

## 과정기반 모형을 활용한 산림의 순일차생산성 평가: 남북한 소나무 및 참나무 임분을 중심으로

송철호<sup>1</sup>, 최현아<sup>1,2</sup>, 손지원<sup>3</sup>, 고영진<sup>3</sup>, Stephan A. Pietsch<sup>4</sup>, 이우균<sup>1,3,\*</sup>

<sup>1</sup>고려대학교 오정리질리언스연구원, <sup>2</sup>한스자이델재단 한국사무소, <sup>3</sup>고려대학교 환경생태공학과, <sup>4</sup>국제응용시스템분석연구소

## Assessing forest net primary productivity based on a process-based model: Focusing on pine and oak forest stands in South and North Korea

Cholho Song<sup>1</sup>, Hyun-Ah Choi<sup>1,2</sup>, Jiwon Son<sup>3</sup>, Youngjin Ko<sup>3</sup>, Stephan A. Pietsch<sup>4</sup> and Woo-Kyun Lee<sup>1,3,\*</sup>

<sup>1</sup>OJEng Resilience Institute, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea

<sup>2</sup>Hanns Seidel Foundation, Korea Office, Seoul 04491, Republic of Korea

<sup>3</sup>Department of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea

<sup>4</sup>International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg A-2361, Austria

### Contribution to Environmental Biology

- The overall mean value of NPP simulated by the BGC-MAN model from 1991 to 2100 was 5.17 Mg C ha<sup>-1</sup>, with a range of 3.30–8.19 Mg C ha<sup>-1</sup>.
- Under the SSPs scenarios, the decline of pine forests on the Korean Peninsula due to climate change and ecological disturbances due to climate variability is expected.
- The applicability of the process-based BGC-MAN model is demonstrated to study forest ecosystems material cycles and carbon flux in the Korean Peninsula, including North and South Korea.

### \*Corresponding author

Woo-Kyun Lee

Tel. 02-3290-3016

E-mail. leewk@korea.ac.kr

Received: 28 July 2023

Revised: 13 October 2023

Revision accepted: 8 November 2023

**Abstract:** In this study, the biogeochemistry management (BGC-MAN) model was applied to North and South Korea pine and oak forest stands to evaluate the Net Primary Productivity (NPP), an indicator of forest ecosystem productivity. For meteorological information, historical records and East Asian climate scenario data of Shared Socio-economic Pathways (SSPs) were used. For vegetation information, pine (*Pinus densiflora*) and oak (*Quercus* spp.) forest stands were selected at the Gwangneung and Seolmacheon in South Korea and Sariwon, Sohung, Haeju, Jongju, and Wonsan, which are known to have tree nurseries in North Korea. Among the biophysical information, we used the elevation model for topographic data such as longitude, altitude, and slope direction, and the global soil database for soil data. For management factors, we considered the destruction of forests in North and South Korea due to the Korean War in 1950 and the subsequent reforestation process. The overall mean value of simulated NPP from 1991 to 2100 was 5.17 Mg C ha<sup>-1</sup>, with a range of 3.30–8.19 Mg C ha<sup>-1</sup>. In addition, increased variability in climate scenarios resulted in variations in forest productivity, with a notable decline in the growth of pine forests. The applicability of the BGC-MAN model

to the Korean Peninsula was examined at a time when the ecosystem process-based models were becoming increasingly important due to climate change. In this study, the data on the effects of climate change disturbances on forest ecosystems that was analyzed was limited; therefore, future modeling methods should be improved to simulate more precise ecosystem changes across the Korean Peninsula through process-based models.

**Keywords:** biogeochemistry model, process-based model, net primary productivity, forest ecosystem, climate variation

## 1. 서 론

전 세계적으로 기후변화에 따라 육상생태계의 대표적인 흡수원인 산림의 역할에 대한 관심이 늘어나고 있다. 특히, 토지이용, 토지이용 변화 및 임업(Land Use-Land Use Change and Forestry, LULUCF)으로 일컬어지는 육상생태계의 탄소 흡수원에서 산림은 가장 넓은 면적을 차지한다(Hong *et al.* 2022). 이에 산림의 현재와 미래 온실가스 흡수 및 저장량을 파악하는 것은 중요한 과제로 여겨지고 있다. 산림의 온실가스 흡수 및 저장량은 산림의 생산성과 산림 축적의 변화를 통해 평가된다. 따라서 LULUCF와 산림에 대한 정확한 인벤토리 작성을 위해서는 이들 변화를 모의할 수 있는 다양한 모델링 기법이 적용되어야 한다(Kim *et al.* 2017; Choi *et al.* 2023). 우리나라에서도 마찬가지로 산림을 중심으로 한 육상생태계의 탄소수지에 대한 다양한 모델링 연구가 이루어지고 있다(Choi *et al.* 2014b).

현재까지 우리나라에서는 4 km 단위의 격자로 전국을 조사하는 국가산림자원조사를 수행하여 산림 기본 통계를 작성하고 있고, 이를 통해 현재까지의 산림 축적, 온실가스 흡수량, 생태계 건강성 등을 파악하고 있다(Kim *et al.* 2021a). 또한, 위와 같은 조사에 기반하여 기후인자를 추가한 다양한 산림성장모형을 개발하여 미래 온실가스 흡수량을 산정하고 있다(Choi *et al.* 2014a; Piao *et al.* 2018). 이렇게 통계적 방법에 근거한 기존의 모형들은 연 단위 평가가 이루어지며, 비교적 높은 정확성을 갖는 특성이 있다. 그러나 기존 모형들의 모의 과정에는 대부분 생태계의 구조 및 과정이 반영되지 않았다. 또한, 대부분 연 단위 평가가 이루어져 일 단위, 월 단위로 변화하는 기상조건을 반영하기 어렵고, 생태계 전반을 아우르는 상호 관계 파악에 한계가 있었다. 이러한 분석 시간 단위의 차이는 일 단위의 광합성량과 생산성에 기반한 분석이 이루어지는 다른 농업 및 생태계 모형과의 연계에 어려움을 가져왔으며, 우리

나라 육상생태계에 대한 탄소수지 파악에서의 한계로 존재했다. 이에 육상생태계 전반과의 연계를 위해서는 산림의 광합성능에 기반하여 일 단위로 생태계 변화를 모의해야 하는 상황이다. 따라서 생태적인 구조와 과정을 모사하여 일 단위의 광합성능과 생산성을 추정하는 과정기반 모형(Process-based Model)의 적용을 보다 확대하기 위한 연구가 다시금 필요한 상황이다(Heo *et al.* 2022).

산림생태계에 과정기반 모형은 과거부터 일부 적용되어왔다. 우리나라 육상생태계의 구조 분석을 위해 MAPSS-CENTURY (MC1) 모형, Vegetation Integrated Simulator for Trace gases (VISIT) 모형, Yasso 모형 등이 대표적으로 적용되어왔다(Kim *et al.* 2009; Choi *et al.* 2011; Byun *et al.* 2012; Kwon *et al.* 2012; Yoo *et al.* 2012; Cui *et al.* 2014; Kim *et al.* 2016b). 이들은 모두 식생의 일차생산성과 탄소축적 과정을 모의했다는 공통점이 있으나 시공간적 분석 시 대부분 산림에 대한 해외 계수를 그대로 사용하였으며, 낮은 해상도 혹은 일부 대상지에 국한되어 분석이 이루어진 제약이 있었다. 또한 최근 국내에 적용되지 않았던 일부 모형을 분석한 사례나, 기존 모형을 개선하여 인공지능 등과 연계하여 분석을 수행한 사례가 있었으나(Lim *et al.* 2010; Kim *et al.* 2021b), 여전히 우리나라를 대상으로 한 과정기반 모형의 적용은 제한적인 상태이다. 그리고 이러한 한계점은 국내에 적용된 선행 연구의 사례가 제한적이고, 각 모형별 고도화와 적용 사례가 많지 않음에 기인하는 것으로 판단된다. 따라서, 국제적으로 검증된 과정기반 산림생태계 모형을 한반도에 적용하여 향후 모형 고도화를 위한 다양한 활용사례가 필요하다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 Biome-Biogeochemistry (BGC) 계열의 모형인 BGC-Management (MAN) 모형을 국내에 적용하고자 한다. Biome-BGC 모형은 Dynamic global vegetation model (DGVM)과 더불어 전 세계에서 널리 활용되고 있는 과정기반 모형으로 우리나라에서는 점봉산 및 광릉 시험림 등을 대상으로 적용된 바 있다(Kang *et al.*

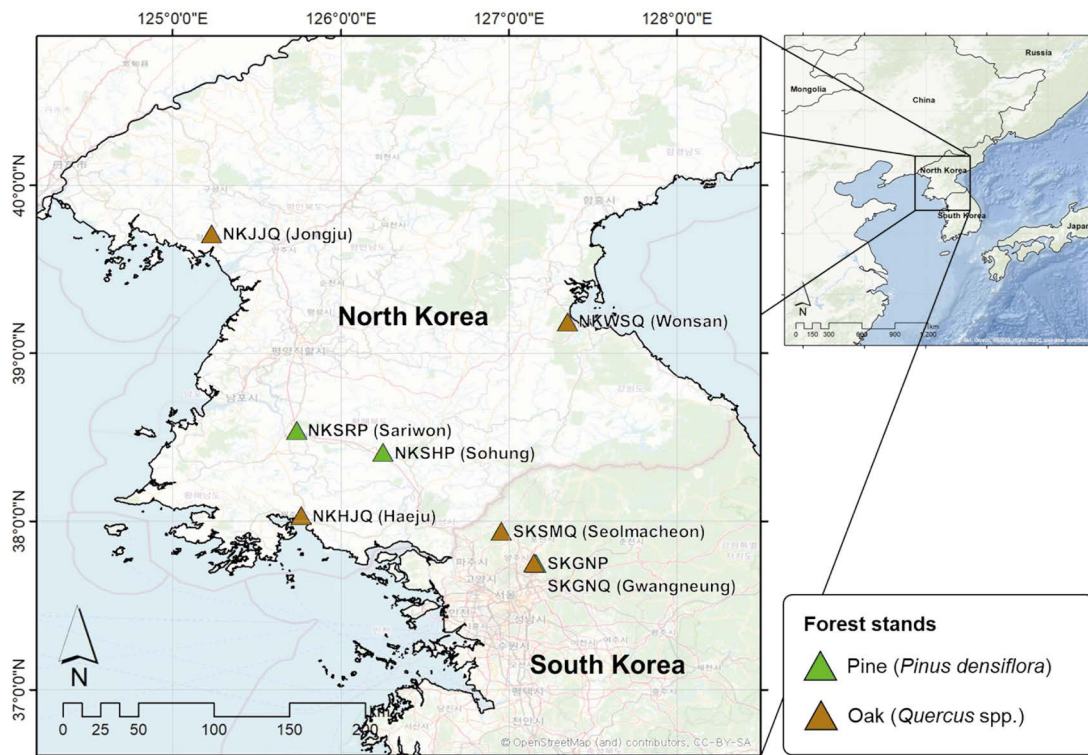
2006; Kang *et al.* 2016; Song *et al.* 2019). BGC-MAN 모형은 이러한 Biome-BGC 모형을 국제응용시스템분석연구소(International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA)에서 개선한 모형으로 보다 상세한 임분 상태를 반영할 수 있는 특징이 있다(Pietsch 2014; Akujärvi *et al.* 2018). 우리나라를 대상으로 한 과정기반 모형의 적용성을 향상시켜야 하는 시점에서, 본 연구는 해당 모형의 남한 및 북한의 적용을 통해 향후 해당 모형에 대한 활용 가능성을 높이고, 기후변화에 따른 육상생태계 탄소수지 및 순환 연구에 필요한 다양한 모델링에 대한 접근성을 향상시키고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 연구 대상지

본 연구의 대상지는 한반도의 대표적인 침엽수종인 소나무(*Pinus densiflora*)와 활엽수종인 참나무(*Quercus*

spp.) 임분을 포함한다. 또한 모형 구동을 위해 각 지점에 코드를 부여하여 분석에 활용하였다. 대상지로는 기본적으로 모형 구동에 필요한 정보가 충분히 구축되어 있는 지역을 우선 선정하였는데, 우리나라의 경우 관측이나 모델링에 기반하여 산림의 생산성이 분석되어 있는 지역을 선정하였다. 따라서, 우리나라의 경우 광릉의 소나무 및 참나무 임분 2곳(SKGNP, SKGNQ)과 설마천 유역 1곳(SKSMQ)을 포함한 총 3곳의 대상지가 선정되었다(Kwon *et al.* 2009; Noh *et al.* 2010; Chae 2011). 북한의 경우에는 임상 및 임분에 대한 실제 정보 획득에는 제한이 있어왔다. 이로 인해 과정기반 모형에 대한 적용성이 평가된 사례가 적어 모형의 활용성을 제고하는 측면과 기후변화로 인한 영향을 일차적으로 파악하는 측면에서 분석의 의미가 있다고 할 수 있다. 따라서, 북한 내 임분 정보는 한스자이델재단(Hanns Seidel Foundation, HSF)과 같이 국외 NGO로서 대북 접근이 가능한 기관의 산림 관련 활동 내역을 통해서 파악하였다. 본 연구에서는 북한 내 양묘장이 건설된 것으로 알려져 있어 주변 수종 및 임분 정보가 추정 가



**Fig. 1.** Distribution of the study sites for running the biogeochemistry management (BGC-MAN) model in South and North Korea. Three pine (*Pinus densiflora*) stands: SKGNP, NKSHP, and NKSHP, and five oak (*Quercus* spp.) stands: SKGNQ, SKSMQ, NKHJQ, NKJJQ, and NKWSQ.

능한 곳을 대상으로 선별하였다. 따라서 소나무 임분의 경우에는 사리원(NKSRP)과 서흥(SKSH), 2곳이 대상으로 선정되었고, 참나무 임분의 경우에는 해주(NKHJQ), 정주(NKJJQ), 원산(NKWSQ)의 3곳을 대상으로 선정하였다 (Fig. 1).

## 2.2. 연구 재료

BGC-MAN 모형은 Biome-BGC 모형에서 파생된 바와 같이 BGC 계열의 모형에서 요구하는 생물리학적 정보, 수종 정보, 기후 정보, 관리 정보 등 크게 4가지 범주의 자료를 분석에 활용하고, 세부적으로는 총 50여 가지가 넘는 입력 자료 및 계수가 요구된다. 또한, 기본적으로 BGC-MAN의 경우에는 BGC-MAN에 대한 소스 코드와 이에 대한 인터페이스 그리고 입력자료 구축을 위한 세부 프로그램 등이 활용된다. 특히, 이러한 생태계 모형은 태양에너지와 수목의 광합성 과정을 비롯하여 생물리학적 특성과 탄소 및 질소 교환 등의 생지화학적 과정 등 생태계의 구조와 생태적 영향 관계를 모사하는 특징이 있으며 다양한 입력자료를 요구한다(Pietsch *et al.* 2005).

생물리학적 정보는 대상지의 좌표, 고도, 사면 방향, 경사도, 태양 입사각, 토성, 질소량 등의 정보가 포함된다. 우선 본 연구에서는 좌표, 고도, 사면방향, 경사도 등의 정보를 구축하기 위해 셔틀 레이더 지형 미션(Shuttle Rader Topography Mission, SRTM)의 30 m급 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM)을 구축하여 활용하였다. 또한 토성 및 토양 심도의 경우에는 전 세계적으로 널리 활용하는 Harmonized World Soil Database (HWSD) 토양 정보를 활용하였다. 이 외에도 알베도, 질소량, 이산화탄소량 등에 대한 정보는 유사한 대상지에서의 모의를 진행한

Song *et al.* (2019)의 선행 연구의 자료를 준용하였다(Table 1).

수종 정보의 경우에는 우선 소나무 및 참나무와 관련되어 BGC 모형 계열에서 계수 작성 시 널리 참조하는 White *et al.* (2000)에서 제시하는 값에 기반한 Song *et al.* (2019)과 Pietsch (2014) 등에서 활용하였던 정보를 참조하였다 (Table 2). 특히, 우리나라의 경우에는 광릉과 설마천 유역에 대한 선행 연구 정보를 포함하여 임분의 산림 축적 및 수종의 생리적 특성을 확인하여 계수에 반영하였으며 (Kwon *et al.* 2009; Lim *et al.* 2010; Chae 2011; Noh *et al.* 2013), 북한에 대한 수종 정보는 북한에 대한 선행 연구와 한스자이델재단을 통해 확보한 북한 내부 식생 분포 정보 및 양묘장에 대한 정보 등을 종합하여 활용하였다(Piao *et al.* 2016). 또한 식생의 고사율의 경우에는 우리나라의 주요 수종으로 대상으로 연구를 수행한 Kim *et al.* (2017a)의 연구를 참조하여 적용하였다. 따라서 전반적인 임분의 고사율과 생육 기간을 정의하는 계수들이 우리나라에 맞게 일부 조정되었으며, 질소 및 탄소의 배분과 관련한 요소들의 경우에는 기존 계수들을 활용하되 국내 연구와 검토하여 해당 값의 타당성 등을 검토한 후 사용하였다. 다만, 국내 문헌이 존재하지만 모형의 구동 상 문제가 되거나 수종 및 임분 특성 등을 검토하였을 시 활용하기 어려운 경우에는 선행 연구의 계수를 준용하였다.

기후 정보의 경우에는 과거 자료의 경우에는 우리나라 기상청의 관측 자료를 활용하였으며, 미래 시나리오 자료의 경우에는 새롭게 구축된 공통사회경제경로(Share Socioeconomic Pathways, SSPs)의 기후 시나리오를 활용하였다. 본 연구에서는 온실가스 감축에 대한 부담과 기후 변화 적응에 대한 부담이 적은 것을 가정한 SSP1-2.6 시나리오와 이에 대비되는 SSP3-7.0 시나리오 그리고 가장 많

**Table 1.** Biophysical data of each site

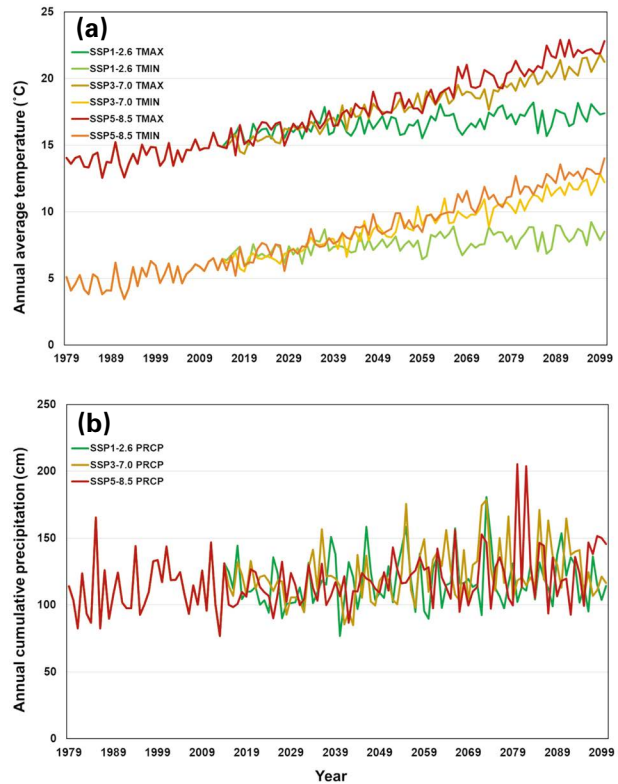
Station code	Longitude	Latitude	Elevation (m)	Slope degree	Aspect	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Soil depth (m)
NKHJQ	125.76	38.03	32	1.80	221	42	36	22	1
NKJJQ	125.23	39.71	19	4.63	112	42	36	22	1
NKSH	126.25	38.41	117	3.49	30	42	36	22	1
NKSRP	125.74	38.54	19	0.85	338	42	36	22	1
NKWSQ	127.35	39.19	10	0.71	16	42	36	22	1
SKGNP	127.16	37.75	425	19.00	255	50	45	5	1
SKGNQ	127.15	37.75	340	14.00	300	50	13	37	1
SKSMQ	126.95	37.94	293	15.00	315	52	25	23	1



**Table 2.** Species information data modified from Song *et al.* (2019) and Pietsch (2014)

Types	Pine	Oak
Yearday to start new growth*	0	90
Yearday to end litterfall*	0	320
Transfer growth period	0.3	0.15
Litterfall as fraction	0.3	0.65
Annual leaf, fine root turnover fraction	0.18	1
Annual live wood turnover fraction	0.7	0.7
Minimum mortality fraction*	0.014	0.017
Maximum mortality fraction*	0.014	0.042
(Low) elliptic mortality	300	450
(High) elliptic mortality	100	150
Fire mortality fraction	0	0
New fine root C:New leaf C	0.523	1
New stem C:New leaf C*	2.5	1.29
New live wood C:New total wood C	0.059	0.12
New root C:New stem C	0.29	0.25
Current growth:Storage growth	0.5	0.5
C:N of leaves*	33.1	26.8625
C:N of leaf litter, after retranslocation	132.0	63.3
C:N of fine root*	38.0	73.5
C:N of live wood	50.0	63.5
C:N of dead wood	1400	450
Leaf litter labile proportion	0.257	0.2
Leaf litter cellulose proportion	0.493	0.56
Leaf litter lignin proportion	0.25	0.24
Fine root labile proportion	0.252	0.34
Fine root cellulose proportion	0.495	0.44
Fine root lignin proportion	0.253	0.22
Dead wood cellulose proportion	0.71	0.704
Dead wood lignin proportion	0.29	0.296
Canopy water interception coefficient	0.051	0.38
Canopy light extinction coefficient	0.51	0.54
All-sided to projected leaf area ratio	2.6	2
Canopy average specific leaf area	13	35
Ratio of shaded SLA:Sunlit SLA	2	2
Fraction of leaf N in Rubisco	0.0457	0.088
Maximum stomatal conductance	0.001	0.0018
Cuticular conductance	0.000014	0.0004
Boundary layer conductance	0.09	0.005
Leaf water potential: start	-0.5	-0.1
Leaf water potential: complete	-2.2	-3.5
Vapor pressure deficit: start	50	200
Vapor pressure deficit: complete	2500	2550
Nighttime freezing temperature: start*	-2	-1
Nighttime freezing temperature: complete*	-8	-9

\*Modified after checking Korean literature



**Fig. 2.** Trends of climate data of Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) scenarios: (a) annual average maximum and minimum temperature of SSP1, 3, and 5; (b) annual cumulative precipitation of SSP1, 3, and 5 from 1979-2100.

은 온실가스 배출량을 가정한 SSP5-8.5 시나리오를 활용 하였다. 북한을 대상지로 포함하기 때문에 우리나라 기상청 기후정보포털 (<http://www.climate.go.kr>)에서 제공하는 동아시아 시나리오 자료를 활용하였으며, 대상지 위치 정보에 맞게 일부 추출하여 사용하였다. 시나리오 시작 시점 (1979~2015년)까지의 자료는 과거 기상정보로써 각 시나리오별로 동일한 기상 상태를 지니며, 이후 시나리오 예측부터 각각 기상자료의 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 다만, 1979년 이전 모형의 초기화 단계에서는 각 기상자료 시나리오의 추세 값이 모형에서 반영된다. 모형에서는 일별로 자료를 활용하기 때문에, 일별 시나리오 자료를 확보하였다(Fig. 2).

관리 정보의 경우에는 수종정보와 마찬가지로 선행 연구에서 밝힌 대로 대상지의 관리 현역이 나와있는 문헌을 참조하였다. 선행 연구에서 제시한 영급 구조 등을 고려하였을 시, 광릉의 소나무 및 참나무 임분의 경우에는 장기간 산림이 유지된 것으로 선정하였으며, 그 외의 남북한 산림

의 경우에는 한국전쟁 등을 고려한 산림 파괴 등을 반영하여 1950년대에 훼손되어 1960년대부터 재조립된 것으로 가정하였다(Bae *et al.* 2012; Lee *et al.* 2018). 따라서 모형의 초기화 시점은 1950년부터 시작하여 분석이 이루어진다. 북한의 경우에는 최근 연구에서 산림 훼손에 대한 다양한 내용이 보고되고 있으나, 양묘 사업장 등을 대상으로 한다는 점과 대상지에 대한 구체적인 내용을 확인하기 어렵다는 점 등을 고려하여 산림이 남한과 유사하게 복원되어 있는 상황을 가정하였다(Kim *et al.* 2016a).

### 2.3. 연구 방법

본 연구에서는 IIASA에서 개발한 BGC-MAN 모형의 소스코드와 인터페이스를 확보하여 구동하였다. 따라서 일반적인 BGC 계열의 모형과는 다르게 입력 자료 형식에 맞게 자료를 가공하여 인터페이스에 직접 입력하는 형식으로 구동이 이루어졌다. 수종 정보의 경우에는 소나무와 참나무에 대해 획득한 계수 정보를 모형 입력형식에 맞게 대상지 코드별 개별 파일로 정리하여 모형과 연동하였다. 기 후정보의 경우, mtclim43 및 dmout2bgc 등과 같은 어플리케이션을 통해 고도에 따른 기온 감률을 적용하고 모형에서 인식 가능한 형태로 자료의 형식을 조정하여 모델링에 활용하였다. 이에 본 연구에서는 남북한의 전반적인 탄소 수지를 파악하기 위하여 기상자료의 시작시점(1979년) 이후인 1991년부터 2100년까지의 산림의 순일차생산성(Net Primary Productivity, NPP)을 중점적으로 모의하였다. 분석은 각 SSP 시나리오별로 진행되었으며, 모형에서 일별로 구동된 결과를 종합하여 연별로 결과 값을 산출하였다.

모형 결과에 대한 검증은 현재 시점까지 기상자료가 존재하는 시점에서 도출된 결과값을 기존 문헌 비교하는 것과 위성관측을 통한 산출물 결과와 비교하는 두 가지 방식을 통해 이루어졌다. 출력된 모델링 결과의 검증은 대상지의 NPP에 대한 선행 연구가 있는 경우 해당 범위를 비교하였으며, 총일차생산성(Gross Primary Productivity, GPP)만이 존재하는 경우에는 이를 따로 산출하여 비교하였다. 제한적인 선행 연구 상황에서 모델링을 통한 결과와 플럭스에 기반한 연구 사례 등을 종합한 후, 적합한 NPP 범위를 비교하여 모형의 결과를 분석하고자 하였다. 또한, MODIS와 같이 위성영상을 통해 계산된 NPP 산출물과 비교를 통해 우리나라 및 북한에 대한 전반적인 모델링 결과에 대한 수치와 경향성을 파악하였다. MODIS

산출물의 경우에는 비교적 널리 활용되고 있는 보정된 MYD17A3HGF의 NPP 산출물을 활용하였다. 해당 자료는 전 세계를 500 m 간격으로 모니터링하여 분석한 결과로 2001년부터 2022년까지의 자료를 제공하고 있다.

## 3. 결 과

### 3.1. 대상지별 산림생태계 생산성

BGC-MAN 모형을 통해 모의된 산림생태계의 생산성을 나타내는 지표인 NPP의 전체 평균 값은  $5.17 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 이었으며, 최대값 및 최소값을 고려하였을 시의 범위는  $3.30 \sim 8.19 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 로 도출되었다. 분석 대상지에 포함된 해주(NKHJQ), 정주(NKJJQ), 서흥(NKSHQ), 사리원(NKSRP), 원산(NKWSQ), 광릉 소나무림(SKGNP), 광릉 참나무림(SKGNQ), 설마천(SKSMQ) 임분에서는 각각 연 평균 최대값 및 최소값으로  $2.80 \sim 7.76$ ,  $2.44 \sim 6.98$ ,  $-3.08 \sim 7.84$ ,  $-1.84 \sim 7.90$ ,  $4.18 \sim 8.59$ ,  $-3.29 \sim 12.35$ ,  $2.93 \sim 21$ ,  $4.01 \sim 9.20 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 의 범위를 보였다(Table 3).

시계열적으로 추정된 NPP의 최대값과 최소값을 보았을 때, 참나무 임분의 NPP는 지속적으로 양(+)의 생산성을 보였으나, 소나무 임분의 경우에는 최소값에서 NPP 값이 음(-)의 값으로 나타나는 시점이 나타났다. 전반적인 NPP의 경향성을 보면, 2100년까지 전반적으로 값이 증가하는 경향이라고 할 수 있다. 그러나 가까운 미래라 할 수 있는 2050년까지의 생산성 증가는 증감폭이 비교적 적은 상태에서 증가 추세를 보였으나, 2050년 이후로의 먼 미래에서는 생산성의 증감 폭이 커지는 형태로 값이 증가하는 추세로 도출되었다(Fig. 3).

### 3.2. 문헌 기반 선행 연구와의 결과 비교

우선 각 선행 연구들에서의 NPP 값은 본 연구와 추정하는 시점과 대상 임분 등에 일부 차이가 존재하여 직접 비교는 제한적이다. 그러나, 본 연구에서의 과거 추정치(1991~2020년)와 미래 예측 값(2021~2100년) 등을 선행 연구에서 제시한 수치와 비교하였을 때 추정치가 전반적으로 유사하게 도출되었다. 우선 우리나라 SKGNP 및 SKGNQ의 경우에 본 연구에서 추정된 과거 추정치는  $2.32 \sim 5.42 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 과  $2.93 \sim 5.54 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 이었으며, 대상지에 대한 추정 시점이 겹치는 문헌에서의 추정 값인

5.37~7.20 Mg C ha<sup>-1</sup>과 4.00~6.55 Mg C ha<sup>-1</sup>의 범위로 나타나 본 연구의 추정치의 최대값과 문헌 추정 값의 최소값이 유사성을 가졌다. 다만, 미래 추정치의 경우에는 기존 문헌의 결과치를 모두 포함하고는 있었으나 기후 변동성으로 인해 본 연구의 값 범위는 다소 크게 나타났다. 또한, SKSMQ의 경우에는 선행 연구에서 GPP의 값을 제시하고 있어 해당 값으로 비교 가능하였는데, 전반적인 값의 범위

가 문헌과 유사하였다(Table 4).

반면 북한을 대상으로 한 대상지들은 전반적으로 검증 자료를 확보하기 어려웠으나 유사한 과정기반 모형을 바탕으로 북한 전역을 모의한 선행 연구와의 비교가 가능하였다. Cui *et al.* (2014)의 경우에는 4.53~5.97 Mg C ha<sup>-1</sup>로 과거의 NPP 값을 모의하였고, 본 연구에서는 1.46~6.75까지로 일부 시점과 대상지별 차이는 있으나 전반적으로 선

**Table 3.** Net primary productivity (NPP) estimation of forest stand sites (unit: Mg C ha<sup>-1</sup>)

Category	Scenario	NKHJQ			NKJJQ			NKSHP			NKS RP		
		Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.	Min.
Historical NPP (1991–2020)	SSP1-2.6	4.16	4.50	3.84	3.72	3.98	3.41	4.31	5.98	1.46	4.03	5.56	2.43
	SSP3-7.0	3.63	4.13	3.25	3.23	3.74	2.90	4.19	5.26	2.69	3.88	5.02	2.14
	SSP3-8.5	3.19	3.77	2.80	2.79	3.30	2.44	4.02	4.78	3.12	3.75	4.52	2.77
2020s NPP (2021–2030)	SSP1-2.6	4.68	4.83	4.55	4.17	4.30	4.06	4.55	6.14	1.48	4.02	4.94	1.66
	SSP3-7.0	4.31	4.55	4.08	3.84	4.16	3.63	4.12	5.37	3.34	4.07	5.54	3.22
	SSP3-8.5	3.89	4.03	3.70	3.45	3.57	3.27	4.19	4.68	3.31	3.99	4.55	2.95
2030s NPP (2031–2040)	SSP1-2.6	5.04	5.19	4.77	4.51	4.71	4.32	4.62	5.85	1.87	4.45	6.34	2.22
	SSP3-7.0	4.84	5.10	4.58	4.34	4.59	4.02	4.36	5.99	2.86	3.97	5.26	2.86
	SSP3-8.5	4.38	4.73	4.06	3.88	4.20	3.54	4.15	5.01	3.31	3.90	4.92	2.86
2040s NPP (2041–2050)	SSP1-2.6	5.46	5.70	5.25	4.90	5.18	4.66	4.42	7.51	-0.83	4.37	6.63	0.10
	SSP3-7.0	5.34	5.63	5.00	4.81	5.00	4.34	4.66	6.08	3.13	4.21	5.09	2.10
	SSP3-8.5	4.94	5.05	4.82	4.41	4.58	4.13	4.24	5.53	2.35	4.17	5.49	1.93
2050s NPP (2051–2060)	SSP1-2.6	5.89	6.10	5.66	5.36	5.62	5.19	4.70	6.51	2.24	4.45	5.77	2.28
	SSP3-7.0	5.92	6.19	5.64	5.32	5.57	5.12	4.58	6.14	3.40	4.29	6.20	2.10
	SSP3-8.5	5.59	6.01	5.37	5.00	5.35	4.64	4.27	6.14	-3.05	3.99	5.78	-1.84
2060s NPP (2061–2070)	SSP1-2.6	6.42	6.67	6.23	5.86	6.06	5.67	4.48	6.92	1.95	4.25	6.18	1.73
	SSP3-7.0	6.61	6.91	6.22	6.01	6.31	5.61	4.34	6.50	0.02	4.27	6.95	-0.76
	SSP3-8.5	6.38	6.77	6.14	5.59	5.96	5.35	4.75	6.17	0.60	4.37	5.62	1.29
2070s NPP (2071–2080)	SSP1-2.6	6.19	6.73	5.93	5.58	6.09	5.33	5.20	7.42	2.53	4.78	7.05	1.97
	SSP3-7.0	5.86	6.74	5.51	5.33	6.21	5.00	5.26	7.67	2.53	4.87	7.19	2.38
	SSP3-8.5	5.58	6.75	5.18	4.95	5.93	4.63	5.23	7.46	1.17	4.88	7.90	-0.11
2080s NPP (2081–2090)	SSP1-2.6	6.49	6.94	6.16	5.92	6.28	5.59	4.71	7.58	-0.13	4.51	6.80	1.33
	SSP3-7.0	5.98	6.43	5.65	5.45	5.79	5.12	4.68	6.94	-0.08	4.53	6.57	1.18
	SSP3-8.5	5.66	6.09	5.32	5.10	5.45	4.78	4.67	6.72	-0.05	4.48	6.35	1.26
2090s NPP (2091–2100)	SSP1-2.6	7.34	7.76	6.95	6.63	6.98	6.31	5.15	7.84	1.68	4.87	7.03	2.92
	SSP3-7.0	6.84	7.26	6.44	6.16	6.53	5.83	5.05	7.28	1.67	4.80	6.45	2.94
	SSP3-8.5	6.50	6.92	6.11	5.83	6.20	5.50	5.00	6.78	2.20	4.76	6.25	2.96
Total average	SSP1-2.6	5.74	6.05	5.48	5.18	5.47	4.95	4.68	6.86	1.36	4.41	6.26	1.85
	SSP3-7.0	5.48	5.88	5.15	4.94	5.32	4.62	4.58	6.36	2.17	4.32	6.03	2.02
	SSP3-8.5	5.12	5.57	4.83	4.56	4.95	4.25	4.50	5.92	1.44	4.25	5.71	1.56

Table 3. Continued

Category	Scenario	NKWSQ			SKGNP			SKGNO			SKSMQ		
		Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.	Min.
Historical NPP (1991–2020)	SSP1-2.6	5.78	6.75	4.92	4.54	5.42	2.53	5.01	5.54	4.49	5.67	6.10	5.36
	SSP3-7.0	5.40	5.98	4.48	4.11	5.22	3.20	4.12	4.72	3.62	4.88	5.33	4.49
	SSP3-8.5	5.02	5.59	4.19	3.73	4.72	2.32	3.47	3.95	2.93	4.36	4.89	4.01
2020s NPP (2021–2030)	SSP1-2.6	5.88	6.58	5.16	4.63	6.20	-0.48	5.62	5.78	5.47	6.23	6.47	6.08
	SSP3-7.0	5.59	6.22	4.79	4.27	5.39	3.06	4.55	4.90	4.06	5.51	5.72	5.30
	SSP3-8.5	5.37	5.87	4.95	3.63	4.36	2.59	3.75	4.23	3.06	5.07	5.21	4.92
2030s NPP (2031–2040)	SSP1-2.6	5.95	6.40	5.24	4.68	5.39	3.84	5.68	5.90	5.43	6.58	6.78	6.29
	SSP3-7.0	5.66	6.42	5.13	5.12	7.32	2.36	4.64	4.81	4.43	5.99	6.19	5.76
	SSP3-8.5	5.24	5.83	4.68	5.15	6.75	3.49	4.08	4.27	3.90	5.46	5.76	5.12
2040s NPP (2041–2050)	SSP1-2.6	6.25	6.66	5.90	4.62	5.87	1.59	6.08	6.45	5.76	6.96	7.31	6.65
	SSP3-7.0	5.94	6.79	5.21	4.60	4.96	4.32	5.11	5.48	4.75	6.43	6.68	6.12
	SSP3-8.5	5.66	6.37	4.27	4.56	4.93	4.28	4.63	5.00	4.27	5.99	6.17	5.81
2050s NPP (2051–2060)	SSP1-2.6	6.23	6.53	5.85	5.00	8.47	-0.16	6.72	7.02	6.38	7.33	7.63	7.20
	SSP3-7.0	6.25	7.27	5.36	4.87	5.51	3.90	5.80	6.11	5.44	6.94	7.27	6.60
	SSP3-8.5	5.77	6.60	4.65	4.87	5.51	3.99	5.33	5.63	4.99	6.49	6.76	6.29
2060s NPP (2061–2070)	SSP1-2.6	6.90	7.50	6.22	5.13	9.06	1.65	7.34	7.65	7.04	7.77	7.99	7.53
	SSP3-7.0	6.31	7.07	5.70	4.86	8.47	0.22	6.44	6.78	6.14	7.46	7.84	7.06
	SSP3-8.5	5.76	6.82	4.81	4.91	8.28	0.22	5.99	6.29	5.67	7.03	7.32	6.64
2070s NPP (2071–2080)	SSP1-2.6	7.09	7.53	6.49	4.44	8.90	-1.64	7.92	8.30	7.62	7.64	8.07	7.21
	SSP3-7.0	6.93	8.59	4.99	4.89	7.90	-0.56	7.10	7.44	6.80	6.94	7.75	6.49
	SSP3-8.5	6.90	8.38	5.44	4.93	8.27	-0.92	6.62	6.93	6.39	6.51	7.35	6.10
2080s NPP (2081–2090)	SSP1-2.6	7.17	7.79	6.78	5.34	9.81	1.96	8.40	8.90	7.94	8.05	8.49	7.70
	SSP3-7.0	6.72	7.29	6.30	5.52	10.11	-3.04	7.78	8.13	7.45	7.28	7.72	6.88
	SSP3-8.5	6.60	7.14	6.18	5.17	8.48	1.32	7.23	7.49	6.97	6.88	7.32	6.47
2090s NPP (2091–2100)	SSP1-2.6	7.87	8.51	7.15	5.92	12.35	-1.05	8.96	9.22	8.50	8.85	9.21	8.55
	SSP3-7.0	7.46	8.13	6.71	4.37	11.90	-2.95	8.27	8.70	7.86	8.14	8.56	7.76
	SSP3-8.5	7.29	7.93	6.55	5.09	9.15	-3.30	7.92	8.37	7.44	7.75	8.17	7.37
Total average	SSP1-2.6	6.57	7.14	5.97	4.92	7.94	0.92	6.86	7.19	6.51	7.23	7.56	6.95
	SSP3-7.0	6.25	7.08	5.41	4.73	7.42	1.17	5.98	6.34	5.62	6.62	7.01	6.27
	SSP3-8.5	5.96	6.72	5.08	4.67	6.72	1.55	5.45	5.80	5.07	6.17	6.55	5.86

행 연구를 포함한 예측치를 도출하였다. 또한, Kim *et al.* (2016a)의 경우에는 NPP 값을 과소추정하는 경향을 갖고 있었으나, 전반적인 선행 연구 등과의 비교를 통해 미래 북한 산림의 적정 NPP의 범위를 0.81~6.03로 제시하여 본 연구의 추정치와 유사한 추정 범위를 제시하였다. 남북한에 일부 대상지가 중복되는 Song *et al.* (2019)의 연구에서는 전 지구 스케일의 RCP 시나리오 기후자료를 사용한 반

면, 본 연구에서는 SSP 시나리오 기후 자료를 사용하였는데, 거의 유사한 범위대가 결과로 도출되었다.

### 3.3. 위성영상 기반 생산성 산출물과의 결과 비교

각 기후 시나리오에 따른 본 연구의 추정 값과 MODIS 영상 산출물에 따른 NPP 값을 비교분석하였을 때 전반적으로 MODIS 영상 산출물의 결과가 큰 것으로 나타났



다. 종합적으로 살펴보면, SSP1-2.6에 기반한 기후 시나리오를 적용하였을 시 위성 산출물과의 차이가 가장 적었고, SSP3-7.0과 SSP5-8.5에서의 분석 결과에서 과소추정 되는 결과가 두드러지게 나타났다. 이러한 추세는 전반적으로 0을 절편으로 하는 선형 수식을 통해서도 나타났으며, 각각의 기울기 값을 통해 과소추정되는 경향성을 파악할 수 있었다. 이때, 각 수식별로 R<sup>2</sup> 값은 0.941~0.957 사이의 값을 가졌다. 특히, SSP5-8.5에서는 MODIS 영상과의 NPP 차이가 1~2 Mg C ha<sup>-1</sup> 이상 나타나기도 하였는데, 이는 극심한 기후변화를 가정한 기후 시나리오의 영향이 존재한 것으로 판단된다(Fig. 4).

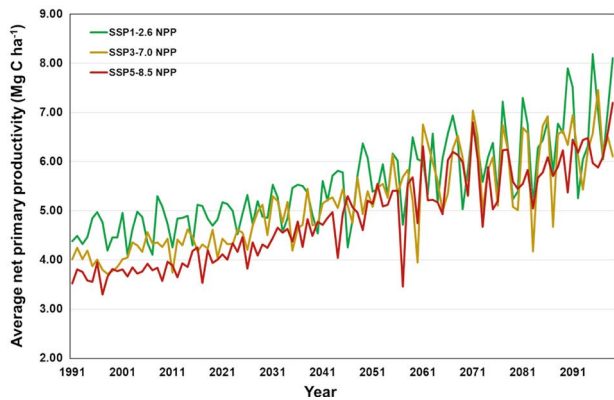


Fig. 3. Trends of estimated net primary productivity by biogeochemistry management (BGC-MAN) model during 1991–2100.

#### 4. 고 찰

국제적으로 검증된 과정기반 산림생태계 모형을 북한과 우리나라에 적용하여 산림의 생산성을 평가하였을 시, 전반적인 일차생산성의 수치는 위도가 높은 북한에서의 모

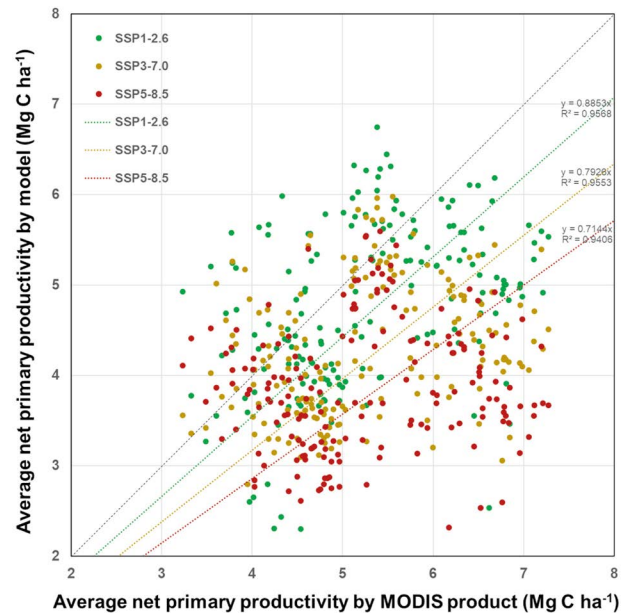


Fig. 4. Comparison between modeling simulation by scenarios and moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) products.

Table 4. Comparing modeling results with previous literature (unit: Mg C ha<sup>-1</sup>)

Station code	Historical (this study)	Estimation (this study)	Literature	Reference
NKHJQ	2.80–4.50	3.70–7.76		
NKJJQ	2.24–3.98	3.22–6.98	4.53–5.97	Cui <i>et al.</i> (2014)
NKSHP	1.46–5.98	–3.05–7.84	0.81–6.03	Kim <i>et al.</i> (2016b)
NPSRP	2.14–5.56	–1.84–7.90		
NKWSQ	4.19–6.75	4.27–8.59	6.75	Song <i>et al.</i> (2019)
SKGNP	2.32–5.42	–3.30–12.35	5.37–7.20 6.39	Eum <i>et al.</i> (2005) Song <i>et al.</i> (2019)
SKGNQ	2.93–5.54	3.06–9.22	4.30–6.05 4.00–6.55 4.28–5.39	Lim <i>et al.</i> (2003) Lim <i>et al.</i> (2010) Song <i>et al.</i> (2019)
SKSMQ	4.01–6.10 6.84–10.63*	4.92–9.21 8.72–15.46*	8.72 11.93–12.06*	Song <i>et al.</i> (2019) Shin <i>et al.</i> (2012)

\*Value of gross primary productivity (GPP) from original data for comparing previous research

의 값이 상대적으로 낮게 나타났으며, 위도가 낮은 지역의 모의 값이 높게 나타났다. 이는 일반적으로 고위도 지방으로 갈수록 광합성에 필요한 태양 에너지량이 줄고 기후 조건이 한랭해지기 때문인 것으로 추정된다(Lindsay *et al.* 2014). 또한, 장기간 임분이 유지된 것으로 입력 값을 설정해 준 남한 광릉시험림의 소나무 및 참나무 임분(SKGNP 및 SKGNQ)의 값이 다른 지역에 비해서 높게 도출되었다. 이는 임분의 상태가 타 대상지에 비해 생태적으로 건강한 상태로 추정되어 있어 토양의 질소 및 탄소 조건이 결과 출력 시점인 1991년 이전부터 좋은 상태로 모의되었기 때문으로 예상된다. 다만, 본 연구에서는 북한의 양묘장을 대상으로 하였고, 일반적으로 널리 알려진 1990년대와 2000년대의 북한 산림 황폐화 등을 모형의 관리인자에 반영하지 않았기 때문에 이러한 결과들은 북한 산림이 지속적으로 유지되었을 때의 생산성으로 이해할 수 있다. 따라서 북한 산림이 지속적으로 관리되고 산림 황폐화를 겪지 않았다면, 본 연구에서 모의한 것과 같이 북한의 산림은 우리나라와 유사한 산림생산성을 보여주었을 것으로 예상된다.

다만, 전반적인 생산성의 편차가 커지는 것은 기후변동성의 영향으로 인한 것으로 판단된다. 또한, 1979년부터 2015년까지 현재 기상자료를 반영하였음에도, 1991년부터 2015년까지의 NPP 추정 결과가 상이한 이유 또한 모형 구동 시 관리 인자로 설정한 1950년부터 1979년까지의 임분 모의에서 입력된 평균적인 기상 인자의 영향이 반영된 것으로 보여, 결국 기상 편차가 큰 SSP5-8.5 시나리오에서의 부정적인 생태계 생산성이 예상된다. 이러한 요인은 일차생산성의 상대적인 저평가와 함께 모형 검증 과정에서의 과소추정 경향에서도 나타나고 있다. 특히, 기상자료와 종합해 보면, 미래 기후변화에 따라 기온은 계속 상승하지만 강수 패턴은 불규칙하게 변함에 따라 극심한 건조 및 습윤한 상태가 산림생태계의 생산성에 부정적인 영향을 주는 것으로 파악된다. 이런 측면에서 소나무 임분에서의 생산성이 미래에 악화되는 이유가 설명되는데, 이는 기상 조건에서의 장기간의 고온과 강수량의 편차가 커짐에 따라 발생하는 것으로 사료된다. 따라서 기후변화로 인해 소나무를 비롯한 침엽수림의 쇠퇴가 예상되고, 활엽수림의 생장이 상대적으로 우수할 것이라는 선행 연구들의 예측과 유사한 결과라고 할 수 있다(Byun *et al.* 2013; Kim *et al.* 2017b). 따라서 기후변화로 인한 극한 기상 상황들이 추후 생태계의 건강성 및 생산성에 대한 중요한 교란 요인으

로 작용할 수 있음을 시사한다. 그리고 이는 온도 및 강수에 대한 변동성이 기후변화로 인해 갈수록 커짐에 따른 변화를 언급한 Duveneck and Thompson (2017)의 연구와도 유사하다고 할 수 있다. 따라서, 전반적으로는 SSP1-2.6에서의 생산성이 SSP3-7.0과 SSP5-8.5에 비해서 높은 것으로 나타나지만, 기후변동성이 큰 2060 및 2070년대에서는 반대의 경향도 예측되는 등 산림생태계 생산성에 큰 변화를 보여준다.

검증 측면에서 각 선행 문헌에 따른 결과는 연구 방법 등이 상이하어 직접비교는 어려우나, 넓은 범위에서 BGC-MAN 모형이 전반적인 추정 경향과 추세를 잘 반영하고 있는 것으로 판단된다. 일반적으로 위성영상을 활용한 산출물의 경우에는 세부 수종이 아닌 산림의 개략적 특성만을 반영하여 NPP를 산출하는데, 산림 외에도 초지 등의 식생을 전반적으로 포함하여 산출물의 결과를 표출하고 있어 해당 산출물의 NPP 값이 정확하게 산림의 NPP 값이라고 단정하기 어려운 한계가 있다. 또한, 일부 선행 연구에서는 동아시아 지역에서의 NPP 추정에 있어서 위성영상 산출물의 결과가 일부 과추정된다는 논의도 진행 중에 있다(Cui *et al.* 2014). 따라서 통계적인 직접 분석의 의의는 상당히 제한되는 상황이다. 또한, 본 연구는 일별 자료를 연평균 NPP로 환산한 것이고 MODIS 산출물은 8일 주기로 분석이 이루어진 것을 연평균으로 재분석한 것이라는 점에서 전반적인 경향성의 차이를 이해할 수 있다. 다만, 본 연구의 결과에서 나타나는 것과 같이 동일한 연도와 위치에서 분석을 하였을 시 모든 시나리오에서 양의 상관관계를 보여주었다는 점과 기후변동성으로 인하여 상대적으로 SSP5-8.5 시나리오에서의 추정 값이 과소평가되었다는 것에 대해서는 보다 다양한 논의가 필요할 것으로 판단된다.

북한에 대한 산림 탄소저장량, 산림의 생산성, 황폐화 정도 등에 대한 논의는 지속적으로 이루어지고 있다(Kim *et al.* 2016a; Cho *et al.* 2023). 이러한 시점에서 국제적으로 활용되었고 우리나라 대상지에 대해서도 구동되었던 모형을 북한에 적용하여 생산성을 추정하였으므로, 이를 기반으로 향후 북한의 산림 축적 등에 대한 비교 검증이 가능한 결과를 생산한 의미가 있다고 판단된다. 또한, 남한과 북한을 포함한 한반도 산림생태계 및 탄소수지 연구에 BGC-MAN 모형의 적용성을 규명하였다는 의의가 있으며, 이는 향후 과정기반 모형의 여러 한계점을 극복하는 데 활용할 수 있을 것이다. 그러나 다소 제한적인 산림 임분을 대상으

로 연구를 수행하였다는 점과 과정기반 모형 및 산림의 일차생산성에 대한 연구 사례의 부족으로 충분한 상호검증에는 한계가 있었다. 따라서 향후에는 다양한 모형을 활용하여 기후변화에 따른 산림의 생산성과 생태계 변화에 대한 연구와 함께 북한 산림 복원과 기후변화 적응에 대한 연구가 복합적으로 이루어져야 할 것이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 과정기반 생지화학 모형인 Biome-BGC 계열의 BGC-MAN 모형을 국내 및 북한에 적용해 보았다. 우리나라 광릉 시험림 및 설마천 유역을 대상으로 한 NPP 추정치는 기존 문헌 및 위성기반 산출물 자료의 범위와 유사하였고, 북한 대상지의 NPP 추정치 또한 선행 연구와 비교하여 이해 가능하였다. 본 연구에서는 RCP 시나리오를 활용한 기존 모델링에 추가하여 새롭게 SSP 시나리오에 따른 기후자료를 반영하였다. 따라서 최신 기후시나리오의 기후변화 예측에 따른 기온 및 강수 등의 편차로 인한 산림 생산성 교란 증가를 파악하였으며, 북한 산림의 생산성이 남한에 비해 크게 차이가 없다는 결과와 함께 기후변화로 인한 영향이 크게 발생하고 있음을 규명하였다. 따라서 본 연구의 결과는 선행 연구에서 다수 언급되는 기후변화로 인한 침엽수림의 쇠퇴와 기후 변동성에 따른 생태적 교란 관계를 잘 설명한다고 할 수 있다. 본 연구에서 활용된 BGC-MAN 모형의 경우에도 분석 범위와 정확성을 보다 향상시킬 필요가 있다. 즉, 과정기반의 Biome-BGC 계열의 모형인 만큼, 생물리적 구조와 생지화학적 반응을 포함한 다른 과정기반 모형과의 상호보완적 관계를 파악하고 활용되어야 할 것이다. 또한, 본 연구에서 규명한 것과 같이 온실가스 배출과 이에 따른 기후 시나리오에서의 기온 및 강수의 편차에 따라 생태적 생산성이 감소한다는 예측 결과에 대응하기 위한 다양한 시공간적 모델링 방법의 보완, 적응 대책의 수립 등이 향후 심도 깊게 논의되어야 할 것이다.

## 적 요

본 연구에서는 과정기반 생지화학모형 중 하나인 BGC-MAN (Biogeochemistry Management) 모형을 남북한에 적용하여 산림생태계의 생산성을 나타내는 지표인 순일

차생산성(Net Primary Productivity, NPP)을 평가하였다. 기상자료의 경우에는 우리나라 기상청 기후정보포털의 실측 및 동아시아 시나리오 자료를 병행하여 활용하였다. 식생정보로는 소나무(*Pinus densiflora*) 및 참나무(*Quercus* spp.) 임분을 대상으로 우리나라의 광릉 및 설마천 유역과 북한 내 양묘장이 있는 것으로 알려져 있는 사리원, 서흥, 해주, 정주, 원산을 대상지로 선정하였다. 생물리적 정보 중 경위도, 고도, 사면 방향 등의 지형정보는 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)의 수치표고모형을 활용하였으며, 토양정보 등의 경우에는 HWSO (Harmonized World Soil Database)의 정보를 활용하였다. 관리 요인의 경우에는 1950년의 한국전쟁으로 인한 남북한 산림파괴와 이후 산림의 재조림 과정을 고려하였다. 1991년부터 2100년까지 모의된 NPP의 전체 평균 값은  $5.17 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 이었으며, 범위는  $3.30 \sim 8.19 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 로 도출되었다. 또한 기후 시나리오의 변동성이 커짐에 따라서 산림 생산성의 교란이 커졌으며, 소나무 임분의 성장 둔화가 두드러지게 나타났다. 기후변화에 따라 생태계 과정기반 모형의 중요성이 커지는 시점에서 BGC-MAN 모형의 한반도 적용성이 검토되었다. 본 연구의 제한된 자료를 통해서 기후변화에 대한 교란이 산림생태계에 미치는 여러 요인들이 분석된 만큼, 향후 모델링 방법의 보완을 통해 보다 한반도 전역의 정밀한 생태계 변화를 과정기반 모형을 통해 모의할 수 있도록 해야 할 것이다.

## CRedit authorship contribution statement

**C Song:** Conceptualization, Methodology, Investigation, Visualization, Writing - Original draft, Project administration. **HA Choi:** Resources, Investigation, Writing - Original draft. **J Son:** Methodology, Writing - Review & editing. **Y Ko:** Resources, Writing - Review & editing. **SA Pietsch:** Resources, Methodology. **WK Lee:** Resources, Supervision, Funding acquisition.

## Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

## 사 사

본 연구는 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 자율운영형 중점연구소 고려대학교 오정리질리언스연구원(NRF-2021R16A1A10045235)의 세부과제와 산림청(한국임업진흥원)의 전과정 산림관리 모형 개발을 통한 산림 영급구조 개선 시나리오 개발(2022464B10-2224-0201)의 지원에 의하여 수행되었습니다. 또한, 모형의 활용을 허가해 준 국제응용시스템분석연구소와 모델링 시스템을 지원한 고려대학교 오정리질리언스연구원 이지상 연구원에게 감사의 말을 전합니다.

## REFERENCES

- Akujärvi A, A Shvidenko and SA Pietsch. 2018. Modelling the impacts of intensifying forest management on carbon budget across a long latitudinal gradient in Europe. *Environ. Res. Lett.* 14:034012. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf766>
- Bae JS, RW Joo and YS Kim. 2012. Forest transition in South Korea: Reality, path and drivers. *Land Use Pol.* 29:198–207. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2011.06.007>
- Byun JG, WK Lee, M Kim, DA Kwak, H Kwak, T Park, WH Byun, Y Son, JK Choi, YJ Lee, J Saborowski, DJ Chung and JH Jung. 2013. Radial growth response of *Pinus densiflora* and *Quercus* spp. to topographic and climatic factors in South Korea. *J. Plant Ecol.* 6:380–392. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtt001>
- Byun JY, WK Lee, SH Choi, SH Oh, SJ Yoo, TS Kwon, JH Sung and JW Woo. 2012. Vulnerability assessment for forest ecosystem to climate change based on spatio-temporal information. *Korean J. Remote Sens.* 28:159–171. <https://doi.org/10.7780/kjrs.2012.28.1.159>
- Chae N. 2011. Annual variation of soil respiration and precipitation in a temperate forest (*Quercus serrata* and *Carpinus laxiflora*) under East Asian monsoon climate. *J. Plant Biol.* 54:101–111. <https://doi.org/10.1007/s12374-011-9148-9>
- Cho W, I Kim and D Ko. 2023. Assessment of potential carbon storage in North Korea based on forest restoration strategies. *Korea J. Environ. Biol.* 41:204–214. <https://doi.org/10.11626/kjeb.2023.41.3.204>
- Choi GM, M Kim, WK Lee, HU Gang, DJ Chung, EJ Ko, BHYun and CH Kim. 2014a. Estimating radial growth response of major tree species using climatic and topographic condition in South Korea. *J. Climate Change Res.* 5:127–137. <https://doi.org/10.15531/ksccr.2014.5.2.127>
- Choi HA, WK Lee, SW Jeon, JS Kim, H Kwak, M Kim, J Kim and JT Kim. 2014b. Quantifying climate change regulating service of forest ecosystem - focused on quantifying carbon storage and sequestration. *J. Climate Change Res.* 5:21–36. <https://doi.org/10.15531/ksccr.2014.5.1.21>
- Choi S, WK Lee, H Kwak, SR Kim, S Yoo, HA Choi, S Park and JH Lim. 2011. Vulnerability assessment of forest ecosystem to climate change in Korea using MC1 model. *J. For. Plan.* 16:149–161. [https://doi.org/10.20659/jfp.16.Special\\_Issue\\_149](https://doi.org/10.20659/jfp.16.Special_Issue_149)
- Choi SE, S Hong, C Song, J Kim, W Kim, R Ha and WK Lee. 2023. Construction of land-use change matrix and estimation of greenhouse gas inventory focusing on settlements in South Korea. *Carbon Balanc. Manage.* 18:4. <https://doi.org/10.1186/s13021-023-00223-3>
- Cui G, WK Lee, D Kim, EJ Lee, H Kwak, HA Choi, DA Kwak, SW Jeon and W Zhu. 2014. Estimation of forest carbon budget from land cover change in South and North Korea between 1981 and 2010. *J. Plant Biol.* 57:225–238. <https://doi.org/10.1007/s12374-014-0165-3>
- Duveneck MJ and JR Thompson. 2017. Climate change imposes phenological trade-offs on forest net primary productivity. *J. Geophys. Res.-Biogeosci.* 122:2298–2313. <https://doi.org/10.1002/2017JG004025>
- Eum S, S Kang and D Lee. 2005. A simulation study to investigate climatic controls on net primary production (NPP) of a rugged forested landscape in The Mid-western Korean Peninsula. *Korean J. Agric. For. Meteorol.* 7:67–78.
- Heo M, C Song, J Kim and WK Lee. 2022. Applicability of biogeochemical models to forest ecosystems in South Korea. *J. Climate Change Res.* 13:409–428. <https://doi.org/10.15531/ksccr.2022.13.4.409>
- Hong M, C Song, M Kim, J Kim, SG Lee, CH Lim, K Cho, Y Son and WK Lee. 2022. Application of integrated Korean forest growth dynamics model to meet NDC target by considering forest management scenarios and budget. *Carbon Balanc. Manag.* 17:5. <https://doi.org/10.1186/s13021-022-00208-8>
- Kang S, D Lee, J Lee and SW Running. 2006. Topographic and climatic controls on soil environments and net primary production in a rugged temperate hardwood forest in Korea. *Ecol. Res.* 21:64–74. <https://doi.org/10.1007/s11284-005-0095-0>
- Kang S, JH Lim, ES Kim and N Cho. 2016. Modelling analysis of climate and soil depth effects on pine tree dieback in Korea using BIOME-BGC. *Korean J. Agric. For. Meteorol.* 18:242–252. <https://doi.org/10.5532/KJAFM.2016.18.4.242>
- Kim D, CH Lim, C Song, WK Lee, D Piao, S Heo and SW Jeon. 2016a. Estimation of future carbon budget with climate change and reforestation scenario in North Korea. *Adv. Space Res.* 58:1002–1016. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.05.049>
- Kim HS, Y Luo, F Noulèkoun, NJ Noh, J Lee and Y Son. 2021b. Carbon and nitrogen turnover times of South Korean forests es-

- timated via data-model fusion. *J. Geophys. Res.-Biogeosci.* 126:e2021JG006368. <https://doi.org/10.1029/2021JG006368>
- Kim M, F Kraxner, N Forsell, C Song and WK Lee. 2021a. Enhancing the provisioning of ecosystem services in South Korea under climate change: The benefits and pitfalls of current forest management strategies. *Reg. Envir. Chang.* 21:6. <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01728-0>
- Kim M, WK Lee, GM Choi, C Song, CH Lim, J Moon, D Piao, F Kraxner, A Shvidenko and N Forsell. 2017a. Modeling stand-level mortality based on maximum stem number and seasonal temperature. *For. Ecol. Manag.* 386:37–50. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.12.001>
- Kim M, WK Lee, WA Kurz, DA Kwak, S Morken, CE Smyth and D Ryu. 2016b. Estimating carbon dynamics in forest carbon pools under IPCC standards in South Korea using CBM-CFS3. *iForest* 10:83–92. <https://doi.org/10.3832/ifer2040-009>
- Kim M, WK Lee, Y Son, S Yoo, GM Choi and DJ Chung. 2017b. Assessing the impacts of topographic and climatic factors on radial growth of major forest forming tree species of South Korea. *For. Ecol. Manage.* 404:269–279. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.08.048>
- Kim SN, WK Lee, Y Son, Y Cho and MS Lee. 2009. Applicability of climate change impact assessment models to Korean forest. *J. Korean Soc. For. Sci.* 98:33–48.
- Kwon H, J Lee, Y Lee, JW Lee, SW Jung and J Kim. 2009. Seasonal variations of evapotranspiration observed in a mixed forest in the Seolmacheon catchment. *Korean J. Agric. For. Meteorol.* 11:39–47. <https://doi.org/10.5532/kjafm.2009.11.1039>
- Kwon SS, SH Choi and SD Lee. 2012. Estimation of spatial-temporal net primary productivity and soil carbon storage change in the capital area of South Korea under climate change. *J. Environ. Impact Assess.* 21:757–765. <https://doi.org/10.14249/eia.2012.21.5.757>
- Lee J, CH Lim, GS Kim, A Markandya, S Chowdhury, SJ Kim, WK Lee and Y Son. 2018. Economic viability of the national-scale forestation program: The case of success in the Republic of Korea. *Ecosyst. Serv.* 29:40–46. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.11.001>
- Lim HJ, YH Lee and HJ Kwon. 2010. Evaluation of community land model version 3.5-dynamic global vegetation model over deciduous forest in Gwangneung, Korea. *Korean J. Agric. For. Meteorol.* 12:95–106. <https://doi.org/10.5532/kjafm.2010.12.2.095>
- Lim J, JH Shin, GZ Jin, JH Chun and JS Oh. 2003. Forest stand structure, site characteristics and carbon budget of the Kwangneung Natural Forest in Korea. *Korean J. Agric. For. Meteorol.* 5:101–109.
- Lindsay K, GB Bonan, SC Doney, FM Hoffman, DM Lawrence, MC Long, NM Mahowald, JK Moore, JT Randerson and PE Thornton. 2014. Preindustrial-control and twentieth-century carbon cycle experiments with the Earth System Model CESM1 (BGC). *J. Clim.* 27:8981–9005. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00565.1>
- Noh NJ, C Kim, SW Bae, WK Lee, TK Yoon, H Muraoka and Y Son. 2013. Carbon and nitrogen dynamics in a *Pinus densiflora* forest with low and high stand densities. *J. Plant Ecol.* 6:368–379. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtt007>
- Noh NJ, Y Son, SK Lee, TK Yoon, KW Seo, C Kim, WK Lee, SW Bae and J Hwang. 2010. Influence of stand density on soil CO<sub>2</sub> efflux for a *Pinus densiflora* forest in Korea. *J. Plant Res.* 123:411–419. <https://doi.org/10.1007/s10265-010-0331-8>
- Piao D, M Kim, GM Choi, J Moon, H Yu, WK Lee, SW Wang, SW Jeon, Y Son, YM Son and G Choi. 2018. Development of an integrated DBH estimation model based on stand and climatic conditions. *Forests* 9:155. <https://doi.org/10.3390/f9030155>
- Piao D, WK Lee, Y Zhu, M Kim, C Song. 2016. Assessment of Forest Degradation and Carbon Storage for REDD+ Project in North Korea. *Korean J. Environ. Biol.* 34:1–7. <https://doi.org/10.11626/kjeb.2016.34.1.001>
- Pietsch SA, H Hasenauer and PE Thornton. 2005. BGC-model parameters for tree species growing in central European forests. *For. Ecol. Manag.* 211:264–295. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.02.046>
- Pietsch SA. 2014. Modelling Ecosystem Pools and Fluxes. Implementation and Application of Biogeochemical Ecosystem Models. Institute of Silviculture Department of Forest and Soil Sciences, University of Natural Resources and Life Sciences (BOKU), Vienna, Austria.
- Shin HJ, JJ Park and SJ Kim. 2012. Evaluation of forest watershed hydro-ecology using measured data and RHESSys Model -For the Seolmacheon catchment-. *J. Korea Water Resour. Assoc.* 45:1293–1307 <https://doi.org/10.3741/jkwra.2012.45.12.1293>
- Song C, SA Pietsch, M Kim, S Cha, E Park, A Shvidenko, D Schepaschenko and WK Lee. 2019. Assessing forest ecosystems across the vertical edge of the mid-latitude ecotone using the biogeochemistry management model (BGC-MAN). *Forests* 10:523. <https://doi.org/10.3390/f10060523>
- White MA, PE Thornton, SW Running and RR Nemani. 2000. Parameterization and sensitivity analysis of the BIOME-BGC Terrestrial Ecosystem Model: Net primary production controls. *Earth Interact.* 4:1–85. [https://doi.org/10.1175/1087-3562\(2000\)004<0003:PASAOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1087-3562(2000)004<0003:PASAOT>2.0.CO;2)
- Yoo S, WK Lee, Y Son and A Ito. 2012. Estimation of vegetation carbon budget in South Korea using ecosystem model and spatio-temporal environmental information. *Korean J. Remote Sens.* 28:145–157. <https://doi.org/10.7780/kjrs.2012.28.1.145>