

국가산림자원조사 자료를 활용한 강원도 산림내 낙엽층의 탄소저장량 및 변화량 추정

이선정* · 김래현** · 손영모* · 임종수**

*국립산림과학원 산림산업연구과, **국립산림과학원 연구기획과

Estimating Litter Carbon Stock and Change on Forest in Gangwon Province from the National Forestry Inventory Data

Lee, Sun Jeoung*, Kim, Raehyun**, Son, Yeong Mo* and Yim, Jong Su**

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

**Division of Research Planning and Coordination, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

ABSTRACT

This study was conducted to estimate litter carbon stock change from the National Forest Inventory (NFI) data for national greenhouse gas inventory report. Litter carbon stocks were calculated from the NFI dataset in NFI5 (2008) and NFI6 (2013) in Gangwon province. Total carbon stock change of litter was 0.68 ± 0.71 t C/ha from NFI5 (2008) to NFI6 (2013), however, there was no significant difference between the both dataset at 2008 and 2013 year. Litter carbon stock of coniferous stands was higher than deciduous stands in NFI5 (2008) and NFI6 (2013) ($P < 0.05$). This study was limited to pilot study, so we will assess litter carbon stock using more complete data from NFI systems. It can be used as data sources for national greenhouse gas inventory report on forest sector.

Key words: Carbon Stock Change, Litter, Forest Sector, LULUCF, National Forest Inventory, National Greenhouse Gas Inventory

1. 서 론

2015년에 파리협정이 체결되면서 기후변화협약에 참여하는 모든 당사국들은 전 지구적 온실가스 감축을 위하여 국가별 역량과 다양한 상황 및 공통의 그러나 차별화된 책임을 고려하는 상황식의 국가기여방안(Nationally Determined Contributions; NDC) 방식을 채택하였다. 이에 따라 2020년 이후부터 모든 당사국은 온실가스 감축 목표를 이행할 책임을 지게 되었고, 연간 국가 온실가스 배출량을 측정 가능하고 제3자에 의해 검증이 가능하도록 보고해야 한다(IPCC, 2006). 기후변화협약에서 낙엽층은 토지이용, 토지이용변화 및 산림(Land Use, Land-Use Change and Forestry; LULUCF)의 다섯 가지 탄소 저장고 중 하나이다(IPCC, 2006). 낙엽층은 전체 산림 생태계 탄소저장량의 약 5%를 차지하고 있고(Pan *et al.*, 2011), 국가

온실가스 인벤토리 보고와 국가 온실가스 인벤토리 감축 목표 설정에 있어 중요한 요인이 될 수 있다(Domke *et al.*, 2016).

대부분의 부속서 I 국가들은 산림부문 국가 온실가스 인벤토리 보고를 위하여 국가산림자원조사(National Forest Inventory; NFI) 체계를 개편하여 NFI에서 수집된 자료를 활용하고 있다(Federal Environment Agency, 2015; Swedish Environmental Protection Agency, 2015; Statistics Finland, 2015). 특히 독일과 스웨덴은 국가산림자원조사와 토양조사 자료에서 수집된 자료를 산림부문 온실가스 인벤토리 보고를 위한 기초자료로 활용하고 있다(Federal Environment Agency, 2015; Swedish Environmental Protection Agency, 2015). 핀란드의 경우, 토양 및 유기물의 탄소저장량 산정에 Yasso 모델을 활용하고 있으며, 모형의 입력 값으로 국가산림자원조사에서 수집된 낙엽층 자료를 활용하고 있다(Statistics Finland, 2015).

† Corresponding author: yimjs@korea.kr

Received October 19, 2017 / Revised November 1, 2017 1st, November 29, 2017 2nd / Accepted December 11, 2017

우리나라도 산림부문 국가 온실가스 인벤토리 보고 시 국가 산림자원조사 자료를 활용하고 있으나, 토양, 고사목, 낙엽층의 탄소저장량 및 온실가스 흡수량은 시계열 활동자료 및 배출계수 등의 부재로 산정하지 못하고 있다(GIR, 2016). 최근 우리나라의 국가산림자원조사 체계는 1992년 리우 환경개발 회의(UNCED) 이후 지속가능한 개발의 원칙에 따라 지속가능한 산림경영 기반 연구의 필요성이 대두됨에 따라 2006년부터 개편되었다(KFRI, 2015). 개편된 제5차 국가산림자원조사(2006~2010)는 계통적 추출법에 의해 집락표본점 및 부표본점을 전국에 배치하고, 매년 20%씩 총 5년에 걸쳐 임분 현황, 임목, 벌간 및 고사목, 낙엽층, 산림식생조사 및 토양특성 조사 등이 조사되었고, 제6차 국가산림자원조사(2011~2015)가 완료되면서 시계열 자료가 확보되었다(KFS, 2016a).

국내 낙엽층 탄소저장량 연구는 특정 임분의 낙엽층 탄소저장량 연구(Ju et al., 2015; Lee et al., 2013; Won et al., 2016)와 간벌에 따른 낙엽층 탄소저장량의 변화 연구(Kim, 2008; Ko et al., 2014; Yang et al., 2011) 등이 진행되었다. 그러나 기존 연구는 시계열적 일관성 및 대표성 등의 한계로 우리나라 탄소변화량을 추정하기에는 어려움이 존재한다. 따라서 전국단위로 시계열 자료를 확보할 수 있는 제5차 및 제6차 국가산림자원조사에서 수집된 낙엽층의 건중량, 탄소농도 등의 자료를 활용하여 강원도 산림내 낙엽층의 탄소저장량 및 변화량을 산정하고, 국가 온실가스 인벤토리의 적용가능성을 검토하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구자료

본 연구는 우리나라 전체 산림 면적의 약 22%를 차지하는 강원도 산림을 대상으로 하였다(KFS, 2016b). 강원도의 전체 면적은 2015년을 기준으로 1,683천 ha이며, 산림은 1,372천 ha로 강원도 전체 면적의 약 82%가 산림으로 구성되어 있다. 강원도 산림면적은 침엽수림이 31.8%, 활엽수림 38.4%, 그리고 혼효림이 27.2%를 차지하고 있으며, 전체 산림면적의 57%가 IV~V영급으로 이루어져 있다(KFS, 2016b).

강원도 낙엽층의 탄소저장량 및 변화량을 산정하기 위해 제5차(2008) 및 6차(2013) 국가산림자원조사 자료를 활용하였다(Fig. 1). 국가산림자원조사의 고정표본점은 집락표본점으로 총 4개의 부표본점으로 구성되어 있다(Fig. 2). 총 4개의 부표본점(S1, S2, S3, S4) 중 중심표본점(S1)내에서 3개의 조사구를 설치하고, 그 중 2개의 지점을 선택하여 낙엽층과 토양의 시료가 채취되는데 현장의 시료채취가 불가피하게 어려

운 경우 부적합 사유를 감안하여 조사구 개수가 변경될 수 있다(KFRI, 2008; KFS, 2012). 토양조사는 제5차 국가산림자원조사 이후 10년 주기로 진행되기 때문에 시계열 자료를 확보

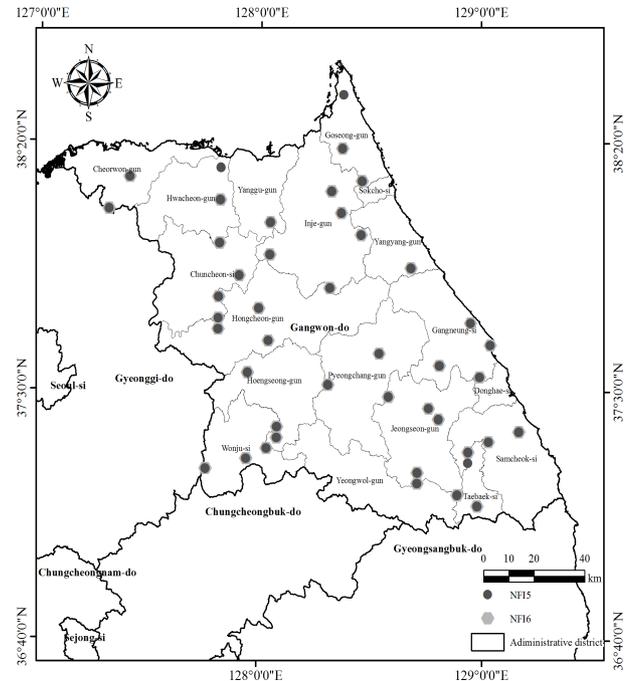


Fig. 1. Sampling points of NFI5 (2008) and NFI6 (2013) in Gangwon provinces.

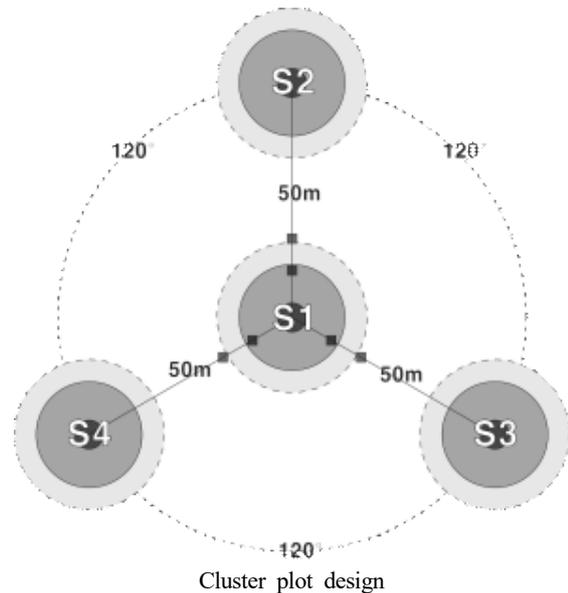


Fig. 2. Sampling and plot designs for the National Forest Inventory (KFRI, 2010).

할 수 없다. 따라서 제5차 및 6차 국가산림자원조사의 중심표본점(S1)에서 취득한 1~2개 지점에서 채취된 낙엽층에 대한 탄소저장량만 산정하였고(Fig. 1), 낙엽층 탄소저장량 산정에 활용한 고정표본점의 개수는 2008년에 40개(침엽수림: 6개, 활엽수림: 23개, 혼효림: 11개)이고, 2013년도에 40개(침엽수림: 7개, 활엽수림: 25개, 혼효림: 8개)이었으며, 낙엽층의 탄소변화량을 추정하기 위한 동일 고정표본점의 개수는 총 38개였다(Table 1).

2.2 낙엽층의 탄소저장량 및 변화량 산정

국가산림자원조사에서 낙엽층은 분해정도에 따라서 L층과 FH층으로 구분한다. L층은 분해되지 않은 낙엽층이며, FH층은 식물조직이 분해된 부식층을 의미한다. 강원도 산림내 낙엽층의 탄소저장량을 산정하기 위하여 국가산림자원조사의 S1 표본점에서 상단부로부터 L층과 FH층의 모든 낙엽과 낙지(직경 6 cm 미만)를 채취하였다(Fig. 2). 시료를 채취한 후 80℃ 건조기에서 24시간 건조하였으며, 건조량(dry weight)을 칭량 후 시료를 곱게 갈아 원소분석기로 탄소농도(carbon content)를 측정하였다(KFRI, 2008; KFS, 2012). 낙엽층의 탄소저장량은 건조량에 탄소농도를 곱하여 산정하였으며(Eq. 1), 탄소저장량의 변화량은 2006 IPCC 가이드라인에 따라 산정하였다(IPCC, 2006; KFRI, 2010).

$$\text{Carbon stock(t C/ha)} = \frac{\text{Dry weight (t/ha)} \times \text{Carbon content (C\%)}}{100} \quad (\text{Eq. 1})$$

2.3 통계분석

동일 고정표본점에서 발생하는 탄소저장량 변화량 차이의 유의성을 검정하기 위하여 쌍체 t-검정(paired t-test)을 활용하여 분석하였으며, 임상별 낙엽층의 탄소저장량의 차이는 다중 선형회귀모형(General liner model)을 활용하여 분산분석을 수행하였다. 임상간 차이를 확인하기 위한 사후검정은 LSD 검정(Least significant difference test)을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 강원도 산림내 낙엽층의 탄소저장량 및 변화량

강원도에서 제5차(2008) 및 6차(2013) 국가산림자원조사로 수집된 낙엽층의 탄소저장량은 Table 1 및 Fig. 3과 같다. 강원도 낙엽층 탄소저장량은 시간이 지남에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 통계적으로 유의하지는 않았지만 5년 동안 총 탄소저장량은 0.68±0.71 t C/ha의 탄소가 증가한 것으로 나타났다(Table 1). 임분 성숙에 따라 탄소저장량이 다소 증가하

Table 1. Total litter (L+FH) carbon stock and change in NF15 (2008) and NF16 (2013) in Gangwon province (mean±standard error)

Num. of plot	Forest type		Age class		Crown density		t C/ha		ΔC (t C/ha)
	NF15	NF16	NF15	NF16	NF15 (%)	NF16 (%)	NF15	NF16	
2285121	D	D	III	III	51~75	76~100	5.50	3.21	-2.29
2365241	D	D	V	V	51~75	76~100	1.43	4.68	3.25
2684161	D	D	III	III	0~25	51~75	3.73	3.62	-0.11
2724681	D	D	III	IV	51~75	76~100	1.27	1.51	0.24
2724721	C	C	III	III	51~75	51~75	5.66	4.12	-1.54
2724801		C		IV		76~100		5.72	
2725001	D	D	V	VI	76~100	76~100	4.92	3.42	-1.50
2725161	D	D	VI	VII	76~100	76~100	5.87	1.82	-4.05
2804881	M	C	IV	IV	76~100	76~100	2.11	7.13	5.02
2844201	C	C	IV	IV	51~75	51~75	2.85	19.80	16.94
2844521	M	M	V	V	51~75	76~100	10.43	12.37	1.94
2884761	D	D	IV	IV	51~75	76~100	1.32	2.36	1.04

Table 1. Continued

Num. of plot	Forest type		Age class		Crown density		t C/ha		ΔC (t C/ha)
	NFI5	NFI6	NFI5	NFI6	NFI5 (%)	NFI6 (%)	NFI5	NFI6	
2924241	D	D	IV	IV	76~100	76~100	5.62	6.41	0.79
2924641	D	D	III	III	51~75	76~100	4.26	3.17	-1.10
2924961	D	D	IV	V	51~75	76~100	1.80	5.00	3.20
2925081	M	M	III	IV	76~100	76~100	1.47	4.40	2.93
2964281	D	D	IV	V	51~75	76~100	4.70	4.03	-0.67
2964321	D	D	V	V	51~75	76~100	1.77	7.56	5.79
3164481	D	D	III	IV	76~100	76~100	2.55	2.41	-0.13
3164841	D	D	IV	V	26~50	51~75	4.01	2.25	-1.76
3165201	M	D	VI	VI	51~75	76~100	5.58	5.50	-0.08
3205121	D	D	VI	VII	76~100	51~75	1.78	3.32	1.54
3205361	D		III		76~100		3.28		
3205561	M		V		51~75		3.16		
3285041	D	D	VI	VII	51~75	76~100	3.28	6.00	2.73
3285241	D	D	V	V	51~75	76~100	3.29	4.12	0.83
3364601	C	C	IV	IV	76~100	76~100	4.44	5.32	0.88
3404441	D	D	IV	IV	76~100	76~100	2.65	4.43	1.78
3484921	M	M	V	V	51~75	76~100	5.59	4.06	-1.52
3524121	M	M	IV	V	76~100	76~100	2.07	9.21	7.14
3524161	D	D	V	V	51~75	76~100	1.14	8.20	7.06
3564401	D	D	V	VI	76~100	76~100	1.93	5.18	3.26
3604361	C	C	V	V	51~75	76~100	8.02	5.39	-2.63
3604561		D		V		76~100		2.37	
3684081	D	D	IV	V	51~75	76~100	4.92	3.44	-1.47
3724241	D	D	I	III	0~25	76~100	5.61	3.11	-2.50
3724721	C	C	VI	VI	76~100	76~100	6.28	4.03	-2.25
3764041	M	D	IV	V	76~100	76~100	19.00	7.49	-11.51
3764521	C	M	V	V	51~75	76~100	9.22	6.06	-3.16
3804281	M	M	VI	VII	76~100	76~100	4.72	4.34	-0.38
3804641	M	M	III	IV	51~75	76~100	7.08	3.49	-3.58
3924321	M	M	IV	IV	76~100	76~100	4.34	5.94	1.60
			Mean				4.47±0.51	5.15±0.51	0.68±0.71

C: Coniferous, D: Deciduous, M: Mixed.

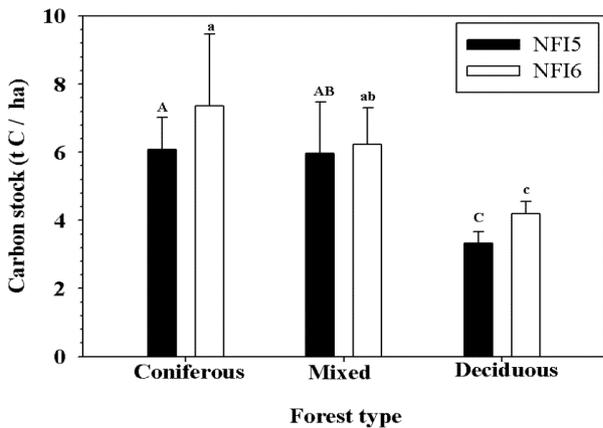


Fig. 3. Litter (L+FH) carbon stock on Forest type in NFI5 (2008) and NFI6 (2013) in Gangwon province. Values with different indicated significant differences among three forest types on each NFI data at $P < 0.05$. Horizontal bar indicates on standard error (NFI5: coniferous $n=6$, deciduous $n=23$, mixed $n=11$, NFI6: coniferous $n=7$, deciduous $n=25$, mixed $n=8$).

였는데, 이는 성숙한 임분에서 잔뿌리 및 목질부의 수피 등이 증가하여 낙엽층의 탄소량이 증가된다는 연구결과(Schulp *et al.*, 2008)와 유사한 경향을 나타내고 있다. 반면, 터키의 구주 소나무를 대상으로 토양탄소저장량을 200년간 모의한 자료에 의하면 임령이 증가함에 따라 낙엽층(O층)의 탄소저장량은 감소하지만, 일정 임령을 기준으로 서서히 증가하는 연구결과(Lee *et al.*, 2016)와는 차이를 나타내고 있다. 본 연구에서는 통계적으로 유의하지 않지만 낙엽층의 탄소저장량이 시간에 따라 증가하는 경향인 것은 임분 성숙과 관련이 있을 것으로 판단된다. 실제로 제5차(2008) 및 6차(2013) 국가산림자원조사 고정표본점의 수관밀도 및 영급분포 변화정보를 분석한 결과, 제6차 국가산림자원조사 자료의 약 88%가 “76~100%” 수관 밀도와 4영급 이상의 임분으로 변화된 것을 확인할 수 있었다(Table 2).

낙엽층의 탄소저장량은 조사지점 및 모형의 구조에 따라 변이가 매우 크고, 영향을 미치는 요인들도 수종, 낙엽층 두께,

경사, 모재, 산림경영활동 등으로 다양하다(Ko *et al.* 2014, Gruneberg *et al.*, 2014; Schulp *et al.*, 2008). 국가산림자원조사에서 조사되는 간벌 등 시업이력자료를 활용해 시업에 따른 낙엽층의 탄소저장량 변화를 분석하려 하였으나, 전체 80개 표본점 중 7개 표본점에서만 숲가꾸기 및 조림 등이 이루어진 것으로 나타나 정확한 원인분석을 수행하기 어려웠다. 정확한 탄소저장량 변화의 원인을 구명하기 위해서는 표본점 내 기초정보 및 변화에 대한 지속적인 모니터링과 이력관리가 필요한 것으로 판단된다.

강원도의 낙엽층 탄소저장량은 임상별로 차이가 있는 것으로 나타났다. 제5차 및 6차 국가산림자원조사에서 임상별 낙엽층 탄소저장량은 침엽수림, 혼효림, 그리고 활엽수림 순으로 나타났다(Fig. 3). 제5차(2008) 및 6차(2013) 국가산림자원조사에서 모두 침엽수림에 해당하는 표본점의 낙엽층 탄소저장량(NFI5: 6.08 ± 0.95 t C/ha, NFI6: 7.36 ± 2.11 t C/ha)이 활엽수림(NFI5: 3.33 ± 0.34 t C/ha, NFI6: 4.19 ± 0.37 t C/ha)의 탄소저장량보다 높게 나타났으며, 통계적으로 유의한 차이를 보였다(Fig. 3, $P < 0.05$). 이전 연구에서도 이와 동일한 연구 결과가 보고된 바 있으며(KFS and Kopfi, 2013; Schulp *et al.* 2008), 일반적으로 침엽수림의 낙엽층은 활엽수림의 낙엽층보다 분해하기 어려운 물질도 구성되어 있기 때문이다(Berg, 2000). 또한 침엽수림의 토양은 활엽수림의 토양보다 pH가 낮아 토양 내 미생물의 활동이 감소하여 부식층보다 건전한 잎으로 구성된 낙엽이 더 많이 존재한 결과로 판단된다(Thuille and Schulze, 2006). 따라서 침엽수림의 낙엽층 탄소저장량은 활엽수림보다 많으며, 높은 탄소고정효과를 가진다고 할 수 있다. 그러나 그 외 탄소저장고인 바이오매스와 토양의 경우 단위면적당 탄소저장량 및 배출계수 등은 활엽수림에서 침엽수림보다 높은 것으로 알려져 있기 때문에(KFS and Kopfi, 2013; GIR, 2016), 향후 산림의 전체 탄소저장고에 대한 탄소저장량 평가 연구가 필요한 것으로 판단된다.

3.2 산림부문 국가 온실가스 인벤토리보고의 적용가능성 검토

국가 온실가스 인벤토리의 산정 수준은 Tier 1~3로 구분하

Table 2. Frequency table of crown density and age class in NFI5 (2008) and NFI6 (2013) on Gangwon province

	Crown density				Age class			
	≤50	51~75%	76~100%	Total	≤Ⅲ	Ⅳ~Ⅴ	Ⅵ~Ⅶ	Total
NFI5	3	21	16	40	23	17	0	40
NFI6	0	5	35	40	5	27	8	40

고 있으며, Tier 수준이 낮을수록 국가 온실가스 인벤토리 산정의 필수 요소인 활동자료와 배출계수의 자료의 신뢰성이 상대적으로 낮다(IPCC, 2003). IPCC 가이드라인에 따르면 산림 부문의 낙엽층의 탄소저장량을 산정하는 경우, Tier 1은 낙엽층의 탄소저장량의 변화가 없다고 가정하고 0으로 보고하는 것이며, Tier 2의 경우 국가자료를 활용해 축적차이법에 의해 탄소변화량을 산정하는 것이며, Tier 3은 모델을 활용해 탄소저장량 변화를 모의하는 것이다(IPCC, 2003; 2006).

국가산림자원조사 자료를 활용하여 낙엽층의 탄소저장량 및 변화량을 추정하는 것은 Tier 2에 해당하는 것이다. 일부 국가들도 산림의 낙엽층 탄소저장량 및 변화량 산정 시 자국의 국가산림자원조사를 활용하고 있다(Federal Environment Agency, 2015, Statistics Finland, 2015). 국가산림자원조사는 고정표본점에서 조사가 이루어지기 때문에 시계열적 자료 확보가 가능하며 낙엽층의 탄소변화량을 모의하기에 적합하다. 또한 국가산림자원조사의 자료는 토양 및 고사유기물을 모의할 수 있는 Tier 3을 위한 모형의 기초자료로 활용될 수 있으며, 모형의 적합도를 높일 수 있다(Schulp *et al.*, 2008). 국가산림자원조사에서 수집된 낙엽층 자료는 국가 온실가스 인벤토리 산정에 충분히 적용될 수 있는 것으로 판단되지만, 본 연구는 강원도를 대상으로 한 시범연구로 향후 전국 단위의 탄소저장량 산정이 이루어진 후에 국가 온실가스 인벤토리에 적용이 가능할 것 판단된다. 다만, 우리나라 전체 낙엽층의 탄소저장량을 산정하기 위해서는 토지이용변화 매트릭스에 의한 임상별 산림면적자료가 확보되어야 하며, 다양한 산림유형에 따른 낙엽층의 탄소순환에 대한 변화를 추적하기 위한 지속적인 모니터링이 필요한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 시계열로 수집된 국가산림자원조사 자료를 활용하여 낙엽층의 탄소저장량 및 변화량을 산정하고, 국가 온실가스 인벤토리의 적용가능성을 검토하기 위하여 수행되었다. 제5차 및 제6차 국가산림자원조사의 2008년 및 2013년도에 수집된 강원도지역의 고정표본점을 대상으로 낙엽층의 탄소저장량 변화량을 산정한 결과, 통계적으로 유의하지는 않지만 5년 동안 낙엽층의 탄소저장량은 0.68 ± 0.71 t C/ha 증가한 것으로 나타났다. 또한 침엽수림의 탄소저장량이 활엽수림의 탄소저장량보다 높은 것으로 나타났으며, 이전 연구와 동일한 경향인 것으로 나타났다. 부속서 I 국가들은 국가 온실가스 인벤토리 보고 시 국가의 현실 상황을 잘 반영하고, 측정·보고·검증(MRV)이 가능하도록 보고하기 위해 국가산림자원

조사에 의해 주기적으로 수집되는 자료를 활용하고 있다. 즉, 국가 온실가스 인벤토리 보고에는 국가의 산림 상황을 잘 반영하여 주기적으로 정확하게 수집된 자료를 활용하는 것이 중요하다. 따라서 국가 온실가스 인벤토리 보고 시 낙엽층의 탄소변화량을 보고하기 위한 하나의 방안으로 국가산림자원조사 자료의 활용을 제시할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구는 현재까지 국내 국가 온실가스 인벤토리 보고서에서 보고되지 않은 낙엽층의 탄소저장량 산정 방안으로 국가산림자원조사 자료의 활용성을 검토한 시범연구로 국가 온실가스 인벤토리에 바로 적용하기에는 무리가 있다. 따라서 향후 전국 단위의 표본점을 대상으로 탄소변화량 평가 연구를 수행한다면 국가 온실가스 인벤토리 보고 수준 Tier 2에 준하는 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 “국립산림과학원 일반과제(국가산림자원조사 자료의 융복합 활용기술 개발)” 및 “산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업(신기후체제 대응 산림분야 국가 온실가스 인벤토리 산정체계 및 탄소계정 고도화 연구: 2017-044B10-1719-BB01)”의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Berg B. 2000. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. *Forest Ecology and Management* 133:13-22.
- Domke GM, Perry CH, Walters BF, Woodall CW, Russell MB, Smith JE. 2016. Estimating litter carbon stocks on forest land in the United States. *Science of the Total Environment* 557-558:469-478.
- Federal Environment Agency. 2015. Submission under the united nations framework convention on climate change and the Kyoto Protocol 2015. Federal Environment Agency. Dessau, Germany.
- GIR (Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea). 2016. National greenhouse gas inventory report 2016. GIR. Seoul, Korea. (In Korean).
- Gruneberg E, Ziche D, Wellbrock N. 2014. Organic carbon stocks and sequestration rates of forest soils in Germany. *Global Change Biology* 20:2644-2662.
- IPCC. 2003. Good practice guidance for land use, land-use

- change and forestry. IPCC/IGES. Hayama, Japan.
- IPCC. 2006. IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventory. IPCC/IGES. Hayama, Japan.
- Ju NG, Lee KS, Son YM, Kim RH, Son YH, Kim CS. 2015. Belowground carbon storage by stand age classes and regions of red pine (*Pinus densiflora*) and cork oak (*Quercus variabilis*) stands in Western Gyeonnam province. Journal of Agriculture and Life Science 49(1):29-39. (In Korean with English abstract).
- KFRI (Korea Forest Research Institute). 2008. The 5th national forest inventory - field manual -. Korea Forest Research Institute. Seoul, Korea. (In Korean).
- KFRI (Korea Forest Research Institute). 2010. Survey manual for forest biomass and soil carbon. Korea Forest Research Institute. Seoul, Korea.
- KFRI (Korea Forest Research Institute). 2015. The changes of national forest inventory systems (1971~2010). KFRI. Seoul, Korea. (In Korean).
- KFS (Korea Forest Service). 2012. The 6th national forest inventory and forest health monitoring - Field manual Ver. 1.2 -. Korea Forest Service. Daejeon, Korea. (In Korean).
- KFS (Korea Forest Service). 2016a. National forest inventory and forest health monitoring 2016. Korea Forest Service. Daejeon, Korea. (In Korean).
- KFS (Korea Forest Service). 2016b. Statistical yearbook of forest. Korea Forest Service, Daejeon, Korea.
- KFS (Korea Forest Service) and Kofpi (Korea Forestry Promotion Institute). 2013. Assessment of the Korea's forest resources. Korea Forestry Promotion Institute. Seoul, Korea. (In Korean).
- Kim CS. 2008. Soil carbon storage, litterfall and CO₂ efflux in fertilized and unfertilized larch (*Larix leptolepis*) plantations. Ecological Research 23:757-763.
- Ko SI, Yoon TK, Kim SJ, Kim CS, Lee ST, Seo KW, Son, YH. 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. (In Korean with English abstract).
- Lee JY, Kim DK, Won HY, Mun HT. 2013. Organic carbon distribution and budget in the *Pinus densiflora* forest at Mt. Worak national park. Korean Journal of Environment and Ecology 27(5):561-570. (In Korean with English abstract).
- Lee JY, Tolunay D, Makineci E, Comez A, Son YM, Kim RH, Son YH. 2016. Estimating the age-dependent changes in carbon stocks of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands in Turkey. Annals of Forest Science 73:523- 531.
- Pan Y, Birdsey RA, Fang J, Houghton R, Kauppi PE, Kurz WA, Phillips OL, Shvidenko A, Lewis SL, Canadell JG, Ciais P, Jackson RB, Pacala SW, McGuire AD, Piao S, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. Science 333 (6045):988-993.
- Schulp CJE, Nabuurs G, Verburg PH, Waal RW. 2008. Effect of tree species on carbon stocks in forest floor and mineral soil and implication for soil carbon inventories. Forest Ecology and Management 256(3):482-490.
- Statistics Finland. 2015. Greenhouse gas emissions in Finland 1990~2013. Statistics Finland. Helsinki, Finland.
- Swedish Environmental Protection Agency. 2015. National inventory report 2015 Sweden. Swedish Environmental Protection Agency. Stockholm, Sweden.
- Thuille A, Shulze ED. 2006. Carbon dynamics in successional and afforested spruce stands in Thuringia and the Alps. Global Change Biology 12:325-342.
- Won HY, Kim DK, Han AR, Lee YS, Mun HT. 2016. Distribution and absorption of organic carbon in *Quercus mongolica* and *Pinus densiflora* forest at Mt. Geumgang in Seosan. Korean Journal of Environment and Ecology 30(2):243-252. (In Korean with English abstract)
- Yang AR, Son YH, Noh NJ, Lee SK, Jo WY, Son JA, Kim CS, Bae SW, Lee ST, Kim HS, Hwang JH. 2011. Effect of thinning on carbon storage in soil, forest floor and coarse woody debris of *Pinus densiflora* stands with different stand ages in Gangwon-do, central Korea. Forest Science and Technology 7(1):30-37.