

## 한반도에서 기후변화에 따른 수변 외래식물인 털물참새피의 분포 변화 예측

# Prediction of Changes in the Potential Distribution of a Waterfront Alien Plant, *Paspalum distichum* var. *indutum*, under Climate Change in the Korean Peninsula

조강현<sup>1</sup> · 이승현<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>인하대학교 생명과학과, <sup>2</sup>(주)청록환경생태연구소

Kang-Hyun Cho<sup>1</sup> and Seung Hyun Lee<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Biological Sciences, Inha University, Incheon 402-751, Korea

<sup>2</sup>Chungrok Environmental Ecosystem Research Institute, Anyang 431-755, Korea

Received 1 July 2015, revised 16 August 2015, accepted 31 August 2015, published online 30 September 2015

**ABSTRACT:** Predicting the changes in the potential distribution of invasive alien plants under climate change is an important and challenging task for the conservation of biodiversity and management of the ecosystems in streams and reservoirs. This study explored the effects of climate change on the potential future distribution of *Paspalum distichum* var. *indutum* in the Korean Peninsula. *P. distichum* var. *indutum* is an invasive grass species that has a profound economic and environmental impact in the waterfronts of freshwater ecosystems. The Maxent model was used to estimate the potential distribution of *P. distichum* var. *indutum* under current and future climates. A total of nineteen climatic variables of Worldclim 1.4 were used as current climatic data and future climatic data predicted by HadGEM2-AO with both RCP 2.6 and RCP 8.5 scenarios for 2050. The predicted current distribution of *P. distichum* var. *indutum* was almost matched with actual positioning data. Major environmental variables contributing to the potential distribution were precipitation of the warmest quarter, annual mean temperature and mean temperature of the coldest quarter. Our prediction results for 2050 showed an overall reduction in climatic suitability for *P. distichum* var. *indutum* in the current distribution area and its expansion to further inland and in a northerly direction. The predictive model used in this study appeared to be powerful for understanding the potential distribution, exploring the effects of climate change on the habitat changes and providing the effective management of the risk of biological invasion by alien plants.

**KEYWORDS:** Climate change, Invasive alien plants, *Paspalum distichum* var. *indutum*, Species distribution modelling, Stream

**요 약:** 기후변화에 따른 침입외래식물의 잠재적 분포지를 예측하는 것은 하천과 저수지에서 생물다양성 보전과 생태적 관리를 위하여 중요하고 해결해야 할 과제이다. 본 연구에서는 한반도에서 털물참새피 (*Paspalum distichum* var. *indutum*)의 잠재적 미래 분포에 미치는 기후변화의 영향을 파악하였다. 털물참새피는 담수생태계의 수변에서 심각한 경제적, 환경적 영향을 미치는 침입 초본식물이다. 현재와 미래의 기후에서 털물참새피의 잠재적 분포를 추정하기 위하여 Maxent 모델을 적용하였다. 기후변화의 영향을 파악하기 위하여 현재 기후 자료로서 Worldclim 1.4의 19개 기후 변수를 사용하였고, 미래의 기후 자료로서 RCP 2.6와 RCP 8.5 시나리오에 따라서 HadGEM2-AO에 의하여 예측된 기후 변수를 사용하였다. 예측된 털물참새피의 현재 잠재분포지는 실제 위치 자료와 거의 일치하였다. 이 식물의 잠재 분포에 영향을 미치는 환경 변수는 가장 따뜻한 분기의 강수량, 연평균기온 및 가장 추운 분기의 평균기온이었다. 2050년에 기후변화에 따른 털물참새피의 분포 예측에 의하면 이 식물의 현재 분포지에서는

\*Corresponding author: joell@naver.com

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

기후 적합성이 대체로 감소하였고, 이 식물이 보다 내륙과 북쪽으로 분포지가 확대되었다. 본 연구에서 사용한 예측 모델은 잠재적 분포를 이해하고 분포 변화에 미치는 기후변화의 영향을 파악하며 외래식물에 의한 생물적 침입의 위해성을 효과적으로 관리하는데 유용할 것으로 기대된다.

**핵심어:** 기후변화, 침입외래식물, 털물참새피, 중 분포 모델링, 하천

## 1. 서론

침입외래종 (invasive alien species)은 인간에 의하여 새로운 환경으로 도입되고 번식하여 그 분포지에서 급격하게 확산되는 생물종으로 이들은 대부분 환경에 큰 영향을 미치거나 인간의 이익을 해치고 있다 (Gurevitch and Padilla 2004, Jose et al. 2013). 특히 우리나라에서는 도입된 외래식물 중에서 고유 생태계에 부정적인 영향을 미치는 12종의 침입외래식물을 환경부가 생태계교란생물로서 지정하여 특별 관리하고 있다 (NIER 2012). 침입외래종은 우리 국토의 주요한 사회기반시설인 하천, 저수지 및 댐호를 주요 확산 통로 또는 서식지로서 이용할 수 있다. 하천은 주기적 홍수에 의하여 교란이 가해지고 다양한 지형이 형성되어 있기 때문에 외래종의 침입이 용이하고 (Hood and Naiman 2000, Richardson et al. 2007), 특히 최근 하천 관리에서 하천정비 등의 인위적 교란이 심해지면서 외래종 침입이 더욱 가속된다 (Shin and Cho 2001). 한편 댐호를 포함하는 저수지는 댐에 의하여 물 흐름의 연속성이 차단되고 정체수역이 증가하여 외래종이 확산되는데 징검다리 역할을 한다 (Havel et al. 2005). 현재 우리나라의 하천과 저수지 등의 수변부에서 생태적, 관리상의 문제를 유발하고 있는 주요 침입외래식물은 가시박, 물참새피, 털물참새피 등이다 (NIE 2014).

기후변화가 침입외래식물에게 보다 적합한 환경을 제공하여 전지구적으로 외래종이 우점하는 식생이 증가할 것이라는 예측을 넓게 수용하고 있다 (Leishman and Gallagher 2015). 전지구적인 기후변화로 인한 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도 증가, 온도 상승 및 강수량 변화가 외래식물의 확산을 촉진할 수 있다. 일반적으로 침입외래식물은 뛰어난 산포 정착 능력, 넓은 환경 저항성 및 빠른 적응능력을 가지고 있어서 기후변화에 성공적으로 대응할 수 있는 능력을 가지고 있

다고 간주된다 (Bradley et al. 2010). 결국 기후변화로 인하여 특정지역으로 외래종 침입 확률과 확산 범위가 증가되어 생물다양성 감소, 고유종 멸종 등의 부정적인 영향이 증가할 것으로 예상된다 (Dukes and Ziska 2014). 따라서 침입외래종의 잠재적 분포 지역을 예측하는 것은 기후변화로 인한 고유생태계의 보전을 위하여 매우 중요하다 (Crossman et al. 2011, Tererai and Wood 2014).

중 분포 모델링은 경험적 자료를 이용하여 종과 환경 사이의 관계를 분석한 후 종의 잠재적 분포와 기후변화에 따른 침입외래종의 분포지역을 예측하기 위한 도구로 활용되고 있다 (Kleinbauer et al. 2010, Jones 2012, Taylor and Kumar 2013). Crossman et al. (2011)은 GLM (generalized linear), GAM (generalized additive model), Maxent (maximum entropy model)의 3가지 중 분포 모델링을 이용하여 호주 남부지역에 분포하는 침입외래식물의 현재와 2030년의 서식지 분포 패턴 및 확산 과정을 예측하여 관리방안을 제시하였다. Wasowicz et al. (2013)은 중 분포 모델링을 이용하여 아이슬란드에 분포하는 외래식물의 공간 유형을 분석하고 이들의 분포에 영향을 미치는 주요 환경요인을 파악하여 기후변화에 따른 대상종의 분포 변화를 예측하였다. Qin et al. (2014)은 중국에서 침입종인 돼지풀과 단풍잎돼지풀의 현재와 2050년의 잠재적 분포지역을 예측하기 위하여 중 분포 모델링을 이용하였다.

따라서 본 연구는 한반도에서 분포지역이 주로 남부지역에 제한되어 있고 하천 생태계에 부정적인 영향을 미치는 침입외래식물은 털물참새피를 대상으로 중 분포 모델링을 이용하여 1) 현재 한반도의 잠재적 분포지역을 파악하고, 2) 기후변화에 따른 잠재적인 분포지의 변화를 예측하여, 3) 한반도에서 주요 침입외래식물의 관리방안을 수립할 때 중 분포 모델링의 적용을 제안하는데 연구 목적이 있다.

## 2. 조사 방법

### 2.1 연구 대상종 선정

우리나라에서 생태계교란 생물로 지정된 털물참새피 (*Paspalum distichum* var. *indutum*)는 현재 한반도 남부지역에서 하천과 저수지의 수변부에서 번성하여 이들 공공기반시설 관리에 어려움을 주고 생물다양성을 위협하는 침입외래식물이다. 털물참새피는 벼과에 속하는 다년생 초본으로서 저수지, 하천, 습지 등 수심 얇은 수변에서 대단위 군락을 이루며 생육한다 (NIER 2012). 털물참새피는 지면이나 수면을 기거나 뜨는 줄기를 뺏아서 수면을 완전히 덮는 단순 군락을 형성하여 다른 식물종과 어류의 생존을 위협하고, 생물종다양성을 감소시키며, 이들의 고사체로 인하여 수질오염을 야기하는 하는 등의 수생태계에 부정적인 영향을 일으키고 있다 (Stroh 2006, Yang et al. 2002). 본 종의 원산지는 북미이고, 현재 다른 지역으로 도입되어 전지구 분포범위는 동아시아에서부터 열대 아메리카까지로 폭넓다 (NIER 2012). 한반도에서는 주로 남부지방과 해안선을 따라 중부지방까지 제한적인 분포를 보이고 있다 (NIER 2012, NIE 2014).

### 2.2 식물 위치 자료 수집

털물참새피의 위치 자료는 연구대상종이 침입외래 식물인 점을 고려하여 자생지, 전지구 및 한반도로 지역을 구분하여 수집하였다 (Table 1). 자생지 위치 자료는 세계생물다양성정보기구 (GBIF 2015)와 Allred (1982)로부터 북미 앨라바마, 워싱턴, 캘리포니아, 샌디에고, 뉴멕시코, 텍사스에서 수집된 자료이다. 자생지와 한반도를 제외한 전지구 위치자료는 세계생물다양성정보기구 (GBIF 2015)와 Yasuro (1994)에

서 수집하였다. 한편 한반도에서 위치자료는 본 연구자에 의한 현지조사, NIER (2012), NIE (2014), 국립수목원의 국가생물종지식정보시스템 (KNA 2015) 및 국립생물자원관 표본자료 (NIBR 2015)에서 수집하였다 (Table 1). 특히 생태계교란생물 자료집 (NIER, 2012)의 분포 위치는 분포지 도면에서의 위치를 QGIS DT (2014)를 이용하여 경위도 좌표로 전환하여 수집하였다.

### 2.3 환경 자료 수집

식물 분포에 영향을 미치는 환경요인 중에서 기후요인, 특히 온도와 강수량이 매우 중요하다 (Woodward and Williams 1987). 본 연구에서는 현재 한반도에서 털물참새피의 잠재분포지역을 예측하기 위하여 환경자료는 WorldClim 1.4 (WorldClim 2014)에서 제공하는 공간 해상도 5 km의 온도와 강수량으로 이루어진 19 개 기후환경자료를 이용하였다 (Table 2). 또한 미래의 기후 자료는 전지구 기후 모델 (GCMs: Global Climate Models)인 HadGEM2-AO로 예측된 2050년대 (2041 - 2060년의 평균)의 기후자료를 사용하였다 (NIMR 2012). 이 기후 예측자료는 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 5차 평가 보고에서 사용한 기후변화 시나리오에 기반을 두고 있다 (Edenhofer et al. 2014). 본 연구에서는 이 시나리오 중에서 인간 활동에 의한 영향을 지구 스스로 회복 가능한 경우인 Representative Concentration Pathways (RCP) 2.6 시나리오와 온실기체의 저감 없이 지속적으로 배출되는 경우인 RCP 8.5 시나리오를 선택하여 털물참새피의 2050년 잠재분포 지역을 예측하였다. 여기에서 RCP 2.6 시나리오는 IPCC의 5개 시나리오 가운데 가장 완만한 온실가스 배출 시나리오이고, RCP 8.5는 가장 극단적인 것이다 (Moss et al. 2010).

**Table 1.** The number of occurrence data of *Paspalum distichum* var. *indutum* used for the species distribution model.

		Number of datum	Data source
Native areaLocation		9	GBIF (2015) and Allred (1982)
Introduced area	Korean Peninsula	65	KNA (2015), NIBR (13), NIE (2014), NIER(2012) and this study
	The other area	46	GBIF (2015) and Yasuro (1994)
Total		120	

**Table 2.** The percentage contribution of the bioclimatic variables (WorldClim 2014) used in the species distribution model of *Paspalum distichum* var. *indutum*. The values are averages with ten replicate runs.

Abbreviation	Variable	Contribution (%)
BIO18	Precipitation of warmest quarter	31.3
BIO1	Annual mean temperature	23.1
BIO11	Mean temperature of coldest quarter	14.6
BIO4	Temperature seasonality (standard deviation x100)	6.2
BIO12	Annual precipitation	4.5
BIO5	Max temperature of warmest month	3.8
BIO17	Precipitation of driest quarter	3.7
BIO19	Precipitation of coldest quarter	3.4
BIO6	Min temperature of coldest month	2.4
BIO8	Mean temperature of wettest quarter	1.9
BIO10	Mean temperature of warmest quarter	1.5
BIO9	Mean temperature of driest quarter	1.1
BIO15	Precipitation seasonality (coefficient of variation)	0.9
BIO16	Precipitation of wettest quarter	0.6
BIO7	Temperature annual range (BIO5 - BIO6)	0.5
BIO13	Precipitation of wettest month	0.2
BIO14	Precipitation of driest month	0.2
BIO3	Isothermality ((BIO2/BIO7) x100)	0.1
BIO2	Mean diurnal range (Mean of monthly (max temp - min temp))	0.0

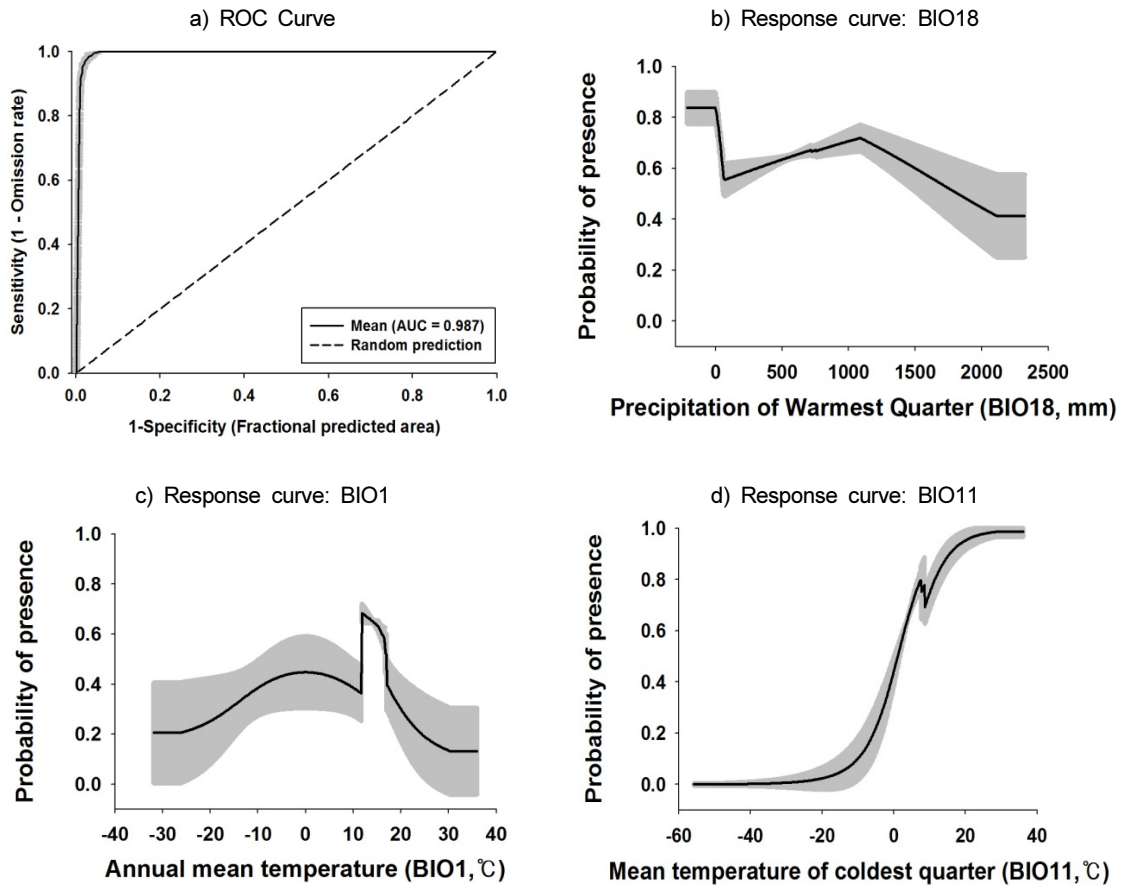
## 2.4 종 분포 모델링

본 연구 대상종의 위치자료가 출현지점만이 표현되어 있어서 종 분포 모델링은 출현자료만을 적용할 경우 높은 정확도를 보이는 Maxent를 사용하였다 (Phillips et al. 2006). Maxent 수행을 위한 프로그램은 Maxent 3.3.3k (Phillips 2013)를 이용하였다. 이 프로그램의 선택사항으로서 random test percentage를 25%로 설정하였고, 10차 교차 검증 (10-fold cross validation)을 10회 반복하였다. 또한 기후 환경 변수의 최대 수는 10,000개로 설정하였고, 기후 환경 변수의 중요도를 파악하기 위하여 잭나이프 (jackknife) 기법을 선택하였다. 모델의 결과는 분포확률을 최저값 0과 최대값이 1로 설정이 되는 로지스틱 형식 (logistic format)으로 출력하였다. 각 기후환경 변수가 식물종에 미치는 영향을 파악하기 위하여 반응곡선 (response curve)을 생성하였다. 현재와 미래의 잠재적 분포지역을 예측하기 위하여 현재와 기후변화 시나리오가 적용된 2050년대의 19개 기후환경 변수를 입력하였다. 모델링 결과에 대하여 수신자 조작

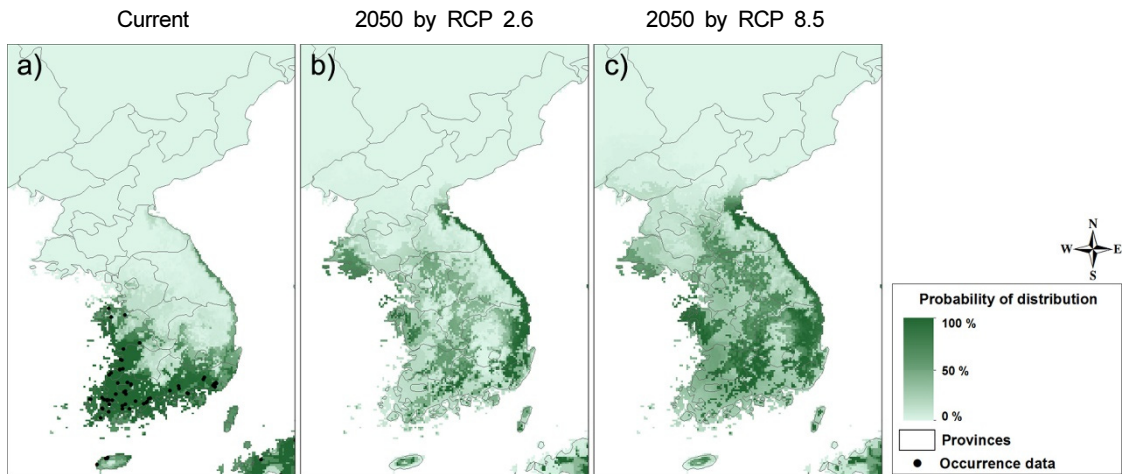
특성 곡선 (ROC, receiver operating characteristic curve)의 아랫부분 면적 (AUC, area under the curve)을 통하여 모델의 정확도를 판단하였다. 또한 모델 결과 생성된 털물참새피의 공간 자료는 ArcGIS Desktop 10.1 (ESRI, Redlands, CA, USA)을 이용하여 지도로 도시화하였다.

## 3. 결과 및 고찰

기후환경 요인을 이용한 털물참새피의 종분포 모델 Maxent의 10차 교차 검증에 의한 모델링 결과에서 수신자 조작 특성 곡선 (ROC)의 아랫부분 면적 (AUC)이 0.8이상인 0.987로 생성된 종분포 모델이 매우 적합한 것으로 판단되었다 (Swets 1988) (Fig. 1a). 현재 기후 조건에서 털물참새피는 충청남도과 전라북도의 서해 쪽 일부 지역, 대부분의 전라남도, 경상남도, 제주도 지역 및 경상북도와 강원도의 동해안을 따라서 좁게 생육이 가능할 것으로 예측되었다 (Fig. 2a). 한반도에서 기후환경요인으로 예측된 털물참새피의 잠재분포지역은 Fig. 2a의 검은 점으로



**Fig. 1.** The area under the curve (AUC) of the receiver operating characteristic (ROC) (a) and environmental response curves (b - d) for bioclimatic variables contributing greater than 10% to the species distribution models of *Paspalum distichum* var. *indutum* (BIO18; precipitation of warmest quarter, BIO1; annual mean temperature, and BIO11; mean temperature of coldest quarter). The lines indicate mean values for the 10 iterations of the models and grey shading indicates their standard deviations.



**Fig. 2.** Predicted potential distribution of *Paspalum distichum* var. *indutum* in the Korean Peninsula under current (a) and future (2050) climate conditions according to Representative Concentration Pathway (RCP) 2.6 Scenario (b) and RCP 8.5 Scenario (c).

표시된 이들의 실제 분포지역과 거의 일치하였다.

19개 기후 환경 변수 중에서 가장 따뜻한 사분기의 강수량 (BIO18)이 전체 변이의 31.4%, 연평균 기온 (BIO1)이 23.1%, 가장 추운 사분기의 평균기온 (BIO11)이 14.6%로서 털물참새피의 분포에 큰 영향을 주었다 (Table 2). 털물참새피는 가장 따뜻한 사분기의 강수량 (BIO18)이 1,000 mm 부근, 연평균 기온 (BIO1)이 10-20°C 범위, 가장 추운 사분기의 평균기온 (BIO11)이 0°C 이상인 지역에서 분포 확률이 50% 이상인 것으로 예측되었다 (Fig. 1 b, c, d). 이러한 잠재 분포지의 기후 조건은 이 식물의 자생지인 미국 남부의 아열대 기후와 동부의 해안 기후 조건을 포함하고 있었다 (Allred 1982, GBIF 2015).

기후변화를 가장 완만하게 예측하는 RCP 2.6 시나리오를 적용한 2050년대 한반도에서 털물참새피의 잠재 분포지역은 제주도, 전라남도, 전라북도, 충청남도의 분포확률이 줄어들고, 동해안 해안을 따라서 보다 북쪽으로 분포지 확장되고, 경기도, 충청북도, 경상북도, 강원도의 내륙지로 분포가 제한될 것으로 예측되었다 (Fig. 2b). 또한 기후변화가 가장 크게 일어날 것으로 전제하는 RCP 8.5 시나리오에 따라서 분포지를 예측하면 RCP 2.6 시나리오에서 예측된 분포 지역과 유사하였으나 분포확률은 증가하는 것으로 예측되었다 (Fig. 2c).

본 연구에서 도출한 털물참새피의 중분포 모델에서 기여도가 높았던 가장 따뜻한 사분기의 강수량 (BIO18), 연평균 기온 (BIO1) 및 가장 추운 사분기의 평균기온 (BIO11)에 대하여 현재 (Fig. 3 a, d, g) 와 2050년대의 RCP 2.6 시나리오 (Fig. 3 b, e, h)와 RCP 8.5 시나리오 (Fig. 3 c, f, i)에 따른 한반도 분포도를 작도하였다. 한반도의 기후 변화를 털물참새피 잠재분포지와 비교하면 2050년대에 한반도 중남부 내륙지방에서 강수량이 증가하고 겨울 기온이 상승함에 따라서 털물참새피의 분포 확률이 증가하였으며 현재 중분포지에서는 여름에 강수량이 다소 감소하고 연평균 기온이 20°C 부근으로 증가함에 따라서 이 식물의 분포확률이 감소하는 것으로 판단되었다.

IPCC의 가장 완만하거나 급격한 RCP 시나리오를 적용하여 기후변화에 따른 한반도에서 털물참새피의 2050년대 분포 예측 모델링 결과 현재 분포지에서는 앞으로 분포 확률이 감소할 것이며, 생육지가 현재보

다 다소 북상하고, 내륙으로 이동할 것으로 예측되었다. 이러한 변화는 한반도에서 기후변화에 따라서 기온이 상승하고 여름의 강수량이 해안보다는 내륙에서 증가하는 것에서 기인한다고 판단된다. 따라서 앞으로 중 분포 모델에 의하여 예측된 털물참새피의 잠재적 분포지역 중 분포확률이 높은 지역을 주요 모니터링 지역으로 선정하고, 지속적으로 모니터링을 실시한다면 털물참새피의 확산과 침입을 사전에 예방할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 기후변화에 의한 털물참새피의 분포 변화를 단지 온도와 강수량과 관계된 기후요인에 의하여 예측하였다. 그러나 실제로 기후변화에 의한 환경변화는 기후 이외에 CO<sub>2</sub> 농도 증가, 교란에 의한 식생 회복력 (resilience) 감소와 같은 환경 변화를 동반한다 (Leishman and Gallagher 2015). 일반적으로 CO<sub>2</sub> 농도가 증가함에 따라 C<sub>3</sub> 식물의 자원이용효율이 높아져서 C<sub>4</sub>보다 C<sub>3</sub> 외래식물의 침입성이 증가할 것으로 예상된다 (Smith et al. 2000). C<sub>4</sub> 식물로 추정되는 털물참새피는 (Mesleard et al. 1993) 기후변화에 따른 CO<sub>2</sub> 농도의 증가로 그 침입성의 증가를 기대할 수 없을 것으로 판단된다. 한편 기후변화에 따라서 현재 식생 분포의 적도 방향이나 저고도 주변부에서 식물의 사망률이 증가하고, 생물량의 감소에 따른 식생의 회복력 감소로 인하여 산포력이 크며, 환경 적응력이 높은 외래식물이 보다 유리하게 정착하게 될 것으로 생각된다 (Bradley et al. 2010). 또한 기후변화는 수위변동을 초래하여 수생식물의 생육패턴과 서식환경구조를 변화시킨다 (KEI 2009). 따라서 기후변화에 의한 수위변동은 털물참새피의 분포와 확산에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 그러므로 기후변화에 따른 털물참새피의 분포지 변화를 보다 정확히 예측하기 위해서는 기후 요인을 포함한 다양한 환경 변화, 고유 식생과의 상호관계, 연구 대상종의 생태적 지위를 고려하여야 할 것으로 판단된다. 향후 서식지의 기후조건, 수위, 고유식생과의 상호관계 등을 파악한다면 털물참새피의 확산을 제어하는데 좀 더 효과적일 것으로 사료된다.

본 연구에서와 같이 외래식물의 침입 가능성을 파악하고, 기후변화에 의하여 이들의 분포지가 어떻게 변화하는지 예측하기 위해서는 외래종의 기본적인 지위를 결정하는 환경요인이 무엇인지 파악하는 것

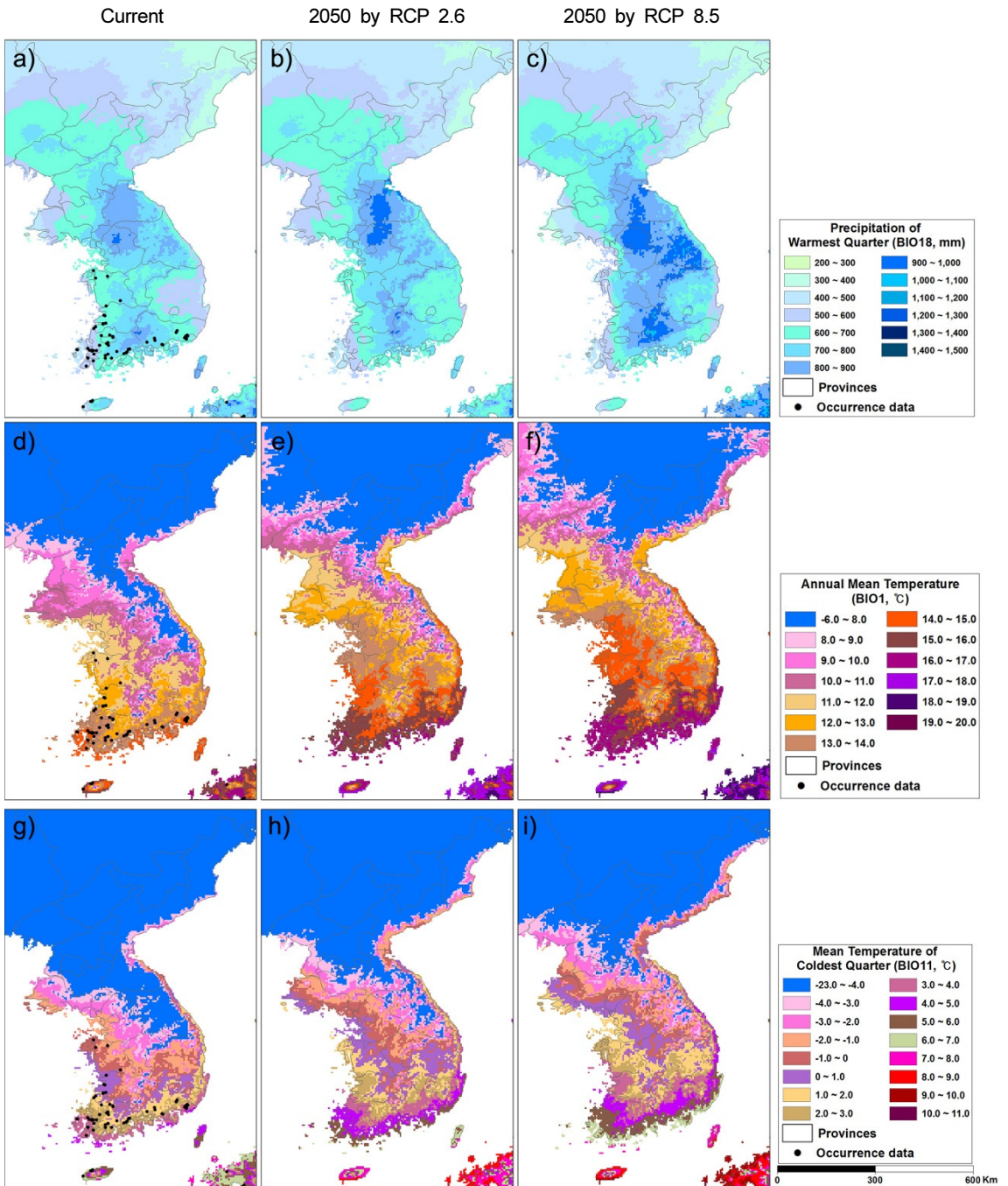


Fig. 3. Current and future expected (2050) precipitation of the warmest quarter (BIO18), annual mean temperature (BIO1) and mean temperature of the coldest quarter (BIO11) in the Korean Peninsula (a, d and g current; b, e and h 2050 by Representative Concentration Pathway (RCP) 2.6 Scenario; c, f and i 2050 by RCP 8.5 Scenario).

이 중요하며, 이를 위해 중 분포 모델링이 필요하다 (Webber et al. 2011, Roger et al. 2015). 따라서 본 연구는 기후변화에 따른 침입외래식물의 주요 분포 지역을 예측하고, 침입외래식물의 분포에 영향을 주

는 환경요인 파악을 위하여 중 분포 모델링의 적용이 가능하다는 것을 제안하였다. 또한 중 분포 모델링은 침입외래식물로 인하여 고유생태계의 피해가 우려되는 지역을 파악하고, 우선적인 관리지역을 선정하는

데 매우 유용할 것으로 사료된다. 다만 침입외래식물의 분포에 주요한 영향을 주는 인위적 교란, 물리적 환경 등 다양한 환경요인을 중 분포 모델링에 적용한다면 보다 정확한 잠재적 분포지역을 예측할 수 있을 것으로 사료된다. 하지만 전지구적 수준에서 다양한 환경자료의 수집이 용이하지 않아서 중 분포 모델 구축에 한계점을 보였다. 향후 체계적인 자료 조사를 수행하여 다양한 환경자료가 적용된 중 분포 모델링을 구축하는 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

기후변화로 인하여 침입외래식물의 잠재적 분포지역을 예측하는 것은 고유생태계를 보전하고, 침입외래식물을 관리하기 위하여 매우 중요하다. 본 연구는 한반도에서 분포지가 매우 제한적인 털물참새피를 대상으로 잠재적인 분포지역을 파악하고, 이를 바탕으로 2050년의 서식지 변화를 예측하였다. 모델에 의하여 예측된 털물참새피의 현재 잠재적 분포지역은 털물참새피의 실제 분포지역과 대부분 일치하였다. 또한 털물참새피는 가장 따뜻한 분기의 강수량(BIO18)이 1,500 mm 미만인 지역, 연 평균 온도(BIO1)가 10°C 이상 20°C 미만인 지역, 가장 추운 분기의 평균온도(BIO11)가 0°C 이상인 지역을 선호하는 것으로 확인되었다. 2종의 RCP (2.6/8.5) 기후변화 시나리오를 이용하여 2050년의 분포를 예측한 결과 털물참새피의 현재 잠재적 분포지역은 대부분 선호하지 않는 환경으로 변화되었으며, 서식지가 현재보다 좀 더 북상하고, 내륙으로 이동하는 것으로 예측되었다. 본 연구를 통하여 중 분포 모델링은 기후변화에 대응하여 침입외래식물을 효과적으로 관리하기 위하여 잠재적인 분포지역을 파악하고, 기후변화로 인하여 생육지가 어떻게 변화될지를 예측하는데 매우 유용한 방법인 것으로 확인되었다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비 지원 (12기술혁신C02)에 의해 수행되었습니다.

#### References

- Allred, K.W. 1982. *Paspalum distichum* L. var. *indutum* Shinnars (Poaceae). Western North American Naturalist 42: 101-104.
- Bradley, B.A., Blumenthal, D.M., Wilcove, D.S. and Ziska, L.H. 2010. Predicting plant invasions in an era of global change. Trends in Ecology and Evolution 25: 310-318.
- Crossman, N.D., Bryan, B.A. and Cooke, D.A. 2011. An invasive plant and climate change threat index for weed risk management: integrating habitat distribution pattern and dispersal process. Ecological Indicators 11: 183-198.
- Dukes, J.S. and Ziska, L.H. 2014. Introduction. In, Ziska, L.H. and Dukes, J.S. (eds.), Invasive Species and Global Climate Change. CABI, Wallingford, UK. pp. 1-6.
- Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Adler, K., Baum, I., Brunner, S., Eickemeier, P., Kriemann, B., Savolainen, J., Schlömer, S., von Stechow, C., Zwickel T. and Minx, J.C. 2014. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA.
- GBIF. 2015. The global biodiversity information facility. <http://www.gbif.org>. Assessed 1 May 2014.
- Gurevitch, J. and Padilla, D.K. 2004. Are invasive species a major cause of extinctions? Trends in Ecology and Evolution 19: 470-474.
- Havel, J.E., Lee, C.E. and Vander Zanden, M.J. 2005. Do reservoirs facilitate invasions into landscapes? BioScience 55: 518-525.
- Hood, W.G. and Naiman, R.J. 2000. Vulnerability of riparian zones to invasion by exotic vascular plants. Plant Ecology 148: 105-114.
- Jones, C.C. 2012. Challenges in predicting the future distributions of invasive plant species. Forest Ecology and Management 284: 69-77.
- Jose, S., Singh, H.P., Batish, D.R. and Kohli, R.K. 2013. Invasive Plant Ecology. CRC Press, London, UK.
- KEI. 2009. The Impact of Climate Change on the Ecosystem: The Case of Wetland Plants. Korea



- Environment Institute, Seoul, Korea. (in Korean)
- Kleinbauer, I., Dullinger, S., Peterseil, J. and Essl, F. 2010. Climate change might drive the invasive tree *Robinia pseudacacia* into nature reserves and endangered habitats. *Biological Conservation* 143: 382-390.
- KNA. 2015. Korea Biodiversity Information System. Korea National Arboretum. <http://www.nature.go.kr>. Assessed 1 May 2014.
- Leishman, M.R. and Gallagher, R.V. 2015. Will there be a shift to alien-dominated vegetation assemblages under climate change? *Diversity and Distributions* 21: 848-852.
- Mesleard, F., Ham, L.T., Boy, V., van Wijck, C. and Grillas, P. 1993. Competition between an introduced and an indigenous species: the case of *Paspalum paspalodes* (Michx) Scribner and *Aeluropus litoralis* (Gouan) in the Camargue (southern France). *Oecologia* 94: 204-209.
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M. and Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P. and Wilbanks, T. J. 2010. The next generations of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463: 747-756.
- NIBR. 2015. Data Base. National Institute of Biological Resources, Incheon, Korea. Personal communication.
- NIE. 2014. Monitoring of Invasive Alien Species Designated by the Wildlife Protection Act (I). National Institute of Ecology, Seocheon, Korea. pp. 29-31. (in Korean)
- NIER. 2012. Invasive Alien Species. National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea. (in Korean)
- NIMR. 2012. Global Climate Change Report for a Response of the IPCC 5th Assessment Report: Prospect of Climate Change by RCP 2.6/4.5/6.0/8.5. Jeju-do, Korea. pp. 3-4. (in Korean)
- Phillips, S.J. 2013. Maxent Software for Species Habitat Modeling, version 3.3.3k. <http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/>. Assessed 13 October 2014.
- Phillips, S.J., R.P. Anderson and R.E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190: 231-259.
- QGIS DT. 2014. Quantum GIS Geographic Information System. <http://www.qgis.org>. Assessed 26 October 2014.
- Qin, Z., DiTommaso, A., Wu, R.S. and Huang, H.Y. 2014. Potential distribution of two *Ambrosia* species in China under projected climate change. *Weed Research* 54: 520-531.
- Richardson, D.M., Holmes, P.M., Esler, K.J., Galatowitsch, S.M., Stromberg, J.C., Kirkman, S.P., Pysek, P. and Hobbs, R.J. 2007. Riparian vegetation: degradation, alien plant invasions, and restoration prospects. *Diversity and Distributions* 13: 126-139.
- Roger, E., Duursma, D.E., Downey, P.O., Gallagher, R.V., Hughes, L., Steel, J., Johnson, S.B. and Leishman, M.R. 2015. A tool to assess potential for alien plant establishment and expansion under climate change. *Journal of Environmental Management* 159: 121-127.
- Shin, D.H. and Cho, K.-H. 2001. Vegetation structure and distribution of exotic plants with geomorphology and disturbance in the riparian zone of Seunggi Stream, Incheon. *Korean Journal of Ecology* 24: 273-280.
- Smith, S.D., Huxman, T.E., Zitzer, S.F., Charlet, T.N., Housman, D.C., Coleman, J.S., Fenstermaker, L.K., Seeman, J.R. and Nowak, R.S. 2000. Elevated CO<sub>2</sub> increases productivity and invasive species success in an arid ecosystem. *Nature* 408: 79-82.
- Stroh, H.G. 2006. Contribution to the ephemeral wetland vegetation along riverbanks and lakeshores of Western Thrace (NE Greece). *Tuexenia* 26: 353-388.
- Swets, J.A. 1988. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science* 240: 1285-1293.
- Taylor, S. and Kumar, L. 2013. Potential distribution of an invasive species under climate change scenarios using CLIMEX and soil drainage: A case study of *Lantana camara* L. in Queensland, Australia. *Journal of Environmental Management* 114: 414-422.
- Tererai, F. and Wood, A.R. 2014. On the present and potential distribution of *Ageratina adenophora* (Asteraceae) in South Africa. *South African Journal of Botany* 95: 152-158.
- Wasowicz, P., Przedpelska-Wasowicz, E.M. and Kristinsson, H. 2013. Alien vascular plants in Iceland: Diversity, spatial patterns, temporal trends,

- and the impact of climate change. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants* 208: 648-673.
- Webber, B.L., Yates, C.J., Le Maitre, D.C., Scott, J.K., Kriticos, D.J., Ota, N., McNeill, A., Le Roux, J.J. and Midgley, G.F. 2011. Modelling horses for novel climate courses: insights from projecting potential distributions of native and alien Australian acacias with correlative and mechanistic models. *Diversity and Distributions* 17: 978-1000.
- Woodward, F. and Williams, B. 1987. Climate and plant distribution at global and local scales. *Vegetatio* 69: 189-197.
- WorldClim. 2014. WorldClim – Global Climate Data. <http://www.worldclim.org>. Assessed 13 October 2014.
- Yang, Y.H., Song, C.K., Park, S.H. and Kim, M.H. 2002. A study on the distribution of naturalized plants of genus *Paspalum* L. *Journal of Subtropical Agriculture and Biotechnology* 18: 37-41. (in Korean)
- Yasuro, K. 1994. *Aquatic Plants of Japan*. Bun-ichi Sogo Shuppan, Tokyo, Japan. (in Japanese)