


## 국가산림자원조사 자료를 활용한 고사목의 탄소저장량 변화: 강원도를 대상으로

문가현 · 임종수 \*

국립산림과학원 산림ICT연구센터

## Changes in Carbon Stocks of Coarse Woody Debris in National Forest Inventories: Focus on Gangwon Province

Ga Hyun Moon and Jong Su Yim \*

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

**요약:** 기후변화 영향의 심각성을 인지한 국제사회의 움직임에 발맞춰 우리 정부는 2050 탄소중립 선언을 통해 지속가능한 탄소중립 사회를 지향하고 있으며, 국가 온실가스 감축 목표의 이행을 위해 산림부문을 적극적으로 활용한 전략을 수행 중이다. 특히 산림 내 고사목은 탄소저장고로서의 역할을 담당하므로 고정표본점에 대하여 모니터링이 이루어지는 국가산림자원조사(National Forest Inventory; NFI)에서 수집되는 고사목 자료를 활용하여 고사목 축적량과 고사목의 탄소저장량 변화 특성을 구명하는 것은 의의가 크다. 따라서 본 연구는 각 차수별(제5차~제7차 NFI) 고사목 자료를 활용하여 동일표본점 내 고사목의 발생 현황 및 탄소저장량을 산출하고 시간에 따른 변화 특성을 분석하였다. 강원도 산림에서 각 차수별로 모니터링이 가능한 동일 표본점 2,021개를 분석한 결과 조사차수별 고사목 축적량( $m^3 ha^{-1}$ )은 제5차 및 제6차 NFI에서 각각 4.71과 4.09로 나타났으나, 제7차 NFI에서는 3.09로 감소하는 결과를 보였다. 연도별 고사목의 탄소저장량( $ton C ha^{-1}$ )은 2009년 0.67, 2014년 0.64, 그리고 2019년 0.41로 분석되어, 시간의 흐름에 따른 감소추세를 나타냈다. 본 연구 결과를 기초자료로 활용하여 향후 전국 산림에 대한 고사목의 탄소저장량 추정 및 시계열적 변화 특성에 대한 지속적인 모니터링 연구가 수행될 필요가 있다.

**Abstract:** Considering worldwide efforts to mitigate repercussions of climate change, the South Korean government has declared to reach net zero by 2050 to achieve a carbon-neutral sustainable society. For full implementation of NDCs, the government has actively reflected its forestry sector into these strategies. Since coarse woody debris (CWD) in forests represents an enduring carbon storage, it is of particular significance to determine characteristics of changes in carbon stocks of CWD by utilizing data on dead trees monitored in permanent sample plots within national forest inventories (NFIs). In this study, therefore, both occurrence and carbon stocks of CWD were estimated in such plots using data on CWD from the 5<sup>th</sup>, 6<sup>th</sup>, and 7<sup>th</sup> NFIs. Subsequently, characteristics of changes in carbon stocks over time were analyzed. Based on the analysis of 2,021 plots available for monitoring in each NFI of Gangwon Province, the volume of CWD ( $m^3 ha^{-1}$ ) was found to be 4.71 in the 5<sup>th</sup> NFI and 4.09 in the 6<sup>th</sup> NFI. However, the volume of CWD declined to 3.09 in the 7<sup>th</sup> NFI. Moreover, the annual carbon stocks of CWD ( $ton C ha^{-1}$ ) were estimated to be 0.67 in 2009, 0.64 in 2014, and 0.41 in 2019, showing a downward trend over time. This study provides a basis for future research to investigate long-term changes and estimate carbon stocks of CWD in South Korea forests.

**Key words:** coarse woody debris (CWD), carbon stock, decay class, permanent plot, national forest inventory

## 서론

\* Corresponding author  
E-mail: yimjs@korea.kr

ORCID

성명  <https://orcid.org/0000-0001-7316-6093>

제21차 유엔기후변화협약 당사국총회(COP21)에서 모든 당사국들이 파리 협정에 합의함에 따라 국제사회는 기후변화의 저감뿐만 아니라 기후변화 적응, 그리고 지속가

능한 발전의 중요성을 동시에 강조한 신기후 체제(Post-2020)의 출범을 알렸다. 이러한 상황에서 기후변화 영향의 심각성을 인지한 우리 정부는 국제사회의 움직임에 맞춰 '2050 탄소중립 선언'을 통해 탈탄소 사회로의 이행을 시사하였다. 탄소중립(Carbon neutrality)이란 온실가스 배출량과 흡수량이 서로 상쇄되어 온실가스 순 배출량이 0(zero)이 되는 상태를 의미하는 것으로, 기후변화에 대한 정부의 적극적인 대응 전략으로 볼 수 있다(Bae, 2021). 특히 정부에서는 전례 없는 기후 위기 시대에 2050 탄소중립 실현을 위하여 산림이 핵심적인 역할을 수행할 것으로 기대하고 있으며, 온실가스 인벤토리의 대상이자 탄소저장고로서 산림의 기능을 적극적으로 활용하고자 하는 요구가 높아지고 있다(Korea Forest Service, 2021).

현대 사회의 경제적 활동 과정에서 화석연료 소비량에 비례해 온실가스 배출이 발생하는 것과 비교할 때 산림은 이용 및 관리 방법에 따라 탄소흡수원으로서 매우 중요한 기여를 할 수 있다(Kim and Lee, 2010; Kim et al., 2010). 산림은 이산화탄소의 흡수원인 동시에 배출원이기 때문에 산불, 병해충, 그리고 산지전용으로 인한 산림면적의 감소 등 관리가 잘 이루어지지 않을 경우 많은 양의 이산화탄소를 배출할 수 있다(Yun, 2008). 반면에 산림을 잘 가꾸면 상당량의 이산화탄소를 흡수할 수 있으므로 주요 탄소흡수원으로서 산림의 역할을 명확히 인식할 필요가 있다. 육상생태계에서 탄소의 대부분은 산림에 저장되어 있는데, 산림생태계 내에서도 임목, 고사목, 낙엽층 그리고 토양이 탄소의 주요 저장고이다(Schuur et al., 2001; IPCC, 2006; Churkina et al., 2007).

고사목 바이오매스는 산림생태계의 기능 및 생산성에 중요한 역할을 담당하며, 고사 후 완전히 분해될 때까지 많은 시간이 소요되어 오랜 기간에 걸쳐 산림생태계에 영향을 미친다(Harmon et al., 1986; Freedman et al., 1996). 특히 산림 내에서 광합성을 통해 합성된 고사유기물은 분해되는 과정에서 다양한 생물들의 서식처를 제공하고(Nordén et al., 2004), 물질순환(N, P, Ca, Mg)의 중요한 인자로 작용하며(Laiho and Prescott, 1999; Holub et al., 2001; Zhou et al., 2007), 임상에 장기간 잔존하여 탄소의 장기적인 저장 기능을 수행한다(Ravindranath and Ostwald, 2008). 또한 고사목은 수분 및 온도 등 국지적인 기후를 조절하고, 지형을 안정시켜 낙엽 및 토양의 유출을 방지하는 등의 역할을 통해 산림의 생물다양성을 대표하는 유용한 지표로 활용되고 있다(Reid et al., 1996; Bragg and Kershner, 1999).

이와같이 고사목을 중요한 연구대상으로 인식한 연구자들은 기본적으로 고사목의 재적, 부후등급, 그리고 분해속도를 측정하는 연구를 수행하였으며(Harmon et al., 1986;

Nalder et al., 1997; Hart, 1999; Progar et al., 2000), 고사형태나 고사목의 크기 등 물리적·생물적 특성에 따른 호흡속도의 변화를 측정하고자 하였다(Chambers et al., 2001; Carmona et al., 2002; Wu et al., 2010; Olajuyigbe et al., 2011; Forrester et al., 2012). 최근에는 기후변화 저감을 위한 산림의 탄소 동태 파악이 중요해짐에 따라 고사목의 탄소저장량에 미치는 장기적인 영향을 구명하기 위한 연구가 다양하게 이루어지고 있다(Lal, 2005; Gough et al., 2007; Powers et al., 2011; Harmon et al., 2013; Santaniello et al., 2017).

국내에서도 시업 강도, 임분특성 등에 따라 토양, 낙엽층 및 고사목의 탄소저장량에 미치는 영향을 구명하기 위한 연구가 수행된 바 있으며(Ko et al., 2014; Kim, 2019; Lee et al., 2019), 탄소저장 비율이 높은 임목과 토양의 경우 양분순환 및 산림탄소모델을 이용하여 국내 산림부문의 온실가스 감축 잠재력을 추정하기 위한 다양한 연구가 수행되었다(Lee et al., 2014; Kim et al., 2018). 이처럼 산림생태계 내의 탄소저장량을 파악하기 위해서는 각 탄소저장고별 역할 정립과 물질순환을 고려한 관점에서 탄소저장량 변화 특성에 관한 연구가 이루어질 필요가 있다. 그중에서도 고사목의 경우 탄소전환계수의 불확도가 높고 고사목의 특성이 반영된 정확한 탄소저장량 산정이 어려운 실정이다(Kim and Son, 2002). 특히 산림 내 고사목은 탄소를 격리하는 저장고로서의 역할을 수행하므로(Stevens, 1997; IPCC, 2006), 장기적으로 탄소저장량의 변화 특성을 분석하기 위한 모니터링이 필요하다.

우리나라는 전체 산림을 대상으로 산림자원량의 현황을 파악하고 시간의 흐름에 따른 변화를 모니터링하기 위하여 1970년대부터 국가산림자원조사(National Forest Inventory; NFI)를 수행하고 있다. 특히 제5차 NFI부터는 모든 탄소저장고에 관한 기초자료가 수집된 상태로 산림자원의 시계열 변화를 탐지하기 위한 고정표본점을 설치하여 이에 대한 모니터링이 가능하다(National Institute of Forest Science, 2011). 국가 단위 조사자료의 경우 많은 인력과 비용이 소요된다는 점을 고려할 때 모니터링이 가능한 NFI의 고사목 자료를 활용하여 고사목의 탄소저장량 특성을 구명하는 것은 의의가 크다. 또한, 전국에 일정한 간격으로 배치된 고정표본점에서 수집된 시계열 자료는 임목축적 뿐만 아니라 산림 내 모든 탄소저장고별 탄소저장량의 현황을 파악할 수 있다(Korea Forest Service, 2018). 따라서 본 연구의 목적은 NFI 자료를 활용하여 강원도 산림 내 고사목의 발생현황과 탄소저장량 변화 특성을 분석하는 것으로, 전국단위 고사목의 탄소저장량 변화 동태를 장기적으로 파악할 수 있는 모니터링 체계를 개발하는데 기여하고자 한다.

## 재료 및 방법

### 1. 연구대상지

본 연구의 대상지인 강원도는 한반도 중앙부의 동쪽에 위치하며, 기후대는 온대중부 및 북부에 속한다(Yim, 1977, Shin et al., 2002). 2019년 통계 기준 강원도의 전체 산림면적은 1,368천 ha이고, 임상별 면적분포를 보면 침엽수(33%), 활엽수(39%), 혼효림(28%)의 면적을 차지하고 있다(Korea Forest Service, 2020). 또한, 임상별 영급 구성을 살펴보면 침엽수림의 경우 II~IV영급이 많은 면적을 차지하고 있으며, 활엽수림은 III~V영급이 대부분인 것으로 나타났다.

### 2. 국가산림자원조사(NFI)

제5차 국가산림자원조사(5<sup>th</sup> National Forest Inventory; NFI)의 표본설계는 임의의 한점을 기준으로 4 km×4 km의 일정한 간격으로 표본점을 배치하는 계통추출법(Systematic sampling)을 적용한 것으로, 집락표본점으로서 4개의 부 표본점으로 구성되어 있다(Figure 1). 제5차 NFI부터는 시간경과에 따른 산림자원의 변화를 모니터링하기 위하여 고정표본점으로 설치되어 있으며, 5년마다 재조사가 수행되고 있다(Korea Forest Service and Korea Forestry Promotion Institute, 2017).

NFI에서 고사목조사는 모든 집락표본점의 중앙표본점(S1)에서 수행되며, 고사목 조사가 이루어지는 중앙표본점은 기본조사원(0.04 ha)으로 중심으로부터 반경이 11.3 m인 원형조사원이다. 일반적으로 산림의 중요한 생태적 역할을 담당하는 고사목(Coarse Woody Debris; CWD)은 자연적 또는 인위적 원인으로 인해 임내에서 있거나 쓰러

져 죽은 나무를 지칭하며(Harmon et al., 1986; Clark et al., 2002), 존재 상태에 따라 서 있는 고사목(Standing dead wood), 쓰러진 고사목(Down dead woody), 그리고 그루터기(stump) 등으로 구분할 수 있다(Teodosiu and Bouriaud, 2012). 본 연구에서 고사목의 범위는 NFI의 고사목 조사기준(Korea Forest Research Institute, 2011)을 따르며, 재선충병 및 시들음병 등의 병해충에 의한 고사, 담압이나 농약 살포 등의 인위적 피해에 의한 고사, 그리고 자연환경 및 기상재해 등의 자연적 고사에 의한 고사입목과 임내에 쓰러져 죽은 도목으로 정의하였다.

### 3. 고사목 분석

NFI에서 수집된 고사입목은 흉고직경과 수고를 이용하여 재적을 산출하고, 도목의 경우 중앙부 직경과 길이를 이용하여 개체목의 재적산출과 동일한 방법으로 산출한다. 표본점 단위의 고사목 축적량 및 탄소저장량은 입목재적의 산출식을 적용하였다(식 1).

$$y_{c,i} = \frac{\sum y_{c,j}}{a_{i,j}} \quad (1)$$

여기서,  $y_{c,i}$ 는 부표본점( $i$ )의 ha당 고사목 축적량( $m^3 ha^{-1}$ )을 나타내고,  $y_{c,j}$ 는 기본조사원( $a_{i,j}$ )에 포함된 고사목 축적량, 그리고  $a_{i,j}$ 는 기본조사원의 실제 산림면적이다(Korea Forest Research Institute, 2011). 본 연구에서는 제5차 NFI(2006~2010년)·제6차 NFI(2011~2015년)·제7차 NFI(2016~2020년)에서 수집된 고사목 자료를 활용하였으며, 각 차수별 탄소저장량 변화 특성을 파악하기 위해 모니터링이 가능한 표본점만을 대상으로 하였다(Table 1).

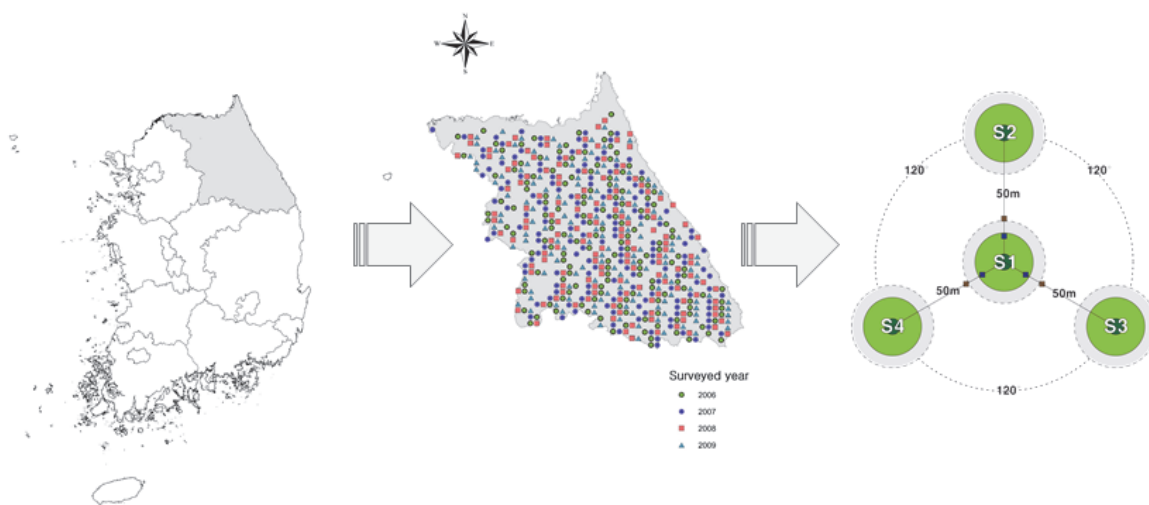


Figure 1. Sampling and plot designs for coarse woody debris (CWD) in the Korean NFI system (National Institute of Forest Science, 2011).

**Table 1. The number of sample plots with coarse woody debris (CWD) in Gangwon Province.**

Survey	Year	Planted forest	Natural forest	Total
5 <sup>th</sup>	2006	85	468	2,021
	2007	79	461	
	2008	67	410	
	2009	88	363	
6 <sup>th</sup>	2011	79	474	2,021
	2012	82	458	
	2013	64	413	
	2014	91	360	
7 <sup>th</sup>	2016	83	470	2,021
	2017	87	453	
	2018	68	409	
	2019	91	360	

제7차 NFI는 2020년 현지조사가 마무리되었으나 연구가 수행된 시점에서 자료가 완전하게 구축되지 않았다고 판단하여 2020년도의 자료는 분석에서 제외하였다. 이에 따라 모니터링이 가능한 동일표본점을 대상으로 하기 위해 5년 주기로 조사된 차수별 자료에서 마지막 연도인 2010년도와 2015년도 자료는 제외하였다. 결과적으로 모니터링이 가능한 차수별 표본점은 2,021개로 인공림(16%)과 천연림(84%)의 분포를 나타냈다. 전체 임목 중에서 고사목이 차지하는 비율을 파악하기 위해 고사목 축적량의 경우 고사목의 ha당 본수를 고사입목과 도목으로 구분하

**Table 2. Criteria for the classification of coarse woody debris (CWD) by decay class.\***

Decay class	Classification criteria	Description
I	Recently dead	Soon after being dead, but with leaves or branches
II	Incipient decay	The stage in which there are neither branches nor leaves, with the stem decayed partly
III	Progressed decay	The stage in which the stem is not only decayed completely but the sapwood is also partly decayed
IV	Intense decay	The stage in which only the empty shell of the tree remains to the extent to which it can be destroyed by just one touch

\*Source: Korea Forest Service (2020).

였다. 고사목의 부후도는 조사자가 부후정도를 육안으로 판정하며, 고사목의 부후도 구분기준은 Table 2와 같다.

고사목의 부후정도는 최근에 고사한 것부터 부패의 초기단계, 부패의 중간정도 진척 단계, 그리고 부패가 심화된 단계인 4등급으로 구분된다. 또한, 고사목의 탄소저장량은 부후등급별 고사목 축적량을 산출한 후 국립산림과학원에서 개발하고 환경부 온실가스종합정보센터(GIR, 2020)에서 검증과정을 거쳐 고사한 고사목의 부후등급별 목재밀도(Wood density; D)와 탄소전환계수(Carbon fraction; CF)를 적용하여 분석하였다(Table 3).

**Table 3. Wood density(D) and carbon fraction (CF) of coarse woody debris (CWD) by decay class.\***

Species	Decay class	D	CF	Species	Decay class	D	CF
<i>Larix kaempferi</i>	I	0.44	0.50	<i>Quercus variabilis</i>	I	0.48	0.49
	II	0.41	0.49		II	0.39	0.50
	III	0.31	0.50		III	0.32	0.50
	IV	0.19	0.49		IV	0.21	0.50
<i>Pinus rigida</i>	I	0.43	0.50	<i>Quercus acutissima</i>	I	0.52	0.46
	II	0.33	0.49		II	0.38	0.46
	III	0.25	0.47		III	0.32	0.46
	IV	0.21	0.49		IV	0.21	0.46
<i>Pinus densiflora</i>	I	0.35	0.51	<i>Quercus mongolica</i>	I	0.58	0.49
	II	0.32	0.50		II	0.43	0.48
	III	0.27	0.50		III	0.40	0.48
	IV	0.18	0.50		IV	0.24	0.49
<i>Pinus koraiensis</i>	I	0.40	0.47	Other deciduous species	I	0.55	0.49
	II	0.33	0.47		II	0.41	0.48
	III	0.26	0.47		III	0.37	0.48
	IV	0.19	0.48		IV	0.23	0.49
Other coniferous species	I	0.39	0.50				
	II	0.33	0.47				
	III	0.27	0.49				
	IV	0.18	0.50				

\*Source: Greenhouse Gas Inventory Research Center (2020).

목재밀도( $D$ )는 수피를 제외한 생재적에 대한 목질부 건중량의 비율로서, 고사목의 부후등급별로 수집된 재적 측정을 통해 건중량으로 전환할 수 있다(Korea Forest Research Institute, 2007). 탄소전환계수( $CF$ )는 바이오매스를 탄소량으로 전환하기 위한 값으로(Korea Forest Research Institute, 2011), 해당 국가고유계수는 부후등급별 탄소전환계수 개발의 필요에 의해 낙엽송, 리기다, 소나무, 잣나무, 기타침엽수와 굴참나무, 상수리나무, 신갈나무, 기타활엽수를 대상으로 개발되고 검증이 완료된 국가고유계수이다. 고사목의 탄소저장량( $C_{cwd}$ )을 산정하는 방법은 식 2와 같다.

$$C_{cwd} = y_{s,d} \times D_{s,d} \times CF_{s,d} \quad (2)$$

앞서 산정한 방법에 따라 수종별( $s$ )·부후등급별( $d$ ) 고사목 축적량( $m^3 \text{ ha}^{-1}$ )에 수종별·부후등급별 목재밀도( $\text{ton d.m. m}^{-3}$ )와 수종별·부후등급별 탄소전환계수( $\text{ton C ton d.m.}^{-1}$ )를 적용하여 탄소저장량( $\text{ton C ha}^{-1}$ )을 산출하였다. 주기적으로 수집되는 NFI의 자료를 이용하여 모집단에 대한 통계를 산출하기 위해서는 표본설계에 근거한 적합한 추정식의 적용이 필요하다. 본 연구에서는 우리나라의 임목축적 산출에 적용되고 있는 사후층화이중추출법(Double sampling for post-stratification)에 의한 추정식(Scott et al., 2005; Korea Forest Research Institute, 2011, Yim et al., 2012)을 적용하여 연년통계량을 산출하였다(식 3, 4).

$$\bar{y}_p = w'_{h,p} \bar{y}_{h,p} \quad (3)$$

$$\widehat{var}(\bar{y}_p) = \sum_{h=1}^3 [w_{h,p}^2 \frac{s_{h,p}^2}{n_{h,p}} + w_{h,p} \frac{(\bar{y}_{h,p} - \bar{y}_p)^2}{n_p}] \quad (4)$$

여기서,  $y_{i,p}$ 는 기본계획구 표본점의 고사목 축적량이고,  $\bar{y}_{h,p}$ 는 기본계획구내 표본층의  $\text{ha}$ 당 평균 고사목 축적량,  $s_{h,p}^2$ 가 기본계획구내 표본층의 표본분산이다. 표본층별 가중치( $w'_{h,p}$ )는 수집된 표본층의 표본개수( $n'_{h,p}$ )를 전체 표본개수( $n'_p$ )로 나눈 값으로 적용하였다.

기준년도 고사목 축적량의 평균값을 추정하기 위해서 가중 이동평균법(Weighted Moving Average)을 적용하였으며(Bechtold and Patterson, 2005), 강원도 산림 내 고사목 축적량의 총량은 임목지 면적과 산출된 추정평군을 이용하여 산정하였다(식 5, 6).

$$\bar{y}_{ma,p} = w'_{l,p} \times \bar{y}_{l,p}, (w'_{l,p} = \frac{n'_{l,p}}{n'_p}) \quad (5)$$

$$\widehat{var}(\bar{y}_{ma}) = \sum_{l=1}^5 w'_{l,p}{}^2 \times \widehat{var}(\bar{y}_{l,p}) \quad (6)$$

여기서,  $\bar{y}_{ma,p}$ 는 이동평균법에 의해 산출된 기본계획구( $p$ )의 평균이며,  $\bar{y}_{l,p}$ ,  $w'_{l,p}$ ,  $n'_{l,p}$ 는 각각 기본계획구의 해당년도 평균, 가중치, 그리고 표본개수이다. 기본계획구의 전체 표본개수는  $n'_p = \sum_{l=1}^5 n'_{l,p}$ 로 산출하였다. 각 차수별 고사목의 총량( $T_p$ )은 가중 이동평균법에 의해 추정된 단위면적당 평균값( $\bar{y}_{ma,p}$ )과 임목지 면적( $A_{s,p}$ )을 곱하여 산출하였고, 추정된 평균값의 오차는 다음의 추정식을 적용하였다(식 7, 8).

$$s_{y_{ma}} = \sqrt{var(\bar{y}_{ma})}, \quad t \times s_{y_{ma}} (t = 2), \quad (7)$$

$$SE_{\%} = \frac{s_{y_{ma}}}{\bar{y}_{ma}} \times 100$$

$$T_e = \pm (t \times s_{y_{ma}} \times A_{s,p}) \quad (8)$$

각각은 산출된 추정평군의 표준오차( $s_{y_{ma}}$ ), 신뢰구간(95%), 그리고 상대추정오차( $SE_{\%}$ )이고, 최종적으로 전체 총량의 오차( $T_e$ )는 추정평군의 표준오차와 임목지면적, 그리고 95% 신뢰구간( $t=2$ )에 의해 추정하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 고사목 축적량의 변화

제5차 NFI가 시작된 2006년부터 제7차 NFI가 종료된 2020년까지 시간의 흐름에 따른 강원도 내 산림의 차수별 고사목 축적량 변화를 파악하기 위해 모니터링이 가능한 표본점을 대상으로 단위면적당 고사목 축적량을 분석하였다(Table 4). 그 결과 고사목이 발생한 표본점 중에서 모니터링이 가능한 표본점의 개수는 각 차수별로 2,021개 인 것으로 나타났다.

제5차 NFI가 수행된 이후 약 10년에 걸친 모니터링 기간 동안 전체적으로 고사목이 발생한 표본점이 감소하였다. 총 2,021개의 동일한 표본점을 대상으로 각 차수별 평균 고사목 축적량을 살펴보면 제5차 NFI는  $4.71 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ 로 가장 크고, 제6차 NFI의 경우  $4.09 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ 였으며, 제7차 NFI가  $3.09 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ 로 가장 적게 나타나 재조사가 진행됨에 따라 감소치가 지속된 것으로 분석되었다. 제6차 NFI의 경우 평균 고사목 축적량은 제5차와 제7차의 중간정도를 나타냈지만, 표본점별 변이가 상대적으로 커서 상대오차는 6.14%로 나타났다. 강원도 산림의 전체 고사목 축적량을 파악하기 위해 임목지 면적에 평균 고사목 축적량을 적용한 결과, 제5차 NFI는  $6,324,037 \pm 335,671 \text{ m}^3$ 이고, 제6차 NFI가  $5,486,036 \pm 335,332 \text{ m}^3$ 로 나타났으며, 제7차 NFI의 경우  $4,129,226 \pm 227,174 \text{ m}^3$ 인 것으로 분석되었다.

Table 4. The change in the volume of coarse woody debris (CWD).

Survey	Evaluation statistics			Total (m <sup>3</sup> )
	Estimated Mean (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	± Standard error	Relative standard error (%)	
2009(5 <sup>th</sup> )	4.71	± 0.25	5.26	6,324,037 ± 335,671
2014(6 <sup>th</sup> )	4.09	± 0.25	6.14	5,486,036 ± 335,332
2019(7 <sup>th</sup> )	3.09	± 0.19	6.12	4,129,226 ± 227,174

Table 5. Stand density and volume of coarse woody debris (CWD) by age class.

Survey		Age class					
		Total	II	III	IV	V	VI
5 <sup>th</sup>	<i>n</i> (trees ha <sup>-1</sup> )	1,181	971	1,258	1,215	1,152	1,067
	CWD (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	4.71	1.67	3.17	4.84	4.95	7.6
6 <sup>th</sup>	<i>n</i> (trees ha <sup>-1</sup> )	1,066	998	1,154	1,081	1,048	1,024
	CWD (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	4.09	0.43	2.44	2.88	4.75	6.74
7 <sup>th</sup>	<i>n</i> (trees ha <sup>-1</sup> )	995	835	1,166	1,022	985	948
	CWD (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	3.09	0.06	0.24	2.08	3.62	4.25

Table 5는 NFI의 차수별 영급에 따른 단위면적당 입목본수(본 ha<sup>-1</sup>)와 고사목 축적량(m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>)을 분석한 결과이다. 조사차수에 관계없이 입목본수는 III영급(21~30년생)에서 1,154~1,258본으로 입분밀도가 가장 높은 것으로 나타났다. 단위면적당 고사목 축적량은 VI영급 이상(51년생 이상)의 임령에서 4.25~7.6 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>로 가장 많이 분포하는 것으로 나타났으며, 결과적으로 고사목 축적량은 영급이 높아지면서 증가하는 추세를 보였다. 이는 동령임분에서의 고사목 발생과 동일한 경향을 나타내는 것으로 (Davis and Johnson, 1987; Shin et al., 2002), 고사목 축적량이 입분밀도 보다 영급의 영향을 많이 받은 것은 인공림보다 천연림의 비율이 높은 국내 산림의 특성이 반영된 결과로 판단된다.

한편, 시간경과에 따른 고사목 축적량의 변화를 살펴보기 위해 각 차수별 입목본수와 고사목 축적량을 분석한 결과 고사목 축적량은 점차 감소하는 추세를 나타냈다. 이러한 결과는 자연적인 고사에 의한 고사입목의 발생보다는 숲가꾸기 등의 인위적 간섭으로 인하여 피해목 및 고사입목 등이 제거되어 신규로 유입되는 고사입목과 도목이 감소한 결과로 판단된다. 선행 연구를 살펴보면 Choi et al.(2014)은 잣나무 인공림을 대상으로 간벌강도에 따른 성장변화를 모니터링 하였으며, 표준지 내 고사목을 분석한 결과 간벌 후 12년 동안 강도 간벌구에서 고사목이 전혀 발생하지 않은 반면 대조구에서는 27.9~37.8% 발생한 것으로 보고하였다. 양질의 목재생산을 경영 목표로 하는

인공림의 경우 숲가꾸기가 많이 시행되므로, 다양한 간벌시업 장기모니터링을 통해 간벌강도에 따른 고사목의 변화 양상을 구명할 필요가 있다. 또한 고사목은 입목의 경쟁을 통해 발생할 수 있으며, 생물적 환경인자와 무생물적 환경인자를 모두 고려하여 고사목과의 상관관계를 파악할 필요가 있다. 지리산 구상나무를 대상으로 고사목의 발생량과 환경인자와의 상관관계를 분석한 Yun et al.(2019)의 연구에서는 무생물적 환경인자인 경사도가 높을수록 고사율이 높아지는 경향을 나타냈으며, 생물적 환경인자인 교목층 피도가 감소할수록 고사율이 증가하는 결과를 보고하였다. 따라서 고사량의 변화는 성장학적 이론에 근거한 해석 및 경영목표에 따른 간벌시업의 효과를 고려하여 이루어질 필요가 있다. NFI는 국가 또는 시도 단위의 산림자원 변화를 탐지하기 위한 목적으로 수행되기 때문에 일반적인 임분에서의 고사목 발생과는 다른 경향을 나타내므로 고사목의 신규 발생 및 제거 등의 정보를 취득할 수 있는 모니터링 조사체계가 요구된다. 산림청에서 발간하는 시·도별 입목별채 허가실적을 살펴보면 제6차 NFI 시점(2011~2015년)에 조사된 강원도 지역의 입목별채 허가 면적은 98,780 ha로 전차기(2006~2010년)의 49,688 ha에 비해 두 배 가량의 큰 증가량을 나타냈으며, 별채 항목 중에서 간벌 면적이 크게 증가하였는데(Korea Forest Service, 2006~2020), 이러한 인위적 간섭에 의해 고사목 축적량이 크게 감소된 것으로 판단된다.

현재까지 NFI에서 수집하는 시업정보는 현지에서 지난



5년 동안 이루어진 시업내용을 기록해왔으며, 시업년도를 확인하기 어려운 경우 해당 지역 지자체의 협조를 통해 시업년도 및 시업사항을 확인하여 기록하거나 현지조사 조사의원의 판단에 의해 기입하였다. 하지만 이러한 방식으로 시업정보가 수집될 경우 조사의원의 현지 판단에 대한 정확성에 따라 오차가 발생할 수 있다. 따라서 최근 5년간의 숲가꾸기 등의 시업이력에 관한 근거자료를 수집하여 임분변화에 관한 정확한 정보가 수집될 필요가 있다. 우리나라 국유림의 경우 조림, 숲가꾸기, 벌채 등의 산림사업에 대한 이력이 관리되고 있고, 사유림에 대해서도 경영정보 DB 구축 사업을 통해 지역별 조림, 숲가꾸기, 벌채에 대한 정보가 구축되어 있다(Korea Forest Service and Korea Forestry Promotion Institute, 2020). 이러한 정보들은 산림사업의 이력관리를 위한 목적으로 구축되고 있으며 임분의 변화를 탐지하고 변화 특성을 해석하는데 중요한 자료로 활용될 수 있으므로 산림사업이력과 현지조사 자료의 연계를 위한 통합 시스템 등이 마련될 필요가 있다.

고사목 축적량의 감소 원인을 파악하기 위해 부후등급에 따른 평균 고사목 축적량을 분석한 결과 제5차 NFI의 경우 부후가 상당히 진행된 IV등급의 평균 고사목 축적량 ( $2.04 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ )이 높았으나, 제6차 및 제7차 NFI에서 부후 정도가 IV등급인 고사목 축적량은 각각  $1.29$  및  $0.58 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ 로 급격하게 감소하는 추세를 나타냈다. 또한, 부패가 중간 정도 진척된 단계인 III등급의 평균 고사목 축적량은  $1.36 \sim 1.39 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ 로 높게 분석되었다(Figure 2). 부후등급별 평균 고사목 축적량의 오차는 부후등급이 높아질수록 크게 증가하는 경향을 나타내고 있는데, 이는 부후등급 IV의 경우 상대적으로 나무의 형태만 존재하고 쉽게 부서지는 단계이므로 상대적으로 변이 폭이 크게 발생한 것으로 판단된다.

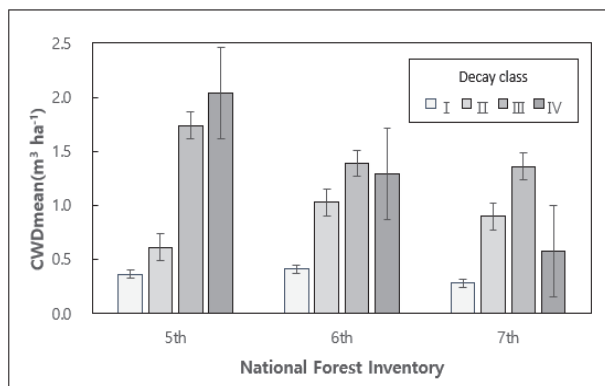


Figure 2. Mean volume of coarse woody debris (CWD) by decay class.

## 2. 고사목의 탄소저장량 및 변화량 분석

강원도 산림 내 고사목의 탄소저장량을 산정하기 위해 주요 산림수종의 고사목 부후등급별 목재밀도 및 탄소전환계수를 활용하였으며, NFI의 각 차수별 마지막 시점인 2009년, 2014년, 그리고 2019년의 부후등급별 탄소저장량을 분석하였다(Table 6). 각 2,021개의 표본점에 대해 분석한 결과 연도별 고사목의 단위면적당 탄소저장량( $\text{ton C ha}^{-1}$ )은 각각 2009년 0.67, 2014년 0.64, 그리고 2019년 0.41로 나타났다. 간벌강도에 따른 고사목의 탄소저장량에 미치는 영향을 분석한 연구(Ko et al., 2014)에서는 간벌강도에 따라 대조구(Control 0%), T39 처리구(39%), 그리고 T74 처리구(74%)로 구분하여 탄소저장량 변화를 분석하였다. 그 결과 고사목의 단위면적당 탄소저장량( $\text{ton C ha}^{-1}$ )은 간벌에 의해 유입되는 잔존목이 증가되어 대조구 대비 간벌처리구에서 고사목의 탄소저장량이 증가하는 경향을 나타내었다. 목재 및 탄소경영을 위한 최적의 간벌사업체계를 분석한 Han et al.(2014)의 연구에서는 집약적 산림경영의 경우 무간벌 대조구와 비교하여 탄소흡수량이 대략 60% 정도 높은 것으로 나타났으며, 무간벌 대조구의 고사율이 상대적으로 높게 분석된 결과를 통해 집약적 산림경영의 간벌사업 효과가 매우 큰 것으로 보고하였다. 이는 벌채 및 간벌과 같은 숲가꾸기 활동으로 인해 임분 내 생육공간이 확보되는 경우 임목 간 경쟁이 완화되어 고사목 발생이 적어지기 때문에 시업처리구의 탄소저장량 역시 대조구에 비해 낮게 나타나는 것으로 보고한 연구와는 상이한 결과이다(Chatterjee et al., 2009; Powers et al., 2011). 결과적으로 간벌이후 가지 등의 바이오매스 처리방법이 고사유기물(고사목 및 낙엽층)의 탄소저장량에 영향을 미친 것으로 판단된다. 바이오매스 산물수집은 임업부산물의 활용도를 높이고 산림자원의 효율적 이용을 촉진할 수 있는 잠재력을 지니고 있으므로(Mun et al., 2013), 산림의 탄소저장 기능을 종합적으로 고려할 때 숲가꾸기 산물에 대한 바이오매스의 처리방안이 다각적으로 검토될 필요가 있다.

Table 6. Carbon stocks of coarse woody debris (CWD) by decay class.

Decay class	Year		
	2009	2014	2019
I	0.1209	0.1547	0.0647
II	0.0849	0.2054	0.1148
III	0.3512	0.2085	0.1775
IV	0.1081	0.0708	0.0573
Carbon stock ( $\text{ton C ha}^{-1}$ )	0.67	0.64	0.41

한편, 리기다소나무를 대상으로 탄소저장량을 평가한 연구의 경우 고사목의 단위면적당 탄소저장량( $\text{ton C ha}^{-1}$ )은 0.65로 분석되어(Seo et al., 2016), 동일 수종에 대해 국립산림과학원(Korea Forest Research Institute, 2010)에서 조사한  $0.83 \text{ ton C ha}^{-1}$ 의 분석값보다 낮은 수치를 보였다. 이러한 연구 결과에서 나타나듯이 간벌에 따른 인위적 요인이 고사목의 발생 및 탄소저장량에 미치는 영향을 고려할 때 장기간에 걸쳐 생장에 관한 시계열 정보를 수집할 수 있는 NFI에서 고사에 대한 정확한 측정 및 간벌 및 숲가꾸기 등의 이력 관리가 수반되어야 할 것이다. 또한, 사업이후 잔존목의 처리방법에 따라 고사유기물의 탄소저장량에 크게 영향을 주므로 간벌부산물의 처리상황에 관한 정보를 확인할 필요가 있다.

## 결론

본 연구는 산림 내 탄소저장고 중 하나인 고사목의 발생 현황 및 탄소저장량을 분석하고 변화 특성을 살펴보고자 하였다. 이를 위해 강원도를 시범지역으로 선정하였으며, 국가산림자원조사에서 수집된 자료를 활용하여 시간경과에 따른 고사목 축적량 및 탄소저장량을 분석하였다. 그 결과 강원도 내 산림의 고사목 축적량은 시간경과에 따라 감소하는 추세를 보였고, 고사목의 탄소저장량도 감소한 것으로 나타났다. 모니터링이 가능한 동일표본점을 대상으로 하여 고사목의 증감여부를 분석하고 감소한 표본점의 사업이력을 확인한 결과 전차기에 숲가꾸기 등의 사업이 시행된 곳이 대부분인 것으로 나타났다. 또한 고사목이 증가한 표본점의 경우 자연적 고사원인으로는 덩굴로 인한 피해가 많았으며, 숲가꾸기가 실시된 이후 어린나무에 대한 적절한 관리가 이루어지지 않아 집단 고사한 경우도 있었다. 따라서 고사목 축적량의 증감 원인으로는 산림 생태계내의 생물적 요인뿐만 아니라 숲가꾸기 등의 인위적 경영활동에 의한 효과를 확인할 필요가 있다. 특히 산림에서의 사업활동이 고사목의 탄소저장량 감소에 큰 영향을 미치고 있으므로 산림 내 적정 사업을 통해 목재 생산림으로서의 기능뿐만 아니라 산림탄소경영의 효과도 극대화할 필요가 있을 것으로 보인다.

본 연구의 결과는 우리나라 전국의 산림을 대상으로 고사목의 탄소저장량을 추정하고자 할 경우 시범지역의 분석 결과물로 산림 내 다양한 경영활동이 고사목의 탄소저장량에 미치는 영향을 분석함에 있어 기초자료로서 활용될 수 있다. 우리나라가 탄소중립 사회로 발돋움하는 과정에서 산림의 탄소흡수 및 저장 기능을 정량화하고 국제사회가 신뢰하는 산림부문 온실가스 인벤토리를 구축하기 위해서는 산림부문 탄소저장고에 관한 탄소저장량을 분

석하여야 하며, 고사목 등의 탄소저장고의 변화 특성을 정확히 파악하기 위해서는 장기적인 모니터링 연구가 지속되어야 한다. 또한, 산림 내 탄소저장고는 유기적으로 연계되어 있으므로 입목, 고사목, 낙엽층, 그리고 토양의 탄소순환에 관한 모니터링 및 모델 개발이 필요하고 인위적 활동이 탄소순환에 미치는 효과에 관한 분석이 필요하다.

## References

- Bae, S.H. 2021. Confirmation of the vision for 2050 net zero...‘Worldwide cooperation’: In the 61<sup>st</sup> cabinet meeting for the report of LEDS and NDC for the expanded production and use of renewable energy-based electricity and hydrogen, Ministry of Environment. Electric Power 15(1): 70-71.
- Bechtold, W.A. and Patterson, P.L. 2005. The enhanced forest inventory and analysis program—national sampling design and estimation procedures. General technical report GTR-SRS-080. Asheville, NC: USDA Forest Service, Southern Research Station. pp. 85.
- Bragg, D.C. and Kershner, J.L. 1999. Coarse woody debris in riparian zones. Journal of Forestry 97(4): 30-35.
- Carmona, M.R., Armesto, J.J., Aravena, J.C. and Pérez, C.A. 2002. Coarse woody debris biomass in successional and primary temperate forests Chiloé Island, Chile. Forest Ecology and Management 164(1-3): 265-275.
- Chambers, J.Q., Schimel, J.P. and Nobre, A.D. 2001. Respiration from coarse wood litter in central Amazon forests. Biogeochemistry 52: 115-131.
- Chatterjee, A., Vance, G.F. and Tinker, D.B. 2009. Carbon pools of managed and unmanaged stands of ponderosa and lodgepole pine forests in Wyoming. Canadian Journal of Forest Research 39(10): 1893-1900.
- Choi, J., Lee, B., Lee, D. and Choi, I. 2014. Growth monitoring of Korean white pine (*Pinus koraiensis*) plantation by thinning intensity. Journal of Korean Society of Forest Science 103(3): 422-430.
- Churkina, G., Trusilova, K., Vetter, M. and Dentener, F. 2007. Contributions of nitrogen deposition and forest regrowth to terrestrial carbon uptake. Carbon Balance and Management 2(5): 1-7.
- Clark, D.B., Clark, D.A., Brown, S., Oberbauer, S.F. and Veldkamp, E. 2002. Stocks and flows of coarse woody debris across a tropical rain forest nutrient and topography gradient. Forest Ecology and Management 164(1-3): 237-248.
- Davis, L.S. and Johnson, K.N. 1987. Forest management. McGraw-Hill. pp. 790.



- Forrester, J.A., Mladenoff, S.T., Gower, S.T. and Stoffel, J.L. 2012. Interactions of temperature and moisture with respiration from coarse woody debris in experimental forest canopy gaps. *Forest Ecology and Management* 265: 124-132.
- Freedman, B., Zelazny, V., Beaudette, D., Fleming, T., Flemming, S., Forbes, G., Gerrow, J.S., Johnson, G. and Woodley, S. 1996. Biodiversity implications of changes in the quantity of dead organic matter in managed forests. *Environmental Reviews* 4(3): 238-265.
- Gough, C.M., Vogel, C.S., Kazanski, C., Nagel, L., Flower, C.E. and Curtis, P.S. 2007. Coarse woody debris and the carbon balance of a north temperate forest. *Forest Ecology and Management* 244(1-3): 60-67.
- Greenhouse Gas Inventory and Research Center (GIR). 2020. 2020 National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea. Seoul: Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea. pp. 88.
- Han, H., Kwon, K., Chung, H., Seol, A. and Chung, J. 2015. Analysis of optimal thinning prescriptions for a *Cryptomeria japonica* stand using dynamic programming. *Journal of Korean Forest Society* 104(4): 649-656.
- Harmon, M.E., Fasth, B., Woodall, C.W. and Sexton, J. 2013. Carbon concentration of standing and downed woody detritus: Effects of tree taxa, decay class, position, and tissue type. *Forest Ecology and Management* 291: 259-267.
- Harmon, M.E., Franklin, J.F., Swanson, F.J., Sollins, P., Gregory, S.V., Lattin, J.D., Anderson, N.H., Cline, S.P., Aumen, N.G., Sedell, J.R., Lienkaemper, G.W., Cromack Jr, K. and Cummins, K.W. 1986. Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems. *Advances in Ecology Research* 15: 133-302.
- Hart, S.C. 1999. Nitrogen transformation in fallen tree boles and mineral soil of an old-growth forest. *Ecology* 80(4): 1385-1394.
- Holub, S.M., Spears, J.D.H. and Lajtha, K. 2001. A reanalysis of nutrient dynamics in coniferous coarse woody debris. *Canadian Journal of Forest Research* 31(11): 1894-1902.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory. IGES, Japan. pp. 32.
- Kim, B.S., Choi, J.H. and Jeong, B.J. 2010. Optimal greenhouse gas allocation among Korean industries. *Journal of the Korean Society of Supply Chain Management* 10(1): 45-53.
- Kim, E.G. and Lee, K.H. 2010. Climate change and forest. Seoul: Doyosae. pp. 295.
- Kim, H., Lee, J., Han, S.H., Kim, S. and Son, Y. 2018. Approaches for developing a forest carbon and nitrogen model through analysis of domestic and overseas models. *Journal of Korean Forest Society* 107(2): 140-150.
- Kim, R.H. and Son, Y. 2002. Coarse woody debris (CWD) in forest ecosystems. *Life Science and Natural Resources Research* 10: 57-67.
- Kim, S. 2019. Thinning, age, and density impacts on tree and soil carbon storage in *Quercus mongolica* and *Q. variabilis* forests in central Korea [Ph.D. dissertation]. Gangwon: Gangwon University. pp. 99.
- Ko, S., Yoon, T.K., Kim, S., Kim, C., Lee, S.T., Seo, K.W. and Son, Y. 2014. Thinning intensity effects on carbon storage of soil, forest floor and coarse woody debris in *Pinus densiflora* stands. *Journal of Korean Forest Society* 103(1): 30-36.
- Korea Forest Research Institute. 2007. Survey manual for forest biomass and soil carbon. Seoul: Korea Forest Research Institute. pp. 74.
- Korea Forest Research Institute. 2010. Main tree species carbon emission factors for forest greenhouse gas inventory. Seoul: Korea Forest Research Institute. pp. 89.
- Korea Forest Research Institute. 2011. The 5<sup>th</sup> national forest inventory report. Seoul: Korea Forest Research Institute. pp. 187.
- Korea Forest Research Institute. 2014. Carbon emission factors and biomass allometric equations by species in Korea. Seoul: Korea Forest Research Institute. pp. 97.
- Korea Forest Service (Internet). 2021. Countermeasure to climate change, South Korea that takes the lead in the forestry sector among Asian countries. [cited 2021 March 10]. Available from: Korea Forest Service Homepage (<https://www.forest.go.kr>)
- Korea Forest Service and Korea Forestry Promotion Institute. 2017. The 7<sup>th</sup> national forest inventory and forest health monitoring. -Field manual-. Seoul: Korea Forestry Promotion Institute. pp. 86.
- Korea Forest Service and Korea Forestry Promotion Institute. 2020. A study on a framework for estimation of national carbon inventories and on the enhancement in carbon account in the forestry sector in accordance with the paris agreement.. R&D Res Rep. Daejeon: Korea Forest Service. pp. 274.
- Korea Forest Service. 2006. Statistical yearbook of forestry. Daejeon: Korea Forest Service. pp. 482.
- Korea Forest Service. 2011. Statistical yearbook of forestry. Daejeon: Korea Forest Service. pp. 484.
- Korea Forest Service. 2016. Statistical yearbook of forestry. Daejeon: Korea Forest Service. pp. 414.
- Korea Forest Service. 2018. The 6<sup>th</sup> basic forest plan (2018~2037). Daejeon: Korea Forest Service. pp. 151.

- Korea Forest Service. 2019. Statistical yearbook of forestry. Daejeon: Korea Forest Service. pp. 444.
- Korea Forest Service. 2020. Statistical yearbook of forestry. Daejeon: Korea Forest Service. pp. 448.
- Laiho, R. and Prescott, C.E. 1999. The contribution of coarse woody debris to carbon, nitrogen, and phosphorus cycles in three Rocky Mountain coniferous forests. *Canadian Journal of Forest Research* 29(10): 1592-1603.
- Lal, R. 2005. Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management* 220(1-3): 242-258.
- Lee, J., Yoon, T.K., Han, S., Kim, S., Yi, M.J., Park, G.S., Kim, C., Son, Y.M., Kim, R. and Son, Y. 2014. Estimating the carbon dynamics of South Korean forests from 1954 to 2012. *Biogeosciences* 11(17): 4637-4650.
- Lee, M., Kwon, B., Kim, S., Yoon, T.K., Son, Y. and Yi, M.J. 2019. Coarse woody debris (CWD) respiration rates of *Larix kaempferi* and *Pinus rigida*: Effects of decay class and physicochemical properties of CWD. *Journal of Korean Forest Society* 108(1): 40-49.
- Mun, J.M., Ahn, B.I. and Kim, C.H. 2013. Comparison of the economic values created by utilizations of forest biomass for wood pellets and pulp. *Korean Journal of Agricultural Economics* 54(2): 1-27.
- Nalder, I.A., Wein, R.W., Alexander, M.E. and de Groot, W.J. 1997. Physical properties of dead and downed round-wood fuels in the boreal forests of Alberta and Northwest Territories. *Canadian Journal of Forest Research* 27(9): 1513-1517.
- Nordén, B., Ryberg, M., Götmark, F. and Olausson, B. 2004. Relative importance of coarse and fine woody debris for the diversity of wood-inhabiting fungi in temperate broadleaf forests. *Biological Conservation* 117(1): 1-10.
- Olajuyigbe, S.O., Tobin, B., Gardiner, P. and Nieuwenhuis, M. 2011. Stocks and decay dynamics of above- and below-ground coarse woody debris in managed Sitka spruce forests in Ireland. *Forest Ecology and Management* 262(6): 1109-1118.
- Powers, M., Kolka, R., Palik, B., McDonald, R. and Jurgensen, M. 2011. Long-term management impacts on carbon storage in Lake States forests. *Forest Ecology and Management* 262(3): 424-431.
- Progar, R.A., Schowalter, T.D., Freitag, C.M. and Morrell, J.J. 2000. Respiration from coarse woody debris as affected by moisture and saprotroph functional diversity in Western Oregon. *Oecologia* 124(3): 426-431.
- Ravindranath, N.H. and Ostwald, M. 2008. Carbon inventory methods: Handbook for greenhouse gas inventory, carbon mitigation and roundwood production projects. Springer. pp. 306.
- Reid, C.M., Foggo, A. and Speight, M. 1996. Dead wood in the Caledonian pine forest. *Journal of Forestry* 69(3): 275-279.
- Santaniello, F., Djupström, L.B., Ranius, T., Weslien, J., Rudolphi, J. and Sonesson, J. 2017. Simulated long-term effects of varying tree retention on wood production, dead wood and carbon stock changes. *Journal of Environmental Management* 201: 37-44.
- Schuur, E.A.G., Chadwick, O.A. and Matson, P.A. 2001. Carbon cycling and soil carbon storage in mesic to wet Hawaiian montane forests. *Ecology* 82(11): 3182-3196.
- Scott, C.T., Bechtold, W.A., Reams, G.A., Smith, W.D., Westfall, J.A., Hansen, M.H. and Moisen, G.G. 2005. Sample-based estimators used by the forest inventory and analysis national information management system. pp. 43-67. In Bechtold, W.A. and Patterson, P.L. (Eds). *The Enhanced Forest Inventory and Analysis Program—National Sampling Design and Estimation Procedures*. General technical report SRS-80. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station.
- Seo, Y.O., Jung, S.C. and Lee, Y.J. 2016. Estimation of carbon storage for *Pinus rigida* stands in Muju. *Korean Journal of Environment and Ecology* 30(3): 399-405.
- Shin, M.Y., An, H.S., Rho, D.K., Kong, G.S., Seo, J.W., Kim, C.C. and Seo, S.A. 2002. Use of stand table projection technique for the estimation of growth rate by forest types and age classes in Kangwon province. *Journal of Korean Forest Society* 91(4): 535-544.
- Stevens, V. 1997. The ecological role of coarse woody debris: An overview of the importance of CWD in BC forests. *Res. Br., B.C. Min. For., Victoria, B.C. Work.* pp. 30.
- Teodosiu, M. and Bouriaud, O.B. 2012. Deadwood specific density and its influential factors: A case study from a pure Norway spruce old-growth forest in the Eastern Carpathians. *Forest Ecology and Management* 283: 77-85.
- Wu, J., Zhang, X., Wang, H., Sun, J. and Guan, D. 2010. Respiration of downed logs in an old-growth temperate forest in north-eastern China. *Scandinavian Journal of Forest Research* 25(6): 500-506.
- Yim, J.S., Jung, I.B., Kim, J.C., Kim, S.H., Ryu, J.H. and Shin, M.Y. 2012. Estimation of forest growing stock by combining annual forest inventory data. *Journal of Korean Forest Society* 101(2): 213-219.
- Yim, Y.J. 1977. Distribution of forest vegetation and climate in the Korean peninsula: IV. Zonal distribution of forest vegetation in relation to thermal climate. *Japanese Journal of Ecology* 27(4): 269-278.
- Yun, E.S., Song, J.H., Kim, H.J., Lee, J.E., Lim, J.H., Jung, S.C. and Yun, C.W. 2019. The relationship between seed-

- ling and dead trees of *Abies koreana* population and the environmental factors in Mt. Jirisan. Proc. Korean Society of Environment & Ecology 29(2): 97-97.
- Yun, Y.G. 2008. Lecture on leadership in the context of climate change – Lecture 6 – Climate change, UNFCCC, and forest. Forest Management 188: 6-9.
- Zhou, L., Dai, L., Gu, H. and Zhong, L. 2007. Review on the decomposition and influence factors of coarse woody debris in forest ecosystem. Journal of Forestry Research 18(1): 48-54.
- 
- Manuscript Received : April 9, 2021  
First Revision : May 13, 2020  
Second Revision : June 1, 2021  
Third Revision : June 2, 2021  
Accepted : June 3, 2021