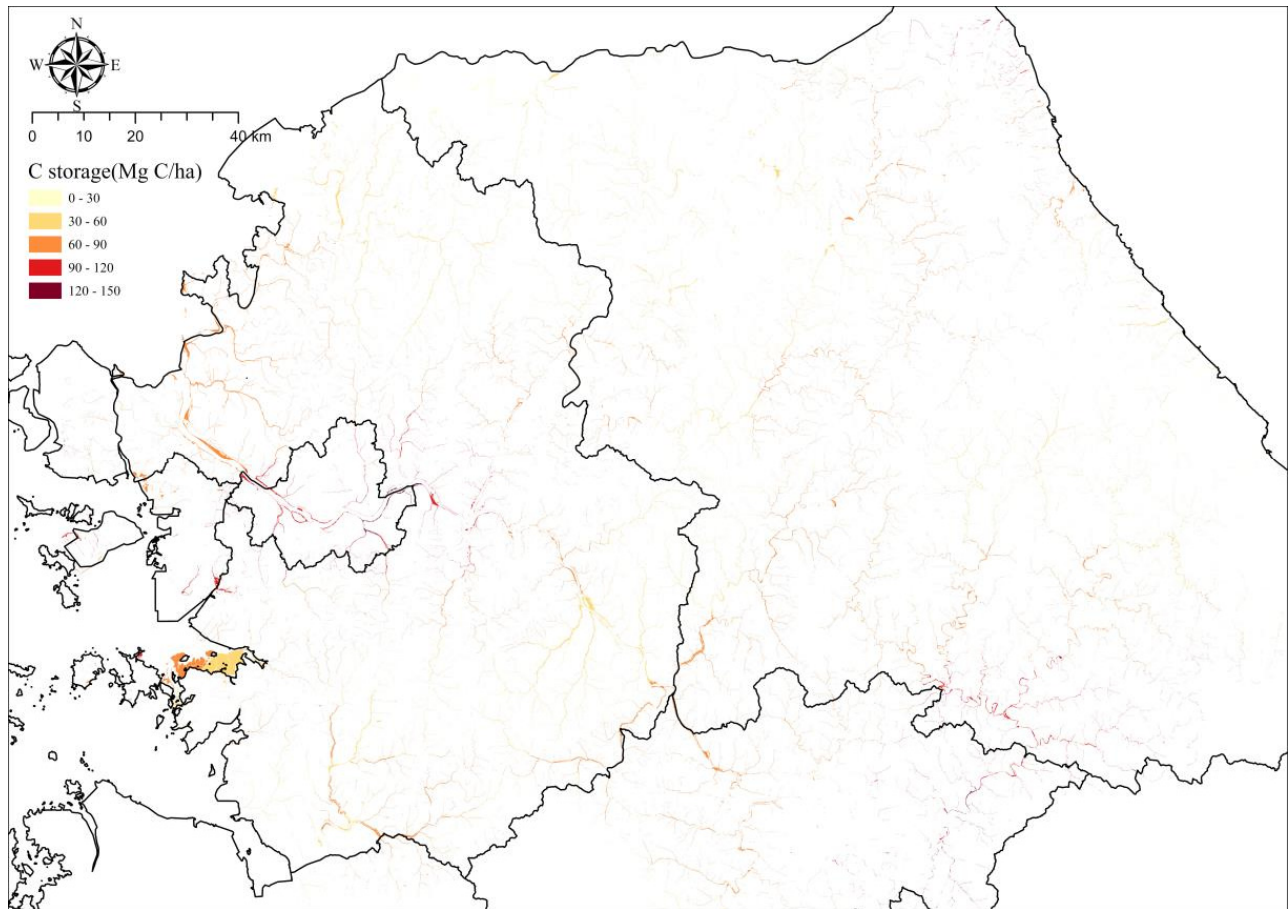


Fig. 3. Spatial distribution of soil carbon storage estimated by Ordinary Kriging

그러나 전반적으로 R^2 는 0.3 ~ 0.7 수준으로 강한 설명력을 나타내진 않았다(Fig. 2). 이는 토양 탄소 저장량이 특정 단일 인자에 의해서만 좌우되지 않고, 식생구조, 수분 상태, 토지 이용 이력 등 복합적인 요인이 작용하기 때문이다(Conforti et al., 2016).

3.2. 토양 탄소의 공간적 분포

Ordinary Kriging을 수행한 결과, 본 연구에 적용된 수계를 제외한 한강권역 내륙습지의 면적은 47,529 ha이며 총 토양 탄소 저장량은 3,176,831 Mg으로 나타났다(Fig. 3). 또한 토양 탄소 저장량은 지형 및 수문 조건에 따라 차이를 보였다. 특히 서울권역에서는 높은 탄소 저장량이 나타나는 경향을 보였다. 이는 상대적으로 계류의 폭이 넓고 유속이 느려 유기물과 토양이 퇴적되기 쉬운 환경적 특성으로 인해 탄소 저장량이 높은 것으로 판단된다. 이러한 지형은 석력함량과 용적밀도가 낮고 미사와 점토 함량이 높

은 토양 특성을 가지며, 이는 앞서 분석한 토양 인자들과 탄소 저장량 간의 상관관계 결과와도 일치한다. 반면, 강원권역은 낮은 탄소 저장량이 나타나는 경향을 보였다. 이는 산악지형이 발달되어 계류의 폭이 좁고 유속이 빨라 유기물과 토양이 유실되는 환경적 특성에 기인한 것으로 판단된다.

한편 한강권역 내륙습지 토양 탄소 저장량은 단위면적당 66.83 Mg C/ha로 추정되었으며 이는 중국 북부 하천변 습지를 대상으로 한 연구 중 전형적인 초지 지역(65.83 Mg C/ha)과 유사한 수준이다(Liu et al., 2022). 그러나 같은 연구의 높은 식생 밀도와 잘 관리된 습지에서는 최대 521.73 Mg C/ha로 본 연구 결과보다 높은 탄소 저장량을 보였다(Liu et al., 2022). 토양의 탄소 저장량은 장기적인 생태계 복원과 식생 관리에 의해 점진적으로 개선될 수 있다. 특히, 10년 이상의 생태계 복원 사업은 습지 토양의 탄소 저장량 회복에 유의미한 효과를 보인다(Xu et al., 2019). 또한 식생 관리는 탄소 흡수량과 수자원 이용 효율

을 증가시키며 생태계의 생산성과 탄소 저장 능력을 향상시킬 수 있음을 시사한다(Ma et al., 2023).

4. 결론

본 연구는 한강권역 내륙습지를 대상으로 토양의 이화학적 특성과 탄소 저장량 간의 관계를 분석하고 Ordinary kriging 기법을 활용하여 토양 탄소 저장량의 공간적 분포를 추정하였다. 그 결과 석력함량, 용적밀도, 모래·미사·점토 함량, CEC, EC가 토양 탄소 저장량과 유의한 상관관계를 보였으며 이는 토양의 이화학적 특성이 탄소 저장 능력에 영향을 미친다는 점을 시사한다. 또한 본 연구 대상지의 토양 탄소 저장량은 중국 북부의 초지형 습지와 유사한 수준을 보였으나 높은 식생 밀도로 관리된 습지와 비교했을 때는 다소 낮은 편이었다. 이는 내륙습지 토양 탄소 저장 능력이 생태계 복원 및 식생관리에 따라 개선될 수 있음을 의미한다. 본 연구는 내륙습지 토양의 탄소 저장량을 정량화하고 공간적 분포 특성을 제시함으로써 국가 온실가스 인벤토리의 정밀화와 유형별 국가 계수 개발을 위한 기초자료로 활용될 수 있다. 향후 연구에서는 고도, 식생 등 다양한 변수를 고려한 복합 분석을 적용하면 토양 탄소 저장량의 정확도를 높일 수 있을 것이다. 더불어 영산강, 낙동강 등 국내 주요 수계의 내륙습지에 대한 추가 연구와 장기적인 모니터링을 통한 탄소 저장량 추적 및 예측 연구가 수행된다면, 국내 내륙습지의 토양 탄소 저장량을 보다 체계적으로 정량화할 수 있을 것으로 기대된다.

사사

본 연구는 환경부의 ‘내륙습지 토양정보지도 구축 및 유기탄소의 축적량 산정’ 사업의 도움을 받아 수행되었으며, 2024년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(RS-2024-00357071)을 통한 성과물입니다.

Reference

- Aprile F, Lorandi R. 2012. Evaluation of cation exchange capacity (CEC) in tropical soils using four different analytical methods. *J Agric Sci* 4(6): 278. doi: 10.5539/jas.v4n6p278
- Batjes NH. 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Eur J Soil Sci* 47(2): 151-163. doi: 10.1111/j.1365-2389.1996.tb01386.x
- Beltrán-Dávalos AA, Ayala Izurieta JE, Echeverria Guadalupe MM, Van Wittenberghe S, Delegido J, Otero Pérez XL, Merino A. 2022. Evaluation of soil organic carbon storage of Atillo in the Ecuadorian Andean wetlands. *Soil Syst* 6(4): 92. doi: 10.3390/soilsystems6040092
- Brady NC, Weil RR. 2008. The nature and properties of soils. Vol. 13. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. p. 662-710.
- Bridgham SD, Megonigal JP, Keller JK, Bliss NB, Trettin C. 2006. The carbon balance of North American wetlands. *Wetlands* 26(4): 889-916. doi: 10.1672/0277-5212(2006)26[889:tcbona]2.0.co;2
- Conforti M, Lucà F, Scarciglia F, Matteucci G, Buttafuoco G. 2016. Soil carbon stock in relation to soil properties and landscape position in a forest ecosystem of southern Italy (Calabria region). *Catena* 144: 23-33. doi: 10.1016/j.catena.2016.04.023
- Cressie N. 1988. Spatial prediction and ordinary kriging. *Math Geol* 20: 405-421. doi: 10.1007/bf00892986
- Fowler DN, King SL, Weindorf DC. 2014. Evaluating abiotic influences on soil salinity of inland managed wetlands and agricultural croplands in a semi-arid environment. *Wetlands* 34: 1229-1239. doi: 10.1007/s13157-014-0585-3
- Hong S, Gan P, Chen A. 2019. Environmental controls on soil pH in planted forest and its response to nitrogen deposition. *Environ Res* 172: 159-165. doi: 10.1016/j.envres.2019.02.020
- IPCC. 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). Intergov Panel Clim Change.
- Isaaks EH, Srivastava RM. 1989. An introduction to applied geostatistics. New York, NY: Oxford University Press. doi: 10.1017/s0016756800008189

- Jobbágy EG, Jackson RB. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecol Appl* 10(2): 423-436. doi: 10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDOSO]2.0.CO;2
- Kalra YP. 1991. *Methods manual for forest soil and plant analysis*. Edmonton, AB: Forestry Canada, Northwest Region, Northern Forestry Centre.
- Lee J, Kim H, Choi S, Lee Y, Chu Y, Lee W, Son Y. 2023. Strategies for estimating greenhouse gas emissions in inland wetlands: classification systems and emission factors (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 14(6-1): 715-726. doi: 10.15531/kscrcr.2023.14.6.715
- Lee SK, Son Y, Noh NJ, Heo SJ, Yoon TK, Lee AR, Lee WK. 2009. Carbon storage of natural pine and oak pure and mixed forests in Hoengseong, Kangwon (in Korean with English abstract). *J Korean Soc For Sci* 98(6): 772-779.
- Liu X, Lu X, Yu R, Sun H, Li X, Li X, Lu C. 2022. Distribution and storage of soil organic and inorganic carbon in steppe riparian wetlands under human activity pressure. *Ecol Indic* 139: 108945. doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108945
- Ma T, Wang T, Yang D, Yang S. 2023. Impacts of vegetation restoration on water resources and carbon sequestration in the mountainous area of Haihe River basin, China. *Sci Total Environ* 869: 161724. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.161724
- McKay MD, Beckman RJ, Conover WJ. 1979. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics* 21(2): 239-245. doi: 10.2307/1268522
- Ministry of Environment (KR). 2021. 2030 updated nationally determined contribution of the Republic of Korea. Sejong: Ministry of Environment.
- Mitsch WJ, Gosselink JG. 2015. *Wetlands*. Hoboken, NJ: Wiley.
- Nahlik AM, Fennessy MS. 2016. Carbon storage in US wetlands. *Nat Commun* 7(1): 13835. doi: 10.1038/ncomms13835
- Park H, Shin H, Noh Y, Kim K, Park K. 2012. Estimating forest carbon stocks in Danyang using kriging methods for aboveground biomass (in Korean with English abstract). *J Korean Assoc Geogr Inf Stud* 15(1): 16-33. doi: 10.11108/kagis.2012.15.1.016
- Reddy KR, Clark MW, DeLaune RD, Kongchum M. 2013. Physicochemical characterization of wetland soils. In: Reddy KR, Delaune RD, editors. *Methods in biogeochemistry of wetlands*. Madison (WI): Soil Science Society of America. p. 41-54. (SSSA Book Series; vol. 10). doi: 10.2136/sssabookser10.c3
- Seybold CA, Mersie W, Huang J, McNamee C. 2002. Soil redox, pH, temperature, and water-table patterns of a freshwater tidal wetland. *Wetlands* 22(1): 149-158. doi: 10.1672/0277-5212(2002)022[0149:srptaw] 2.0.co;2
- Sharmeen S, Willgoose GR. 2006. The interaction between armouring and particle weathering for eroding landscapes. *Earth Surf Process Landf* 31(10): 1195-1210. doi: 10.1002/esp.1397
- Six J, Conant RT, Paul EA, Paustian K. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant Soil* 241(2): 155-176. doi: 10.1023/a:1016125726789
- Solly EF, Weber V, Zimmermann S, Walthert L, Hagedorn F, Schmidt MW. 2020. A critical evaluation of the relationship between the effective cation exchange capacity and soil organic carbon content in Swiss forest soils. *Front For Glob Change* 3: 98. doi: 10.3389/ffgc.2020.00098
- Temmink RJ, Lamers LP, Angelini C, Bouma TJ, Fritz C, van de Koppel J, van der Heide T. 2022. Recovering wetland biogeomorphic feedbacks to restore the world's biotic carbon hotspots. *Science* 376(6593): eabn1479. doi: 10.1126/science.abn1479
- Whalley WR, Dumitru E, Dexter AR. 1995. Biological effects of soil compaction. *Soil Tillage Res* 35(1-2): 53-68. doi: 10.1016/0167-1987(95)00473-6
- Xu S, Liu X, Li X, Tian C. 2019. Soil organic carbon

- changes following wetland restoration: A global meta-analysis. *Geoderma* 353: 89-96. doi: 10.1016/j.geoderma.2019.06.027
- Yoo J, Kim J, Kim J, Lim J, Kang H. 2022. Soil carbon storage and its economic values of inland wetlands in Korea. *Ecol Eng* 182: 106731. doi: 10.1016/j.ecoleng.2022.106731
- Zhang YS, Sonn YG, Park CW, Hyun BK, Moon YH, Song KC. 2011. Soil physical and chemical characteristics of river-bed sediments in river basins. *Korean J Soil Sci Fert* 44(6): 963-969. doi: 10.7745/KJSSF.2011.44.6.963
- Zhang Z, Zhou Y, Huang X. 2020. Applicability of GIS-based spatial interpolation and simulation for estimating the soil organic carbon storage in karst regions. *Glob Ecol Conserv* 21: e00849. doi: 10.1016/j.gecco.2019.e00849
- Zhou W, Han G, Liu M, Li X. 2019. Effects of soil pH and texture on soil carbon and nitrogen in soil profiles under different land uses in Mun River Basin, Northeast Thailand. *PeerJ* 7: e7880. doi: 10.7717/peerj.7880