

산림유형과 시기에 따른 GEDI - ALS 수고 일치성 및
GEDI 구조 지표(FHD, PAI) 특성 분석*
- 과천시와 의왕시 산림을 대상으로 -

이승현¹⁾²⁾ · 송영근³⁾

¹⁾서울대학교 환경대학원 협동과정 조경학 · ²⁾서울대학교 스마트시티 글로벌 융합 전공 ·

³⁾서울대학교 환경대학원 환경설계학과 교수

Forest-Type and Seasonal Analysis of GEDI - ALS Canopy Height
Agreement and GEDI Structural Metrics (FHD, PAI)*
- A Case Study of Forests in Gwacheon-si and Uiwang-si -

Lee, Seunghyeon¹⁾²⁾ and Song, Youngkeun³⁾

¹⁾Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea,

²⁾Integrated Major in Smart City Global Convergence, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea,

³⁾Professor, Department of Environmental Design, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea.

ABSTRACT

Forest ecosystem functions—carbon uptake and storage, productivity, and biodiversity support—are strongly governed by three-dimensional structure. Key features include height distributions and canopy organization. Airborne laser scanning (ALS) provides highly accurate structural measurements. However, its cost and limited acquisition frequency constrain broad, repeatable monitoring. NASA's Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) waveform LiDAR offers global sampling of vertical

* 본 논문은 기후에너지환경부 한국환경산업기술원의 생태계 기반 탄소흡수원 조성·관리 기술개발사업(RS-2023-00218245)의 지원을 받아 작성되었습니다. 그리고 이 논문은 국토교통부의 스마트시티 혁신인재육성사업으로 지원되었습니다.

First author : Lee, Seunghyeon, Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Seoul National University; and Integrated Major in Smart City Global Convergence, Seoul National University,

Tel : +82-2-880-8860, Email : shlee5598@snu.ac.kr

Corresponding author : Song, Youngkeun, Department of Environmental Design, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University, Professor,

Tel : +82-2-880-8860, Email : songyoung@snu.ac.kr

Received : 28 January, 2026. **Revised** : 5 March, 2026. **Accepted** : 6 March, 2026.

forest structure. Yet its performance in seasonally varying, species-diverse temperate forests remains insufficiently characterized. In this study, we evaluated GEDI Level 2A/2B footprints against leaf-on/off - matched ALS over temperate forests in Gwacheon-si and Uiwang-si, South Korea. Across deciduous, evergreen, and mixed forests, GEDI RH95 exhibited strong positive associations with ALS CRH95, but showed consistent height-dependent bias, with slopes <1 (0.315 - 0.716) and positive intercepts. Agreement improved under leaf-on conditions and was highest in mixed forests ($R^2 = 0.668$) with a minimal mean difference (0.025 m), indicating that separating leaf-on and leaf-off observations is important for calibration and sensor fusion because opposing seasonal biases can partially cancel when pooled. GEDI Level 2B metrics captured complementary aspects of canopy structure. Foliage height diversity (FHD) primarily reflected species and forest-type differences with relatively modest seasonal shifts, whereas plant area index (PAI) increased sharply under leaf-on conditions in deciduous and mixed forests. Two-way ANOVA supported these contrasting sensitivities, with significant effects detected where expected ($p < 0.001$ for all significant effects). Collectively, our findings demonstrate that GEDI can deliver actionable canopy-structure information in heterogeneous Korean temperate forests, while emphasizing the need for forest-type - and season-aware interpretation and bias correction in quantitative applications.

Key Words : *GEDI; airborne laser scanning; canopy height; forest type; leaf-on/leaf-off; foliage height diversity; plant area index*

I. Introduction

산림 생태계의 핵심 기능인 탄소 흡수 및 저장, 산림 생산성, 생물다양성 서식처 제공 등은 산림의 3차원 구조, 특히 수고 분포와 층위화, 수관 내부의 밀도 및 수직적 배치에 의해 크게 좌우된다(MacArthur and MacArthur, 1961; Hardiman et al., 2011). 이러한 수직 구조는 단순한 수종 분포나 면적 기반 지표보다 생체량의 공간적 이질성을 더 직접적으로 반영하며, 구조 기반(structure-based) 진단과 모니터링의 핵심 정보로 간주된다(Lefsky et al., 2002). 더 나아가 최근 연구들은 “수직 구조의 복잡성” 자체가 탄소 저장 및 생태계 기능과 밀접하게 연결될 수 있음을 보여주며, 구조 지표를 활용한 산림 모니터링의 필요성이 증대되고 있다(Ehbrecht et al., 2021). 전통적으로 이러한 수직 구조의 정량

화는 현장 조사나 표본 플롯 기반 추정에 의존해 왔으나, 이는 공간적 대표성 확보와 반복 관측에 제약이 있어 광역적·주기적 모니터링에는 한계가 있다(Lefsky et al., 2002). 이를 보완하기 위해 항공 라이더(Airborne Laser Scanning; ALS)는 산림의 3차원 점군 데이터를 통해 수고 분위수와 수관 높이 분포 등 다양한 구조 지표를 정밀하게 산출하는 표준적 도구로 자리 잡았다(Lim et al., 2003). 그러나 ALS는 높은 취득 비용과 제한적인 촬영 주기, 그리고 국가 단위의 자료 접근성 제약 때문에 넓은 지역을 주기적으로 관측하는 데 한계가 있으며, 자료 전처리의 표준화 및 재현성 확보가 지속적인 과제로 남아 있다(Roussel et al., 2020).

이러한 배경에서 2018년 발사된 GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation)는 전 지구적 규모의 산림 수직 구조 정보를 비교

적 짧은 주기로 제공하며 산림 모니터링의 새로운 전기를 마련하였다(Dubayah et al., 2020). GEDI는 약 25m 직경의 footprint 내에서 수고 상대높이(Relative Height) 지표뿐만 아니라 식생의 밀도와 수직적 분포 균등성을 나타내는 식생면적지수(Plant Area Index; PAI), 엽층높이 다양성(Foliage Height Diversity; FHD) 등의 지표를 제공한다(Dubayah et al., 2020). 특히 GEDI L2B 산출물인 FHD는 높이별 식생 분포의 다양성을 Shannon 지수 형태로 요약한 지표로, 동일한 수고라도 수관과 그 하부의 상대적 분포가 달라질 때, 구조적 복잡성의 차이를 반영할 수 있다(Dubayah et al., 2021b). PAI는 수관을 포함한 지상부 식생량을 요약하는 지표로서, 바이오매스 추정이나 연료량 특성화 등 다양한 생태-재해 분야 응용에서 중요한 입력 변수로 활용되고 있다(Leite et al., 2022). 최근에는 온대림을 대상으로 GEDI 수고뿐 아니라 total PAI와 수직 프로파일 지표까지 ALS 참조 자료와 비교하여 평가한 연구가 보고되었고(Dhargay et al., 2022), GEDI 수직 PAI 프로파일 산출물에 대해서도 DHP 및 ALS 기반 참조 자료와의 비교를 통해 제품 성능을 점검하면서 footprint 정합의 중요성이 함께 제시되었다(Wang et al., 2025a). 이는 GEDI가 높이 지표를 넘어 구조 및 식생량 관련 지표로 활용 범위를 넓힐 수 있음을 보여주는 한편, 지표별로 검증 근거를 축적할 필요가 있음을 시사한다.

다만 GEDI는 전 지표를 연속 관측하는 방식이 아니라 샘플링 기반(footprint) 관측이므로, 실제 활용을 위해서는 지역 수준에서 참조 자료와의 일치성 평가 및 불확실성 요인 규명이 반드시 선행되어야 한다(Adam et al., 2020; Dubayah et al., 2020). 선행 연구들에 따르면 GEDI의 정확도는 지형 경사, 수관 폐쇄도, 빔 특성 및 민감도(Sensitivity), 그리고 관측 시간 등에 의해 좌우될 수 있음이 보고되었다(Adam et al., 2020; Liu et al., 2021; Wang et al., 2022).

또한 footprint 지오로케이션 오차는 수고 및 구조 지표의 공간적 불일치와 오차를 유발할 수 있어, 지오로케이션 불확실성의 정량화와 보정 방법이 별도의 연구 흐름으로 축적되고 있다(Roy et al., 2021; Tang et al., 2023). 예를 들어 Tang et al (2023)은 체계적 지오로케이션 오차가 GEDI 수고 성능에 직접적인 영향을 줄 수 있음을 보이고, 빔 단위 조정을 통해 이를 완화할 수 있음을 제시하였다. 또한 ALS를 참조하여 몬테카를로 방식으로 footprint 위치 오차를 모의하고 보정함으로써 수고 오차를 줄이려는 접근도 제시되었다(Wang et al., 2025b). 따라서 지역 단위의 GEDI 활용에서는 품질 필터링뿐 아니라 footprint 정합과 위치 불확실성에 대한 고려가 중요하다.

최근 GEDI 활용 연구는 단순 정확도 보고를 넘어, 품질 필터링과 불확실성 관리, 그리고 광역 지도화로 확장되는 경향을 보인다. 예를 들어 GEDI 기반 수고 산출에서 알고리즘 설정, 품질 조건, 환경 요인을 체계적으로 점검하여 정확도를 높이려는 연구가 보고되었고(Moudrý et al., 2024), GEDI와 Landsat 등 광학 자료를 결합해 전 지구 규모의 수고 분포를 지도화하려는 접근도 제시되었다(Potapov et al., 2021). 한편 GEDI L2B의 PAI 등 수직 에너지 분포 기반 지표는 구조 복잡성 및 생태계 기능 연구에서 활용 가능성이 커지고 있으며, GEDI 파형과 프로파일 정보를 통해 구조 특성을 광역에서 평가하려는 연구도 보고되고 있다(de Conto et al., 2024). 그러나 이러한 확장에도 불구하고, 지역 단위에서 어떤 조건이 GEDI 수고 및 구조 지표의 오차를 체계적으로 좌우하는지, 특히 복합 지형과 혼합 임상 구조를 갖는 온대림에서의 검증 근거는 여전히 축적이 필요한 상황이다(Adam et al., 2020; Moudrý et al., 2024).

특히 온대림에서는 잎의 유무에 따른 생물계절적 상태(leaf-on/off)가 파형의 수직 에너지 분포와 gap 추정에 영향을 줄 수 있으므로, 동일

지역이라도 계절 조건에 따라 구조 지표의 분포와 오차 특성이 달라질 가능성이 제기되어 왔다(Wang et al., 2022). 실제로 낙엽수림과 침엽수림에서 leaf-on/off 조건에 따라 GEDI 수고 지표의 성능이 상반되게 나타날 수 있음을 보인 연구도 보고되었으며, 이는 임상과 계절 조건을 함께 고려한 검증 설계의 필요성을 시사한다(Rajab Pourrahmati et al., 2023). 더 나아가 최근 연구들은 GEDI를 다른 광학 자료와 결합해 하부식생(understory) 또는 층위 구조 특성을 추정하려는 시도를 보고하고 있어, 파형 기반 수직 에너지 분포 정보가 수관층만이 아니라 수관 하부 구조까지 반영할 수 있음을 간접적으로 보여준다(Mohammadpour et al., 2025). 이처럼 GEDI 구조 지표는 계절성, 임상, 지형·관측 조건에 따라 민감하게 달라질 수 있으므로, 특정 지역(특히 복합 지형과 혼합 수종 구조가 일반적인 지역)에서의 체계적 검증과 해석이 필요하다.

아시아 지역은 GEDI 모델 보정·검증에 활용되는 참조 자료가 상대적으로 희소하다는 지적도 꾸준히 제기되어 왔으며, 지역 특화 검증 연구의 축적이 요구된다(Duncanson et al., 2022). 이 맥락에서 국내에서도 GEDI 자료를 정제하거나 국가 산림자원조사(National Forest Inventory; NFI) 데이터와 결합하여 생체량을 추정하려는 시도가 보고되고 있으며(Cho and Lee, 2024; Lee and Lee, 2025), 지형이 험준하고 수직 구조가 복잡한 국내 산림 환경에서 시기와 임상별 구조적 의미를 동시에 고려한 GEDI-ALS 비교 및 GEDI 구조 지표 특성 분석의 필요성이 더욱 요구된다. 더구나 도시 열·기후, 재해, 탄소·생태계 기능 등 다양한 응용에서 산림 구조가 핵심 입력으로 사용되는 최근 경향을 고려하면, 국내 산림에서 GEDI 구조 지표의 활용 가능성과 한계를 분명히 하는 작업이 필요하다(Schneider et al., 2020).

따라서 본 연구는 경기도 과천시와 의왕시를 대상으로 GEDI와 ALS 데이터를 활용하여 두 가지 연구 목적을 수행한다. 첫째, leaf-on/off 시

기 및 주요 산림유형(낙엽수림, 상록수림, 혼효림)에 따라 GEDI RH95와 ALS CRH95의 일치성과 오차 특성을 평가한다. 둘째, GEDI L2B의 구조 지표인 FHD와 PAI를 활용해 산림 수종별·시기별 상대적 구조적 특성을 분석한다. 이를 통해 복잡한 수종 분포 및 지형적 특징을 갖는 국내 산림에서 GEDI 데이터의 활용 가능성과 한계를 제시하고자 한다.

II. Materials and methods

1. 연구 대상지 및 활용 자료와 전처리

본 연구의 대상지는 경기도 과천시와 의왕시로(Figure 1), 두 개 시를 대상으로 촬영된 ALS 자료를 연구에 사용하였다. 과천시는 2021년 11월과 2022년 4월에, 의왕시는 2021년 7월과 3월에 촬영되어 식생에 잎이 있는 시기와 없는 시기의 자료를 모두 활용하였다. 과천시의 ALS 자료는 1 제곱 미터 당 약 40개의 점군 밀도를 갖고 있으며, 의왕시 자료는 그보다 적은 10개의 점군 밀도를 갖고 있다. GEDI 자료는 Level 2A 와 2B 를 사용하였으며, 2021년 5월부터 2023년 11월까지 촬영된 자료 중 과천시와 의왕시 경계에 포함되는 자료를 모두 활용하였다(Table 1). 또한, 산림청에서 제공하는 임상도를 통해 GEDI 자료 중 산림을 대상으로 촬영된 자료만 별도로 분리하여 연구에 활용하였다. 이때에 낙엽성 침엽수인 낙우송을 고려하여, 산림 유형을 보편적인 활엽수림, 침엽수림, 혼효림이 아닌 수종에 따라 낙엽수림, 상록수림, 혼효림으로 구분하여 속성에 추가하였다.

ALS 자료는 캐노피 상대 높이(Canopy Relative Height; CRH)값을 취득하기 위하여 점군 전처리와 Normalized ALS point cloud (Normalized ALS) 제작의 과정을 거쳤다. 구체적으로, 점군 전처리는 노이즈 제거, 산림 내 전신주 및 송전탑 점군 제거, 지면 점군 분류의 순서로 진행되었다. 노이즈는 ALS 촬영 과정에서 발생할 수 있는 이

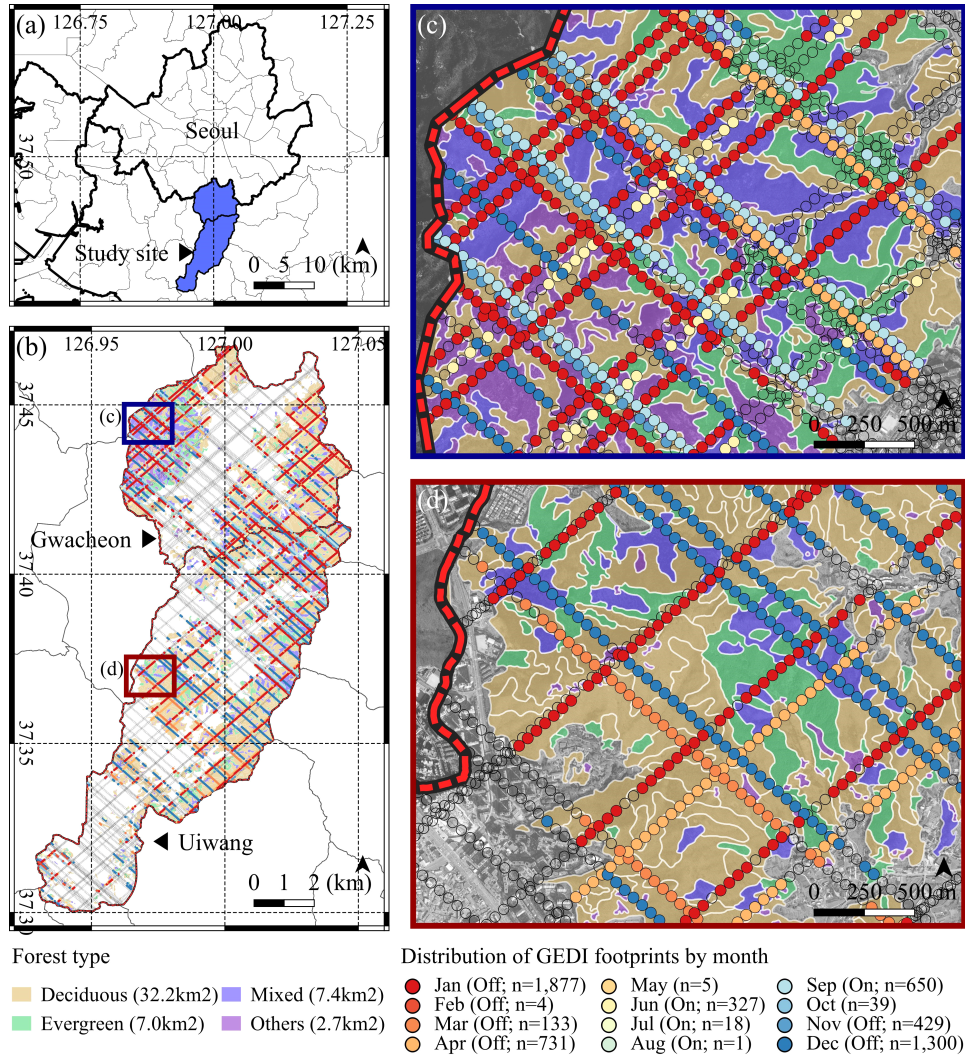


Figure 1. The location of study site and distribution of GEDI footprints. (a) The location of study site (Gwacheon and Uiwang); (b) The distribution of GEDI footprints by month and the forest type distribution; (c) GEDI footprints distribution at the western part of Gwacheon; (d) GEDI footprints distribution at the western part of Uiwang

상치로 고고도의 노이즈는 일반적으로 조류, 향 공기 같은 물체에 의한 레이저 반사로 발생한다. 저고도의 노이즈는 주로 다중 경로 반사 효과 (Multipath effect)로 인해 발생하며, 레이저 펄스가 센서로 돌아왔을 때, 실제 물체와의 거리보다 먼 것으로 인식되어 발생할 수 있다. 노이즈 제거는 개별 점군 포인트마다 이웃한 10개 포인트와의 평균 거리를 계산한 뒤 이상치를 탐지해내는

LiDAR360 (V8.0. GreenValley International Inc, Berkeley, CA 94710, USA) 소프트웨어의 Remove outliers 기능을 사용하여 제거하였다. 산림 내 전신주와 송전탑은 CRH 산정 시 매우 큰 오류값을 야기할 수 있다. 따라서, 산림의 과천시와 의왕시 산림을 모두 육안으로 확인하여 노이즈 제거로 삭제되지 않은 전신주와 송전탑을 수동으로 삭제하였다. 이 때, 송전탑은 구조물에 해

당하는 점군만 정확히 삭제하는 것이 불가능하므로 송전탑이 차지하는 최소 평면 영역의 모든 점군을 삭제하였다. ALS 지면 점군은 Zhao et al (2016)의 TIN densification filtering algorithm에 기반한 LiDAR360의 Classify Ground Points 기능을 사용하여 분류하였다.

Normalized ALS 는 ALS 점군에 대해 지면 고도를 기준으로 높이 정규화를 수행하는 것으로, 산림 식생 및 기타 객체는 지면으로부터의 상대 높이로 표현된다. Normalized ALS의 제작에는 분류된 지면 점군으로부터 생성된 1 m 해상도의 DEM (Digital Terrain Model)을 사용하였다.

GEDI 자료는 Level 2A 제품의 RH (Relative Height) 값과 Level 2B 제품의 FHD, PAI를 연구에 활용하였다. 두 제품의 속성값들은 촬영시간과 shotID를 기준으로 하여 동일 footprint에 조인하여 융합된 자료를 사용하였다. 분석에 활용할 GEDI 자료의 품질 확보를 위해 Liu, Cheng, and Chen (2021) 이 제시한 것과 동일하게 Sensitivity 값이 0.9 이상이며, Quality flag 값 1을 기준으로 필터링 하여 사용하였다. 또한, GEDI footprint 는 약 10m 이내의 지리참조 오류를 갖는 것으로 알려져 있으며, 이러한 현상은 급경사 지형, 임연부 등에서 주로 발생한다(Roy, D. P., et al., 2021; Tang, H., et al., 2023). 따라서, GEDI 품질 속성 중, Degraded flag 가 0인 조건을 만족하는 footprint만을 추가로 필터링하여 신호 품질 및 지리참조 저하 가능성이 있는

자료를 모두 제외하였다. 이 외에도, GEDI는 주간 태양 배경광에 영향을 받아 야간에 더 높은 정확도를 보이지만(Duncanson et al., 2020; Potapov et al., 2021), 본 연구에선 사전에 적용한 엄격한 필터링 기준과 데이터 표본의 증가를 위하여 주간/야간에 따른 필터링은 진행하지 않았다. 최종적으로, 필터링된 GEDI footprint의 촬영 월에 따라 잎이 있는 시기(6, 7, 8, 9, 10월)와 없는 시기(12, 1, 2, 3, 4월)를 구분하여 ALS와 동일한 시기별로 상호 비교가 가능하도록 하였다. 필터링 이전의 원본 GEDI footprint는 총 6,152개였으며, 필터링을 통해 2,448개의 footprint가 제외되어 최종적으로 총 3,704개의 GEDI footprint 가 분석에 활용되었다.

이후 ALS 와 GEDI 의 수고 비교를 위하여, 필터링이 완료된 GEDI footprint를 중심으로 반경 12.5 m의 버퍼를 적용하여 GEDI 데이터 획득 영역과 동일한 영역을 생성하였다. 해당 영역으로 Normalized ALS의 점군을 클립 후, CRH 값을 계산하여 연구에 활용하였다. 이후, GEDI 자료에 잎의 유무 시기를 구분하여 ALS CRH 값을 조인하였다. 연구 대상지인 과천시와 의왕시 마다 잎의 유무 시기의 두 ALS 자료가 있으므로, 총 4개의 원본 자료에 동일한 과정을 적용하여 최종 데이터를 구축하였다.

2. GEDI와 ALS의 산림유형/시기별 수고 비교 분석

전처리 과정 이후 동일 GEDI footprint 영역에

Table 1. Overview of ALS and GEDI datasets used in this study and the derived metrics.

Dataset	Site	Sensor (or product)	Acquisition Date	Pointcloud density	Derived Metrics	unit	Reference
ALS	Gwacheon	TerrainMapper1	2021.11.03. (leaf-on), 2022.04.02. (leaf-off)	approx. 40 pts/m ²	CRH95	m	-
	Uiwang	LiteMapper LM7800-II-s	2021.03.23. (leaf-off), 2021.07.23-27. (leaf-on)	approx. 10 pts/m ²	CRH95	m	-
GEDI	Gwacheon & Uiwang	Level 2A	2021.05. - 2023.11.	-	RH95	m	Dubayah et al., 2021a
		Level 2B			FHD	-	Dubayah et al., 2021b
		PAI			m ² /m ²	Dubayah et al., 2021b	

서 획득한 ALS 와 GEDI 수고 값으로 OLS 단순선형회귀를 수행하였다. 이를 통해 ALS-GEDI 사이의 일치성 비교를 넘어, 국내 산림의 시기적/공간적 특성에 따른 GEDI 자료의 활용성을 확인하고자 하였다. 값의 비교는 시기(leaf-on and -off) 와 산림유형(낙엽수림, 상록수림, 혼효림) 별로 구분하여 수행하였고, 추가적으로 동일 산림유형에 대해 두 시기의 값을 모두 포함하여 비교하였다. OLS 회귀는 GEDI 수고를 독립변수(x축)로, ALS 수고를 종속변수(y축)로 하여 수행하였다. 두 데이터에 대해 극단값이 회귀계수 추정에 미치는 영향을 최소화하기 위하여, boxplot의 이상치 판별법과 동일한 IQR 기반 규칙을 통해 이상치를 판별하고 분석에서 제외하였다. OLS 분석으로 분석별 표본 수(n), 회귀계수(기울기, 절편), 결정계수(R^2 ; Eq.(1)), 상관계수(pearson-r), p-value, RMSE (Root Mean Square Error; Eq.(2))를 산출하였다. 또한, GEDI 와 ALS의 수고 평균과 그 차이 및 $y=x$ 선과 OLS 회귀선의 교차점의 x값도 함께 그래프에 표시하였다(Figure 2).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (2)$$

여기서 x_i 는 GEDI RH95를 의미하며, y_i 는 동일 footprint에서 측정된 ALS CRH95를 의미한다. \hat{y}_i 는 OLS 회귀모형으로부터 계산된 ALS CRH95의 적합값을 의미한다. \bar{y} 는 ALS CRH95의 평균값이며, n은 비교에 사용된 footprint의 총 개수를 나타낸다.

3. GEDI 도출 FHD와 PAI의 시기별 수종별 분석

GEDI Level 2B 제품은 FHD 와 PAI 값을 제공하고 있다. FHD와 PAI는 각각 산림 식생의 수직적 복잡성과 수관 밀도를 대표하기 때문에, 이

를 활용하여 국내 산림의 수직적 발달 정도와 수관 밀도 특성을 GEDI를 통해 시기별, 수종별로 확인하고자 하였다. FHD와 PAI는 Shannon diversity와 gap probability에 기반한 동일한 개념적 정의를 갖지만, 산출 과정은 센서별로 상이하다. GEDI는 footprint 단위의 waveform 관측으로부터 FHD와 PAI를 산출하는 반면(Dubayah et al., 2021b), ALS는 discrete return 점군의 수직 분포를 기반으로 두 지표를 산출한다. 이러한 차이로 인해 두 지표의 절대값에 체계적 편향과 차이가 발생할 수 있으며, 선행연구에서도 ALS와 GEDI 간 PAI의 일치가 R^2 0.16으로 제한적인 것으로 보고되었다(Dhargay et al., 2022). 따라서, 본 절에서는 두 센서 간의 절대값 검증보다는, GEDI FHD/PAI의 시기별, 수종별 상대적 패턴 확인과 해석에 초점을 두었다.

FHD와 PAI 분석에서는 GEDI 와 ALS의 수고 비교에 활용했던 낙엽수림, 상록수림, 혼효림의 산림유형 분류보다 한 단계 더 세분화하여, 개별 수종 수준에서 두 시기의 값을 비교하였다. 낙엽수림은 낙엽송(*Larix kaempferi*; LK), 아까시나무(*Robinia pseudoacacia*; RP), 기타활엽수(DE), 상수리나무(*Quercus acutissima*; QA), 굴참나무(*Quercus variabilis*; QV), 기타참나무(QU)를 대상으로 한다. 상록수림에는 잣나무(*Pinus koraiensis*; PK), 리기다소나무(*Pinus rigida*; PR), 소나무(*Pinus densiflora*; PD)가, 혼효림은 침활혼효림(MX)을 대상으로 하였다. 분석 시, 오류 값 제거를 위해 FHD 와 PAI 모두 0 보다 큰 값들만 필터링하여 사용하였다.

GEDI 도출 FHD와 PAI의 시기 및 수종별 데이터 분포는 boxplot으로 시각화하되, 아웃라이어는 표시에서 제외하여 확인하였다. 또한 동일 산림유형 내에서 시기와 수종에 따른 FHD와 PAI의 차이를 검정하기 위해 범주형 변수를 포함한 OLS 일반선형모형을 적합하고, 이에 대한 two-way ANOVA를 수행하여 각 시기와 수종의 주효과 유의성을 평가하였다. 본 연구에서는 상

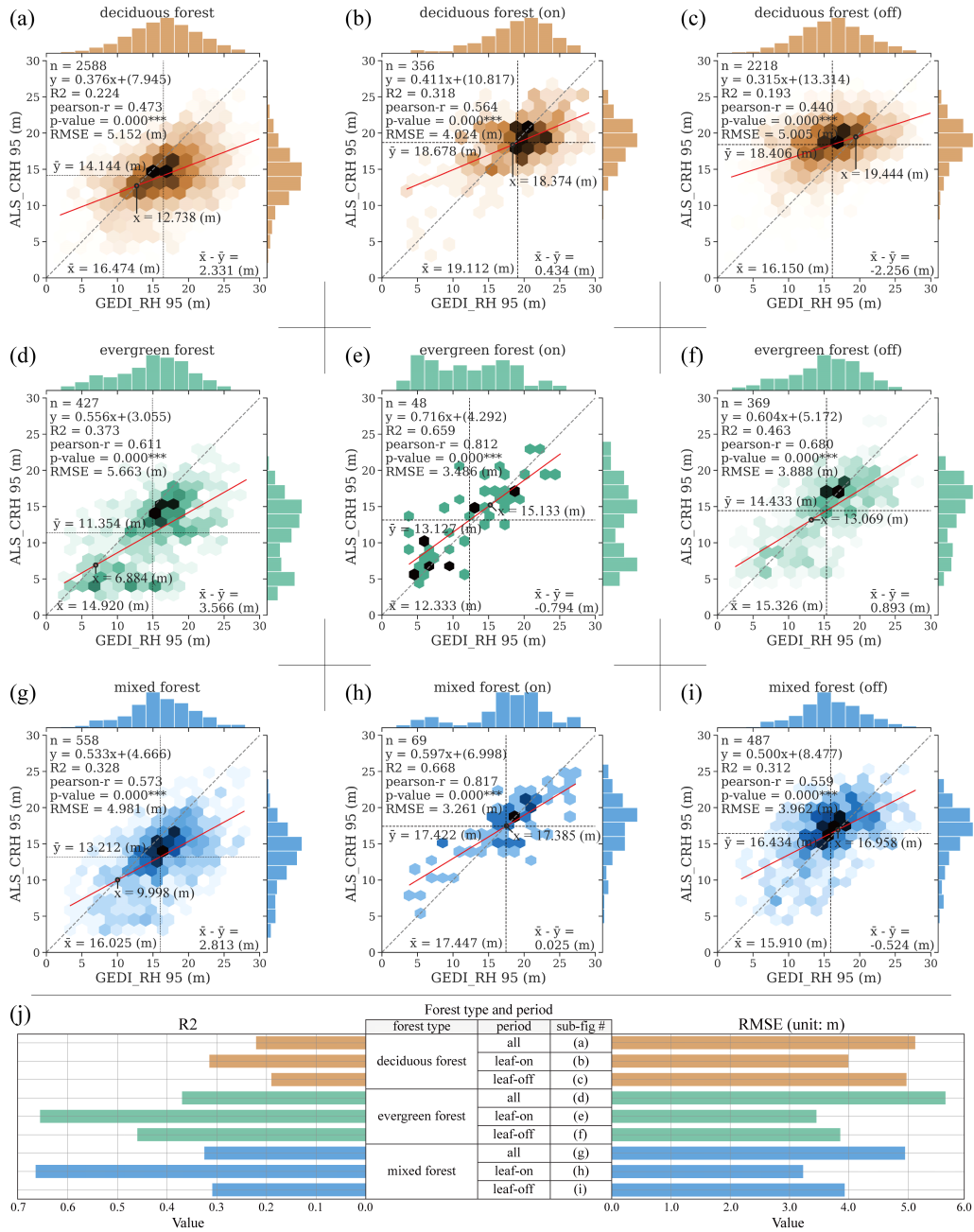


Figure 2. Relationship between GEDI(x-axis) and ALS(y-axis) canopy relative height 95 across forest types and periods. The hexagons represent scatter density, and marginal histograms showing data distributions. Red line indicates the ordinary least squares regression fit, and the dashed vertical/horizontal lines mark the mean values of GEDI and ALS respectively. The gray dotted line indicates $y=x$ line. (a-c) deciduous forest; (d-f) evergreen forest; and (g-i) mixed forest. The left, middle, and right columns respectively represent combined, leaf-on, and leaf-off period results. (j) R^2 and RMSE of subfigure (a)-(i).

호작용 효과를 포함하지 않은 주효과 모형을 적용하였으므로, 각 요인의 독립적 효과를 평가하기 위해 Type II 제곱합 F 검정을 사용하였다. 또한 시기 및 수종별 표본 수가 불균형하고 분산이 동일함을 가정하기 어려우므로, 회귀계수의 표준오차 및 유의확률 계산에는 HC3 방식의 robust 표준오차를 적용하였다. 요인 효과의 통계적 유의성은 F 통계량과 이에 대응하는 p 값을 기준으로 판단하였으며, 유의수준은 0.05로 설정하였다. 추가적으로, 시기 효과의 추정치(Estimate)를 산출하였으며, 이는 적합된 OLS 모형의 회귀계수값으로 산출하여 두 시기의 평균 차이(leaf-on - leaf-off)를 나타낸다.

III. Results

1. 산림유형과 시기에 따른 ALS 와 GEDI 의 수고 일치성 및 편향

GEDI 와 ALS 수고의 일치성을 평가하기 위해, GEDI 수고를 x축, ALS 수고를 y축으로 비교하였다. 분석 결과, 모든 시기와 산림유형에서 두 센서는 유의한 양의 관계를 보였다(Figure 2). 하지만 OLS 회귀 기울기의 값이(0.315-0.716) 대체로 1보다 낮고 절편이 양의 값을 가지고 있어, 두 값이 1:1로 대응하기 보다는 특정 수고 범위에서 더 정확하게 일치하는 형태로 대응하는 경향이 확인됐다. 이는 국내 산림 영역에서 GEDI 수고값이 낮은 구간에서는 GEDI 추정 수고가 ALS 값에 비해 과대 추정되고, GEDI 수고값이 높은 구간에선 과소 추정 편향이 나타날 수 있음을 시사한다. 따라서, 국내 산림에서 GEDI 수고는 산림유형과 시기 조건을 반영한 해석과 보정을 전제로 사용하는 것이 필요하다.

산림 유형별로 결과를 확인하면, leaf-on 과 leaf-off의 두 시기를 함께 고려했을 때(Figure 2a, d, g), 상록수림과 혼효림(R^2 : 0.373, 0.328; OLS slope: 0.556, 0.533)이 낙엽수림(R^2 : 0.224; OLS slope: 0.376)보다 높은 R^2 값과 1에 가까

운 OLS 회귀 기울기로 더욱 높은 일치성을 보였다. 이를 통해, 수종과 시기에 따른 산림 구조가 안정적인 두 산림유형(상록수림, 혼효림)에서 두 센서의 수고가 상대적으로 더 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 낙엽수림의 상대적으로 낮은 일치성은, 시기에 따른 수관 구조 변화가 크고 footprint 내부 구조 이질성이 상대적으로 커서 동일 footprint 내에서도 두 센서가 반응하는 구조 요소가 달라질 가능성이 있기 때문이다. 따라서 낙엽수림에서는 GEDI 수고를 직접 사용하기보다 시기를 고려한 조건별 보정 또는 다른 자료와의 융합을 전제로 활용하는 것이 바람직하다. 시기별로 나눠서 확인한 결과에선, 세 산림유형 모두에서 leaf-on 시기의 일치성이 더 높았다. 특히 이러한 패턴은 혼효림에서 더욱 뚜렷하게 확인되어, leaf-on 시기의 혼효림 결과가 산림유형과 시기에 따른 모든 결과 중 가장 높은 일치성을 보였다(R^2 : 0.668; OLS slope: 0.597).

GEDI 수고와 ALS 수고의 평균 차이를 비교한 결과(GEDI 평균-ALS 평균), leaf-on 과 leaf-off 시기로 나눠 값을 비교했을 때가 두 시기의 데이터를 합쳐 계산했을 때보다 평균 차이의 절댓값이 작게 나타났다. 특히, leaf-on 시기의 평균 차이 절댓값이 모든 산림유형에서 작았으며, 그 중에서도 혼효림 leaf-on은 0.025 m 로 가장 작은 값을 보였다. 상록수림은 leaf-on과 leaf-off 시기의 평균 차이가 각각 -0.794, 0.893 으로 나타나 절댓값 차이가 유사하였다. 반면, 낙엽수림에선 leaf-on 일 때 0.434, leaf-off 일 때 -2.256 으로 나타나 시기에 따른 GEDI-ALS 수고 평균 차이가 모든 산림 유형 중 가장 크게 나타났다. 또한 한 시기에는 GEDI 수고가 높고, 다른 한 시기에는 ALS 수고가 높은 특징이 확인되었으며, 이에 따라 시기를 구분하지 않으면 반대 방향의 편향이 서로 상쇄되어 평균 오차가 작아 보일 수 있다.

결과적으로 국내 산림의 GEDI와 ALS의 비

교, 보정, 혹은 융합에 있어 leaf-on 과 leaf-off 시기의 구분은 높은 정확도와 활용성을 위한 핵심 단계가 될 수 있다. GEDI 수고는 산림유형과 시기에 따라 ALS 수고 대비 RMSE 3.261 - 5.663 m 수준의 오차를 보였고, GEDI 수고 높이 범위가 낮을 땐 과대추정, 높을 땐 과소추정의 가능성이 있다. 따라서, 국내 산림 연구에 GEDI 활용 시, 산림 수고 추정에 직접적으로 활용하기보다 산림유형 및 시기에 기반한 해석과 보정을 전제로 활용하는 것이 타당하다.

2. 동일 산림유형 내 GEDI FHD 및 PAI의 수종별 시기별 차이

본 결과는 GEDI Level 2B FHD와 PAI가 동일 산림유형 내에서 시기 및 수종에 따라 어떻게 달라지는지 정량적으로 확인하는 것을 목적으로 한다. 따라서 데이터의 시기 및 수종별 분포는 Figure 3에 제시하였고, 시기와 수종에 따른 차이는 two-way ANOVA로 검정하였다 (Table 2). FHD는 전반적으로 수종 간 차이가 나타났으나, 시기 간 차이는 상대적으로 미비한 것으로 확인되었다. 낙엽수림(Figure 3a)에서는 FHD 중앙값이 leaf-off에서 약 2.85, leaf-on에서 약 2.95로 소폭 증가하는 경향을 보였으며, 수종별로는 낙엽송(LK)이 두 시기 모두 중앙값 3.00 이상으로 나타나 상대적으로 높은 값을 보였다. 낙엽수림의 two-way ANOVA 결과, 수종 효과 ($F = 7.00, p < 0.001$)와 시기 효과 ($F = 12.39, p < 0.001$)가 모두 유의하게 나타나, 동일 산림유형 내에서 수종과 시기에 따른 평균 차이가 통계적으로 확인되었다. 다만 추정치(Estimate) 기준으로 leaf-on은 leaf-off 대비 0.07 (leaf-on: 2.80, leaf-off: 2.73) 높게 나타나 시기 효과는 유의하나, 그 크기는 상대적으로 작았다.

상록수림(Figure 3b)에서는 낙엽수림과는 다른 패턴이 나타났다. FHD 중앙값은 leaf-off 시기에 상대적으로 높고 분포 범위가 비교적 좁게 나타난 반면, leaf-on 시기에는 값의 분산이 다

소 확대되면서 중앙값이 감소하는 경향을 보였다. 상록수림에서도 수종 효과($F = 21.31, p < 0.001$)와 시기 효과($F = 26.96, p < 0.001$)가 모두 유의하게 나타났다. 추정치를 기준으로 leaf-on은 leaf-off 대비 평균적으로 0.30 (leaf-on: 2.32, leaf-off: 2.62) 낮게 나타나, 시기에 따른 평균 차이가 낙엽수림보다 크게 나타났다. 이는 상록수림에서도 시기 조건에 따라 GEDI 기반 FHD가 일정 수준의 변동을 보일 수 있음을 시사한다. GEDI FHD는 waveform 수직 분포의 상대적 균등성을 반영하므로, 잎량 변화가 크지 않더라도 수직 에너지 분포의 상대적 비율이 달라지면 FHD가 변동할 수 있다. 따라서 상록수림에서 leaf-off 시기에 FHD가 높게 나타난 결과는, 시기에 따른 잎량 변화보다는 수직 분포의 상대적 차이가 반영되었을 가능성을 시사한다.

혼효림(Figure 3c)의 경우, 별도의 수종 정보가 없어 시기 효과만을 검정하였다. 혼효림의 FHD 중앙값은 leaf-off와 leaf-on 시기에서 큰 차이를 보이지 않았으며, 분포 역시 두 시기 간 유사한 범위를 나타냈다. 통계적으로도 시기 효과는 유의하지 않았다($F = 0.20, p = 0.653$). 추정치 기준 leaf-on은 leaf-off 대비 0.02 (leaf-on: 2.68, leaf-off: 2.70) 낮게 나타났으나, 이는 통계적으로 유의하지 않은 수준이었다. 따라서 혼효림에서는 시기에 따른 FHD 차이가 뚜렷하게 나타나지 않았다.

반면 PAI는 FHD와 달리 시기에 따른 차이가 보다 뚜렷하게 나타났다. 낙엽수림(Figure 3d)에서 PAI 중앙값은 leaf-off 시기에 0.59 - 1.67의 범위를 보였으며, leaf-on 시기에는 3.40 - 3.89 수준으로 크게 증가하였다. 낙엽수림에서는 PAI도 시기 효과($F = 606.37, p < 0.001$)와 수종 효과($F = 12.97, p < 0.001$)가 모두 유의하였다. 추정치 기준으로 leaf-on은 leaf-off 대비 평균 1.83 (leaf-on: 3.39, leaf-off: 1.56) 높게 나타나, 시기에 따른 평균 차이가 FHD보다 현저히 크게 나

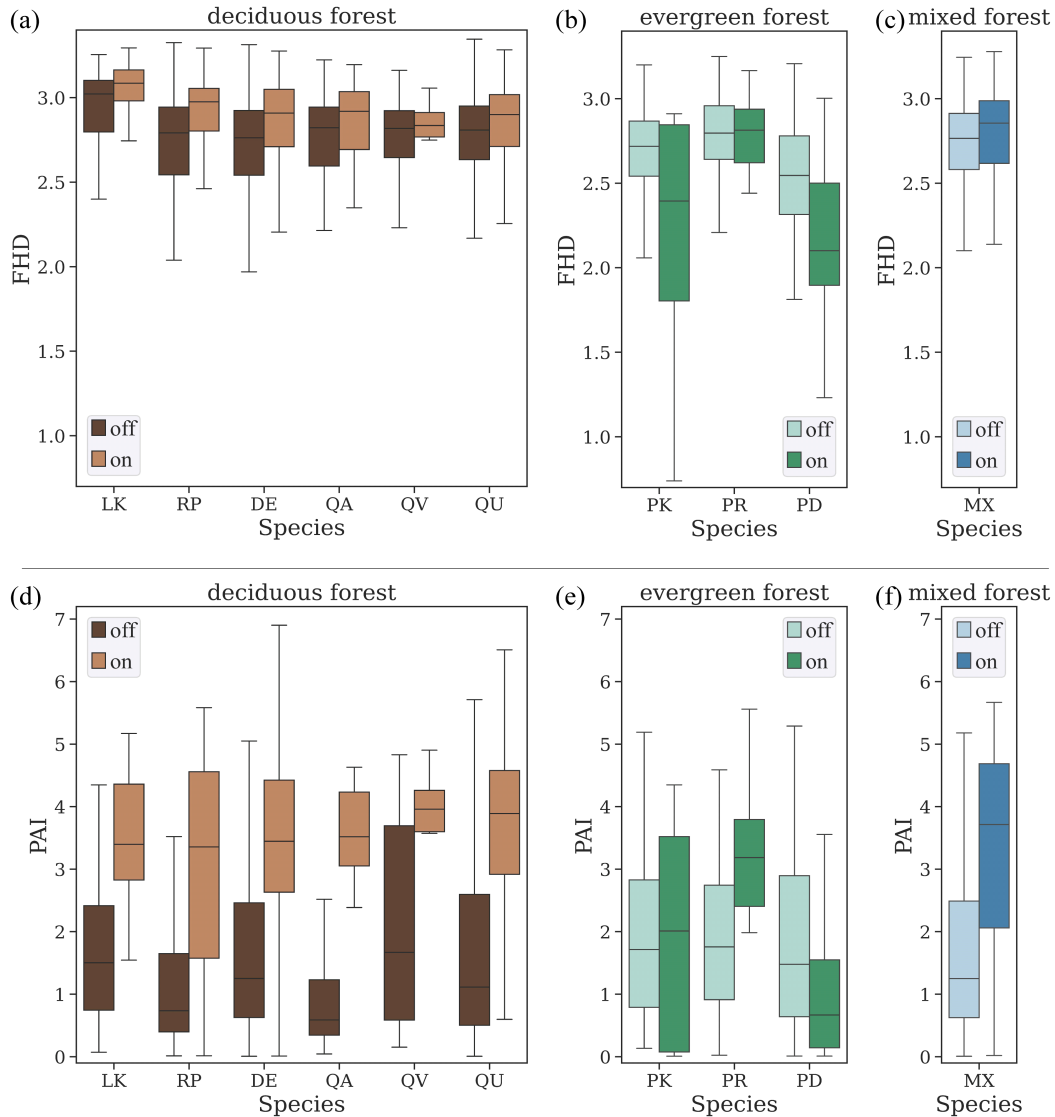


Figure 3. Comparison of FHD and PAI by species and periods (leaf-on and -off). species are *Larix kaempferi*(LK), *Robinia pseudoacacia*(RP), other deciduous species(DE), *Quercus acutissima*(QA), *Quercus variabilis*(QV), other *Quercus* species(QU), *Pinus koraiensis*(PK), *Pinus rigida*(PR), *Pinus densiflora*(PD), and mixed species(MX). (a, d), (b, e) and (c, f) respectively represent FHD and PAI of deciduous, evergreen, and mixed forests.

타났다. 이는 GEDI 기반 PAI가 동일 산림유형 내에서 계절적 잎의 유무에 따른 수관 밀도 변화를 명확히 반영하고 있음을 보여준다.

상록수림(Figure 3e)에서는 PAI의 시기 효과와 수종 효과 모두 통계적으로 유의하지 않았다(시기: $F = 0.01$, $p = 0.920$; 수종: $F = 2.09$, $p = 0.125$).

데이터 분포상으로도 leaf-on과 leaf-off 간 중앙값 차이는 낙엽수림에 비해 상대적으로 작게 나타났으며, 추정치 기준 leaf-on은 leaf-off 대비 0.02 (leaf-on: 1.89, leaf-off: 1.87) 높게 나타나 차이가 미미하였다. 이는 상록수림에서 잎의 계절적 변화가 제한적이라는 생태적 특성과 일치하는 결과로

Table 2. Results of two-way ANOVA for FHD and PAI within each forest type

Forest type	Metric	Effect	df	F	p	Estimate (on-off)
Deciduous	FHD	Season	1	12.39	<0.001	0.07 (2.80 - 2.73)
Deciduous		Species	5	7.00	<0.001	-
Evergreen		Season	1	26.96	<0.001	-0.30 (2.32 - 2.62)
Evergreen		Species	2	21.31	<0.001	-
Mixed		Season	1	0.20	0.653	-0.02 (2.68 - 2.70)
Deciduous		Season	1	606.37	<0.001	1.83 (3.39 - 1.56)
Deciduous	PAI	Species	5	12.97	<0.001	-
Evergreen		Season	1	0.01	0.920	0.02 (1.89 - 1.87)
Evergreen		Species	2	2.09	0.125	-
Mixed		Season	1	88.15	<0.001	1.56 (3.21 - 1.65)

해석된다. 혼효림(Figure 3f)은 PAI 중앙값은 leaf-off 대비 leaf-on 시기에 뚜렷하게 증가하는 경향을 보였다(1.25 > 3.71). 통계적으로도 시기 효과가 유의하였는데($F = 88.15$, $p < 0.001$), 추정치 기준 leaf-on은 leaf-off 대비 평균 1.56 (leaf-on: 3.21, leaf-off: 1.65) 높게 나타났다. 이는 혼효림에서도 계절에 따른 변화가 GEDI 기반 PAI에 반영되고 있음을 보여준다.

종합하면, FHD는 동일 산림유형 내에서 수종 간 차이를 일관되게 나타냈고, 시기에 따른 평균 차이는 상대적으로 작거나 산림유형에 따라 상이하게 나타났다. 반면 PAI는 낙엽수림과 혼효림에서 leaf-on과 leaf-off 간 차이가 크게 나타났으며, 이는 시기에 따른 식생량 변화를 민감하게 반영하는 특성을 보여준다. 특히 낙엽수림에서 PAI의 시기 효과(Estimate = 1.83)는 FHD의 시기 효과(Estimate = 0.07)에 비해 규모가 크게 나타나, 두 지표가 계절 변화에 반응하는 방식에 차이가 있음을 시사한다. 이러한 결과는 GEDI를 활용하여 국내 산림의 수직 구조와 수관 밀도 특성을 분석할 때, 동일 산림유형 내에

서도 수종과 시기를 구분하여 해석하는 것이 필요함을 보여준다.

IV. Discussion

1. 임상 및 계절적 특성에 따른 GEDI-ALS 수고 지표의 일치성과 오차 특성

본 연구 결과, 경기도 과천시, 의왕시 산림에서 GEDI와 ALS 기반 수고는 모든 임상과 시기에서 유의미한 양의 상관관계를 보였다. 하지만 OLS 선형회귀의 기울기가 1보다 낮고, 양의 절편을 갖는 공통된 경향이 확인되었다. 이는 GEDI를 사용한 경기도 산림 수고 추정 시, 낮은 높이의 식생은 과대추정하고, 높은 식생은 과소추정할 수 있는 가능성을 갖고 있다. 이러한 경향은 호주 온대 유칼립투스림(Dhargay et al., 2022; RMSE 10.97 m) 및 미국 전역의 다양한 산림 유형(Wang et al., 2022)에서 보고된 GEDI의 수고 추정 특성과 일맥상통한다. 특히 수고가 상대적으로 높은 산림에서 나타나는 GEDI의 과소추정 현상은 GEDI가 높은 생체량 구간에서

모델링 상의 한계를 보이는 글로벌한 경향성과 맥락을 같이 한다(Lang et al., 2022; Silva et al., 2021).

본 연구의 결과를 단일 수종 혹은 구성이 단순한 해외 산림을 대상으로 한 선행연구와 비교했을 때, GEDI와 ALS 수고 모델링의 결정계수와 상관관계수가 높은 값을 나타냈다. 스페인 바다호스 지역의 균일한 침엽수림을 대상으로 한 연구(Dorado-Roda et al., 2021)의 결과에서 상관관계수는 0.71, 결정계수는 0.31~0.46 범위로 확인되었다. 반면 본 연구의 상록수림(pearson-r = 0.812; $R^2 = 0.659$)과 혼효림(pearson-r = 0.817; $R^2 = 0.668$)에서는 leaf-on 시기에 선행연구보다 높은 정확도를 입증하였다. 이는 선행연구 대상지에 비해, 지형이 험준하고 수종 분포가 다양하며 수직 구조가 복잡한 국내 산림의 제한적 환경에서도 GEDI를 통한 수고 추정의 활용성을 보여준다. 또한 본 연구의 수치는 전 지구적 검증 결과인 결정계수 0.62 (Potapov et al., 2021) 및 호주 온대림 연구(Dhargay et al., 2022)의 결정계수 0.58을 상회하는 수치로, GEDI가 국내 산림 특유의 복합적 구조 특성을 효과적으로 포착하고 있음을 실증한다.

수고 측정 오차의 측면에서는, 본 연구에서 GEDI RH95의 ALS 대비 RMSE가 3.261 - 5.663 m로 나타났다. 이는 미국 동부 NEON 사이트의 활엽수림 및 혼효림에서 보고된 RMSE (3.48 - 4.05 m; Wang et al., 2022)와 유사한 범위이며, 전 지구 단위 검증에서 제시된 RMSE (6.5 - 9.07 m; Potapov et al., 2021)와 비교해도 연구 대상지의 수고 변동을 유의미하게 반영하고 있음을 시사한다. 특히 leaf-on 시기에 일치성이 높아진 결과는, 하층 식생과 지면 신호가 혼재할 가능성이 큰 국내 산림 조건에서도 GEDI 파형이 수관 상부 구조 신호를 비교적 안정적으로 포착할 수 있음을 보여준다. 나아가 잎의 유무에 따른 시기별 관측치를 분리하는 접근은 설명력을 높이는 핵심 요소임을 뒷받침한

다. 다만 회귀 기울기와 절편을 고려하면, GEDI는 절대 수고를 오차 없이 재현하기 보다 평균적으로 수 m 수준의 오차와 수고 구간별 편향을 동반하는 자료로 해석하는 것이 타당하다. 따라서 본 연구 범위에서 GEDI 수고는 임상과 시기로 구분한 뒤 보정 또는 융합을 전제로 사용할 때 신뢰도가 높아지며, 특히 상대적 차이 비교나 변화 탐지 같은 정량 분석에서 실질적 활용성이 크다.

2. GEDI 식생 지수의 활용 가치

본 연구에서 GEDI L2B 지표인 FHD와 PAI는 시기와 수종에 대해 서로 다른 반응을 보였다. FHD는 전반적으로 수종 간 차이를 일관되게 나타냈으며, 시기 효과는 산림유형에 따라 작거나 상이하게 나타났다. 낙엽수림과 상록수림에서는 시기 효과가 유의했지만, 낙엽수림에서의 시기 효과 크기는 0.07로 작았고, 혼효림에서는 시기 효과가 유의하지 않았다. 이는 FHD가 잎의 양 변화 자체보다 수직 분포의 상대적 균등성 변화에 더 민감할 수 있음을 시사하며, 특히 침엽과 활엽이 혼재하는 국내 산림의 모자이크 구조에서는 leaf-on/off만으로 FHD를 단순 해석하기 어렵다는 점을 보여준다. 즉, 국내 혼효림과 같이 footprint 내부 구조 이질성이 큰 조건에서는 계절 변화가 FHD의 평균값에 뚜렷하게 나타나지 않을 수 있으며, FHD는 수종 구성 및 수직 분포 변화 맥락에서 해석하는 것이 적절하다.

반면 PAI는 낙엽수림과 혼효림에서 leaf-on과 leaf-off 간 차이가 크게 나타났다. 특히 낙엽수림에서 leaf-on이 leaf-off보다 평균 1.83 높게 나타나, 계절적 잎의 유무에 따른 수관 밀도 변화를 뚜렷하게 반영하였다. 이는 낙엽수림에서 PAI가 계절적 식생량 변화에 민감하다는 선행 결과와도 같은 방향의 해석을 제공한다(Xi et al., 2022). 국내 산림은 낙엽수림의 계절성이 뚜렷하고, 도심 인접 산림과 산단 주변 산림 등 다

양한 응용에서 계절 변화가 중요한 변수로 작동한다는 점을 고려할 때, PAI는 국내 낙엽수림 및 혼효림의 계절 변화 탐지에 유용한 지표로 활용될 가능성이 크다. 반면 상록수림에서는 PAI의 시기·수종 효과가 유의하지 않고 차이도 미미했는데, 이는 상록수림에서 잎의 계절적 변화가 제한적이라는 생태적 특성과 일치한다. 따라서 국내 상록수림에서 PAI는 계절 변화보다는 임상 간 수준 차이 또는 공간적 이질성 평가에 더 적합할 수 있다.

또한 상록수림에서 FHD가 시기에 따라 달라진 결과는, 잎량 변화가 크지 않더라도 수직 분포의 상대적 비율이 달라지면 FHD가 변할 수 있음을 시사한다. 국내 산림은 복합 지형과 다양한 층위 구조가 공존하므로, 파형 기반 수직 분포 지표는 지면 및 하층 신호 혼입 가능성을 함께 고려해 해석할 필요가 있다. 이런 맥락에서 FHD는 ‘계절 변화’ 자체보다 ‘수직 구조의 상대적 배치’와 관련된 해석 보조 지표로 활용하는 것이 합리적이다.

종합하면, 국내 산림에서 FHD는 수종 구성 및 수직 분포 차이를 해석하는 지표로, PAI는 낙엽수림과 혼효림에서 계절적 수관 밀도 변화를 나타내는 지표로서 상호 보완적으로 활용될 수 있다. 따라서 GEDI 기반 지표를 적용할 때는 산림유형뿐 아니라 수종과 시기를 구분하고, 지표별 해석 범위를 구체화하는 것이 필요하다.

3. 연구의 한계 및 향후 과제

본 연구의 한계점은 연구 대상지와 샘플 수의 제한이다. 경기도 과천시와 의왕시만을 대상으로 하였기 때문에, 경기도 전체 혹은 국내 전체의 산림 환경을 모두 대변하기에는 한계가 있으며, 한정된 연구 대상지의 크기만큼 GEDI 자료의 샘플 수가 적어 일부 산림유형 혹은 시기에 대해 다른 경우보다 적은 샘플수로 분석을 진행하였다. 또한, 그 외에도 GEDI 자료에 대해 일반적으로 알려진 지리참조 오차와 연구 대상지

의 지형/경사적 특징으로 인해 GEDI와 ALS 수고 사이의 차이가 더 크게 나타날 수 있는 가능성을 내포한다. 그리고 과천(평균 40pts/m²)과 의왕(평균 10pts/m²)의 ALS 점군 밀도 차이 역시 수고 분위수 산출 시 미세한 차이를 유발하여 검증 결과에 영향을 미쳤을 가능성이 있다.

향후 연구에서는 본 연구에서 과천·의왕 산림의 유형별 시기별로 확인된 GEDI 분석 결과를 바탕으로, 연구 범위를 경기도 및 전국 단위로 확대하여 더욱 정밀한 수고 산정 모델 제작 및 전국 산림 수고와 바이오매스 추정 모델 개발을 목표로 한다. 또한 공간적으로 불연속적인 GEDI 포인트 사이의 공백을 메우기 위해 Sentinel-1/2와 같은 레이더 및 광학 위성영상과의 융합을 통해 wall-to-wall 매핑 연구를 추진함으로써 국내 산림의 생태적 구조적 지표의 구축과 고도화에 기여하고자 한다.

그리고 본 연구의 GEDI-ALS 수고 비교 결과 중, 낙엽수림에서 상대적으로 낮은 R²가 나타났다. 이는 시기에 따른 수관 구조 변화와 footprint 내부 구조 이질성과 연관된 것으로, 향후 연구에 선 이를 개선하기 위해 낙엽수림 내에서 개별 수종 단위로 데이터를 구분한 뒤, 각 수종과 시기마다 별도의 보정식을 구축하여 향상된 일치성을 확보할 수 있다. 또한, GEDI의 품질 변수(Sensitivity, BEAM 유형, Degraded flag 등)와 footprint 위치의 지형 변수를 공변량으로 포함하여, 동일한 RH95 라도 관측 신뢰도와 지형적 조건에 따른 개별 모델을 구성할 수 있다.

V. Conclusion

본 연구는 경기도 과천·의왕 산림을 대상으로 GEDI와 ALS 데이터를 비교 분석하여 국내 산림 모니터링에서 GEDI의 유효성을 평가하였다. GEDI RH95와 ALS CRH95는 모든 시기와 산림유형에서 유의미한 양의 관계를 보였으며, 특히 leaf-on 시기의 혼효림에서 가장 높은 일치성

($R^2 = 0.668$, $r = 0.817$)이 나타났다. 다만 회귀 기울기가 1보다 낮고 절편이 양(+)인 경향이 확인되어 저수고 과대추정과 고수고 과소추정 가능성이 함께 나타났다. 낙엽수림은 R^2 가 약 0.2 - 0.3 수준으로 상대적으로 낮아 조건별 해석과 보정을 전제로 한 활용이 필요함을 확인하였다. RMSE는 3.261 - 5.663 m 범위였으며, 평균차 분석 결과 leaf-on/off에 따라 편향 방향이 달라질 수 있어 시기를 구분하지 않으면 편향이 서로 상쇄될 수 있어 보정 방향을 잘못 설정할 수 있다. 따라서 leaf-on/off 구분은 국내 산림에서 GEDI - ALS 비교, 보정 및 융합의 핵심 단계가 될 수 있다.

또한 GEDI Level 2B 산출물인 FHD와 PAI는 국내 산림의 수직적 구조 특성과 계절적 식생량 변화를 정량화하는 지표로서 서로 다른 해석적 가치를 보였다. FHD는 전반적으로 수종 간 차이를 일관되게 나타냈으나, 시기 효과는 산림유형에 따라 작거나 상이하게 나타났고 혼효림에서는 유의하지 않았다. 반면 PAI는 낙엽수림과 혼효림에서 leaf-on/off에 따른 차이가 크게 나타났으며, 특히 낙엽수림에서 leaf-on이 leaf-off보다 평균 1.83 높게 나타나 계절적 잎의 유무에 따른 수관 밀도 변화를 뚜렷하게 반영하였다. 이는 GEDI 데이터가 국내 산림 모니터링과 구조·기능 관련 응용에서 활용될 수 있음을 시사하며, 동시에 산림유형·수종·시기를 구분한 해석이 필요함을 보여준다. 결론적으로 본 연구는 GEDI 데이터가 복잡한 국내 산림 구조를 파악하는 데 활용 가능함을 확인하는 한편, 조건별 오차와 편향을 고려한 적용상의 주의점을 제시함으로써 위성 기반 광역적 모니터링 및 향후 융합 지도화 연구를 위한 기술적 근거를 마련하였다.

Reference

Adam, M., Urbazaev, M., Dubois, C., &

- Schmullius, C. (2020). Accuracy assessment of GEDI terrain elevation and canopy height estimates in European temperate forests: Influence of environmental and acquisition parameters. *Remote Sensing*, 12(23), 3948.
- Cho, K. H., & Lee, S. K. (2024). 정제된 GEDI Level-2A 데이터베이스 구축: 경기도 지역을 중심으로. *GEO DATA*, 6(2), 77-86.
- de Conto, T., Armston, J., & Dubayah, R. (2024). Characterizing the structural complexity of the Earth's forests with spaceborne lidar. *Nature Communications*, 15(1), 8116.
- Dhargay, S., Lyell, C. S., Brown, T. P., Inbar, A., Sheridan, G. J., & Lane, P. N. (2022). Performance of GEDI space-borne lidar for quantifying structural variation in the temperate forests of south-eastern Australia. *Remote Sensing*, 14(15), 3615.
- Dorado-Roda, I., Pascual, A., Godinho, S., Silva, C. A., Botequim, B., Rodríguez-González, P., González-Ferreiro, E., & Guerra-Hernández, J. (2021). Assessing the accuracy of GEDI data for canopy height and aboveground biomass estimates in Mediterranean forests. *Remote Sensing*, 13(12), 2279.
- Dubayah, R., Blair, J. B., Goetz, S., Fatoyinbo, L., Hansen, M., Healey, S., Hofton, M., Hurtt, G., Kellner, J., Luthcke, S., Armston, J., Tang, H., Duncanson, L., Hancock, S., Jantz, P., Marselis, S., Patterson, P., Qi, W., & Silva, C. (2020). The Global Ecosystem Dynamics Investigation: High-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography. *Science of remote sensing*, 1, 100002.
- Dubayah, R., Hofton, M., Blair, J., Armston, J., Tang, H., Luthcke, S. (2021a). GEDI L2A Elevation

- and Height Metrics Data Global Footprint Level V002 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes d Active Archive Center. Accessed 2024-02-06 from https://doi.org/10.5067/GEDI/GEDI02_A.002
- Dubayah, R., Tang, H., Armston, J., Luthcke, S., Hofton, M., & Blair, J. (2021b). GEDI L2B Canopy Cover and Vertical Profile Metrics Data Global Footprint Level V002 [Data set]. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center. https://doi.org/10.5067/GEDI/GEDI02_B.002 Date Accessed: 2026-02-25
- Duncanson, L., Kellner, J. R., Armston, J., Dubayah, R., Minor, D. M., Hancock, S., Healey, S. P., Patterson, P. L., Saarela, S., Marselis, S., Silva, C. A., Bruening, J., Goetz, S. J., Tang, H., Bickel, K., Ferrere, M., Fatoyinbo, L., Luthcke, S., Hofton, M., ... Zraggen, C. (2022). Aboveground biomass density models for NASA's Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) lidar mission. *Remote Sensing of Environment*, 270, 112845. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112845>
- Duncanson, L., Neuenschwander, A., Hancock, S., Thomas, N., Fatoyinbo, T., Simard, M., Silva, C.A., Armston, J., Luthcke, S.B., Hofton, M., Kellner, J.R., Dubayah, R., 2020. Biomass estimation from simulated GEDI, ICESat-2 and NISAR across environmental gradients in Sonoma County, California. *Remote Sens Environ* 242, 111779. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111779>
- Ehbrecht, M., Seidel, D., Annighöfer, P., Kreft, H., Köhler, M., Zemp, D. C., ... & Ammer, C. (2021). Global patterns and climatic controls of forest structural complexity. *Nature communications*, 12(1), 519.
- Hardiman, B. S., Bohrer, G., Gough, C. M., Vogel, C. S., & Curtis, P. S. (2011). The role of canopy structural complexity in wood net primary production of a maturing northern deciduous forest. *Ecology*, 92(9), 1818-1827.
- Lang, N., Kalischek, N., Armston, J., Schindler, K., Dubayah, R., & Wegner, J. D. (2022). Global canopy height regression and uncertainty estimation from GEDI LIDAR waveforms with deep ensembles. *Remote sensing of environment*, 268, 112760.
- Lee, S., & Lee, M. J. (2025). Forest aboveground biomass estimation by the integration of GEDI LiDAR and national forest inventory data in South Korea. *Korean Journal of Remote Sensing*, 41(2), 407-419.
- Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Parker, G. G., & Harding, D. J. (2002). Lidar remote sensing for ecosystem studies: Lidar, an emerging remote sensing technology that directly measures the three-dimensional distribution of plant canopies, can accurately estimate vegetation structural attributes and should be of particular interest to forest, landscape, and global ecologists. *BioScience*, 52(1), 19-30.
- Leite, R. V., Silva, C. A., Broadbent, E. N., do Amaral, C. H., Liesenberg, V., de Almeida, D. R. A., Mohan, M., Godinho, S., Cardil, A., Hamamura, C., Lopes de Faria, B., Brancalion, P. H. S., Hirsch, A., Marcatti, G. E., Corte, A. P. D., Zambrano, A. M. A., Costa, M. B. T., Matricardi, E. A. T., Silva, A. L., Ruggeri Ré Y. Goya, L., Valbuena, R., Furtado de Mendonça, B. A., Silva

- Junior, C. H. L., Aragão, L. E. O. C., García, M., Liang, J., Merrick, T., Hudak, A. T., Xiao, J., Hancock, S., Duncason, L., Ferreira, M. P., Valle, D., Saatchi, S., & Klauberg, C. (2022). Large scale multi-layer fuel load characterization in tropical savanna using GEDI spaceborne lidar data. *Remote Sensing of Environment*, 268, 112764.
- Lim, K. S., & Treitz, P. M. (2004). Estimation of above ground forest biomass from airborne discrete return laser scanner data using canopy-based quantile estimators. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19(6), 558-570.
- Liu, A., Cheng, X., & Chen, Z. (2021). Performance evaluation of GEDI and ICESat-2 laser altimeter data for terrain and canopy height retrievals. *Remote Sensing of Environment*, 264, 112571.
- MacArthur, R. H., & MacArthur, J. W. (1961). On bird species diversity. *Ecology*, 42(3), 594-598.
- Mohammadpour, P., Viegas, D. X., Pereira, A., & Chuvieco, E. (2025). Multitemporal Sentinel and GEDI data integration for overstory and understory fuel type classification. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 139, 104455.
- Moudrý, V., Prošek, J., Marselis, S., Marešová, J., Šárovcová, E., Gdulová, K., ... & Wild, J. (2024). How to find accurate terrain and canopy height GEDI footprints in temperate forests and grasslands?. *Earth and Space Science*, 11(10), e2024EA003709.
- Potapov, P., Li, X., Hernandez-Serna, A., Tyukavina, A., Hansen, M. C., Kommareddy, A., Pickens, A., Turubanova, S., Tang, H., Silva, C. E., Armston, J., Dubayah, R., Blair, J. B., & Hofton, M. (2021). Mapping global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 253, 112165.
- Rajab Pourrahmati, M., Baghdadi, N., & Fayad, I. (2023). Comparison of GEDI LiDAR data capability for forest canopy height estimation over broadleaf and needleleaf forests. *Remote Sensing*, 15(6), 1522.
- Rishmawi, K., Huang, C., & Zhan, X. (2021). Monitoring key forest structure attributes across the conterminous United States by integrating GEDI LiDAR measurements and VIIRS data. *Remote Sensing*, 13(3), 442.
- Roussel, J. R., Auty, D., Coops, N. C., Tompalski, P., Goodbody, T. R., Meador, A. S., Bourdon, J.-F., de Boissieu, F., & Achim, A. (2020). lidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data. *Remote Sensing of Environment*, 251, 112061.
- Roy, D. P., Kashongwe, H. B., & Armston, J. (2021). The impact of geolocation uncertainty on GEDI tropical forest canopy height estimation and change monitoring. *Science of Remote Sensing*, 4, 100024.
- Silva, C. A., Duncanson, L., Hancock, S., Neuenschwander, A., Thomas, N., Hofton, M., Fatoyinbo, L., Simard, M., Marshak, C. Z., Armston, J., Luthcke, S., & Dubayah, R. (2021). Fusing simulated GEDI, ICESat-2 and NISAR data for regional aboveground biomass mapping. *Remote Sensing of Environment*, 253, 112234.
- Tang, H., Stoker, J., Luthcke, S., Armston, J., Lee, K., Blair, B., & Hofton, M. (2023). Evaluating and mitigating the impact of systematic geolocation error on canopy

- height measurement performance of GEDI. *Remote Sensing of Environment*, 291, 113571.
- Wang, C., Elmore, A. J., Numata, I., Cochrane, M. A., Lei, S., Hakkenberg, C. R., Li, Y., Zhao, Y., & Tian, Y. (2022). A framework for improving wall-to-wall canopy height mapping by integrating GEDI LiDAR. *Remote Sensing*, 14(15), 3618.
- Wang, Y., Fang, H., Li, Y., Li, S., & Tang, H. (2025a). Validation of the vertical plant area index profile product derived from GEDI over global forest sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 371, 110612.
- Wang, X., Wang, R., Yang, B., Yang, L., Liu, F., & Xiong, K. (2025b). Simulation-Based Correction of Geolocation Errors in GEDI Footprint Positions Using Monte Carlo Approach. *Forests*, 16(5), 768.
- Xi, Y., Tian, Q., Zhang, W., Zhang, Z., Tong, X., Brandt, M., & Fensholt, R. (2022). Quantifying understory vegetation density using multi-temporal Sentinel-2 and GEDI LiDAR data. *GIScience & Remote Sensing*, 59(1), 2068-2083.
- Zhao, X., Guo, Q., Su, Y., & Xue, B. (2016). Improved progressive TIN densification filtering algorithm for airborne LiDAR data in forested areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 117, 79-91.

Supplementary Table 1. Statistical summary of FHD for the boxplots shown in Fig. 3a-c

Species	Forest type	Period	n	mean	min	q1	median	q3	max	n (outliers)	
LK	deciduous	off	66	2.92	2.40	2.80	3.02	3.10	3.25	4	
		on	18	3.06	2.74	2.98	3.09	3.16	3.29	1	
RP		off	206	2.71	2.04	2.54	2.79	2.94	3.33	9	
		on	24	2.85	2.46	2.80	2.98	3.05	3.29	2	
DE		off	601	2.70	1.97	2.54	2.76	2.92	3.31	19	
		on	100	2.82	2.20	2.71	2.91	3.05	3.28	4	
QA		off	173	2.74	2.21	2.59	2.82	2.94	3.22	9	
		on	18	2.80	2.35	2.69	2.92	3.04	3.19	1	
QV		off	57	2.75	2.23	2.65	2.82	2.92	3.16	2	
		on	7	2.82	2.75	2.77	2.84	2.91	3.06	1	
QU	off	1199	2.74	2.17	2.63	2.81	2.95	3.35	58		
	on	204	2.77	2.25	2.71	2.90	3.02	3.28	19		
PK	off	59	2.67	2.06	2.54	2.72	2.87	3.20	2		
	on	8	2.20	0.74	1.80	2.39	2.85	2.91	-		
PR	evergreen	off	163	2.74	2.21	2.64	2.80	2.96	3.25	10	
		on	15	2.66	2.44	2.62	2.81	2.94	3.17	1	
PD		off	166	2.50	1.81	2.31	2.55	2.78	3.21	7	
		on	31	2.12	1.23	1.90	2.10	2.50	3.00	1	
MX		mixed	off	514	2.70	2.10	2.58	2.76	2.91	3.24	24
			on	75	2.68	2.14	2.62	2.86	2.99	3.28	11

Supplementary Table 2. Statistical summary of PAI for the boxplots shown in Fig. 3d-f

Species	Forest type	Period	n	mean	min	q1	median	q3	max	n (outliers)	
LK	deciduous	off	66	1.76	0.07	0.74	1.50	2.42	4.97	1	
		on	18	3.35	0.35	2.83	3.40	4.36	5.17	1	
RP		off	206	1.22	0.01	0.40	0.74	1.65	5.10	15	
		on	24	3.00	0.01	1.58	3.36	4.56	5.58	-	
DE		off	601	1.65	0.01	0.63	1.25	2.46	7.01	2	
		on	100	3.32	0.01	2.63	3.45	4.42	6.90	-	
QA		off	173	0.96	0.04	0.34	0.59	1.23	5.99	15	
		on	18	3.19	0.03	3.05	3.52	4.23	4.63	3	
QV		off	57	2.06	0.15	0.59	1.67	3.69	4.83	-	
		on	7	3.60	0.64	3.60	3.96	4.26	4.90	1	
QU	off	1199	1.62	0.01	0.50	1.11	2.60	5.71	-		
	on	204	3.52	0.01	2.92	3.89	4.58	7.58	18		
PK	off	59	1.95	0.13	0.79	1.71	2.83	5.19	-		
	on	8	2.01	0.01	0.08	2.01	3.52	4.35	-		
PR	evergreen	off	163	1.91	0.02	0.91	1.76	2.74	4.59	-	
		on	15	3.04	0.02	2.40	3.18	3.79	5.56	1	
PD		off	166	1.82	0.01	0.64	1.48	2.89	5.29	-	
		on	31	1.24	0.01	0.14	0.67	1.55	4.43	4	
MX		mixed	off	514	1.65	0.01	0.62	1.25	2.49	6.00	2
			on	75	3.21	0.02	2.06	3.71	4.69	5.67	-