

## 원격탐사기반 임분고 추정 모델 개발 국내외 현황 고찰 및 제언

이복남<sup>1</sup> · 정건휘<sup>2</sup> · 류지연<sup>2</sup> · 권경원<sup>2</sup> · 임종수<sup>3</sup> · 박주원<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>경북대학교 빅데이터 기반 글로벌 Forest Science 4.0 전문인력양성센터, <sup>2</sup>경북대학교 임학과,  
<sup>3</sup>국립산림과학원 산림ICT연구센터, <sup>4</sup>경북대학교 산림과학 · 조경학부

### Review of Remote Sensing Technology for Forest Canopy Height Estimation and Suggestions for the Advancement of Korea's Nationwide Canopy Height Map

Boknam Lee<sup>1</sup>, Geonhwi Jung<sup>2</sup>, Jiyeon Ryu<sup>2</sup>, Gyeongwon Kwon<sup>2</sup>,  
Jong Su Yim<sup>3</sup> and Joowon Park<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Human Resources Development Center for Big Data-based Glocal Forest Science 4.0 Professionals,  
Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

<sup>2</sup>Department of Forestry, College of Agriculture and Life Science,  
Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

<sup>3</sup>Forest ICT Research Center, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

<sup>4</sup>School of Forest Sciences and Landscape Architecture, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

**요약:** 대면적 산림의 정확한 임분고 측정은 산림경영, 산림 탄소량 추정, 산림 생태계 관리를 위한 필수적인 지표인자로 다수의 국가에서 주기적인 현장조사를 수행하고 있다. 하지만, 현장조사는 많은 비용 및 시간 소요, 접근의 용이성이 낮은 지역의 조사의 기술적 한계성을 가지고 있다. 이를 극복하기 위한 대안으로 원격탐사 기술을 이용한 수고 및 임분고 추정 연구가 활발하다. 이에 본 논문에서는 해외 및 국내의 다양한 원격탐사기반 수고 및 임분고 추정 연구 사례를 분석하여 원격탐사기반 임분고 추정 연구의 동향을 크게 LiDAR기반, Stereo 및 SAR 이미지 점군(Image-based Point Clouds)기반, 원격탐사자료 융합기반 임분고 추정 모델로 나누어 살펴보았다. 또한, 대면적의 전국단위 산림 임분고 추정을 위한 원격탐사 자료의 업스케일링(Upscaling) 기법의 사례 분석을 통해 향후 국내 산림환경 및 현황에 적합한 원격탐사기반 전국단위 산림 임분고 추정을 위한 방법의 발전 방향성을 고찰하였다.

**Abstract:** Forest canopy height is an indispensable vertical structure parameter that can be used for understanding forest biomass and carbon storage as well as for managing a sustainable forest ecosystem. Plot-based field surveys, such as the national forest inventory, have been conducted to provide estimates of the forest canopy height. However, the comprehensive nationwide field monitoring of forest canopy height has been limited by its cost, lack of spatial coverage, and the inaccessibility of some forested areas. These issues can be addressed by remote sensing technology, which has gained popularity as a means to obtain detailed 2- and 3-dimensional measurements of the structure of the canopy at multiple scales. Here, we reviewed both international and domestic studies that have used remote sensing technology approaches to estimate the forest canopy height. We categorized and examined previous approaches as: 1) LiDAR approach, 2) Stereo or SAR image-based point clouds approach, and 3) combination approach of remote sensing data. We also reviewed upscaling approaches of utilizing remote sensing data to generate a continuous map of canopy height across large areas. Finally, we provided suggestions for further advancement of the Korean forest canopy height estimation system through the use of various remote sensing technologies.

**Key words:** forest canopy height, remote sensing, LiDAR, Stereo/SAR image-based point clouds, upscaling

\* Corresponding author  
E-mail: joowon72@knu.ac.kr

ORCID  
Joowon Park  <https://orcid.org/0000-0001-7505-6912>

## 서론

수고(Tree Height) 및 임분고(Forest Canopy Height)는 산림재적, 탄소저장량, 산림생산성 등 산림관리에 필요한 정보들의 추정에 사용되는 핵심적 산림 속성 인자로서 지속가능한 산림관리를 위한 산림생태계 모니터링 및 모델링에 필요한 주요인자이다(Simard et al., 2011; Zhang et al., 2016). 특히, 대면적 산림의 정확한 수고 및 임분고 측정은 임분재적, 지상부 바이오매스, 탄소 저장량 밀도, 산림의 수직 분포도 및 산림 서식지를 관리함에 필요한 생물적, 물리적 지표 평가에 있어 핵심인자로 주기적인 조사가 필요하다(Alexander et al., 2018; Hill and Hinsley, 2015; Li et al., 2015).

대면적 산림의 수고를 측정하는 방법은 크게 2가지로 현장조사와 원격탐사로 나눌 수 있다. 현장조사의 경우 조사 비용 및 시간 소모가 많고, 접근이 용이하지 않은 지역에 대한 조사가 어려운 한계가 있어 전국단위와 같은 대면적의 현장조사를 실시하기는 많은 제한이 따른다(St-Onge and Achaichia, 2001). 이에 미국, 캐나다, 유럽과 같은 선진국의 경우 대면적의 산림 관리를 위해 소규모 산림지역부터 광범위한 지역을 대상으로 2차원(Horizontal Structure) 및 3차원(Horizontal & Vertical Structure) 식생구조 자료 취득 및 처리가 용이한 다양한 원격탐사 기술기반 임분고 추정 연구를 수행해 오고 있다. 예를 들어, 소규모 산림 지역(Local Scale)에서는 항공 LiDAR (Airborne LiDAR) (Chung et al., 2019; Lefsky et al., 2005), 레이더(Radar) (Kugler et al., 2014; Garestier et al., 2007), 고해상도 위성 영상을 활용한 수고 추정 연구(Li et al., 2020; Kugler et al., 2014)가 활발한 반면, 대규모 단위 산림지역(Regional/Global Scale)에서는 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), Landsat과 같은 저해상도 위성영상 자료를 활용한 임분고 추정 연구가 주류를 이루고 있다 (Potapov et al., 2021; Wang et al., 2016). 특히, 지상에 레이더파를 주사하여 정보를 취득하는 능동형 원격탐사 시스템(Active Remote Sensing Sensor)인 LiDAR와 Radar는 수목의 3차원 수직정보 및 식생구조에 대한 변수 취득이 가능함에 따라 수고 및 임분고 추정에 많이 이용되고 있다 (Lefsky et al., 2002; Treuhaft and Siqueira, 2000). 최근에는 저해상도 위성영상 자료의 정확성을 높일 수 있는 방안으로 광학 위성영상 자료가 아닌 스테레오(Stereo) 위성영상 자료(WorldView -2) (Ullah et al., 2020; Goldbergs et al., 2019), 위성(Space) LiDAR 기반 관측 자료(GEDI)(Potapov et al., 2021) 및 고밀도 LiDAR 자료와 위성영상, 현장조사 자료와의 융합을 통한 임분고 추정 모델 개발 연구들이

활발히 진행되고 있다(Mora et al., 2013; Hyde et al., 2006; McCombs et al., 2003).

2000년대 이후 국내에서도 원격탐사자료를 이용해 산림의 수고 및 임분고를 추정하려는 연구가 활발히 시도되고 있다. Woo et al.(2007)은 국내 산림지형의 특성을 고려한 개체목 인식 및 수고추출을 위한 항공 LiDAR 자료의 기본적인 처리기법을 제시하고 순수 지표면을 표현하는 수치표고모형자료(Digital Elevation Model: DEM) 생성과 수관고모형(Canopy Height Model: CHM) 자료에서 임분고 및 수고를 추출하는 필터링 기법 개발 연구를 수행하였다. Kim(2013)은 영상정보만을 이용하여 수목을 분리하고 수고정보를 효율적으로 획득할 수 있는 자료처리 방법을 제안하였으며, LiDAR 자료와 정사영상을 융합하여 개별 수목을 분리한 후 산림영역을 추출하는 연구를 수행하였다. Lim et al.(2015)은 UAV 이미지를 활용하여 스테레오 이미지(Stereo Image)를 구성하고 스테레오 영상 기반 수치표면모델(Digital Surface Model: DSM)을 산출하여 수고를 추정하는 연구를 수행하였으며, Kim et al.(2017)은 Digital Microscope Camera 1 (DMC1) 카메라의 영상을 기반으로 컴퓨터비전 해석을 통해 Point Cloud를 생성하고 Digital Canopy Model (DCM)을 제작하여 수고추정 연구를 실시하였다.

하지만 국내의 경우 해외 연구동향과 비교하여 원격탐사기반 임분고 연구사례 및 기반 기술이 대부분 항공 LiDAR 및 UAV에 위주의 소규모 산림 연구지의 수고 추정 연구가 대부분으로 다양한 원격탐사자료의 적용이 미흡할 뿐 아니라 전국단위 임분고 추정에 대한 연구는 전무한 실정이다. 이에 본 연구는 국내외의 다양한 원격탐사기반 임분고 추정 모델 연구 사례를 검토하고, 국내 산림 환경 및 현황에 적합한 원격탐사기반 전국단위 산림 임분고 추정을 위한 방법에 대한 고찰을 통해 향후 국내 원격탐사기반 임분고 연구의 방향을 제시하고자 한다.

## 재료 및 방법

원격탐사기반 임분고 추정 모델 개발 연구동향을 파악하기 위하여 Web of Science를 통한 논문검색과 인터넷 검색을 병행하여 국외 사례를 중심으로 원격탐사기반 전국단위 임분고 추정 연구 현황 및 동향을 조사하였다. 최신 동향을 파악하기 위하여 조사 기간은 최근 15년간 발표된 논문으로 제한하였으며, 총 82개의 국내외저널 등재논문이 검토되었다. 국내외의 다양한 원격탐사기반 수고 및 임분고 추정 연구 사례 분석 결과, 원격탐사기반 임분고 추정 연구의 주요 동향에 따라 1) LiDAR기반, 2) Stereo

및 SAR 이미지 점군 기반(Image-based Point Clouds), 3) 원격탐사자료 융합기반 임분고 추정 모델로 나누어 살펴보았으며, 각 원격탐사기법의 특성을 처리방법(Processing), 연구대상면적(Cover Area), 정확도(Accuracy)를 중심으로 연구 사례를 분석하였다. 또한, 대면적의 전국단위 산림 임분고 추정을 위한 원격탐사자료의 업스케일링(Upscaling) 기법의 사례 분석을 통해 향후 국내 산림환경 및 현황에 적합한 원격탐사기반 전국단위 산림 임분고 추정을 위한 고려사항 및 방향성을 제시하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 원격탐사기반 임분고 추정 모델 연구 동향

지난 20년간 국내외 원격탐사기반 임분고 추정 연구는 전지구적(Global Scale), 지역적(Regional Scale), 및 임분단위(Stand Scale)에 따른 데이터 획득 용이성에 따라 저해상도 및 고해상도 위성 영상, LiDAR(지상·무인기·항공·위성 기반), TanDEM-X, TerraSAR-X 기반 Radar 위성 영상, Stereo 항공사진 및 고해상도 Stereo 위성영상사진 기반 임분고 추정 등 다양한 원격탐사 기반 연구사례들이 있다. 특히, 전국단위 산림과 같은 대규모 단위 임분고 추정에는 기존의 다양한 원격탐사 연구방법들의 장단점을 보완한 융합모델인 고해상도 항공 LiDAR와 위성자료의 융합, 스테레오 영상 기반 항공사진과 위성자료의 융합 연구사례들이 있다. 이에 본 연구에서는 원격탐사기반 임분고 추정 모델 연구 동향을 원격탐사 방법 플랫폼에 따라

크게 LiDAR, 이미지 점군 기반(Image-based Point Clouds), 융합모델 시스템(Combination of Remote Sensing Data System)으로 나누어 살펴보았으며, 각 원격탐사 플랫폼에 따라 LiDAR는 지상 LiDAR (Terrestrial Laser Scanning: TLS), 드론 LiDAR (Drone LiDAR), 항공 LiDAR (Airborne Laser Scanning: ALS), 위성기반 LiDAR (Satellite LiDAR)로, 이미지 점군은 스테레오(Stereo) 및 SAR (Synthetic Aperture Radar) 영상 기반 임분고 추정, 그 외 다양한 원격탐사 융합모델 시스템을 살펴보고 그 적용 연구 사례에 대해 분석하였다(Figure 1).

#### 1) LiDAR 기반(Light Detection and Ranging) 임분고 추정

LiDAR 기반 수고 및 임분고의 추정은 LiDAR의 레이저 펄스를 산림 식생에 주사하고 반사된 레이저의 도달시간 및 강도(Intensity)정보를 측정함으로써 반사 지점의 공간 위치 좌표를 계산해내는 3차원의 정보를 추출하는 측량기법으로 대상물의 특성에 따라 반사되는 시간의 차이를 이용하여 수관부에서 반사된 신호값과 지표층에서 반사된 신호값의 차이를 이용하여 수고 및 임분고를 추정한다(Figure 2 and 3). 즉, 식생의 최고 상층부 표면에서 반사된 점군(Point Clouds)으로 만든 DSM과 최저 지표면에서 반사된 점들로 만든 수치지형모델(Digital Terrain Model: DTM)의 차이를 이용하여 제작된 CHM를 이용하여 수고 및 임분고를 추정한다(Luscombe et al., 2014; Anderson et al., 2010; Jang et al., 2008)(Figure 2). LiDAR는 식생의 3차원 구조 정보를 취득할 수 있는 주요 원격탐사 방법으

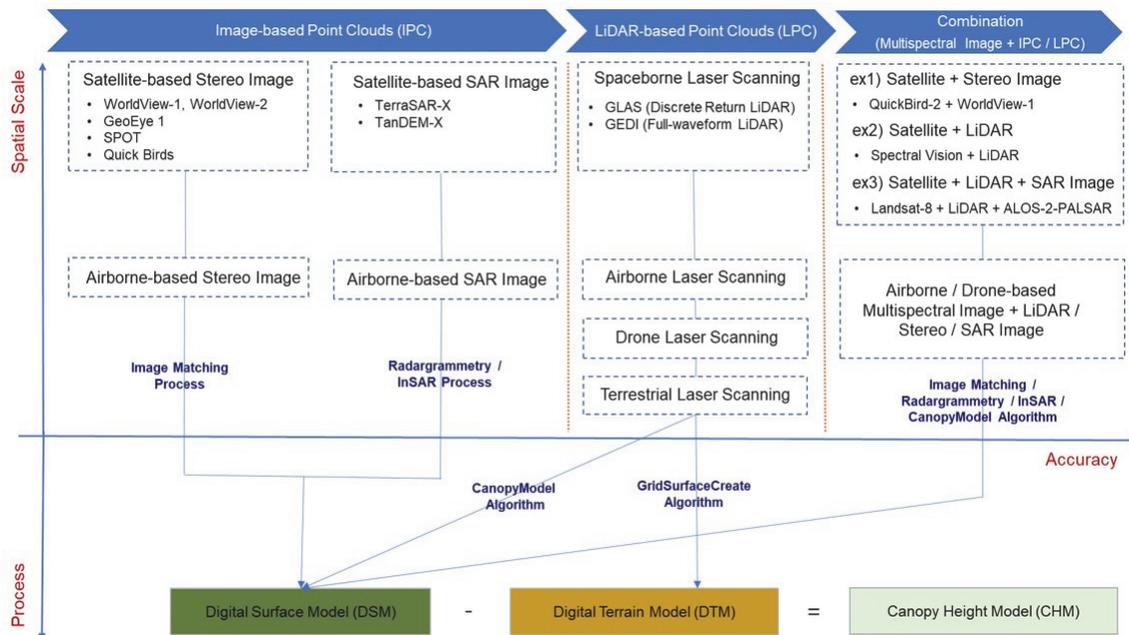
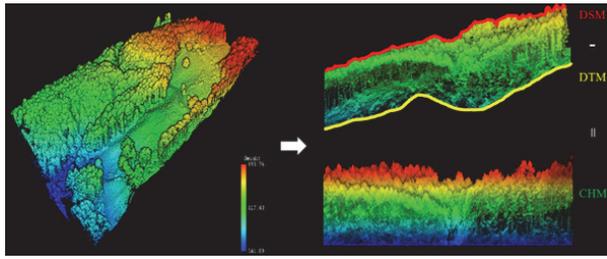


Figure 1. Illustration of three main remote sensing technology approaches for forest canopy height estimation.

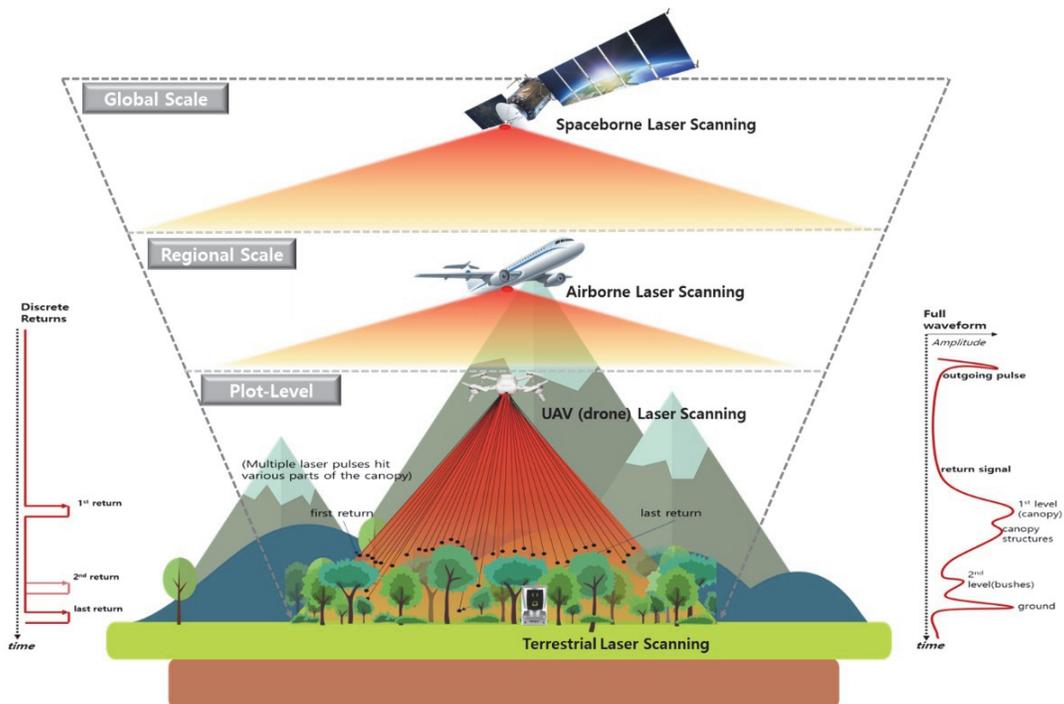


**Figure 2. Illustration of a canopy height model (CHM) derived by differencing a digital surface model (DSM) which depicts the top of the tree canopy, and a digital terrain model (DTM) which represents the underlying terrain.**

로 대면적 식생 모니터링을 위한 수고 및 임분고 추정에 가장 많이 사용되며 다른 원격탐사 방법과 비해 정확도가 뛰어난 것으로 알려져 있다(Li et al., 2020; Van Leeuwen and Nieuwenhuis, 2010; Sexton et al., 2009). 예를 들어, Sexton et al.(2009)은 침엽수림과 활엽수림 수고 추정에 항공 LiDAR, SRTM (Global Shuttle Radar Topography Mission), GeoSAR (Geographic Synthetic Aperture Radar), 그리고 현장 실측을 이용해 수고를 추정하고 비교 분석할 결과, 항공 LiDAR가 Radar에 비해 전반적으로 더 높은 수고 추정 정확도를 보임을 알 수 있었다.

LiDAR를 이용한 수고 및 임분고 추정은 플랫폼에 따라 지상 LiDAR (TLS), 드론 LiDAR (Drone LiDAR), 항공

LiDAR (ALS), 위성 LiDAR (Satellite LiDAR) 시스템으로 나눌 수 있다(Figure 3). 수고 및 임분고 추정을 위한 산림 지역의 면적이 클수록 위성 LiDAR, 항공 LiDAR, 드론 LiDAR, 지상 LiDAR의 순으로 많이 이용되고 있으며, 일반적으로 소규모 산림지역(임·소반 단위)의 수고 및 임분고 추정에는 항공·드론·지상 LiDAR가 많이 이용되고 있다. Lee et al.(2008)은 항공 LiDAR 자료를 기반으로 생성한 DTM, DSM의 높이차를 이용해 생성한 nDSM자료를 통해 산림 내외부의 수목 개체수에 따른 밀도, 수고, 수관 울폐도의 분석을 한 결과, 산림 외부에 비해 산림 내부의 평균 수고가 높게 나타나며 규칙적인 경향성을 보임을 확인할 수 있었다. Almeida et al.(2019)은 드론 Lidar를 통해 혼효림의 복구 조림 사업 결과물을 평가하고자 LiDAR 데이터를 이용해 수고, 수관 울폐도, 엽면적지수를 추정함으로써 복구 조림지의 구조적 특징을 모니터링하는 예측 방정식을 정교하게 만들 수 있었다. Liang et al.(2015)은 Single-scan, Multi-scan, Multi-single-scan 3가지 방법으로 습득한 지상 LiDAR 자료로부터 표준지 내 개체목 모델을 추출하여 흉고직경, 수고, 나뭇가지, 관목, 잎 등 세부적인 특징 유무에 따라 개체목을 5가지의 유형으로 구분하였으며, 나무 속성으로 수간 탐지, 수간 밀도, 흉고직경, 수고, 간곡선, 수간 재적, 바이오매스, 형질, 변화 탐지 추정 연구 사례들을 검토하고 평가하였다.



**Figure 3. Representation of types of LiDAR platforms (terrestrial laser scanning, UAV (drone) laser scanning, airborne laser scanning, and space-borne laser scanning) with pulse return systems (discrete return and full-waveform) over a tree canopy.**

위성 LiDAR는 항공·드론·지상 LiDAR로 측정이 불가능한 지역, 국가 및 전지구적(Regional, National, and Global Scale) 수준과 같이 대규모 면적의 수고 및 임분고 추정을 위해 고안된 방법으로 ICESat (Ice, Cloud, and Land Elevation) 위성 플랫폼에 장착된 GLAS (Geoscience Laser Altimeter System)가 최초의 위성 LiDAR 시스템으로 2003~2009년에 걸쳐 산림의 바이오매스 추정 및 기존의 DEM를 개선하기 위해 사용되어 왔으나, 2010년에 퇴역하였다(Harding and Carabajal, 2005; NASA, 2009). GLAS를 이용한 임분고 추정 연구 사례는 다음과 같다. Lefsky et al.(2005)은 ICESat 위성에 탑재된 GLAS로 브라질 열대 활엽수림, Tennessee 온대 활엽수림, Oregon 온대 침엽수림 지역의 정사각형 3×3 해발고도 행렬에서 파생된 지형 지수와 해발고 차이를 통해 임분고를 추정해 본 결과, 실측 산림 임분고(RMSE 4.85~12.66 m)와 59~68% 정확도 차이를 보임을 확인할 수 있었으며, 브라질의 열대 활엽수림 plot의 ICESat 기반 임분고는 지상 바이오매스 추정량과 상관관계( $R^2=73\%$ ,  $RMSE=58.3 \text{ Mgha}^{-1}$ )가 높음을 알 수 있었다. Simard et al.(2011)은 ICESat에 탑재된 GLAS의 데이터를 통해 1 km 해상도의 Wall-to-Wall 글로벌 임분고 지도를 생성하고자 GLAS기반 임분고 데이터와 7개의 글로벌 예측변수(Annual Mean Precipitation, Precipitation Seasonality, Annual Mean Temperature, Temperature Seasonality, Elevation, Tree Cover, Protection Status)를 이용해 Random Forest 모델을 개발한 결과, 모델 예측 임분고 정확도가  $RMSE=6.1 \text{ m}$ ,  $R^2=0.5$ 이었으며, 폐쇄된 활엽수림에서 모델 예측 임분고와 GLAS footprint 수준(65 m) LiDAR에서 파생된 임분고 추정치 차이의 오차가 증가함을 알 수 있었다. 또한, 본 연구에서 생성된 글로벌 임분고 지도를 통해 적도지역의 산림 교란 증가 패턴을 확인할 수 있었다.

LiDAR는 레이저의 반사에 따른 취득 타입에 따라 이산형 반사(Discrete Return)와 연속형 반사(Full-waveform Recording)로 나눌 수 있다(Figure 3). 이산형 반사 LiDAR는 레이저 펄스당 식생에서 반사된 저밀도 및 고밀도 점군들을 이용해 식생구조를 파악하는 반면, 연속형 반사 LiDAR는 연속적으로 반사된 레이저를 취합하여 식생의 3차원 구조를 파악하므로 이산형 반사 라이더에 비해 좀 더 구체적인 식생구조를 제공한다(Danson et al., 2014; Armston et al., 2013; Mallet et al., 2009). Anderson et al.(2015)은 이산형 반사 LiDAR와 연속형 반사 LiDAR를 이용해 영국의 도시 산림숲의 임분고 추정을 해본 결과, 이산형 반사 LiDAR로 추정된 임분고 값은 0.82 m 오차( $sd=1.78 \text{ m}$ )의 과소추정, 연속형 반사 LiDAR는 -0.65 m 오차( $sd=1.45 \text{ m}$ )

의 과대 추정을 보였다. 특히, 하층 식물의 구조 추정에는 연속형 LiDAR가 이산형 반사 LiDAR에 더 적합함을 알 수 있었다. 위성 LiDAR의 경우, 기존의 이산형 반사 위성 LiDAR (i.e. NASA GLAS (ICESat), ATLAS (ICESat-2))를 통한 임분고 추정 식생지도(Vegetation Mapping)의 정확도를 개선하기 위한 대안으로 최근 들어 연속형 반사 위성 LiDAR인 GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation)를 융합한 임분고 추정 연구가 이어지고 있다. GEDI는 미국NASA 주도아래 2018년에 발사된 첫번째 연속형 반사 위성 LiDAR로 51.6°N~ 51.6°S 사이에 위치한 열대 및 온대 산림생태계의 수직적 구조 및 바이오매스 추정 모니터링 데이터를 25 m footprint의 해상도로 제공한다(Dubayah et al., 2020; Duncanson et al., 2020; Qi and Dubayah, 2016). Potapov et al.(2021)는 2019년에 측정된 GEDI의 수고 데이터와 Landsat기반 546개 모델 변수를 이용하여 Bagged Regression Trees Ensemble 모델기반 전지구 단위(Global Scale)의 임분고 추정을 한 결과, RMSE 10.43 m를 가지며 정확도에 큰 불확실성을 보였으며, 참조데이터인 항공 LiDAR 수고 데이터와 낮은 상관관계를 보임을 확인하였다. 또한, GEDI를 통해 수고 데이터를 추출하는 과정에서 도시지역의 경우 빌딩과 나무를 구분하기 어려운 제한점과 더불어 복잡한 구조의 경사도가 심한 지역의 임분고 추정시에는 과대추정 경향성을 보임을 확인하였다. 이렇듯, 연속형 반사 LiDAR 시스템은 많은 양의 데이터, 데이터 처리를 위한 가공 과정의 복잡성, 멀티반사(Multiple Scattering)에 의한 식생구조의 복잡한 펄스곡선에 대한 데이터 분석의 어려움 및 높은 비용(Disney et al., 2016)으로 인해 지금까지 이루어진 대부분의 수고 및 임분고 추정연구는 이산형 반사 라이더 시스템이 주류를 이루고 있다(Wulder et al., 2008; Næsset, 2004; Lim et al., 2003).

## 2) 이미지 점군 기반(Image-based Point Clouds) 임분고 추정

LiDAR로 생성된 3차원 점군(Point Clouds) 기반 CHM 모델은 현재까지 가장 정확한 수고 추정 원격탐사기법으로 알려져 있다(Yu et al., 2015; Lefsky et al., 2001). 하지만, LiDAR를 이용한 3차원 점군 데이터 기반 수고 측정은 높은 비용으로 인해 대면적 산림의 임분고 추정에 일반적으로 적용하기 어려운 실정이다. 이에 기존의 LiDAR에 비해 1/2~1/3의 저렴한 비용으로 LiDAR와 유사한 방식으로 항공 스테레오 사진(Aerial Stereo Photograph) 및 고해상도 스테레오 위성 영상(High-Resolution Stereo Satellite Image), TanDEM-X, TerraSAR-X 레이더 위성영

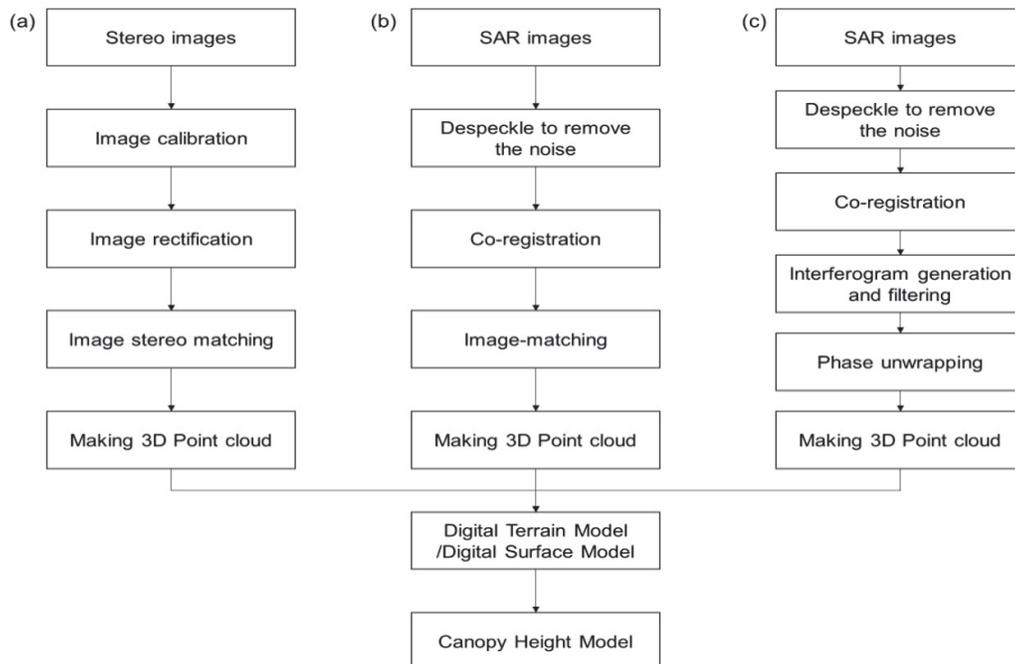
상(Radar Satellite Image) 이미지 기반 3차원 점군(Image-based Point Clouds)을 통한 DSM 추출을 통해 CHM을 산출함으로써 수고 및 임분고를 추정하는 연구가 활발하다 (Yu, et al., 2015; White et al., 2013). 이에 본 연구에서는 스테레오 사진 및 영상, SAR 이미지 기반 3차원 점군을 통한 수고 및 임분고 추정 방법과 적용 연구 사례에 대해 살펴보았다.

#### (1) 스테레오(Stereo) 영상 기반 임분고 추정

스테레오 영상 기반 임분고 추정은 방사보정, 기하보정 등 전처리 과정을 거친 항공 스테레오 사진 또는 고해상도 스테레오 위성영상(e.g. WorldView-2, Ikonos, SPOT, Kartosat, and Quick birds) 이미지를 디지털 사진측량(Digital Photogrammetry)기법에 기반하여 3차원 위치 포인트(Three-dimensional Position)의 점군을 이미지 매칭(Image Matching) 알고리즘을 적용하여 LiDAR에서 추출되는 방식과 유사하게 3차원 수직정보를 포함하는 3차원 점군을 생성한다. 이후, 필터링을 거쳐 DSM과 DTM을 산출함으로써 CHM을 생성하여 수고 및 임분고를 추정한다 (Figure 4). 예를 들어, Ullah et al.(2020)은 독일지역에 위치한 279 표본구내의 침엽수림, 활엽수림, 혼합림의 평균 수고를 추정하기 위해 항공 Stereo 사진과 WorldView-2 위성 영상을 이용하였다. 스테레오 영상기반 3차원 점군

을 이용해 1×1 m 공간해상도의 DSM을 추출하였으며, DTM은 LiDAR 기반으로 추출한 후 CHM을 생성하였다. 15가지의 CHM 기반 수고 측정값 중 최대 수고값을 추출하여 현장 실측치와의 선형회귀모델을 실행한 결과, 항공 스테레오 사진으로 추정한 수고의 정확도는 RMSE가 침엽수림(1.36 m), 활엽수림(1.54 m), 혼합림(1.83 m), 임분(1.71 m)으로 WorldView-2 위성영상으로 추정한 수고의 정확도(RMSE: 침엽수림(2.01 m), 활엽수림(1.78 m), 혼합림(2.00 m), 임분(2.04 m))보다 높은 결과를 보였다. 이 연구를 통해 독일의 경우 정기적으로 수집되어지는 스테레오 항공 사진의 활용을 통한 산림의 지속적인 수고 추정 모니터링에 대한 가능성을 살펴볼 수 있었으며, 위성기반 스테레오 영상(WorldView-2) 또한 항공 스테레오 사진 촬영에 제한이 따르는 경우 사용할 수 있는 대안임을 알 수 있었다. 하지만, 스테레오 영상 기반 임분고 추정시에 필요한 DTM 자료의 경우 기존의 정확한 DTM 자료가 없다면 LiDAR 기반으로 제작된 정확도가 높은 DTM이 필요한 제한이 따르며, 사진 촬영 시 구름이 있을 경우 그 영향으로 수고 추정에 어려움이 있다.

Goldbergs et al.(2019)는 오스트레일리아 북부의 넓은 열대 사바나 산림지역의 수고 추정을 위해 항공 LiDAR의 높은 비용을 대체할 수 있는 고해상도 스테레오 위성 영상인 GeoEye 1 (GE1)과 WorldView-1 (WV1)의 스테레오 영



**Figure 4.** The overall workflow of Stereo and SAR image processing to extract the 3D point clouds for a CHM generation. a) Stereo image based-point clouds (Shaheen et al., 2021; Gong and Fritsch, 2018), b) SAR image based-point clouds: Radargrammetry approach (Markiewicz, et al., 2019; Agrawal et al., 2018), c) SAR image based-point clouds: InSAR approach (Torun and Orhan, 2021; Hong et al., 2018).

상 조합을 반지구적 이미지 매칭(Semi-global Dense Matching: SGM)기법을 통해 CHM을 생성함으로써 수고를 추정하였으나, 정확도 평가를 위해 참고데이터인 LiDAR 기반 수고 추정치와의 비교한 결과 WV1-GE1 조합 영상의 수고 추정치가 우점종인 유칼립투스(Eucalyptus) 수관 덩불의 영향으로 현저히 과소 추정된 결과를 보임으로써 고해상도 스테레오 영상기반 수고 추정에 제한점을 보였다. 이는 LiDAR의 경우 레이저파가 식생을 뚫고 지면과 수관부 최상지점에서 반사된 점군의 집합으로 한번의 펄스마다 최대 5개의 점군이 반사되어 수집되므로 식생의 3차원 구조에 대한 보다 정확한 DSM 및 DTM 생성이 가능한 반면, 스테레오 영상 기반 3차원 점군은 수관 위 부분의 지표면에 대한 정보에 기반한 DSM으로 LiDAR의 3차원 점군과는 달리 식생구조의 외관윤곽(Outer Envelope of Forest Canopy)에 대한 3차원 정보만을 제공하기 때문이다. 이에, 수관이 밀집한 산림 지역에 적용할 경우 정확한 DTM, DEM 생성에 제한이 있으므로, 기존에 LiDAR로 생성된 DTM, DEM 자료에 기반한 CHM 생성을 통해서만 정확한 수고 및 임분고 추정이 가능한 것으로 보인다 (Grigorijs et al., 2013; Reutebuch et al., 2003; Zimble et al., 2003).

(2) SAR 영상 기반 임분고 추정

SAR 영상 기반 임분고 추정은 Radargrammetry과 InSAR (SAR Interferometry)방법을 통해 추출된 3차원 식생구조에 기반한다(Figure 4). Radargrammetry은 광학 사진 측량법에서 사용되어지는 스테레오 조망 기법을 레이더(Radar) 이미지에 적용한 방법으로, 광학파장 대신 X-band (0.03 m 파장)의 후방산란 강도(Backscattered Intensity)를 이용해 다른 각도에서 획득한 입체기반(Stereoscopic Measurement) SAR 이미지 쌍을 이용해 추출한 3차원 좌표정보에 기반한 DSM을 이용한 CHM을 통해 수고 및 임분고를 추정한다. Persson & Fransson(2014)은 스웨덴 아한대 산림의 임분고 추정을 위해 TerraSAR-X 데이터를 이용해 Radargrammetry로 DSM을 생성한 후, 항공 LiDAR로 만든 DTM과의 차이를 이용하여 CHM을 생성하여 임분단위 수고를 추정한 결과, 현장 조사 데이터와 9.4% RMSE 차이를 보여 Radargrammetry을 이용한 SAR 영상 기반 DSM 생성 적용 가능성을 보였으며, Radargrammetry을 이용한 DSM 생성시 지형요소가 중요한 인자로 나타났다. Karjalainen et al.(2012)은 TerraSAR-X 데이터를 이용해 Radargrammetry로 핀란드 아한대 산림의 표본단위(Plot-level)별 평균 임분고 추정을 한 결과, 14.0% RMSE 차이를 보임으로써 SAR 영상 기반 임분고 추정에 대한 적용 가능성을 확인하였으나, 고해상도

X-band SAR 위성 영상 촬영을 위한 비싼 운영비와 다양한 계절 및 기후 환경에서 촬영한 SAR 영상 기반 임분고 추정에 대한 후속 연구가 필요함을 제시하였다.

InSAR 방법은 다른 측면에서 촬영한 2장의 SAR 이미지의 화소기반(Pixel-by-Pixel) 차이를 지형의 고도차이로 전환함으로써 생성한 DEM을 통해 수고 및 임분고 추정에 사용한다(Rosen et al., 2000; Massonnet et al., 1998). Karila et al.(2015)는 남부 핀란드 산림지역의 수고 추정을 위해 TanDEM-X data 5쌍을 이용해 InSAR 방법을 통해 DSM을, 항공 LiDAR 데이터 기반 DTM 생성을 통해 InSAR CHM 생성하여 평균·최대·최소 수고 값을 추출한 후, Random Forest 모델의 예측변수로 이용함으로써 Lorey기반 수고값을 추정한 결과, 예측 정확도는 20% RMSE를 보였다. Solberg et al.(2013)는 노르웨이 남동부 지역의 가문비나무 우점종 산림지역의 바이오매스 추정 시 HH 편광각(Polarization)으로 획득한 TanDEM-X data 2쌍을 이용해 InSAR 방법으로 DSM을 생성한 뒤, 항공 LiDAR 데이터로 만든 DTM을 이용해 InSAR기반 임분고 모델을 바이오매스 추정에 사용하였다. 이 연구를 통해 InSAR기반 DSM은 LiDAR 기반 DSM에 비해 구체성이 떨어지나 대면적의 임분고 추정 시 비용을 줄일 수 있으며, 광학 이미지 기반 DSM 생성시와는 달리 구름 및 시간의 제한성이 없다는 이점이 있음을 알 수 있었다. 하지만, 임분고 추정을 위한 CHM 생성시 필요한 정확한 DTM 제작을 위해 기존의 항공 LiDAR와 같은 데이터가 필수적임을 알 수 있었다(Ullah et al., 2020; Schlund et al., 2016; Yu et al., 2015).

3) 원격탐사 자료 융합 기반(Combination of Multi-Source Remote Sensing Data) 임분고 추정

수고 및 임분고 추정시 식생의 3차원 정보를 제공하는 이점으로 인해 현재까지 가장 정확한 수고 추정 원격탐사 기법으로 알려진 LiDAR의 경우 높은 조사 비용의 제한점, 다중분광영상 및 광학 원격 탐사는 대면적 산림의 조사에 용이하나 산림의 수평적 분포에 대한 정보만을 제공하는 제한점이 따른다. 이에 각 원격탐사 방법의 장단점을 상호 보완하여 수고 추정의 정확성과 효율성을 높이기 위한 방안으로 LiDAR, SAR와 같은 능동형(Active) 원격탐사 자료와 저해상도 및 고해상도 광학위성과 같은 수동형(Passive) 원격탐사 자료 융합을 통한 임분고 추정 모델이 이용되고 있다. LiDAR와 고해상도 광학 위성 이미지 자료의 융합은 LiDAR의 수고 인자 추출 시 개체목 분리에 정확성을 높여 개체목 수준(Individual Tree Level)에서의 수고 추정에 이점이 있는 것으로 알려져 있다. Mora et

al.(2013)는 캐나다 북부산림 지역의 수고 추정 모델 개발을 위해 0.6 m 해상도의 QuickBird-2와 0.5 m 해상도의 WorldView-1에서 얻은 VHSR (Panchromatic Very High Spatial Resolution) 이미지를 기반으로 산림을 개체목 단위로 구별한 뒤 식생 수관 분포도(Crown Size Distribution)와 분광방사도(Top-of-Atmosphere Spectral Radiance)를 추출하여 kNN (k-Nearest Neighbor)과 선형회귀모델을 이용해 수고를 추정하였다. 이때 LiDAR 자료를 이용해 수고 모델의 보정 및 평가를 수행한 결과, kNN을 이용한 수고 모델이  $R^2=0.76$ , RMSE 1.95 m로 선형회귀모델에 비해 높은 정확도를 보임을 알 수 있었으며, 비용면에서 다중분광영상(Multi-Spectral) 이미지에 비해 저렴한 반면, 개별 식생의 특징 구분에 VHSR 이미지가 유용함을 알 수 있었다. McCombs et al.(2003)은 미국 미시시피에 위치한 소나무 조림지의 수고 추정을 위해 Small Foot-Print LiDAR와 Spectral Vision으로 획득한 0.61 m 고해상도 다중분광영상의 융합을 통해 추출한 개별 식생의 위치와 수관의 정확도가 83.5~94.8%로 LiDAR(정확도: 64.7%~87.3%)와 다중분광영상(정확도: 78.6%~92.4%)을 개별적으로 사용해서 추출할 때보다 더 높은 정확도를 보임을 알 수 있었으나, 수고 추정시 융합데이터로 인한 정확도는 LiDAR로 추정된 수고 추정치보다 오히려 낮음을 알 수 있었다. Erdody and Moskal(2010)은 산불연료량 추정시 필요한 수고 추정을 위해 미국 워싱턴주의 소나무 식생 지대에서 획득한 항공 LiDAR 데이터, 0.61 m 고해상도 근적외선 위성 이미지를 각각 단독으로 사용한 다중선형 회귀 수고 추정 모델과 두 데이터를 융합해 만든 모델의 수고 추정 정확도를 비교한 결과, LiDAR는  $R^2=0.94$ , 고해상도 위성 이미지  $R^2=0.42$ , 융합센서  $R^2=0.96$ 를 보여 융합으로 인한 수고 정확도의 향상이 있었으나, 그 효과가 미미함을 알 수 있었다. Fagua et al.(2019)은 브라질 열대우림의 3개의 다른 생태 산림지역(Dry Forest, Moist Forest, Rainforest) 수고 추정의 정확성을 높이기 위해 항공 LiDAR에서 추출한 98% 누적포인트(98% of the Cumulative Points) 데이터를 종속변수로, Landsat-8와 SAR 센서 ALOS-2-PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar)에서 추출한 20개의 예측변수를 조합한 5개의 다른 임분고 모델(Linear Regression, Random Forest, Support Vector Machine, Multivariate Adaptive Regression Splines, Lasso and Elastic-Net Regularized Generalized Linear Models)을 개발한 결과, 융복합 원격탐사 기반 임분고 모델의 정확도가 건조 산림 지역의 경우 RMSE 2.6 m, 습한 산림은 RMSE 5.7 m, 우림 지역의 경우 RMSE 6.6 m를 보이며 기존의 모델보다 향상됨을 알 수 있었다.

## 2. 원격탐사기반 전국단위 임분고 추정(Country-wide Mapping of Forest Canopy Height) 동향

전국단위 규모의 대면적 임분고 추정은 항공 및 위성 LiDAR, SAR로 소규모 지역(Plot-level)에서 획득한 수고 데이터를 지역(Regional Scale), 국가(National Scale), 지구적 단위(Global Scale)의 대면적 산림에서 획득한 위성기반 영상(Contiguous Satellite Image) 데이터와의 융합 임분고 추정 모델 개발을 통한 업스케일(Upscaling)을 통해서 이루어져 왔다(Lang et al., 2019; Su et al., 2016; Wang et al., 2016; Zald et al., 2016). 이때, 업스케일은 LiDAR, SAR 기반 3차원 식생 구조 데이터에서 추출한 수고 지표와 대면적 광학 및 스테레오 위성영상에서 추출한 분광반사율(Spectral Reflectance), 식생지수(Vegetation Indices), 텍스처 변수(Texture Variables)와 같이 수고와 관련이 있는 예측변수(Ancillary Co-variables)와의 상관성(Correlation)을 기반으로 한 모델링을 통해서 이루어진다(Wang et al., 2016)(Figure 5). Daniel et al.(2010)은 11,568 ha의 남부 스코틀랜드 Aberfoyle 산림지역의 임분고 추정을 위해 항공 LiDAR와 IRS 위성 이미지(Medium Resolution Optical Indian Remote Sensing Satellite Imagery)를 융합한 kNN 임분고 모델을 개발하였다. 이 연구에선 LiDAR의 수고변수와 상관성이 가장 높은 IRS 위성 이미지 밴드 1~4를 조합해 만든 kNN 모델을 이용해 12개의 현장조사 지역 및 전체 산림 지역의 임분고 추정을 한 결과, 밴드 1과 4를 융합한 kNN 모델이 RMSE 7.61 m를 보이며 정확도가 다른 모델에 비해 높은 것으로 나타났다. Meddens et al.(2018)은 알래스카 지역에 위치한 대면적의 북부 한대수림 3곳의 임분고 추정을 위해 항공 LiDAR, 고해상도 스테레오 위성 영상으로 만든 ArcticDEM, WorldView-2 다중분광영상 자료를 융합한 북극 수관고모델(Arctic CHM)을 Random Forest와 yaImpute을 이용 개발하였다. ArcticDEM은 WorldView-1, WorldView-2, WorldView-3, GeoEye 위성영상의 스테레오 이미지로 만든 북극 지역의 DSM으로 5 m 공간해상도로 제작되었으며, 대면적의 임분고 추정을 위해 Random Forest와 yaImpute을 이용해 임분고 모델을 생성하였다. 모델의 종속변수는 항공 LiDAR에서 획득한 평균 최대 수고값을 사용하였으며, 예측변수는 ArcticDEM에서 추출한 고도, 경사도, 방향도, 임분고 모델과 WorldView-2에서 추출한 다중 밴드와 식생지수를 사용한 결과, Random Forest 모델은 RMSE 2.2~2.6 m,  $R^2$  0.57~0.76 정확도를 보이며, yaImpute보다 더 높은 정확도를 가짐을 알 수 있었다. Li et al.(2020)은 중국 북동부 지역 대면적 산림지대의 임분고의 공간적 분포 추정을 위해 위성 기반 ICESat-2 LiDAR와 Sentinel-1, Sentinel-2,

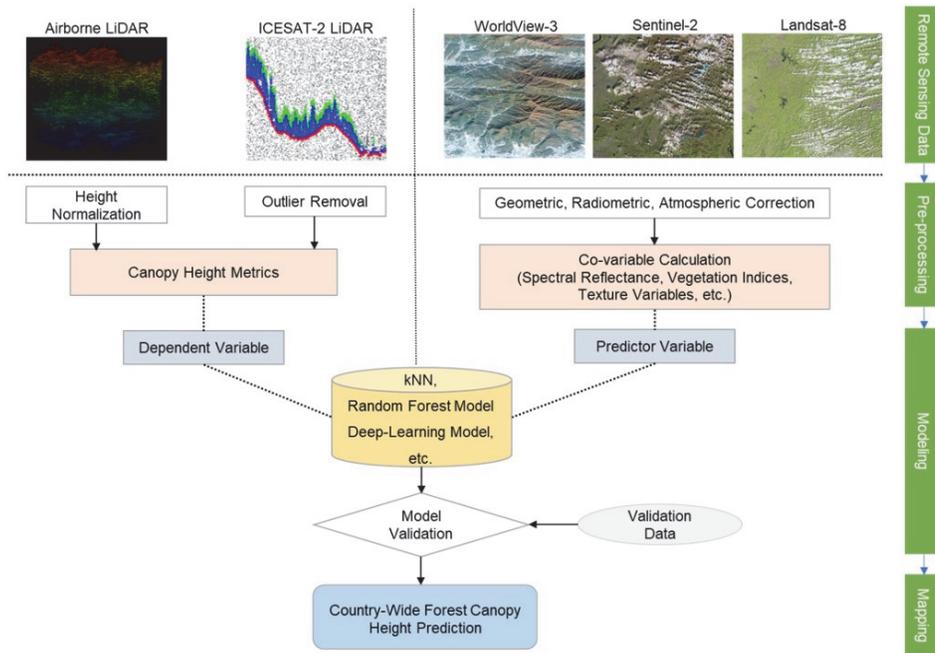


Figure 5. The example workflow of mapping a country-wide forest canopy height (modified from Li et al.(2020)).

Landsat-8 데이터를 융합한 Deep Learning, Random Forest 모델을 개발하였다. 먼저, ICESat-2 LiDAR의  $H_{canopy}$ (임분고) 데이터의 검증에 위해 Sentinel-1, Sentinel-2, Landsat-8의 해상도(10 m, 30 m, 250 m, 500 m, 1000 m)에 맞추어 정규화된 5개의 항공 LiDAR 수고 인자( $H_{mean}$ : 평균수고,  $H_{median}$ : 중간값 수고,  $H_{p90}$ : 90백분위수 수고,  $H_{p95}$ : 95백분위수 수고,  $H_{max}$ : 최대값 수고)와의 상관분석을 한 결과,  $H_{p90}$  인자가 250 m 해상도에서 ICESat-2 LiDAR의  $H_{canopy}$ 와 최대 Pearson 상관계수(0.82)를 보였으며, 일반화 선형 회귀(Generalized Linear Regression)분석 결과 RMSE 1.95 m로 상대적으로 낮은 에러를 보여 대면적의 중국 산림 지역의 임분고 추정시 ICESat-2 데이터의 사용 적합성을 보여주었다. 이후, 전국단위(Regional Level) 임분고 추정을 위해 250 m, 30 m 해상도로 ICESat-2  $H_{canopy}$ 를 종속변수로 Sentinel, Landsat-8의 합성밴드 이미지(Composite Median Images)에서 추출한 반사도(Reflectance), 식생지수(Vegetation Indices), 질감지수(Texture Metrics)를 독립변수로 융합한 Deep Learning, Random Forest 임분고 모델링 결과, Sentinel 위성을 융합한 모델의 정확도( $R^2$ )가 0.78, 0.68를 보이며 Deep Learning 모델이 Random Forest에 비해 더 적합한 모델임을 알 수 있었다. 또한, Sentinel-1의 후방산란(Backscattering)인자와 Sentinel-2의 Red-edge 밴드변수가 대면적 임분고 추정 정확도를 높이는 효과를 보여 Landsat-8 위성 융합 모델보다 Sentinel 위성 융합 모델이 더 정확한 결과를 보임을 알 수 있었다.

### 3. 우리나라 산림 환경 및 임분고 추정 현황을 고려한 원격탐사기반 전국단위 임분고 모델 구축 방향 고찰

국토의 65%가 산림인 우리나라의 경우 지속가능한 산림 경영을 위한 산림기본계획 및 산림정책수립의 기본자료 수집을 위해 전국 산림을 대상으로 국가산림자원조사를 수행해 오고 있다. 특히, 개체목의 수고는 조사 표본점 내 수종별 표준목에 대해서만 조사가 이루어지고 있다. 국가산림자원조사는 전국의 산림을 직접 현장 방문하여 조사 및 측정함에 따라 많은 시간과 인력이 요구되고 있으며, 접근의 제한이 있는 험준한 산림 지역의 경우 현장조사에 제한이 따르는 어려움이 있다. 또한, 임분고 자료의 수요가 증가함에 따라 최근 1:5,000 임상도는 각 폴리곤 단위의 임분고 정보를 제공하고 있으나, 제한된 현지조사 자료를 활용하여 임분고 정보를 제공하여 추정치의 불확도가 높은 한계가 있다(Kim, 2015).

이에 2000년대 이후 국내에서는 원격탐사기반 수고 추정 연구가 항공 LiDAR 및 UAV를 중심으로 수행되어 왔다. Kwak et al.(2005)은 유명산 일대의 3000 m 상공에서 촬영한 항공 LiDAR 자료의 High Vegetation Pulse와 Ground Pulse의 표고차를 이용하여 DSM를 제작한 뒤 잣나무, 낙엽송, 참나무류 개체목의 수고를 산출하였으며, 실제 수고와의 정확도 비교 결과 전체 수종의 경우  $R^2=0.66$ , 잣나무  $R^2=0.68$ , 낙엽송  $R^2=0.66$ , 참나무류  $R^2=0.60$ 를 보임으로서 항공 LiDAR를 이용한 수고 추정 가능성을 제시하였다. Woo et al.(2007)도 유명산의 잣나무와 낙엽송 조

림지에서 촬영된 항공 LiDAR 자료로부터 비지면점을 제거하는 기법을 적용하여 생성한 DEM를 기반으로 CHM을 제작한 뒤 개체목의 위치를 자동 식별하고 개체목의 수고를 추출하는 Moving Window 필터링 기법을 통해  $R^2=0.94$ ,  $RMSE=1.99$  m의 정확도로 개체목의 수고를 추정함으로써 Kwak et al.(2005)의 연구에서 더 나아가 CHM과 필터링 기법을 적용하여 좀 더 정확한 수고를 산출할 수 있음을 보였다. Lim et al.(2015)은 드론 카메라(UAV)를 이용하여 건국대학교 내의 독일가문비, 메타세콰이아 나무의 스테레오 이미지와 DSM를 생성한 후, LiDAR 자료 기반으로 만든 DTM를 이용해 독일가문비  $RMSE=0.84$  m, 메타세콰이아  $RMSE=2.45$  m 정확도로 개체목의 수고를 산출함으로써 UAV 기반 수고 추정의 가능성을 보였다.

이렇듯, 국내에서 수행된 원격탐사기반 임분고 추정 연구는 소규모 표본지(Plot) 단위의 조림지나 산림이 아닌 평지의 나무를 대상으로 한 항공 LiDAR, UAV 중심의 수고 추정 연구가 대부분으로 전국 산림을 대상으로 한 대규모 단위의 원격탐사기반 임분고 추정 연구는 전무하다. 이에 앞으로 국가산림조사지원 시스템을 보완할 수 있는 원격탐사기반 전국단위 임분고 추정을 위해 기존의 표본지 단위 위주의 원격탐사기반 연구의 보완과 더불어 업스케일링(Upscaling)을 통한 지역 및 전국 산림 단위의 원격탐사기반 임분고 추정을 위해 향후 다음과 같은 사항을 고려한 연구가 필요할 것으로 보인다.

첫째, 현재 소규모 표본지 단위의 원격탐사기반 임분고 추정 연구를 위해 주로 쓰이는 LiDAR, UAV와 더불어 다양한 원격탐사자료를 이용한 임분고 추정 연구가 필요할 것으로 사료된다. LiDAR는 3차원의 식생 구조를 제공하는 이점으로 인해 다른 원격탐사 방법에 비해 수고 및 임분고 추정 정확도가 뛰어난데 따라(Li et al., 2020; Van Leeuwen and Nieuwenhuis, 2010) 국내 임분고 추정 연구에 가장 많은 비중으로 이용되고 있다. 하지만, 다른 원격탐사 방법에 비해 높은 비용으로 인해 지금까지 수행된 국내 임분고 추정 연구는 저밀도 LiDAR 위주의 연구가 대부분이다. 이에 LiDAR에 비해 1/2~1/3 비용으로 LiDAR와 유사한 3차원 식생구조 데이터를 제공하는 스테레오 및 SAR 영상 자료를 이용한 임분고 추정 연구를 통해 국내 산림 환경에서의 수고 추정 정확도, 영상처리, 분석의 용이성, 비용 효율성 측면에서 기존의 LiDAR 자료를 이용한 임분고 추정 연구와의 차이점을 파악함으로써 표본지 단위에서의 임분고 추정 연구에서의 향상을 도모할 수 있을 것이다.

둘째, 소규모 단위에서 진행되던 임분고 추정 연구의 전국단위로의 확대를 위한 업스케일링을 위해 위성 광학영

상, 위성 스테레오 영상 등 위성기반 원격탐사자료를 이용한 지역적, 국가 단위에서의 원격탐사기반 임분고 추정 연구가 필요하다. 우리나라의 경우 앞으로 제공되는 국토부의 위성 스테레오 영상 및 2025년 발사 예정인 차세대 중형위성 4호(농림위성) 등을 활용한 전국단위 임분고 추정 연구를 추진할 수 있을 것으로 사료되므로 이에 앞서 국토부의 스테레오 위성과 농림위성의 사양과 유사한 밴드(Band) 구성 및 공간해상도를 가진 기존의 WorldView-2, Rapideye 위성영상 등을 활용한 지역 및 전국 산림 단위에서의 선행 임분고 추정 연구를 통해 광학 및 스테레오 위성영상 기반 국내 산림지역의 임분고 추정의 정확도, 중요 예측변수를 미리 파악함으로써 앞으로의 위성영상 자료 기반 전국단위 임분고 추정 연구의 밑바탕 체계를 갖출 수 있을 것으로 사료된다.

셋째, 국내의 경우 다양한 원격탐사자료 융합을 통한 임분고 연구 또한 전무한 실정이므로 이에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다. 국외의 사례처럼 LiDAR, SAR와 같은 능동형(Active) 원격탐사 자료와 위성기반 수동형(Passive) 원격탐사 자료 융합을 통해 각 원격탐사 방법의 장단점을 상호 보완하며 수고 추정의 정확성과 효율성을 높이는 임분고 추정 모델 연구가 필요하다. 예를 들어, 국내의 경우 표본지 단위에서 가장 많은 비중으로 이용되고 저밀도 LiDAR와 앞으로 제공될 국토부의 스테레오 위성 영상 및 농림위성영상 자료의 융합을 통해 전국단위 임분고 모델 구축을 위한 업스케일링 연구를 할 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 앞으로 LiDAR의 비용 제한성이 낮아진다면 기존의 저밀도 LiDAR와 더불어 고밀도 LiDAR, 지상 LiDAR 자료와의 융합 모델 구축을 통해 전국단위 임분고를 추정하는 방안도 고안할 수 있다.

넷째, 전국단위 임분고 추정 연구에 있어 원격탐사자료 적용의 다양성 확대와 더불어 임분고 추정모델 개발에 있어 정확도 개선을 위한 연구 또한 필요할 것으로 사료된다. 예를 들어, 임목의 수고는 침엽수림, 활엽수림 등 수종에 따라 차이가 있으나, 현재의 LiDAR 기술은 국내와 같이 수종 및 임분 구조가 다양하고 수관유효도가 상대적으로 높은 산림지역의 경우 수종 차이에 따른 임분고 추정 정확도가 다소 떨어진다(Woo et al., 2007). 이에 LiDAR 데이터 기반 임분고 추정을 위한 수목의 개체 추출 시 다양한 수관 추출 알고리즘 및 개체목 분할 알고리즘(ex: Local Maxima Filtering, Watershed Processing, Object Recognition)중 국내 산림 환경조건에 적합한 방법을 비교 연구하거나 국내의 산림 환경 특성을 고려한 수목의 기하학적 정보 추출 알고리즘의 개발을 통해 정확도를 개선할 수 있을 것으로 사료된다. 특히, 개체목 식별이나 수고 추정의 정확도는

임목의 수관부 상층과 지표면의 차이를 나타내는 CHM에 의해 좌우되는데, 지형기복이 심한 우리나라 산림의 지형적 특성상 LiDAR 센서에 수신되는 신호는 임분 내 여러 층위에서 반사되는 신호가 혼재되어 수관부 상층이나 지표면에서 반사된 신호를 정확하게 구분하는 과정에서 발생할 수 있는 오류를 줄이기 위한 LiDAR 자료의 전처리 기법의 개발 및 적용을 통한 정확도 개선 연구 수행도 필요할 것이다. 또한, LiDAR를 이용한 자료 분석시 국내에서 널리 사용되고 있는 FUSION 소프트웨어(McGaughey, 2021)는 미국 산림청에서 미국내의 산림데이터 활용성을 향상시키기 위해 개발한 것으로 국내 산림의 임분고 추정을 위해서는 국내의 산림환경을 반영한 파라미터(Parameter) 값을 적용하기 위한 체계적인 프로세스 개발이 필요하다.

## 결론

본 연구에서는 다양한 원격탐사기반 수고 및 임분고 추정 연구 동향을 살펴봄으로써 향후 국내 산림환경 및 현황에 적합한 원격탐사기반 전국단위 산림 임분고 추정을 위한 방법에 대한 적용 방향성을 탐색해 보았다. 국내외 다양한 원격탐사기반 임분고 추정 연구사례 분석 결과, 현재까지 가장 정확한 임분고 추정 원격탐사기법으로 알려진 LiDAR 기반 추정 방법에서부터 LiDAR 비용의 제한성의 대안으로 스테레오 및 SAR 이미지 점군 기반(Image-based Point Clouds) 임분고 추정, 원격탐사 방법의 장단점을 상호 보완하여 임분고 추정의 정확성과 효율성을 높이기 위한 방안으로 원격탐사자료 융합기반 임분고 추정 방법이 대두되었다. 특히, 대면적의 전국단위 산림 임분고 추정을 위해서는 항공 및 위성 LiDAR, SAR기반으로 표본지(Plot) 단위에서 획득한 수고 및 임분고 데이터를 지역, 국가, 및 지구적 단위에서 획득한 위성기반 영상(Contiguous Satellite Image)에서 산출한 데이터와의 융합 임분고 추정 모델 개발을 통한 업스케일(Upscaling)을 통해서 수행되고 있다.

이에 현재까지 LiDAR 및 UAV 위주의 소규모 단위에서의 임분고 추정 연구에 한정되어 있는 우리나라의 경우 향후 국내 산림환경 및 현황에 적합한 원격탐사기반 임분고 추정방법을 모색하기 위해 LiDAR, UAV와 더불어 스테레오, SAR, 위성 영상 자료(e.g. 국토부 스테레오 위성 영상, 차세대 중형위성 4호(농림위성))를 이용한 임분고 추정 연구 등 다양한 플랫폼의 원격탐사기법을 연구 수행함으로써 국내 산림 환경에서의 임분고 추정 정확도, 영상 처리, 분석의 용이성, 비용 효율성 측면에서 최적의 원격탐사기법을 탐색할 필요가 있다. 또한, 원격탐사자료 전처리 기법의 개발 및 고도화를 통해 우리나라 산림 지형,

수종의 특성 등을 고려한 원격탐사자료의 분석의 향상을 통해 임분고 추정의 정확도를 개선할 수 있을 것으로 사료된다. 이에, 궁극적으로 국가산림조사의 일환으로 현재의 현장조사 방식에서 벗어나 다양한 원격탐사자료 융합 기반 업스케일링 임분고 추정 모델 개발을 통해 전국단위의 임분고를 추정하는데 기여할 수 있을 거라 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 산림청 국립산림과학원 “산림자원 평가 및 모니터링을 위한 농림위성 융합 산출물 개발(과제번호: FM0103-2021-03)”, 산림청(한국임업진흥원), 산림과학기술 연구개발사업(과제번호: 2021359C10-2223-BD01)의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- Agrawal, R., Das, A. and Rajawat, A.S. 2018. Accuracy assessment of digital elevation model generated by SAR stereoscopic technique using COSMO-SkyMed Data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 46(10): 1739-1747.
- Alexander, C., Korstjens, A.H. and Ross, A.H. 2018. Influence of micro-topography and crown characteristics on tree height estimations in tropical forests based on LiDAR canopy height models. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 65: 105-113.
- Almeida, D. et al. 2019. Monitoring the structure of forest restoration plantation with a drone-lidar system. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 79: 192-198.
- Anderson, K., Hancock, S., Disney, M. and Gaston, K.J. 2016. Is waveform worth it? A comparison of LiDAR approaches for vegetation and landscape characterization. *Remote Sensing in Ecology and Conservation* 2(1): 5-15.
- Anderson, K., Bennie, J. and Wetherelt, A. 2010. Laser scanning of fine scale pattern along a hydrological gradient in a peatland ecosystem. *Landscape Ecology* 25: 477-492.
- Armston, J., Disney, M., Lewis, P., Scarth, P., Phinn, S., Lucas, R., Bunting, P. and Goodwin, N. 2013. Direct retrieval of canopy gap probability using airborne waveform lidar. *Remote Sensing of Environment* 134: 24-38.
- Asner, G.P., Hughes, R.F., Varga, T.A., Knapp, D.E. and Kennedy-Bowdoin, T. 2009. Environmental and biotic controls over aboveground biomass throughout a tropical rain forest. *Ecosystems* 12: 261-278.

- Bang, D.S., Lee, D.G., Yang, S.R. and Lee, H.J. 2018. Study on the tree height using unmanned aerial photogrammetry method. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 21(3): 35-47. (in Korean with English abstract).
- Chung, C.H., Wang, C.H., Hsieh, H.C. and Huang, C.Y. 2019. Comparison of forest canopy height profiles in a mountainous region of Taiwan derived from airborne lidar and unmanned aerial vehicle imagery. *GIScience & Remote Sensing* 56(8): 1289-1304.
- Danson, F.M., Gaulton, R., Armitage, R.P., Disney, M., Gunawan, O., Lewis, P., Pearson, G. and Ramirez, A.F. 2014. Developing a dual-wavelength full-waveform terrestrial laser scanner to characterize forest canopy structure. *Agricultural and Forest Meteorology* 198: 7-14.
- Dubayah, R. et al. 2020. The global ecosystem dynamics investigation: high-resolution laser ranging of the earth's forests and topography. *Science of Remote Sensing* 1(1): 100002.
- Duncanson, L. et al. 2020. Biomass estimation from simulated GEDI, ICESat-2 and NISAR across environmental gradients in Sonoma County, California. *Remote Sensing of Environment* 242: 111779.
- Erdody, T.L. and Moskal, M. 2010. Fusion of LiDAR and imagery for estimating forest canopy fuels. *Remote Sensing of Environment* 114(4): 725-737.
- Fagua, J.C., Jantz, P., Rodriguez-Buritica, S., Duncanson, L. and Goetz, S.J. 2019. Integrating LiDAR, multispectral and SAR data to estimate and map canopy height in tropical forests. *Remote Sensing* 11(22): 2697.
- Frazer, G.W., Wulder, M.A. and Niemann, K.O. 2005. Simulation and quantification of the fine-scale spatial pattern and heterogeneity of forest canopy structure: A lacunarity-based method designed for analysis of continuous canopy heights. *Forest Ecology and Management* 214(1-3): 65-90.
- Garestier, F., Dubois-Fernandez, P.C. and Papathanassiou, K.P. 2007. Pine forest height inversion using single-pass X-band PolInSAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 46(1): 59-68.
- Goldbergs, G., Maier, S.W., Levick, S.R. and Edwards, A. 2019. Limitations of high resolution satellite stereo imagery for estimating canopy height in Australian tropical savannas. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 75: 83-95.
- Gong, K. and Fritsch, D. 2018. Point cloud and digital surface model generation from high resolution multiple view stereo satellite imagery. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences* 42(2).
- Guerra-Hernández, J., Görgens, E.B., García-Gutiérrez, J., Rodríguez, L.C.E., Tomé, M. and González-Ferreiro, E. 2016. Comparison of ALS based models for estimating aboveground biomass in three types of Mediterranean forest. *European Journal of Remote Sensing* 49(1): 185-204.
- Hancock, S., Armston, J., Hofton, M., Sun, X., Tang, H., Duncanson, L.I., Kellner, J.R. and Dubayah, R. 2019. The GEDI simulator: A large-footprint waveform lidar simulator for calibration and validation of spaceborne missions. *Earth and Space Science* 6(2): 294-310.
- Harding, D.J. and Carabajal, C.C. 2005. ICESat waveform measurements of within-footprint topographic relief and vegetation vertical structure. *Geophysical Research Letters* 32: L21S10.
- Hill, R.A. and Hinsley, S.A. 2015. Airborne lidar for woodland habitat quality monitoring: Exploring the significance of lidar data characteristics when modelling organism-habitat relationships. *Remote Sensing* 7(4): 3446-3466.
- Holmgren, J. 2004. Prediction of tree height, basal area and stem volume in forest stands using airborne laser scanning. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19(6): 543-553.
- Hong, S.H., Wdowinski, S., Amelung, F., Kim, H.C., Won, J.S. and Kim, S.W. 2018. Using TanDEM-X pursuit monostatic observations with a large perpendicular baseline to extract glacial topography. *Remote Sensing* 10(11): 1851.
- Hyde, P., Dubayah, R., Walker, W., Blair, J.B., Hofton, M. and Hunsaker, C. 2006. Mapping forest structure for wildlife habitat analysis using multi-sensor (lidar, SAR/InSAR, ETM+, QuickBird) synergy. *Remote Sensing of Environment* 102(1-2): 63-73.
- Järnstedt, J., Pekkarinen, A., Tuominen, S., Ginzler, C., Holopainen, M. and Viitala, R. 2012. Forest variable estimation using a high-resolution digital surface model. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 74: 78-84.
- Karabörk, H., Makineci, H.B., Orhan, O. and Karakus, P. 2021. Accuracy assessment of DEMs derived from multiple SAR data using the InSAR technique. *Arabian Journal for Science and Engineering* 46(6): 5755-5765.
- Karjalainen, M., Kankare, V., Vastaranta, M., Holopainen, M. and Hyypä, J. 2012. Prediction of plot-level forest variables using TerraSAR-X stereo SAR data. *Remote Sensing of Environment* 117: 338-347.

- Karila, K., Vastaranta, M., Karjalainen, M. and Kaasalainen, S. 2015. Tandem-X interferometry in the prediction of forest inventory attributes in managed boreal forests. *Remote Sensing of Environment* 159: 259-268.
- Kim, K.D., Lee, D.G., Yu, Y.G. and Lee, H.J. 2017. Processing of aerial photographic image using unmanned aerial photogrammetry process and revision/update method of digital map of small change area. *Korean Society for Geospatial Information Science* 25(4): 15-24. (in Korean with English abstract).
- Kim, K.M. 2015. Analysis of the status of domestic and overseas forest type map and development plan. *National Institute of Forest Science* 54: 1-32. ISSN 2288-4815 (In Korean).
- Kim, E.M. 2013. Extraction of the tree regions in forest areas using LIDAR data and ortho-image. *Journal of the Korean Society for Geospatial Information System* 21(2): 27-34. (in Korean with English abstract).
- Koch, B. 2010. Status and future of laser scanning, synthetic aperture radar and hyperspectral remote sensing data for forest biomass assessment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65(6): 581-590.
- Krainak, M.A. et al. 2012. Laser transceivers for future NASA missions. *Laser Technology for Defense and Security VIII* 8381: 83810Y.
- Kugler, F., Schulze, D., Hajnsek, I., Pretzsch, H. and Papathanassiou, K.P. 2014. TanDEM-X Pol-InSAR performance for forest height estimation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 52(10): 6404-6422.
- Kwak, D.A., Lee, W.K. and Son, M.H. 2005. Application of LiDAR for measuring individual trees and forest stands. *Journal of Korean Forest Society* 94(6): 431-440. (in Korean with English abstract).
- Lang, N., Schindler, K. and Wegner, J.D. 2019. Country-wide high-resolution vegetation height mapping with Sentinel-2. *Remote Sensing of Environment* 233: 111347.
- Lagomasino, D., Fatoyinbo, T., Lee, S.K. and Simard, M. 2015. High-resolution forest canopy height estimation in an African blue carbon ecosystem. *Remote Sensing in Ecology and Conservation* 1(1): 51-60.
- Lee, D.K., Ryu, J.E., Kim, E.Y. and Jeon, S.W. 2008. Analysis of forest structure using LiDAR data: A case study of forest in Namchon-Dong, Osan. *Journal of Environmental Impact Assessment* 17(5): 279-288. (in Korean with English abstract).
- Lefsky, M.A., Cohen, W.B. and Spies, T.A. 2001. An evaluation of alternate remote sensing products for forest inventory, monitoring, and mapping of Douglas-fir forests in western Oregon. *Canadian Journal of Forest Research* 31(1): 78-87.
- Lefsky, M.A., Cohen, W.B., Parker, G.G. and Harding, D.J. 2002. Lidar remote sensing for ecosystem studies. *BioScience* 52(1): 19-30.
- Lefsky, M.A., Harding, D.J., Keller, M., Cohen, W.B., Carabajal, C.C., Espirito-Santo, F.D.B., Hunter, M.O. and Oliveira Jr, R.D. 2005. Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICESat. *Geophysical Research Letters* 32(22): L22S02.
- Li, W., Niu, Z., Liang, X., Li, Z., Huang, N., Gao, S., Wang, C. and Muhammad, S. 2015. Geostatistical modeling using LiDAR-derived prior knowledge with SPOT-6 data to estimate temperate forest canopy cover and above-ground biomass via stratified random sampling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 41: 88-98.
- Li, W., Niu, Z., Shang, R., Qin, Y., Wang, L. and Chen, H. 2020. High-resolution mapping of forest canopy height machine learning by coupling ICESat-2 LiDAR with Sentinel-1, Sentinel-2, and Landsat-8 data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 92: 102163.
- Liang, X. et al. 2016. Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 115: 63-77.
- Lim, K., Treitz, P., Wulder, M., St-Onge, B. and Flood, M. 2003. Lidar remote sensing of forest structure. *Progress in Physical Geography* 27(1): 88-106.
- Lim, Y.S., La, P.H., Park, J.S., Lee, M.H., Pyeon, M.W. and Kim, J.I. 2015. Calculation of tree height and canopy crown from drone images using segmentation. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography* 33(6): 605-614. (in Korean with English abstract).
- Luscombe, D.J., Anderson, K., Gatis, N., Wetherelt, A., Grand-Clement, E. and Brazier, R.E. 2014. What does airborne LiDAR really measure in upland ecosystems?. *Ecohydrology* 8(4): 584-594.
- Mallet, C. and Bretar, F. 2009. Full-waveform topographic lidar: state-of-the-art. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64(1): 1-16.
- Markiewicz, J., Abratkiewicz, K., Gromek, A., Ostrowski, W., Samczyński, P. and Gromek, D. 2019. Geometrical matching of SAR and optical images utilizing ASIFT features for SAR-based navigation aided systems. *Sensors* 19(24): 5500.
- Massonnet, D. and Feigl, K.L. 1998. Radar interferometry and

- its application to changes in the earth's surface. *Reviews of Geophysics* 36(4): 441-500.
- McCombs, J.W., Roberts, S.D. and Evans, D.L. 2003. Influence of fusing Lidar and multispectral imagery on remotely sensed estimates of stand density and mean tree height in a managed loblolly pine plantation. *Forest Science* 49(3): 457-466.
- McGaughey, R.J. 2021. FUSION/LDV: Software for LIDAR data analysis and visualization, U.S. Forest Service (Pacific Northwest Research Station).
- Mcinerney, D.O., Suarez-Minguez, J., Valbuena, R. and Nieuwenhuis, M. 2010. Forest canopy height retrieval using LiDAR data, medium-resolution satellite imagery and kNN estimation in Aberfoyle, Scotland. *Forestry* 83(2): 195-206.
- Meddens, A.J.H., Vierling, L.A., Eitel, J.U., Jennewein, J.S., White, J.C. and Wulder, M.A. 2018. Developing 5 m resolution canopy height and digital terrain models from WorldView and ArcticDEM data. *Remote Sensing of Environment* 218: 174-188.
- Schlund, M., Poncet, F.V., Kuntz, S., Boehm, H.V., Hoekman, D.H. and Schullius, C. 2016. TanDEM-X elevation model data for canopy height and aboveground biomass retrieval in a tropical peat swamp forest. *International Journal of Remote Sensing* 37(21): 5021-5044.
- NASA (National Aeronautics and Space Administration). 2009. IceSat Homepage, (Accessed July 22, 2010). <http://icesat.gsfc.nasa.gov/index.php>
- Næsset, E. and Bjerknes, K.O. 2001. Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanner data. *Remote sensing of Environment* 78(3): 328-340.
- Næsset, E. 2002. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sensing of Environment* 80(1): 88-89.
- Næsset, E. 2004. Practical large-scale forest stand inventory using small-footprint airborne scanning laser. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19(2): 164-179.
- Pang, Y., Lefsky, M., Sun, G. and Ranson, J. 2011. Impact of footprint diameter and off-nadir pointing on the precision of canopy height estimates from spaceborne lidar. *Remote Sensing of Environment* 115(11): 2798-2809.
- Persson, H. and Fransson, J.E.S. 2014. Forest variable estimation using radargrammetric processing of TerraSAR-X images in boreal forests. *Remote Sensing* 6(3): 2084-2107.
- Potapov, P. et al. 2021. Mapping global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data. *Remote Sensing of Environment* 253: 112165.
- Popescu, S.C., Wynne, R.H. and Scrivani, J.A. 2004. Fusion of small-footprint lidar and multispectral data to estimate plot-level volume and biomass in deciduous and pine forests in Virginia, USA. *Forest Science* 50(4): 551-565.
- Qi, W. and Dubayah, R.O. 2016. Combining Tandem-X InSAR and simulated GEDI lidar observations for forest structure mapping. *Remote Sensing of Environment* 187: 253-266.
- Rosen, P.A., Hensley, S., Joughin, I.R., Li, F.K., Madsen, S.N., Rodriguez, E. and Goldstein, R.M. 2000. Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE* 88(3): 333-382.
- Reutebuch, S.E., McGaughey, R.J., Andersen, H.E. and Carson, W.W. 2003. Accuracy of a high-resolution lidar terrain model under a conifer forest canopy. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29(5): 527-535.
- Saatchi, S.S. et al. 2011. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108(24): 9899-9904.
- Shaheen, A., Sims-Waterhouse, D., Bointon, P., Takushima, S., Piano, S. and Leach, R.K. 2021. Characterization of a multi-view fringe projection system based on the stereo matching of rectified phase maps. *Measurement Science and Technology* 32(4): 045006.
- Ullah, S., Dees, M., Datta, P., Adler, P., Saeed, T., Khan, M.S. and Koch, B. 2020. Comparing the potential of stereo aerial photographs, stereo very high-resolution satellite images, and TanDEM-X for estimating forest height. *International Journal of Remote Sensing* 41(18): 6976-6992.
- Sankey, T., Donager, J., McVay, J. and Sankey, J.B. 2017. UAV lidar and hyperspectral fusion for forest monitoring in the southwestern USA. *Remote Sensing of Environment* 195: 30-43.
- Sankey, T.T., McVay, J., Swetnam, T.L., McClaran, M.P., Heilman, P. and Nichols, M. 2018. UAV hyperspectral and lidar data and their fusion for arid and semi-arid land vegetation monitoring. *Remote Sensing in Ecology and Conservation* 4(1): 20-33.
- Schutz, B.E., Zwally, H.J., Shuman, C.A., Hancock, D. and DiMarzio, J.P. 2005. Overview of the ICESat mission. *Geophysical Research Letters* 32: L21S01.
- Sexton, J.O., Bax, T., Siqueira, P., Swenson, J.J. and Hensley, S. 2009. A comparison of lidar, radar, and field measurements of canopy height in pine and hardwood forests of southeastern North America. *Forest Ecology and Management* 257(3): 1136-1147.

- Simard, M., Pinto, N., Fisher, J.B. and Baccini, A. 2011. Mapping forest canopy height globally with spaceborne lidar. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences* 116(G4).
- Solberg, S., Astrup, R., Breidenbach, J., Nilsen, B. and Weydahl, D. 2013. Monitoring spruce volume and biomass with InSAR data from TanDEM-X. *Remote Sensing of Environment* 139: 60-67.
- St-Onge, B.A. and Achaichia, N. 2001. Measuring forest canopy height using a combination of lidar and aerial photography data. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 34(3/W4): 131-138.
- Su, Y., Guo, Q., Xue, B., Hu, T., Alvarez, O., Tao, S. and Fang, J. 2016. Spatial distribution of forest aboveground biomass in China: Estimation through combination of spaceborne lidar, optical imagery, and forest inventory data. *Remote Sensing of Environment* 173: 187-199.
- Torun, A.T. and Orhan, O. 2021. Investigation of temporal baseline effect on DEMs derived From COSMO Sky-Med data. *International Journal of Engineering and Geosciences* 6(3): 157-164.
- Treuhaft, R.N. and Siqueira, P.R. 2000. The vertical structure of vegetated land surfaces from interferometric and polarimetric radar. *Radio Science* 35(1): 141-177.
- Ullah, S., Dees, M., Datta, P., Adler, P., Saeed, T., Khan, M.S. and Koch, B. 2020. Comparing the potential of stereo and aerial photographs, stereo very high-resolution satellite images, and TanDEM-X for estimating forest height. *International Journal of Remote Sensing* 41(18): 6976-6992.
- Leeuwen, M.V. and Nieuwenhuis, M. 2010. Retrieval of forest structural parameters using LiDAR remote sensing. *European Journal of Forest Research* 129(4): 749-770.
- Li, W., Zheng, N., Shang, R., Qin, Y., Wang, L. and Chen, H. 2020. High-resolution mapping of forest canopy height using machine learning by coupling ICESat-2 LiDAR with Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat-8 data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 92: 102163.
- Wang, X., Huang, H., Gong, P., Biging, G.S., Xin, Q., Chen, Y., Yang, J. and Liu, C. 2016. Quantifying multi-decadal change of planted forest cover using airborne LiDAR and Landsat imagery. *Remote Sensing* 8(1): 62.
- Wang, Y., Li, G., Ding, J., Guo, Z., Tang, S., Wang, C., Huang, Q., Liu, R. and Chen, J.M. 2016. A combined GLAS and MODIS estimation of the global distribution of mean forest canopy height. *Remote Sensing of Environment* 174: 24-43.
- White, J.C., Wulder, M.A., Vastaranta, M., Coops, N.C., Pitt, D. and Woods, M. 2013. The utility of image-based point clouds for forest inventory: A comparison with airborne laser scanning. *Forests* 4(3): 518-536.
- Woo, C.S., Yoon, J.S., Shin, J.I. and Lee, K.S. 2007. Automatic extraction of individual tree height in mountainous forest using airborne lidar data. *Journal of Korean Forest Society* 96(3): 251-258. (in Korean with English abstract).
- Wulder, M.A., Bater, C.W., Coops, N.C., Hilker, T. and White, J.C. 2008. The role of lidar in sustainable forest management. *The Forestry Chronicle* 84(6): 807-826.
- Wulder, M.A., White, J.C., Nelson, R.F., Næsset, E., Ørka, H.O., Coops, N.C., Hilker, T., Bater, C.W. and Gobakken, T. 2012. Lidar sampling for large-area forest characterization: A review. *Remote Sensing of Environment* 121: 196-209.
- Yu, X. et al. 2015. Comparison of laser and stereo optical, SAR and InSAR point clouds from air-and space-borne sources in the retrieval of forest inventory attributes. *Remote Sensing* 7(12): 15933-15954.
- Zald, H.S.J., Wulder, M.A., White, J.C., Hilker, T., Hermosilla, T., Hobart, G.W. and Coops, N.C. 2016. Integrating Landsat pixel composites and change metrics with lidar plots to predictively map forest structure and aboveground biomass in Saskatchewan, Canada. *Remote Sensing of Environment* 176: 188-201.
- Zhang, J., Nielsen, S.E., Mao, L., Chen, S. and Svenning, J.C. 2016. Regional and historical factors supplement current climate in shaping global forest canopy height. *Journal of Ecology* 104(2): 469-478.
- Zimble, D.A., Evans, D.L., Carlson, G.C., Parker, R.C., Grado, S. C. and Gerard, P.D. 2003. Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LiDAR. *Remote Sensing of Environment* 87(2-3): 171-182.

---

Manuscript Received : April 28, 2022

First Revision : September 5, 2022

Second Revision : September 6, 2022

Accepted : September 6, 2022