



산림의 탄소저장량 추정을 위한 신규 입목수간재적표 적용 방안

이선정* · 고치웅** · 임종수* · 강진택****

*국립산림과학원 산림산업연구과 임업연구사, **국립산림과학원 산림산업연구과 석사연구원, ***국립산림과학원 산림산업연구과 임업연구관

A Study on the Application of a New Stem Volume Table to Estimate Forest Carbon Stock in South Korea

Lee, Sun Jeoung* · Ko, Chi Ung** · Yim, Jong Su* and Kang, Jin Taek****

*Research scientist, Division of Forest Industry Research, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

**Assistant Researcher, Division of Forest Industry Research, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

***Senior research scientist, Division of Forest Industry Research, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

ABSTRACT

This study was conducted to suggest application of a new stem volume for the forest carbon stocks in South Korea. We recalculated stem volume using the Kozak parameter and equations based on the old stem volume (approach one) and new stem volume (approach two). Also, we calculated carbon stock and changes using the estimated stem volume and country-specific emission factors. As a result, growing stock with approach two was higher than that with approach one, and there was a statistically significant difference ($p < 0.05$). The result indicates that the new volume table (approach two) will reduce error when assessing wood resources of the middle DBH class or higher and also will improve the accuracy of forest growing stocks. The annual carbon stock change ($m^3/ha/yr.$) by tree species was 5.7 ± 0.74 in *Pinus densiflora*, 5.65 ± 0.37 in *Quercus mongolica*, and 9.54 ± 1.08 in *Larix kaempferi* by approach two, for which the annual carbon stock change ($Ct/ha/yr.$) was 2.28 ± 0.30 for *Pinus densiflora*, 3.98 ± 0.26 for *Quercus mongolica*, and 3.79 ± 0.43 for *Larix kaempferi*. According to the Paris Agreement, there is a need to improve the accuracy of greenhouse gas inventory in the forest sector. Moreover, the current estimation algorithm for stem volume of the National Forest Information System (NFIS) should be enhanced by updating the stem volume table. Then it is necessary to estimate the growing stocks based on new stem volume table. This study is a pilot study for Gangwon province, and nationwide pilot research is needed in the future.

Key words: Carbon Stock, Forest, Recalculation, Stem volume table

1. 서 론

파리협정 제4조 2항에 따라 국가는 온실가스 감축목표를 투명하게 설정하고 이행해야하며 국가별 상황에 따른 온실가스 흡수 및 배출량, 산정 방법론 등을 포함한 정보를 제공해야 한다 (Oh, 2018; UNFCCC, 2015). 국가 온실가스 배출량은 IPCC 가이드라인 방법론에 따라 산정하고 (IPCC, 2003; 2006), 관련 정보를 국가 온실가스 인벤토리보고서, 국가보고서, 격년투명성보고서 등의 형태로 UNFCCC에 제출해야 한다 (Kim et al., 2019; Oh, 2019). 또한 국가 온실가스 감축목

표를 5년마다 제출해야하는 글로벌 이행점검이 의무화됨에 따라 투명하고 일관된 정보로 국가 온실가스 통계를 준비해야 한다 (UNFCCC, 2015).

우리나라 산림부문의 국가 온실가스 통계는 국가산림자원조사 (National Forest Inventory; NFI)에 근거한 산림기본통계를 활용하고 있다 (GIR, 2016). 국가산림자원조사는 1972년부터 현재까지 6차례에 걸쳐 전국의 산림자원을 모니터링하는 조사 체계이다. 국가산림자원조사에서 취득한 표본점의 임분조사 (흉고직경, 수고 등) 자료는 국가산림자원정보시스템 (National Forest Information System; NFIS)의 임목자원평

† Corresponding author: beg8bune@korea.kr (02455, 57, Hoegi-ro, Dongdaemun-gu, Seoul, Republic of Korea, Tel. +82-2-961-2830)
 Received November 14, 2019 / Revised November 29, 2019 / Accepted December 23, 2019

가프로그램에 의해 재적으로 변환된다. 임목자원평가프로그램은 임목수간재적표 및 수확표에 근거해 임분의 재적 정보를 제공하는 프로그램이기 때문이다 (Lee et al., 2018; KFRI, 2011).

우리나라의 2015년 이전 임목수간재적표는 중경급 이상 재적 추정에 문제가 되어 산림청에서는 이를 해결하고자 신규 임목수간재적표 개발 사업을 수행하였고, 주요 산림의 10 수종에 대한 신규 임목수간재적표를 개발하였다 (Kang and Son, 2016; KFS and NIFoS, 2018). 최근 우리나라에서 개발된 임목수간재적표는 변량지수식 기반의 Kozak 모형에 의해 산출하고 있다. Kozak 모형은 흉고직경과 수고를 이용하여 수간고별 수피외직경을 구할 수 있는 식으로 수간곡선 추정에 높은 설명력을 가지기 때문이다 (Kozak, 1988). 국내 연구에서도 소나무 수간곡선 추정에 Kozak 모형이 다른 모형에 비해 적합도 (F.I.)가 높고, 편의 (Bias)가 낮은 것으로 보고된 바 있다 (Kang et al., 2014). 이외에도 Kozak 모형은 우리나라 주요 침엽수종과 활엽수종의 수간곡선을 정확하게 추정한다고 보고된 바 있다 (Chung et al., 2010; Kang et al., 2014; Kang et al., 2015a; 2015b; Kang et al., 2017; Ko et al., 2019a; 2019b; Son et al., 2009; Son et al., 2012; Son et al., 2017).

산림의 탄소저장량 추정에 기초자료인 임목재적을 정확하게 산출해야 국가 온실가스 통계의 투명성 향상에 기여할 수 있다. IPCC 지침에서도 산림자원의 조사체계 개편 등으로 기초자료가 변화하는 경우 시계열 일관성과 투명성 확보를 위한 재계산을 권고하고 있다 (IPCC, 2003). 우리나라를 포함한 일부 선진국에서도 국가산림자원조사 체계 개편 등에 따라 산림면적 및 임목축적의 재계산을 수행하고 있다 (Lee et al., 2016; SF, 2015; MOE, 2011). 우리나라에서 Kozak 모형을 기반으로 2018년에 개발된 임목수간재적표는 국유림경영계획과 임목매각 등에 기초자료로 활용되고 있지만, 국가수준의 산림자원을 평가하는 국가산림자원정보시스템에는 활용되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 산림의 탄소저장량 산정을 위한 기초자료인 임목축적량의 정확한 통계 확보를 위해 신규 임목수간재적표 적용 방안을 제시하고자 한다. 또한 수종별 임목수간재적표 변경이 온실가스 통계에 미치는 영향을 분석하여 개선방안을 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구자료

우리나라 전체 산림 면적의 약 22%를 차지하는 강원도 지

역을 연구 대상으로 선정하였다 (KFS, 2016). 강원도는 약 82%가 산림이며, 산림면적은 활엽수림이 38.4%, 침엽수림이 31.8%, 혼효림이 27.2%으로 구성되어 있다. 또한 전체 산림 면적의 57%가 IV~V영급으로 이루어져 있으며, 소나무 (*Pinus densiflora*, 23.7%), 신갈나무 (*Quercus mongolica*, 23.3%), 일본잎갈나무 (*Larix kaempferi*, 7.4%), 굴참나무 (*Q. variabilis*, 6.2%), 잣나무 (*P. Koraiensis*, 2.9%) 순으로 우점하고 있다 (KFS, 2016; KFS and Kofpi, 2013). 따라서 강원도의 제5차 (2006~2009) 및 6차 (2010~2014) 국가산림자원조사 고정표본점 (20 m×20 m) 자료를 활용하였다 (Fig. 1; Table 1). 소나무림과 신갈나무림의 경우 대부분 천연림이며 일본잎갈나무는 인공림으로 구분되었으며, 제6차 국가산림자원조사 자료 기준의 평균 영급은 소나무와 신갈나무는 V영급이었으며, 일본잎갈나무는 IV영급이었다.

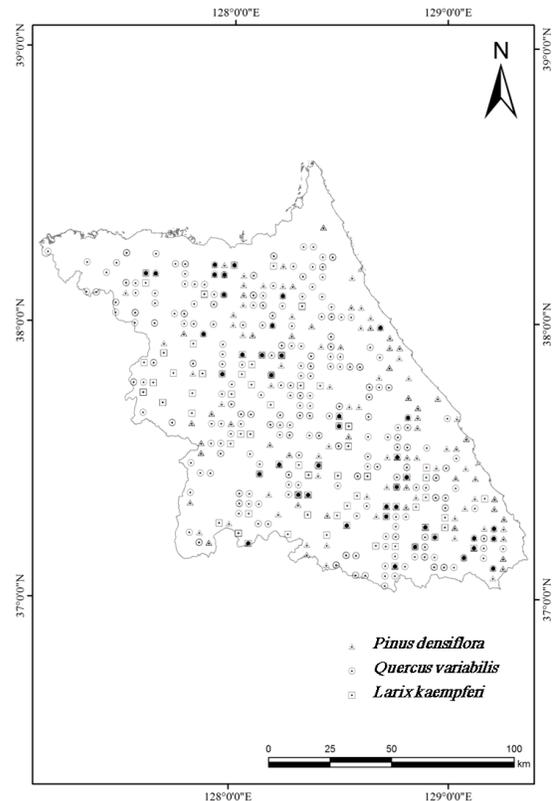


Fig. 1. Spatial distribution of sampling plots used in this study on Gangwon province (Black circle is indicator of the overlapping sampling points).

2.2 재적식에 의한 입목축적 산출

산림의 탄소저장량 추정을 위한 신규 수간재적표 적용 방안을 검토하고자 입목재적 추정방법을 2가지로 구분하였다. 접근방법1은 국가산림자원정보시스템 (NFIS) 기준의 재적을 활용한 것으로 2009년에 개발된 입목재적·바이오매스 및 입분수확표에 있는 모수를 활용하여 재적을 추정하는 방법이다 (KFS, 2009). 접근방법2는 2018년에 개발된 입목재적·바이오매스 및 입분수확표에 있는 모수를 활용하여 재적을 추정하는 방법이다 (KFS and NIFoS, 2018). 재적식에 의한 입목축적을 산출하기 위해 제5차 (2006~2009) 및 6차 (2010~2014) 국가산림자원조사에서 소나무림 (226개), 신갈나무림 (400개), 일본잎갈나무림 (112개)으로 구분된 고정표본점 자료를 활용하였다. 국가산림자원조사에서는 수관 점유면적 또는 입목본수 비율에 따라서 임상을 구분하고 있다. 예를 들어 침엽수림은 침엽수종의 수관 점유면적 또는 입목본수 비율이 75%이상인 임분을 의미한다 (KFS, 2012). 즉 국가산림자원조사에서는 침엽수림으로 구분된 임상에는 75% 침엽수종 외 침엽수 혹은 활엽수종 등이 포함되어 있다. 본 연구에서는 국가산림자원조사의 임상 및 수종구분 기준에 따라 구분되어 있는 임분 내에서 조사된 모든 수종의 개체목 (최소: 6본, 최대: 143본)의 흉고직경과 수고 자료를 활용하였다.

고정표본점의 개체목별 흉고직경과 수고를 수종별 Kozak 모수와 수간곡선식 등을 적용하여 수간고별 직경을 도출한 후, 수간의 형태별로 나누어 개체목의 재적을 산출하였다 (Table 2; Table3; Table 4; KFS and NIFoS, 2018; Ko et al.,

2019a; 2019b). 단, 입목수간재적표가 개발되지 않은 수종, 즉 재적 추정을 위한 Kozak 모수가 없는 경우 2009년 입목수간재적표에 제시된 대체수종 기준을 적용하여 임분내 존재하는 개체목의 입목재적을 계산하였다 (KFS, 2009). 국가산림자원조사 체계에 따라 소나무림, 신갈나무림, 일본잎갈나무림으로 구분된 고정표본점 내에는 해당 수종 외에 다른 수종의 개체목 재적도 합산하여 임분의 재적을 추정하기 때문이다.

소나무림, 신갈나무림, 일본잎갈나무림의 입분재적을 산출하기 위해 수종별 개체목 재적을 합산하였으며, 재적을 단위면적당 입목축적으로 확장하기 위하여 부표본점의 기본조사원 (0.04 ha)와 대경목조사원 (0.08 ha)으로 구분하여 계산하였다 (KFRI, 2011; eq. 1).

$$y_i = \frac{\sum y_{i,j}}{a_{i,j}} + \frac{\sum y_{i,k}}{a_{i,k}} \quad (\text{eq. 1})$$

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

Table 1. Stand attributes of sampling plots for three species used in this study

Category	Species	n	Tree number (n/ha)	DBH (cm)	Height (m)	Basal area (m ² /ha)	Age	Stand age class
The 5 th national forest inventory	<i>Larix kaempferi</i>	112	868.83 ±36.45	18.85 ±0.53	14.86 ±0.35	22.99 ±0.95	30.02 ±0.92	$\frac{IV}{I - VI}$
	<i>Pinus densiflora</i>	226	1107.99 ±36.24	19.55 ±0.4	11.52 ±0.18	30.98 ±0.79	38.59 ±0.78	$\frac{IV}{II - VI}$
	<i>Quercus mongolica</i>	400	1283.09 ±30.52	16.52 ±0.22	10.73 ±0.1	26.98 ±0.47	41.99 ±0.65	$\frac{V}{II - XII}$
The 6 th national forest inventory	<i>Larix kaempferi</i>	112	829.56 ±38.33	20.64 ±0.51	17.00 ±0.34	25.49 ±0.91	35.17 ±0.89	$\frac{IV}{II - V}$
	<i>Pinus densiflora</i>	226	1000.41 ±36.96	21.71 ±0.41	12.74 ±0.18	32.99 ±0.84	43.67 ±0.78	$\frac{V}{III - X}$
	<i>Quercus mongolica</i>	400	1208.11 ±28.15	17.87 ±0.22	11.81 ±0.09	29.35 ±0.48	47.03 ±0.65	$\frac{V}{III - XII}$

2.3 탄소저장량 및 변화량 산정

소나무, 신갈나무, 일본잎갈나무의 탄소저장량 및 변화량 산정을 위해서 접근방법에 의해 추정된 임목축적 값을 활용하였으며, IPCC 가이드라인의 탄소저장량 산정방법에 따라 국가에서 개발된 수종별 목재기본밀도, 바이오매스확장계수, 뿌리함량비와 IPCC 2006 가이드라인에 제시된 탄소전환계수를 활용하여 산정하였다 (Table 5; IPCC, 2006; GIR, 2016).

2.4 통계분석

두 가지 접근방법에 따른 임목축적 및 탄소저장량 차이의 유의성은 쌍체 t-검정 (t-통계량, eq. 2)을 이용하여 검정하였으며, SAS 9.4 소프트웨어를 활용하여 분석하였다 (SAS Institute Inc., USA).

$$t = \frac{\bar{D}}{s_{\bar{D}}} \tag{eq.2}$$

\bar{D} = : mean of the difference estimated volume between approach one and two

$s_{\bar{D}}$ = : Standard error of mean difference

3. 결과 및 고찰

3.1 임목수간재적표 적용에 따른 임목축적 추정

강원도 주요 수종의 임목축적을 추정한 결과 접근방법2가 접근방법1보다 임목축적이 높게 나타났으며, 통계적으로 유의한 차이를 보였다 (Table 6). 제6차 국가산림자원조사 기준으로 소나무림은 4.3%, 신갈나무림은 12.6%, 일본잎갈나무 1.0%으로 차이가 났으며 (Table 6), 재적추정에 활용한 모수

Table 2. Form of Kozak's stem taper model used in this study

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

Table 3. Parameter estimates of Kozak's stem taper model for approach 1 (KFS, 2009)

	<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>
a1	1.1886	1.1619	1.0598	0.9417	0.8946	1.0636	1.1434	1.3380
a2	0.8869	0.8751	0.9629	1.0201	1.0208	0.9741	0.9162	0.8840
a3	1.0010	1.0014	0.9998	0.9970	0.9975	0.9987	0.9995	1.0000
b1	-0.6203	-0.5110	-0.1955	0.7667	0.6159	1.1647	0.2044	0.7584
b2	0.0736	0.0972	0.0111	-0.1556	-0.1052	-0.2864	-0.0907	-0.1833
b3	-1.5224	-2.0307	-0.9354	1.1785	0.2387	1.3298	0.1243	1.0931
b4	1.1230	1.1866	0.6401	-0.5214	-0.0987	-0.7236	0.1248	-0.4576
b5	-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	0.2	0.16

및 수종 구분 차이에 기인한 것으로 판단된다 (KFS, 2009; KFS and KFRI, 2018). 최근에 개발된 신규 입목수간재적표에서 추정된 Kozak 모수는 중경급 이상의 입목재적을 보다 정확하게 추정할 수 있는 것으로 보고된 바 있다 (Ko et al., 2019b). 또한 국내 일본잎갈나무의 지방별 입목수간재적표 추정 연구에서도 신규 입목수간재적표의 재적이 기존 입목수간재적표의 재적 보다 높은 것으로 보고된 바 있다 (Kang et al., 2014). 신갈나무와 상수리나무를 대상 입목수간재적표 추

정 연구에서도 Kozak 모형에 의해 도출된 신규입목재적표의 재적이 기존 입목수간재적표의 재적 보다 높은 것으로 보고된 바 있으며, 이는 신규 입목수간재적표에서 추정된 수간곡선의 수간고별 직경이 기존 입목수간재적표 보다 높기 때문인 것으로 보고되었다 (Ko et al., 2019a; 2019b). 신규 입목수간재적표는 장령기에 접어든 우리나라 산림의 영급 및 경급 구조가 반영된 것으로, 유령림에 편중되어 개발된 과거 입목수간재적표와 차이가 발생할 수 있기 때문이다 (Kang et al.,

Table 4. Parameter estimates of Kozak's stem taper model for approach 2 (KFS and NIFos, 2018)

	<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>Pinus thunbergii</i>	<i>Quercus acutissima</i>	<i>Quercus mongolica</i>	<i>Quercus variabilis</i>	<i>Betula playphylla</i>	<i>Liriodendron tulipifera</i>
a1	1.0742	1.0045	1.0693	1.0332	0.9655	0.9880	0.9834	1.4720	1.1996	1.3095	1.4030	1.1370
a2	0.8968	0.9217	0.9470	0.9370	0.9773	0.9900	0.9722	0.8104	0.9141	0.8613	0.7510	0.9160
a3	1.0013	1.0009	1.0003	0.9998	0.9984	0.9980	0.9972	1.0045	0.9985	1.0016	1.0140	1.0000
b1	-0.0123	-0.1732	0.2310	0.6748	0.5759	1.1140	-0.0809	0.8145	1.3612	0.7292	0.4520	0.3870
b2	-0.1073	-0.0876	-0.1019	-0.1551	-0.0877	-0.2380	-0.0997	-0.2509	-0.3368	-0.1883	-0.1170	-0.1730
b3	0.4714	0.4003	0.7174	1.0180	0.3327	1.2980	0.5580	1.8771	2.2859	0.6832	0.6650	1.5200
b4	0.1232	0.2271	-0.0979	-0.3671	-0.1010	-0.6970	0.0654	-0.7479	-1.1220	-0.2646	-0.1980	-0.4450
b5	-0.0221	-0.0409	0.0162	0.0628	0.1207	0.1400	0.0315	0.0422	0.1378	0.0817	0.2620	0.0710
p	0.30	0.30	0.20	0.30	0.25	0.20	0.25	0.20	0.25	0.25	0.25	0.25

Table 5. Country specific emission factors used for the estimation of carbon removal and emission in Korea (GIR, 2016 and IPCC, 2006)

	Basic wood density (g/cm ³)	Biomass expansion factor	Root to shoot ratio	Carbon fraction
<i>Larix kaempferi</i>	0.45	1.34	0.29	0.51
<i>Pinus densiflora</i> in Gangwon reigon	0.42	1.48	0.26	0.51
<i>Quercus mongolica</i>	0.66	1.60	0.39	0.48

Table 6. Result of paired t-test for growing stock volumes by two approaches.

Category	Forest stand	n	Mean difference	Standard error	t value	p value
The 5 th national forest inventory	<i>Larix kaempferi</i>	112	-0.8354	0.2904	-2.88	0.0048
	<i>Pinus densiflora</i>	227	-7.0534	0.3312	-21.3	<0.001
	<i>Quercus mongolica</i>	400	-19.1229	0.4150	-46.08	<0.001
The 6 th national forest inventory	<i>Larix kaempferi</i>	112	-2.3917	0.3293	-7.26	<0.001
	<i>Pinus densiflora</i>	226	-8.8825	0.4037	-22.00	<0.001
	<i>Quercus mongolica</i>	400	-22.0052	0.4352	-50.56	<0.001

2014; Ko et al., 2019a; 2019b). 이외에도 접근방법1에서는 개발되지 않았던 소나무림, 신갈나무림, 일본잎갈나무림에 존재하는 해송, 자작나무, 백합나무의 재적추정을 위한 Kozak 모수가 접근방법2에서는 적용된 점도 재적차이에 영향을 준 것으로 판단된다 (KFS, 2009; KFS and NIFoS, 2018).

제5차 및 6차 국가산림자원조사의 고정표본점 자료를 활용하여 연간 임목축적 변화량을 추정하였다. 그 결과 모든 임분에서 중경급 이상의 재적을 정확하게 추정할 수 있는 접근방법2가 접근방법1보다 연간 임목축적 변화량 ($m^3/ha/yr.$)이 높은 것으로 나타났으며, 접근방법2에 따라 소나무림의 경우 5.70 ± 0.74 , 신갈나무림의 경우 5.65 ± 0.37 , 일본잎갈나무림의 경우 9.54 ± 1.08 인 것으로 나타났다 (Table 7). 연구 대상지의 소나무림의 평균 임령이 V영급인 것을 고려할 때, 45년 생 연평균생장량 ($m^3/ha/yr.$) 범위 (4.83~7.63)에 있는 것으로 나타나 정상범위에서 성장하고 있는 것을 유추할 수 있었다 (KFS and NIFoS, 2018). 한편 신갈나무림과 일본잎갈나무림은 동일 영급 법정림의 연평균생장량 (신갈나무림: $4.00 \sim 5.03 m^3/ha/yr.$, 일본잎갈나무림: $4.94 \sim 8.08 m^3/ha/yr.$) 보다 높은 것으로 나타났다 (KFS and NIFoS, 2018). 또한 현실림의 연평균생장량 추정 연구와 비교한 결과 소나무림의 연간 임목축적 변화량은 중상위 (12~14) 지위지수 범위에 있었으며, 신갈나무림과 일본잎갈나무림의 연간 임목축적 변화량은 상위 지위지수의 연평균생장량보다 높은 것으로 나타났다 (NIFoS, 2016). 신갈나무림과 일본잎갈나무림의 연평균생장량이 기존 연구보다 높은 이유는 강원도 지역이 두 수종에 적합한 임지생산력을 가지고 있기 때문으로 판단된다. 국내 연

구결과에 따르면 강원도 고산지역에 지위지수 14 이상의 신갈나무림이 분포되어 있는 것으로 분석되었으며 (Shin et al., 2012), 강원도 일본잎갈나무의 지위지수는 18~30 범위로 전국 단위 지위지수 추정치 (16~24) 보다 높게 추정된 바 있다 (Lee et al., 2015). 또한 환경요인을 고려하여 수종별 적지를 추정한 연구결과에서도 강원도는 일본잎갈나무의 적지인 것으로 보고된 바 있다 (Lee et al., 2012).

3.2 수종별 탄소저장량 및 변화량 산정

접근방법2에 따라 강원도 지역의 주요 수종의 탄소저장량 (Ct/ha)을 산정한 결과 제 5차 (2006~2009) 국가산림자원조사 기준으로 소나무림이 75.25 ± 2.37 , 신갈나무림이 118.99 ± 2.30 , 일본잎갈나무림이 75.91 ± 3.65 으로 나타났으며, 제6차 (2011~2014) 국가산림자원조사 기준으로 소나무림이 86.88 ± 2.71 , 신갈나무림이 138.88 ± 2.45 , 일본잎갈나무림이 94.84 ± 4.20 으로 나타났다 (Table 8). 이를 연간 탄소변화량으로 환산할 때 소나무, 신갈나무, 일본잎갈나무의 각각 연간 탄소저장량 (Ct/ha/yr)은 2.28 ± 0.30 , 3.98 ± 0.26 , 3.79 ± 0.43 으로 나타났다 (Table 8). 한편 강원도의 소나무림의 연간 탄소저장량을 추정한 연구 결과보다 낮게 나타났는데, 연구에 활용한 자료 등의 차이에 의한 것으로 판단된다 (Kang et al., 2014). Kang et al. (2014)은 제6차 국가산림자원조사 (2016)에서 조사된 임목축적을 활용한 값이며, 본 연구에서는 강원도 지역의 제5차 (2006~2009) 및 6차 (2011~2014) 국가산림자원조사 자료에서 개체목별 흉고직경 및 수고 등에 의해 임목축적을 산출한 값을 활용하였기 때문에 이러한 차이가

Table 7. Comparison of annual growing stock volumes by tree species for two approaches (mean \pm standard error)

	n	Approach 1 ($m^3/ha/yr.$)	Approach 2 ($m^3/ha/yr.$)
<i>Larix kaempferi</i>	112	9.23 ± 1.06	9.54 ± 1.08
<i>Pinus densiflora</i>	226	5.34 ± 0.72	5.70 ± 0.74
<i>Quercus mongolica</i>	400	5.07 ± 0.33	5.65 ± 0.37

Table 8. Carbon stock changes by tree species for approach 2 (mean \pm standard error)

	n	The 5 th national forest inventory (Ct/ha)	The 6 th national forest inventory (Ct/ha)	ΔC (Ct/ha/yr.)
<i>Larix kaempferi</i>	112	75.91 ± 3.65	94.84 ± 4.20	3.79 ± 0.43
<i>Pinus densiflora</i>	226	75.25 ± 2.37	86.88 ± 2.71	2.28 ± 0.30
<i>Quercus mongolica</i>	400	118.99 ± 2.30	138.88 ± 2.45	3.98 ± 0.26

탄소저장량에 영향을 준 것으로 판단된다. 또한 강원도 운두령의 소나무, 신갈나무, 일본잎갈나무의 연간 탄소저장량을 추정된 연구결과와 비교한 결과 신갈나무와 일본잎갈나무는 다소 높게, 소나무림은 다소 낮게 나타났는데 (Kim et al., 2014), 본 연구 대상지보다 Kim et al. (2014)의 연구 대상지 영급이 신갈나무림은 높고 소나무림은 낮았기 때문에 사료된다. 동일 수종이라도 영급 구조에 따라 흡수할 수 있는 연간 탄소저장량이 다를 수 있고, 영급 구조에 따른 생장량 및 탄소저장량 차이는 이전 연구결과에서 보고된 바 있기 때문에 (Besnard et al., 2015; Cao et al., 2019; KFS, 2009), 보다 정확한 해석을 위해서는 전국단위 수종별 영급구조에 따른 탄소저장량 추정 연구를 수행해야할 것으로 판단된다.

3.3 국가 온실가스 인벤토리 적용 방안

파리협정 체결에 따라 국가 온실가스 인벤토리 통계의 투명성이 요구되는 상황이다. 우리나라의 산림부문 온실가스 통계는 국가산림자원조사에서 취득하는 임목축적 자료 등을 활용하고 있다. 현재 국가산림자원조사 시스템에는 기존에 개발된 수간곡선 및 입목수간재적표 등이 반영되어 있는 상태로 현행화가 필요하다. 또한 신규 입목수간재적표는 기존 입목수간재적표보다 3수종의 재적을 추가로 개발하였기 때문에 다양한 수종의 재적을 보다 정확하게 산정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 국가 온실가스 인벤토리 적용을 위해 다음과 같은 방안을 제시하고자 한다. 우선 기존의 산림부문의 온실가스 인벤토리의 정확성을 높이기 위해서는 현재 국가산림자원조사시스템 (NFIS)의 재적 추정 알고리즘을 개선해야 한다. 신규 입목수간재적표 적용 시 입목재적의 수종 구분의 세분화로 개체목 재적을 정확하게 추정할 수 있고, 산림자원 통계의 투명성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 특히 유령림을 기준으로 개발되었던 기존 입목수간재적표와 달리 장령림을 포함한 신규 입목수간재적표 적용은 대경급 산림자원의 재적을 정확하게 추정하게 됨으로써 산림자원 통계의 정확성 향상시킬 수 있을 것이다. 또한 신규 입목수간재적표 적용 후에는 기존의 임목축적 자료의 재계산을 수행해야 한다. 통계의 정확성 향상과 시계열 일관성 확보를 위해서 IPCC 가이드라인에서는 재계산을 권고하고 있다. 국내의 경우 국가산림자원조사 체계에 의한 임목축적 불균형의 문제를 해결하기 위해서 재계산을 수행한바 있다 (Lee et al., 2016). 신규 입목수간재적표 적용에도 기존의 임목축적과의 차이가 발생하기 때문에 1990년 이후의 임목축적의 재산정이 요구된다. 이는 UNFCCC의 국가 온실가스 인벤토리 보고 시 국

제적 검토 (Expert review team, ERT)에서도 지적 받을 수 있기 때문이다 (Lee et al., 2016).

4. 결론

본 연구에서는 산림의 탄소저장량 추정을 위한 신규 입목수간재적표 적용 방안을 제시하고자 한다. 입목수간재적표 제작을 위해 개발된 Kozak 모수를 활용하여 임목축적을 재계산 하였으며, 국가고유계수와 IPCC 기본 값을 활용하여 탄소저장량 및 변화량을 분석하였다. 그 결과 신규 입목수간재적표 (접근방법2) 적용으로 추정된 임목축적이 기존 입목수간재적표 (접근방법1)를 적용한 임목축적보다 높았으며, 통계적으로 유의한 차이를 보였다 ($p < 0.05$). 접근방법에 따른 임목축적의 차이는 접근방법2가 접근방법1보다 중경급 이상의 재적을 정확하게 산출하였기 때문에 판단된다. 접근방법2 기준의 연간 임목축적 변화량 ($m^3/ha/yr$)은 소나무림의 경우 5.7 ± 0.74 , 신갈나무림의 경우 5.65 ± 0.37 , 일본잎갈나무림의 경우 9.54 ± 1.08 으로 나타났으며, 신갈나무와 일본잎갈나무의 연간 임목축적 변화량이 기존 연구결과보다 높은 이유는 강원도가 두 수종의 적지이기 때문인 것으로 판단된다. 추정된 임목축적을 활용하여 연간 탄소저장량 ($Ct/ha/yr$)을 산출한 결과 소나무는 2.28 ± 0.30 , 신갈나무는 3.98 ± 0.26 , 일본잎갈나무는 3.79 ± 0.43 의 탄소를 저장하는 것으로 나타났다. 파리협정 체결에 따라 국가 온실가스 인벤토리 통계의 투명성이 요구되는 상황에서 산림부문 온실가스 통계의 정확성을 향상시키기 위해서는 현재 국가산림자원조사시스템의 재적 추정 알고리즘을 개선해야 하고, 신규재적표 적용 후에는 임목축적을 재산정해야 한다. 본 연구는 강원도를 대상으로 수행한 시범연구로 향후 전국단위 시범연구가 필요하다. 또한 향후 입목수간재적표 개선계획에 있는 편백, 삼나무의 재적표 개발 및 적용성 검토 등의 연구도 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 “산림청 (한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업 (신기후체제 대응 산림분야 국가 온실가스 인벤토리 산정체계 및 탄소계정 고도화 연구 : 2017044B10-1919-BB01)”의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Besnard S, Carvalhais N, Arain. M.A, Black A, Bruin S, Buchmann N, Cescatti A, Chen J, Clevers JGPW, Desai A, Gough CM, Havrankova K, Herold M, Hörtnagl L, Jung M, Knohl A, Kruijt B, Krupkova L, Law BE, Lindroth A, Noormets A, Roupsard O, Steinbrecher R, Varlagin A, Vincke C, Reichstein M. 2018. Quantifying the effect of forest age in annual net forest carbon balance. *Environmental Research Letter* 13 (12): 1-10.
- Cao J, Gong Y, Adamowski JF, Deo RC, Zhu G, Dong A, Zhang X, Liu H, Xin Cunlim. 2019. Effects of stand age on carbon storage in dragon spruce forest ecosystems in the upper reaches of the Bailongjiang River basin, China. *Science Reports* 9: 3005.
- Chung YG, Kim DH, Kim CM. 2010. Development of stem profile and taper equation for *Carpinus laxiflora* in Jeju experimental forests national institute of forest science. *Journal of Agriculture & Life Science* 44 (4): 1-7.
- GIR (Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea). 2016. National greenhouse gas inventory report 2016. Seoul: GIR (in Korean).
- IPCC. 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Hayama: IPCC/IGES.
- IPCC. 2006. IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventory. Hayama: IPCC/IGES.
- Kang JT, Son YM, Kim SW, Lee SJ, Park H. 2014. 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 JT, Son YM, Kim SW, Park H, Hwang JS. 2014. Development of local stem volume table for *Larix kaempferi* using Kozak's stem taper model. *Journal of agriculture & life science, Gyeongsang national university* 48 (6): 119-131 (in Korean with English abstract).
- Kang JT, Moon HS, Son YM, Ahn KW. 2015a. An estimation on the stem volume of *Cryptomeria japonica* in Jeju using Kozak's stem taper model. *The Journal of Korean Island* 27 (3): 145-160.
- Kang JT, Son YM, Jeon JH, Yoo BO. 2015b. 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.
- Kang JT, Son YM, Jeon JH, Lee SJ. 2017. Assessment of carbon stock and uptake by estimation of stem taper equation for *Pinus densiflora* in Korea. *Journal of Climate Change Research* 8 (4): 415-424.
- Kang JT, Son YM. 2016. Application of the stem table for major tree species in South Korea. Seoul: NIFoS (in Korean).
- Kim R, Lee DH, Yim JS, Lee N, Oh KM, Kim MK. 2019. the 24th climate change conference of parties : outcome and implication in forests. Seoul, Korea: NIFoS Global policy topic of forests 79 (in Korean).
- Kim SW, Kang JT, Hwang JS, Lee SJ, Park H, Son YM. Stand growth analysis and carbon stocks/removals assessment on forest growth monitoring plots in Korea. *Journal of Agriculture & Life Science* 48 (6): 11-19 (in Korean with English abstract).
- KFRI (Korea Forest Research Institute). 2011. The 5th national forest inventory report. Seoul, Korea: KFRI (in Korean).
- KFS (Korea Forest Service). 2016. Statistical yearbook of forest. Daejeon, Korea: KFS (in Korean).
- KFS (Korea Forest Service). 2009. The table of the stem volume, biomass, and yield. Daejeon, Korea: KFS (in Korean).
- KFS (Korea Forest Service). 2012. The 6th national forest inventory and forest health monitoring - Field manual Ver. 1.2 -. Daejeon, Korea: KFS (In Korean).
- KFS (Korea Forest Service), Kofpi (Korea Forestry Promotion Institute). 2013. Assessment of the Korea's forest resources. Seoul, Korea: Kofpi (in Korean).
- KFS (Korea Forest Service), NIFoS (National Institute of Forest Science). 2018. The table of the stem volume, biomass, and yield. Seoul, Korea: KFS and NIFoS (in Korean).
- Ko CU, Kim DG, Kang JT. 2019a. 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 (in Korean with English abstract).
- Ko CU, Kang JT, Son YM, Kim DG. 2019b. Estimating stem volume using stem taper equation for *Quercus mongolica* in South Korea. *Forest Science and Technology*. 15:2. pp. 58-62.

- Kozak, A. 1988. A variable-exponent taper equation. *Canada Journal of Forest Research* 18: 1363-1368.
- Lee DS, Seo YW, Park G, Choi JG. 2015. Estimation of site index for *Larix kaempferi* and *Pinus koraiensis* in Gangwon and North Gyeongsan province. *Journal of Forest and Environmental Science* 31 (3): 202-206.
- Lee SJ, Yim JS, Son YM, Kim R. 2016. Recalculation of forest growing stock for national greenhouse gas inventory. *Journal of Climate Change Research* 7 (4): 485-492 (in Korean with English abstract).
- Lee KH, Son YM, Yim JS, Kim R, Lee SJ, Ko CU. 2018. Practical measurement and survey of forests. Seoul, Korea: NIFos (in Korean).
- Lee YS, Sung JH, Chun JH, Shin MY. 2012. Development of site index equations and assessment of productive areas based on environmental factors for major coniferous tree species. *Journal of Korean Forest Society* 101 (3): 395-404 (in Korean with English abstract).
- MOE (Ministry of the Environment, Japan). 2011. National greenhouse gas inventory report of Japan. Tokyo, Japan: MOE.
- NIFoS (National Institute of Forest Science). 2016. Empirical stand yield table. Seoul, Korea: NIFos (in Korean).
- Oh JG. 2018. Analysis of negotiation on the Paris Agreement and the follow-up process and its implications. *Journal of Climate Change Research* 9 (4): 343-355 (in Korean with English abstract).
- Oh JG. 2019. Analysis of guidance and rule on the 24th climate change conference of parties of year 2018. *World Energy Market Insight* 19 (11): 3-13 (in Korean).
- SF (Statistics Finland). 2015. Greenhouse gas emissions in Finland 1990~2013. Helsinki, Finland: SF.
- Shin MY, Sung JH, Chun JH. 2012. Estimating forest site productivity and productive area of *Quercus acutissima* and *Quercus mongolica* using environmental variables. *Korean Journal of Agricultural and Forest meteorology* 14 (1): 89-97 (in Korean with English abstract).
- Son YM, Kim H, Lee HW, Kim CM, Kim CS, Kim JW, Joo RW, Lee KH. 2009. Taper equations and stem volume table of *Eucalyptus pellita* and *Acacia mangium* plantations in Indonesia. *Journal of Korean Forest Society* 98 (6): 633-638.
- Son YM, Jeon JH, Pyo JK, Kim KN, Kim SW, Lee KH. 2012. Development of stem volume table for Robinia pseudoacacia using Kozak's stem profile model. *Journal of Agriculture & Life science* 46 (6): 43-49.
- Son YM, Kang JT, Jeon JH, Ko CU. 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. 2015. Paris Agreement; [assessed 2019 Nov 19]. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf