

## RCPs 기후변화 시나리오에 따른 큰망초(*Conyza sumatrensis*)의 적합 서식지 분포 예측

김명현, 최순군, 조재필<sup>1</sup>, 김민경, 어진우, 엽소진, 방정환\*

국립농업과학원 기후변화평가과, <sup>1</sup>유역통합관리연구원

## Predicting the suitable habitat distribution of *Conyza sumatrensis* under RCP scenarios

Myung-Hyun Kim, Soon-Kun Choi, Jaepil Cho<sup>1</sup>, Min-Kyeong Kim, Jinu Eo, So-Jin Yeob and Jeong Hwan Bang\*

Climate Change Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju 55365, Republic of Korea

<sup>1</sup>Watershed Management Institute, Seoul 04540, Republic of Korea

### \*Corresponding author

Jeong Hwan Bang  
Tel. 063-238-2527  
E-mail. jhbang0909@korea.kr

Received: 2 September 2021

First Revised: 11 November 2021

Second Revised: 18 November 2021

Revision accepted: 22 February 2022

**Abstract:** Global warming has a major impact on the Earth's precipitation and temperature fluctuations, and significantly affects the habitats and biodiversity of many species. Although the number of alien plants newly introduced in South Korea has recently increased due to the increasing frequency of international exchanges and climate change, studies on how climate change affects the distribution of these alien plants are lacking. This study predicts changes in the distribution of suitable habitats according to RCPs climate change scenarios using the current distribution of the invasive alien plant *Conyza sumatrensis* and bioclimatic variables. *C. sumatrensis* has a limited distribution in the southern part of South Korea. Isothermality (bio03), the max temperature of the warmest month (bio05), and the mean temperature of the driest quarter (bio09) were found to influence the distribution of *C. sumatrensis*. In the future, the suitable habitat for *C. sumatrensis* is projected to increase under RCP 4.5 and RCP 8.5 climate change scenarios. Changes in the distribution of alien plants can have a significant impact on the survival of native plants and cause ecosystem disturbance. Therefore, studies on changing distribution of invasive species according to climate change scenarios can provide useful information required to plan conservation strategies and restoration plans for various ecosystems.

**Keywords:** climate change, *Conyza sumatrensis*, invasive plant, MaxEnt, RCPs

## 서 론

기후변화로 인한 환경 변화는 다양한 생물들의 서식지

와 생존을 위협하고 있다(IPCC 2018). 지구 온난화는 식물의 출현시기뿐만 아니라 개화나 개엽시기 그리고 휴면타파에 상당한 영향을 줄 수 있으며(Root *et al.* 2003;

Cleland *et al.* 2007; Miller-Rushing *et al.* 2008; Hegland *et al.* 2009), 기후변화로 인한 강수량 변화는 식물 군집과 종 풍부도에 상당한 영향을 줄 것이다(Hirabayashi *et al.* 2013; Garssen *et al.* 2015). 따라서 미래 기후변화는 많은 종의 서식지와 분포 변화를 초래하여 생물다양성 감소와 생태계 교란이 예상된다(Araújo and Rahbek 2006).

침입외래식물(Invasive alien plant)은 환경 변화에 빠르게 적응하여 번식률과 성장률을 높일 수 있으며 이러한 성공적인 침입 전략은 기후변화와 함께 외래종 확산을 촉진시킬 수 있다(Bradley *et al.* 2010a; Davidson *et al.* 2011). 선행 연구에서는 침입식물이 자생식물 군집에 악영향을 줄 수 있고 자생종의 다양성을 감소시킬 수 있다고 보고하였다(Levine *et al.* 2003; Vilà *et al.* 2011). 또한 침입식물은 타감 물질을 생산하여 자생종과의 경쟁에서 우위를 보이며 새로운 서식지에 빠르게 확산될 수 있다(Vilà and Weiner 2004; Lankau *et al.* 2009; Bradley *et al.* 2010a). 침입식물의 이러한 특성은 기후변화와 함께 생태계 교란의 주요 요인으로 작용할 수 있다. 따라서, 기후변화에 따른 침입외래식물의 분포를 예측하여 생태계에 미치는 영향을 파악하는 것은 생태계 관리를 위한 중요한 기초자료가 될 것이다.

종 분포모형(Species Distribution Model)은 생태학 분야에서 널리 사용되는 도구로 종의 서식지 적합성을 예측하는데 이용되어 왔다(Elith and Leathwick 2009; Park *et al.* 2020). 그중에서도 MaxEnt 모형은 식물의 잠재적 분포를 추정하는 데 효과적으로 사용되고 있다(Phillips *et al.* 2006; Koch *et al.* 2017). 선행 연구에서는 멸종위기종의 잠재적 분포를 모델링하였고(Wilting *et al.* 2010), 최근에는 기후변화에 따른 미래의 종 분포 변화를 예측하는 데 많이 사용되고 있다(Booth 2018; Li *et al.* 2020a; Du *et al.* 2021). 또한 MaxEnt는 생물의 출현 데이터를 이용하여 간편하게 분석할 수 있고, 표본 수가 작거나 불규칙한 데이터에도 강력한 결과를 얻을 수 있어서 생태학 분야에 널리 사용되고 있다(Hernandez *et al.* 2006; Person *et al.* 2007; Ortega-Huerta and Peterson 2008; Guan *et al.* 2020; Ji *et al.* 2021).

큰망초(*Conyza sumatrensis* E. Walker)는 이미 외국에서는 침입성이 높고 새로운 환경에 대한 적응력이 높은 식물로 알려져 있으며(Hao *et al.* 2009; Liu *et al.* 2012), 농경지 작물에 큰 피해를 줄 수 있고, 자생종의 생물다양성을 위협할 수 있는 식물이다(Jordá *et al.* 2001; Chivasa *et al.* 2002; Liu *et al.* 2012). 이러한 생태적 중요성에도 불구하고 큰망초의 분포 변화에 대한 연구는 거의 없으며, 특히 기후변화

에 따른 큰망초 분포를 예측하는 연구가 필요한 시점이다. 본 연구는 국내에 유입되어 분포하고 있는 외래종 큰망초의 현재 분포를 파악한 후 생물기후 변수를 활용하여 RCPs 기후변화 시나리오에 따른 잠재 서식지 분포를 예측하였다. 이를 통해 기후변화에 따른 생태계 관리 방안을 마련하기 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

## 재료 및 방법

### 1. 종 출현 자료

큰망초(*C. sumatrensis*)의 분포 자료는 현장 조사와 GBIF(Global Biodiversity Information Facility database, <http://www.gbif.org/>)를 통해 종 출현 자료를 확보했다. 하지만, GBIF에는 큰망초에 대한 국내 분포기록 자료가 없어서 본 연구에는 현장조사 자료만 이용되었다. 현장조사는 2013년부터 2020년까지 전국을 대상으로 무작위로 수행하여 큰망초가 출현한 총 181지점의 GPS 좌표를 기록했고, 각 조사지점 사이의 거리는 최소 5 km 이상으로 하였다(Fig. 1). 큰망초(*C. sumatrensis*) 출현 지점은 주로 한국의 남부지

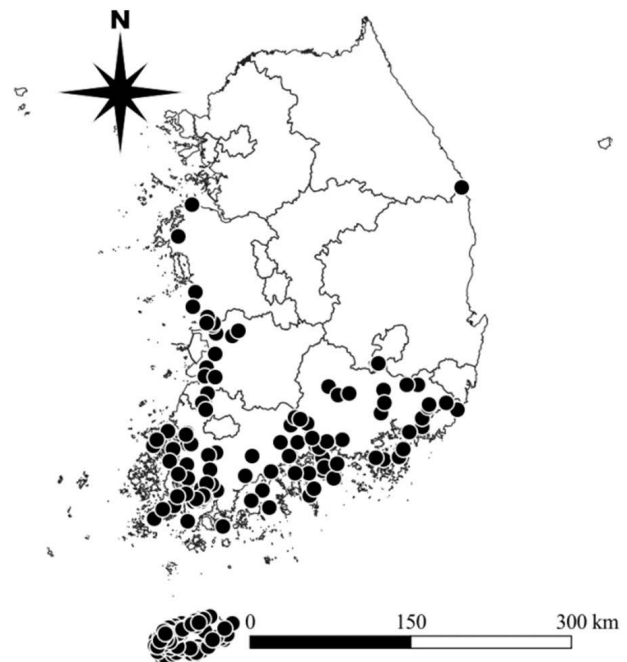


Fig. 1. Spatial distribution of occurrence records of *Conyza sumatrensis* in South Korea. The black dots indicate the locations covered by *C. sumatrensis*.

역을 중심으로 분포하였다(Fig. 1). 큰망초의 지역별 분포를 살펴보면, 한국의 남부 지방인 제주도, 전라도, 경상도에서 전체 식물 분포의 약 95%를 차지하였고 한국의 중부지방은 출현 빈도가 상대적으로 낮게 나타났다.

## 2. 생물기후변수

MaxEnt에는 다양한 유형의 환경변수를 입력 변수로 활용할 수 있지만, 본 연구에서는 기후영향을 중점적으로 파악하기 위하여 20개 생물기후변수(Bioclimatic variables)를 사용하였다(Table 1). 생물기후변수들은 미국 지질 조사국(US Geological Survey)에서 개발한 20개의 생물기후변수 세트이며, 종 분포에 대한 기후변화의 영향을 평가할 때 사용된다(O'Donnell and Ignizio 2012).

본 연구의 대상인 남한지역의 현재 기후자료(1976년~2005년)는 기상청의 60개 종관기상관측소(Automated Surface Observing System, ASOS) 지점의 관측 자료와 고도, 경사, 향, 해안으로부터의 거리 등의 정보를 바탕으로 생산된 3 km 공간 해상도의 자료를 사용하여(Cho *et al.* 2020a), 20개 생물기후변수를 생산하여 사용하였다. 미래 기후자료는 기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 5차 평가보고서(Fifth Assessment Report, AR5)에 활용되었던 결합모델상호비교사업(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5)의 기후변화 시나리오 미래 전망 자료를 사용하였다. 본 연구에서는 CMIP5 자료 중 10개 전지구모형(Global Climate Model, GCM) 자료(Table 2; Cho *et al.* 2020a)의 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오 자료를 이용하여, 미래 기후조건에서 20개 생물기후변수를 생산하여 사용하였다. RCP 4.5는 온실가스 저감 정책이 상당히 실행되는 경우에 해당되며, RCP 8.5는 현재 추세(저감 없이)로 온실가스가 배출되는 경우에 해당된다(Lee *et al.* 2016). 기후변화에 따른 큰망초 분포의 변화를 파악하기 위하여 다음과 같이 미래 구간을 구분했다: 근미래(Near future, 2010~2039), 중미래(Mid future, 2040~2069), 먼미래(Far future, 2070~2099).

너무 많은 환경변수는 종 분포를 예측할 때 계산 시간과 효율성에 영향을 미치며, 또한 상관성이 높은 변수의 사용은 결과 해석에 영향을 미친다. 따라서, 본 연구에서는 변수의 퍼센트 기여율과 피어슨 상관계수를 이용하여 환경변수의 수를 줄이고 적절한 변수를 선택하였다. 첫 번째로

**Table 1.** Description of bioclimatic variables

Index	Description	Unit
bio01	Annual Mean Temperature	°C
bio02	Annual Mean Diurnal Range	°C
bio03	Isothermality	%
bio04	Temperature Seasonality (Standard Deviation)	°C
bio04a	Temperature Seasonality (CV)	%
bio05	Max Temperature of Warmest Month	°C
bio06	Min Temperature of Coldest Month	°C
bio07	Annual Temperature Range	°C
bio08	Mean Temperature of Wettest Quarter	°C
bio09	Mean Temperature of Driest Quarter	°C
bio10	Mean Temperature of Warmest Quarter	°C
bio11	Mean Temperature of Coldest Quarter	°C
bio12	Annual Precipitation	mm
bio13	Precipitation of Wettest Month	mm
bio14	Precipitation of Driest Month	mm
bio15	Precipitation Seasonality (CV)	%
bio16	Precipitation of Wettest Quarter	mm
bio17	Precipitation of Driest Quarter	mm
bio18	Precipitation of Warmest Quarter	mm
bio19	Precipitation of Coldest Quarter	mm

모든 변수를 이용하여 초기 모델을 구동하고 그 결과 변수의 기여도가 1 미만인 변수를 제거했다. 초기 모델에서는 'Random percentage'를 25로 설정하고, 'Create response curves', 'Make pictures of predictions' 및 'Do jackknife to measure variable importance'를 선택하고, 나머지 모델 값은 기본으로 설정하였다. 두 번째로 1차 선정된 변수들 중 다중공선성(multicollinearity)을 가진 변수를 제거하기 위해 피어슨 상관 계수(Pearson's correlation coefficient,  $r$ )를 확인하였다(Dormann *et al.* 2013). 만약 변수들 사이에 높은 상관관계( $|r| > 0.85$ )가 있는 경우에는 초기 모델 결과에서 기여도가 높은 하나의 변수만 선택하였다.

## 3. 최적모델 선정

MaxEnt에는 feature classes와 regularization multiplier의 두 개의 변경할 수 있는 주요 매개변수(parameter)가 있다. Feature class에는 L (linear), Q (quadratic), P (product), T (threshold), H (hinge), C (categorical) 6개가 있다. 본 연구에서는 6개의 feature 조합(L, LQ, H, LQH, LQHP, LQHPT)과 8개의 regularization parameters (0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4)를 이용하여 전체 48개의 후보 모델을 만들

**Table 2.** General circulation models (GCMs) used in this study

GCMs	Institution	Resolution (degree)
BCC-CSM1-1	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	2.813 × 2.791
CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	2.813 × 2.791
GFDL-ESM2G	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	2.500 × 2.023
GFDL-ESM2M		2.500 × 2.023
HadGEM2-CC	Met Office Hadley Centre	1.875 × 1.250
HadGEM2-ES		1.875 × 1.250
INM-CM4	Institute for Numerical Mathematics	2.000 × 1.500
IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace	3.750 × 1.895
MIROC-ESM-CHEM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute and National Institute for Environmental Studies	2.813 × 2.791
MIROC-ESM		2.813 × 2.791

었다. MaxEnt (version 3.4.4)를 dismo package (Hijiman *et al.* 2017)로 통계프로그램 R에 탑재하여 ENMeval package (Muscarella *et al.* 2014)와 함께 구동하여 후보 모델을 생성하였다. 후보 모델 중 AICc (corrected Akaike information criterion) 값이 가장 작은 모델을 최적 모델로 선정하였다.

#### 4. 종 분포 예측 모델

최종 모델에서는 최적 모델에서 선정된 features를 선택하고, 'regularization multiplier'에 값을 입력하였다. 'Replicated run type'은 'Crossvalidate'로 'Replicates'는 10, 'Max number of background points'는 10,000으로 설정하였다. 또한 종 출현 자료의 편향은 모델 결과에 영향을 줄 수 있으며 이를 방지하기 위하여 bias layer를 생성하여 'Bias file'에 추가하여 모델을 구동하였다 (Kramer-Schadt *et al.* 2013; Halvorsen *et al.* 2016). 큰망초의 적합 서식지 지도의 생성을 위한 출력 유형은 Cloglog를 사용하였다.

모델의 예측 정확도는 ROC (receiver operating characteristic) 곡선의 AUC (area under ROC curve) 값으로 검증하였다 (Fois *et al.* 2018). AUC 값의 범위는 0.5~1이며, 값이 클수록 모델의 예측 정확도가 높다는 것을 의미한다. 일반적으로 모델 예측 정확도는 다음과 같은 5등급으로 구분된다: 0.5~0.6, fail; 0.6~0.7, poor; 0.7~0.8, fair; 0.8~0.9, good; 0.9~1.0, excellent (Swets 1988).

각 생물기후변수의 중요도를 평가하기 위하여 Jackknife 검정을 수행했고, 반응곡선을 이용하여 각 생물기후변수 값과 큰망초 분포확률의 관계를 파악하였다 (Phillips *et al.* 2006). 변수의 중요성은 기여도 (Percent Contribution)와 중요도 (Permutation Importance)를 통해서 측정될 수 있다. 기여도는 모델의 훈련과정에서 각 변수의 기여도를 바꿔가면서 최적의 결과를 도출하도록 하는 방법이며, 중요도는 무작위 자료에 대한 모델 훈련 시 AUC 값을 감소시키는 변수의 중요성을 나타낸다 (Gill and Sangermano 2016; Cho *et al.* 2020b).

모델링 결과는 큰망초의 서식 적합성을 0에서 1 사이로 나타낸다. 본 연구에서는 서식 적합성을 등간격 접근법 (Equal interval approach)을 사용하여 다음과 같이 5등급으로 구분하였다: 0~0.2 (non-suitable area), 0.2~0.4 (low-suitability area), 0.4~0.6 (general-suitability area), 0.6~0.8 (medium-suitability area), 0.8~1 (high-suitability area) (Li *et al.* 2020b).

## 결과 및 고찰

### 1. 환경변수와 최적 모델 선정

환경요인 중에서 온도와 강수량은 식물의 분포를 결정하



**Table 3.** Percent contribution and permutation importance of variables

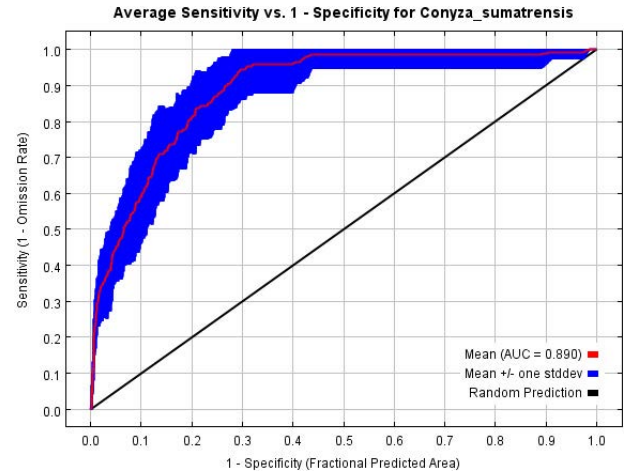
Variables	Percent contribution (%)	Permutation importance (%)
bio09	78.8	83.8
bio03	14.5	3.5
bio05	6.7	12.7

는 중요한 요인이다(Woodward and Woodward 1987; Chapuis *et al.* 2012; Steinkamp and Hickler 2015). 따라서 본 연구에서는 온도와 강수량과 관련된 20개의 생물기후변수를 사용했다(Table 1). 초기 모델 구동과 변수 사이의 상관관계 분석을 통해 모델 구동을 위한 환경 변수들이 선정되었다(Table 3). 최종 선정된 환경변수는 bio03 (등온선), bio05 (가장 더운 달의 최고기온) 및 bio09(가장 건조한 분기의 평균기온)로 모두 기온과 관련된 변수들이었다.

후보 모델 48개 중 최적 모델로 AICc 값이 2534.5로 가장 작은 LQHPT\_1이 선정되었다. 즉, 최종 모델에 feature classes가 L, Q, H, P 및 T이고, regularization multiplier 값이 1인 조합이 사용되었다. 최종 선정된 LQHPT\_1 모델을 사용하여 큰망초의 적합 서식지를 예측했다.

**2. 모델 평가**

최종 선정된 LQHPT\_1 모델에 대한 10-fold cross-validation 결과, 평균 test AUC 값은 0.8 이상(good)인 0.890으로 산출되었다(Fig. 2). 따라서 본 모델은 신뢰할 수 있고 적합한 성능을 가진 것으로 판단할 수 있다(Swets 1988). 큰망초의 분포에 영향을 주는 변수들의 기여도와 중요도를 확인한 결과, 기여도는 bio09 (78.8%), bio03 (14.5%), bio05 (6.7%) 순으로 높게 나타났고, 중요도는 bio09 (83.8%), bio05 (12.7%), bio03 (3.5%) 순으로 높게 나타났다(Table 3). Jackknife test에서는 bio09와 bio05가 중요한

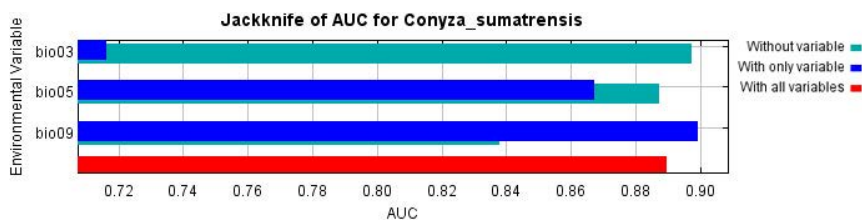


**Fig. 2.** ROC (receiver operating characteristic) curve and AUC (area under ROC curve) value by the MaxEnt model for *Conyza sumatrensis*.

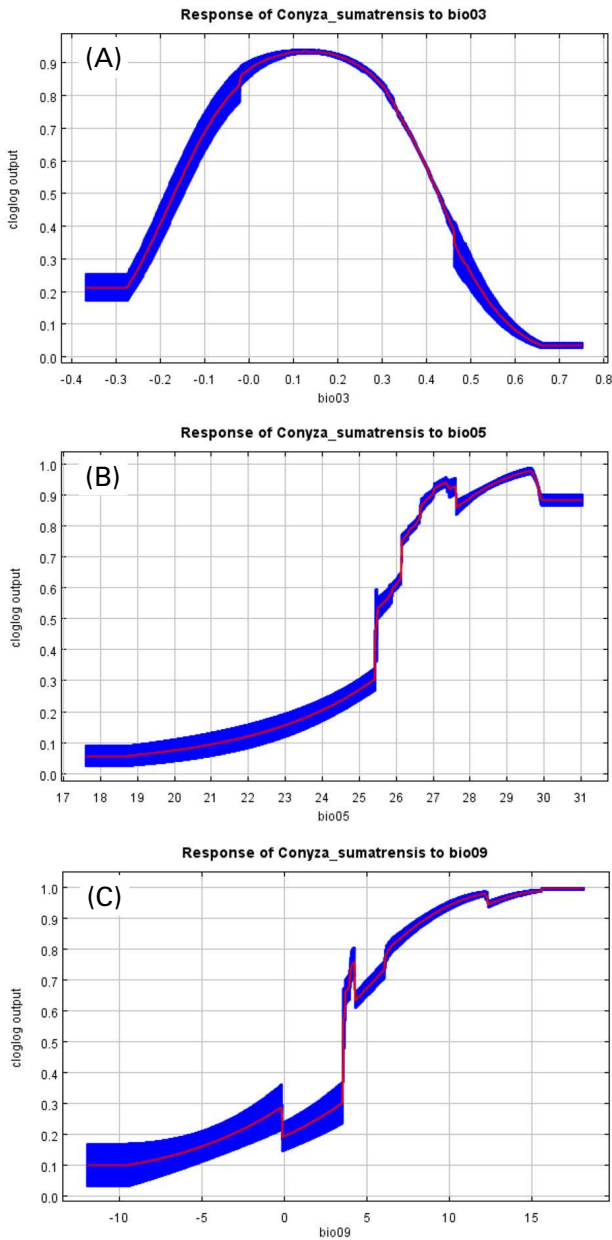
환경변수로 확인되었다(Fig. 3).

큰망초 분포에 영향을 미치는 변수들의 반응곡선을 확인한 결과, bio03의 값이 증가할수록 큰망초의 존재 확률은 증가 후 감소하는 경향을 나타냈고, bio05와 bio09의 값이 증가할수록 존재 확률도 함께 증가하는 경향을 나타냈다(Fig. 4). 각 변수별 50% 이상의 존재 확률을 나타내는 범위는 bio03은 -0.2%에서 0.4% 사이, bio05는 26°C 이상, bio09는 4°C 이상인 것으로 나타났다.

본 연구 결과에서 bio09는 큰망초 분포를 결정하는 가장 중요한 환경요인이라는 것을 보여준다. 큰망초의 실제 분포 지역은 한국의 남부지역에 주로 분포하고 있으며, 건조한 시기의 평균기온이 상대적으로 낮은 중부지역에서는 분포가 제한된 것으로 보인다. 그러나 최근 농업생태계 기후변화 지표식물로 지정된 큰망초가 서해안을 따라 북상하는 것이 관측되었다(Kim *et al.* 2018). 이러한 결과는 향후 장기 모니터링을 통한 추가적인 분석이 필요하지만 온도 상승에 따른 식물의 분포 변화로 추정된다.



**Fig. 3.** Jackknife results for environmental variables in *Conyza sumatrensis*'s habitat distribution model.



**Fig. 4.** Response curves of the environmental variables in *Conyza sumatrensis*'s habitat distribution model. (A): bio03, (B): bio05 (C): bio09. Red lines and blue lines are the mean and standard deviation of ten replicated responses, respectively.

### 3. 분포 적합지 예측

MaxEnt 모델을 통해 분석된 기준년대에서 큰망초의 분포 확률이 높은 지역은 실제 출현한 지역과 유사한 경향을 나타냈다(Fig. 5). 기준년대에서 큰망초의 서식지 적합성이 일반 이상(*general, medium, high*)인 지역은 제주도를 포함한 우리나라 남부지역을 중심으로 분포하는 것으로 나타

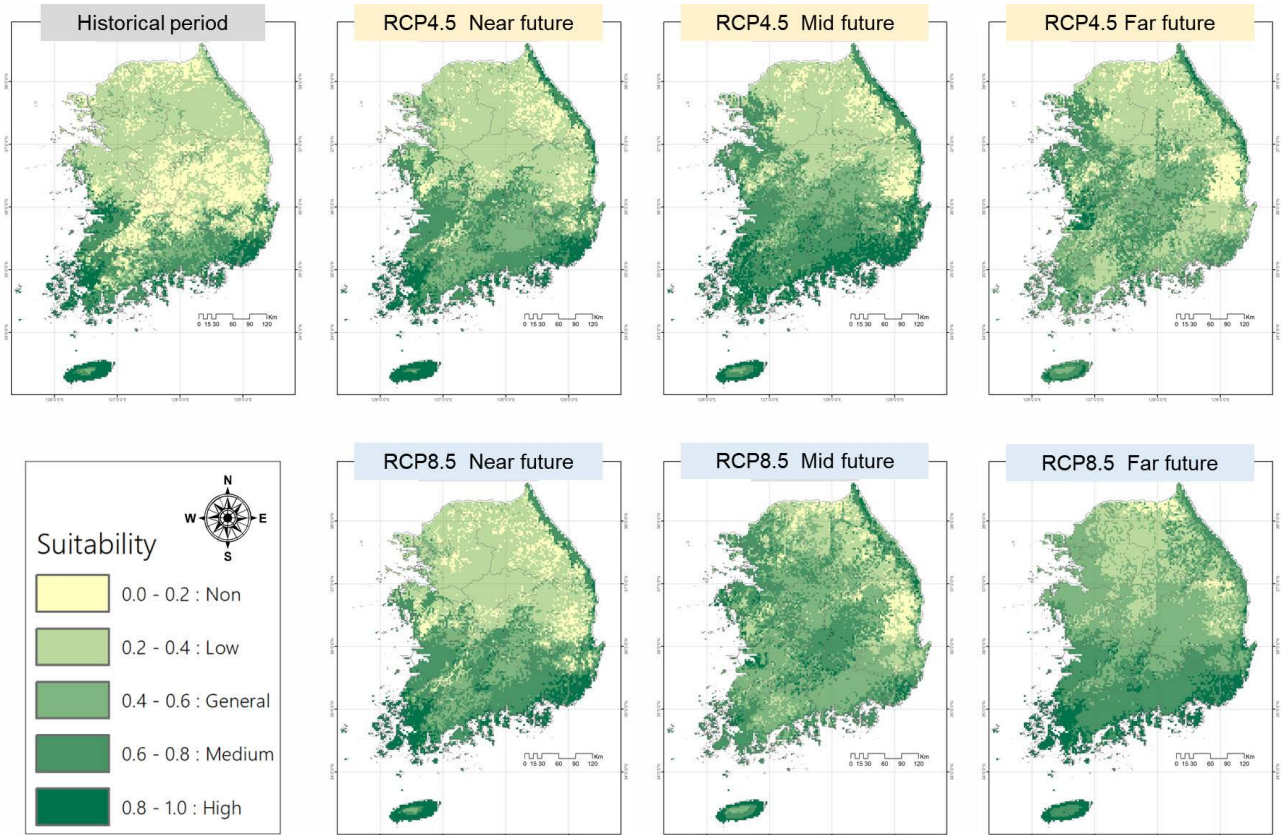
났다(Fig. 5). 기준년대에서 서식지 적합성 등급별(비적합지, 낮은 적합지, 일반 적합지, 중간 적합지, 높은 적합지)은 각각 22.38%, 44.24%, 9.04%, 16.42%, 7.92%로 비적합지와 낮은 적합지가 우리나라 전체 국토의 60% 이상을 차지하였다(Table 4).

큰망초의 적합 서식지에 대한 미래 변동성을 예측하기 위하여 모델에 기준년대 대비 미래 기후변화 시나리오 RCP 4.5와 RCP 8.5를 투영하였다(Table 4, Fig. 5). RCP 4.5 시나리오에서 큰망초가 서식하기 어려운 비적합지 면적 비율은 기준년대 22.38%에서 근미래에 7.86%로 급격히 감소하고, 이후 중미래 7.23%, 먼미래 7.79%로 유사한 수준을 유지하였다. 기준년대에 가장 넓은 면적을 차지하는 낮은 적합지 면적 비율은 기준년대보다 미래에 다소 감소하며 중미래에서 가장 낮았다. 반면에 일반 이상 적합지(일반, 중간, 높은) 면적 비율은 기준년대보다 미래에 증가하는 것으로 나타났다. RCP 8.5 시나리오에서 큰망초의 비적합지 면적 비율은 기준년대 22.38%에서 근미래에 8.86%, 중미래 4.52%, 먼미래 1.71%로 지속적으로 감소하는 것으로 나타났고, 이러한 감소 폭은 RCP 4.5보다 컸다. 낮은 적합지 면적 비율은 중미래에 급격히 감소하는 경향을 나타냈다. 일반 이상 적합지 면적 비율은 RCP 4.5와 동일하게 미래에 크게 증가한 것으로 나타났다.

큰망초와 같은 침입식물들의 분포 변화는 기후변화로 인해 가속화될 수 있으며, 자생식물 서식지에 상당한 영향을 줄 수 있다(Bradley *et al.* 2010b; Taylor *et al.* 2012). 선행 연구에 따르면, 침입식물의 분포는 기후변화와 함께 증가할 것으로 예상된다(Kriticos *et al.* 2003). 그러나 기후변화에 반응하는 식물종에 따라 분포 범위가 달라질 수 있다(Bradley *et al.* 2009). 이것은 자생식물과 침입식물이 성장과 번식을 위해 서로 다른 전략을 선택하기 때문일 것이다(Chun *et al.* 2007). 따라서 향후 기후변화로 인한 침입식물들의 분포가 어떻게 변화하는지 장기 모니터링을 수행할 필요가 있으며, 침입식물의 분포 변화를 예측하여 자생 종 복원을 위한 데이터로 활용할 수 있을 것이다.

### 적 요

기후변화로 인한 지구온난화는 강수량과 기온에 영향을 주며, 다양한 종들의 서식지와 생물다양성에 상당한 영향을 줄 수 있다. 최근 국제 교류의 증가와 기후변화 등의 원



**Fig. 5.** Habitat suitability map of *Conyza sumatrensis* according to different future periods and RCP scenarios in comparison to the historical period. Historical period: 1976–2005; Near future: 2010–2039; Mid future: 2040–2069; Far future: 2070–2099.

**Table 4.** Suitable habitat for *Conyza sumatrensis* within South Korea under climate change RCP scenarios

Suitability Grade	Suitable habitat within South Korea (%)						
	RCP	RCP 4.5			RCP 8.5		
	†Historical period	Near future	Mid future	Far future	Near future	Mid future	Far future
None (%)	22.38	7.86	7.23	7.79	8.86	4.52	1.71
Low (%)	44.24	39.49	29.63	35.50	38.36	17.53	18.82
General (%)	9.04	18.36	16.76	31.73	15.51	40.20	39.18
Medium (%)	16.42	25.25	31.77	22.52	26.86	33.54	28.91
High (%)	7.92	9.03	14.61	2.46	10.41	4.21	11.39

†Historical period: 1976–2005; Near future: 2010–2039; Mid future: 2040–2069; Far future: 2070–2099.

인으로 국내로 새롭게 유입되어 정착하는 외래식물이 증가하고 있지만, 기후변화가 이들 외래식물의 국내 분포에 어떤 영향을 주는지에 대한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구는 침입외래식물 큰망초(*C. sumatrensis*)의 현재 분포와 생물기후 변수를 활용하여 RCPs 기후변화 시나리오에 따

른 적합 서식지 분포 변화를 예측하였다. 큰망초는 현재 우리나라 남부 지방에서 제한된 분포를 보이고 있으며, 이들의 분포에는 가장 건조한 분기의 평균기온(bio09), 가장 더운 달의 최고기온(bio05), 등온선(bio03)이 영향을 미치는 것으로 나타났다. 기후변화 시나리오에 따라 큰망초의 미

래 적합 서식지 면적은 증가할 것으로 전망되었다. 큰망초와 같은 침입외래종의 분포 변화는 자생식물의 생존을 위협할 수 있으며 생태계 교란을 일으킬 수 있다. 따라서 기후변화에 따른 외래종 분포에 대한 연구는 자생식물뿐만 아니라 생물다양성 보전에 중요한 데이터로 활용될 수 있으며, 향후 서식지 복원과 생물자원을 관리하기 위한 정책 자료로 활용될 수 있다.

## 사 사

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ01480801)의 지원에 의해 이루어진 것임.

## REFERENCES

- Araújo MB and C Rahbek. 2006. How does climate change affect biodiversity? *Science* 313:1396–1397.
- Booth TH. 2018. Species distribution modelling tools and databases to assist managing forests under climate change. *For. Ecol. Manag.* 430:196–203.
- Bradley BA, DM Blumenthal, DS Wilcove and LH Ziska. 2010a. Predicting plant invasions in an era of global change. *Trends Ecol. Evol.* 25:310–318.
- Bradley BA, DS Wilcove and M Oppenheimer. 2010b. Climate change increases risk of plant invasion in the Eastern United States. *Biol. Invasions* 12:1855–1872.
- Bradley BA, M Oppenheimer and DS Wilcove. 2009. Climate change and plant invasions: restoration opportunities ahead? *Glob. Change Biol.* 15:1511–1521.
- Chappuis E, E Ballesteros and E Gacia. 2012. Distribution and richness of aquatic plants across Europe and Mediterranean countries: patterns, environmental driving factors and comparison with total plant richness. *J. Veg. Sci.* 23:985–997.
- Chivasa S, EJA Ekpo and RGT Hicks. 2002. New hosts of *Turnip mosaic virus* in Zimbabwe. *Plant Pathol.* 51:386.
- Cho JP, JU Kim, SK Choi, SW Hwang and HC Jung. 2020a. Variability analysis of climate extreme index using downscaled multi-models and grid-based CMIP5 climate change scenario data. *J. Climate Change Res.* 11:123–132.
- Cho NH, ES Kim, B Lee, JH Lim and SK Kang. 2020b. Predicting the potential distribution of *Pinus densiflora* and analyzing the relationship with environmental variable using MaxEnt model. *Korean J. Agric. For. Meteorol.* 22:47–56.
- Chun YJ, ML Collyer, KA Moloney and JD Nason. 2007. Phenotypic plasticity of native vs. invasive purple loosestrife: a two-state multivariate approach. *Ecology* 88:1499–1512.
- Cleland EE, I Chuine, A Menzel, HA Mooney and MD Schwartz. 2007. Shifting plant phenology in response to global change. *Trends Ecol. Evol.* 22:357–365.
- Davidson AM, M Jennions and AB Nicotra. 2011. Do invasive species show higher phenotypic plasticity than native species and, if so, is it adaptive? A meta-analysis. *Ecol. Lett.* 14:419–431.
- Dormann CF, J Elith, S Bacher, C Buchmann, G Carl, G Carré, JR Marquéz, B Gruber, B Lafourcade, PJ Leitão, T Münkemüller, C McClean, PE Osborne, B Reineking, B Schröder, AK Skidmore, D Zurell and S Lautenbach. 2013. Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography* 36:27–46.
- Du Z, Y He, H Wang, C Wang and Y Duan. 2021. Potential geographical distribution and habitat shift of the genus *Ammopiptanthus* in China under current and future climate change based on the MaxEnt model. *J. Arid Environ.* 184:104328.
- Elith J and JR Leathwick. 2009. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 40:677–697.
- Fois M, A Cuenca-Lombraña, G Fenu and G Bacchetta. 2018. Using species distribution models at local scale to guide the search of poorly known species: Review, methodological issues and future directions. *Ecol. Model.* 385:124–132.
- Garssen AG, A Baatrup-Pedersen, LA Voeseinek, JT Verhoeven and MB Soons. 2015. Riparian plant community responses to increased flooding: A meta-analysis. *Glob. Change Biol.* 21:2881–2890.
- Gill NS and F Sangermano. 2016. Africanized honeybee habitat suitability: a comparison between models southern Utah and southern California. *Appl. Geogr.* 76:14–21.
- Guan BC, HJ Guo, SS Chen, DM Li, X Liu, X Gong and G Ge. 2020. Shifting ranges of eleven invasive alien plants in China in the face of climate change. *Ecol. Inf.* 55:101024.
- Halvorsen R, S Mazzoni, JW Dirksen, E Næsset, T Gobakken and M Ohlson. 2016. How important are choice of model selection method and spatial autocorrelation of presence data for distribution modelling by MaxEnt? *Ecol. Model.* 328:108–118.
- Hao JH, S Qiang, QQ Liu and F Cao. 2009. Reproductive traits associated with invasiveness in *Conyza sumatrensis*. *J. Syst. Evol.* 47:245–254.
- Hegland SJ, A Nielsen, A Lázaro, AL Bjerknes and Ø Totland. 2009. How does climate warming affect plant-pollinator interaction? *Ecol. Lett.* 12:184–195.
- Hernandez PA, CH Graham, LL Master and DL Albert. 2006. The



- effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods. *Ecography* 5:773–785.
- Hijiman RJ, J van Etten, J Cheng, M Mattiuzzi, M Summer, JA Greenberg and A Ghosh. 2017. Raster: Geographic Data Analysis and Modeling, version 2.6-7. <http://cran.r-project.org/web/packages/raster/>
- Hirabayashi Y, R Mahendran, S Koirala, L Konoshima, D Yamazaki, S Watanabe, H Kim and S Kanae. 2013. Global flood risk under climate change. *Nat. Clim. Change* 3:816–821.
- IPCC. 2018. Summary for policymakers. p. 32. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty. World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland.
- Ji W, G Gao and J Wei. 2021. Potential global distribution of *Daktulosphaira vitifoliae* under climate change based on MaxEnt. *Insects* 12:347.
- Jordá C, I Font, P Martínez, M Juárez, A Ortega and A Lacasa. 2001. Current status and new natural hosts of *Tomato yellow leaf curl virus* (TYLCV) in Spain. *Plant Dis.* 85:445–445.
- Kim MH, SW Choi, C Jung, KJ Ahn, YJ Oh, YJ Song, SI Kwon, J Eo and HK Nam. 2018. Indicator Species of Climate Change in Agroecosystem of Korea. National Institute of Agricultural Sciences. Wanju, Korea.
- Koch R, JS Almeida-Cortez and B Kleinschmit. 2017. Revealing areas of high nature conservation importance in a seasonally dry tropical forest in Brazil: Combination of modelled plant diversity hot spots and threat patterns. *J. Nat. Conserv.* 35:24–39.
- Kramer-Schadt S, J Niedballa, JD Pilgrim, B Schröder, J Lindenborn, V Reinfelder, M Stillfried, I Heckmann, AK Scharf, DM Augeri, SM Cheyne, AJ Hearn, J Ross, DW Macdonald, J Mathai, J Eaton, AJ Marshall, G Semiadi, R Rustam, H Bernard, R Alfred, H Samejima, JW Duckworth, C Breitenmoser-Wuersten, JL Belant, H Hofer and A Wilting. 2013. The importance of correcting for sampling bias in MaxEnt species distribution models. *Divers. Distrib.* 19:1366–1379.
- Kriticos DJ, RW Sutherst, JR Brown, SW Adkins and GF Maywald. 2003. Climate change and the potential distribution of an invasive alien plant: *Acacia nilotica* ssp. *indica* in Australia. *J. Appl. Ecol.* 40:111–124.
- Lankau R, V Nuzzo, G Spyreas and AS Davis. 2009. Evolutionary limits ameliorate the negative impact of an invasive plant. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 106:15362–15367.
- Lee YH, SH Hong, CS Na, SI Sohn, MH Kim, CS Kim and YJ Oh. 2016. Predicting the suitable habitat of *Amaranthus viridis* based on climate change scenarios by MaxEnt. *Korean J. Environ. Biol.* 34:240–245.
- Levine JM, M Vilà, CM D'Antonio, JS Dukes, K Grigulis and S Lavorel. 2003. Mechanisms underlying the impacts of exotic plant invasions. *Proc. R. Soc. Lond. B* 270:775–781.
- Li J, G Fan and Y He. 2020a. Predicting the current and future distribution of three *Coptis* herbs in China under climate change conditions, using the MaxEnt model and chemical analysis. *Sci. Total Environ.* 698:134141.
- Li Y, M Li, C Li and Z Liu. 2020b. Optimized maxent model predictions of climate change impacts on the suitable distribution of *Cunninghamia lanceolata* in China. *Forests* 11:302.
- Liu J, HD Luo, WZ Tan and L Hu. 2012. First report of a leaf spot on *Conyza sumatrensis* caused by *Phoma macrostoma* in China. *Plant Dis.* 96:148.
- Miller-Rushing AJ, DW Inouye and RB Primack. 2008. How well do first flowering dates measure plant responses to climate change? The effects of population size and sampling frequency. *J. Ecol.* 96:1289–1296.
- Muscarella R, PJ Galante, M Soley-Guardia, RA Boria, JM Kass, M Uriarte and RP Anderson. 2014. ENMeval: an R package for conducting spatially independent evaluations and estimating optimal model complexity for maxent ecological niche models. *Methods Ecol. Evol.* 5:1198–1205.
- O'Donnell MS and DA Ignizio. 2012. Bioclimatic predictors for supporting ecological applications in the conterminous United States. *US Geological Survey Data Series* 691(10):4–9.
- Ortega-Huerta MA and AT Peterson. 2008. Modeling ecological niches and predicting geographic distributions: a test of six presence-only methods. *Rev. Mex. Biodivers.* 79:205–2016.
- Park JU, T Lee, DG Kim and S Shin. 2020. Prediction of potential habitats and distribution of the marine invasive sea squirt, *Herdmania momus*. *Korean J. Environ. Biol.* 38:179–188.
- Person RG, CJ Raxworthy, M Nakamura and AT Peterson. 2007. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *J. Biogeogr.* 34:102–117.
- Phillips SJ, RP Anderson and RE Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecol. Model.* 190(3-4):231–259.
- Root TL, JT Price, KR Hall, SH Schneider, C Rosenzweig and JA Pounds. 2003. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature* 421:57–60.
- Steinkamp J and T Hickler. 2015. Is drought-induced forest dieback globally increasing? *J. Ecol.* 103:31–43.
- Swets J. 1988. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science* 240:1285–1293.
- Taylor S, L Kumar, N Reid and DJ Kriticos. 2012. Climate change and the potential distribution of an invasive shrub, *Lantana*

*camara* L. PLoS One 7:e35565.

Vilà M and J Weiner. 2004. Are invasive plant species better competitors than native plant species? Evidence from pairwise experiments. *Oikos* 105:229–238.

Vilà M, JL Espinar, M Hejda, PE Hulme, V Jarošík, JL Maron, J Pergl, U Schaffner, Y Sun and P Pyšek. 2011. Ecological impacts of invasive alien plants: a meta-analysis of their effects on species, communities and ecosystems. *Ecol. Lett.* 14:702–708.

Wilting A, A Cord, AJ Hearn, D Hesse, A Mohamed, C Traeholdt, SM Cheyne, S Sunarto, MA Jayasilan, J Ross, AC Shapiro, A Sebastian, S Dech, C Breitenmoser, J Sanderson, JW Duckworth and H Hofer. 2010. Modelling the species distribution of flat-headed cats (*Prionailurus planiceps*), an endangered South-East Asian small felid. *PLoS One* 5:e9612.

Woodward FI and FK Woodward. 1987. *Climate and Plant Distribution*. Cambridge University Press. Cambridge, UK.