

## 삼나무와 편백 임분의 임목, 임상, 토양의 탄소량 비교

김춘식<sup>1\*</sup> · 백경원<sup>1</sup> · 최병길<sup>1</sup> · 하지석<sup>1</sup> · 배은지<sup>2</sup> · 이광수<sup>3</sup> · 손영모<sup>2</sup>

<sup>1</sup>경남과학기술대학교 산림자원학과, <sup>2</sup>국립산림과학원 산림바이오소재연구소,

<sup>3</sup>국립산림과학원 난대아열대산림연구소

## Carbon Stocks of Tree, Forest Floor, and Mineral Soil in *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* Stands

Choonsig Kim<sup>1\*</sup>, Gyeongwon Baek<sup>1</sup>, Byeonggil Choi<sup>1</sup>, Jiseok Ha<sup>1</sup>,  
Eun Ji Bae<sup>2</sup>, Kwang-Soo Lee<sup>3</sup> and Yeong Mo Son<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Forest Resources, Gyeongnam National University of Science and Technology, Jinju 52725, Korea

<sup>2</sup>Forest Biomaterials Research Center, National Institute of Forest Science, Jinju 52817, Korea

<sup>3</sup>Warm Temperate and Subtropical Forest Research Center, National Institute of Forest Science, Seogwipo 63582, Korea

**요약:** 본 연구는 우리나라 남부지역의 주요 조림 수종으로 유사한 입지환경에 조성되는 삼나무와 편백 임분의 유기 탄소량을 비교하기 위해 수행하였다. 삼나무와 편백이 서로 인접한 지역에 조성된 대표적 조림지 13개 지역을 선정하고, 임목, 임상, 토양 10 cm 깊이의 탄소량을 조사하였다. 조사지의 평균 임분 연령은 삼나무 45년, 편백 43년이었으며, 임분밀도는 삼나무가 989본 ha<sup>-1</sup>로 편백 1,223본 ha<sup>-1</sup>에 비해 유의적으로 낮았다. 평균 흉고직경과 우세목의 평균 수고는 삼나무가 27.4 cm와 20.4 m, 편백은 23.9 cm와 17.9 m로 삼나무가 유의적으로 큰 것으로 나타났다. 두 임분의 임목 바이오매스 탄소량은 흉고단면적과 유의적인 선형회귀 관계(삼나무:  $r^2 = 0.82$ ; 편백:  $r^2 = 0.92$ ;  $P < 0.05$ )가 있었으나, 임분밀도 및 지위지수와는 회귀식에 유의성이 없었다( $P > 0.05$ ). 지상부 임목 바이오매스 탄소량은 삼나무 95.5 Mg C ha<sup>-1</sup>, 편백 117.7 Mg C ha<sup>-1</sup>로 편백 임분이 유의적으로 크게 나타났으나( $P < 0.05$ ), 임상 및 토양층의 유기 탄소 농도 및 탄소량은 유의적인 차이가 없었다. 본 연구 결과에 따르면 유사한 입지환경에 조성된 두 수종의 임목 바이오매스 탄소량은 편백 임분이 삼나무 임분에 비해 큰 것으로 나타났으나, 임상이나 토양 탄소량은 수종의 영향이 크지 않았다.

**Abstract:** This study aimed to compare the organic carbon stocks of *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* stands established under a similar-site environmental condition in South Korea. *C. japonica* and *C. obtusa* stands adjacent to each other from 13 representative regions were chosen to evaluate the carbon stocks of tree biomass, forest floor, and mineral soils. Mean stand ages were 45 years for *C. japonica* and 43 years for *C. obtusa*, respectively. Tree density was significantly lower in *C. japonica* (989 tree ha<sup>-1</sup>) than in *C. obtusa* (1,223 tree ha<sup>-1</sup>) stands, whereas diameter at breast height and dominant tree height values were significantly higher in *C. japonica* (27.4 cm and 20.4 m, respectively), compared with *C. obtusa* (23.9 cm and 17.9 m, respectively) stands. The total carbon stocks of tree biomass were linearly related with stand basal area (*C. japonica*:  $r^2 = 0.82$ ; *C. obtusa*:  $r^2 = 0.92$ ;  $P < 0.05$ ), whereas stand density and site index were not correlated with the carbon stocks of tree biomass ( $P > 0.05$ ). The carbon stocks of aboveground tree biomass were significantly higher in *C. obtusa* (117.7 Mg C ha<sup>-1</sup>), compared with *C. japonica* (95.5 Mg C ha<sup>-1</sup>) stands, whereas carbon concentration and stocks of the forest floor and mineral soil layers were insignificantly different between the *C. japonica* and *C. obtusa* stands. The results indicated that trees in *C. obtusa* stands sequestered more carbon dioxide, compared with *C. japonica* stands, whereas carbon stocks in the forest floor and mineral soil layers were unaffected by stand development processes of the different tree species.

**Key words:** allometric equations, carbon dioxide, carbon sequestration, Japanese cypress, Japanese cedar, forest soil, site index

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

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

## 서 론

온실가스 중의 하나인 대기 중 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 농도의 증가가 지구 온난화와 밀접한 관계가 있는 것으로 알려지면서 이산화탄소의 흡수능력을 가진 산림 내 탄소량 평가에 대한 관심이 높다(Fukuda et al., 2003; Sasaki and Kim, 2009; Cheng et al., 2013; Lee et al., 2018). 많은 연구들은 임목 식재를 대기 중 이산화탄소 농도 저감을 위한 가장 효과적인 수단 중의 하나로 인정하고 있으며(Shutou and Nakane, 2004; IPCC 2006; Lee et al., 2018), 조림지 (forest plantation) 같은 산림경영림의 탄소축적 능력에 대한 정량적 평가의 중요성을 강조하고 있다(Vesterdal et al., 2008; Cheng et al., 2013; Fang et al., 2014). 특히 임목, 임상(forest floor), 토양의 탄소량에 수종이 미치는 영향에 대한 연구가 유럽을 중심으로 수행되어 임상의 경우 200~500%, 광물질 토양층은 40~50% 정도 수종 간 차이가 발생하는 것으로 보고 되고 있다(Vesterdal et al., 2013). 한편, 임목 탄소량의 정량적 평가에는 상당한 시간과 비용이 투입되어야 하기 때문에 대규모 면적일 경우 기 개발된 바이오매스 추정 일괄 상대생장식이나(Ishihara et al., 2015), 바이오매스 확장계수 및 목재 기본 밀도 등을 이용하여 탄소량을 추정하기도 한다(Lee et al., 2018).

삼나무와 편백은 우리나라 온대 남부나 난대(아열대) 산림대에 중요한 조림 수종으로 조림면적과 임목 축적은 삼나무 6,296 ha, 1,326,052 m<sup>3</sup>, 편백 32,580 ha, 6,341,457 m<sup>3</sup>가 분포하는 것으로 알려져 있다(Korea Forest Research Institute, 2014). 삼나무와 편백은 용재 생산을 위한 경제적인 면뿐만 아니라 산림 휴양 및 치유와 같은 다양한 생태계 서비스 기능을 발휘하는 산림자원으로서 관심이 증대되고 있다. 한편, 편백의 경우 산림갱신지나 숲겹질과 지벌레 피해지 같은 산림재해 발생지를 중심으로 대면적이 조림되었으며, 최근 남부지역의 소나무 재선충병 피해지에 식생복원을 위한 후계림으로 가장 선호되고 있다. 이와 같은 중요성 때문에 삼나무 및 편백의 생태적 특성과 관련한 다양한 연구가 수행된 바 있으며, 산림지역 탄소량 추정과 연관되는 산림 바이오매스 관련 연구로 유사한 입지에서 생육한 삼나무와 편백의 바이오매스 비교(Kim et al., 1987), 편백의 영급에 따른 지상부 바이오매스 분배(Seo and Lee, 2013), 임분밀도 차에 따른 임목 바이오매스 변화 등이 수행된 바 있다(Jung et al., 2014; Gwon et al., 2014). 그러나 국내에서 수행된 바이오매스 관련 연구의 대부분은 1) 소규모 임분 단위에서 조사되어 연구 결과의 공간 규모 확장에 어려움이 있으며, 2) 유사한 입지를 점유하는 삼나무와 편백의 임분 발달 과정 동안 생장 및 양분순환 특성의 차이로부터 발생할 수

있는 입상이나 토양층의 탄소량 변화에 대해서는 잘 알려져 있지 않다.

본 연구는 유사한 입지환경의 서로 인접한 지역에 조성된 삼나무와 편백 임분을 대상으로, 1) 임목, 임상, 토양 탄소량과 임분 환경요인과의 관계를 구명하고, 2) 임목, 임상, 토양 탄소량의 정량적 평가를 통하여 수종 간 탄소흡수 능력을 비교하기 위해 수행하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사구 선정

본 연구는 우리나라 남부지역인 경상남도, 전라남도, 전라북도, 제주도에 위치한 삼나무 및 편백 임분 중 10 ha 이상의 대면적 조림지를 대상으로 하였다. 각 지역별 조사구는 국립산림과학원 자료 및 영상 지도를 활용하여 개략적인 위치를 선정한 후 현장을 답사하고, 서로 인접한 위치에 식재된 삼나무와 편백 임분을 대상으로 임분의 대표성 및 임목밀도를 고려하여 조사지를 선정하였다. 선정된 조사지는 2018년의 경우 전라남도 장성군 장성읍 덕진리 및 월성리 외 6지역, 2019년은 전라북도 완주군 소양면 신원리 외 5지역 등 총 13개 지역의 삼나무와 편백 조림지를 대상으로 하였다(Table 1). 조사지의 최근 30년(1981~2010)동안(Korea Meteorological Administration, 2017) 연평균 기온은 전라남도 장성군이 13.0°C로 가장 낮고, 제주도가 17.1°C로 가장 높았다(Table 1). 연 강수량은 완주가 1,313 mm yr<sup>-1</sup>로 가장 낮았으며, 남해군 1,960 mm yr<sup>-1</sup>와 제주도 1,988 mm yr<sup>-1</sup> 등이 높았다.

각 지역별 조사구는 최근에 숲가꾸기나 병해충 피해 같은 산림 교란이 발생하지 않은 임분을 대상으로 2018년과 2019년 6월에서 7월에 지역별 각 3개소씩 총 78개소(삼나무 39개소, 편백 39개소)를 대상으로 현장 조사를 실시하였다. 선정된 조사구의 방위는 북, 북동, 북서 방향이 대부분이나 남해나 진주의 경우 남향이나 동향에 조림지가 분포하였다. 해발고의 경우 전북 완주가 200 m 이하, 전남은 장성을 제외하고 100~250 m에 분포하였으며, 경남은 190~370 m로 전남에 비해 높은 해발고에 분포하였다(Table 1).

### 2. 바이오매스 상대생장식

본 연구에서 임목 바이오매스 탄소량 추정을 위한 상대생장식은 국립산림과학원의 “교토의정서대응 산림탄소계정기반 구축” 연구로부터 수집된 삼나무 30본과 편백 30본의 지상부와 지하부 건중량 자료 및 전문 학술지에 발표된 두 수종의 바이오매스 관련 자료(Kim et al., 1987; Gwon et al., 2014)를 이용하였다. 본 연구가 광범

Table 1. General characteristics of the study sites.

Location	Aspect	Elevation (m a.s.l.)	MAT (°C) <sup>1</sup>	MAP (mm) <sup>2</sup>
Boseong-gun Joseong-myeon Daegok-ri	E, NE	140-270	13.6	1,453
Changwon-si Jinhac-gu Janun-dong	NW, W	190-220	14.9	1,545
Goseong-gun Goseong-eup Idang-ri	NE, W	200-270	14.3	1,540
Gwangyang-si Okryong-myeon Choosan-ri	N	170-260	12.6	1,531
Hangdong-gun Okjong-myeon Witae-ri	N	180-370	14.5	1,735
Jangheung-gun Jangheung-eup Woosan-ri	NE, NW	80-140	13.4	1,546
Jangseong-gun Jangseong-eup Deokjin-ri	N, NW	250-400	13.0	1,404
Jangseong-gun Seosam-myeon Moarm-ri	NE	170-250	13.0	1,404
Jinju-si Geumsan-myeon Jangsa-ri	NE, E	100-200	13.1	1,512
Namhae-gun Sangju-myeon and Sangdong-myeon	S, E	150-350	14.4	1,960
Sacheon-si Gonmyong-myeon Yongsan-ri	N, NW	90-100	13.1	1,512
Seogwipo-si Namwon-eup Hannam-ri	SW, NE	100-380	17.1	1,988
Wangju-gun Soyang-myeon Shinwon-ri	W	150-200	13.3	1,313

<sup>1</sup> Mean annual temperature, <sup>2</sup> Mean annual precipitation

위한 지리적 범위에서 조사되어 공간적 변동이 크기 때문에 바이오매스 추정식은 우세목과 준우세목의 수고로부터 지위지수를 구분한 후 각 수종 및 지위별로 흉고직경(DBH)을 독립변수로 하고 임목 건중량을 종속변수로 하는 상대성장식[ $(\text{Log}_{10}Y = a + b \times \text{Log}_{10}X)$ , Y: 임목 건중량(kg), X: DBH(cm)]을 개발하였다. 지위지수는 국내 산림 내 임목의 수고 생장이 안정화에 접어들었다고 볼 수 있는 30년을 기준 연령으로 개발된 Schumacher 모델의 삼나무 지위추정식[Site Index = EXP(우세목 수고 + 13.203882×(1/임령-1/30))](Son et al., 2105)과 편백의 경우 Chapman-Richards식 [Site Index = 우세목 수고×((1-EXP(-0.015306 × 임분연령))/(1-EXP(-0.015306 × 30)))<sup>0.67415</sup>]를 이용하여 각 조사구별 우세목 및 준우세목 3~5본의 수고로부터 지위를 판정하였다.

### 3. 임목 탄소량

각 조사지로부터 조사구는 20 × 10 m 크기로 구획하고 흉고직경, 수고 및 임분 현황을 조사하였다. 수종별 지위 추정의 경우 각 조사구로부터 3~5본의 우세목과 준우세목을 선정하여 Haglof Hypsometer (Haglof, Sweden)를 이용하여 수고를 10 cm 정밀도로 측정하였다. 임분 연령은 매목 조사 후 평균 흉고직경 값에 가까운 표준목을 선정하고 성장추를 이용하여 흉고직경 부위 목편을 채취하였다. 채취한 목편은 목재 코어 마운트에 부착하고 확대경을 이용하여 연륜을 구분한 후 측정된 연륜에 5년을 더하여 임분 연령으로 하였다. 각 조사구의 임목 탄소량은 수종 및 지위별 개발된 상대성장식을 이용하여 임목 바이오매스를 추정된 후 Intergovernmental Panal on Climate Change

(IPCC)의 산림지역 임목의 유기탄소 전환 디폴트 값인 0.47을(IPCC, 2006) 곱하여임목 탄소량으로 환산하였다.

### 4. 임상 및 토양 탄소량

임상의 경우 200 cm<sup>2</sup> 표면적을 가지는 원형 스테인리스 채취기를 이용하여 각 조사구에 임의로 선정된 3지점으로부터 토양층 상부까지의 시료를 채취하고 지퍼백에 밀봉한 후 실험실로 운반하였다. 실험실로 운반된 시료는 65°C 온풍 건조기에서 항량에 도달할 때까지 건조 후 건중량을 측정하였다. 건조된 임상 시료는 분쇄기로 곱게 분말을 만든 후, 0.420 mm체(ASTM No. 40)를 이용하여 유기탄소 분석용 시료를 조제하고 원소분석기(Thermo Scientific, Flash 2000, Italy)를 이용하여 유기탄소 농도를 측정하였다. 조사구의 토양 탄소측정 시료는 임상 시료가 채취된 지점에 400 cm<sup>3</sup> 크기의 스테인리스 코어 토양 채취기로 0~10 cm 깊이에 토양 시료를 채취하고 지퍼백에 밀봉하여 실험실로 운반하였다. 실험실로 운반된 토양은 건조 후 0.420 mm체를 이용하여 유기탄소 농도 분석 시료를 조제한 후 대용량 원소분석기(Vario Macro cube, Germany)를 이용하여 측정하였다. 임상의 탄소량은 ha당 건중량에 탄소 농도, 토양층의 탄소량은 토양 탄소 농도, 토양용적밀도, 토양 시료 채취깊이, 석력함량의 용적비 등을 이용하여 계산하였다.

### 5. 토양 성질 분석

조사구의 토양 성질은 토양 탄소량 추정을 위해 채취한 시료를 대상으로 건조 후 2 mm 체(ASTM No. 10)로 토양 물리, 화학적 성질 분석용 시료를 조제하였다. 토양 입경

분포는 비중계법을 이용하여 모래, 미사, 점토함량을 결정하였다. 토양 pH는 이온전극(Model-735, ISTEK, Korea)을 이용하여 1:5(토양:증류수) 혼합액으로부터 측정하였다. 질소 농도는 토양 건중량 시료를 0.420 mm체를 이용하여 시료를 조제한 후 대용량 원소분석기(Vario Macro cube, Germany)를 이용하여 측정하였다. 인, 칼륨, 칼슘, 마그네슘 함량 등은 2.5 g의 건조 토양을 암모늄 아세테이트 용액 55 ml를 첨가하여 16시간 동안 진공 추출하고 추출한 용액을 ICP (Perkin Elmer Optima 5300, USA)를 이용하여 분석하였다.

## 6. 자료분석

삼나무와 편백 임분의 탄소량에 대한 유의성 검정은 SAS TTEST( $P < 0.05$ ), 임목 바이오매스와 임분 환경요인과의 관계는 선형회귀식, 토양 탄소 농도 및 탄소량과 임분 환경요인과의 관계는 상관분석을 이용하였다(SAS Institute Inc, 2003). 임목 바이오매스 추정 상대생장식은 결정계수와( $R^2$ )와 평균제곱근 편차(RMSE)를 이용하여 적합도를 판정하였고, 로그변환 상대생장식의 편이 수정계수(CF)는 추정표준오차(SEE)로부터 계산하였다(Garcia Villacorta et al., 2015).

## 결과 및 고찰

### 1. 임분 현황

조사구의 임분 밀도, 흉고직경, 우세목의 평균 수고, 지

위지수 등은 삼나무가 편백에 비해 유의적으로 크게 나타난 반면, 임분 연령과 흉고단면적은 유의적인 차이가 없었다(Table 2). 평균 흉고직경과 평균 수고 같은 임목 성장특성은 삼나무 27.4 cm, 20.4 m, 편백 23.9 cm, 17.9 m로 삼나무가 유의적으로 큰 것으로 나타났으며, 이는 편백에 비해 삼나무의 낮은 임분 밀도나 급속한 성장 특성(Fukuda et al., 2003)이 부분적으로 기여하는 것으로 사료된다. 한편, 유사한 입지환경에서 생육한 삼나무는 편백에 비해 지위지수가 평균 2.7 정도 크게 나타나 산림생산력은 삼나무가 편백에 비해 높은 것으로 나타났다. 그러나 두 임분 사이에 평균 흉고직경, 수고, 지위 등은 상당한 차이가 있었지만, 임분 흉고단면적에 유의적인 차이가 없는 것은 편백 임분의 임분 밀도가 높기 때문으로 사료된다.

### 2. 토양 물리·화학적 성질

토양 물리적 성질 중 토양 용적밀도, 토양 입경분포, 석력함량의 경우 두 조립지가 서로 인접한 지역에서 조사되어 차이가 크지 않았다(Table 3). 일반적으로 토양의 물리적 성질은 임분의 발달 과정이나 수종의 영향이 크지 않는 것으로 보고되고 있다(Binkley and Fisher, 2020). 토양 물리적 성질과는 대조적으로  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  같은 일부 교환성 양이온 농도는 편백 임분이 삼나무 임분에 비해 유의적으로 낮았으며 그 결과 토양 pH의 경우도 편백 4.52, 삼나무 4.94로 편백 임분의 토양 산성화가 삼나무 임분에 비해 심한 것으로 나타났다. 국내에서 조사된 경상남도 남해군 삼나무 임분의 토양 pH는 4.76으로 편

Table 2. General characteristics in *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* stands.

Stand	Stand age (yrs)	Stand density (tree ha <sup>-1</sup> )	Mean DBH (cm)	Height (m)	Basal area (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	Site index
<i>C. japonica</i>	45.1 (3.3)	990 (54)	27.4 (1.20)	20.4 (0.80)	57.1 (2.86)	18.2 (0.44)
<i>C. obtusa</i>	43.1 (2.9)	1223 (85)	24.0 (0.95)	17.9 (0.59)	52.1 (2.95)	15.5 (0.36)
<i>P</i> -value	0.662	<b>0.024*</b>	<b>0.029</b>	<b>0.015</b>	0.232	<b>&lt;0.001</b>

Values in parenthesis are standard error. \*Bold-faced values indicate a significant difference at  $P < 0.05$ .

Table 3. Soil physico-chemical properties of *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* stands.

Stand	Bulk density (g cm <sup>-3</sup> )	Coarse fragment (g g <sup>-1</sup> )	Particle size distribution (%)			Soil pH	Organic C (g kg <sup>-1</sup> )	Total N (g kg <sup>-1</sup> )	Avail. P (mg kg <sup>-1</sup> )	Exchangeable (cmolc kg <sup>-1</sup> )		
			Sand	Silt	Clay					K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
<i>C. japonica</i>	0.80 (0.04)	0.35 (0.02)	52.5 (2.17)	36.2 (1.62)	11.3 (0.97)	4.94 (0.06)	63.0 (6.5)	4.28 (0.43)	2.5 (0.3)	0.44 (0.04)	3.11 (0.51)	0.64 (0.09)
<i>C. obtusa</i>	0.77 (0.04)	0.34 (0.02)	54.2 (1.53)	34.8 (1.08)	11.0 (0.73)	4.52 (0.05)	72.0 (7.0)	4.41 (0.40)	3.9 (0.6)	0.23 (0.02)	0.93 (0.19)	0.35 (0.04)
<i>P</i> -value	0.55	0.73	0.52	0.46	0.83	<b>&lt;0.01*</b>	0.35	0.34	0.06	<b>&lt;0.01</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>

Values in parenthesis are standard error. \*Bold-faced values indicate a significant difference at  $P < 0.05$ .

**Table 4. Site index-specific and generic allometric regression equations ( $\text{Log}_{10}Y = a + b\text{Log}_{10}X$ ) for aboveground, roots and total biomass of *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa*.**

Stand	Site index	Component	a	b	$R^2$	RMSE	P-value	CF	
<i>C. japonica</i>	12	Aboveground	-0.3098	1.8394	0.89	0.1066	<0.0001	1.013	
	14	Aboveground	-0.5480	2.0391	0.94	0.0668	<0.0001	1.005	
	16	Aboveground	-0.6913	2.1185	0.93	0.0966	<0.0001	1.011	
	18	Aboveground	-0.8704	2.1527	0.97	0.0704	<0.0001	1.006	
	Generic		Aboveground	-0.8106	2.2002	0.93	0.1045	<0.0001	1.013
			Roots	-1.0941	2.0313	0.81	0.1413	<0.0001	1.023
			Total	-0.4256	2.0259	0.89	0.1010	<0.0001	1.012
<i>C. obtusa</i>	12	Aboveground	-0.9483	2.3257	0.99	0.0487	<0.0001	1.003	
	14	Aboveground	-0.8795	2.3119	0.91	0.0464	<0.0001	1.002	
	16	Aboveground	-1.1518	2.4975	0.99	0.0608	<0.0001	1.004	
	Generic		Aboveground	-1.0250	2.4016	0.99	0.0555	<0.0001	1.004
			Roots	-1.8456	2.6398	0.95	0.1384	<0.0001	1.022
			Total	-0.9969	2.4719	0.99	0.0637	<0.0001	1.005

$\text{Log}_{10}Y = a + b \times \text{Log}_{10}X$ , X: DBH (cm), Y: Dry weight (kg), RMSE: root mean square error, CF: correction factors.

백 임분의 토양 pH 4.53보다 높아 본 연구 결과와 유사한 경향이 보고된 바 있다(Kim et al., 2016). 본 연구에서 두 임분의 교환성 양이온 농도의 차는 수종 간 양분 흡수 특성, 낙엽낙지의 질적·양적 성질, 양분 용탈 특성 등과 같은 다양한 요인의 변화가 임분 발달 과정 동안 발생했기 때문에 사료된다(Binkley and Giardina, 1998). 한편, 일본에서 조사된 삼나무는 토양 내  $\text{Ca}^{2+}$ 을 축적하는 반면 편백의 경우  $\text{Ca}^{2+}$ 과  $\text{K}^+$  농도가 감소한다는 결과와도 유사하였다(Tanikawa et al., 2014).

### 3. 삼나무 및 편백의 상대성장식

삼나무 및 편백의 지위별 임목 지상부 및 총 바이오매스(Y)와 흉고직경(DBH)을 독립변수(X)로 하여 계산된(Table 4) 상대성장식의 유의성이 모두 인정되었다( $P < 0.05$ ). 상대성장식의 결정계수( $R^2$ )는 삼나무의 지위지수 12나 뿌리 상대성장식을 제외하고 0.90 이상으로 개발된 상대성장식의 적합도가 높은 것으로 나타났다. 상대성장식의 회귀계수(b)는 삼나무와 편백 모두 지위가 높아지면서 회귀계수도 증가하는 경향을 보였다. 또한, 지상부 임목 바이오매스 추정식의 회귀계수는 삼나무 2.2002에 비해 편백 2.4016으로 편백이 유사한 흉고직경 급에서 임목 바이오매스가 큰 것으로 나타났다. 국내에서 수행된 타 연구의 결과도 흉고직경과 수고( $\text{DBH}^2 \cdot H$ )를 독립변수로 하는 상대성장계수는 삼나무 0.8196, 편백 0.8598로 편백이 크게 나타났고(Kim et al., 1987), 일본의 삼나무와 편백 지상부 임목 바이오매스의 상대성장계수는

2.5217과 2.6124로 편백이 큰 값을 보였다(Hosoda and Iehara, 2010).

### 4. 임분 환경요인과 임목 탄소량과의 관계

산림지역에서 쉽게 측정이 가능한 임분 환경요인과 임목 탄소량과의 관계를 조사한 결과 임분밀도나 지위지수는 임목 탄소량과 유의적인 선형 관계가 나타나지 않았다(Figure 1). 그러나 흉고단면적과 평균 흉고직경은 삼나무와 편백 모두 임목 탄소량과 유의적인 선형 관계를 보였다(Figure 1). 평균 흉고직경을 독립변수로 하는 지상부 임목 탄소량 추정 선형회귀식의 회귀계수는 편백 4.4877, 삼나무 2.6379로 상대성장식의 상대성장계수에서 나타난 결과와 동일하게 유사한 평균 직경급의 임목의 임목 탄소량은 편백이 삼나무에 비해 클 것으로 나타났다. 평균 흉고직경이나 흉고단면적 변수 외에도 편백의 경우 임분 연령이나 우세목의 평균 수고를 이용하여 임목 탄소량 추정이 가능하지만 회귀식의 설명력은 흉고단면적 변수에 비해 낮은 값을 보였다. 삼나무와 편백 임분의 임목 탄소량은 숲가꾸기나 간벌 정도에 따라 변화가 발생하기 쉬운 임분밀도나 지위지수 같은 공간적 변수보다는 시간적인 변화 속성을 가지는 흉고직경이나 흉고단면적 변수와 밀접한 관계를 보였다.

### 5. 임분 환경요인과 임상 및 토양층의 탄소농도 및 탄소량과의 상관관계

임상 및 토양층의 유기탄소 농도 및 유기탄소량과 임분

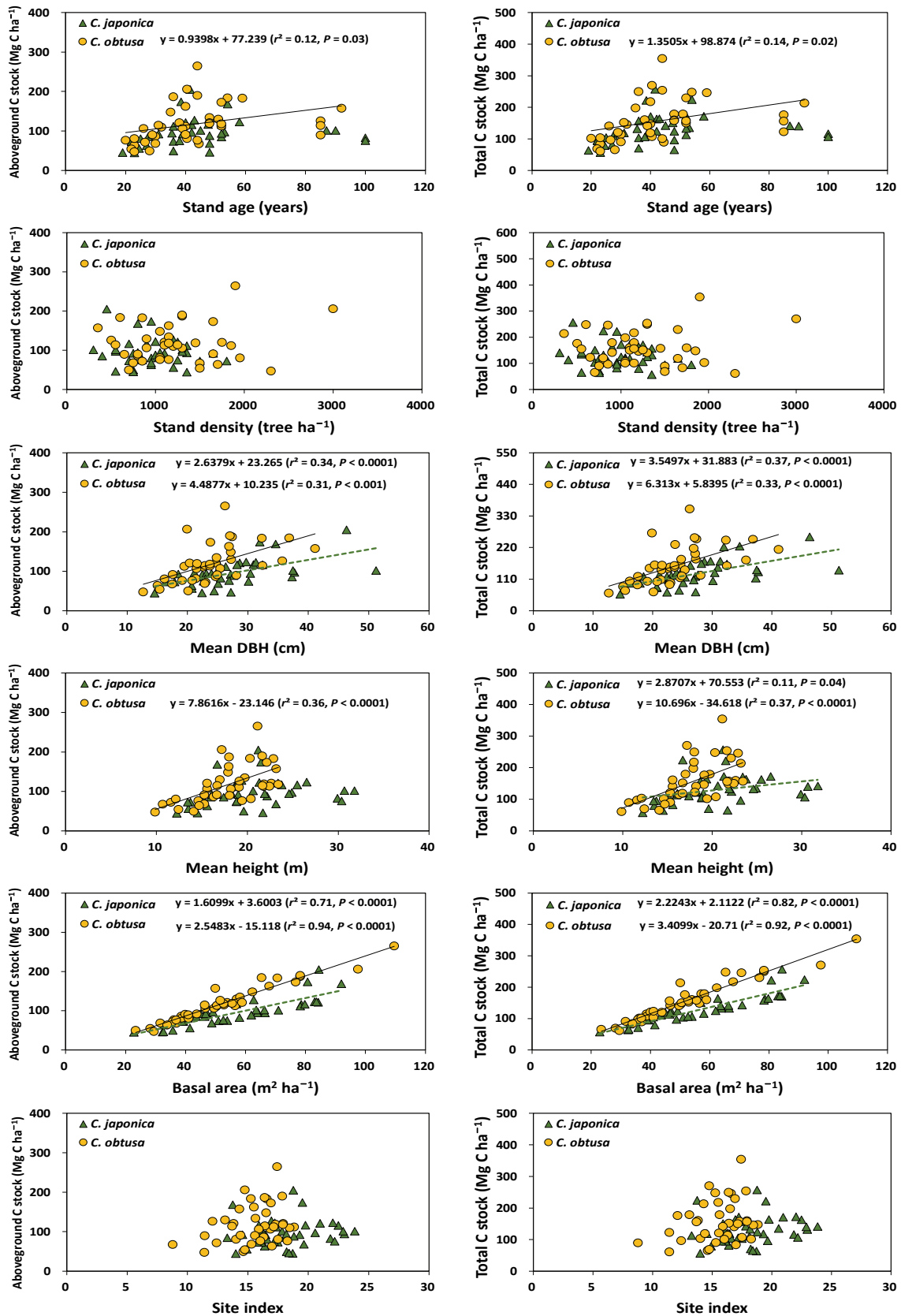


Figure 1. Relationships between carbon stocks in tree biomass and stand variables of *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* stands.

**Table 5. Pearson correlation coefficient ( $r$ ) between carbon concentration or carbon stocks of the forest floor and soils, and stand variables in *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* stands.**

Stand variable	Stand	Carbon concentration		Carbon stock	
		Forest floor	Soil	Forest floor	Soil
Stand density	<i>C. japonica</i>	0.21	-0.31	-0.22	-0.28
	<i>C. obtusa</i>	-0.11	-0.26	-0.19	-0.61
DBH	<i>C. japonica</i>	-0.26	0.15	-0.26	0.10
	<i>C. obtusa</i>	0.22	<b>0.36*</b>	0.17	<b>0.37*</b>
Basal area	<i>C. japonica</i>	-0.25	-0.14	0.19	-0.08
	<i>C. obtusa</i>	0.16	0.11	0.05	0.27
Stand age	<i>C. japonica</i>	-0.12	-0.07	-0.07	0.16
	<i>C. obtusa</i>	0.21	0.13	-0.08	0.25
Tree height	<i>C. japonica</i>	-0.19	-0.10	-0.08	0.17
	<i>C. obtusa</i>	-0.05	0.08	-0.06	0.25
Site index	<i>C. japonica</i>	-0.17	0.02	-0.13	0.21
	<i>C. obtusa</i>	<b>-0.36*</b>	-0.04	-0.07	0.04

\* Bold-faced values indicate a significant difference at  $P < 0.05$ .

**Table 6. Organic carbon concentration and stocks of the forest floor and soil depth at 0-10cm in *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* stands.**

Stand	Carbon concentration (mg C g <sup>-1</sup> )			Carbon stock (Mg C ha <sup>-1</sup> )			
	Tree	Forest floor	Soil	Trees		Forest floor	Soil
				Aboveground	Total		
<i>C. japonica</i>	470	316 (16)	63.0 (6.5)	95.5 (5.5)	129.1 (7.0)	7.15 (0.40)	38.1 (2.1)
<i>C. obtusa</i>	470	299 (13)	72.0 (7.0)	117.7 (7.8)	157.0 (10.4)	7.80 (0.46)	41.6 (2.6)
<i>P</i> -value	-	0.39	0.35	<b>0.02*</b>	<b>0.03</b>	0.29	0.31

Values in parenthesis are standard error. \* Bold-faced values indicate a significant difference at  $P < 0.05$ .

환경요인의 상관관계를 분석한 결과 삼나무는 조사된 임분 환경요인과 탄소 농도 및 탄소량과 상관관계가 나타나지 않았다( $P > 0.05$ ). 그러나 편백 임분은 임상에서 지위지수와 탄소 농도, 토양층의 평균 흉고직경 과 탄소 농도 및 탄소량 사이에 유의적인 상관관계가( $P < 0.05$ ) 있었다(Table 5). 편백 임분의 지위지수와 탄소 농도 사이의 부의 상관( $r = -0.36$ )은 지위가 높아질수록 토양수분 조건이 양호하여 지위가 낮은 임지에 비해 유기물층의 탄소 무기화가 빠르게 진행되어 탄소 농도가 낮게 나타났기 때문일 수 있다. 유사한 결과로, Herrero et al.(2016)은 임상의 탄소 농도는 낙엽층(L)에 비해 분해층(F) 및 부식층(H)이 지속적으로 낮게 나타난 결과를 보고한 바 있다. 편백 임분의 평균 흉고직경은 토양층의 탄소 농도( $r = 0.36$ )와 탄소량( $r = 0.37$ ) 사이에 정의 상관관계가 있었다. 이는 평균 흉고직경이 큰 조림지의 경우 임목 생육상

태가 양호하고 낙엽낙지나 세균을 통한 유기물의 토양층에 급속한 환원과 관련이 있기 때문에 사료된다. 임분 환경요인 중 흉고단면적 증가는 임목 바이오매스에 의한 탄소량 증가와 밀접한 관련이 있었지만 유기물층이나 토양층에 미치는 영향은 크지 않았다.

## 6. 임목, 임상, 토양층의 탄소량

임목 바이오매스에 저장된 지상부 및 총 탄소량은 삼나무 95.5 Mg C ha<sup>-1</sup>, 129.1 Mg C ha<sup>-1</sup>, 편백 117.7 Mg C ha<sup>-1</sup>, 157.0 Mg C ha<sup>-1</sup>로 편백 임분이 유의적으로 높게 나타났다(Table 6). 두 수종 사이 임분 흉고단면적은 유의적인 차가 없었기 때문에 임목 바이오매스 탄소량 차이는 임분 환경요인보다는 임목의 본질적인 성질에 의해 영향을 받고 있을 가능성이 있다. 예를 들면 국내에서 생육한 삼나무의 목재 기본 밀도는 0.35 Mg m<sup>-3</sup>, 편백은 0.43 Mg

$m^3$ , 바이오매스 확장계수(Biomass Expansion Factors)는 삼나무 1.31, 편백 1.35(Lee et al., 2018)로 유사한 흉고단면적을 가지는 삼나무와 편백 임분의 경우 목재 기본 밀도나 바이오매스 확장계수가 임목 탄소량을 결정하는 요인임을 시사한다. 유사한 결과로 Kim et al.(1987)은 전라남도 장성군 삼나무와 편백 III영급 임분의 임목 바이오매스는 수종 간 목재 전진 비중과 밀접한 관계를 보였다고 보고한 바 있다. 본 연구 결과를 국내에서 조사된 삼나무와 편백 관련 연구의 임목 바이오매스 탄소량과 비교할 때 전라남도 장성 46년생 삼나무 조림지의 임목 바이오매스 총 탄소량은  $144.82 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (Seo and Lee, 2013), 장흥 40년생 편백 지상부 임목 바이오매스 탄소량은  $83.6 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (Chung and Lee, 2001)로 삼나무는 낮은 값이나 편백은 높게 나타났다. 한편, 남부지역에 식재된 V영급의 삼나무 분포면적과 축적은 368ha,  $74,378m^3$ , 편백은 215ha,  $58,217m^3$ (Korea Forest Research Institute, 2014)로, 국내에서 개발된 바이오매스 확장계수 및 목재 기본 밀도 값(Lee et al., 2018)을 이용한 삼나무 임분의 지상부 임목 바이오매스 탄소량은  $43.6 \text{ Mg C ha}^{-1}$ , 편백 임분  $73.9 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 로 본 연구 결과보다 낮게 나타났다. 그러나 삼나무 45년생 임분의 산림수확표 상 임목 바이오매스 탄소량  $83.9 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (Son et al., 2015)와는 큰 차이가 없었다. 일본에서 조사된 히로시마현 V영급 삼나무 조림지의 지상부 임목 바이오매스 탄소량은  $100.5 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (Shutou and Nakane, 2004), 일본 전 지역을 대상으로 조사된 편백 조림지의 임목 바이오매스 탄소량은  $1.3 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 에서  $115.6 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (Fukuda et al., 2003) 정도가 분포하였다. 대만에서 조사된 49년생 삼나무 임분의 임목 바이오매스 탄소량은  $163 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (Cheng et al., 2013)로 국내 삼나무 임목 바이오매스 탄소량보다 크게 나타났다.

임상의 유기탄소 농도는 삼나무  $316 \text{ mg C g}^{-1}$ , 편백  $299 \text{ mg C g}^{-1}$ 으로 유의적인 차가 없었다. 그러나 두 수종의 탄소 농도는 IPCC가 보고한 임상의 디폴트 값  $400 \text{ mg C g}^{-1}$  보다(IPCC, 2006)는 낮았다. Ichikawa et al.(2006)은 삼나무와 편백 임분은 임상층의 층위 발달이 빈약하고 토양이 최대 14%까지 혼입되어 타 수종의 임상에 비해 탄소 농도가 낮게 나타나는 것으로 보고한 바 있다. 본 연구에서 조사된 임상의 탄소량은 삼나무  $7.15 \text{ Mg C ha}^{-1}$ , 편백  $7.80 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 으로 두 임분 간 유의적인 차가 없었다. 일본 간토(Kanto)지방의 48년생 삼나무 조림지 임상 탄소량은  $8.1 \text{ Mg C ha}^{-1}$ , 편백 조림지는  $7.9 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 로서 본 연구 결과와 큰 차이는 없었다(ichikawa et al., 2006). 두 수종의 임상 탄소량은 국내에서 조사된 소나무 천연림의  $11.85 \text{ Mg C ha}^{-1}$  보다는 낮으나, 잣나무 및 리기다소나무 임분  $7.36 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 와  $7.95 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (Lee et al., 2018)

과는 유사하였다. 삼나무와 편백 임분의 임상 탄소량은 타 침엽수종에 비해 낮은 것으로 알려져 있으며, 이는 두 수종이 주로 온도가 높고 습윤한 비옥지에 식재되어 낙엽낙지의 분해가 빠르게 진행되기 때문으로 알려져 있다(Takahashi et al., 2010).

토양 10 cm 깊이의 탄소 농도 및 탄소량은 두 수종 간 유의적인 차이가 없었으며, 토양 탄소량은 삼나무  $38.1 \text{ Mg C ha}^{-1}$ , 편백  $41.6 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 로 나타났다. 본 연구 결과와 유사하게 일본에서 조사된 간토지방의 유사한 입지에 식재된 48년생 삼나무와 편백 임분의 0~23 cm 깊이 토양 탄소량은  $69.6 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 와  $83.0 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 로 편백 임분의 탄소량이 크게 나타났으나 유의적인 차이는 없었다(Ichikawa et al., 2006). Ono et al.(2011)은 토양 탄소는 주로 낙엽낙지나 지하부 세균 등의 부식화과정(humification processes)을 통하여 생성되며, 삼나무와 편백의 낙엽 분해율은 수종 간 유의적인 차이가 없었고 부식화 과정도 유사하다고 보고한 바 있다. 한편, 일본에서 조사된 세균 생산량의 경우 삼나무 임분  $72\sim 320 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ , 편백 임분  $122\sim 306 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 로 수종 간 큰 차이는 없었다(Noguchi et al., 2007).

## 결론

유사한 입지환경에 조성된 삼나무와 편백 임분을 대상으로 임분 환경요인, 임목, 임상 및 토양 0~10 cm 깊이의 탄소량을 조사하였다. 임분 환경요인 중 흉고직경과 우세목의 평균 수고는 삼나무가 편백에 비해 양호한 생장특성을 보였다. 그러나 두 임분 사이 흉고단면적에 유의적인 차이는 없었으나, 임목 바이오매스 탄소량은 편백 임분이 삼나무 임분에 비해 유의적으로 크게 나타났다. 편백 임분의 임목 바이오매스 탄소량이 크게 나타난 것은 목재 기본 밀도와 바이오매스 확장계수 등과 같은 수종 간 고유의 특성에 의해 영향을 받고 있기 때문으로 사료된다. 임목 바이오매스 탄소량과는 달리 임상 및 토양층의 탄소 농도와 탄소량은 두 수종 간 유의적 차가 없었다. 본 연구 결과에 따르면 인접한 지역의 유사한 입지 환경에 조성된 삼나무와 편백 임분의 임목 바이오매스 탄소량은 임분 발달 과정 동안 유의적인 차이가 발생하지만 임상이나 토양 탄소량은 수종의 영향이 크지 않는 것으로 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 국립산림과학원 산림바이오소재연구소의 연구용역인 “삼나무, 편백림의 임지생산력 평가를 위한 지위 추정 모델 개발” 과제의 일부로 연구비 지원에 감사드립니다.



## References

- Binkley, D. and Giardina, C. 1998. Why do tree species affect soils? The warp and woof of tree-soil interactions. *Biogeochemistry* 42: 89-106.
- Binkley, D. and Fisher, R.F. 2020. Ecology and management of forest soils. 5<sup>th</sup> Ed. John Wiley & Sons Ltd. UK. pp. 440.
- Cheng, C.H., Hung, C.Y., Chen, C.P. and Pei, C.W. 2013. Biomass carbon accumulation in aging Japanese cedar plantations in Xitou, central Taiwan. *Botanical Studies* 54(1): 60.
- Chung, Y.G. and Lee, K.S. 2001. Biomass estimation of 40 years old *Chamaecyparis obtusa* stands. *Korean Journal of Forest Measurements* 4(2): 11-17.
- Fang, J., Kato, T., Guo, Z., Yang, Y., Hu, H., Shen, H., Zhao, X., Kishimoto, A.W., Tang, Y. and Houghton, R.A. 2014. Evidence for environmentally enhanced forest growth. *PNAS* 111(11): 9527-9532.
- Fukuda, M., Iehara, T. and Matsumoto, M. 2003. Carbon stock estimates for Sugi and Hinoki forests in Japan. *Forest Ecology and Management* 184(1-3): 1-16.
- Garcia Villacorta, A.M., Martin, T.A., Jokela, E.J., Cropper Jr, W.P. and Gezan, S.A. 2015. Variation in biomass distribution and nutrient content in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) clones having contrasting crown architecture and growth efficiency. *Forest Ecology and Management* 342: 84-92.
- Gwon, J.H., Seo, H., Lee, K.S., You, B.O., Park, Y.B., Jeong, J. and Kim, C. 2014. Allometric equations and biomass expansion factors by stand density in *Cryptomeria japonica* plantations. *Journal of Korean Forest Society* 103(2): 175-181.
- Herrero, C., Turrión, M.B., Pando, V. and Bravo, F. 2016. Carbon content of forest floor and mineral soil in Mediterranean *Pinus* spp. and oak stands in acid soils in Northern Spain. *Forest Systems* 25(2): e065.
- Hosoda, K. and Iehara, T. 2010. Aboveground biomass equations for individual trees of *Cryptomeria japonica*, *Chamaecyparis obtusa* and *Larix kaempferi* in Japan. *Journal of Forest Research* 15: 299-306.
- Ichikawa, T., Takahashi, T. and Asano, Y. 2006. Comparison of changes in organic matter dynamics due to stand age between artificial Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) forests and Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa* Sieb. et Zucc.) forests. *Journal of the Japan Forest Society* 88(6): 525-533.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006. Guidelines for national greenhouse gas inventories. Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. and Tanabe, K. (Eds.). IPCC/OECD/IEA/IGES, Hayama, Japan.
- Ishihara, M.I., Utsugi, H., Tanouchi, H., Aiba, M., Kurokawa, H., Onoda, Y., Nagano, M., Umehara, T., Ando, M., Miyata, R. and Hiura, T. 2015. Efficacy of generic allometric equations for estimating biomass: a test in Japanese natural forests. *Ecological Applications* 25(5): 1433-1446.
- Jung, S.C., Lumbres, R.I.C., Won, H.K. and Seo, Y.O. 2014. Allometric equations, stem density and biomass expansion factors for *Cryptomeria japonica* in Mount Halla, Jeju Island, Korea. *Journal of Ecology and Environment* 37(4): 177-184.
- Kim, C., Lee, J.S. and Cho, K.J. 1987. Biomass and net production of *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* in Changsong district, Chonnam. *Journal of Korea Forest Energy* 7(1): 1-10.
- Kim, H.S., Park, G.S., Lee, S.M., Lee, S.J., Lee, H.G., Park, H.W., Park, D.Y., Lee, C.H., Kim, J.H. and Lee, J.K. 2016. A study on the vegetation structure of the Geumsan in Namhae-gun of Korea. *Korean Journal of Environmental Ecology* 30(2): 214-227.
- Korea Forest Research Institute. 2014. Forest resources and distribution of major tree species in Southern Korea. pp. 22.
- Korea Meteorological Administration. 2017. Korea climatological reports. pp. 322.
- Lee, S.J., Yim, J.S., Son, Y.M., Son, Y. and Kim, R. 2018. Estimation of forest carbon stocks for national greenhouse gas inventory reporting in south Korea. *Forests* 9(10): 625.
- Noguchi, K., Konôpka, B., Satomura, T., Kaneko, S. and Takahashi, M. 2007. Biomass and production of fine roots in Japanese forests. *Journal of Forest Research* 12(2): 83-95.
- Ono, K., Hiradate, S., Morita, S., Ohse, K. and Hirai, K. 2011. Humification processes of needle litters on forest floors in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) and Hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa*) plantations in Japan. *Plant and Soil* 338: 171-181.
- SAS Institute Inc. 2003. SAS/STAT statistical software. Version 9.1 SAS Publishing Cary, NC.
- Sasaki, N. and Kim, S. 2009. Biomass carbon sinks in Japanese forests: 1966-2012. *Forestry* 82(1): 105-115.
- Seo, Y.O. and Lee, Y.J. 2013. Estimation of above- and belowground biomass with consideration of age classes for *Cryptomeria japonica* stands. *Journal of Agriculture & Life Science* 47(2): 17-23.
- Shutou, K. and Nakane, K. 2004. Change in soil carbon cycling

- for stand development of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantations following clear-cutting. *Ecological Research* 19(2): 233-244.
- Son, Y.M., Kang, J.T., Hwang, J.S., Park, H. and Lee, K.S. 2015. Assessment and prediction of stand yield in *Cryptomeria japonica* stands. *Journal of Korean Forest Society* 104(3): 421-426.
- Takahashi, M., Ishizuka, S., Ugawa, S., Sakai, Y., Sakai, H., Ono, K., Hashimoto, S., Matsuura, Y. and Morisada, K. 2010. Carbon stock in litter, deadwood and soil in Japan's forest sector and its comparison with carbon stock in agricultural soils. *Soil Science and Plant Nutrition* 56(1): 19-30.
- Tanikawa, T., Sobue, A. and Hirano, Y. 2014. Acidification processes in soils with different acid buffering capacity in *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* forests over two decades. *Forest Ecology and Management* 334: 284-292.
- Vesterdal, L., Schmidt, I.K., Callesen, I., Nilsson, L.O. and Gundersen, P. 2008. Carbon and nitrogen in forest floor and mineral soil under six common European tree species. *Forest Ecology and Management* 255: 35-48.
- Vesterdal, L., Clake, N., Sigurdsson, B.D. and Gudersen, P. 2013. Do tree species influence soil carbon stocks in temperate and boreal forests? *Forest Ecology and Management* 309: 4-18.

---

Manuscript Received : April 19, 2020

First Revision : May 26, 2020

Accepted : May 27, 2020