

산림생태계 기후변화 조절서비스 계량화 방법
- 탄소 저장 및 흡수기능 계량화 방법을 중심으로 -

Quantifying Climate Change Regulating Service of Forest Ecosystem
- Focus on Quantifying Carbon Storage and Sequestration -

최현아* · 이우균*[†] · 전성우** · 김준순*** · 곽한빈* · 김문일* · 김재욱** · 김정택***

Choi, Hyun-Ah*, Lee, Woo-Kyun*[†], Jeon, Seong Woo**, Kim, Joon Sun***,
Kwak, Hanbin*, Kim, Moonil*, Kim, Jaek** and Kim, Jung Teak***

*고려대학교 대학원 환경생태공학과, **한국환경정책·평가연구원
***강원대학교 산림경영학과

*Department of Environmental Science and Ecological Engineering,
Korea University, Seoul, Korea

**Korea Environment Institute, Seoul, Korea

***Department of Forest Management, Kangwon National University, Chuncheon, Korea

요 지

산림생태계는 우리에게 다양한 재화와 서비스를 제공하고 있다. 재화와는 다르게, 산림으로부터 생산되는 생태계 서비스는 시장기작을 통해 가격형태로 평가가 이루어지지 못하는 문제를 지니고 있다. 이러한 평가의 불분명성은 산림생태계 서비스 관련 의사결정에 갈등을 초래하고 있다. 산림생태계 서비스에 대한 중요성과 그에 따른 합리적 의사결정의 필요성을 감안할 때, 산림생태계 서비스의 객관적인 평가가 도입되어야 한다. 최근 기후변화에 관심이 증대되면서, 탄소흡수원인 산림의 탄소저장 및 흡수기능에 대한 객관적 계량화의 필요성이 높아지고 있다. 이에 본 연구에서는 산림의 탄소저장 및 흡수기능을 평가하는 다양한 국내·외 모형의 규모, 출력인자, 입력인자 확보 가능성을 분석하여, 국내 적용 가능성을 분석하였다. 분석 결과, 탄소저장 및 흡수면에서는 대부분의 모형이 국내에 적용 가능하였으며, 산림의 다른 조절기능(대기정화, 홍수저감, 침식조절, 수절정화 등)까지 포함할 수 있는 모형은 상대적으로 적은 것으로 평가되었다. 본 연구는 탄소저장 및 흡수원으로서의 산림생태계의 조절서비스를 계량화하는 연구에 도움이 될 것이다.

키워드 : 산림생태계 서비스, 조절서비스, 탄소저장 및 흡수, 계량화

[†] Corresponding author : E-mail: leewk@korea.ac.kr

ABSTRACT

Forest ecosystem provides variety goods and services for human being. Unlike goods, forest ecosystem services could not be easily priced by market mechanism. This uncertainty has been caused to conflict in decision-making related forest ecosystem services. Quantification of forest ecosystem services is required to understand the importance of ecosystem services and their contribution to decision-making. As a growing concern of climate change, it is necessary to quantify and calculate carbon storage and sequestration in forest. In this study, for quantifying carbon storage and sequestration, we compared scale, output, input data availability of the models and analyzed the applicability of the models to Korea. The results of this study show that most models are applicable for quantifying carbon storage and sequestration. However, relatively few models are applicable for other regulating services (air quality regulation, flood mitigation, erosion control, water quality, etc.) of forest. This study would be helpful for quantifying regulating services of forest ecosystem research.

Key words : Forest Ecosystem Service, Regulating Service, Carbon Storage and Sequestration, Quantifying

1. 서론

생태계로 인한 이익은 식량 및 물과 같은 기본 공급에서부터 수질과 기후조절까지 이르는 다양한 생태계 상품과 서비스(ecosystem goods and services)로 나타낼 수 있다(Costanza *et al.*, 1997). 이중 자연으로부터 인간이 받는 환경적 이익, 즉 생태계 서비스(ecosystem service)도 수량적으로 평가되어야 그와 관련된 의사결정이 합리적으로 이루어질 수 있다. 새천년생태계평가(Millennium Ecosystem Assessment, MA, 2005)는 생태계와 인간후생에 대한 의사결정지원을 위한 과학적 정보제공을 일차적 목표로 하고 있으며, 생태계 서비스를 그 역할에 따라 공급서비스(provisioning service), 조절서비스(regulating service), 지원서비스(supporting service), 문화서비스(cultural service) 등의 4가지로 구분하고, 범주 아래 25개 개별서비스를 정리하였다. MA(2005)에 의하면 공급서비스는 생태계로부터 얻는 생산물(재화), 조절서비스는 생태계 과정을 조절함으로써 얻어지

는 편익, 문화서비스는 생태계로부터 얻는 비물질적 편익, 지원서비스는 다른 생태계 서비스를 생산하기 위해 필요한 서비스로 정의할 수 있다.

최근, 생태계 서비스의 유형 및 기능을 반영한 생태계 서비스 계량화 연구가 다양하게 진행되고 있다. MA(2005)에서 구분한 생태계 서비스(조절, 공급, 문화, 지원)를 바탕으로 현재 이용 가능한 정보를 이용하여 유럽의 지역 및 국가단위를 평가한 RUBICODE(Rationalising Biodiversity Conservation in Dynamic Ecosystems) 프로젝트(Vandewalle *et al.*, 2009), 생태계 서비스의 다중규모(multi-scale) 통합평가가 가능한 GUMBO(Global Unified Model of the Biosphere; Boumans *et al.*, 2002)와 지역(regional) 평가가 가능한 InVEST(Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs; Nelson *et al.*, 2009) 등이 대표적인 생태계 서비스 계량화 방법으로 발표된 바 있다. 국내의 경우, 우리나라 국토 면적의 64%를 차지하면서 다양한 생태계 서비스를 제공하고 있는 산림을 대상으로 통계자료 및 현지조사 결과

를 토대로 공익적 기능을 계량화한 바 있다(김종호, 1989; 김종호 등, 2005; 2007; 2010; 2012; 오동하 등, 2011).

육지면적의 약 1/3, 지구 전체 광합성의 2/3 담당하고 있는 산림은 탄소흡수원으로서 기후 및 환경을 조절하는 기능을 담당하고 있다. 기후변화, 사막화 문제 등과 같은 환경문제가 심각해지면서 산림의 탄소흡수 및 저장 관련 기후조절기능은 더욱 중요시되고 있다. 산림은 광합성작용을 통하여 지구온난화의 주요 원인의 하나인 이산화탄소(carbon dioxide, CO₂)를 흡수·저장하여 지구온난화를 방지하고, 산소를 생산하여 각 지역(local, regional, global) 단위의 온도, 습도 등에 영향을 주고 있다(산림청, 2009; Costanza *et al.*, 1997; de Groot *et al.*, 2002). 산림의 기후변화 조절기능을 계량화하기 위한 이전 노력은 탄소순환과 질소순환을 포함한 생지화학적 순환(bio-geochemical cycle)과의 상호작용 및 기후시스템에 관한 피드백을 포함하고 있다(Prentice *et al.*, 2001). 또한, 대기, 식물 바이오매스 또는 토양유기물에 저장한 CO₂를 포함한 황산화물, 질소산화물 등의 온실가스(greenhouse gases) 조절에 영향을 주는 과정을 강조하고 있다(Foley *et al.*, 2003; Meir *et al.*, 2006; Chapin *et al.*, 2008).

산림의 탄소 저장 및 흡수 관련 조절기능을 보다 정확하게 계량화하기 위해서는 지형적, 환경적 특성 등을 고려할 수 있도록 지리정보시스템(Geographic Information Systems, GIS)을 통하여 다양한 규모로 탄소 수지를 평가·통합할 필요가 있다(Heywood *et al.*, 1994; Grêt-Regamey *et al.*, 2008). 이러한 방법을 통해 계량화된 결과는 환경정책 관련 의사결정에 매우 중요한 자료를 제공할 수 있다. 그러나 국내 연구의 경우, 지역적·공간적 특성을 반영한 계량화 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 산림의 탄소 저장 및 흡수량 계량화 방법에 대한 평가수준을 고도화하기 위해 해외 산림 탄소 모형의 국내 적용

가능성을 비교·검토한 후 대안점을 도출하고자 하였다.

2. 연구범위 및 방법

본 연구에서는 1) 산림의 탄소 저장 및 흡수기능을 공간적으로 평가하기 위해 국내외 탄소저장량 예측 모형의 규모, 구성 등을 비교·분석하였으며, 2) 각 모형의 입출력인자의 파악을 통해 국가 및 지역단위의 평가가 가능한지를 분석하였다. 이를 통해 3) 각 모형의 특징 및 입력인자 확보면에서 국내 적용 가능성을 살펴보고, 생태계 서비스 기능에 대한 계량화 방법을 제안하고자 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 산림 탄소저장 및 흡수관련 모형 종류

산림의 탄소 저장 및 흡수 기능 계량화를 위해 기존에 개발된 모형은 크게 기상 및 환경요인을 포함하여 광합성 및 호흡기작에 근거하여 예측하는 과정기반모형(Process Based Model)과 산림의 성장 및 수확에 근거하여 예측하는 성장기반모형(Growth Based Model)으로 구분할 수 있다. 과정기반모형 중 대표적으로 BEAMS(Biosphere model integrating eco-physiological and mechanistic approaches using satellite data; Sasai *et al.*, 2005), CEVSA(Carbon Exchange between Vegetation, Soil, and the Atmosphere; Cao *et al.*, 1998), GUMBO(Boumans *et al.*, 2002), MC1(MAPSS-CENTURY Model; Bachelet *et al.*, 2001), SIM-CYCLE(Simulation Model of the Carbon Cycle in land Ecosystem; Ito *et al.*, 2005), VISIT(Vegetation Integrated Simulator for Trace gases; Ito *et al.*, 2006) 등이 있으며, 성장기반모형으로 CO₂FIX-CAFOR(Carbon Sequestration in Forested Landscapes; Noble *et al.*, 2000), Ecosystem-based carbon curves(FORECAST; Wel-

ham *et al.*, 2001), CBM-CFS3(Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector; Kurz *et al.*, 2009) 등이 대표적이다. 이 외 산림성장모형(Forest Growth Model)을 이용한 임상별 탄소 저장량 추정모형(Yu *et al.*, 2013)이 있다. 본 연구에서는 이들을 구성, 규모, 입출력인자 확보가능성 측면에서 비교하였다. 각 모형은 입력인자와 그에 따른 출력인자를 가지고 있으며, 기상학적 인자(온도, 강수량, 풍속, 습도 등)와 토양인자(토양 탄소, 토양 수분, 수증기압 등)가 필요하다(Table 1).

3.2 출력인자(구성)

BEAMS 모형은 위성 관측 자료와 기상자료를 입력 자료로 탄소, 에너지, 물의 흐름을 시뮬레이션한 모형으로서 스트레스 계산을 포함하는 수문(Hydrological) 및 탄소 순환(Carbon cycle) 서브모형으로 구성된다(Sasai *et al.*, 2005). BEAMS 모형은 지표면의 기상변화, 식생형태 및 토양 형태의 차이 등을 알 수 있으며, 탄소수지량을 계산할 수 있다. CEVSA 모형은 생리반응(기공전도, 광합성, 호흡작용과 증산작용 등), 식물 전체(광선, 물, 탄소와 질소에 대한 평형흡수 및 질소와 탄소에 대해 뿌리, 줄기, 잎 간에 배분과 일차 생산력에 영향), 생태계(식생-토양-대기시스템이 물, 탄소, 질소 순환의 상호 작용 및 순 생태계 생산력에 대한 영향)의 여러 척도를 결합하여 분석할 수 있다(Cao *et al.*, 1998; 2002). CEVSA 모형을 통해 순1차 생산량, 순생태계 생산량, 토양 탄소 저장량, 식생 탄소 저장량을 모의할 수 있다. GUMBO 모형은 육상모형으로서 생태계 서비스 기능에 관한 토지이용 변화를 평가할 수 있다(Boumans *et al.*, 2002). MC1 모형은 기후변화가 생태계 구조와 기능에 미치는 영향을 평가하기 위한 모형으로, 산림의 식생변화에 미치는 영향과 지상부 식생(잎, 가지, 줄기), 지하부 식생(세균, 주근), 고사물질에서의 탄소 순환을 예측

할 수 있다(Bachelet *et al.*, 2001). SIM-CYCLE 모형은 식물 성장, 토양 탄소의 축적, 지구 환경 변화에 따른 생태계의 변화 등을 모형화하여 대기와 육지, 생태계 간의 이산화탄소 변환을 모의할 수 있다(Ito *et al.*, 2005). VISIT 모형을 구동하기 위해서는 다양한 환경공간 정보가 입력자료로 필요하며, 대기와 생태계 간의 생지화학적 순환을 파악할 수 있다. 공간적으로 한 지점에서부터 지구 규모까지 시뮬레이션할 수 있으며, 시간적으로는 일별에서부터 월별까지 시뮬레이션이 가능하다(Ito *et al.*, 2006).

CBM-CFS3 모형은 산림 바이오매스, 고사유기물, 토양탄소를 대상으로 하며, 다양한 자연교란 및 산림경영 시나리오를 토대로 산림의 총 탄소 저장량과 흡수량을 예측하는 것이 가능하다(Kurz *et al.*, 2009). InVEST 모형은 이해관계자 협의로 시작하는 의사결정 시스템으로 ArcGIS 기반 14개 서브모형으로 구성되며, 탄소 저장량과 같은 생물물리학적(biophysical) 조건 또는 탄소 저장량의 순현재가치(Net Present Value, NPV)를 추정할 수 있다(Natural Capital Project 웹사이트). 임상도와 국가산림자원조사(National Forest Inventory, NFI) 자료 기반 임상별 탄소 저장량 추정모형(Yu *et al.*, 2013)은 임목 성장만을 고려하여 산림 재적과 탄소 흡수량을 추정할 수 있다. 임령에 따른 산림 탄소 저장량 변화 추정모형(남기준, 2013)은 산림사업의 유무와 수종별 벌기령을 고려하여 탄소 저장량을 추정하였으며, 김중호 등(2010)은 대기오염물질 흡수량은 추정식을 이용하여 이산화탄소 흡수량을 추정하였다. 임분단위 분석결과를 토대로 경영단위의 통합분석이 가능한 CO₂FIX-CAFOR 모형은 각 임분 단위에 대한 산림조사 자료, 성장 및 수확자료, 탄소계수 등을 토대로 바이오매스와 토양에 저장되는 탄소 축적 및 탄소 저장고 사이의 이동량을 년 단위로 계정할 수 있다(Noble *et al.*, 2000). FORECAST 모형은 각 임분 단위에 대한 산림조사 자료, 성장

Table 1. Input and output factors of the models

Models	Input factors	Output factors	Scale	Type	Reference
BEAMS	<ul style="list-style-type: none"> - Air temperature, precipitation vapor pressure - Incoming surface solar radiation - Net surface short/long wave radiation - Wind speed - fAPAR - Leaf Area Index (LAI) - Land cover map - Soil texture - Soil depth - Elevation 	<ul style="list-style-type: none"> - Net Primary Product (NPP) - Net Ecosystem Product (NEP) - Autotrophic respiration - Litter fall - Soil decomposition 	G	P	Sasai <i>et al.</i> (2005)
CEVSA	<ul style="list-style-type: none"> - Monthly precipitation, temperature - Atmospheric CO₂, humidity, climate - Soil moisture, soil carbon, vegetation type 	<ul style="list-style-type: none"> - Vegetation distribution - Soil carbon storage - NPP - NEP - Vegetation carbon storage 	G	P	Cao <i>et al.</i> (1998)
GUMBO	<ul style="list-style-type: none"> - Human population - GWP (economic goods and services) changes (economic investments, consumption) 	<ul style="list-style-type: none"> - Global temperature - Atmospheric carbon - Sea level - Water - Gossil and alternative energy consumption - Area of different land covers 	G	P	Boumans <i>et al.</i> (2002)
MC1	<ul style="list-style-type: none"> - Climatic data: Precipitation, temperature, vapor pressure, wind speed, solar radiation - Soil data: Gridded maps of soil texture, rock fraction, soil radiation, soil depth, soil texture, bulk density 	<ul style="list-style-type: none"> - Actual evapotranspiration - Soil carbon - Run off - Total tree NPP - Max LAI trees and grasses - Vegetation ecosystem Modeling and analysis project (VEMAP) vegetation classes 	G	P	Bachelet <i>et al.</i> (2001)
SIM-CYCLE	<ul style="list-style-type: none"> - Climate condition: Ground surface temperature, air temperature at 2 m height, total precipitation, mean cloudiness, soil temperature at 10 and 200 cm depths, specific humidity at 2 m above the ground, wind velocity - Soil condition: Rooting depth, water-holding capacity, hydraulic conductivity - Secondary data: Day length, photosynthetic photon flux density, net radiation, soil water content 	<ul style="list-style-type: none"> - NPP - Gross primary production (GPP) - Leaf area index - Plant carbon stock - Soil carbon stock - Total carbon stock - Biomass turnover - Soil turnover - Radiation use efficiency - Water use efficiency 	G	P	Ito <i>et al.</i> (2005)

Table 1. 계속

Models	Input factors	Output factors	Scale	Type	Reference
VISIT	<ul style="list-style-type: none"> - Climate data: Daily maximum temperature, daily minimum temperature, daily precipitation, daily shortwave radiation, daily wind - Vapor pressure deficit - Soil data: Percent clay content, percent sand content, percent silt content, field capacity, wilting point, saturated water content, rooting depth, soil depth, soil type 	<ul style="list-style-type: none"> - NPP - NEP - GPP - Soil respiration - Heterotrophic respiration 	G	P	Ito <i>et al.</i> (2006)
CBM-CFS3	<ul style="list-style-type: none"> - Aboveground biomass - Belowground biomass - Aboveground dead organic matter - Belowground dead organic matter 	<ul style="list-style-type: none"> - Litter - Deadwood - Slow DOM - Soil carbon - Snags and aboveground Biomass - Belowground biomass stocks 	R	G	Kurz <i>et al.</i> (2009)
InVEST	<ul style="list-style-type: none"> - Land use map - Aboveground biomass - Belowground biomass - Soil organic matter - Dead organic matter 	<ul style="list-style-type: none"> - Total carbon stock 	R	G	Natural Capital Project
Statistical Forest Growth Model	<ul style="list-style-type: none"> - Forest Type Map (FTM) - Hydrological and Thermal Analogy Group (HyTAG) 	<ul style="list-style-type: none"> - Forest volume - Height 	R	G	Kwak <i>et al.</i> (2012)
Statistical Forest Growth Model	<ul style="list-style-type: none"> - FTM - National Forest Inventory (NFI) 	<ul style="list-style-type: none"> - Forest volume - Carbon storage 	R	G	Yu <i>et al.</i> (2013)
Statistical Forest Growth Model	<ul style="list-style-type: none"> - FTM - HyTAG - NFI - Final cutting age 	<ul style="list-style-type: none"> - Forest volume - Carbon storage 	R	G	Nam <i>et al.</i> (2013)
Statistical Model	<ul style="list-style-type: none"> - Growing stock - Forest bulk density - Biomass expansion factor - Carbon fraction 	<ul style="list-style-type: none"> - CO₂ sequestration - O₂ production 	R	G	Kim <i>et al.</i> (2010)
CO ₂ FIX-CAFOR	<ul style="list-style-type: none"> - Total carbon stored in living (above plus belowground) biomass - Carbon stored in soil organic matter - Carbon stored in wood products 	<ul style="list-style-type: none"> - Carbon in the atmosphere 	L	G	Noble <i>et al.</i> (2000)
FORECAST	<ul style="list-style-type: none"> - Total tree - Understory plants - Coarse woody debris - Litter - Soil carbon pools 	<ul style="list-style-type: none"> - Total forest ecosystem carbon projections 	L	G	Welham <i>et al.</i> (2001)

G: Global, R: Regional, L: Local, P: Process based model, G: Growth based model.

및 수확자료, 탄소계수 등을 토대로 바이오매스와 토양에 저장되는 탄소축적 및 탄소 저장고 사이의 이동량을 년 단위로 계정할 수 있다(Welham *et al.*, 2001).

3.3 모형 적용규모

본 연구에서 분석한 모형들의 공간해상도의 경우, 대부분 전 지구 단위 분석모형으로 BEAMS, CEVSA, GUMBO, MC1, SIM-CYCLE, VISIT 모형이 이에 해당한다. 전 지구적 규모의 모형은 생지화학학적 과정을 계산하기 위해 다양한 함수식이 결합되어 있으며, 생지구화학 및 미기후 서브 모듈 등을 가지고 있다. 이외 CBM-CFS3, InVEST, 통계모형의 경우 지역(국가)단위 규모로 평가가 가능하며, CO₂FIX-CAFOR, FORECAST 모형은 임분 단위로 분석할 수 있다.

3.4 입력자료 확보 가능성

전 지구 단위 모형 중 CEVSA, MC1, VISIT 모형과 지역(국가) 단위 모형 중 CBM-CFS3, InVEST, 성장모형, 통계모형이 입력자료 확보 가능성이 높게 나타났다. 기상 및 토양과 관련된 자료는 국내 기상청(<http://www.kma.go.kr>)과 농촌진흥청 흙토람(<http://soil.rda.go.kr>) 등에서 제공하는 기 구축된 자료와 실제 측정기구 설치를 통해 구축할 수 있다. 이외 국가산림자원조사 자료를 이용하여 임분단위 조사자료(평균수고, 평균흉고직경, 영급, 본수 등), 개체목단위 조사자료(수령, 흉고직경, 직경생장량 등), 지상 및 지하부 바이오매스 등을 추정할 수 있다. 그러나 전 지구 단위 모형 중 BEAMS, SIM-CYCLE 모형은 국내 적용을 위해 측정해야할 자료가 있다(Table 2).

모형에서 가장 중요한 요소는 입력자료에 의해 모형을 예측하고 추정하는 데만 그치는 것이 아니라, 현장자료를 이용하여 얼마만큼 정확하게

접근했는지, 모형의 결과 값을 검증할 수 있어야 한다(김순아 등, 2009). 기존 산림의 탄소 저장 및 흡수에 관한 계량화 연구 중 국가산림조사 자료를 이용하여 탄소 저장량을 산출한 경우, 국가산림조사의 표본점은 전국을 대상으로 4 km 간격으로 설치되어 미조사 지점에 대해 산림자원 정보의 공간적 분포를 산출하기 어려운 한계를 지니고 있다. 이를 극복하기 위해, 국내외적으로 공간정보를 이용한 생태학적 연구와 다양한 통계 및 공간분석방법으로 산림 바이오매스의 공간적 분포를 도출하고 있다(Cao *et al.*, 2002). 또한, 산림성장모형을 이용한 탄소 저장량 추정은 특정 시기의 임목재적을 이용하고 있다.

3.5 국내 구동가능 모형의 구현 결과

최근 CEVSA, MC1, VISIT, CBM-CFS3, InVEST, 산림성장모형 등을 구현하여 탄소 저장 및 흡수기능을 계량화한 연구들이 보고된 바 있다. 본 연구에서는 동아시아 지역 탄소수지 평가 및 플럭스(flux) 관측 자료를 이용하여 검증 가능한 과정 기반형 VISIT 모형(유성진 등, 2012)에 대해 분석하였다. 또한, 지역(국가) 단위 규모에 적용이 가능하고, 입력자료 확보가 용이한 CBM-CFS3 모형(Carbon Budget Model for Korean Forest Sector, 이우균 등, 2013), 산림성장모형(Yu *et al.*, 2013; 남기준, 2013)과 본 연구에서 구동한 InVEST 모형과 통계모형에 대해 비교·분석하였다.

3.5.1 VISIT 모형

VISIT 모형은 국내 환경정보를 이용하여 총 10년(1999~2008년) 동안 연평균 총일차생산량(Gross Primary Production, GPP)과 순일차생산량(Net Primary Production, NPP)을 각각 91,890,000 tC yr⁻¹, 40,160,000 tC yr⁻¹로 추정하였다(유성진 등, 2012). 이 기간 동안 우리나라의

Table 2. Availability of input data for quantifying carbon storage and sequestration to Korea

Models	Applicable input factors	Available data in Korea	Source
BEAMS	Climatic data	○	KMA
	Solar radiation data (incoming solar radiation, net surface short/long wave radiation)	×	-
	Soil data	○	FAO, NAAS
CEVSA	Atmospheric data	○	KMA, NIMR, Lee(2008)
	Soil data	○	Yu(2006), Lee(2008)
	Vegetation data	○	Yu(2006), Kirilenko <i>et al.</i> (1998)
MC1	Climatic data	○	KMA, NIMR
	Soil data	○	NGII, FAO, ISRIC
	Vegetation data	○	KFS, NGII, Choi <i>et al.</i> (2011)
SIM-CYCLE	Climate condition (soil temperature at 200 cm depths)	×	-
	Soil condition (hydraulic conductivity)	×	-
	Secondary data (day length, net radiation, photosynthetic photon flux density)	×	-
VISIT	Climatic data	○	KMA
	Soil data	○	NAAS, USDA
	Secondary data	○	MEV, IGBP
CBM-CFS3	Biomass pool	○	KFS
	Aboveground DOM pool	○	KFS
	Belowground DOM pool	○	KFS
InVEST	Biomass pool	○	Eggleston <i>et al.</i> (2006), Hong <i>et al.</i> (2010), Hwang <i>et al.</i> (2010)
	Soil data	○	Hong <i>et al.</i> (2010)
Forest Growth Model	Forest type map	○	KFS
	National forest inventory	○	KFS
Statistical Model	Biomass pool	○	KFS

FAO: Food and Agriculture Organization, FTM: Forest Type Map, IGBP: International Geosphere-Biosphere Programme, KFS: Korea Forest Service, KMA: Korea Meteorological Administration, MEV: Ministry of Environment, NFI: National Forest Inventory, NAAS: National Academy of Agricultural Science under Rural Development Administration, NGII: National Geographic Information Institute, NIMR: National Institute of Meteorological Research, ISRIC: International Soil Reference and Information Centre, USDA: U.S. Department of Agriculture.

식생 생태계는 연간 $3,510,000 \pm 3,160,000 \text{ tC yr}^{-1}$ (mean \pm standard deviation of inter-annual variability)의 탄소를 흡수하는 역할을 수행한 것으로 추정하였다. 이를 인위적 탄소배출량 자료와 비교해 보면, 2007년 우리나라의 순생태계 생산량(Net Ecosystem Production, NEP)은 $4,610,000 \text{ tC yr}^{-1}$ 로 인위적 탄소배출량($137,000,000 \text{ tC yr}^{-1}$)의 3.3%를 상쇄시킨 것으로 나타났다. 공간적으로는 동해안 지역과 중남부 지방에서 순생태계 생산량(NEP)이 높게 나타났다(Fig. 1a).

3.5.2 CBM-CFS3 모형

CBM-CFS3 모형에 의해 추정된 탄소 저장량은 바이오매스가 함유하고 있는 탄소량과 고사유기물량 내 함유되어 있는 탄소량의 합으로 추정할 수 있다. CBM-CFS3 모형에서 추정된 바이오매스량은 생장이 활발한 청년기에는 지속적으로 증가하고, 고사유기물량은 약간 감소하는 추세를 보였으나, 장년기로 접어들면서 생장이 둔화되고 고사가 진행되면서 고사유기물량이 점차 증가하는 추세를 나타냈다(이우균 등, 2013). 바이오매스에서 전환되는 고사량과 살아있는 바이오매스의 총량은 거의 변함이 없으나, 전체 탄소 저장량은 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 2052년 이후에는 생장의 둔화와 산림의 노령화에 의해 증가량은 둔화하는 것으로 나타났다(Fig. 1b). CBM-CFS3 모형에서 추정된 탄소 저장량은 2010년 기준 47.00 tC ha^{-1} 로 나타났으며, 이는 자연교란 및 벌채가 없음을 가정한 결과이다.

3.5.3 산림생장모형

Yu *et al.*(2013)은 2010~2110년 동안 탄소 저장량 변화에 대해 임상도와 국가산림자원조사를 이용해 추정하였다. 이때 지형조건과 기후변화에 따른 성장변화는 고려하지 않고, 임목 생장만을

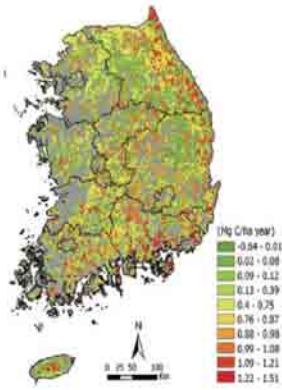
고려하였다. 연구 결과, 평균 수종별 재적(forest volume)은 ha당 $126.89 \text{ m}^3 \sim 246.61 \text{ m}^3$ 로 나타났으며, 탄소 저장량은 $50.51 \text{ tC ha}^{-1} \sim 99.76 \text{ tC ha}^{-1}$ 로 추정하였다. 또한, 50년 후(2060년)에는 산림 재적이 ha 당 226.81 m^3 로 증가한다고 추정하였으며, 산림 밀도가 높은 강원도 지방에서 높게 나타났다(Fig. 1c). 남기준(2013)은 지형조건, 기후변화에 따른 변화와 생장변화는 고려하지 않고, 산림사업 유무와 수종별 벌기령을 고려하여 탄소 저장량 변화를 추정하였다. 그 결과, 우리나라 현재(2010년 기준) 산림 재적은 ha 당 127.25 m^3 이며, 탄소 저장량은 72.87 tC ha^{-1} 로 추정하였다. 2040~2050년에는 탄소 저장량이 감소하여 82.61 tC ha^{-1} 가 될 것으로 추정하였으며, 다른 지역에 비해 백두대간 보호지역을 중심으로 탄소 저장량이 높게 나타났다(Fig. 1d).

3.5.4 InVEST 모형

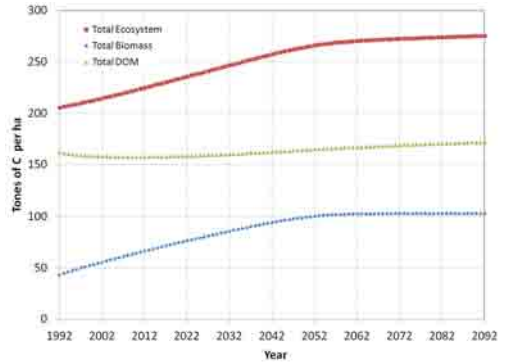
InVEST 모형에 의해 추정된 탄소 저장량은 지상부 및 지하부, 고사목, 토양 탄소 저장량을 모두 고려하였다. InVEST 모형에서 추정된 전국 산림 탄소 저장량은 $91 \sim 249 \text{ tC ha}^{-1}$ 로 총 $998,095,830 \text{ tC}$ (176 tC ha^{-1})으로 나타났으며, 임목 전체(지상부 및 지하부) 탄소 저장량은 $473,673,378 \text{ tC}$ (83.72 tC ha^{-1})로 추정되었다. 공간적으로는 강원도 일대를 중심으로 산림의 탄소 저장량이 높게 나타났으며, 서울을 포함한 경기도 일대에서도 높게 나타났다(Fig. 1e).

3.5.5 통계모형

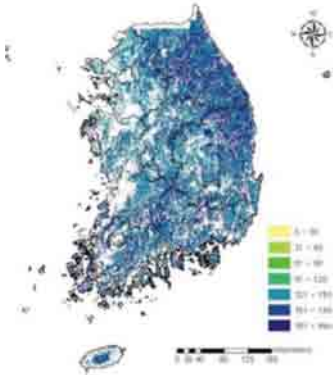
통계모형에 의해 추정된 이산화탄소 흡수량은 임목축적, 목재기본밀도, 10년간(2002~2011) 평균 축적 변화량을 고려하였다. 이때 탄소배출계수는 목재기본밀도(침엽수 0.47, 활엽수 0.80), 바이오매스 확장 계수(침엽수 1.6512, 활엽수 1.7202), 탄소전환계수(0.5)를 이용하였다(김종호 등, 2010). 그 결과, 전국 산림 이산화탄소 흡수량은 $66,464,477$



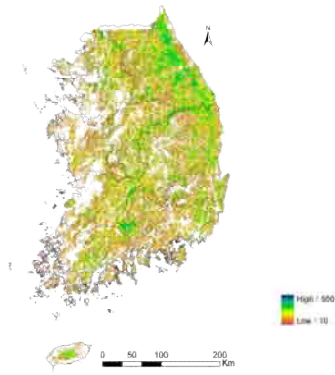
(a) Estimated NEP using VISIT model (유성진 등, 2012)



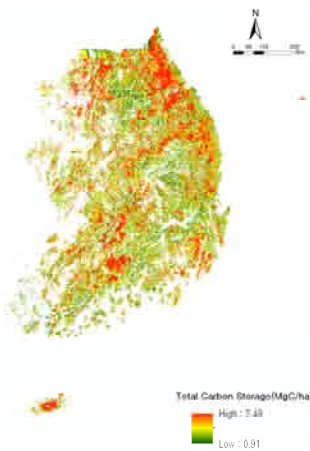
(b) Estimated carbon storage change using CBM-CFS3 model(이우균 등, 2013)



(c) Estimated carbon storage using forest growth model in 2060(Yu *et al.*, 2013)



(d) Estimated carbon storage using forest growth model in 2050(남기준, 2013)



(e) Estimated carbon storage using INVEST model



(f) Estimated carbon sequestration using statistic model

Fig. 1. The results of applicability model for quantifying carbon storage and sequestration in Korea.

tCO₂(11.75 tCO₂ ha⁻¹ yr⁻¹)로 나타났으며, 천연림 중 3~4영급 활엽수림(15.92 tCO₂ ha⁻¹ yr⁻¹)과 인공림 중 1~2영급 활엽수림(15.68 tCO₂ ha⁻¹ yr⁻¹)이 다른 영급에 비해 높게 나타났다. 공간적인 분포는 강원도를 포함한 백두대간 보호지역을 중심으로 높게 나타났다(Fig. 1f). 통계모형에 의해 추정된 이산화탄소 흡수량은 임목 전체로 확장하여 임목 축적 및 재적을 산출한 결과로 국립산림과학원이 추정한 국내 산림 대표 임상별, 영급별 이산화탄소 흡수량은 5.12~15.52 tCO₂ ha⁻¹ yr⁻¹로 기존 연구 결과와 유사하게 나타났다.

3.5.6 고찰

각 모형을 통해 도출된 탄소 저장량 결과는 국가적인 산림 조사를 통해 도출된 통계량을 통해 간접적으로 검증할 수 있을 것으로 사료된다. 현재 우리나라 산림의 평균 임목축적은 ha 당 125.6m³로 추정되고 있다(산림청, 2012). 이를 목재기본밀도 등의 탄소배출계수를 적용하여 탄소 저장량으로 변환하면, 침엽수의 경우 대표 수종인 소나무의 계수를 적용했을 때 51.65 tC ha⁻¹이며, 활엽수의 경우 대표 수종인 참나무류의 계수를 적용했을 때 88.28 tC ha⁻¹로 추정된다. 이를 이산화탄소량으로 변환하면 침엽수는 189.39 tCO₂ ha⁻¹, 활엽수는 323.71 tCO₂ ha⁻¹로 추정된다(산림청, 2011). 각 모형에서 추정된 탄소 저장량은 시공간적인 정보의 차이, 자연교란 자료 및 벌채자료의 부재, 임목 생장 만을 고려하거나, 지형 조건 등을 고려하지 않아 차이가 나타났다.

다양한 모형 구동 결과에서 볼 수 있듯이, 시공간적 규모, 사용 가능한 자료와 대체 가능한 자료 여부에 따른 평가로 결과의 정확성에 대한 한계를 보여주고 있다. 또한, 산림의 탄소 흡수 및 저장기능은 임종(천연림, 인공림)과 임상, 영급에 따라 가치가 다르게 평가되며(이경학 등, 2001; 손영모와 이경학, 2007; IPCC, 2003), 산림의 유형(도시림, 하천림 등) 또는 산림의 입지에

따라 다르게 평가될 수 있다(김해동과 구현숙, 2002; 박은진, 2009; UK NEA, 2011). 이를 극복하기 위해 향후에는 토양탄소(soil carbon), 낙엽, 지상 및 지하부 바이오매스(Biomass) 등이 추정 가능한 모형을 이용한 계량화 방법과 임상 및 생장 변화 등을 고려하여 보다 정확한 탄소계량화가 이루어져, 생태계 서비스의 파급효과를 정량적으로 평가할 수 있도록 지원해야 할 것이다.

3.6 산림생태계의 기타 조절서비스와의 연성

산림의 생장에 따라 다르게 나타나는 산림의 생태계 서비스 기능 및 가치를 적절하게 평가하기 어려운 한계가 있다(전성우 등, 2013). 이러한 문제를 해결하기 위해 산림의 탄소 흡수 및 저장 기능을 포함한 조절기능에 대한 시·공간적 접근이 필요하며, 향후 생태계 서비스 가치평가와 연계가 가능한 공간화 방법이 필요하다. 따라서 산림의 생태계 서비스 중 조절서비스의 대표적인 기능을 계량화 및 가치평가할 수 있는 모형을 Table 3과 같이 도출하였다. 그 결과, InVEST 모형과 김종호 등(2012)의 통계모형(Statistical model)을 이용한 방법이 가능한 것으로 나타나, 향후 산림이 제공하는 다양한 서비스에 대한 계량화와 가치 평가와 연계한 평가가 가능할 것으로 조사되었다.

4. 결론

생태계가 제공하는 서비스를 평가하기 위한 시도는 전 세계적으로 다양한 연구 주제와 개념 체계를 바탕으로 진행되고 있으며, 생태계 서비스 및 그 가치에 대한 인식이 달라졌다. 최근 생태계와 그 서비스 가치의 중요성은 개발과 보전 논리로 인한 사회갈등으로 빚어지고 있으며, 객관적 타당성과 이를 뒷받침할 수 있는 정량적 평가가 상대적으로 미흡한 상황이다. 본 연구에서

Table 3. Applicability of the models for regulating services of forest ecosystem

Models	Regulating services					Economic value of output
	Carbon storage	Air quality regulation	Flood mitigation	Erosion control	Water quality	
BEAMS	○	×	×	×	×	×
CEVSA	○	○	×	×	×	×
MC1	○	×	×	×	×	×
SIM-CYCLE	○	×	×	×	×	×
VISIT	○	×	×	×	×	×
CBM-CFS3	○	×	×	×	×	×
InVEST	○	×	○	○	○	△
Statistical Forest Growth Model	○	×	×	×	×	×
Statistical model	○	○	○	○	○	○
CBM-CFS3	○	×	×	×	×	×

△: Needs economic data for valuation.

는 산림이 제공하는 다양한 생태계 서비스와 기능 중 탄소 저장 및 흡수 기능의 계량화를 위해 개발된 다양한 모형들을 공간규모에 따라 비교·분석하였다. 입력자료 확보 가능성이 용이한 모형을 대상으로 구동 결과, 지역(국가) 단위 규모의 InVEST 모형(83.72 tC ha⁻¹)과 산림생장모형(72.87 tC ha⁻¹)이 다른 모형들에 비해 전체 산림 탄소 저장량(73.42 tC ha⁻¹)과 유사하게 추정되었다. 그러나 국토면적이 좁고 지형이 복잡한 우리나라의 경우, 전 지구적인 모형을 적용하는데 한계가 있다는 것으로 분석되었다. 또한, 각 변수에 따른 계수 적용시 기존 연구에서 개발된 계수를 적용하고 있어 계수에 따른 결과가 다르게 추정되고 있다. 따라서 국내 적용을 위한 다양한 계수들이 제시되어야 하며, 이를 해결하기 위해서는 장기적인 연구를 통한 한국형 계수 도출이 필요하다. 또한, 지형 조건과 기후변화에 따른 생장 및 수종 변화를 고려한 향후 연구가 진행되어야 한다. 바이오매스량을 추정하기 위해 탄소배출계

수를 이용하였으나, 정확한 결과를 위해 임업통계자료에 대한 검토를 포함한 구축된 모형의 결과값과 검증할 수 있는 산림 관련 지표가 마련되어야 한다. 방법론적으로는 생태계 서비스 및 생물다양성의 변화 경향을 파악하기 위한 시나리오 및 통합영향 평가가 가능한 모형에 관해 추가로 검토가 이루어져야 한다.

사사

본 연구는 2013년도 환경부 차세대 에코노베이션 기술 개발사업의 지원에 의해 이루어진 것이다(과제번호: 2012000210002).

참고문헌

- 기상청 웹사이트, <http://www.kma.go.kr>.
 김순아, 이우균, 손요환, 조용성, 이미선, 2009, 산림에 대한 기후변화 영향평가 모형의 국내 적용성 분석, 한국임학회지, 98권 1호, 33-48.

- 김종호, 1989, 산림의 공익기능의 계량화, 연구정보, p. 4.
- 김종호, 김기동, 김래현, 박찬열, 윤희중, 이승우, 최형태, 김재준, 2010. 산림의 공익기능 계량화 연구, 국립산림과학원 연구보고 '10-26호, p. 205.
- 김종호, 김래현, 윤희중, 이승우, 최형태, 김재준, 박찬열, 김기동, 2012, 산림공익기능의 경제적 가치평가, 한국산림휴양학회지, 16권 4호, 9-18.
- 김종호, 김재준, 전준현, 손영모, 김경하, 윤희중, 박찬열, 이승우, 2007. 산림의 공익기능 계량화 연구, 국립산림과학원 연구보고 '07-07호, p.354.
- 김종호, 이경학, 박찬우, 김경하, 윤희중, 손영모, 이승우, 박찬열, 서정원, 오정수, 2005, 산림의 공익기능 계량화 연구보고서, 국립산림과학원 연구보고 '05-07호, p. 244.
- 김해동, 구현숙, 2002, 도시수목에 의한 미기후개선 효과의 평가, 환경과학논집, 7집, 189-198.
- 남기준, 2013, 기후변화에 따른 임상 분포 변화 기반의 탄소저장량 예측 연구, 고려대학교 석사학위 논문.
- 농촌진흥청 흙토람 웹사이트, <http://soil.rda.go.kr>
- 박은진, 2009, 도시 수목의 이산화탄소 흡수량 산정 및 흡수효과 증진 방안, 경기개발연구원.
- 산림청, 2009, 기후변화와 산림.
- 산림청, 2011, 임업통계연보.
- 산림청, 2012, 임업통계연보.
- 손영모, 이경학, 2007, 기후변화와 산림 바이오매스, 산림과학논문집, 70호, 31-44.
- 오동하, 여운상, 2011, 산림의 가치평가를 통한 공익기능 향상 방안, 부산발전연구원.
- 유성진, 이우균, 손요환, A. Ito, 2012, 생태계 모형과 시공간 환경정보를 이용한 우리나라 식생 탄소 수지 추정, 대한원격탐사학회지, 28권 1호, 145-159.
- 이경학, 손영모, 김영수, 2001, 임업 및 토지이용 부문의 온실가스 흡수 및 배출 현황, 임산에너지, 20권 1호, 53-61.
- 이우균, 광두안, 광한빈, 최계선, 김문일, 송용호, 2013, 위성기반 탄소지도 시스템 개발 연구, 중간보고서.
- 전성우, 김재욱, 정휘철, 2013, 생태계 서비스 가치평가를 위한 산림 유형 분류 방안- 임상도와 토지피복지도 활용을 중심으로 -, 한국환경복원녹화기술학회지, 16권 3호, 31-39.
- 황상일, 명수정, 조공장, 안정이, 박선환, 2010, 식생과 토양의 역할을 고려한 저탄소 토지이용계획 수립방안 II, 한국환경정책·평가연구원.
- Bachelet, D., J. M. Lenihan, C. Daly, R. P. Neilson, D. S. Ojima, and W. J. Parton, 2001, MC1: A dynamic vegetation model for estimating the distribution of vegetation and associated ecosystem fluxes of carbon, nutrients, and water, USDA Forest Service. General Technical Report, PNW-GTR-508, 2-36.
- Boumans, R., R. Costanza, J. Farley, M. A. Wilson, R. Portela, J. Rotmans, F. Villa, and M. Grasso, 2002, Modeling the dynamics of the integrated earth system and the value of global ecosystem services using the GUMBO model, **Ecological Economic**, **41**, 529-560.
- Cao, M., and F. I. Woodward, 1998, Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their responses to climate change, **Glob Change Biol**, **4**, 185-198.
- Cao, M., S. D. Prince, and H. H. Shugart, 2002, Increasing terrestrial carbon uptake from the 1980s to the 1990s with changes in climate and atmospheric CO₂, **Global Biogeochemical Cycles**, **16**, 1069.

- Chapin III, F. S., J. T. Randerson, A. D. McGuire, J. A. Foley, and C. B. Field, 2008, Changing feedbacks in the climate-biosphere system, **Frontiers in Ecology and the Environment**, **6**, 313-320.
- Choi, s., W. K. Lee, H. Kwak, S. R. Kim, S. Yoo, H. A. Choi, S. Park, and J. H. Lim, 2011, Vulnerability Assessment of forest ecosystem to climate change in Korea using MC1 model, **Journal of Forest Planning**, **16**, 149-161.
- Costanza, R., R. D'Arge, R. S. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R. V. O'Neill, J. Paruelo, R. G. Raskin, P. Sutton, and M. van den Belt, 1997, The value of world's ecosystem services and natural capital, **Nature**, **387**, 253-260.
- de Groot, R. S., M. A. Wilson, and R. M. Boumans, 2002, A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services, **Ecological Economics**, **41** (3), 393-408.
- Eggleston, S., L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, and K. Tanabe, 2006. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Japan.
- Foley, J. A., M. H. Costa, C. Delire, N. Ramankutty, and P. Snyder, 2003, Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect earth's climate, **Frontiers in Ecology and the Environment**, **1**, 38-44.
- Grêt-Regameya, A., P. Bebib, I. D. Bishop, and W. A. Schmid, 2008, Linking GIS-based models to value ecosystem services in an Alpine region, **Journal of Environmental Management**, **89**, 197-208.
- Heywood, D. I., M. F. Price, and J. R. Petch, 1994, Mountain regions and geographic information systems: an overview, In: Price, M. F. (Ed.), *Mountain Environments and Geographic Information Systems*. Taylor & Francis, London.
- Hong, S. Y., B. Minasny, Y. S. Zhang, Y. H. Kim, and K. H. Jung, 2010. Digital soil mapping using legacy soil data in Korea. International Union of Soil Sciences (IUSS), c/o Institut für Bodenforschung, Universität für Bodenkultur, pp. 5-8.
- IPCC, 2003, Good practice guidance for land use, land-use change and forestry, Penman, J. M., Gytarsky, T., Hiraishi, T., Krug, D., Kruger, R., Pipatti, L., Buendia, K., Miwa, T., Ngara, K., Tanabe, and F. Wagner (Eds). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), IPCC/IGES, Kanagawa, Japan.
- Ito, A., H. Muraoka, H. Koizumi, N. Saigusa, S. Murayama, and S. Yamamoto, 2006, Seasonal variation in leaf properties and ecosystem carbon budget in a cool-temperate deciduous broad-leaved forest: simulation analysis at Takayama site, **Japan. Ecological Research**, **21**, 137-149.
- Ito, A., N. Saigusa, S. Murayama, and S. Yamamoto, 2005, Modeling of gross and net carbon dioxide exchange over a cool-temperature deciduous broad-leaved forest in Japan: Analysis of seasonal and interannual change, **Agricultural and Forest Meteorology**, **134**, 122-134.
- Kirilenko, A. P., and A. M. Solomon, 1998, Modeling dynamic vegetation response to rapid climate change using bioclimatic classifications, **Climate Change**, **38**, 15-49.

- 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**, 480-504.
- Kwak, D. A., W. K. Lee, Y. Son, S. Choi, S. Yoo, D. J. Chung, S. H. Lee, S. H. Kim, J. Kee Choi, Y. Jin Lee, and W. H. Byun, 2012, Predicting distributional change of forest cover and volume in future climate of South Korea, **Forest Science and Technology**, **8**, 105-115.
- Lee, M. A., 2008, A study on the vulnerability of forest ecosystems to climate change in Korea, Korea University MA thesis.
- MA (Millennium Ecosystem Assessment), 2005. Ecosystems and Human Well-being. Millennium Ecosystem Assessment (MA). Island Press. Washington D C.
- Meir, P., P. Cox, and J. Grace, 2006, The influence of terrestrial ecosystems on climate. **Trends Ecol. Evol.**, **21**, 254 60.
- Natural Capital Project, Internet available at <http://www.naturalcapitalproject.org>
- Nelson, E., G. Mendoza, J. Regetz, S. Polasky, H. Tallis, D. R. Cameron, K. M. A. Chan, G. C. Daily, J. Goldstein, P. M. Kareiva, E. Lonsdorf, R. Naidoo, T. H. Ricketts, and M. R. Shaw, 2009, Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales, **Front Ecol. Environ.**, **7**, 4 11.
- Noble, I., M. Apps, R. Houghton, D. Lashof, W. Makundi, D. Murdiyaso, B. Murray, W. Sombroek, and R. Valentini, 2000, Implications of different definitions and generic issues. In: Watson, R., *et al.* (Eds.), IPCC Special Report Land Use, Land-Use Change and Forestry. Cambridge University Press, New York, 53 126.
- Polasky, S., E. Nelson, D. Pennington, and K. A. Johnson, 2011, The impact of land-use change on ecosystem services, biodiversity and returns to landowners: A case study in the state of Minnesota, **Environmental and Resource Economics**, **48**, 219-242.
- Prentice, I. C., G. D. Farquhar, M. J. R. Fasham, M. L. Goulden, M. Heimann, V. J. Jaramillo, H. S. Khesghi, C. Le Quere, R. J. Scholes, and D. W. R. Wallace, 2001, The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. In: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Houghton, J.T., *et al.* (eds.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 184-238.
- Sasai, T., K. Ichii, Y. Yamaguchi, and R. Nemani, 2005, Simulating terrestrial carbon fluxes using the new biosphere model "biosphere model integrating eco-physiological and mechanistic approaches using satellite data" (BEAMS), **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, **110**: G02014.
- Tallis, H., and S. Polasky, 2009, Mapping and valuing ecosystem services as an approach for conservation and natural-resource management, **Annals of the New York Academy of Sciences**, **1162**, 265-283.
- UK National Ecosystem Assessment, 2011, The

- UK National Ecosystem Assessment Technical Report, UNEP-WCMC, Cambridge.
- Vandewalle, M., M. T. Sykes, P. A. Harrison, G. W. Luck, P. Berry, R. Bugter, T. P. Dawson, C. K. Feld, R. Harrington, J. R. Haslett, D. Hering, K. B. Jones, R. Jongman, S. Lavorel, P. Martins da Silva, M. Moora, J. Paterson, M. D. A. Rounsevell, L. Sandin, J. Settele, J. P. Sousa, and M. Zobel, 2009, Review paper on concepts of dynamic ecosystems and their services, http://www.rubicode.net/rubicode/RUBICODE_Review_on_Ecosystem_Services.pdf (Date:11.05.2009).
- Welham, C., B. Seely, and H. Kimmins, 2001, Bringing biology into growth and yield: An overview of the ecologically based forest growth model, FORECAST. Forest Ecosystem Management Simulation Group, Department of Forest Sciences, University of British Columbia, Vancouver, B.C.
- Yu, H., W. K. Lee, Y. Son, D. Kwak, K. Nam, M. Kim, J. Byun, and T. Kwon, 2013, Estimating carbon stocks in Korean forests between 2010 and 2110: a prediction based on forest volume age relationships, **Forest Science and Technology**, 9(2), 105-110.
- Yu, L., 2006. Assessment the vulnerability of natural ecosystems to climatic change in China. Chinese Academy of Sciences. Ph.D. thesis (in Chinese).