

우리나라 소나무의 수간곡선식 추정에 의한 탄소저장량 및 흡수량 산정

강진택[†] · 손영모 · 전주현 · 이선정

국립산림과학원 산림산업연구과

Assessment of Carbon Stock and Uptake by Estimation of Stem Taper Equation for *Pinus densiflora* in Korea

Kang, Jin-Taek[†], Son, Yeong-Mo, Jeon, Ju-Hyeon and Lee, Sun-Jeoung

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

ABSTRACT

This study was conducted to estimate carbon stocks of *Pinus densiflora* with drawing volume of trees in each tree height and DBH applying the suitable stem taper equation and tree specific carbon emission factors, using collected growth data from all over the country. Information on distribution area, tree age, tree number per hectare, tree volume and volume stocks were obtained from the 5th National Forest Inventory (2006~2010) and Statistical yearbook of forest (2016), and method provided in IPCC GPG was applied to estimate carbon stock and uptake. Performance in predicting stem diameter at a specific point along a stem in *Pinus densiflora* by applying Kozak's model, $d = a_1 DBH^{a_2} a_3^{DBH} X^{b_1 Z^2 + b_2 \ln(Z+0.001) + b_3 \sqrt{Z} + b_4 e^Z + b_5 (\frac{DBH}{H})}$, which is well known equation in stem taper estimation, was evaluated with validations statistics, Fitness Index, Bias and Standard Error of Bias. Consequently, Kozak's model turned out to be suitable in all validations statistics. Stem volume table of *P. densiflora* was derived by applying Kozak's model and carbon stock tables in each tree height and DBH were developed with country-specific carbon emission factors (WD = 0.445 t/m³, BEF = 1.445, R = 0.255) of *P. densiflora*. As the results of analysis in carbon uptake for each province, the values were high with Gangwon-do 9.4 tCO₂/ha/yr, Gyeongsangnam-do and Gyeonggi-do 8.7 tCO₂/ha/yr, Chungcheongnam-do 7.9 tCO₂/ha/yr and Gyeongsangbuk-do 7.8 tCO₂/ha/yr in order, and Jeju-do was the lowest with 6.8 tC/ha/yr. Total carbon stocks of *P. densiflora* were 127,677 thousands tC which is 25.5% compared with total percentage of forest and carbon stock per hectare (ha) was 84.5 tC/ha and 7.8 tCO₂/ha/yr, respectively.

Key words: Volume, Stem Taper Equation, Carbon Emission Factors, National Forest Inventory, Kozak Model

1. 서 론

산림은 육상의 생태계 발달과 유지 등의 기능과 함께 전 지구적 탄소순환의 중요한 요소이며, 이러한 기능과 중요성으로 인하여 기후변화협약에서도 흡수원으로 인정받고 있다(Lee *et al.*, 2015; KFRI, 2013; UNFCCC, 2009). 우리나라도 국토 면적의 약 63%를 차지하는 산림을 기후변화 대응을 위한 감축 수단의 하나인 흡수원으로 최대한 활용하기 위하여 과학적·정책적으로 접근하여 노력하고 있다(The Republic of Korea, 2011). 이러한 우리나라 산림의 대표적 수종인 소나무는 산림 면적의 25.9%(156만 ha)를 차지하고 있다(KFS, 2016a). 소나

무의 분포는 수직적으로 북위 43° 20'의 함북에서부터 북위 33° 20'제주 한라산에 이르고 있으며, 또한 수직적으로 표고 10 m에서 최고 1,300 m까지 분포하고 있다(Chung and Lee, 1965). 소나무는 우리나라의 기상조건과 환경에 적응력이 높아서 가장 넓은 면적에 가장 많이 자라고 있으며, 주요 용제는 건축재와 펄프재 등으로 사용되어지고 있는 중요한 수종이다. 전 세계적으로 온실효과로 인한 기후변화에 대처하기 위하여 이산화탄소 흡수원과 방출원 및 주요 생태계의 탄소축적량 평가에 연구가 중요하게 다루어지고 있다(Lee *et al.*, 2009). 소나무는 우리나라의 기상조건과 환경에 적응력이 높아서 가장 넓은 면적에 가장 많이 자라고 있으며, 주요 용제는 건축재

[†] Corresponding author: beg8bunc@korea.kr

Received November 13, 2017 / Revised November 24, 2017 1st, December 8, 2017 2nd / Accepted December 15, 2017

와 펄프재 등으로 사용되어지고 있는 중요한 수종이다.

1980년대 중반 이후 온난화가 가속되고 있고, 그 결과 기상 이변, 사막화의 진전, 극빙의 해빙, 해수면의 상승과 생태계의 파괴가 급속히 진행되었다. 이러한 일련의 현상은 CO₂ 농도의 증가가 주요 원인인 것으로 밝혀지고 있다(Cannell *et al.*, 1992; Tans *et al.*, 1990; Ramanathan, 1988; Jone *et al.*, 1986; Wigley, 1985; Post *et al.*, 1982). 1997년 12월 일본 교토에서 개최된 기후변화협약 제3차 당사국 총회에서는 이산화탄소 흡수원으로서 산림의 역할이 크게 주목 받게 되었다(Choi and Joo, 2011). 이는 산림이 대기중의 이산화탄소를 흡수하여 오랜 기간 동안 산림바이오매스와 토양 내에 저장할 수 있기 때문이다. 최근 이러한 산림이 유일한 탄소흡수원으로서 중요한 역할을 하고 있는 가운데 산림의 수종별 국가고유 계수 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 수종별 온실가스 배출·흡수계수는 산림부문의 온실가스 배출을 정량화하는 계수로, 국가와 지자체 온실가스 배출량 산정 및 산림의 탄소상쇄사업 등에서 탄소저장량 및 흡수량을 산정할 때 사용된다. 특히, 국가 온실가스 보고서 작성에 있어서 국가 고유계수를 개발하여 적용하면 『기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)』에서 제시된 기본값을 사용한 통계보다 통계의 신뢰성이 높은 수준으로 인정되고 있다. 이러한 국가 고유계수를 이용하여 주요 수종별 탄소저장·흡수량을 정확히 산정할 수 있다. 또한 산림의 전체 면적과 수종별 면적, 축적 등에 대한 정보를 획득하기 위해서는 국가 단위의 산림통계정보를 수집할 수 있는 장치가 필수적이다. 현재 우리나라는 국가산림자원조사(National Forest Inventory; NFI) 자료와 수치지상도(1:5,000) 자료를 통하여 산림에 대한 세부적인 정보를 얻고 있다. 최근 이러한 방대하고 정교한 정보를 통하여 수종별 산림면적, ha당 임목축적 등 다양한 정보를 수집·이용할 수 있으며, 산림의 수종별 탄소저장량 추정이 가능하게 되었다. 최근 기후변화에 대한 관심이 고조되면서 탄소량 추정에 관한 연구(Son *et al.*, 2013b, 2014d; Kim *et al.*, 2010; Song *et al.*, 1997)와 고해상도 위성영상을 이용하여 바이오매스나 탄소저장량 추정에 관한 연구(Park and Lee, 2011; Lee *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2009; Thenkabail *et al.*, 2004)가 활발히 이루어지고 있다.

본 연구는 우리나라 소나무의 탄소저장량을 추정하기 위하여 최적의 수간곡선모델에 의한 소나무의 재적을 추정하고, 탄소배출계수와 국가산림자원조사 자료 및 임상도 등의 자료를 이용하여 우리나라 전체 소나무의 탄소저장량을 추정하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시재료

2.1.1 자료수집

본 연구는 우리나라 전역에 분포하고 있는 소나무에 대하여 탄소저장량을 추정하기 위하여 전국에서 수집한 소나무 2,320본의 벌채목 자료를 이용하여 현실림의 임목 바이오매스량을 추정하였으며, 분석에 이용된 개체목 성장특성은 Table 1과 같다.

우리나라 전역에 분포하고 있는 소나무림을 대상으로 직경급(소, 중, 대)과 지역별 현실림의 성장특성이 고르게 반영되도록 표준목 2,320본을 선정·벌채하였으며, 수간고별 직경, 수고, 지하고, 임령의 성장특성과 임분특성을 조사하여 임목 바이오매스량 추정에 사용하였다.

2.1.2 소나무 분포면적

전국에 걸쳐 분포하고 있는 소나무의 분포면적을 추출하기 위하여 1:5,000 임상도 총 16,270도엽을 이용하였다. 본 연구에 사용된 자료인 1:5,000 임상도는 2008~2012년까지 5년 동안 구축한 임상도이며, 임상도의 산림 정의에 따라 최소면적은 인공림 0.1 ha, 천연림 0.5 ha, 최소폭 20 m를 기준으로 판독한 자료이다(Fig. 1). 이러한 임상도 분석 자료를 이용하여 2016 임업통계연보의 수종별 면적자료를 작성하였다. 따라서 본 연구에서 소나무의 도별 및 전국 분포면적은 1:5,000 임상도를 기반으로 한 2016 임업통계연보(KFS, 2016) 자료를 이용하였으며, 소나무의 면적은 1,562천 ha(25.9%)로 분석되었다.

2.2 수간곡선식 및 임목의 성장량 추정

본 연구에서는 임목의 수간곡선 추정에 의한 현실림의 재적추정을 위하여 우리나라 임목의 수간곡선식 추정에 적합한

Table 1. Data summary of stem analysis of *Pinus densiflora* used in this study

Species	Age (yr)			DBH (cm)			Height (m)		
	Min.	Max.	Mean	Min.	Max.	Mean	Min.	Max.	Mean
<i>Pinus densiflora</i>	8.0	107.0	40.2	2.4	50.4	21.7	1.7	26.2	13.8

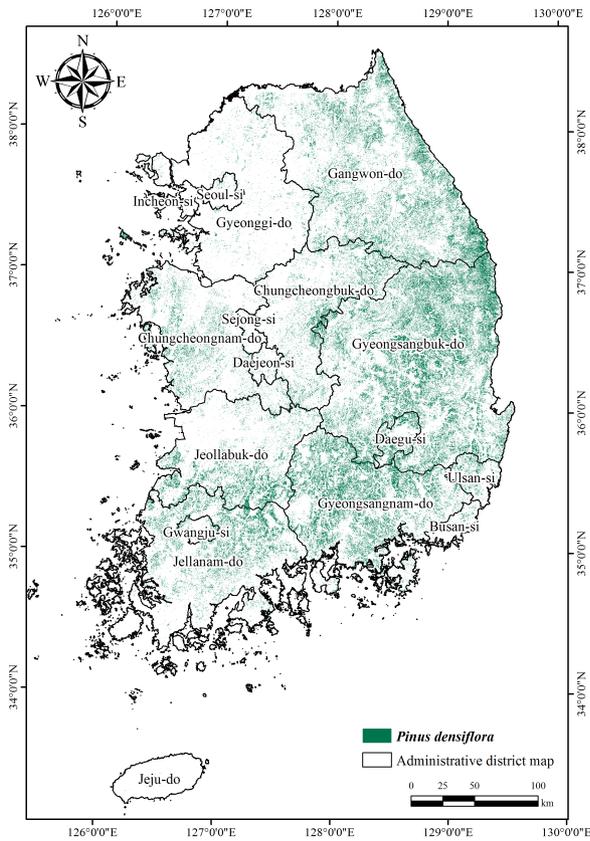


Fig. 1. Growing space distribution of *Pinus densiflora* stand in Korea.

널리 알려진 Kozak 모델을 이용하였으며(Table 2), 모델에 대한 적합성 검정을 위하여 검정통계량에 의한 최적 모형을 판정하였다. 수간곡선모델을 이용하여 수간곡선 모양을 구하고 이를 수간중심선 중심으로 회전시켜 수간재적을 산출하여 재적표를 조제하였다(Kang et al., 2014b; Lee et al., 2003; Kozak,

Table 2. Applied stem taper equation for fitting of *Pinus densiflora* in this study

Model	Taper equation
	$d = a_1 DBH^{a_2} a_3 DBH X^{b_1 Z^2 + b_2 \ln(Z + 0.001) + b_3 \sqrt{Z} + b_4 e^Z + b_5 \left(\frac{DBH}{H}\right)}$
Kozak	where $Z = \text{relative height} \left(= \frac{h}{H} \right)$ $X = \frac{1 - \sqrt{\frac{h}{H}}}{1 - \sqrt{p}} \quad (p = \frac{HI}{H}, \quad HI; \text{ inflection point})$ $a_i, b_i = \text{parameters}$

1988; Max and Burkhardt, 1976).

Table 3은 각 수간곡선식의 수간높이별 수간직경 추정 이행능력을 평가하기 위해 적합도지수(Fitness Index; FI), 편의(Bias), 추정치 표준오차의 백분율(Standard Error of Estimate; SEE%), 평균절대편차(Mean Absolute Deviation; MAD) 등의 검정통계량으로, 소나무의 수간곡선을 추정하기 위해 사용된 모델에 대한 검정을 위해 사용되었다(Lee et al., 1999; Son et al., 2009c, 2012; Kang et al., 2014c).

검정통계량 중 적합도지수(FI)는 회귀분석에서의 결정계수와 같은 성격의 지수이며, 비선형회귀분석에서의 결정계수는 의미가 없으므로 실측치와 추정치와의 관계정도를 구명하기 위하여 나타내는 것이며, 편의(Bias)는 추정량이 평균적으로 모수의 참값에 대해 어느 정도 과소치 혹은 과대치를 주는지를 나타내준다. 추정치 표준오차의 백분율(SEE%)은 모델의 상대적인 정도(Accuracy)를 평가하고, 평균절대편차(MAD)는 각 추정치 잔차의 절대값을 평균한 값으로 각 추정치의 평균적인 편차 크기를 나타내 주는 것이다.

2.3 소나무 분포면적 및 임황정보 분석

전국에 분포하고 있는 소나무의 분포면적과 임목축적은 2016년도 임업통계연보 자료를 이용하였으며, 영급 및 경급, ha당 분수 등에 관한 정보를 추출하기 위하여 전국 4,000여개의 표본점을 바탕으로 산림정보가 수집되는 제 6차 국가산림자원조사(NFI)의 자료를 이용하였다.

2.4 탄소저장량 추정

국가산림자원조사 자료에서 소나무의 면적, 임목축적, ha

Table 3. Fit statistics for evaluating taper equation

Statistics	Equation
Fitness index (FI)	$FI = 1 - \sum \frac{(Y_i - \hat{Y}_i)^2}{(Y_i - \bar{Y})^2}$
Bias	$\bar{D} = \sum \frac{Y_i - \hat{Y}_i}{n}$
Standard error of estimate as percent of the mean (SEE%)	$SEE\% = \frac{\sqrt{\frac{(ei - \bar{D})^2}{N-1}}}{\bar{Y} \times 100}$
Mean absolute difference (MAD)	$ \bar{D} = \frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i) }{n}$

당 본수 및 재적 등의 정보를 이용하였으며, 탄소저장량 추정 은 IPCC GPG(2003)에서 제시하는 탄소저장량 추정 방법을 적용하였으며(식 1), 이용된 탄소배출계수는 소나무의 국가고유의 계수로서 Table 4와 같다(Son *et al.*, 2013b).

$$C = \sum_j (V_j \cdot D_i \cdot BEF_j) \cdot (1 + R_j) \cdot CF \quad (1)$$

C : Carbon storage (tC)

V : Volume (m³)

D : Basic wood density (t · dm/m³)

BEF : Biomass expansion factor

R : Root to shoot ration

CF : Carbon fraction

여기서, *V*는 재적(m³/ha), *BEF*는 바이오매스 확장계수, *D*는 목재기본밀도(t · dm/m³), *R*은 뿌리함량비, 0.5는 탄소전환 계수를 나타낸다(IPCC, 2003).

Table 4에서 우리나라는 소나무의 탄소배출계수는 현재 강원지방소나무와 중부지방소나무로 구분하여 적용하고 있다. 본 연구에서는 강원지방소나무와 중부지방소나무의 탄소배출계수 평균값을 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수간곡선 파라미터 도출

수간곡선식 Kozak 모델의 수간곡선 추정 파라미터와 수간곡선식에 대한 검정통계량을 도출한 결과는 Table 5와 같다.

Table 5에서, 적합도지수, 편의 등 기타 검정통계량 값으로 모델의 적합성을 검토하였다. Kozak 모델에 의해 추정된 수

간곡선식의 적합성은 97.4%로 소나무의 수간곡선을 추정하는데 적합한 것으로 나타났으며, 기존의 연구에서 제시한 적합도지수와 유사하게 나타났다(Son *et al.*, 2012a; Chung *et al.*, 2010; Son *et al.*, 2009d). Kozak 모델의 수간곡선 모형 적합성을 좀 더 정밀하게 알아보기 위하여 잔차를 도식한 결과, 잔차는 ‘0’을 중심으로 하여 고르게 분포하고 있었다(Fig. 2). 따라서 Kozak 모델이 소나무 수간곡선을 설명하는데 우수함을 알 수 있어, 소나무의 수간곡선을 추정하는데 있어 적합한 식임을 알 수 있었다. 그러므로 본 수간곡선을 재적추정에 이용하였다.

Table 5. Parameter estimates for three taper equations of *Pinus densiflora*

Species	Model	Kozak	
<i>Pinus densiflora</i>	Parameter	<i>a</i> ₀	1.6642
		<i>a</i> ₁	0.7331
		<i>a</i> ₂	1.0055
		<i>b</i> ₁	-0.2962
		<i>b</i> ₂	-0.0063
	FI	<i>b</i> ₃	-0.7539
		<i>b</i> ₄	0.6297
		<i>b</i> ₅	0.0769
		SEE	1.5406
		Bias	-0.0129
MAD	1.1282		

Table 4. Carbon emission factors of *Pinus densiflora*

Species	Basic wood density (D) (Unit: t · dm/m ³)	Biomass expansion factor (BEF)	Root-shoot ratio (R)
Gwangwon regional <i>Pinus densiflora</i> *	0.420	1.480	0.260
Jungbu regional <i>Pinus densiflora</i> **	0.470	1.410	0.250
<i>Pinus densiflora</i> ***	0.445	1.445	0.255

* Gwangwon regional *Pinus densiflora*: 강원도 전역, 경북 북부(영주, 봉화, 울진, 영양군) 지역에 있는 소나무, 강원지방 소나무라고 함.

** Jungbu regional *Pinus densiflora*: 강원도 전역, 경북 북부(영주, 봉화, 울진, 영양군) 지역을 제외한 지역에 있는 소나무, 중부지방 소나무라고 함.

*** *Pinus densiflora*: 강원지방 소나무와 중부지방 소나무를 통틀어 소나무라고 함.

3.2 수간곡선형 추정

Kozak 모델의 파라미터를 이용하여 소나무의 수간형을 상대수고(Relative Height; RH)를 토대로 도식화 하였다(Fig. 2). 정밀한 수간곡선형의 비교는 그림 상에서 식별하기 곤란하나, 초살도가 낮을수록 임목의 부피, 즉 재적이 그만큼 높게 나타날 수 있음을 의미한다. Fig. 3에서 소나무의 수형은 초살도가 높지 않고 상대수고별로 직경급이 고르게 분포하는 정상적인 모양의 수간곡선형을 유지하고 있었다.

3.3 수간재적 추정

소나무 현실림에 대한 정확한 탄소저장량을 추정하기 위하여 지역별 성장특성이 최대로 반영된 최적의 수간곡선식을 이용하여 수간재적 도출이 요구된다. 각 표본목의 수피포함 수간재적 실측치는 측정된 수간고와 직경을 토대로 Smalian 식에 의한 구분구적법으로 계산하였으며, 반면 수간재적 추정치는 먼저 측정된 수간고와 직경에 의해 모델별 수간곡선식

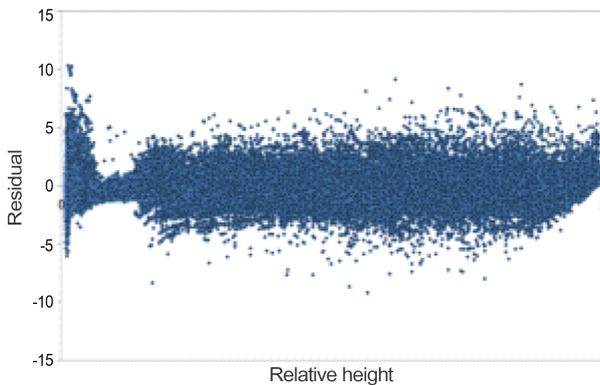


Fig. 2. Residual distribution of estimated diameter by relative height of *Pinus densiflora*.

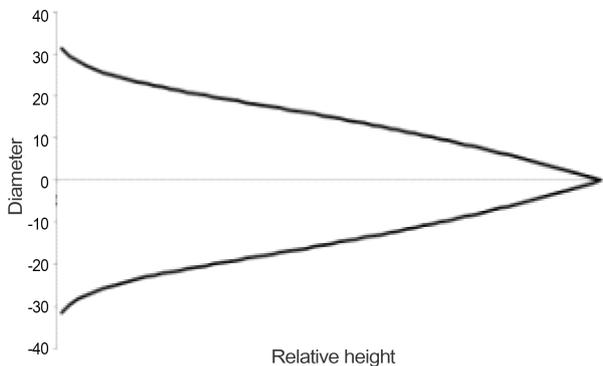


Fig. 3. Stem taper curve pattern of *Pinus densiflora*.

을 도출한 후, 이를 이용하여 수간고 10cm 간격으로 직경을 추정하고, Smalian식에 의한 구분구적법으로 산출하였다(Son et al., 2012a; Kang et al., 2014b). 각 모형별 수간곡선식에 의해 얻어진 추정재적과 실측재적을 비교하여 실측재적을 가장 잘 적합시키는 최적 수피포함 수간곡선식인 Kozak 모델을 이용하여 소나무의 수간재적표를 도출한 결과는 아래 Table 6과 같다.

현재 사용하고 있는 소나무의 임목재적표는 최초 1973년에 조제되어 중간에 몇 차례 보완하여 왔지만, 재적표 개발에 이용된 대부분의 자료들은 1973년 이전에 수집된 자료들로 평균 흉고직경이 낮은 데이터를 이용하여 만들어졌기 때문에 현실림에 적용시 과대·과소치를 보이고 있다. 따라서 본 연구에서는 현실림의 임분특성과 지역별 성장특성을 충분히 반영한 흉고직경 4~100 cm, 수고 3~35 m까지의 새로운 임재적표를 조제하였으며, 본 연구에서는 편의상 Table 6과 같이 흉고직경 6~30 cm, 수고 6~25 m까지만 제시하였다. 따라서 본 연구에서는 현실림의 임분특성을 충분히 반영한 새로운 소나무의 재적표를 개발하여 산림의 탄소저장·흡수량 산정에 적용함으로써 정확성을 높일 수 있을 것으로 기대하고 있다.

3.4 탄소저장량 추정

온실가스 배출·흡수계수는 부문 온실가스 배출을 정량화하는 계수로, 국가와 지자체 온실가스 배출량 산정 및 산림의 탄소상쇄사업 등에서 탄소저장량 및 흡수량을 산정할 때 사용된다. 특히, 국가 온실가스 인벤토리 보고서 작성에 있어서 국가 고유계수를 개발하여 적용하면 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 제시된 기본값을 사용한 통계보다 통계의 신뢰성이 높은 수준으로 인정되고 있다. 따라서 산림부문 탄소흡수량 산정을 위하여 국립산림과학원에서 개발한 국가 고유계수를 이용하였다. Table 7은 개발된 우리나라 국가 고유의 탄소배출계수를 Kozak 수간곡선 모델에 의해 도출한 소나무 재적표에 적용하여 흉고직경 및 수고별 탄소저장량을 계산한 결과이다. 지역별 성장특성을 반영한 소나무 현실림의 수고 및 직경별 탄소저장량을 나타낸 표로서, 임목의 수고와 흉고직경을 알면 쉽게 탄소저장량을 찾아서 이용할 수 있다.

제 6차 국가산림자원조사(KFS, 2016) 자료의 소나무 영급별 분포면적, ha당 본수 및 축적 정보를 이용하여 지역별 탄소저장량을 추정한 결과는 Table 8과 같다.

지역별 탄소저장량과 흡수량 분석 결과, 탄소저장량에서는 강원도 109.8 tC/ha, 경상남도과 경기도 87.4 tC/ha, 제주도 85.9

Table 6. Estimation stem volume table using the suitable Kozak's taper equation of *Pinus densiflora* (Unit: m³)

H(m) \ DBH(cm)*	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
5	0.0106	0.0163	0.0230	0.0305	0.0390	0.0483	0.0587	0.0700	0.0825	0.0960	0.1108	0.1268	0.1442
6	0.0128	0.0197	0.0277	0.0368	0.0470	0.0583	0.0707	0.0844	0.0992	0.1153	0.1329	0.1518	0.1723
7	0.0149	0.0231	0.0325	0.0432	0.0551	0.0683	0.0828	0.0987	0.1160	0.1348	0.1551	0.1770	0.2007
8	0.0171	0.0264	0.0373	0.0495	0.0632	0.0783	0.0950	0.1132	0.1329	0.1544	0.1775	0.2025	0.2293
9	0.0193	0.0298	0.0420	0.0558	0.0713	0.0884	0.1071	0.1276	0.1499	0.1740	0.2000	0.2280	0.2581
10	0.0215	0.0332	0.0468	0.0622	0.0794	0.0984	0.1193	0.1421	0.1669	0.1937	0.2226	0.2537	0.2871
11	0.0237	0.0366	0.0516	0.0685	0.0875	0.1085	0.1315	0.1566	0.1839	0.2134	0.2452	0.2794	0.3161
12	0.0258	0.0400	0.0563	0.0749	0.0956	0.1185	0.1437	0.1711	0.2009	0.2331	0.2679	0.3052	0.3452
13	0.0280	0.0433	0.0611	0.0812	0.1037	0.1286	0.1559	0.1857	0.2180	0.2529	0.2906	0.3310	0.3744
14	0.0302	0.0467	0.0659	0.0876	0.1118	0.1387	0.1681	0.2002	0.2351	0.2727	0.3133	0.3569	0.4037
15	0.0324	0.0501	0.0706	0.0939	0.1200	0.1487	0.1803	0.2148	0.2522	0.2926	0.3361	0.3828	0.4329
16	0.0345	0.0534	0.0754	0.1003	0.1281	0.1588	0.1926	0.2293	0.2693	0.3124	0.3589	0.4088	0.4623
17	0.0367	0.0568	0.0802	0.1066	0.1362	0.1689	0.2048	0.2439	0.2864	0.3323	0.3817	0.4348	0.4916
18	0.0389	0.0602	0.0849	0.1130	0.1443	0.1790	0.2170	0.2585	0.3035	0.3521	0.4045	0.4607	0.5210
19	0.0411	0.0636	0.0897	0.1193	0.1524	0.1891	0.2292	0.2731	0.3206	0.3720	0.4273	0.4868	0.5504
20	0.0432	0.0669	0.0944	0.1257	0.1606	0.1991	0.2415	0.2876	0.3377	0.3919	0.4502	0.5128	0.5798
21	0.0454	0.0703	0.0992	0.1320	0.1687	0.2092	0.2537	0.3022	0.3549	0.4118	0.4730	0.5388	0.6093
22	0.0476	0.0737	0.1040	0.1384	0.1768	0.2193	0.2660	0.3168	0.3720	0.4317	0.4959	0.5649	0.6387
23	0.0498	0.0771	0.1087	0.1447	0.1849	0.2294	0.2782	0.3314	0.3892	0.4516	0.5188	0.5909	0.6682
24	0.0519	0.0804	0.1135	0.1511	0.1930	0.2395	0.2904	0.3460	0.4063	0.4715	0.5416	0.6170	0.6977
25	0.0541	0.0838	0.1183	0.1574	0.2012	0.2496	0.3027	0.3606	0.4234	0.4914	0.5645	0.6431	0.7272

* DBH(cm): Diameter at breast height, H(m): Height.

Table 7. Stock of carbon by DBH and height class in a *Pinus densiflora*

(Unit: tC)

H(m) \ DBH(cm)*	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
5	0.0043	0.0066	0.0093	0.0123	0.0157	0.0195	0.0237	0.0282	0.0333	0.0387	0.0447	0.0512	0.0582
6	0.0052	0.0079	0.0112	0.0148	0.0190	0.0235	0.0285	0.0341	0.0400	0.0465	0.0536	0.0613	0.0695
7	0.0060	0.0093	0.0131	0.0174	0.0222	0.0276	0.0334	0.0398	0.0468	0.0544	0.0626	0.0714	0.0810
8	0.0069	0.0107	0.0151	0.0200	0.0255	0.0316	0.0383	0.0457	0.0536	0.0623	0.0716	0.0817	0.0925
9	0.0078	0.0120	0.0169	0.0225	0.0288	0.0357	0.0432	0.0515	0.0605	0.0702	0.0807	0.0920	0.1041
10	0.0087	0.0134	0.0189	0.0251	0.0320	0.0397	0.0481	0.0573	0.0673	0.0782	0.0898	0.1024	0.1158
11	0.0096	0.0148	0.0208	0.0276	0.0353	0.0438	0.0531	0.0632	0.0742	0.0861	0.0989	0.1127	0.1275

Table 7. Continued

H(m) \ DBH(cm)*	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
12	0.0104	0.0161	0.0227	0.0302	0.0386	0.0478	0.0580	0.0690	0.0811	0.0941	0.1081	0.1231	0.1393
13	0.0113	0.0175	0.0247	0.0328	0.0418	0.0519	0.0629	0.0749	0.0880	0.1020	0.1173	0.1336	0.1511
14	0.0122	0.0188	0.0266	0.0353	0.0451	0.0560	0.0678	0.0808	0.0949	0.1100	0.1264	0.1440	0.1629
15	0.0131	0.0202	0.0285	0.0379	0.0484	0.0600	0.0728	0.0867	0.1018	0.1181	0.1356	0.1545	0.1747
16	0.0139	0.0215	0.0304	0.0405	0.0517	0.0641	0.0777	0.0925	0.1087	0.1261	0.1448	0.1650	0.1865
17	0.0148	0.0229	0.0324	0.0430	0.0550	0.0682	0.0826	0.0984	0.1156	0.1341	0.1540	0.1754	0.1984
18	0.0157	0.0243	0.0343	0.0456	0.0582	0.0722	0.0876	0.1043	0.1225	0.1421	0.1632	0.1859	0.2102
19	0.0166	0.0257	0.0362	0.0481	0.0615	0.0763	0.0925	0.1102	0.1294	0.1501	0.1724	0.1964	0.2221
20	0.0174	0.0270	0.0381	0.0507	0.0648	0.0803	0.0974	0.1160	0.1363	0.1581	0.1817	0.2069	0.2339
21	0.0183	0.0284	0.0400	0.0533	0.0681	0.0844	0.1024	0.1219	0.1432	0.1662	0.1909	0.2174	0.2459
22	0.0192	0.0297	0.0420	0.0558	0.0713	0.0885	0.1073	0.1278	0.1501	0.1742	0.2001	0.2279	0.2577
23	0.0201	0.0311	0.0439	0.0584	0.0746	0.0926	0.1123	0.1337	0.1570	0.1822	0.2093	0.2384	0.2696
24	0.0209	0.0324	0.0458	0.0610	0.0779	0.0966	0.1172	0.1396	0.1639	0.1903	0.2185	0.2490	0.2815
25	0.0218	0.0338	0.0477	0.0635	0.0812	0.1007	0.1221	0.1455	0.1708	0.1983	0.2278	0.2595	0.2934

* DBH(cm): Diameter at breast height, H(m): Height.

Table 8. Carbon stock and uptake by region of *Pinus densiflora*

Region	Carbon stock (tC/ha)	Carbon uptake (tCO ₂ /ha/yr)	Total carbon stock (tC)	Total carbon uptake (tCO ₂ /yr)
Gangwon-do	109.8	9.4	27,378,953	2,334,639
Gyeonggi-do	87.4	8.7	1,741,064	172,538
Chungcheongbuk-do	76.3	7.9	5,469,885	489,177
Chungcheongnam-do	80.0	6.8	1,294,518	758,225
Jeollabuk-do	76.3	7.2	7,821,535	735,358
Jeollanam-do	76.3	7.4	15,078,872	1,454,979
Gyeongsangbuk-do	81.0	7.8	37,447,328	3,613,339
Gyeongsangnam-do	87.4	8.7	23,793,343	2,357,899
Jeju-do	85.9	6.8	1,294,518	103,186
Average (Total)	84.5	7.8	127,676,680	12,019,340

tC/ha 순으로 높게 나타났으며, 전라남도, 전라북도가 각각 76.3 tC/ha로 가장 낮게 나타났다. 반면에 이산화탄소 흡수량에 있어서는 강원도 9.4 tCO₂/ha/yr, 경기도와 경상남도 8.7 tCO₂/ha/yr, 충청남도 7.9 tCO₂/ha/yr, 경상북도 7.8 tCO₂/ha/yr 순으

로 나타났으며, 제주도가 6.8 tCO₂/ha/yr로 가장 낮게 나타났다. 소나무의 평균 ha당 탄소저장량은 84.5 tC/ha로 Lee *et al.* (2009)의 참나무류 순림 147.6 MgC/ha, 소나무 순림 141.4 MgC/ha보다 낮게 나타났다. 또한 Kim *et al.*(2014)의 활엽수의 탄

소저장량 93.8 tC/ha와 Kim *et al.*(2010)의 느티나무 우세목의 탄소저장량 40.1 MgC/ha보다 높게 나타났다. 본 연구에서 소나무 평균 임령 40년생의 탄소흡수량 7.8 tCO₂/ha/yr는 KFRI (2012)의 주요 산림수종의 표준 탄소흡수량에서 소나무 40년생의 7.2 tCO₂/ha/yr과 유사하게 나타났다. Son *et al.*(2014)의 25년생 아까시나무의 연간 이산화탄소흡수량이 13.8 tCO₂/ha/yr와 Kang *et al.*(2015b)의 34년생의 졸참나무 이산화탄소 흡수량 14.8 tCO₂/ha/yr보다는 낮게 나타났다. 이러한 참나무류와 아까시나무는 소나무에 비하여 기본적으로 목재기본밀도(Wood density; D), 바이오매스확장계수(Biomass Expansion Factor; BEF) 그리고 뿌리함량비(Root-shoot ration; R)의 탄소배출계수가 훨씬 높기 때문인 것으로 판단된다.

본 연구에서 추정된 소나무의 총탄소저장량은 127,677천 tC으로 KOFPI(2003)의 한국의 산림자원평가 보고서에서 발표한 138,445천 tC보다는 약간 낮게 추정되었다. 또한 Lee *et al.*(2015)이 추정된 강원지역 소나무의 탄소저장량을 12,536천 tC으로 추정하였는데, 본 연구에서는 27,379천 tC으로 두 배 이상의 차이를 보였다. 이러한 차이는 본 연구에서는 2016년에 직접 전국 소나무림을 대상으로 벌채에 의한 데이터 수집에 의해 수간재적을 직접 추정함으로써 좀 더 정확한 탄소저장량을 산정하였으나, Lee *et al.*(2015)은 제5차와 6차 국가산림자원조사(2006~2013)의 평균값을 이용하였기 때문에 시간에 따른 성장량의 차이와 실제 재적추정에 의한 방법적 측면에서 다르기 때문인 것으로 판단된다. 산림 부문 총 탄소흡수량 47,000천 tCO₂(GIR, 2016)에 비교하여 볼 때, 우리나라 산림의 25.9%(156만 ha)를 차지하고 있는 소나무의 총 이산화탄소 흡수량은 12,019천 CO₂로 우리나라 총탄소흡수량의 25.6%에 해당되며, 소나무의 산림면적(25.9%)과 유사하게 나타났다. 이처럼 수종별 고유의 탄소배출계수를 개발하여 사용하면 훨씬 정확한 국가탄소흡수량을 추정할 수 있다. 이러한 산림의 산림 탄소저장 및 흡수량을 산정할 수 있는 Tier 2 수준의 국가기본산림 통계자료와 국가고유계수를 개발 보유함으로써, 향후 국제적으로 높은 수준의 온실가스 통계자료를 제공할 수 있을 것이다.

4. 결 론

IPCC 등 기후변화 관련 국제기구에서는 국가 온실가스 인벤토리 산정 시 국제적 기준에 맞는 정확하고 신뢰성 있는 활동자료와 국가 고유의 온실가스 흡수/배출계수의 적용에 따른 고품질의 국가보고서 작성을 요구하고 있다. 기후변화협약에 따른 온실가스 흡수량 및 배출량을 추정하기 위한 방법론을

각각 3가지 수준으로 구분하여 정의하고 있다. 본 연구에서는 대상수종에 대한 바이오매스를 추정하기 위하여 직접 조사에 의한 최적의 수간곡선 추정에 의하여 재적을 산정하였으며, 정확한 활동자료와 국가 고유의 탄소배출계수를 이용한 Tier 2 수준에서 탄소저장 및 흡수량 산정을 하였다. 소나무의 연간 이산화탄소 흡수량은 평균 7.8 tCO₂/ha/yr로 나타났으며, 지역별로는 강원지역이 9.4 tCO₂/ha/yr로 가장 높게 나타났으며, 충청남도, 충청북도 지역이 9.4 tCO₂/ha/yr로 가장 낮게 나타났다. 또한 우리나라 소나무의 총 이산화탄소 흡수량은 산림 분야 전체 흡수량의 25.5%에 해당하는 12,019천 CO₂로 나타났다. 소나무는 전체 산림의 25.9%(156만 ha)로 가장 많은 분포면적을 차지하고 있으나, 소나무류재선충병으로 인한 피해로 많은 면적이 사라지고 있다. 또한 우리나라는 온실가스 총 배출량이 690백만 tCO₂(GIR, 2016) 세계 12위의 다배출국으로, 온실가스 배출 증가에 따른 지구온난화로 우리나라 산림 구조와 수종이 침엽수에서 활엽수인 참나무류로 변하고 있는 추세이다(Park and Moon, 1999). 현재 참나무류의 분포면적은 전체 산림면적의 24.2%(KFS, 2016b)로 소나무 다음으로 많으며 점점 확대되고 있는 반면, 소나무의 면적은 활엽수의 자연 증가에 따라 점점 줄어들고 있는 추세다. 따라서 현재 우리나라 산림수종 중 가장 많은 면적을 차지하고 있는 소나무림에 대하여 향후 목재생산 등의 산림경영과 탄소흡수원 관리적 측면에서 활엽수의 분포 확대 추세를 고려한 장기적인 대책 수립이 필요한 시점이다. 본 연구는 향후 이러한 산림수종 등 산림구조의 변화에 따른 산림부문 국산 온실가스 인벤토리 산정에 있어 정확한 재적 추정에 의한 탄소량 산정 방법에 관한 기본적인 정보 제공과, 우리나라 산림부문 온실가스 통계기반 구축을 위한 기초자료로 활용함으로써 국가온실가스통계의 질적 향상을 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 논문은 산림청 산림과학기술 연구개발사업(02017044C-1719-BB01)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

- Cannell MGR, Dewar RC, Thorney JHM. 1992. Carbon flux and storage in European, responses of forest ecosystems to environmental change, sd. Teller A, Mathy P and Jeffers JNR. pp 1009.
- Choi SI, Joo RW. 2011. An estimation of carbon stocks in

- harvested wood products in Korean houses. *J Korean For Soc* 100(4):708-714.
- Chung KH, Lee WK, Kim KH, Lee SH. 2001. Classification of forest type using high resolution imagery of satellite IKONOS. *J Remote Sensing* 17(3):275-284.
- IPCC. 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Institute for Global Environmental Strategies. Hayama, Japan, pp 324.
- Chung TH, Lee WC. 1965. A study of th Korean woody plant zone and favorable region for the growth and proper species. Sungkyunkwan Univ. Research paper 10:329-366
- Chung YG, Kim DH, Kim CM. 2010. Development of stem profile and taper equation for *Quercus acuta* in Jeju experiment forests. *J Korean For Soc* 99(1):57-61.
- GIR(Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea). 2016. National greenhouse gas inventory report of Korea. Green Gas Inventory & Research Center of Korea. Seoul.
- Jones PD, Wigley TML, Wright PB. 1989. Global temperature variations between 1861 and 1984. *Nature* 322:430-434.
- Kang JT, Son YM, Kim SW, Lee SJ, Park H. 2014a. Development of local stem volume table for *Pinus densiflora* S. et Z. using tree stem taper model. *J Agricultural and Forest Meteorology* 16(4):327-335.
- Kang JT, Son YM, Kim SW, Park H, Hwang JS. 2014b. Development of local stem volume table for *Larix kaempferi* using Kozak's stem taper model. *J Agri & Life Sci* 48(6):119-131.
- Kang JT, Son YM, Jeon JH, Yoo BO. 2015c. Estimation of carbon stock by development of stem taper equation and carbon emission factors for *Quercus serrata*. *J Climate Change Research* 6(4):357-366.
- KFRI(Korea Forest Research Institute). 2012. The forest and human in climate change. Korea Forest Research Institute. Seoul.
- KFRI(Korea Forest Research Institute). 2013. Amount of standard carbon uptake for main forest species in Korea. Korea Forest Research Institute. Seoul.
- KFS(Korea Forest Service). 2016a. Statistical yearbook of forest. Korea Forest Service, Daejeon.
- KFS(Korea Forest Service). 2016b. The 6th National forest inventory.
- Kim SR, Lee WK, Kwak HB, Choi SH. 2009. Estimating carbon sequestration in forest using KOMPSAT-2 imagery. *J Korean For Soc* 98(3):324-330.
- KOFPI(Korea Forestry Promotion Institute). 2013. Assessment of the Korea's forest resources. Korea Forestry Promotion Institute, Seoul.
- Kozak, A. 1988. A variable-exponent taper equation. *Can J For Res* 18:1363-1368.
- Lee SJ, Yim JS, Son YM, Kim RH. 2015. Estimation of the carbon stock and greenhouse gas removals by tree species and forest types in Gangwon province. *J Climate Change Research* 6(4):303-310.
- Lee SH. 2003. Development of site index equation and curves for *Cryptomeria japonica*. *J Korean For Soc* 92:152-159.
- Lee SK, Son YH, Noh NJ, Heo SJ, Yoon TK, Lee AR, Razak SA, Lee WK. 2009. Carbon storage of natural pine and oak pure and mixed forests in Hoengseong, Kangwon. *J Korean For Soc* 98(6):772-779.
- Max TA, Burkhart HE. 1976. Segmented polynomial regression applied taper equations. *Forest Science* 22(3):283-289.
- Park IH, Moon GS. 1999. Species Competition and productivity in a natural mixed forest *Pinus densiflora* and *Quercus variabilis* at a Mt. Mohu area. *J Korean For Soc* 88(2):462-468.
- Post WM, Emanuel WR, Zinke PJ, Stangenberger AG. 1982. Soil carbon pools and world life zone. *Nature* 298:156-159.
- Ramantathan V. 1988. The greenhouse theory of climate change; A test by an inadvertent global experiment. *Science* 240:293-299.
- Song CY, Chang KS, Park KS, Lee SW. 1997. Analysis of carbon fixation in natural forests of *Quercus mongolica* and *Quercus variabilis*. *J Korean For Soc* 86(1):35-45.
- Son YM, Jeon JH, Pyo JK, Kim KN, Kim SW, Lee SJ, Lee KH. 2012a. Development of stem volume table for *Robinia pseudoacacia* using Kozak's stem profile model. *J Agri & Life Sci* 46(6):43-49.
- Son YM, Kang JT, Chung YG, Lee KS, Yoo BO. 2013b. Development of statistics infrastructure for forest greenhouse gas. Korea Forest Research Institute Report, pp

- 477-515.
- Son YM, Kim RH, Kim YH, Lee KH. 2009c. Estimation of stand growth and CO₂ removals for *Juglans monshurica* plantations in ChungJu, Chunchongbuk-do in Korea. J Korean For Soc 98(6):646-651.
- Son YM, Kim SW, Lee SJ, Kim JS. 2014d. Estimation of stand yield and carbon stock for *Robinia pseudoacacia* stands in Korea. J Korean For Soc 103(2):264-269.
- Tans PP, Fung IY, Takahasi T. 1990. Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget. Science 247:1431-1438.
- Thenkabail PS, Stucky N, Grisscom BW, Ashton MS, Diels J van der Meer B, Enclona E. 2004 Biomass estimations and carbon stock calculations in the oil palm plantations of African derived savannas using IKONOS data. J Remote Sensing 25(3):5447-5472.
- The Republic of Korea. 2011. Korea's third national communication under the United Nations framework convention on climate change. The Republic of Korea, Seoul.
- UNFCCC. 2009. Descision 2/CP.15 Available from: http://unfccc.int/meetings/copenhagen_dec_2009/session6262/php/view/decisions.php
- Wigley TML, Schlesinger ME. 1985. Analytical solution for the effect of increasing CO₂ on global mean temperature. Nature 315:649-652.