

Research Paper

다중기후모형을 활용한 동북아시아의 미래 생물기후권역 변화분석

최유영* · 임철희** · 류지은*** · 전성우*

고려대학교 환경생태공학과*, 고려대학교 생명자원연구소**, 고려대학교 환경GIS/RS센터***

Analysis of Future Bioclimatic Zones Using Multi-climate Models

Yuyoung Choi* · Chul-Hee Lim** · Jieun Ryu*** · Seongwoo Jeon*

Dept. of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University*
Institute of Life Science and Natural Resources, Korea University**
Environmental GIS/RS Center, Korea University***

요약: 기후변화에 대응하여 보다 적극적인 생물보전전략 수립을 위해 생물 서식환경의 변화예측이 필요하며, 생물기후권역은 유용한 생태계 관리체계를 제공할 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 생물기후권역 구축을 통해 동북아시아의 생물 서식환경을 파악하고, 생물 서식관점에서 기후변화의 영향을 분석하였다. Worldclim에서 제공하는 현재(1970~2000년) 기후자료 및 17개 전 지구 기후모형의 예측자료(RCP4.5, RCP8.5)를 이용하여 2050년대와 2070년대의 변화를 모의하였다. 먼저 현재와 미래의 주요생물기후변수(Aridity index, growing degree days, potential evapotranspiration seasonality, temperature seasonality)를 구축하여 동북아시아의 생물기후환경 특성을 파악하고, 기후변화에 따른 시공간적 변화를 분석하였다. ISODATA 군집분석으로 현재의 생물기후권역을 구분하고, MLC(Maximum Likelihood Classification)를 통해 미래의 권역변화를 예측하였다. 기후변화에 따라 대부분의 권역이 북상하는 경향성을 확인할 수 있었으며, 권역의 면적과 위도 분포변화를 분석함으로써 권역의 축소가 가장 두드러지게 나타나는 중국 남부에 위치한 권역을 집중 관리권역으로 제시하였다. 본 연구는 한반도를 포함한 동북아시아 지역의 다양한 기후변화 시나리오에 따른 영향평가를 바탕으로 향후 기후변화에 대응한 생물종 혹은 생태계 관련 적응정책 수립 시 활용 가능한 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

주요어: 생물기후권역, 다중기후모형, 동북아시아, 생물다양성, 보전전략

First Author: Yuyoung Choi, Dept. of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 02841, Korea, Tel: +82-2-3290-3543, E-mail: cuteyu0@korea.ac.kr

Corresponding Author: Seongwoo Jeon, Dept. of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 02841, Korea, Tel: +82-2-3290-3043, E-mail: eepps_korea@korea.ac.kr

Co-Authors: Chul-Hee Lim, Institute of Life Science and Natural Resources, Korea University, Seoul 02841, Korea, Tel: +82-2-3290-3543, E-mail: limpossible@korea.ac.kr

Jieun Ryu, Dept. of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 02841, Korea, Tel: +82-2-3290-3543, E-mail: ulygajok@gmail.com

Received: 12 September, 2018. Revised: 2 October, 2018. Accepted: 4 October, 2018.

Abstract : As climate changes, it is necessary to predict changes in the habitat environment in order to establish more aggressive adaptation strategies. The bioclimatic classification which clusters of areas with similar habitats can provide a useful ecosystem management framework. Therefore, in this study, biological habitat environment of Northeast Asia was identified through the establishment of the bioclimatic zones, and the impact of climate change on the biological habitat was analyzed. An ISODATA clustering was used to classify Northeast Asia (NEA) into 15 bioclimatic zones, and climate change impacts were predicted by projecting the future spatial distribution of bioclimatic zones based upon an ensemble of 17 GCMs across RCP4.5 and 8.5 scenarios for 2050s, and 2070s. Results demonstrated that significant changes in bioclimatic conditions can be expected throughout the NEA by 2050s and 2070s. The overall zones moved upward, and some zones were predicted to be greatly expanded or shrunk where we suggested as regions requiring intensive management. This analysis provides the basis for understanding potential impacts of climate change on biodiversity and ecosystem. Also, this could be used more effectively to support decision making on climate change adaptation

Keywords : Bioclimatic classification, multi-climate models, Northeast Asia, Biodiversity, Conservation strategies

I. 서론

서식지 파괴, 오염, 생태계 교란 등으로 인해 많은 생물종들이 서식지를 잃고 멸종위기에 처해 있으며, 특히 기후변화로 인한 생물다양성의 감소는 심각한 문제로 대두되고 있다(IPCC 2014; WWF 2015). 이에 대응하기 위해, 생물다양성협약(Convention on Biological Diversity)은 생물다양성 보전을 위한 전략계획과 아이치 생물다양성 목표(strategic plan for biodiversity 2011~2020 and Aichi biodiversity targets)를 채택하였고, 목표달성을 위해 전 세계적으로 보호지역의 확보와 훼손지 복원 등의 노력을 기울이고 있다. 그러나 현재까지의 복원 및 보전전략은 주로 기존의 상태를 유지하거나 훼손 전 과거의 상태로 되돌리는 것에 초점을 맞추고 있다(Hobbs et al. 2010). 하지만 기후변화는 급격한 생태계의 변화를 초래하고 있으며(Hole et al. 2009; Staudinger et al. 2013; Svenning & Sandel 2013), 이는 과거의 서식환경이 더 이상 생물다양성보전에 기여하지 못할 수 있음을 의미한다(Araujo et al. 2004; Hannah et al. 2007). 즉, 기후변화에 따른 서식환경 변화를 예측하고 이에 대응한 계획·전략 수립이 요구된다.

기후변화 영향파악 및 효율적인 생태계 관리를

위해 여러 연구자는 환경과 기후가 유사한 지역을 구분한 생태지역 혹은 생물기후권역(ecoregions or bioclimate stratification) 등을 유용한 체계로 제시한 바 있다(Olson et al. 2001; Metzger et al. 2005; Noss et al. 2012). Dinerstein et al.(2017)은 전 세계 846개의 생태권역을 대상으로 권역별 보호지역의 면적을 분석하고, Aichi target의 육상생태계 보호지정 목표치(17%)를 넘어 50% 달성을 위한 전략을 제시하였다. 권역별 기후변화 영향을 파악한 연구로는 Beaumont et al.(2010)이 전 세계 생태권역(132개의 육상권역과 53개의 담수권역)을 대상으로 월평균 기온 및 강수량의 변화 정도를 통해 기후변화에 따른 위기에 처한 생태지역들을 규명하였다. 또한 Watson et al.(2013)은 전 세계 생태지역(Ecoregion)을 공간적 단위로 삼아 현재와 미래 기후의 차이를 통해 기후의 안정성(climate stability)을 평가하고, 자연지역의 비율을 각 권역의 적응능력(adaptive capacity)으로 규정하여, 이 두 가지 지표에 따른 생태지역별 관리정책을 제안한 바 있다. 위와 같은 연구들은 권역을 구분하여 관리정책을 제시하였으나, 기후변화에 따라 현재와 유사한 기후환경이 어느 지역에 위치하게 되는지에 대한 분석은 수행하지 않았다. 반면,

Soteriades et al. (2017)은 전 세계 125개의 생물기후계층(bioclimate stratification)에 대해 Random Forest classifier를 이용하여 4개의 RCP 시나리오와 19개의 GCMs를 종합하여 기후변화에 따른 각 권역의 이동을 분석함으로써 기후변화의 영향을 생물서식권역 측면에서 보다 직관적으로 이해하고자 하였다. 따라서 본 연구에서 이 연구의 방법론을 활용하여 분석을 수행하고자 한다.

환경과 기후가 유사한 지역을 구분하는 연구는 국내에서도 다수 수행되었으나(Shin & Kim 1996; Kim 2004; National Institute of Environmental Research 2007; Choi et al. 2017a; Choi et al. 2017b), 기후변화의 영향을 분석한 연구는 많지 않다. 유사한 선행연구로는 남한을 대상으로 쾨펜-트레와다의 정의를 적용하여 아열대 지역을 구분하고, 기후변화에 따른 아열대 지역구의 확장을 예측한 바 있으나(Kwon et al. 2007; Park et al. 2013; Lee et al. 2017), 평균기온 단일변수만을 이용하였고 상세한 권역의 구분 없이 남한만을 대상으로 하였다는 한계가 존재한다.

기후변화에 따른 서식환경 변화예측을 위해서는 생물종이 새롭게 등장하거나, 이주할 수 있는 범위를 고려할 필요가 있으며(Dawson et al. 2011), 환경적 영향과 생물종의 이동은 국가를 넘어 영향을 주고받기 때문에 국제적 차원의 연구 및 인접 국가 간 협력을 통한 관리가 필요하다(Parr et al. 2003; Davidson 2017). 그러나 국내의 기후변화와 생물종 관련 선행 연구들은 주로 기후변화 취약 생물종을 대상으로 남한 혹은 한반도 범위 내에서 분포변화를 모의하는데 국한되어 왔다(Kong 2009; Lee et al. 2011; Park et al. 2016; Lim et al. 2018). 향후 보다 적극적인 기후변화 대응을 위해서는 남한을 중심으로 일본, 북한, 중국 등 주변 국가를 포함한 동북아시아 차원의 연구를 진행하여야 한다(Shin & Jung 2015).

동북아시아를 대상으로 한 기후변화 연구는 주로 평균기온, 누적강수 등 기본 기후변수들의 변화예측 및 분석을 중심으로 이루어져 왔다(Hong et al. 2013; Kim et al. 2014; Shin & Jung 2015). 하지만 생물종의 서식, 특히 식물의 생장 및 분포는 평균적인 변

화뿐 아니라 최한월의 최저기온, 온량지수, 유효강수지수 등의 변수들과 밀접한 관련이 있으므로(Choi et al. 2011; Choi et al. 2017), 생물다양성 보전 등의 장기 전략 수립을 위해서는 생물 서식에 영향을 미치는 생물기후변수들의 변화예측 및 분석도 수행되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 생물기후권역 구축을 통해 현재 동북아시아의 생물 서식환경을 파악하고, 다중기후모형을 활용하여 생물기후권역 변화를 예측함으로써, 생물서식 관점에서의 기후변화의 영향을 파악하고자 한다. 주요생물기후변수를 통해 동북아시아의 생물기후권역 구축 및 특성을 규명하고, 17개 전지구 기후모형에서 예측한 미래 각 시나리오를 활용하여 생물기후변수의 시·공간적 변화를 분석한다. 이에 따른 생물기후권역의 면적변화 및 위도 분포변화 등을 분석하여 기후변화에 따라 변화가 두드러지는 지역 혹은 권역의 축소/소멸이 예상되는 지역을 제시함으로써, 집중적으로 관리해야 할 지역을 파악하는 것을 목적으로 한다.

II. 재료 및 방법

1. 연구의 대상지

본 연구의 대상지는 한반도를 중심으로 북위 18°58'57"~57°17'15", 동경 111°0'56"~147°17'12"에 위치한 넓은 범위의 동북아시아로 설정하였다. 이 지역은 남한, 북한, 대만, 일본의 전역과 러시아, 몽골 및 중국 동부의 일부 지역을 포함한다(Figure 1). 동북아시아의 기후대는 북쪽의 냉대기후부터 남쪽의 아열대기후까지를 포함하며, 중부에 위치한 한국과 일본은 주로 온대습윤기후, 특히 온대계절풍기후를 나타낸다. 북부지역에는 침엽수림이 넓게 분포하고 있으며 중국과 몽골 사이에는 고비사막을 포함한 건조지역이 위치한다. 중국 동부지역은 상대적으로 해발고도가 낮은 동베이 평원에서 화남으로 이어지는 평야 지대로 계절풍의 영향을 받아 넓은 지역이 경작지로 이용되고 있다. 반면 한반도와 일본은 동고서저형으로 지형의 기복이 심하고 산림이 넓게 분포하고 있다.

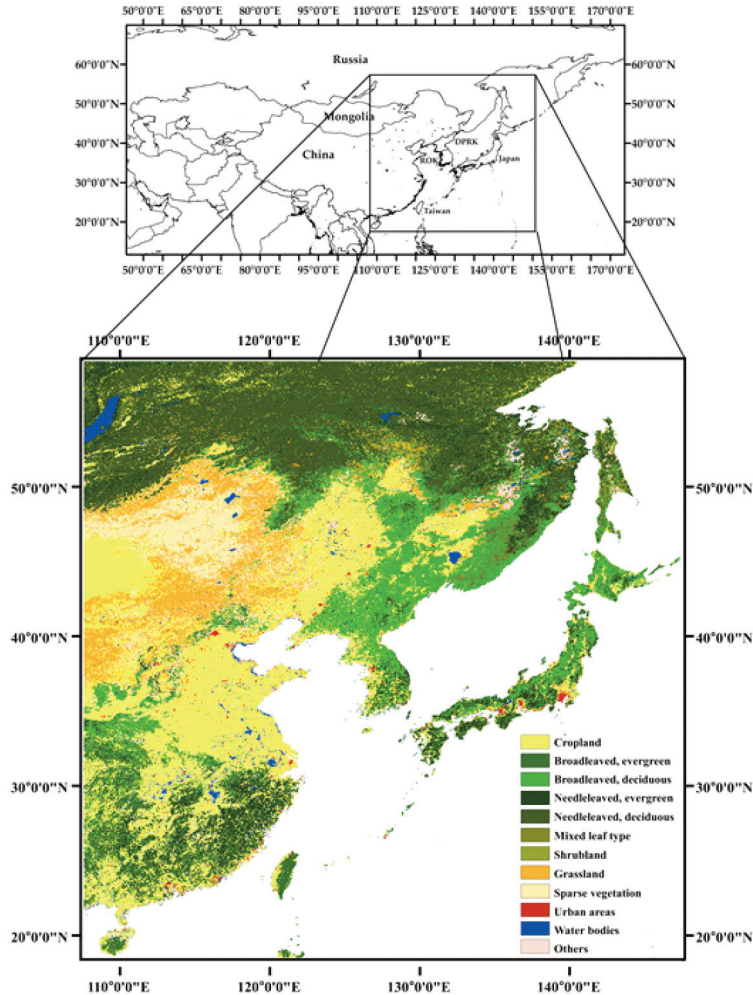


Figure 1. Location of Northeast Asia and land cover map of the study area obtained from European Space Agency Climate Change Initiative (ESA CCI).

2. 연구의 자료

동북아시아의 생물기후권역 구축 및 미래 기후변화 분석을 위한 기후자료로 WorldClim(<http://www.worldclim.org>)에서 30-arc second(~1km)의 해상도로 제공하는 Version 2.0의 현재(1970~2000) 기후자료(최저기온, 최고기온, 평균기온, 강수량) 및 월별 태양복사에너지 자료와 Version 1.4의 미래 기후자료를 이용하였다(Hijmans et al, 2005; Fick & Hijmans 2017). 미래기후는 온실가스 저감 정책이 상당히 실행되는 경우인 RCP 4.5와 온실가스의 저감 없이 현재의 배출 추세를 지속하는 경우인

RCP 8.5 시나리오에 따라 추정된 2050년(2040~2060년)과 2070년(2060~2080년)의 기후자료를 사용하였다. Worldclim에서는 총 19개의 전 세계 기후모델(GCM, Global Climate Model)의 자료를 제공하고 있으나, 본 연구에서는 RCP4.5와 RCP8.5 자료를 모두 제공하는 17개 기후모델의 추정자료를 사용하였다(Table 1). 또한 생물기후권역 내 식생분포 현황을 파악하기 위해 European Space Agency Climate Change Initiative(ESA-CCI, <https://www.esa-landcover-cci.org>)에서 제공하는 토지 피복 자료를 이용하였다(Figure 1). ESA-CCI에서

Table 1. Climate projections data from GCMs provided by worldclim. The symbol 'X' and 'O' indicate whether to provide RCP scenario data. In this study, 17 GCMs were used excluding CESM1-CAM5-1-FV2 and GFDL-ESM2G which do not provide RCP 8.5 data

GCM	RCP 4.5	RCP 8.5
ACCESS1-0	○	○
BCC-CSM1-1	○	○
CCSM4	○	○
CESM1-CAM5-1-FV2	○	×
CNRM-CM5	○	○
GFDL-CM3	○	○
GFDL-ESM2G	○	×
GISS-E2-R	○	○
HadGEM2-AO	○	○
HadGEM2-CC	○	○
HadGEM2-ES	○	○
INMCM4	○	○
IPSL-CM5A-LR	○	○
MIROC-ESM-CHEM	○	○
MIROC-ESM	○	○
MIROC5	○	○
MPI-ESM-LR	○	○
MRI-CGCM3	○	○

는 1992~2015의 시계열 토지피복도를 300m의 고 해상도로 제공하고 있으며, 동북아시아의 식생분포를 잘 반영하고 있어 기후변화에 따른 환경변화 파악에 활용되고 있다(Li et al. 2016). 본 연구에서 현재 생물기후권역 구축에 사용한 기후자료가 1970~2000년 평균자료이므로 이를 1985년 자료로 간주하고, 이와 가장 근접한 년도인 1992년의 토지피복도를 연구에 활용하였다.

3. 연구의 방법

1) 생물기후변수의 구축

현재의 생물기후권역도 구축을 위해서 다양한 방법으로 타당성과 유용성이 검증된 바 있는 Metzger et al.(2013a)가 제시한 생물기후변수와 방법론을 활용하였다(Metzger et al. 2013b; Zomer et al. 2014; Soteriades et al. 2017). Metzger et al.(2013a)은 생물 서식에 영향을 미치는 42개의 생물기후변수를 구축하고 상관분석과 주성분 분석을 통해 독립적인 4개의 주요변수로 건조지수(AI, Aridity index), 생

장도일(GDD, Growing degree-days on a 0°C base), 기온의 계절성(TS, Temperature seasonality)과 잠재증발산량의 계절성(PES, Potential evapotranspiration seasonality)을 도출하였다.

AI는 연 잠재증발산량과 강수량의 비로 계산되는 지수로(식1), 건조/습윤한 상태 혹은 가용 수자원량의 지역적 변화를 파악하기 위해 널리 이용되고 있다(UNESCO 1979; UNEP 1992). 잠재증발산량은 토양의 수분이 완전히 포화된 상태에서의 증발산량으로, 지표의 성질 및 조건과 무관하게 기상요소에만 영향을 받게 된다(Allen 2000; Kim et al. 2017). 다양한 계산 방법을 통해 잠재증발산량을 추정할 수 있으며, 본 연구에서는 주 단위 이상의 예측에서 높은 정확도를 나타내는 Hargreaves 방법(식2)을 적용하여 산출하였다(Hargreaves 1994; Hargreaves & Allen 2003). AI가 높을수록 습윤한 지역을 나타내며, 0에 가까울수록 건조하여 가뭄이나 물 부족을 경험할 가능성이 높은 지역을 나타낸다.

$$AI = \frac{P}{PET} \quad (1)$$

$$PET = 0.0023 \times RA \times (Tmean + 17.8) \times \sqrt{TD} \quad (2)$$

(PET: 잠재증발산량, P: 연강수량, RA: 월별 태양복사 에너지, Tmean: 월별 평균기온, TD: 월별 온도범위)

GDD는 식생이 어느 일정량의 열량을 얻어야 생육 과정을 진행한다는 가정을 바탕으로 생물의 계절(phenology)을 예측하기 위해 사용할 수 있는 온도 적산 값으로, 일 평균값과 생육임계온도와의 차이의 합으로 계산된다(식3). GDD의 분포는 수목이나 작물의 기후학적 적응도의 판단 기준으로 활용할 수 있어 농업기후지대 구분에 널리 이용되어왔다(Booth 1990; Mackay et al. 1996; Coops et al. 2001; Kim & Yun 2008). 평균값이 임계온도보다 낮으면 생장도일은 0으로 계산하며 임계온도는 생육에 필요한 한계온도로 식생의 종류에 따라 다르다(Lee et al. 2012). 본 연구에서는 월 평균기온자료로 GDD를 추정하는 방법을 이용하였고, 생육 임계온도는 넓은 범위에 생육하는 식물들을 고려하기 위해 Metzger et al. (2013)과 마찬가지로 0℃로 설정하였다.

$$GDD = \max\left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_{base}, 0\right) \quad (3)$$

(Tmax: 월 최대기온, Tmin: 월 최소기온, Tbase: 임계 온도(0℃))

기후의 계절성은 연중/연간 수분균형(water balance)에 영향을 미치며(Yokoo et al. 2008), TS와 PES는 각각 월 평균기온 및 잠재증발산량의 표준편차를 통해 산출하며(식4, 식5), 표준편차가 클수록 월별, 계절별 변동성이 큰 것을 의미한다(O'Donnell & Ignizio 2012). TS의 경우 일사량의 영향을 받으며(Xu et al. 2013). 식물의 광합성 활동에 영향을 미쳐 식생의 분포 범위에 영향을 미친다(Sheldon et al. 2015). PES는 기온과 풍속, 일사량 및 상대습도 등에 영향을 받으며(Ren et al. 2012), 기후변화에 대한 생태계의 생태 수문학적 반응(ecohydrological responses)을 예측하고 이용 가능 수분량의 변화를 파악하는 데 중요하다(Liu et al. 2017).

$$PES = SD(PET_1, \dots, PET_{12}) \times 100 \quad (4)$$

$$TS = SD(Tmean_1, \dots, Tmean_{12}) \quad (5)$$

(PET_i: 월 별 PET, Tmean_i: 월 별 평균기온(i=1~12))

2) 생물기후권역의 구분

본 연구에서는 4개의 주요생물기후변수를 현재와 미래(2050년, 2070년) 시나리오 별(RCP 4.5, RCP8.5)로 각각 30-arc second(~1km) 해상도로 구축하고, ISODATA(the Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique)를 이용하여 현재의 생물기후권역도를 생성하였다. 미래의 생물기후권역 변화 예측은 현재 생물기후권역 구축 시 생성한 훈련자료를 이용하여 최대우도법(MLC, Maximum Likelihood Classification)을 통해 진행하였다. 최대우도법은 트레이닝 데이터들의 평균값과 데이터 간의 분산, 공분산 값을 특징으로 하는 분류법으로 (Jeon & Cho 2000), 권역별 현재 기후의 특징을 수치화하고, 미래 기후자료를 이용하여 현재의 기후와 가장 가까운 권역으로 분류하였다.

3) 생물기후권역의 특성규명 및 변화 분석

현재 동북아시아의 생물기후 특성을 파악하기 위해 4개의 주요 생물기후변수들의 지역적 분포 특성을 분석하고, 구축한 생물기후권역 별 평균 고도, 연평균기온, 연 누적강수량 및 주요 생물기후변수들의 범위를 규명하였다. 또한 토지피복도를 활용하여 구축한 생물기후권역 내 식생분포 현황을 파악하였다. 기후에 영향을 받는 식생 단위에서 비교하기 위해 총 37개의 class로 상세화되어있는 토지피복 분류를 상록활엽수림(broadleaved, evergreen), 낙엽활엽수림(broadleaved, deciduous), 상록침엽수림(needleleaved, evergreen), 낙엽침엽수림(needleleaved, deciduous), 혼효림(mixed leaf type), 관목(shrubland), 초지(grassland), sparse vegetation, 농경지(cropland) 및 기타 지역으로 재분류하였다. 이를 이용하여 생물기후권역 별 식생 분포면적 비율을 산출하고, 식생과 생물기후권역의 분포양상을 비교하였다.

미래 생물기후의 변화는 시간적, 공간적 두 가지

측면에서 분석을 수행하였다. 시간적 변화 분석은 현재 주요생물기후 대비 미래(2050년대, 2070년대) 기후변수 간의 변화율을 통해 수행하였다. 17개의 기후모형 각각 변화율을 계산하였으며, 기후모형 간의 차이를 통해 예측의 불확실성을 확인하였다. 공간적 측면에서는 17개 기후모형의 양상별 결과와 현재 기후변수 간의 증감률을 도면화하여, 각 주요생물기후변수의 변화양상을 파악하였다. 생물기후권역의 변화양상은 생물기후권역 별 분포면적 및 위도 변화를 통해 분석을 진행하였다. 모든 분석은 Arc GIS 10.2

(ESRI, Redlands, CA, USA)와 R version 3.1.3(R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria)을 활용하였다.

III. 연구결과 및 고찰

1. 현재 생물기후권역의 구축 및 특성규명

현재 기후자료를 이용하여 4개의 주요생물기후변수를 구축한 결과는 Figure 2와 같다. 먼저, AI를 통해 동북아시아의 건조/습윤 분포를 확인하였다.

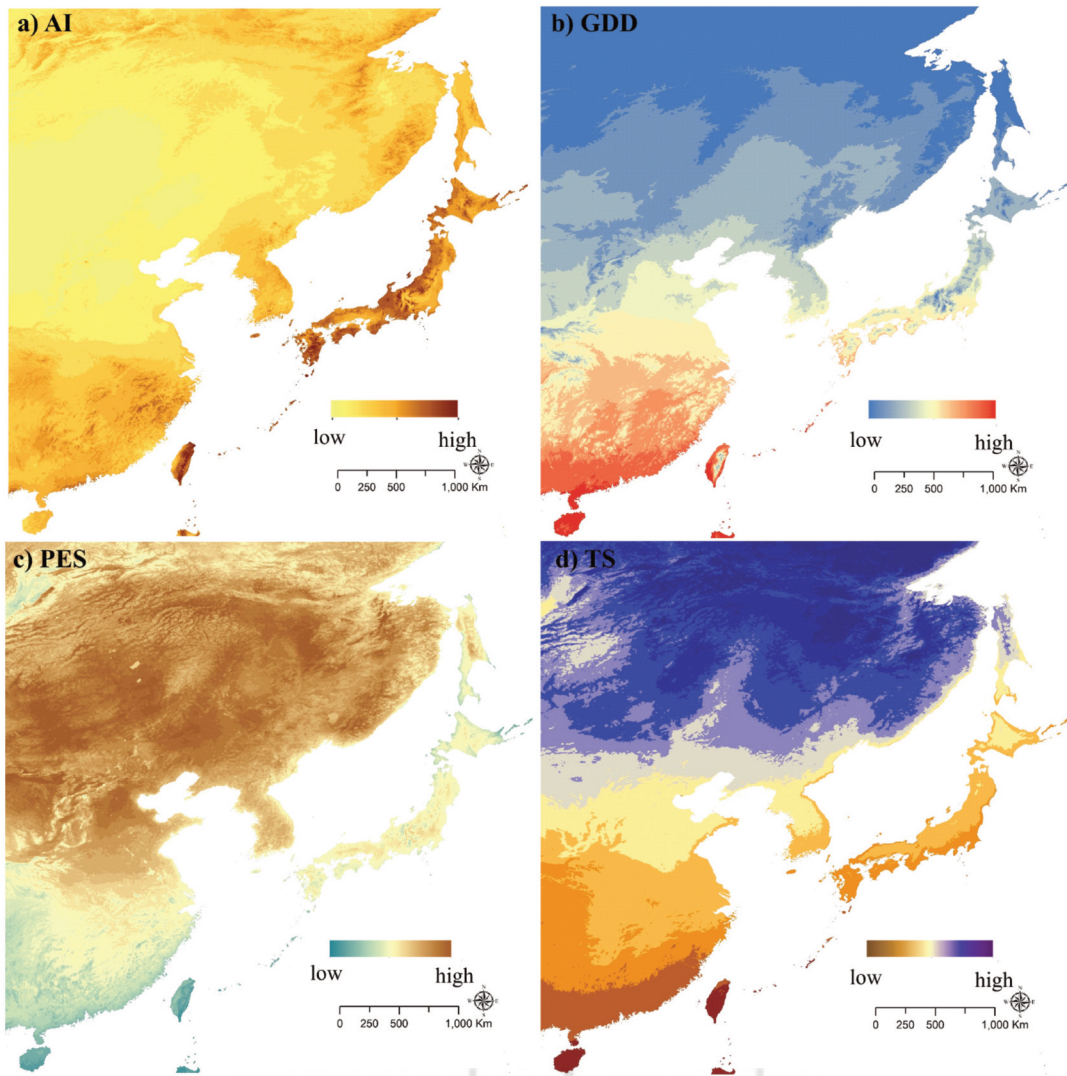


Figure 2. Current map of four variables (a) aridity Index (AI); (b) growing degree days (GDD); (c) potential evapotranspiration seasonality (PES); (d) temperature seasonality (TS).

대만, 일본과 같이 해안에 둘러싸인 섬 지역들은 전반적으로 AI가 높은 습윤한 기후를 나타낸 반면, 고비사막에 가까운 내륙 쪽으로 갈수록 강수량이 감소하여, 건조한 기후를 나타냈다. 연평균기온과 직접 연관된 GDD의 경우, 기온분포와 마찬가지로 위도 및 고도가 높아질수록 낮아지는 경향을 확인할 수 있었다. 이에 따라 중국 남부 평야 지대, 한반도의 남서 평야 및 일본 남부 지역이 충분한 GDD를 나타내었고, 남부지역의 고지대 및 고위도 북부 지역에서 낮은 GDD를 보였다.

열대 계절풍의 영향을 받는 중국 남부와 대만지역은 연중 기온이 높고, 연교차가 작기 때문에 잠재증발산량과 기온 모두 계절적 차이가 작게 나타났다. 반면, 한반도를 비롯한 중국 내륙지역은 온대 계절풍의 영향으로 한랭 건조한 겨울과 고온 다습한 여름의 특성을 보이기 때문에 높은 PES와 TS 값을 나타내었다. 특히 TS의 경우 일사량 패턴의 영향으로 인해 위도와 함께 꾸준한 증가 추세를 나타낸다. 또한 중국 북부지역과 몽골 근처 지역은 식생이 분포하지 않

는 사막 지역으로 여름철의 태양열을 식혀주지 못해 계절적으로 더 큰 차이를 보였다. 이러한 생물기후의 특성을 반영하여 최종적으로 동북아시아를 15개의 생물기후권역으로 구분하였다(Figure 3).

15개로 구분한 생물기후권역은 북쪽 고위도 지역에서 남쪽 저위도 지역 순으로 1번~15번 권역으로 명명하였다(Figure 3). Appendix 1은 권역별 현재의 환경적 특성을 파악하기 위해 고도, 기온, 강수량에 대하여 평균값과 최소, 최댓값을 나타낸 것이다. 평균 고도는 산맥과 평야 지역의 분포에 따라 차이를 보이거나 동북아시아에서는 전반적으로 북쪽 지역의 고도가 높다. 러시아의 스타노보이산맥을 포함하는 동북아시아의 가장 북쪽에 위치한 1번 권역이 평균 1130m로 가장 높은 평균 고도를, 중국의 화남평야를 포함하는 15번 권역이 약 163m의 평균으로 가장 낮은 고도를 나타냈다. 이와 같은 고도와 위도 차이로 따라 평균 기온은 남쪽 권역으로 갈수록 높아지는 경향성을 나타낸다. 위도와 평균 고도가 가장 높은 1번 권역(평균 -8.31°C)에서부터 가장 낮은 위도와 평균

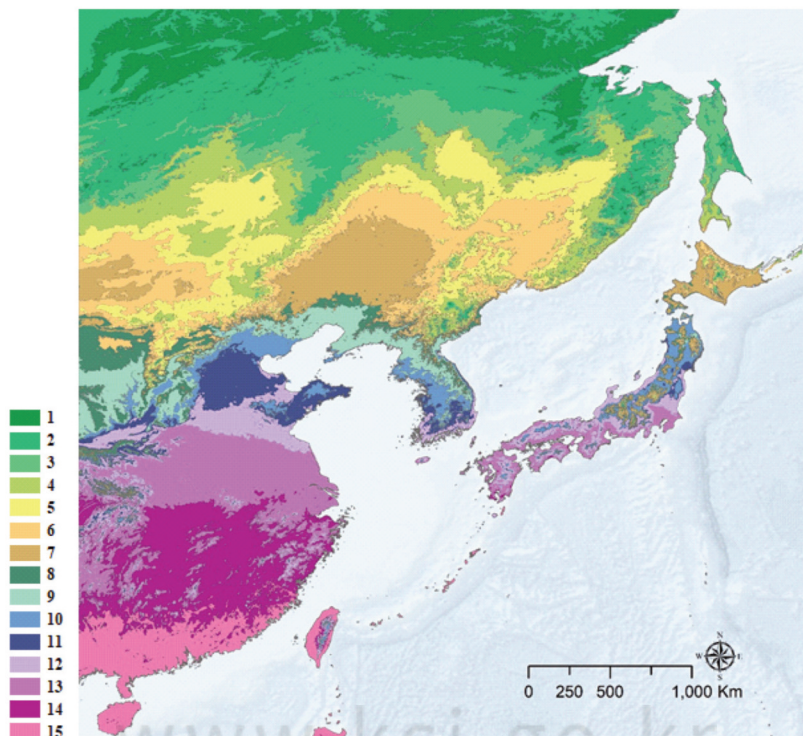


Figure 3. Fifteen bioclimatic zones of Northeast Asia.

Table 2. Percentage distribution of forest type by bioclimatic zone (unit: %)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Broadleaved, evergreen	0	0	0	0	0	0	0	2	1	4	4	11	12	17	19
Broadleaved, deciduous	1	6	14	27	25	20	15	27	22	20	9	12	6	1	1
Needleleaved, evergreen	11	14	9	3	1	1	2	3	4	15	7	19	14	22	8
Needleleaved, deciduous	70	66	28	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mixed leaf type	1	3	4	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Shrubland	12	3	9	2	1	1	0	1	1	2	1	3	2	3	8
Grassland	0	3	18	24	22	19	16	31	18	6	2	1	0	0	1
Sparse vegetation	3	0	3	20	21	3	4	1	1	0	0	0	0	0	0
Cropland	2	1	5	7	19	49	55	27	41	41	70	47	57	45	48
Urban	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	2	1	2	1	2
Water	0	2	1	1	1	2	1	0	1	2	1	2	2	4	3
Others	1	2	8	7	7	4	5	8	11	8	3	4	5	9	10

고도를 나타내는 15번 권역(평균 21.73℃)까지 꾸준히 증가하는 추세를 보였다. 반면 연 누적강수량의 경우, 해양과의 근접성 및 지형 등의 영향을 받는다. 이에 따라 가장 남쪽 적도 부근에 위치한 15번 권역에 약 1,722mm의 최고 누적 연 강수량을 보였으며, 대륙성 기후 지역을 가장 많이 포함하는 5번 권역이 약 449mm로 최저 누적 강수량을 나타냈다.

식생의 분포는 현재 기후의 영향을 많이 받기 때문에, 생물기후권역의 타당성 검증 및 특성규명을 위하여 생물기후권역의 분포를 식생의 분포현황과 비교하였다. 낙엽침엽수림은 러시아 동남부와 중국과 북한의 경계의 백두산 부근에 위치하는 냉대림으로 생물기후권역 주로 1, 2번 권역에 걸쳐 분포하며, 남쪽 분포한계선과 2번 권역의 경계가 유사한 양상을 나타낸다. 1번에서 5번 권역으로 갈수록 감소하는 추세를 보이며 분포하고, 5~15번 권역에는 더 이상 존재하지 않는다. 상록침엽수림은 낙엽침엽수림 부근보다 낮은 고도의 북부대륙 지역과 중국, 일본 남부 지역에 분포한다. 2번 권역에 주로 분포하는 북부 상록침엽수림은 추운 겨울과 짧은 생육 기간에 알맞은 한대성 침엽수림이며, 10~15번 권역에 걸쳐 남부 지역에 분포하는 상록침엽수림은 난대성 상록침엽수림으로 구분된다.

낙엽활엽수림은 중국 동북부지역에서부터 한반도와 일본 대부분의 산지를 거쳐 중국 중남부 평야 지

대까지 넓게 분포한다. 약 50% 정도가 4~6번 권역에 걸쳐 분포하며, 중국 동북부지역에서는 4번 권역의 남부 한계선과 유사한 분포를 나타낸다. 넓은 면적을 차지하진 않지만, 북부지역에서는 2번 권역의 북방한계선과 한반도에서는 9번 권역의 경계와, 남쪽 해안 부근과 제주도에서는 11번 권역의 분포 한계와 유사한 경향으로 분포한다. 상록활엽수림은 본 연구대상지의 가장 남쪽에 위치하는 중국 동남부 지역과 대만 중심부에 99% 이상이 13~15번 권역에 걸쳐 분포하며, 북방 한계분포선이 중국 쪽 14번 권역의 분포경계와 유사한 경향을 나타낸다. 낙엽침엽수림과는 반대로 7번 권역까지는 등장하지 않으며 8번 권역부터 15번 권역까지 증가하는 분포비율을 보인다. 혼효림의 경우에는 러시아 동남지역 및 백두산 부근의 2~4번 권역에서 약 83% 이상이 분포하고, 6번 권역부터는 존재하지 않는다.

식생의 분포에는 기후뿐 아니라 지형, 토양조건, 인간의 활동 등 다양한 요인이 영향을 미치며 나아가 단순히 공간적 영향 뿐 아니라 진화의 역사 등과 같은 시간적 영향도 받는다(Lee and Lim 2002). 따라서 기후만으로 분류한 생물기후권역이 식생의 분포와 완벽히 일치하지 않는 한계가 존재한다. 하지만, 개략적으로 식생과 생물기후권역 분포의 유사성을 확인함으로써 어느 정도 생물 서식에 영향을 미치는 기후적 요인을 구분해내었다고 판단된다.

2. 미래 생물기후 변화 분석

기후변화 시나리오에 따른 17개 기후모형의 예측 결과를 분석하고, 모델 간 차이를 통해 불확실성을 평가하였다. Figure 4는 현재(1970~2000년)의 평균값을 기준으로 미래(2050s, 2070s)에 대한 RCP 시나리오별 주요생물기후변수들의 변화율을 나타내었다. Figure 4의 Box는 상위 75%와 하위 25%의 범위를 나타내며, 상한과 하한선(whisker)은 각 Box로부터 1.5배 내의 값 중 최댓값과 최솟값을 연결한 것으로, 기후모형 예측 결과의 불확실성을 의미한다. 이를 초과하거나 미달한 값은 이상치(outlier)로 Boxplot 바깥쪽의 점으로 나타난다. 전반적으로 네 변수 모두 현재 기후보다 평균값이 증가하였고, 2050년대보다 2070년대가, RCP 4.5보다 RCP8.5에서가 불확실성이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

AI는 현재 기후에서보다 평균적으로 약 3~4% 정도 증가하는 것으로 예측되었고, 시나리오와 기간에 따른 차이는 크지 않았다. AI의 증가는 기온 상승으로

인한 잠재증발산량의 증가보다 강수량의 증가가 큰 것을 의미하는 것이다. 이는 식생이 가용 가능한 수분의 양이 증가하는 것으로 해석할 수 있으나, 지역적 변화양상의 확인이 필요하다. GDD의 경우, 현재 기후에서의 GDD 보다 평균 약 20%(RCP4.5, 2050년대) 이상 증가할 것이며, 그 증가 폭은 RCP4.5보다 RCP8.5에서 현저하게 나타날 것으로 예상되었다. 다른 변수들과 비교하여 GDD가 가장 큰 증가율을 나타냈으며, 이는 GDD가 기후변화에 따른 기온 상승을 직접적으로 반영했기 때문이다. GDD의 급격한 증가는 식물의 생장과 발육, 작물의 품질과 수량에도 큰 변화를 야기할 수 있음을 의미한다(Kim & Yun 2008). PES 역시 GDD변화와 유사한 변화 추세를 나타냈으나, 변화율은 최대(RCP8.5, 2070년대) 평균 약 7%로 변화폭이 작았다. TS는 평균 약 1% 정도의 증가율로, 가장 적게 변화하는 것으로 예측되었고, 기간이나 시나리오에 따라서도 큰 차이는 나타나지 않았다. PES와 TS의 변화율을 통해 기후변화에 따

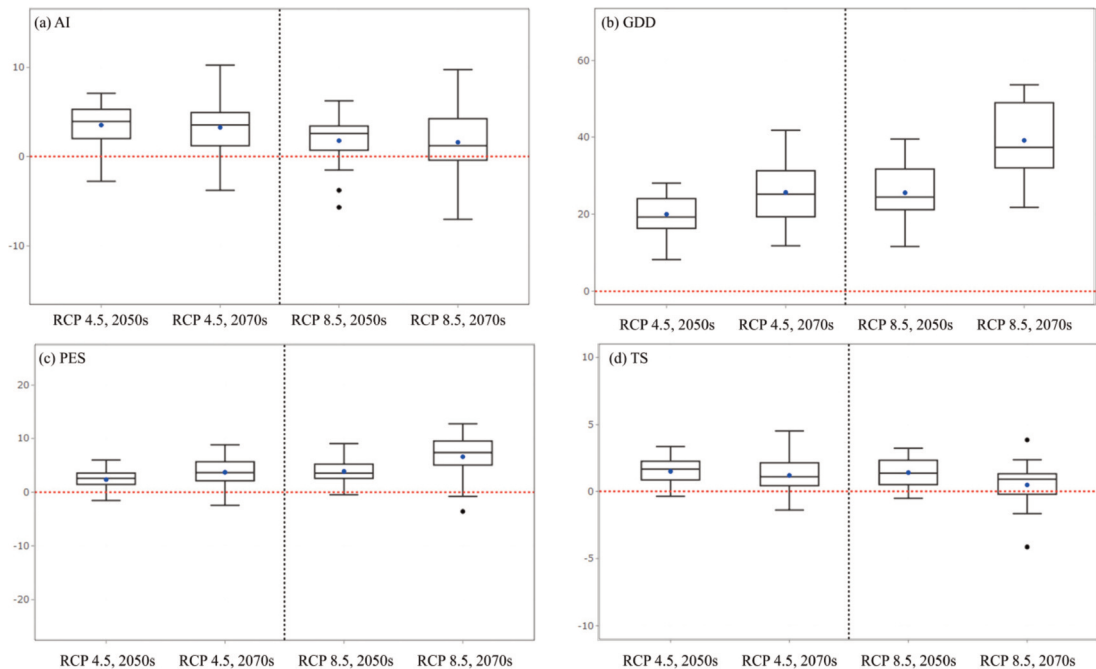


Figure 4. Average change rate of main bioclimatic variables (a) aridity Index (AI); (b) growing degree days (GDD); (c) potential evapotranspiration seasonality (PES); (d) temperature seasonality (TS). The top and bottom of the box show the top 75% and the bottom 25%. The horizontal line is the median value, the dot in the box is mean value of GCMs and the dot outside the box is the outlier.

라 전반적인 계절적 변동성은 크지 않을 것을 알 수 있다.

Figure 5는 변수별 증감률을 공간적으로 표현한 것이다. 시나리오와 기간에 따라 변화양상은 차이가 있으나, 전체적인 경향성은 유사하기 때문에 가장 극명한 변화를 확인할 수 있는 RCP8.5 시나리오의 2070년대의 분포를 통해 기후변화에 따른 생물기후 변수의 공간적 변화 패턴을 확인하였다. AI가 증가하는 지역은 주로 해안과 인접한 지역으로, 러시아의 극동지역에서부터 중국의 보하이만 주변 지역, 한반도의 중부 산간지역이 가장 큰 증가를 보였다. 반면 사막과 인접한 연구 대상지의 북부 내륙지역과 중국 남부 지역은 AI가 크게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. AI의 감소는 강수량 증가에 비해 기온 상승으로 인한 잠재증발산량 증가가 큰 지역을 의미한다.

북부 내륙지역의 AI 감소는 잠재증발산량 증가에 따른 것으로, 중국 남부지역의 AI 감소는 강수량의 변화가 적은 것이 원인으로 사료된다. 기존에 AI가 가장 낮아 건조했던 북부 내륙 지역은 미래에 더 건조해질 것으로 예상되었고, 특정 해안 지역에서는 더 습윤해져 지역적 건조도의 차이가 확대될 것으로 나타났다.

GDD의 경우, 앞서 boxplot을 통해 확인한 것처럼 전 지역에서 크게 증가하였으나, 특히 동북아의 북쪽 산간지역에서 가장 크게 증가하였다. 반면 중국 남부, 대만, 일본 등 기존에 GDD가 높았던 남부지역에서는 증가 폭이 작게 나타났다. 즉, 과거에도 겨울철 기온이 0℃ 이상이었던 남부지역의 식물 성장 가능일수의 증가는 적었던 반면, 겨울이 길고 기온이 매우 낮았던 북부지역은 기온 증가로 겨울철 성장가능일

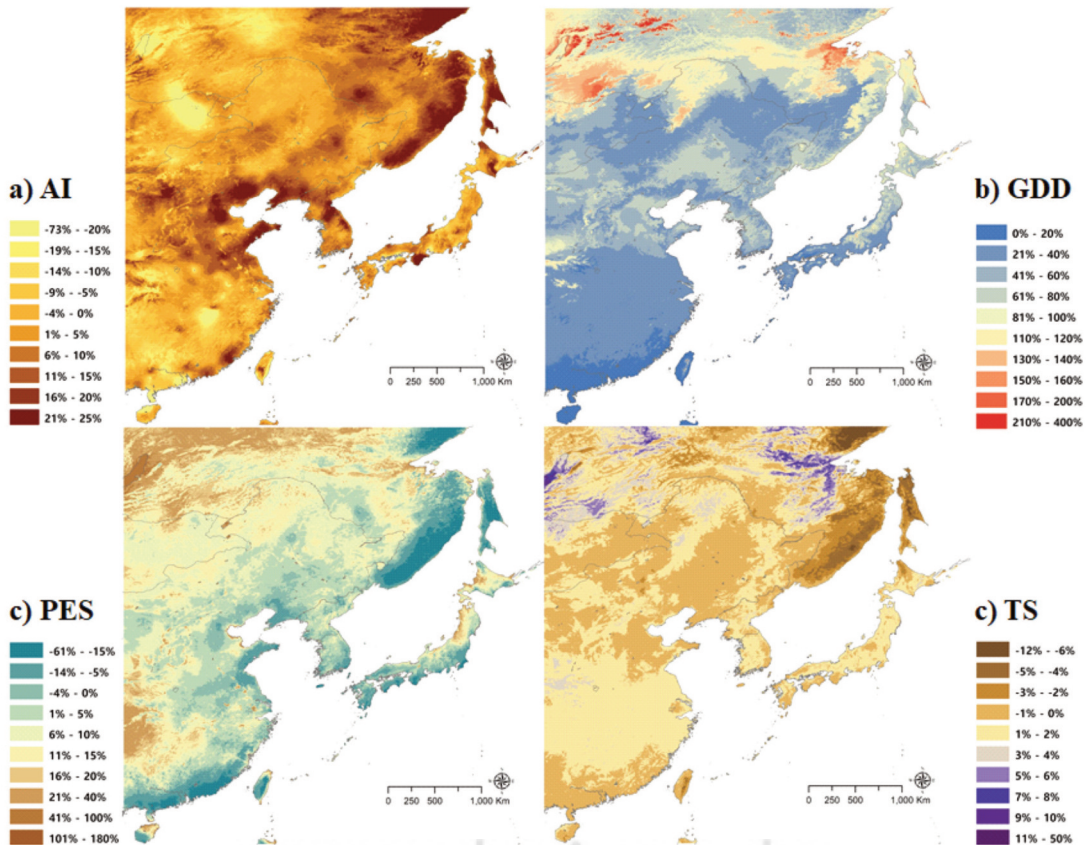


Figure 5. Spatial distribution of change rate (a) aridity Index (AI); (b) growing degree days (GDD); (c) potential evapotranspiration seasonality (PES); (d) temperature seasonality (TS).

수가 크게 증가하는 것을 의미한다. 식물이 성장할 수 있는 범위가 기후변화에 의해 북쪽으로 확장될 수 있음을 시사한다.

반면, PES의 경우에는 AI와 상반된 경향을 나타냈다. 해안 인접 지역에서 PES가 감소하고, 내륙지역이 증가하였다. 이는 전통적으로 잠재증발산량의 계절적 차이가 작았던 해안 인접 지역에서는 계절성이 감소하고, 계절적 차이가 크게 나타났던 내륙지역은 보다 계절성이 증가하는 것을 의미한다. 즉 기후변화에 의해 PES에 대한 지역 기후의 특성이 강화되는 것으로 이해할 수 있다. TS의 경우는 변화율 자체가 타 변수에 비해 매우 적게 나타났다. GDD 증가가 크게 나타난 동북아 북부 지역에서 증가하였고, 러시아 극동지역에서 상대적으로 큰 감소를 보였다. 그

외 대부분 지역은 TS의 변화가 크지 않았다. 중국의 남부평야, 한반도 및 일본의 경우, 전반적인 TS의 변화는 거의 없었다.

3. 미래 생물기후권역의 구축 및 변화분석

앞서 규명한 생물기후변수의 변화를 반영하여, 17개의 기후모형 별미래 생물기후권역을 각각 구축하였으며, 기후모형별로 예측결과와 차이가 존재하였다. 모형 간 일치율이 낮을수록 불확실성이 높다고 판단할 수 있으며, 전반적으로 북부 내륙지역이 남부 해안지역보다, 2050년대보다 2070년대에서, RCP4.5시나리오 보다 RCP8.5 시나리오에서 불확실성이 높게 나타났다(Figure 6). 최종적으로 17개의 기후모형의 결과를 중첩하여 가장 많은 모형에서 예

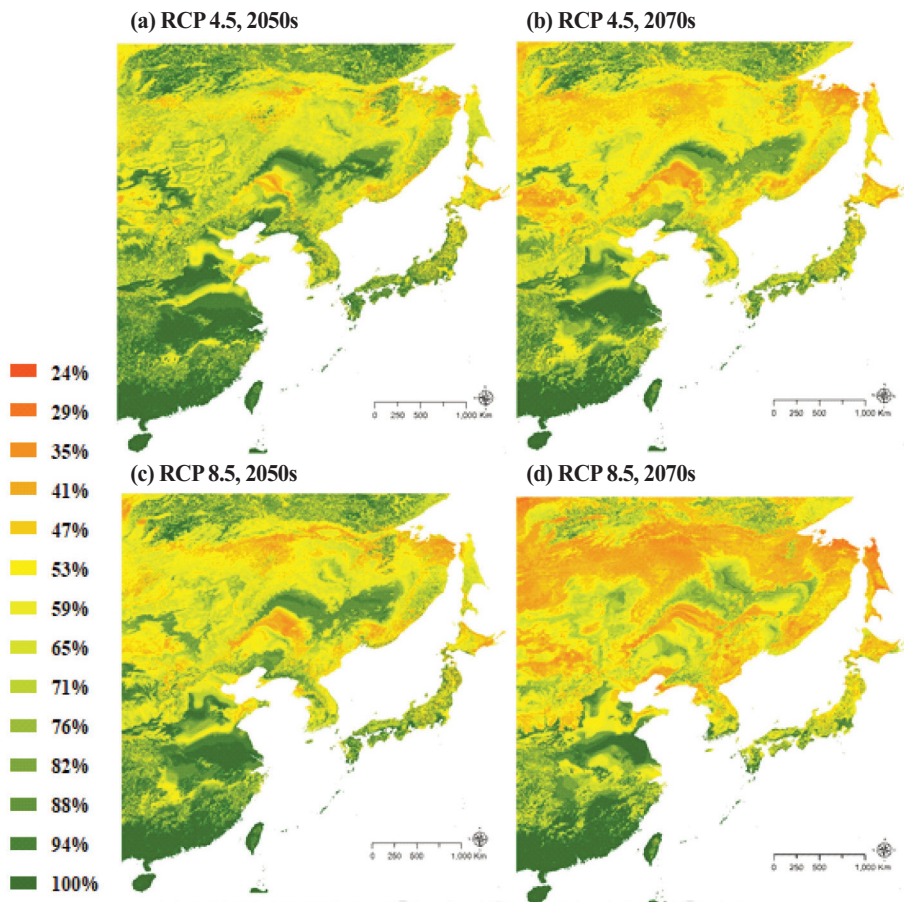


Figure 6. Percentage of match among 17 global climate models (a) RCP 4.5, 2050s; (b) RCP4.5, 2070s; (c) RCP 8.5, 2050s; (d) RCP 8.5, 2070s.

측한 권역으로 최종 권역을 할당하였다(Figure 7). 최종 생물기후권역 변화예측 결과, 전반적으로 권역들이 북상하였으나, 권역 별로 변화양상은 차이가 존재하였다.

몽골의 고비사막 부근 중부내륙에서 한반도 남부지역에 걸쳐 위치한 6~10번 권역과 중국 남부 해안 부근 14, 15번 권역은 면적이 증가한 반면, 북부내륙에 위치한 1~5번 권역과 중국 중부 화베이 평원 부근에 위치한 11~13번 권역은 면적이 감소하였다(Table 3).

면적의 증가가 가장 큰 권역은 7번 권역으로 RCP 8.5 시나리오에서 2070년대에는 약 13%가량 증가하

였다. 7번 권역이 북쪽으로 확장하며, 기존 4~6번 권역이 위치했던 지역의 기후를 대체하는 것은 중부 내륙의 기온이 상승하고, 건조기후가 보다 습윤해지는 것을 의미한다. 다음으로 증가율이 높은 권역은 15번(약 8%), 14번(약 3%) 권역으로, 남한과 일본 남부지역까지 확장되었다. 두 권역의 확장은 고온 다습한 아열대 기후가 북상하는 것으로 해석할 수 있다.

면적의 감소가 가장 큰 권역은 2번 권역으로 RCP 8.5 시나리오에서 2070년대에는 약 10% 감소하였고, 다음으로 1번 권역이 약 9% 감소하였다. 11~13번 권역은 1~2% 정도의 면적 감소를 나타냈다. 대상지의

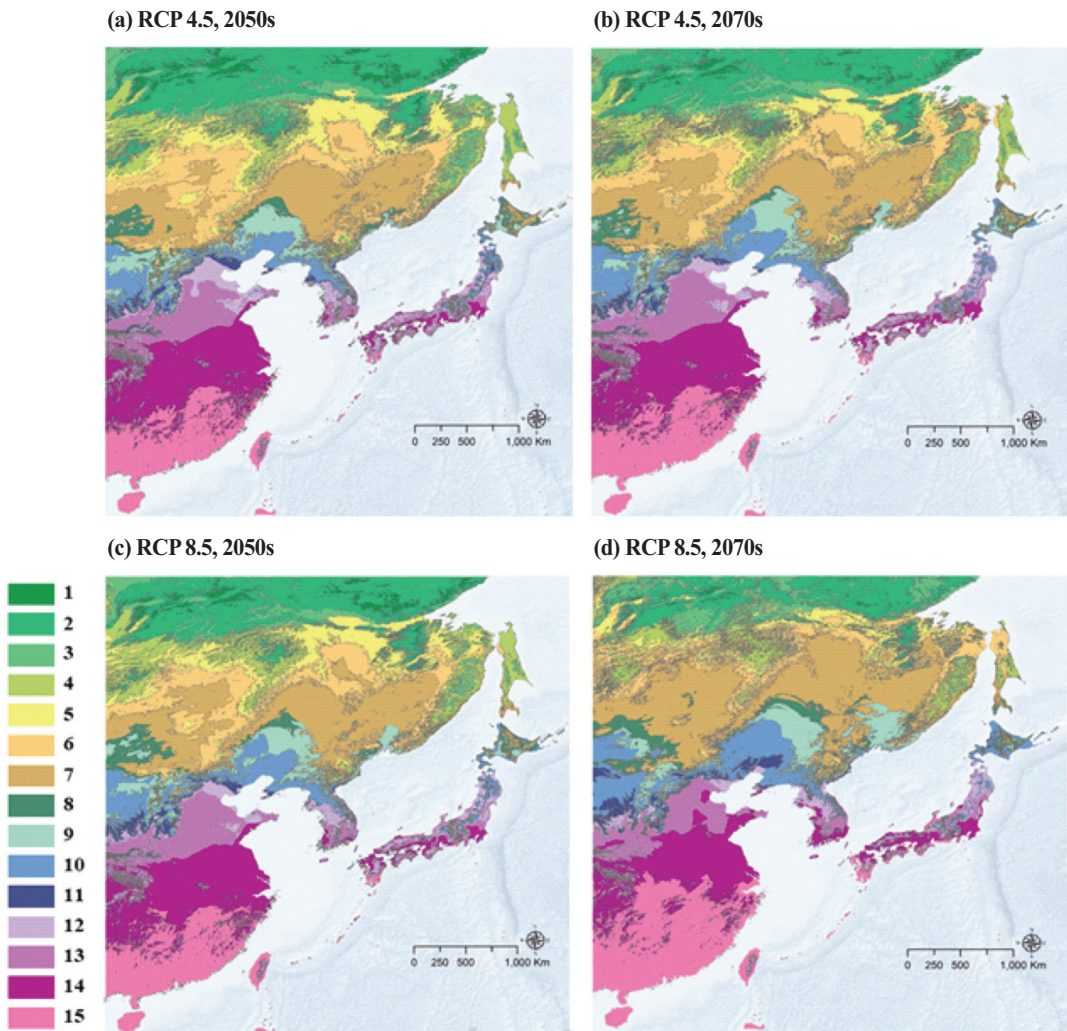


Figure 7. Distribution of the 15 bioclimatic zones in Northeast Asia based upon the majority result from 17 multi-model GCMs (a) RCP 4.5, 2050s; (b) RCP 4.5, 2070s; (c) RCP 8.5, 2050s; (d) RCP 8.5, 2070s.

Table 3. Distribution percentage and maximum change rate of the 15 bioclimatic zones in Northeast Asia (unit: %)

Bioclimatic Zone	Current	2050s RCP4.5	2070s RCP4.5	2050s RCP8.5	2070s RCP8.5	Maximum change rate
1	9.83	2.46	1.48	1.89	0.46	-9.4
2	18.27	13.70	12.17	12.28	7.75	-10.5
3	7.00	6.55	6.88	5.30	6.30	-1.7
4	7.94	7.55	6.39	8.10	4.84	-3.1
5	9.24	8.00	7.04	7.78	6.21	-3.0
6	7.85	10.55	10.50	9.62	8.97	2.7
7	5.71	11.92	14.79	13.55	18.37	12.7
8	2.64	2.50	2.01	2.58	3.18	-0.6
9	3.49	4.13	4.34	4.51	5.16	-0.6
10	2.61	4.43	5.65	5.48	7.35	4.7
11	2.90	1.48	1.18	1.45	2.04	-1.7
12	3.90	3.54	3.23	3.04	2.65	-1.2
13	8.10	5.99	6.26	6.25	5.36	-2.7
14	6.70	10.10	10.28	10.19	9.54	3.6
15	3.82	7.10	7.79	7.97	11.84	8.0

가장 북쪽에 위치한 1, 2번 권역의 면적 감소는 기후 변화에 따라 권역들이 북쪽으로 이동하면서 본 연구의 대상지를 벗어난 것이 감소의 원인일 수 있어 권역의 소멸로 해석하기에는 어려움이 있다. 반면 11~13번 권역은 아열대 기후권역이 북상하다 고도가 차이가 큰 타이완산맥을 만나 더 이상 확장하지 못하고 축소된 것으로 판단된다.

한반도를 중심으로 권역의 변화를 살펴보면, 남부 해안지역과 제주도에 위치하던 12번 권역이 서울 부근 중부지역까지 크게 확장되었고, 중국 남부 및 일부 일본지역에 위치한 13번과 14번 권역이 남부지역에 새롭게 등장하는 것으로 예측되었다. 기존의 남한을 대부분 차지하던 10번, 11번 권역은 급격히 북상하여 태백산맥부근 및 중국 북부 산간지역으로 이동하였다. 개마고원 부근에서는 가장 고도가 높은 지역에 위치한 1~3번 권역은 기후변화에도 유지되었으나, 주변을 둘러싸고 있던 4~6번 권역은 크게 축소되는 것을 확인할 수 있었다.

생물기후권역의 이동정도를 파악하기 위해 권역별 위도에 따른 분포면적을 Violin plot으로 나타내었다 (Figure 8). 기간과 시나리오에 따라 변화의 경향성은 유사하였기 때문에, 보다 극명한 변화를 확인할

수 있는 2070년대를 대푯값으로 표현하였다. 2070년대의 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오의 권역 별 위도 분포 변화를 살펴보면, 북쪽에 위치한 1~5번 권역은 본 연구 대상지 범위의 한계로 북쪽으로 확장되는 범위를 확인할 수 없어 명확한 권역의 분포변화를 파악할 수 없으므로 구체적인 해석에서는 제외하였다. 권역의 현재 및 미래의 분포가 모두 대상지 내에 포함되는 나머지 권역들은 면적이 증가하는 권역과 감소하는 권역으로 구분할 수 있고, 권역의 이동이나 면적감소가 급격히 나타나는 권역에 서식하는 생물종들이 서식 적합 환경의 변화로 인해 생존을 위협받을 확률이 높은 것으로 해석할 수 있다.

또한 면적이 증가하는 권역(6번~10번, 14번, 15번)들은 권역의 위도분포 폭이 유지·확장되는 권역들과 위도분포 폭이 감소하는 권역들로 구분할 수 있다. 7번, 8번, 10번 권역들은 권역의 남쪽 분포한계선에는 큰 변화 없이 북쪽으로 권역을 확대하며 면적이 증가한다. 반면, 6번, 9번, 14번 권역들은 남쪽 분포한계선이 급격히 북상하여 남쪽 지역에 더 이상 그 권역의 기후대가 존재하지 않는 지역이 발생한다. 즉 북쪽에서의 면적은 증가하나 남쪽 지역에 기후대가 소멸하는 지역에 대해서는 생물종에 대한 관리가 필

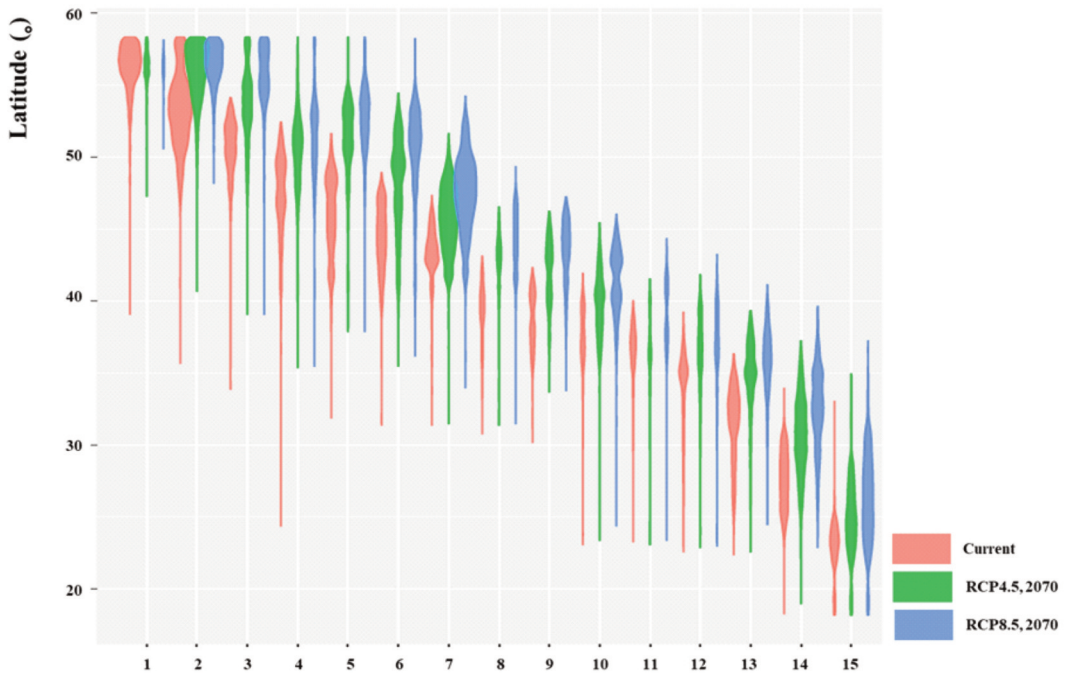


Figure 8. Violin plot of the bioclimatic zones' latitudinal distribution. The violine lines represents the distribution of each zone against latitude.

요하다.

면적이 감소하는 권역들도 마찬가지로 위도분포 범위의 변화에 따라 구분이 가능하다. 면적이 감소하는 11~13번 권역들 중 11번, 12번 권역은 위도분포의 범위는 확장되면서 면적이 감소하나, 13번 권역의 경우 면적감소 뿐 아니라 위도분포의 범위도 감소한다. 이에 따라 13번 권역을 기후변화에 따라 북상하며 분포 범위가 점차적으로 줄어드는, 즉 소멸 가능성이 가장 높은 권역으로 해석할 수 있다. 면적이 감소하는 권역들에 대해 서식환경 변화에 따른 생물종의 영향 등에 대한 모니터링이나 관리 조치가 필요하며, 특히 13번 권역 내에만 존재 가능한 생물종들에 대한 집중적인 관리가 필요하다.

IV. 결론

기후변화에 대응한 보다 적극적인 생물보전전략 수립을 위해 생물 서식환경의 변화예측이 필요하며, 생물기후권역은 유용한 생태계 관리체계를 제공할 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 생물기후권역 구

축을 통해 동북아시아의 생물 서식환경을 파악하고, 기후변화의 영향을 분석하였다. 먼저 4가지 주요 생물기후변수(AI, GDD, PES, TS)를 구축하여 동북아시아의 현재 생물기후권역을 구분하고, 권역별 환경 특성을 제시하였다. 또한 미래의 변화예측을 위해 17개의 전 지구 기후모형을 활용하여 각 생물기후변수의 2050년대, 2070년대의 RCP4.5, 8.5시나리오에 따른 변화율과 변화율의 공간적 분포를 분석하였다. 이러한 변화를 반영하여 미래의 생물기후권역도를 구축한 결과, 기후변화에 따라 대부분의 권역이 북상하는 경향성을 확인할 수 있었으며, 권역의 면적과 위도 분포변화를 예측함으로써 중국 남부에 위치하여 권역의 축소가 가장 두드러지게 나타나는 13번 권역을 집중 관리권역으로 제시하였다.

본 연구에서 제시하는 현재와 미래의 생물기후권역도는 생태계 관리의 공간적 단위를 제공하고, 권역별 환경 특성 및 기후변화 영향을 제시함으로써 자연환경보전계획, 국가기후변화적응대책 등의 국가 단위 보전전략 수립 시, 보다 효율적인 보전전략 수

립에 활용할 수 있다. 또한 외래종 유입 및 멸종위기 종의 서식처 변화 등 국가 간 경계를 넘어 발생하는 생태계 변화에 대응하기 위한 협력체계 구축의 근거를 제시할 수 있을 것으로 사료된다. 다만 본 연구에서는 동북아시아의 공간적 범위를 포함하며, 고해상도의 생물기후권역도 구축을 위해 WorldClim의 자료를 이용하였으나, 현재(1970~2000년 평균자료)의 자료가 최신의 기후를 반영하지 못한 한계가 존재한다. 또한 기존 권역 내에서의 변화만 모의한 것이기 때문에 새롭게 등장하는 기후권역들은 나타내지 못하였다. 후속연구에서는 최신 기후자료의 이용 및 기법의 고도화를 통해 미래의 변화양상을 파악하고, 권역별 변화에 따른 보다 구체적인 체계적인 적응 전략을 제시한다면 보다 정확하고 유용한 자료를 제공할 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 기상청 “기상See-At기술개발사업(KMIPA2015-6140)” 및 환경부의 재원으로 국립생물자원관(NIBR201839202)의 지원을 받아 수행하였습니다.

References

- Allen RG. 2000. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. *Journal of Hydrology*. 229(1-2): 27-41.
- Araújo MB, Cabeza M, Thuiller W, Hannah L, Williams PH. 2004. Would climate change drive species out of reserves? An assessment of existing reserve selection methods. *Global change biology*. 10(9): 1618-1626.
- Baumont LJ, Pitman A, Perkins S, Zimmermann NE, Yoccoz NG, Thuiller W. 2011. Impacts of climate change on the world's most exceptional ecoregions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 201007217.
- Booth TH. 1990. Mapping regions climatically suitable for particular tree species at a global scale. *Forest Ecology and Management*. 36: 47-60.
- IPCC. 2014. *Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. p.151.
- Choi S, Lee WK, Kwak DA, Lee S, 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(3): 229-245.
- Choi Y, Lim CH, Ryu J, Jeon SW. 2017b. Bioclimatic Classification of Northeast Asia Reflecting Social Factors: Development and Characterization. *Sustainability*. 9(7): 1137.
- Choi Y, Lim CH, Ryu J, Dongfan P, Kang JY, Weihong Z, Guishan C, Lee WK, Jeon SW. 2017a. Bioclimatic Classification and Characterization in South Korea. *Korea Society of Environmental Restoration Technology*. 20(3): 1-18. [Korean Literature]
- Coops N, Loughhead A, Ryan P. 2001. Development of daily spatial heat unit mapping from monthly climatic surfaces for the Australian continent. *International Journal of Geographical Information Science*. 15: 345-361.
- Davidson MD. 2017. Equity and the Conservation of Global Ecosystem Services. *Sustainability*. 9: 339.
- Dawson TP, Jackson ST, House JI, Prentice IC, Mace GM. 2011. Beyond predictions: biodiversity conservation in a changing

- climate. *Science*. 332(6025): 53-58.
- Dinerstein E, Olson D, Joshi A, Vynne C, Burgess ND, Wikramanayake E, Hahn N, Palminteri S, Hedao P, Noss R, Hansen M. 2017. An ecoregion-based approach to protecting half the terrestrial realm. *BioScience*. 67(6): 534-545.
- Fick SE, Hijmans RJ. 2017. Worldclim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*.
- Hannah L, Midgley G, Anelman S, Araujo M, Hughes G, Martinez-Meyer E, Pearson R, Williams P. 2007. Protected area needs in a changing climate. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 5(3): 131-138.
- Hargreaves GH, Allen RG. 2003. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 129(1): 53-63.
- Hargreaves GH. 1994. Defining and using reference evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 120(6): 1132-1139.
- Richard JH, David NC, Laurie Y, Erika SZ, Gregory HAF, Stuart C, Peter BL, David JP, Nathan LS, Peter SW, David MG, Eric SH, Connie M, John M. 2010. Guiding concepts for park and wilderness stewardship in an era of global environmental change. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 8: 483-490.
- Hole DG, Willis SG, Pain DJ, Fishpool LD, Butchart SH, Collingham YC, Rahbek C, Huntley B. 2009. Projected impacts of climate change on a continent wide protected area network. *Ecology letters*. 12(5): 420-431.
- Hong SY, Oh SG, Suh MS, Lee DK, Ahn JB, Kang HS. 2013. Future Climate Changes over North-East Asian Region Simulated by RegCM4 Based on the RCP Scenarios. *Journal of climate research*. 8(1): 27-44. [Korean Literature]
- Jeon HS, Cho GS. 2000. A comparison of neural networks and maximum likelihood classifier for the classification of land-cover. *Journal of Korean Society for Geospatial Information System*. 8(2): 23-33. [Korean Literature]
- Kim WJ. 2004. Ecoregion classification in Korea based on analysis of geospatial variables. *Interdisciplinary Doctoral Program in Landscape Architecture Major Graduate School Seoul National University*. [Korean Literature]
- Kim G, Kim J, Kim CJ, Jin CS, Suh MS, Park SC, Cha DH. 2014. Climate Change Projections over CORDEX East Asia Domain using Multi-RCMs. *Journal of climate research*. 9(4): 257-268. [Korean Literature]
- Kim JH, Yun JI. 2008. On Mapping Growing Degree-Days (GDD) from Monthly Digital Climatic Surfaces for South Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*. 10(1): 1-8. [Korean Literature]
- Kim SJ, Kim MI, Lim CH, Lee WK, Kim BJ. 2017. Applicability Analysis of FAO56 Penman-Monteith Methodology for Estimating Potential Evapotranspiration in Andong Dam Watershed Using Limited Meteorological Data. *Journal of Climate Change Research*. 8(2): 125-143. [Korean Literature]
- Kong WS. 2005. Selection of Vulnerable Indicator Plants by Global Warming. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*. 41(2-1): 263-273. [Korean Literature]

- Kwon YA, Kwon WT, Boo KO, Choi YE. 2007. Future projections on subtropical climate regions over South Korea using SRES A1B data. *Journal of the Korean Geographical Society*. 42. [Korean Literature]
- Lee H, Kim G, Park C, Cha DH. 2017. A Study of Future Changes of Climate Classification and Extreme Temperature Events over South Korea in Multi Regional Climate Model Simulations. *Journal of Climate Research*. 12: 149-164.
- Lee SG, Seo TC, Jang YA, Lee JG, Nam CW, Choi CS, Um YC. 2012. Prediction of Chinese cabbage yield as affected by planting date and nitrogen fertilization for spring production. *Journal of Bio-Environment Control*.
- Lee SC, Choi SH, Lee WK. 2011. Vulnerability Assessment of Forest Distribution by the Climate Change Scenarios. *Korean Forest Society*. 435-438.
- Lee WC, Lim YJ. 2002. *Phytogeography*. Kangwon national university.
- Lim CH, Yoo S, Choi Y, Jeon SW, Son Y, Lee WK. 2018. Assessing Climate Change Impact on Forest Habitat Suitability and Diversity in the Korean Peninsula. *Forests*. 9(5): 259.
- Liu C, Sun G, McNulty SG, Noormets A, Fang Y. 2017. Environmental controls on seasonal ecosystem evapotranspiration/potential evapotranspiration ratio as determined by the global eddy flux measurements. *Hydrology and Earth System Sciences*. 21(1): 311-322.
- Li W, Ciais P, MacBean N, Peng S, Defourny P, Bontemps S. 2016. Major forest changes and land cover transitions based on plant functional types derived from the ESA CCI Land Cover product. *International journal of applied earth observation and geoinformation*. 47: 30-39.
- Mackey BG, McKenney DW, Yang YQ, McMahon JP, Hutchinson MF. 1996. Site regions revisited: a climatic analysis of Hills' site regions for the province of Ontario using a parametric method. *Canadian Journal of Forest Research*. 26(3): 333-354.
- Metzger MJ, Brus DJ, Bunce RG, Carey H, Goncalves PD, Honrado JP, Jongman RHG, Trabucco A, Zomer R. 2013b. Environmental stratifications as the basis for national, European and global ecological monitoring. *Ecological Indicators*. 33: 26-35.
- Metzger MJ, Bunce RGH, Jongman RHH, Mucher CA, Watkins JW. 2005. A climatic stratification of the environment of Europe. *Global ecology and biogeography*. 14(6): 549-563.
- Metzger MJ, Bunce RG, Jongman RH, Sayre R, Trabucco A, Zomer R. 2013a. A high resolution bioclimate map of the world: a unifying framework for global biodiversity research and monitoring. *Global Ecology and Biogeography*. 22(5): 630-638.
- National Institute of Environmental Research. 2007. *Assessments of Ecosystems Sensitive to Climate Change(I) : With Emphasis on Bioclimatic Classification*.
- Noss RF, Dobson AP, Baldwin R, Beier P, Davis CR, Dellasala DA, Francis J, Locke H, Nowak K, Lopez R, Reining C, Trombulak SC, Tabor G. Bolder thinking for conservation. *Conservation Biology* 26: 1-4.
- O'Donnell MS, Ignizio DA. 2012. Bioclimatic

- predictors for supporting ecological applications in the conterminous United States: U.S. Geological Survey Data Series 691: 10 p.
- David MO, Eric D, Eric DW, Neil DB, George VNP, Emma CU, Jennifer AD, Illanga I, Holly ES, John CM, Colby JL, Thomas FA, Taylor HR, Yumiko K, John F, Lamoreux WW, Wettengel PH, Kenneth RK. 2001. Terrestrial ecoregions of the world: A new map of life on Earth. *BioScience*. 51: 933-938.
- Park CY, Choi YE, Kwon YA, Kwon JI, Lee HS. 2013. Studies on changes and future projections of subtropical climate zones and extreme temperature events over South Korea using high resolution climate change scenario based on PRIDE model. *Journal of the Korean association of regional geographers*. 19. [Korean Literature]
- Park SU, Koo KA, Kong W. 2016. Potential impact of climate change on distribution of warm temperate evergreen broad-leaved trees in the Korean Peninsula. *Journal of the Korean Geographical Society*. 51(2): 201-217. [Korean Literature]
- Parr TW, Sier AR, Battarbee RW, Mackay A, Burgess J. 2003. Detecting environmental change: Science and society-Perspectives on long-term research and monitoring in the 21st century. *Sci. Total Environ*. 310: 1-8.
- Ren JL, Li QF, Yu MX, Li HY. 2012. Variation trends of meteorological variables and their impacts on potential evaporation in Hailar region. *Water Science and Engineering*. 5(2): 137-144.
- Sheldon KS, Leache AD, Cruz FB. 2015. The influence of temperature seasonality on elevational range size across latitude: a test using *L. iolaemus* lizards. *Global Ecology and Biogeography*. 24(6): 632-641.
- Shin JH, Kim CM. 1996. Ecosystem classification in Korea (I): Ecoregion classification. Korea Forest Reserach Institute. *ForestScience*. 54: 188-189. [Korean Literature]
- Shin Y, Jung H. 2015. Assessing uncertainty in future climate change in Northeast Asia using multiple CMIP5 GCMs with four RCP scenarios. *J. Environ. Impact Assess*. 24(3): 205~216. [Korean Literature]
- Soteriades AD, Murray-Rust D, Trabucco A, Metzger MJ. 2017. Understanding global climate change scenarios through bioclimate stratification. *Environmental Research Letters*. 12(8): 084002.
- Staudinger MD, Carter SL, Cross MS, Dubois NS, Duffy JE, Enquist C, Duffy JE, Enquist C, Griffis R, Hellmann JJ, Lawler JJ, O'Leary J, Morrison SA, Sneddon L, Stein BA, Thompson LM, Turner W. 2013. Biodiversity in a changing climate: a synthesis of current and projected trends in the US. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 11(9): 465-473.
- Svenning JC, Sandel B. 2013. Disequilibrium vegetation dynamics under future climate change. *American Journal of Botany*. 100(7): 1266-1286.
- UNEP. 1992. World Atlas of Desertification.
- UNESCO. 1979. Map of the world distribution of arid regions: explanatory note. MAP Technical Notes 7, UNESCO: Paris, 54.
- WWF. 2015. Impact of Climate Change on Species.
- Xu L, Myneni RB, Chapin IFS, Callaghan TV, Pinzon JE, Tucker CJ, Zhu Z, Bi J, Ciais P, Tømmervik H, Euskirchen ES, Forbes

- BC, Piao SL, Anderson BT, Ganguly S, Nemani RR, Goetz SJ, Beck PSA, Bunn AG, Cao C, Stroeve JC. 2013. Temperature and vegetation seasonality diminishment over northern lands. *Nature Climate Change*. 3(6): 581.
- Yokoo Y, Sivapalan M, Oki T. 2008. Investigating the roles of climate seasonality and landscape characteristics on mean annual and monthly water balances. *Journal of Hydrology*. 357(3-4): 255-269.
- Zomer RJ, Trabucco A, Wang M, Lang R, Chen H, Metzger MJ, Smajgl A, Beckschafer P, Xu J. 2014. Environmental stratification to model climate change impacts on biodiversity and rubber production in Xishuangbanna, Yunnan, China. *Biological Conservation*. 170: 264-273.