

상수리나무, 신갈나무, 졸참나무, 굴참나무 임분의 임목 바이오매스와 토양 탄소 저장량

이상태¹ · 정상훈¹ · 김춘식^{2*}

¹국립산림과학원 산림기술경영연구소, ²경상국립대학교 환경산림과학부

Carbon Stocks in Tree Biomass and Soils of *Quercus acutissima*, *Q. mongolica*, *Q. serrata*, and *Q. variabilis* stands

Sang Tae Lee¹, Sang Hoon Chung¹ and Choonsig Kim^{2*}

¹Forest Technology and Management Research Center, National Institute of Forest Science, Pocheon 11186, Korea

²Division of Environmental and Forest Science, Gyeongsang National University, Jinju 52725, Korea

요약: 본 연구는 낙엽활엽수종인 참나무류 중 상수리나무, 굴참나무, 신갈나무, 졸참나무 4개 수종을 대상으로 임목 바이오매스 및 토양 탄소 저장량을 비교하였다. 2016년부터 2021년 사이 전국 경제림 단지에 분포하는 상수리나무 110개소, 신갈나무 177개소, 졸참나무 96개소, 굴참나무 148개소 등 총 531개소를 대상으로 임분 현황을 조사하고 토양 A층과 B층의 탄소 농도를 분석하였다. 임목 바이오매스의 탄소 저장량은 평균 임령 57년생인 신갈나무 임분이 144.9 Mg C ha⁻¹, 43년생인 굴참나무 임분 123.7 Mg C ha⁻¹, 43년생인 졸참나무 임분 120.1 Mg C ha⁻¹, 36년생인 상수리나무 임분 113.2 Mg C ha⁻¹ 순이었다. 토양 탄소 농도는 신갈나무 임분의 A층이 43.1 mg C g⁻¹로 졸참나무 임분 31.0 mg C g⁻¹, 굴참나무 임분 25.3 mg C g⁻¹, 상수리나무 임분 24.4 mg C g⁻¹에 비해 유의적으로 크게 나타났다. 토양 탄소 저장량은 신갈나무 임분이 116.8 Mg C ha⁻¹로 타 참나무류 임분에 비해 가장 높고, 상수리나무 임분은 49.3 Mg C ha⁻¹로 가장 낮은 값을 보였다. 총 탄소 저장량은 신갈나무 임분 262 Mg C ha⁻¹, 졸참나무 임분 218 Mg C ha⁻¹, 굴참나무 임분 211 Mg C ha⁻¹, 상수리나무 임분 163 Mg C ha⁻¹ 순이었으며 해발고, 임령, 평균 흉고직경, 평균 수고, 흉고단면적이 증가함에 따라 탄소 저장량도 증가하는 경향을 보였다. 조사된 4개 수종의 총 탄소 저장량은 흉고단면적과 해발고 같은 설명 변수를 이용한 다중 회귀모델에 의해 유의적인($P < 0.05$) 추정 가능하였다.

Abstract: We compared carbon stocks in tree biomass and soils of *Quercus acutissima*, *Q. mongolica*, *Q. serrata*, and *Q. variabilis* stands. A total of 531 plots (*Q. acutissima*: 110 plots, *Q. mongolica*: 177 plots, *Q. serrata*: 96 plots, *Q. variabilis*: 148 plots) were examined between 2016 and 2021 to determine the tree biomass and soil carbon stocks throughout the country. The carbon stocks of tree biomass were significantly higher in *Q. mongolica* (mean stand age, 57 years, 144.9 Mg C ha⁻¹) than in *Q. variabilis* (mean stand age, 43 years, 123.7 Mg C ha⁻¹), *Q. serrata* (mean stand age, 43 years, 120.1 Mg C ha⁻¹), and *Q. acutissima* (mean stand age, 36 years, 113.2 Mg C ha⁻¹) stands. The soil carbon concentration was significantly higher in *Q. mongolica* (A: 43.1 mg C g⁻¹) than in *Q. serrata* (31.0 mg C g⁻¹), *Q. variabilis* (25.31 mg C g⁻¹), and *Q. acutissima* (24.4 mg C g⁻¹) stands. The soil carbon stocks were significantly higher in *Q. mongolica* (116.8 Mg C ha⁻¹) than in *Q. acutissima* (49.3 Mg C ha⁻¹) stands. Total carbon stocks of tree biomass and soil were highest in *Q. mongolica* (262 Mg C ha⁻¹), followed by *Q. serrata* (218 Mg C ha⁻¹), *Q. variabilis* (211 Mg C ha⁻¹), and *Q. acutissima* (163 Mg C ha⁻¹) stands. Multiple linear regressions were performed to estimate the total carbon stocks of the four *Quercus* spp., and results showed that total carbon stocks increased with increasing elevation, mean diameter at breast height, and basal areas. Basal area and elevation of *Quercus* spp. stands were important explanatory variables based on multiple linear regressions for estimating carbon stocks.

Key words: biomass carbon, organic carbon concentration, forest soils, oaks, carbon stocks, soil carbon

* Corresponding author
E-mail: ckim@gnu.ac.kr

ORCID
Choonsig Kim  <https://orcid.org/0000-0002-3263-1187>

서론

대기의 이산화탄소를 흡수 저장할 수 있는 능력을 가진 산림생태계의 탄소 저장량 추정에는 임목이나 토양의 탄소 저장 능력 향상을 위한 국가적인 정책 수립에 중요한 의미를 갖는다(Bispo et al., 2017; Wellbrock et al., 2017; Lee et al., 2018; Kasper et al., 2021). 일반적으로 임목의 지상부 및 지하부 탄소 저장량은 임목의 수확, 수간석해나 탄소 함량비 측정 등을 통해 계산된다(Yue et al., 2018). 그러나 임목의 수확과 수간석해에 많은 비용과 인력이 필요하기 때문에, 다수의 연구가 임목의 흉고직경, 수고, 줄기-뿌리 비율, 바이오매스 상대생장식 등을 이용하여 임목의 지상부 및 지하부 탄소 저장량을 추정하고 있다(Wellbrock et al., 2017; Lee et al., 2018). 한편 토양 탄소 저장량은 지형, 해발고, 경사도, 방위 등 입지 속성과 토양으로의 유기물 유입량, 유기물의 화학적 특성 등 식생 종류에 따라 변이를 보인다(Li et al., 2010). 뿐만아니라, 토양 탄소 저장량은 그 공간적 변이가 크게 나타나, 입지 속성과 식생 특성을 이용한 추정의 신뢰성이 임목 탄소 저장량 추정보다 낮은 것으로 알려져 있다(Merabtene et al., 2021).

2015년에 조사된 제6차 전국산림자원조사 결과에 따르면 우리나라 산림면적 617만ha 중 활엽수 임분의 면적은 203만ha이며, 이 중 상수리나무, 굴참나무, 졸참나무, 신갈나무와 같은 참나무류 임분은 77만ha로 전체 활엽수류의 약 38%를 차지하고 있는 것으로 알려져 있다(Lee et al., 2018). 한편 우리나라 참나무류 임분의 임목 바이오매스 탄소 저장량에 관한 연구로 굴참나무 임분의 지상부 탄소 저장량은 $90.3 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (Son et al., 2012), 신갈나무 임분의 지상부와 지하부 탄소 저장량은 138 Mg C ha^{-1} (Lee et al., 2019) 등이 보고된 바 있다. 토양 탄소 저장량 관련 연구로는 전국 산림을 대상으로 추정된 0~50cm 깊이의 토양 탄소 저장량은 상수리나무와 신갈나무 임분이 64 Mg C ha^{-1} , 굴참나무 임분은 $57.0 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 정도였다(Lee et al., 2018). 그러나 대부분 연구 결과가 탄소 저장량에 영향을 미칠 수 있는 입지나 임분 속성은 거의 포함하고 있지 않으며, 탄소

저장량 추정 모델도 제시되지 않고 있다.

본 연구는 우리나라 대표적 낙엽활엽수종인 상수리나무, 굴참나무, 신갈나무, 졸참나무 임분을 대상으로 임목 바이오매스 및 토양에 저장된 탄소 저장량을 비교하고, 해발고, 임령, 평균 흉고직경, 흉고단면적 같은 입지 및 임분 속성을 이용한 탄소 저장량 추정 모델의 제시를 목적으로 하고 있다.

재료 및 방법

본 연구를 위한 조사구는 경제림 육성단지를 중심으로 임상도(1:5,000)와 GIS 자료 및 기존 문헌자료를 통해 참나무류의 주요 분포 현황을 파악하고, 수종별 점유비율 75% 이상임분을 영급 및 입지환경을 고려하여 조사 대상지를 선정하였다. 2016년에서 2021년까지 6개년 간 조사한 표본수는 상수리나무 110개소, 신갈나무 177개소, 졸참나무 96개소, 굴참나무 148개소 등 총 531개소였으며, 10개소 이하가 조사된 떡갈나무와 갈참나무는 분석에서 제외하였다. 조사구는 반경 11.3 m의 원형 표본 조사구(400 m^2)를 사면 경사 및 방위 등을 고려하여 구획하였으며, 지황(지형, 경사, 석력, 토양 등)과 임황(수종, 흉고직경, 수고 등)을 조사하였다. 지상부 임목 바이오매스는 임목수간제적표를 이용하여(Korea Forest Service and National Institute of Forest Science, 2021), 각 조사구의 임목 재적을 계산한 후 국가 온실가스 정보센터(Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea, 2016)에 등록된 LULUCF 분야 상수리나무, 굴참나무, 신갈나무, 졸참나무의 목재 기본 밀도, 바이오매스 확장계수, 지상부와 지하부 뿌리 비율 계수를 이용하여(Table 1) 임목 바이오매스를 계산하였다. 임목 바이오매스의 탄소량은 온대림 임목의 탄소 농도 디폴트 값 0.47을 이용하여(IPCC, 2006) 환산하였다.

토양 탄소 저장량은 조사구의 중심 부분에 가로 80 cm, 세로 80 cm에 모재층 깊이까지 토양 단면을 제작하고 A층과 B층을 구분한 후 각 층위 깊이 및 단면 조사를 실시하였다. 토양 탄소 분석을 위한 시료는 각 층위로부터 500 g

Table 1. Carbon emission factors of four different oak species reported in Greenhouse Gas Inventory and Research Center in Korea (Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea, 2016).

Species	Basic wood density (Mg m^{-3})	Biomass expansion factors	Ratio of root biomass to aboveground biomass
<i>Q. acutissima</i>	0.72	1.45	0.31
<i>Q. mongolica</i>	0.66	1.60	0.39
<i>Q. serrata</i>	0.66	1.55	0.43
<i>Q. variabilis</i>	0.72	1.34	0.32

정도의 토양을 채취하여 실험실로 운반하고, 2주 이상 음건한 후 2 mm 체로 선별하여 토양 분석용 시료를 조제하였다. 토양 시료의 탄소 농도는 Walkley-Black 방법(Kalra and Maynard, 1991)에 의해 측정하였다. 본 연구에서는 토양 층위의 용적밀도 시료가 채취되지 않아 Park et al. (2021)이 제안한 모래 함량과 층위 깊이로 부터 광물질 토양의 용적밀도를 계산하고(Equation 1), 유기물 함량 등을 이용하여 각 층위별 토양 용적밀도를(Equation 2) 추정하였다.

$$BD_{min} = 1.017 + 0.0032 \times \text{sand} (\%) + 0.054 \times \log(\text{mean depth, cm}) \quad (1)$$

$$\text{Bulk density (g cm}^{-3}\text{)} = 100 / [(OM/BD_{OM}) + (100 - OM)/BD_{min}] \quad (2)$$

(BD_{min}: bulk density of mineral soil; OM: organic matter content (%); BD_{OM}: bulk density of organic matter, 0.224 g cm⁻³)

토양 각 층위의 석력 함량은 토양단면 조사의 석력함량비를 이용하였다. 토양 탄소량은 토양 탄소 농도, 토양 용적밀도, 토양 시료 채취 깊이, 석력함량의 용적비를 이용하여 [토양 탄소저장량 = 토양 탄소 농도 × 토양 용적밀도 × 토심 × (1 - 용적 석력비)] 계산하였다(Poelau et al., 2017).

본 연구로부터 수집된 자료 중 해발고나 경사 같은 입지 요인이나 임령, 임분밀도, 평균 흉고직경 등과 같은 임분 현황, 토심, 토양 탄소 농도 및 탄소 저장량 등과 같은 토양 현황의 임분 간 비교는 SAS의 일반선형모형에 의해 유의성을 검정하였으며, 유의적인 차이가 있을 경우 Tukey 방법에 의해 사후 분석을 실시하였다(SAS Institute, 2003).

임분별 총 탄소 저장량 추정식은 해발고, 평균 흉고직경, 평균 수고, 흉고단면적 등을 이용하여 단계적 회귀분석에 의한 설명변수를 선별하였다. 설명변수 선택은 SAS의 디폴트 값인 P<0.15로 설정하였으며, 모델 선정에 위한 회귀식의 유의수준은 P<0.05였다(SAS Institute, 2003).

결 과

본 연구에서 조사된 참나무류 4개 수종의 평균 해발고는 신갈나무 임분이 667 m로 가장 높게 나타났으며 상수리나무 임분이 166m로 가장 낮았다. 경사는 굴참나무나 신갈나무 임분은 30° 정도의 급경사지에 주로 분포하였으며, 상수리나무와 졸참나무 임분은 25° 범위였다. 평균 임령은 신갈나무 임분이 57년으로 가장 높았고 상수리나무 임분이 36년으로 가장 낮았다(Table 2). 임분 밀도는 굴참나무 임분이 852본 ha⁻¹로 가장 높았으며, 졸참나무 임분은 527본 ha⁻¹로 가장 낮았다. 평균 흉고직경과 평균 수고는 졸참나무 임분이 각각 24.7 cm와 14.4 m로 타 참나무류 임분에 비해 유의적으로 크게 나타났으나, 나머지 굴참나무, 신갈나무, 상수리나무 임분의 평균 흉고직경과 수고는 유의적인 차이가 없었다. 흉고단면적과 임분 재적은 신갈나무 임분이 각각 30.0 m² ha⁻¹와 210 m³ ha⁻¹로 상수리나무, 굴참나무, 졸참나무 임분에 비해 가장 크게 나타났다.

토양단면 조사 결과 A층의 토심은 졸참나무 임분이 20 cm로 가장 깊게 나타난 반면, B층은 졸참나무 임분이 41 cm로 가장 얇았다. 전 토심은 상수리나무 임분이 51cm로 타 참나무류에 비해 얇게 나타났다. 토양 용적밀도는 신갈나무 임분, 석력함량은 졸참나무나 굴참나무 임분이 상수리나무 임분에 비해 높았다(Table 3).

Table 2. General stand attributes in four different oak stands.

Stand	No. of plot	Elevation (m)	Slope (°)	Stand age (yrs)	Stand density (tree ha ⁻¹)	DBH (cm)	Height (m)	Basal area (m ² ha ⁻¹)	Volume (m ³ ha ⁻¹)
<i>Q. acutissima</i>	110	166±8c (27~431)*	24.8±0.7b (8~39)	36±1.1c (12~82)	766±31a (250~2,000)	19.82±0.45b (8.8~33.8)	13.7±0.2ab (8.9~21.0)	24.7±0.8b (7.6~53.0)	176±6.2b (19.4~333)
<i>Q. mongolica</i>	177	667±21a (91~1,268)	29.1±0.5a (13~42)	57±1.2a (28~92)	819±22a (225~2,150)	21.31±0.37b (9.3~36.6)	13.3±0.2b (8.0~17.6)	30.0±0.7a (10.5~60.7)	210±5.7a (65.2~431)
<i>Q. serrata</i>	96	317±20b (13~807)	26.1±0.8b (4~41)	43±1.0b (19~80)	527±22b (250~1,400)	24.74±0.75a (11.6~47.6)	14.4±0.2a (9.5~20.5)	26.2±1.1b (10.4~69.9)	174±7.4b (58.6~455)
<i>Q. variabilis</i>	148	340±14b (28~890)	30.4±0.3a (4~49)	43±0.8b (21~77)	852±33a (175~2,166)	20.35±0.39a (9.6~32.2)	13.3±0.2b (6.6~18.9)	27.2±0.7b (6.2~52.1)	207±8.5a (21.2~497)
Mean		411±12 (13~1,268)	28.0±0.3 (4~49)	46±0.6 (12~92)	765±15 (175~2,166)	21.3±0.24 (9~48)	13.5±0.1 (7~21)	27.3±0.4 (6~70)	195±3.6 (19~497)

*Mean±standard error (min~max). Different letters among stands represent a significant difference at P<0.05.

Table 3. Soil depth, bulk density, coarse fraction, sand content, and soil organic matter of A and B horizons in four different oak stands.

Stand	Soil depth (cm)		Bulk density (g cm ⁻¹)		Coarse fraction (%)		Sand content (%)		Soil organic matter (%)	
	A horizon	B horizon	A horizon	B horizon	A horizon	B horizon	A horizon	B horizon	A horizon	B horizon
<i>Q. acutissima</i>	6±2c*	45±1.7ab	1.01±0.003a	1.01±0.004a	7±0.3b	21±1.3b	57.3±1.9a	57.9±1.9a	4.26±0.2b	1.97±0.2c
<i>Q. mongolica</i>	15±1b	43±1.5b	0.97±0.005b	0.97±0.005b	9±0.4b	23±1.1b	49.6±1.3b	51.4±1.2b	7.48±0.4a	3.97±0.2a
<i>Q. serrata</i>	20±1a	41±1.5b	1.02±0.001a	1.02±0.001a	15±1.3a	25±1.8ab	50.5±1.3b	50.4±1.3b	5.36±0.3b	2.93±0.2b
<i>Q. variabilis</i>	14±1b	48±1.7a	0.99±0.005a	0.97±0.006a	15±1.0a	29±1.3a	50.5±1.5b	48.7±1.4b	4.55±0.2b	3.41±0.2ab

*Mean±standard error. Different letters among stands represent a significant difference at $P < 0.05$.

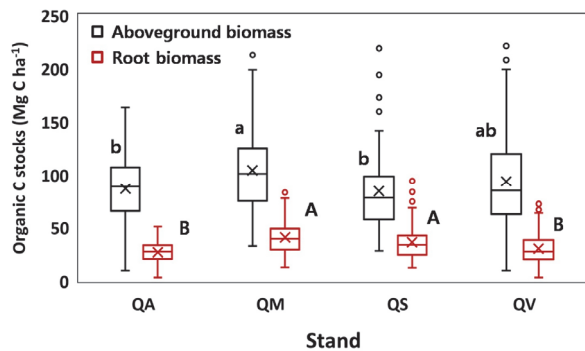


Figure 1. Organic carbon stocks of aboveground and root biomass in four oak stands (QA: *Q. acutissima*, QM: *Q. mongolica*, QS: *Q. serrata*, QV: *Q. variabilis*). The box represents the median and the 25th and 75th percentiles, × represents the arithmetic mean, the solid lines extend to 1.5 of the interquartile range and the values outside this range are indicated by circles. Different small and capital letters on the bar represent a significant difference in aboveground and root biomass, respectively, among four different oak stands at $P < 0.05$.

임목 바이오매스에 의한 지상부 탄소 저장량은 신갈나무 임분이 104.3 Mg C ha⁻¹로 상수리나무 임분 86.5 Mg C ha⁻¹나 졸참나무 임분 84.1 Mg C ha⁻¹에 비해 유의적으로 높게 나타났다(Figure 1). 그러나 지하부 뿌리 탄소 저장량은 신갈나무 임분이 40.6 Mg C ha⁻¹, 졸참나무 임분이 36.1 Mg C ha⁻¹로 유의적인 차이가 없었으나, 굴참나무 임분의 30 Mg C ha⁻¹이나 상수리나무 임분 26.8 Mg C ha⁻¹에 비해 유의적으로 높은 값을 보였다(Figure 1).

토양 탄소 농도는 신갈나무 임분의 A층이 43.1 mg C g⁻¹, B층이 22.8 mg C g⁻¹로 A층은 졸참나무 임분 31.0 mg C g⁻¹, 굴참나무 임분 25.3 mg C g⁻¹, 상수리나무 임분 24.4 mg C g⁻¹이나, B층의 굴참나무 임분 17.0 mg C g⁻¹과 상수리나무 임분 11.4 mg C g⁻¹에 비해 유의적으로 높았다(Figure 2). 토양 탄소 저장량은 탄소 농도와 유사한 경향을 보여 A층은 신갈나무 임분이 57.9 Mg C ha⁻¹로 굴참나무 임분의

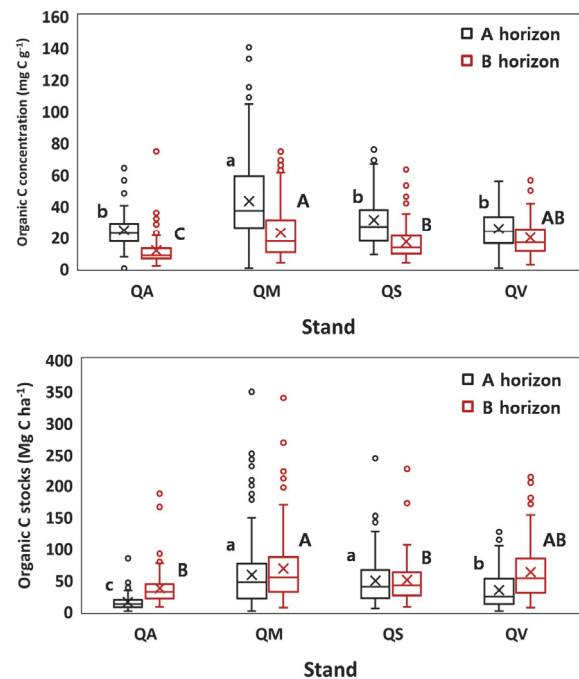


Figure 2. Soil organic carbon concentration and stocks of A and B horizons in four different oak stands (QA: *Q. acutissima*, QM: *Q. mongolica*, QS: *Q. serrata*, QV: *Q. variabilis*). The box represents the median and the 25th and 75th percentiles, × represents the arithmetic mean, the solid lines extend to 1.5 of the interquartile range and the values outside this range are indicated by circles. Different small and capital letters on the bar represent a significant difference in A and B horizons, respectively, among four different oak stands at $P < 0.05$.

33.8 Mg ha⁻¹나 상수리나무 임분의 14.7 Mg C ha⁻¹에 비해 유의적으로 높았다. B층의 경우도 신갈나무 임분이 67.2 Mg C ha⁻¹로 졸참나무 임분 49.6 Mg C ha⁻¹나 상수리나무 임분 36.7 Mg C ha⁻¹에 비해 유의적으로 높았다(Figure 2).

임목 바이오매스의 지상부와 뿌리의 탄소 저장량은 신갈나무 임분이 144.9 Mg C ha⁻¹로 굴참나무 임분 123.7 Mg C ha⁻¹, 졸참나무 임분 120.1 Mg C ha⁻¹, 상수리나무

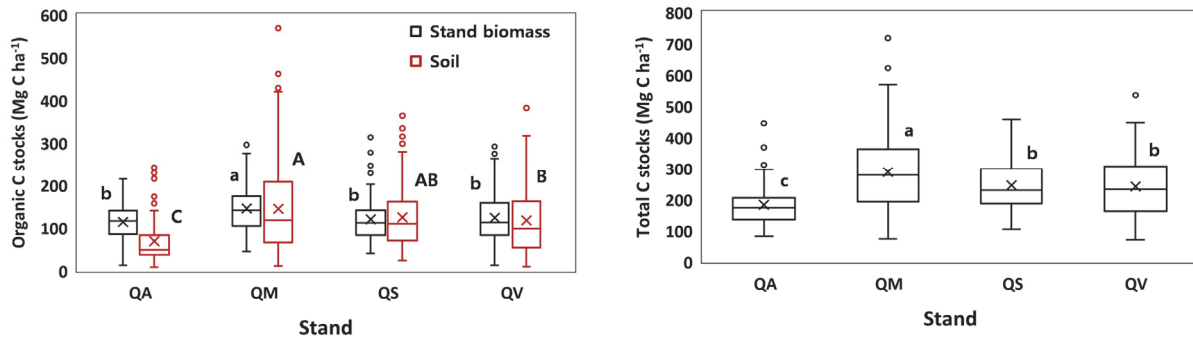


Figure 3. Total organic carbon stocks of stand biomass and soils at A and B horizons in four different oak stands (QA: *Q. acutissima*, QM: *Q. mongolica*, QS: *Q. serrata*, QV: *Q. variabilis*). The box represents the median and the 25th and 75th percentiles, × represents the arithmetic mean, the solid lines extend to 1.5 of the interquartile range and the values outside this range are indicated by circles. Different small and capital letters on the bar represent a significant difference in stand biomass and soil, respectively, among four different oak stands at $P < 0.05$.

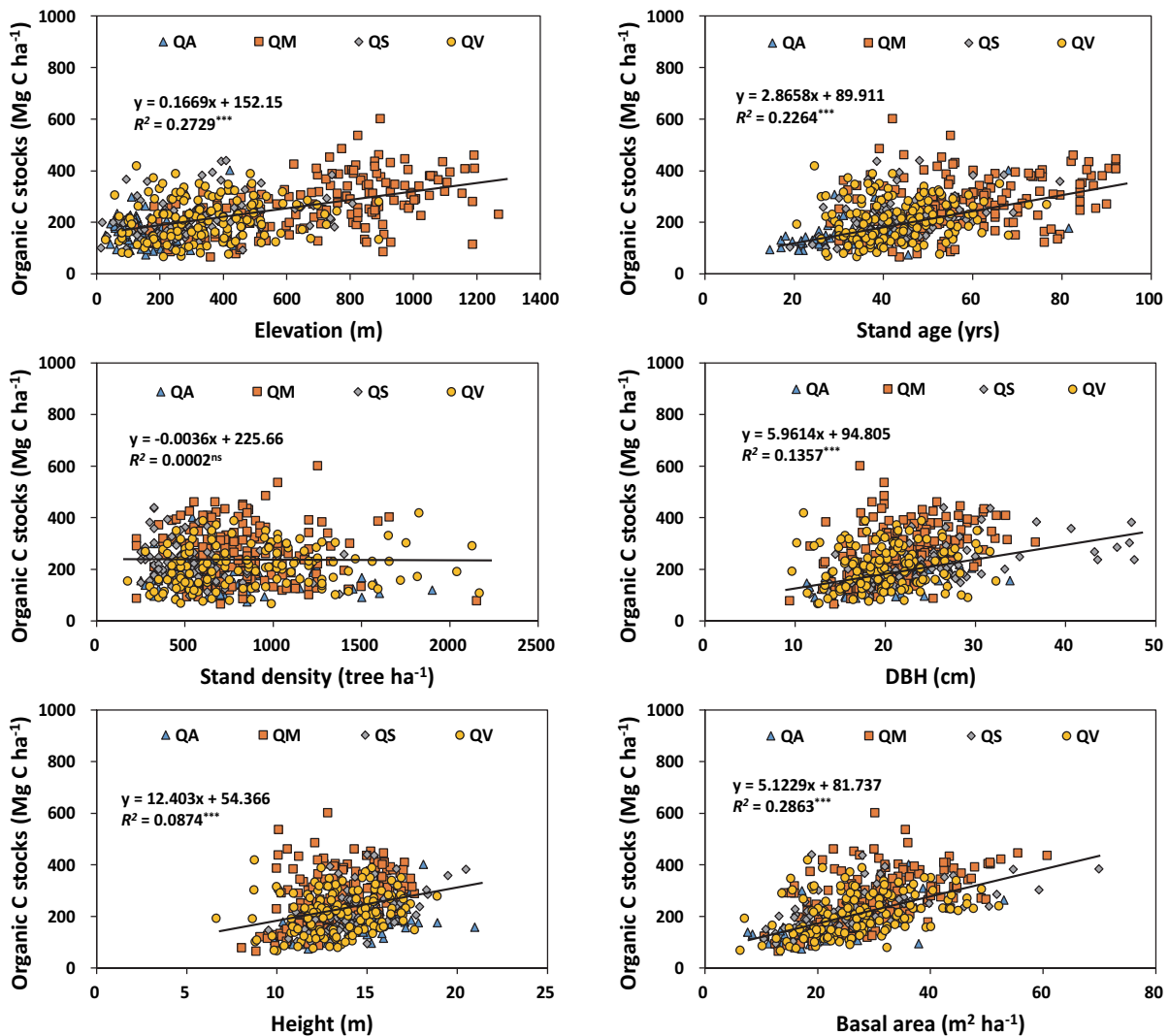


Figure 4. Relationships between total organic carbon stocks and stand parameters in four different oak stands (QA: *Q. acutissima*, QM: *Q. mongolica*, QS: *Q. serrata*, QV: *Q. variabilis*). ***: $P < 0.001$, ns: non-significant.

Table 4. Multiple regression equations to estimate total organic carbon stocks (tree biomass and soil carbon stocks) of four different oak stands.

Stand	Regression coefficient	R ²	P-value
<i>Q. acutissima</i> (n=82)	Total organic C stocks = -108.02+0.9975×(elevation, m)+1.0067 ×(stand age, yrs)+9.7136×(mean height, m)+3.4359×(basal area, m ² ha ⁻¹)	0.58	<0.0001
<i>Q. mongolica</i> (n=175)	Total organic C stocks = -54.80+0.1523×(elevation, m)+7.2014×(mean height, m)+3.9931×(basal area, m ² ha ⁻¹)	0.50	<0.0001
<i>Q. serrata</i> (n=96)	Total organic C stocks = 91.0428+0.08034×(elevation, m)+3.8991 ×(basal area, m ² ha ⁻¹)	0.40	<0.0001
<i>Q. variabilis</i> (n=139)	Total organic C stocks = 74.4868+4.5632×(mean height, m)+2.8800 ×(basal area, m ² ha ⁻¹)	0.13	<0.0001
Total (n=495)	Total organic C stocks = -16.2337+0.1308×(elevation, m)+6.4144 ×(mean height, m)+3.5033×(basal area, m ² ha ⁻¹)	0.45	<0.0001

임분 113.2 Mg C ha⁻¹에 비해 유의적으로 높았다(Figure 3). 토양의 A층과 B층의 탄소 저장량은 신갈나무 임분이 116.8 Mg C ha⁻¹로 굴참나무 임분 98.3 Mg C ha⁻¹와 유의적인 차이는 없었으나 상수리나무 임분 49.3 Mg C ha⁻¹에 비해 유의적으로 크게 나타났다(Figure 3). 임목 바이오매스와 토양 탄소 저장량을 합한 총 탄소 저장량은 신갈나무 임분 262 Mg C ha⁻¹, 졸참나무 임분 218 Mg C ha⁻¹, 굴참나무 임분 211 Mg C ha⁻¹, 상수리나무 임분 163 Mg C ha⁻¹ 순이었다(Figure 3).

조사된 4개 수종의 흉고단면적, 해발고, 평균 흉고직경 등의 설명변수를 이용하여 다중회귀 분석 결과 회귀식의 유의성이 인정되었으며($P<0.05$), 유의적인 총 탄소 저장량 추정이 가능한 것으로 나타났다(Figure 4). 다중회귀식의 설명력은 상수리나무가 0.58로 가장 높게 나타났으며, 굴참나무는 0.13으로 가장 낮았다. 조사한 4개 수종 전체를 포함하는 총 탄소 저장량 추정식의 설명력은 0.45로서 졸참나무 임분이나 굴참나무 임분의 수종별 추정식의 설명력보다 높았다(Table 4). 조사한 4개 수종의 임목 바이오매스와 토양의 총 탄소 저장량과 해발고, 임령, 임분 밀도, 평균 흉고직경, 평균 수고, 임분 흉고단면적의 관계를 조사한 결과, 흉고단면적, 해발고, 임령 등의 증가에 따라 총 탄소 저장량도 선형 증가 경향을 보였다(Figure 4).

고 찰

참나무류는 우리나라에 가장 많이 분포하는 낙엽활엽 수종으로 식생이나 토양에 많은 양의 탄소를 저장하고 있는 것으로 알려져 있으나(Jeong et al., 1998; Lee et al., 2018) 수종 간 탄소 저장량의 직접적인 비교나 그에 기여

하는 요인에 대한 것은 잘 알려져 있지 않다. 본 연구 결과에 따르면 임목 바이오매스 탄소 저장량은 신갈나무 임분이 가장 높았으며, 이는 신갈나무 임분이 평균 VI영급으로 IV영급의 상수리나무, V영급의 졸참나무나 굴참나무 임분에 비해 높았기 때문으로 사료된다. 유사한 결과로 중국에서 조사된 갈참나무나 굴참나무 임분의 임목 바이오매스 탄소 저장량도 임령의 증가와 밀접한 관련이 있는 것으로 보고된 바 있다(Yue et al., 2018). 한편, 신갈나무 임분의 임분 축적은 210 m³ ha⁻¹로 굴참나무 임분의 축적 207 m³ ha⁻¹과 큰 차이가 없었으나 임목 바이오매스에 의한 탄소 저장량은 유의적인 차이를 보였다. 이는 본 연구에서 임목 바이오매스 탄소 저장량 추정에 사용된 목재 기본 밀도가 굴참나무 0.72 g cm⁻³, 신갈나무 0.66 g cm⁻³, 바이오매스 확장계수는 신갈나무 1.60, 굴참나무 1.34임을 고려할 때 두 임분 사이 임목 바이오매스에 의한 탄소 저장량은 목재 기본 밀도 보다는 바이오매스 확장계수가 기여하고 있는 것으로 나타났다. 타 연구에서도 임목 바이오매스 탄소 저장량은 목재 기본 밀도나 바이오매스 확장계수(Kang et al., 2015; Lee et al., 2019), 간벌이나 가지치기 같은 산림작업, 임령, 지형 같은 입지 환경 요인 등에 따라 다양한 변이를 보이는 것으로 보고되고 있다(Yue et al. 2018; Pandey et al., 2019). 본 연구에서 조사된 신갈나무 임분의 임목 바이오매스 탄소 저장량은 제6차 국가산림자원조사(2011~2014)로부터 얻어진 신갈나무 임분의 탄소 저장량 138.88 Mg C ha⁻¹(Lee et al., 2019)과 큰 차이가 없었다. 한편 졸참나무 임분의 지상부 탄소 저장량은 120.2 Mg C ha⁻¹, 굴참나무 임분의 지상부 탄소 저장량 93.7 Mg C ha⁻¹로 타 연구에서 조사된 졸참나무 V영급의 임목 바이오매스에 의한 탄소 저장량 125.8 Mg C ha⁻¹

(Kang et al., 2015)이나, 굴참나무 임분의 지상부 탄소 저장량 $90.3 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (Son et al., 2012)과 비교할 때 큰 차이는 없었다. 본 연구 결과에 따르면 참나무류 4개 수종의 평균 임목 바이오매스 탄소 저장량은 128 Mg C ha^{-1} 로 우리나라 활엽수 임분의 평균 임목 바이오매스 탄소 저장량 $87.46 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 보다(Chun et al., 2019)는 높아 참나무류 임분의 탄소 저장 능력은 국내 활엽수 임분의 평균 값보다 높은 것으로 나타났다.

토양 탄소 농도는 신갈나무 임분의 A층과 B층이 타 참나무류에 비해 가장 높았다. 이는 신갈나무 임분의 평균 해발고도가 667 m로 타 참나무류의 평균 해발고도 166~340 m에 비해 높아 낮은 토양 온도로 인하여 유기물 분해가 느리게 진행되어 탄소 농도가 높게 나타났기 때문일 수 있다(Merabtene et al., 2021). 신갈나무 임분과는 대조적으로 상수리나무 임분의 B층 토양 탄소 농도는 11.4 mg C g^{-1} 로 조사된 참나무류 중 가장 낮은 값을 보였다. 이는 상수리나무 임분이 저해발 산지에 주로 분포하여 토양 온도가 타 참나무류에 비해 높아 유기물 분해가 빠르게 진행되었거나, 오랜 기간 전통마을 숲으로 이용되어(Kim and Kim, 2017), 낙엽 채취 같은 인위적인 교란에 의한 물질 순환이 빈약하게 진행되었기 때문으로 사료된다. 한편 A층의 탄소 농도가 B층에 비해 높은 것은 산림토양에서 나타나는 일반적인 현상이다(Jeong et al., 2002) 지상부로부터 유입되는 낙엽·낙지, 죽은 가지나 줄기 같은 분해 잔재, 표토에 주로 분포하는 세균 등이 유입량이 많기 때문으로 사료된다. 본 연구에서 조사된 참나무류 임분의 토양 탄소 농도는 평균 24.8 mg C g^{-1} 로 국내 참나무류 임분의 평균 탄소 농도 17.0 mg C g^{-1} 에서 25.3 mg C g^{-1} (Lee et al., 2018) 범위에 분포하였다.

토양 탄소 저장량은 수종 간 차이가 있었으며, 이는 참나무류의 분포나 생육 입지 등이 다양하고(Kim and Kim, 2017) 특히 수종의 차에 따른 유기물의 양적·질적 특성이 토양 탄소 저장량에 영향을 미치고 있기 때문으로 사료된다(Pandey et al., 2019; Merabtene et al., 2021). 본 연구에서 조사된 4개 수종의 평균 토양 탄소 저장량은 약 94 Mg C ha^{-1} 로 국가 산림자원조사의 0~50cm 깊이에 상수리나무 임분 $64.30 \text{ Mg C ha}^{-1}$, 신갈나무 임분 $64.02 \text{ Mg C ha}^{-1}$, 굴참나무 임분 $57.09 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (Lee et al., 2018)이나 산림토양 중 활엽수 임분의 평균 토양 탄소량 $55.68 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 보다는(Chun et al., 2019) 높게 나타났다. 이는 토양 탄소 저장량 추정에 중요 변수인 토양 용적밀도나 석력 함량의 차가 기여하고 있는 것으로 사료된다. 본 연구에서의 토양 용적밀도는 직접 측정이 아닌 추정식으로부터 계산되어 어느 정도 불확실성을 포함하고 있으나, 국

내 산림토양의 A층과 B층의 평균 토양용적밀도 0.88 g cm^{-3} 과 1.01 g cm^{-3} 에 비해(Jeong et al., 2002) A층은 약간 높고 B층은 유사하였다. 석력함량은 A층이 11%, B층이 24%로 국가산림자원조사의 평균 석력함량 32%(Lee et al., 2018) 보다는 낮게 나타났다. 그러나 본 연구 결과는 1980년대 전국 420개의 토양단면으로부터 조사된 참나무류 임분 0~63 cm 깊이의 토양 탄소 저장량 95 Mg C ha^{-1} (Jeong et al., 1998)와는 차이가 없었다.

해발고, 흉고직경, 평균 수고, 흉고단면적 같은 입지 및 임분의 속성변수를 이용하여 총 탄소 저장량 추정을 위한 다중회귀식을 개발한 결과 흉고단면적은 조사한 4개 수종 및 일괄 다중회귀식에 가장 중요한 설명변수였다. 이는 흉고단면적의 경우 바이오매스 탄소 저장량과 해발고는 토양 탄소 저장량과 관련이 있었기 때문으로 사료된다. 한편, 회귀식의 설명력은 굴참나무가 가장 낮았으며 이는 이 수종이 주로 급경사지의 토심이 얇고 척박한 입지와 교란에 의한 이차림에 주로 분포(Kim and Kim, 2017)하여 변수 간 변이 폭이 크기 때문으로 사료된다.

산림에서 쉽게 측정이 가능한 해발고, 임령, 임분 밀도, 평균 흉고직경, 평균 수고, 흉고단면적과 총 탄소 저장량과의 관계를 조사한 결과, 임분 밀도를 제외한 흉고단면적, 해발고, 임령 등의 증가와 함께 총 탄소 저장량도 증가하였다. 입지 속성인 해발고의 증가에 따른 총 탄소 저장량의 증가 경향은 해발고의 차이에 따라 임목의 생장이나 유기물의 분해와 관계되는 온도와 습도의 영향이 크게 나타날 수 있기 때문으로 알려져 있다(Merabtene et al., 2021). 유사한 결과로 해발고 증가는 일본 산악지대 너도밤나무 및 자작나무 임분의 토양 탄소 저장량 증가와 밀접한 관계가 관찰된 바 있다(Li et al., 2010). 그러나 임분 밀도는 총 탄소 저장량과 유의적인 관계가 나타나지 않았으며, 이는 간벌이나 숲가꾸기 같은 인위적인 요인에 의해 임분 밀도의 변이 폭이 크게 나타날 수 있기 때문으로 사료된다.

결론

상수리나무, 신갈나무, 졸참나무, 굴참나무 임분을 대상으로 임목 바이오매스와 토양에 저장된 탄소 저장량은 수종별 차이가 있었다. 주로 높은 해발고와 임령이 높았던 신갈나무 임분의 탄소 저장량이 크게 나타났으며, 낮은 해발고에 위치하여 유기물의 분해나 인위적인 교란이 심하였을 것으로 사료되는 상수리나무 임분은 탄소 저장량이 낮았다. 임목 바이오매스와 토양에 저장된 총 탄소 저장량 증가는 해발고와 같은 입지 속성이나 흉고단면적, 흉고직

경, 임령 등과 같은 성장 속성과 유의적인 관계를 보였으나 임분 밀도와는 뚜렷한 관계가 없었다. 본 연구에서 제시된 다중회귀식은 해발고도, 흉고단면적, 임령, 평균 수고 등과 같은 입지 및 임분속성을 이용하여 수종별 총 탄소 저장량 추정에 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국립산림과학원 산림기술경영연구소의 “활엽수림의 고부가가치 이용 및 유형별 관리기술 개발” 과제(SC0500-2018-10)의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Bispo, A., et al. 2017. Accounting for carbon stocks in soils and measuring GHGs emission fluxes from soils: Do we have the necessary standards? *Frontiers in Environmental Science* 5: 41.
- Chun, J., Kim, C.K., Kang, W., Park, H., Kim, G. and Lee, W.K. 2019. Sustainable management of carbon sequestration service in areas with high development pressure: considering land use changes and carbon costs. *Sustainability* 11(18): 5116.
- Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Korea. 2016. National Greenhouse Gas Inventory Report 2016. Seoul.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. and Tanabe, K. (Eds.). IPCC/OECD/IEA/IGES, Hayama, Japan.
- Jeong, J.H., Kim, C. and Lee, W.K. 1998. Soil organic carbon content in forest soils of Korea. *FRI Journal of Forest Science* 57: 178-183.
- Jeong, J.H., Koo, K.S., Lee, C.H. and Kim, C. Physico-chemical properties of Korean forest soils by regions. *Journal of Korean Forestry Society* 91(6): 694-700.
- Kalra, Y.P. and Maynard, D.G. 1991. Methods Manual for Forest Soil and Plant Analysis. Forestry Canada, Northwest Region, Northern Forestry Centre, Edmonton, Alberta. Information Report NOR-X-319E. pp. 116.
- Kang, J.T., Son, Y.M., Jeon, J.H. and Yoo, B.O. 2015. Estimation of carbon stock by development of stem taper equation and carbon emission factors for *Quercus serrata*. *Journal of Climate Change Research* 6(4): 357-366.
- Kasper, J., Weigel, R., Walentowski, H., Gröning, A., Petritan, A.M. and Leuschner, C. 2021. Climate warming-induced replacement of mesic beech by thermophilic oak forests will reduce the carbon storage potential in aboveground biomass and soil. *Annals of Forest Science* 78: 89.
- Kim, Y.H. and Kim, J.W. 2017. Distributional uniqueness of deciduous oaks (*Quercus L.*) in the Korean Peninsula. *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology* 20(2): 37-59.
- Korea Forest Service and National Institute of Forest Science. 2021. Tree Volume, Biomass and Stand Yield Table. Research Note of National Institute of Forest Science No. 979. pp. 373.
- Lee, S.J., Ko, C.U., Yim, J.S. and Kang, J.T. 2019. A study on the application of a new stem volume table to estimate forest carbon stock in South Korea. *Journal of Climate Change Research* 10(4): 463-471.
- Lee, S.J., Yim, J.S., Son, Y.M., Son, Y. and Kim, R. 2018. Estimation of forest carbon stocks for national greenhouse gas inventory reporting in South Korea. *Forests* 9(10): 625.
- Li, P., Wang, Q., Endo, T., Zhao, X. and Kakubari, Y. 2010. Soil organic carbon stock is closely related to aboveground vegetation properties in cold-temperate mountainous forests. *Geoderma* 154(3-4): 407-415.
- Merabtene, M.D., Faraoun, F., Mlih, R., Djellouli, R., Latreche, A. and Bol, R. 2021. Forest soil organic carbon stocks of Tessala Mount in North-West Algeria-preliminary estimates. *Frontiers in Environmental Science* 8: 520284.
- Pandey, A., Arunachalam, K., Thadani, R. and Singh, V. 2019. Forest degradation impacts on carbon stocks, tree density and regeneration status in banj oak forests of Central Himalaya. *Ecological Research* 35(1): 208-218.
- Park, S.J., Kwon, S.I., Kim, S.H., Lee, Y.H., Sim, J. and Oh, T.K. 2021. Estimation of soil organic carbon (SOC) stock in south Korea using digital soil mapping technique. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 54(2): 247-256.
- Poepplau, C., Vos, C. and Don, A. 2017. Soil organic carbon stocks are systematically overestimated by misuse of the parameters bulk density and rock fragment content. *Soil* 3(1): 61-66.
- SAS Institute Inc. 2003. SAS/STAT Statistical Software. Version 9.1 SAS publishing Cary, NC.
- Son, Y.M., Pyo, J.K., Kim, S.W. and Lee, K.H. 2012. Prediction of stand volume and carbon stock for *Quercus variabilis* using Weibull distribution model. *Journal of Korean Society of Forest Science* 101(4): 599-605.
- Wellbrock, N., Grüneberg, E., Riedel, T. and Polley, H. 2017. Carbon stocks in tree biomass and soils of German forests.

Central European Forestry Journal 63(2-3): 105-112.
Yue, J.W., Guan, J.H., Yan, M.J., Zhang, J.G., Deng, L., Li, G. and Du, S. 2018. Biomass carbon density in natural oak forests with different climate conditions and stand ages in northwest China. Journal of Forest Research 23(6): 354-362.

Manuscript Received : July 17, 2022

First Revision : August 5, 2022

Accepted : August 8, 2022