

Original article

우리나라 산림의 지상부 탄소저장량과 종 다양성 및 구조적 다양성과의 관계

정현모 · 김의주¹ · 박재훈¹ · 김해란^{2,*}

국립생태원 기후탄소연구팀, ¹공주대학교 생물학과, ²국립생태원 환경영향평가팀

Relationships between Above-ground Carbon Stock and Species and Structural Diversity in South Korean Forests. Heon Mo Jeong (0000-0003-4151-0659), Eui Joo Kim¹ (0000-0002-9249-7055), Jae Hoon Park¹ (0000-0002-7905-8998) and Hae Ran Kim^{2,*} (0000-0003-4151-0659) (Carbon and Climate Change Research Team National Institute of Ecology, SeoCheon 33567, Republic of Korea; ¹Department of Life Science, Kongju National University, Kongju 32588, Republic of Korea; ²National Institute of Ecology, Environmental Impact Assessment Team, National Institute of Ecology, SeoCheon 33567, Republic of Korea)

Abstract To analyse the relationship between above-ground carbon stocks, species diversity and broadleaved forests structural diversity of South Korean forests, we collected vegetation inventories from environmental impact assessment projects over the past 10 years. The available data were selected and organised including tree species, DBH and area each projects. The data was classified by forest type, aboveground carbon stocks were calculated and compared, and the correlation between aboveground carbon stocks and biodiversity and structural diversity was analysed. The results showed that above-ground carbon stocks were higher in mixed forests and broadleaved forests and lower in needleleaved forests, similar to previous studies. However aboveground carbon stocks of mixed forests were higher in natural forests than in plantations. Aboveground carbon stocks in broadleaved forests were higher in plantations than natural forests, and there was no statistical different of between natural and plantations in needleleaved forest. This could be the result of a variety influences including biological and environmental factors in the study area, and further research is needed to analyse the effects on carbon sequestration. Correlation analysis showed no correlation between biodiversity and above-ground carbon stocks, but a positive correlation between structural diversity and above-ground carbon stocks. This indicates that above-ground carbon stocks in forests are associated with unevenness diameters and the proportion and evenness of tree species by diameter. In addition, it has been analysed that the high succession stages in forest have higher species diversity and structural diversity, and greater efficiency in the utilization of resources required for plant growth, leading to increased plant productivity and storage. Considering that the study sites were young forests with an average DBH of 14.8~23.7 cm, it is expected that carbon stocks will increase as biodiversity and structural diversity increase. Further research is needed to develop techniques to quantitatively assess the relationship of diversity to carbon stocks for policy use in assessing and increasing carbon stocks in forests.

Key words: carbon sequestration, species diversity, structural diversity, forest type, environmental impact assessment

Manuscript received 4 April 2024, revised 5 August 2024,
revision accepted 6 August 2024

* Corresponding author: Tel: +82-41-950-5443, Fax: +82-41-950-1635
E-mail: ecoran@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.

서론

전 지구적 온실가스의 연간 배출량은 2019년 기준 59 ± 6.6 GtCO₂-eq로, 2010년 대비 12% 증가하였고, 그중 CO₂ 농도는 410 ppm에 달하며 이는 1750년 이후 47% 상승한 것이다(IPCC, 2021). 이처럼 지속적으로 증가하는 온실가스 배출을 저감하고 기후변화에 대처하기 위해 전 세계는 많은 노력을 기울이고 있다. 우리나라는 2050 탄소중립 사회로의 이행을 실현하기 위해 「제1차 국가 탄소중립·녹색성장 기본계획(2023~2042)」을 수립하여 온실가스 감축 및 이행 기반 강화 정책을 제시하고 있다. 이 중 대표적인 탄소흡수원인 산림을 대상으로 흡수원의 양적·질적 제고를 통한 기능 증진 및 체계적인 흡수원의 복원 관리를 핵심과제로 선정하여 온실가스 감축 목표 이행을 도모하고 있다. 2015년 기후변화협약(UNFCCC, UN Framework convention on climate change)에서 체결된 파리 협정(Paris agreement)으로 온실가스 배출을 감축하고 산업화 수준보다 섭씨 2°C 이상 상승하지 않도록 노력하고 특히 가능한 1.5°C 상승을 제한할 것을 목표로 하고 있다(IPCC, 2018). 또한 쿤밍-몬트리올 GBF(Global Biodiversity Framework)는 생물다양성 보호와 기후변화 대응을 위해 탄소저장소를 증대시키고 대기 중 배출을 줄이는 것을 목표로 하고 있다.

우리나라 전체 국토 면적의 약 64%를 차지하는 산림은 대표적인 탄소 저장고이자 흡수원이다. 우리나라 산림은 2019년 기준 약 19억 3천만 톤의 탄소를 저장하고 있으며 연간 4,323만 톤을 흡수한다(NIFOS, 2022). 탄소 보전과 저장·흡수 기능 증진을 위해서는 산림의 적절한 조성 관리가 필요하다. 유엔기후변화협약(UNFCCC)은 2009년 12월, 산림 전용 및 산림훼손방지구로부터 탄소배출 감축(REDD)을 확장한 REDD+ 메커니즘 도입을 합의하였다. 온실가스 감축을 위해 산림 벌채와 황폐화를 줄이는 것에서 더 나아가 산림 탄소 축적의 보전, 지속가능한 산림경영, 조림과 산림 복원을 통한 탄소 축적 증진 등 탄소 보전 관리 측면에서 중요성을 강조하고 있다(Seok and Yoon, 2010).

산림에 의한 탄소 저장은 기후, 지리적 위치, 입지 및 토양 환경 등 외부 요인과 종 구성, 종 풍부도, 식생 구조 등 내부 요인에 의해 영향을 받는다(Poorter *et al.*, 2015). 최근 들어 탄소 저장고이자 흡수원인 산림 기능의 유지·관리를 위해 고려해야 할 필수 요인으로 생물다양성이 언급되고 있다(Phelps *et al.*, 2012). REDD+ 메커니즘에서는 산림 보전과 지속 가능한 산림 관리를 통해 탄소 보전과 생물다양성 증진 간의 공동 이익(co-benefits)의 창출 가능

성을 언급하고 있으며, 탄소 보전을 위한 생물다양성의 역할을 중요시하고 있다(Day *et al.*, 2013).

이에 따라 탄소저장량과 생물다양성과의 상관관계를 밝히려는 연구가 활발히 진행되고 있다(Tran *et al.*, 2013; Sullivan *et al.*, 2017; van der Sande *et al.*, 2017). 관련 연구 결과에 따르면 산림의 구조적 다양성 및 종 다양성이 높은 산림은 생산성과 탄소저장량이 높다고 알려져 있다(Tilman *et al.*, 1997; Liang *et al.*, 2016; Mohanta *et al.*, 2020). 미국 서부 대륙 산림을 대상으로 RCP 8.5 시나리오를 사용하여 기상기후모델(Community Land Model, CLM)로 모의한 결과, 잠재적으로 탄소 격리 능력이 높고 화재나 가뭄과 같은 미래 환경 변화에 취약성이 낮은 지역을 확인하였다. 이러한 산림 지역의 특징은 식물의 종 다양성과 생산성이 높고, 멸종위기에 처한 동물의 서식지로서 중요한 기능을 수행하고 있다는 것이다(Buotte *et al.*, 2020). Van Der Sande *et al.* (2017)은 생물다양성과 탄소 저장·흡수와의 관계를 평가하기 위하여 열대림의 38개의 관련 연구를 분석한 결과 종 특성 또는 구조와 관련된 생물다양성 속성이 탄소저장량 또는 흡수량에 영향을 미치는 것을 확인했다. 이처럼 많은 연구에서 생물다양성과 탄소 저장과의 양의 상관관계를 보이고 있지만 일부는 지역이나 규모 등에 따라 가변적이며(Strassburg *et al.*, 2010), 심지어 음의 상관관계를 보이는 경우도 있다(Anderson *et al.*, 2009).

국내에서는 토지이용별 탄소저장량 비교, 산림, 도시, 습지 등 토지 피복별, 생태계 유형별 탄소저장량 및 흡수량을 평가하는 연구가 대부분이며, 탄소저장량과 생물다양성(종 다양성, 종 풍부도, 구조적 다양성 등) 간의 관계를 규명하는 연구는 점봉산 신갈나무림에서 수행된 연구(Jeong *et al.*, 2016) 사례만이 확인되고 있어 관련 연구가 시급한 실정이다. 따라서 본 연구의 목적은 우리나라 산림의 종 다양성 및 구조적 다양성과 탄소저장량과의 관계를 알아보고 산림의 탄소저장량 증대에 영향을 미치는 생태학적 요인들을 밝히고자 수행되었다.

연구 방법

1. 연구 지역 및 데이터 수집

우리나라 산림의 탄소저장량과 구조적 다양성과의 관계를 분석하기 위하여 환경영향평가서의 식생 조사자료를 활용하였다. 대상 사업은 환경영향평가 정보지원시스템(www.eiass.go.kr)에서 최근 10년간(2014~2023년) 협

Table 1. Allometric equations of tree species.

Species	Allometric equations					Reference
	Components	Equations	a	b	c	
<i>Pinus densiflora</i>	Stem	$W = aD^b$	0.07	2.379		Son <i>et al.</i> , 2011
	Branch	$W = aD^b$	0.001	3.341		
	Leaf	$W = a + bD + cD^2$	1.564	-0.095	0.014	
<i>Quercus variabilis</i>	Stem	$W = a + bD + cD^2$	-51.453	4.913	0.227	Son <i>et al.</i> , 2007
	Branch	$W = a + bD + cD^2$	-8.684	0.121	0.089	
	Leaf	$W = a + bD + cD^2$	-1.598	0.215	0.005	
<i>Quercus mongolica</i>	AGB	$\log W = a + b \log DBH$	2.076	2.579		Son <i>et al.</i> , 2007
<i>Pinus koraiensis</i>	AGB	$\log W = a + b \log DBH$	-0.5432	2.0553		Ryu <i>et al.</i> , 2014
<i>Quercus acutissima</i>	AGB	$\log W = a + b \log DBH$	2.094	2.417		Park and Moon, 1994
Broad-leaved tree	AGB	$\ln W = a + b \ln DBH$	-1.4134	2.4581		Lee, 2003
Needle-leaved tree	AGB	$\ln W = a + b \ln DBH$	-1.047	2.1436		

의된 개발사업 중 산림에서 중점적으로 이루어지는 사업 유형(산지의 개발, 체육시설의 설치, 토석·모래·자갈·광물 등의 채취)에서 선정하였다. 총 82개 개발사업의 환경영향평가서에 제시된 식생조사표 1,109건을 전수 검사하여 Braun-Blanquet (1932) 식물사회학적 방법에 따라 식생조사표가 온전히 작성된 자료를 선별하였다. 그중 조사표 작성 부실, 수기 작성으로 인한 판독 불가, 계획 대상 지역이 개발지인 경우 등은 분석에서 제외하였다. 그 결과, 44개 사업의 환경영향평가서에 제시된 식생조사표 총 553건을 분석에 활용하였다. 식생조사 결과 중 출현 식물 종명, DBH, 조사 지역 행정구역 및 면적 등을 엑셀 프로그램 (Office 365, Microsoft CO.)을 이용하여 수집·정리하였다.

2. 산림의 지상부 탄소저장량 산정

수목의 지상부 탄소저장량을 산정하기 위하여 상대생장식 (Allometric equation)을 활용하였다. 상대생장식은 수목의 흉고직경 (DBH)과 수고 (Height)와 같은 생체정보를 활용하여 산림 훼손 없이 현존량을 측정할 수 있는 방법이다 (Whittaker and Woodwell, 1968). 본 연구에서는 수목 현존량을 산정하기 위하여 해당 수종에 맞는 상대생장식을 찾아 적용하였고, 상대생장식이 확인되지 않는 수종은 분류학적으로 유연관계가 높은 수종의 상대생장식을 활용하였다 (Table 1). 수목의 현존량이 산정되면 탄소 전환계수 0.5 (IPCC, 2006)를 적용하여 산림 지상부의 탄소저장량을 추정하였다.

산림 지상부 탄소저장량은 임상 유형별 (활엽수림, 침엽수림, 혼효림) 및 기원별 (자연림, 인공림)로 구분하여 그 차이를 비교·분석하였다.

3. 종 다양성 (Species diversity) 산정

본 연구에서 종 다양성은 수목을 대상으로 종 풍부도 (S ; Species richness)와 종 다양성 지수 (H' ; Shannon index), 종 균등도 (J' ; Shannon evenness)를 계획별로 산정하였으며 (Magurran, 1988) 이를 지상부 탄소저장량과 구조적 다양성과의 관계 분석에 활용하였다.

4. 식생 구조-종 다양성

(Vegetation structure-species diversity)

일반적으로 식생의 바이오매스 축적은 기후, 지리적 위치 등 외부 요인의 영향을 많이 받는 것으로 알려져 있다 (Tran *et al.*, 2013). 그러나 한편으로 바이오매스는 개체목의 수평적 분포의 다양성과 줄기 직경의 다양성 등과 같은 내부 요인에 의해서도 설명될 수 있다. 이를 기초로 우리나라 산림을 대상으로 지상부 탄소저장량과 종 다양성의 관계를 알아보기 위하여 탄소저장량-종 다양성 지수 (BS ; Biomass-Species diversity index)와 종 풍부도-탄소저장량-종 다양성 지수 (ABS ; Abundance-Biomass-Species diversity index)의 2가지 지수를 산정하였다 (Tran *et al.*, 2013; Martínez-Sánchez *et al.*, 2016). 탄소저장량-종 다

양성 지수(*BS*)는 각 흉고직경급에 대한 지상부 탄소저장량 인수(factor)의 합과 각 흉고직경급에 대한 종 수 인수(factor)의 합을 더한 것이다(식 1).

$$BS = - \sum_{i=1}^d \{p_{AGB_i} \ln(p_{AGB_i}) + p_{S_i} \ln(p_{S_i})\} \quad (1)$$

P_{AGB_i} 는 i 번째 흉고직경급의 지상부 탄소저장량의 비율, P_{S_i} 는 i 번째 흉고직경급의 종 비율 그리고 d 는 흉고직경급의 수를 의미한다. *BS*는 흉고직경급별 지상부 탄소저장량과 종의 비율이 얼마나 고르게 분포하는지 나타낸다.

종 풍부도-탄소저장량-종 다양성 지수(*ABS*)는 각 흉고직경급에 대한 개체 수 인수(factor)와 *BS* 지수와 더한 것이다(식 2).

$$ABS = - \sum_{i=1}^d \{p_{A_i} \ln(p_{A_i}) + p_{AGB_i} \ln(p_{AGB_i}) + p_{S_i} \ln(p_{S_i})\} \quad (2)$$

P_{A_i} 는 i 번째 흉고직경급의 개체수 비율을 의미한다. *ABS*는 *BS*에 흉고직경급별 개체수의 비율이 고르게 분포하는지 나타낸다. 즉, 탄소저장량-종 다양성 지수(*BS*)는 흉고직경급별 지상부 탄소저장량 비율과 종 비율에 의해 산정된 값으로 지수가 높을수록 각 흉고직경급별 종 수와 지상부 탄소저장량이 균등해진다는 것을 의미한다. 종 풍부도-

탄소저장량-종 다양성 지수(*ABS*)는 각 흉고직경급의 종에 *BS*가 더해진 값으로 지수가 높을수록 각 흉고직경급의 종별 개체수와 종 수와 지상부 탄소저장량이 균등해진다는 것을 의미한다.

본 연구에서 흉고직경급(diameter classes)은 5 cm로 단위로 설정하여 지수(*BS*, *ABS*)를 산정하였다.

5. 통계분석

침엽수림, 활엽수림 그리고 혼효림 간 지상부 탄소저장량 비교 및 자연림과 인공림 간 지상부 탄소저장량 차이는 일원분산분석(one-way ANOVA)을 수행하여 분석하였다. 사후검정(Post-hoc)은 Tukey의 HSD(Honestly Significant Difference)로 분석하였다. 다양성 지수(H' , J' , *BS* 그리고 *ABS*)와 지상부 탄소저장량과의 관계는 상관분석(Pearson's correlation coefficient)을 통해 분석하였다. 또한 통계분석은 R프로그램(ver. 4.3.1, www.r-project.org)을 활용하였다.

결과 및 고찰

1. 산림 구조와 수목별 지상부 탄소저장량

연구에 활용된 대상지(44개사업, 553건의 식생조사표)

Table 2. Basal area, above-ground carbon stock, average DBH and tree density each plant community in study areas.

Species	Basal area (m ² ha ⁻¹)	Above-ground carbon stock (MgC ha ⁻¹)	DBH (cm)	Density
			Mean ± S.D.	Trees ha ⁻¹
<i>Pinus densiflora</i>	10.9	27.7	20.4 ± 8.7	282.8
<i>Quercus mongolica</i>	6.0	28.0	16.7 ± 5.8	245.4
<i>Quercus variabilis</i>	5.4	16.3	18.9 ± 5.3	166.6
<i>Pinus rigida</i>	2.3	5.0	17.4 ± 5.2	87.7
<i>Quercus acutissima</i>	2.0	5.7	19.6 ± 5.3	60.8
<i>Castanea crenata</i>	1.3	8.4	18.9 ± 6.6	41.8
<i>Robinia pseudo-acasia</i>	1.3	7.7	15.4 ± 5.3	63.1
<i>Larix kaempferi</i>	1.3	4.0	23.7 ± 6.7	26.5
<i>Quercus serrata</i>	1.0	6.0	17.5 ± 6.2	35.5
<i>Quercus aliena</i>	0.9	5.9	18.9 ± 7.0	28.3
<i>Pinus koraiensis</i>	0.6	1.9	15.8 ± 4.8	29.9
<i>Platycarya strobilacea</i>	0.5	2.8	17.5 ± 4.9	18.1
<i>Pinus thunbergii</i>	0.2	0.5	16.2 ± 4.1	10.4
<i>Salix koreensis</i>	0.2	1.4	14.8 ± 6.4	10.9
<i>Quercus dentata</i>	0.2	1.4	19.6 ± 5.0	6.8
The others (34 species)	2.0	12.1	—	—

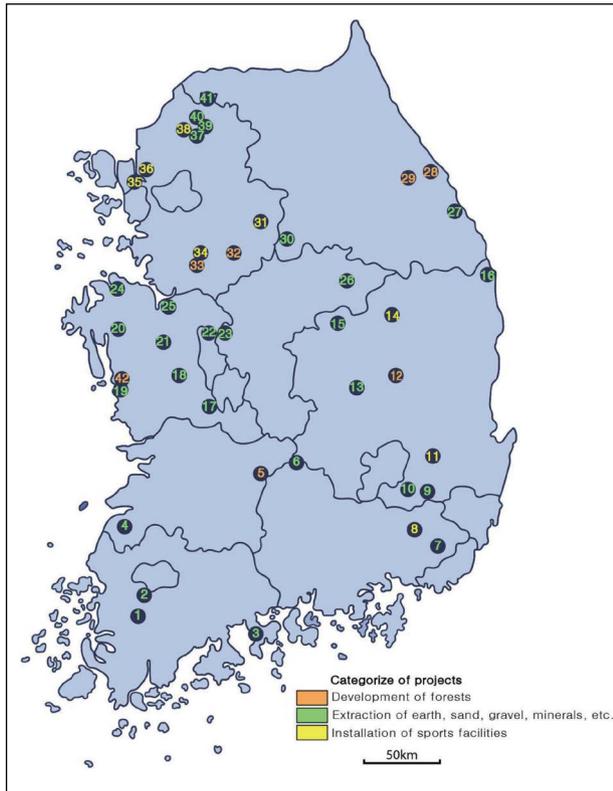


Fig. 1. Geographic location of the study site. The panels show the categorize of projects.

의 총 면적의 합은 5.86 ha, 수목은 6,938주 ($1,184 \text{ trees ha}^{-1}$)로 산정되었으며 단위면적당 기저면적과 지상부 탄소저장량은 각각 $36.0 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$, 134.8 Mg ha^{-1} 로 산정되었다 (Table 2). 수종별 기저면적은 소나무 ($10.9 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$), 신갈나무 ($6.0 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$), 굴참나무 ($5.4 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$), 리기다소나무 ($2.3 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$), 상수리나무 ($2.0 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$), 밤나무 ($1.3 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$) 등의 순이었다. 지상부 탄소저장량은 신갈나무 (28.0 Mg ha^{-1}), 소나무 (27.7 Mg ha^{-1}), 굴참나무 (16.3 Mg ha^{-1}), 밤나무 (8.4 Mg ha^{-1}), 아까시나무 (7.7 Mg ha^{-1}), 상수리나무 (5.7 Mg ha^{-1}) 등의 순이었다. 임목 밀도는 소나무가 $1,657 \text{ 주} (282.8 \text{ trees ha}^{-1})$ 로 가장 많았고 신갈나무 $1,438 \text{ 주} (245.4 \text{ trees ha}^{-1})$, 굴참나무 $976 \text{ 주} (166.6 \text{ trees ha}^{-1})$, 리기다소나무 $514 \text{ 주} (87.7 \text{ trees ha}^{-1})$, 아까시나무 $370 \text{ 주} (63.1 \text{ trees ha}^{-1})$, 상수리나무 $356 \text{ 주} (60.8 \text{ trees ha}^{-1})$ 등의 순이었다. 평균 DBH는 일본잎갈나무가 $23.7 \pm 6.7 \text{ cm}$ 로 가장 컸고 소나무가 $20.4 \pm 8.7 \text{ cm}$, 상수리나무 $19.6 \pm 5.3 \text{ cm}$, 굴참나무 $18.9 \pm 5.3 \text{ cm}$, 밤나무 $18.9 \pm 6.6 \text{ cm}$, 갈참나무 $18.9 \pm 7.0 \text{ cm}$ 등의 순으로 기저면적과 지상부 탄소저장량, 평균 DBH 그리고 밀도는 수종에 따라 다르게 나타났다.

조사 지역에서 우리나라 산림의 주요 우점식물로 판단

되는 소나무와 낙엽성 참나무(상수리나무, 굴참나무, 신갈나무, 갈참나무, 졸참나무, 떡갈나무) 7종의 지상부 탄소저장량은 전체 49종의 지상부 탄소저장량의 약 67.5%를 차지하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 소나무와 낙엽성 참나무는 조사된 전체 개체수의 69.8%, 기저넓이는 73.2% 정도로 가장 많은 비율을 차지하고 있는 것과 관련이 있는 것으로 판단된다. 산림청의 산림임업통계연보 (Korea Forest Service, 2022)에 따르면 우리나라 산림의 참나무류와 소나무 및 해송이 분포하는 지역은 전체 산림 면적의 60.6%를 차지하는 것으로 나타나 소나무와 참나무는 우리나라 산림에서 우점하는 수종으로 나타났다. 또한 산림청에서는 최근 5년간 (2017~2021) 수종별 조림실적을 보면 소나무와 상수리나무를 12,135,000주를 식재하여 편백나무, 낙엽송, 자작나무 등 다른 어느 수종보다도 많이 식재한 것으로 분석되었다 (Korea Forest Service, 2022). 그리고 지리산 국립공원에서 출현하는 식물종의 피도와 구성에 따라 그룹으로 분류한 TWINSpan 결과 유형화되는 주요 4개 군락 중 3개의 군락이 졸참나무-굴참나무군락, 신갈나무군락, 소나무군락으로 나타나 참나무 및 소나무에 의한 우점도가 높은 것으로 분석되었다 (NPRI, 2019). 설악산 국립공원의 경우 확인된 식물군락 20개 중 신갈나무군락, 소나무군락, 신갈나무-소나무군락, 소나무-신갈나무군락이 높은 빈도로 출현하여 신갈나무와 소나무 우점이 확인된 본 연구와 비슷했다 (NPRI, 2020).

2. 산림 유형별 지상부 탄소저장량

우리나라 산림을 혼효림과 활엽수림 그리고 침엽수림으로 구분하여 지상부 탄소저장량을 산정, 비교한 결과 혼효림과 활엽수림이 침엽수림보다 많았고 혼효림과 활엽수림은 차이가 없었다 (Fig. 2A, $p < 0.001$). 그리고 혼효림, 활엽수림 그리고 침엽수림을 각각 자연림과 인공림으로 구분하여 지상부 탄소저장량을 비교한 결과 혼효림에서는 자연림이 더 많았고 활엽수림에서는 인공림에서 더 많았다 (Fig. 2B, $p < 0.05$). 침엽수림에서는 자연림과 인공림 간의 차이가 없었다.

일반적으로 활엽수림은 침엽수림보다 탄소저장량이 높은 것으로 알려져 있으며 생물다양성이 높은 활엽수림에서 탄소저장량이 많은 것으로 보고된 바 있다 (van der Sande *et al.*, 2017). Jo and Ahn (2000)은 경기도 용인시 2영급 이상의 산림에서 활엽수림과 혼효림의 영급별 탄소저장량이 많고 침엽수림의 저장량이 적어 본 연구와 비슷한 경향을 나타냈다. 강원도 산림의 침엽수림과 활엽수림의 탄소저장량을 비교한 연구에서 활엽수림은 더 많은 탄

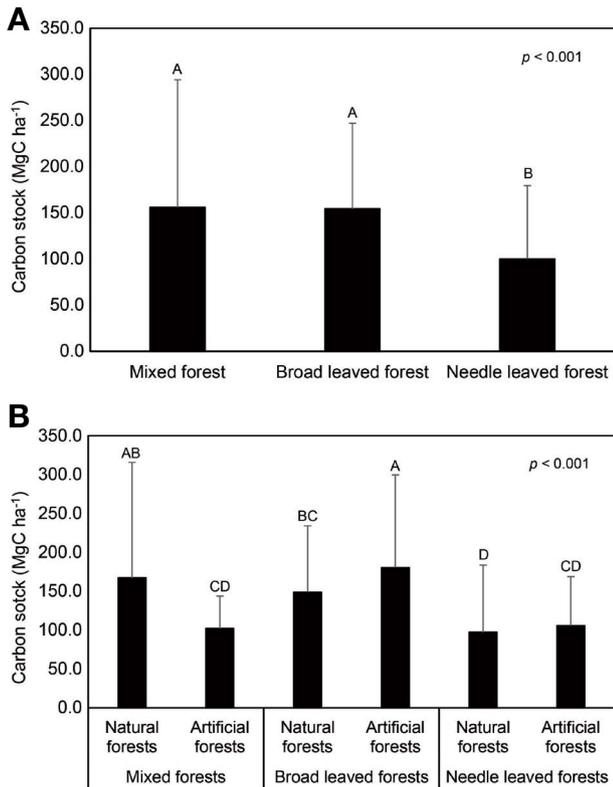


Fig. 2. Compare above-ground carbon stock between forest types. Alphabets on the bars mean significantly different among the forest types.

소를 저장하였다(Lee *et al.*, 2015). 강원도 홍천군 일대 산림(소나무림, 신갈나무림, 잣나무림, 낙엽송림 등)에서 탄소저장량은 활엽수림 (2,956천 Cton), 혼효림 (2,060 천 Cton), 침엽수림 (958 천 Cton) 순으로 많아 본 연구결과와 비슷하였다(Son *et al.*, 2006).

충청북도 소백산 국립공원의 활엽수 및 혼효림의 탄소저장량 (619.49, 625.58 CO₂ ton ha⁻¹)과 경상남도 가야산 국립공원의 활엽수 및 혼효림의 탄소저장량 (619.71, 886.54 CO₂ ton ha⁻¹)은 침엽수림의 탄소저장량보다 더 많은 경향을 나타냈다(NPRI, 2022a, 2022b). 그러나 강원도 치악산, 오대산 그리고 광주광역시 무등산 국립공원의 침엽수림 탄소저장량은 각각 712.16, 489.64, 559.28 CO₂ ton ha⁻¹로 활엽수림이나 혼효림보다 많아 다른 결과를 나타냈다(NPRI, 2021, 2022c, 2022d). 전국 산림의 다양한 연구 사례에서 산림 유형별 탄소저장량은 본 연구와 비슷한 경향을 나타냈지만, 일부 산림에서는 반대의 연구 결과를 나타냈다. 이는 활엽수림과 침엽수림의 탄소저장량에 영향을 미치는 성장속도의 차이, 낙엽 축적량 및 분해속도, 생물 다양성 등 다양한 생태적 요인이 산림의 탄소순환(carbon

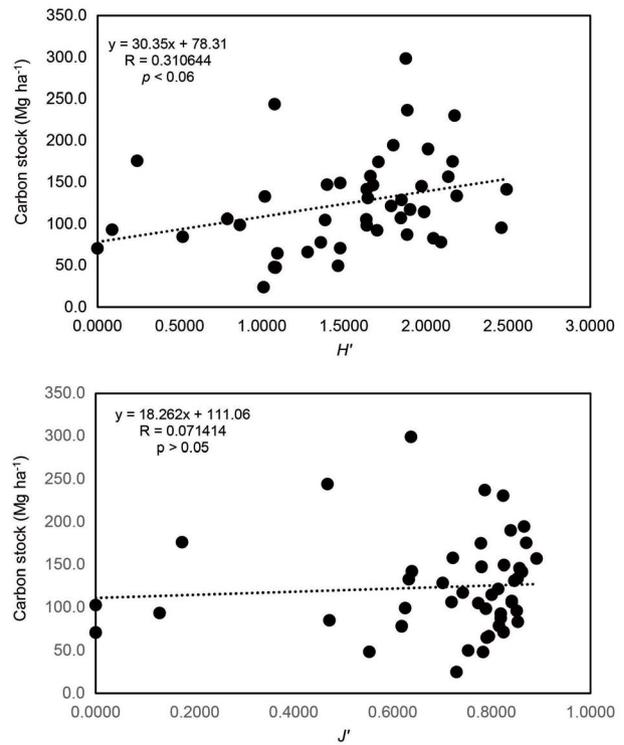


Fig. 3. Relationship between above-ground carbon stock and biodiversity (Shannon index; H' and evenness; J').

cycle)에 영향을 미쳐 나타난 결과로 판단된다. 또한 산림 간벌과 같은 인위적 요인은 산림의 탄소저장량을 감소시키고 회복을 방해하는 것으로 판단된다.

현재까지 다양한 연구를 통해 산림의 생산성은 숲의 종 다양성, 유전적 다양성, 수목밀도, 생장초기 지상부 바이오매스 등과 같은 생물학적 요인과 지리적 구조, 강수량, 연평균 기온, 일사량, 습도, 풍속과 같은 환경적 요인 등 다양한 영향을 받는 것으로 알려졌다(Tang *et al.*, 2022; Salas-Eljatib, 2021; Ouyang *et al.*, 2019; Geng *et al.*, 2021; Siyuan *et al.*, 2021). 따라서 산림 유형 (자연림과 인공림, 혼효림, 활엽수 그리고 침엽수)과 탄소저장량 간의 상호관계(상승 또는 상충작용)에 영향을 미치는 생물학적, 환경적 요인들을 분석하고 작용 원리를 규명하기 위한 장기적인 실험적 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3. 종 다양성과 지상부 탄소저장량과의 관계

종 다양성 지수(H')와 지상부 탄소저장량과의 상관성을 분석한 결과 약한 양의 상관관계가 있는 것으로 나타났으나 통계적 의미는 없었다($p > 0.05$, Fig. 3). 또한 종 균등도(J')와 지상부 탄소저장량과의 상관성을 분석한 결과 상관

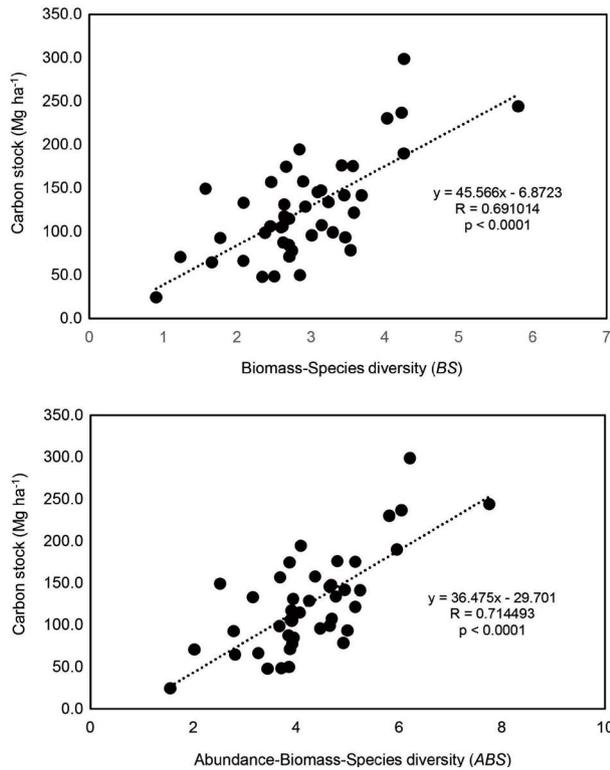


Fig. 4. Relationship between above-ground biomass and measure of structure-species-diversity (*BS* (Biomass-Species diversity) and *ABS* (Abundance-Biomass-Species)).

관계가 없었다 ($p > 0.05$). 일반적으로 생물다양성이 높은 산림은 탄소저장량과 탄소흡수율이 높다고 알려져 있다 (van der Sande *et al.*, 2017). 방글라데시 산림에서 수목의 종 풍부도와 다양성 지수가 높을수록 지상부와 지하부 탄소저장량이 높았고 종 풍부도와 다양성 지수가 1씩 증가할 때마다 탄소저장량은 각각 22, 30 MgC ha^{-1} 이 증가하는 것으로 분석되었다 (Baul *et al.*, 2021). 또한 열대 수종 대상의 실험에서 수목의 다양성과 생산성 간의 관계를 조사한 결과 수종이 다양한 숲에서 생산성과 안정성이 높았고 종 다양성은 생산성에 더 큰 영향을 미쳤다 (Schnabel *et al.*, 2019). 그 밖에도 산림의 종 다양성과 생산성 간의 양의 관계를 밝히는 연구는 다양하다 (Forrester and Bausch, 2016; Bohn and Huth, 2017; Huang *et al.*, 2018).

그러나 위의 전술한 연구 사례들은 자연림을 대상으로 하는 연구들로 본 연구에서 종 다양성과 균등도가 지상부 탄소저장량과 상관성이 없었던 것은 대상 사업들 중 다수 섞여 있는 식재림의 영향 때문으로 판단된다. Staples *et al.* (2019)은 호주의 산림 식재지에서 종 다양성과 지상부 탄소저장량 간에는 상관관계가 없고 지상부 탄소저장량은 현지 환경조건과 식물 밀도로 가장 잘 설명할 수 있다고

하였다. 그리고 Shovon *et al.* (2022)은 온대 식재림에서 15년 동안 균집이 발달하는 동안 종 다양성과 생산성의 관계는 초기 4년간 음의 관계를 나타내었지만 이후 5년 동안 양의 관계로 변화하는 것을 밝혔다. 이러한 현상은 수목이 밀집되고 주변 지역의 다양성에 따라 촉진되는 것으로 분석되었다. 국내의 인공림에서도 식재 후 첫 수십년 동안에는 다양성과 생산성 간의 상관성이 나타나지 않다가 2차 천이가 진행되면서 수목의 균집 구조가 변화하면 양의 상관관계를 보일 것으로 예측된다.

4. 구조적 다양성과 지상부 탄소저장량의 관계

BS 및 *ABS*와 지상부 탄소저장량과 상관관계를 분석한 결과 모두 양의 상관관계 ($R = 0.6901, 0.7145$)를 나타냈다 ($p < 0.0001$). 이 결과는 산림 지상부 탄소저장량의 증가는 수목 직경이 다양하고 직경에 따른 수종의 비율과 개체수가 균등해진다는 것을 의미한다. 그리고 이는 점봉산 신갈 나무군락에서 구조 다양성과 지상부 탄소저장량이 양의 상관관계를 보였던 연구와 같았다 (Jeong *et al.*, 2016). 또한 Crockett *et al.* (2023)은 미국 전역 1,796개 구역에 대한 산림 인벤토리 데이터를 활용하여 연구한 결과, 산림 탄소저장량은 종 다양성보다 구조적 다양성과 더 강한 상관관계가 있음을 발견했고 본 연구결과와 유사했다. 캐나다 가문비나무림의 구조적 다양성과 지상부 탄소저장량의 관계를 분석한 연구에서 임분의 구조적 다양성(수목 직경 및 높이)은 지상부 탄소저장에 긍정적인 영향을 미쳐 탄소저장 능력은 숲의 구조적 다양성이 증가할수록 향상된다고 하였다 (Wang *et al.*, 2011). 그 밖에도 열대림의 노령림, 터키의 소나무군락, 중국 광둥성 산림에서도 탄소저장량은 산림의 구조적 다양성과 관련이 있다고 연구되었다 (Ilker, E. 2018; Wang *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2023).

전술한 연구 사례들을 종합해 보면 탄소저장량에 긍정적인 영향을 미치는 구조적 다양성은 복잡한 산림 구조를 형성하여 산림 내 도달하는 빛의 양을 증가시켜 가용성을 높이고 수목이 산림 내 자원을 더 효율적으로 활용할 수 있도록 해 결과적으로 생산량과 탄소저장 능력을 상승시킨다고 분석된다 (Wang *et al.*, 2011; Crockett *et al.*, 2023). 이러한 분석은 Tilman (1997)의 지위 상보성 이론 (Niche complementarity hypothesis)이 잘 반영된 결과로 판단된다. 지위 상보성 이론은 지위의 분치와 촉진 작용에 의해 종 간 경쟁이 줄어들면서 한정된 자원을 효율적으로 이용하여 생산성이 높아지는 효과를 의미한다. 결과적으로 산림은 천이 과정에 따라 종 다양성과 구조적 다양성이 높아지게 되고 이 과정에서 빛, 수분, 양분, 공간 등 식

물의 생장에 필요한 자원의 이용 효율이 높아져 식물의 생산성과 저장량이 늘어나게 되는 것이다. 본 연구 대상지인 산림은 2차 천이림이거나 조림지로 시간이 지남에 따라 산림의 구조적 다양성과 지상부 탄소저장량 사이의 상관성이 더욱 강해질 것으로 판단되며, 수목의 평균 DBH가 14.8~23.7 cm (Table 2) 것을 고려했을 때 더 많은 탄소를 저장할 수 있는 잠재성이 있을 것으로 판단된다.

한편 매우 드물게 산림의 구조적 다양성과 탄소저장량 사이의 관계가 나타나지 않거나 매우 약한 연구 사례가 있었다. 대규모 열대우림에서 산림 다양성과 탄소저장량 사이에는 유의한 관계가 없었고 1 ha 면적 규모에서 약한 양의 상관관계가 감지되었다. 이는 열대림의 다양성 효과가 규모에 따라 달라질 수 있는 것으로 분석하였다 (Sullivan *et al.*, 2017). 그리고 생물다양성의 경우 앞서 설명한 연구 사례에 따라 지역과 규모에 따라 상관성의 차이가 있을 수 있고 생물다양성이 탄소저장량과 흡수량을 유지하는 필수 요건인지 단순히 도움이 되는 요건인지 명확하게 할 필요가 있다고 하였다 (van der Sande *et al.*, 2017). 따라서 향후 관련 후속 연구를 통하여 구조 다양성 및 종 다양성의 효과를 더욱 정량적으로 평가하고 그 인과성을 설명할 수 있어야 할 것이다.

이 연구는 우리나라 산림의 탄소저장량과 종 다양성 및 구조적 다양성에 대한 특성을 설명하기에 적은 수의 산림 샘플 데이터 (50개 미만, 산림면적 5.86 ha)를 사용한 한계점이 있었다. 그럼에도 본 연구는 현재까지 활용되지 못했던 전국적인 조사 데이터를 활용하여 지상부 탄소저장량과 구조적 다양성을 평가하고자 한 국내 최초의 연구이다. 앞으로는 국내에서 생성되는 유관 기관들의 산림 데이터를 통합·관리하면 더욱 많은 샘플 데이터로 정확도 높은 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 나아가 우리나라에 특화된 산림 생물다양성 및 탄소저장량을 평가할 수 있는 예측 변수를 개발하고 이용할 수 있기를 기대한다 (LaRue *et al.*, 2023).

적 요

우리나라 산림의 지상부 탄소저장량과, 종 다양성 및 구조적 다양성과의 관계를 분석하기 위하여 과거 10년 동안의 환경영향평가 계획에서 조사된 식생조사표를 수집하였다. 이 중 이용 가능한 자료를 선별하여 계획별로 수종, DBH, 면적 등의 자료를 정리하였다. 정리된 자료는 산림 유형별로 구분하고 지상부 탄소저장량을 산정, 비교하였으며 지상부 탄소저장량과 생물종 다양성 및 구조적 다양성과의 상관성을 분석하였다. 분석 결과 산림의 지상부 탄소

저장량은 혼효림과 활엽수림에서 많고 침엽수림에서 적어 기존의 연구와 비슷하였다. 그러나 혼효림에서는 인공림보다 자연림에서 지상부 탄소저장량이 많았으나 활엽수림에서는 인공림이 더 많았고 침엽수림에서는 자연림과 인공림 간의 차이가 없어 뚜렷한 경향성이 없었다. 이는 대상 지역의 생물학적, 환경적 요인 등 다양한 영향에 의한 결과로 탄소저장에 영향을 분석하기 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 생물다양성과 지상부 탄소저장량의 상관성 분석 결과 상관관계가 없었고 구조적 다양성과 지상부 탄소저장량은 중간 정도의 양의 상관관계가 있었다. 이는 산림의 지상부 탄소저장량은 수목의 직경이 다양하고 직경에 따른 수종의 비율과 개체수의 균등도 증가와 관련이 있음을 나타낸다. 그리고 산림의 발달과정에서 종 다양성과 구조적 다양성이 높아지고 식물 생장에 필요한 자원의 이용 효율이 높아져 식물의 생산성과 저장량이 늘어나는 것으로 분석되었다. 본 연구가 수행된 산림은 평균 DBH가 14.8~23.7 cm인 비교적 젊은 산림인 것을 고려했을 때 생물다양성 및 구조적 다양성이 증가함에 따라 탄소저장량도 더욱 많아질 것으로 판단된다. 향후 산림의 탄소저장량 평가 및 증대를 위한 정책적 활용을 위해 탄소 저장량에 대한 다양성의 관계를 정량적으로 평가할 수 있는 기법을 개발하기 위한 많은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

저자정보 정현모 (국립생태원 기후탄소연구팀 연구원), 김의주 (공주대학교 생물학과 연구원), 박재훈 (공주대학교 생물학과 연구원), 김해란 (국립생태원 환경영향평가팀 전임 연구원)

저자기여도 개념설정: 정현모, 김해란, 방법론: 정현모, 김해란, 분석: 정현모, 김해란, 김의주, 박재훈, 자료관리: 정현모, 김해란, 원고 초안작성: 정현모, 김해란, 김의주, 박재훈, 원고 교정: 정현모, 김해란, 김의주, 박재훈, 원고 편집 및 검토: 정현모, 김해란, 김의주, 박재훈

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

연구비 본 논문은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 ICT 기반 환경영향평가 의사 결정 지원 기술개발사업 (No. 2020002990001, RS-2020-KE000948)의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- Anderson, B.J., P.R. Armsworth, F. Eigenbrod, C.D. Thomas, S. Gillings, A. Heinemeyer, D.B. Roy and K.J. Gaston. 2009. Spatial covariance between biodiversity and other

- ecosystem service priorities. *Journal of Applied Ecology* **46**: 888-896.
- Baul, T.K., A. Chakraborty, R. Nandi, M. Mohiuddin, A. Kilpelainen and T. Sultana. 2021. Effects of tree species diversity and stand structure on carbon stocks of homestead forests in Maheshkhali Island, Southern Bangladesh. *Carbon Balance and Management* **16**: 11.
- Bohn, F.J. and A. Huth. 2017. The importance of forest structure to biodiversity-productivity relationships. *Royal Society Open Science* **4**: 160521.
- Braun-Blanquet, J. 1932. Plant Sociology: The Study of Plant Communities. Transl. by G.D. Fuller and H.S. Conard. New York; NY: McGraw-Hill Book Co.
- Buotte, P.C., B.E. Law, W.J. Ripple and L.T. Berner. 2020. Carbon sequestration and biodiversity co-benefits of preserving forests in the western United States. *Ecological Applications* **30**: e02039.
- Crockett, E.T.H., J.W. Atkins, Q. Guo, G. Sun, S.M. Potter, S. Ollinger, C.A. Silva, H. Tang, C.W. Woodall, J. Holgerson and J. Xiao. 2023. Structural and species diversity explain aboveground carbon storage in forests across the United States: Evidence from GEDI and forest inventory data. *Remote Sensing of Environment* **295**: 113703.
- Day, M., C. Baldauf, E. Rutishauser and T.C.H. Sunderland. 2013. Relationships between tree species diversity and above-ground biomass in Central African rainforests: implications for REDD. *Environmental Conservation* **41**: 64-72.
- Forrester, D.I. and J. Bauhus. 2016. A review of processes behind diversity-productivity relationships in forests. *Current Forestry Reports* **2**: 45-61.
- 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.
- Huang, Y., Y. Chen, N. Castro-Izaguirre, M. Baruffol, M. Brezzi, A. Lang, Y. Li, W. Härdtle, G. von Oheimb, X. Yang, X. Liu, K. Pei, S. Both, B. Yang, D. Eichenberg, T. Assmann, J. Bauhus, T. Behrens, F. Buscot, X. Chen, D. Chesters, B. Ding, W. Durka, A. Erfmeier, J. Fang, M. Fischer, L. Guo, D. Guo, J.L.M. Gutknecht, J. He, C. He, A. Hector, L. Höning, R. Hu, A. Klein, P. Kühn, Y. Liang, S. Li, S. Michalski, M. Scherer-Lorenzen, K. Schmidt, T. Scholten, A. Schuldt, X. Shi, M. Tan, Z. Tang, S. Trogisch, Z. Wang, E. Welk, C. Wirth, T. Wubet, W. Xiang, M. Yu, X. Yu, J. Zhang, S. Zhang, N. Zhang, H. Zhou, C. Zhu, L. Zhu, H. Bruelheide, K. Ma, P.A. Niklaus and B. Schmid. 2018. Impact of species richness on productivity in a large-scale subtropical forest experiment. *Science* **362**: 80-83.
- IPCC. 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, prepared by the national greenhouse gas inventories programme, Eggleston, H.S., L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara and K. Tanabe (eds). Publishd: IGES, Japan.
- IPCC. 2018. Summary for Policymakers. In: Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland 32pp.
- IPCC. 2021. Climate change 2021: The physical science basis. In Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Pean, S. Berger, N. Caud *et al.* (eds.), Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press.
- Ilker, E. 2018. Positive effect of forest structural diversity on aboveground stand carbon stocks for even-aged Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands in the Sariçiçek Forest, Northern Turkey. *Scandinavian Journal of Forest Research* **33**: 455-463.
- Jeong, H.M., I. Jang and S. Hong. 2016. Relationship between aboveground biomass and measures of structure and species diversity in *Quercus mongolica*-dominated forest, Mt. Jeombong. *Korean Journal of Environmental Ecology* **30**: 1022-1031.
- Jo, H.K. and T.W. Ahn. 2000. Indicators of carbon storage and uptake by tree growth in natural ecosystem. *Korean Journal of Environmental Ecology* **14**: 175-182.
- Korea Forest Service. 2022. Statistical yearbook of forestry.
- LaRue, E.A., J.A. Knott, G.M. Domke, H.Y. Chen, Q. Guo, M. Hisano, C. Oswald, S. Oswald, N. Kong, K.M. Potter and S. Fei. 2023. Structural diversity as a reliable and novel predictor for ecosystem productivity. *Frontiers in Ecology and the Environment* **21**: 1-60.
- Lee, K.K. 2003. Sustainability indicators of greenspace in apartment sites. Seoul national University. Ph. D. thesis.
- Lee, S.J., J.S. Yim, Y.M. Son and R. Kim. 2015. Estimation of the carbon stock and greenhouse gas removals by tree species and forest types in Gangwon Province. *Journal of Climate Change Research* **6**: 303-310.
- Li, T., X. Wu, Y. Wu and M. Li. 2023. Forest carbon density estimation using tree species diversity and stand spatial structure indices. *Forests* **14**: 1105.
- Liang, J., T.W. Crowther, N. Picard, S. Wiser, M. Zhou, G. Alberti, E.D. Schulze, A.D. McGuire, F. Bozzato, H. Pretzsch, S. de Miguel, A. Paquette, B. Herult, M. Scherer-Lorenzen, C.B. Barrett, H.B. Glick, G.M. Hengeveld, G.J. Nabuurs, S. Pfautsch, H. Viana, A.C. Vibrans, C. Ammer, P. Schall, D. Verbyla, N. Tchebakova, M. Fischer, J.V. Watson, H.Y.H. Chen, X. Kei, M.J. Schelhaas, H. Lu, D. Gianelle, E.I. Parfenova, C. Salas, E. Lee, B. Lee, H.S. Kim, H. Bruelheide, D.A. Coomes, D. Piotta, T. Sunder-

- land, B. Schmid, S. Gourlet-Fleury, B. Sonke, R. Tavani, J. Zhu, S. Brandl, J. Vayreda, F. Kitahara, E.B. Searle, V.J. Neldner, M.R. Ngugi, C. Baraloto, L. Frizzera, R. Balazy, J. Oleksyn, T. Zawila-Niedzwiecki, O. Bouriaud, F. Bussotti, L. Finer, B. Jaroszewicz, T. Jucker, F. Valladare, A.M. Jagodzinski, P.L. Peri, C. Gonamdje, W. Marthy, T. O'Brien, E.H. Martin, A.R. Marshall, F. Rovero, R. Bitariho, P.A. Niklaus, O. Alvarez-Loayza, N. Chamuya, R. Valencia, F. Mortier, V. Wortel, N.L. Engone-Obiang, L.V. Ferreira, D.E. Ideke, R.M. Vasquez, S.L. Lewis and P.B. Reich. 2016. Positive biodiversity-productivity relationship predominant in global forests. *Science* **354**: aaf8957.
- Magurra, A.E. 1988. Ecological diversity and its measurement. Princeton University Press. Princeton N. J.
- Martínez-Sánchez, J.L., B.J. Tigar, L. Cámara and O. Castillo. 2016. Relationship between structural diversity and carbon stocks in humid and sub-humid tropical forest of Mexico. *Ecoscience* **22**: 125-131.
- Mohanta, M.R., A. Mohanta, U. Mohapatra, R.C. Mohanty and S.C. Sahu. 2020. Carbon stock assessment and its relation with tree biodiversity in Tropical Moist Deciduous Forest of Similipal Biosphere Reserve, Odisha, India. *Tropical Ecology* **61**: 497-508.
- NIFOS (National Institute of Forest Science). 2022. Forest and carbon story. *Forest Science Newsflash* 22-07: 1-19.
- NPRI (Korea national park research institute). 2019. Natural Resources Survey in Jiri National Park.
- NPRI (Korea national park research institute). 2020. Natural Resources Survey in Seorak National Park.
- NPRI (Korea national park research institute). 2021. Natural Resources Survey in Odae National Park.
- NPRI (Korea national park research institute). 2022a. Natural Resources Survey in Sobaek National Park.
- NPRI (Korea national park research institute). 2022b. Natural Resources Survey in Gaya National Park.
- NPRI (Korea national park research institute). 2022c. Natural Resources Survey in Chiak National Park.
- NPRI (Korea national park research institute). 2022d. Natural Resources Survey in Mudeung National Park.
- Ouyang, S., W. Xiang, X. Wang, W. Xiao, L. Chen, S. Li, H. Sun, X. Deng, D.I. Forrester, L. Zeng, P. Lei, X. Lei, M. Gou and C. Peng. 2019. Effects of stand age, richness and density on productivity in subtropical forests in China. *Journal of Ecology* **5**: 2266-2277.
- Park, I.H. and G.S. Moon. 1994. Biomass, net production and biomass estimation equations in some natural *Quercus* forests. *Journal of Korean Forest Society* **83**: 246-253.
- Phelps, J., E.L. Webb, W.M. Adams. 2012. Biodiversity co-benefits of policies to reduce forest-carbon emissions. *Nature Climate Change* **2**: 497-503.
- Ryu, D., M. Moon, J. Park, S. Cho, T. Kim and H.S. Kim. 2014. Development of allometric equations for V age-class *Pinus koraiensis* in Mt. Taehwa plantation, Gyeonggi-do. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **16**: 29-38.
- Salas-Eljatib, C. 2021. An approach to quantify climate-productivity relationships: an example from a widespread *Nothofagus* forest. *Ecological Applications* **31**: e02285.
- Schnabel, F., J.A. Schwarz, A. Danescu, A. Fichtner, C.A. Nock, J. Bauhus and C. Potvin. 2019. Drivers of productivity and its temporal stability in a tropical tree diversity experiment. *Global Change Biology* **25**: 4257-4272.
- Seok, H.D. and B.S. Yoon. 2010. Understanding of the UNFCCC REDD+ mechanism and prospect of REDD+ negotiations. Korea rural economic institute Policy research report. p.114.
- Shovon, T.A., S. Kang, M. Scherer-Lorenzen and C.A. Nock. 2022. Changes in the direction of the diversity-productivity relationship over 15 years of stand development in a planted temperate forest. *Journal of Ecology* **110**: 1125-1137.
- Siyuan, R., Q. Yang, H. Liu, G. Shen, Z. Zheng, S. Zhou, M. Liang, H. Yin, Z. Zhou and X. Wang. 2021. The driving factors of subtropical mature forest productivity: Stand structure matters. *Forests* **12**: 998.
- Son, Y.M., K.H. Lee, R.H. Kim and J.H. Seo. 2006. Stand development estimate and carbon stocks/removals assessment using stand growth monitoring. *Journal of Korean Forest Bioenergy* **25**: 42-48.
- Son, Y., D.Y. Kim, I.H. Park, M.J. Yi and H.O. Jin. 2007. Production and nutrient cycling of oak forests in Korea: A case study of *Quercus mongolica* and *Q. variabilis* stands. Kangwon National University Press, 57p.
- Son, Y.M., K.H. Lee and J.K. Pyo. 2011. Development of biomass allometric equations for *Pinus densiflora* in central region and *Quercus variabilis*. *Journal of Agricultural & Life Science* **45**: 65-72.
- Staples, T.L., J.M. Dwyer, J.R. England and M.M. Mayfield. 2019. Productivity does not correlate with species and functional diversity in Australian reforestation plantings across a wide climate gradient. *Global Ecology and Biogeography* **28**: 1417-1429.
- Strassburg, B.N., A. Kelly, A. Balmford, R.G. Davies, H.K. Gibbs, A. Lovett, L. Miles, C.D.L. Orme, J. Price, R.K. Turner and A.S.L. Rodrigues. 2010. Global congruence of carbon storage and biodiversity in terrestrial ecosystems. *Conservation Letters* **3**: 98-105.
- Sullivan, M.J.P., J. Talbot, S.L. Lewis, O.L. Phillips, L. Qie, S.K. Begne, J. Chave, A. Cuni-Sanchez, W. Hubau, G. Lopez-Gonzalez, L. Miles, A. Monteagudo-Mendoza, B. Sonké, T. Sunderland, H. ter Steege, L.J.T. White, K. Affum-Baffoe, S. Aiba, E.C. de Almeida, E.A. de Oliveira, P. Alvarez-Loayza, E.Á. Dávila, A. Andrade, L.E.O. C. Aragão, P. Ashton, G.A. Aymard C., T.R. Baker, M. Balinga, L.F. Banin, C. Baraloto, J. Bastin, N. Berry, J. Bogaert, D. Bonal, F. Bongers, R. Brienen, J.C. Camargo,

- C. Cerón, V.C. Moscoso, E. Chezeaux, C.J. Clark, Á.C. Pacheco, J.A. Comiskey, F.C. Valverde, E.N.H. Coronado, G. Dargie, S.J. Davies, C. De Canniere, M.N. Djuikou K., J. Doucet, T.L. Erwin, J.S. Espejo, C.E.N. Ewango, S. Fauset, T.R. Feldpausch, R. Herrera, M. Gilpin, E. Gloor, J.S. Hall, D.J. Harris, T.B. Hart, K. Kartawinata, L.K. Kho, K. Kitayama, S.G.W. Laurance, W.F. Laurance, M.E. Leal, T. Lovejoy, J.C. Lovett, F.M. Lukasu, J. Makana, Y. Malhi, L. Maracahipes, B.S. Marimon, B.H. Marimon Junior, A.R. Marshall, P.S. Morandi, J.T. Mukendi, S. Muginzi, R. Nilus, P.N. Vargas, N.C.P. Camacho, G. Pardo, M. Peña-Claros, P. Pétronelli, G.C. Pickavance, A.D. Poulsen, J.R. Poulsen, R.B. Primack, H. Priyadi, C.A. Quesada, J. Reitsma, M. Réjou-Méchain, Z. Restrepo, E. Rutishauser, K.A. Salim, R.P. Salomão, I. Samsuodin, D. Sheil, R. Sierra, M. Silveira, J.W.F. Slik, L. Steel, H. Taedoung, S. Tan, J.W. Terborgh, S.C. Thomas, M. Toledo, P.M. Umunay, L.V. Gamarra, I.C.G. Vieira, V.A. Vos, O. Wang, S. Willcock and L. Zemagho. 2017. Diversity and carbon storage across the tropical forest biome. *Scientific report* **7**: 39102.
- Tang, T., N. Zhang, F.J. Bongers, M. Staab, A. Schuldt, F. Fornoff, H. Lin, J. Canender-Bares, A.L. Hipp, S. Li, Y. Liang, B. Han, A. Klein, H. Bruelheide, W. Durka, B. Schmid, K. Ma and X. Liu. 2022. Tree species and genetic diversity increase productivity via functional diversity and trophic feedback. *Elife* **11**: e78703.
- Tilman, D., J. Knops, D. Wedin, P. Reich, M. Ritchie and E. Siemann. 1997. The influence of functional diversity and composition on ecosystem processes. *Science* **277**: 1300-1302.
- Tran, V.C., T.T. Nguyen, T.T.H. Do, C.C. Khiem, H.Q. Tran, T.L. Vu, V.D. Tran and S. Tamotsu. 2013. Relationship between aboveground biomass and measures of structure and species diversity in tropical forests of Vietnam. *Forest Ecology and Management* **310**: 213-218.
- van der Sande, M.T., L. Poorter, L. Kooistra, P. Balvanera, K. Thonicke, J. Thompson, E.J.M. Arets, N.G. Alaniz, L. Jones, F. Mora, T.H. Mwampamba, T. Parr and M. Peña-Claros. 2017. Biodiversity in species, traits, and structure determines carbon stocks and uptake in tropical forests. *Biotropica* **49**: 593-603.
- Wang, G., Y. Liu, X. Wi, D. Pang, X. Yang, A. Hussain and J. Zhou. 2020. Stand Structural Diversity and Species with Leaf Nitrogen Conservation Drive Aboveground Carbon Storage in Tropical Old-Growth Forests. *Forests* **11**: 994.
- Wang, W., X. Lei, Z. Ma, D.D. Kneeshaw and C. Peng. 2011. Positive relationship between aboveground carbon stocks and structural diversity in spruce-dominated forest stands in New Brunswick, Canada. *Forest Science* **57**: 506-515.
- Whittaker, R.H. and G.M. Woodwell. 1968. Dimension and production relations of trees and shrubs in the Brookhaven Forest. *New York Journal of Ecology* **56**: 1-25.