

RCP 8.5 기후변화 시나리오에 따른 소나무림과 굴참나무림의 산림 탄소 동태 변화 추정 연구

이종열¹ · 한승현¹ · 김성준¹ · 장한나¹ · 이명종² · 박관수³ · 김춘식⁴ · 손영모⁵ · 김래현⁵ · 손요환^{1*}
¹고려대학교 대학원 환경생태공학과, ²강원대학교 산림자원학과, ³충남대학교 산림환경자원학과,
⁴경남과학기술대학교 산림자원학과, ⁵국립산림과학원 기후변화연구센터
(2014년 8월 6일 접수; 2015년 1월 22일 수정; 2015년 1월 27일 수락)

Estimating the Changes in Forest Carbon Dynamics of *Pinus densiflora* and *Quercus variabilis* Forests in South Korea under the RCP 8.5 Climate Change Scenario

Jongyeol Lee¹, Seung Hyun Han¹, Seongjun Kim¹, Hanna Chang¹, Myong Jong Yi²,
Gwan Soo Park³, Choonsig Kim⁴, Yeong Mo Son⁵, Raehyun Kim⁵ and Yowhan Son^{1*}

¹Department of Environmental Science and Ecological Engineering, Graduate School, Korea University,
Seoul 136-713, Korea

²Department of Forest Resources, Kangwon National University, Chuncheon City, Kangwon-do 200-701, Korea

³Department of Environment and Forest Resources, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

⁴Department of Forest Resources, Gyeongnam National University of Science and Technology,
Jinju City, Gyeongsangnam-do 660-758, Korea

⁵Department of Forest and Climate Change, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

(Received August 6, 2014; Revised January 22, 2015; Accepted January 27, 2015)

ABSTRACT

Forests contain a huge amount of carbon (C) and climate change could affect forest C dynamics. This study was conducted to predict the C dynamics of *Pinus densiflora* and *Quercus variabilis* forests, which are the most dominant needleleaf and broadleaf forests in Korea, using the Korean Forest Soil Carbon (KFSC) model under the two climate change scenarios (2012–2100; Constant Temperature (CT) scenario and Representative Concentration Pathway (RCP) 8.5 scenario). To construct simulation unit, the forest land areas for those two species in the 5th National Forest Inventory (NFI) data were sorted by administrative district and stand age class. The C pools were initialized at 2012, and any disturbance was not considered during the simulation period. Although the forest C stocks of two species generally increased over time, the forest C stocks under the RCP 8.5 scenario were less than those stocks under the CT scenario. The C stocks of *P. densiflora* forests increased from 260.4 Tg C in 2012 to 395.3 (CT scenario) or 384.1 Tg C (RCP 8.5 scenario) in 2100. For *Q. variabilis* forests, the C stocks increased from 124.4 Tg C in 2012 to 219.5 (CT scenario) or 204.7 (RCP 8.5 scenario) Tg C in 2100. Compared to 5th NFI data, the initial value of C stocks in dead organic matter C pools seemed valid. Accordingly, the annual C sequestration rates of the two species over the simulation period under the RCP 8.5 scenario (65.8 and 164.2 g C m⁻² yr⁻¹ for *P. densiflora* and *Q. variabilis*) were lower than those values under the CT scenario (71.1 and 193.5 g C m⁻² yr⁻¹ for *P. densiflora* and *Q. variabilis*). We concluded that the C sequestration potential of *P. densiflora* and *Q. variabilis* forests could be decreased by climate change. Although there were uncertainties from parameters and model structure, this study could contribute to elucidating the C dynamics of South Korean forests in future.

Key words: Climate change scenario, KFSC model, Forest carbon, Carbon sequestration rate



* Corresponding Author : Yowhan Son
(yson@korea.ac.kr)

I. 서론

지구 평균 기온은 꾸준히 상승하고 있고 미래에도 기온 상승 추세가 이어질 것으로 예상됨에 따라 (IPCC, 2007), 생태계 탄소 순환 연구에 대한 관심이 증대되고 있다. 특히 산림은 지구 표면의 약 13%를 차지하고 있으며, 육상 생태계 탄소 저장량의 50% 이상이 산림 생태계에 저장되어 있다(Dixon *et al.*, 1994). 현재 전세계 산림은 약 861 Pg C의 탄소를 저장하고 있으며, 매년 2.4 Pg C의 탄소를 흡수하는 탄소 흡수원으로 추정된다(Pan *et al.*, 2011).

한편, 산림 탄소 동태는 기후변화에 의하여 영향을 받을 수 있다. 예를 들어, 산림 탄소 저장량은 기온 상승에 따른 식물 생장기간 연장 및 광합성 촉진 등으로 인하여 증가하지만(McMahon *et al.*, 2010), 유기물 분해 촉진으로 인하여 감소할 수도 있다(Davidson and Janssens, 2006; Lützow and Kögel-Knabner, 2009). 이러한 불확실성 때문에 우리나라에서도 기후변화에 따른 산림 탄소 저장량의 변화를 모델로 모의하는 연구들이 진행되고 있다. 특히 식생 탄소는 기후변화에 의하여 꾸준히 증가한다는 결과와(Hong *et al.*, 2011; Kwon *et al.*, 2012), 점차 감소한다는 상반된 결과가 모의된 바 있다(Choi *et al.*, 2009; Shin *et al.*, 2013). 또한 토양 탄소는 기후변화에 의하여 꾸준히 감소한다는 결과와(Kwon *et al.*, 2012), 가까운 미래에는 증가하다가 2100년에 가까워질수록 감소한다는 다른 결과가 보고되었다(Lee *et al.*, 2009; Park *et al.*, 2013). 그러나 우리나라 전역을 대상으로 산림 식생과 토양뿐만 아니라 기타 고사유기물(낙엽층, 고사목)까지 포함하여 기후변화에 따른 탄소 동태를 모의한 연구는 진행된 바 없다.

소나무와 굴참나무는 우리나라 산림에서 가장 우점하는 침엽수종과 활엽수종으로 기후변화에 따른 두 수종의 탄소 동태 변화는 우리나라 산림 탄소 동태 변화의 지표가 될 수 있다. 최근 적은 입력 자료로 우리나라 산림 식생의 생장부터 토양 탄소 배출에 이르기까지의 탄소 동태를 모의할 수 있는 한국형 산림토양탄소모델(Korean Forest Soil Carbon model; KFSC 모델)이 개발 및 개선되었다(Yi *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2014). 따라서 본 연구에서는 KFSC 모델을 이용하여 Representative Concentration Pathway (RCP) 8.5 기후변화 시나리오(2012–2100)에 따른 우리나라 소나

무림과 굴참나무림의 식생 및 고사유기물 탄소 저장량(Tg C)과 연간 탄소 흡수율($g\ C\ m^{-2}\ yr^{-1}$)의 변화를 추정하고자 한다. 또한 기후변화가 없다고 가정한 시나리오를 적용한 결과와 비교하여 기후변화가 산림 탄소 동태에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

II. 재료 및 방법

2.1. KFSC 모델

국내에서 해외 산림탄소모델을 적용할 때 필요한 입력 자료와 파라미터에 대한 연구가 부족한 실정이므로 (Lee *et al.*, 2010) 적은 자료로 산림 탄소 동태를 모의할 수 있는 KFSC 모델을 개발하였다(Yi *et al.*, 2013). KFSC 모델은 주로 식생의 생장 및 고사, 유입된 고사유기물의 분해 등을 모의하며, 모델의 구조는 크게 식생(수간, 가지, 잎, 주근, 세근)과 1차 고사유기물(지상부 고사목(Aboveground Woody Debris from Stem; AWDS), 지상부 낙지(Aboveground Woody Debris from Branch; AWDB), 지상부 낙엽(Aboveground Litter; ALT), 지하부 고사목(Belowground Woody Debris; BWD), 지하부 리터(Belowground Litter; BLT)), 그리고 2차 고사유기물(지상부 부식질

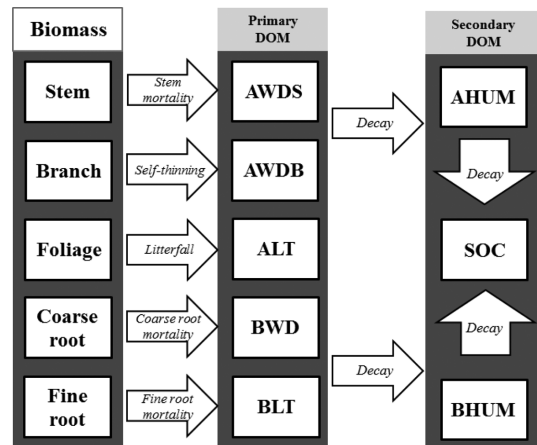


Fig. 1. The structure of the modified Korean Forest Soil Carbon (KFSC) model. The model consists of biomass (stem, branch, foliage, coarse root, and fine root) compartment, primary dead organic matter (DOM) compartment (AWDS: Aboveground Woody Debris from Stem, AWDB: Aboveground Woody Debris from Branch, ALT: Aboveground Litter, BWD: Belowground Woody Debris, and BLT: Belowground Litter), and secondary DOM (AHUM: Aboveground Humus, BHUM: Belowground Humus, and SOC: Soil Organic Carbon) compartment (Lee *et al.*, 2014).

Table 1. Parameters of the Gompertz function for stem volume for *Pinus densiflora* and *Quercus variabilis* (Lee *et al.*, 2014). $Volume_{(age)} = a \times \exp(b \times \exp(c \times age))$

Species	Site index	Parameter		
		a	b	c
<i>P. densiflora</i>	10	182.8	-7.73	-0.0902
	12	231.5	-8.75	-0.0954
	14	285.6	-9.55	-0.0991
	16	345.0	-10.20	-0.1018
<i>Q. variabilis</i>	12	190.3	-3.81	-0.0883
	14	233.6	-3.91	-0.0903
	16	280.8	-3.96	-0.0918
	18	311.5	-4.01	-0.0930

(Aboveground Humus; AHUM), 지하부 부식질 (Belowground Humus; BHUM), 토양유기탄소(Soil Organic Carbon; SOC)) 등으로 구성되어 있다(Fig. 1; Lee *et al.*, 2014).

식생의 생장은 다음과 같은 과정을 통하여 모의하였다. 우선 임분수확표(Korea Forest Service, 2012)를 이용한 생장식(Table 1; Lee *et al.*, 2014)을 통하여 수간의 임분재적 생장량을 모의하고, 이에 목재 밀도(소나무: 0.474, 굴참나무: 0.720; Korea Forest Research Institute, 2010)와 탄소 농도(50%)를 곱하여 수간 탄소 저장량을 구하였다. 다른 부위의 탄소 저장량을 계산하기 위하여 수간 탄소 저장량에 상대생장식(Korea Forest Research Institute, 2010)을 바탕으로 추정된 생체량전환계수(Biomass Conversion Factor (BCF); Table 2; Lee *et al.*, 2014)를 곱하였다. 그리고 식생 탄소 저장량의 변화를 통하여 연간 순생산량을 모의하

였다.

식생으로부터의 고사유기물 유입은 식생 탄소 저장고별 전환율(Table 3; Lee *et al.*, 2014)을 바탕으로 추정되며, 발생한 고사유기물은 1차 고사유기물 탄소 저장고로 유입된다. 유입된 고사유기물의 분해량은 고사유기물 탄소 저장고별 분해율(Table 3; Lee *et al.*, 2014)을 바탕으로 추정되며, 1차 고사유기물이 분해되면 대기 중으로 방출되거나 2차 고사유기물 탄소 저장고로 유입되고, 토양유기탄소 저장고의 유기물이 분해되면 대기 중으로 방출된다. 산림 탄소 저장고들은 IPCC 우수실행지침(Good Practice Guidance; IPCC, 2014)에 따라 식생, 고사목, 낙엽층, 토양 탄소 저장고로 분류하였다. 모델의 구동에 필요한 파라미터들을 설정하기 위하여 국내 문헌자료를 이용하였으며, 국내에 적절한 자료가 부족한 경우 해외 문헌자료를 이용하였다.

2.2. 연구 대상지 및 입력 자료

본 연구는 5차 국가산림자원조사 자료를 바탕으로, 우리나라 9개 도와 7개 특별·광역시에 분포하고 있는 소나무림(2,152,000 ha)과 굴참나무림(556,000 ha)을 대상으로 수행되었다. 각 행정구역별 소나무림과 굴참나무림을 6개 영급(1영급: 1-10년, 2영급: 11-20년, 3영급: 21-30년, 4영급: 31-40년, 5영급: 41-50년, 6영급 이상: 51년 이상)으로 나누고, 이를 바탕으로 250개의 모의 단위(소나무림 146개, 굴참나무림 104개)를 구성하였다. 국내 소나무림과 굴참나무림의 총 탄소 저장량(Tg C)은 모의 단위별 연간 산림탄소 저장량을 합산하여 추정하였다. 단위 면적당 산림 탄소 저

Table 2. The biomass conversion factors (BCFs) for *Pinus densiflora* and *Quercus variabilis* by site indices (Lee *et al.*, 2014). $BCF_{(age)} = a \times age^b$

Species	Site index	Compartment					
		Branch		Foliage		Coarse root	
		a	b	a	b	a	b
<i>P. densiflora</i>	10	0.3574	-0.1397	0.8357	-0.6735	0.3962	-0.0545
	12	0.3515	-0.1397	0.7772	-0.6746	0.3936	-0.0545
	14	0.3462	-0.1396	0.7203	-0.6730	0.3912	-0.0545
	16	0.3419	-0.1401	0.6811	-0.6754	0.3893	-0.0547
<i>Q. variabilis</i>	12	0.0458	0.0907	0.0907	-0.2120	0.8268	-0.1060
	14	0.0479	0.0889	0.0889	-0.2110	0.8181	-0.1060
	16	0.0500	0.0871	0.0871	-0.2110	0.8099	-0.1060
	18	0.0516	0.0858	0.0858	-0.2120	0.8039	-0.1060

Table 3. Parameters of the KFSC model (Lee *et al.*, 2014). The abbreviations of dead organic matter pools are explained in Section 2.1. and Fig. 1

Parameter	Species	Value	Reference
<i>Turnover rate (yr⁻¹)</i>			
Stem	Pd	0.002	Noh (2011)
	Qv	0.0045	Kurz <i>et al.</i> (1992)
Branch	Pd	0.061	Lee <i>et al.</i> (2014)
	Qv	0.057	Lee <i>et al.</i> (2014)
Foliage	Pd	0.385	Lee <i>et al.</i> (2014)
	Qv	0.934	Lee <i>et al.</i> (2014)
Coarse root	Pd and Qv	0.02	Kurz <i>et al.</i> (1992)
Fine root	Pd	1.23	Park <i>et al.</i> (2010)
	Qv	1.195	Park <i>et al.</i> (2006)
<i>Decay constant (k; yr⁻¹)</i>			
AWDS and AWDB	Pd	0.137	Noh (2011)
	Qv	0.058	Yoon <i>et al.</i> (2011)
ALT	Pd	0.317	Lee <i>et al.</i> (2014)
	Qv	0.402	Lee <i>et al.</i> (2014)
BWD	Pd	0.137	Assumed to equal to the decay constant of AWDS
	Qv	0.058	Assumed to equal to the decay constant of AWDS
BLT	Pd and Qv	0.462	Kim (2002)
AHUM	Pd	0.012	Liski <i>et al.</i> (2005)
	Qv	0.02	Liski <i>et al.</i> (2005)
BHUM	Pd	0.012	Liski <i>et al.</i> (2005)
	Qv	0.02	Liski <i>et al.</i> (2005)
SOC	Pd	0.0012	Liski <i>et al.</i> (2005)
	Qv	0.0017	Liski <i>et al.</i> (2005)

(Pd: *Pinus densiflora*, Qv: *Quercus variabilis*)

장량(Mg C ha⁻¹)은 앞서 추정된 총 탄소 저장량을 모의 면적으로 나누어 계산하였다. 또한 모의 기간 동안의 평균 연간 탄소 증가율(Tg C yr⁻¹)은 2012년에서 2100년까지 증가한 탄소 저장량을 모의 기간으로 나누어 계산하였다.

주요 입력 자료는 임령, 임분 성장 보정항(growth modifier), 평균 기온 등으로 구성되어 있다. 모의 단위별 대표 임령은 모의 단위 내 제5차 국가산림자원조사 조사구 실측치(목편)의 평균값으로 하였다. 대표 지위지수는 Lee *et al.*(2014)에서 제시한 방법을 이용하여 특정 임령에서의 임분 재적량을 임분수확표(Korea Forest Service, 2012)와 비교함으로써 추정하였다. 임분 성장 보정항은 임분재적 실측치와 수간 생장식(Table 1)으로부터 추정된 임분재적 예측치 간의 차이를 보정하는 요소이다(Park *et al.*, 2013). 각 모의 단위별 임분 성장 보정항은 지위지수별 임분생장식을 통하여 추정된 단위 면적당 임분재적에 대한 제5

차 국가산림자원조사의 임분재적 실측치의 비율을 계산한 뒤, 본 보정항을 임분생장식에 곱하여 생장량의 차이를 보정하였다(Park *et al.*, 2013). 기온 자료는 기후변화가 나타나지 않고 2011년과 2012년의 평균 기온이 2100년까지 유지되는 시나리오(Constant Temperature scenario; CT 시나리오)와 RCP 8.5 시나리오(2012–2100)을 이용하였다. RCP 8.5 시나리오는 해상도 12.5 km × 12.5 km의 행정구역별 연평균 기온을 바탕으로 구축하였으며, 2012년과 2100년 예상 기온의 차이는 행정구역에 따라 약 6.7–7.5°C로 나타났다(Climate Change Information Center; <http://climate.go.kr>).

2.3. 탄소 저장고 초기화 및 가정

우리나라 산림은 목재 수탈과 한국 전쟁을 겪으며 황폐된 이후, 1974년부터 시작된 조림사업을 통하여 회복되기 시작하였다. 1–4영급 임분은 단계적인 조림 사업을 통하여 형성되었으며, 그 이전에는 목재 수탈,

한국 전쟁, 그리고 산림 훼손으로 인하여 산림 형성이 억제된 것으로 가정하였다. 따라서 1-4영급 임분은 Lee *et al.*(2014)에서 적용한 초기화 방식을 이용하여 1954년부터 산림 형성이 시작되기 전까지 황폐화 된 상태로 유지되었다고 가정한 후, 산림 형성이 시작된 해부터 2012년까지의 산림 동태를 모의하여 초기화하였다. 반면 5영급 이상 임분은 조림 사업이 대대적으로 시작된 1974년 이전에 형성되었으며, 1-4영급 임분과 달리 황폐화를 겪지 않았다고 가정하였다. 따라서 5영급 이상 임분의 탄소 저장고들은 일반 스핀업 (spin-up) 과정을 통하여 초기화하였다(Kurz *et al.*, 2009). 스핀업 과정은 탄소 저장량이 안정화되는 단계 까지 산림 탄소 동태를 모의한 뒤, 안정화된 시점의 탄소 저장고별 탄소 저장량을 초기값으로 설정하는 방법이다. 본 연구에서는 80년 주기의 개벌을 가정한 후, 연속적인 두 번의 벌기령에서의 토양 탄소 저장량 차이가 1% 미만인 곳을 초기화 시점으로 설정하였다. 초기화 된 시점부터 벌채, 산불, 병충해 등의 교란은 모의 과정에 반영되지 않았다. 탄소 저장고들의 초기값은 제5차 국가산림자원조사 보고서(Korea Forest Research Institute, 2011)와 결과를 비교함으로써 검증하였다. 또한 기온 변화에 따른 식생 성장률의 변화를 반영하기 위하여 Park *et al.*(2013)에서 이용한 Miami equation (Lieth, 1975; Grosso *et al.*, 2008)을 적용하였다.

$$NPP_{alt}(gC\ m^{-2}\ yr^{-1}) = NPP_{std} \times \frac{1 + e^{(1.315 - 0.119 \times T_{std})}}{1 + e^{(1.315 - 0.119 \times T_{alt})}} \quad (1)$$

이 식에서 NPP_{alt} 는 변화된 온도 하에서의 순일차생산량, NPP_{std} 는 초기 온도에서의 순일차생산량, T_{alt} 는 RCP 8.5 시나리오 상의 온도, T_{std} 는 초기 온도를 의미한다. 이 때 기온 상승으로 인한 NPP의 증가율은 각 부위별로 모두 동일하다고 가정하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 식생 탄소 저장량 변화

두 시나리오 하에서 소나무림과 굴참나무림의 식생 탄소 저장량은 지속적으로 증가하나, 그 증가율은 시간의 경과에 따라 점차 감소하는 것으로 나타났다 (Fig. 2). 그런데 소나무림의 식생 탄소 저장량(Tg C)은 두 시나리오 하에서 차이가 거의 나타나지 않았으며, 2012년에 132.7에서 2100년에는 227.8로 증가

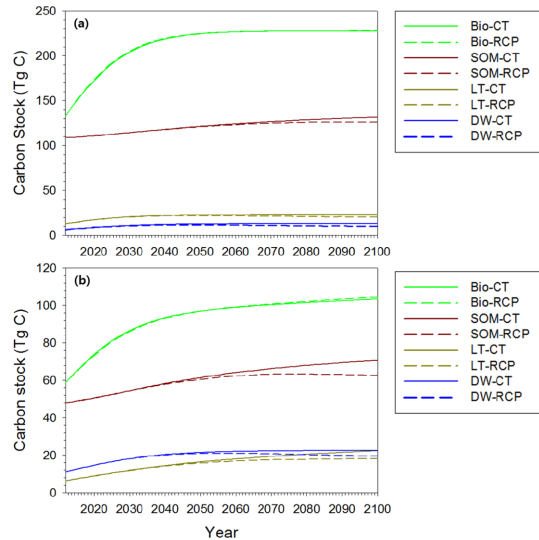


Fig. 2. The carbon stock of each pool (Bio: Biomass, SOM: Soil Organic Matter, LT: Litter, and DW: Dead Wood) in *Pinus densiflora* (a) and *Quercus variabilis* (b) forests from 2012 to 2100 under the Constant Temperature scenario (CT) and the RCP 8.5 climate change scenario (RCP).

하였다(Fig. 2a). 또한 단위 면적당 식생 탄소 저장량 ($Mg\ C\ ha^{-1}$)은 소나무림에서 2012년부터 2100년까지 각각 61.7에서 105.8(CT 시나리오) 및 106.0(RCP 8.5 시나리오)으로 증가하였다. 한편 굴참나무림의 식생 탄소 저장량(Tg C)은 CT 시나리오 하에서 2012년에 58.9에서 2100년에는 103.4로 증가하였고, RCP 8.5 시나리오 하에서 2012년에 58.9에서 2100년에는 104.5로 증가하였다(Fig. 2b). 또한 단위 면적당 식생 탄소 저장량($Mg\ C\ ha^{-1}$)은 굴참나무림에서 2012년부터 2100년까지 각각 105.9에서 186.1(CT 시나리오) 및 188.0(RCP 8.5 시나리오)으로 증가하였다. 따라서 두 가지 수종의 총 식생 탄소 저장량과 단위 면적당 식생 탄소 저장량은 2100년까지 약 70% 이상 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 증가 경향은 과거 조림 사업 이후 임분의 성숙에 따른 식생 탄소 저장량의 증가가 미래에도 지속될 것임을 의미한다(Li *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2014). 한편 두 시나리오 하에서 2013년 연간 탄소 흡수량($Tg\ C\ yr^{-1}$)은 소나무림과 굴참나무림에서 각각 5.8과 2.1로 나타났으며, 2100년에는 임분의 노령화로 인하여 거의 평형 상태에 도달하는 것으로 보인다. 그리고 모의 기간 동안의 평균 연간 탄소 흡수량은($Tg\ C\ yr^{-1}$) 소나무림과 굴참나무림에서 각각 1.1과 0.5로 나타났다.

CT 시나리오와 RCP 8.5 시나리오 간 식생 탄소 저장량의 차이가 뚜렷하게 나타나지 않는 이유는 본 연구에서 기온 외에 다른 환경 요인들을 고려하지 않았기 때문으로 판단된다. 즉 기후변화의 영향을 모의할 때 기온의 상승 뿐만 아니라 대기 중 이산화탄소의 농도를 고려하면 식생 탄소의 뚜렷한 증가가 나타나는 결과가 있으며(Cramer *et al.*, 2001; Davi *et al.*, 2006), 국외 생태계 탄소 모형에서는 식생 탄소의 생장을 모의할 때 기온뿐만 아니라 대기 중 이산화탄소의 농도, 수분, 광량, 양분 유효도 등의 환경 요인들을 고려하고 있다(Chen *et al.*, 2000; Sitch *et al.*, 2003; Krinner *et al.*, 2005). 따라서 식생 탄소의 변화를 보다 정확히 모의하기 위하여 기온뿐만 아니라 대기 중 이산화탄소의 농도 및 수분 조건과 같은 환경 요인들을 동시에 고려해야 할 것으로 판단된다.

3.2. 고사유기물 탄소 저장량의 초기값 및 변화

고사유기물 탄소 저장량의 초기값은 제5차 국가산림자원조사 자료와 비교하였을 때 타당한 것으로 판단된다. 즉 모의 결과 초기 토양과 낙엽층 탄소 저장량(Mg C ha^{-1})은 소나무림에서 65.6 ± 44.5 과 5.7 ± 2.8 으로 나타났으며, 굴참나무림에서 95.8 ± 73.1 과 11.0 ± 6.2 로 나타났다. 그런데 제5차 국가산림자원조사(Korea Forest Research Institute, 2011) 결과에 따르면 토양과 낙엽층 탄소 저장량(Mg C ha^{-1})은 침엽수림에서 59.9 ± 31.2 와 5.6 ± 2.6 이고, 활엽수림에서 96.1 ± 43.2 와 4.3 ± 3.1 로 토양 탄소 저장량은 모델 초기값과 실측치가 유사한 것으로 나타났다. 반면 낙엽층 탄소 저장량은 소나무림의 경우 초기값이 실측치와 유사하나, 굴참나무림에서는 초기값이 실측치에 비하여 높은 것으로 보인다. 본 연구에서 이용한 굴참나무림 낙엽 분해율은 Lee *et al.*(2014)이 북부 신갈나무림과 중부 및 남부 굴참나무림에서 수행한 연구를 바탕으로 추정된 것이다. 낙엽의 분해율은 남부 및 중부 굴참나무림에 비하여 북부 신갈나무림에서 낮기 때문에(Korea Forest Research Institute, 2013), 굴참나무림만을 연구 대상으로 한정된 본 연구에서는 더 높은 분해율이 적용되어야 할 것으로 생각된다. 따라서 낮게 적용된 굴참나무림의 낙엽 분해율이 굴참나무림에서 낙엽층 탄소 저장량이 과대하게 추정된 원인으로 사료된다.

두 시나리오 하에서 소나무림과 굴참나무림의 고사

유기물 탄소 저장량은 지속적으로 증가하는 것으로 나타났으나, RCP 8.5 시나리오 하에서는 2100년에 가까워질수록 평형에 도달하거나 소폭 감소하는 경향이 나타났다(Fig. 2). 즉 소나무림의 고사유기물 탄소 저장량(Tg C)은 2012년에 127.7(토양: 108.8, 낙엽층: 12.8, 고사목: 6.1)에서 2100년에는 167.5(CT 시나리오; 토양: 131.7, 낙엽층: 23.0, 고사목: 12.8) 혹은 156.3(RCP 8.5 시나리오; 토양: 126.3, 낙엽층: 20.2, 고사목: 9.8)으로 증가할 것으로 나타났다(Fig. 2a). 한편 굴참나무림의 고사유기물 탄소 저장량(Tg C)은 2012년에 65.5(토양: 48.0, 낙엽층: 6.5, 고사목: 11.0)에서 2100년에는 116.1(CT 시나리오; 토양: 70.9, 낙엽층: 22.5, 고사목: 22.7) 혹은 100.2(RCP 8.5 시나리오; 토양: 62.6, 낙엽층: 18.2, 고사목: 19.4)로 증가할 것으로 추정되었다(Fig. 2b).

RCP 8.5 기후변화 시나리오 하에서 고사유기물 탄소 저장량이 CT 시나리오에 비하여 낮으며, 모의 후기에 탄소 저장량이 감소하는 이유는 고사유기물의 분해율이 유입량을 초과하기 때문으로 보인다. 한편 식생 탄소 저장량은 두 시나리오간 차이가 거의 없었으므로 고사유기물 유입량은 유사하다. 고사유기물 분해율은 기온 상승에 의하여 지수함수적으로 증가한다(Davidson and Janssens, 2006; Noh *et al.*, 2010). 따라서 기온 상승이 지배적인 RCP 8.5 시나리오에서는 모의 후기부터 고사유기물 탄소 저장량이 감소하는 것으로 보인다. 그러나 기후변화에 의한 순일차생산량의 증가가 종속영양호흡량보다 높을 때, 고사유기물 탄소 저장량은 미래에도 꾸준히 증가할 수 있다(Cramer *et al.*, 2001; Ju *et al.*, 2007).

우리나라 선행 연구들에서 토양 탄소 저장량은 2100년이 가까워짐에 따라 뚜렷하게 감소하였는데(Lee *et al.*, 2009; Park *et al.*, 2013), 본 연구에서는 평형에 도달하거나 소폭 감소하였다. 이것은 탄소 저장고 초기화 방법의 차이에서 기인한 것으로 보인다(Peltoniemi *et al.*, 2006). Lee *et al.*(2009)와 Park *et al.*(2013)은 초기 토양 탄소 저장량이 안정화 되었다고 가정된 스핀업 과정을 이용하여 토양 탄소를 초기화하였으나, 본 연구는 우리나라 산림의 역사를 고려하여 안정화 되어있지 않은 상태로 초기화 하였다. 따라서 선행 연구들의 모의 과정에서는 상대적으로 이른 시기에 토양 탄소 동태가 평형에 도달한 후, 기온 상승에 의하여 토양 탄소 저장량이 감소하였을 것으로 보인다.

3.3. 연간 탄소 흡수율

소나무림과 굴참나무림의 연간 탄소 흡수율은 시간이 경과함에 따라 전체적으로 감소하는 추세를 보이며, RCP 8.5 시나리오 하에서는 모의 기간 후기에 산림 탄소의 순손실이 발생할 것으로 예측되었다(Fig. 3). 소나무림의 연간 탄소 흡수율($\text{g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$)은 2013년에 316.1(CT 시나리오; 식생: 268.0, 고사유기물: 48.1)과 325.5(RCP 8.5 시나리오; 식생: 267.4, 고사유기물: 58.1)에서 2100년에는 6.0(CT 시나리오; 식생: 0.22, 고사유기물: 5.8) 혹은 -11.1(RCP 8.5 시나리오; 식생: 0.04, 고사유기물: -11.2)으로 꾸준히 감소하였다(Fig. 3a). 한편 굴참나무림의 연간 탄소 흡수율($\text{g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$)은 2013년에 558.0(CT 시나리오; 식생: 372.1, 고사유기물: 185.9)과 563.1(RCP 8.5 시나리오; 식생: 371.5, 고사유기물: 191.6)에서 2100년에는 53.9(CT 시나리오; 식생: 16.1, 고사유기물: 37.8) 혹은

-20.2 (RCP 8.5 시나리오; 식생: 20.7, 고사유기물: -40.9)로 감소하였다(Fig. 3b). 모의 기간 동안 연간 탄소 흡수율($\text{g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$)은 소나무림에서 71.1(CT 시나리오)와 65.8(RCP 8.5 시나리오), 굴참나무림에서 193.5(CT 시나리오)와 164.2(RCP 8.5 시나리오)로 나타났다.

굴참나무림의 연간 탄소 흡수율이 소나무림에 비하여 높게 나타나는 이유는 식생 탄소 저장량의 증가율이 굴참나무림에서 더 높고, 그로 인한 유기물 유입량이 많기 때문으로 판단된다. 임분수확표에 따르면 동일 지위지수 하에서 두 수종의 임목 축적 증가율은 유사하다(Korea Forest Service, 2012). 그러나 Lee *et al.*(2014)로부터 계산한 생체량확장계수는 소나무림보다 굴참나무림에서 더 높았다. 즉 임령이 10년부터 100년이 될 때까지 소나무림의 생체량확장계수는 0.83에서 0.72로 꾸준히 감소하였지만, 굴참나무림의 생체량확장계수는 1.32에서 1.38로 꾸준히 증가하였다.

시간의 경과에 따른 연간 탄소 흡수율의 감소는 임분의 노령화와 기온 상승에 의한 것으로 보인다. 본 연구에서는 산림의 교란을 반영하지 않았으므로 임령이 지속적으로 증가한다. 노령화된 임분은 식생의 생장이 거의 일어나지 않아 식생에 의한 연간 탄소 흡수율은 0에 수렴하게 된다(Gower *et al.*, 1996). 반면 RCP 8.5 시나리오 하에서는 기온의 지속적인 증가에 의하여 고사유기물의 분해량이 크게 증가하므로 연간 탄소 흡수율은 모의 기간 후기부터 음의 값을 나타냈다. 이는 기후변화 시나리오 하에서 연간 탄소 흡수율은 시간이 경과함에 따라 감소하며, 2100년에 산림이 탄소 배출원이 될 수 있다는 국외 연구 결과들과 일치한다(Davi *et al.*, 2006; Shanin *et al.*, 2011; Hlásny *et al.*, 2014).

3.4. 불확실성

본 연구 결과에는 모델의 구조, 입력 자료, 파라미터 등으로부터 기인하는 불확실성이 존재한다. 우선 KFSC 모델의 단순한 구조에 의한 불확실성이 있을 수 있다. KFSC 모델의 구조는 다양한 수목의 생리적 기작을 포함하고 탄소 저장고들을 화학적 조성에 따라 분류한 해외 모델들에 비하여 단순한 구조를 가지고 있다(Sitch *et al.*, 2003; Liski *et al.*, 2005; Kurz *et al.*, 2009; Yi *et al.*, 2013). 그러나 기존에 KFSC 모델을 적용한 연구들이 수행된 바 있으며(Park *et al.*,

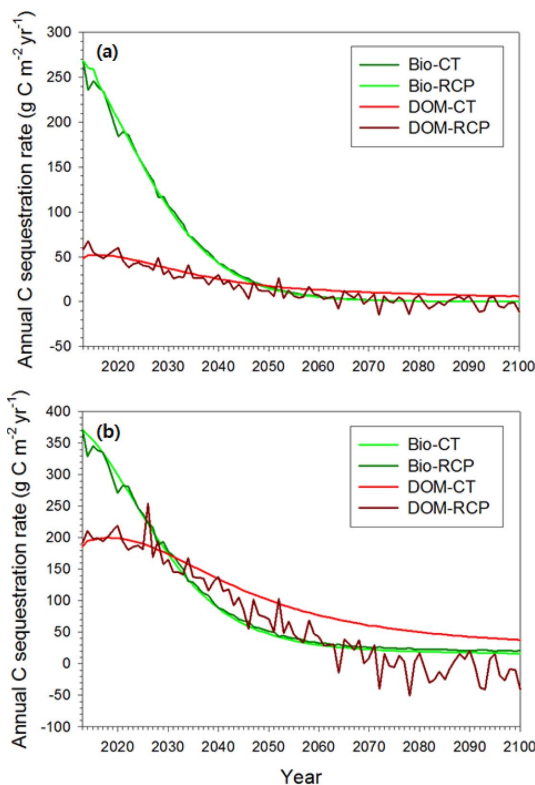


Fig. 3. The annual carbon sequestration rates of *P.densiflora* (a) and *Q. variabilis* (b) forests from 2013 to 2100 under the Constant Temperature scenario (CT) and the RCP 8.5 climate change scenario (RCP). The annual C sequestration rates were explained by biomass (Bio) and dead organic matter (DOM).

2013; Yi *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2014), 국내 산림 탄소 동태를 적절하게 모의하고 있으므로 구조에 의한 불확실성은 낮을 것으로 추정된다. 다음으로 입력 자료에 의한 불확실성이 예상된다. 본 모델의 입력 자료는 임령, 임분 성장 보정항, 평균 기온 등이며 공간 해상도는 도 단위이다. 한편 국내 산림 탄소를 모의한 선행 연구들의 경우 수 km 내외의 공간 해상도를 바탕으로 입력 자료를 구축하였다(Yoo *et al.*, 2013; Cui *et al.*, 2014; Lee *et al.*, 2014). 따라서 본 연구에서 사용하고 있는 도 단위의 비교적 낮은 공간 해상도는 환경의 변이를 반영하는데 어느 정도의 한계가 존재하므로 후속 연구에서 공간 해상도를 향상시켜야 할 것으로 사료된다. 마지막으로 모델 파라미터에 의한 불확실성이 존재할 수 있다. 모델 파라미터는 산림 탄소 동태 추정 시 불확실성을 발생시키는 주된 요소이므로 모의 지역에 적합한 파라미터를 사용하는 것이 중요하다(Peltoniemi *et al.*, 2006). 본 모델에 적용한 파라미터 중 일부는 해외 연구 결과로부터 인용하였으나, 대부분의 파라미터들은 국내 연구 결과로부터 인용되었다(Yi *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2014). 따라서 본 연구에서는 모델 파라미터에 의한 불확실성이 매우 제한적일 것으로 사료된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 RCP 8.5 시나리오와 기온 변화가 없다고 가정한 CT 시나리오 하에서 2012년부터 2100년까지의 우리나라 소나무림과 굴참나무림 내 식생 및 고사유기물 탄소 저장량 변화와 연간 탄소 흡수율을 추정하였다. 모의 초기에는 임분이 성숙함에 따라 산림 탄소 저장량의 증가 경향이 뚜렷하였으나, 모의 기간 후기에는 임분의 노령화로 인하여 연간 탄소 흡수율이 뚜렷하게 감소하였다. 특히 RCP 8.5 시나리오 하에서는 높은 기온 증가가 고사유기물 분해를 촉진시킴에 따라 미래 산림 탄소 저장량이 소폭 감소되는 것으로 모의되었다. 따라서 기온이 많이 상승할수록 소나무림과 굴참나무림의 탄소 흡수 잠재력은 낮아질 것으로 예상된다. 본 연구 결과는 모델의 구조 및 파라미터로부터 불확실성이 존재하지만 기온 증가에 따른 식생의 성장과 고사유기물의 분해를 모의하여 식생, 낙엽층, 고사목, 토양 탄소 저장량의 변화를 구분하여 제시하였으므로 미래 산림 탄소 정량화에 기여

할 것으로 기대된다.

적 요

산림은 많은 양의 탄소를 저장하고 있으며, 산림 탄소 동태는 기후변화에 따라 변화할 것으로 예상된다. 본 연구는 우리나라 산림에서 가장 우점하는 침엽수종과 활엽수종인 소나무림과 참나무림을 대상으로 최근 개발 및 개선된 한국형산림토양탄소모델(Korean Forest Soil Carbon model; KFSC model)을 이용하여 두 가지 기후변화 시나리오(2012년 기온이 2100년까지 유지되는 시나리오(CT), Representative Concentration Pathway (RCP) 8.5 시나리오) 하에서의 산림 탄소 동태를 예측하였다. 5차 국가산림자원조사 자료로부터 소나무림과 굴참나무림 조사구들을 추출한 뒤, 이를 행정구역(9개 도, 7개 특별·광역시) 및 영급(1-5영급, 6영급 이상)별로 분류하여 탄소 동태 모의 단위를 설정하였다. 탄소 저장고는 2012년을 기준으로 초기화하였으며, 모의 기간인 2012년부터 2100년까지 모든 교란은 고려하지 않았다. 모의 결과 산림 탄소 저장량은 시간이 경과함에 따라 전반적으로 증가하지만, CT 시나리오에 비하여 RCP 8.5 시나리오 하에서 산림 탄소 저장량이 낮게 나타났다. 소나무림의 탄소 저장량(Tg C)은 2012년에 260.4에서 2100년에는 각각 395.3(CT 시나리오) 및 384.1(RCP 8.5 시나리오)로 증가하였다. 굴참나무림의 탄소 저장량(Tg C)은 2012년에 124.4에서 2100년에는 219.5(CT 시나리오) 및 204.7(RCP 8.5 시나리오)로 각각 증가하였다. 5차 국가산림자원조사 자료와 비교한 결과, 고사유기물 탄소 저장량의 초기값은 타당한 것으로 나타났다. 모의 기간 동안 소나무림과 굴참나무림의 연간 탄소 흡수율($g C m^{-2} yr^{-1}$)은 CT 시나리오 하에서 각각 71.1과 193.5, RCP 8.5 시나리오 하에서 각각 65.8과 164.2로 추정된다. 따라서 우리나라 소나무림과 굴참나무림의 탄소 흡수 잠재력은 지구 온난화에 의하여 감소할 것으로 예상된다. 비록 모델의 구조와 파라미터로부터 불확실성이 존재하지만 본 연구는 미래 산림 탄소 동태 파악에 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 산림청(S111314L100120)과 환경부

(C314-00131-0408-0)의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- Chen, W., J. Chen, J. Liu, and J. Cihlar, 2000: Approaches for reducing uncertainties in regional forest carbon balance. *Global Biogeochemical Cycles* **14**(3), 827-838.
- Choi, S., W.-K. Lee, H. B. Kawk, and S. Kim, 2009: Predicting the vegetation distribution and terrestrial carbon-fluxes using MC1 model. *ESRI User Conference Proceeding*, 1-8.
- Cramer, W., A. Bondeau, F. I. Woodward, I. C. Prentice, R. A. Betts, V. Brovkin, P. M. Cox, V. Fisher, J. A. Foley, A. D. Friend, C. Kucharik, M. R. Lomas, N. Ramankutty, S. Sitch, B. Smith, A. White, and C. Young-Molling, 2001: Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: results from six dynamic global vegetation models. *Global Change Biology* **7**(4), 357-373.
- Cui, G., W.-K. Lee, D. Kim, E. J. Lee, H. Kwak, H.-A. Choi, D.-A. Kwak, S. Jeon, and W. Zhu, 2014: Estimation of forest carbon budget from land cover change in South and North Korea between 1981 and 2010. *Journal of Plant Biology* **57**(4), 225-238.
- Davi, H., E. Dufrêne, C. Francois, G. L. Maire, D. Loustau, A. Bosc, S. Rambal, A. Granier, and E. Moors, 2006: Sensitivity of water and carbon fluxes to climate changes from 1960 to 2100 in European forest ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology* **141**(1), 35-56.
- Davidson, E. A., and I. A. Janssens, 2006: Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature* **440**(7081), 165-173.
- Dixon, R. K., A. M. Solomon, S. Brown, R. A. Houghton, M. C. Trexler, and J. Wisniewski, 1994: Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* **263**(5144), 185-190.
- Gower, S. T., R. E. McMurtrie, and D. Murty, 1996: Aboveground net primary production decline with stand age: potential causes. *Trends in Ecology and Evolution* **11**(9), 378-382.
- Grosso, S. D., W. Parton, T. Stohlgren, D. Zheng, D. Bachlet, S. Prince, K. Hibbard, and R. Olson, 2008: Global potential net primary production predicted from vegetation class, precipitation, and temperature. *Ecology* **89**(8), 2117-2126.
- Hlásny, T., Z. Barcza, I. Barka, K. Merganièova, R. Sedmak, A. Kern, J. Pajtik, B. Balazs, M. Fabrika, and G. Churkina, 2014: Future carbon cycle in mountain spruce forests of Central Europe: modelling framework and ecological inferences. *Forest Ecology and Management* **328**(15), 55-68.
- Hong, J., C. Shim, M. Lee, G. Baek, W. Song, S. Jeon, and Y. Park, 2011: Net primary production changes over Korea and climate factors. *Korean Journal of Remote Sensing* **27**(4), 467-480. (in Korean with English abstract)
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007: *Climate change 2007: synthesis report*, Core Writing Team, R. K. Pachauri, and A. Reisinger (Eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 104pp.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014: *2013 Revised supplementary methods and good practice guidance arising from the Kyoto Protocol*, K. N. Tanabe, Srivastava, J. Baasansuren, M. Fukuda, and T. Troxler (Eds.). IPCC, Geneva, Switzerland.
- Ju, W. M., J. M. Chen, D. Harvey, and S. Wang, 2007: Future carbon balance of China's forests under climate change and increasing CO₂. *Journal of Environmental Management* **85**(3), 328-562.
- Kim, C., 2002: Mass loss rates and nutrient dynamics of decomposing fine roots in a sawtooth oak and Korean pine stands. *Korean Journal of Ecology* **25**(4), 235-239.
- Korea Forest Research Institute, 2010: *Study on the basis of forest carbon accounting in Korea*. Korea Forest Service, Daejeon, Korea, 436pp. (in Korean)
- Korea Forest Research Institute, 2011: *The 5th national forest inventory report*. Korea Forest Research Institute, Korea, 166pp.
- Korea Forest Research Institute, 2013: *Development of greenhouse gas inventory system in forest sector of post-2012 climate regime*. Korea Forest Service, Korea, 477pp. (in Korean).
- Korea Forest Service, 2012: *Table of tree volume/mass and yield table*, Korea Forest Service, Korea, 261pp. (in Korean)
- Krinner, G., N. Viovy, N. Noblet-Ducoudré, G. Ogée, J. Polcher, P. Friedlingstein, P. Ciais, S. Sitch, and I. C. Prentice, 2005: A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles* **19**(1), 1-33.
- Kurz, W. A., M. J. Apps, T. M. Webb, and P. J. McNamee, 1992: *Carbon budget of the Canadian forest sector: phase I (inf. Rep. NOR-X-326)*. Northern Forestry Centre, Canada.
- Kurz, W. A., C. C. Dymond, T. M. White, G. Stinson, C. H. Shaw, G. J. Rampley, C. Smyth, B. N. Simpson, E. T. Neilson, J. A. Trofymow, J. Metsaranta, and M. J. Apps, 2009: CBM-CFS3: a model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards. *Ecological Modelling* **220**(4), 480-504.
- Kwon, S.-S., S.-H. Choi, and S.-D. Lee, 2012: Estimation of spatial-temporal net primary productivity and soil carbon storage change in the capital area of South Korea under climate change. *Environmental Impact Assessment* **21**(5), 757-765. (in Korean with English abstract)
- Lee, A. R., N. J. Noh, T. K. Yoon, S. K. Lee, K. W. Seo, W.-K. Lee, Y. Cho, and Y. Son, 2009: Estimation of forest soil carbon stocks with Yasso using a dendrochronological approach. *Journal of Korean Forest Society* **98**(6), 791-

798. (in Korean with English abstract)
- Lee, A. R., K. Yi, Y. Son, R. H. Kim, C. Kim, G. S. Park, K. H. Lee, and M. J. Yi, 2010: Approaches for developing a Korean model through analysis of overseas forest soil carbon models. *Journal of Korean Forest Society* **99**(6), 791-801.
- Lee, J., T. K. Yoon, S. Han, S. Kim, M. J. Yi, G. S. Park, C. Kim, Y. M. Son, R. Kim, and Y. Son, 2014: Estimating the carbon dynamics of South Korean forests from 1954 to 2012. *Biogeosciences* **11**(17), 4637-4650.
- Li, X., M. J. Yi, Y. Son, G. Jin, and S. S. Han, 2010: Forest biomass carbon accumulation in Korea from 1954 to 2007. *Scandinavian Journal of Forest Research* **25**(6), 554-563.
- Lieth, H., 1975: Modeling the primary productivity of the world. *Primary productivity of the Biosphere*, Springer Berlin Heidelberg, 237-263.
- Liski, J., T. Palosou, M. Peltoniemi, and R. Sievänen, 2005: Carbon and decomposition model Yasso for forest soils. *Ecological Modelling* **189**(1-2), 168-182.
- Lützow, M., and I. Kögel-Knabner, 2009: Temperature sensitivity of soil organic matter decomposition—what do we know?. *Biology and Fertility of Soils* **46**(1), 1-15.
- McMahon, S. M., G. G. Parker, and D. R. Miller, 2010: Evidence for a recent increase in forest growth. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **107**(8), 3611-3615.
- Noh, N. J., Y. Son, S. K. Lee, T. K. Yoon, K. W. Seo, C. Kim, W. K. Lee, S. W. Bae, and J. H. Hwang, 2010: Influence of stand density on soil CO₂ efflux for a *Pinus densiflora* forest in Korea. *Journal of Plant Research* **123**(4), 411-419.
- Noh, N. J., 2011: Carbon and nitrogen dynamics in a natural *Pinus densiflora* forest with different stand densities. Ph.D. Dissertation. Korea University.
- Pan, Y., R. A. Birdsey, J. Fang, R. Houghton, P. E. Kauppi, W. A. Kurz, O. L. Phillips, A. Shvidenko, S. L. Lewis, J. G. Canadell, P. Ciais, R. B. Jackson, S. W. Pacala, A. D. McGuire, S. Piao, A. Rautiainen, S. Sitch, and D. Hayes, 2011: A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* **333**(6045), 988-993.
- Park, C. W., J. Lee, M. Yi, C. Kim, G. S. Park, R. H. Kim, K. H. Lee, and Y. Son, 2013: Estimation of change in soil carbon stock of *Pinus densiflora* forests in Korea using KFSC model under RCP 8.5 climate change scenario. *Climate Change Research* **4**(2), 77-93. (in Korean with English abstract)
- Park, G. S., J. G. Lim, D. H. Kim, and S. Ohga, 2006: Net fine root carbon production in *Quercus* natural forest ecosystems of Korea. *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University* **51**(1), 57-61.
- Park, G. S., G. N. Kang, S. J. Lee, H. G. Lee, S. Y. Lee, H. M. Chae, and S. Ohga, 2010: Net fine root carbon production in *Pinus densiflora*, *Pinus koraiensis*, *Larix leptolepis* and *Quercus acutissima* stands, Gongju area, Chungnam province, Korea. *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University* **55**(1), 73-76.
- Peltoniemi, M., T. Palosou, S. Monni, and R. Mäkipää, 2006: Factors affecting the uncertainty of sinks and stocks of carbon in Finnish forests soils and vegetation. *Forest Ecology and Management* **232**(1), 75-85.
- Shanin, V. N., A. S. Komarov, A. V. Mikhailov, and S. S. Bykhovets, 2011: Modelling carbon and nitrogen dynamics in forest ecosystems of Central Russia under different climate change scenarios and forest management regimes. *Ecological Modelling* **222**(14), 2262-2275.
- Shin, J. Y., M. S. Won, K. Kim, and M. Y. Shin, 2013: Predicting the effect of climate change on forest biomass by different ecoprovinces and forest types in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **15**(3), 119-129. (in Korean with English abstract)
- Sitch, S., B. Smith, I. C. Prentice, A. Arneth, A. Bondeau, W. Cramer, J. O. Kaplan, S. Levis, W. Lucht, M. T. Sykes, K. Thonicke, and S. Venevsky, 2003: Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biology* **9**(2), 161-185.
- Yi, K., C. W. Park, S. R. Ryu, K. H. Lee, M. J. Yi, C. Kim, G. S. Park, R. Kim, and Y. Son, 2013: Simulating the soil carbon dynamics of *Pinus densiflora* forests in central Korea. *Scandinavian Journal of Forest Research* **28**(3), 241-256.
- Yoo, S., D. A. Kwak, G. Cui, W.-K. Lee, H. Kwak, A. Ito, Y. Son, and S. Jeon, 2013: Estimation of the ecosystem carbon budget in South Korea between 1999 and 2008. *Ecological Research* **28**(6), 1045-1059.
- Yoon, T. K., H. Chung, R.-H. Kim, N. J. Noh, K. W. Seo, S. K. Lee, W. Jo, and Y. Son, 2011: Coarse woody debris mass dynamics in temperate natural forests of Mt. Jumbong, Korea. *Journal of Ecology and Field Biology* **34**(1), 115-125.