

라이다 기반 습지 버드나무림의 비파괴적 탄소저장량 추정* - 운곡습지 사례 -

제갈갑성¹⁾³⁾ · 양영은²⁾ · 이승현²⁾³⁾ · 송영근⁴⁾

¹⁾서울대학교 환경대학원 환경설계학과 · ²⁾서울대학교 환경대학원 협동과정 조경학 ·

³⁾서울대학교 스마트시티 글로벌 융합 전공 · ⁴⁾서울대학교 환경설계학과 교수

Non-destructive Carbon Storage Estimation of *Salix Spp* community In Wetlands Using LiDAR* - A Case Study of Ungok Wetland -

Jekal, Gapseong¹⁾³⁾ · Yang, Yeongeun²⁾ · Lee, Seunghyun²⁾³⁾ and Song, Youngkeun⁴⁾

¹⁾Department of Environmental Design, Graduate School of Environmental Studies,
Seoul National University, Seoul, Republic of Korea,

²⁾Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Graduate School of Environmental Studies,
Seoul National University, Seoul, Republic of Korea,

³⁾Global Convergence Major in Smart City, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea,

⁴⁾Professor, Department of Environmental Design, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea.

ABSTRACT

Wetlands occupy only about 5–8% of the Earth's surface, but they function as key carbon sinks that play an important role in mitigating climate change. However, quantitative evaluations of the structural characteristics and carbon sequestration functions of *Salix spp.* forests in wetlands, which have high carbon storage potential, are limited both domestically and internationally. This study aims to identify the relationship between tree height and diameter at breast height (DBH) of wetland *Salix spp.* forests and to estimate and verify non-destructive carbon storage by integrating UAV Laser Scanning (ULS)

* 본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 습지생태계 가치평가 및 탄소흡수 가치증진 사업의 지원을 받아 수행되었습니다. 또한, 본 연구는 국토교통부의 스마트시티 혁신인재육성사업으로 지원되었습니다. (2022003630004) 또한 이 성과는 정부(환경부)의 재원으로 한국환경산업기술원의 지원을 받아 수행된 연구임.

First author : Jekal Gap-seong, Department of Environmental Design, Seoul National University, Student,
Tel : +82-2-880-8860, : khg05338@snu.ac.kr

Corresponding author : Song, Young-Keun, Department of Environmental Design, Seoul National University, Professor,
Tel : +82-2-880-8860, E-mail : songyoung@snu.ac.kr

Received : 28 October, 2025. **Revised** : 1 December, 2025. **Accepted** : 1 December, 2025.

and Mobile Laser Scanning (MLS). The study site is the Ungok Wetland *Salix spp.* forest (2.92 ha), dominated by *Salix spp.* DBH was obtained using MLS (1,625.7 pts·m⁻²), and tree height was obtained using ULS (637.45 pts·m⁻²). A total of 98 individual trees were analyzed by integrating structural variables. The relative growth equation derived from the ULS–MLS fusion was expressed as $DBH = 0.0008 \times H^{2.2753}$ ($R^2 = 0.551$), and the estimated carbon storage of the Ungok Wetland (28.37 tC/ha) showed a similar level to the national forest inventory (NFI) average for *Salix spp.* forests (29.13 tC/ha). Although the mean DBH of the Ungok Wetland (17.38 cm) was smaller than that of the NFI (24.89 cm), the maximum height in the Ungok Wetland (17.97 m) was higher than that of the NFI (15.60 m). The average height of the tallest 50% of individuals was greater in the Ungok Wetland (12.32 m) than in the NFI (9.38 m), indicating a slender growth form characterized by enhanced height growth. Despite such morphological differences, the consistency of carbon storage was due to the compensatory effect of height growth for the limitation in diameter growth. However, the lack of spatial diversity in the *Salix spp.* forest samples remains a limitation. In the future, it is necessary to verify the universality and predictive power of the model for inland wetland *Salix spp.* forests that include large trees with heights over 15 m.

Key words: *Wetland ecology, Carbon sequestration, LiDAR remote sensing, Allometric modeling, Forest structure analysis*

I. 서 론

습지는 지구 표면의 약 5~8%만을 차지하지 만(Zhang, Jiang et al. 2023), 기후 변화 완화를 위한 핵심 탄소 흡수원으로서 중요한 역할을 수행한다(Yu, Kim et al. 2022). 생물다양성 유지, 수질 정화, 홍수 조절 등 단위 면적당 가장 높은 생태계 서비스를 제공하는 공간으로, 인간 삶의 질과 직결되는 생태계이다(Conlisk, Chamberlin et al. 2023, 이수동, 정명희 et al. 2025). 그러나 전 세계적으로 습지의 약 87%가 소실되었으며, 특히 내륙 습지의 탄소 저장 및 격리 기능은 상대적으로 과소평가되고 있다.(이수동, 정명희 et al. 2025).

그 중 습지 버드나무림(*Salix spp.*)은 탄소 저장 잠재력이 높음에도 불구하고, 구조적 특성과 탄소 격리 기능이 충분히 규명되지 않았다(Zhang, Jiang et al. 2023). 습지 버드나무림의 탄소 저장 능력을 평가하기 위해서는, 수목 구조적 특성을 반영한 상대생장식(Allometric Equation)

이 필요하다(Brede, Terryn et al. 2022). 특히 수고(Tree Height)와 흉고직경(DBH) 간의 관계를 정확히 규명하는 것은 바이오매스 및 탄소저장량 추정의 정확도를 결정짓는 핵심 요소이다(Qiu, Liu et al. 2021, Mîzgaciu, Tudoran et al. 2025). 따라서 수고와 흉고직경의 관계를 정밀하게 분석하는 것은, 습지 목본 식생의 탄소 동태를 과학적으로 규명하는 기초 단계이다(Fonton, Medjibé et al. 2017).

특히 이러한 수고-흉고직경 관계는 습지 환경의 교란 요인에 따라 달라진다(Anderson, Lockaby et al. 2013). 습지의 수목은 수위 변동, 침수, 퇴적 등 다양한 교란이 지속적으로 작용하는 환경에서 성장하며(조광진, 임정철 et al. 2021), 이러한 교란은 개체 생장의 균형을 불안정하게 만들어 동일한 수고에서도 흉고직경의 변동 폭이 크게 나타나는 비정형적 성장 패턴을 초래한다(Fischer, Greet et al. 2021).

습지 버드나무림의 구조적 특성을 정량적으로 분석하기 위해서는 비파괴적 원격탐사 기법의

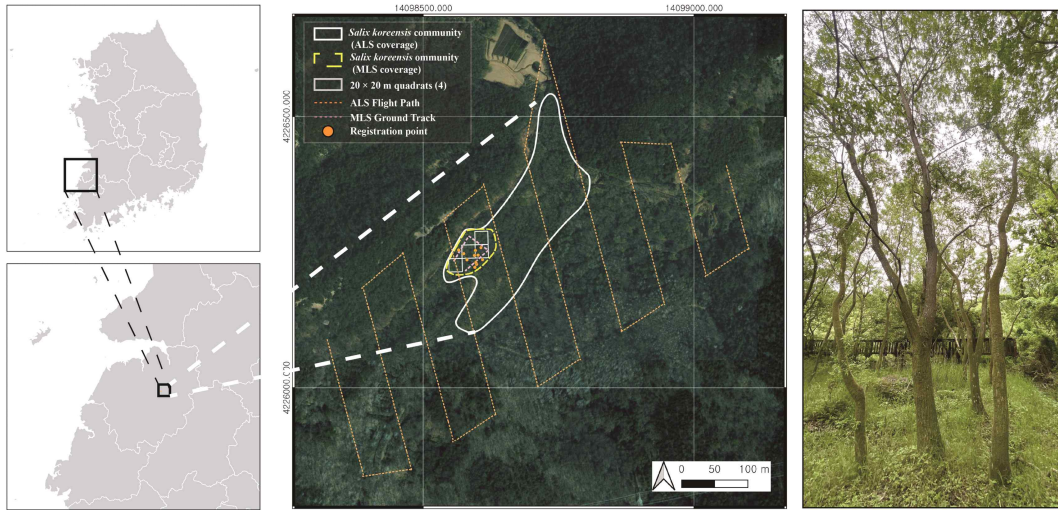


Figure 1. Study site in the Ungok Wetland

Table 1. Summary of data collection for MLS, ULS, Field survey

데이터 종류	장비	획득일	점밀도 / 비행고도
MLS	Kaarta Stencil 2-32	25-03-15	1625.7 pts m ⁻²
ULS	DJI Zenmuse L2 (DJI Matrice 300 RTK)	25-05-15	637.45 pts m ⁻² / 비행고도 130 m
Field survey	방형구 4개 (20×20 m)	25-05-15	

도입이 필수적이다(Priscoe, Halls et al. 2024). 습지 환경은 지면 접근이 어렵고, 토양 포화 및 침수로 인해 현장 조사의 효율이 매우 낮기 때문이다(Mahdavi, Salehi et al. 2018). 라이다(Light Detection and Ranging, LiDAR) 기술은 이러한 한계를 극복할 수 있는 고정밀 원격탐사 기법으로, 수목의 3차원 구조를 비접촉 방식으로 정밀하게 측정할 수 있다(Choi and Song 2022). 드론 라이다(UAV Laser Scanning, ULS)는 광범위한 지역의 수고와 수관 구조를 효율적으로 파악할 수 있으나, 수관 하부의 줄기 정보 및 흉고직경은 충분히 확보하기 어렵다(Liang, Wang et al. 2019). 반면 이동형 라이다(Mobile Laser Scanning, MLS)는 하층부의 고밀도의 포인트 클라우드를 활용해 개체 단위의 흉고직경과 정밀하게 추출할 수 있지만(Mizgaciu, Tudoran et al. 2025), 넓은 지역

을 대상으로 한 공간적 확장성은 제한적이다(Choi and Song 2022).

이에 본 연구는 ULS와 MLS를 융합하여, 습지 버드나무림의 구조적 특성을 반영하는 비파괴적 탄소저장량 추정 및 검증을 하고자 한다. 본 연구의 목적은 ULS-MLS 기반 수고-흉고직경 관계식을 도출하고 이를 활용해 운곡습지의 탄소저장량을 산정하며, 국가산림자원조사(NFI) 자료와 비교하여 모델의 정확도와 생태적 타당성을 검증한다.

II. 연구 재료 및 방법

1. 연구 대상지

본 연구의 대상지는 전라북도 고창군 아산면 운곡리에 위치한 운곡습지(Ungok Wetland) 내의 버드나무림(*Salix spp.*) 구역(2.92 ha)이다. 운

곡습지는 1983년 영광발전소 냉각수 공급을 위해 조성된 운곡저수지 주변의 휴경 논에서 2차적으로 형성된 내륙습지-산지형-소택지형 습지로, 현재는 2011년 환경부 지정 습지보호지역이자 람사르 습지로 등록되어 있다(Figure 1).

대상지는 해발 35~75 m의 저지대에 위치하며, 과거 경작지의 잔재인 계단식 요철 지형이 남아 있어 토양의 공간적 이질성이 뚜렷하고, 수문 조건에 따라 미세한 생육 환경의 차이가 나타난다(김종원, 이승은 et al. 2017). 운곡습지의 식생은 버드나무 군락(*Salix koreensis* community)으로 구성되어 있으며, 본 연구에서는 이 버드나무 군락이 분포하는 2.92 ha 구역을 중심으로 LiDAR 기반 비파괴적 구조 분석 및 탄소저장량 산정을 수행하였다.

2. 데이터

본 연구에서는 운곡습지 내 버드나무림(2.92 ha)을 대상으로 라이다 자료(MLS·ULS)와 현장 조사 자료를 결합하여 구조적 생육 특성을 정량적으로 분석하였다(Figure 2). 지상 이동형 라이다(MLS)는 Kaarta Stencil 2-32 장비를 사용하여 2025년 3월 15일에 취득하였으며, 평균 점밀도 1,625.7 pts·m⁻²의 고밀도 포인트 클라우드를 기반으로 개체목 흉고직경을 산정하였다. 드론 라이다(ULS)는 DJI Zenmuse L2(기체, DJI Matrice 300 RTK)를 활용해 2025년 5월 15일, 비행고도 130 m, 점밀도 637.45 pts·m⁻² 조건에서 취득하였고, 이를 통해 수고 변수를 도출하였다. 동일 시기 4개 방형구(20×20 m)를 설치하여 개체목수와 흉고직경을 수집하였으며, 이 자료는 MLS·ULS 기반 구조 변수의 정확도 검증에 활용하였다 (Table1).

3. LiDAR 데이터 정합 및 전처리

본 연구에서는 MLS(2025년 3월)와 ULS(2025년 5월) 자료의 공간 정합을 수행하였다(Figure2). 정합은 LiDAR360의 Manual

Registration 기능을 활용하였으며, 두 자료에서 총 11개의 기준점을 선정하여 ULS 데이터를 기준(reference)으로 정렬하였다. 정확도 평가는 각 기준점의 잔차(residual error)를 기반으로 산출하였으며, 최종 평균 정합 오차는 0.56 m로 나타났다.

4. 개체목 분리

개체목 분리의 MLS 데이터를 활용하여 습지형 버드나무림의 높은 개체 밀도와 다간 구조를 고려하여 수행하였다(Figure2). 선행연구에 따르면, 버드나무류는 수관이 밀집한 환경에서도 LiDAR 기반 구조 분석이 효과적으로 (Castaño-Díaz, Álvarez-Álvarez et al. 2017), 고밀도 점군에서 개체 분리를 위해 0.2~0.4 m 범위의 유클리드 거리 임계값과 50~100점 수준의 최소 군집 크기가 안정적으로 사용된다(Sung, Eum et al. 2024). 본 연구에서는 이러한 선행연구의 범위와 더불어 현장 조사에서 확인된 수고·수관 폭·개체 간 식재 간격, 그리고 MLS 점군의 수평적 분포 특성을 함께 검토하여 인접 개체 간 최소 0.3m의 거리가 나타남을 확인하였다. 이를 바탕으로 0.3 m를 분할 거리 기준으로 설정하였다. 또한 습지 버드나무림에서 잔가지·초본층 반사점이 소규모 군집을 형성하는 특성을 제거하기 위해 기존 LiDAR 연구에서 제안된 50~100점의 기준을 참고하여 50점을 최소 군집 크기로 적용하였다(Rosier, Diels et al. 2021). 이러한 기준은 습지 버드나무림의 구조적 특성에 적합하며, MLS-ULS 융합 점군에서 개체 분리를 안정적으로 수행하는 데 효과적이었다.

5. 수고 흉고직경 변수 추출 및 관계식 구축

본 연구에서는 정합이 완료된 ULS-MLS 점군을 활용하여 버드나무 개체의 구조 변수를 추출하였다(Figure 2). 흉고직경은 MLS 개체목 데이터를 활용하여 LiDAR360의 DBH Measurement 기능을 이용하여 지면으로부터 1.3 m 높이(±0.05

m)서 산출하였다(Mizgaciu, Tudoran et al. 2025).

수고는 ULS 개체목 데이터에서 95번째 분위 값(P95)을 개체 수고로 정의하였다(Brede, Terryn et al. 2022). 이 과정을 통해 총 98주의 버드나무 개체에 대해 수고와 흉고직경 변수를 정량적으로 추출하였다. 이 후 산출된 수고와 흉고직경 데이터를 이용하여 버드나무 개체의 수고 흉고직경 상대생장식을 구축하였다.

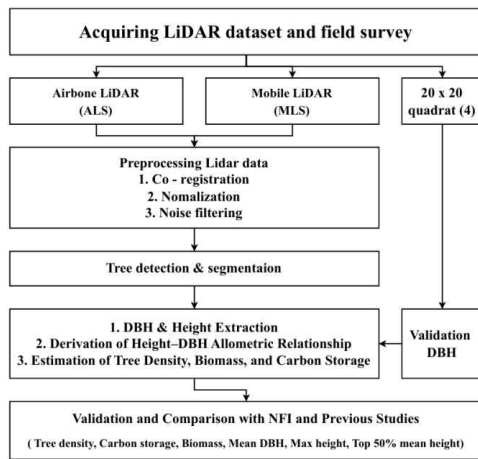


Figure 2. Workflow of Research

6. 탄소저장량 산정

이후 각 개체의 흉고직경과 수고를 입력 변수로 하여, 선행 연구의 왕버들(*Salix chaenomeloides*, *S. chaenomeloides*)의 상대생장식(김태근, 이팔홍 et al. 2007)을 적용하여 지상부 바이오매스 (Above-Ground Biomass, AGB)를 계산하였다 (Table 2).

국내·국의 선행연구에 따르면 *S. koreensis*와 *S. chaenomeloides*는 모두 하천 및 범람원·내륙 습지에 분포하는 대표적인 버드나무속(*Salix*) 교목으로, 여러 수변 식생 조사에서 *S. koreensis* 군락은 습지, 하천의 수변 교목층 우점 군집으로, *S. chaenomeloides*는 우포늪 및 낙동강 버드나무 수림의 주요 구성종으로 보고된 바 있다(김태근, 이팔홍 et al. 2007, 조형진, 진승남 et al. 2017, 조광진, 임정철 et al. 2021). 특히 우포

늪, 낙동강 연구에서는 *S. chaenomeloides*에 대해 흉고직경과 수고를 이용한 지상부 생물량 상대생장식이 제시되어 왔으나, *S. koreensis*에 대한 종 특이적 바이오매스 식은 보고되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 동일 속 내 습윤 수변 환경에 공존하며 성장 특성이 정량화된 근연종 *S. chaenomeloides*의 상대생장식을 대안으로 대리 적용하였으며, 이로 인한 AGB 추정치의 잠재적 불확실성은 방법론적 한계로 함께 논의하였다.

ULS 데이터는 Canopy Height Model(CHM)에서 국지적 최대값을 수관 중심으로 간주하는 Local Maxima 기반 개체목 탐지 기법을 적용하였다. 기법의 정확도는 4개 방형구(20×20 m)에서 수집한 개체목의 본수를 참값으로 설정하고, 동일 방형구에서 추출된 ULS 탐지 개체목의 본수를 비교하여 평가하였다. 그 결과 방형구별 ULS/Field 탐지율은 0.83–1.39 범위를 보였으며, 이는 습지 버드나무림의 다간 구조와 수관 중첩으로 인해 개체가 과·소분리될 수 있는 특성을 반영한 결과이다(Hamraz, Contreras et al. 2017). 이러한 탐지율 변동은 복잡한 활엽수림에서 Local Maxima 방식이 일반적으로 보이는 성능 수준과 정합적이며, 실제로 우세목 탐지율이 약 90% 이상, 하층목이 60%까지 감소하거나(Hamraz, Contreras et al. 2017), 높은 수관 피복 조건에서 탐지 재현율이 0.36–0.67 수준으로 저하된다는 선행연구 결과와도 일치한다(Sparks and Smith 2021). 따라서 본 연구에서 나타난 탐지율 변동은 습지 버드나무림의 구조적 특성에서 기인하는 정상적 편차로 해석되며, 하층목 누락이나 다간 개체의 과대 분리가 일부 존재하더라도 우세목 중심의 생물량 구조가 안정적으로 포착된 만큼 탄소저장량 산정의 신뢰성에는 실질적 영향이 없는 것으로 판단된다(Suchar and Crookston 2010, Cao, Ball et al. 2023).

산정된 AGB를 기반으로, 지하부 바이오매스

(Below-Ground Biomass, BGB)는 $BGB = AGB \times 0.43$ 의 관계식을 이용하여 추정하였다(Penman, Gytarsky et al. 2003). 총 바이오매스(Total Biomass)는 각 개체의 AGB와 BGB를 합산하여 산정하였으며, 탄소저장량(Carbon Storage)은 총 바이오매스에 탄소전환계수 0.47을 곱하여 계산하였다(Penman, Gytarsky et al. 2003). 이를 통해 ULS-MLS 융합 기반으로 산출된 개체별 탄소저장량 데이터셋이 구축되었다.

최종적으로 2.92 ha 전역을 대상으로 단위면적당 본수밀도(Tree/ha), 바이오매스량(t/ha), 탄소저장량(tC/ha)을 산출하였고, 4개 방형구(20×20 m) 현장조사 결과와 비교하여 전역 평균값의 신뢰성을 검증하였다.

Table 2. Allometric equation applied for carbon stock estimation (*Salix chaenomeloides*)

Plant organ	Biomass = $a \cdot (D^2H)^b$
Stem	$24.537 \times (D^2H)^{0.929}$
Branch	$6.8373 \times (D^2H)^{0.7233}$
Leaf	$8.6146 \times (D^2H)^{0.7239}$
Flower	$0.812 \times (D^2H)^{0.7209}$

7. 모델 검증 및 비교 분석

ULS-MLS 융합 기반으로 산정된 운곡습지 버드나무림의 구조 및 탄소저장량 결과를 검증하기 위해, 국가산림자원조사(National Forest Inventory, NFI)에 포함된 버드나무 방형구(19개 지점)의 자료와 비교 분석을 수행하였다(Yang, Zhou et al. 2023). 주요 변수로는 본수밀도(Tree density), 평균 흉고직경(DBH), 최대수고(Max height), 상위 50% 평균수고(Top 50% mean height), 바이오매스량, 탄소저장량을 선정하였다(Anderson, Lockaby et al. 2013, Brede, Terryn et al. 2022). 두 데이터 간의 상대적 차이를 표준화하기 위해 Z-score 표준화를 적용하였으며(Clark, Hakkenberg et al. 2025), 이를 통해 운곡습지 버드나무림의 구조적 특성과 탄소저장량을 NFI 버드나무 방형구와 정량적으로

비교하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 습지 버드나무의 수고 - 흉고직경 관계식 도출

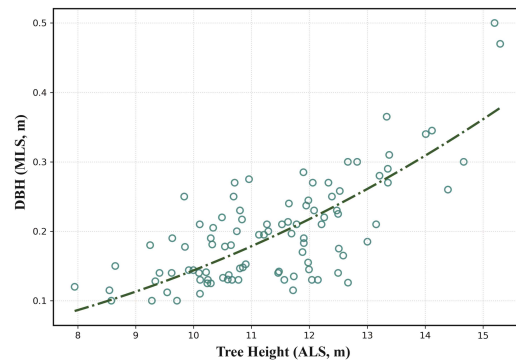


Figure 3. Correlation between tree height and DBH of *Salix* spp.

총 98주의 버드나무 개체를 대상으로 ULS와 MLS를 정합한 후 수고-흉고직경 간 상관관계를 도출하였다. 아웃라이어 2개를 제거한 96주 데이터에서 최종 회귀식은 $DBH = 0.0008 \times Height^{2.2753}$ 으로 나타났다. 두 개체목의 DBH 잔차는 $-0.171m$ 과 $-0.195m$ 로 나타났으며, 이는 전체 표본의 DBH 잔차 분포에서 산출된 임계값 $1.5 \times IQR$ 를 벗어난 이상치로 판단되어 분석에서 제외하였다. 모델의 상관계수(R)는 0.742, 결정계수(R²)는 0.551, RMSE는 0.050 m로 확인되었으며, ULS 기반 수고가 MLS 기반 DBH와 통계적으로 유의한 함수적 관계를 가지는 것으로 검증되었다(Figure 3, Table 3).

Table 3. Regression model in height and DBH

Equation	R ²
$DBH = 0.0008 \times Height^{2.2753}$	0.551

한편 선행연구에 따르면 습지 버드나무류는 침수, 수위 변동, 퇴적 등 수문 교란에 지속적인

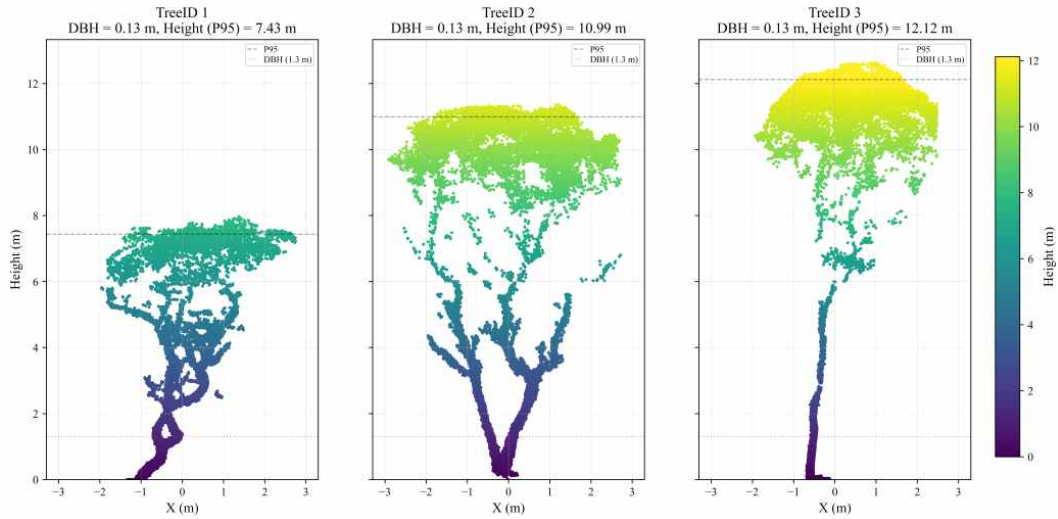


Figure 4. Different Tree Heights with Identical DBH in wetland *Salix spp.* community

로 노출되며, 이러한 환경적 이질성이 동일 직경에서도 수고를 크게 다르게 만드는 주요 요인으로 보고된다(Fischer, Greet et al. 2021). 본 연구에서도 동일 DBH 구간에서 큰 수고 변동성이 관찰되며, 습지 특유의 성장 변이성과 표본구조의 제약이 결정계수 저하의 핵심 요인으로 작용한 것으로 해석된다(Figure 4)

2. ULS - MLS 융합 기반 운곡습지 버드나무림 비파괴적 탄소저장량 추정

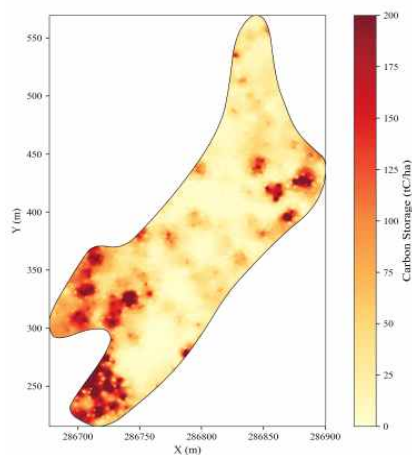


Figure 5. Spatial distribution of total carbon stock of *Salix koreensis* community

ULS 기반 수고와 MLS 기반 DBH를 융합하여 구축한 수고-흉고직경 관계식을 운곡습지 전역에 적용하였다. 분석 결과, 버드나무림의 총 면적은 2.92 ha, 총 개체수는 1,634본으로 산정되었으며, 총 바이오매스는 176.44 t, 총 탄소저장량은 82.92 tC로 계산되었다. 이를 면적 단위로 환산한 결과, 본수밀도는 560 Tree/ha, 바이오매스량은 60.37 t/ha, 탄소저장량은 28.37 tC/ha로 나타났다(Table 4).

운곡습지 내 4개 방형구(n=4)를 대상으로 한 평균치는 본수 밀도 581.25 ± 68.84 Tree/ha, 바이오매스량 88.54 ± 29.70 t/ha, 탄소저장량 45.16 ± 13.27 tC/ha로 전역 기반 평균보다 다소 높은 수준을 보였다(Figure 5, Table 4). 본 연구에서 방형구는 생장이 우수한 지역 2곳과 중간 수준의 지역 2곳을 선정하여 운곡습지의 구조적 특성을 대표하도록 배치되었으나, 조사 범위가 제한적이기 때문에 전역의 모든 생육 조건을 포괄하기는 어렵다.

반면 LiDAR 기반 전역 분석은 생장이 낮은 저밀도 지역과 침수·수위 변동·퇴적 등의 영향으로 왜소한 개체 그리고 생장이 높은 고밀도 지역까지 포함한 2.92 ha 전 범위 평균값을 제

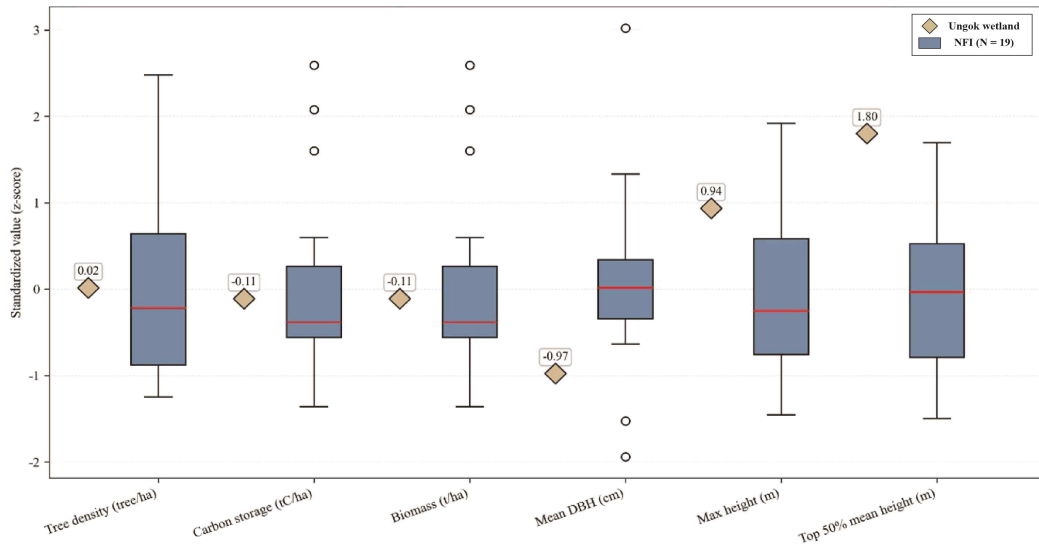


Figure 6. Comparison of standardized (z-score) ecological structure and carbon indicators between the Ungok *Salix spp.* Community forest and NFI *Salix spp.* community plots

공한다. 이러한 차이 LiDAR 분석이 운곡습지의 구조적·생태적 이질성을 전체적으로 반영하는 운곡습지 전역의 대표값을 산정한다는 점에서 의미가 크다.

운곡습지 버드나무림의 단위면적당 탄소저장량(28.37 tC/ha)은 일반적인 습지 초본 식생의 평균 탄소 밀도(약 5-10 tC/ha)에 비해 약 3~5 배 높은 수준으로(Sapkota, Berkowitz et al. 2025), 버드나무림이 습지 생태계 내 주요 탄소 흡수원으로 기능함을 정량적으로 입증한다. 특히 운곡습지 버드나무림의 평균 탄소저장량은 우포늪의 대표적인 왕버들림(28.36 tC/ha)과 유사한 수준으로(김태근, 이팔홍 et al. 2007), 두 지역 모두 버드나무류가 우점하는 높은 탄소저장 특성을 반영한다.

Table 4. Tree density, carbon stock, and biomass of *Salix koreensis* community in the Ungok Wetland

	Tree density (Tree/ha)	Carbon storage (tC/ha)	Biomass (t/ha)
전체	560	28.37	60.38
방형구	581.25 ± 68.84	45.16 ± 13.27	88.54 ± 29.70

3. 습지 버드나무 탄소저장량 모델의 타당성 검증

운곡습지 버드나무림 전체를 대상으로 구축한 ULS-MLS 융합 기반 탄소저장량 추정 모델의 결과를, 국가산림자원조사(NFI)에 주요 수종 버드나무(*Salix koreensis*) 방형구(19개)와 비교하였다(Table 4). 본수 밀도는 운곡습지 560 Tree/ha, NFI 555.8 Tree/ha로 거의 유사한 수준을 보였다. 탄소저장량은 운곡습지 28.37 tC/ha, NFI 29.13 tC/ha 또한 유사한 수준을 보였다. 바이오매스량 또한 각각 6.377 t/ha(운곡)와 61.98 t/ha(NFI)로, 두 지역 간 큰 차이는 관찰되지 않았다. 평균 흉고직경은 운곡습지 17.38 cm, NFI 24.89 cm로 NFI가 다소 높았으며, 최대수고는 각각 17.97 m(운곡)와 15.60 m(NFI)로 운곡습지가 2.37 m 높게 나타났다. 상위 50% 평균수고는 운곡 12.32 m, NFI 9.38 m로 2.94 m의 차이를 보여, 운곡습지의 상층부 구조 발달이 더 뚜렷하였다(Figure 6).

Z-score 표준화 결과, 운곡습지는 최대 수고(+0.94) 및 상위 50% 평균수고(+1.80)에서 NFI (-0.05, -0.10)에 비해 뚜렷한 양의 편차를 보였다. 반면 평균 흉고직경은 운곡 -0.97, NFI

+0.05로 통계적 차이가 상대적으로 명확하게 나타났다. 이러한 결과는 운곡습지 버드나무림이 흉고직경 발달보다는 수고 성장 중심의 구조적 특성을 보임을 시사한다(Figure 6).

운곡습지 버드나무림과 NFI 버드나무 방형구는 본수 밀도와 탄소·바이오매스 저장량은 유사한 수준을 보였으나, 개체의 형태적 구조에서는 뚜렷한 차이가 확인되었다. 운곡습지는 평균 흉고직경(17.38 cm)이 NFI(24.89cm) 대비 유의하게 작고, 최대수고와 상위 50% 평균수고는 각각 17.97 m와 12.32 m로 더 높았다(Figure 5). 이는 운곡습지 버드나무가 직경 성장보다는 수고 성장에 집중하는 ‘세장형(slender-form)’ 성장 전략을 취하고 있음을 나타낸다. 즉, 습지 환경에서 빛 획득 경쟁이 주요 요인으로 작용함에 따라, 버드나무는 수직 성장에 집중하여 상층부를 점유하는 전략을 취하는 것으로 해석된다 (Asigbaase, Dawoe et al. 2023).

이러한 형태적 차이에도 불구하고 운곡습지의 탄소저장량(28.37 tC/ha)은 NFI 버드나무림(29.13 tC/ha)과 유사하게 나타났다. 이는 ULS-MLS 융합 기반 탄소추정 모델이 실제 산림 조사값과 일관된 정확도를 보임을 시사하며, 모델의 타당성을 간접적으로 입증한다. 운곡습지와 같이 DBH는 작지만 수고가 큰 세장형 구조에서는 바이오매스 산정식의 D^2H 항에서 ‘높이’ 요인이 직경 부족분을 보정하는 역할을 수행하였을 가능성이 높다(Stovall, Anderson-Teixeira et al. 2018).

IV. 결론

본 연구는 드론 라이다(ULS)와 이동형 라이다(MLS)를 융합하여 습지형 버드나무림(*Salix koreensis*)의 구조적 특성과 탄소저장량을 비파괴적으로 정량화한 최초의 시도이다. 운곡습지(2.92 ha)를 대상으로 수행된 ULS-MLS 융합 분석 결과, 총 바이오매스는 176.44 t, 총 탄소저장량은

82.92 tC로 산정되었으며, 단위면적당 탄소저장량은 28.37 tC/ha로 확인되었다. 이는 일반적인 초본성 습지의 평균치(5-10 tC/ha)에 비해 약 3-5 배 높은 수치로, 버드나무림이 내륙형 습지 생태계 내에서 핵심 탄소 흡수원으로 기능함을 실증적으로 입증하였다. 또한, 수고-흉고직경 관계식 $DBH = 0.0008 \times Height^{2.2763}$ ($R^2 = 0.551$) 을 도출하여 습지 특유의 교란 환경을 반영한 상대성장 모델을 구축하였고, 이는 기존 산림형 식생식과 구별되는 세장형(slender-form) 성장 패턴을 정량적으로 설명하였다. 향후 연구에서는 국내 자생종인 *Salix koreensis*에 대한 고유 상대성장식의 개발이 필요하다. 본 연구는 근연종 식을 활용하였으나, 종 특이적 성장 특성과 구조 변이를 반영하기 위해서는 장기 방형구 관측, 지상 라이다 기반 구조 정보, 생체량 직접 측정 자료를 통합한 식의 구축이 요구된다. 이러한 후속 연구는 습지 버드나무류 탄소모델의 정확성을 높이고, 국가 단위의 습지 탄소 관리 체계 고도화에 중요한 기반이 될 것이다.

Reference

- Anderson, C. J., et al. (2013). “Changes in wetland forest structure, basal growth, and composition across a tidal gradient.” *The American Midland Naturalist* **170**(1): 1-13.
- Asigbaase, M., et al. (2023). “Allometric relationships between stem diameter, height and crown area of associated trees of cocoa agroforests of Ghana.” *Scientific Reports* **13**(1): 14897.
- Brede, B., et al. (2022). “Non-destructive estimation of individual tree biomass: Allometric models, terrestrial and UAV laser scanning.” *Remote Sensing of Environment* **280**: 113180.
- Cao, Y., et al. (2023). “Benchmarking airborne laser scanning tree segmentation algorithms

- in broadleaf forests shows high accuracy only for canopy trees.” *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **123**: 103490.
- Castaño-Díaz, M., et al. (2017). “Evaluation of the use of low-density LiDAR data to estimate structural attributes and biomass yield in a short-rotation willow coppice: An example in a field trial.” *Annals of Forest Science* **74**(4): 69.
- Choi, H. and Y. Song (2022). “Comparing tree structures derived among airborne, terrestrial and mobile LiDAR systems in urban parks.” *GIScience & remote sensing* **59**(1): 843–860.
- Clark, M. L., et al. (2025). “Changes in GEDI-based measures of forest structure after large California wildfires relative to pre-fire conditions.” Available at SSRN 4993482.
- Conlisk, E., et al. (2023). “Evidence for the multiple benefits of wetland conservation in North America: carbon, biodiversity, and beyond.” *Point Blue*, March **32**.
- Fischer, S., et al. (2021). “Flood disturbance affects morphology and reproduction of woody riparian plants.” *Scientific Reports* **11**(1): 16477.
- Fonton, N. H., et al. (2017). “Analyzing accuracy of the power functions for modeling aboveground biomass reduction in Congo basin tropical forests.”
- Hamraz, H., et al. (2017). “Forest understory trees can be segmented accurately within sufficiently dense airborne laser scanning point clouds.” *Scientific Reports* **7**(1): 6770.
- Hamraz, H., et al. (2017). “Vertical stratification of forest canopy for segmentation of understory trees within small-footprint airborne LiDAR point clouds.” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **130**: 385–392.
- Hulshof, C. M., et al. (2015). “Tree height–diameter allometry across the United States.” *Ecology and evolution* **5**(6): 1193–1204.
- Liang, X., et al. (2019). “Forest in situ observations using unmanned aerial vehicle as an alternative of terrestrial measurements.” *Forest ecosystems* **6**(1): 1–16.
- Mahdavi, S., et al. (2018). “Remote sensing for wetland classification: A comprehensive review.” *GIScience & remote sensing* **55**(5): 623–658.
- Mîzgaciu, L., et al. (2025). “A Comparative Analysis of UAV LiDAR and Mobile Laser Scanning for Tree Height and DBH Estimation in a Structurally Complex, Mixed-Species Natural Forest.” *Forests* **16**(9): 1481.
- Penman, J., et al. (2003). “Good practice guidance for land use, land-use change and forestry.”
- Pricope, N. G., et al. (2024). “Precision mapping of coastal wetlands: An integrated remote sensing approach using unoccupied aerial systems light detection and ranging and multispectral data.” *Journal of Remote Sensing* **4**: 0169.
- Qiu, H., et al. (2021). “Variation in height-diameter allometry of ponderosa pine along competition, climate, and species diversity gradients in the western United States.” *Forest Ecology and Management* **497**: 119477.

- Rosier, I., et al. (2021). "A workflow to extract the geometry and type of vegetated landscape elements from airborne LiDAR point clouds." *Remote Sensing* **13**(20): 4031.
- Sapkota, Y., et al. (2025). "A synthesis of freshwater forested wetland soil organic carbon storage." *Frontiers in Forests and Global Change* **8**: 1528440.
- Sparks, A. M. and A. M. Smith (2021). "Accuracy of a lidar-based individual tree detection and attribute measurement algorithm developed to inform forest products supply chain and resource management." *Forests* **13**(1): 3.
- Stovall, A. E., et al. (2018). "Assessing terrestrial laser scanning for developing non-destructive biomass allometry." *Forest Ecology and Management* **427**: 217–229.
- Suchar, V. A. and N. L. Crookston (2010). "Understory cover and biomass indices predictions for forest ecosystems of the Northwestern United States." *Ecological Indicators* **10**(3): 602–609.
- Sung, U.-J., et al. (2024). "Evaluation of Tree Object Segmentation Performance for Individual Tree Recognition Using Remote Sensing Techniques Based on Urban Forest Green Structures." *Land* **13**(11): 1856
- Yang, M., et al. (2023). "Developing allometric equations to estimate forest biomass for tree species categories based on phylogenetic relationships." *Forest ecosystems* **10**: 100130.
- Yu, H., et al. (2022). Carbon sequestration potential in montane wetlands of Korea. *Glob Ecol Conserv* **37**: e2166.
- Zhang, Z., et al. (2023). "Assessment of the impact of wetland changes on carbon storage in coastal urban agglomerations from 1990 to 2035 in support of SDG15. 1." *Science of the Total Environment* **877**: 162824.
- 김종원, et al. (2017). "고창 운곡습지의 식물군락 다양성과 분포 특성." *생태와 환경* **50**(3): 295–304.
- 김태근, et al. (2007). "우포늪 지역에서 버드나무류 군집의 현존식생도, 현존량 및 1차 생산성." *Journal of Wetlands Research* **9**(2): 33–43.
- 이수동, et al. (2025). "지리산국립공원 내 설산 습지의 식물상과 식생구조 분석." *한국환경생태학회지* **39**(1): 30–45.
- 조광진, et al. (2021). "습지보호지역 버드나무림의 식물군락 특성." *한국습지학회지* **23**(3): 201–212.
- 조형진, et al. (2017). "하천 하안대에서 입지 연령에 따른 선버들과 왕버들의 생물량 변화." *Ecology and Resilient Infrastructure* **4**(3): 149–155.