

기초지자체의 공간기반 탄소흡수원관리를 위한 마을단위 산림탄소흡수지도 개발

고영진* · 송철호** · 정유정*** · 홍민아**** · 김준** · 이우균*****†

*고려대학교 환경생태공학과 박사과정 학생, **고려대학교 오정리질리언스연구원 연구교수

고려대학교 오정리질리언스연구원 석사후연구원, *국립산림과학원 산림탄소연구센터 박사후연구원, *****고려대학교 환경생태공학부 교수

Development of village-level forest carbon sink map for spatial carbon sink management of the local government

Ko, Youngjin* · Song, Cholho** · Jeong, Yujeong*** · Hong, Mina**** · Kim, Joon** and Lee, Woo-Kyun*****†

*Ph.D. Student, Dept. of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

**Research professor, OJong Resilience Institute (OJERI), Korea University, Seoul, Korea

***Master's Degree Researcher, OJong Resilience Institute (OJERI), Korea University, Seoul, Korea

****Ph. D. Researcher, Forest Carbon Center on Climate Change, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea

*****Professor, Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

ABSTRACT

Forests play a crucial role in carbon neutrality by acting as significant carbon sinks. To meet these targets, local governments must establish comprehensive carbon neutrality strategies that incorporate forest management. Appropriate spatio-temporal information is essential for implementing effective forest management systems at the local level. In this study, we developed a carbon sink map designed to support carbon neutrality efforts using a dynamic forest growth model to assist with local-level decision-making. The input data had a spatial resolution of 100 meters, which is informative for identifying detailed forest characteristics. These high-resolution data allow improved representation of forest areas and the specific species that are present. We found that South Korean forests sequestered approximately 41.5 million tons of carbon in 2020. These carbon sequestration data were divided considering the local forest areas, ensuring precise allocation of carbon sink capacities. We verified our results using national statistics obtained from the Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea (GIR). We proposed the need for support tailored to regional carbon sink characteristics on urban areas, suburbs, and forest villages. Especially, our results indicate that areas including or adjacent to the Baekdudaegan Mountain range absorb significant amounts of carbon. Many of these high carbon absorption areas correspond with regions experiencing population decline. This finding emphasizes the necessity for targeted carbon sink incentive systems in population-decreasing areas. Our study emphasizes the practicality and applicability of 100-meter spatio-temporal modeling for generating carbon sink maps to assist in local government decision-making processes. Such maps provide critical insights for the formulation and implementation of carbon-neutral strategies.

Key words : 100 m Spatial Resolution, Carbon Sink Map, Carbon Neutrality, Local Government

†Corresponding author : leewk@korea.ac.kr (145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul, 02841, Korea. Tel. +82-2-3290-3470) ORCID 고영진 0000-0002-9345-3214 홍민아 0000-0001-9177-309X
송철호 0000-0002-8491-9545 김준 0000-0001-8741-2523
정유정 0009-0001-4462-0266 이우균 0000-0002-2188-359X

Received: July 11, 2024 / Revised: September 3, 2024 1st, October 21, 2024 2nd / Accepted: December 6, 2024

1. 서론

국제사회는 다양한 분야의 온실가스 감축을 중요한 의제로 삼고 있다. 특히, 흡수원 부문에서 산림을 포함한 토지의 지속가능한 유지와 관리를 강조하고 있으며, 산림의 효과적 관리 없이는 탄소중립 달성에 한계가 있음을 언급하였다. 특히, 시공간정보 기반의 산림경영관리체계로의 전환을 통한 효과적 산림경영률 파악과 NDC 달성 및 탄소중립 기여를 위한 필요성이 대두되고 있다(Lee et al., 2021). 우리나라는 2030 국가 온실가스 감축목표(Nationally Determind Contribution, NDC) 상향안과 2050 탄소중립 선언에 흡수원 부문을 포함하여 온실가스 감축 정책 및 이행 강화를 위해 노력하고 있다(CNGGC, 2023). 특히, 산림은 자연기반의 해법으로 비용 대비 효과적이며, 부작용 없이 효과를 지속할 수 있는 탄소흡수원으로 인정받아 그 역할이 강조되고 있다(KFS, 2023c).

탄소흡수원은 「탄소흡수원법」 제2조에 따라 탄소를 흡수하고 저장하는 입목, 죽, 고사유기물, 토양, 목제품 및 산림바이오매스 에너지로 정의하고 있으며, 국제사회는 산림경영, 신규조림, 재조림, 목제품 활용, 산림바이오매스 에너지 이용, 개도국 산지전용 및 산림황폐화 방지를 산림탄소흡수원 증진 활동으로 인정하고 있다(KFS, 2023c). 산림청은 탄소흡수원 관리 및 증진을 위해서 다양한 법체계를 정비하고, 2019년부터 국공사유림의 통합을 위해 중앙정부부터 산주까지 이어지는 연결고리와 소유를 넘어선 통합계획을 수립하고 있다(KREI, 2022). 특히, 「산림기본법」 제11조는 산림기본계획 수립 및 시행 시 산림정책협의회의 의견 수렴을 포함하고 있으며, 「산림기본법 시행령」 제9조는 산림데이터베이스를 체계적으로 관리하기 위한 정보시스템 구축 및 운영의 필요성을 포함하고 있다. 또한, 「탄소흡수원법」 제8조에서는 산림경영 활동과 관련된 모든 시간적·공간적 이력정보에 대한 정보체계 구축 및 운영을 포함하는 등 체계적인 산림사업이력정보의 수집과 정책협의회 및 정보시스템 구축 운영 지원을 언급하고 있다. 이러한 법령 체계에서 볼 때, 중앙 정부부터 지방 정부까지 기후변화와 관련된 산림 정보의 생산과 이에 기반한 탄소흡수원 관리가 활발히 논의되고 있는 시점이다.

그러나 탄소흡수원 관리 및 증진과 대응하여 개정된 법체계가 원활히 안착하기 위해서는 여러 한계점이 있다. 우리나라 산림은 사유림이 약 66%를 차지하고 있으나, 개인 산주의 이해 및 설득 또는 경제적 손실에 대한 보상 등

의 이슈 해결이 필요함에도 필지 단위의 사유림에 대한 정확한 정보 체계는 부족한 상태이다(KFS, 2023a). 또한, 2023년 시도 기준 우리나라 산림경영계획이 수립된 비율은 28.4%에 그치는 실정이다(KFS, 2023b).

우리나라는 국가 수준의 산림기본계획과 지역 수준의 지역산림기본계획을 법적으로 수립 및 이행하도록 하고 있다. 하지만 실제 사업의 실행단계인 공사유림을 위한 산림경영계획은 유연성을 부여하여 운영되고 있으며, 기초지자체 그리고 공사유림 지원을 위한 상세한 정보의 공간자료는 구축이 되어있지 않은 상태이다(KREI, 2022; Lee, 2023; Lee et al., 2021). 현재 국가 및 광역 차원에서 공간자료의 구축이 이루어져 수요자의 요청에 대응하는 것과는 달리 지역 및 마을 단위의 정보를 제공하는 것에 한계가 있다. 따라서, 고해상도의 공간자료에 기반한 시군 산림계획을 수립하여 법정 계획과 연계시킬 뿐만 아니라 체계적이고 계획적인 산림관리를 통해 온실가스 흡수량을 증진하고 생태적 기능을 안정적으로 유지해야 할 시점이다.

한편, 우리나라에서는 산림경영, 온실가스 흡수량에 대한 적절한 평가를 위해 다양한 방법이 활용되고 있다(NIFoS, 2021). 하지만 이는 광역 지자체 단위로 평가되고 있기 때문에 지역 및 마을 수준의 산림경영과 탄소흡수량을 산정하는 것에 한계가 있다. 국가 온실가스 인벤토리에서 활용되는 방식은 국가산림자원조사(National Forest Inventory, NFI)와 산림기본통계 기반의 임업통계연보에 기초하고 있으며, 이는 4km² 격자 단위로 설치된 고정표본점에 기반하므로 리와 같은 작은 행정구역에서 활용하기에는 다소 어려움이 존재한다. 한편, 기존 연구인 산림탄소경영모델은 산림상태와 산림경영의 장기성을 고려하여 목재 및 산림바이오매스 자원의 이용으로 순흡수량 및 탄소저장을 증대시키는 경영모델이지만, 국가단위의 공간적 분석이 아닌 시계열 분석에 초점을 맞추고 있어 지역 수준에서 의사결정자의 활용에 제한이 있을 수 있다(NIFoS, 2021). 또한, 공간분석이 용이한 KO-G-Dynamics 모델의 경우 산림경영에 따른 탄소흡수량에 대한 시공간 예측이 가능하여 국가 또는 광역 차원의 의사결정 지원을 할 수 있다는 장점이 있으나, 1 km² 격자 단위로 분석하여 국가 기후변화 적응 계획 단위에만 활용될 수 있어, 실제 임업 현장인 지역 및 마을 단위를 나타낼 수 있는 행정구역에서의 활용이 어려운 실정이다. 따라서, 지역 수준에 적합한 공간 범위에서의 모형 구동을 통해 동리 대상에서 활용가능한 산림관리 방안을 마련할 필요가 있다.

따라서, 본 연구에서는 실제 사업에서 산림경영의 최소 단위인 임소반의 최소면적을 고려하여 1 ha 단위로 공간 자료를 구축하고, 이를 활용한 동리의 탄소흡수지도 제작을 목표로 한다. 특히, 1 ha 및 동리 단위로 제작된 탄소흡수지도를 기반으로 시군단위 산림경영계획 수립 및 행정 체계 지원과 연계된 활용 방안을 파악해 본다. 이를 통해 본 연구는 기초지자체 탄소중립계획 수립시 활용될 수 있는 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 연구 범위 및 방법

2.1. 연구 대상지

우리나라는 행정구역상 226개의 시군구, 3,532개의 읍면동, 37,723개의 리를 포함한다(MOIS, 2022). 이에 본 연구에서는 동리 단위를 기준으로 소나무, 일본잎갈나무, 잣나무, 신갈나무, 굴참나무 등의 주요수종과 혼효림 2종을 대상으로 하였다(Fig. 1).

2.2. 연구 방법 및 재료

본 연구는 산림동적성장모형(KO-G-Dynamics)을 활용하여 임분의 재적량 및 탄소흡수량을 파악하였으며, 국토지리정보원에서 제공하는 읍면동 및 리 단위의 지도를 활용하여 각 행정구역의 탄소흡수량을 확인하였다(Fig. 2). KO-G-Dynamics 모형은 한국의 환경적 및 생태적 특성에 온대림의 성장을 정확하게 예측할 수 있다. 흉고직경(DBH)과 고사(Mortality)에 기후의 영향을 고려하여 기후변화에 따른 미래 성장 예측의 불확실성을 줄일 수 있으며, 산림관리 여부에 따른 영향을 반영하여 미래 산림생장과 산림자원의 변화를 예측하여 최적 산림관리계획 수립을 지원할 수 있다(Hong et al., 2023). 모형에 활용된 입력자료는 임상도, 산림입지토양도, 보호구역도, 유역도, DEM의 지형 데이터와 RCP 8.5 기후시나리오 데이터 및 NFI가 활용되었다. 본 연구에서는 RCP 8.5 시나리오를 활용하여 미래 기후변화의 시공간적 특성을 분석하고자 하였다. 남한상세 및 동아시아에 대한 NetCDF 형태의 2011 ~ 2100년 연별 RCP 8.5 기후시나리오를 획득하였으

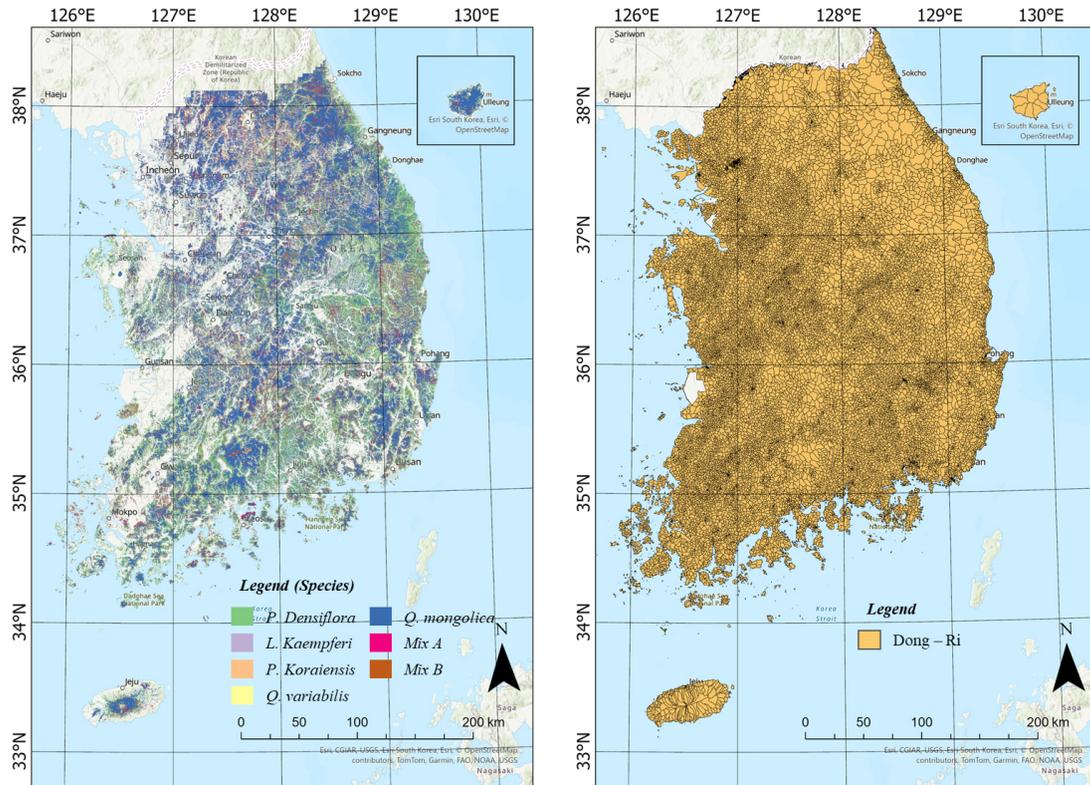


Fig. 1. Study area (forest cover map and Dong-Li boundary)

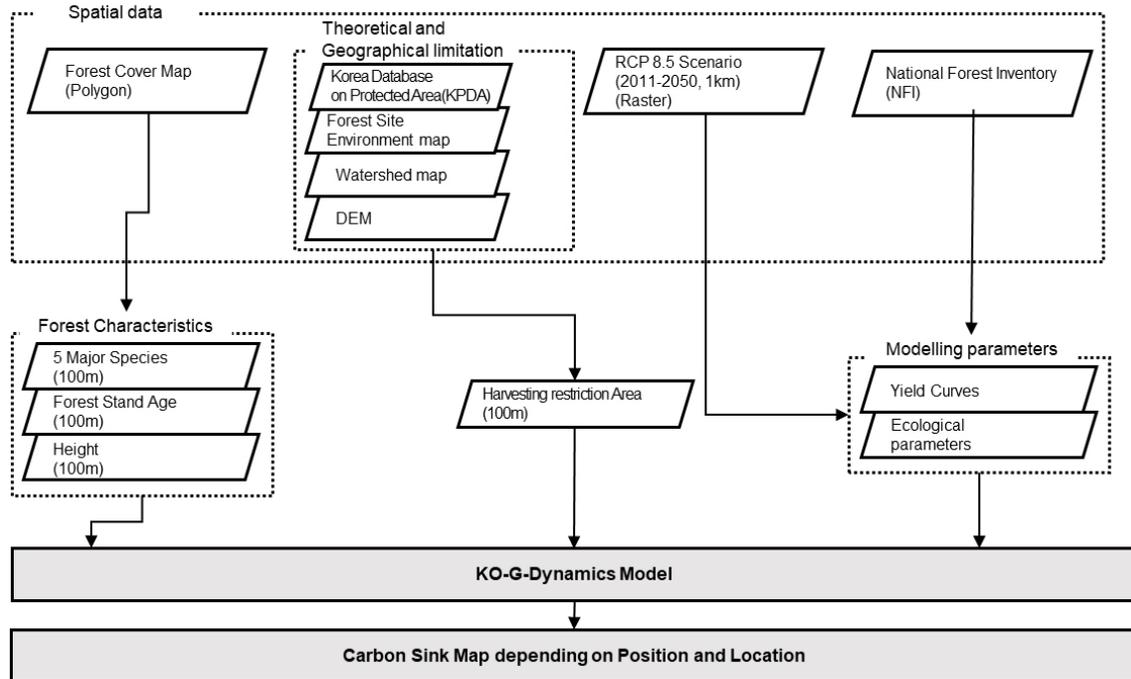


Fig. 2. Flowchart for preparing carbon sink map

Table 1. Input data for estimation of carbon sequestration

Classification	Species	Contents
Forest Cover Map (FCM)		Species, Age Class, Height
Forest Site Environment Map		Topography (Hill top, Hillside, Foot of mountain)
Protection area (KPDA)		Seperation of protected area
Watershed map		Within 30m from riverside
DEM		Steep slope
RCP 8.5		Forest growth considering climate change

며, ArcGIS 툴을 활용하여 각 연도별로 분할하고 2011년 ~ 2050년까지의 산림에 따른 탄소흡수량을 파악하였다. 또한, 기상청에서 제공하는 데이터의 좌표를 Raster project 기법을 활용하여 EPSG: 5186으로 변환하여 사용하였다. 산림 및 지형 데이터는 1ha, RCP 8.5 기후시나리오 오는 1 km² 격자크기를 모형의 입력자료로 활용하였다. 본 연구에서는 기존에 개발된 수종별 성장계수를 활용하였다(Table 1)(Kim et al., 2019; Kim, Lee, Choi, et al., 2017; Kim, Lee, Son, et al., 2017; Piao et al., 2018). 특히, 본 연구에서는 Hong et al. (2023)에서 사용한 제6차 산림기본계획에 따른 적극적 산림관리 수준을 적용하여 모형을 구동하였다.

2.2.1. 1ha 단위 산림공간자료 구축

본 연구에서는 임상도를 활용하여 탄소흡수량에 영향을 미치는 인자를 도출하고, 우리나라 산림의 공간적 분포와 특성을 파악하기 위한 위치 기반 자료로 활용하였다. 임상도는 산림의 공간분포를 나타내는 주제도로 항공사진을 판독하여 임상, 주요수종, 경급, 영급, 소밀도 등 다양한 속성정보를 포함하고 있으며, 각종 산림계획 수립과 의사결정을 위한 자료로 활용되고 있다. 임상도의 경우 폴리곤 형태의 데이터로 제공되고 있지만, 연산을 위해 레스터 형태의 자료로 변환하였다. 자료 변환시 셀에 가장 많이 포함된 폴리곤의 값을 할당하는 Maximum area를 사용하여 레스터 형태의 임상도를 제작하였다. 본 연

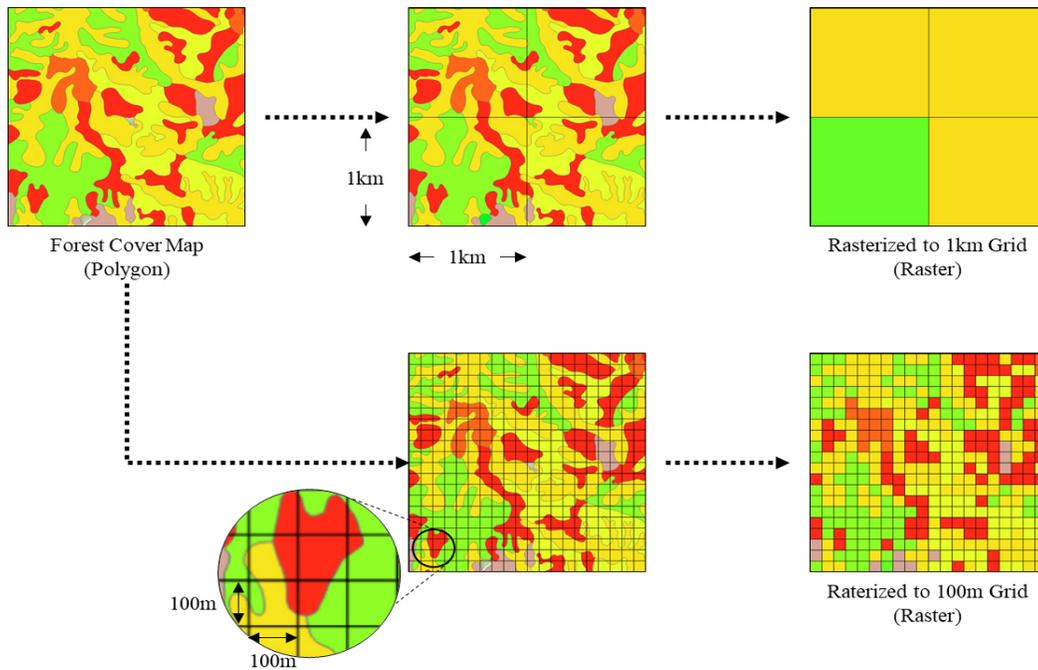


Fig. 3. A comparison of spatial resolution in 1 km² and 1 ha (example)

구는 임상도를 활용하되 죽림과 미립목지를 제외하여 1 ha 공간해상도로 변형하였을 때 산림의 면적은 약 565만 ha로 나타났다. 특히, 우리나라 평균입분의 크기는 2 ha ~ 3 ha이며, 사유림의 약 85%가 3 ha 미만으로 평균 면적은 1.9 ha로 보고됨에 따라 본 연구에서는 산림의 특성과 우리나라 산림 소유규모 등을 고려하여 산림과 관련된 모든 지형 데이터 즉, 임상도의 수종, 영급, 수고와 수치지형도 등의 위치 정보를 1 ha 크기의 격자 즉, 1 ha 공간해상도 데이터로 변환하였다(Fig. 3). 한편, RCP 8.5 기후시나리오의 경우 기상청에서 제공하고 있는 1 km² 데이터를 활용하여 KO-G-Dynamics 모형을 구동하였으며, 본 연구에서는 2020년의 결과를 포함시켰다(Kim et al., 2010).

2.2.2. 1ha 및 동리 단위 탄소흡수지도 제작

기존 KO-G-Dynamics 모형을 활용한 연구에서는 주로 탄소흡수량 변화 파악과 NDC달성 방안, 리스크 평가 등에 대한 연구가 수행된 바 있다(Hong et al., 2022, 2023; Kim et al., 2019; Kim, Lee, Choi, et al., 2017; Kim, Lee, Son, et al., 2017; Piao et al., 2018). 이에 본 연구에서는 1ha 단위로 개선된 산림공간정보를 활용하여 KO-G-Dynamics 모형을 구동하였다. 모형은 기존 임상도로부터 기후의 영향을 고려한 산림생장 정보를 산출하며,

최종적으로는 입목 축적과 이산화탄소 저장 및 흡수량을 식 (1)과 같이 추정할 수 있다(Table 2)(NIFoS, 2014). 탄소흡수지도는 1 ha 단위로 구동된 모델링 결과의 공간 좌표를 바탕으로 시군구의 공간 범위 내의 값을 공간적으로 통계를 내어 활용하였다. 이를 통해 시군구 탄소흡수지도를 제작하여 우리나라의 탄소흡수량의 행정구역별 공간적인 분포를 확인하였다.

$$tCO_2 = V_{i,t} \times WD_i \times BEF_i \times (1 + R_i) \times CF \times 44/12 \quad (1)$$

tCO₂ : CO₂ Sequestration *V_i* : Volume of tree species; (m³/ha)
WD_i : Wood Density of tree species; (td·m/m³)
BEF_i : Biomass Emission Factors of tree species;
R_i : Root ratio of tree species; *CF* : Conversion Factor (tC/td·m·)

t : Tree age 44/12 : Stoichiometric ratio of CO₂ and C

2.2.3. 기초지자체 수준 온실가스 인벤토리 통계 비교 및 검증

본 연구의 결과값과 비교 및 검증을 하기 위해 일차적으로 국가 온실가스 인벤토리 보고서(National Inventory Report, NIR)의 LULUCF (Land Use and Land Use Change and Forestry) 분야 내 산림지에 대한 탄소흡수량

Table 2. Carbon absorption factor for each species (Sohn et al., 2014)

Species	Pd	Lk	Pk	Qm	Qv
Wood density (WD)	0.472	0.453	0.408	0.663	0.721
Biomass expansion factor (BEF)	1.413	1.335	1.812	1.603	1.338
Root ratio (R)	0.254	0.291	0.283	0.388	0.324
Conversion factor (CF)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Pd : *Pinus densiflora*, Lk : *Larix kaempferi*,
 Pk : *Pinus koraiensis*, Qm : *Quercus mongolica*,
 Qv : *Quercus variabilis*

과 비교하여 총 탄소흡수량을 검증하였다. 또한, 시군구 단위의 비교 및 검증을 위해 ha단위로 구동된 모델링 결과의 공간 좌표를 바탕으로 시군구의 공간 범위 내의 값을 공간적으로 통계를 내어 활용하였다. 해당 시군구 탄소흡수지도는 온실가스종합정보센터에서 제공하고 있는 기초지자체 수준 지역 온실가스 인벤토리 LULUCF의 산림지 부분과 비교하였으며, 모형의 정확도를 검증하기 위해 산점도를 활용하여 인벤토리에서 제공하고 있는 226개 시군구의 산림지 탄소흡수량과 모형의 결과값을 검증하였다(GIR, 2022). 또한, 탄소흡수량을 기준으로 분위수 기반 분류를 사용하여 하위 33%, 중간 33%, 상위 33%로 나누어 구분하였다.

3. 결과

3.1. 1ha 단위 산림공간자료 구축

본 연구에서는 선행연구에 따라 100 m 공간해상도를 활용하여 산림의 환경 및 특성을 반영하였다. 임상도, 1 km², 1 ha의 임상에 대한 면적을 비교한 결과 면적의 차이는 크지 않으나, 임상도를 1 km² 격자 변환시 약 6,853 ha, 1 ha 격자 변환시 약 121 ha의 손실이 발생한다(Fig. 4). 또한, 임상도의 폴리곤을 레스터로 변환시 1 ha 공간해상도의 경우 평균적으로 2~3개의 임분을 포함하여 격자 내 임분 구성을 단순화하여 하나의 레스터 값으로 표현이 가능하지만, 1 km² 공간해상도의 경우 평균적으로 40개의 임분을 하나의 레스터 값으로 표현하므로 정보손실이 크게 발생한다.

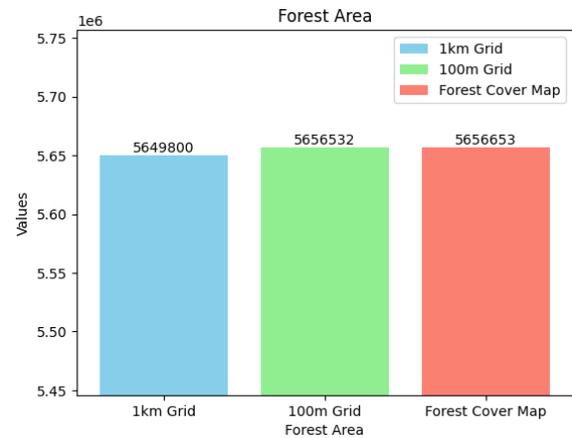


Fig. 4. Comparison of forest area between 1 km, 100 m, and forest cover map

3.2. 1ha 동리 단위 탄소흡수지도 제작

본 연구에서는 RCP 8.5 시나리오 데이터를 사용하여 2020년의 산림 특성을 반영한 모형 결과를 바탕으로 1ha 단위의 탄소흡수지도를 작성하였다(Fig. 5). 해당 1ha 단위 탄소흡수지도는 백두대간을 중심으로 탄소흡수량이

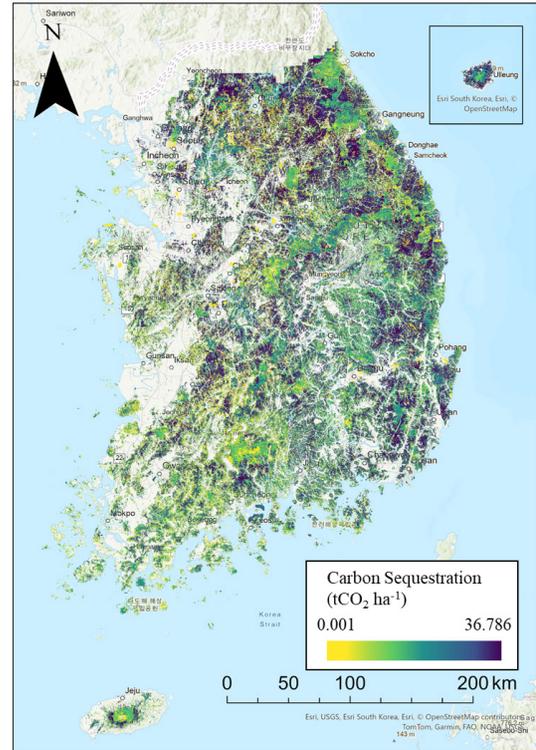


Fig. 5. Carbon Sink Map from model based on 1 ha

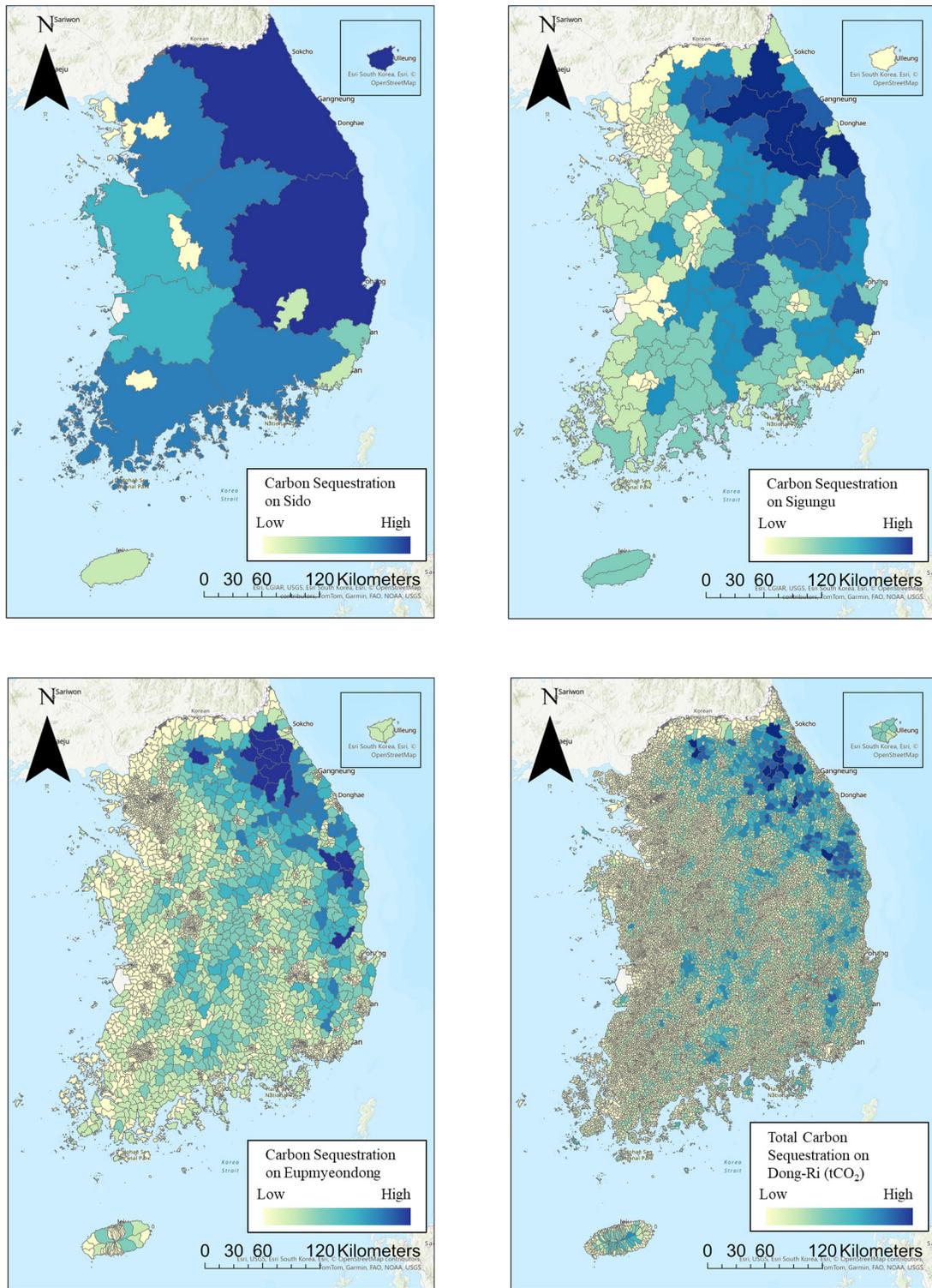


Fig. 6. Carbon sink map on Si·do, Si·Gun·Gu, Eup·Myeon·Dong, and Dong·Ri

높은 것으로 나타났다. 이를 시도, 시군구, 읍면, 동리 수준의 지도로 확인하였을 때 산림의 면적이 가장 많이 분포하고 있는 강원도와 경상북도의 경우 탄소흡수량이 높은 것으로 나타났다. 또한, 시군구, 읍면, 동리 수준의 지도를 파악하였을 때 1 ha 탄소흡수지도와 동일하게 백두대간 또는 그 인접한 지역의 탄소흡수량이 높은 것으로 나타났다. 해당 지도를 더욱 세분화된 행정구역별 지도를 제작하였으며, 이를 통해 동리 즉, 마을 단위의 탄소흡수량을 파악하였다(Fig. 6).

3.3. 기초지자체 수준 온실가스 인벤토리 통계 비교 및 검증

해당 모형을 통한 임목축적 및 탄소흡수량을 추정하였으며, 2020년 기준 우리나라 전체의 헥타당 임목축적은 155 m³/ha, 탄소흡수량은 약 4,150만 톤으로 나타났다. 모형결과 2030년과 2050년 탄소흡수량은 각각 약 3,573만

톤, 약 2,766만 톤으로 나타났다. 산림청은 산림기본통계의 발표주기가 5년임에 따라 2020년 통계 발표시 16-19년의 임상별 임목축적을 보정하여 발표하였다(GIR, 2022). 2020년 기준 우리나라 산림의 헥타당 임목축적은 165 m³/ha로 보고하고 있으며, 산림의 탄소흡수량은 4,052만 톤으로 나타났다(GIR, 2022; KFS, 2023c). 온실가스종합정보센터의 통계에 따르면 산림을 통한 이산화탄소 흡수량이 많은 10개 시군구는 아래와 같이 나타났다(Table 3). 해당 시군구의 흡수량과 모형 구동에 따른 흡수량의 결과를 비교하였을 경우 행정구역별 지도에서 확인할 수 있듯이 백두대간에 포함되거나 인접해있는 행정구역인 홍천, 평창, 울진 등의 탄소흡수량이 높은 것으로 나타났다(Choi et al., 2014; Kim et al., 2022).

또한, 모형의 정확도를 검증하기 위해 산점도를 활용하여 인벤토리에서 제공하고 있는 226개 시군구의 산림지 탄소흡수량과 모형의 결과값을 비교 및 검증하였다. 그 결과 0.89의 정확도를 보여 ha 및 시군구 단위의 탄소흡수량이 비교적 잘 추정이 된 것으로 판단할 수 있다(Fig. 7). 특히 A지역의 경우 도시 지역이 많이 포함되었으며, B지

Table 3. Forest Area and Carbon sequestration on Local government based on Statistics and Model (Top 10)

No	Si-Gun-Gu (Province)	Carbon sequestration (tCO ₂) (Inventory)	Carbon sequestration (tCO ₂) (This study)	Differences
1	Hongcheon-gun (Gangwon)	1,319,110	1,421,135	-102,025
2	Pyeongchang-gun (Gangwon)	1,135,790	1,133,294	2,496
3	Uljin-gun (Gyeongbuk)	1,054,320	761,678	292,642
4	Inje-gun (Gangwon)	1,043,000	1,199,157	-156,157
5	Yeongwol-gun (Gangwon)	989,822	957,037	32,785
6	Bonghwa-gun (Gyeongbuk)	900,194	757,393	142,801
7	Jeongseon-gun (Gangwon)	861,590	946,224	-84,634
8	Uiseong-gun (Gyeongbuk)	805,530	761,678	43,852
9	Samcheok-si (Gangwon)	694,908	883,700	-188,792
10	Gangneung-si (Gyeongbuk)	654,710	618,328	36,382

Table 4. Forest Area and Carbon sequestration on Dong-ri (Top 10)

No	Dong-ri (Province)	Forest area (ha)	Carbon Sequestration (tCO ₂)
1	Yongdae-ri (Gangwon)	17,351	125,941
2	Jindong-ri (Gangwon)	9,229	106,360
3	Jeongmok-ri (Gyeonggi)	6,244	93,600
4	Gwang-won-ri (Gangwon)	10,782	92,859
5	Sugam-ri (Gangwon)	5,658	90,769
6	Bangnae-ri (Gangwon)	6,389	89,425
7	Bangdong-ri (Gangwon)	8,795	88,819
8	Samsan-ri (Gyeonggi)	12,629	87,933
9	Yuljeon-ri (Gangwon)	6,409	87,739
10	Goseon-ri (Gyeongbuk)	8,982	84,032

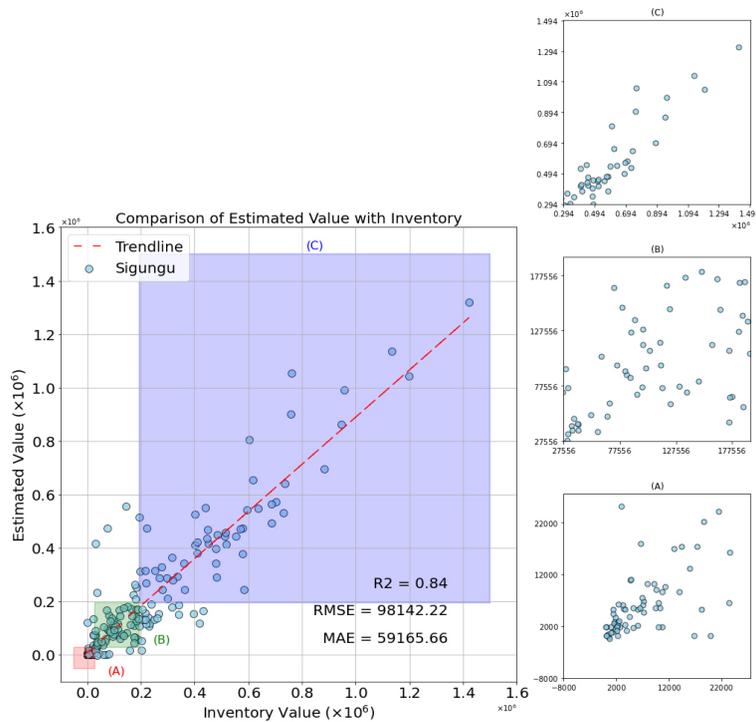


Fig. 7. Comparison of Value from Inventory and this study using Scatter plot

역은 교외 또는 농촌과 도시가 공존하는 지역으로 나타났다. 또한, C지역은 산림이 풍부한 지역에서 주로 나타났다 (Fig. 7).

특히, 가장 작은 행정구역인 동리 단위의 탄소흡수량을 파악한 결과, 강원도 인제군 북면 용대리와 기린면 진동리의 경우 탄소흡수량이 크게 나타났으며, 적목리, 광원리, 숙암리, 방내리, 방동리, 삼산리, 울전리, 고선리 순으로 나타났다. 해당 지역은 시군구의 결과와 마찬가지로 대부분 백두대간에 포함되거나 인접하고 있는 지역으로 나타났다(Table 4).

4. 고찰

본 연구에서는 1 ha 단위로 공간자료를 변환하였을 때, 1 km² 래스터 자료로 변환하였을 때보다 공간적인 자료의 손실이 적게 나타났다. 이는 산림사업에서 기준으로 삼는 1 ha 단위의 분석을 기후변화 및 온실가스 흡수량 파악에도 적용하는 것이 효과적일 수 있음을 시사한다. 또한, 산림재해, 수종분포 등 타 분야의 산림연구에서도 1 ha 단위 등의 고해상도 영역을 활용한 연구가 필요할 것으로 보인다. 이는 임상도의 손실을 최소화하면서 산림 내 다양한

현상을 고려한 산림의 상태를 예측할 수 있을 것이다. 특히, 소나무의 출현빈도 및 지형 간의 연구에서는 다양한 격자 크기를 활용하여 소나무의 출현빈도를 가장 잘 설명할 수 있는 공간해상도를 1 ha로 언급한 바 있으며, 1 ha 단위 변환이 1 km² 단위 분석 체계보다 유의미한 것으로 보인다(KFS, 2008). 임상도 폴리곤에서도 무립목지 등을 제외하였을 때, 면적이 565만 ha로 분석됨에 따라 1 ha 격자는 1 km² 격자보다 더욱 임상도에 대한 정보손실을 더욱 최소화할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 하지만, 폴리곤의 데이터를 래스터로 변환할 경우 1 ha의 고해상도로 설정을 하였지만 폴리곤을 래스터로 바꾸는 과정에서 발생하는 데이터의 손실과 도서지역에서의 정보손실 등은 여전히 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서, 폴리곤 형태의 임상도를 데이터 형태의 변환 과정없이 자체로 활용하여 임목축적 및 탄소흡수량을 산정할 수 있는 방안도 고려해 볼 수 있을 것이다. 이는 임상도에서 제공하고 있는 정보의 손실을 가장 최소화할 수 있는 방안으로 판단된다.

탄소흡수지도 제작에 따른 공간적인 분포로 볼 때, 탄소흡수량이 높은 시군구 및 동리를 파악한 결과, 백두대간 또는 인접한 지역이 다수 포함된 것으로 나타났다. 해당 지역의 경우 탄소중립마을에 대한 가능성을 지닌 지역

으로 볼 수 있을 것이며, 탄소흡수원의 효율적인 관리와 기후변화 대응 전략을 강화할 수 있을 것이다. 또한, 이를 활용하여 마을 내 산림자원과 탄소 배출활동을 조절할 수 있으며, 탄소중립 목표 달성에 기여할 수 있을 것이다. 특히, 해당 지역은 산촌으로 지정되어 있으며, 대부분이 인구감소지역으로 지정된 곳이기도 하다(Lee, 2023). 「산림기본법」에 따르면 산촌은 산림면적이 현저히 높고 인구밀도가 낮은 지역으로 정의하고 있다. 또한, 임야율 70% 이상, 경지율 21% 이하, 인구밀도 1.11 인/ha에 해당하는 지역이라고 언급하고 있다. 국립산림과학원은 우리나라 산촌의 미래를 위한 정성적 평가를 수행하였다(NIFoS, 2022). 해당 연구는 산촌의 인구감소 대응과 산촌 활성화는 국민들의 선호도와 문제 인식이 높다고 언급하였다. 또한, 이를 선제적으로 대응하기 위해 기존의 산촌활성화 지원 및 귀산촌 정책의 효과성 검토와 개선에 대한 필요성을 강조하였다(NIFoS, 2022). 따라서, 해당 산촌 지역의 면밀한 검토를 통해 탄소중립마을 등의 지정하면 산촌의 활성화를 도모할 수 있는 제도 또는 인센티브 마련이 가능할 것으로 보인다. 또한, 산촌이라는 지역공동체의 발전을 추구한다는 면에서 산림 탄소흡수원 관리를 농촌주택 에너지효율화사업, 환경 측면의 농업폐기물 수거사업 등의 감축계획과 연계시켜 시너지효과를 꾀할 수 있을 것으로 보인다(Lee, 2023).

본 연구는 1 ha 공간데이터를 활용하여 2021년부터 2050년까지의 기후변화에 따른 산림의 성장과 그에 따른 탄소흡수량을 파악하였다. 모형에 따른 결과와 제3차 탄소흡수원 증진 계획 비교시 2030년(3,200만 톤)의 경우 목표값보다 큰 것을 확인하였으나, 2050년(3,170만 톤)의 탄소흡수량은 작은 것으로 나타났다. 이는 본 모형의 경우 다양한 정책 시나리오를 모두 고려하지 않았다는 한계가 있으며, 추후 연구에서는 다양한 시나리오를 고려하여 더욱 정확한 예측이 필요할 것으로 보인다. 한편, 2020년 임목축적 및 탄소흡수량을 추정된 결과를 활용하여 탄소흡수지도를 작성하였을 때, 시군구 및 동리 단위로 세분화될수록 값에 대한 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 추정된 값과 실제 인벤토리 값의 비교시 R2: 0.84, RMSE: 98,142.22, MAE: 59,165.66으로 나타나 모델이 좋은 성능을 보였다. 하지만, 일부 영역에서 RMSE나 MAE를 줄이기 위한 방안 마련이 필요할 것으로 보인다. 이는 모형 구동시 국가 단위의 통계에 기반한 산림을 통한 전체 흡수량과 비교 검증은 한 것에 기인한다고 볼 수 있다. 전체 국가 차원에서의 흡수량에 대한 값은 유사할

수 있지만, 더욱 작은 단위로 갈수록 오차 발생이 더 많은 것으로 나타났다. 또한, 일부 자료가 제한되는 민통선 지역의 경우에 오차 값이 크게 나타나는데, 이는 추후 ha 단위의 자료 생성과 탄소흡수 지도의 고도화를 통해 개선될 수 있는 수준으로 판단된다. 특히, 토지이용의 변화 및 산림관리 등에 따른 시공간 데이터의 수집 및 반영을 통해 더욱 정확한 탄소흡수량이 예측될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 해당 모형의 결과는 지역별 탄소흡수량의 특성을 분류하여 각 지역에 맞는 정책을 수립 및 지원할 수 있을 것이다. A지역은 도시화가 많이 진행된 지역으로 산림의 면적이 낮아 탄소흡수량도 상대적으로 낮게 나타난 것으로 보이므로, 도심 내 녹지 확충과 같은 정책을 지원할 수 있을 것이다. 또한, B지역은 교외 또는 농촌과 도시가 혼재된 지역으로 탄소흡수량도 중간 정도를 나타냈으며, 도시화가 크게 진행되지 않은 곳으로 도시계획 시 기존 산림자원의 보존과 함께 균형을 이루어 개발이 가능할 것이다. 특히, C지역은 산림이 풍부한 지역으로 나타났으며, 탄소중립을 위한 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 보인다. 해당 지역은 탄소흡수원의 역할을 크게 하는 곳으로 지속가능한 임업과 산림 보호 등을 통해 탄소흡수 능력을 유지하는 것이 필요할 것이며, 이에 맞춘 정책 지원이 필요할 것이다.

본 연구에서 ha 단위로 구동한 KO-G-Dynamics에서는 우리나라의 주요 대표 수종인 소나무, 일본잎갈나무, 잣나무, 굴참나무, 신갈나무, 2종의 혼효림에 대한 산림의 성장을 활용하여 탄소흡수량을 산정하였다. 하지만, 최근 산림청에서는 기후위기에 대응하기 위해 기후대 및 지역의 특성에 맞는 수종의 개발 및 식재가 이루어지고 있으므로, 추후 이러한 정책적 및 환경적 특성을 고려한 수종의 성장식 개발 및 추가 등을 통해 다양한 산림 수종을 포함할 필요가 있다. 또한, 본 연구는 매년 변화되는 기후와 환경적 특성을 반영한 동적변화를 2020년에 대해서만 특정했다는 것에 한계가 있다. 따라서, 장기적인 미래 탄소흡수정책을 위해서는 연대별 경향성을 반영한 지도 구축이 필요하다. 특히, 기후시나리오를 활용함으로써 미래에 대한 탄소 예측을 통해 시군구 또는 동리 단위의 산림관리계획을 설정하여 탄소흡수에 대한 목표량을 수립하는 등 장기적인 관점에서의 탄소흡수원 관리가 가능할 것으로 보인다. 한편, 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」 제11조 및 제12조는 지자체 탄소중립 녹색성장 기본계획 수립을 위한 근거를 제시하고 있다. 지자체 탄소중립계획은 전환 및 산업, 건물, 수송, 농축산, 폐기

물, 흡수원을 포함하고 있으며, 연차별 온실가스 감축량, 연차별 사업량을 로드맵 형태로 제시하도록 하고 있다 (ME, 2022). 따라서, 해당 탄소흡수지도는 지자체 탄소중립계획 수립 시 연차별 계획수립에 활용 및 지원할 수 있을 것으로 보인다.

하지만 본 연구에서는 산림의 미래 동적변화에 따른 탄소흡수량을 예측하기 위하여 관측기상과 RCP 8.5 시나리오를 상호비교하여 적용하였으나, 보다 정밀한 산악기상 관측자료와 최근 제시된 공동사회경제경로(Shared Socioeconomic Pathways, SSPs)의 시나리오를 활용하여 산출하지 못했다는 한계가 있다(KMA, 2022). 따라서, 향후 산악기상과 함께 SSPs 시나리오 데이터를 활용하여 기후변화에 대한 영향과 함께 미래 인구, 토지 등 사회경제적인 요소를 고려한 최신 기후시나리오의 적용에 따른 기온과 강수 등의 편차로 인한 영향을 고려할 필요가 있다. 이를 통해 장기적인 예측과 탄소흡수지도가 세밀한 행정 구역 단위로 제시된다면, 보다 정밀한 산림사업 지원 및 탄소중립 달성 지원이 가능해 질 것이다.

5. 결론

본 연구는 1 ha 공간해상도의 산림생장모형을 이용하여 기초지자체(시군구) 및 동리 등 행정구역별 산림의 탄소흡수량을 추정하고, 탄소흡수지도를 제작하였으며, 국가 통계와 비교하였다. 이에 기존 1 km² 공간해상도에서 파악되던 산림 탄소 흡수 및 저장량에 대한 평가가 1 ha 단위에서도 가능함을 확인하였다. 탄소흡수량이 많은 동리의 경우 산촌 및 인구감소지역에 포함되며, 이를 개선하기 위해 탄소중립마을 등을 통한 산촌 및 인구감소지역의 활성화를 위한 방안을 제안하였다. 더 나아가, 본 연구는 기후변화 시나리오를 활용하여 장기 예측을 할 수 있다는 장점이 있으며, 이는 탄소 흡수량의 미래 예측을 통해 효율적인 탄소관리 전략 수립, 탄소 크레딧 및 거래를 위한 데이터 등으로 활용될 수 있을 것이다. 또한, 해당 결과는 과학 기반의 탄소흡수량 예측이라는 점에서 해당 자료를 산림 담당자에게 제공함으로써 담당자가 산림 관련 업무 시 관할 구역을 대상으로 체계적인 데이터를 활용하여 적극적인 산림행정이 가능하도록 지원하는 도구로 활용될 수 있음을 언급하였다. 따라서, 본 연구는 동리 단위의 탄소흡수지도를 제작하여 기초지자체의 탄소중립 계획 수립 시 참고자료로 활용될 수 있을 것이다.

사사

본 연구는 산림청 임업진흥원의 산림부문 탄소중립 추진기반 및 실증기술 연구(FTIS2022464A00-2324-0201), 국토교통부/국토교통과학기술진흥원(RS-2020-KA158194), 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 자율운영형 중점연구소 고려대학교 오정리질리언스연구원(NRF-2021R16A1A10045235), 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 생태계 기반 탄소흡수원 조성관리 기술개발사업(RS-2024-00218243)의 지원을 받아 수행되었습니다. 또한, 모델링 시스템을 지원한 고려대학교 오정리질리언스연구원 이지상 연구원에게 감사의 말을 전합니다.

Reference

- Choi HA, Lee WK, Jeon SW, Kim JS, Kwak HB, Kim MI, Kim JW, Kim JT. 2014. Quantifying climate change regulating service of forest ecosystem -Focus on quantifying carbon storage and sequestration- (in Korean with English abstract). *Clim Change Res* 5(1): 21-36. doi: 10.15531/KSCCR.2014.5.1.21
- CNGGC (Carbon Neutrality and Green Growth Commission). 2023. Carbon neutrality and green growth national strategy and 1st national master plan.
- GIR (Greenhouse Gas Inventory and Research Center). 2022. Local government level regional green house gas emission(2016-2020) announcement.
- Hong MA, Song CH, Kim MI, Kim JW, Lee SG, Lim CH, Cho KJ, Son YW, Lee WK. 2022. Application of integrated Korean forest growth dynamics model to meet NDC target by considering forest management scenarios and budget. *Carbon Balance Manag* 17(1): 5. doi: 10.1186/s13021-022-00208-8
- Hong MA, Song CH, Kim MI, Kim JW, Roh MW, Ko YJ, Cho KJ, Son YW, Jeon SW, Kraxner F, et al. 2023. Modeling-based risks assessment and management of climate change in South Korean forests. *Forests* 14(4): 745. doi: 10.3390/f14040745
- KFS (Korea Forest Service). 2008. Comprehensive cultivation and protection plan for pine forests.

- KFS (Korea Forest Service). 2023a. Current state of nationwide forest owner.
- KFS (Korea Forest Service). 2023b. Statistical yearbook of forestry.
- KFS (Korea Forest Service). 2023c. The 3rd comprehensive plan for the improvement of carbon sink.
- Kim GS, Kim AR, Lim BS, Seol JW, An JH, Lim CH, Joo SJ, Lee CS. 2022. Assessment of the carbon budget of local governments in South Korea. *Atmosphere* 13(2): 342. doi: 10.3390/atmos13020342
- Kim MI, Kraxner F, Son YH, Jeon SW, Shvidenko A, Schepaschenko D, Ham BY, Lim CH, Song CH, Hong MA, et al. 2019. Quantifying impacts of national-scale afforestation on carbon budgets in South Korea from 1961 to 2014. *Forests* 10(7): 579. doi: 10.3390/f10070579
- Kim MI, Lee WK, Choi GM, Song CH, Lim CH, Moon JY, Piao D, Kraxner F, Shvidenko A, Forsell N. 2017. Modeling stand-level mortality based on maximum stem number and seasonal temperature. *For Ecol Manag* 386: 37-50. doi: 10.1016/j.foreco.2016.12.001
- Kim MI, Lee WK, Son Y, Yoo SM, Choi GM, Chung DJ. 2017. Assessing the impacts of topographic and climatic factors on radial growth of major forest forming tree species of South Korea. *For Ecol Manag* 404: 269-279. doi: 10.1016/j.foreco.2017.08.048
- Kim SN, Lee WK, Shin KI, Kafatos M, Seo DJ, Kwak HB. 2010. Comparison of spatial interpolation techniques for predicting climate factors in Korea. *For Sci Technol* 6(2): 97-109. doi: 10.1080/21580103.2010.9671977
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2022. Manual on the use of climate change scenario data.
- KREI (Korea Rural Economic Institute). 2022. Strategies and tasks of cooperative forest policy in response to decentralization.
- Lee DG, Ryu YS, Lee WG, Hong SH. 2021. Measures to improve the forest sector institution to respond to the climate crisis and create a sustainable society. Seoul, Korea: National Assembly Forum on Climate Change.
- Lee WK. 2023. Climate smart forestry for climate neutrality era. Seongnam, Korea: The Korean Academy of Science and Technology.
- ME (Ministry of Environment). 2022. Local government carbon neutral implementation support resource book.
- MOIS (Ministry of the Interior and Safety). 2022. Administrative division and population of local government.
- National Institute of Forest Science. 2021. Effects and political application plan for forest carbon management model.
- National Institute of Forest Science. 2022. The future of Korea's forests, forestry, and mountain villages as seen by the public, foresters, and experts.
- Piao D, Kim MI, Choi GM, Moon JY, Yu HM, Lee WK, Wang SW, Jeon SW, Son YW, Son YM, et al. 2018. Development of an integrated DBH estimation model based on stand and climatic conditions. *Forests* 9(3): 155. doi: 10.3390/f9030155
- Sohn YM, Kim RH, Lee KH, Pyo JK, Kim SW, Hwang JS, Lee SJ, Park H. 2014. Carbon emission factors and biomass allometric equations by species in Korea. Seoul, Korea: Korea Forest Research Institute. Research Report 14-08.