

RCP, SSP 기후변화 시나리오를 활용한 우리나라 미래 수종 분포 예측 연구

김찬우* · 김지원** · 홍민아*** · 송철호*** · 이우균****†

*고려대학교 환경생태공학과 석사과정학생, **고려대학교 오정리질리언스연구원 박사후 연구원,

고려대학교 오정리질리언스연구원 연구교수, *고려대학교 환경생태공학부 교수

Prediction of the Future Distribution of Tree Species Based on the Representative Concentration Pathways (RCP) and Shared Socioeconomic Pathways (SSP) Climate Change Scenarios in Korea

Kim, Chanwoo* · Kim, Jiwon** · Hong, Mina*** · Song, Cholho*** and Lee, Woo-Kyun****†

*M.S. Student, Department of Environment Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

**Postdoctoral Researcher, Ojeong Resilience Institute (OJERI), Korea University, Seoul, Korea

***Research professor, Ojeong Resilience Institute (OJERI), Korea University, Seoul, Korea

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

ABSTRACT

The seriousness of climate change is being discussed in various fields, including the importance of efficient afforestation and forest management as a major carbon absorption sink to help achieve the 2050 carbon neutral aim. The scheme of climate change data has been changed from Representative Concentration Pathways (RCP) to Shared Socioeconomic Pathways (SSP) to reflect socioeconomic land use. The SSP can be used to predict the distribution of future tree species when used with the existing Hydrological and Thermal Analogy Groups (HyTAG) model. Therefore, this study predicted potential distribution changes by tree species using RCP and SSP scenario data and compared the trends of the two scenarios to actual climate change data. For the analysis, climatic indices were constructed by period and used in the HyTAG model to predict potential distribution of tree species. Growth of needleleaf and broadleaf trees was confirmed only in the vicinity of the alpine region of Gangwon-do, with decreasing proportions of 81% (RCP 8.5) and 97% (SSP 5-8.5) in the RCP and SSP scenarios, respectively. In addition, the area of such trees decreased by 50% in the long-term (2051-2080) compared to the mid-term (2021-2050) and was nearly depleted in severe cases. Comparison of hydrological and thermal indices by climate change scenario confirmed that actual climate change was progressing faster than predicted in any climate change scenarios. These results show that forests, which are major carbon absorption sinks, are facing serious risks from rapid climate change and should be considered in decision-making on climate change adaptation measures and future afforestation strategies.

Key words: RCP, SSP, Climate Change, HyTAG, WI, PEI, MTCI

1. 서론

오늘날 인간사회는 기후변화의 심각한 영향과 그 속도를 환경 뿐 아니라 사회, 경제, 문화 등 다양한 분야에서 체감하고 있다(KEI, 2011; Oh et al., 2022). 이에 대한 대

응 방안으로 탄소흡수원인 산림의 관리와 확충의 중요성이 커지고 있으나, 기후변화가 동반하는 여러 기상현상의 변동성 증가와 지속적인 기온 상승으로 인해 산림 생태계의 피해도 증가하고 있는 실정이다(Lee, 2019). 특히, 우리나라의 기후변화 양상은 전세계의 평균 추세를 웃도는 수준으로 보고되고 있다. 지난 130여년간(1880~2012년)

†Corresponding author : leewk@korea.ac.kr (Room No. 319, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul, 02841, Korea. Tel. +82-2-3290-3470)

ORCID 김찬우 0000-0002-7578-3324
김지원 0000-0003-1856-4114
홍민아 0000-0001-9177-309X

송철호 0000-0002-8491-9545
이우균 0000-0002-2188-359X

전 세계 평균 기온은 약 0.85℃ 상승하였는데(IPCC, 2014), 우리나라는 지난 30년간(1971~2000) 겨울철 기온이 급격하게 상승함에 따라, 연 평균 기온이 1.2℃ 증가한 것으로 나타났다(Kim and Park, 2006; Lim, 2016; Cho et al., 2020). 기후변화로 인한 강수량의 변동성은 뚜렷하지 않고 지역에 따라 경향성이 상이하나, 전국적으로 여름철 강수량의 증가가 나타났다(KMA, 2020).

우리나라의 급격한 기후변화로 인해 취약수종 및 고유종 고사, 외래종 유입 등 산림 생태계의 피해가 증가하고 있다. Kim et al.(2022)은 2055년까지 국내 침엽수림이 전체 임상 중 38.1%에서 28.5%로 감소할 것으로 예측하였고, 실제로 1990년대 중반 이후 20년간의 침엽수림 면적은 약 25% 감소한 것으로 나타났다(Kim et al., 2019). 특히, 구상나무는 한반도에서만 서식하는 침엽수종으로 약 36년간 318ha가 감소하였으며(NIFoS, 2014), 리기다소나무림의 분포 가능 면적은 2000년에 비해 가까운 미래(2050년)에는 56% 감소하며, 먼 미래(2100년)에는 15%로 크게 감소할 것으로 예측된 바 있다(Kim et al., 2012). 반면 전체 임상의 약 18%에 해당하는 참나무류(KFS, 2013)의 분포 면적은 점점 증가하는 추세이다(Park and Moon et al., 1999; Kang et al., 2015).

수종분포의 변화는 임목 생산량, 산림 탄소 저장 및 흡수량 변화를 야기하고, 추정의 불확도를 높이는 원인이 되며, 이것은 탄소흡수원 관리에 직간접적으로 부정적인 영향을 미친다는 점에서(Doi and Yurlova, 2011) 기후변화에 따른 수종분포의 양상을 파악하고 예측할 필요가 있다. 실제로 멸종위기에 놓인 식물종이 늘어나는 추세에 있다는 점에서 기후변화와 산림생태계의 상관성 분석을

통해 부정적인 영향을 최소화하고 산림생태계를 관리하는 것은 매우 중요하다(IPCC, 2007; Olmos, 2001). 이러한 변화 추세를 지속적인 모니터링이 가능한 GIS 등의 공간분석기법을 활용하여 생태계의 시공간적인 변화를 효율적으로 분석하여(An, 2019), 기후변화로 인한 식생의 계절학적 변화(Park, 2013) 및 서식지 변화(Lee et al., 2003) 등 생태계 변화를 분석하는 연구도 수행되어 왔다.

그러나 최근 인간의 사회경제적 활동에 따른 온실가스 배출량의 변화를 반영한 Shared Socioeconomic Pathways (SSP) 시나리오가 제시됨에 따라(IPCC, 2021) 이를 반영하여 수종분포 변화를 예측해야 한다. 이와 더불어 수종의 성장에 영향을 미칠 수 있는 다양한 지수의 변화 양상을 파악하고 이를 실제 기상 관측자료와 비교분석함으로써, 기후변화의 실제 양상과 속도를 고려하는 연구를 수행해야 한다. 또한, RCP 시나리오와 SSP 시나리오 기반의 결과 비교를 통해 기존 RCP 기반의 다양한 수종분포 관련 연구의 활용성을 높여야 할 필요성도 존재한다. 즉, 국내 탄소흡수원 관리 및 조림 정책의 지원은 다양한 기후 시나리오 기반의 연구 결과 통해 이루어져야 한다.

따라서 본 연구에서는 과거 관측 기상자료와 임상도를 활용하여 수종별로 분포 가능한 기후조건을 도출하고, RCP 시나리오와 SSP 시나리오를 사용하여 기후지수를 산출하였다. 이후 수종별 기후지수 범위를 기반으로 수종별 미래 분포 가능 지역을 예측하였다. 또한, 시나리오별 기후지수와 실제 관측 기상자료를 통해 구축한 기후지수의 비교를 통해 기후변화 시나리오와 실제 기후변화 양상을 분석함으로써 산림관리 정책을 지원하고자 하였다.

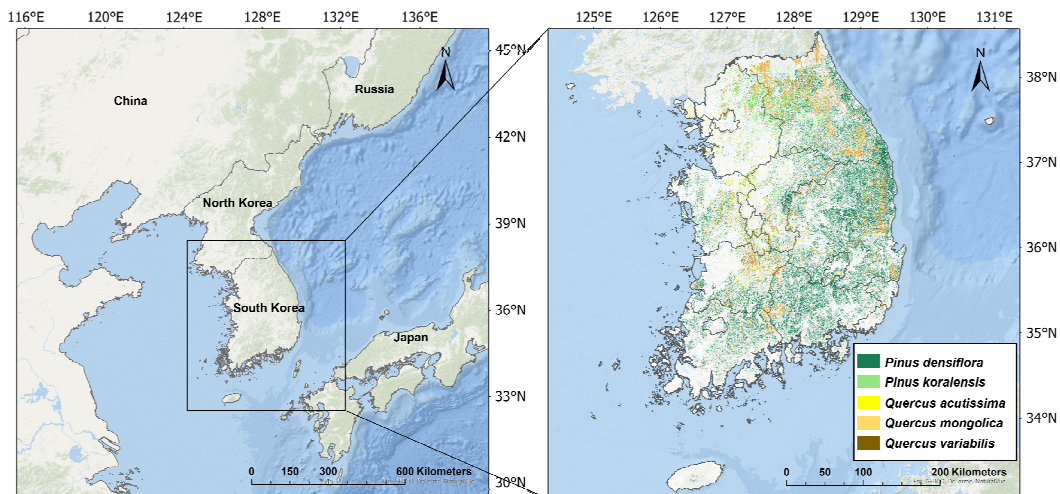


Fig. 1. Study area and used forest type map (Korea Forest Service, 2019)

2. 연구 재료 및 방법

2.1. 연구 대상지 및 범위

본 연구는 남한상세 RCP, SSP 기후변화 시나리오와 공간적 범위가 동일한, 경도 124° 54' ~ 131° 6', 위도 33° 9' ~ 38° 35'의 공간 범위를 대상으로 수행하였다(Fig. 1). 시간적 범위는 기후 변동성을 고려하여 중기(2021~2050), 장기(2051~2080)로 구분하여 예측하였다.

2.2. 연구 재료

2.2.1. 대상 수종 분포 자료

본 연구에서는 우리나라 대표 수종이며 분포 면적이 가장 넓은 소나무, 소나무 과의 잣나무, 활엽수종이며 탄소 흡수 능력이 뛰어난 상수리나무, 신갈나무, 굴참나무를 연구 대상 수종으로 선정하였다(Son et al., 2007; Han et al., 2010; Kim et al., 2014). 수종별 현존 식생 분포 공간자료는 산림청에서 제공하는 5차 임상도를 기반으로 제작된 1:5000 축척의 임상도에서 수종별로 추출하여 사용하였다(Table 1).

Table 1. Area of each tree species (km²)

Species	Size
<i>Pinus densiflora</i>	12,822
<i>Pinus koraiensis</i>	1,584
<i>Quercus acutissima</i>	1,000
<i>Quercus mongolica</i>	2,604
<i>Quercus variabilis</i>	1,448

2.2.2. 기후 자료

본 연구에서는 기후변화에 따른 미래 수종별 잠재 분포 변화를 예측하기 위해 과거 관측기상과 미래 기후변화 시나리오의 월 평균 기온과 월 누적 강수량 자료를 입력자료로 사용하였다(Choi et al., 2011). 먼저, 과거 관측 기상자료는 기상청에서 제공하는 1971년부터 2000년까지의 자료를 활용하였다. 과거 관측 기상자료는 Excel 형태의 자료로 제공되고 있으며, 관측지점의 속성정보, 기상 값, 경위도 등의 정보가 포함되어 있다. 본 연구에서 활용하기 위해 ArcMap 프로그램을 통해 값을 보정한 후 1 km² 해상도의 공간자료로 구축하여 사용하였다. 예측 시기는 기상청에서 1

km² 해상도의 공간자료로 제공되고 있는 HadGEM3-RA 지역기후모형을 통해 제작된 RCP (2021~2080) 시나리오와 5ENSMN 앙상블 모델을 통해 제작된 SSP (2021~2080) 시나리오를 사용하였다(KMA, 2022).

두 시나리오 중 본 연구에서는 다수의 선행 연구(Koo et al., 2016; Yoo et al., 2020; Lee et al., 2021; Hong et al., 2022)에서 활용되고 있는 RCP 4.5, RCP 8.5 시나리오와 SSP 시나리오 중 1 km²의 해상도로 제공하는 SSP 1-2.6, SSP 5-8.5 시나리오를 활용하였으며, 과거 관측기상과 RCP, SSP 시나리오의 월 평균 기온, 월 누적 강수량을 사용하여 각각의 온량지수, 유효강우지수, 최저온도지수로 구축하였다.

2.3. 연구 방법

2.3.1. HyTAG 모형을 통한 미래 수종 잠재분포 예측

본 연구에서는 한국형 산림생태계 분포 모형인 Hydrological and Thermal Analogy Groups (HyTAG) 모형을 활용하여 기후변화 시나리오에 따른 소나무, 잣나무, 신갈나무, 굴참나무, 상수리나무의 미래 잠재 분포 변화를 예측하였다. 본 모형은 한국의 기후와 산림생태계 특성을 잘 반영한 모형으로, 우리나라 수종 분포 예측 정확도가 비교적 높으며 국내 적용성을 인정받은 모형이다(Choi et al., 2011; Yoo et al., 2020).

HyTAG 모형은 수종 분포에 가장 큰 영향을 미치는 기상 인자를 활용하여 미래 잠재 수종 분포를 예측하는 모형이다. 또한, 입력자료인 임상도와 기후 자료를 통해 구축한 온량지수, 유효강우지수, 최저온도지수의 공간 정보를 수종별 분포 가능한 기후 조건으로 정의하고, 이 기후 조건이 미래 기후변화 시나리오에 따라 부합하는 지역을 공간적으로 예측하는 모형이다(Jeong et al., 2013; Yoo et al., 2020).

먼저, 수종별 분포 가능한 기후 조건을 도출하기 위해 임상도에서 연구 대상 수종을 추출하고, 수종별 현존 식생 분포 공간자료 범위에 맞게 과거(1971~2000) 기상 공간자료를 기후지수로 구축한다. 이후 과거 기후지수와 수종별 현존 식생 분포 공간자료를 결합하여 수종별 온량지수, 유효강우지수, 최저온도지수에 대한 분포 기후 조건을 도출하였다. 도출한 수종별 기후지수 분포 범위에 확률밀도함수를 적용하여 정규분포곡선을 도출하고, 누적분포함수를 이용하여 극소값인 하위 11.5%, 극한값인 상위 11.5%를 제외한 중앙값 77% 이내에 위치한 값들을 수종별 분포 가능한 기후 조건으로 정의하였다(Choi et al., 2011; Yoo et al., 2020).

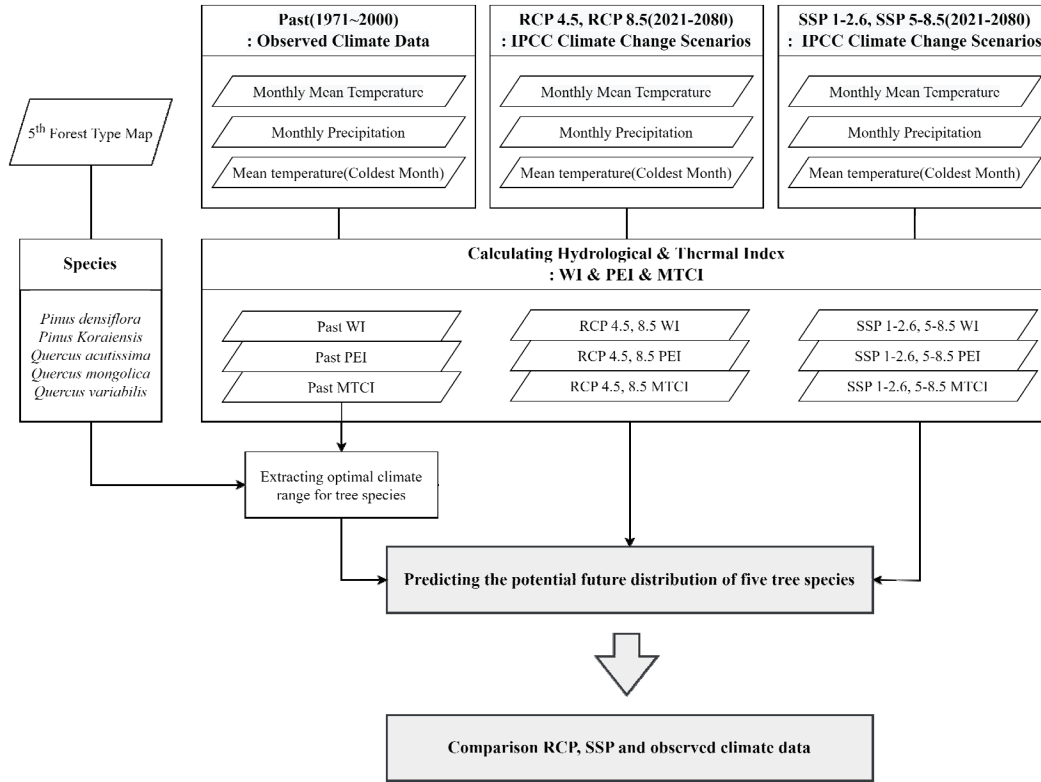


Fig. 2. Flow chart of the HyTAG model

본 연구에서는, 1:5000 축적의 임상도와 과거(1971~2000) 기상 공간 자료를 활용하여 수종별 분포 가능한 기후 조건을 도출하였다. 이때, 환경적인 측면에서 우리나라는 1973년 치산녹화계획을 통해 속성수종 위주로 대부분 식재되었으며, 기후적인 측면에서는 과거 기후가 치산녹화 이후 임상의 구조와 분포를 나타내는데 용이하기 때문에 해당 기간 내 자료를 활용하였다(Bae, 2007). 이후, 위 과정에서 도출된 수종별 분포 가능한 기후 조건에 따라 RCP, SSP 기후변화 시나리오를 활용하여, 구축한 기후지수 범위와 부합하는 지역을 시공간적으로 분석하고, 부합하는 지역을 미래 우리나라 수종별 잠재 분포 변화 지역으로 예측하였다. HyTAG 모형과 지수별 설명은 다음과 같다(Fig. 2).

1) 온량지수(Warmth Index, WI)

온량지수는 식물 성장과 유효 열량 간의 관계를 바탕으로 개발되었으며, 우리나라 식생 분포를 설명하기 위해 사용되는 지수이다(Yim et al., 1977). 온량지수는 식물 성장에 필요한 최저 온도인 5°C 보다 높은 월 평균 기온의 합으로 WI를 구축할 수 있으며(Kira, 1945), 온량지수를 활용하

것은 우리나라의 식생 및 토양분포와 온량지수로 분류된 기후대의 범위가 일치하는 지역이 많으며, 이를 활용하여 국내 수종 분포 및 식생분포 등을 설명한 연구가 많이 진행되었기 때문이다(Yang, 2001; Yun et al., 2014). 이에 따라 본 연구에서는 수종 분포 예측을 위해 월 평균 기온을 활용하여 온량지수를 구축하였다(Eq. (1)).

$$WI = \sum_{Jan}^{Dec} (t - 5) \tag{Eq. (1)}$$

t: Monthly Mean Temperature, (t > 5°C)

2) 유효강우지수(Precipitation Effectiveness Index, PEI)

산림 식생 분포 예측을 위해서는 수분 인자 측면에서의 연관성을 고려해야 하므로, 본 연구에서는 대표적인 수분 지수이며 식물 성장에 필요한 수분을 분석하는데 주요하게 작용하는 유효강우지수를 활용하였다(Thorthwaite, 1948). 이에 본 연구에서는 월 평균 기온과 월 누적 강수량을 활용하여 월별 강우증발산 비율인 PEratio를 구하고, 월별 PEratio

를 연별로 구축하여 유효강우지수를 도출하였다(Eq. (2)). 여기서, PEratio가 40보다 낮은 경우, 열대 우림 조건을 나타내므로 PEratio가 40보다 크면 모두 40으로 치환한다.

$$PEratio = 11.5 \times \left[\frac{P}{T-10} \right]^{\frac{10}{9}} \quad \text{Eq. (2)}$$

$$PEI = 10 \times \sum_{Jan}^{Dec} PEratio$$

P(inch): Monthly Precipitation
T(°F): Monthly Mean Temperature

3) 최저온도지수(Mean Temperature Index of the Coldest Month, MTCI)

최저온도지수는 식생의 내한성(cold resistance)을 나타내는 지수로, 식물이 추위에 견딜 수 있는 정도를 나타낸 지수이다. Neilson (1995)은 가장 추운 달의 평균 기온에 따라 산림 식생대의 구조가 달라질 것이라 보고하였으며,

Bachelet et al.(2001)은 최한월 평균 기온을 의미하는 지수인 MMT(Monthly mean temperature of the coldest month)를 동적식생모델(Dynamic Vegetation model)과 연계하여 최저온도지수로 활용한 바 있다. 이에 본 연구에서는 식생의 내한성을 분석하기 위해 최한월 평균 기온을 활용하여 최저온도지수를 구축하였다(Eq. (3)).

$$MTCI = \begin{cases} \frac{MTC - t_{mid}}{t_{hi} - t_{mid}} \times 100 & (MTC \geq t_{mid}) \\ \frac{t_{mid} - MTC}{t_{mid} - t_{low}} \times (-100) & (MTC < t_{mid}) \end{cases}$$

Eq. (3)

MTC: Monthly Mean Temperature of the Coldest Month
t_{hi}: 18°C
t_{mid}: 1.5°C
t_{low}: -15°C

Table 2. Optimal climate range of WI, PEI and MTCI for each tree species

Species	Optimal WI range	Optimal PEI range	Optimal MTCI range
<i>Pinus densiflora</i>	76.18 ~ 104.42	75.57 ~ 109.2	-43.7 ~ -9.58
<i>Pinus koraiensis</i>	70.53 ~ 97.34	80.335 ~ 110.12	-55.54 ~ -24.25
<i>Quercus acutissima</i>	87.11 ~ 103.1	80.71 ~ 100	-37.61 ~ -15.37
<i>Quercus mongolica</i>	61.87 ~ 93.36	79.74 ~ 121.21	-61.75 ~ -24.45
<i>Quercus variabilis</i>	73.28 ~ 98.92	76.98 ~ 109.68	-49.53 ~ -16.97

Table 3. Distribution of the WI, PEI and MTCI under RCP (4.5, 8.5), SSP (1-2.6, 5-8.5) scenario and observed climate (1971 ~ 2000)

	Yearly	WI	PEI	MTCI
Past	1971 ~ 2000	40.12 ~ 134.4	42.92 ~ 289.39	-98.16 ~ 32.94
RCP 4.5	Mid-term	42.36 ~ 154.4	55.17 ~ 423.92	-76.42 ~ 43.67
	Long-term	48.25 ~ 167.07	65.30 ~ 438.59	-69.79 ~ 48.02
RCP 8.5	Mid-term	44.4 ~ 156.3	58.31 ~ 420.75	-80.33 ~ 41.87
	Long-term	55.47 ~ 177.03	58.31 ~ 420.75	-66.1 ~ 53.17
SSP 1-2.6	Mid-term	46.64 ~ 159.29	53.71 ~ 644.08	-78.18 ~ 37.45
	Long-term	49.7 ~ 165.13	60.77 ~ 653.43	-77.33 ~ 39.31
SSP 5-8.5	Mid-term	48.77 ~ 164.06	52.54 ~ 651.69	-71.45 ~ 41.57
	Long-term	63.03 ~ 189.25	60.56 ~ 628.72	-58.92 ~ 53.69

3. 결과

3.1. 시나리오별 Hydrological and Thermal Index와 수종별 분포 가능한 기후 조건의 상관성 분석

본 연구에서는 수종별 분포 가능한 기후 조건에 따른 미래 수종의 분포 변화를 확인하기 위해 과거(1971~2000), 중기(2021~2050), 장기(2051~2080)의 온량지수, 유효강우지수, 최저온도지수를 구축하였다. 먼저 1990년대 과거

기후지수를 활용하여 수종별 분포 가능한 기후 조건을 도출하였으며(Table 2), RCP, SSP 기후변화 시나리오를 활용하여 시나리오별 WI, PEI, MTCI를 구축하였다(Table 3).

하지만, 수종별 분포 가능한 기후 조건과 미래 기후지수의 범위는 시나리오별로 미래로 갈수록 지수의 평균값이 상승하면서 공간적, 수치적으로 부합하지 않는 것이 확인되었다. 또한 Box plot에서 중앙값은 전체 값의 50%로, 평균값을 의미하는데, PEI는 평균값에 큰 변화가 나타

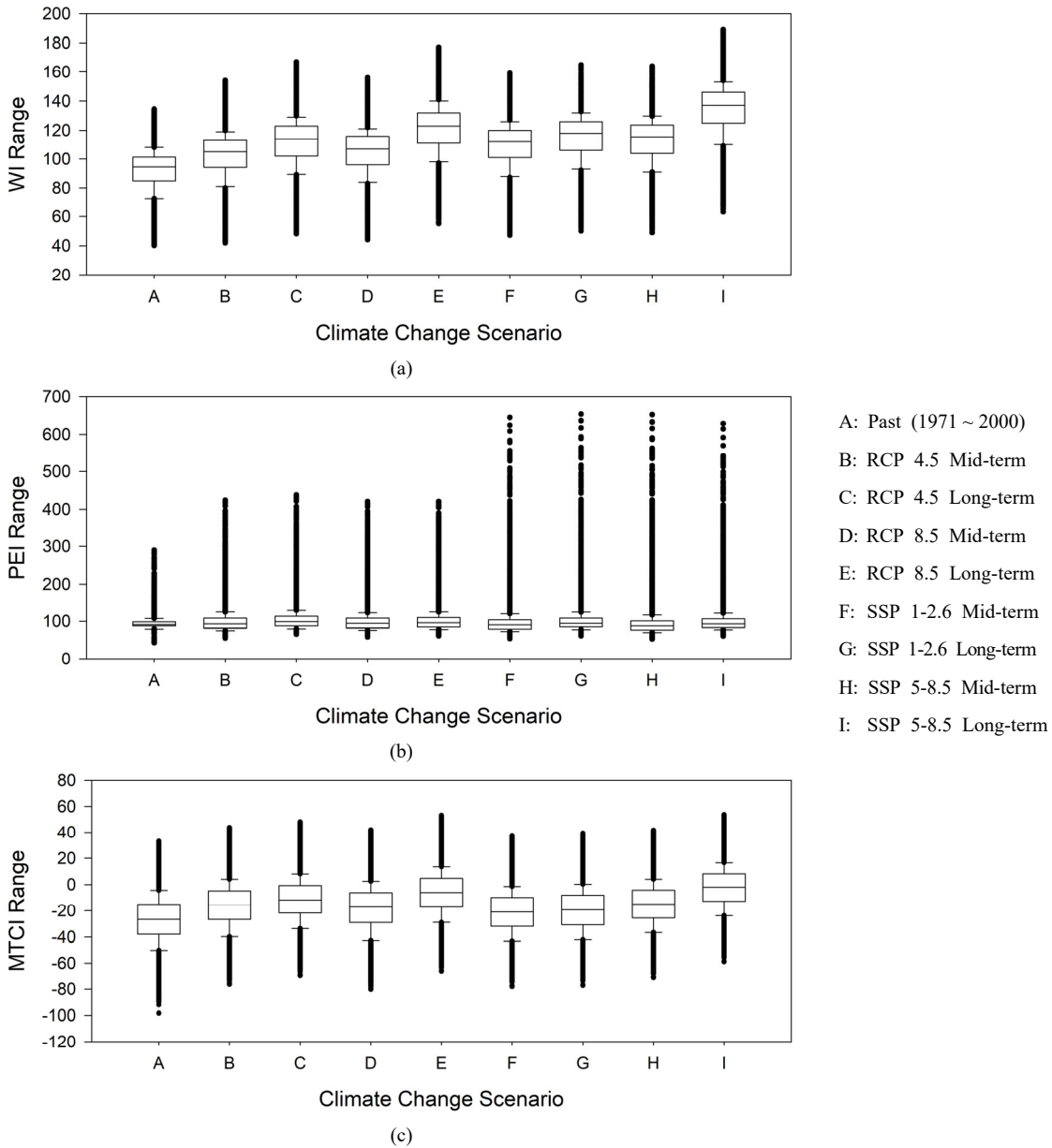


Fig. 3. Box plot of WI, PEI and MTCI by Climate Change Scenario

나지 않으며, 극단값만 증가하였다. 이는 일별, 지역별, 계절별 강수량의 편차가 커(Lee et al., 2014) 극값의 편차가 갈수록 커지는 사실을 확인할 수 있었으며, 기온만을 활용하는 WI와 MTCI와는 다른 경향이 나타난 것으로 확인되었다. WI와 MTCI는 기후의 변동성이 큰 시나리오일수록 장기적으로 극단값, 평균값 모두 전반적으로 증가하는 경향이 나타났으며, 미래로 갈수록 수종별 분포 가능한 기후 조건과 부합하지 않는 것이 확인되었다(Fig. 3).

이는 미래로, 기후변화가 극심한 시나리오로 갈수록 기온이 지속적으로 상승하는 경향이 원인으로 나타났다(Oh et al., 2022). 시나리오별 WI의 범위는 미래로 갈수록 평균값이 증가하면서 SSP 5-8.5 Long-term에는 평균값이 120~140으로 나타났으며, 수종별 WI의 범위는 최소 61.87에서 최대 104.42로 값의 편차가 큰 것이 확인되었다. 시나리오별 MTCI의 범위 또한 평균값이 증가하면서 SSP 5-8.5 Long-term에는 평균값이 -20~10으로 나타났으며, 수종별 MTCI의 범위는 최소 -61.75에서 최대 -9.58로 최솟값, 최댓값에서 큰 차이가 나타났다. 하지만 시나리오별 PEI의 범위는 평균값이 전반적으로 90~120으로 나타났으며, 수종별 PEI의 범위와 크게 차이가 나지 않는 것으로 확인되었다. 이와 같이 과거 기후지수를 활용하여 도출한 수종별 분포 가능한 기후 조건과 미래 기후지수인 범위의 평균값 차이가 수종별 분포 변화에 영향을 미친 것으로 추정되며, 이에 따라 본 연구의 결과가 도출되었다.

RCP 시나리오에서 WI는 남부지방인 제주도, 전라도, 경상도 지역에서 높은 경향이 확인됐으며 제주도에서 177로 가장 높게 나타났다. MTCI는 남부 지방과 동해와 인접한 부근에서 높은 값이 확인되었으며, 제주도에서 53.17로 가장 높게 나타났다. 수분 지수인 PEI는 고도가 높아 기온이 낮은 강원도 산지 부근과 지리산, 한라산 부근에서 높은 값이 확인되었으며, 한라산 부근에서 438.59로 가장 높게 나타났다.

SSP 시나리오에서 WI는 강원도를 제외한 대부분의 지역에서 전반적으로 높은 경향이 나타났으며, 특히 연평균 기온이 높은 열대지방과 제일 근접한 제주도 하부에서 189.25로 가장 높은 값이 확인되었다. MTCI는 RCP 시나리오와 비슷한 양상이 나타났으며, 높은 지수값의 공간분포가 RCP 시나리오 보다 전반적으로 북상하는 모습이 확인되었다. PEI 또한 RCP 시나리오와 비슷한 양상이 나타나며, 한라산 부근에서 653.43으로 가장 높게 나타났다.

전반적으로 기온과 관련된 WI와 MTCI는 기후변화의

변동성이 크고 장기적으로 갈수록 기온이 크게 상승함에 따라 높은 수치가 북상하는 양상을 나타냈으며, 강우지수인 PEI는 특정 지역에 집중적으로 높은 지수값의 분포가 확인되었다(Fig. 4).

3.2. 기후변화 시나리오에 따른 수종별 미래 잠재 분포 변화

RCP 4.5 시나리오에서 침엽수인 소나무와 잣나무의 잠재 분포 면적은 중기(2021~2050)에서 장기(2051~2080)로 넘어가면서 59%, 73%의 면적이 감소하였으며, 활엽수인 상수리나무, 신갈나무, 굴참나무는 65%, 61%, 69%의 면적이 감소하였다. 온실가스 저감 정책이 상당히 실현된 RCP 4.5 시나리오에서도 기후변화로 인해 전반적으로 절반 이상의 수종별 잠재 분포의 면적이 감소하는 것을 확인할 수 있다(Table 4).

RCP 8.5 시나리오에서 소나무와 잣나무의 잠재 분포 면적은 중기(2021~2050)에서 장기(2051~2080)로 넘어가면서 76%, 86%의 면적이 감소하였으며, 상수리나무, 신갈나무, 굴참나무는 82%, 81%, 83%의 면적이 감소하였다. 현 기후 상황과 가장 유사한 RCP 8.5 시나리오와 같이 현재 추세와 동일하게 온실가스 배출이 진행된다면, 전반적으로 약 80%의 감소율이 나타나는 것으로 확인되었다(Fig. 5).

SSP 1-2.6 시나리오에서 소나무와 잣나무의 잠재 분포 면적은 중기(2021~2050)에서 장기(2051~2080)로 넘어가면서 51%, 55% 감소하였으며, 상수리나무, 신갈나무, 굴참나무는 56%, 46%, 51%의 면적이 감소하였다. SSP 1-2.6 시나리오에서는 평균 감소율이 50% 정도로, RCP 4.5, RCP 8.5 시나리오보다 낮은 감소율이 확인되었다. 하지만 중기(2021~2050)에는 RCP 시나리오보다 미래 잠재 분포 면적이 더 많이 감소한 것을 확인할 수 있으며, 장기(2051~2080)가 되어서야 감소율이 낮아진 것을 확인할 수 있다.

SSP 5-8.5 시나리오에서 소나무와 잣나무의 분포 면적은 중기(2021~2050)에서 장기(2051~2080)로 넘어가면서 94%, 99%의 면적이 감소하였으며, 상수리나무, 신갈나무, 굴참나무의 면적 감소 비율은 99%, 97%, 98%로 매우 높은 감소율이 나타났다. 이러한 결과는 SSP 5-8.5 시나리오를 통해 도출한 기후지수와 수종별 분포 적합한 기후 조건이 일치하는 지역이 거의 없는 것을 의미한다. 이에 따라 SSP 5-8.5 시나리오 장기(2051~2080)에는 수종별 분포 적합지가 급격하게 줄어들 것으로 보여진다(Fig. 6).

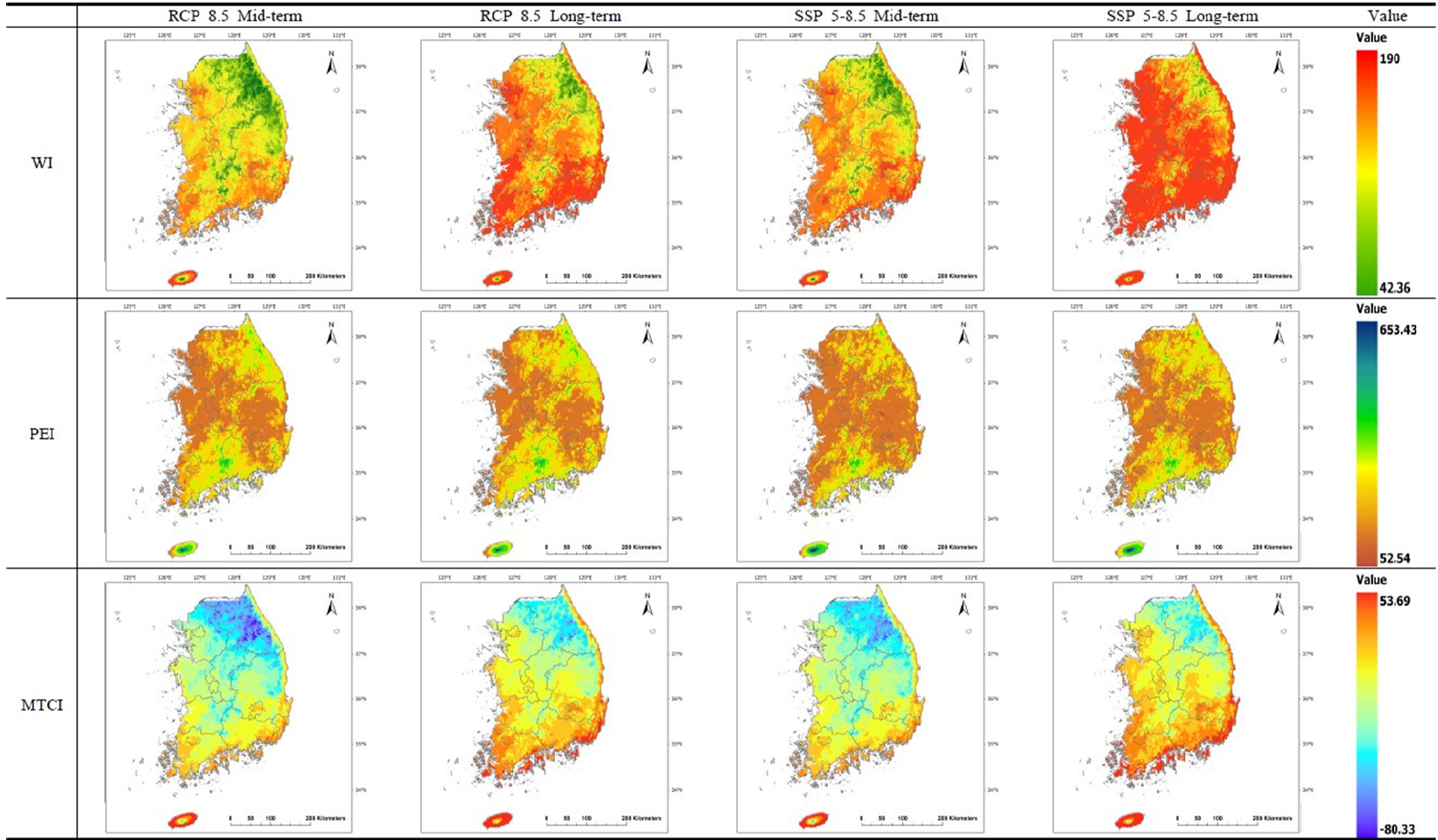


Fig. 4. Distribution of the WI, PEI and MTCI in South Korea for the Mid-term, Long-term under RCP 8.5, SSP 5-8.5 scenario

Table 4. Area (km²) of the distribution changes for each tree species under climate change scenario

Yearly	RCP 4.5		RCP 8.5		SSP 1-2.6		SSP 5-8.5	
	Mid-term	Long-term	Mid-term	Long-term	Mid-term	Long-term	Mid-term	Long-term
<i>Pinus densiflora</i>	25,880	10,764	20,401	4,965	14,126	7,140	14,638	834
Reduction ratio	59%		76%		51%		94%	
<i>Pinus koraiensis</i>	13,561	3,681	11,505	1,577	10,317	4,684	8,861	78
Reduction ratio	73%		86%		55%		99%	
<i>Quercus acutissima</i>	11,159	3,909	8,626	1,572	4,966	2,174	5,858	13
Reduction ratio	65%		82%		56%		99%	
<i>Quercus mongolica</i>	13,815	5,405	12,620	2,379	10,633	5,755	8,799	241
Reduction ratio	61%		81%		46%		97%	
<i>Quercus variabilis</i>	18,511	5,850	14,075	2,329	10,584	5,157	10,376	158
Reduction ratio	69%		83%		51%		98%	

전반적으로 수종별 분포 변화는 RCP 4.5, 8.5, SSP 1-2.6, 5-8.5 시나리오 모두 장기(2051~2080)로 넘어가면서 강원도 고산지대 부근에서만 분포가 적합한 것으로 나타나거나, 분포 적합지가 저위도 지방에서 고위도 지방으로, 저지대에서 고지대로 이동할 것으로 예측되었으며, 크게는 분포 적합지가 대부분 사라지는 것으로 확인되었다.

3.3 관측기상, RCP, SSP 시나리오 비교

본 연구에서는 RCP, SSP 시나리오를 통해 예측한 2021년 기상과 2021년 관측 기상 공간자료의 비교를 통해 실제 기후변화 양상을 파악해보고자 하였다.

먼저, 2021년 관측 기상 공간자료를 활용하여 도출한 WI는 RCP, SSP 시나리오 보다 극소값, 극단값 모두 전반적으로 높게 나타났다. PEI는 RCP 시나리오 보다 높은 극단값이 나타났으나 SSP 시나리오보다는 낮게 나타났으며, MTCI는 RCP 8.5 시나리오를 제외한 모든 시나리오 보다 극단값이 높게 나타났다(Table 5). 온실가스 배출량과 인간의 사회경제적 활동을 반영하여 예측한 RCP, SSP 기후변화 시나리오 보다 관측기상을 통해 구축한 기후지수의 값이 전반적으로 높게 나타나거나 비슷한 수준으로 확인되었다. 여기서, 관측기상을 통해 구축한 WI, MTCI가 시나리오 기후 지수값 보다 높게 나타난 것은 급격한 기후변화에 따른 기온 상승이 원인으로 판단되며, 이는 기후변화 시나리오로 예측한 2021년 보다 실제 기후변화의 속도가 빠르게 진행되며, 급격한 온난화가 진행되고 있음을 의미한다. 하지만, PEI는 강수의 변동성이 크며, 강수 강도가

점차 증가하는 추세가 나타나면서, SSP 시나리오 기후지수의 극단값이 더 높게 나타난 것으로 판단된다.

4. 고찰

본 연구에서는 RCP, SSP 기후변화 시나리오에 따른 미래 우리나라 수종별 잠재 분포 변화를 시공간적으로 예측하기 위해 HyTAG 모형을 활용하여 수종별 WI, PEI, MTCI의 분포 가능한 기후 조건을 도출하고, 이에 따른 수종별 잠재 분포 변화를 예측하였다. 수종 분포의 최적 기후 범위를 도출하기 위해 활용한 기후지수 중 PEI는 온실가스 배출량이 증가하는 시나리오로 갈수록 극단값은 증가하나 평균값의 증가와 변화 경향은 미미하게 나타났다. 이러한 결과는 강수량이 증가하고 집중적인 강한 강수가 잦아짐에 따라 극단값이 증가한 것으로 파악되며, 이는 강수량의 추세가 뚜렷하지 않으며, 변동성이 큰 것이 원인으로 판단된다. 하지만, 기온과 관련된 WI와 MTCI는 미래로 갈수록 기온이 증가함에 따라 평균값과 극단값이 함께 증가하였다. 이러한 기후지수의 변화 양상은, 기후변화 시나리오에서 예측된 바와 같이 기온 상승으로 인한 연 평균 기온의 상승과 집중호우로 인한 강수 강도의 증가가 원인으로 판단된다(Sung et al., 2012). 따라서, 지역 간의 편차가 점점 커지고, 단기간에 집중적인 태풍, 폭염, 폭우 등이 빈번하게 발생할 것이라 예측되고 있으며, 이는 산림생태계에 있어 지속적이고 극단적인 교란을 야기할 수 있다(Moon et al., 2020).

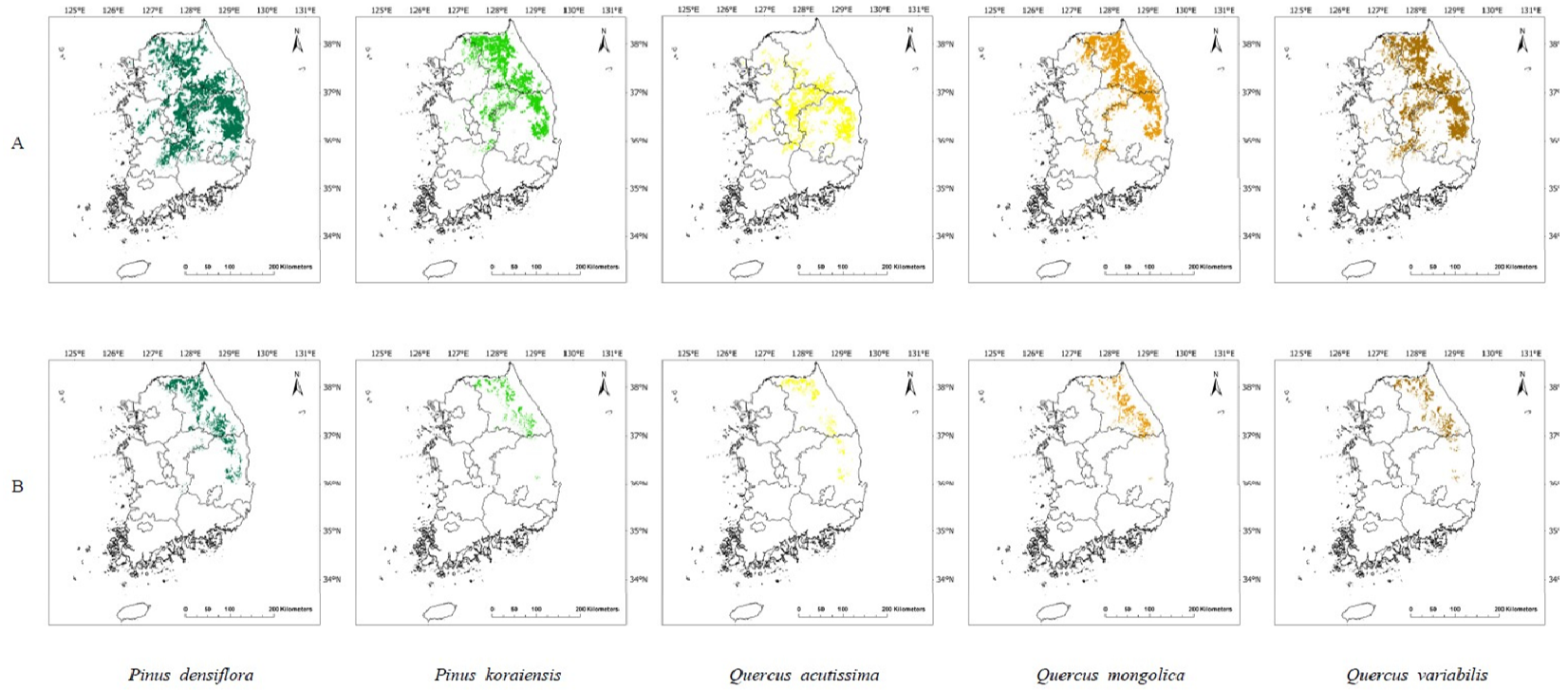


Fig. 5. Potential distribution of each tree species using HyTAG model under RCP 8.5 scenario (A: Mid-term, B: Long-term)

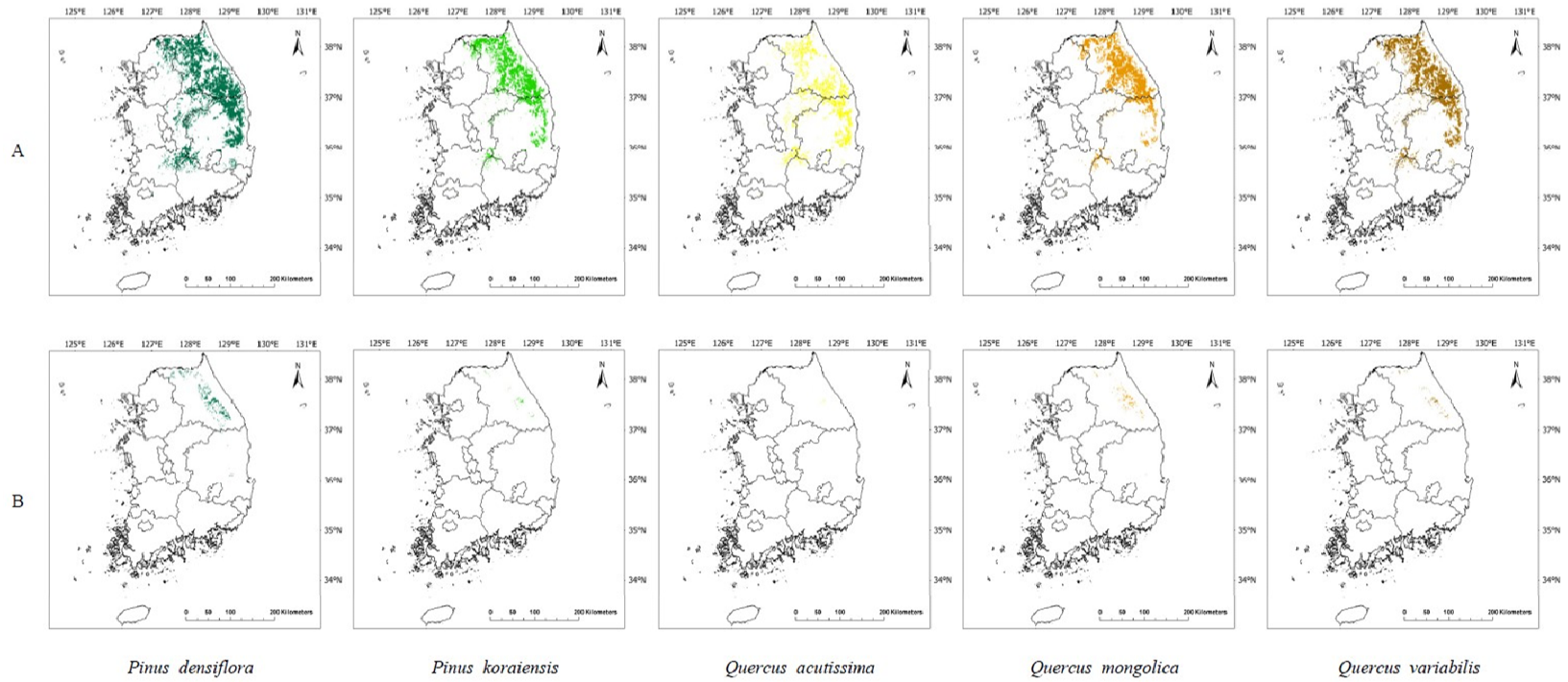


Fig. 6. Potential distribution of each tree species using HyTAG model under SSP 5-8.5 scenario (A: Mid-term, B: Long-term)

Table 5. Distribution of the WI, PEI and MTCI under RCP, SSP scenario and observed climate in 2021

Climate data source	Year	WI	PEI	MTCI
Observed Climate	2021	46.31 ~ 162.46	42.64 ~ 430.63	-90.31 ~ 43.49
RCP 4.5		36.7 ~ 144.6	46.89 ~ 395.26	-100.6 ~ 29.09
RCP 8.5		37.23 ~ 149.63	40.61 ~ 373.88	-66.61 ~ 47.02
SSP 1-2.6		48 ~ 157.8	52.5 ~ 685.16	-83.63 ~ 30.3
SSP 5-8.5		43.3 ~ 148.9	58.16 ~ 672.83	-80 ~ 30.3

기존 연구들에서는 기후변화에 따른 산림 내 수종 분포를 현존식생도와 분포 변화의 비교를 통해 예측 및 검증되었다(Choi et al., 2011; Yoo et al., 2020). 이에 본 연구에서는 검증된 HyTAG 모형을 활용하여 수종 분포 변화를 야기하는 기후변화의 경향을 파악하였다. 기후지수 분석을 통해 예측한 수종별 잠재 분포 변화의 면적은 점점 쇠퇴하는 것으로 나타났는데, 이는 온난화에 따른 WI와 MTCI의 증가와 지역적으로 집중적인 강수로 인해 수종의 분포지가 축소된 것으로 판단된다. 또한, 겨울의 기온이 상승하면서 수분 스트레스와 함께 식물 생장에 악영향을 끼친 것으로 확인된다(Sevanto et al., 2006). 이에 본 연구 결과는 기온 상승에 따른 WI, MTCI의 분포 변화와 집중적인 강수가 소나무, 잣나무, 상수리나무, 신갈나무, 굴참나무의 잠재 분포 변화에 영향을 미친 것으로 확인되었다.

일반적으로 활엽수는 침엽수 보다 기온이 더 높고 햇빛이 강한 환경에서도 분포가 가능한 것으로 알려져 있으나, 기후변화에 따라 기온이 상승함에도 불구하고, 본 연구 결과에서는 활엽수인 상수리나무, 신갈나무, 굴참나무의 분포 변화 면적이 침엽수인 소나무, 잣나무 보다 낮거나 비슷한 수준으로 나타났다. 이러한 결과는 과거 기후대와 임상도를 통해 수종별 분포 가능한 기후 조건을 도출하는 부분에서, 현 임상도 내 수종의 공간 분포 정보를 기반으로 기후 범위가 도출되었기 때문인 것으로 사료된다. 침엽수인 소나무는 전국적으로 고르게 분포되어 있고, 기온이 높은 남부지방에서도 분포하여 비교적 높고 다양한 기후대의 정보를 고려할 수 있었으나, 침엽수인 잣나무와 탄소흡수량이 높으며 대표적인 활엽수인 상수리나무, 신갈나무, 굴참나무는 일부 지역에 집중 조림되어, 현존하는 분포 범위가 소나무에 비해 한정적이므로 정확한 기후 범위를 도출하는 것에 한계가 존재하였다(Kim et al., 2012; Yoo et al., 2020). 본 모형은 기후 인자만을 고려하여 수종 분포 변화를 예측함으로써, 수종별 분포 가

능한 기후 조건이 적합하다 할지라도 토양, 생태계 서비스, 수종이 지닌 환경 적응력 등의 조건을 고려하지 못한 한계점이 존재하였다. 또한, 과거(1971 ~ 2000년) 기후자료와 2009년 이후 제작된 1:5000 임상도를 사용하여 수종별 분포 가능한 기후 조건을 도출함에 시기적 차이의 한계가 존재하였으며, 나아가 환경적인 영향을 반영할 수 있는 토양지수와 고도 등 수종의 분포에 영향을 미치는 인자들과 보다 정확한 수종별 분포 가능 기후 조건을 고려한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

본 연구에서 활용한 시나리오 중 기후변화가 가장 완화된 SSP 1-2.6 시나리오에서 인간의 노력으로 온실가스 배출량이 줄어든다 할지라도 가까운 미래인 중기(2021 ~ 2050)의 기후 상황은 급격하게 바뀌지 않으며, Table 4와 같이 RCP 시나리오의 중기(2021 ~ 2050) 보다 수종 분포 면적 감소 비율이 더 높게 나타났다. 이후 사회경제적인 활동을 통해 장기(2051 ~ 2080)에 RCP 시나리오 보다 낮은 감소율이 나타났으며, 이러한 결과는 기후변화 대응 및 온실가스 감축을 위한 인간의 꾸준한 노력이 필요함을 시사한다.

마지막으로, 기존 선행 연구들은 RCP 기후변화 시나리오만을 활용하여 미래 기후변화의 경향을 예측하였으나, 본 연구는 실질적인 기후변화의 경향을 파악하기 위하여 미래 기후를 예측한 RCP, SSP 시나리오와 실제 관측기상 자료를 활용하여 변화 양상을 비교함에 의의가 있다. 또한, 급격한 기후변화에 따라 기후변화 시나리오를 고려한 산림 및 기후변화 정책, 탄소흡수원 관리의 필요성이 언급되고 있으나, 본 연구의 결과와 같이 현재 기후변화의 속도는 심각한 수준의 기후변화 시나리오보다 빠르거나 비슷한 수준임을 시사한다.

이에, 미래 탄소흡수원 관리와 기후변화 적응을 위해서는 급속도로 변하는 실제 기후변화 양상을 반영한 시나리오 예측이 필수적이므로, 현 기후변화 시나리오의 고도화

가 필요한 것으로 사료된다. 이러한 결과를 기반으로 미래 산림정책은 기후추세를 고려하여 기후변화 취약 수종, 멸종위기종을 보호하며, 기후변화 적응 수종 식재를 도모하여 적응 능력을 증진하는 전략이 필요하다. 이는 탄소중립 달성을 포함할 뿐만 아니라 지속가능한 산림관리와 연계된다. 따라서 본 연구의 결과는 중·장기적인 산림정책에 과학적 기반을 마련하고 기후변화 추세에 따른 조림 적합 수종을 제시할 수 있다.

5. 결론

기후변화로 인한 기온 및 강수량의 증가는 산림생태계에 많은 영향을 미칠 것으로 예상된다. 이에 따라, 본 연구에서는 기후변화에 따른 탄소흡수원 관리와 기후변화 대응 정책 지원을 위해 HyTAG 모형을 활용하여 탄소흡수원으로써 비중이 큰 산림 내 소나무, 잣나무, 상수리나무, 신갈나무, 굴참나무를 시공간적으로 미래 잠재 분포 변화를 예측하였다. 기후변화 시나리오를 통해 도출한 기후지수 중 온량지수와 최저온도지수의 평균값은 극심한 시나리오로 갈수록, 미래로 갈수록 기온 상승에 따라 증가하였으며, 유효강우지수는 지역적으로 집중적인 강한 강수가 잦아지고 강수량도 증가함에 따라 극단값이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 전국적인 기온 상승과 지역별 집중호우 현상의 원인으로 나타나며, 수종의 분포지 축소로 이어졌다. 수종 분포 예측 결과, 공간적으로 수종별 분포 적합지는 시나리오 모두 전반적으로 태백산맥을 따라 기온이 낮은 강원도 고산지대 부근이 분포가 적합한 것으로 나타났으며, 이에 따라 전반적으로 잠재 분포 적합 면적이 줄어드는 것이 확인되었다. 또한, 기후변화에 따른 수종 분포 변화를 예측하기 위해 실제 기후변화 양상과 RCP, SSP 기후변화 시나리오를 비교하여 현 기후 상황을 분석해보았다. 분석 결과, 현 기후 상황이 반영된 관측기상을 통해 도출한 기후지수값이 시나리오 보다 높게 나타났으며, 이는 현 기후변화의 속도가 시나리오 보다 더 빠르게 진행되고 있음을 나타낸다. 이러한 결과는 가속화 되어가고 있는 기후변화 대응을 위해 탄소흡수원 관리 및 충원을 위한 추가적인 연구와 적응 방안, 정책이 필요함을 시사한다.

본 연구에서는 현존 식생 분포와 기후 인자만을 고려하여 수종별 분포 가능 기후 조건과 수종별 미래 잠재 분포 변화를 예측하였으며, 기후변화에 따른 수종의 분포 변화 추세와 현 기후변화 양상을 파악할 수 있었다. 향후 비기

후 인자, 자연 생태계 등이 반영된 추가적인 연구를 통해 분포 변화 예측의 정확도를 향상시킬 필요가 있으며, 이러한 분석 결과는 산림 관리 및 조림 정책 수립을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

사사

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었으며(과제번호: 22UMRG-C158200-03), 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업의 연구 결과입니다(NRF-2021R1A6A1A10045235).

References

- An SM. 2019. A basic study for forest landscape fragmentation monitoring. *Journal of Korean Society of Forest Science* 108(3): 454-467. (in Korean with an English abstract).
- Bachelet D, Neilson RP, Lenihan JM, Drapek RJ. 2001. Climate change effects on vegetation distribution and carbon budget in the United States. *Ecosystems* 4(3): 164-185.
- Bae JS. 2007. Establishing process of the 1st 10-year national greening project: At the turning point between the management-oriented approach and administration-oriented approach. *Journal of Korean Society of Forest Science* 96(3): 269-282. (in Korean with an English abstract).
- Choi SH, Lee WK, Kwak DA, Lee SC, Son YH, 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.
- Cho NH, Kim ES, Lee BR, Lim JH, Kang SK. 2020. Predicting the potential distribution of *Pinus densiflora* and analyzing the relationship with environmental variable using MaxEnt model. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 22(2): 47-56. (in Korean with an English abstract).
- Doi H, Yurlova NI. 2011. Consequent effects of

- parasitism on population dynamics, food webs, and human health under climate change. *Ambio*, 40(3), 332-334.
- Han SJ, Kim HW, Kim HR, Kim HJ, Han DU, Park SK, You YH. 2010. Net primary production, annual accumulation of organic carbon and leaf decomposition in *Salix* plant community. *Journal of Korean Wetlands Society* 12(1): 15-22. (in Korean with an English abstract).
- Hong MA, Song CH, Kim MI, Kim JW, Lee SG, Lim CH, Cho KJ, Son YH, Lee WK. 2022. Application of integrated Korean forest growth dynamics model to meet NDC target by considering forest management scenarios and budget. *Carbon Balance and Management* 17(1): 1-18.
- IPCC, 2007. *Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability*.
- IPCC, 2014. *Climate change 2014: Synthesis report*.
- IPCC, 2021. *Summary for policymakers*. In: *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Jeong HY, Lee WK, Nam KJ, Kim MI. 2013. Estimating the change of potential forest distribution and carbon stock by climate changes - Focused on forest in Yongin-City -. *Journal of Climate Change Research* 4(2): 177-188. (in Korean with an English abstract).
- Kang JT, Son YM, Jeon JH, Yoo BO. 2015. Estimation of carbon stock by development of stem taper equation and carbon emission factors for *Quercus serrata*. *Journal of Climate Change Research* 6(4): 357-366. (in Korean with an English abstract).
- KEI (Korea Environment Institute). 2011. *Economic analysis of climate change in Korea* (In Korean).
- Kim ES, Jung BH, Bae JS, Lim JH. 2022. Future prospects of forest type change determined from national forest inventory time-series data. *Journal of Korean Society of Forest Science* 111(4): 461-472 (in Korean with an English abstract).
- Kim ES, Lee JS, Park GE, Lim JH. 2019. Change of subalpine coniferous forest area over the last 20 years. *Journal of Korean Society of Forest Science* 108(1): 10-20. (in Korean with an English abstract).
- Kim KT, Park JS. 2006. Correlation analysis of vegetation index and drought index. *Journal of Wetlands Research*, 8(1), 49-58 (in Korean with an English abstract).
- Kim YK, Lee WK, Kim YH, Oh SH, Heo JH. 2012. Changes in potential distribution of *Pinus rigida* caused by climate changes in Korea. *Journal of Korean Society of Forest Science* 101(3): 509-516 (in Korean with an English abstract).
- Kim YH, Jeon EJ, Shin MY, Chung IB, Lee ST, Seo KW, Pho JK. 2014. A study on the baseline carbon stock for major species in Korea for conducting carbon offset projects based on forest management. *Journal of Korean Society of Forest Science* 103(3): 439-445. (in Korean with an English abstract).
- Koo KA, Kim JU, Kong WS, Jung HC, Kim GH. 2016. Projecting the potential distribution of *Abies koreana* in Korea under the climate change based on RCP scenarios. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology* 19(6): 19-30 (in Korean with an English abstract).
- KFS (Korea Forest Service). 2013. *The 5th national forest inventory*.
- KFS (Korea Forest Service). 2019. *The forest type map, 1:5000*.
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2022. *Manual on the use of climate change scenario data*.
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2020. *Korean climate change assessment report 2020*.
- Kira T. 1945. *A new classification of climate in eastern Asia as the basis for agricultural geography [dissertation]*. University of Kyoto.
- Lee HJ. 2019. *Differences of net ecosystem production change between a *Pinus koraiensis* plantation and a deciduous broad-leaved forest over a four-year period after drought [dissertation]*. University of Seoul

- National.
- Lee MB, Kim NS, Choe HS, Shin KH. 2003. An analysis on spatio-temporal changes of land cover focusing on NDVI using GIS and RS in Pyeongbuk Province, Northwest Korea. *Journal of the Korean Geographical Society* 38(5): 835-848. (in Korean with an English abstract).
- Lee MK, Chun JH, Lee CB. 2021. Prediction of distribution changes of *Carpinus laxiflora* and *C. tschonoskii* based on climate change scenarios using MaxEnt model. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 23(1): 55-67 (in Korean with an English abstract).
- Lee SW, Choi GY, Kim BJ. 2014. Spatial and temporal characteristics of summer extreme precipitation events in the Republic of Korea, 2002~2011. *Journal of The Korean Association of Regional Geographers* 20(4): 393-408. (in Korean with an English abstract).
- Lim JH. 2016. Climate change-induced dieback of evergreen conifers in Korea and options for adaptation. In Seoul: Proceedings of 2016 International Climate Change Adaptation Symposium on Forest Management for Enhancing Resilience to Climate Change (pp. 53-76).
- Moon JG, Shim CS, Jung OJ, Hong JW, Han JY, Song YI. 2020. Characteristics in regional climate change over South Korea for regional climate policy measures: based on long-term observations. *Journal of Climate Change Research* 11(6-2): 755-770. (in Korean with an English abstract).
- Neilson RP. 1995. A model for predicting continental-scale vegetation distribution and water balance. *Ecological Applications* 5(2): 362-385.
- NIFoS (National Institute of Forest Science). 2014b. Long-term Ecological Research (LTER) on forest ecosystem responses to global environmental change. Seoul: NIFoS.
- Oh MJ, Kim JE, Lee BS, Kim TW. 2022. Hydro-meteorological characteristics in season and solar term according to RCP climate change scenarios. *Journal of Wetlands Research* 24(4): 288-300. (in Korean with an English abstract).
- Oh SB, Yun SJ, 2022. The mediating effect of affective response between climate crisis risk perception and responding behavioral intention. *Journal of Environmental Policy and Administration* 30(4): 53-97. (in Korean with an English abstract).
- Olmos S. 2001. Vulnerability and adaptation to climate change: concepts, issues, assessment methods. *Climate Change Knowledge Network (CCKN)*.
- Park IH, Moon GS. 1999. Species competition and productivity in a natural mixed forest of *Pinus densiflora* and *Quercus variabilis* at Mt. Mohu Area. *Journal of Korean Society of Forest Science* 88(4): 462-468. (in Korean with an English abstract).
- Park S. 2013. Satellite-measured vegetation phenology and atmospheric aerosol time series in the Korean peninsula. *Journal of the Korean Geographical Society* 48(4): 497-508. (in Korean with an English abstract).
- Sevanto S, Suni T, Pumpanen J, Grönholm T, Kolari P, Nikinmaa E, Hari P, Vesala T. 2006. Wintertime photosynthesis and water uptake in a boreal forest. *Tree Physiology* 26(6): 749-757.
- Son YM, Lee KH, Kim RH. 2007. Estimation of forest biomass in Korea. *Journal of Korean Society of Forest Science* 96(4): 477-482. (in Korean with an English abstract).
- Sung JH, Kim BS, Kang HS, Cho CH. 2012. Non-stationary frequency analysis for extreme precipitation based on representative concentration pathways (RCP) climate change scenarios. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 12(2): 231-244. (in Korean with an English abstract).
- Thornthwaite CW. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review* 38(1): 55-94.
- Yang KC. 2001. Classification of major habitats based on the climatic conditions and topographic features in Korea [dissertation]. University of Chung-Ang.
- Yim YJ. 1977. Distribution of forest vegetation and

climate in the Korean peninsula: IV. Zonal distribution of forest vegetation in relation to thermal climate. *Japanese Journal of Ecology* 27(4): 269-278.

Yoo SM, Lim CH, Kim MI, Song CH, Kim SJ, Lee WK. 2020. Potential distribution of endangered coniferous tree species under climate change. *Journal of Climate Change Research* 11(4): 215-226. (in Korean with an English abstract).

Yun JH, Nakao K, Kim JH, Kim SY, Park CH, Lee BY. 2014. Habitat prediction and impact assessment of *Neolitsea sericea* (Blume) Koidz. under climate change in Korea. *Journal of Environmental Impact Assessment* 23(2): 101-111. (in Korean with an English abstract).