

## 수간곡선식 개발과 국가탄소배출계수를 이용한 졸참나무의 탄소저장량 추정

강진택\*† · 손영모\* · 전주현\* · 유병오\*\*

\*국립산림과학원 산림산업연구과, \*\*남부산림자원연구소

### Estimation of Carbon Stock by Development of Stem Taper Equation and Carbon Emission Factors for *Quercus serrata*

Kang, Jin-Taek\*†, Son, Yeong-Mo\*, Jeon, Ju-Hyeon\* and Yoo, Byung-Oh\*\*

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

\*\*Southern Forest Resources Research Center, National Institute of Forest Science, Jinju 52817, Korea

#### ABSTRACT

This study was conducted to estimate carbon stocks of *Quercus serrata* 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 number per hectare, tree volume and volume stocks were obtained from the 5<sup>th</sup> National Forest Inventory (2006~2010), and method provided in IPCC GPG was applied to estimate carbon storage and removals. Performance in predicting stem diameter at a specific point along a stem in *Quercus serrata* 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 tables of *Quercus serrata* were 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=0.65 t/m<sup>3</sup>, BEF=1.55, R=0.43) of *Quercus serrata*. As a result of carbon stock analysis by age class in *Quercus serrata*, carbon stocks of IV age class (11,358 ha, 36.5%) and V age class (10,432; 33.5%) which take up the largest area in distribution of age class were 957,000 tC and 1,312,000 tC. Total carbon stocks of *Quercus serrata* were 3,191,000 tC which is 3% compared with total percentage of broad-leaved forest and carbon sequestration per hectare(ha) was 3.8 tC/ha/yr, 13.9 tCO<sub>2</sub>/ha/yr, respectively.

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

## 1. 서 론

전 세계적으로 온실효과로 인한 기후변화에 대처하기 위하여 이산화탄소 흡수원과 방출원 및 주요 생태계의 탄소축적량 평가에 연구가 중요하게 다루어지고 있다(Lee *et al.*, 2009). 특히 산림생태계는 육상생태계에서 가장 큰 탄소저장고이기 때문에, 생태계 탄소저장량 연구에서 주목을 받고 있다(McCar and Schneider, 2001). 우리나라 산림의 주요 임상별 면적과 비율은 소나무림이 2,220천 ha로 전체 산림면적의 37.0%를

차지하고 있고, 그 다음으로 참나무류(1,079천 ha)가 18%로 많은 면적을 차지하고 있다(2013, KFS).

한국의 천연림 생태계는 상록 침엽수림에서 낙엽 활엽수림으로 천이되어 가는 과정으로 낙엽 활엽수 천연림의 주종을 이루고 있는 수종은 참나무류이다. 현재 졸참나무를 포함하여 참나무류의 분포는 전체 산림면적의 18%(1,079천 ha)로 향후 소나무의 분포 면적은 점점 줄어들고 있으며, 참나무류의 분포 면적이 확대되고 있는 추세이다(Park and Moon, 1999). KFS(2000)는 「21세기 산림비전」에서 2030까지 활엽수(혼효림

† Corresponding author : beg8bune@korea.kr

Received November 2, 2015 / Revised December 4, 2015 / Accepted December 14, 2015

포함)를 60%까지 확대한다고 밝힌바 있고, 기후변화와 관련하여 산림은 온실가스 흡수원으로서 이미 주목받고 있다.

특히 침엽수보다 활엽수의 탄소흡수 능력이 뛰어나다는 것은 입증된 사실이므로, 이를 기반으로 하는 성장량 정보 즉, 다양한 활엽수 바이오매스 정보가 필요한 시점이나, 현재 활엽수에 대한 성장량 정보는 참나무류에 주로 한정되어 있어 산림에 대한 국가온실가스 통계자료 생산 및 정보제공에 어려움이 있다.

1980년대 중반 이후 온난화가 가속되고 있고 그 결과 기상이변, 사막화의 진전, 극빙의 해빙, 해수면의 상승과 생태계의 파괴가 급속히 진행되고 있으며, 이러한 일련의 현상은 CO<sub>2</sub> 농도의 증가가 주요 원인인 것으로 밝혀지고 있다(Post *et al.*, 1982; Wigley, 1985; Jone *et al.*, 1986; Ramanathan, 1988; Tans *et al.*, 1990; Cannell *et al.*, 1992). 1997년 12월 일본 교토에서 개최된 기후변화협약 제3차 당사국 총회에서는 이산화탄소의 흡수원으로서 산림의 역할이 크게 주목 받게 되었는데(Choi and Joo, 2011), 이는 산림이 대기 중의 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. 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 『기후변화에 관한 정부간 협의체 (IPCC)』에서 제시된 기본값을 사용한 통계보다 통계의 신뢰성이 높은 수준으로 인정되고 있다.

현재 우리나라는 산림부분 온실가스 통계 산정에 필요한 우리나라 주요 수종별(침엽수 9수종, 활엽수 8수종) 탄소배출·흡수 계수에 대한 『토지 이용 및 토지이용 변화와 임업(LU-LUCF)』 분야 국가 승인 고유계수를 개발한 상태이다. 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. 우리나라는 국가산림자원조사(National Forest Inventory, NFI) 자료와 수치임상도(1:5,000) 자료를 통하여 산림에 대한 세부적인 정보를 얻고 있고 있으며, 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(Song *et al.*, 1997; Kim *et al.*, 2010; Son *et al.*, 2013, 2014)가 활발히, 최근에는 고해상도 위성영상을 이용하여 바이오매스나 탄소저장량 추정에 관한 연구(Thenkabail *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2009; Park and Lee, 2011)가 활발히 이루어지고 있다.

본 연구는 우리나라에서 소나무 다음으로 많이 분포하고 있고 탄소배출계수가 높은 졸참나무의 탄소저장량 추정을 위하여, 산림의 수종별 탄소배출계수를 직접 개발하고, 임목의 수간곡선모형을 가장 적합하게 추정할 수 있는 수간곡선모형을 이용하여 졸참나무의 재적을 추정하여 개발한 탄소배출계수와 국가산림자원조사 자료 및 수치임상도 등의 자료를 이용하여 우리나라 전체 졸참나무의 탄소저장량을 추정하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 공시재료

본 연구는 우리나라 전역에 분포하고 있는 졸참나무에 대하여 탄소저장량을 추정하기 위하여 전국에서 조사 수집한 졸참나무 수간석해 13,474본의 자료를 이용하여 졸참나무의 수고 및 흉고직경별 재적을 나타내는 수간재적표를 개발하였으며, 분석에 이용된 개체목 성장특성은 Table 1과 같다.

### 2.2 수간곡선식 및 임목의 성장량 추정

최근 수간재적표는 개체목 재적을 말구직경 및 원구직경 등을 자유롭게 조정하여 이용재적을 산출할 수 있는 수간곡선식을 도출하여 이를 적분하는 방법을 많이 이용하고 있다. 그 중 Kozak이 개발한 수간곡선 모형으로 변방지수식(Variable exponent taper equation, or K2 equation)으로 명명되고

Table 1. Data summary of stem analysis for *Quercus serrata* used in this study

Species	Age (yr)			DBH (cm)			Height (m)		
	Min.	Max.	Mean	Min.	Max.	Mean	Min.	Max.	Mean
<i>Quercus serrata</i>	6	100	34.3	0.5	51.1	15.3	3.0	21.2	10.3

있으며, 미국, 캐나다 등에서 타 모형보다 많은 사용빈도를 보이고 있다(Gal & Bella, 1994). 현재까지 수간재적표 개발을 위한 수간곡선식 추정에 적합한 것으로 알려진 Kozak 모형을 이용하였다(Table 2). 도출된 최적 모형을 이용하여 수간곡선 모양을 구하고, 이를 수간중심선 중심으로 회전시켜 수간재적을 산출하여 재적표를 조제하였다(Max and Burkhart, 1976; Kozak, 1988; Lee *et al.*, 2003, Kang *et al.*, 2014). 일반적으로 변곡점은 전체 수고의 15~30% 범위 내에 나타나고 있다(Perez *et al.*, 1990).

각 수간곡선식의 수간높이별 수간직경 추정 이행능력을 평가하기 위해 적합도지수(Fit index, FI), 편의(Bias), 추정치 표준오차(Standard error of estimate, SEE), 평균절대편차(Mean absolute deviation, MAD) 등의 검정통계량을 이용하였다(Table 3, Lee *et al.*, 1999; Son *et al.*, 2009, 2012; Kang *et al.*, 2014).

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 표준오차(SEE)는 모델의 정도(Accuracy)를 평가하고, 평균절대편차(MAD)는 각 추정치 잔차의 절대값을 평균한 값으로 각 추정치의 평균적인 편차 크기를 나타내 주는 것이다.

2.3 졸참나무 분포면적 및 임황정보 분석

전국에 분포하고 있는 졸참나무의 분포면적과 영급 및 경급, ha당 본수 및 재적 등에 관한 정보를 추출하기 위하여 전국 4,000여개의 표본점을 바탕으로 산림정보가 수집되는 제 5차 국가산림자원조사(KFS, 2013)를 이용하였다.

2.4 탄소저장량 추정

Table 3. Fit statistics for evaluating taper equation

Statistics	Equation
Fitness index (FI)	$FI = 1 - \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2 / (\sum Y_i - \bar{Y})^2$
Bias	$\bar{D} = \sum (Y_i - \hat{Y}_i) / n$
Standard error of estimate (SEE)	$SEE = \sqrt{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2 / (n - m)}$
Mean absolute difference (MAD)	$ \bar{D}  = \sum  Y_i - \hat{Y}_i  / n$

where  $Y_i$  = 측정된 직경,  $\hat{Y}_i$  = 예측된 직경,  $n$  = 측정값 수,  $m$  = 추정에 사용된 파라미터

국가산림자원조사 자료에서 졸참나무의 면적, 임목축적, ha당 본수 및 재적 등의 정보를 이용하였으며, 탄소저장량 추정은 IPCC GPG(2003)에서 제시하는 탄소저장량 추정 방법을 적용하였으며(식 1), 이용된 탄소배출계수는 졸참나무의 국가고유의 계수로서 Table 4와 같다(Son *et al.*, 2013).

$$\text{탄소저장량} = V \times BEF \times WD \times (1+R) \times 0.5 \quad (1)$$

여기서,  $V$ 는 재적( $m^3/ha$ ),  $BEF$ 는 바이오매스 확장계수,  $WD$ 는 목재기분밀도( $t/m^3$ ),  $R$ 은 뿌리함량비, 0.5는 탄소전환계수를 나타낸다(IPCC, 2003).

3. 결과 및 고찰

3.1 수간곡선 파라미터 도출

졸참나무의 정확한 탄소저장량을 추정하기 위해서는 수간의 곡선형을 정확히 추정하는 최적의 수간곡선식을 적용하고, 적용된 수간곡선식의 파라미터 및 검정통계량을 도출한 결과는 Table 5와 같다.

Table 2. Applied stem taper equation for fitting of *Quercus serrata* in this study

Model	Taper Equation
Kozak (1988)	$d = a_0 DBH^{a_1} a_2^{DBH} X^{b_1 Z^2 + b_2 \ln(Z + 0.001) + b_3 \sqrt{Z} + b_4 e^Z + b_5 (\frac{DBH}{H})}$ <p>where <math>Z = \text{relative height} \left( = \frac{h}{H} \right)</math>, <math>H</math>; Total height(m), <math>h</math>; Height above ground level(m)</p> $X = \frac{1 - \sqrt{\frac{h}{H}}}{1 - \sqrt{p}}$ <p>(<math>p = \frac{Hi}{H}</math>, <math>p</math>; inflection point, <math>Hi</math>; the stem height of inflection point where the taper curve changes from neiloid to paraboloid) <math>a_i, b_i</math> = parameters</p>

Table 4. Carbon emission factors of *Quercus serrata*

Species	Basic wood density (WD) (Unit : t/m <sup>3</sup> )	Biomass expansion factor (BEF)	Root-shoot ratio (R)
<i>Quercus serrata</i>	0.66	1.55	0.43

Table 5에서, 적합도 지수(Fitness Index, FI), 추정치의 표준오차(Standard error of estimate, SEE), 편의(Bias), 평균절대편차(Mean absolute deviation, MAD) 등 기타 검정통계량 값으로 모델의 적합성을 검토하였으며, 또한 잔차도를 그려 평균 범위를 벗어나는지를 검토하였다. Kozak 모델에 의해 추정된 수간곡선식의 적합성은 90.1%였으며, Bias, SEE, MAD 등의 검정통계량을 이용하여 Kozak 모델의 적합성을 검토하였다 (Son *et al.*, 2009, 2012; Chung *et al.*, 2010). Kozak 모델의 수간곡선 모형 적합성을 좀 더 정밀하게 알아보기 위하여 잔차를 도식한 결과, 잔차는 “0”을 중심으로 하여 고르게 분포하고 있었다(Fig. 1). 따라서 Kozak 모델이 졸참나무 수간곡선을 설명하는데 우수한 것으로 나타나, 졸참나무의 수간곡선을 추정하는데 있어 적합한 식으로 본 연구의 수간곡선을 재적 추정에 이용하였다.

### 3.2 수간곡선형 추정

Kozak 모델의 파라미터를 이용하여 각 지방별 졸참나무의 수간형을 상대수고(Relative height, RH)를 토대로 도식화 하였다(Fig. 2). 정밀한 수간곡선형의 비교는 그림 상에서 식별하기 곤란하나, 초살도가 낮을수록 입목의 부피, 즉 재적이 그

Table 5. Parameter estimates for three taper equations for *Quercus serrata*

Species	Model	Kozak	
<i>Quercus serrata</i>	Parameter	$a_0$	1.88293
		$a_1$	0.71606
		$a_2$	1.00467
		$b_1$	2.12895
		$b_2$	-0.59831
	$b_3$	5.18995	
		$b_4$	-2.38588
		$b_5$	-0.04202
		FI	0.90064
		SEE	1.19980
Bias	001152		
MAD	0.84119		

만큼 높게 나타날 수 있음을 의미한다. Fig. 2에서, 졸참나무의 수형은 초살도가 높지 않고 상대수고별로 직경급이 고르게 분포하는 정상적인 모양의 수간곡선형을 유지하고 있었다.

### 3.3 수간재적표 조제

졸참나무의 정확한 탄소저장량을 추정하기 위하여 최적의 수간곡선식을 이용하여 수간재적표 도출이 요구되어진다. 각 표본목의 수피포함 수간재적 실측치는 측정된 수간고와 직경

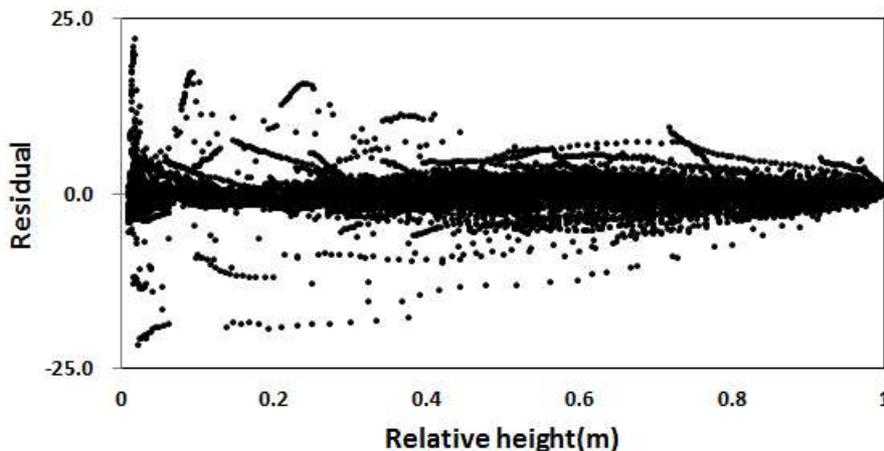


Fig. 1. Residual distribution of estimated diameter by relative height in a *Quercus serrata*.

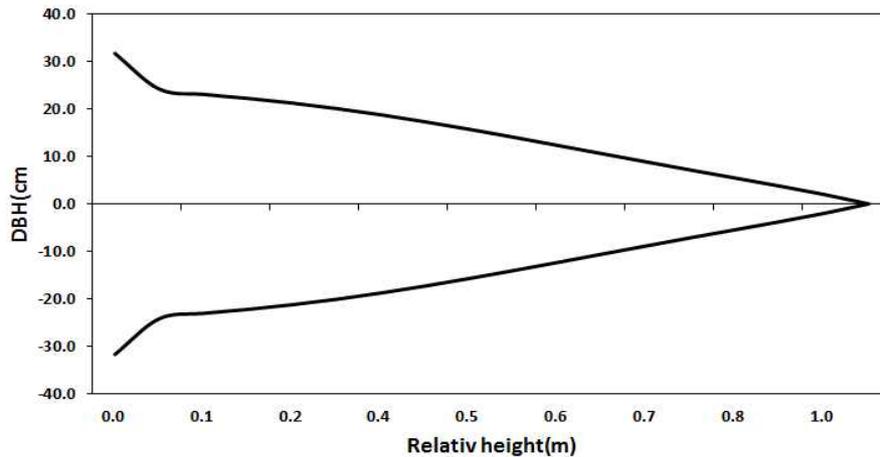


Fig. 2. Stem taper curve pattern of *Quercus serrata*.

을 토대로 Smalian식에 의한 구분구적법으로 계산하였으며, 반면 수간재적 추정치는 먼저 측정된 수간고와 직경에 의해 모델별 수간곡선식을 도출한 후, 이를 이용하여 수간고 10 cm 간격으로 직경을 추정하고, Smalian식에 의한 구분구적법으로 산출하였다(Son *et al.*, 2012; Kang *et al.*, 2014). 각 모형별 수간곡선식에 의해 얻어진 추정재적과 실측재적을 비교하여 실측재적을 가장 잘 적합시키는 최적 수피포함 수간곡선식인 Kozak 모델을 이용하여 졸참나무의 수간재적표를 도출한 결과는 Table 6과 같다.

지금까지 졸참나무의 고유의 임목재적표는 존재된 바 없어 신갈나무의 재적표를 이용하고 있는 실정이다. 본 연구에서 졸참나무 흉고직경 4~100 cm, 수고 3~35 m까지의 임목재적표를 개발하였으며, 본 연구에서는 편의상 Table 6과 같이 흉고직경 6~30 cm, 수고 6~25 m 까지만 제시하였다. 따라서 본 연구에서는 처음으로 졸참나무의 재적표를 개발함으로써 산림사업 및 산림경영과 산림의 탄소저장·흡수량 계산에 편리하고 효율적으로 이용할 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 산정에 필요한 임목 바이오매스 15개 수종별 국가 고유계수를 개발하여 본 연구의 탄소저장량 및 흡

수량 산정에 적용하였다. 개발된 LULUCF(Land use, Land Use Change and Forest) 분야 승인 국가고유계수는 Table 7과 같다.

전체 수종 중  $m^3$  당 가장 많은 탄소를 저장하고 있는 나무는 붉가시나무로  $0.840 tC/m^3$ 이, 신갈나무  $0.738 tC/m^3$ , 졸참나무  $0.731 tC/m^3$  순이며, 침엽수종 중에서 가장 많은 탄소를 저장하고 있는 수종은 해송  $0.473 tC/m^3$ , 잣나무  $0.459 tC/m^3$  순으로 나타났다. 졸참나무는 침·활엽수 전체수종 중 3번째로 높은 탄소저장량을 가지고 있는 수종으로 나타났다. 졸참나무는 목재기본밀도계수(Wood basic density, WD)와 뿌리함량비(Root-shoot ratio, R)의 탄소배출계수가 다른 수종에 비하여 높은 편으로 나타났다. 개발된 우리나라 국가 고유의 탄소배출계수를 이용하여 Kozak 수간곡선 모델에 의해 도출한 졸참나무 재적표를 이용하여 흉고직경 및 수고별 탄소저장량을 계산한 결과는 Table 8과 같다.

이와 같이, Table 8은 졸참나무의 수고 및 직경별 탄소저장량을 나타낸 표로서, 임목의 수고와 흉고직경값을 알면 쉽게 탄소저장량을 찾아서 쉽게 이용할 수 있다. 제 5차 국가산림자원조사(NFI, 2013) 자료의 졸참나무 영급별 분포면적, ha당 본수 및 축적 정보를 이용하여 영급별 탄소저장량을 추정한 결과는 Table 9와 같다.

우리나라 전체 임상별 영급별 산림면적에 있어서도 IV영급이 침엽수림 35.5%, 활엽수림 32.3%, 그리고 혼효림 42.4%로 모든 임상에서 IV영급이 다른 영급에 비하여 상대적으로 넓은 면적을 차지하고 있다(2013, 한국의 산림자원평가). 마찬가지로 졸참나무의 총면적은 31,123 ha로 대부분 중·장령급에 해당하는 IV영급(36.5%)과 V영급(33.5%)이 전체의 70%를 차지하고 있다.

졸참나무의 총 탄소저장량은 약 3,191천 tC로 우리나라 활

Table 6. Estimation stem volume table using the suitable Kozak's taper equation for *Quercus serrata*  
(Unit : D cm, H m)

H \ D	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
5	0.0157	0.0252	0.0366	0.0496	0.0643	0.0806	0.0985	0.1179	0.1389	0.1615	0.1856	0.2112	0.2384
6	0.0190	0.0306	0.0443	0.0601	0.0779	0.0976	0.1193	0.1428	0.1683	0.1956	0.2248	0.2558	0.2888
7	0.0223	0.0359	0.0520	0.0706	0.0915	0.1147	0.1401	0.1678	0.1976	0.2297	0.2640	0.3005	0.3392
8	0.0256	0.0412	0.0597	0.0811	0.1051	0.1317	0.1609	0.1927	0.2270	0.2638	0.3032	0.3451	0.3895
9	0.0289	0.0465	0.0675	0.0915	0.1186	0.1487	0.1817	0.2176	0.2563	0.2979	0.3424	0.3897	0.4399
10	0.0322	0.0519	0.0752	0.1020	0.1322	0.1657	0.2025	0.2425	0.2857	0.3320	0.3816	0.4343	0.4903
11	0.0355	0.0572	0.0829	0.1125	0.1458	0.1828	0.2233	0.2674	0.3150	0.3662	0.4208	0.4790	0.5407
12	0.0388	0.0625	0.0906	0.1230	0.1594	0.1998	0.2441	0.2923	0.3444	0.4003	0.4600	0.5236	0.5910
13	0.0422	0.0679	0.0984	0.1335	0.1730	0.2168	0.2649	0.3172	0.3737	0.4344	0.4992	0.5682	0.6414
14	0.0455	0.0732	0.1061	0.1439	0.1866	0.2339	0.2857	0.3421	0.4031	0.4685	0.5384	0.6128	0.6918
15	0.0488	0.0785	0.1138	0.1544	0.2002	0.2509	0.3065	0.3671	0.4324	0.5026	0.5776	0.6575	0.7421
16	0.0521	0.0838	0.1215	0.1649	0.2137	0.2679	0.3273	0.3920	0.4618	0.5367	0.6168	0.7021	0.7925
17	0.0554	0.0892	0.1293	0.1754	0.2273	0.2849	0.3481	0.4169	0.4911	0.5708	0.6560	0.7467	0.8429
18	0.0587	0.0945	0.1370	0.1859	0.2409	0.3020	0.3690	0.4418	0.5205	0.6049	0.6952	0.7913	0.8933
19	0.0620	0.0998	0.1447	0.1963	0.2545	0.3190	0.3898	0.4667	0.5498	0.6391	0.7344	0.8359	0.9436
20	0.0650	0.1046	0.1517	0.2058	0.2667	0.3343	0.4085	0.4891	0.5762	0.6698	0.7697	0.8761	0.9890
21	0.0683	0.1100	0.1594	0.2163	0.2803	0.3513	0.4293	0.5140	0.6056	0.7039	0.8089	0.9207	1.0393
22	0.0716	0.1153	0.1671	0.2267	0.2939	0.3684	0.4501	0.5390	0.6349	0.7380	0.8481	0.9654	1.0897
23	0.0749	0.1206	0.1748	0.2372	0.3075	0.3854	0.4709	0.5639	0.6643	0.7721	0.8873	1.0100	1.1401
24	0.0782	0.1259	0.1826	0.2477	0.3211	0.4024	0.4917	0.5888	0.6936	0.8062	0.9265	1.0546	1.1905
25	0.0815	0.1313	0.1903	0.2582	0.3346	0.4195	0.5125	0.6137	0.7230	0.8403	0.9657	1.0992	1.2408

\* H: height, D: DBH.

Table 7. Inherent carbon emission factors in LULUCF

Forest type	Species	Basic wood density (D) (Unit : t/m <sup>3</sup> )	Biomass expansion factor (BEF)	Root-shoot ratio (R)	tC/m <sup>3</sup>
Coniferous forest	<i>Pinus densiflora</i> (Gangwon district)	0.42	1.48	0.26	0.391
	<i>Pinus densiflora</i> (Central district)	0.47	1.41	0.25	0.418
	<i>Larix kaempferi</i>	0.45	1.34	0.29	0.391
	<i>Pinus rigida</i>	0.50	1.33	0.36	0.455
	<i>Pinus thumbergii</i>	0.48	1.52	0.29	0.473
	<i>Pinus koraiensis</i>	0.41	1.74	0.28	0.459
	<i>Cryptomeria japonica</i>	0.35	1.31	0.23	0.281

Table 7. Continued

Forest type	Species	Basic wood density (D) (Unit : t/m <sup>3</sup> )	Biomass expansion factor (BEF)	Root-shoot ratio (R)	tC/m <sup>3</sup>
Coniferous forest	<i>Chamaecyparis obtusa</i>	0.43	1.35	0.20	0.346
	Other coniferous tree	0.46	1.43	0.27	0.418
Deciduous forest	<i>Quercus variabilis</i>	0.72	1.34	0.32	0.687
	<i>Quercus acutissima</i>	0.72	1.45	0.31	0.638
	<i>Quercus mognolica</i>	0.66	1.60	0.39	0.738
	<i>Quercus serrata</i>	0.66	1.55	0.43	0.731
	<i>Quercus acuta</i>	0.83	1.70	0.19	0.840
	Other deciduous tree	0.68	1.51	0.36	0.708

Table 8. Storage of carbon by age and height class in a *Quercus serrata* (Unit : tC)

H \ D	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
5	0.0115	0.0184	0.0268	0.0363	0.0470	0.0589	0.0720	0.0862	0.1015	0.1181	0.1357	0.1544	0.1743
6	0.0139	0.0224	0.0324	0.0439	0.0569	0.0713	0.0872	0.1044	0.1230	0.1430	0.1643	0.1870	0.2111
7	0.0163	0.0262	0.0380	0.0516	0.0669	0.0838	0.1024	0.1227	0.1444	0.1679	0.1930	0.2197	0.2480
8	0.0187	0.0301	0.0436	0.0593	0.0768	0.0963	0.1176	0.1409	0.1659	0.1928	0.2216	0.2523	0.2847
9	0.0211	0.0340	0.0493	0.0669	0.0867	0.1087	0.1328	0.1591	0.1874	0.2178	0.2503	0.2849	0.3216
10	0.0235	0.0379	0.0550	0.0746	0.0966	0.1211	0.1480	0.1773	0.2088	0.2427	0.2789	0.3175	0.3584
11	0.0260	0.0418	0.0606	0.0822	0.1066	0.1336	0.1632	0.1955	0.2303	0.2677	0.3076	0.3501	0.3953
12	0.0284	0.0457	0.0662	0.0899	0.1165	0.1461	0.1784	0.2137	0.2518	0.2926	0.3363	0.3828	0.4320
13	0.0308	0.0496	0.0719	0.0976	0.1265	0.1585	0.1936	0.2319	0.2732	0.3175	0.3649	0.4154	0.4689
14	0.0333	0.0535	0.0776	0.1052	0.1364	0.1710	0.2088	0.2501	0.2947	0.3425	0.3936	0.4480	0.5057
15	0.0357	0.0574	0.0832	0.1129	0.1463	0.1834	0.2241	0.2684	0.3161	0.3674	0.4222	0.4806	0.5425
16	0.0381	0.0613	0.0888	0.1205	0.1562	0.1958	0.2393	0.2866	0.3376	0.3923	0.4509	0.5132	0.5793
17	0.0405	0.0652	0.0945	0.1282	0.1662	0.2083	0.2545	0.3048	0.3590	0.4173	0.4795	0.5458	0.6162
18	0.0429	0.0691	0.1001	0.1359	0.1761	0.2208	0.2697	0.3230	0.3805	0.4422	0.5082	0.5784	0.6530
19	0.0453	0.0730	0.1058	0.1435	0.1860	0.2332	0.2849	0.3412	0.4019	0.4672	0.5368	0.6110	0.6898
20	0.0475	0.0765	0.1109	0.1504	0.1950	0.2444	0.2986	0.3575	0.4212	0.4896	0.5627	0.6404	0.7230
21	0.0499	0.0804	0.1165	0.1581	0.2049	0.2568	0.3138	0.3757	0.4427	0.5146	0.5913	0.6730	0.7597
22	0.0523	0.0843	0.1222	0.1657	0.2148	0.2693	0.3290	0.3940	0.4641	0.5395	0.6200	0.7057	0.7966
23	0.0548	0.0882	0.1278	0.1734	0.2248	0.2817	0.3442	0.4122	0.4856	0.5644	0.6486	0.7383	0.8334
24	0.0572	0.0920	0.1335	0.1811	0.2347	0.2942	0.3594	0.4304	0.5070	0.5893	0.6773	0.7709	0.8703
25	0.0596	0.0960	0.1391	0.1887	0.2446	0.3067	0.3746	0.4486	0.5285	0.6143	0.7059	0.8035	0.9070

\* H: height, D: DBH

Table 9. Distribution and storage of carbon by age class in a *Quercus serrata* stand.

	Age class					
	II	III	IV	V	VI	Total
Area (ha)	1,602 (5.1%)	5,593 (18.0%)	11,358 (36.5%)	10,432 (33.5%)	2,138 (6.9%)	31,123 (100%)
m <sup>3</sup> /ha	10.6	82.7	115.3	172.1	365.1	
Total tC	12,413	338,118	957,301	1,312,399	570,607	
tC/ha	7.7	60.5	84.3	125.8	266.9	
tC/ha/yr	0.52	2.42	2.41	2.80	4.85	
tCO <sub>2</sub> /ha/yr	1.9	8.9	8.8	10.3	17.8	

엽수 전체 탄소저장량(105,479천 tC, 2013, KFS, 2013)의 3%에 해당하는 양이다. 졸참나무의 평균 ha당 탄소저장량은 109 tC/ha로 참나무류 순림에서 147.6 MgC/ha, 소나무 순림에서 141.4 Mg C/ha(Lee *et al.*, 2009)보다 다소 낮게 나타났다. Lee *et al.*(2009)의 연구에서는 참나무류의 상층과 하층을 포함하고 계산하였으며, 임령이 44년생일 때의 탄소저장량으로 본 연구의 V영급일 경우 128.5 tC/ha로 하층식생을 포함시킨다면 이와 유사하게 나타날 것으로 추측된다. 또한 Lee *et al.*(2009)는 지상부 생체량을 신갈나무 건중량 추정 회귀식을 이용하여 추정하였기 때문에, 졸참나무 고유의 생체량이 아니므로 본 연구의 결과와 다소 차이가 나는 것으로 추측된다. Kim *et al.*(2014) 활엽수의 탄소저장량 93.8 tC/ha과 Kim *et al.*(2010)의 느티나무 우세목의 탄소저장량 40.1 MgC ha<sup>-1</sup>보다 높게 나타났다. 또한 연간 이산화탄소 흡수량은 IV영급(30~40생)일 때 8.8 tCO<sub>2</sub>/ha으로 아까시나무 40년생일 때 5.63 tCO<sub>2</sub>/ha(Son Kim *et al.*, 2014)보다 훨씬 높게 나타났다.

우리나라 졸참나무 전체의 평균 이산화탄소 흡수량은 14.8 CO<sub>2</sub>/ha으로 대체적으로 졸참나무의 탄소저장량 및 흡수량이 다른 수종에 비하여 높게 나타난 것은 졸참나무의 탄소배출계수 값이 전체수종중 붉가시나무, 신갈나무 다음으로 높은 것도 그 원인 중의 하나이다. 우리나라 산림의 영급 구조는 과거 II, III영급에서 현재 IV, V영급이 대부분을 차지하고 있다. 이러한 산림의 영급 및 경급 구조별 산림 탄소저장 및 흡수량을 산정할 수 있는 Tier 2 수준의 국가기본산림 통계자료와 국가고유계수를 개발 보유하고 있게 되어, 향후 국제적으로 수준 높은 온실가스 통계자료를 제공할 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

최근 기후변화에 대응하기 위하여 산림바이오매스 탄소계수 산정에 관한 연구와 함께 국제적 기준에 맞는 정확하고 신

뢰성 있는 온실가스 흡수/배출계수와 수종별 국가 고유의 계수 개발에 많은 연구가 진행되고 있다. 기후변화협약에 따른 온실가스 흡수량 및 배출량을 추정하기 위한 방법론을 각각 3가지의 수준으로 구분하여 정의하고 있다. 본 연구에서는 국가 고유의 활동자료와 배출계수를 이용한 Tier 2 수준에서 탄소저장 및 흡수량 산정을 하였다. 우리나라 산림의 수종 분포는 아직까지 소나무가 전체 산림의 37%(2,220천 ha)를 차지하고 있으나, 점차 온실가스 배출의 증가에 따라 기후가 변화함에 따라 우리나라 산림구조와 수종이 참나무류로 변하고 있는 추세이다(Park and Moon, 1999년). 한국의 천연림 생태계는 상록 침엽수림에서 낙엽 활엽수림으로 천이되어 가는 과정에 있다. 낙엽 활엽수 천연림이 주종을 이루고 있는 수종은 참나무류이다. 현재 졸참나무를 포함하여 참나무류의 분포는 전체 산림면적의 18%(1,079천 ha)로 향후 소나무의 분포면적은 점점 줄어들고, 참나무류의 분포 면적이 확대될 전망이다. 따라서 본 연구는 향후 기후변화에 따른 우리나라 산림의 주요 수종으로 자리 잡을 것으로 예측되는 참나무류에 대한 탄소량 추정에 관한 기본적인 정보 제공과 우리나라 산림 부문 온실가스 통계기반 구축을 위한 기초자료로 활용함으로써 국가온실가스통계의 질적 향상을 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 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. Jour 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. *Journal of 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 YG, Kim DH, Kim CM. 2010. Development of stem profile and taper equation for *Quercus acuta* in Jeju experiment forests. *Jour Korean For Soc* 99(1): 57-61.
- 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. 2014. Development of local stem volume table for *Pinus densiflora* S. et Z. using tree stem taper model. *Korean Jour 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. *Jour of Agriculture & Life Science* 48(6): 119-131.
- Kim HS, Bae SW, Lee ST, Hwang JH. 2010. Analysis for growth characteristics and aboveground carbon storage for *Zelkova serra* artificial forests in Gwangneung Experimental Forest. *Jour Korean For Soc* 99(1): 144-152.
- Kim SR. 2007. Forest cover classification by optimal segmentation of IKONOS imagery. Thesis for Master, Korea University, Seoul.
- Kim SR, Lee WK, Kwak, HB, Choi SH. 2009. Estimating carbon sequestration in forest using KOMPSAT-2 Imagery. *Jour Korean For Soc* 98(3): 324-330.
- Kim SW, Son YM, Kim ES, Park H. 2014. Estimation of growing a stock and carbon stock based on components of forest type map: The case of Kangwon province. *Jour Korean For Soc* 103(3): 446-452.
- 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. *Jour Korean Fo Soc* 98(6): 772-779.
- Korea Forest Service. 2000. The 21st century "Forest Vision". pp 101.
- Korea Forest Service. 2013. The 5th national forest inventory.
- Korea Forest Service. 2013. Assessment of the Korea's forest resources.
- Kozak, A. 1988. A variable-exponent taper equation. *Can J For Res* 18: 1363-1368.
- Lee SH. 2003. Development of site index equation and curves for *Cryptomeria japonica*. *Jour of Korean For Soc* 92: 152-159.
- Lee WK, Lee JH, Chung KH, Jun EJ. 2001. Spatial characteristics of forest type distribution on the basis of geomorphological factors and IKONOS satellite imagery. *Korean Journal of Forest Measurements* 4(1): 74-82.
- 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. *Jour Korean For Soc* (8842): 462-468.
- Park JW, Lee JS. 2011. Analysis of spatial distribution and estimation of carbon emissions in deforestation using GIS and administrative data. *Jour Korean For Soc* 100(3): 466-475.
- Pérez D, Burkhart H, Stiff C. 1990. A variable-form taper function for *Pinus oocarpa* Schiede. in Central Honduras. *For Sci* 36:186-191.
- 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*. *Jour Korean For Soc* 86(1): 35-45.
- Son YM, Jeon JH, Pyo JK, Kim KN, Kim SW, Lee SJ, Lee KH. 2012. Development of stem volume table for *Robinia pseudoacacia* using Kozak's stem profile model. *Jour Agri & Life Sci* 46(6): 43-49.
- Son YM, Kang JT, Chung YG, Lee KS, Yoo BO. 2013. Development of statistics infrastructure for forest greenhouse gas. *Korea Forest Research Institute Report*. pp 477-515.

- Son YM, Kim RH, Kim YH, Lee KH. 2009. Estimation of stand growth and CO<sub>2</sub> removals for *Juglans mondszurica* plantations in ChungJu, Chuncheongbuk-do in Korea. Jour Korean For Soc 98(6): 646-651.
- Son YM, Kim SW, Lee SJ, Kim JS. 2014. Estimation of stand yield and carbon stock for *Robinia pseudoacacia* stands in Korea. Jour Korean For Soc 103(2): 264-269.
- Tans PP, Fung IY, Takahasi Taro. 1990. Observational constraints on the global atmospheric CO<sub>2</sub> 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. International Journal of Remote Sensing 25(3): 5447-5472.
- Wigley TML, Schlesinger ME. 1985. Analytical solution for the effect of increasing CO<sub>2</sub> on global mean temperature. Nature 315: 649-652.