

국가산림자원조사 고정표본점 자료를 활용한 고사목의 탄소저장량 추정

문가현* · 임종수**† · 강진택***

*국립산림과학원 산림ICT연구센터 박사후연구원, **국립산림과학원 산림ICT연구센터 연구사, ***국립산림과학원 산림ICT연구센터 연구관

Estimation of Carbon Stocks in Coarse Woody Debris Using Permanent Sample Plot Data from the Korean National Forest Inventory

Moon, Ga Hyun* · Yim, Jong Su**† · Kang, Jin Taek***

*Postdoctoral Fellow, Forest ICT Research Center, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea

**Research Scientist, Forest ICT Research Center, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea

***Senior Research Scientist, Forest ICT Research Center, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea

ABSTRACT

The greenhouse gas reduction function of forests is crucial globally in ameliorating climate change. Varying research attempts to assess dead organic matter and carbon stock volume in soil have been conducted. The purpose of this study was to analyze changes in the occurrence of coarse woody debris (CWD) and related carbon stocks using data from the National Forest Inventory (NFI). To monitor changes in forest resources over time, this study used NFI data (2006-2020) that were collected from permanent sample plots every five years; 1,903 sample plots in which CWD occurred were analyzed at each time point and CWD volume was calculated based on tree stem volume. Carbon stocks of CWD were estimated by applying basic woody density and carbon fraction to CWD by tree type and tree decay level. The average volume of CWD decreased from 23.04 to 14.83 m³ ha⁻¹ and carbon stocks of CWD were also reduced from 3.36 to 1.86 ton C ha⁻¹. This analysis estimated carbon stocks of CWD in forests nationwide and the results can be utilized to build a greenhouse gas inventory. Long-term monitoring and research are needed to identify the changing characteristics of CWD carbon storage. As carbon storage in forests is interconnected, monitoring and model development should include trees, CWD, forest floor litter, and soil carbon cycles. Furthermore, an analysis of the effect of anthropogenic activities on carbon cycles in future research would be useful.

Key words: Coarse Woody Debris, Forest Management, Carbon Stock, National Forest Inventory

1. 서론

현대사회의 경제적 활동 과정에서 수반되는 온실가스 배출에 대한 국가별 규제가 강화됨에 따라 온실가스 배출량에 대한 환경 분석과 평가의 투명성을 제고하기 위한 국제사회의 인식 및 환경전략이 변화하고 있다. 특히 국제협약을 통해 지구의 기온 및 국가별 온실가스 감축량이 협의됨에 따라 각국의 온실가스 인벤토리를 산정하는 것이 매우 중요해졌다(Lee, 2008). 국가별로 정확한 온실가스 인벤토리를 산정하기 위해서는 국제적으로 합의된 방법론에 따라 탄소배출량 및 흡수량을 정량적으로 평가하여 해당 감축분을 인정받는 것이 중요하다(Kim, 2014; Kim, 2017). 이러한 국제사회의 움직임에 발맞춰 우리나라 역시 ‘2050 탄소중립 선언’을 통해 온실가스 순배출량이 0(zero)인 상태로 만들기 위한 정책을 추진 중이며, 국가 온실가스 감축 목표(Nationally Determined Contributions ; NDC) 달성을 위한 산림부문 대응 방안의 일환으로 국가 온실가스 통계 개발 및 검증을 위한 체계를 구축하는 한편 온실가스 인벤토리를 산정하기 위해서는 국제적으로 합의된 방법론에 따라 탄소배출량 및 흡수량을 정량적으로 평가하여 해당 감축분을 인정받는 것이 중요하다(Kim, 2014; Kim, 2017). 이러한 국제사회의 움직임에 발맞춰 우리나라 역시 ‘2050 탄소중립 선언’을 통해 온실가스 순배출량이 0(zero)인 상태로 만들기 위한 정책을 추진 중이며, 국가 온실가스 감축 목표(Nationally Determined Contributions ; NDC) 달성을 위한 산림부문 대응 방안의 일환으로 국가 온실가스 통계 개발 및 검증을 위한 체계를 구축하는 한편 온실가스 인벤토리를 산정하기 위해서는 국제적으로 합의된 방법론에 따라 탄소배출량 및 흡수량을 정량적으로 평가하여 해당 감축분을 인정받는 것이 중요하다(Kim, 2014; Kim, 2017).

이러한 국제사회의 움직임에 발맞춰 우리나라 역시 ‘2050 탄소중립 선언’을 통해 온실가스 순배출량이 0(zero)인 상태로 만들기 위한 정책을 추진 중이며, 국가 온실가스 감축 목표(Nationally Determined Contributions ; NDC) 달성을 위한 산림부문 대응 방안의 일환으로 국가 온실가스 통계 개발 및 검증을 위한 체계를 구축하는 한편 온실가스 인벤토리를 산정하기 위해서는 국제적으로 합의된 방법론에 따라 탄소배출량 및 흡수량을 정량적으로 평가하여 해당 감축분을 인정받는 것이 중요하다(Kim, 2014; Kim, 2017).

†Corresponding author : yimjs@korea.kr (57 Hoegiro, Dongdaemun-gu, Seoul 02455, Korea. Tel. +82-2-961-2953)

ORCID 문가현 0000-0002-2250-6884
임종수 0000-0001-7316-6093

강진택 0000-0002-4688-8450

토리의 투명성 향상을 위한 통계 관리에도 노력을 기울이고 있다(GIR, 2020).

국내외에서는 조림 및 재조림 등의 산림관리를 통하여 탄소흡수 및 저장 효과를 구명하기 위한 다양한 연구가 이루어지고 있다(Lu et al., 2018; Lewis et al., 2019; Lim and Kim, 2021; Yoo et al., 2021). 국내 산림의 공익적 기능을 화폐적 가치로 평가한 자료에 따르면(NIFoS, 2018), 새롭게 추가된 온실가스 흡수·저장 기능의 경우 2014년 기준 3.9%에서 2018년 34.2%로 점유율이 크게 증가하여 산림의 영향 범위가 넓어졌음을 짐작할 수 있다(Kim, 2021). 산림은 육상생태계의 가장 효율적인 탄소저장고로서 흡수원인 동시에 배출원으로 기능하여 지구의 탄소순환에 큰 역할을 수행하고 있다(Dixon et al., 1994; Kim et al., 2015). 산림의 탄소저장량 및 흡수량은 입지조건이나 수종 등의 다양성으로 인해 정확한 측정이 어렵지만, 지상부와 지하부를 포함하는 임목 바이오매스와 고사목 및 낙엽층의 고사유기물, 그리고 토양에 저장된 탄소량과 매년 흡수되거나 배출되는 탄소량 등의 활동자료를 통해 산정이 가능하다(Shuur et al., 2001; Kim et al., 2015). 산림부문 온실가스 인벤토리의 측정, 보고, 검증(Measurement, Reporting and Verification; MRV) 체계를 구축하기 위해서는 산림면적 변화 및 탄소저장고에 관한 기초자료의 수집이 선행되어야 한다. 특히 산림유형에 따른 탄소저장고별 탄소저장량 및 변화량을 추정하기 위해서는 고사유기물 및 토양의 탄소변화량을 평가하기 위한 방법이 개발되어야 한다. IPCC 지침에서 제시된 탄소저장고의 정의에 따르면, 고사목은 낙엽층에 포함되지 않은 토양 혹은 지면 위에서 있거나 쓰러져 있는 살아있지 않은 모든 목본 바이오매스를 포함한다(IPCC, 2006). 이러한 고사목의 탄소축적변화 및 배출·흡수의 산정을 위해서는 모니터링이 가능한 고정표본점에서 조사된 주기적인 인벤토리 자료가 필요하며, 이를 활용하여 탄소저장량 및 변화량의 추정이 가능하다.

우리나라의 경우 토지이용, 토지이용 변화 및 임업(Land-Use, Land-Use Change and Forestry; LULUCF) 부문에서 산림의 토양 및 고사유기물에 대한 탄소배출 및 흡수량은 활동자료 미구축으로 인해 산정되지 못하고 있는 실정이며, 현재 온실가스 통계에서 ‘산림으로 유지된 산림지’에서의 토양 및 고사유기물의 탄소저장량은 Tier 1 방법론을 적용하여 변화가 없음을 가정하고 있다(GIR, 2020). 따라서, 온실가스 통계의 완전성을 확보하기 위해서는 토양 및 고사유기물의 탄소저장량에 대한 활동자료

와 국가고유계수의 개발이 필요하다(Lee et al., 2015; Moon et al., 2021; NIFoS, 2021).

본 연구의 목적은 시계열 모니터링 자료를 활용하여 고사목 통계를 생산하고, 국가고유계수를 활용하여 고사목의 탄소저장량 및 변화량을 산출하는 것이다. 이를 위해 2006년(제5차)부터 2020년(제7차)까지 국가산림자원조사(National Forest Inventory; NFI) 고정표본점에서 수집된 자료를 활용하여 우리나라 산림에서 고사목의 발생현황과 탄소저장량의 변화를 분석하고자 하였다.

2. 연구재료 및 방법

2.1 연구재료

본 연구는 우리나라의 고사목 발생현황 및 탄소저장량을 분석하기 위해 전국 산림을 대상으로 수행한 NFI 자료를 활용하였으며, 분석에 사용한 고정표본점의 분포는 Fig. 1과 같다. 우리나라 산림 면적은 2020년 기준 약 628만 ha로 전체 국토면적의 63%를 차지하고 있으며, 영급별 분포를 살펴보면 IV영급 이상 면적 비율이 78%를 나타내고 있다(KFS, 2021).

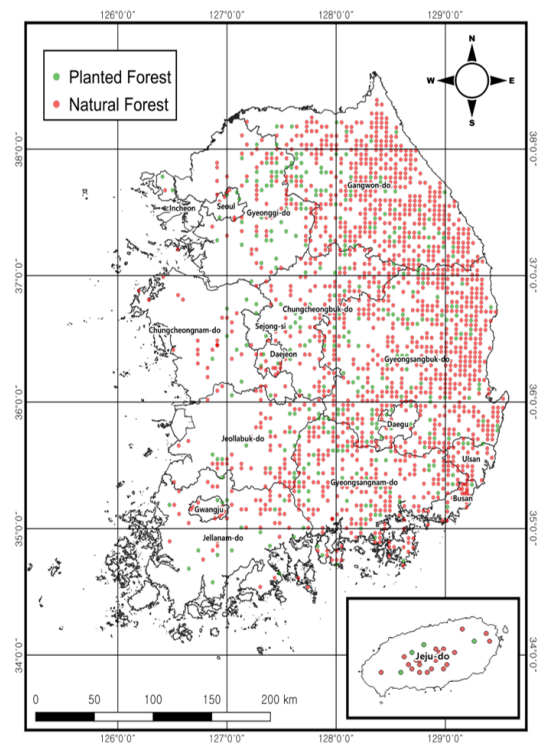


Fig. 1. Sampling designs for CWD

제5차 NFI의 고정표본점을 대상으로 주기적으로 조사되는 산림자원량 자료를 활용하면, 시간 경과에 따른 고사목의 변화를 모니터링 할 수 있다. 고사목 조사는 모든 집락표본점의 중앙표본점(S1)에서 수행되며, 중심으로부터 반경 11.3 m(0.04 ha)의 원형 조사원에서 이루어진다(KFS and KOFPI, 2017). 중앙표본점에서는 임내 모든 고사입목과 쓰러진 도목을 대상으로 수종, 흉고직경(중앙직경), 수고(길이), 고사원인, 부후도 등을 조사하고 있다.

고사목은 부후등급에 따라 목재밀도와 탄소저장량에 차이가 있으므로 탄소저장량을 산출하기 위해서는 정확한 부후등급의 판정이 필요하다(IPCC, 2006). 우리나라의 NFI에서 고사목의 부후등급은 4등급으로 구분되며, 최근에 고사한 것 (I)부터 부패의 초기단계 (II)와 중간정도 진척단계 (III)를 거쳐 부패가 심화된 단계 (IV)로 나뉜다. 여기서, 부후도 1등급은 고사 직후 잔가지나 잎이 남아있는 상태이고, 잔가지나 잎이 없고 수피가 부분적으로 썩어 있는 상태를 2등급, 수피가 완전히 썩고 변재까지 부분적으로 썩어있는 상태가 3등급, 최종적으로 나무의 형태만 남아있으며 손으로 만졌을 때 부서질 정도의 상태를 4등급으로 구분한다(KFS and KOFPI, 2017).

2.2 고사목 분석

제5차 NFI (2006 ~ 2010년)에서 고사목 조사가 수행된 고정표본점 중에서 제6차 NFI (2011 ~ 2015년) 및 제7차 NFI (2016 ~ 2020년)를 통해 모니터링이 가능한 표본점을 대상으로 고사목 축적량을 파악하고 탄소저장량을 산출하기 위해 각 차수별로 동일 표본점 1,903개를 분석하였다. 고사입목은 흉고직경과 수고를 이용하여 재적을 산출하였고, 쓰러진 고사목의 경우 중앙부 직경과 길이를 이용하여 개체목 재적산출과 동일한 방법을 적용하였다. 고사목의 탄소저장량은 수종별·부후등급별 단위면적당 고사목축적량과 국립산림과학원에서 개발하고 온실가스종합정보센터에서 검증하여 고시한 고사목의 부후등급별 목재밀도와 탄소전환계수 (Table 1)를 적용하여 추정식(Eq. 1)에 의해 산출하였다.

$$C_{cwd,i} = y_{s,d} \times D_{s,d} \times CF_{s,d} \quad (\text{Eq. 1})$$

$C_{cwd,i}$: 개체목(i)의 탄소저장량 [ton C]

$y_{s,d}$: 수종별(s)·부후등급별(d) 고사목의 재적 [m^3]

$D_{s,d}$: 수종별(s)·부후등급별(d) 목재밀도 [t d.m. m^{-3}]

$CF_{s,d}$: 수종별(s)·부후등급별(d) 탄소전환계수 [t C t d.m.^{-1}]

Table 1. Basic density (D) and carbon fraction (CF) of CWD

Species	Decay class*	Basic density (D)				Carbon fraction (CF)			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV
Larix kaempferi		0.44	0.41	0.31	0.19	0.5	0.49	0.5	0.49
Pinus rigida		0.43	0.33	0.25	0.21	0.5	0.49	0.47	0.49
Pinus densiflora		0.35	0.32	0.27	0.18	0.51	0.5	0.5	0.5
Pinus koraiensis		0.4	0.33	0.26	0.19	0.47	0.47	0.47	0.48
Other coniferous species		0.39	0.33	0.27	0.18	0.5	0.47	0.49	0.5
Quercus variabilis		0.48	0.39	0.35	0.21	0.49	0.5	0.5	0.5
Quercus acutissima		0.52	0.38	0.32	0.21	0.46	0.46	0.46	0.46
Quercus mongolica		0.58	0.43	0.4	0.24	0.49	0.48	0.48	0.49
Other deciduous species		0.55	0.41	0.37	0.23	0.49	0.48	0.48	0.49

*Decay class; I (Recently dead), II (Incipient decay), III (Progressed decay), IV (Intense decay)

Source: Greenhouse Gas Inventory Research Center (2020).

고사목의 개체목 단위 탄소저장량을 산출한 뒤, 추정식 (Eq. 2)에 의해 각 개체목의 탄소저장량을 합산하여 고정 표본점 단위의 탄소저장량을 산출하였다.

$$y_{ca,j} = \frac{\sum C_{cwd,i}}{a'_j} \quad (\text{Eq. 2})$$

$y_{ca,j}$: 표본점(j)의 ha당 탄소저장량 [ton C ha⁻¹]
 $C_{cwd,i}$: 개체목(i)의 탄소저장량 [ton C]
 a'_j : 기본조사원(0.04 ha)의 실제 산림면적 [ha]

2.3 고사목축적량 및 탄소저장량 추정방법

각 차수별로 조사된 NFI 자료를 활용하여 고사목 축적량에 대한 연년통계량은 사후층화이중추출법(Double sampling for post-stratification)에 의한 추정식(Eq. 3, 4)을 적용하여 산출하였다.

$$\overline{y_j} = w'_{h,j} \overline{y_{h,j}} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\widehat{var}(\overline{y_j}) = \sum_{h=1}^3 \left[w_{h,j}^2 \frac{s_{h,j}^2}{n_{h,j}} + w'_{h,j} \frac{(\overline{y_{h,j}} - \overline{y_j})^2}{n_j} \right] \quad (\text{Eq. 4})$$

y_j : 표본점(j)의 고사목축적량 [m³ ha⁻¹]
 $y_{h,j}$: 임상(h)별 고사목축적량 [m³ ha⁻¹]
 $w_{h,j}$: 임상(h)별 가중치
 n_j : 전체 표본개수

기준연도 고사목축적량의 평균값은 가중 이동평균법 (Weighted Moving Average)을 적용하여 산정하였고 (Bechtold and Patterson, 2005; Yim et al., 2012), 전국의 산림을 대상으로 한 고사목축적량의 총량은 입목지 면적 과 산출된 추정평균을 이용하여 산정하였다(Eq. 5, 6).

$$\overline{y_{ma,j}} = w'_{l,h} \times \overline{y_{l,j}}, \quad (w'_{l,j} = \frac{n'_{l,j}}{n_j}) \quad (\text{Eq. 5})$$

$$\widehat{var}(\overline{y_{ma}}) = \sum_{l=1}^5 w_{l,j}^2 \times \widehat{var}(\overline{y_{l,j}}) \quad (\text{Eq. 6})$$

$\overline{y_{ma,j}}$: 평균 고사목축적량 [m³ ha⁻¹]
 $\overline{y_{l,j}}, w_{l,j}, w'_{l,j}$: 해당연도 평균, 가중치, 표본개수

고사목의 총량(T_j)은 가중 이동평균법에 의해 추정된 단위면적당 평균값($\overline{y_{ma,j}}$)에 입목지 면적($A_{s,j}$)을 곱하여 산출하였으며, 추정된 평균값의 오차는 (Eq. 7)과 (Eq. 8)의 평가통계량을 적용하였다.

$$s_{y_{ma}} = \sqrt{var(\overline{y_{ma}})}, \quad t \times s_{y_{ma}} \quad (t \neq 2) \quad (\text{Eq. 7})$$

$$RSE\% = \frac{s_{y_{ma}}}{\overline{y_{ma}}} \times 100, \quad T_e = \pm (t \times s_{y_{ma}} \times A_{s,j}) \quad (\text{Eq. 8})$$

$s_{y_{ma}}$: 표준오차
 $RSE\%$: 상대추정오차
 T_e : 전체 총량의 오차

3. 연구 결과

3.1 각 차수별 고사목축적량

NFI 조사차수별 고사목축적량을 파악하고 탄소저장량을 분석하기 위해서는 모니터링 가능한 조사자료가 필요하다. 제5차 NFI가 시작된 2006년부터 제7차 NFI의 완료 시점인 2020년까지 동일표본점 현황을 파악한 결과(Fig. 2), NFI의 각 차수별 표본점은 1,903개로 천연림(84%)의 분포가 인공림(16%) 보다 높은 것으로 나타났다.

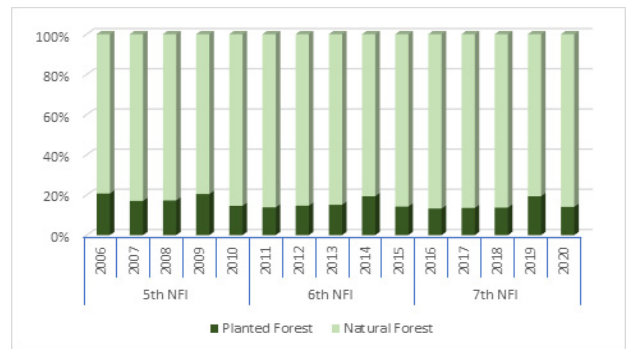


Fig. 2. The number of sample plot with CWD

전체 산림의 고사목축적량을 파악하기 위해 각 차수별 평균 고사목축적량을 분석한 뒤 산출된 축적에 입목지 면적을 적용하였다(Table 2). 분석 결과 각 차수별 마지막 연도인 2010년, 2015년, 그리고 2020년의 시점에서 추정된 고사목의 평균 고사목축적량은 시간의 흐름에 따라 감

소하는 경향을 나타냈다. 제7차 NFI의 완료시점인 2020년에 조사된 평균 고사목축적량이 가장 낮게 분석되었으나, 제6차 고사목 자료의 경우 표본점별 변이가 상대적으로 커서 상대오차가 2.68%로 나타났다.

Table 2. The change in the volume of CWD

Year	Mean (m ³ ha ⁻¹)	± SE	RSE (%)	Total (m ³)
2010	23.04	± 0.5	2.17	142,191,567 ± 3,085,755
2015	17.27	± 0.46	2.68	105,274,811 ± 2,804,077
2020	14.83	± 0.39	2.64	90,401,011 ± 2,377,370

SE: Standard Error, RSE: Relative Standard Error

입목지 면적을 반영한 전국 산림의 고사목축적량은 2010년 142,191,567 ± 3,085,755 m³에서 5년 후 2015년 105,274,811 ± 2,804,077 m³로 줄어들었고, 마지막 2020년도에는 90,401,011 ± 2,377,370 m³인 것으로 분석되었다. 해당 표본점 자료를 활용하여 단위면적당 평균 고사목축적량을 영급별로 분석한 결과(Fig. 3), 영급이 높아짐에 따라 차수별 고사목축적량은 증가하는 추세를 나타냈다.

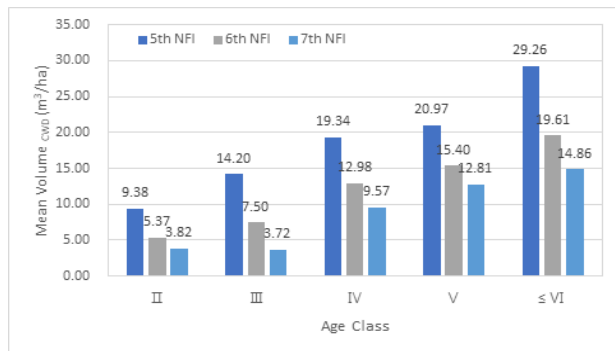


Fig. 3. Mean volume of CWD by age class

하지만 고사목의 단위면적당 고사목축적량을 지난 조사차수와 비교하면(Fig. 4), 전체적인 고사목축적량은 점차 감소하는 추세를 나타내고 있다. 이는 자연적으로 고사되는 고사입목의 출현본수 보다 숲가꾸기 및 목재수확에 의해 제거되는 고사목의 본수가 증가된 영향으로 판단되며(KFS, 2020), 명확한 원인분석을 위하여 해당 표본점의 시업이력과 신규로 출현한 고사목 본수 간의 관계를 분석할 필요가 있다.

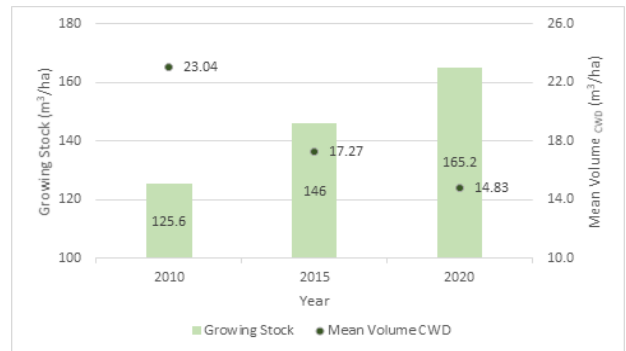


Fig. 4. Growing stock and mean volume of CWD

단위면적당 입목축적은 2010년 125.6 m³ ha⁻¹에서 2020년 165.2 m³ ha⁻¹로 증가하였으나, 고사목축적량에는 큰 영향을 미치지 못했다. 일반적으로 입목축적이 높아짐에 따라 고사목의 발생이 증가하지만(Šenħofa et al., 2021), 본 연구에서 입목축적이 증가함에도 불구하고 고사목축적량은 감소하는 경향을 나타내고 있으므로 고사목의 발생특성에 관한 추가적인 분석이 필요하다. 고사목의 감소원인을 다각도로 살펴보기 위해 부후등급별 평균 고사목축적량을 분석한 결과는 다음과 같다(Fig. 5).

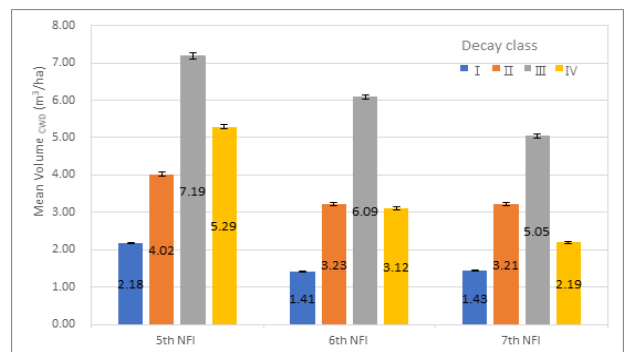


Fig. 5. Mean volume of CWD by decay class

최근에 고사한 I 등급의 평균 고사목축적량이 가장 낮게 나타났고, 부후의 중간정도 진척단계를 나타내는 III 등급에서 고사목축적량이 가장 높은 것으로 분석되었다. 부후도 III 등급 이상부터 평균 고사목축적량의 오차가 크게 증가한 이유는 수피 뿐만 아니라 변재까지도 썩기 시작하여 부패가 심화된 단계로 나무의 형태가 쉽게 부서지는 상태에서 상대적으로 변이 폭이 크게 발생된 것으로 판단된다.

3.2 고사목의 탄소저장량 산정

전국 산림을 대상으로 조사된 NFI 자료를 활용하여 각 차수별 고사목축적량을 분석한 뒤, 주요 산림수종의 부후 등급별 목재밀도 및 탄소전환계수를 활용하여 고사목의 탄소저장량을 산정하였다. 마지막 조사시점인 2010년, 2015년, 그리고 2020년의 부후등급별 탄소저장량을 분석한 결과는 다음과 같다(Table 3).

각 차수별 마지막 조사연도에서 고사목의 탄소저장량(ton C ha^{-1})은 2010년(3.36), 2015년(2.39), 그리고 2020년(1.86)으로 분석되었다. 모든 조사시점에서 부후도 III 등급의 탄소저장량이 높은 것으로 분석되었으나, 시간의 흐름에 따른 총 탄소저장량은 전차기 대비 약 20%대의 감소율을 나타내고 있다.

Table 3. Carbon stocks of coarse woody debris (CWD) by decay class

Decay class	Year		
	2010	2015	2020
I	0.6399	0.2769 (∇ 57%)	0.359 (Δ 30%)
II	0.9973	0.6039 (∇ 39%)	0.4872 (∇ 19%)
III	1.2523	1.256 (0%)	0.76 (∇ 39%)
IV	0.4722	0.2502 (∇ 47%)	0.2492 (0%)
Carbon stock	3.36	2.39 (∇ 29%)	1.86 (∇ 22%)

이러한 감소치의 원인을 분석하기 위해 2010년부터 2020년까지 10년간의 입목벌채 허가실적(KFS, 2021)에서 주벌(Final clearing), 솎아베기(Thinning), 수종갱신(Species conversion), 피해목(Damaged tree) 및 기타(Others) 항목을 검토하였다(Fig. 6). 그 결과, 솎아베기 및 솎아베기의 경우 벌채량 및 수집량 모두 시간이 지날수록 감소하였으나, 피해목의 벌채량 및 수집량은 증가추세를 나타냈다.

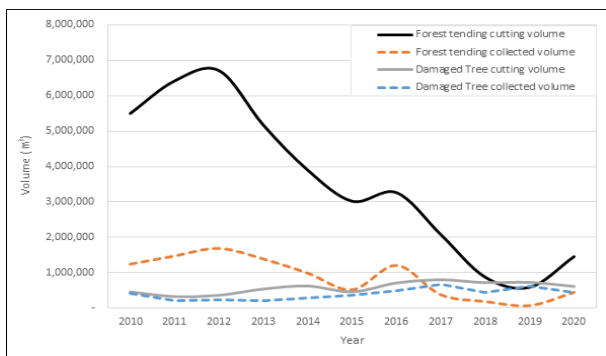


Fig. 6. Permission on annual timber cutting (KFS, 2021).

4. 고찰

사업활동에 따른 탄소경영 효과를 비교한 Han et al.(2014)의 연구에서는 임분 내 유입되는 잔존목이 증가하는 경우 고사목의 탄소저장량이 대조구와 비교하여 높게 나타나는 결과를 보고한 바 있다. 또한 간벌강도에 따른 고사목의 변화를 분석한 국내 연구(Kim et al., 1994; Choi et al., 2014)에서는 간벌강도를 다르게 작업하였을 때, 간벌을 시행하지 않은 대조구에서 가장 높은 고사목을 보이는 것으로 나타났다. 특히, Choi et al.(2014)의 연구에서는 단위면적당 잔존본수가 1,411본 미만(간벌율 46% 이상)인 간벌 표준지에서 고사목이 발생하지 않은 것으로 보고하였다. 리기다소나무의 생태계 탄소저장량을 분석한 Seo et al.(2016)의 연구에서도 고사목의 총 탄소저장량(ton C ha^{-1})은 0.65로 분석되어 동일 수종을 대상으로 NIFoS (2010)에서 조사한 0.83의 값과 비교하여 낮은 수치를 보인 원인을 간벌에 따른 인위적 요인이 영향을 미친 것으로 보고한 바 있다.

반면, 간벌이 참나무림의 토양, 낙엽층 및 고사목 내 탄소저장량에 미치는 단기 영향을 분석한 Yang et al.(2011)의 연구에서는 낙엽층과 고사목의 탄소 농도가 간벌강도에 따른 차이를 보이지 않은 것으로 보고하였다. 이는 간벌 작업 후 낙엽과 낙지의 유입 및 분해 증가로 인해 탄소 농도가 높아질 것이라는 예측과 반대되는 결과로, 간벌 직후 시간이 얼마 경과되지 않은 시점에서 분석을 수행한 것이 결과에 영향을 미친 것으로 판단된다. 간벌은 임분 밀도 조절을 통해 구조적 다양성을 높일 뿐만 아니라 양질의 목재를 생산하기 위한 하나의 수단이 될 수 있다(Cameron, 2002). 이는 입목이 생장하는 과정에서 경쟁이 발생하는 경우 벌채 및 간벌과 같은 사업활동을 통해 생육공간을 확보해주면 경쟁이 완화되고(Bae et al., 2010), 미세지형 및 환경적 요인에 따라 고사목의 발생이 줄어들 수 있음을 시사한다.

본 연구에서도 고사목이 감소한 표본점의 사업이력을 확인하기 위해 산림청의 산림입업통계 플랫폼에서 제공하는 조사자료를 대조한 결과 일부 표본점에서는 전차기에 솎아베기 등의 사업활동이 이루어진 것으로 나타났다. 또한, 사업 이후 치수에 대한 적절한 관리가 이루어지지 못한 대상지에서는 덩굴식물의 피해로 인해 고사가 많이 발생하였다. 이처럼 각 차수별 고사목축적량의 증감요인을 사업이력을 통해 분석하기 위해서는 고정표본점에 대한 사업연도와 내용 그리고 특이사항 등의 기록이 필요하

나, 현재 일부만 기록되어 있어 고사원인을 규명하기에는 한계가 있다.

산림 내 임목의 탄소는 고사 이후 동물이나 미생물에 의해 분해되어 이산화탄소의 형태로 대기중으로 돌아가거나, 그중에서 일부가 땅 속 깊숙하게 묻혀 지질학적 순환을 한다(Kim, 2013). 숲가꾸기는 어린나무가꾸기, 덩굴치기, 솎아베기 등의 산림작업을 통해 산림의 성장을 촉진하고 산림재해에 대한 내성을 증가시켜 탄소흡수원으로 기능하도록 유도하는 산림작업으로, 교토의정서상 탄소흡수원 확충 활동으로 인정받는 산림경영 활동이다(Kim, 2015). 하지만 이러한 작업이 시행된 이후 지속적인 관리가 이루어지지 않을 경우 치수가 집단 고사하거나 대상지에 덩굴이 밀생하여 성장에 영향을 미치는 피해를 줄 수 있다. 따라서, 산림탄소경영을 통한 탄소배출 감축효과를 높이기 위해서는 경제림육성단지 등의 경영대상 산림의 경우 불량치수 및 하층식생 제거와 더불어 간벌을 통한 밀도조절이 필요하고, 미이용바이오매스의 활용 촉진을 통해 임내 잔존하는 고사목의 본수를 조절할 필요가 있다.

고사목은 탄소저장 및 순환 기능뿐만 아니라 고사목에 서식하는 유기체나 야생동물의 서식지, 산불발생 피해정도를 확산시키는 매개체 등 산림 생태계 내에서 다양한 기능을 수행하며 생물다양성의 유지증진에 기여하는 주요 요인이다(Böhl and Brändli, 2007; Weggler et al., 2012; Woodal et al., 2019). 이러한 고사목의 생태학적 역할을 고려할 때 산림 내 종의 서식지나 영양 순환의 핵심 요소로서 기능하는 고사목에 대한 관리가 필요하며, 이에 적합한 기술적 육림 방법이 필요하다. Paletto et al.(2014)의 연구에 따르면 목재 생산에 경영 목적을 두고 집약적으로 관리된 임분의 경우 산림이 다목적으로 이용된 곳과 비교할 때 고사목의 발생이 적은 것으로 나타났다. 이러한 조건의 임분에서 벌채는 목재의 수확 뿐만 아니라 임지 내 벌채 부산물까지 모두 제거하는 것을 의미한다. 반대로 산림의 다목적 이용에 중점을 두는 경우, 산림의 생물다양성을 증진시키기 위해 고사목을 증가시키거나 임내에 유지하는 관리전략을 수행할 수 있다. 즉, 산림의 관리 유형은 고사목의 발생과 생태학적 역할에 큰 영향을 미치므로 이를 고려한 경영전략이 수립될 필요가 있다.

5. 결론

2050 탄소중립에 대한 세계적 흐름에 동참한 한국이 감축목표를 달성해 나가기 위해서는 온실가스 인벤토리 구

축에 주력할 필요가 있다. 특히 온실가스 통계의 완전성 제고를 위해서는 고사목에 관한 탄소저장량 산정이 시급하다. NFI의 각 차수별 평균 고사목축적량은 $23.04 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ 에서 $14.83 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ 으로 감소하였으며, 고사목의 탄소저장량은 2010년 $3.36 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, 2015년 $2.39 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, 그리고 2020년 $1.86 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ 로 분석되어 시간의 흐름에 따른 총 탄소저장량은 감소하는 경향을 나타내었다.

고사목은 산림 내 탄소저장고 및 생물다양성 유지에 기여하는 부분이 크기 때문에 지속적인 모니터링을 통해 고사목에 대한 관리와 연구가 이루어질 필요가 있다. 우리나라는 2006년부터 NFI의 체계를 개편하여 고사목에 관한 기초자료를 수집하고 있으며, 2020년도에 주요 산림수종을 대상으로 고사목에 관한 국가고유계수를 개발하여 고사목의 탄소저장량 및 변화량을 산출할 수 있는 기반을 마련하였다. 본 연구는 고사목에 관한 활동자료와 국가고유계수를 활용한 고사목의 탄소저장량 산정에 관한 시범연구로써 향후 온실가스 통계로 활용이 가능하다. 본 연구의 한계는 고정표본점을 대상으로 조사된 자료를 활용하여 고사목의 발생현황 및 탄소저장량을 분석하였기 때문에 고사목축적량의 증감원인과 관련하여 산림 생태계 내의 생물적 요인 및 산림에서의 시업활동에 의한 영향을 구명하는데 한계가 있다. 따라서 추가연구를 통해 고사목의 발생특성 및 변화에 관한 해석이 필요하며, 이를 통해 탄소저장고로서의 고사목이 온실가스 통계에 미치는 영향을 제시함으로써 온실가스 인벤토리의 MRV 체계 확보 및 통계의 투명성 제고에 기여할 수 있다.

사사

본 연구는 “국립산림과학원 일반과제(산림자원 순환경제를 위한 산림자원 통계 및 정보 구축 방안 연구)”의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

References

- Bae SW, Hwang JH, Lee ST, Kim HS, Jeong JM. 2010. Changes in soil temperature, moisture content, light availability and diameter growth after thinning in Korean pine (*Pinus koraiensis*) Plantation. *Journal of Korean Society of Forest Science*. 99(3): 397-403.
- Bechtold WA, Patterson PL. 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.
- Böhl J, Brändli UB. 2007. Deadwood volume assessment in the third Swiss National Forest Inventory: methods and first results. *European Journal of Forest Research*. 126: 449-457.
- Cameron AD. 2002. Importance of early selective thinning in the development of long-term stand stability and improved log quality: a review. *Forestry*. 75(1): 25-35.
- Choi JK, Lee Bk, Lee DS, Choi IH. 2014. Growth monitoring of Korean white pine (*Pinus koraiensis*) plantation by thinning intensity. *Journal of Korean Society of Forest Science*. 103(3): 422-430.
- Dixon RK, Brown S, Houghton RA, Solomon AM, Trexler MC, Wisniewski J. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*. 263(5144): 185-190.
- GIR (Greenhouse Gas Inventory & Researches Center). 2020. National Greenhouse Gas Inventory - Guideline for Measurement, Reporting, Verification -. (in Korean)
- Han H, Kwon K, Chung H, Seol A, Chung J. 2015. Analysis of optimal thinning prescriptions for a *Cryptomeria japonica* stand using dynamic programming. *Journal of Korean Society of Forest Science*. 104(4): 649-656.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. Chapter 3. Consistent representation of lands. In: *IPCC Guidelines for national Greenhouse gas inventories*. p. 3.1-3.42.
- KFS (Korea Forest Service). 2020. Market Survey of Timber Products. Daejeon. Korea: Korea Forest Service.
- KFS (Korea Forest Service). 2021. Statistical Yearbook of Forestry. Daejeon. Korea: Korea Forest Service.
- KFS and KOFPI (Korea Forest Service and Korea Forestry Promotion Institute). 2017. The 7th National Forest Inventory and Forest Health Monitoring. -Field Manual-. Seoul. Korea: Korea Forest Service.
- Kim CM. 2017. Establishment of Information Statistics Base for Forest Carbon Sink. Seoul. Korea: National Institute of Forest Science. Research Report 17-28.
- Kim DK, Lee HJ, Kim JW, Park SK. 1994. Effects of Planting Density and Thinning Intensity in Growth of Korean Pine. Research Report of Forestry Research Institute. 50: 112-127.
- Kim HS. 2013. Global warming and forest. *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers*. 55(1): 47-50.
- Kim KW. 2021. Forest and Nation. Seoul. Korea: Bookshill. 772p.
- Kim YH, Jeon EJ, Bae JS. 2015. Development of Optimization Technique for Forest Carbon Management. Seoul. Korea: National Institute of Forest Science. Research Report 15-11.
- Kim YH, Jeon EJ, Shin MY, Chung IB, Lee ST, Seo KW, Pho JK. 2014. A study on the baseline carbon stock for major species in Korea for conducting carbon offset projects based on forest management. *Journal of Korean Society of Forest Science*. 103(3): 439-445.
- Lee GH. 2008. Expansion of carbon absorption sources in preparation for Post-2012 system. *Planning and Policy*. 318(4): 18-25.
- 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. *Journal of Climate Change Research*. 6(4): 303-310.
- Lewis SL, Wheeler CE, Mitchard ETA, Koch A. 2019. Restoring natural forests is the best way to remove atmospheric carbon. *Nature*. 568: 25-28.
- Lim JM, Kim DK. 2021. A study on Korea's remaining GHG emissions allowance and capped-emissions trajectories under the Paris agreement goal. *Journal of Climate Change Research*. 12(3): 255-270.
- Lu F, Hu H, Sun W, Zhu J, Liu G, Zhou W, Zhang Q, Shi P, Liu X, Wu X et al. 2018. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010. *Proceedings of the*

- National Academy of Sciences of the United States of America. 115(16): 4039-4044.
- Moon GH, Yim JS. 2021. Change in carbon stocks of coarse woody debris in national forest inventories: Focus on Gangwon province. *Journal of Korean Society of Forest Science*. 110(2): 233-243.
- Moon GH, Yim Js, Moon NH. 2021. Optimal sampling intensity in South Korea for a land-use change matrix using point sampling. *Land*. 10(7): 1-16.
- NIFoS (National Institute of Forest Science). 2010. Main tree species carbon emission factors for forest greenhouse gas inventory. Seoul. Korea: National Institute of Forest Science.
- NIFoS (National Institute of Forest Science). 2018. Results and Implications of Public Function Evaluation in Forests. Seoul. Korea: National Institute of Forest Science.
- NIFoS (National Institute of Forest Science). 2021. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventories. Seoul. Korea: National Institute of Forest Science.
- Paletto A, De Meo I, Cantiani P, Ferretti F. 2014. Effects of forest management on the amount of deadwood in Mediterranean oak ecosystems. *Annals of Forest Science*. 71: 791-800.
- Schuur EAG, Chadwick OA, Matson PA. 2001. Carbon cycling and soil carbon storage in mesic to wet Hawaiian montane forests. *Ecology*. 82(11): 3182-3196.
- Šēnhofa S, Šņepsts G, Bičkovskis K, Jaunslaviete I, Liepa L, Straupe I, Jansons Ā. 2021. Availability and structure of coarse woody debris in hemiboreal mature to old-growth aspen stands and its implications for forest carbon pool. *Forests*. 12(7): 901.
- Seo YO, Jung SC, Lee YJ. 2016. Estimation of carbon storage for *Pinus rigida* stands in Muju. *Korean Journal of Environment and Ecology*. 30(3): 399-405.
- Weggler K, Dobbertin M, Jüngling E, Kaufmann E, Thürig E. 2012. *European Journal of Forest Research*. 131: 1423-1438.
- Woodall CW, Monleon VJ, Fraver S, Russell MB, Hatfield MH, Campbell JL, Domake GM. 2019. The downed and dead wood inventory of forests in the United States. *Scientific Data*. 6(180303): 1-13.
- Yang AR, Bae SW, Lee ST, Hwang JH, Noh NJ, Lee SK, Yoon TK, Jo WY, Lee G, Kim CS, Son Y. 2011. Short-term effect of thinning on carbon storage in soil, forest floor and coarse woody debris of *Quercus* spp. stands in Gangwon province, central Korea. *Proceeding of the Forest Science Academic Conference*. 2011: 166-169.
- Yim JS, Jung IB, Kim JC, Kim SH, Ryu JH, Shin MY. 2012. Estimation of forest growing stock by combining annual forest inventory data. *Journal of Korean Society of Forest Science*. 101(2): 213-219.