

하천습지 권역별 수문환경과 식생 특성이 토양 탄소·영양염류 동태에 미치는 영향

노희영^{*†}

^{*}넥서스환경디자인연구원(주)

Hydro-Vegetative Controls on Soil Carbon and Nutrient Dynamics in Riparian Wetlands

Hee Young Roh^{*†}

^{*}NEXUS Ecological Group, Republic of Korea

(Received : 11 November 2024, Revised : 25 August 2025, Accepted : 25 August 2025)

요약

본 연구는 하천습지 권역을 수문조건에 따라 육상권역, 수변권역, 수중권역으로 구분한 뒤, 권역별 수문환경과 수변식생이 토양의 유기물, 유효질소(N), 유효인산(P2O₅), pH, 전기전도도(EC), 수분함량에 미치는 영향을 실험실 규모의 모의 습지 시스템을 통해 정량적으로 평가하였다. 주요 하천식생종으로는 노랑꽃창포(*Iris pseudacorus*)와 물칸나(*Thalia dealbata*)를 활용하였다. 이를 위해 2022년 10월 중순부터 약 6주간 권역별 실험구(육상A, 수변B, 수중C)를 구축하여 품질검사법에 따라 토양 시료를 분석하였다. 일원배치 분산분석(one-way ANOVA) 및 Scheffé 사후검정 사후검정을 통해 권역 간 차이를 검정하였다. 연구 결과, 수중권역 토양은 유기물(2.685%), 유효질소(0.168%), 유효인산(136.225mg/kg), 수분함량(25%)이 육상권역 대비 각각 유의하게 높았으며($p < 0.05$), 이는 혐기조건에서 유기물 분해 억제에 따른 탄소, 질소 축적과 점토, 유기물 흡착에 의한 인 고정을 촉진한 결과로 해석된다. 반면, pH는 모든 권역에서 6.5~7.0 사이로 유의한 차이가 없었다. 특히, 토양 유기물 함량 변화는 토양 탄소 저장량의 증가와 관련이 있기 때문에 수중권역에서 육상권역보다 높은 탄소 저장능을 갖는 것으로 판단되었다. 또한 Welch's t-test 검정 결과, 물칸나는 노랑꽃창포보다 유기물과 유효질소를 유의하게 더 많이 축적하는 특성이 확인되었으며($p < 0.001$), 노랑꽃창포는 토양 pH가 다른 처리구와 비교하여 유의하게 높게 나타났다. 본 연구의 결과는 권역별 수문 조건과 식생 유형을 고려한 하천습지 식재 및 수위 전략 수립의 근거를 제공하며, 토양 유기물 함량 변화를 극대화 하기 위한 하천습지 복원 설계 실무에서 기초자료로 활용할 수 있다.

핵심용어 : 하천습지, 습지복원, 수문환경, 토양탄소, 영양염류, 하천식생

Abstract

This study assessed the effects of hydrological conditions and riparian vegetation on soil properties within simulated terrestrial (A), riparian (B), and aquatic (C) wetland zones over six weeks. Two macrophytes, *Iris pseudacorus* and *Thalia dealbata*, were cultivated, and soil samples were analyzed using standard protocols. One-way ANOVA showed that aquatic soils contained significantly higher organic matter (2.69%), available nitrogen (0.168%), available phosphorus (136.23 mg/kg), and moisture content (25.0%) compared to terrestrial soils ($p < 0.05$), while soil pH remained stable (6.5–7.0). Welch's t-test further revealed that *T. dealbata* accumulated more organic matter (2.62% vs. 1.08%) and nitrogen (0.167% vs. 0.090%) than *I. pseudacorus* ($p < 0.001$), whereas *I. pseudacorus* showed higher soil pH (7.16 vs. 6.19). These results demonstrate that hydrological zonation and vegetation type are key drivers of soil nutrient dynamics and carbon storage, offering practical guidance for wetland restoration and water-level management.

Key words : riverine wetlands, wetland restoration, hydrological environment, soil carbon, nutrients, riparian vegetation

[†]To whom correspondence should be addressed.

NEXUS Ecological Group, Gyeonggi-do, Republic of Korea
E-mail : love44925@naver.com

• Hee Young Roh NEXUS Ecological Group, Republic of Korea



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

습지는 생물서식처 제공, 탄소 저장, 수질 정화 등 다기능 생태계서비스를 수행하는 핵심 자연자원이다. 특히 하천 습지는 하천 수변부에서 육상과 수중 생태계가 접합되는 전이대로, 지하수위가 지면이나 그 근처에 있거나 얇은 물로 덮여 있는 생태계로 정의된다(Cowardin et al., 1979). 일반적으로 습지는 수체가 지속적으로 유지됨에 따라 혐기 조건이 형성되며, 이로 인해 토양 내 유기물 분해가 억제되어 높은 유기물 함량이 유지된다. 토양 유기물 함량이 높을수록 토양 유기탄소 저장량이 증가하므로, 습지는 전지구적인 탄소 저장고로서 탄소 저감 측면에서 핵심적인 역할을 수행한다.

그러나, 하천의 구조적 특성에 의해 일정한 수체를 유지하지 않고 수위의 변동과 유속의 흐름을 가짐으로써 수문학적 특성이 시간에 따라 변화한다. 이에 하천습지의 권역별 특성에 따라 탄소 저장 및 흡수 조건이 달라진다. 제6차 IPCC 기후변화 보고서(IPCC, 2021)의 온실가스 감축 목표 설정과 최근 환경부의 기후변화 관련 탄소중립 시나리오 및 정책 방향 설정에 따라 습지의 탄소저장 및 흡수에 대한 중요성이 강조되고 있다. 그럼에도 불구하고, 하천습지의 수문조건별 토양 내 탄소 저장량을 직접 비교하거나, 하천습지의 권역별(육상, 수변, 수중) 수문환경이 토양 탄소 저장 및 영양염류의 동태에 미치는 영향을 종합적으로 고찰한 연구는 드물다. 따라서 하천습지의 수위 변동에 따른 권역별 토양 흡수율 조건과 주요 하천식생의 종류에 따른 토양 내 탄소 저장량 및 영양염류의 영향 정도를 비교·평가하는 연구가 필요하다.

따라서 본 연구는 하천습지 내 식생권역을 수문조건에 따라 육상권역, 수변권역, 수중권역의 3개 권역으로 구분하고, 각 권역별 수분포화 조건을 실험실 규모의 모의 습지 실험구로 재현하였다. 이후 대표적 식생종인 노랑꽃창포와 물간나를 식재하여 약 6주간 생육 및 토양 유기물 변화 등을 모니터링 하였다. 토양 시료 채취 후 유기물 함량을 분석하여 권역별 탄소 저장량을 정량화하고, 수문 조건과 하천식생 종류에 따른 토양의 화학적, 물리적 환경 요인인 질소, 유효인산, pH, 전기전도도(EC), 수분함량을 비교·평가하였다. 본 연구 결과는 향후 하천습지 복원 및 관리에서 탄소 저장량을 극대화하기 위한 권역별 수문 조건과 식생 조합 전략 수립에 기여할 수 있으며, 나아가 복원 설계의 기초 자료로 활용될 수 있다.

1.1. 하천습지의 권역별 구분

하천습지는 유수 발생에 의한 하천작용으로 형성된 지형으로, 물에 의해 침수되거나 포화된 상태, 주기적인 침수에 의하여 일정 기간 동안 간헐적으로 침수되는 입지, 지하수위가 지표 가까이 있어 토양이 습성인 입지, 하천식생이 형성된 입지를 의미하며, 이 중 한가지 기준에 부합되면 하천습지로 규정한다(Cho, 2006). 또한, 하천습지는 하도의 홍수터에서 발생하는 수위변동 구간의 생태적 추이대로 정의되며, 건강한 하천 생태계의 생태계서비스를 유지하는 데 중요한 역할을 수행한다(Jeon, 2011).

하천습지의 권역 구분 기준은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 수위 변동을 기준으로 하는 방법(Lee, 2005; Lee, 2009)과 수변 식생 분포를 기준으로 하는 방법(Ministry of Environment, 2011; Park, 2011)이다. 먼저 수위 변동을 기준으로 하는 방법에 대한 연구로 Lee(2005)는 하천의 횡단면을 수위에 따라 수중권역, 수변권역, 고수부지권, 하천제방권, 하중도권으로 구분하고, 중수위와 저수위에 위치하는 수변권역을 다시 저수변부, 수변부, 고수변부로 세분하였다. Lee(2009)는 수분 구배 및 범람 빈도와 수위 변동을 고려하여 습지추이대, 조건대, 진연안대, 원수대로 권역을 구분하였다. 두 번째로 수변 식생 분포를 기준으로 하는 방법 연구로 Ministry of Environment (2011)는 수변공간을 지형과 우점 식생 분포를 결합하여 수생식물대, 습생식물대(하안부, 저수부), 하반림(고수부, 제방)으로 구분하였다. Park(2001)은 하천 횡단면의 미소지형 단위에 따라 수생식물 분포를 기준으로 수생식물역, 정수 식물역, 하원식물역으로 구분하였다.

본 연구에서는 이러한 기준을 종합하여, 수분 포화도를 중점적으로 고려함으로써 하천습지를 육상권역, 수변권역, 수중권역의 세 영역으로 구분하였다. 이후 각 권역에서 동일한 토양 및 식생 조건을 설정 후, 대표적 식생종으로 노랑꽃창포와 물간나를 식재하여, 권역별 수문 환경이 토양의 화학적·물리적 특성 및 식생 생육에 미치는 영향을 비교·분석하였다(Table 1, Figure 1).

Table 1. Moisture conditions by river wetland area

| 구분 | 특성 | 식물상 |
|-------|--|-------------------------|
| 육상 권역 | · 강우시기 및 혹은 홍수시기가 아닌 평상 시에는 토양표면이 건조한 상태를 유지 · 토성에 따라 토양 내 함수율 범위 상이 · 범람에 따라 연중 1~2회 관수의 영향을 받음 | 버드나무, 갯버들, 갈풀, 바늘고랭이 등 |
| 수변 권역 | · 하안이 직접 맞닿은 하안선을 중심으로 형성되며, 계절적 수위변동에 따라 간헐적으로 물에 잠기는 지역 · 뿌리와 줄기의 하부는 수중이나 포화된 토양층에 있으며, 줄기와 잎은 대부분 수변위에 있음 | 갈대, 부들, 줄, 꽃창포 등 |
| 수중 권역 | · 항상 수심이 발달하였으며 만수위 전까지 범위로 개방수역에서 연안대 사이의 구간 · 수중권역에는 침수식물, 부유식물 부엽 식물종 생육 | 마름, 가래, 수련, 개구리밥, 물옥잠 등 |

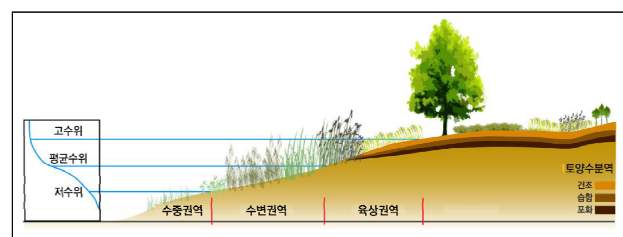


Fig 1. Classification according to river wetland area

1.2. 하천습지의 탄소 흡수·저장 메커니즘

하천습지에서 탄소가 흡수·저장되는 과정은 수리·수문 조건, 식생 조성, 토양 환경의 상호작용으로 설명될 수 있다(Table 2). 먼저, 수리·수문 조건에서 탄소 저장에 영향을 주는 인자는 범람 주기, 수위 변동, 유속 등이며, 이를 통해 유기탄소 유입과 메탄(CH_4) 방출이 결정된다. 일반적으로 수심이 깊고 유속이 낮은 구역은 용존산소 농도가 감소하여 혐기 조건이 강화되지만, 동시에 메탄 방출이 억제되는 경향이 확인되었다(Lee et al., 2011). 또한, 홍수로 인한 주기적인 교란을 받는 범람 과정에서도 상류에서 이송된 식물성 유기물이 퇴적되면서 상대적으로 높은 유기물 함량을 유지할 수 있다(Jung et al., 2014).

둘째, 식생 인자 역시 탄소 동태에 중요한 요소이다. 수변 완충대 설계 연구에 따르면 목본 위주의 식재가 다년생 초본보다 토양 탄소 축적과 이산화탄소 저장 효과가 크다는 결과가 제시되었다(Kim, 2010). 또한 콩과식물은 질소 고정 능력을

통해 토양 개량과 탄소 저장 효율을 동시에 높이며(Lee et al., 2020), 일부 침수식물은 야간에 중탄산이온(HCO_3^-)을 이용해 이산화탄소를 고정하는 특수 광합성 경로를 나타내어 고수위 구간에서의 탄소 흡수를 증진한다(Lee and Sung, 2013).

셋째, 토양 인자는 탄소 저장량의 직접적인 매개체이다. 토양 내 메탄생성균의 활성에 영향을 주는 주요 요인으로는 토양 유기물 함량, 산화·환원 전위, 토양 산도, 토성, 비료 투입 여부, 토양 온도 등이 있다(Kwon et al., 2022). 일반적으로 습지에서 토양 유기탄소는 0~30cm 깊이에서 높게 나타나며, 그 이상의 깊이에서는 점차 감소한다. 동일 깊이에서 토양 유기탄소는 식물체 탄소보다 최대 두 배에 해당하는 저장량을 보유한다(Nahlik and Fennessy, 2016; Xiaoyan et al., 2019). 또한 수분 함량과 미사 및 점토 함유량이 증가할수록 산화·환원 전위가 낮아져 탈질 및 메탄 생성 과정이 활성화된다(Kim et al., 2012). 특히, 산화·환원 전위가 -200 mV 이하로 떨어질

Table 2. Derivation of factors influencing carbon storage and absorption in river wetlands

| 구분 | 연구내용 | 영향인자 | 출처 |
|----------|--|--|--|
| 수리 수문 | <ul style="list-style-type: none"> • 메탄의 경우 수심이 깊을수록 발생량이 낮게 나타나며, 높은 수온과 토양온도는 메탄 발생량 가중시킴 • 수변지역은 수리·수문학적 상태에 따라 탄소흡수·축적 기능이 상이함 • 수류의 유기물 운반에 따른 하천의 중·하류 지역에서 유기물 함량이 높음 | <ul style="list-style-type: none"> • 수위변동 • 물순환 • 수류의 양분이동 • 유기물 유입·유출 | <ul style="list-style-type: none"> • 이정아(2011) • 정지선(2014) |
| 식생 | <ul style="list-style-type: none"> • 목본 위주의 식재가 탄소축적 및 저감에 효율적 • 콩과식물이 토양 내 탄소를 저장하는 역할을 함 • 식재기반형 이탄습지의 경우 같은 면적의 30년생 소나무의 CO_2 흡수량보다 다소 높음 • 일부 침수식물의 경우 밤중에 이산화탄소를 고정하여 낮 동안의 광합성에 이용하고, 습지 토양에서 배출되는 이산화탄소를 주로 활용함 | <ul style="list-style-type: none"> • 목본식물 • 콩과식물 • 이탄습지 • 침수식물 | <ul style="list-style-type: none"> • 김보라(2010) • 이선미(2020) • 일송환경복원(2014) • 이근주(2013) |
| 토양 | <ul style="list-style-type: none"> • pH 농도가 낮을수록 메탄의 대기방출 저해 • 토양의 0~30cm 구간이 가장 많은 탄소를 축적하며, 그 이상으로는 축적량 감소 • 토양 탄소 흡수원(0~40cm)은 식물 탄소 흡수원(0~40cm)의 약 두 배 • 토양의 수분함량, 미사·점토가 증가할수록 토양의 혐기조건 증가 및 탈질량 증가 • 토양의 산화·환원 전위가 -200mV에서 메탄화 과정이 발생함 | <ul style="list-style-type: none"> • PH 농도 • 토심 • 탄소흡수원 • 산화·환원 전위 | <ul style="list-style-type: none"> • 기보민(2013) • Nahlik(2016) • Xiaoyan(2019) • 김영주(2012) • 김재근(2004) |

Table 3. Measurement range and items for each experimental equipment

| 구분 | 측정범위 | 측정항목 |
|---|---|--|
| 토양다항목측정기 -SOIL6CH | 토양온도 : $0^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 토양습도 : $0 \sim 100 \text{ \%RH}$ 토양산도 : $4 \sim 10 \text{ pH}$ | 토양 내 온도, 습도, 산도 |
| 온습도 측정기 | 대기온도 : $0 \sim 70^\circ\text{C}$ 대기습도 : $0 \sim 100 \text{ \%RH}$ | 대기 온도, 습도 |
| ALMEMO 데이터 로거 | 이산화탄소 : $0 \sim 10,000 \text{ ppm}$ 산소 : $0 \sim 100\%$ | 대기 중 산소, 이산화탄소, 이슬점, 대기압 |
|  |  |  |
| ALMEMO-데이터 로거 | 온습도 측정기 | SOIL6CH-토양다항목측정기 |

경우 메탄생성균의 활성이 극대화되는 것으로 보고되었다(Kim, 2004).

종합하면, 수위 변동에 따른 토양 함수율의 변화로 인해 산화와 환원 조건이 달라지고, 이에 따라 탄소와 메탄의 동태에 차이가 발생한다. 이러한 인과 순환 고리가 하천습지의 탄소 순환을 설명할 수 있다. 본 연구는 이러한 선행 연구를 바탕으로 수위 차이에 따른 함수율 구배를 반영하기 위해 하천습지를 육상, 수변, 수중의 세 권역으로 구분하였다. 또한, 토양 내 탄소저장량은 0-30 cm 이내에서 가장 높게 나타나므로, 토양 탄소가 가장 집중되는 10-15 cm 깊이에서 토양 시료를 채취하였다(Sapkota et al., 2025; Nahlik & Fennessy., 2016). 아울러 하천식생 중 내습성과 내건성이 상이한 노랑꽃창포(*Iris pseudacorus*)와 물칸나(*Thalia dealbata*)를 식재하여 권역별 식생 효과를 비교하도록 실험을 설계하였다.

2. 연구방법

2.1. 연구재료 및 실험방법

2.1.1 연구재료 및 실험조건

본 연구는 하천습지의 세가지 수분권역을 육상권역(A), 수변권역(B), 수중권역(C)으로 구분하고, 실내에 실험구를 설치하여 권역별 수분 조건이 토양 유기물 함량 및 식생 생육에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 실험은 2022년 10월 17일부터 11월 30일까지 약 6주간 진행되었으며, 각 권역과 식생 조합별로 4회 반복하여 총 24개 실험구를 설치하였다.

식생은 하천변 전이대에서 자연적으로 분포하거나 복원 시 활용되는 습지식생으로 노랑꽃창포(*Iris pseudacorus*)와 물칸나(*Thalia dealbata*)를 선정하였다. 노랑꽃창포는 하천변의 가장자리에서 생육하는 종으로 내건성과 내습성이 우수하여 하천변의 전이대 식생으로 적합한 종으로 알려져 있다(Kang, 2012; Lee, 2014; Kim, 2015; Son, 2015; Park, 2022). 물칸나는 저지대 습지에 분포하며, 내습성이 강하고 양지 조건에서 생육하는 종으로 Kang(2012)의 연구에 따라 습지 식생으로 활용하였다. 두 식생종은 각 실험구에 동일한 밀도로 식재하였다(Table 4).

실내 환경 변수는 평균온도(°C), 상대습도(%), 이산화탄소 농도(ppm), 조도(lx)를 사전 측정하였으며, 측정 장비는 ALMEMO 데이터 로거를 활용하였다. 연구 기간 동안 주 3일 간격으로

모니터링을 실시하여 토양함수율, 식물 초장, 관수량을 기록하였다. 토양 함수율은 SOIL6CH 토양다항목측정기를 이용하여, 각 실험구 상층부 토양층 10cm 깊이에서 총 3회 측정 후 평균값을 산출하였으며, 이를 바탕으로 권역별 수분 포화도가 토양 유기물 축적과 식생 생육에 미치는 영향을 종합적으로 분석하였다(Table 3).

권역별 수분 조건은 육상권역(A)은 주간 관수량을 약 400ml로 제한하여 최소 생육 조건을 설정하였다. 수변권역(B)은 저면 관수 방식을 적용 후 일일 약 2L를 관수하여 토양 함수율을 안정적으로 유지하였다. 수중권역(C)은 실험구 경계면에서 10cm 높이까지 상시 침수 상태를 구현하여 포화, 환원 조건을 유지하도록 설계하였다.

2.1.2 토양수분 조건 및 토양 측정 항목

토양수분 조건과 초기 생육 기반토의 화학적, 물리적 특성을 평가하기 위해 다음과 같이 분석을 수행하였다. 초기 생육 기반토는 실험 대상지 인근 하천의 수변 식생대에서 채취한 토양을 기초 재료로 활용하였으며, 이는 연구 대상 식생의 실제 생육 환경을 반영하기 위함이다. 채취한 토양은 물리적·화학적 특성의 균질화를 위해 체질 과정을 거친 후, 식물 생육토와 5:5 비율로 혼합하였다. 이는 실험에서 식생의 초기 활착 및 생육 조건을 안정적으로 조성하기 위한 목적에서 수행되었다. 토양 함수율 측정은 총 9회에 걸쳐 진행되었으며, 이를 통해 권역별 평균 함수율 범위를 산정하였다. 그 결과, 육상 권역의 평균 함수율은 12.8%~26.4%의 범위를 나타냈으며, 수변권역은 24.7%~47.9%, 수중권역은 58.9%~74.5%의 범위를 나타냈다. 이와 같은 권역 간 토양 함수율의 뚜렷한 차이는 이후 유기물 축적 및 탄소 저장 변화 해석의 기초 자료로 활용하고자 하였다.

2.1.3 시료채취 및 분석

시료 채취는 각 권역 및 식생 실험구별 대표 지점에서 상층부(깊이 10-15cm) 토양을 채취한 후, 105°C에서 건조하였다. 이후 농촌진흥청의 「비료 품질검사 방법 및 시료 채취 기준」에 따라 공인 시험기관에 시험성적서를 의뢰하였다. 분석항목은 유기물, 유효질소(N), 유효인산(P₂O₅), pH, 전기전도도(EC), 수분함량의 총 6가지 항목이었다. 이를 통해 실험에 투입된 초기 생육 기반토의 화학적·물리적 특성을 종합적으로 파악하였다.

초기 기반토 분석 결과, 노랑꽃창포 처리구의 토양은 2.49%, 유효질소 0.13%, 유효인산 131.83 mg/kg, pH 6.23, 전기전도도 0.39 dS/m, 함수율 19.08%의 특성을 나타냈다. 물칸나(*Thalia dealbata*) 처리구의 토양은 유기물 1.98%, 유효질소 0.11%, 유효인산 196.39mg/kg, pH 6.07, 전기전도도 0.17dS/m, 함수율 16.96%로 측정되었다. 두 처리구 모두 사질양토로 분류되었으며, 이 결과는 권역별 및 식생별 토양 반응 차이를 해석할 때 활용하고자 하였다(Table 5).

데이터 분석은 SPSS를 활용하여 일원배치 분산분석(one-way ANOVA) 및 Scheffé 사후검정, Welch's t-test를 활용하였다.

Table 4. Construction of experimental zone(22.10.14)



| | |
|---|---|
|  |  |
| 실험구 설치(22.10.14) | 개별실험구(물칸나) |

Table 5. Soil properties of the initial planting substrate

| 분석항목 | 노랑꽃창포 | 물칸나 |
|---|--------|--------|
| 유기물(%) | 2.49 | 1.98 |
| 유효질소(N)(%) | 0.13 | 0.11 |
| 유효인산(P ₂ O ₅)(mg/kg) | 131.83 | 196.39 |
| 토양산도(pH) | 6.23 | 6.07 |
| 전기전도도(dS/m) | 0.39 | 0.17 |
| 수분함량 | 19.08 | 16.96 |
| 토성 | 사질양토 | 사질양토 |

3. 결과

3.1 하천권역별 토양환경요인 비교 분석

일원배치 분산분석 및 Scheffé 사후검정 결과, 수분 포화도가 높은 수중권역에서 토양 유기물 함량, 유효질소, 유효인산, 전기 전도도 및 수분함량이 모두 육상권역 대비 유의하게 증가하였다($p < 0.05$) (Table 6). 특히 유기물 함량은 수중권역(2.685%)에서 가장 높았으며, 수변권역(1.795%)과 육상권역(1.075%) 보다 유의하게 높은 값을 보였다($p = 0.015$). 이는 수중권역의 혐기성 조건에서 낮은 산소 농도로 인해 미생물 분해 속도가 느려지고, 그 결과 식물 잔재물과 부착조류 등의 유기물 축적이 촉진된 것으로 해석할 수 있다. 이러한 결과는 습지에서 혐기성 조건이 유기물 분해를 억제하여 탄소와 질소 축적을 증가시킨다는 연구(Mitch & Gosselink, 2015), 습지 내 유기탄소와 질소 농도가 연안 및 육상권역보다 유의미하게 높다는 연구(Reddy & Delaune, 2008) 결과와도 일치한다.

유효질소 함량 또한 수중권역(0.168%)이 가장 높게 나타났으며, 수변권역(0.134%), 육상권역(0.086%)의 순이었다($p = 0.004$). 이는 수중권역은 미생물 분해로 유입된 유기태 질소 순환이 활발하고 홍수 시 상류로부터 유입된 질소가 토양 내 축적되기 때문으로 판단된다.

유효인산의 경우, 수중권역에서 136.225 mg/kg으로 가장 높았으며($p < 0.001$), 수변권역(95.545 mg/kg), 육상권역(65.085 mg/kg) 순이었다. 이는 수변권역과 수중권역에서 유출수와 침전물에 포함된 인(P)이 식생 근권의 미생물에 의해 인산염이

흡착·저류되어 평균값이 상대적으로 높게 나타난 것으로 파악된다(Richardson, 1985). 특히 점토 입자 및 유기물과의 화학적 결합을 통해 인(P)의 흡착, 고정 작용이 높아지는 것으로 해석된다. 이러한 경향은 하천의 수변 식생대에서 물 흐름을 지연시켜 영양염류 침전 및 흡착을 촉진한다는 선행연구와도 부합한다(Kadlec & Wallace, 2009).

반면, pH는 세 권역 간 유의한 차이를 보이지 않았으며($p = 0.182$), 세권역 모두 약산성에서 중성 범위에 머물렀다. 이는 토양 완충능(buffering capacity)이 유사하게 작용한 결과로 해석된다.

전기전도도는 수중권역(0.207 dS/m), 수변권역(0.166 dS/m), 육상권역(0.154 dS/m)의 순으로 나타났으며, 사후검정 결과 수중권역이 육상권역보다 유의하게 높았다($p < 0.05$). 이는 수중권역과 수변권역에서 지속적 침수로 인해 염류와 용해성 이온성분(유효 염류)이 축적되었기 때문으로 판단된다. 수분 함량의 경우, 수중권역(24.99%), 수변권역(23.79%), 육상권역(12.79%)의 순으로 나타났으며, 사후검정 결과 수중권역과 수변권역이 육상권역보다 유의하게 높은 값을 보였다($p < 0.05$). 이는 수변권역과 수중권역의 지속적 또는 반복적인 침수로 인해 토양 수분 함량이 증가하였기 때문이며, 건조한 조건의 육상권역과 대비되는 결과이다.

3.2 수변식생별 토양환경요인 비교 분석

Levene의 등분산 검정 결과, 대부분의 변수에서 분산의 동질성이 위배되어, Welch의 t-검정(Welch's t-test)을 활용하였다. 분석 결과, 노랑꽃창포와 물칸나 간 유기물, 유효질소, pH, 수분 함량에서 통계적으로 유의미한 차이가 확인되었다($p < 0.01$) (Table 7).

특히 물칸나 처리구는 노랑꽃창포 처리구 대비 유기물과 유효질소가 유의하게 높은 특성을 나타냈다. 유기물 함량은 물칸나 2.62%, 노랑꽃창포 1.08%로 높았고, 유효질소도 동일하게 물칸나 0.167%, 노랑꽃창포 0.09%로 나타났다. 이는 상대적으로 높은 생체량과 뿌리 분비물에 기인한 유기물, 질소 축적 능력을 반영한다.

반면 pH는 노랑꽃창포(*Iris pseudacorus*) 처리구가 평균 7.16으로 약알칼리성 경향을 보였으며($p < 0.001$), 물칸나(*Thalia dealbata*) 처리구는 평균 6.19로 산성화의 경향을 보였다. 이는

Table 6. Soil environmental factors by riparian zone

| 분석항목 | 총합 | 평균값 | | | F | p-value | Scheffe |
|---|--------|--------|--------|---------|--------|---------|-----------|
| | | A | B | C | | | |
| | | 육상권역 | 수변권역 | 수중권역 | | | |
| 유기물(%) | 1.852 | 1.075 | 1.795 | 2.685 | 5.190 | 0.015** | 1 < 3 |
| 유효질소(N)(%) | 0.129 | 0.086 | 0.134 | 0.168 | 7.200 | 0.004** | 1 < 3 |
| 유효인산(P ₂ O ₅)(mg/kg) | 98.952 | 65.085 | 95.545 | 136.225 | 29.182 | 0.001* | 1 < 2 < 3 |
| pH | 6.675 | 6.965 | 6.590 | 6.470 | 1.850 | 0.182 | - |
| 전기전도도(dS/m) | 0.176 | 0.154 | 0.166 | 0.207 | 3.953 | 0.035** | 1 < 3 |
| 수분함량 | 20.523 | 12.790 | 23.790 | 24.990 | 12.843 | 0.001* | 1 < 2=3 |

* $p < 0.001$, ** $p < 0.05$

Table 7. Effects of riparian vegetation on soil environmental factors

| 분석항목 | 노랑꽃창포 (N=12) | 물칸나 (N=12) | t | df | p-value |
|---|----------------------------|-----------------------------|--------|--------|---------|
| 유기물(%) | 1.083 (0.94 ± 1.24) | 2.620 (1.21 ± 4.13) | -4.245 | 11.233 | <.001* |
| 유효질소(N) (%) | 0.090 (0.06 ± 0.11) | 0.167 (0.11 ± 0.22) | -5.009 | 16.042 | <.001* |
| 유효인산(P ₂ O ₅) (mg/kg) | 88.676 (68.24 ± 106.40) | 109.226 (61.93 ± 166.05) | -1.488 | 13.876 | .080 |
| pH | 7.163 (6.91 ± 7.34) | 6.186 (5.94 ± 6.59) | 9.493 | 18.698 | <.001* |
| 전기전도도 (dS/m) | 0.163 (0.15 ± 0.18) | 0.189 (0.13 ± 0.27) | -1.490 | 11.948 | .081 |
| 수분함량 | 16.290 (5.06 ± 22.26) | 24.756 (20.52 ± 28.43) | -3.270 | 14.588 | .003** |

* $p < 0.001$, ** $p < 0.05$

식생별 뿌리 분비물의 화학적 특성 차이가 반영된 것으로 설명할 수 있다. 한편, 유효인산과 전기전도도는 두 집단 간 차이가 통계적으로 유의하지 않아($p > 0.05$), 해당 지표들은 식생 유형에 따른 토양 환경 차이에 덜 민감한 것으로 판단된다.

이러한 결과는 하천습지 복원 설계 시 권역별 수분 조건과 식생 유형에 따른 토양 화학적 특성 차이를 고려하여, 복원 목표에 맞는 식재 전략과 수위 조절 방안을 수립해야함을 시사한다.

4. 결론 및 고찰

수중권역과 수변권역에서는 지속적인 침수와 퇴적 작용으로 인해 토양 내 유기물, 질소, 인 등 주요 영양염류가 유의하게 축적되었으며, 이에 따라 전기전도도와 수분 함량이 증가하는 경향을 보였다. 반면, 육상권역은 배수가 원활하여 유기물 분해와 영양염류 유출이 상대적으로 활발하게 일어나 권역별 토양의 화학적·물리적 특성에서 뚜렷한 차이가 확인되었다. 이러한 권역별 차이는 토양 수분 조건, 미생물 분해 속도, 화학적 흡착능 등의 복합적 상호작용에 기인하는 것으로 해석된다. 특히, 지속적인 물포화로 인한 무산소 조건은 미생물의 호기성 분해를 억제하여 유기물 분해율을 낮추는 동시에, 유기물 보존율을 높이고 용해성 영양염류의 화학적·물리적 축적을 촉진한다. 또한 점토 및 유기물 표면에서의 양이온-음이온 교환 및 흡착 작용은 토양 내 탄소와 인의 보유능력을 강화하는데 기여한다.

유기물 함량 증가는 토양 탄소 저장량의 증대로 직결되므로, 본 연구 결과에 따르면, 수중권역은 육상권역보다 높은 탄소 저장능을 지니는 것으로 판단된다. 따라서 하천권역 주변에서의 지속적인 수심 확보와 수위 유지, 습지환경 조성은 탄소 저장 증진에 긍정적인 영향을 줄 수 있다.

다만, 본 연구는 총 6주간의 실험기간에 근거하여 결과를 도출하였기 때문에 장기적인 경향을 충분히 반영하기에는 한계가 있다. 또한 실내 실험이라는 점에서 실제 자연 습지와 규모, 주변 환경 조건 등과 차이가 존재한다. 따라서 향후

연구에서는 장기간의 모니터링을 통해 시간에 따른 토양 특성 변화와 탄소 저장 기능을 검증할 필요가 있으며, 현장 기반의 실증 연구와 다양한 공간 규모에서의 연구를 병행함으로써 실무 적용 가능성을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구 결과를 바탕으로 도출할 수 있는 생태복원 및 습지복원 관련 시사점은 다음과 같다. 첫째, 습지 복원 설계 시 지속적인 수위 조절을 위한 친환경 구조물을 적용하여 환원(anaerobic)과 산화(aerobic) 조건을 구현함으로써 유기물과 영양염류의 축적 및 처리 효율을 균형 있게 확보할 수 있다. 둘째, 복원 목표와 토양 특성을 고려한 식생 조합 비율 및 수위 조절 패턴의 설계 적용이 필요하다. 복원 초기 단계에서 식재종을 활용하여 빠른 유기물과 질소 확보가 요구되는 구역은 물칸나 등의 유기물 생산량이 큰 식생을 우선 식재할 수 있으며, 식물별 근권 호흡 및 산소 공급 능력의 차이를 고려한 혼식 설계를 통해 토양 화학성의 안정화를 유도할 수 있다.

셋째, 수변권역에서 인산 과다 축적에 따른 부영양화를 방지하기 위해 인 제거에 효과적인 식생 도입과 여과식생대(buffer strip) 등 저영향개발 기법의 적용이 필요하다. 다만, 본 연구에서 확인된 수중권역의 유효인산 증가는 단순한 영양염류 축적보다는, 건조 토양이 침수되며 발생하는 혐기성 조건에서 철(Fe)의 환원 과정과 함께 기존 토양에 결합해 있던 인이 용출되는 ‘유산인(Legacy phosphorus)’ 전환 현상일 가능성이 있다. 따라서 향후 연구에서는 인의 축적과 더불어 이러한 용출 메커니즘을 정량적으로 검증하는 과정이 필요하다. 마지막으로, 본 연구의 직접적인 실험 범위는 아니지만, 향후 실무적으로는 탄소 기반 토양 개량제나 적응적 관리 기법을 보완적으로 활용할 수 있을 것이다.

사 사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 습지생태계 가치평가 및 탄소흡수 가치증진 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2022003630003).

References

- AMS-III AU. (2019). Methane emission reduction by adjusted water management practice in rice cultivation. UNFCCC Clean Development Mechanism Methodology.
- Bu, X.Y., Dong, S.C., Mi, W.B., and Li, F.J. (2019). Spatial-temporal change of carbon storage and sink of wetland ecosystem in arid regions, Ningxia Plain. *Atmospheric Environment*, 204: 89–101. doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.02.026
- Cho, W.S. (2006). Classification and functional evaluation of riverine wetlands: Focus on Gyeongang Stream. Master's thesis, Sangmyung University, Seoul, Korea.
- Choi, I.Y. (2013). Effects of temperature increase on decomposition rate of soil organic matter and greenhouse gas emissions. Master's thesis, Ewha Womans University, Seoul, Korea.
- Choi, K.S. (2008). Vegetation and environmental factors in the lower reaches of Yangjae Stream. Master's thesis, Kyung Hee University, Seoul, Korea.
- Cowardin, L.M., Carter, V., Golet, F.C., and LaRoe, E.T. (1979). Classification of wetlands and deepwater habitats of the United States. Washington, DC: U.S. Fish and Wildlife Service.
- Gwon, H.S., Choi, E.J., Lee, S.I., Lee, H.S., Lee, J.M., and Kang, S.S. (2022). Research review of methane emissions from Korean rice paddies. *Journal of Climate Change Research*, 13(1): 117–134. doi.org/10.15531/KSCCR.2022.13.1.117
- Ilsong Environmental Restoration. (2014). Development of wetland creation and management technology specialized in greenhouse gas absorption and reduction. Ministry of Environment Report, Republic of Korea.
- IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Jeon, S.H. (2011). Assessment of naturalness of riparian wetlands vegetation. *Environmental Impact Assessment*, 20(1): 1–11.
- Jung, J.S., Lee, J.S., Lee, J.H., Sim, G.M., and Lee, J.S. (2014). Soil carbon accumulation and soil respiration characteristics of riparian vegetation in the Namhan River. *Korean Journal of Environmental Biology*, 32(4): 363–370.
- Kadlec, R.H., and Wallace, S. (2008). Treatment wetlands. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Ki, B.M., Jeon, S.H., Heo, M.S., Jeong, H.H., Park, J.H., Park, H.S., Park, H.J., and Cho, K.S. (2013). Methane production potential and methanogenic bacteria in relation to wetland soil properties. *Proceedings of the Korean Society for Environmental Education Conference*, 13(12): 176–178.
- Kim, B.R. (2010). Design strategies for riparian buffer zones considering carbon sequestration. Master's thesis, Pukyong National University, Busan, Korea.
- Kim, B.R., and Sung, K.J. (2010). Design methods of riparian areas considering non-point pollution reduction and carbon sequestration. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 32(11): 1030–1037.
- Kim, E.J., Cho, K.H., and Kang, J.K. (2014). A study on the correlation between river environments and vegetation distribution in the Nakdong River. *Journal of Korea Water Resources Association*, 47(4): 321–330.
- Kim, J.K. (2004). Monthly variations of redox potential in the Jingwan-naedong ecosystem conservation area. *Journal of Korean Wetlands Society*, 6(2): 65–71.
- Kim, Y.J., and Kang, H.J. (2009). Biogeochemical mechanisms of surface water-groundwater mixing zones as ecologically significant areas of natural rivers. *Journal of Korean Wetlands Society*, 11(1): 123–130.
- Kim, Y.J., Kwon, M.J., and Kang, H.J. (2012). Denitrification and controlling factors in relation to land use characteristics and micro-topography of tributaries of the Han River. *Journal of Korean Wetlands Society*, 14(1): 139–146.
- Lee, G.J., and Sung, K.J. (2013). Effects of floating and submerged plants on major water environments of wetlands. *Journal of Korean Wetlands Society*, 15(3): 289–300.
- Lee, J.A., Kim, H.D., and Lee, B.Y. (2011). Observational study for estimating methane emissions in Upo Wetland. *Journal of Environmental Science International*, 20(3): 301–308.
- Lee, S.E. (2009). Classification and community ecology of vegetation in potential floodplain wetlands of the Nakdong River, Gyeongnam Province. Master's thesis, Keimyung University, Daegu, Korea.
- Lee, S.M., Yoon, J.E., Kang, D.I., and Cha, J.K. (2020). Current status and improvement measures of planting in ecological restoration projects. *Environmental Impact Assessment*, 29(5): 307–322.
- Lee, S.Y., Ryu, H.W., and Cho, K.S. (2012). Effect of ammonia on methane oxidation rate of methanotrophs. *Journal of Korean Society of Odor Research and Engineering*, 11(1): 41–46.
- Lee, Y.K. (2005). Phytosociological classification and community ecology of riverine vegetation in Korea. PhD dissertation, Keimyung University, Daegu, Korea.

- Mitsch, W.J., and Gosselink, J.G. (2015). *Wetlands*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA.
- Ministry of Environment. (2011). Technical guidelines for ecological river restoration. Ministry of Environment Report, Republic of Korea.
- Nahlik, A.M., and Fennessy, M.S. (2016). Carbon storage in US wetlands. *Nature Communications*, 7: 13835. doi.org/10.1038/ncomms13835
- Park, B.K. (2011). A study on vegetation restoration models of eco-river revetments according to planting bases. Master's thesis, Dankook University, Yongin, Korea.
- Reddy, K.R., DeLaune, R.D., and Inglett, P.W. (2022). Biogeochemistry of wetlands: Science and applications. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Richardson, C.J. (1985). Mechanisms controlling phosphorus retention capacity in freshwater wetlands. *Science*, 228(4706): 1424–1427.
- Sapkota, Y., Berkowitz, J.F., Stagg, C.L., and Busby, R.R. (2025). A synthesis of freshwater forested wetland soil organic carbon storage. *Frontiers in Forests and Global Change*, 8: 1528440.
- Son, H.R. (2022). Relationship between hydromorphological characteristics of urban streams and wetland plants. Master's thesis, Konkuk University, Seoul, Korea.