

고흥군 산지습지에서 탄소 저장 및 플럭스의 계절·공간적 변화 연구

장인영 · 정헌모 · 한상학 · 이응필 · 강성룡**

국립생태원

Seasonal and spatial changes in carbon storage and fluxes in forested wetlands in Goheung-gun, Korea

Inyoung Jang · Heon Mo Jeong · Sang-Hak Han · EungPill Lee · Sung-Ryong Kang**

National Institute of Ecology, Seochon, Korea

(Received : 30 October 2024, Revised : 14 November 2024, Accepted : 21 November 2024)

요약

전지구적 탄소 순환에 있어, 자연생태계는 유일한 탄소 흡수원으로서의 역할을 담당하고 있다. 최근 심화되는 기후변화에 따라, 자연생태계의 이러한 기능에 대한 중요성이 강조되고 있다. 특히, 습지 생태계의 경우 높은 생산성을 가진 반면에 낮은 분해율을 가진 생태계로 타 생태계에 비해 단위면적당 많은 양의 탄소를 저장하고 있다고 알려져 있다. 본 연구에서는 국내 산지습지의 탄소 저장량 및 토양 호흡량 분석을 위해 전라남도 고흥군 우미산에 위치한 산지습지(N34.602487 E127.495810)의 습지 내·외부에서 계절별로 토양을 채취하여 토양 특성 및 탄소를 분석함과 동시에 토양 호흡을 측정하였다. 또한, 습지 내부의 식물체 탄소 저장량도 함께 측정하였다. 그 결과 습지 내부의 토양 탄소 저장량은 129.58~236.77 kgC m⁻²였으며, 습지 외부 토양 탄소 저장량은 49.02~59.81 kgC m⁻²로 습지 내부 토양이 유의하게 더 많은 양의 탄소를 저장하고 있는 것으로 나타났다. 이를 습지 면적으로 환산하여 보면 습지 내부 토양에서는 233.1tC의 탄소가 저장되어 있는 것으로 나타났으며, 습지 내 목본 및 초본 식생의 탄소 저장량은 1.575tC으로 상대적으로 습지 토양에 많은 양의 탄소가 저장되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한 습지 내부 탄소 저장량의 경우 중량수분함량($P<0.000$, $r=0.8443$), T-P($P<0.000$, $r=0.900$), NH₄⁺($P=0.001$, $r=0.818$)과 높은 상관 관계를 나타낸 반면, 습지 외부는 T-P 만 양의 상관관계를 나타냈다($P=0.014$, $r=0.682$). 대상 습지의 토양호흡의 경우 습지 내부에서는 0.2~1.3 gCO₂ m⁻² hr⁻¹, 습지 외부 토양에서는 1.2~2.9 gCO₂ m⁻² hr⁻¹의 값을 나타냈다. 습지 내부의 경우, 토양 유기탄소함량($P=0.013$, $r=0.641$) 및 중량수분함량($P=0.002$, $r=0.743$)과 유의한 양의 상관관계를 나타내었으며, 습지 외부의 경우 암모늄 이온($P=0.029$, $r=0.804$) 및 질산성 질소 이온($P<0.000$, $r=0.974$)과 양의 상관관계를 나타내어 습지 내·외부가 서로 다른 요인에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 산지습지, 탄소 고정, 토양호흡, 계절성, 환경요인

Abstract

In the global carbon cycle, natural ecosystems are the only carbon sinks. With the recent intensification of climate change, this function of natural ecosystems has been emphasized. In particular, wetland ecosystems store a large amount of carbon per unit area compared to other ecosystems due to their high productivity and low decomposition rate. In this study, to analyze the carbon storage and soil respiration of a forested wetland in Korea, we collected seasonal soil samples from inside and outside the wetland of a forested wetland (N34.602487 E127.495810) located in Umisan, Goheung-gun, Jeollanam-do, and analyzed soil properties and carbon, and measured soil respiration. We also measured the carbon storage of plant life inside the wetland. The results showed that the soil carbon storage inside the wetland ranged from 129.58 to 236.77 kgC m⁻², while the soil carbon storage outside the wetland ranged from 49.02 to 59.81 kgC m⁻², indicating that the soil inside the wetland stored significantly more carbon. Converting this to the wetland area, we found that 233.1 tC

*To whom correspondence should be addressed.
National Institute of Ecology, Seochon, Korea
E-mail : srkang@nie.re.kr

- Inyoung Jang National Institute of Ecology / Senior Researcher (iyjang@nie.re.kr)
- HeonMo Jeong National Institute of Ecology / Researcher (eimple01@nie.re.kr)
- Snaghak Han National Institute of Ecology / Researcher (hsh2334@nie.re.kr)
- EungPill Lee National Institute of Ecology / Associate Researcher (ecomant21@nie.re.kr)
- Sung-Ryong Kang National Institute of Ecology / Team Leader (srkang@nie.re.kr)

of carbon was stored in the soil inside the wetland, while the carbon storage of woody and herbaceous vegetation in the wetland was 1,575 tC, indicating that a relatively large amount of carbon is stored in the wetland soil. In addition, carbon storage inside the wetland was highly correlated with weighted moisture content ($P < 0.000$, $r = 0.8443$), TP ($P < 0.000$, $r = 0.900$), and NH_4^+ ($P = 0.001$, $r = 0.818$), while outside the wetland, only TP was positively correlated ($P = 0.014$, $r = 0.682$). Soil respiration in the target wetlands ranged from 0.2 to 1.3 $\text{gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ inside and from 1.2 to 2.9 $\text{gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ in soils outside the wetlands. Inside the wetland, it was significantly and positively correlated with soil organic carbon content ($P = 0.013$, $r = 0.641$) and weight moisture content ($P = 0.002$, $r = 0.743$), while outside the wetland, it was positively correlated with ammonium ions ($P = 0.029$, $r = 0.804$) and nitrate nitrogen ions ($P < 0.000$, $r = 0.974$), indicating that it was influenced by different factors inside and outside the wetland.

Key words : Forested wetland, Carbon sequestration, Soil respiration, Seasonality, Environmental factors

1. 서론

최근 기후변화의 심화에 따라 생태계의 이산화탄소 흡수 및 저장능력에 대한 관심이 높아지고 있다. 생태계의 이산화탄소 흡수는 대기 중 이산화탄소를 흡수제거하는 유일한 기작으로, 대기 이산화탄소의 농도 조절에 주요한 역할을 담당하고 있다. 실제, 최근의 전지구적 탄소 순환을 살펴보면 화석연료의 사용에 따른 탄소 배출이 35 $\text{Gt CO}_2 \text{ yr}^{-1}$, 토지이용변화에 의한 탄소배출이 5 $\text{Gt CO}_2 \text{ yr}^{-1}$ 로 나타났으며, 이렇게 배출된 이산화탄소는 육상생태계의 일차생산자들에 의해 12 $\text{Gt CO}_2 \text{ yr}^{-1}$, 해양으로 10 $\text{Gt CO}_2 \text{ yr}^{-1}$ 흡수되어 제거된다고 보고되었다(Global Carbon Project 2023). 육상생태계 일차생산자의 광합성 작용으로 흡수된 이산화탄소는 지상부 및 지하부 호흡에 의해 대기 중으로 재방출 되거나, 식물체에 저장된다. 이렇게 저장된 탄소는 이후 유기물의 형태로 토양에 유입되게 되며, 유입된 탄소는 토양 미생물에 의해 분해되어 이산화탄소의 형태로 대기 중으로 다시 방출되게 된다. 습지의 경우 침수된 환경으로, 토양으로의 산소 투과가 제한되어 토양 미생물에 의한 분해 속도가 느리다. 습지는 습지 식생의 활발한 탄소 고정 능력에 반하여 습지 토양 유기물 분해가 적게 일어난다. 때문에, 주요한 탄소저장고로 여겨지고 있다. IPCC의 2000년 보고서에 의하면, 전 세계의

습지생태계는 240 Gt C을 저장하고 있는 것으로 보고되었다. 이는, 북방침엽수림(559 Gt C), 열대우림(428 Gt C), 열대 초원(330 Gt C), 온대 초지(304 Gt C)에 이어 다섯 번째로 많은 탄소저장량이지만, 면적 대비 저장량의 크기로 살펴보면 습지 생태계는 $685.7 \times 10^9 \text{ Gt C ha}^{-1}$ 로 다른 생태계에 비해 가장 높은 저장량을 나타내었다(북방침엽수림: $408.03 \times 10^9 \text{ Gt C ha}^{-1}$, 열대우림 $243.18 \times 10^9 \text{ Gt C ha}^{-1}$, 열대 초원: $146.67 \times 10^9 \text{ Gt C ha}^{-1}$) ⇒ (IPCC, 2000). 이와 같이, 습지 생태계는 타 생태계 유형에 비해 높은 탄소 저장능력을 갖고 있으므로 이러한 습지에서의 탄소 저장 및 거동에 대한 분석은 매우 중요하다. 또한, 습지 생태계의 탄소 관련 기작의 경우, 생물학적 과정에 의해 일어나기 때문에, 환경적 요인에 의해 저장량의 차이가 나타나게 된다. 특히, 습지가 위치하는 지역의 온도 및 기온 등 기후 인자, 토양수분함량 등의 수리수문학 관련 인자 등이 습지의 탄소 저장과 많은 상관관계가 있다는 것이 보고되었다(Adhikari *et al.*, 2009; Man *et al.*, 2019; Dong *et al.*, 2022; Xia *et al.*, 2022; Nie *et al.*, 2023).

국내 습지의 경우 대부분의 습지 토양은 무기토양으로 분류되어 탄소 저장고로서의 기능은 상대적으로 덜 한 것으로 예측되지만, 산지습지의 경우 상대적으로 주변 생태계로부터의 유기물 유입과 축적이 많아 탄소저장고로서의 역할이 강

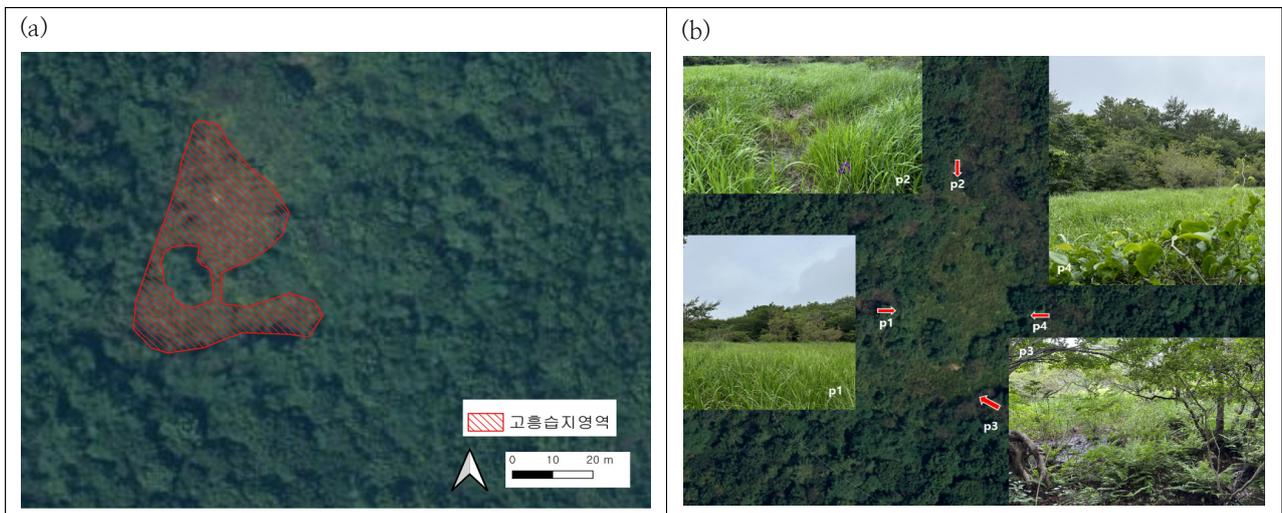


Fig. 1. (a) Satellite Images and (b) overview of Study Area.

조되고 있다. 본 연구에서는 23개의 습지 유형 중 탄소저장 고로서의 역할이 중요하다고 생각되어지는 산지습지를 대상으로 탄소의 저장량을 평가하는 연구를 진행하였다. 특히, 산지습지 내부와 외부의 탄소 저장·토양 호흡 등 탄소 관련 항목들을 비교하여 습지의 탄소 저장·거동과 이에 영향을 미치는 영향 인자에 대한 연구를 진행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구지역 정보

본 연구는 전라남도 고흥군 우미산에 위치한 산지습지에서 수행하였다(N34.602487 E127.495810, Fig. 1). 조사지역의 연평균기온은 13.7°C이며, 연평균강수량은 1,443.8mm 이다(KNA, 2019). 이 습지의 경우 2015년에는 면적이 2,212m² 이었으나, 2023년에는 1,336.7m²로 9년 동안 약 39.6%의 면적 손실이 있었다(KNA, 2019).

2.2 샘플 채취 및 분석

연구 대상 지역 토양의 일반적 특성 분석을 위해서 2023년 봄, 여름, 가을의 3계절에 걸쳐 조사지역 습지 내부와 외부에서 각각 6개 지역에서 깊이 10cm의 토양을 채취하였다. 또한, 봄철의 경우, 토양의 용적밀도(bulk density)를 계산하기 위하여 100ml 토양 코어(core)를 활용하여 토양을 채취하였다. 토양 분석 항목은 중량수분함량(gravimetric water content), 토양유기물함량(soil organic matter), pH, 토양용적밀도, 토성(soil texture), 총인(T-P: total phosphorus), 총질소(T-N: total nitrogen), 암모늄 이온(NH₄⁺), 질산염 이온(NO₃⁻)을 분석하였으며, 토양 분석은 공인시험기관(서울대학교 농생명과학공동기기원)에 의뢰하여 수행하였다.

토양 유기 탄소 함량(SOC, Soil Organic Carbon)의 경우, 토양 유기물 함량에서 탄소 비율(0.58)을 곱해서 계산하였다(Buringh, 1984). 토양 탄소 함량과 토양 깊이, 용적밀도를 활용하여 토양 탄소 저장량을 산정하였다. 또한, 습지 내 일차생산자에 저장된 탄소의 측정을 위해, 여름 조사 시에 0.5m × 0.5m 방형구에서 3 반복으로 초본을 수확하여, 건중량을 측정하였다. 습지 내의 목본에 저장된 탄소의 양은 습지 내 모든 목본(42점)의 흉고직경(DBH)을 측정하여 수종별 상대생장식을 적용하여 현존량을 산정하고(Zianis and Radoglou, 2006), 여기에서 탄소전환계수(활엽수 0.48, 침엽수 0.51)를 곱하여 탄소 저장량을 산정하였다(IPCC, 2006).

본 연구에서는 토양 및 식물체 탄소 저장량 뿐만 아니라, 토양에서 토양 호흡으로 발생하는 이산화탄소를 측정하여, 습지에서 발생하는 이산화탄소를 측정하고자 하였다. 토양 호흡은 습지 내·외부에서 이동형 토양호흡 측정장치(EGM-4, USA, PP-system)를 활용하여 조사별로 오전 10시에서 오후 2시 사이에 5회 측정하였다. 이 중 습지 내부의 토양 호흡은 습지 내부 중물에 잠겨있지 않고 공기 중에서 노출된 토양을 찾아 토양호흡을 산정하였다. 토양 호흡 측정과 동시

에, 안정적인 토양 온도 측정이 가능한 깊이인 10cm 깊이에서의 토양 온도도 함께 기록하였다.

2.3 통계분석

측정된 토양 호흡량 및 온도 데이터는 계절별, 측정 위치별(습지 내·외부)로 정리, 분석하여 평균값을 산정하였으며, 또한, 계절별 및 위치별 유의미한 차이의 분석을 위해 반복측정 분산분석(Repeated-measure ANOVA)를 이용하였다. 또한, 토양 탄소 함량과 토양 특성값들과의 상관성 분석을 위해, 습지 내·외부를 나누어 토양 유기 탄소 함량(SOC)과 기타 다른 토양 특성과의 상관분석(Pearson correlation)을 실시하였다. 이때 통계분석은 SPSS(ver. 18.0.0, SPSS Inc.)를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 토양 특성

토양 pH는 습지 내부는 5.3, 외부는 5.1의 값을 기록하였으며, 통계적으로 유의한 차이는 보이지 않았다. 토성 분석 결과 습지 내부와 외부에서 구성 비율의 차이가 있었다. 습지 내부는 모래(sand), 실트(silt) 그리고 점토(clay)의 구성 비율이 각각 35.5, 33.7, 30.8%로 비슷하였으나, 습지 외부의 구성 비율은 각각 70.4, 20.1, 9.5%로 모래가 절반 이상으로 가장 많았고 점토가 10% 미만으로 적었다. 토양 구성 성분을 토대로 미국 농무성 분류법으로 분류한 토질은 토양 내부는 식양토(Clay loam soil), 토양 외부는 사양토(Sandy loam soil)인 것으로 나타났다(Soil Survey Division Staff, 1993; Table 1, Fig. 2(a)). 중량수분함량은 습지 내부가 432.79±261.23%, 습지 외부가 47.19±14.4%로 나타났으며, 유의한 차이를 나타냈다($P<0.001$, Table 1, Fig. 2(b)). 토양 용적밀도는 습지 내부 및 외부 각각 0.217±0.064, 0.700±0.134 g cm⁻³으로 토양 외부가 내부에 비해 유의하게 높은 결과를 나타냈다($P<0.001$). 조사지역의 토양 총인 분석 결과 습지 내부와 습지 외부는 다르게 나타났다. 습지 내부에서 여름철 총인은 846.2±241.1 mg kg⁻¹로 가을철 424.5±126.8 mg kg⁻¹보다 더 많았으며($P<0.001$), 습지 외부의 경우 여름과 가을의 차이는 없었다(Fig. 2(c)). 습지 내부의 여름철 총질소는 18,967±3,740 mg kg⁻¹로 가을철 8,907±658.4 mg kg⁻¹보다 더 많았으며, 습지 외부에서 여름과 가을의 토양 총질소는 차이가 없었다(Fig. 2(d)). 조사지역의 암모늄 이온 분석 결과 습지 내부의 여름철 암모늄 이온은 316.0±166.7 mg kg⁻¹로 가을철 112.7±19.7 mg kg⁻¹보다 더 높았고 습지 외부에서 계절별 차이가 없었다($P<0.001$, Fig. 2(e)). 암모니아는 혐기성 환경에서 유기물이 분해될 때 생성되는 물질로 여름철 토양 수분함량이 높은 환경에 영향을 받았을 것으로 판단된다. 조사지역의 토양 총질소 분석 결과 습지 내부는 습지 외부보다 더 많았다($P<0.001$). 조사지역에서 질산이온은 습지 내부에서 검출되

지 않았고 습지 외부에서만 검출되었다(Fig. 2(f)). 습지 외부의 평균 질산이온은 여름철이 $38.2 \pm 30.4 \text{ mg kg}^{-1}$ 로 가을철 $9.7 \pm 2.8 \text{ mg kg}^{-1}$ 보다 더 높았으나 통계적으로 유의한 차이는 없었다.

토양 특성을 나타내는 항목끼리 상관분석을 실시한 결과, 습지 내부와 외부가 서로 다른 경향을 나타냈다. 습지 내부의 경우 중량수분함량과 총인(Fig. 3(a); $r=0.903$, $P<0.000$), 암모늄 이온이(Fig. 3(b); $r=0.841$, $P=0.001$) 양의 상관관계

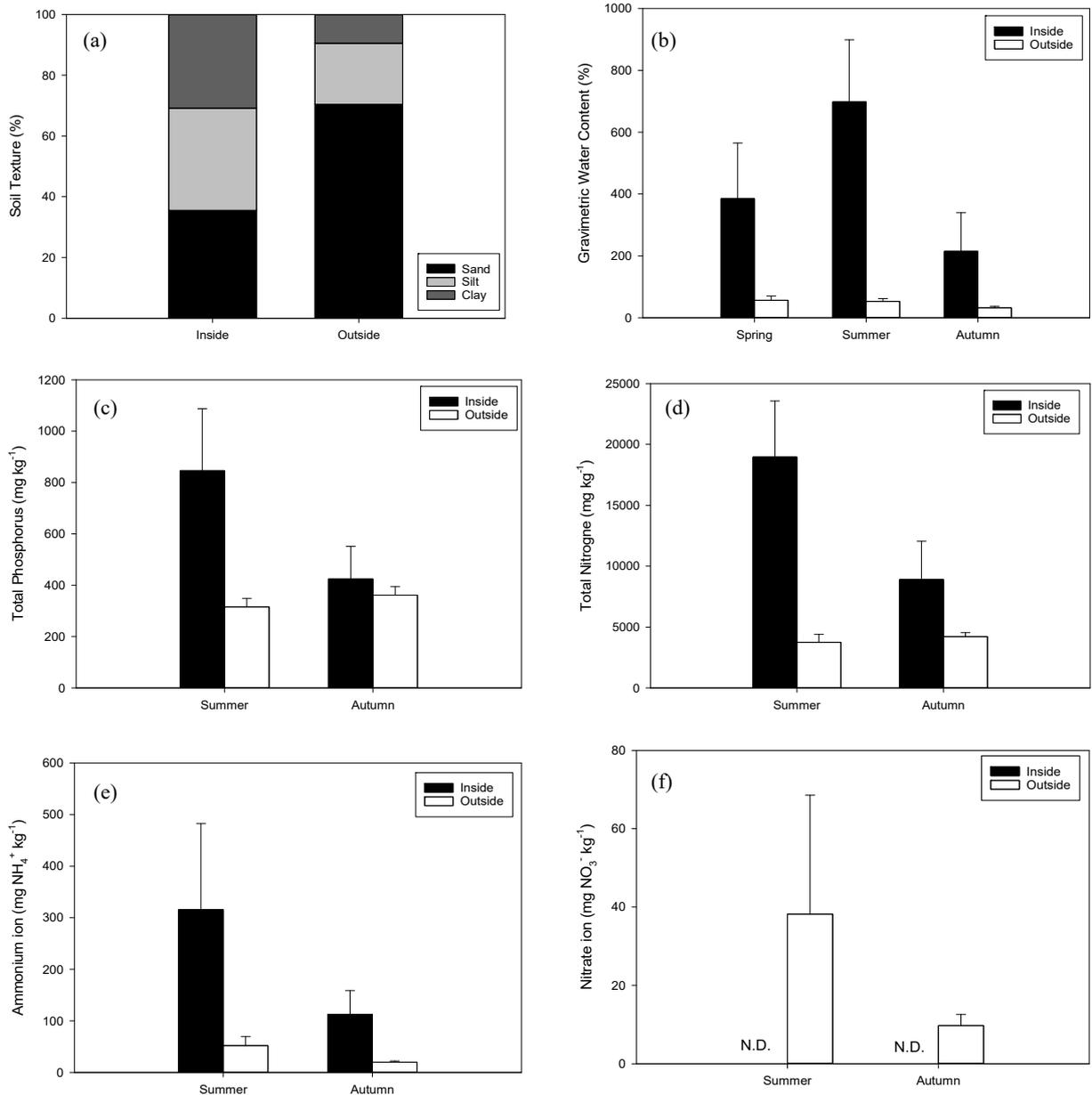


Fig. 2. Differences of soil properties between inside and outside in the forested wetland (a) Soil texture, (b) Gravimetric water content, (c) T-P, (d) T-N, (e) NH_4^+ , (f) NO_3^- .

Table 1. Average value and standard deviation of soil bulk density, soil organic matter, soil organic carbon, gravimetric water content, pH, soil texture, T-N, T-P, NH_4^+ and NO_3^- which measured in forested wetland in Goheung-gun.

	Bulk Density (g cm^{-3})	Soil organic matter (%)	Soil organic carbon (kg m^{-2})	Gravimetric water content (%)	pH	Soil texture	Total nitrogen (g kg^{-1})	Total phosphorus (mg kg^{-1})	Ammonium (mg kg^{-1})	Nitrate (mg kg^{-1})
Inside	0.22 ± 0.06	20.05 ± 6.64	174 ± 57.73	432.8 ± 261.2	5.3 ± 0.1	Clay loam soil	13.94 ± 6.46	635.34 ± 286.74	214.35 ± 157.62	ND
Outside	0.68 ± 0.13	18.56 ± 0.83	52 ± 9.60	47.2 ± 14.4	5.1 ± 0.2	Sandy loam soil	3.98 ± 5.55	338.11 ± 39.91	35.88 ± 20.68	23.94 ± 25.38

를 나타냈다. 담수 습지나 연안 습지의 경우 인이 제한요소로 작용한다는 연구결과들이 있다(Sundareswar *et al.*, 2003; Turner *et al.*, 2003; Reddy *et al.*, 2005; Verhoeven *et al.*, 2006). 하지만, 이러한 경향은 습지 외부 산림지역에서는 나타나지 않는데, 습지외부에서는 중량수분함량과 암모늄 이온만이 양의 상관관계를 나타냈다(Fig. 3(c); $r=0.824$, $P=0.001$).

3.2 토양 및 식생 탄소 저장량

본 대상 산림습지의 식생 탄소d 저장량 분석을 위해 목본 식물 및 초본 식물의 탄소 저장량 분석을 실시하였다. 본 조사지역 내 목본 식물은 총 42개체가 분포하고 있었으며, 이중 오리나무가 가장 많았고 소나무, 뽕나무의 순이었다. 조사된 각 개체목의 흉고직경(DBH)를 활용하여 현존량을 추정 한 결과 대상 습지 내 목본식물에는 820.4 kgC의 탄소가 저장되어 있었다. 또한, 본 조사대상지역의 대부분을 차지하는 초지식물 군락의 탄소 저장량 분석을 위하여, 본 조사지역 내 0.25 m² 면적 내 초본 식물을 샘플링하여 건조량을 측정하였다. 그 결과 초본의 무게는 평균 332.3±34.8 g m⁻²였다. 이를 전체 습지 면적으로 외삽하면 대상 습지 내 초본식물에는 총 755.4 kgC의 탄소가 저장되어 있는 것으로 분석되었다.

본 연구에서의 습지 내부의 봄, 여름, 가을 계절별 토양 탄소 함량은 각각 10.5±1.6, 15.8±1.9, 8.6±3.4%였고 습지 외부의 봄, 여름, 가을 계절별 토양 탄소 저장량은 각각 4.0±0.7, 3.0±0.4, 3.4±0.4% 였다. 토양 탄소 함량과 토양 용적밀도 및 토양 깊이를 활용하여 산정한 토양 탄소 저장량은 습지 내부의 경우 계절별로 각각 156.88±24.30, 236.77±29.23, 129.57±49.40 kgC m⁻²였으며, 습지 외부의 경우 59.81±10.68, 45.02±5.67, 50.74±5.76 kg m⁻² 였다 (Fig. 4). 습지 내부의 토양 탄소 저장량은 유의하게 습지 외부보다 높은 양을 기록하였다($P<0.001$). 또한, 습지 토양 탄소 저장량은 계절적인 차이를 나타내었다($P=0.003$). 위의 결과를 습지 면적으로 환산해 보면, 연구 대상 습지 내부의 토양에는 약 233.1tC의 탄소가 저장되어 있는 것으로 분석되었다. Kang *et al.* (2008)의 연구에 의하면 고흥만 인공습지의 경우 0.10~1.27% 정도의 토양탄소함량을 가지고 있는 것으로 나타, 본 연구의 탄소함량이 14배~200배 정도 더 높은 것을 확인할 수 있었다. Yoo *et al.* (2022)은 국내 전국 담수 습지 토양에 저장된 탄소양을 22.3±0.6 kgC m⁻²로 산정하여, 본 연구에서의 토양 탄소 저장량은 이에 비해 7.8배 높게 나타났다. 산지습지의 경우, 타 담수습지나 인공습지에 비해 습지 외부로부터의 유기물의 유입이 많아 상대적으로 높은 저장량을 나타낸 것으로 예측된다. Park *et al.* (2012)의 연구

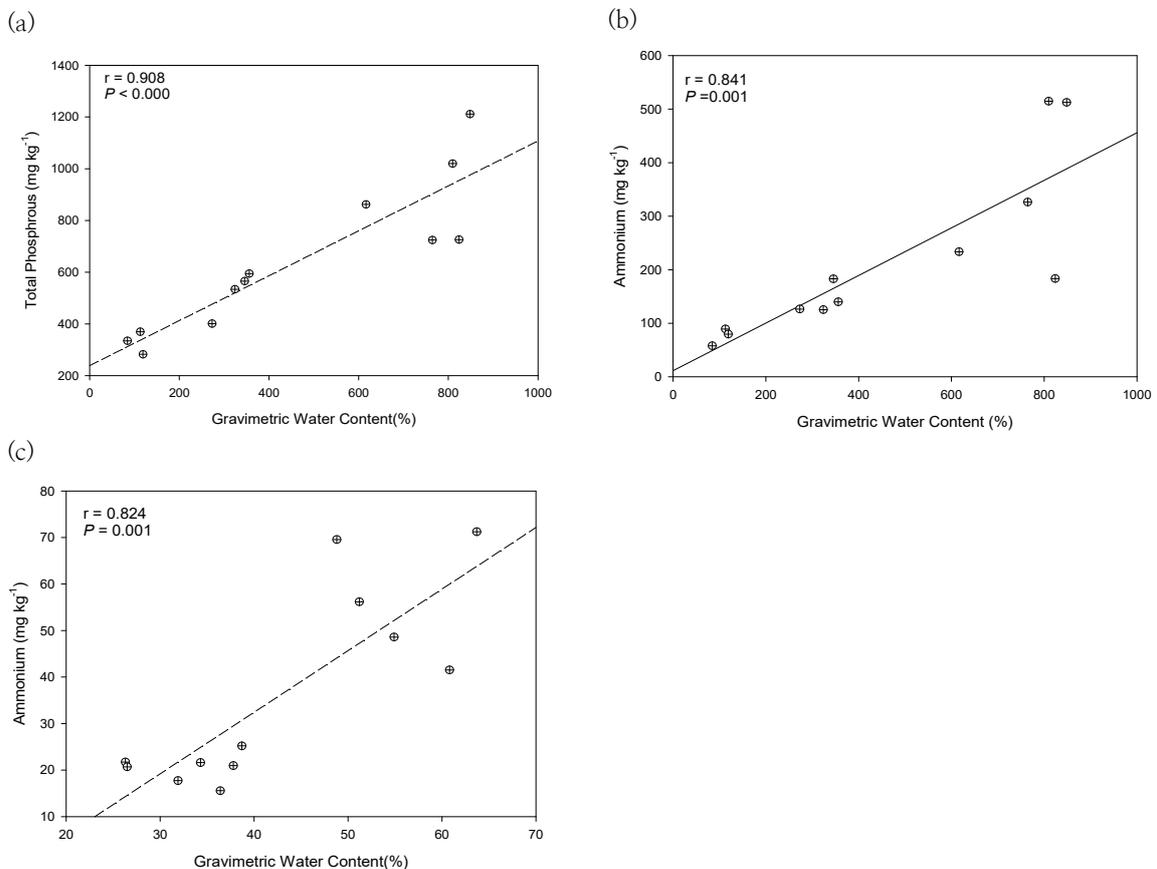


Fig. 3. Correlation between gravimetric water content and (a) total phosphorous in inside wetland, (b) ammonium in inside wetland (c) ammonium in outside wetland.

에서도 인공습지나, 하구나 연안습지에 비해 내륙습지에서의 유기물 저장량이 더 많은 것을 확인할 수 있었다. Adame *et al.* (2015)의 연구에서도 습지의 위치와 형태에 따라 탄소 저장량이 달라지는 것으로, 지형적 요인 및 구성 식생이 중요하다는 결론을 내렸다. 또한, Stewart *et al.* (2024)의 연구는 더 많은 양의 탄소를 저장하고 있다는 결과를 보고하였다.

본 연구에서 토양 탄소 저장량은 233.1tC, 목본과 초본에 저장된 탄소량은 1.575tC로 토양의 탄소 저장량이 식물체에 저장된 양보다 148배 높게 나타났다. 습지는 자연 생태계 중 탄소 저장 능력이 높은 생태계로 알려져 있다(IPCC, 2000). 습지 식물의 일차생산에 의해 대기 중에서 흡수된 탄소는 결국 토양으로 유입되게 되는데, 이렇게 유입된 유기탄소가 산소가 부족한 습지 토양의 특성에 의해 분해되지 않고 쌓이게 된다. 호기성 토양(aerobic soil)에서는 유기 탄소의 분해가 쉽게 일어나는 반면, 습지토양과 같이 수분함량이 높아 산소의 공급이 제한적인 혐기성 토양(anaerobic soil)에서는 유기물의 분해 속도가 느리다. 이러한 기작을 통해 습지의 토양 탄소는 토양에서 분해되지 않은 유기물 형태로 나타난다(Keddy, 2010). 본 연구에서도 습지 탄소의 대부분이 식생 보다는 토양에 저장되어 있는 것을 확인 할 수 있었다.

토양 탄소 저장량과 다른 토양 인자와의 상관관계 분석 결과를 살펴보면, 습지 내·외부의 결과가 서로 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 습지 내부의 경우 중량수분함량

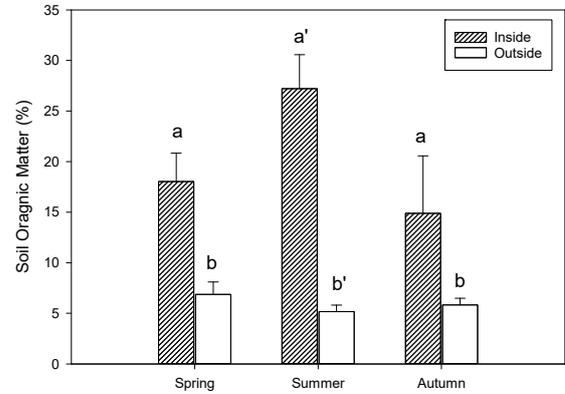


Fig. 4. Soil organic carbon content in forested wetland. Diagonal line bar represents the carbon amount in inside wetland and white bar shows the results carbon amount in outside wetland. Dashed character (a, b and a', b') indicate seasonal differences, and different letters (a and b) denote significant differences between locations.

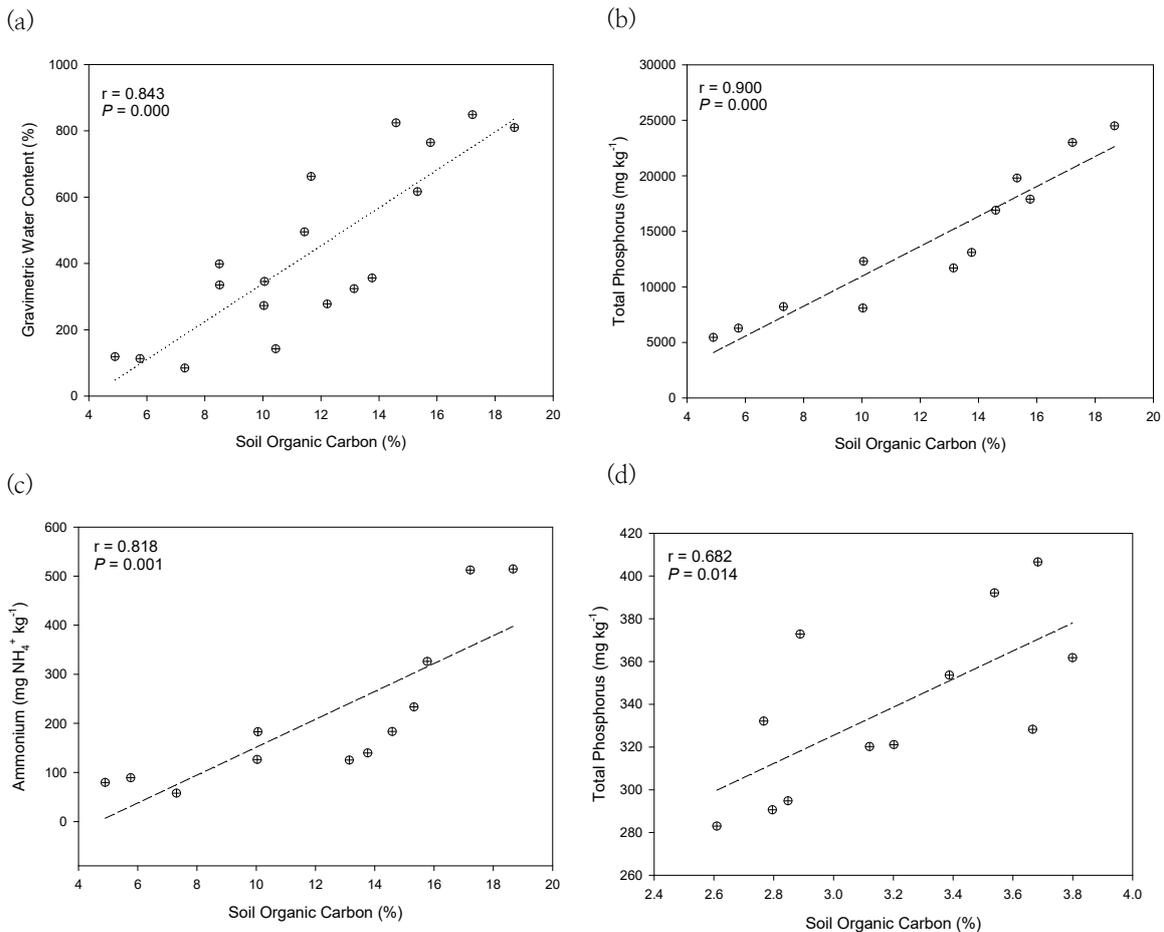


Fig. 5. Correlation between soil organic matter and soil properties (a) water content vs. soil organic matter in inside wetland, (b) T-P vs. soil organic matter in inside wetland (c) NH_4^+ vs. soil organic matter in inside wetland, (d) T-P vs. soil organic matter in outside wetland.

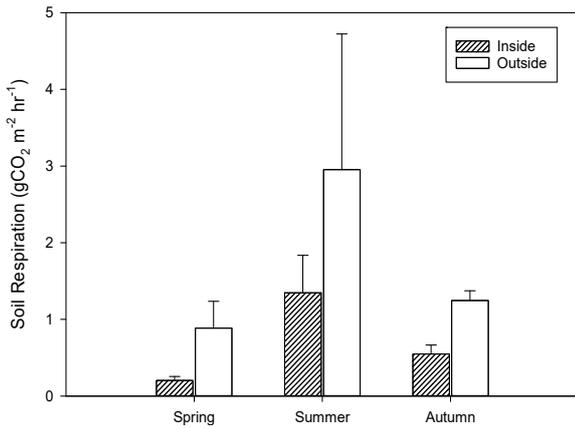


Fig. 6. Soil respiration in forested wetland. Diagonal line bar represents the carbon amount in inside wetland and white bar shows the results carbon amount in outside wetland.

($P < 0.000$, $r = 0.8443$), T-P ($P < 0.000$, $r = 0.900$), NH_4^+ ($P = 0.001$, $r = 0.818$)과 높은 상관 관계를 나타낸 반면(Fig. 5(a), (b), (c)), 습지 외부는 T-P만 양의 상관관계를 나타냈다(Fig. 5(d); $P = 0.014$, $r = 0.682$). 습지 내부의 탄소 저장량의 경우, 앞에서 기술한 바와 같이 토양 수분 함량이 높아지게 되면, 산소의 토양 투과가 저해되어 상대적으로 토양에 축적되는 탄소의 양이 증가하기 때문에, 중량수분함량과 양의 상관관계를 나타낸 것으로 판단된다. 이와 비슷하게, Seo et al.(2010)의 경우 인공습지에서 수심이 따른 토양 용존 유기탄소 양을 측정된 결과, 수심이 깊은 지역에서 더 많은 양의 용존유기탄소량을 나타낸 것을 확인하였다.

3.3 토양 호흡

습지 내부 및 외부의 계절별 토양 호흡량은 각각 봄에 0.203 ± 1.141 , 1.558 ± 0.975 $\text{gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$, 여름에 1.347 ± 0.488 , 2.953 ± 1.770 $\text{gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$, 가을에 0.558 ± 0.098 , 1.247 ± 0.126 $\text{gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 이었다(Fig. 6). Lee et al. (2010)의 연구에 의하면 국내에서 측정된 토양 호흡은 $0.13 \sim 0.90$ $\text{gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 의 범위를 나타내었으나, 본 연구에서는 $0.20 \sim 2.95$ $\text{gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ 으로 선행연구에 비해 높은 값을 나타냈다. 이는 본 연구의 토양 호흡 측정이 봄, 여름, 가을에 나타난 것과 연관지을 수 있다. 토양 호흡은 온도와 상관성이 높아, 상대적으로 여름에 높은 값을 나타내는데(Davidson et al., 2006; Philips et al., 2010), 본 연구의 토양 호흡이 봄, 여름, 가을 각각의 계절 중 하루만을 대상으로 측정하였기 때문에 나타나는 결과였을 것으로 판단된다. 특히, 습지 외부에서의 토양 호흡량은 선행연구의 보고 보다 더 많은 양을 나타내었는데, 습지 외부의 경우 낮은 중량수분함량 등의 산림지역의 특성이 나타나, 많은 양의 토양 호흡을 나타낸 것으로 볼 수 있다. Savage and Davidson (2001)의 연구에서도 고지대에서의 토양 호흡량이 습지보다 높은 것을 확인하였다.

본 연구에서 상관관계 분석 결과, 습지 내·외부의 토양 호흡과 토양온도는 양의 상관관계를 나타냈다(Fig. 7(a); $P = 0.002$,

$r = 0.579$). 또한, 습지 내부와 외부에서 상관관계를 가진 항목들에 차이가 나타났는데, 습지 내부의 경우, 토양 유기탄소함량($P = 0.013$, $r = 0.641$) 및 중량수분함량($P = 0.002$, $r = 0.743$)과 유의한 양의 상관관계를 나타내었다(Fig. 7(b), (c)). 토양 유기탄소함량의 경우, 토양 호흡의 주된 원인이 되는 미생물의 활성에 많은 영향을 미치는 인자이다. 일반적으로 토양 유기탄소가 많아지면 미생물의 먹이원이 많아지기 때문에, 미생물의 활성이 높아지고, 이에따른 토양 호흡량이 증가한다고 알려져 있다. 토양 호흡의 경우, 토양 내 미생물과 같은 종속영양생물(heterotrophs)의 호흡과 독립영양생물(autotrophs)의 뿌리 호흡에 의해 발생된 이산화탄소가 대기 중으로 방출되는 과정으로, 이러한 과정들은 생물학적인 과정으로 환경 인자의 영향을 많이 받는데, 특히 토양 수분함량이 주요한 요인으로 여겨진다(Orchard and Cook, 1983; Davidson et al., 2000; Quansheng et al., 2003). 습지 내부가 토양 유기탄소 함량과 중량수분함량과 양의 상관관계를 나타낸 반면, 습지 외부의 경우 암모늄 이온($P = 0.029$, $r = 0.804$) 및 질산성 질소 이온($P < 0.000$, $r = 0.974$)과 양의 상관관계를 나타내었다(Fig. 7(d), (e)). Menge et al. (2012)의 연구에 의하면 300년 이하의 산림의 경우 질소 제한 생태계인 것으로 나타났다. 따라서, 토양 내 질소가 많아 질수록 미생물의 활성이 높아져 토양 호흡과 양의 상관관계를 나타낸 것이라 보여진다. 실제로 Lui et al. (2019)의 연구에서는 질소의 첨가로 인한 질소관련 미생물 활성의 변화로 토양 호흡이 11%~15% 증가하는 결과를 기록하다. 또한, 국내에서도 상수리나무림에 무기질소를 시비하였을 때 토양 호흡의 유의한 증가를 확인하였다(Choi and Moon, 2004). 습지 내·외부의 토양 호흡량을 비교하였을 때, 중량수분함량이 높게 나타난 습지 내부의 토양 호흡량이 습지 외부에 비해 낮은 것으로 나타나, 중량수분함량에 의한 미생물의 저해가 나타났다고 볼 수 있다.

4. 결론

국내 산지습지를 대상으로 식물체와 토양의 탄소 저장량 및 토양 호흡을 살펴보고, 공간적(습지 내·외부) 및 계절적 차이를 분석하는 연구를 진행하였다. 그 결과, 본 연구의 대상습지에는 기존에 국내 연구에서 보고된 것 보다 더 많은 양의 탄소가 저장되어 있는 것을 확인하였으며, 토양에는 수목에 저장된 탄소의 양보다 148배의 더 많은 탄소가 저장되어 있었다. 또한, 습지 내부 토양에 습지 외부 토양보다 유의하게(2.6~5.3배) 더 많은 양의 탄소가 저장되어 있었다. 습지 토양의 경우, 이전의 연구에서도 탄소 저장고로 매우 중요하게 여겨지고 있는데, 국내 산지습지 토양에도 많은 양의 탄소가 저장되어 있는 것으로 나타났다. 특히, 산지습지의 경우 주변 산림에서의 탄소 유입이 많아 이러한 경향이 더욱 두드러지는 것으로 예측된다. 토양 탄소 저장량에 영향을 미치는 인자를 살펴보면 습지 내부의 경우 중량수분함량 및 영양염류(T-P, NH_4^+)와 높은 상관관계를 나타냈으나, 습지 외부의 경우 T-P와의 상관관계만 나타나, 토양 탄소 저장에

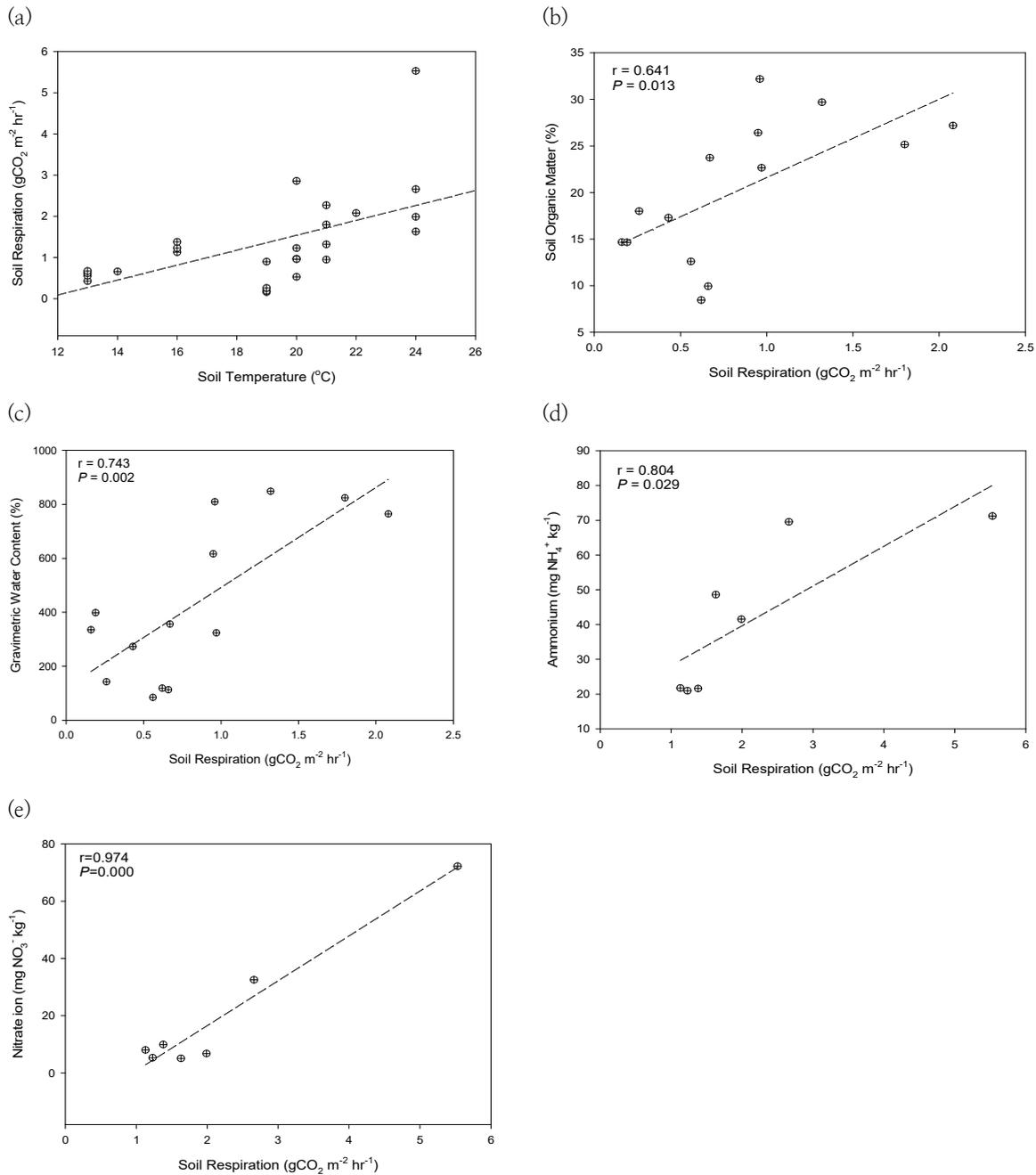


Fig. 7. Correlation between soil respiration and soil properties (a) soil temperature vs. soil respiration, (b) soil organic matter vs. soil respiration in inside wetland, (c) water content vs. soil respiration in inside wetland (d) NH_4^+ vs. soil respiration in outside wetland, (e) NO_3^- vs. soil respiration in outside wetland.

각각 다른 요인들이 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 또한, 토양 호흡의 경우, 공간적·계절적인 차이는 나타나지 않았으나, 습지 내·외부의 영향인자는 각기 다르게 나타났다. 습지 내부의 경우 유기탄소함량 및 중량수분함량과 유의한 양의 상관관계를 나타낸 반면, 습지 외부의 토양호흡은 질소 관련 항목들과 유의한 양의 상관관계를 나타내었다.

국내 산지습지의 경우 탄소 저장에 있어 매우 중요한 역할을 담당하고 있음에도 불구하고, 관련 연구 등은 매우 제한적이다. 본 연구를 통해 산지습지, 특히 토양에 많은 양의 탄

소가 저장되어 있다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 국내 산지습지의 탄소 저장 및 거동에 관한 더 많은 연구와, 탄소 저장고의 확보를 위한 정책적 보호 수단이 필요할 것으로 보인다.

사 사

본 논문은 환경부의 재원으로 국립생태원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIE-고유연구-2024-16).

References

- Adame, M. F., Santini, N. S., Tovilla, C., Vázquez-Lule, A., Castro, L., and Guevara, M. (2015). Carbon stocks and soil sequestration rates of tropical riverine wetlands. *Biogeosciences*, Vol. 12(12), pp. 3805–3818.
- Adhikari, S., Bajracharya, R. M. and Sitaula, B. K. (2009). A Review of Carbon Dynamics and Sequestration in Wetlands. *Journal of Wetlands Ecology*, Vol. 2(1), pp. 42–46.
<https://doi.org/10.3126/jowe.v2i1.1855>
- Buringh, P. (1984). Organic carbon in soils of the world. The role of terrestrial vegetation in the global carbon cycle: *Measurement by remote sensing*, Vol. 23, pp. 91–109.
- Choi, J.S. and Moon, H.T. (2004) Effect of Nitrogen Addition on Soil Respiration. *Journal of Ecology and Environment*, vol.27(3), pp. 155–159
- Davidson, E. A., Richardson, A. D., Savage, K. E., & Hollinger, D. Y. (2006). A distinct seasonal pattern of the ratio of soil respiration to total ecosystem respiration in a spruce-dominated forest. *Global Change Biology*, Vol. 12(2), pp. 230–239.
- Davidson, E. A., Verchot, L. V., Cattânio, J. H., Ackerman, I. L. and Carvalho, J. E. M. (2000). Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry*, Vol. 48, pp. 53–69.
- Dong, J., Wang, L., Quan, Q., Zhang, J., Li, X., Zhao, D., Fang, J. and Liu, J. (2022). Factors controlling soil organic carbon content in wetlands at multiple scales and assessment of the universality of estimation equations: A mega-data study. *Science of the Total Environment*, Vol. 827, pp. 154380.,
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154380>
- IPCC (2000) IPCC Special report: Land use, land-use change and forestry. Robert T. Watson, Ian R. Noble, Bert Bolin, N. H. Ravindranath, David J. Verardo and David J. Dokken (Eds.) Cambridge University Press, UK, pp 375.
- IPCC (2006) IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan.
- Kang, D. H., Kim, S. S., Kwon, B. H. and Kim, I. K. (2008) Observations of Variations in Soil Organic Carbon and Carbon Dioxide in the Constructed Wetland at Goheung Bay. *Journal of fisheries and marine sciences education*, Vol. 20, pp. 58–67.
- Keddy, P. A. (2010) Wetland ecology. Principles and conservation. Cambridge University Press, Cambridge & New York.
- Korea National Arboretum (KNA). (2019). Forest Wet Land of Korea. Korea National Arboretum. pp. 487.
- Lee, E. H., Lim, J. H. and Lee, J. S. (2010) A Review on Soil Respiration Measurement and Its Application in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 12(4), , pp. 264~276
- Liu, Y., Chen, Q., Wang, Z., Zheng, H., Chen, Y., Chen, X., Wang, L., Li, H. and Zhang, J. (2019). Nitrogen addition alleviates microbial nitrogen limitations and promotes soil respiration in a subalpine coniferous forest. *Forests*, Vol.10(11), pp. 1038.
<https://doi.org/10.3390/f10111038>
- Man, W., Mao, D., Wang, Z., Li, L., Liu, M., Jia, M., Ren, C. & Ogashawara, I. (2019). Spatial and vertical variations in the soil organic carbon concentration and its controlling factors in boreal wetlands in the Greater Khingan Mountains, China. *Journal of Soils and Sediments*, Vol. 19, pp. 1201–1214.
- Menge, D. N., Hedin, L. O. and Pacala, S. W. (2012). Nitrogen and Phosphorus Limitation over Long-Term Ecosystem Development in Terrestrial Ecosystems. *PLOS ONE* Vol. 7(8), pp. e42045.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0042045>.
- Nie, X., Wang, D., Ren, L., Du, Y. and Zhou, G. (2023). Storage and controlling factors of soil organic carbon in alpine wetlands and meadow across the Tibetan Plateau. *European Journal of Soil Science*, Vol. 74(3), pp. e13383.
- Orchard, V. A. and Cook, F. J. (1983). Relationship between soil respiration and soil moisture. *Soil Biology and Biochemistry*, Vol. 15(4), pp. 447–453.
- Park, S. Y., Yi, Y., Yoon H. and Sung K. J., (2012) Retention properties of organic matters and nutrients in wetland soils and coastal sediments. *Journal of Wetland Reserach*, Vol. 14(2), pp. 265–275.
- Phillips, S. C., Varner, R. K., Frolking, S., Munger, J. W., Bubier, J. L., Wofsy, S. C. and Crill, P. M. (2010). Interannual, seasonal, and diel variation in soil respiration relative to ecosystem respiration at a wetland to upland slope at Harvard Forest. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, Vol. 115(G2).
- Quansheng, C., Linghao, L., Xingguo, H. and Zhidan, Y. (2003). Effects of water content on soil respiration and the mechanisms. *Acta Ecologica Sinica*, Vol. 23(5), pp. 972–978.
- Reddy, K. R., Wetzel, R. G., and Kadlec, R. H. (2005). Biogeochemistry of phosphorus in wetlands, in: Phosphorus: Agriculture and the Environment, edited by: Sims, J. T. and Sharpley, A. N., American Society

- of Agronomy, Madison, WI, pp. 263–316.
- Savage, K. E. and Davidson, E. A. (2001). Interannual variation of soil respiration in two New England forests. *Global biogeochemical cycles*, Vol. 15(2), pp. 337–350.
- Seo, J., Song, K. and Kang, H. (2010) Influences of Water Level and Vegetation Presence on Spatial Distribution of DOC and Nitrate in Wetland Sediments. *Journal of wetlands research*, Vol.12, pp.59 – 65.
- SPSS Inc. Released 2009. PASW Statistics for Windows, Version 18.0. Chicago: SPSS Inc.
- Soil Survey Division Staff (1993), Soil Survey Manual, Soil Conservation Service, vol. 18, USDA, U.S.A.
- Stewart, A. J., Halabisky, M., Babcock, C., Butman, D. E., D'Amore, D. V. and Moskal, L. M. (2024). Revealing the hidden carbon in forested wetland soils. *Nature communications*, Vol. 15(1), pp. 726.
- Sundareshwar, P. V., Morris, J. T., Koepfler, E. K. and Fornwalt, B. (2003) Phosphorus limitation of coastal ecosystem processes, *Science*, Vol. 299, pp. 563–565.
- Turner, R. E., Rabalais, N. N. and Dortch, Q. (2003). Future aquatic nutrient limitations. *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 46(8), pp. 1032–1034.
- Verhoeven, J. T., Arheimer, B., Yin, C. and Hefting, M. M. (2006). Regional and global concerns over wetlands and water quality. *Trends in ecology & evolution*, Vol. 21(2), pp. 96–103.
- Xia, S., Song, Z., Van Zwieten, L., Guo, L., Yu, C., Wang, W., Li, Q., Hartley, I. P., Yang, Y., Liu, H., Wang, Y., Ran, X., Liu, C.-Q. and Wang, H. (2022). Storage, patterns and influencing factors for soil organic carbon in coastal wetlands of China. *Global Change Biology*, Vol. 28, pp. 6065–6085. <https://doi.org/10.1111/gcb.16325>
- Zianis, D. and Radoglou, K. 2006. Comparison between empirical and theoretical biomass allometric models and statistical implications for stem volume predictions. *Forestry* Vol. 79 pp. 477~487.