

고해상도 원격탐사 자료와 기계학습을 이용한 한국 산림의 탄소 저장량 산정

신재원¹⁾ · 정수종^{1,2)*} · 장동영^{1,2)}

¹⁾서울대학교 환경계획연구소, ²⁾서울대학교 환경대학원 환경계획학과

(접수일: 2023년 2월 15일, 게재확정일: 2023년 2월 19일)

Estimation of Forest Carbon Stock in South Korea Using Machine Learning with High-Resolution Remote Sensing Data

Jaewon Shin¹⁾, Sujong Jeong^{1,2)*}, and Dongyeong Chang^{1,2)}

¹⁾Environmental Planning Institute, Seoul National University, Seoul, Korea

²⁾Department of Environmental Planning, Graduate School of Environmental Studies,
Seoul National University, Seoul, Korea

(Manuscript received 15 February 2023; accepted 19 February 2023)

Abstract Accurate estimation of forest carbon stocks is important in establishing greenhouse gas reduction plans. In this study, we estimate the spatial distribution of forest carbon stocks using machine learning techniques based on high-resolution remote sensing data and detailed field survey data. The high-resolution remote sensing data used in this study are Landsat indices (EVI, NDVI, NDII) for monitoring vegetation vitality and Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) data for describing topography. We also used the forest growing stock data from the National Forest Inventory (NFI) for estimating forest biomass. Based on these data, we built a model based on machine learning methods and optimized for Korean forest types to calculate the forest carbon stocks per grid unit. With the newly developed estimation model, we created forest carbon stocks maps and estimated the forest carbon stocks in South Korea. As a result, forest carbon stock in South Korea was estimated to be 432,214,520 tC in 2020. Furthermore, we estimated the loss of forest carbon stocks due to the Donghae-Uljin forest fire in 2022 using the forest carbon stock map in this study. The surrounding forest destroyed around the fire area was estimated to be about 24,835 ha and the loss of forest carbon stocks was estimated to be 1,396,457 tC. Our model serves as a tool to estimate spatially distributed local forest carbon stocks and facilitates accounting of real-time changes in the carbon balance as well as managing the LULUCF part of greenhouse gas inventories.

Key words: Carbon, forest, biomass, LULUCF, remote sensing, machine learning

*Corresponding Author: Sujong Jeong, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea.
Phone: +82-2-880-5664, Fax: +82-2-883-5620
E-mail: sujong@snu.ac.kr

1. 서 론

대기 중 이산화탄소는 온실가스로서 지구 기온 상승에 기여하고 있다. 대기 중 이산화탄소 농도는 산업화 시대 이전 278 ppm에서 2021년 414 ppm으로 근 2세기 만에 약 50% 증가하였으며 이에 따라 지구 평균 기온이 지속적으로 증가하고 있다(NOAA, 2023). 뿐만 아니라 지속적으로 증가하는 대기 중 이산화탄소는 전 지구적으로 폭염, 폭우, 한파 및 가뭄 등 이상 기후 현상의 원인이 되어 기후 위기를 심화시키고 있다(Eggleston et al., 2006). 국제사회는 온실가스를 저감하고 기후위기에 대응하기 위해 1992년 UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change, 기후변화에 관한 유엔 기본 협약), 1997년 교토 의정서(Kyoto protocol), 2015년 파리 협정(Paris Agreement) 및 최근의 탄소중립 선언까지 많은 노력을 기울이고 있다.

산림은 전통적인 온실가스 감축수단의 하나로 산림의 적절한 조성관리와 관리를 통해 산림 내 식생 성장을 촉진하여 대기 중 이산화탄소를 감축할 수 있다(Dixon, 1994; Olivier, 2017; Friedlingstein, 2020). 산림에 의한 온실가스 흡수량은 온실가스 인벤토리 중 LULUCF (Land Use, Land Use Change, and Forestry, 토지이용, 토지이용변화 및 임업) 부문으로 분류된다(UNFCCC, 1997). 산림은 우리나라 전체 국토 면적의 약 64%를 차지하며, LULUCF 부문의 탄소 흡수량은 매년 국가 전체 온실가스 배출량의 약 6%를 차지한다(GIR, 2021). 비록 양은 적지만 산림은 주요한 온실가스 흡수원으로 역할을 하기에 산림 탄소 저장량을 정확하고 상세하게 산정하는 것은 온실가스 관리 및 저감 계획수립에 있어 매우 중요한 과정이다.

최근 들어 국제사회는 온실가스 인벤토리의 정확도 향상을 위해 온실가스 인벤토리 작성 시 공간정보의 중요성을 강조하고 있다(IPCC, 2006). 현 LULUCF 부문 온실가스 인벤토리는 산림청 및 지방자치단체의 산림사업 내역 등의 행정자료를 기반으로 산정되어 공간정보가 포함되지 않은 시·군·구 지방자치단체 단위의 통계적 결과값으로 제공되고 있다. 따라서, 국소(local) 규모에서 변동되는 산림의 탄소 저장량은 정확히 측정하기 어려운 한계가 있다(Yu et al., 2015; Sim et al., 2017). 온실가스 인벤토리는 작성 방법에 따라 Tier 1에서 Tier 3으로 분류되며, 일반적으로 높은 Tier의 방법론을 적용한 인벤토리일수록 정확도가 높아진다(IPCC, 2006). 현재 우리나라 LULUCF 부문의 인벤토리 작성 방법은 IPCC 지침의 Tier 2 수준에 해당하여 인벤토리 작성 시 Tier 3 수준의 방법론을 적용하여 인벤토리의 정확도를 향상하고 불확도를 개선하는 것이 필요하다.

일반적으로 선행 연구들은 산림 탄소 저장량의 공간분포를 산정하기 위해 원격탐사 자료와 현장 조사 자료에 Multiple Linear Regression(다중선형회귀), k-NN (k-Nearest Neighbors, k-최근접 이웃), Decision Tree(결정트리), SVR (Support Vector Regression, 서포트 벡터 회귀), Random Forest 기법 등을 이용하였다(Gallaun et al., 2010; Heo et al., 2014; Lee et al., 2015). 최근의 연구는 단순한 회귀 분석 방법보다 정확도가 높은 기계학습 기법을 이용하여 고성능의 모델을 제작하려는 연구로 발전해가고 있다(Harris et al., 2021). 뿐만 아니라 컴퓨터 연산 능력의 향상과 고해상도 원격 탐사 자료의 증가는 더욱 광범위한 지역에 대한 상세한 연구를 가능하게 하였다. 본 연구는 우리나라의 LULUCF 부문 온실가스 인벤토리를 Tier 3 수준으로 고도화 하기위해 원격탐사 자료와 국가 고유 계수를 활용하여 국내에 최적화된 산림 탄소 저장량의 공간분포를 산정하는 모델을 개발하고자 하였다.

2. 자료 및 방법

본 연구의 산림 탄소 저장량 산정 모델은 원격탐사 자료와 현장 조사 자료에 Random Forest를 이용하여 격자 단위의 임목축적을 산정하는 과정과 산정된 임목축적에 산림 바이오매스 탄소 저장량 환산식을 적용하여 산림 탄소 저장량을 계산하는 과정을 포함한다. Random Forest 모델은 고해상도 원격탐사 자료인 Landsat 위성영상의 지수 EVI (Enhanced Vegetation Index), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), NDII (Normalized Difference Infrared Index)와 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)의 지형인자(Slope, Aspect, Elevation)를 독립변수로 이용하고, 현장 조사 자료인 NFI 임목축적 자료를 종속변수로 이용한다. 모델의 결과는 30 m 공간해상도를 갖는 전국 단위의 임목축적 지도와 산림 탄소 저장량 지도이다. 본 연구는 모델 결과를 활용하여 시·군·구 및 읍·면·동 단위의 산림 탄소 저장량 산정 예시와 2022년 동해-울진 산불로 소실된 산림 탄소 저장량을 산정하였다.

2.1 자료

2.1.1 Landsat 위성영상 자료

본 연구는 Landsat 위성영상을 토지피복지도 제작에 활용하고, 산림 탄소 저장량 산정 모델의 독립변수로 활용하였다. Landsat 위성영상은 2020년에 촬영된 Landsat 7 ETM+과 Landsat 8 OLI/TIRS를 이용하였다(Table S1). Landsat 위성영상의 이용 범위는 우리나라 전 국토를 포함하는 Path 113~117과 Row 33~37 지점에서 촬영된 자료를 활용하였다(Fig. S1). 본 연구는 기하보정이 완료된 Level 1 Collection 1

Table S1. Date list of Landsat data used in this study

Path/Row	Date											
113034	20200306	20200322	20200407	20200610	20200626							
114034	20200406	20200414	20200422	20200430	20200508	20200601	20200609	20201023	20201108	20201116		
114035	20200305	20200406	20200414	20200422	20200430	20200508	20200609	20201007	20201023	20201108		
114036	20200305	20200406	20200414	20200430	20200609	20201007	20201023	20201108				
115033	20200320	20200405	20200608	20200616	20200920	20200928	20201006	20201107				
115034	20200320	20200405	20200608	20200920	20200928	20201006	20201030	20201123				
115035	20200312	20200320	20200405	20200429	20200523	20200608	20200616	20200904	20200904	20200920	20201006	20201030
115036	20200312	20200320	20200405	20200421	20200429	20200608	20200904	20200920	20201006	20201030		
115037	20200320	20200405	20200429	20200507	20200608	20200904	20201006	20201014	20201030			
116033	20200311	20200404	20200506	20200530	20200615	20200919	20200927	20201005	20201029	20201114	20201130	
116034	20200311	20200404	20200428	20200506	20200927	20201005	20201029	20201114	20201130			
116035	20200311	20200319	20200404	20200428	20200506	20200927	20201114					
116036	20200311	20200404	20200428	20200506	20200927	20201005	20201005	20201114				
117034	20200302	20200403	20200427	20200513	20200606	20200622	20200918	20200926	20201020	20201028		

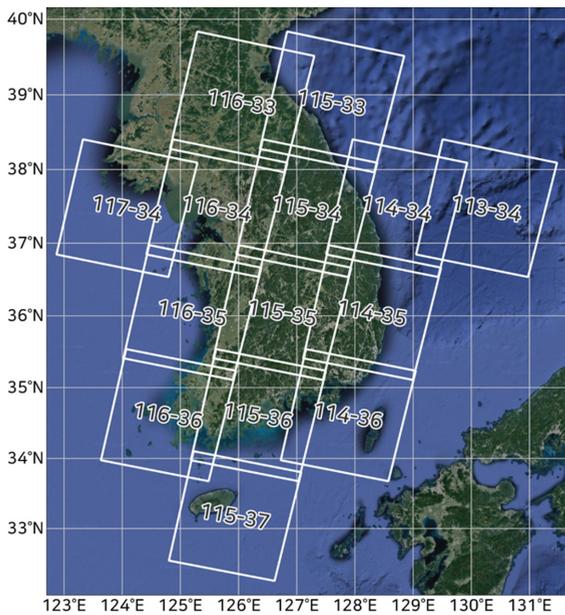


Fig. S1. The map of range of Landsat data used in this study.

Tier 1 자료를 이용하여 기상 방해요인인 구름과 강수의 영향이 적은 봄과 가을철에 촬영된 영상 중 전체 화소 중 윤량이 10% 미만인 영상을 선정하였다. 본 연구는 위성 영상 분석 시 발생할 수 있는 영상의 오차를 최소화하고자 Landsat 위성영상의 전처리 과정으로 QA (Quality Assurance) 보정, TOA (Top Of Atmosphere) 보정, 좌표계 보정, SLC (Scan Line Corrector) 보정을 진행하였다(Fig. S2).

본 연구는 전처리가 완료된 Landsat 위성영상을 이용하여 식생 활력도를 나타내는 인자인 NDVI, EVI, NDII를 산출하여 산림 탄소 저장량 산정 모델의 독립

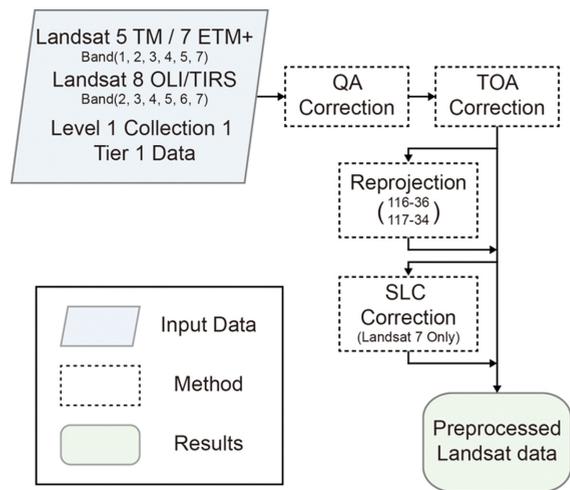


Fig. S2. Schematic diagram of Landsat preprocessing.

립 변수로 활용하였다. Landsat 위성영상을 활용한 각 지수의 계산 방법은 Table 1과 같다. 산출된 각 지수는 계절 변동성을 최소화하여 데이터 품질을 향상시키고자 MVC (Maximum-Value Composite, 최댓값 합성) 기법을 적용하여 연중 지수의 최댓값을 산출하였다. 산출된 각 지수의 최댓값은 토지피복지도의 산림 지역과 중첩분석을 시행하여 산림지에 대한 각 지수 값을 추출하였다.

2.1.2 SRTM DEM 자료

본 연구는 식생 성장과 밀접한 연관이 있는 지형인자인 SRTM의 DEM (Digital Elevation Models; 수치표고 모형) 원격 탐사 자료를 산림 탄소 저장량 산정 모델의 독립변수로 활용하였다. SRTM DEM은 우리나라 전 국토에 해당하는 124.0~132.0°E, 33.0~39.0°N

Table 1. Formula of Landsat indices used in this study

Satellite	NDVI	EVI	NDII
Formula	$\frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$	$2.5 \times \frac{(NIR - Rdd)}{(NIR + 6 \times Red - 7.5 \times Blue + 1)}$	$\frac{(NIR - SWIR1)}{(NIR + SWIR1)}$
Landsat 5, 7	$\frac{(Band4 - Band3)}{(Band4 + Band3)}$	$2.5 \times \frac{(Band4 - Band3)}{(Band4 + 6 \times Band3 - 7.5 \times Band1 + 1)}$	$\frac{(Band4 - Band5)}{(Band4 + Band5)}$
Landsat 8	$\frac{(Band5 - Band4)}{(Band5 + Band4)}$	$2.5 \times \frac{(Band5 - Band4)}{(Band5 + 6 \times Band4 - 7.5 \times Band2 + 1)}$	$\frac{(Band5 - Band6)}{(Band5 + Band6)}$

의 자료를 활용하였다. SRTM DEM은 세계 지구 좌표 시스템 좌표계인 WGS 84 (EPSG: 4326)의 경위도 좌표계로 구성되어 1 아크 초(1 arc second=0.00028°=30 m)의 공간해상도를 갖는다. DEM 자료는 원활한 분석을 위해 Landsat 좌표계와 같은 좌표계인 WGS 84/UTM zone 52N (EPSG: 32652) 좌표계로 최근접 이웃 보간법(Nearest neighbor interpolation)을 적용하여 30 m 공간해상도 자료로 변환되었다. 본 연구는 좌표계가 변환된 DEM 자료를 활용하여 모델의 독립 변수로 활용되는 고도(Elevation), 향(Aspect), 경사(Slope) 값을 계산하였다. 계산된 각 지형인자 값은 토지피복지도의 산림지역과 중첩분석을 시행하여 산림지에 대한 각 지형인자 값을 추출하였다.

2.1.3 국가산림자원조사자료(NFI) 및 수치임상도

본 연구는 현장 조사 자료인 NFI (National Forest Inventory, 국가산림자원조사 자료)를 산림 탄소 저장량 산정 모델의 종속변수로 활용하였다. 국가산림자원조사는 대한민국 산림청에서 국가 산림자원 기본통계를 확보하려는 목적으로 전국 산림에 대해 5년 주기로 시행하며, 1972년부터 제1차 전국산림자원조사로 시행된 이후 2006년 시행된 5차 조사부터 국가산림자원조사로 명칭이 변경되어 IPCC Guideline이 권장하는 국제 조사 기준에 따라 시행되고 있다. 산림청은 국가산림자원조사를 위해 전국의 산림에 4 km 격자 간격으로 약 4,000여 개의 고정된 표본점을 설치하였다. 각 표본점은 1년에 약 800개씩 조사되며, 설치된 모든 표본점은 5년 주기로 식생 조사 등 산림에 관한 전반적인 조사가 진행된다(Korea Forest Service, 2017). 본 연구는 가장 최신 자료인 2020년 NFI 자료의 임목축적을 산림 탄소 저장량 산정 모델의 종속변수로 활용하였다. NFI 자료는 조사 표본점에 대한 정확한 위치정보를 제공되지 않아 위치정보 제공 최소 단위인 읍·면·동 행정구역 단위로 임목축적을 평균하여 사용하였다.

수치임상도는 임상, 임령 등 산림 식생에 대한 각종 정보가 담긴 지도이다(Korea Forest Service, 2023).

본 연구는 산림 바이오매스 탄소 저장량 환산식에 임상별 국가 고유 계수를 적용하고자 1:25000 축적의 수치 임상도를 활용하여 산림지역의 임상을 침엽수림, 활엽수림, 혼효림으로 구분하였다. 접경지역 등 수치 임상도에 포함되지 않아 임상을 알 수 없는 지역의 산림은 전부 혼효림으로 가정하였다.

2.1.4 토지피복지도

본 연구는 산림의 공간 분포 판단을 위해 토지피복 지도를 자체적으로 제작하여 활용하였다. 토지피복지도 제작에는 전처리가 진행된 Landsat 7 ETM+ 영상의 1, 2, 3, 4, 5, 7번 Band와 Landsat 8 OLI/TIRS 영상의 2, 3, 4, 5, 6, 7번 Band에 감독분류 기법을 이용하였다. 토지피복은 다섯 가지(산림지, 농경지, 도시지역, 나지, 수역)로 분류된다. 제작된 토지피복지도는 환경부 대분류 토지피복지도의 정확도 검증 방법에 따라 검증한 결과 97.4%의 전체 정확도를 보였다(Ministry of Government Legislation, 2021). 본 연구는 토지피복지도 중 산림지로 분류된 지역을 추출하여 분석에 활용하였다.

2.2 모델 구축 방법

본 연구의 산림 탄소 저장량 산정 모델은 Random Forest를 이용하여 임목축적의 공간분포를 산정한 후, 임목축적에 산림 바이오매스 탄소 저장량 환산식을 적용하여 산림 탄소 저장량을 계산하는 과정을 포함한다(Fig. 1).

Random Forest 모델은 종속변수인 읍·면·동 행정구역 단위의 NFI 조사구 임목축적 평균값과 독립변수인 Landsat 지수(NDVI, EVI, NDII) 및 SRTM 지형인자(Elevation, Slope, Aspect) 평균값 간의 관계를 학습하여 임목축적 공간분포를 산정하는 모델이다. 본 연구는 Random Forest 모델의 학습 시 학습 자료와 검증 자료를 8:2로 랜덤하게 배분하였고, 모델의 성능 향상을 위해 RMSE (Root Mean Square Error, 평균 제곱근 오차)가 가장 적게 발생하는 최적 매개변수를 찾아 하이퍼파라미터 튜닝을 진행하였다. 본 연구에

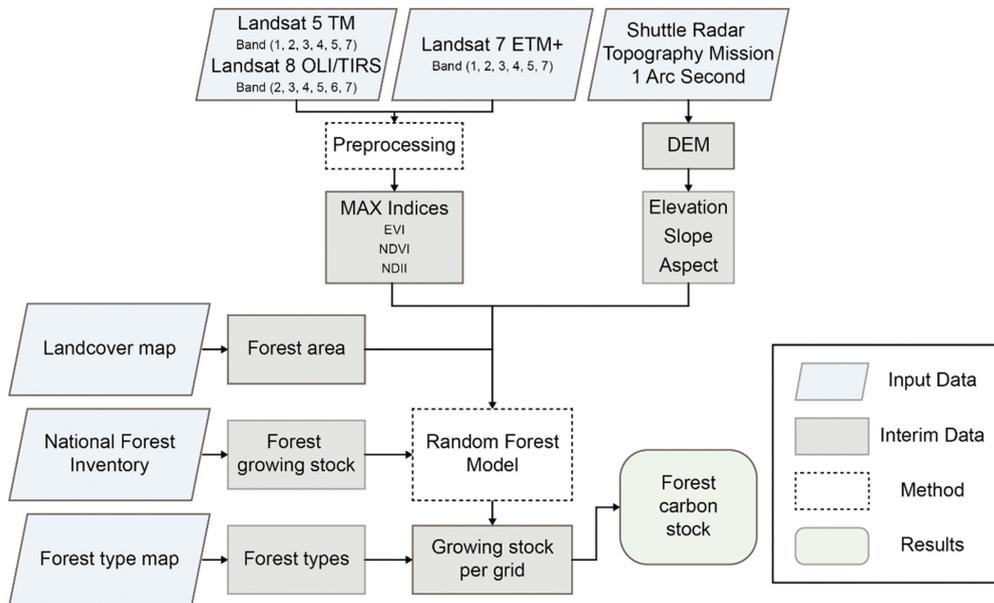


Fig. 1. Schematic diagram of forest carbon stock estimating model.

Table 2. Carbon emission factors by forest types in South Korea from National Institute of Forest Science

Forest types	Density of wood (D), Unit = t d. m./m ³	Biomass expansion factor (BEF), Unitless	Root-shoot ratio (R), Unitless	Carbon fraction (CF), Unit = t C/t d. m.
Coniferous	0.460	1.430	0.270	0.510
Broadleaf	0.680	1.510	0.360	0.480
Mixed	0.570	1.470	0.315	0.495

서 구축한 Random Forest 모델의 임목축적 공간분포 산정식은 다음과 같다.

$$S_i = \beta_1 NDVI_i + \beta_2 EVI_i + \beta_3 NDII_i + \beta_4 El_i + \beta_5 Sl_i + \beta_6 As_i + \varepsilon$$

S = 임목축적(m³)

$NDVI$ = Normalized Difference Vegetation Index

(정규화 식생 지수, 범위: 0~1)

EVI = Enhanced Vegetation Index

(향상된 식생 지수, 범위 0~)

$NDII$ = Normalized Difference Infrared Index

(정규화 적외선 지수, 범위 0~1)

El = Elevation(표고)

Sl = Slope(경사, 범위: 0~90)

As = Aspect(향, 범위: 0~360)

β = 모델 계수

ε = 오차

i = 지점 i

본 연구는 학습이 완료된 Random Forest 모델에 Landsat 지수(NDVI, EVI, NDII) 및 SRTM 지형인자(Elevation, Slope, Aspect) 데이터를 입력하여 산림지역의 임목축적 공간분포를 산정하였다.

산림 탄소 저장량의 공간분포는 Random Forest 모델로 산정된 임목축적 공간분포에 산림 바이오매스 탄소 저장량 환산식을 적용하여 계산된다. 본 연구는 산림 바이오매스 탄소 저장량 환산식에 임상(침엽수림, 활엽수림, 혼효림)별 국가 고유 계수(Table 2)를 활용하였다(Korea Forest Research Institute, 2007, 2010). 산림 바이오매스 탄소 저장량 환산식은 다음과 같다.

$$C_i = S_i \times D_j \times BEF_{S_j} \times (1 + R_j) \times CF_j$$

C = 산림 바이오매스 탄소 저장량 (Forest biomass carbon stock)(tC)

S = 임목축적(Growing stock)(m³)

D = 목재기본밀도(Density of wood)(t d.m./m³)

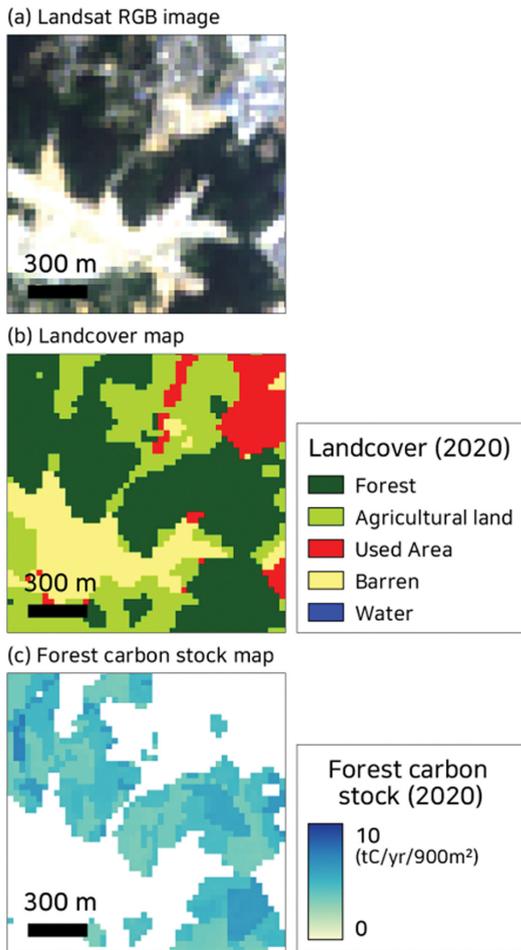


Fig. 2. Comparison example of spatial distribution of (a) 2020 Landsat RGB image, (b) 2020 Landcover map, (c) 2020 Forest carbon stock map estimated by this study.

$BEFs$ = 바이오매스 확장계수(Biomass expansion factor)

R = 뿌리-지상부 비율(Root-shoot ratio)

CF = 탄소전환계수(Carbon fraction)(tC/t d.m.)

j = 지점 i 의 임상 유형(Forest types)

(침엽수림, 활엽수림, 혼효림)

i = 지점 i

본 연구는 독립변수로 Landsat 위성영상을 활용하여 연구의 결과물인 토지피복지도, 임목축적 지도 및 산림 탄소 저장량 지도 모두 30 m 공간해상도를 갖는다(Fig. 2).

2.3 모델의 성능 검증

본 연구는 산림 탄소 저장량 산정 모델의 성능 검증을 진행하였다. 본 연구는 모델의 종속변수(임목축

적)와 독립변수(원격탐사자료)를 8:2로 랜덤하게 배분한 훈련 및 검증 자료 각각에 대해 성능평가 지표로 주로 활용되는 통계인 RMSE를 산출하여 모델의 성능을 검증하였다.

RMSE의 단위는 모델의 종속변수로 활용된 임목축적 단위인 m^3 으로 나타난다. 본 연구에서 활용한 RMSE 산출식은 다음과 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}$$

\hat{y} = 모델의 예측값

y = 실제 값

모델의 RMSE 산출 결과, 훈련 자료의 RMSE는 3.809, 검증 자료의 RMSE는 4.493으로 훈련과 검증 자료 간 RMSE 차이는 약 5%로 나타나 모델의 신뢰도는 높은 것으로 판단된다.

3. 연구 결과

3.1 임목축적 및 산림 탄소 저장량 산정

본 연구는 산림 탄소 저장량 산정 모델을 활용하여 2020년 전국 산림지역의 임목축적 지도 및 산림 탄소 저장량 지도를 제작하였다(Fig. 3). 임목축적 지도는 격자($900 m^2$) 당 임목축적(m^3)을, 산림 탄소 저장량 지도는 격자($900 m^2$) 당 산림 탄소 저장량(tC)을 나타낸다. 모델을 활용하여 산정한 2020년 전국의 임목축적은 $811,604,692 m^3$ 이며, 산림 탄소 저장량은 $432,214,520 tC$ 이다.

본 연구는 광역자치단체 단위 산림 탄소 저장량을 산정하기 위해 대한민국 광역자치단체 행정구역과 임목축적 지도 및 산림 탄소 저장량 지도의 중첩 분석을 수행하였다. 광역자치단체 중 강원도 및 경상북도는 타 광역자치단체에 대비해 넓은 산림면적인 $1,454,221 ha$ (21%), $1,475,235 ha$ (22%)로 산정되었다. 임목축적은 두 지역에서 각 $186,342,063 m^3$ (23%), $176,037,546 m^3$ (22%)로, 산림 탄소 저장량은 각 $101,987,778 tC$ (24%), $92,247,290 tC$ (21%)로 산정되어 광역자치단체 중 가장 많은 임목축적과 산림 탄소 저장량을 가진 것으로 나타났다. 반면, 서울특별시와 광주광역시도 타 광역자치단체에 대비해 좁은 산림면적인 $18,185 ha$ (0.27%), $19,145 ha$ (0.28%)로 산정되었다. 임목축적은 두 지역에서 각 $2,001,661 m^3$ (0.25%), $2,105,867 m^3$ (0.26%), 산림 탄소 저장량은 각 $1,169,051 tC$ (0.27%), $1,043,481 tC$ (0.24%)로 산정되어 다른 광역자치단체에 비해 적은 임목축적과 산림 탄소 저장량을 보유한 것으로 나타났다. 산림면적이 넓은 광역자치단체는 전반적으로 임목축적과 산림 탄소 저장량을 많이 보유하고 있는 것

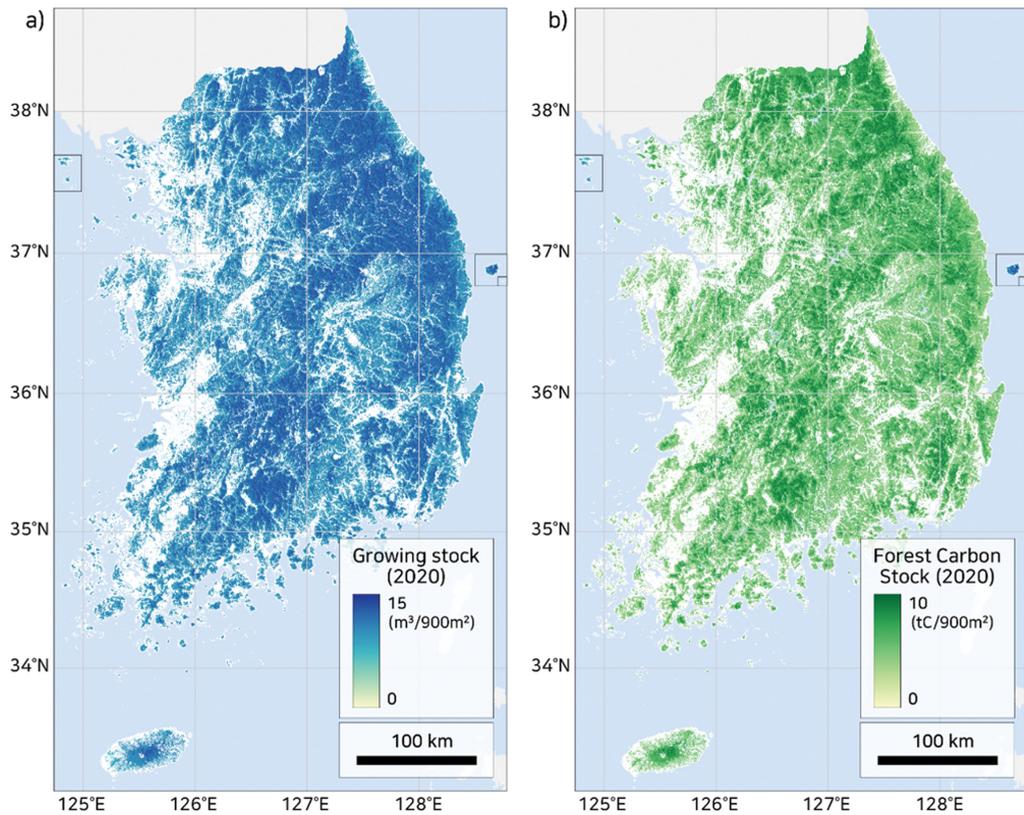


Fig. 3. The maps of (a) growing stock and (b) forest carbon stock in 2020 generated by this study.

Table 3. Estimated growing stock, forest carbon stock, forest area and forest carbon storage efficiency in units of regional governments

Region	Growing stock (m ³)	Forest carbon stock (tC)	Forest area (ha)	Forest carbon storage efficiency (tC/ha)
Seoul	2,001,661	1,169,051	18,185	64.28
Busan	4,342,684	2,292,706	38,712	59.22
Daegu	6,136,812	3,159,826	52,912	59.72
Incheon	4,198,223	2,363,472	39,793	59.39
Gwangju	2,105,867	1,043,481	19,145	54.50
Daejeon	3,568,367	1,883,179	32,175	58.53
Ulsan	8,473,833	4,619,193	74,456	62.04
Sejong	2,780,824	1,547,526	26,181	59.11
Gyeonggi-do	63,158,870	34,698,413	560,204	61.94
Gangwon-do	186,342,063	101,987,778	1,454,221	70.13
Chungcheongbuk-do	64,347,903	34,388,133	539,978	63.68
Chungcheongnam-do	47,221,547	24,848,729	432,561	57.45
Jeollabuk-do	56,091,622	30,009,506	465,060	64.53
Jeollanam-do	81,764,920	41,661,484	727,279	57.28
Gyeongsangbuk-do	176,037,546	92,247,290	1,475,235	62.53
Gyeongsangnam-do	92,063,934	48,161,538	874,192	61.42
Jeju	10,968,016	6,133,215	96,798	63.36
Total	811,604,692	432,214,520	6,837,088	63.22

Table 4. Estimated growing stock and forest area in this study and the statistical yearbook of forestry in units of regional governments

Region	Growing stock in this study (m ³)	Forest area in this study (ha)	Growing stock in Forest Service (m ³)	Forest area in Forest Service (ha)
Seoul	2,001,661	18,185	2,282,684	15,323
Busan	4,342,684	38,712	6,268,223	34,926
Daegu	6,136,812	52,912	8,745,821	48,338
Incheon	4,198,223	39,793	5,705,792	39,373
Gwangju	2,105,867	19,145	2,806,238	18,944
Daejeon	3,568,367	32,175	5,006,992	29,764
Ulsan	8,473,833	74,456	11,401,826	68,001
Sejong	2,780,824	26,181	3,839,903	24,849
Gyeonggi-do	63,158,870	560,204	81,057,717	512,105
Gangwon-do	186,342,063	1,454,221	250,792,917	1,366,644
Chungcheongbuk-do	64,347,903	539,978	78,091,550	488,337
Chungcheongnam-do	47,221,547	432,561	59,154,844	404,097
Jeollabuk-do	56,091,622	465,060	71,494,501	440,746
Jeollanam-do	81,764,920	727,279	88,048,613	686,852
Gyeongsangbuk-do	176,037,546	1,475,235	228,240,999	1,333,691
Gyeongsangnam-do	92,063,934	874,192	124,449,446	698,810
Jeju	10,968,016	96,798	13,059,207	87,334
Total	811,604,692	6,837,088	1,040,447,273	6,298,134

으로 나타났다(Table 3).

그런데, 단위면적당 산림 탄소 저장량은 산림면적과 산림탄소 저장량의 관계와 서로 다르게 나타나 광역자치단체별 산림 탄소 저장 효율을 살펴보고자 하였다. 산림 탄소 저장량이 많은 강원도와 경상북도는 산림 탄소 저장 효율에 큰 차이 있는 것으로 나타났다. 강원도는 산림 탄소 저장 효율이 전국 광역자치단체 중 가장 높은 70.13 tC/ha로 나타난 반면, 경상북도는 산림 탄소 저장 효율이 전국의 산림 탄소 저장 효율인 63.22 tC/ha 보다 낮은 62.53 tC/ha로 산정되었다. 경상북도는 산림 면적이 넓은 것에 대비해 산림 탄소 저장량은 적어 산림 탄소 저장 효율이 낮게 나타났다. 여기서 한가지 흥미로운 점은 서울특별시는 산림 면적은 작지만, 산림 탄소 저장 효율이 전국에서 3번째로 높은 64.28 tC/ha로 나타났다(Table 3). 이와 같이 지역에 따라 산림 탄소 저장 효율에 차이가 발생하는 것은 지역의 산림 식생 구성 및 식생 활력의 차이와 지형 등 자연 환경의 영향으로 인한 것으로 추정된다.

3.2 임업통계연보와의 비교

산림청은 매년 임업통계연보를 발간하여 광역자치단체 단위의 산림면적 및 임목축적 정보를 제공하고 있다. 따라서, 본 연구는 2020년 임업통계연보 자료와 본 연구 결과의 산림면적 및 임목축적을 비교하였다. 2020년 임업통계연보의 전국 산림면적과 임목축적은

각 62,981 ha와 1,040,447,273 m³으로 본 연구결과에 대비하여 산림면적은 약 5,390 ha(8%) 적고 임목축적은 약 228,842,581 m³(28%) 많은 것으로 나타났다(Table 4).

임업통계연보와 본 연구결과를 광역자치단체 단위로 비교한 결과, 인천광역시와 광주광역시는 산림면적이 가장 차이가 적은 것으로 나타났다. 두 지역의 산림면적 차이는 각 4 ha(1%), 2 ha(1%)로 본 연구결과가 조금 더 높게 산출되었지만, 임목축적의 차이는 두 지역에서 각 1,507,569 m³(36%), 700,371 m³(33%)만큼 임업통계연보에서 더 많은 것으로 나타났다. 전라북도는 임목축적의 차이가 가장 적게 나타난 지역으로 6,283,693 m³(8%)만큼 임업통계연보에서 더 많은 것으로 나타났지만, 산림면적은 404 ha(6%)만큼 본 연구결과가 높게 산정하였다(Table 4).

본 연구는 산림면적의 산정 시 위성 자료를 기반으로 산림지역을 판단하였다. 이에 따라 본 연구 결과는 산림 외 녹지 및 도시공원 등의 식생 면적이 포함되어 임업통계연보의 산림면적보다 높게 나타나는 것으로 추정된다. 반면, 본 연구의 임목축적은 임업통계연보의 임목축적보다 적게 산정되었다. 이는 NFI 임목축적 활용 방법의 차이로 인해 발생하는 것으로 추정된다.

3.3 상세 지역 사례 연구

기존 LULUCF 부문 온실가스 인벤토리는 최소 광

Table 5. Estimated Forest carbon stock in units of City County in Seoul and Dong of administration in Gwanak-gu

City County	Forest carbon stock (tC)	Dong of administration in Gwanak-gu	Forest carbon stock (tC)
Jongno-gu	142,919	Bongcheon-dong	30,402
Jung-gu	17,817	Sillim-dong	126,642
Yongsan-gu	25,184	Namhyeon-dong	35,204
Seongdong-gu	12,197	Total	192,248
Gwangjin-gu	35,849		
Dongdaemun-gu	13,427		
Jungnang-gu	51,420		
Seongbuk-gu	102,626		
Gangbuk-gu	177,699		
Dobong-gu	123,664		
Nowon-gu	186,405		
Eunpyeong-gu	183,257		
Seodaemun-gu	63,602		
Mapo-gu	32,231		
Yangcheon-gu	36,982		
Guro-gu	42,088		
Geumcheon-gu	31,776		
Yeongdeungpo-gu	9,239		
Dongjak-gu	41,338		
Gwanak-gu	192,248		
Seocho-gu	250,566		
Gangnam-gu	101,999		
Songpa-gu	39,933		
Gangdong-gu	45,213		
Gangseo-gu	41,982		
Total	2,001,661		

Table S2. Forest fire damage area according to forest type

Forest types	Donghae (ha, %)	Uljin (ha, %)
Coniferous forest	2,877.48 (56%)	11,390.58 (58%)
Broadleaf forest	211.95 (4%)	971.28 (5%)
Mixed forest	2,019.87 (40%)	7,365.42 (47%)
Total	5,109.3 (100%)	19,727.28 (100%)

역차치단체 단위로 제공되어 시·군·구 및 읍·면·동 행정구역 단위의 인벤토리는 알 수 없다. 반면, 본 연구는 격자 단위로 산림 탄소 저장량 공간 분포를 판단하여 상세 행정구역 단위의 산림 탄소 저장량을 계산할 수 있다. 따라서, 본 연구는 산림 탄소 저장량 산정 모델을 활용한 사례 연구로 서울특별시 구 단위 및 관악구의 법정동을 대상으로 산림 탄소 저장량을 산정하였다.

분석 결과, 서울특별시의 산림 탄소 저장량 2,001,661 tC 중 관악구는 192,248 tC(10.41%)를 차지하는 것으로 나타났으며, 관악구의 법정동인 봉천동, 신림동, 남현동의 산림 탄소 저장량은 각각 30,402 tC(16%),

126,642 tC(66%), 35,204(18%)을 차지하는 것으로 나타났다(Table 5).

3.4 산불 사례 연구

본 연구는 산림 탄소 저장량 산정 모델 이용한 사례 연구로 2022년 동해-울진 산불로 발생한 산림 탄소 수지 변화량을 분석하였다. 동해-울진 산불은 국내에서는 이례적인 대규모의 산불로 2022년 3월 4일에서 2022년 3월 13일까지 동해 및 울진지역에서 발생하였다. FIRMS (Fire Information for Resource Management System)의 자료(NASA, 2023)와 Sentinel-2 위성영상을 분석한 결과, 산불로 인한 산림 소실 면적은 동해지

역 5,109 ha, 울진지역 19,726 ha로 총 24,835 ha로 추산된다(Table S2).

본 연구는 2020년의 산림 탄소 저장량 모델 결과 자료를 산불 피해 지역과 중첩하여 산림 탄소 저장량의 소실량을 산정하였다. 산불 피해 지역은 산불로 인해 산림 탄소 저장량이 모두 소실된 것으로 가정하였다. 분석 결과, 산림 탄소 저장량의 소실량은 동해지역 284,221 tC, 울진지역 1,112,246 tC로 총 1,396,457 tC로 산정되었다(Table 6). 각 지역의 산림 탄소 저장량의 소실량은 산불 피해 면적과 비례하며(Table S2), 산불 피해 면적당 산림 탄소 저장량의 소실량은 동해, 울진지역 모두 약 56 tC/ha로 산정되었다.

산불에 의한 피해는 수치임상도의 임상 분포에 따

라 서로 다르게 나타났다. 2022년 동해-울진 산불 피해지역은 전체 면적 24,835 ha 중 침엽수림이 14,268 ha(57%), 활엽수림이 1,183 ha(5%), 혼효림이 9,384 ha(38%)를 차지하며(Table S2) 두 지역 모두 침엽수림이 우세한 지역에서 산불이 발생하였다(Fig. 4). 반면, 산림 탄소 저장량의 소실량은 침엽수림 682,857 tC(49%), 활엽수림 107,192 tC(8%), 혼효림 606,408 tC(43%)로 산정되었다(Table 6). 이에 따라 임상별 산불 피해 면적당 산림 탄소 저장량의 소실량은 침엽수림 48.86 tC/ha, 활엽수림 90.59 tC/ha, 혼효림 64.62 tC/ha로 나타났다. 산림의 임상별 탄소 저장 효율은 침엽수림 대비 활엽수림이 뛰어나 산불에 의한 산림 탄소 저장량의 피해에도 영향을 주는 것으로 보인다.

Table 6. Comparison of forest biomass carbon stock by forest types in wildfire area by this study

Wildfire area	Coniferous forest, Unit = tC (%)	Deciduous forest, Unit = tC (%)	Mixed forest, Unit = tC (%)	Row sum, Unit = tC (%)
Donghae	134,995 (47%)	17,593 (6%)	131,623 (46%)	284,211 (100%)
Uljin	547,862 (49%)	89,599 (8%)	474,785 (43%)	1,112,246 (100%)
Total	682,857 (49%)	107,192 (8%)	606,408 (43%)	1,396,457 (100%)

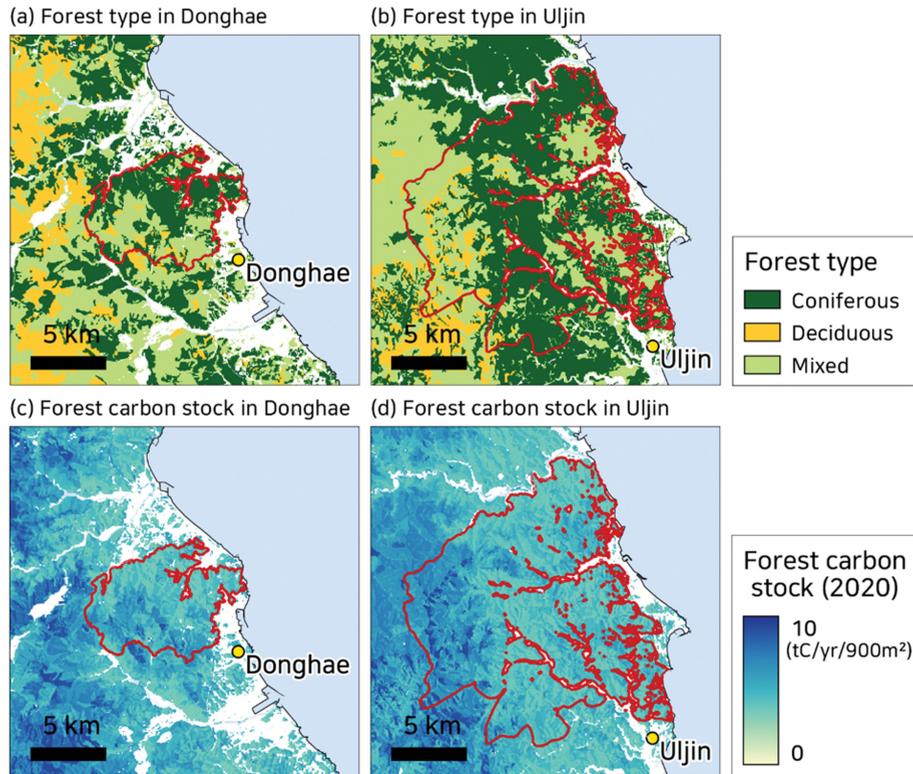


Fig. 4. The maps of (a) Forest type map with wildfire area in Donghae, (b) Forest type map with wildfire area in Uljin, (c) 2020 Forest carbon stock map with wildfire area in Donghae, (d) 2020 Forest carbon stock map with wildfire area in Uljin.

4. 결론 및 논의

산림은 중요한 탄소 흡수원으로 온실가스 감축에 중요한 역할을 담당하여 산림의 변화를 정확하게 파악하는 것은 탄소 저감 정책 수립에 있어서 중요한 기초 자료가 된다. 그러나 우리나라의 현행 LULUCF 부문 온실가스 인벤토리는 광역자치단체 행정구역 단위로 제공하기에 국소 규모의 산림 탄소 저장량의 변화는 파악하기 어렵다. 본 연구는 기존 방법의 한계점을 극복하고자 고해상도 위성자료를 활용하여 정확도 높은 토지피복지도를 구축하고, 기계학습 기법을 이용하여 산림 탄소 저장량의 공간분포를 산정하는 모델을 개발하였다.

본 연구로 개발된 산림 탄소 저장량 추정 모델은 상세한 탄소공간정보를 제공하여 다양한 분야의 공간 지리정보와 중첩 분석이 가능한 장점이 있다. 이를 통해 임상 구분, 산림 식생 성장, 산림 면적 등의 변화를 매년 반영할 수 있고, 기존 통계적 방법으로 산출할 수 없는 시·군·구 및 읍·면·동 등 국소지역 행정구역 단위의 산림 탄소 저장량의 산정이 가능하다. 궁극적으로 본 연구 결과는 산림 경영뿐만 아니라, 도시계획 및 탄소 저감 정책 설계시에도 정보 활용이 가능하여 탄소 중립 달성을 위한 효율적인 지역단위 탄소 흡수량 관리에 기여할 수 있을 것으로 여겨진다.

본 연구에서 개발한 모델은 기존 인벤토리 기반의 산림 탄소 흡수량 자료보다 상세한 공간정보를 제공한다. 장점은 있지만 아직 개선의 여지가 남아있다. 예를 들어 모델의 종속변수로 활용된 NFI 임목축적은 산림청에서 조사구의 정확한 위·경도 좌표를 제공하지 않아 최소 배포 단위인 읍·면·동 행정구역 단위로 평균하여 연구를 진행할 수밖에 없었다. 본 연구는 조사구의 임목축적 값을 평균하여 사용하여 산림 탄소 저장량 산정결과에 오차가 발생할 가능성이 높을 것으로 여겨진다. 그리고, 본 연구에서 추정된 산림 탄소 저장량은 산림 토양 및 고사 유기물에 흡수되는 탄소량은 포함하지 않기에 실제 산림 바이오매스에 의한 탄소 흡수량에 비해 과소 추정될 여지가 존재한다. 이러한 모델의 한계점은 후속 연구를 통해 개선되어지면 좋을 것이다. 이에 더하여 Sentinel-2 등 Landsat 보다 더 좋은 공간해상도를 갖는 위성영상을 본 모델에 활용하여 고해상도로 향상된 결과 자료를 산출할 수 있게 된다면 더욱 세밀한 산림 탄소 저장량을 추정할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심사위원께 감사를 드립니다. 본 연구는 국

토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(과제번호 23UMRG-B158194-04)으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Dixon, R. K., A. M. Solomon, S. Brown, R. A. Houghton, M. C. Trexler, and J. Wisniewski, 1994: Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, **263**, 185-190, doi:10.1126/science.263.5144.185.
- Eggleston, H., L. Buendia, K. Miwa T. Ngara, and K. Tanabe, 2006: 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.
- Friedlingstein, P., and Coauthors, 2020: Global carbon budget 2020. *Earth Syst. Sci. Data.*, **12**, 3269-3340, doi:10.5194/essd-12-3269-2020.
- Gallaun, H., G. Zanchi, G.-J. Nabuurs, G. Hengeveld, M. Schardt, and P. J. Verkerk, 2010: EU-wide maps of growing stock and above-ground biomass in forests based on remote sensing and field measurements. *Forest ecology and management*, **260**, 252-261, doi:10.1016/j.foreco.2009.10.011.
- Harris, N. L., and Coauthors, 2021: Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nature Climate Change*, **11**, 234-240, doi:10.1038/s41558-020-00976-6.
- Jung, J., H. Nguyen, J. Heo, K.-M. Kim, and J. Im, 2014: Estimation of aboveground forest biomass carbon stock by satellite remote sensing - A Comparison between k-nearest neighbor and regression tree analysis -. *Korean Journal of Remote Sensing*, **30**, 651-664, doi:10.7780/kjrs.2014.30.5.10.
- Lee, J.-H., J.-H. Im, K.-M. Kim, and J. Heo, 2015: Change analysis of aboveground forest carbon stocks according to the land cover change using multi-temporal landsat TM images and machine learning algorithms. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, **18**, 81-99, doi:10.11108/kagis.2015.18.4.081.
- Olivier, J., K. Schure, and J. Peters, 2017: Trends in global CO₂ and total greenhouse gas emissions. *PBL Netherlands Environmental Assessment Agency*, **5**, 1-11.
- Sim, W., J. Park, and J. Lee, 2017: A study on the utilization plan of national geospatial information for land use change matrix. *Journal of Forest Economics*, **24**, 41-50.
- Yu, S. C., J. W. Ahn, and J. A. Ok, 2015: A study on construction plan of the statistics for national greenhouse gas inventory (LULUCF Sector). *Journal of Korea Spatial Information Society*, **23**, 67-77.
- GIR (Greenhouse Gas Inventory & Research Center of

- Korea). *National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea*.
- IPCC, 2006: *IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*.
- Korea Forest Resarch Institute, 2007: *Survey Manual for Forest Biomass and Soil Carbon*.
- Korea Forest Resarch Institute, 2010: *Forest Biomass Assessment in Korea*.
- Korea Forest Servise, 2017: *The 7th National Forest Inventory and Forest Health Monitoring Guidebook*.
- UNFCCC, 1997: *Kyoto Protocol*.
- FGIS, 2023: *Korea Forest Servise*. Forest Geospatial Information System. [Available online at https://www.for-est.go.kr/newkfsweb/html/HtmlPage.do?pg=/fgis/UI_KFS_5002_020100.html&mn=KFS_02_04_03_04_01&orgId=fgis] (in Korean).
- Ministry of Government Legislation, 2021: *Guidelines for preparing land cover maps*.—[Available online at <https://www.law.go.kr/%ED%96%89%EC%A0%95%EA%B7%9C%EC%B9%99/%ED%86%A0%EC%A7%80%ED%94%BC%EB%B3%B5%EC%A7%80%EB%8F%84%EC%9E%91%EC%84%B1%EC%A7%80%EC%B9%A8>] (in Korean).
- NASA, 2023: *Fire Information for Resource Management System*. [Available online at <https://firms.modaps.eos-dis.nasa.gov/map/#d:24hrs;@0.0,0.0,3z>].
- NOAA, 2023. *Global Monitering Laboratory*. [Available online at <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>].