

Original article

산림 사업에 의한 산림 식생 및 토양 탄소 변화

정현모 · 장인영 · 한상학 · 조소연 · 최철현 · 이연지 · 강성룡*

국립생태원 기후탄소연구팀

The Carbon Stock Change of Vegetation and Soil in the Forest Due to Forestry Projects. Heon Mo Jeong (0000-0003-4151-0659), Inyoung Jang (0000-0002-1779-6928), Sanghak Han (0000-0002-7792-0417), Soyeon Cho (0000-0002-2447-779X), Chul-Hyun Choi (0000-0002-3303-013X), Yeon Ji Lee (0009-0000-6238-5127) and Sung-Ryong Kang* (0000-0002-8728-0732) (Carbon and Climate Change Research Team, National Institute of Ecology, SeoCheon 33567, Republic of Korea)

Abstract To investigate the impact of forestry projects on the carbon stocks of forests, we estimated the carbon stock change of above-ground and soil before and after forestry projects using forest type maps, forestry project information, and soil information. First, we selected six map sheet with large areas and declining age class based on forest type map information. Then, we collected data such as forest type maps, growth coefficients, soil organic matter content, and soil bulk density of the estimated areas to calculate forest carbon storage. As a result, forest carbon stocks decreased by about 34.1~70.0% after forestry projects at all sites. In addition, compared to reference studies, domestic forest soils store less carbon than the above-ground, so it is judged that domestic forest soils have great potential to store more carbon and strategies to increase carbon storage are needed. It was estimated that the amount of carbon stored before forestry projects is about 1.5 times more than after forestry projects. The study estimated that it takes about 27 years for forests to recover to their pre-thinning carbon stocks following forestry projects. Since it takes a long time for forests to recover to their original carbon stocks once their carbon stocks are reduced by physical damage, it is necessary to plan to preserve them as much as possible, especially for highly conservative forests, so that they can maintain their carbon storage function.

Key words: above-ground, soil, carbon storage, forest thinning, reforestation

서 론

전 지구적 지구온난화에 의한 기후변화 심각성이 증가됨에 따라 지구온난화에 원인이 되는 온실가스(CO₂, CH₄, N₂O 등)의 배출과 흡수에 대한 관심이 증가되고 있다.

2012~2021년 동안의 전 지구적 탄소순환에서 화석 연료 사용 및 토지이용 변화로 인한 대기 중 탄소 배출량은 연간 약 10.8 GtC yr⁻¹이었으며 이 중 5.2 GtC yr⁻¹의 탄소가 대기 중에 체류하였다(Friedlingstein *et al.*, 2022). 또한 토양과 식생에는 각각 1,700, 450 GtC의 탄소가 저장되어 있고 연간 3.1 ± 0.6 GtC yr⁻¹의 탄소가 육상 생태계로 흡수되고 있다(Friedlingstein *et al.*, 2022). 이처럼 육상 생태계는 대기 중 탄소를 흡수 및 저장하고 토양호흡을 통해 방출함

Manuscript received 4 October 2023, revised 2 December 2023, revision accepted 4 December 2023

* Corresponding author: Tel: +82-41-950-5491, Fax: +82-41-950-6119
E-mail: srkang@nie.re.kr

© The Korean Society of Limnology. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provide the original work is properly cited.

으로써 전 지구적 탄소순환에서 중요한 역할을 수행한다.

전 세계는 지구온난화에 의한 기후변화 영향을 감소시키기 위해 생태계의 탄소 거동(배출/흡수)·저장량 산정 및 국가온실가스 인벤토리 구축, 온실가스 산정 방법 고도화 등의 노력들을 이어가고 있다. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)에서는 온실가스 산정을 위한 가이드라인(IPCC, 2006, 2019)을 공표하여 국가 통계의 정확성과 투명성을 제고하고 정책활용도를 향상하도록 하였다. 또한 온실가스 산정 방법을 3단계(Tier1~3)로 제시하여 더 높은 수준의 산정 방법으로 인벤토리의 정확성을 높이고 불확도를 낮추도록 권고하고 있다(IPCC 2006, 2019). 이에 대응하여 우리나라는 『기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법』을 제정하고 이를 근거로 AFOLU 부문 온실가스 인벤토리를 산정하고 있다(Ministry of Environment 2022). 그리고 토지이용별 산정기관에서 온실가스 배출 및 흡수를 산정하면 이를 온실가스정보센터에서 취합·관리하여 매년 국가보고서(NIR, National Inventory Report)로 발간되며, UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change)에 격년 업데이트 보고서(BUR, Biennial Update Report) 형태로 보고되고 있다.

우리나라 국토(10,043,185 ha)의 약 63.2%는 산림(Korea Forest Service, 2022)으로 자연생태계에서 가장 넓은 면적을 차지하며 2020년 기준 다른 토지피복과 비교하여 많은 양의 탄소를 흡수하고 있다(산림지 40.5, 초지 0.02, 습지 0.3백만톤 CO₂eq., Ministry of Environment 2022). 그러나 우리나라의 산림은 지속적인 간벌과 수확벌채 등으로 산림의 탄소 저장 기능이 변화될 것으로 예측되고 있다. Lee *et al.* (2015)은 산림사업에 의한 탄소저장량 연구에서 간벌에 의해 직경 성장량이 평균 39% 증가했으나 임목의 탄소저장량은 31% 감소하였다고 보고하였다. 우리나라의 42년된 소나무림의 개별된 곳과 그렇지 않은 곳을 비교한 결과 토양호흡량은 개별된 곳에서, 토양탄소량은 개별되지 않은 곳에서 유의미하게 더 많았다(Kim, 2008). 최근 연구에서 열대림의 벌목되지 않은 산림은 탄소흡수원으로서 기능하는 반면 벌목된 산림은 탄소배출원으로서 기능하고, 탄소 배출은 벌목 강도에 따라 증가하는 경향을 나타냈다(Mills *et al.*, 2023). 이와 같이 산지 개발, 숲 가꾸기, 벌목 등은 산림 탄소저장량에 많은 영향을 미칠 수 있으므로 산림이용에 따라 정확한 탄소 저장 변동량을 산정하고 그 특성을 밝히는 것이 중요하다.

본 연구는 국내 유관 기관 및 연구소 등에서 제공하는 임상도, 산림사업 정보 및 토양 정보 등을 활용하여 산림사업 전후의 식생 및 토양의 탄소저장량을 산정하고 그 변

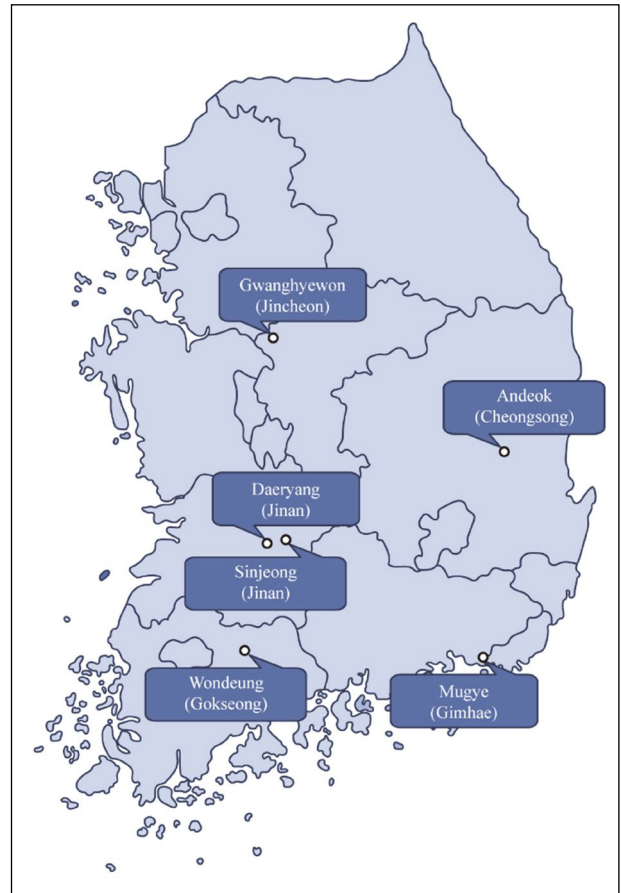


Fig. 1. A map showing the study regions.

화량을 분석하고자 수행 하였다.

연구 방법

1. 연구 대상지 선정 및 정보 수집

국내 산림사업에 의한 탄소저장량 변화를 평가하기 위해 산림청 과거 임상도(4차, 1996~2005)와 최신 임상도(정밀 임상도 1차 현행화 자료, 2015~2019) 내 포함된 정보를 수집·확인하였다. 도엽별로 산림사업의 조림 수종, 경급, 영급 등 임상정보, 사업지역의 면적 크기 및 파편화 등을 고려하였고, 이중 비교적 면적이 넓고 속성 비교를 통한 영급 감소 또는 일시적 미립목지인 지역을 추출하여 6곳의 도엽을 선정하였다(Fig. 1).

연구기간은 산림의 영급, 영급 변동 및 조림 시기 등을 고려하였고 2005년을 6개 도엽의 산림사업 기준 연도로 설정하였다. 산림 사업 전인 2005년의 산림은 6개지역 모두 소경목 및 치수가 대부분이고 4영급의 대경목과 1~2

Table 1. Status of dominant vegetation among the before and after of forestry project in study regions.

No.	Map sheet	Area (ha)	Before forestry project		After forestry project	
			Dominant vegetation	Ratio of ※IV~VI area (%)	Dominant vegetation	Ratio of IV~VI area (%)
1	Daeryang	183.5	<i>Quercus acutissima</i> , <i>Pinus densiflora</i> , <i>Zelkova serrata</i> , <i>Chamaecyparis pisifera</i> , <i>Liriodendron tulipifera</i>	15.4	<i>Quercus acutissima</i> , <i>Fraxinus rhynchophylla</i>	0.6
2	Andeok	124.2	Oaks, <i>P. densiflora</i> , <i>L. tulipifera</i>	3.6	Oaks, <i>P. densiflora</i> , <i>L. tulipifera</i>	0
3	Sinjeong	116.6	<i>Q. acutissima</i> , <i>P. densiflora</i> , <i>C. obtusa</i>	22.9	<i>Q. acutissima</i>	1.5
4	Mugye	78.7	<i>Prunus serrulata</i> , <i>C. obtusa</i>	62.9	<i>Prunus serrulata</i> , <i>C. obtusa</i>	100
5	Gwanghyewon	77.5	<i>P. koraiensis</i> , <i>C. obtusa</i>	18.7	<i>P. densiflora</i> , <i>P. koraiensis</i> , <i>C. obtusa</i>	0
6	Wondeung	86.6	<i>Q. acutissima</i> , <i>Z. serrata</i> , <i>Ace pictum</i>	77.0	<i>Q. acutissima</i> , <i>Z. serrata</i> , <i>P. densiflora</i> , <i>C. obtusa</i>	0

※ IV means forest that ratio of crown as 31~40age trees is more than or equal to 50%.

V means forest that ratio of crown as 41~50age trees is more than or equal to 50%.

VI means forest that ratio of crown as 51~60age trees is more than or equal to 50%.

영급 수목이 섞여 있는 산림이었다. 2005년과 2022년을 기준으로 비교하였을 때 산림 수목의 밀도는 소(수관면적 50% 이하), 중(수관면적 51~70%), 밀(수관면적 71% 이상)이 큰 차이가 없이 분포하는 것으로 판단되었다.

연구대상지로 선정된 지역 6개 도엽의 위치는 행정구역상 진안군에 2곳, 곡성군, 청송군, 진천군, 김해시에 각각 1곳이었다. 임상도에서 확인된 각 도엽별 산림 현황은 Table 1과 같았다. 도엽명 대량 지역 산림의 총 면적은 183.5 ha였고 산림 사업 전 식생은 상수리나무, 소나무, 느티나무, 화백, 툼리나무 등이었다. 가장 높은 영급인 4영급(수령 31~40년) 면적은 전체의 15.4%를 차지하였다. 산림 사업 후 식생은 상수리나무, 물푸레나무 등이었으며 4영급 이상의 면적은 0.6%로 산정되었다. 도엽명 안덕 지역 산림의 총 면적은 124.2 ha였고 산림 사업 전 식생은 참나무류, 소나무, 툼리나무 등이었다. 4영급 이상 지역의 면적은 전체의 3.6%였다. 산림 사업 후 식생은 참나무류, 소나무, 툼리나무 등으로 확인되었고 4영급 이상의 지역은 확인되지 않았다. 도엽명 신정 지역 산림의 총 면적은 116.6 ha였고 산림 사업 전 식생은 상수리나무, 소나무, 편백 등이었다. 4영급 이상의 면적은 전체의 22.9%였다. 산림 사업 후 식생은 상수리나무였으며 4영급 이상의 면적은 1.5%로 산정되었다. 도엽명 무계 지역 산림의 총 면적은 78.7 ha였고 산림 사업 전 식생은 벚나무, 편백 등이었다. 4영급 이상의 면적은 전체의 62.9%였다. 산림 사업 후 식생은 벚나무, 편백 등이었으며 4영급 이상의 면적은 100%로 상승하였다. 도엽명 광혜원 지역 산림의 총 면적은 77.5 ha였고 산림 사업 전 식생은 잣나무, 편백 등이었다. 4영급 이상의 면적은 전체의 18.7%였다. 산림 사업 후 식생은 소나무, 소나무, 잣나무, 편백 등이었으며 4영급 이상의 면적은

확인되지 않았다. 도엽명 원등 지역 산림의 총 면적은 86.6 ha였고 산림 사업 전 식생은 상수리나무, 느티나무, 고로쇠나무 등이었다. 4영급 이상의 면적은 전체의 77.0%였다. 산림 사업 후 식생은 상수리나무, 느티나무, 소나무, 편백 등이었다. 4영급 이상의 면적은 확인되지 않았다.

2. 지상부 탄소 저장량 산정

본 연구에서 지상부 탄소 저장량을 산정하기 위해 수목의 체적(V), 바이오매스 확장계수(BEF), 목재 기본 밀도(WD), 탄소 전환계수(C)를 사용하였으며 추정식은 아래 식(1)과 같다. 이 방법은 산림 수목의 바이오매스 저장량을 산정할 때 이용되는 방법 중 하나로, IPCC의 온실가스 인벤토리 산정 가이드라인에서 소개되어 있다(IPCC 2006).

$$\text{Carbon Stock} = V \times \text{BEF} \times \text{WD} \times C \quad (1)$$

※ V = Volume ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)

BEF = Biomass Expansion Factor (Needle-leaved tree: 1.43, Broad-leaved tree: 1.51)

WD = Wood Density (ton ha^{-1})

C = Carbon fraction (Needle-leaved tree: 0.51, Broad-leaved tree: 0.48)

이 때, 대상사업지의 수목 체적(Volume)은 실측 데이터가 없으므로 임상도 정보(임상, 영급, 경급, 밀도) 특성과 체적과의 관계를 수량화하여 제시한 성장계수($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)를 활용하였다(Kim *et al.*, 2014). 이 성장계수는 임상도의 수목의 종류(활엽수, 침엽수, 혼효림), 영급(2~6영급), 경급(소경목, 중경목, 대경목), 밀도(저, 중, 고)에 따라 대응되

는 체적 값($m^3 ha^{-1}$)을 제공한다. 따라서 실측 조사 데이터가 없더라도 간접적으로 연구지역의 수목 체적 값을 활용할 수 있다. 이 연구에서는 임상도 정보를 통해 얻을 수 있는 성장계수를 위 추정식(1)에 대입하여 산림의 탄소 저장량을 산정하였다. 바이오매스 확장계수(BEF)는 산림 부문 온실가스 인벤토리 산정 방식(Ministry of Environment, 2022)에 따라 침엽수 1.43, 활엽수 1.51을 적용하여 산정하였다. 목재기본밀도(WD) 역시 산림 부문 온실가스 인벤토리 산정 방식에 따라 침엽수 0.46, 활엽수 0.68을 적용하여 산정하였다. 산림사업 전후의 탄소 저장량 변화는 과거 임상도 정보(산림사업 전, 2005년)와 산림 사업 후 정보(2022년)를 활용하여 그 차이로 추정하였다.

3. 토양 탄소 저장량 산정

산림사업 이후의 토양 내 탄소 저장량의 차이는 기본적으로 산림사업 전후의 탄소 저장량의 차이로 산정한다. 토양의 탄소 저장량은 토양의 두께(T), 토양용적밀도(bulk density, BD), 토양 내 유기탄소 함량(C), 석력함량(CF)에 의해 결정된다. 토양탄소저장량을 계산하는 방법은 아래 식(2)와 같다.

$$CS (Mg ha^{-1}) = T \times BD \times C \times (1 - CF) \quad (2)$$

※ T = Soil depth (cm)

BD = Bulk Density ($g cm^{-2}$)

C = Carbon content

CF = Coarse Fragment (%)

산림사업 대상지의 토양 탄소 저장량을 분석하기 위해서는 위의 대상지 데이터가 모두 갖춰져야 한다. 정확한 값의 도출을 위해서는 대상지역에서의 실측 데이터를 활용하는 것이 필요하다. 하지만, 대부분의 사업에서는 실측 값을 구하기 어렵기 때문에, 관련하여 국가 기관에서 공표한 데이터나 선행연구에서 사용하고 있는 값들을 활용하여 계산하는 것이 필요하다. 토양의 두께 및 석력 함량의 경우, 산림청에서 공표하고 있는 산림입지토양도(<http://data.nsdi.go.kr/dataset/20180918ds00066>)를 활용하면 대상지역의 정보를 획득할 수 있다. 또한, 토양 내 유기탄소 함량의 경우에는 농촌진흥청에서 제공하고 있는 흙토람(<https://soil.rda.go.k>)에서 관련 정보를 얻을 수 있다. 흙토람에서는 유기탄소의 양을 직접적으로 제시하지 않고 토양유기물함량 값을 제시하고 있기 때문에, 토양 유기물함량 데이터를 1.724로 나누어 유기탄소의 양으로 환산하여 사용한다. 토양용적밀도의 경우, 공표된 데이터를 통해 직

Table 2. Soil bulk density and depth using forest soil map.

No.	Map sheet	Bulk density ($g cm^3$)		Soil depth (cm)	
		A layer	B layer	A layer	B layer
1	Daeryang	0.84	1.02	19.72	48.96
2	Andeok	0.97	1.04	12.13	46.54
3	Sinjeong	0.97	1.04	20.76	49.78
4	Mugye	0.97	1.04	13.17	51.54
5	Gwanghyewon	0.91	1.04	13.57	51.97
6	Wondeung	0.84	1.02	20.54	55.85

접적으로 획득하는 것이 가능하지 않기 때문에, 모암 정보를 통해 획득해야 한다. 모암 정보는 산림입지토양도에서 동일하게 획득이 가능하고, 획득한 모암 정보에서 토양용적밀도를 유추하는 것은 Jeong *et al.* (2003)에서 제시하고 있는 정보를 활용한다(Table 2). 토양 깊이는 산림입지토양도에서 해당 지역의 토양 정보를 활용하여 A층(용탈층)과 B층(집적층) 깊이를 각각 적용하였으며 도엽별 깊이는 58.7~76.4 cm였다.

전술한대로 산림사업에 의한 토양탄소저장량의 변화를 분석하기 위해서는 산림사업 전후의 데이터가 필요하다. 하지만, 위에서 기술하고 있는 공표된 데이터들은 시기가 한정되어 있어 산림사업 전후 데이터를 획득하는데 한계가 있다. 따라서 공표된 데이터를 통하여 추정된 토양탄소 값을 산림사업 전의 값이라 가정하고, 산림사업 후의 값은 일정한 비율만큼 감소한다고 가정하여 계산하였다(Nave *et al.*, 2010). Nave *et al.* (2010)는 온라인 데이터베이스(ISI Web of Science, BIOSIS 등)의 검색을 통해 얻어진 6,500여 개의 벌목, 수확, 개간 등의 온대림 대상 산림사업 연구결과를 메타 분석하였다. 분석한 결과 토심 5~20 cm에서 침엽수림과 혼효림은 20%, 활엽수림은 36%의 토양탄소가 감소한다고 보고하였다. 본 연구에서 산림사업에 의한 토양탄소 감소는 이 비율을 적용하여 산정하였다.

4. 산림사업 유무에 따른 지상부 탄소 저장량 추정

산림 사업이 산림 지상부 탄소 저장량 축적에 미치는 영향을 알아보기 위해 도엽명 대량의 산림 정보를 활용하여 산림 사업이 있는 경우와 없는 경우를 가정하여 산림 지상부의 탄소 축적 경향을 추정하였다. 산림 사업이 없는 경우는 2005년부터 그리고 산림 사업(산림 벌채 및 조림) 기간인 2006~2021년이 지난 2022년부터 산림 정보를 활용하여 성장계수(Kim *et al.*, 2014)의 영급을 1영급씩 상승시

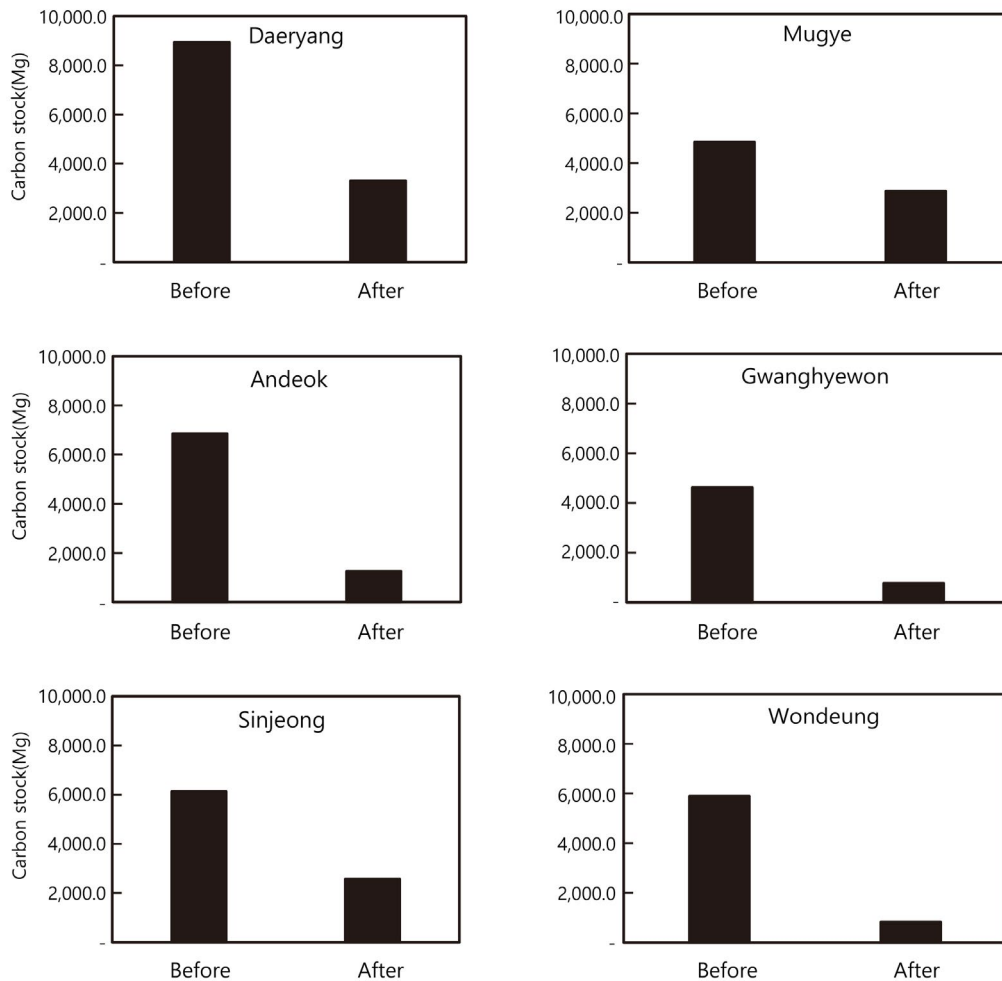


Fig. 2. Carbon stock (Mg) of above-ground before and after forestry project.

켰다. 산림 사업이 있는 경우와 없는 경우 상승된 영급에 따라 해당되는 성장계수(Kim *et al.*, 2014)를 지상부 탄소 저장량 산정식(1)에 대입하여 지상부 탄소 저장량을 추정하였다. 이 추정 결과를 활용하여 산림 사업 유무에 따른 산림 탄소 저장량과 축적 경향을 분석하였다.

5. 통계 분석

산림 벌채에 따른 산림 탄소 저장량 차이를 분석하기 위하여 paired t-test를 실시하였다. Paired t-test는 서로 일대일 대응이 되는 두 집단의 차이를 확인하는 통계분석 방법으로 산림 벌채에 의한 탄소 저장량 변화가 통계적으로 유의한지 분석하고자 하였다(Ross and Willson, 2017). Paired t-test 분석은 R프로그램(ver. 4.3.1, www.r-project.org)을 사용하였으며 5% 유의수준에서 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 산림 벌채 전후 지상부의 탄소 저장량 산정

지상부 탄소 저장량을 산정한 결과 대량, 안덕, 신정, 무계, 광혜원, 원등 6개 도엽의 산림사업 전 지상부 탄소 저장량은 각각 8,933.4, 6,852.9, 6,135.4, 4,484.0, 4,623.2 그리고 5,892.3 Mg이었다(Fig. 2). 또한 산림사업 후 지상부 탄소 저장량은 각각 3,300.6, 1,253.0, 2,575.4, 2,871.3, 776.5 그리고 834.8 Mg이었다. 모든 도엽에서 산림 사업 시행 후 지상부의 탄소 저장량이 감소하는 결과를 나타냈다($p < 0.001$). 대량, 안덕, 신정, 무계, 광혜원, 원등 6개 도엽의 지상부 탄소 감소량(감소율)은 각각 5,632.8 (63.1%), 5,599.9 (81.7%), 3,560.0 (58.0%), 1,976.8 (40.8%), 3,846.7 (83.2%) 그리고 5,057.5 Mg (85.8%) 이었다. 이는 중부지역 일본잎갈나무림에서 벌채 후 지상부 바이오매스가 142.22

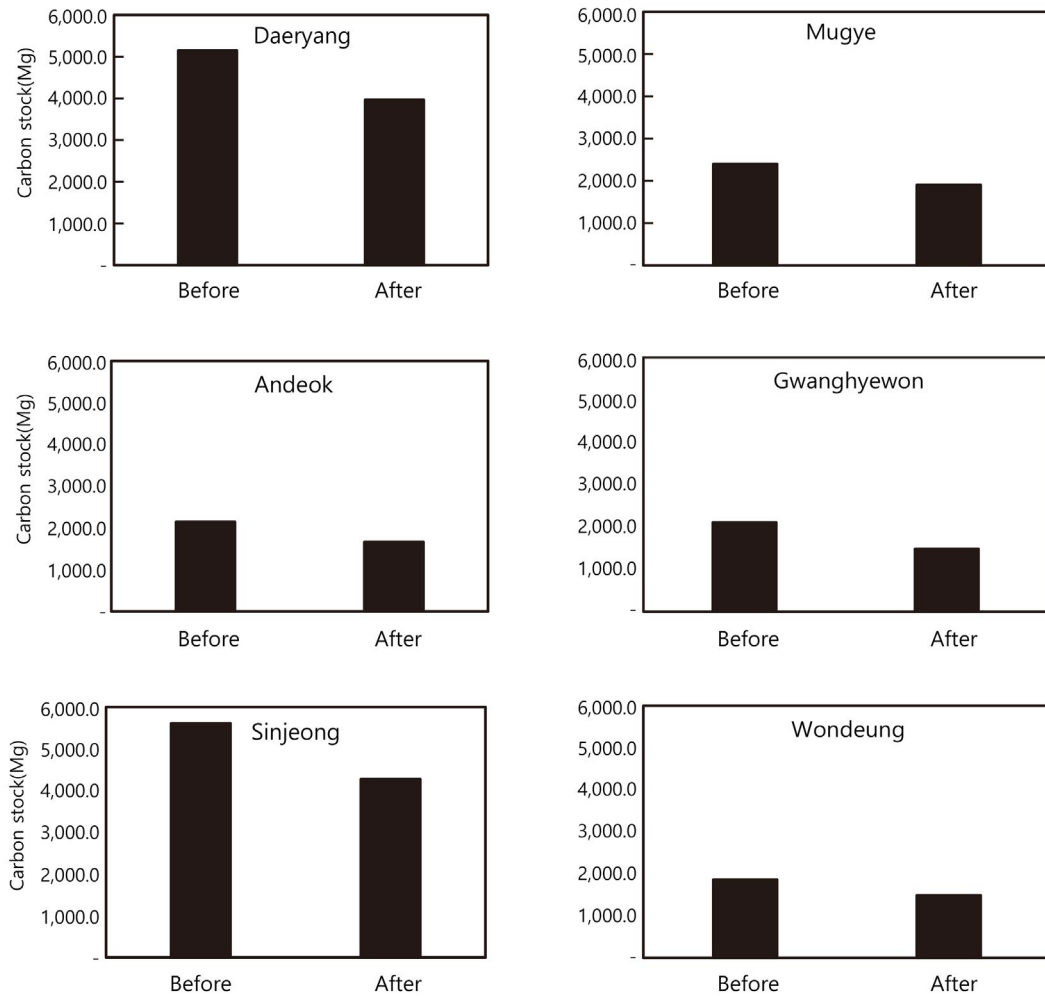


Fig. 3. Carbon stock (Mg) of soil before and after forestry project.

Mg ha⁻¹에서 44.20 Mg ha⁻¹로 감소한 결과와 같았다(Wang and Kim, 2022). 또한 강원도 일본잎갈나무림과 잣나무림에서 숲아베기를 하지 않았을 때 산림의 바이오매스가 더 높은 결과와 같았다(Chhorn *et al.*, 2020). 또한 미국 남부의 참나무림, 중국 온대 혼효림에서 발생한 간벌은 산림 바이오매스 및 축적물을 감소시켜 본 연구와 비슷하였다(Elliott *et al.*, 2020; Geng *et al.*, 2021). 이러한 결과는 간벌의 의해 낮아진 종 다양도(종 수, 균등도)와 산림 바이오매스 회복기간 등이 산림 바이오매스 상승에 영향을 미치는 것으로 분석된 바 있다(Geng *et al.*, 2021).

2. 산림 벌채 전후 토양 탄소 저장량 산정

토양의 탄소 저장량을 산정한 결과 대량, 안덕, 신정, 무계, 광혜원, 원등 6개 도엽의 산림사업 전 토양 탄소 저장

량은 각각 5,143.2, 2,142.9, 5,606.7, 2,402.0, 2,107.3 그리고 1,858.8 Mg이었다(Fig. 3). 또한 산림사업 후 토양 탄소 저장량은 각각 3,965.1, 1,664.0, 4,273.3, 1,903.4, 1,479.7 그리고 1,487.1 Mg으로 토양의 탄소 저장량 역시 감소하는 결과를 나타냈다($p < 0.01$). 이는 간벌 후 함양군의 토양유기탄소함량이 8.06%에서 9.12%로 감소하였고(Kim, 2008) 터키 북동부 오리나무숲(*Alnus glutinosa*) 토양유기물함량이 4.77%에서 1.65%로 감소한(Yüksek and Yüksek, 2009) 결과와 같았다. 이러한 결과는 간벌 후 물리적으로 훼손된 산림의 토양탄소가 강수, 토양호흡 등으로 외부로 방출되고 있음을 시사한다. Kim (2008)은 연구를 통해 간벌 후 산림 토양의 수분과 탄소저장량이 감소하고 온도 및 토양호흡량이 증가하여 토양의 물리화학적 특성이 변화한다고 밝힌 바 있다. 또한 간벌이 토양침식 및 유거수(runoff)에 미치는 모의 실험에서 간벌 후에 토양침식이 더

많이 증가하는 경향을 나타냈다(Dung and Thanh, 2021). Mills *et al.* (2023)은 보르네오 열대림 연구를 통해 간벌된 산림의 순생태계생산량(NEP, Net Ecosystem Production)이 음의 값(탄소배출)을 보였으며, 이는 벌채된 산림의 종속영양생물군 호흡량이 순일차생산량보다 많아 대상 산림이 최소 10년간 탄소배출원으로 기능한 것으로 보고하였다.

3. 산림사업 전후 산림 전체 탄소 저장량 및 탄소 분포 특성

대량, 안덕, 신정, 무계, 광혜원, 원등 6개 도엽의 산림사업 전 산림 전체 탄소 저장량을 산정한 결과 14,076.6, 8,995.8, 11,742.1, 7,250.1, 6,730.5 그리고 7,751.1 Mg이었다(Table 3). 그리고 산림사업 후 산림 전체 탄소 저장량을 산정한 결과 7,265.8, 2,917.0, 6,848.7, 4,774.7, 2,256.2 그리고 2,321.9 Mg이었다. 모든 도엽에서 산림 전체 탄소 저장량은 감소하였으며 탄소 감소량(감소율)은 각각 6,810.9 (48.4%), 6,078.8 (67.6%), 4,893.4 (41.7%), 2,475.4 (34.1%), 4,474.3 (66.5%) 그리고 5,429.2 (70.0%) Mg이

Table 3. Carbon stock (Mg) of above-ground and soil before and after forestry project.

	Before	After	Reduction rate
Daeryang	14076.6	7265.8	48.4%
Andeok	8995.8	2917.0	67.6%
Sinjeong	11742.1	6848.7	41.7%
Mugye	7250.1	4774.7	34.1%
Gwanghyewon	6730.5	2256.2	66.5%
Wondeung	7751.1	2321.9	70.0%

었다.

일반적으로 산림에서 탄소는 지상부보다 토양에 더 많이 저장되는 것으로 알려져 있다(Fahey *et al.*, 2009). Houghton (2007)은 전지구적 탄소순환에서 토양에 1,200 Pg C, 식생에 550 Pg C의 탄소가 저장되어 있다고 발표한 바 있고, Fahey *et al.* (2005)은 100년이 넘는 북방의 산림(northern hardwood forest) 탄소가 지상부와 토양에 각각 9,495, 12,770 g C m⁻² 저장되어 있다고 보고하였다. 중국 대륙에서는 식생과 토양에 각각 13.33, 82.65 Gt C의 탄소가 저장되어 있고, 영국에서는 식생과 토양에 각각 114, 9,838 Mt의 탄소가 저장되어 있었다(Milne and Brown 1995; Kerang *et al.*, 2004). 본 연구에서 산정된 벌채 전 산림의 지상부와 토양의 탄소 저장량은 각각 대량 8,933.4, 5,143.2 Mg, 안덕 6,852.9, 2,142.9 Mg, 신정 6,135.4, 5,606.7 Mg, 무계 4,848.0, 2,402.0 Mg, 광혜원 4,623.2, 2,107.3 Mg 그리고 원등 5,892.3, 1,858.8 Mg으로 토양보다 지상부에서 탄소저장량이 더 많았다. 자연공원법에 따라 보전·관리되고 있는 국립공원은 식생과 토양(최대 토심 50 cm)의 탄소저장량을 산정하고 있어 본 연구 결과와 비교하였다. 그 결과 가야산국립공원(NPRI, 2022), 오대산국립공원(NPRI, 2021)과 소백산국립공원(NPRI, 2022) 그리고 치악산국립공원(NPRI, 2022) 등에서 활엽수림, 침엽수림, 혼효림의 식생이 토양보다 탄소 저장량이 더 많아 본 연구 결과와 비슷한 경향을 나타냈다. 이와 같은 결과로 우리나라 산림 토양은 향후 더 많은 탄소를 산림 내에 저장할 수 있는 잠재성이 있다고 예측해볼 수 있으며, 산림 관리 통한 수목의 탄소 흡수 능력 유지뿐만 아니라 토양의 탄소 저장 능력 역시 유지·증진시킬 수 있는 전략을 마련해야 할 것으로 판단된다.

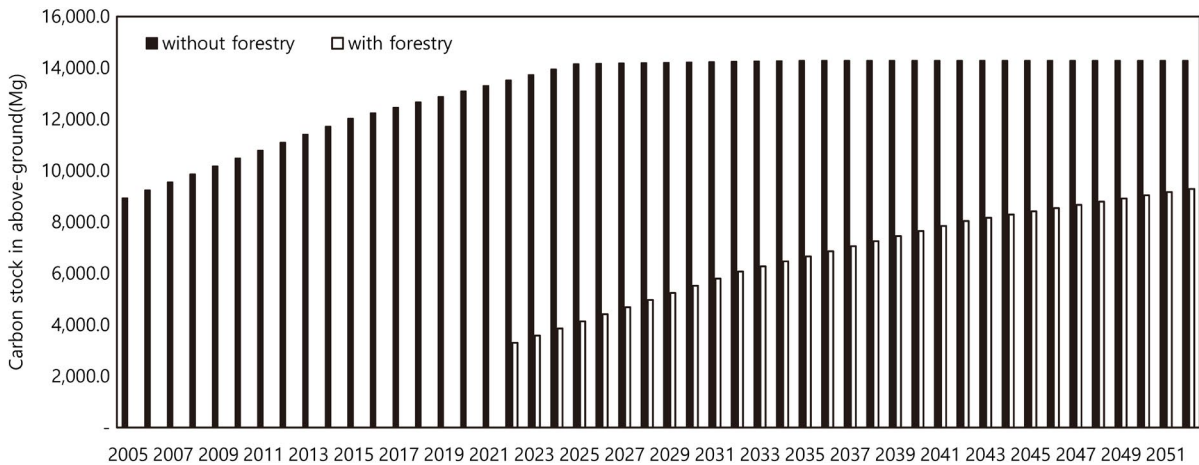


Fig. 4. Carbon stock in above-ground when the without forestry and with forestry.

4. 산림 산업 유무에 따른 탄소 저장량

도엽명 대량의 산림 사업이 없을 때 탄소저장량은 2005년(3영급) 8,933.4Mg부터 최대가 되는 2047년까지 14,280.8 Mg의 탄소가 저장되는 것으로 예측되었다(Fig. 4). 그리고 산림 사업 후 탄소저장량은 2022년(2영급) 3,300.6 Mg부터 최대가 되는 2052년까지 9,289.7 Mg의 탄소가 저장되는 것으로 예측되었다. 산림 사업이 없을 때 산림의 탄소 축적량은 처음 10년(+1영급)에는 309.3 Mg yr⁻¹의 탄소가 축적되고 이후 10년(+2영급)에는 212.7 Mg yr⁻¹, 다음 10년(+3영급)에는 12.8 Mg yr⁻¹의 탄소가 축적되는 것으로 분석되었다. 산림 사업이 있을 때 산림의 탄소축적량은 처음 10년(+1영급)에는 277.4 Mg yr⁻¹의 탄소가 축적되고 이후 10년(+2영급)에는 196.8 Mg yr⁻¹, 다음 10년(+3영급)에는 124.8Mg yr⁻¹의 탄소가 축적되는 것으로 분석되어, 산림 사업 유무에 의한 산림의 탄소 저장량 축적 경향은 서로 다르게 나타났다. 이처럼 산림 사업이 있을 때 산림 지상부 탄소 저장량 축적은 산림 사업이 없을 때보다 더 오랜 시간이 걸리는 것으로 예측되었다(Fig. 4). 산림 사업이 없을 때(2005~) 탄소 저장량은 탄소 축적의 변화가 거의 없는 2025년까지 약 20년 걸릴 것으로 예측되었다. 산림 사업이 있을 때(2022~) 탄소 저장량은 탄소 축적의 변화가 거의 없는 2052년까지 약 30년 걸릴 것으로 예측되었다. 그리고 도엽명 대량에서 탄소 저장량이 최대인 2052년의 탄소 저장량은 14,280.8Mg(산림 사업이 없을 때), 9,289.7Mg(산림 사업이 있을 때)로 추정되었으며, 단순 비교를 통해 산림 사업이 없을 때 있을 때보다 탄소 저장량이 약 1.5배 더 많았다. 이러한 경향은 미국 남부 애플래치아 산림에서 행해진 연구와 비슷하였다. 간벌 후 지상부 바이오매스 축적 속도는 매우 빠르지만 20년 이상이 지나도 지상부 바이오매스는 대조군보다 적어 연구가 끝날 때까지 회복되지 않았다(Elliott *et al.*, 2020). 또한 약 30%의 부분 간벌을 했을 때는 60년 이상이 지난 후 대조군과 비슷한 바이오매스를 나타내 비교적 약한 간벌시에도 산림의 바이오매스 회복은 오래 걸리는 것으로 사료된다. 전술한 예측은 제공되는 최대 영급인 6영급까지 성장계수를 높여(Kim *et al.*, 2014) 산술적으로 추정해 본 결과로, 산림의 경급, 밀도 등이 고려된 다양한 연구를 추가적으로 진행하여 정확도를 높여야 할 것으로 판단된다.

적 요

산림 사업이 산림의 탄소저장량에 미치는 영향을 알아보기 위하여 임상도, 산림사업 정보 및 토양 정보 등을 활

용하여 산림 사업 전후의 지상부 및 토양의 탄소저장량을 산정하고 그 변화를 분석하고자 하였다. 먼저 임상도 정보에 기초하여 면적이 넓고 영급이 감소하는 도엽 6곳을 선정하였다. 그리고 임상도와 성장계수, 산정 지역의 토양유기물함량, 토양용적밀도 등 데이터를 수집하여 산림 탄소저장량을 산정하였다. 그 결과 모든 곳에서 산림 탄소저장량은 산림사업 후 약 34.1~70.0%가 감소하였다. 그리고 기존 연구와 비교했을 때 국내 산림 토양은 지상부에 비해 더 적은 탄소를 저장하고 있어 우리나라의 산림 토양은 더 많은 탄소를 저장할 수 있는 잠재성이 큰 것으로 판단되며 탄소저장량 증대를 위한 전략이 필요할 것으로 판단되었다. 산림사업이 없을 때 있을 때보다 탄소저장량은 약 1.5배 많은 것으로 추정되었다. 그리고 본 연구에서 산림사업에 따라 간벌 전 산림 탄소저장량으로 회복되기까지 약 27년이 걸리는 것으로 추정되었다. 산림은 물리적 훼손에 의해 탄소저장량이 감소하면 원래의 탄소저장량으로 회복되기까지 오랜 시간이 걸리므로 특히 자연성이 높은 산림은 최대한 보전하는 계획을 수립하여 산림의 탄소저장 기능을 유지할 수 있도록 하여야 할 것이다.

저자정보 정현모(국립생태원 기후탄소연구팀 연구원), 장인영(국립생태원 기후탄소연구팀 선임연구원), 한상학(국립생태원 기후탄소연구팀 연구원), 조소연(국립생태원 기후탄소연구팀 전임연구원), 최철현(국립생태원 기후탄소연구팀 전임연구원), 이연지(국립생태원 연구원), 강성룡(국립생태원 기후탄소연구팀 책임연구원)

저자기여도 개념설정: 강성룡, 장인영, 정현모, 방법론: 장인영, 정현모, 분석: 장인영, 정현모, 조소연, 최철현, 한상학, 자료관리: 장인영, 정현모, 원고 초안작성: 정현모, 장인영, 원고 교정: 강성룡, 장인영, 원고 편집 및 검토: 강성룡, 장인영, 정현모, 한상학, 최철현, 조소연, 이연지

이해관계 모든 저자는 논문의 결과에 동의하였고, 출판될 최종본을 검토하고 동의하였습니다.

연구비 본 논문은 국립생태원의 “생태계 유형별 탄소저장량 및 거동 산정 연구(NIE-고유연구-2023-16)”에 의해 지원되었습니다.

REFERENCES

- Chhorn, V., Y. Seo, D. Lee and J. Choi. 2020. The three-year effect of thinning intensity on biomass in *Larix kaempferi* and *Pinus koraiensis* plantation. *Journal of Forest and Environmental Science* 36: 17-24.

- Dung, B.X. and D.T.K. Thahn. 2021. Runoff and soil erosion response to clear cutting period of Acacia plantation in a headwater mountain of Vietnam. *Applied Research in Science and Technology* **1**: 12-25.
- Elliott, K.J., C.F. Miniati, A.S. Medenblik. 2020. The long-term case for partial-cutting over clear-cutting in the southern Appalachians USA. *New Forests* **51**: 273-295.
- Fahey, T.J., T.G. Siccamo, C.T. Driscoll, G.E. Liens, J. Campbell, C.E. Johnson, J.J. Battles, J.D. Aber, J.J. Cole, M.C. Fisk, P.M. Groffman, S.P. Hamburg, R.T. Holmes, P.A. Schwarz and R.D. Yanai. 2005. The biogeochemistry of carbon at Hubbard Brook. *Biogeochemistry* **75**: 109-176.
- Fahey, T.J., P.B. Woodbury, J.J. Battles, C.L. Goodale, S.P. Hamburg, S.V. Ollinger and C.W. Woodall. 2009. Forest carbon storage: ecology, management, and policy. *Frontiers in Ecology and the Environment* **8**: 245-252.
- Friedlingstein, P.M. O'Sullivan, M.W. Jones, R.M. Andrew, L. Gregor, J. Hauck, C. Le Quéré, I.T. Lujckx, A. Olsen, G.P. Peters, W. Peters, J. Pongratz, C. Schwingshackl, S. Sitch, J.G. Canadell, P. Ciais, R.B. Jackson, S.R. Alin, R. Alkama, A. Arneeth, V.K. Arora, N.R. Bates, M. Becker, N. Bellouin, H.C. Bittig, L. Bopp, F. Chevallier, L.P. Chini, M. Cronin, W. Evans, S. Falk, R.A. Feely, T. Gasser, M. Gehlen, T. Gkritzalis, L. Gloege, G. Grassi, N. Gruber, Ö. Gürses, I. Harris, M. Hefner, R.A. Houghton, G.C. Hurtt, Y. Iida, T. Ilyina, A.K. Jain, A. Jersild, K. Kadono, E. Kato, D. Kennedy, K.K. Goldewijk, J. Knauer, J.I. Korsbakken, P. Landschützer, N. Lefèvre, K. Lindsay, J. Liu, Z. Liu, G. Marland, N. Mayot, M.J. McGrath, N. Metz, N.M. Monacci, D.R. Munro, S. Nakaoka, Y. Niwa, K. O'Brien, T. Ono, P.I. Palmer, N. Pan, D. Pierrot, K. Pockock, B. Poulter, L. Resplandy, E. Robertson, C. Rodenbeck, C. Rodriguez, T.M. Rosan, J. Schwinger, R. Sferian, J.D. Shutler, I. Skjelvan, T. Steinhoff, Q. Sun, A.J. Sutton, C. Sweeney, S. Takao, T. Tanhua, P.P. Tans, X. Tian, H. Tian, B. Tilbrook, H. Tsujino, F. Tubiello, G.R. van der Werf, A.P. Walker, H. Wanninkhof, C. Whitehead, A.W. Wranne, A.R. Wright, W. Yuan, C. Yue, X. Yue, S. Zaehle, J. Zeng, and B. Zheng. 2022. Global carbon budget 2022. *Earth System Science Data* **14**: 4811-4900.
- Geng, Y., Q. Yue, C. Zhang, X. Zhao and K. von Gadow. 2021. Dynamics and drivers of aboveground biomass accumulation during recovery from selective harvesting in an uneven-aged forest. *European Journal of Forest Research* **140**: 1163-1178.
- Houghton, R.A. 2007. Balancing the global carbon budget. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* **35**: 313-347.
- IPCC. 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan.
- IPCC. 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories. Calvo Buendia, E. Tanabe, K. Kranjc, A. Baasansuren, J. Fukuda, M. Ngarize, S. Isako, A. Pyrozhenko, Y. Shermanau, P. and Federici, S. Published: IPCC, Switzerland.
- Jeong, J., C. Kim, K. Goo, C. Lee, H. Won and J. Byun. 2003. Physico-chemical properties of Korean forest soils by parent rocks. *Journal of Forest Society* **92**: 254-262.
- Kerang, L., W. Shaoqiang and CAO Mingkui. 2004. Vegetation and soil carbon storage in China. *Science in China series D Earth Sciences* **47**: 49-57.
- Kim, C. 2008. Soil CO₂ efflux in clear-cut and uncut red pine (*Pinus densiflora* S. et Z.) stands in Korea. *Forest Ecology and Management* **255**: 3318-3321.
- Kim, S.W., Y.M. Son, E.S. Kim and H. Park. 2014. Estimation of growing stock and carbon stock based on components of forest type map: The case of Kangwon Province. *Journal of Forest Society* **103**: 446-452.
- Korea Forest Service. 2022. 2022 Statistical yearbook of forestry.
- Lee, J.S., H. Han, S. Kim, S. Lee, Y.M. Son and Y. Son. 2015. A meta-analysis on the effect of forest thinning on diameter growth and carbon stocks in Korea. *Journal of Korean Forest Society* **104**: 527-535.
- Mills, M.B., Y. Malhi, R.M. Ewers, L.K. Kho, Y.A. The, S. Both, D.F.R.P. Burslem, N. Majalap, R. Nilus, W.H. Huasco, R. Cruz, M.M. Pillco, E.C. Turner, G. Reynolds and T. Riutta. 2023. Tropical forests post-logging are a persistent net carbon source to the atmosphere. *PNAS* **120**: e2214462120.
- Milne, R. and T.A. Brown. 1995. Carbon in the vegetation and soil of Great Britain. *Journal of Environmental Management* **49**: 413-433.
- Ministry of Environment. 2022. 2022 National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea.
- Nave, L.E., E.D. Vance, C.W. Swanston and P.S. Curtis. 2010. Harvest impacts on soil carbon storage in temperature forests. *Forest Ecology and Management* **259**: 857-866.
- NPRI (Korea national park research institute). 2022. Natural Resources Survey in Gayasan National Park.
- NPRI (Korea national park research institute). 2022. Natural Resources Survey in Sobaeksan National Park.
- NPRI (Korea national park research institute). 2022. Natural Resources Survey in Chiaksan National Park.
- NPRI (Korea national park research institute). 2021. Natural Resources Survey in Odaesan National Park.
- Ross, A. and V.L. Willson. 2017. Paired t-test, p. 17-19. In: Basic and advanced statistical tests. Rotterdam: Sence Publishers.
- Wang, R.J. and D.Y. Kim. 2022. Early effect of environment-friendly harvesting on the dynamics of organic matter in a Japanese Larch (*Larix leptolepis*) Forest in Central Korea. *Journal of Korean Society of Forestry Science* **111**: 473-481.
- Yüksek, T. and F. Yüksek. 2009. Effects of clear-cutting alder coppice on surface soil properties and aboveground herbaceous plant biomass. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **40**: 2562-2578.