

산림 생태계에 활용된 생지화학모형의 국내 적용성 분석

허민정* · 송철호**† · 김지원*** · 이우균****

*고려대학교 환경생태공학과 석사과정학생, **고려대학교 오정에코리질리언스연구원 연구교수,

고려대학교 환경생태공학과 박사과정학생, *고려대학교 환경생태공학부 교수

Applicability of Biogeochemical Models to Forest Ecosystems in South Korea

Heo, Minjeong* · Song, Cholho**† · Kim, Jiwon*** and Lee, Woo-Kyun****

*M.S. student, Department of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

**Research Professor, OJong Resilience Institute (OJERI), Korea University, Seoul, Korea

***Ph.D. student, Department of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

****Professor, Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

ABSTRACT

Identifying the carbon cycle in forest ecosystems is important when studying climate change. Since 2010, however, most of the suitable process-based biogeochemical models for forest sectors in South Korea have not been validated. For forest ecosystems, Korean and international research using a process-based biogeochemical model was collected and examined in this study. The applicability of models based on methodology, input/output parameters, and the availability of relevant spatio-temporal data was determined. After 2010, a total of 13 models, including one model commonly used by Koreans and foreign studies, were applied, with five originating domestically and nine originating internationally. Global, regional and temporal scales were used in each model, and a variety of targets, including agriculture, forestry and vegetation, were included. The input/output factors in most of the models were comparable. It was found that the CLM3.5-DGVM, MC1, VISIT and BIOME-BGC series models have been used most frequently in Korea and the models are highly applicable. Recent research, however, was limited by poor spatio-temporal resolution and lack of local characteristic data. Future research should include the creation of algorithms that represent forest management and the validation of modeling results using diverse models.

Key words: Forest Ecosystem, Climate Change, Carbon Cycle, Biogeochemistry, Models

1. 서론

인류의 화석 연료 사용은 이산화탄소(CO₂; carbon dioxide)로 대표되는 각종 온실가스 배출을 통해 지구온난화에 큰 영향을 미치고 있다(IPCC, 2014). 또한, 산림과 자연생태계를 파괴하는 토지 개발에서도 CO₂가 배출되고 있는 실정이다. 최근에는 이러한 온실가스 배출의 결과로 전지구 차원의 탄소(C; carbon)순환의 큰 변화가 보고되고 있다(Ahlstrom et al., 2015). 이때, 식생은 광합성을 통해 대기

중 CO₂를 흡수하는 탄소순환의 주요한 요소 중 하나이다. 그러나 인간 활동 및 기후변화에 따른 기온 상승과 강수량의 변화는 산불 및 산사태 등의 재해를 발생시킬 수 있으며, 이러한 피해는 산림의 식생 변화 및 황폐화 등의 생태계 변화로 나타난다(Huang et al., 2020).

산림은 지구 육지 면적의 약 1/3 정도이며, 지구 전체 광합성의 2/3 가량을 담당하고, 육상 생태계 탄소의 80%, 토양 탄소의 40% 정도를 저장하여 기후 및 환경을 조절하는 기능을 수행하고 있다(KFS, 2009; Kim, 2013). 따라서, 탄소순환

†Corresponding author : cholhosong@korea.ac.kr (Room No. 316. KU R&D Center, 145 Anam-ro Seongbuk-gu, Seoul 02841, Korea. Tel. +82-2-3290-4556)

ORCID 허민정 0000-0001-7166-4566 송철호 0000-0002-8491-9545

김지원 0000-0003-1856-4114 이우균 0000-0002-2188-359X

과정에서 산림은 중요한 역할을 하고 있다고 볼 수 있으며, 산림의 탄소순환에는 광합성을 통한 대기 중 CO₂ 흡수 과정과 토양에서의 CO₂ 배출 과정이 포함된다. 현재 기후변화 관련 국제기구는 이러한 산림의 온실가스 동태에 대하여 정량화된 보고를 요구하고 있다(IPCC, 2006; Han et al., 2017; Kim et al., 2018). 또한, 기후변화나 사막화 등과 같은 환경 문제가 심화됨에 따라 모형을 통한 산림의 탄소흡수 및 저장 기능의 평가가 다양한 측면에서 중요해지고 있다(Choi, Lee, Jeon et al., 2014). 지구 육상 생태계의 생물권 모형(TBMs; Terrestrial biosphere models)은 전지구 및 지역적 규모의 생태계 변화와 기후변화에 대한 과정을 연구하는데 매우 중요하다. 지난 수십 년 동안, TBMs는 단순한 개념 및 통계 모형에서 다양한 학문 분야가 결합한 과정기반 모형(Process based model)으로 발전했다. 초기 TBMs는 광합성과 온도, 강수량 등 기상학적 요인을 이용하여 식생 생산량을 예측했으나, 1980년대 후반부터 공간기술 및 생지화학 모델링 발달과 함께 해당 요소를 과정기반 모형에 결합하는 등의 고도화가 진행되었다(Yizhao et al., 2015).

일반적으로 산림 탄소를 평가하는 모형들은 현재의 산림 상태에 근거하여 회귀식으로 분석하는 통계적 모형(Statistical model or Empirical model)과 생태적인 순환 과정을 모사한 과정기반 모형으로 구분된다. 이중 산림 생태계의 광합성과 양분 활용 등을 근거로 하는 과정기반 모형들을 생태생리적(Eco-physiological model) 과정기반 모형으로 일컫는다(Kim et al., 2009). 특히, 산림 부문의 과정기반모형은 대부분 산림 생태계의 생태적, 화학적 과정을 모사하는 생지화학모형(Biogeochemical model)이며, 이들은 다양한 변수와 입력인자를 고려하여 각 산림 유형의 일차생산성 및 탄소저장량 산정에 활용된다. 국내 산림에는 MC1 (MAPSS-Century1)과 VISIT (Vegetation Integrated Simulator for Trace gases) 등의 과정기반 생지화학모형이 적용되어 왔다(Choi, Lee, Jeon et al., 2014; Kang et al., 2016). 이들은 최근의 RFRF (Random Forest)와 CV (Committee Averaging) Ensemble 등의 인공지능 기반 추정이나(Lee et al., 2019; Chung et al., 2020), 국내 산림의 온실가스 현황을 모의할 수 있는 FBDC (Forest Biomass and Dead organic matter Carbon) 모형(Lee et al., 2018) 또는 임분생장모형(Lee et al., 2009; Kim et al., 2014; Son et al., 2014) 및 크리깅 기법(Park et al., 2012) 등의 통계적 회귀분석과는 달리 생태계 전반의 생물리적 특성, 기후자료, 교란 및 생태적 변화, 식생의 생화학적 반응 등을 전반적으로 모의한다.

국내 산림을 대상으로 한 생지화학 과정기반 모형은 그 필요성이 높음에도 불구하고 연구가 상대적으로 부족하였

다. 특히, 2010년대 초반 이후 우리나라 산림 부문에 적합하고 활용 가능한 생지화학모형의 적용 가능성 분석 및 개발에 대한 연구가 부족한 것으로 나타났다(Kim et al., 2009; Choi, Lee, Jeon et al., 2014). 이들은 대부분 2010년도 이전의 정보에 기반하고 있으며, 최근 시점의 연구 동향과 모형 적용 사례는 다루고 있지 않다. 또한, 국외 모형들을 국내에 적용할 경우에는 우리나라 산림의 특성을 고려하지 못할 가능성이 있으나(Kim et al., 2018), 이들에 대한 평가는 이루어지지 않은 상황이다(Hwang et al., 2015). 따라서 단기적으로는 해외 모형의 국내 적용 시 정확성 및 정밀도 등의 제고를 위해, 장기적으로는 국내 생지화학모형의 개발을 통한 산림 부문의 생태계 물질순환과정 규명을 위해 최근의 연구동향을 파악할 필요가 있다.

본 연구에서는 2010년 이후 수행된 국내 및 국외의 산림 부문에 적용된 생지화학모형의 비교·검토를 수행하였으며, 국내 산림 생태계에 대한 생태적 과정기반 생지화학모형의 적용 가능성 분석을 통해 국내 적용 보완 방향을 제시하고자 하였다. 이러한 연구를 통하여 향후 국내의 식생-토양-대기의 탄소순환 구조 및 한국형 생태계 기반 생지화학모형 개발, 산림을 중심으로 한 한반도 육상 생태계의 물질순환구조 규명에 기여하고자 한다.

2. 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 2010년 이후 수행된 연구 및 선행 연구 Kim et al.(2009)에서 언급된 국내외 산림 생태계의 주요 생지화학모형을 기반으로 1) 선행 연구 및 연구대상 모형 수집, 2) 모형의 방법론적 측면 분석, 3) 모형의 입출력 인자 분석, 4) 국내 적용 가능성 파악, 5) 모형의 국내 적용 사례 분석의 단계로 분석을 수행하였다. 이러한 단계적 분석은 모형의 국내 적용성 분석을 수행한 Kim et al.(2018)과 Choi, Lee, Jeon et al.(2014)을 참고하여 실시하였다.

우선, 국내외 산림에 적용된 주요 탄소순환 모형을 확인하기 위해 키워드를 설정하여 조건에 적합한 논문을 검색하였다. 또한, Kim et al.(2009)에서 언급된 모형을 추가로 검색하여 분석 대상의 누락을 감소시켰으며, 최종적으로 추출된 모형은 국내외에 적용된 사례로 구분하여 연구를 수행하였다. 방법론적 측면에서는 모형의 공간적 규모를 전지구 차원과 지역적 차원에서 우선 파악하였으며, 모형이 활용되고 있는 분야를 구분하여 분석하였다. 나아가, 생태적 과정을 모사한 과정기반 모형에 대해 기상인자만을 근거로 하는 예측모형(Prognostic model)과 기후인자와 위성인자를

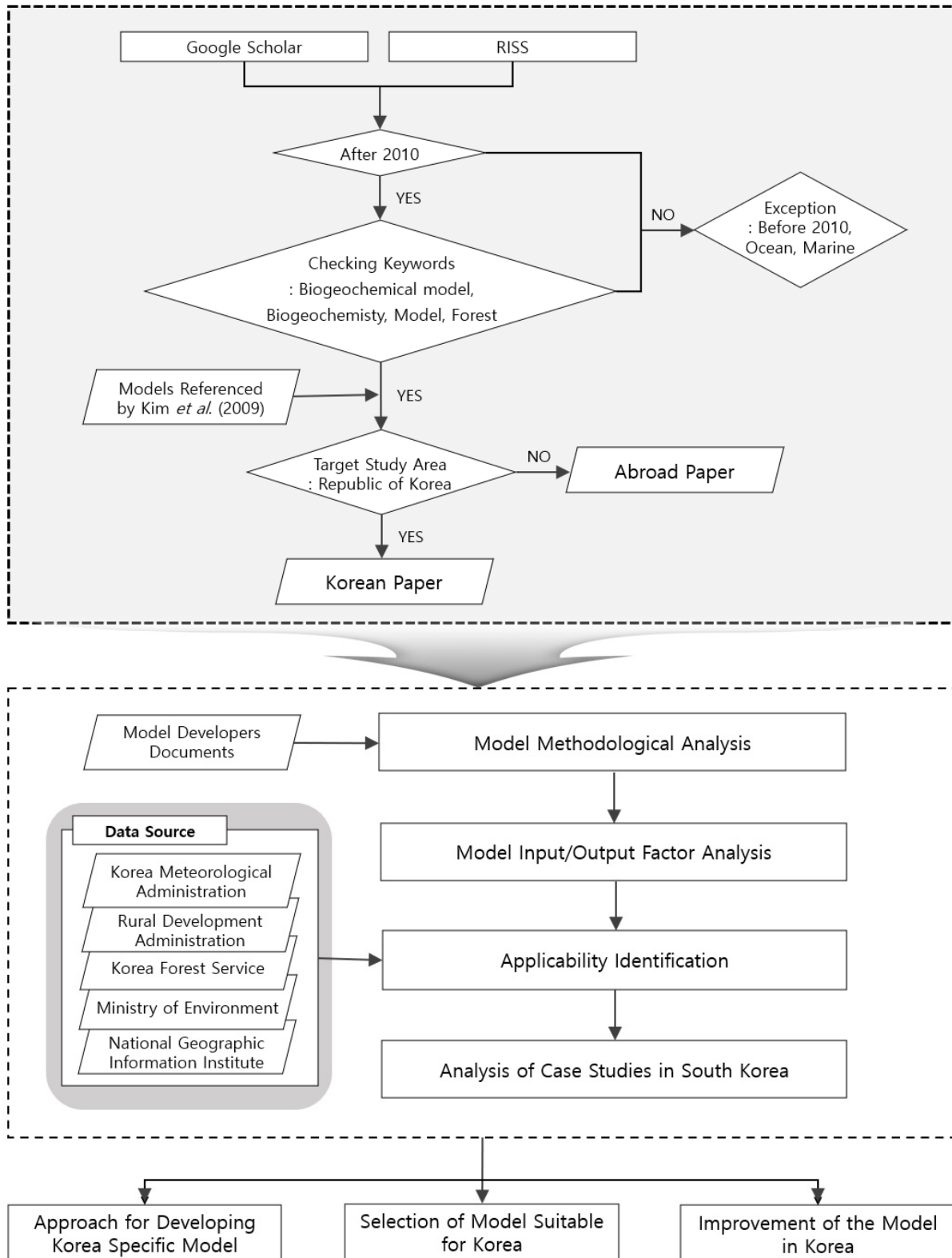


Fig. 1. Flowchart for review of biogeochemical models utilized in studies since 2010

동시에 요구하는 진단모형(Diagnostic model)을 구분하여 각 특징을 비교·분석하였다(Kim et al., 2009). TBMs에서 진단 모형과 예측모형은 중요한 유형의 집단으로 이 두 유형의 모형들은 일반적으로 생태계 순환과정을 설명하기 위해 유사한 개념을 따르지만, 순일차생산량(NPP; Net Primary Production) 및 체류 시간 시뮬레이션 등에서 차이가 있다(Yizhao et al., 2015). 또한, 산림 생태계의 전반적인 탄소순환을 분석하기 위해서 모형별 분석을 위한 입력인자와 분석의 결과로 나타나는 출력 인자를 파악하였다. 각 모형의 입출력인자를 파악한 후에는 국내 정부 기관, 정부출연연구소, 연구기관 등이 제공하는 데이터가 각 모형의 입력자료로 활용될 수 있는지 조사하였다. 이를 통해 모형의 국내 적용 가능성을 파악하였다. 마지막으로 대상 모형들을 활용한 국내 선행 연구의 연구 방법, 결과 등을 분석하였다. 위 과정을 통해 본 연구에서는 해외에서 개발된 생지화학모형의 국내 적용을 위한 보완 방향을 파악하고, 나아가 한국형 과정기반 생지화학모형 개발을 위한 방향을 제안하고자 한다(Fig. 1).

연구 자료 측면에서 본 연구는 2010년도 이후에 우리나라 및 국외를 대상으로 생지화학모형이 적용된 사례를 학술연구정보서비스(RISS, <http://www.riss.or.kr>) 및 Google 학술 검색(Google Scholar, <https://scholar.google.co.kr>)을 통해 검색을 수행하였다. 2010년 이후 국내외 적용된 생지화학모형 검색 시 모형은 산림 등 육상 생태계를 비롯하여 하천, 연안지역 및 해양 분야에 걸쳐 활용되어 온 것으로 나타났으며, 관련 탄소순환에 적용된 모형 연구가 함께 검색되는 문제가 발생하였다. 따라서, 본 연구에서는 육지생태계에서의 탄소순환만을 고려하였으므로 ‘Ocean’, ‘Marine’ 등의 해양 관련 키워드를 제외하여 연구대상 모형을 추출하였다. 또한, 주요 키워드는 ‘Biogeochemistry’,

‘Biogeochemical model’, ‘Model’, ‘Forest’와 같이 산림이 적시되면서 생지화학모형임을 직접적으로 언급한 키워드를 활용하였다. 특히 국내 적용 사례를 확인하기 위해 ‘Korea’ 키워드도 함께 추가하여 검색하였다. 또한, 우리나라에서 탄소순환 모형의 국내 적용성을 검토한 다양한 선행 연구를 찾을 수 있었는데(Song et al., 2014; Choi, Lee, Jeon et al., 2014; Kim et al., 2018), 본 연구에서는 산림 생태계에 활용한 생지화학모형을 대상으로 Diagnostic과 Prognostic 모형을 구분하여 분석을 수행하였다.

3. 결과

3.1. 선행 연구 및 연구대상 모형 수집

Google 학술 검색을 통해 ‘Ocean’, ‘Marine’ 등의 키워드를 제외한 2010년 이후 ‘Biogeochemical model’의 키워드 검색 결과, 약 39,000건, ‘Biogeochemistry’는 약 33,200건의 논문이 검색되었다. 또한, 학술연구정보서비스를 통해 우리나라 산림에 적용된 모형을 확인하기 위하여 앞서 적용되었던 동일한 조건에서 ‘Korea’ 키워드를 함께 검색한 결과, ‘Biogeochemical model’의 경우 13건의 국내 학술논문이 검색되었으며, ‘Biogeochemistry’는 10건의 국내 학술논문, 1건의 해외 학술논문이 검색되었다. 이렇게 검색된 연구들은 산림 및 육상 생태계에서의 생지화학 과정, 모형 활용 등을 모두 포괄하고 있었으므로, ‘Model’, ‘Forest’ 등의 키워드를 추가하여 조건 검색하였다. 그 결과, Google 학술 검색에서는 각각 약 17,600건, 18,200건이 검색되었으며, 학술연구정보서비스에서는 총 7건의 국내 학술논문이 검색되었다.

최종적으로 국내외 산림을 대상으로 모형 분석을 수행

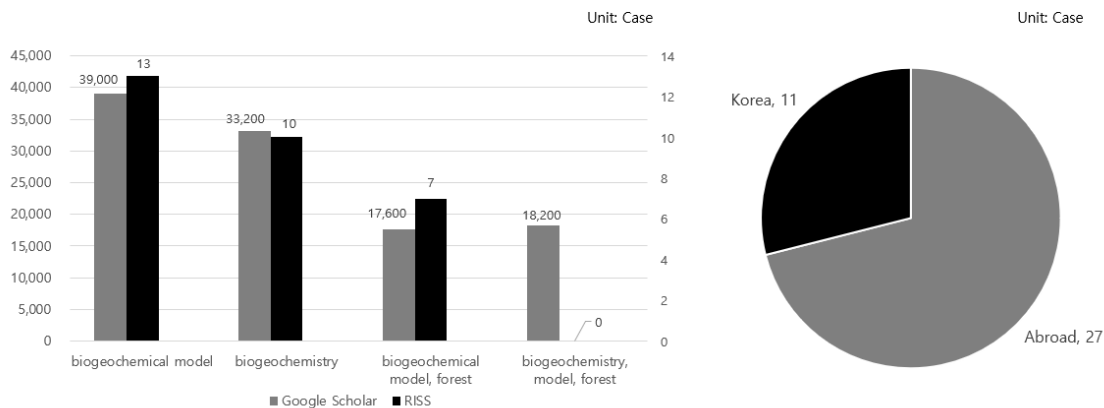


Fig. 2. The results of searching biogeochemical models applied to forest after 2010

Table 1. Forest Biogeochemistry related models that applied after 2010

Model	Character	Reference	
		Abroad	Korea
BGC-ES	Process-based biogeochemical model to estimate biomass, water cycle, carbon-nitrogen cycles in forest ecosystems	Ooba et al.(2010) Ooba et al.(2012)	-
BGC-MAN	One of the first Next Generation Vegetation Models, by explicitly including the flexible response of plants to changes in growth conditions	-	Song et al.(2019)
BIOME-BGC	Terrestrial global Biogeochemistry process model to simulates the development of forest carbon and nitrogen pools over time	Eastaugh et al.(2011) Hlasny et al.(2011) Kumar and Raghubanshi (2011) Hidy et al.(2012) Nunes et al.(2015) Yan et al.(2014) Qingling and Baolin (2016) Yan et al.(2016) Qingling et al.(2017) Ramezani et al.(2017) Mao et al.(2017) Chen and Xiao (2019) You et al.(2019) Li et al.(2020)	Jang et al.(2015) Kang et al.(2016)
CENTURY	C, N, P and S dynamics, agroecosystem model	Yi et al.(2010) Althoff et al.(2018)	-
CLM3.5-DGVM	Land surface processes within the context of global climate simulation, dynamic global vegetation model, an analysis of selected features of the land hydrological cycle	-	Lim et al.(2010)
DRAINMOD-FOREST	Integrated modeling of hydrology, soil carbon and nitrogen dynamics and plant growth for drained forests	Tian et al.(2012) Tian et al.(2014)	-
Forest-BGC	C, N, and water cycles through a forest ecosystem	Veganzones et al.(2010)	-
ForSAFE	Merging PnET, SAFE, Decomp, PULSE components to the three basic material and energy cycles in a single integrated model	Zanchi et al.(2014)	-
IBIS	Physically consistent model that can be directly incorporated within AGCMs to balance Land surface, Water, Carbon and Vegetation module	Cao et al.(2015) Kumar et al.(2018)	-
MC1	Dynamic vegetation model, 3module, one of DGVMs, MAPSS model+CENTURY+MCFIRE	-	Choi, Lee, Kwak, Kim et al.(2011) Kwon et al.(2012) Byun et al.(2012) Cui et al.(2016)
ORCHIDEE	A global continental carbon cycle model which describes the flow of carbon within the soil-plant-atmosphere continuum	Tupek et al.(2010)	-
RothC	Simulating the turnover of organic carbon in non-waterlogged topsoils that allows for the effects of soil type, temperature, moisture content and plant cover on the turnover process	Hashimoto et al.(2011) Chaturvedi et al.(2014)	-
VISIT	Estimating carbon budgets of vegetation ecosystem, developed in order to identify biogeochemical cycle between ecosystem and the atmosphere	-	Yoo et al.(2012) Cui et al.(2014) Kim et al.(2016)

한 연구를 구분하고, Kim et al.(2009)의 선행 연구에서 언급된 모형들의 이름을 검색한 결과, 국내 산림에 적용된 모형 연구는 문헌 11건이 확인되었고, 문헌 내에서 5개의 모형이 도출되었다. 또한, 해외 산림에 적용된 모형 연구는 문헌 27건이 확인되었고, 9개의 모형이 도출되었다(Fig. 2).

국내외에서 BIOME-BGC (BioGeochemical Cycles) 모형을 동일하게 적용한 것으로 확인되었으며, 국내외에서 공통으로 사용된 모형의 중복을 제외하고 총 13개의 모형이 활용된 것으로 나타났다. 국외 산림 탄소순환 연구에 활용된 생지화학모형은 대표적으로 BIOME-BGC (Running and Hunt, 1993; Thornton et al., 2002), ORCHIDEE (Organising Carbon and Hydrology In Dynamic Ecosystems; Krinner et al., 2005), BGC-ES (Biogeochemical forest model for evaluation of ecosystem services; Ooba et al., 2010), Forest-BGC (Forest-Biogeochemical Cycles; Running and Coughlan, 1988; Running and Gower, 1991), RothC (Rothamsted Carbon Model; Jenkinson et al., 1999), CENTURY (Parton et al., 1987), IBIS (Integrated Biosphere Simulator; Foley et al., 1996), DRAINMOD-FOREST (Tian et al., 2009; Tian, 2011), ForSAFE (Wallman et al., 2005; Belyazid et al., 2006) 등이 있었다. 국내에서는 CLM3.5-DGVM (Community Land Model 3.5-Dynamic Global Vegetation

Model; Levis et al., 2004), MC1 (Bachelet et al., 2001), VISIT (Ito and Oikawa, 2002), BIOME-BGC (Running and Hunt, 1993; Thornton et al., 2002), BGC-MAN (BioGeoChemistry Management Model; Pietsch et al., 2005) 등이 산림 탄소순환 연구에 적용되고 있었다. 결과적으로 국내외 공통적으로 BIOME-BGC 모형을 활용하여 수행한 연구가 다른 모형을 활용한 연구보다 비교적 많은 것으로 분석되었다(Table 1).

3.2. 모형의 방법론적 측면 분석

2010년 이후의 탄소순환 관련 선행 연구를 통해 국내외 산림 생태계에 적용된 생지화학모형을 모형개발자와 모형을 활용한 논문을 기준으로 비교·분석하였다. 산림에 적용된 모형은 대부분 전지구 혹은 지역적 규모에 해당하였으며, 특히, 전지구 단위 규모로 분석하는 모형 중에서도 일부 모형은 생지구화학 및 미기후 등의 서브 모듈을 포함하고 있다. 모형의 활용 분야별 비교분석 결과, 농업, 산림, 식생 등의 분야로 구분되어 활용되고 있었다. 또한, 모형은 주로 원격탐사 자료를 활용하지 않고 잠재 식생분포 정보에 근거하여 기상학적 요인 및 기타 환경요인 등을 통해 탄소순환을 예측하는 과정기반 모형에 해당하는 것으로 파악되었다(Table 2).

Table 2. Comparison of forest biogeochemical process based models that applied after 2010

Model	Scale		Target			Base		Developer
	Global	Regional	Agroeco system	Forest ecosystem	Vegetation production	Prognostic models	Diagnostic models	
BGC-ES	○	○	-	-	○	○	○	Ooba et al.(2010)
BGC-MAN	○	○	-	-	○	○	○	Pietsch et al.(2005)
BIOME-BGC	○	○	-	○	-	○	○	Running and Hunt (1993); Thornton et al.(2002)
CENTURY	○	○	○	-	-	○	-	Parton et al.(1987)
CLM3.5-DGVM	○	○	-	-	○	○	○	Levis et al.(2004)
DRAINMOD-FOREST	-	○	-	○	-	-	○	Tian et al.(2009); Tian (2011)
Forest-BGC	○	○	-	○	-	○	-	Running and Coughlan (1988); Running and Gower (1991)
ForSAFE	-	○	-	○	-	-	○	Wallman et al.(2005); Belyazid et al.(2006)
IBIS	○	-	-	-	○	○	-	Foley et al.(1996)
MC1	○	○	-	○	-	○	-	Bachelet et al.(2001)
ORCHIDEE	○	○	-	-	○	○	-	Krinner et al.(2005)
RothC	○	○	-	○	-	○	-	Jenkinson et al.(1999)
VISIT	○	○	-	-	○	○	-	Ito and Oikawa (2002)

전지구 규모에 활용된 모형은 BGC-ES, IBIS 등 11개, 지역적 규모에 해당하는 모형은 BGC-MAN, DRAINMOD-FOREST 등 12개로 나타났으며, BIOME-BGC, CENTURY 등 총 10개의 모형이 전지구 및 지역적 규모 모두에 해당하는 것으로 나타났다.

산림에 적용된 모형은 주로 농업, 산림, 식생 등의 분야를 근거로 구분되어 있었으며, 특히, 산림과 식생이 가장 많이 활용된 것으로 나타났다. 대표적인 분야별 모형 분석 결과, 농업에 근거한 CENTURY 모형은 토양 유기 탄소의 변화량을 예측하기 위한 생태 농업적 모형으로 탄소량 변화를 월별로 예측할 수 있으며, 기상학적 자료와 토양의 화학적 특성 자료를 활용하여 토양의 통합 관리 사례를 파악할 수 있다(Parton et al., 1987; Yi et al., 2010; Aaheim et al., 2011; Medlyn et al., 2011; Althoff et al., 2018). 산림을 기반으로 한 Forest-BGC 모형은 대기와 물 및 산림 생태계의 탄소와 질소순환을 예측할 수 있다. 특히 식생의 탄소순환에 고도화되어 있으며, 식생의 광합성, 호흡량, 증발, 지상부와 지하부의 탄소량, 낙엽과 같은 고사 물질의 분해와 질소 광물화 등을 분석할 수 있다(Running and Coughlan, 1988; 1998; Running and Gower, 1991; Veganzones et al., 2010). MC1 모형은 기후가 산림의 식생 변화와 생태계 구조 및 기능에 미치는 영향을 예측하기 위한 모형으로, 잎, 가지, 줄기 등의 지상부 및 세균, 주근 등의 지하부 식생과 고사 상태의 식생을 포함한 산림 생태계의 탄소순환을 평가할 수 있다(Bachelet et al., 2001; Choi, Lee, Kwak, Kim et al., 2011; Choi, Lee, Kwak, Lee et al., 2011; Kwon et al., 2012; Byun et al., 2012; Cui et al., 2016). 또한, 국내외에서 공통적으로 활용된 모형인 BIOME-BGC는 대상지의 식생형을 구조와 기능적 유사성에 따라 집단화하며, 식물을 개별로 구분하지 않기 때문에 연구대상지가 잎과 줄기 및 뿌리가 하나인 것처럼 임분을 균일하게 가정하여 모의한다. 따라서, 임분의 크기 및 지형에 따라 모형의 공간 해상도가 상이하게 결정될 수 있다(Running and Hunt, 1993; Thornton et al., 2002; Aaheim et al., 2011; Medlyn et al., 2011; Jang et al., 2015; Kang et al., 2016). 식생을 토대로 한 IBIS (Integrated Biosphere Simulator) 모형은 지역을 포함한 전지구적 규모의 통합적 식생 기반 모형으로 토양과 생태계 간의 기작을 모의하여 산림의 식생 구조 및 구성 변화를 예측할 수 있다(Foley et al., 1996; Aaheim et al., 2011; Cao et al., 2015; Choi et al., 2016; Kumar et al., 2018). VISIT 모형은 생태계와 대기에서의 생지화학적 탄소순환을 예측할 수 있다. 환경 공간 정보를 기반으로 작은

지점부터 전국 규모의 공간에 대한 시뮬레이션이 가능하며, 일주기 또는 월주기로 시간단위를 설정하여 시뮬레이션을 수행할 수 있다(Ito and Oikawa, 2002; Yoo et al., 2012; Cui et al., 2014; Kim et al., 2016). 대부분 모형의 구조는 기존 모형의 구동 방법과 도출된 결과를 보완하기 위해 모형 간 연계 및 통합 등이 이루어져 하위 모형이 개발된 형태로 나타났다(Valipour, Driscoll et al., 2018; Valipour, Johnson et al., 2021). 또한, 연구 대상지에 대한 관리, 자연적 교란 등 환경 조건의 변화에 따라 변수가 유연하게 대체 및 보완되는 경향을 보였다.

진단모형과 예측모형을 구분하여 분석한 결과, 진단모형은 BGC-MAN, BIOME-BGC 등의 모형을 포함한 6개의 모형이 해당했으며, CENTURY, MC1 등의 모형을 포함한 11개의 모형은 예측모형으로 나타났다. 진단과 예측을 모두 수행하는 모형은 4개 모형으로 확인되었다.

3.3. 모형의 입출력 인자 분석

본 연구에서는 모형개발자 문서 및 2010년 이후 선행 연구에 제시된 내용을 근거로 입력 및 출력 인자를 정렬하였다. 입력인자를 주요 특성별로 분류할 경우 대기, 토양, 식생 및 지형 등으로 구분되었다. 대기 인자로 온도, 강수량, 풍속, 습도, 증기압, CO₂, 기후 등의 기상학적 요소가 나타났으며, 전체 13개의 모형 중 12개 모형에 적용되고 있었다(Table 3).

토성, 토양수분, 토양탄소, 수증기압 등을 포함하고 있는 토양 인자는 모든 모형에 적용되었으며, 낙엽수, 상록수, 활엽수, 침엽수와 같은 식생 형태와 구성, 고사체 분해 물질 등을 포함한 식생 인자는 10개의 모형에 적용되었다. 지형 인자는 경사와 방위 등의 지형 요소로 전체 13개의 모형 중 2개의 모형에서 나타났다. 전반적으로 모형은 대기 인자 및 토양 인자를 입력인자로 적용하였으며, 식생 인자는 산림 생태계 특성을 고도화한 모형에서 주로 적용되고 있었다. 이와 달리 지형 인자는 비교적 입력인자로 활용되지 않았으며, 인간에 의한 교란 인자의 경우 입력인자로 활용된 사례는 확인할 수 없었다.

산림 생태계의 생지화학모형 구동을 통해 출력된 인자를 분석한 결과, 식생, 토양 및 대기 순으로 예측 결과가 많은 것으로 나타났다. 출력 인자 중 식생에서는 일차생산량(GPP; Gross Primary Production), 순일차생산량, 순생태계생산(NEP; Net Ecosystem Production), 엽면적지수(LAI; Leaf Area Index) 등이 나타났으며, 토양에서는 토

Table 3. Input and Output factors of models

Model	Input factors				Output factors
	Climate	Soil	Vegetation	Topography	
BGC-ES	-	Soil water content	Forest type Management	-	Evapotranspiration Water runoff Carbon-Nitrogen absorption Carbon Sequestration Rate Nitrogen Leaching Sediment Production Rate
BGC-MAN	Temperature Solar radiation Vapor pressure Precipitation	Texture Depth Soil Nitrogen	Forest type LAI Stomatal conductance Carbon Nitrogen ratio	Slope Aspect	GSV GPP NPP Respiration Carbon allocation of the vegetation's carbon pools
BIOME-BGC	Temperature Precipitation Vapor pressure Solar radiation PAR	Soil water content Soil temperature at 20 cm depth Texture	Plant functional type LAI	Slope Aspect	Carbon storage GPP NPP NEP Respiration Evapotranspiration Photosynthetic rate Soil CO ₂ emissions Soil CH ₄ emissions
CENTURY	Monthly average maximum and minimum air temperature Monthly precipitation	Texture Atmospheric and soil N inputs Initial soil C, N, P and S levels	Plant N, P and S content	-	Soil Carbon storage Soil Nitrogen storage Mineral nitrogen Soil carbon storage Soil water dynamics Soil temperature dynamics
CLM3.5-DGVM	Precipitation Mean air temperature Solar radiation Surface reflectance Upward radiation Sensible heat flux Latent heat flux Steam flux Momentum flux Phenological data	Soil and Snow temperature Soil water content Drainage Outflow Water potential	Plant functional type LAI	-	GPP NPP Plant Carbon storage and litter Soil Carbon storage and litter Respiration Soil and Snow thermal properties Water runoff Surface water storage Soil water
DRAINMOD - FOREST	Radiation Temperature Precipitation	Soil temperature Drainage Hydrologic litter pool Soil organic carbon Mineral nitrogen	Density Root Stem and leaf biomass	-	GPP NPP Carbon allocation Litterfall
Forest-BGC	Temperature Humidity Precipitation Meteorological variables	Soil temperature Soil water content Outflow Evaporation Transpiration Water potential	Stem growth Stem litterfall Photosynthesis Maintenance respiration and leaf Stem and root carbon	-	Canopy photosynthesis Transpiration Vegetation distribution GPP NPP Respiration

Table 3. Input and Output factors of models (Continued)

Model	Input factors				Output factors
	Climate	Soil	Vegetation	Topography	
ForSAFE	Temperature Precipitation PAR	Texture Soil water content Depth Bulk density Total C and N, Organic matter Hydrologic Mineralogy Deposition	Tree species Management	-	Wood Carbon storage Harvest NPP Soil organic Carbon Evapotranspiration Acid neutralizing capacity Nitrogen leaching DOC leaching
IBIS	Temperature Precipitation Wind speed Radiation Atmospheric pressure	Soil temperature Soil moisture Soil ice	-	-	Evaporation Transpiration Soil organic matter Soil Carbon storage Soil Nitrogen storage GPP NPP NEP
MC1	Precipitation Temperature Vapor pressure Wind speed Solar radiation	Gridded maps of soil texture Rock fraction Soil radiation Depth Texture Bulk density	-	-	Evapotranspiration Soil Carbon Storage NPP Water runoff Max LAI trees and grasses Carbon Allocation Nitrogen Allocation
ORCHIDEE	Temperature Precipitation Wind speed Insolation Humidity Atmospheric CO ₂ concentration	Soil water content Drainage Outflow	Plant functional type Evaporation Transpiration Interception LAI	-	GPP NPP Respiration Vegetation Carbon storage and litter Soil Carbon storage and litter
RothC	Rainfall Temperature Evaporation over water	Clay content Inert carbon composition Depth Bulk density	-	-	Bulk density Biomass carbon Carbon di-oxide The radiocarbon content of the biomass carbon
VISIT	Temperature Precipitation Daily shortwave radiation Wind speed Vapor pressure deficit Daily mean cloud	Percent clay content Percent sand content Percent silt content Field capacity Wilting point Saturated water content Depth Soil type Texture pH	Forest type LAI	-	Carbon storage GPP NPP NEP Respiration Soil CO ₂ emissions Soil CH ₄ emissions

*DOC: Dissolved organic carbon

*GSV: Growing stock volume

*PAR: Photosynthetically active radiation

양탄소, 토양수분, 토양온도, 토양유기물(C, N) 등으로 나타났고, 대기 출력 인자는 CO₂ 배출, 증발산, 광합성, 풍화 작용, 강수량 등을 포함하고 있다. 대부분 모형의 출력 인자에서 지형적 요소 및 인간에 의한 교란 인자는 포함되지 않았다. 모형 구동을 통해 출력된 인자는 탄소순환 과정, 산림의 일차생산성 및 탄소저장량의 변화 추정, 기후변화 영향평가, 산림의 생산성 평가 등 산림 생태계에 대한 다양한 분석 결과를 도출하였다.

3.4. 국내 적용 가능성 파악

선행 연구에서는 대부분 연구대상지의 대기, 식생, 토양 인자뿐만 아니라, 미세 지형 및 산악 지형 등의 지형적 인자가 고려되었고, 이러한 입·출력 인자들이 서로 연계되어 위성 자료와 GIS 기법 및 Plot 단위의 통합 모형이 구축되었다. 따라서, 국내 모형의 적용 가능성을 높이기 위해서 모형별 입력되는 주요 인자와 GIS 주제도, 위성 자료 등을 근거로 하여 모형 구축 시 확보가 가능한 요소를 바탕으로 Table 4와 같이 도출하였다.

모형의 입력인자 중에서 가장 활용도가 높은 요소로는 CENTURY, IBIS, VISIT 등의 12개 모형이 적용한 기온 자료였으며, 다음으로 활용이 많았던 인자는 강수량 자료

로 BIOME-BGC, Forest-BGC, ForSAFE 등 총 11개의 모형이 활용하였다. 우리나라에서 가장 많은 입력인자를 확보할 수 있는 모형은 BIOME-BGC와 BGC-MAN으로 확인되었으며, 이 모형은 입력인자로 기상, 토양, 식생 및 지형자료를 요구하고 있었다.

대부분 모형의 입력인자로 활용된 기상, 토양, 식생 등의 자료들은 우리나라의 기상청, 농촌진흥청, 환경부, 산림청 등의 기관에서 확보 가능한 것으로 분석되었다. 일반적으로 일최고기온, 월평균기온, 월누적강수량 등의 기상자료는 국내 기상청에서 천리안위성 2A호기(GK-2A)로 관측된 고해상도의 기상위성 영상을 활용하고 있으며, 종관기상관측(ASOS; Automated Synoptic Observing System), 방재기상관측(AWS; Automated Weather System) 등의 지상기상관측망은 약 13km의 해상도로 WMO 권고 수준인 15km보다 조밀하고, 자료수집 주기도 1분 단위로 신속하게 자료를 제공받을 수 있다. 또한, 국내 유관 기관 관측망으로는 기상청을 비롯하여 국토교통부, 농촌진흥청, 산림청, 각 시도 지방자치단체 및 국립공원관리공단 등 28개 기관에서 AWS 및 강수량계 등의 활용을 통해 전국 3,760여 개소 지점에서 관측망을 구축 및 공유하여 관측해상도를 약 13km에서 5km까지 향상시켰다

Table 4. Ensuring possibility to build input data for applicable models

Class	Factors	Applicable Models (over two)	Possibility	Map Scale	Source
Climate	Temperature	12	○	ASOS 13 km, Climate Atlas 1 km	기상청 (www.weather.go.kr)
	Precipitation	11	○		
	Radiation	8	○		
	Wind speed	4	○		
	Pressure	5	○		
	Humidity	2	○		
Soil	Water content	7	○	Soil map 1:25,000	농촌진흥청 흙토람 (http://soil.rda.go.kr)
	Texture	6	○		
	Depth	5	○		
	Outflow	3	○		
	Drainage	3	○		
Vegetation	LAI	5	○	Forest type map 1:5,000	산림청 (www.forest.go.kr) 환경부 (http://me.go.kr)
	Forest Type	3	○	Land cover map 1:5,000	
	Plant functional type	3	○		
Topography	Slope	2	○	Topographic map 1:1,000	국토지리정보원 (www.ngii.go.kr)
	Aspect	2	○		

(KMA, 2015; 2018). 현재 기상청 기후요소 자료 중 데이터 형태로 제공되는 것은 PRISM (Parameter-elevation Regressions an Independent Slopes Model)에 의한 2000년 이후 연평균기온, 일최고 및 일최저기온의 연평균, 연강수량에 대한 격자자료이다. PRISM을 통해 얻은 기후평년값에 대한 격자자료는 거리, 고도, 지향면, 해양도 등을 고려한 1 km 해상도의 기상청의 기후도에서 확인할 수 있다 (Jeong, 2021). 그 외에도 기후와 관련된 토양자료로 지형 습윤지수도, 지형온도지수 등의 자료를 활용할 수 있으며, 토양 용수량, 토성, 토양깊이 등의 토양 속성 관련 자료는 주로 농촌진흥청 흙토람에서 제공하고 있다. 또한, 식생 자료는 국가산림자원조사에서 제공하고 있는 자료를 이용하여 산림축적 등 산림자원량을 추정할 수 있으며, 식생과 관련된 주제도로는 산림청에서 1:25,000 및 1:5,000 대축적으로 제작한 임상도가 있다. 1:25,000 임상도의 경우 2010년 이후로 갱신되지 않았고, 1:5,000 임상도는 매년 갱신되고 있다(KFS, 2019). 이외에도 환경부의 현존식생도 및 생태자연도 등이 있으며, 해당 기관에서 지속적 갱신 및 보안을 수행하고 있다. 환경부에서는 대분류(1:50,000), 중분류(1:25,000), 세분류(1:5,000)로 제작된 토지피복지도를 수집 및 제공하고 있으며, 산림의 식생형을 구분 및 분석할 수 있다. 경사도와 향 등의 지형 관련 주제도는 국토지리정보원에서 1:1,000, 1:5,000, 1:25,000, 1:50,000, 1:250,000 등의 다양한 축척으로 수치지형도를 구축하여 일반인에게 공급하고 있다. 1:5,000 축척의 경우 2년 주기로 전국의 모든 정보를 갱신하며, 2주 단위로 대형 건물, 도로 등의 중요 정보를 수시로 수정한다 (National Geographic Information Institute, 2019). 입력자의 해상도를 분석한 결과, 토양자료는 1:25,000, 기후자료는 1km 해상도의 자료를 활용할 수 있는 반면에 식생 자료는 1:5,000, 지형자료는 1:1,000으로 비교적 해상도가 높은 공간자료를 활용할 수 있다.

앞에서 언급된 입력자료에 대한 검증수단으로써 활용되는 자료는 일반적으로 토지피복지도, 항공사진, 위성영상 등이 활용된다(Kim et al., 2009). 토지피복지도는 주로 위성사진을 활용하여 지표면의 현황을 과학적 기준에 따라 분석 및 표현한 지도로 환경계획 및 관리를 위한 전형적인 주제도로 활용되고 있다. 또한, 항공사진은 항공사진카메라가 탑재된 항공기로 지표면 상의 지형지물을 재현하기 위해 지상을 중복 촬영한 자료로 2004년부터 전국 아날로그 항공사진을 보유 제공하고 있으며, 지형확인 및 도시계획 등에 활용이 가능하다. 검증자료로 활용될 수 있는 위

성영상은 다목적 실용위성(아리랑) 2호(KOMSAT-2)로 촬영된 1 m급 고해상도 자료가 현재 한국항공우주연구원에 구축되어 있으며, 2015년에 발사된 다목적실용위성(아리랑) 3A호(KOMSAT-3A)는 55 cm급 전자광학카메라와 적외선 센서가 탑재된 위성으로 향후 정밀 지상 관측 자료를 제공하여 활용이 가능할 것으로 보인다(Song et al., 2018).

3.5. 모형의 국내 적용 사례 분석

2010년 이후, 우리나라에 적용된 산림 탄소 모형 관련 연구는 Table 5와 같으며, 국내에서는 CLM3.5-DGVM (Lim et al., 2010), MC1 (Choi, Lee, Kwak, Kim et al., 2011; Kwon et al., 2012; Byun et al., 2012; Cui et al., 2016), VISIT (Yoo et al., 2012; Cui et al., 2014; Kim et al., 2016), BIOME-BGC (Jang et al., 2015; Kang et al., 2016), BGC-MAN (Song et al., 2019) 모형 등이 주로 사용되었다. 해당 모형들은 지역을 포함한 전지구 규모로의 분석이 가능했으며, 입력인자로는 MC1은 기후 및 토양자료, CLM3.5-DGVM과 VISIT는 기후, 토양 및 식생자료, BGC-MAN과 BIOME-BGC는 기후, 토양, 식생 및 지형자료를 활용한 것으로 나타났다.

Song et al.(2019)은 BGC-MAN을 이용하여 동북아시아의 다양한 경영활동과 생태적 환경특성을 기반으로 중위도 이행대(MLE; Mid-Latitude Ecotone)의 산림량(GSV; Growing Stem Volume) 및 순일차생산성 변화를 평가하였다. 그러나 연구 영역에 전체적으로 분포된 낙엽송의 매개 변수화는 산림지마다 가능한 한 구체적으로 수정해야 한다는 어려움이 남았다.

BIOME-BGC 모형을 활용한 연구로 Jang et al.(2015)은 기후변화가 한국 계방산에 있는 *Picea jezoensis* 개체군의 탄소순환, 물순환 및 생육기에 미치는 영향을 분석하기 위해 모형을 활용하여 연간 기상 변화 및 성장기 후속 변화, 1차 생산성 및 물 균형에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과 개체군은 기후변화에 노출되어 상당한 영향을 받고 있었다. Kang et al.(2016)은 BIOME-BGC 모형을 활용하여 국내 상록침엽수림에 대한 탄소수지 시뮬레이션 연구를 수행하였으며, 기후변화와 토양조건이 식생 생육에 미치는 영향을 분석하여 국내 소나무 고사 현상에 대한 기후 및 토양 영향 가설을 제안하였다. 그러나, 숲을 하나의 개체로 간주하여 개별목의 다양한 생육상황을 구분하지 못하는 BIOME-BGC 모형의 한계로 인해 개별 수목의 고사

를 명시적으로 모의하지 못한다는 한계점이 나타났다.

Lim et al.(2010)은 광릉 활엽수림에서 CLM3.5-DGVM의 탄소교환과정 모의능력을 평가하기 위해 대상지의 생태자료들을 이용하여 기후변화가 탄소 교환에 미치는 영향 분석 및 민감도 실험을 수행하였으며, 모형에서 추정된 탄소수지와 기후변동성 간 상호관계를 분석하였다. 모형을 통해 추정된 탄소저장량은 광릉에서 관측된 값과 유

사하였으나, 침엽수림과 활엽수림이 공존하는 식생이었음에도 모형에서는 침엽수림의 생물 기후 조건이 성립되지 않아 모의가 수행되지 않았다. 또한, 낙엽이 지는 시기가 한 달 이상 늦게 모의가 수행됨에 따라 생육기간이 과대 추정 된다는 문제가 제기되었다.

MC1 모형을 활용한 국내 연구로는 Choi, Lee, Kwak, Kim et al.(2011), Kwon et al.(2012), Byun et al.(2012),

Table 5. Description of models applied to Korea

Model	Outcome	Data format	Output	Locations	Years
BGC-MAN	To assessed forest volume and net primary productivity changes in the MLE of Northeast Asia	Vector	GSV, GPP, NPP	five pilot sites from each of the southern parts	1960 ~ 2005
BIOME-BGC	The impact of climate on Mt. Gyeonggi and on growth of the site's relict <i>P. jezoensis</i> population	Vector	GPP, NPP, MR, Evapotranspiration, sun leaf and shade leaf photosynthetic rate	Eulsudong Valley watershed at Mt. Gyeonggi	1972 ~ 2006
	Simulating seasonal and inter-annual dynamics of carbon and water processes for forest	Vector	GPP, NPP, MR, Carbon storage	Milyang and Unjin	1988 ~ 2015
CLM3.5-DGVM	Evaluating performance of CLM3.5 -DGVM	Raster	Vegetation distribution, LAI, Carbon storage	Gwangneung	1994 ~ 2003
MC1	Assessing the vulnerability of forest ecosystem to climate change in Korea	Raster	NPP, SCS	Entirety of South Korea	1971 ~ 2000
	Estimating the spatial-temporal NPP and SCS of forest ecosystem under climate change	Raster	NPP, SCS	Seoul, Incheon, Gyeonggi	1971 ~ 2000, 2021 ~ 2050, 2071 ~ 2100
	Assessing the vulnerability of forest ecosystem to climate change in South Korea	Raster	NPP, SCS	Entirety of South Korea	1971 ~ 2000, 2021 ~ 2050
	Development of spatially stratified and normalized vulnerability indices	Raster	Forest type distribution, NPP, SCS	Entirety of South Korea	1970 ~ 2010, 2010 ~ 2050, 2050 ~ 2090
VISIT	Estimating carbon budgets of vegetation ecosystem	Raster	GPP, NPP, NEP, SR, HR, Carbon storage	Entirety of South Korea	1999 ~ 2008
	Identifying the influences of land cover and climate changes on changes in carbon budgets of each period	Raster	GPP, NPP, NEP, SR, HR, AR, Carbon storage	Korean peninsula	1981 ~ 2010
	Assessing and compare the impact of changes in forest area and climate on the carbon budget	Raster	GPP, NPP, NEP, SR, AR, HR, ER	Entirety of North Korea	1980 ~ 2000, 2020 ~ 2050

*SCS: Soil carbon storage

*AR: Autotrophic respiration

*ER: Ecosystem respiration

*MR: Maintenance respiration

*HR: Heterotrophic respiration

*SR: Soil respiration

Cui et al.(2016) 등이 있으며, MC1은 국내 산림에 적용된 모형사례 중에서 가장 많이 활용되는 것으로 나타났다. Choi, Lee, Kwak, Kim et al.(2011)은 MC1 모형을 이용하여 한반도의 기후변화에 따른 식생분포 변화 예측 및 산림 생태계 취약성을 평가하였다. 그 결과, 한국의 생태계는 대부분 혼효림이었으며, 남부 내륙지역과 서부·동부 연안권의 산림 생태계 취약성이 매우 높은 것으로 확인되었으나, 한국의 전체 면적에 대한 산림 생태계의 취약성은 낮거나 적당한 수준이었다. Kwon et al.(2012)은 기후변화에 대응하기 위해 산림의 기능 중 CO₂ 흡수원을 고려한 MC1 모형을 활용하여 수도권 산림의 순일차생산량과 토양탄소저장량의 시공간적 변화를 추정하였다. Byun et al.(2012)은 MC1을 통해 추정된 순일차생산량 및 토양탄소저장량의 변이 및 경향을 기반으로 산림 분포 및 기능의 민감성과 적응성을 정량화하였으며, MC1과 타 식생모형을 함께 구동하여 시공간 정보를 기반으로 기후변화에 따른 우리나라 산림 생태계의 영향 및 취약성을 평가하였다. 또한, Cui et al.(2016)은 기후변화에 따른 산림 생태계의 취약성을 평가하기 위하여 MC1 모형을 통해 산림 탄소 플럭스 및 저장량을 추정하였으며, 공간적으로 계층화 및 정규화된 취약성 지수를 개발하였다. 각 분야의 정규화된 취약성 지수를 정량화한 결과, 서중부 지역과 남동부 내륙 지역에서 전반적으로 산림 유형 분포의 취약성이 더 높다는 것을 확인했다.

국내 산림에 적용된 VISIT 모형 연구로는 Yoo et al.(2012)이 모형을 활용하여 시공간 환경정보를 기반으로 우리나라의 생태계 탄소 수지를 추정하였으며, Cui et al.(2014)은 모형을 활용해 남북한의 지난 30년(1981~2010) 동안의 탄소저장량을 평가 및 정량화하고, 기후변화에 따른 한반도 토지피복 변화 및 탄소 역학에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, Kim et al.(2016)은 VISIT 모형을 통해 근미래 기후변화가 북한 육상 생태계 및 산림지역의 탄소 저장량에 미치는 영향을 평가하고 비교하였다.

MC1, VISIT 등은 2010년도 이전에도 다수 활용이 되었으며, 2010년을 전후로 하여 BIOME-BGC 계열 모형들의 활용성이 증가하는 것으로 파악되었다. 이들 모형에 대한 사례를 전반적으로 파악하였을 때, 지형적 및 산림 관리 등이 구체적으로 포함된 분석에서는 특정 지점을 중심으로 한 벡터 형식의 BGC-MAN, BIOME-BGC 등의 모형을 활용하는 것이 적합한 것으로 파악되었다. 한편 격자 형식으로 분석할 경우에는 CLM3.5-DGVM, MC1, VISIT 등이 비교적 활용성이 높은 것으로 파악되었다.

4. 고찰

본 연구에서는 특정 지점의 산림에 대한 정밀한 생지화학순환 분석이 요구되는 연구의 경우, BGC-MAN, BIOME-BGC 등의 모형이 활용도가 높은 것으로 파악하였으며, 격자 단위로 분석할 경우에는 CLM3.5-DGVM, MC1, VISIT의 모형의 활용성이 높은 것으로 나타났다. 그러나, 각각 공간적 확장성의 문제와 세밀한 계수의 적용이 필요한 것으로 파악하였다. 다만, 본 연구에서는 키워드 분석을 통해 Google Scholar와 RISS의 문헌 중에서 직접적으로 생지화학모형이 언급된 것들을 중심으로 분석하였기 때문에 일부 탄소 및 질소 등에 특화된 모형이 분석에서 제외되는 경향도 파악되었다. 특히, 국내에 적합하게 개발되었던 FBDC 모형은 데이터 퓨전(Data fusion) 등의 방법을 통해 FBDC-CAN (Carbon and Nitrogen) 모형으로 개선되었으며 일부 과정기반모형의 특성이 추가된 것으로 파악된다(Kim, Luo et al., 2021). 이들 모두를 종합하였을 때, 시공간 단위에서 지도화가 가능하고, 우리나라 산림의 특성을 보다 세밀하게 반영하며, 인위적인 교란과 산림 관리 등을 포함하는 계수 및 알고리즘의 보완이 필요한 것으로 판단된다.

2010년 이후 산림에 적용된 모형은 대부분 해외 특성에 따라 개발된 모형으로 한국의 산림생태, 지형 및 기후 후 등의 고유 특성을 잘 반영하고 있지 않은 근본적인 한계가 존재하였으며, 국내 산림 생태계에 직접적으로 미치는 영향을 고려하기 어려워 선행 연구의 모의 값과 일부 실측치 간에 차이가 발생했다. 이를 보완하기 위해서는 이전 모델을 최적화하고, 우리나라의 산림 특성을 반영한 한국형 식생 모형의 개발과 이를 검증할 수 있는 실측자료 확보를 위해 다양한 지역을 대상으로 지속적인 장기 식생 조사가 필요한 것으로 보인다(Kwon et al., 2012; Choi, Lee, Jeon et al., 2014; Choi, Lee, Song et al., 2014; Kim et al., 2018). 또한, 공간자료의 인위성을 감소시키고, 현존식생을 근거로 국내의 연구기관에서 구축된 고해상도 입력자료를 적극 활용하여 모형 구동의 신뢰성을 높이는 것도 중요하다(Yoo et al., 2012). 모형의 입력인자로 사용되는 기상, 토양, 식생 등의 자료들은 대부분 국내 기관에서 확보 가능하며, 이는 국내 산림에 대한 생지화학모형 구축 및 개발에 있어서 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 예상된다. 나아가, 기상청에서 제공하고 있는 국제표준 시나리오(RCP; Representative Concentration Pathways)에 근거한 국가표준 기후변화 시나리오를 기초자료로 활용하여 미래

기후(기온, 강수, 습도, 바람 등)가 산림에 미치는 영향에 대한 예측이 가능할 것으로 예상된다. 이는 모형의 입출력 측면에서 미래기후 예측정보 등의 활용을 통해 기후변화 대응 연구로 발전될 수 있을 것으로 기대된다.

또한, 우리나라는 침엽수, 활엽수, 혼효림 등의 식생이 분포한 산림으로 단순림이 많고 밀도가 높기 때문에 산불 발생 시 대형 산불로 확산될 우려가 크며, 대부분 인간 활동에 의해 발생하고 있다(Kim et al., 2009). 따라서 산림 탄소 모형을 구축할 때 대기, 토양, 식생 외에 인간의 간섭을 포함하는 것이 바람직하다(Alcamo, 1998; Field et al., 1995; Kim et al., 2009; Kim, Kraxner et al., 2021). 또한, 우리나라는 복잡한 지형으로 인해 자연생태계에 발생하는 현상의 차이가 심하여 기후변화에 대한 생태계 영향을 연구하고자 할 때 지형적 요소를 배제할 수 없다(Kim et al., 2020). 그러나 앞에서 언급된 모형 중 대부분 대기나 토양 및 식생과 비교하여 지형인자는 상대적으로 적고 인간 행동에 대한 간섭인자는 거의 배제된 채로 자연적인 광합성능과 식생 및 토양 호흡의 과정만을 반영하고 있는 실정이다.

이러한 측면에서 전지구 규모의 모형은 분석 범위가 넓어서 우리나라와 같이 지표면이 좁은 지역의 복잡한 환경을 정밀하게 표현하지 못한다는 한계점이 있다(Song et al., 2019). 따라서 실험지, 대상지, 소규모 지역 규모의 표본점 단위에서 현존식생까지 파악할 수 있는 원격탐사기술을 적용하여 모형 구축의 신뢰성 및 정확성을 높일 수 있어야 하며, 구축된 모형의 결과값을 해석하는데 충분히 분석 및 검증할 수 있는 관련 지표가 마련되어야 한다(Muraoka and Koizumi, 2009; Kim et al., 2009; Kim et al., 2018). 즉, 위성 생태학적 접근방식을 통해 모형을 개선해 나갈 수 있을 것이다. 그리고 각 모형들에 대한 결과들을 종합하여 비교하는 방식의 검증 또한 필요할 것으로 보인다.

본 연구는 2010년 이후 산림에 적용된 모형 연구를 대상으로 분석을 수행하였다. 대부분 산림 부문에 생지화학 모형을 활용한 연구가 수행되었으며, 이 선행 연구를 통해 모형의 결과 분석 및 국내 적용시 한계점 등을 확인할 수 있었다. 하지만 우리나라 산림에 적용 및 활용성 높은 모형에 대한 분석이 부족하였으며, 국내 산림 특성에 최적화된 국외 모형의 평가 및 개선에 대한 연구가 필요하다. 특히, 2010년도 초기에는 해외 생지화학모형을 국내에 적용하는 것에 그쳤으며, 여러 시공간 자료들의 해상도에 제한이 있어 우리나라 산림의 생태적 특성을 반영하기 어려웠다. 그러나 최근에는 우리나라에 적합한 계수가

개발되고 있으며, 과정기반 생지화학 모형과 여러 모형의 특성을 융합하는 연구도 수행되고 있다(Kim, Luo et al., 2021). 이러한 측면에서 국내외 산림에 적용된 모형을 방법론적 측면에서 분석하고 국내 적용성과 한계점을 시사한 본 연구는 향후 우리나라 산림에 적합한 생지화학 과정기반 모형 개발과 이에 따른 생태적 물질순환구조 규명에 기여할 수 있을 것이다.

5. 결론

기후변화가 심화됨에 따라 산림 생태계의 탄소순환을 파악하는 것은 중요한 의제이다. 그러나, 2010년 이후 우리나라 산림분야에서 과정기반 생지화학모형의 특성을 파악하고 향후 적합한 모형 개발에 대한 연구가 부족했다. 따라서 본 연구에서는 산림 생태계를 대상으로 생지화학모형을 적용한 국내외 문헌을 수집하고 분석하였다. 이 과정에서 각 모형의 방법론적 측면, 입출력 인자, 국내 공간 자료에 따른 적용 가능성이 파악되었다. 2010년 이후, 활용된 모형은 각 국내 5개, 해외 9개로 중복된 모형 1개를 포함하여 총 13개의 모형이 도출되었다. 각 모형의 공간적 규모는 전지구 혹은 지역적 규모였으며, 농업, 산림, 식생 등의 분야에서 다양하게 활용되고 있었다. 2010년 이후 우리나라에 적용된 생지화학모형은 BGC-MAN, BIOME-BGC, CLM3.5-DGVM, MC1, VISIT 등이 주로 활용된 것으로 나타났다. 해상도 및 자료 확보 측면에서 대부분 특정 대상지를 중심으로 세밀한 분석이 이루어지거나, 비교적 낮은 해상도에서 포괄적 분석이 이루어졌다. 기후정보, 토양정보, 식생정보를 주요 입력자료로 하여 광합성 효율을 분석하는 사례가 대다수였으며, 주요 결과들은 탄소교환 과정, 산림의 일차생산성과 탄소량의 시공간적 변화 추정, 산림 생태계의 취약성 판단, 기후변화 영향 평가, 기후변화와 토양조건이 식생에 미치는 영향분석 등으로 나타났다. 그러나 모형들은 공통적으로 낮은 시공간 해상도를 갖고 있으며 우리나라 산림 생태계의 특성과 지형 및 기후인자를 세밀하게 반영하지는 못한 것으로 나타났다. 향후 모형 개발 측면에서는 FBDC-CAN과 같이 과정기반모형과 유사하게 생태계를 모사하고 분석할 수 있는 모형의 결과들과 기존 생지화학모형들의 결과들이 비교 검증되며 고도화가 필요할 것으로 보인다. 또한, 기후변화 대응을 위해 모형의 입출력 및 활용 측면에서 RCP 등의 미래기후 예측정보를 활용하여 미래 기후변화가 산림에 미치는 영향을 예측할 수 있을 것으로 예상된다.

모형의 국내 적용에 대한 정확성을 높이기 위해서는 다음과 같은 사항이 고려되어야 할 것이다. 첫째, 표본점 단위의 지표조사와 인공위성을 이용한 원격탐사기술 및 GIS 기법이 모델링과 연계되는 위성 생태학적 접근으로 정확한 데이터와 검증 체계를 구축하는 것이 필요하다. 둘째, 우리나라의 생태계 구조 및 기능 등 고유 특성에 적합한 지역적 규모의 모형을 시공간적으로 표출할 수 있도록 구축하여야 한다. 셋째, 기상-토양-식생 간의 체계적인 모형 입력자료 DB화가 이루어져야 한다. 넷째, 구축된 모형의 결과값을 해석하는데 정확히 검증할 수 있는 산림 및 기후 변화 관련 현장조사 자료, 각종 지표, 모델링 결과들의 상호 비교가 이루어져야 한다. 본 연구는 국내의 산림에 적용된 생지화학모형의 국내 적용 가능성 분석을 통해 향후 한국형 생태계 기반 생지화학모형 개발과 산림 중심의 생태적 물질순환구조 규명에 기여할 수 있을 것이다.

사사

본 연구는 한국연구재단(교육부)의 기초연구사업 자율운영형 중점연구소 고려대학교 오정리질리언스연구원(NRF-2021R1A6A1A10045235)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Aaheim A, Chaturvedi R, Sagadevan A. 2011. Integrated modelling approaches to analysis of climate change impacts on forests and forest management. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 16: 247-266.
- Ahlstrom A, Raupach MR, Schurgers G, Smith B, Arneeth A, Jung M, Reichstein M, Canadell JG, Friedlingstein P, Jain AK., Kato E, Poulter BI, Sitch SA, Stocker BD, Viovy N, Wang YP, Wiltshire A, Zaehle S, Zeng N. 2015. The dominant role of semi-arid ecosystems in the trend and variability of the land CO₂ sink. *Science* 348: 895-899.
- Alcamo J, Leemans R, Kreileman E. 1998. *Global Change Scenarios of the 21st Century, Results from the IMAGE 2.1 Model*. Pergamon London. UK. 296.
- Althoff T, Menezes R, Pinto A, Pareyn F, Carvalho A, Martins J, Carvalho E, Silva A, Damilano E, Sampaio E. 2018. Adaptation of the century model to simulate C and N dynamics of Caatinga dry forest before and after deforestation. *Agriculture Ecosystems & Environment* 254: 26-34.
- Bachelet D, Lenihan JM, Daly C, Neilson RP, Ojima DS, Parton WJ. 2001. MC1: A Dynamic Vegetation Model for Estimation the Distribution of Vegetation and Associated Ecosystem Fluxes of Carbon, Nutrients, and Water, Technical Documentation version 1.0, U.S.Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 95.
- Belyazid S, Westling O, Sverdrup H. 2006. Modelling changes in forest soil chemistry at 16 Swedish coniferous forest sites following deposition reduction. *Environmental Pollution* 144: 596-609.
- Byun JY, Lee WK, Choi SH, Oh SH, Yoo SJ, Kwon TS, Sung JH, Woo JW. 2012. Vulnerability Assessment for Forest Ecosystem to Climate Change Based on Spatio-temporal Information. *Korean Journal of Remote Sensing* 28(1): 159-171.
- Cao XL, Zhou Z, Chen XD, Shao WW, Wang ZR. 2015. Improving leaf area index simulation of IBIS model and its effect on water carbon and energy-A case study in Changbai Mountain broadleaved forest of China. *Ecological Modelling* 303: 97-104.
- Chaturvedi S, Patra S, Mandal D, Sena D, Mishra P, Melkania U, Alam NM. 2014. Comparative estimation of litter carbon inputs by two different modeling approaches in central Himalayan forests. *Indian Journal of Soil Conservation* 42: 135-142.
- Chen Y, Xiao W. 2019. Estimation of Forest NPP and Carbon Sequestration in the Three Gorges Reservoir Area, Using the Biome-BGC Model. *Forests* 10(2): 149.
- Choi HA, Lee WK, Jeon SW, Kim JS, Kwak HB, Kim M, Kim J, Kim JT. 2014. Quantifying Climate Change Regulating Service of Forest Ecosystem-Focus on Quantifying Carbon Storage and Sequestration. *Journal of Climate Change Research* 5(1): 21-36.
- Choi HA, Lee WK, Song CH, Forsell N, Jeon S, Kim JS, Kim SR. 2016. Selecting and applying

- quantification models for ecosystem services to forest ecosystems in South Korea. *Journal of Forestry Research* 27(6): 1373-1384.
- Choi HA, Lee WK, Song CH, Lee JY, Jeon SW, Kim JS. 2014. Applicability Analysis of Water Provisioning Services Quantification Models of Forest Ecosystem. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology* 17(4): 1-15.
- Choi SH, Lee WK, Kwak DA, Lee SC, Son Y, Lim JH, Saborowski J. 2011. Predicting forest cover changes in future climate using hydrological and thermal indices in South Korea. *Climate Research* 49: 229-245.
- Choi SH, Lee WK, Kwak HB, Kim SR, Yoo S, Choi HA, Park SM, Lim JH. 2011. Vulnerability Assessment of Forest Ecosystem to Climate Change in Korea Using MC1 Model (Multipurpose Forest Management). *Journal of Forest Planning* 16: 149-161.
- Chung HI, Choi Y, Ryu J, Jeon SW. 2020. Accuracy Evaluation of Potential Habitat Distribution in *Pinus thunbergii* using a Species Distribution Model: Verification of the Ensemble Methodology. *Journal of Climate Change Research. The Korean Society of Climate Change Research* 11(1): 37-51.
- Cui G, Kwak HB, Choi SH, Kim M, Lim CH, Lee WK, Kim JS, Chae Y. 2016. Assessing vulnerability of forests to climate change in South Korea. *Journal of Forestry Research* 27(3): 489-503.
- Cui G, Lee W, Kim D, Lee EJ, Kwak H, Choi H, Kwak D, Jeon S. 2014. Estimation of forest carbon budget from land cover change in South and North Korea between 1981 and 2010. *Journal of Plant Biology* 57: 225-238.
- Eastaugh CS, Potzelsberger E, Hasenauer H. 2011. Assessing the impacts of climate change and nitrogen deposition on Norway spruce (*Picea abies* L. Karst) growth in Austria with BIOME-BGC. *Tree physiology* 31(3): 262-74.
- Foley JA, Prentice IC, Ramankutty N, Levis S, Pollard D, Sitch S, Haxeltine A. 1996. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. *Global Biogeochemical Cycles* 10(4): 603-628.
- Han SH, Lee SJ, Chang H, Kim S, Kim R, Jeon EC, Son Y. 2017. Priority for developing emission factors and quantitative assessment in the forestry sector. *Journal of Climate Change Research* 8(3): 239-245.
- Hashimoto S, Wattenbach M, Smith P. 2011. Litter carbon inputs to the mineral soil of Japanese Brown forest soils: comparing estimates from the RothC model with estimates from MODIS. *Journal of Forest Research* 16: 16-25.
- Hidy D, Barcza Z, Haszpra L, Churkina G, Pinter K, Nagy Z. 2012. Development of the Biome-BGC model for simulation of managed herbaceous ecosystems. *Ecological Modelling* 226: 99-119
- Hlasny T, Barcza Z, Fabrika M, Balazs B, Churkina G, Pajtik J, Sedmak R, Turcani M. 2011. Climate change impacts on growth and carbon balance of forests in Central Europe. *Climate Research* 47: 219-236.
- Huang J, Zhang G, Zhang Y, Guan X, Wei Y, Guo R. 2020. Global desertification vulnerability to climate change and human activities. *Land Degradation & Development* 31.
- Hwang W, Park M, Kim YS, Cho K, Lee WK, Hyun S. 2015. Analysis of Greenhouse Gas Emission Models and Evaluation of Their Application on Agricultural Lands in Korea. *Ecology and Resilient Infrastructure* 2(2): 185-190.
- IPCC. 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report.
- Ito A, Oikawa T. 2002. A simulation model of the carbon cycle in land ecosystems (Sim-CYCLE): a description based on dry-matter production theory and plot-scale validation. *Ecological Modeling* 151(2-3): 143-176.
- Jang WS, Keyes C, Running S, Lim JH, Park PS. 2015. Climate-growth relationships of relict *Picea jezoensis* at Mt. Gyebang, South Korea. *Forest Science and Technology* 11: 1-8.
- Jenkinson DS, Meredith J, Kinyamario JI, Warren GP,

- Wong MTF, Harkness DD, Bol R, Coleman K. 1999. Estimating net primary production from measurements made on soil organic-matter. *Ecology* 80: 2762-2773.
- Jeong JJ. 2021. 1991-2020 Climate Map Generation using Spatial Interpolation for Korea Meteorological Administration Data. *The Geographical Journal of Korea* 55(4): 483-496.
- Kang SK, Lim JH, Kim ES, Cho N. 2016. Modelling Analysis of Climate and Soil Depth Effects on Pine Tree Dieback in Korea Using BIOME-BGC. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 18(4): 242-252.
- Kim D, Lim CH, Song CH, Lee WK, Piao D, Heo S, Jeon SW. 2016. Estimation of Future Carbon Budget with Climate Change and Reforestation Scenario in North Korea. *Advances in Space Research* 58: 1002-1016.
- Kim HS. 2013. Global Warming and Forests. *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(1): 47-50.
- Kim H, Lee J, Han SH, Kim S, Son Y. 2018. Approaches for Developing a Forest Carbon and Nitrogen Model Through Analysis of Domestic and Overseas Models. *Journal of Korean Society of Forest Science* 107(2): 140-150.
- Kim H, Luo Y, Noulekoun F, Noh, NJ, Lee, J, Son, Y. 2021. Carbon and nitrogen turnover times of south Korean Forests estimated via data-model fusion. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 126: e2021JG006368.
- Kim M, Ham BY, Kraxner F, Shvidenko A, Schepaschenko D, Krasovskiy A, Park T, Lee WK. 2020. Species- and elevation-dependent productivity changes in East Asian temperate forests. *Environmental Research Letters* 15(3): 034012.
- Kim M, Kraxner F, Forsell N, Song CH, Lee WK. 2021. Enhancing the provisioning of ecosystem services in South Korea under climate change: The benefits and pitfalls of current forest management strategies. *Regional Environmental Change* 21(1).
- Kim M, Lee WK, Nam K, Choi SE, Kim CG, Gwon TS. 2014. Estimating Stand Volume Pinus densiflora Forest Based on Climate Change Scenario in Korea. *Journal of Korean Forest Society* 103(1): 105-112.
- Kim SN, Lee WK, Son Y, Cho YS, Lee MS. 2009. Applicability of Climate Change Impact Assessment Models to Korean Forest. *Journal of Korean Society of Forest Science* 98(1): 33-48.
- Korea Forest Service (KFS). 2009. *Climate Change & Forest*.
- Korea Forest Service (KFS). 2019. *Forest Statistics Report*. Korea Meteorological Administration (KMA). 2015, *Climate Change 2014 SYNTHESIS REPORT*.
- Korea Meteorological Administration (KMA). 2018. *Evaluation of Contribution of Meteorological Observation Data to Weather Forecasts*.
- Krinner G, Viovy N, de Noblet-Ducoudré N, Ogée J, Polcher J, Friedlingstein P, Ciais P, Sitch S, Prentice IC. 2005. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system, *Global Biogeochemical Cycles* 19: GB1015.
- Kumar M, Raghubanshi AS. 2011. Sensitivity analysis of BIOME-BGC model for dry tropical forests of vindhyan highlands, India. *International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences-ISPRS Archives* 38: 129-133.
- Kumar M, Rawat S, Singh H, Ravindranath N, Kalra N. 2018. Dynamic forest vegetation models for predicting impacts of climate change on forests: An Indian perspective. *Indian Journal of Forestry* 41(1): 1-12.
- Kwon SS, Choi SH, Lee SD. 2012. Estimation of Spatial-Temporal Net Primary Productivity and Soil Carbon Storage Change in the Capital area of South Korea under Climate Change. *Journal of Environmental Impact Assessment* 21(5): 757-765.
- Lee AR, Noh NJ, Yoon TK, Lee SK, Seo KW, Lee WK, Cho YS, Son Y. 2009. Estimation of Forest Soil Carbon Stocks with Yasso using a Dendrochronological Approach. *Journal of Korean Forestry Society* 98(6): 791-798.

- Lee B, Jang K, Kim E, Kang M, Chun JH, Lim JH. 2019. Predicting Forest Gross Primary Production Using Machine Learning Algorithms. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 21(1): 29-41.
- Lee J, Makineci E, Tolunay D, Son Y. 2018. Estimating the effect of abandoning coppice management on carbon sequestration by oak forests in Turkey with a modeling approach. *Science of The Total Environment* 640-641: 400-405.
- Levis S, Bonan GB, Vertenstein M, Oleson KW. 2004. The Community Land Model's Dynamic Global Vegetation Model (CLM-DGVM): Technical description and user's guide. Technical Note NCAR/TN-459+IA. University Corporation for Atmospheric Research 459: 1-50.
- Li C, Sun H, Wu X, Han H. 2020. An approach for improving soil water content for modeling net primary production on the Qinghai-Tibetan Plateau using Biome-BGC model. *CATENA* 184: 104253.
- Lim HJ, Lee YH, Kwon HJ. 2010. Evaluation of Community Land Model version 3.5-Dynamic Global Vegetation Model over Deciduous Forest in Gwangneung, Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 12(2): 95-106.
- Mao F, Zhou G, Li P, Du H, Xiaojun X, Shi Y, Mo L, Zhou Y, Tu G. 2017. Optimizing selective cutting strategies for maximum carbon stocks and yield of Moso bamboo forest using BIOME-BGC model. *Journal of Environmental Management* 191: 126-135.
- Medlyn B, Duursma R, Zeppel M. 2011. Forest productivity under climate change: A checklist for evaluating model studies. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 2: 332-355.
- Muraoka H, Koizumi H. 2009. Satellite Ecology (SATECO)-linking ecology, remote sensing and micrometeorology, from plot to regional scale, for the study of ecosystem structure and function. *Journal of Plant Research* 122(1): 3-20.
- National Geographic Information Institute. 2019. Business Operation Plan for '19 to '22'.
- Nunes L, Gower S, Peckham S, Magalhaes M, Lopes D, Rego F. 2015. Estimation of productivity in pine and oak forests in northern Portugal using Biome-BGC. *Forestry: An International Journal of Forest Research* 88: 200-212.
- Ooba M, Fujita T, Mizuochi M, Murakami S, Wang QX, Kohata K. 2012. Biogeochemical forest model for evaluation of ecosystem services (BGC-ES) and its application in the Ise Bay basin. *Procedia Environmental Sciences* 13: 274-287.
- Ooba M, Wang QX, Murakami S, Kohata K. 2010. Biogeochemical model (BGC-ES) and its basin-level application for evaluating ecosystem services under forest management practices. *Ecological Modelling* 221: 1979-1994.
- Park HJ, Shin HS, Roh YH, Kim KM, Park KH. 2012. Estimating Forest Carbon Stocks in Danyang Using Kriging Methods for Aboveground Biomass. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 15(1): 16-33.
- Parton WJ, Schimel D, Cole VC, Ojima D. 1987. Analysis of factors controlling soil organic levels of grasslands in the Great Plains. *Soil Science Society of America Journal* 51: 1173-1179.
- Pietsch SA, Hasenauer H, Thornton PE. 2005. BGC-model parameters for tree species growing in central European forests. *Forest Ecology and Management* 211: 264-295.
- Qingling S, Baolin L. 2016. Developing the Biome-BGC Model to Estimate Net Primary Productivity of Alpine Meadow on the Qinghai-Tibet Plateau. 2016 3rd International Conference on Information Science and Control Engineering(ICISCE). 334-337.
- Qingling S, Li B, Zhang T, Yuan Y, Gao X, Ge J, Li F, Zhang Z. 2017. An improved Biome-BGC model for estimating net primary productivity of alpine meadow on the Qinghai-Tibet Plateau. *Ecological Modelling* 350: 55-68.
- Ramezani MR, Bavani ARM, Jafari M, Binesh A. 2017. Evaluating gridded BIOME-BGC for simulating LAI at

- Kasilian watershed-Iran. *Geology, Ecology, and Landscapes* 1(4): 225-231.
- Running SW, Coughlan JC. 1988. A General Model of Forest Ecosystem Processes for regional applications. I. Hydrologic Balance, Canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological Modelling* 42(2): 125-154.
- Running SW, Coughlan JC. 1998. A General Model of Forest Ecosystem Processes for regional application. Hydrologic Balance, Canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. Global Change Biology* 9: 161-185.
- Running SW, Gower ST. 1991. Forest-BGC, a general model of forest ecosystem processes for regional applications: II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets. *Tree Physiology*, Heron Publishing, Victoria 9(1-2): 147-160
- Running SW, Hunt ER. 1993. Generalization of a Forest Ecosystem Process Model for Other Biomes, BIOME-BGC, and an Application for Global-Scale Models. In Ehleringer JR, Field CB, Eds. *Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe*. 141-158. San Diego, CA: Academic Press.
- Song C, Pietsch SA, Kim M, Cha S, Park E, Shvidenko A, Schepaschenko D, Kraxner F, Lee WK. 2019. Assessing Forest Ecosystems across the Vertical Edge of the Mid-Latitude Ecotone Using the BioGeoChemistry Management Model (BGC-MAN). *Forests* 10(6): 523.
- Song JY, Jeong JC, Lee P. SH. 2018. Development of a Classification Method for Forest Vegetation on the Stand Level, Using KOMPSAT-3A Imagery and Land Coverage Map. *Korean Journal of Environment and Ecology* 32(6): 686-697.
- Song YH, Lim CH, Lee WK, Eom KC, Choi SE, Lee EJ, Kim EJ. 2014. Applicability Analysis of Major Crop Models on Korea for the Adaptation to Climate Change. *Journal of Climate Change Research* 5(2): 109-125.
- Son YM, Kim SW, Lee SJ, Kim JS. 2014. Estimation of Stand Yield and Carbon Stock for Robinia pseudoacacia Stands in Korea. *Journal of Korean Forest Society* 103(2): 264-269.
- Thornton PE, Law BE, Gholz HL, Clark KL, Falge E, Ellsworth DS, Goldstein AH, Monson RK, Hollinger D, Falk M, Chen J, Sparks JP. 2002. Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 113: 185-222.
- Tian S. 2011. Development and field-testing of the DRAINMOD-FOREST model for predicting water, soil carbon and nitrogen dynamics and plant growth in drained forests.
- Tian S, Youssef MA, Amatya DM, Vance E. 2014. Global sensitivity analysis of DRAINMOD-FOREST, an integrated forest ecosystem model. *Hydrological Processes* 28(15): 4389-4410.
- Tian S, Youssef MA, Skaggs RW, Amatya DM, Chescheir GM. 2012. DRAINMOD-FOREST: Integrated Modeling of Hydrology, Soil Carbon and Nitrogen Dynamics, and Plant Growth for Drained Forests. *Journal of Environmental Quality* 41: 764-82.
- Tian, S, Youssef MA, Skaggs RW, Amatya DM, Negm L. 2009. Development and application of the forestry version of DRAINMOD-NII. American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting. Reno, Nevada. ASABE. 097129.
- Tupek B, Zanchi G, Verkerk H, Churkina G, Viogy N, Hughes J, Lindner M. 2010. A comparison of alternative modelling approaches to evaluate the European forest carbon fluxes. *Forest Ecology and Management* 260: 241-251.
- Valipour M, Driscoll CT, Johnson CE, Battles JJ, Campbell JL, Fahey TJ. 2018. The application of an integrated biogeochemical model to simulate dynamics of vegetation, hydrology and nutrients in soil and streamwater following a whole-tree harvest of a northern hardwood forest. *Science of the Total*

- Environment 645: 244-256.
- Valipour M, Johnson C, Battles J, Campbell J, Fahey T, Fakhraei H, Driscoll C. 2021. Simulation of the effects of forest harvesting under changing climate to inform long-term sustainable forest management using a biogeochemical model. *Science of The Total Environment* 767: 144881.
- Veganzones M, Nunes L, Lopes D, Hernandez C, Grana M. 2010. Implementation of an User-Friendly Interface of the Forest-BGC Model for Regional/Global-Scale Researches. *Silva Lusitana*. 13-25.
- Wallman P, Svensson MGE, Sverdrup H, Belyazid S. 2005. ForSAFE—an integrated process-oriented forest model for long-term sustainability assessments. *Forest Ecology and Management* 207: 19-36.
- Yan M, Li Z, Tian X, Chen E, Zhang W, Guo Y, Li Chunmei. 2014. Simulation of carbon flux of forest ecosystem by Biome-BGC and MODIS-PSN models. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 1065-1068.
- Yan M, Tian X, Li Z, Chen E. 2016. Improvement of Biome-BGC model by incorporation and data assimilation. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium(IGARSS)*. 1378-1381.
- Yi Shuhua, McGuire AD, Kasischke E, Harden J, Manies K, Mack M, Turetsky M. 2010. A dynamic organic soil biogeochemical model for simulating the effects of wildfire on soil environmental conditions and carbon dynamics of black spruce forests. *Journal of Geophysical Research* 115(G04015): 15.
- Yizhao C, Jianyang X, Zhengguo S, Jianlong L, Yiqi L, Chengcheng G, Zhaoqi W. 2015. The role of residence time in diagnostic models of global carbon storage capacity: model decomposition based on a traceable scheme. *Scientific Reports* 5(1): 16155.
- Yoo SJ, Lee WK, Son Y, Ito A. 2012. Estimation of Vegetation Carbon Budget in South Korea using Ecosystem Model and Spatio-temporal Environmental Information. *Korean Journal of Remote Sensing* 28(1): 145-159.
- You Y, Wang S, Ma Y, Wang X, Liu W. 2019. Improved Modeling of Gross Primary Productivity of Alpine Grasslands on the Tibetan Plateau Using the Biome-BGC Model. *Remote Sensing* 11: 1287.
- Zanchi G, Belyazid S, Akselsson C, Yu L. 2014. Modelling the effects of management intensification on multiple forest services: A Swedish case study. *Ecological Modelling* 284: 48-59.