

신규 입목수간재적표를 활용한 삼나무 및 편백 임분의 온실가스 흡수량 추정

이민우^{1,2} · 이선정¹ · 유중원¹ · 강진택¹ · 이영진² · 고치웅^{1*}

¹국립산림과학원 산림ICT연구센터, ²국립공주대학교 산림학과

Estimating Greenhouse Gas (GHG) Removal by *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* Stands Using New Stem Volume Tables

Min Woo Lee^{1,2}, Sun Jeoung Lee¹, Joung Won You¹, Jin Taek Kang¹,
Young Jin Lee² and Chi Ung Ko^{1*}

¹Forest ICT Research Center, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

²Department of Forest science, Kongju National University, Yesan 32439, Korea

요약: 본 연구의 목적은 삼나무와 편백 임분을 대상으로 신규 입목수간재적표 적용이 임목축적, 탄소저장량 및 온실가스 흡수량에 미치는 영향을 정량적으로 평가하여 국내 온실가스 인벤토리 개선방안을 제시하는 것이다. 탄소저장량과 온실가스 흡수량을 산정하기 위해 제6차, 7차 국가산림자원조사에서 동일하게 유지되는 부표본점의 임목축적 자료를 활용하였다. 신규 입목수간재적표 적용에 따른 임목축적의 변화를 평가하고자, 2009년(Ver.1)과 2021년(Ver.2)에 개발된 입목수간재적표 내 Kozak(1988) 모수를 이용하였다. 입목수간재적표 Ver.2는 Ver.1에 개발되지 않았던 삼나무를 포함하여 16개 수종으로 확대·개발하였고, 과거 부재하였던 흉고직경 30 cm 이상 대경목 정보를 반영하였다. 삼나무와 편백 임분의 임목축적을 산출한 결과, 입목수간재적표 Ver.2를 적용했을 때 Ver.1보다 높게 나타났으며, 통계적으로 유의한 차이($p < 0.001$)가 나타났다. 이러한 결과는 개선된 신규 입목수간재적표를 적용할 때, 온실가스 흡수량이 약 22%(삼나무림), 13%(편백림) 증가할 수 있음을 의미한다. 임목축적 산출방법이 개선됨에 따라 IPCC 가이드라인에 적합한 통계를 산출하기 위해 산림부문 온실가스 통계 재계산이 필요할 것으로 판단된다.

Abstract: The aim of this study was to quantitatively evaluate a new stem volume table for estimating the growth, carbon storage, and greenhouse gas (GHG) absorption in *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* stands and to provide suggestions for improving the domestic GHG inventory. Carbon storage and GHG absorption were estimated using growing stock data obtained from invariable sub-sample plots between the 6th and 7th national forest inventories. We assessed changes in growing stock using the parameters employed by Kozak (1988) and Versions 1 and 2 of the stem volume table. Version 2 has new stem tables for 16 species, including *Cryptomeria japonica*, which were unavailable in Version 1. Version 2 also includes new data for trees with diameters at breast height equal to or greater than 30 cm. We found greater growing stock values using Version 2 than Version 1 for both stands, and the differences were statistically significant ($p < 0.001$). Applying the new stem volume table increased GHG absorption by 22% for the *Cryptomeria japonica* stand and 13% for the *Chamaecyparis obtusa* stand. The growing stock estimation method used in this study should therefore be applied to re-estimate GHG absorptions in the forestry sector to produce accurate statistics for the IPCC guidelines.

Key words: carbon stock, *Chamaecyparis obtusa*, *Cryptomeria japonica*, greenhouse gas inventory, stem volume table

서론

* Corresponding author
E-mail: kocu0603@korea.kr

ORCID

Chi Ung Ko  <https://orcid.org/0000-0001-6706-5624>

산림은 기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change; UNFCCC)에서 인정하는 이산화탄소를 흡수·저장하는 온실가스 감축 수단이다(UNFCCC,

2016). 우리 정부는 2015년 파리협정에서 합의한 신기후 체제에 대응하고자 2050 탄소중립을 선언하였다. 이에 2050 탄소중립 이행현황을 파악하기 위해 측정(Measurement), 보고(Reporting), 검증(Verification) 체계에 따라 정확하고 신뢰도 높은 통계를 산출할 필요가 있다(Kang et al., 2022). 국제적으로도 온실가스 인벤토리를 평가할 때 일관성, 투명성, 정확성, 완전성, 비교가능성 원칙을 준수해야 하며, 온실가스 감축량과 이행실적 파악을 위한 국제적 검증을 받아야 한다(IPCC, 2006; UNFCCC, 2022).

우리나라는 산림부문 온실가스 인벤토리의 기초자료를 수집하고자 전국 산림을 대상으로 국가산림자원조사(National Forest Inventory; NFI)를 수행하고 있다(Shin et al., 2022). 수집한 자료는 국가산림자원정보시스템(National Forest Information System; NFIS) 임목자원평가프로그램에 의해 임목축적으로 산출되며, 탄소저장량 및 온실가스 흡수량 산정에 활용된다. 그러나, 임목자원평가프로그램은 2009년 임목수간재적표를 준용하여 임목축적을 산출하고 있기 때문에 현 시점의 임분을 평가하기에는 한계가 있다.

2009년 임목수간재적표는 총 8수종(침엽수 6수종, 활엽수 2수종)을 대상으로 개발되었다(KFS, 2009). 또한, 약 40년 전에 조사한 자료를 기반으로 작성하여 현재의 성숙한 임목자원을 평가하기에 무리가 있다고 판단되며(Seo et al., 2015; Son et al., 2017), 중·장령급 임목의 표본이 미흡하기 때문에 통계적으로 과소 또는 과대 추정할 우려가 있다(Kang and Ko, 2020).

이를 개선하고자 산림청과 국립산림과학원은 임목수간재적표 현행화 사업을 통해 「2021 임목재적·바이오매스 및 임분수확표」를 제시하였다(NIFoS, 2021). 2021 임목수간재적표는 총 16수종(침엽수 8수종, 활엽수 7수종, 대나무)에 대해 전국적으로 약 1,000본 이상의 표본을 확보하여 새롭게 개발하였다. 그러나 신규 임목수간재적표는 이상의 장점이 있음에도 불구하고 국가산림자원정보시스템 내 임목자원평가프로그램에는 여전히 적용되지 않은 실정이다. 우리나라 강원지역을 대상으로 신규 임목수간재적표 효과를 분석한 선행연구에서도 신규 임목수간재적표가 장령림이 된 우리나라 현실 임분을 추정하기에 적합하며, 국가산림자원정보시스템 임목자원평가프로그램 내 신규 임목수간재적표 적용의 중요성을 시사하였다(Lee et al., 2019). 또한, 선행연구는 강원지방소나무, 일본잎갈나무, 신갈나무를 대상으로 수행하였기 때문에 타 수종에 대해서도 검토할 필요가 있다고 보고하였다.

삼나무와 편백은 주로 제주도와 남부지역에 분포하였으나, 지구온난화로 인해 평균기온이 상승하면서 내륙지역

으로 분포범위가 점차 확대되고 있다(Chang et al., 1998; Jeong et al., 2010; Jung et al., 2020). Park et al.(2006)은 기후변화로 인하여 제주도는 아열대 기후, 중부지방은 제주도와 같은 기후가 될 것으로 전망하였으며, 두 수종의 강원도 해안지역 식재가능성을 검토한 연구에서도 생육 환경이 적합하다고 보고한 바 있다(Son et al., 2014). 또한, 삼나무는 건축자재로써 가치가 우수하고, 편백은 건축자재와 산림휴양, 산림치유 등 산림복지 측면에서 사회적 요구가 높기 때문에 두 수종의 자원을 정확하게 평가하는 것은 매우 중요하다(Kim et al., 2009; Kim et al., 2011; Lee et al., 2011). 하지만, 편백과 삼나무의 2009년 임목수간재적표는 1987년에 조사한 자료를 기반으로 개발하였기 때문에 2021년 신규 임목수간재적표를 적용함으로써 신규 임목수간재적표 효과에 대해서도 검토할 필요가 있다(Ko et al., 2020).

따라서 본 연구는 국가 온실가스 통계의 정확도와 신뢰도를 향상시키기 위해 삼나무와 편백 임분을 대상으로 신규 임목수간재적표 적용이 임목축적, 탄소저장량 및 온실가스 흡수량에 미치는 영향을 정량적으로 분석하여 온실가스 인벤토리 개선방안을 제시하고자 한다.

재료 및 방법

1. 연구자료

국가산림자원조사는 계통추출법에 의해 전국 산림을 대상으로 임분현황, 임목자원, 벌근 및 고사목 등을 조사하여 산림자원 통계를 작성하는 데 활용하고 있다. 국가산림자원조사 조사지침에 따르면 대표수종은 부표본점 조사구 내 출현한 임목의 흉고단면적 합계에서 가장 많은 점유율을 보이는 수종으로 선정한다(KFS and KOFPI, 2017). 본 연구는 제6차(2011~2015년) 및 7차(2016~2020년) 국가산림자원조사에서 수집된 자료 중 대표수종이 삼나무(*Cryptomeria japonica*)와 편백(*Chamaecyparis obtusa*)인 부표본점을 연구자료로 사용하였다.

탄소저장량과 온실가스 흡수량의 연간 변화량을 파악하기 위해 제6차 및 7차 국가산림자원조사에서 동일하게 유지되는 부표본점은 삼나무림 61 Plot, 편백림 56 Plot으로 나타났다. 연구자료의 임분현황은 Table 1과 같으며, 삼나무 및 편백 임분은 주로 남부지방과 제주도에 분포하는 것으로 나타났다(Figure 1).

2. 임목수간재적표에 의한 임목축적 산출

온실가스 인벤토리의 기초자료인 임목축적은 국가산림자원정보시스템 임목자원평가프로그램 내 임목수간재적

Table 1. Descriptive statistics of *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* stands (mean ± standard error).

Species	Category	Plot	DBH (cm)	Height (m)	Age class	Stand density (n/ha)
<i>Cryptomeria japonica</i>	6 th NFI	61	22.29 ± 0.64	13.29 ± 0.35	IV III – VI	1,494.06 ± 90.29
	7 th NFI	61	25.41 ± 0.37	14.72 ± 0.30	V III – VI	1,446.11 ± 93.24
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	6 th NFI	56	18.49 ± 0.96	11.61 ± 0.46	III I – V	1,241.52 ± 94.49
	7 th NFI	56	22.18 ± 0.81	13.05 ± 0.42	IV I – V	1,285.49 ± 74.35

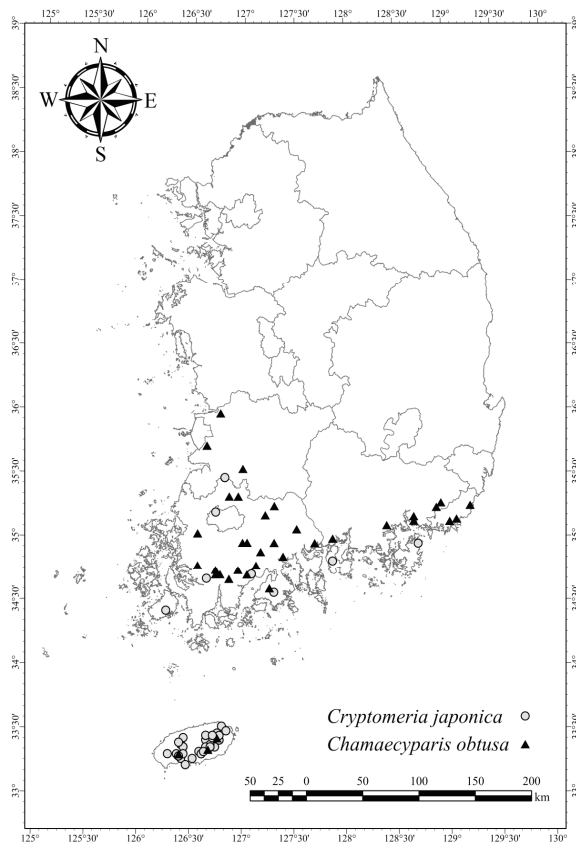


Figure 1. Distribution of sub-plots in *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* stands.

표를 활용하여 부표본점의 임목축적을 산출한 뒤, 단위면적당 임목축적으로 환산하여 추정한다(KFRI, 2011) (식 1). 또한, 온실가스 통계는 국가산림자원조사 부표본점의 모든 수종의 임목 축적을 합산하여 기초자료로 산출하기 때문에 본 연구에서도 부표본점 내 출현한 모든 수종의 임목정보를 이용하였다.

삼나무(61 Plot)와 편백(56 Plot) 임분의 임목축적을 추정하기 위해 2009년 입목수간재적표(이하 Ver.1) 및 2021년 신규 입목수간재적표(이하 Ver.2)를 사용하였으며, 수종별로 개발된 Kozak(1988) 모수를 활용하여 수간고별 직경을 도출한 뒤 임목축적을 추정하였다(Table 2; Table 3; Table 4; Kozak, 1988; KFS, 2009; NIFoS, 2021). Ver.1은 삼나무 0본, 편백 110본을 수집하여 입목수간재적표를 개발한 자료로 ‘삼나무’ 정보가 부재하여 ‘편백’ 모수를 혼용하고 있다(Figure 2). 이를 보완하여 개발한 Ver.2는 삼나무 1,000본, 편백 1,000본을 수집하여 ‘삼나무’와 ‘편백’의 독립된 모수를 개발하고, 입목수간재적표를 작성하였다(Figure 3). 또한, 재적식이 개발되지 않은 수종은 입목수간재적표 적용기준에 준하여 권장하는 대체수종 모수를 활용하였다.

$$y_i = \frac{\sum y_{i,j}}{a'_{i,j}} + \frac{\sum y_{i,k}}{a'_{i,k}} \quad (1)$$

- $y_{i,j}$: volume of the tree ($a_{i,j}$, DBH<30cm) in sub-point plots
- $y_{i,k}$: volume of the large tree ($a_{i,k}$, DBH≥30cm) in sub-point plots
- y_i : volume per ha in sub-point plots (i)
- $a'_{i,j}$: Area of the tree ($a_{i,j}$, DBH<30cm) plots
- $a'_{i,k}$: Area of the large tree ($a_{i,k}$, DBH≥30) plots

3. 탄소저장량 및 온실가스 흡수량 산정

삼나무 및 편백 임분의 탄소저장량을 추정하고자 IPCC 가이드라인에 따라 국가고유계수(목재기본밀도, 바이오매스확장계수, 뿌리함량비)와 탄소전환계수를 이용하였다(IPCC, 2006; GIR, 2021)(식 2)(Table 5). 온실가스 흡수량은 IPCC 가이드라인의 축적차이법을 적용하여 산정하였다(IPCC, 2006).

Table 2. The equation of the Kozak’s stem taper model used in this study (Kozak, 1988).

Model	Taper equation
Kozak 1988	$d = a_1 DBH^{a_2} a_3^{DBH} X^{b_1 Z^2 + b_2 1n(Z+0.001) + b_3 \sqrt{Z} + b_4 e^Z + b_5 (\frac{DBH}{H})}$
	where $Z = \text{relative height} (= \frac{h}{H})$
	$X = \frac{1 - \sqrt{\frac{h}{H}}}{1 - \sqrt{p}} \quad (p = \text{inflection point})$
	$a_n, b_n = \text{parameters}$
	$d = \text{diameter(estimated) when } h/H$

Table 3. Parameter estimates of Kozak’s stem taper model for Ver.1 (2009 stem volume table) (KFS, 2009).

Parameter	<i>Pinus densiflora</i> in Gangwon region	<i>Pinus densiflora</i> in central region	<i>Pinus rigida</i>	<i>Pinus koraiensis</i>	<i>Larix kaempferi</i>	<i>Chamaecyparis obtusa</i>	<i>Quercus acutissima</i>	<i>Quercus mongolica</i>
a_1	1.1886	1.1619	1.0598	0.9417	0.8946	1.0636	1.1434	1.3380
a_2	0.8869	0.8751	0.9629	1.0201	1.0208	0.9741	0.9162	0.8840
a_3	1.0010	1.0014	0.9998	0.9970	0.9975	0.9987	0.9995	1.0000
b_1	-0.6203	-0.5110	-0.1955	0.7667	0.6159	1.1647	0.2044	0.7584
b_2	0.0736	0.0972	0.0111	-0.1556	-0.1052	-0.2864	-0.0907	-0.1833
b_3	-1.5224	-2.0307	-0.9354	1.1785	0.2387	1.3298	0.1243	1.0931
b_4	1.1230	1.1866	0.6401	-0.5214	-0.0987	-0.7236	0.1248	-0.4576
b_5	-0.0087	0.0419	0.0522	0.1235	0.1512	0.1247	0.0948	0.1651
p	0.22	0.28	0.14	0.18	0.17	0.12	0.20	0.16

Table 4. Parameter estimates of Kozak’s stem taper model for Ver.2 (2021 stem volume table) (NIFoS, 2021).

Parameter	<i>Pinus densiflora</i> in Gangwon region	<i>Pinus densiflora</i> in central region	<i>Pinus thunbergii</i>	<i>Pinus rigida</i>	<i>Pinus koraiensis</i>	<i>Larix kaempferi</i>	<i>Cryptomeria japonica</i>	<i>Chamaecyparis obtusa</i>	<i>Quercus acutissima</i>	<i>Quercus variabilis</i>	<i>Quercus mongolica</i>	<i>Quercus serrata</i>	<i>Betula platyphylla</i>	<i>Liriodendron tulipifera</i>
a_1	1.0742	1.0046	0.9834	1.0693	1.0332	0.9817	1.1858	1.0991	1.4721	1.3095	1.1996	1.0838	1.1202	1.0925
a_2	0.8968	0.9217	0.9722	0.9470	0.9370	0.9690	0.9117	0.9526	0.8104	0.8613	0.9141	1.0095	0.9070	0.9099
a_3	1.0013	1.0009	0.9972	1.0003	0.9998	0.9988	0.9997	0.9983	1.0046	1.0016	0.9985	0.9911	0.9991	0.9984
b_1	-0.0123	-0.1732	-0.0809	0.2309	0.6748	0.5749	1.3045	1.3792	0.8144	0.7293	1.3611	2.0063	0.7334	-0.1338
b_2	-0.1073	-0.0876	-0.0997	-0.1019	-0.1551	-0.0857	-0.3416	-0.3023	-0.2510	-0.1883	-0.3368	-0.4896	-0.1566	-0.0181
b_3	0.4714	0.4003	0.5580	0.7172	1.0178	0.3104	1.9306	1.5786	1.8770	0.6833	2.2856	3.6518	1.1076	-0.2964
b_4	0.1232	0.2271	0.0653	-0.0978	-0.3670	-0.0934	-0.9738	-0.8785	-0.7478	-0.2647	-1.1219	-1.8286	-0.3902	0.4614
b_5	-0.0220	-0.0408	0.0315	0.0162	0.0628	0.1238	0.0795	0.1159	0.0422	0.0817	0.1378	0.0797	0.1726	0.1212
p	0.3	0.3	0.25	0.2	0.3	0.25	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.18	0.25	0.25

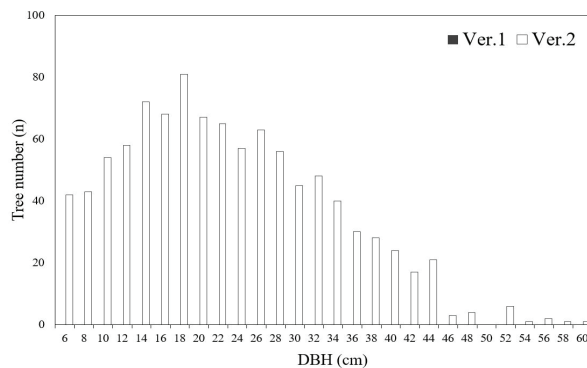


Figure 2. Number of trees by DBH used in the development of *Cryptomeria japonica* stem volume tables for two versions.

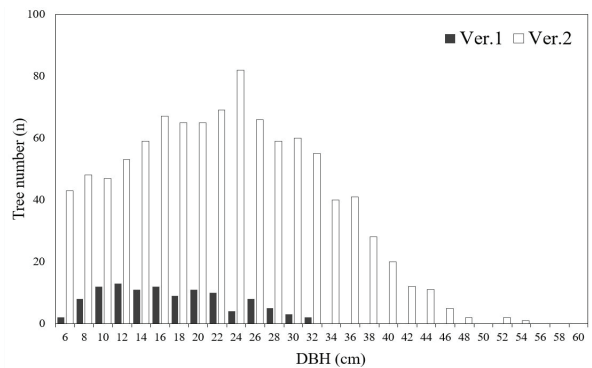


Figure 3. Number of trees by DBH used in the development of *Chamaecyparis obtusa* stem volume tables for two versions.

Table 5. Country specific factors and carbon factors for two species for carbon stock calculation in Korea (GIR, 2021).

Species	Basic wood density (g/cm ³)	Biomass expansion factor	Root to shoot ratio	Carbon fraction
<i>Cryptomeria japonica</i>	0.35	1.31	0.23	0.51
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	0.43	1.34	0.20	0.51

$$C = V \times WD \times BEF \times (1+R) \times CF \quad (2)$$

C : carbon stock (Cton)

V : stem volume (m³)

WD : basic wood density (g/cm³)

BEF : biomass expansion factor

R : root to shoot ratio

CF : carbon fraction

4. 통계분석

임목수간재적표 Ver.1과 Ver.2으로 산출된 임목축적 및 탄소저장량의 통계적 유의성을 검토하기 위해 t-검정(대응표본검정)을 수행하였다.

결과 및 고찰

1. 임목수간재적표 적용에 따른 단위면적당 임목축적

삼나무림과 편백림의 단위면적당 임목축적을 산출한 결과, 제7차 국가산림자원조사 기준 삼나무림은 313.31 m³/ha (Ver.1), 376.85 m³/ha (Ver.2), 편백림은 239.75 m³/ha (Ver.1), 279.58 m³/ha (Ver.2)으로 분석되었으며(Table 6), 임목수간재적표 Ver.1과 Ver.2의 유의성을 검토한 결과 통계적으로 유의하였다(p<0.001). 삼나무림과 편백림 간 임목축적 차이가 크게 나타났는데, 두 수종의 흉고직경(삼나무 25.41 cm, 편백 22.18 cm)과 수고(삼나무 14.72 m, 편백 13.05 m)는 상대적으로 유사하나 임분밀도(삼나무: 1,494.11본/ha, 편백: 1,285.49본/ha) 차이에 의한 것으로 판단된다.

한편, 두 수종 모두 Ver.2에서 더 많은 재적이 추정되었는데, 재적표 현행화 사업의 결과로 2021년에 16개 수종으로 확대·개발되면서 임목재적 추정에 사용되는 수종별 Kozak 모수 차이에 의한 것으로 보인다. 이에 Ver.1에 개발되지 않았던 삼나무, 곰솔, 주요 활엽수종의 Kozak 모수가 Ver.2에는 독립된 수종으로 적용되어 임목축적 차이에 영향을 준 것으로 사료된다(KFS, 2009; NIFoS, 2021). 또한, Ver.2에서 동일한 흉고직경 대비 더 많은 재적을 추정하였다. Ver.1는 상대적으로 소·중경목에 편향되어 개발된 반면, Ver.2는 과거 부재하였던 중·대경급 임목정보를 반영하여 개발되었기 때문이다(Lee et al., 2019). 소나무,

일본잎갈나무, 신갈나무 및 상수리나무 임목수간재적표를 조제한 선행연구에서도 Ver.1 보다 Ver.2에서 더 많은 임목축적을 산출하였다(Kang et al., 2014a, 2014b; Ko et al., 2019a, 2019b).

따라서, 성공적인 산림경영을 위하여 정확한 재적 추정이 기반되어야 하며, 현실 임분특성을 고려한 임목축적을 산출하기 위해서는 Ver.2의 방법으로 추정된 모수를 적용하는 것이 정확도 측면에도 바람직하다.

2. 삼나무와 편백 임분의 탄소저장량 및 온실가스 흡수량

삼나무 및 편백 임분의 탄소저장량을 산정하여 임목수간재적표 개발년도에 따라 비교한 결과 제7차 국가산림자원조사 기준 편백림은 84.54 tC/ha (Ver.1)에서 98.59 tC/ha (Ver.2)으로 14.04 tC/ha (16.61%) 증가하였으며, 삼나무림은 90.11 tC/ha (Ver.1)에서 108.39 tC/ha (Ver.2)으로 상대적으로 더 큰 변화량(18.27 tC/ha, 20.28%)을 보였다(Table 7).

두 수종의 연간 온실가스 흡수량은 Ver.2 기준 삼나무림 10.79 tCO₂/ha/yr, 편백림 18.48 tCO₂/ha/yr으로 분석되었다(Table 8). 우리나라 주요 산림수종의 이산화탄소 흡수량을 평가한 연구결과에 따르면 40년생 편백 임분은 연평균 6.0 tCO₂/ha/yr의 이산화탄소를 흡수하는 것으로 보고하여 본 연구와 상당한 차이를 보였다(NIFoS, 2019). 온실가스 흡수 효과가 높은 상수리나무와 비교하였을 때에도 40년생 기준 12.3 tCO₂/ha/yr을 흡수하여 본 연구결과에서 더 많은 이산화탄소를 흡수하는 것으로 나타났다. 이는 연구자료 차이에 기인한 것으로 사료되는데, 본 연구에서는 제6차 및 제7차 국가산림자원조사 자료를 분석하였고, 선행연구는 2009년 법정임분수확표 자료를 사용하였기 때문이다. 따라서 정확한 비교를 위해서는 최근 자료를 반영한 탄소저장 및 온실가스 흡수량 표준안을 제시하는 것이 필요하다.

3. 산림부문 온실가스 인벤토리 개선 방안

산림부문 온실가스 인벤토리는 ① 활동자료 구축, ② 임목축적 산출, ③ 탄소저장량 추정, ④ 온실가스 흡수량 산정 및 불확도 평가 체계로 작성된다. 파리협정 체결에 따라 온실가스 인벤토리 투명성 확보가 요구되는 상황에서 국가 온실가스 통계의 기초자료인 임목축적은 여전히

Table 6. Forest growing stock volumes and results of the t-test for two versions (mean ± standard error).

Forest stand	Category	Ver.1 (m ³ /ha)	Ver.2 (m ³ /ha)	t value	p value
<i>Cryptomeria japonica</i>	6 th NFI	271.29 ± 16.18	325.70 ± 19.82	11.45	<0.001
	7 th NFI	313.31 ± 17.52	376.85 ± 21.49	12.94	<0.001
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	6 th NFI	176.62 ± 16.02	208.12 ± 18.44	11.00	<0.001
	7 th NFI	239.75 ± 17.60	279.58 ± 20.00	12.50	<0.001

Table 7. Carbon stock of *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* for two versions (mean ± standard error).

Forest stand	Category	ver.1 (tC/ha)	ver.2 (tC/ha)	t value	p value
<i>Cryptomeria japonica</i>	6 th NFI	78.03 ± 0.60	93.68 ± 0.73	14.67	<0.001
	7 th NFI	90.11 ± 0.65	108.39 ± 0.79	15.71	<0.001
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	6 th NFI	62.28 ± 0.76	73.39 ± 0.87	12.03	<0.001
	7 th NFI	84.54 ± 0.83	98.59 ± 0.94	15.05	<0.001

Table 8. Greenhouse gas (GHG) removals of *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* for two versions (mean ± standard error).

Forest stand	Ver.1 (tCO ₂ /ha/yr)	Ver.2 (tCO ₂ /ha/yr)	Increment (%)
<i>Cryptomeria japonica</i>	8.86 ± 0.06	10.79 ± 0.07	21.73
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	16.32 ± 0.08	18.48 ± 0.08	13.19

2009년에 보고된 임목수간재적표를 적용하고 있다. 본 연구결과에 따르면 산림부문 온실가스 인벤토리는 통계적으로 과소 또는 과대 추정되고 있을 것으로 판단되므로, 현실임분을 반영하여 국가 통계의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 임목축적 산출체계를 개선할 필요가 있다.

그 방안으로 먼저, 국가산림자원정보시스템 임목자원평가프로그램에 입력된 임목수간재적표와 모수 값을 현황화 해야 한다. 현 시스템에는 Ver.1의 방법으로 임목축적을 산출하여 ‘편백’ 모수로 ‘삼나무’와 ‘편백’의 임목축적을 추정하는 실정이다. 또한, 1987년에 조사하여 조재된 재적식을 사용하고 있어 중·대경급 임목의 정보부재 한계를 갖는다(Ko et al., 2020). 반면에 Ver.2의 방법으로 프로그램을 개선할 시, 두 수종이 독립된 모수 값을 이용하기 때문에 수종별 성장특성을 반영한 임목축적 추정이 가능하다. 재적식이 개발된 수종도 8개에서 16개로 확대되어 타 수종의 임목축적도 정확하게 추정할 수 있다. 우리나라 산림은 과거에 비해 울창한 산림으로 변모하여 전체 산림의 80% 이상이 IV~V영급에 치중되어 있다(NIFoS, 2022). 이에 따라 과거 부재하였던 중·장령림 정보 취득으로 더 넓은 범위의 수고와 흉고직경을 고려한 임목축적을 추정할 수 있을 것으로 사료된다.

임목자원평가프로그램 시스템을 개선한 뒤에는 온실가

스 인벤토리 재계산을 수행해야 한다. IPCC 가이드라인에서 온실가스 인벤토리를 평가하는 기초자료 또는 방법이 변경·개선될 때 시계열 일관성을 유지하기 위한 우수실행 지침을 제공한다(IPCC, 2006). 따라서 우리나라도 임목축적 산출 시 2021년 신규 임목수간재적표를 반영하고, 온실가스 인벤토리 평가 방법이 개선됨에 따라 일관적인 시계열을 확보하기 위하여 전 기간에 걸쳐 온실가스 인벤토리 평가를 위한 재계산을 수행하여야 한다.

결론

본 연구는 삼나무와 편백 임분의 임목축적을 임목수간재적표 개발년도에 따라 산출하여 탄소저장량 및 온실가스 흡수량 산정에 미치는 영향을 분석하였다.

Ver.1(2009년)과 Ver.2(2021년) 임목수간재적표를 활용하여 삼나무 및 편백 임분의 단위면적당 임목축적을 산출한 결과 제6차, 제7차 국가산림자원조사 모두 Ver.2에서 더 많은 재적을 추정하였다. 이는 과거 부재하였던 중·장령림의 정보와 수종 특성을 반영한 모수 값을 이용하여 나타난 것으로 판단된다. 또한, 임목축적 산출방법을 Ver.2로 변경함에 따라 탄소저장 효과가 향상되었다. 제7차 국가산림자원조사 기준 삼나무림은 20.28%, 편백림은

16.61% 증가하였으며, t-검정을 실시한 결과 통계적으로 유의하였다($p < 0.001$). 특히, 선행연구에 비해 편백 임분에서 탄소저장 효과가 탁월하였는데, 선행연구의 경우 2009년 법정임분수확표 자료를 사용하였기 때문에 본 연구와 상당한 차이가 나타났다. 온실가스 흡수량($\text{CO}_2/\text{ha}/\text{yr}$)의 경우 삼나무림은 8.86 (Ver.1), 10.79 (Ver.2), 편백림은 16.32 (Ver.1), 18.48 (Ver.2)을 흡수하는 것으로 분석되었다.

기후변화협약에서 파리협정이 공포됨에 따라 국가 온실가스 인벤토리 감축의무 이행에 대한 투명성(Transparency)이 요구되고 있다. 이에 산림부문 온실가스 통계의 정확도를 향상시키 위해서는 ① 국가산림자원조사시스템 입목자원평가프로그램 내 입목수간재적표를 2009년에서 2021년 기준으로 개선하고, ② 개선된 방법으로 입목축적을 산출하여 ③ 1990년 이후 온실가스 흡수량을 재계산해야 한다. 본 연구는 우리나라 삼나무림과 편백림을 대상으로 수행하였기 때문에, 향후 삼나무, 편백 이외에 우리나라 주요 산림수종을 대상으로 한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 “국립산림과학원(산림자원 순환경제를 위한 산림자원 통계 및 정보 구축 방안 연구 : FM0000-2020-01-2023)”의 지원으로 수행되었습니다.

References

Chang, W.C., Lee, D.H. and Lee, T.J. 1998. A study on domestic & international status and countermeasures for global warming issues. *Environmental Research* 18(1): 21-31.

GIR (Greenhouse Gas Information Research Center). 2021. 2021 National greenhouse gas inventory report. Cheongju, Korea: GIR.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories. IPCC/IGES, Hayama, Japan.

Jeong, J.K., Kim, H.R. and You, Y.H. 2010. Effects of elevated CO_2 concentration and temperature on growth response of *Quercus acutissima* and *Q. variabilis*. *Korean Journal of Environment and Ecology* 24(6): 648-656.

Jung, S.Y., Lee, K.S., Lee, H.S., Bae, E.J., Park, J.H. and Ko, C.U. 2020. Development of stand yield table based on current growth characteristics of *Chamaecyparis obtusa* stands. *Journal of Korean Society of Forest Science* 109(4): 477-483.

Kang, D.I., Kim, Y.M. and Lee, S.J. 2022. A study on forest carbon MRV statistics production process. *Journal of the Korea Society of Information Technology Policy & Management* 14(3): 3003-3009.

Kang, J.T. and Ko, C.U. 2020. The development of a stem taper equation and a stem table for standing trees of *Chamaecyparis obtusa* on Jeju Island and in the Southern Regions of South Korea. *The Journal of Korean Island* 32(4): 221-233.

Kang, J.T., Son, Y.M., Kim, S.W., Lee, S.J. and Park, H. 2014a. Development of local stem volume table for *Pinus densiflora* S. et Z. using tree stem taper model. *Korean Journal of Agricultural and forest Meteorology* 16(4): 327-335.

Kang, J.T., Son, Y.M., Kim, S.W., Park, H. and Hwang, J.S. 2014b. Development of local stem volume table for *Larix kaempferi* using Kozak's stem taper model. *Journal of Agriculture & Life Science* 48(6): 119-131.

KFRI (Korea Forest Research Institute). 2011. The 5th national forest inventory report. Seoul, Korea: KFRI.

KFS (Korea Forest Service). 2009. The table of the stem volume, biomass, and yield. Daejeon, Korea: KFS.

KFS (Korea Forest Service) and KOFPI (Korea Forestry Promotion Institute). 2017. The 7th national forest inventory and forest health monitoring. -Field manual-. Seoul, Korea: KOFPI.

Kim, K.M., Shim, S.R., Shim, K.B., Park, J.S., Kim, W.S., Kim, B.N. and Yeo, H.M. 2009. Development of structural glued laminated timber with Domestic Cedar. *Mokchae Konghak* 37(3): 184-191.

Kim, S.H., Lee, S.Y., Hong, C.Y., Gwak, K.S., Yeo, H., Lee, J.J. and Choi, I.G. 2011. Whitening and antioxidant activities of essential oils from *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa*. *Journal of Korean Wood Science and Technology* 39(4): 291-302.

Ko, C.U., Kang, J.T., Son, Y.M. and Kim, D.G. 2019a. Estimating stem volume using stem taper equation for *Quercus mongolica* in South Korea. *Forest Science and Technology* 15(2): 58-62.

Ko, C.U., Kim, D.G. and Kang, J.T. 2019b. Estimating stem volume table of *Quercus Acutissima* in South Korea using variable exponent equation. *Journal of Korean Society of Forest Science* 108(3): 357-363.

Ko, C.U., Lee, S.H., Lee, S.J., Kim, D.G. and Kang, J.T. 2020. Development of a stem taper equation and a stem table for *Cryptomeria japonica* stands in South Korea. *Journal of Korean Society of Forest Science* 109(4): 461-467.

- Kozak, A. 1988. A variable-exponent taper equation. Canada Journal of Forest Research. 18: 1363-1368.
- Lee, H.E., Shin, W.S., Yeoun, P.S., Cho, Y.M. and Yeom, S.H. 2011. Effects of inhalation of essential oil(*Chamaecyparis obtusa*) on stress and depression in college students. Journal of Korean Institute of Forest Recreation 15(2): 61-68.
- 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.
- NIFoS (National Institute Forest of Science). 2019. Standard carbon absorption amounts of major forest species (ver. 1.2.). Seoul, Korea: NIFoS.
- NIFoS (National Institute Forest of Science). 2022. 2020 Forest resource in Korea. Seoul, Korea: NIFoS.
- NIFoS (National Institute of Forest Science). 2021. The table of the stem volume, biomass, and yield. Seoul, Korea: NIFoS.
- Park, H.K., Xu, M.G., Lee, K.B., Choi, W.Y., Choi, M.G., Kim, S.S. and Kim, C.K. 2006. Comparison of rice growth under subtropical and temperate environments Korea Journal of Agricultural and Forest Meteorology 8(2): 45-53.
- Seo, Y.O., Jung, S.C., Won, H.K. and Lee, Y.J. 2015. Taper equation and stem volume table of *Cryptomeria japonica* in Jeju experimental forests. Journal of Agriculture & Life Science 49(1): 71-77.
- Shin, J.H., Han, H., Kim, Y.H., Yim, J.S. and Chang, Y.S. 2022. Uncertainty in estimating forest growing stock from volume estimation of a standing tree by stem volume table and the resulting bias in carbon stock estimation: A case study in Hongcheon-Gun, Republic of Korea. Journal of Climate Change Research 13(3): 355-364.
- Son, H.J., Kim, Y.S., Kim, N.Y., Lee, H.B. and Park, W.G. 2014. A consideration of the possibility of planting *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* on the east sea area in Gangwon-province by tree ring dating and climatic factor analysis. Journal of Forest Science 30(1): 36-44.
- Son, Y.M., Kang, J.T., Jeon, J.H. and Ko, C.U. 2017. The estimation of stem volume for *Pinus thunbergii* by Coast using Kozak's stem taper model in Korea. The Journal of Korean Island 29(4): 225-244.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention of Climate Change). 2016. Decision 1/CP.21: Adoption of the Paris Agreement. <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/10a01.pdf>.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention of Climate Change). 2022. Reference manual for the enhanced transparency framework under the Paris Agreement - Understanding the enhanced transparency framework and its linkages. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/RF_ETR_Understanding_English.pdf.

Manuscript Received : June 21, 2023

First Revision : November 13, 2023

Second Revision : November 28, 2023

Accepted : November 28, 2023