ALS–MLS 융합을 활용한 습지 버드나무림의 비파괴적 탄소저장량 추정
- 운곡습지 사례로 -

제갈갑성[1)3)], 양영은[2)], 이승현[2)3)], 송영근[4)]
1)서울대학교 환경대학원 환경설계학과, 2)서울대학교 환경대학원 협동과정 조경학,
3)서울대학교 스마트시티 글로벌 융합 전공, 4)서울대학교 환경설계학과 교수

서론

연구 배경, 차별성, 연구 목적

습지는 지구 표면의 약 5~8%만을 차지하지만, 기후 변화 완화를 위한 핵심 탄소 흡수원으로 중요한 역할을 합니다. 그러나 전 세계 습지의 약 87%가 소실되었으며, 특히 습지 토양 탄소의 연구는 많이 진행되었으나, 버드나무림(Salix spp.)과 같은 내륙 습지림은 높은 탄소 저장 잠재력에도 불구하고 구조적 특성과 탄소 격리 기능에 대한 정량적 연구가 부족합니다.

버드나무의 탄소저장량을 정확히 평가하기 위해서는 수고(Tree Height)와 흉고직경(DBH) 간의 관계를 규명한 상대생장식(allometric equation) 구축이 필수적입니다. 하지만 습지는 수위 변동, 침수 등 비정형적 생육 환경으로 인해 일반 산림과 다른 구조를 보이며, 현장 접근이 어려워 조사 효율이 낮습니다.

본 연구는 ALS(항공 라이다)–MLS(이동형 라이다) 융합 기술을 활용하여 운곡습지 버드나무림의 탄소저장 능력을 규명하는 것을 목표로 합니다.

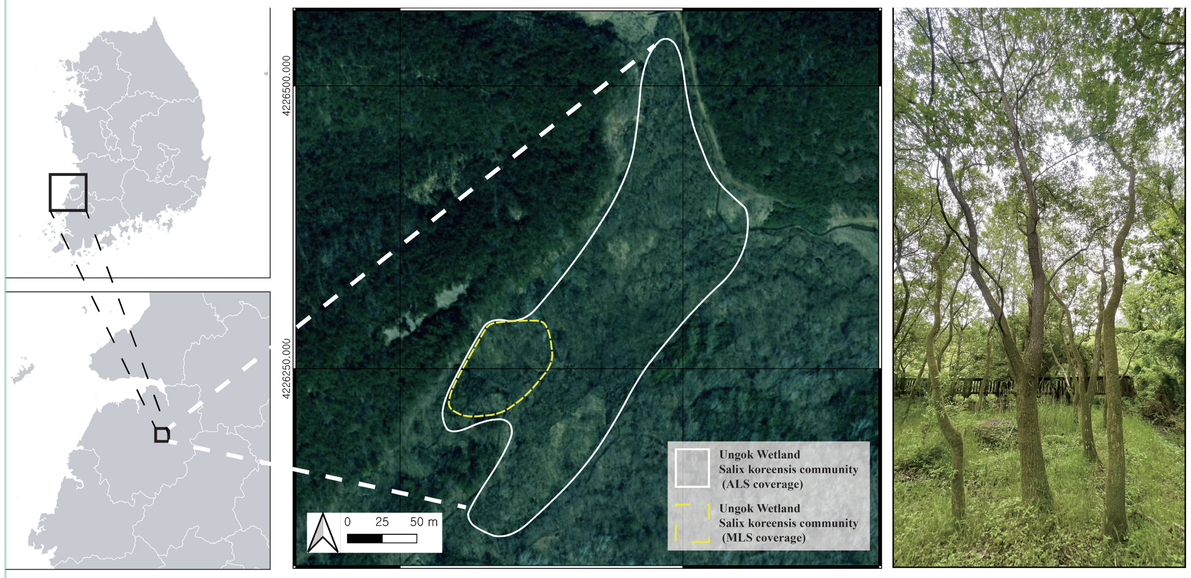
1. 수고–흉고직경 상대생장식 도출
ALS와 MLS 데이터를 융합하여 습지 버드나무의 수고–흉고직경 상대생장식 도출

2. 탄소저장량 산정
도출된 상대생장식을 활용해 운곡습지 버드나무림의 탄소저장량을 비파괴적으로 추정

3. 모델 타당성 검증
국가산림자원조사(NFI)와 비교하여 습지 버드나무림 모델의 정확도와 생태적 타당성을 검증

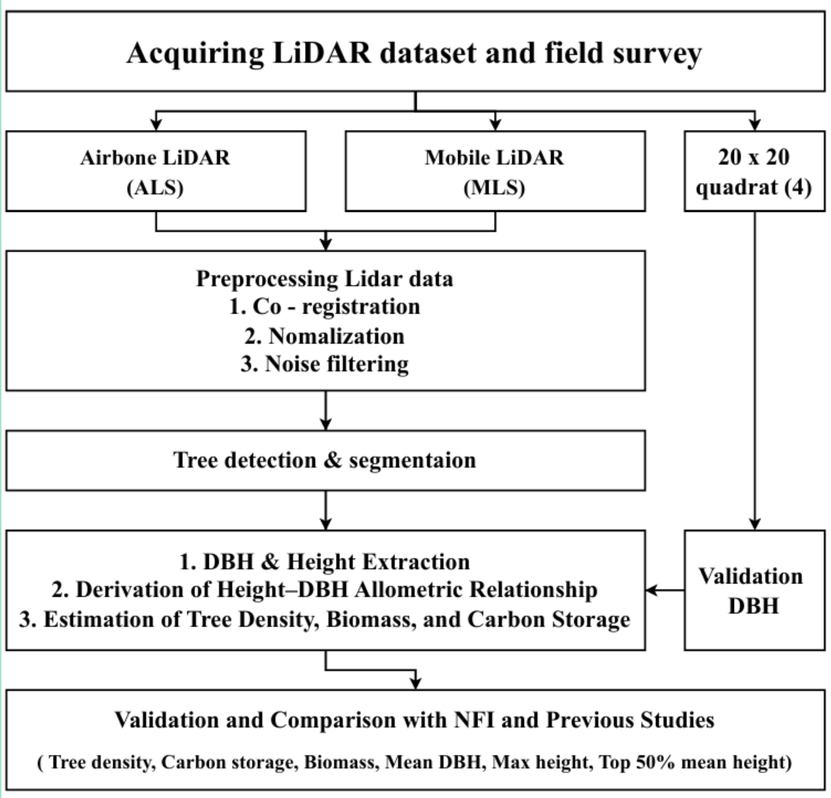
재료 및 방법론

연구 대상지

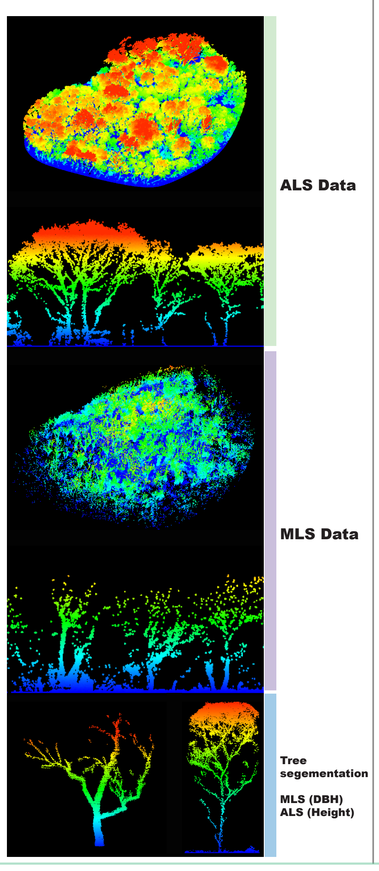


운곡습지는 전라북도 고창군에 위치하며, 1983년 운곡저수지 주변의 휴경 논에서 2차적으로 형성된 내륙 습지-산지형-소택지형 습지로, **2011년에 환경부 지정 습지보호지역이자 람사르 습지로 등록**되었다. 이 습지는 버드나무(Salix spp.)가 우점하는 대표적인 내륙 습지이며, 전체 면적의 약 63.81%를 버드나무 군락이 차지하는 이차 습생림의 특징을 보입니다.

연구 모식도

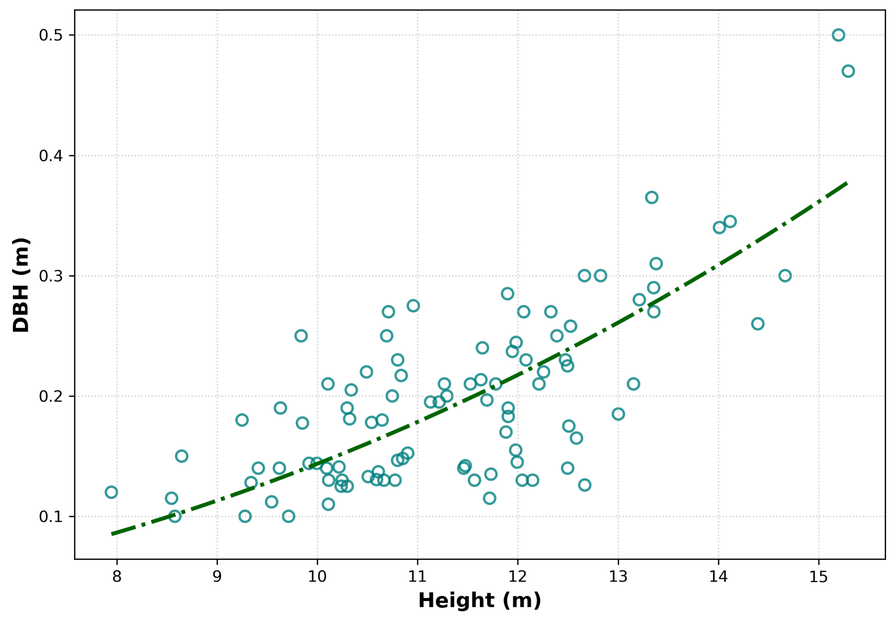


ALS - MLS 데이터



연구 결과 및 고찰

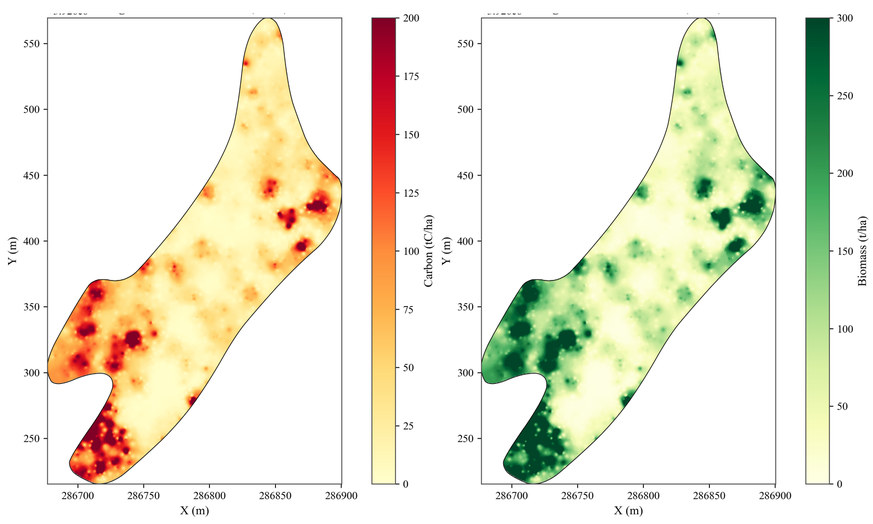
1. 습지 버드나무의 수고 - 흉고직경 관계식 도출



- 생장식의 생태적 해석: 도출된 결정계수(R^2=0.551)는 일반 산림 수종에 비해 상대적으로 낮은 수준을 보이는데, **이는 습지 환경의 수위 변동, 침수, 퇴적 등 다양한 교란 요인으로 인해 개체 간 생장이 불균질하여 비정형적 생장 패턴**이 반영된 결과로 해석됩니다.

Equation	R	R^2	RMSE (m)	Data Count
DBH = 0.0008 × Height$^{2.2753}$	0.742	0.551	0.050	96

2. ALS–MLS 융합 기반 운곡습지 버드나무림 비파괴적 탄소저장량 추정



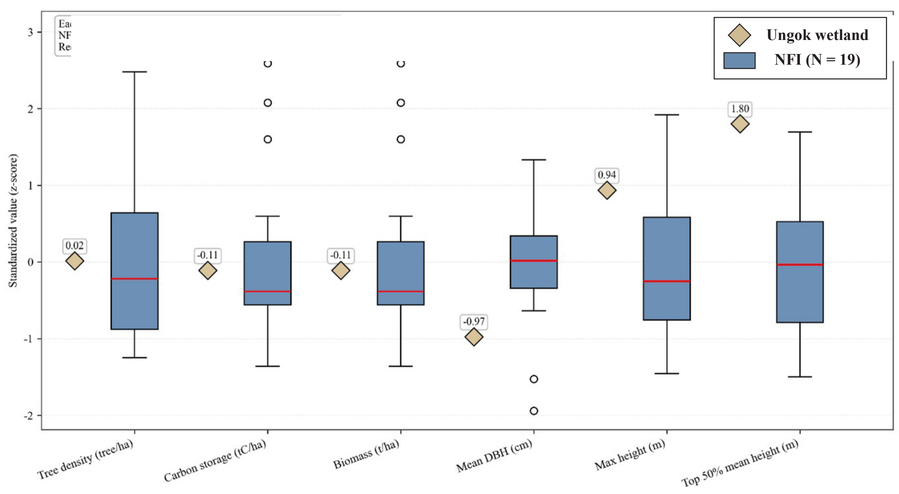
- 모델 검증: ALS–MLS 융합 기반으로 추정된 운곡습지 버드나무림 탄소저장량(27.45 tC/ha)은 우포늪 왕버들림(28.36 tC/ha) 및 NFI 버드나무림(29.13 tC/ha)과 유사 → **비파괴적 라이다 모델의 신뢰성 입증**

- 내륙 습지의 탄소 흡수력: 초본성 습지(5–10 tC/ha) 대비 약 3–5배 높음 → 버드나무림이 내륙 습지의 핵심 탄소 저장원으로 기능

- 전역 vs 방형구:
• 방형구는 제한된 지점의 생육 특성만 반영 → 대표성 낮음
• **전역 기반 라이다 분석은 2.92 ha 전체의 구조적 이질성과 공간적 변동성 포괄 → 보다 안정적·대표성 높은 추정치 확보**

구분	본수밀도 (Tree/ha)	탄소저장량 (tC/ha)	바이오매스량 (t/ha)
운곡습지 버드나무림 전체	560	27.45	58.40
운곡습지 버드나무림 방형구 (N=4)	581.25 ± 68.84	45.16 ± 13.27	88.54 ± 29.70

3. 습지 버드나무 탄소저장량 모델의 타당성 검증



- **세장형 생장 전략 확인** - 운곡습지 버드나무림은 NFI 대비 DBH는 작고(17.38 cm < 24.89 cm), 수고는 높음(17.97 m > 15.60 m).

이는 습지의 빛 획득 경쟁 환경에 적응한 수직 생장 중심의 '세장형(slender-form)' 전략을 의미함.

- 모델 타당성 및 높이의 보정 역할 - 탄소저장량(27.45 tC/ha)이 NFI(29.13 tC/ha)와 유사 → ALS–MLS 융합 모델의 정확도 입증.

이는 바이오매스 식에서 Height 요인이 DBH 부족분을 보정하여 구조적 불균형을 상쇄했기 때문으로 해석됨.

- 본 연구는 수문·지형 요인을 반영하지 못한 한계가 있음. 향후 수문 변수 통합 분석 및 15m 이상 대경목 확장 검증을 통해 모델의 보편성과 예측력을 강화할 필요가 있음.

변수 (Variable)	단위 (Unit)	운곡습지	NFI (N=19)	운곡습지 (Z-score)	NFI (Z-score)
Tree density	Tree / ha	560	555.79 ± 268.88	+0.02	-0.00 ± 1.05
Carbon storage	tC / ha	27.45	29.13 ± 15.47	-0.11	+0.01 ± 1.05
Biomass	t / ha	58.40	61.98 ± 32.91	-0.11	+0.01 ± 1.05
Mean DBH	cm	17.38	24.89 ± 7.53	-0.97	+0.05 ± 1.03
Max height	m	17.97	15.60 ± 2.48	+0.94	-0.05 ± 1.03
Top 50% mean height	m	12.32	9.38 ± 1.49	+1.80	-0.10 ± 0.96