

〈Original article〉

Maxent를 활용한 가늘비름 (*Amaranthus patulus*)의 잠재서식지 예측 및 위험도 평가

이용호 · 나채선¹ · 홍선희 · 손수인² · 김창석³ · 이인용² · 오영주^{4,*}

국립환경대학교 식물생명환경과학과, ¹국립백두대간수목원 종자보전연구실, ²농촌진흥청 국립농업과학원,
³농촌진흥청 국립식량과학원, ⁴(주)미래환경생태연구소

Predicting the Potential Habitat and Risk Assessment of *Amaranthus patulus* using MaxEnt

Yong Ho Lee, Chea Sun Na¹, Sun Hea Hong, Soo In Sohn², Chang Suk Kim³,
In Yong Lee² and Young Ju Oh^{4,*}

Department of Plant & Environmental Science, Hankyong National University, Anseong 17579, Republic of Korea

¹Seed Conservation Division, Baekdudaegan National Arboretum, Bonghwa 35208, Republic of Korea

²National Academy of Agricultural Science, RDA, Wanju 55365, Republic of Korea

³National Institute of Crop Science, RDA, Pyeongchang 25342, Republic of Korea

⁴Institute for Future Environmental Ecology Co., Ltd, Jeonju 54883, Republic of Korea

Abstract - This study was conducted to predict the potential distribution and risk of invasive alien plant, *Amaranthus patulus*, in an agricultural area of South Korea. We collected 254 presence localities of *A. patulus* using field survey and literature search and stimulated the potential distribution area of *A. patulus* using maximum entropy modeling (MaxEnt) with six climatic variables. Two different kinds of agricultural risk index, raster risk index and regional risk index, were estimated. The 'raster risk index' was calculated by multiplying the potential distribution by the field area in 1 × 1 km and 'regional risk index' was calculated by multiplying the potential distribution by field area proportion in the total field of South Korea. The predicted potential distribution of *A. patulus* was almost matched with actual presence data. The annual mean temperature had the highest contribution for distribution modeling of *A. patulus*. Area under curve (AUC) value of the model was 0.711. The highest regions were Gwangju for potential distribution, Jeju for 'raster risk index' and Gyeongbuk for 'regional risk index'. This different ranks among the index showed the importance about the development of various risk index for evaluating invasive plant risk.

Keywords : invasive plant, MaxEnt, *Amarantus patulus*, agricultural risk, risk index

서 론

* Corresponding author: Young Ju Oh, Tel. 063-211-7122,
Fax. 063-211-7123, E-mail. cave50joo@gmail.com

외래식물의 정착과 확산은 기존 생태계에 생물다양성의 변
화와 농업에서의 수확량 감소 등 경제·사회적 손실을 발생시

킬 수 있다(CBD 2009). 이미 국내에 도입된 외래식물은 환경에 적응하여 점차 확산되어 가고 있으며, 물자이동, 인간의 활동 등은 이동, 확산속도를 더욱 증가시키고 있다. 최근 기후변화, 산업화 등과 관련된 환경변화와 더불어 외래식물의 다양한 연구들이 진행되고 있으며 외래식물의 확산과 관리방법 등에 대한 관심이 더욱 높아지고 있다(Pimentel *et al.* 2000; Pimentel 2002).

외래식물을 체계적으로 관리하기 위하여 도입과 확산이 예상되는 잠재적인 서식가능 지역을 예측하는 것이 향후 관리에 있어 중요한 요인으로 파악되고 있다(Beaumont *et al.* 2014; Qin *et al.* 2014). 이와 관련하여 종의 생태적 지위 예측을 기반으로 한 종분포모형(SDM; Species Distribution Model)에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며 GIS 기반 분포자료와 기후, 토양 정보와 같은 환경인자 정보를 기반으로 외래식물의 잠재 서식지를 공간적으로 예측해 볼 수 있는 기법으로 이용되고 있다(Guisan and Thuiller 2005; Elith and Leathwick 2009; Smolik *et al.* 2010; Tererai and Wood 2014). 외래식물은 분포의 특성상 비출현 정보의 획득에 한계가 존재한다(Philips *et al.* 2006). 종분포모형 중에 하나인 MaxEnt(maximum entropy model)는 GLM(generalized linear model) 등의 다른 종분포모형이 종의 출현과 비출현 자료를 모두 요구하는 것과 달리 오직 출현 자료를 이용하여 종의 잠재서식지를 예측할 수 있기 때문에 동물을 포함한 초본식물, 외래식물 등 분포 정보 확보에 제한이 있는 생물종에서 광범위하게 사용되고 있다(Austin 2007; Zimmermann *et al.* 2010; Padalia *et al.* 2014).

비름속(Genus *Amaranthus*) 식물은 전 세계적으로 70여종이 분포하고 있으며 국내 분포하고 있는 비름속 식물은 모두 외래식물이다(Costea and DeMason 2001; Park 2009). 가는털비름(*Amaranthus patulus*)은 남아메리카 원산으로 전국의 농경지, 농경지 주변, 하천변, 나출지, 도로변 등에 분포하고 있다. 가는털비름은 일년생 초본으로 3~4월에 출현하여 7~10월에 꽃이 피며 줄기는 60~300cm 정도 자라는 중대형의 식물로 잎은 서로 어긋나며 난형으로 길이 5~12cm이고 잎 가장자리는 톱니가 없고 주름이 지는 특징을 가지고 있다(Park 2009). 가는털비름은 여름, 가을에 재배되는 밭 농경지에서 가장 심각한 잡초 중 하나로 특히 고추밭의 밀도에 따른 피해율에 대한 연구가 보고되었다(Won *et al.* 2012). 가는털비름과 같이 이미 생활주변에 노출되어 심각한 피해를 입히고 있는 외래식물은 현재 분포지와 향후 확산되어 피해를 줄 수 있는 미래 분포지를 정확하게 예측함으로써 미래 생태계 관리의 방향과 수단에 대한 중요한 정보를 제공할 수 있다.

종분포모형을 기반으로 하여 식물 종의 분포 변화로 인한 다양한 피해를 예측하기 위한 연구들이 수행되어 왔다(Phillips

et al. 2006; Youngah *et al.* 2011). 오스트리아에서는 외래식물의 예측을 위한 종분포모형과 확산모델을 통합한 하모니 모델을 이용해 확산 예측에 대한 정확도를 향상시켰고(Smolik *et al.* 2010), 국내에서는 DMZ내의 분포하고 있는 외래식물인 단풍잎돼지풀의 확산에 대한 예측을 MaxEnt를 활용하여 판단하였다(Park *et al.* 2017). 또한 외래식물인 돼지풀과 물참새피의 잠재 서식지 예측을 위해 생물기후 자료 WorldClim과 종분포모형인 MaxEnt를 활용하여 외래종 침입을 예측하기도 하였다(Lee *et al.* 2016b). 또한 희귀 특산, 자생 식물의 기후 변화에 의한 서식지 축소 가능성에 대한 연구 또한 잣나무, 눈잣나무, 신갈나무, 소나무, 미선나무와 같은 목본류와 초본류인 모데미풀의 종분포모형 연구가 보고되었다(Lee *et al.* 2011; Lee *et al.* 2012; Chun and Lee 2013; Lee *et al.* 2014; Park *et al.* 2014; Choi *et al.* 2015). 하지만 종분포모형과 서식지 변화에 따른 피해가능지역과 연계하여 외래식물의 실질적인 위험성을 평가한 연구는 보고된 바 없다. 본 연구는 국내 유입되어 분포하고 있는 가는털비름의 현재 분포를 기반으로 생물기후인자를 활용하여 잠재 서식지 분포를 예측하고, 가는털비름이 유입되어 부정적 영향을 미칠 가능성이 높은 밭 면적을 중심으로 가는털비름의 밭 경작지에 대한 위험도를 파악하는 것을 목표로 수행되었다.

재료 및 방법

1. 위치자료 수집

가는털비름의 분포자료는 직접 현지 조사를 통한 자료와 기존에 발표된 자료를 통합하여 사용하였다. 현지조사는 2014년부터 2017년까지 전국을 대상으로 수행하였으며 조사지의 GPS 좌표를 기록하였다. 기존의 자료는 국립농업과학원의 외래식물 분포자료(미발표)와 국립수목원 국가생물종지식정보시스템(KNA 2014)에서 제공하는 표본자료를 참고하여 발생 위치 자료를 구축하였다(Fig. 1).

2. 기후 변수

생태적지위 기반의 종분포모형을 구축하기 위한 기후인자로서 Worldclim Ver. 2(Fick and Hijmans 2017)의 생물기후인자(bioclim)의 19개 변수를 남한지역을 대상으로 공간해상도 1 km² 기준으로 96,412개의 격자를 추출하여 이용하였다. 기후인자 19개 변수는 연평균온도(bio 1), 평균일교차(bio 2), 등온성(bio 3), 온도계절성(bio 4), 최난월 최고온도(bio 5), 최한월 최저온도(bio 6), 년온도범위(bio 7), 최습사분기 평균온도(bio 8), 최건사분기 평균온도(bio 9), 최난사분기 평균온

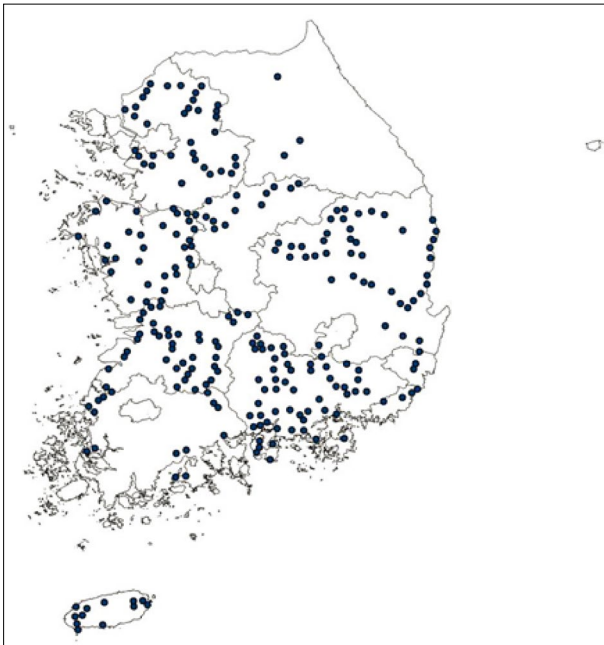


Fig. 1. Point distribution of *Amaranthus patulus* in South Korea.

도(bio 10), 최한분기 평균온도(bio 11), 연강수량(bio 12), 최습월 강수량(bio13), 최건월 강수량(bio 14), 강수량계절성(bio 15), 최습사분기 강수량(bio 16), 최건사분기 강수량(bio 17), 최난사분기 강수량(bio 18), 최한분기 평균온도(bio 19)이다. 19개의 변수는 다중공선성(Multicollinearity)을 제거하기 위하여 변수들에 대한 상관분석을 실시하여 생물기후인자의 주요 기준인 연평균온도, 연강수량과 상관계수가 0.7 이상의 높은 상관이 나타나는 인자들은 분석에서 제외하였다. 최종적으로 선발되어 종분포모형에 사용된 생물기후인자는 연평균기온, 평균일교차, 온도계절성, 연강수량, 최습월 강수량, 최건월 강수량으로 총 6개 인자이다.

3. 종분포모형

종분포모형을 사용하여 외래잡초 가는털비름의 잠재 서식지 분포를 예측하였다. 외래식물은 자생식물과는 다르게 현재 분포하고 있는 지역 이외에도 분포가 가능한 지역의 존재 가능성이 높으며 식물종의 확산전략에 따라 분포범위가 달라질 수 있다. 전국에서 수집된 가는털비름의 발생 지점 위치 정보는 공간적 다중공선성을 제거하기 위하여 기후가 비슷한 지대에 인접하게 5 km 내 발생되는 지점들을 제거하였다(Shcheglovitova and Anderson 2013). 또한 발생지역의 편중으로 인한 편향을 줄이기 위해서 공간적 Jackknife 검정을 활용하여 서식지를 크게 3개의 지역으로 구분 후 지역간의 조

합 중 최적모형을 선발하였다(Boria *et al.* 2014). 모델의 정확도는 교차 검증으로 나타낼 수 있는 Receiver Operating Characteristics (ROC) 곡선의 Area Under the Curve (AUC)값으로 판단하였다. 다중공선성 제거, 상관분석 등 모형의 산출 및 격자의 통계분석 등은 ArcGIS 10.1의 SDMtoolbox 2.2e (Brown *et al.* 2017)을 사용하였다.

4. 위험도 평가

가는털비름이 전국의 밭농업에 미치는 부정적 영향의 공간적 경향을 평가하기 위하여 밭 농경지에 대한 두가지 위험도 지수를 도출하였다. 첫 번째로 1 km² 격자별로 위험도를 산출하기 위해 종분포모형에서 격자별로 예측되는 잠재 서식지 분포 확률과 1 km² 격자 내 밭면적의 비율을 서로 곱하여 “격자 위험도 지수”를 산정하였다. 격자 위험도 지수는 0부터 1의 범위를 지니며, 잠재 서식지 분포 비율과 밭면적의 비율 중 단 하나라도 0이라면 위험도 0으로 평가되고, 둘 다 1이면 위험도를 1로 평가하였다.

$$\text{Risk (raster)} = \text{Potential distribution} \times \text{Proportion of field area}$$

두 번째는 지방자치단체별로 위험도를 산출, 비교하기 위하여 지방자치단체별로 실제 밭면적이 넓을수록 가는털비름이 침입할 수 있는 위험도가 높다고 간주하여 적용하였다. 지방자치단체의 잠재 서식지 분포 확률의 평균과 전체 밭 면적 중 지방자치단체의 실제 밭면적의 비율을 곱하여 “지역 위험도 지수”를 산출하였다. 전국 밭 전체에 대한 지역 위험도 지수는 전국의 잠재 서식지 분포 확률의 평균과 같다.

$$\text{Risk (region)}$$

$$= \frac{\text{Average of potential distribution} \times \text{Regional field area}}{\text{Total field area}}$$

본 연구에서 활용한 밭 면적의 비율은 환경부의 환경공간정보서비스(EGIS 2017)에서 2000년대 말 기준 전국의 토지피복지도를 1 km² 격자 내 밭의 비율로 변환하여 활용하였다(Fig. 2).

결과 및 고찰

1. 가는털비름의 분포

가는털비름의 분포 현황 조사를 위하여 현지 조사와 문헌자료 수집을 수행하였다. 그 결과 총 254지점의 GPS 기반 분포 지점 데이터베이스를 구축하였다(Fig. 1). 산지가 많은 강원도와 논이 많은 전라남도를 제외하고 거의 전국적으로 분

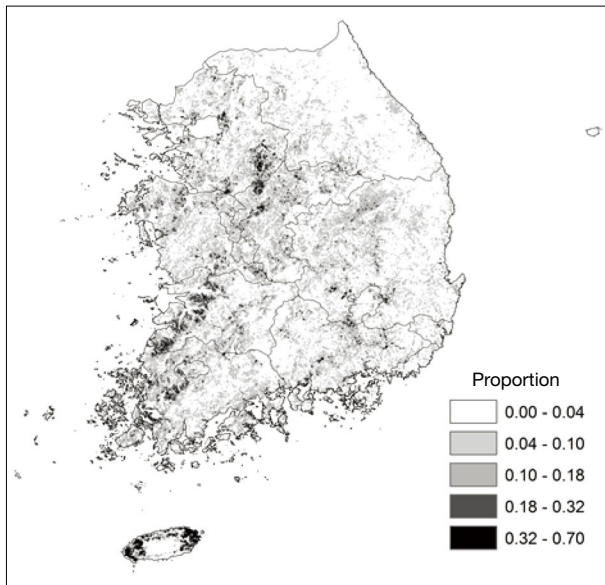


Fig. 2. Potential distribution of *Amaranthus patulus* by MaxEnt model in South Korea.

Table 1. Summary of MaxEnt model for *Amaranthus patulus* distribution in South Korea

Model parameter	Value
Total input samples	254
Training samples	245
Training AUC	0.711
Number of spatial jackknifing groups	3

포하고 있었다. 가는털비름 조사지점의 서식지 유형은 도로변 40.7%, 밭 34.2%, 나출지 17.3%, 하천변 7.8%로 나타났다.

2. 잠재 서식지 분포

가는털비름의 잠재 서식지 분포 모형을 예측하기 위하여 전국에서 수집된 254개의 위치정보가 투입되어 모델 학습에 245개의 위치정보가 사용되었다. AUC를 활용한 모델의 설명력에 대한 검증은 다양한 모델의 검증에 활용되고 있으며 완전 임의 분포 상태의 0.5부터 모델이 완벽하게 예측할 때 1.0이 도출되며 일반적으로 0.7 이상이면 모델이 좋은 설명력을 갖는 것으로 알려져 있다(Swets 1988). 본 연구에서 가는털비름의 잠재 서식지 분포모형은 AUC가 0.711으로 좋은 설명력을 갖는 것으로 분석되었다(Table 1). 분포모형에 각 기후 인자들이 미치는 영향을 평가하기 위해서 MaxEnt의 알고리즘에 대한 기여도 평가와 변수별 무작위 데이터 치환을 통한 AUC값 감소를 평가하여 분석하였다. 모델 예측에 활용된 기후인자, 연평균기온, 평균일교차, 온도계절성, 연강수량, 최습

Table 2. Percent contribution and permutation importance of each environmental variables on modeling *Amaranthus patulus* habitat distribution in South Korea

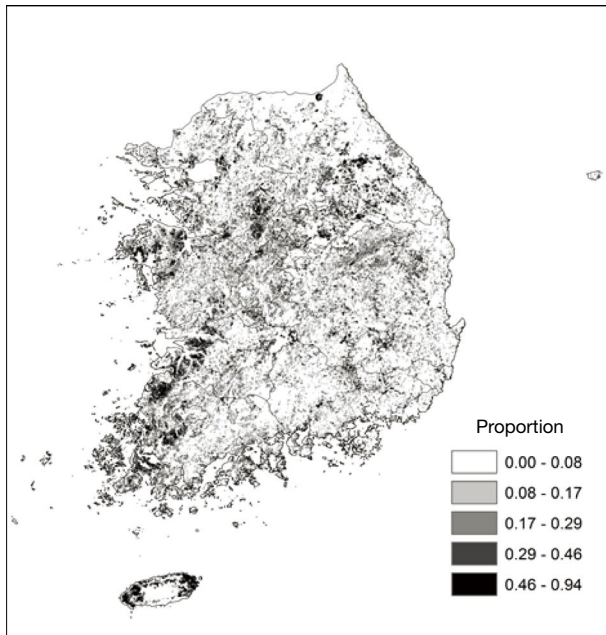
Variable	Percent contribution	Permutation importance
Annual mean temperature	65.3	58.1
Mean diurnal range	12.6	14.7
Temperature seasonality	8.6	15.6
Annual precipitation	2.7	3.5
Precipitation of wettest month	9.2	7.1
Precipitation of driest month	1.5	1.1

월 강수량, 최건월 강수량의 백분율 기여도(Percent contribution)는 연평균기온이 65.3%, 일교차가 12.6%, 최습월 강수량이 9.2%로 나타났으며 치환 중요성(Permutation importance)은 연평균기온이 58.1%, 온도계절성이 15.6%, 일교차가 14.7%로 분석되었다(Table 2). 모든 모델에 대한 중요도 지표에서 연평균기온이 가장 높은 기여도가 나타났다. 이는 가는털비름의 분포가 온도와 높은 상관관계를 가지고 있으며 기후변화와 연계하여 분포 변화를 일으킬 수 있음을 보여준다.

모형에서 예측된 가는털비름의 잠재 서식지 분포 확률은 전국 평균이 0.382, 최대 0.933으로 나타났다. GIS에 의한 공간적인 분포는 경기도의 남동지역, 충청북도의 북동지역, 전라북도와 전라남도의 서쪽지역, 제주도의 동쪽과 서쪽지역이 높게 나타났으며 강원도의 높은 산지와 지리산 인근 소백산맥 지역은 상대적으로 낮은 잠재 서식지 분포 확률로 예측되었다(Fig. 2). MaxEnt 모형을 이용하여 예측된 잠재 서식지 분포 확률의 공간적 분포 양상은 실제 분포지역과 유사하게 나타났다. 이는 가는털비름의 국내 분포 현황이 서식가능한 대부분의 지역으로 이미 확산되어 있음을 보여주었다. 잠재 서식지 분포의 확률을 지방자치단체별로 격자를 평균하여 비교하면 광주광역시가 0.579, 제주도가 0.573, 대전광역시가 0.512, 부산광역시가 0.508, 세종특별시가 0.507 순으로 분석되었다(Table 3). 잠재 서식지 분포 확률이 높은 지역은 제주도 제외하고 대부분 도시지역으로 분석되었는데 이는 본 연구에서 활용한 기후모형인 WorldClim은 전 세계 기상대 데이터 기반의 모형으로 도시지역의 열섬현상이 반영되어 도시의 주변 지역보다 높은 온도가 잠재 서식지 분포 예측에 영향을 미치는 것으로 판단된다(Fick and Hijmans 2017). 지금까지 많은 외래식물의 분포 예측 연구들은 잠재 서식 분포 확률을 활용하여 현재 또는 미래의 외래식물 확산으로 인한 부정적 영향의 가능성을 예측하였다(Stohlgren *et al.* 2010; Lee *et al.* 2015; Lee *et al.* 2016a). 이러한 잠재서식지 예측에서 도시지역은 가는털비름이 주로 분포하고 있는 농경지, 나출지, 교란지 등과 다르게 식물이 서식할 수 있는 공간이 비교적 적게 존재하기 때문에 실제 가는털비름의 부정적 영향

Table 3. Field area, average of proportion of field area, average of potential distribution of invasive plant *Amaranthus patulus* and agricultural risk indices of regions of South Korea

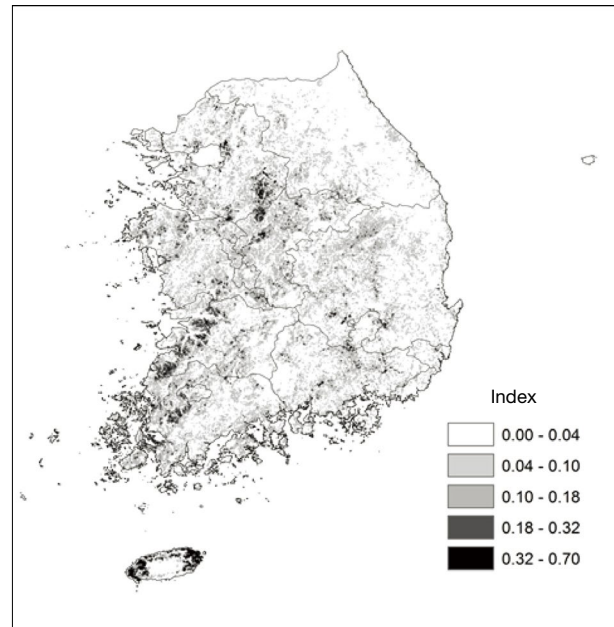
Region	Field area (km ²)	Average of proportion of field area	Average of potential distribution	Average of risk (raster)	Risk (region)
South Korea	10,701	0.142	0.382	0.062	0.382
Busan	36	0.078	0.508	0.040	0.002
Chungbuk	1,037	0.164	0.412	0.075	0.040
Chungnam	1,104	0.162	0.416	0.069	0.043
Daegu	85	0.135	0.415	0.060	0.003
Daejeon	51	0.120	0.512	0.062	0.002
Gangwon	1,518	0.140	0.189	0.032	0.027
Gwangju	46	0.133	0.579	0.079	0.002
Gyeongbuk	1,924	0.118	0.364	0.046	0.065
Gyeonggi	1,166	0.148	0.434	0.072	0.047
Gyeongnam	752	0.098	0.487	0.053	0.034
Incheon	57	0.134	0.310	0.041	0.002
Jeju	373	0.318	0.573	0.220	0.020
Jeonbuk	1,073	0.168	0.429	0.082	0.043
Jeonnam	1,363	0.157	0.460	0.076	0.059
Sejong	42	0.129	0.507	0.068	0.002
Seoul	22	0.095	0.456	0.046	0.001
Ulsan	52	0.081	0.455	0.039	0.002

**Fig. 3.** Proportion of field area in South Korea.

이 낮게 나타날 수 있는 문제를 가지고 있다.

3. 밭 면적 분포

가는털비름의 밭 농경지에 침입할 수 있는 가능성을 중심으로 MaxEnt 모형을 적용하기 위해 전국의 밭면적을 추출하여 모형에 도입하였다. 밭면적의 비율은 전국의 토지피복지도를 1 km² 격자 내 밭의 비율로 변환하여 활용하였다. GIS

**Fig. 4.** Risk (raster) index assessment based on the negative effects of *Amaranthus patulus* to agriculture in South Korea.

에 의한 공간적인 분포에서 밭 면적 비율이 높은 지역은 경기도 남동쪽, 충청남도의 북쪽, 전라남도와 전라북도의 서쪽, 강원도의 남서쪽지역, 제주도의 서쪽과 동쪽지역으로 나타났다(Fig. 3). 변환된 1 km² 격자를 이용하여 계산된 지역별 밭면적의 총합은 10,701 km²였고 가장 넓은 밭면적을 가진 순서로 경상북도 1,924 km², 강원도 1,518 km², 전라남도 1,363 km², 경기도 1,166 km², 충청남도 1,104 km² 순으로 분석되었다

(Table 3). 단위면적당 발면적 비율을 지방자치단체별로 평균하여 비교하면 전국 평균은 0.142였고 가장 높은 순서부터 제주도 0.318, 전라북도 0.168, 충청북도 0.164, 충청남도 0.162, 전라남도 0.157로 나타났다. 가장 낮은 지방자치단체는 울산광역시로 0.081이었다(Table 3).

4. 밭 농경지 위험도 평가

가는털비름의 침입 가능성이 높은 밭 농경지의 부정적 영향을 예측하기 위하여 잠재 서식지와 발면적의 비율을 적용하여 전국 밭 농경지의 위험도를 평가하였다. 본 연구에서 사용한 두 가지의 위험도 지수 중 격자 위험도 지수(raster risk index)는 격자별로 위험성 지수가 평가되어 GIS에 의한 공간적인 분포를 확인할 수 있는 장점이 있다. 격자 위험도 지수가 높은 지역은 경기도 남동쪽, 충청남도 북쪽, 전라남도과 전라북도 서쪽, 강원도 남서쪽, 제주도 서쪽과 동쪽지역으로 발면적 비율과 유사한 경향으로 조사되었다(Fig. 4). 격자 위험도 지수는 전국 평균값은 0.06, 최대값은 0.70으로 분석되었다. 전국의 지역별로 격자 위험도 지수의 평균값을 비교해 본 결과 위험도가 높은 지역은 제주도로 0.220이었고, 전라북도가 0.082, 광주광역시 0.079, 전라남도 0.076, 충청북도 0.075 순으로 나타났다(Table 3). 이는 전국적으로 분포하고 있는 실제 밭 면적의 통계에서는 가장 넓은 면적을 차지하고 있는 경상북도, 전라남도, 경기도, 전라북도 순과는 차이가 있는 것으로 분석되었다(AAS 2017). 전국 발면적 중 지역의 발면적의 비율을 활용하여 실제 산업 크기에 비례한 위험도를 평가할 수 있는 지역 위험도 지수(regional risk index)는 가장 높은 지역이 경상북도로 0.065이었고, 전라남도 0.059, 경기도 0.047, 전라북도 0.043, 충청남도 0.043 순으로 분석되었다(Table 3). 지역 위험도 지수는 실제 전국적으로 분포하고 있는 밭 면적의 순위와 거의 일치하는 것으로 분석되었다. 1 km² 격자별로 구분한 밭의 면적 비율을 그대로 적용하여 지역별로 위험도를 평가할 경우 실제 밭 면적 또는 밭 농업의 규모와 상당한 차이를 발생할 수 있기 때문에 지역간 위험도 비교를 수행할 때에는 지역 위험성 지수의 사용이 더욱 합리적인 결론을 만들 수 있는 것으로 판단되었다.

적 요

본 연구는 MaxEnt 모형을 활용하여 가는털비름의 잠재서식지를 예측하고, 예측된 잠재서식지와 발면적을 활용하여 가는털비름의 잡초로서의 부정적 영향에 대한 위험도 지수를 예측하기 위하여 수행되었다. 가는털비름의 분포 예측을 위

하여 MaxEnt 모형을 구축하기 위하여 남한 전국의 254지점의 분포 자료와 6개의 생물 기후 인자를 활용하였다. 밭농업에 대한 두가지 방법의 위험도 평가를 수행하였고 격자 위험도 지수(raster risk index)는 1 km² 격자별로 잠재 서식지 분포 확률과 발면적의 비율을 서로 곱하여 나타났다. 지역 위험도 지수(regional risk index)는 잠재 서식지 분포 확률의 평균과 전체 밭 면적 중 지방자치단체의 실제 발면적의 비율을 곱하여 산출하였다. MaxEnt모형으로 예측된 가는털비름의 잠재서식지는 실제서식지와 유사하게 나타났으며 모델의 AUC 값 또한 0.711로 좋은 설명력을 지니는 것으로 분석되었다. 잠재서식지 비율이 가장 높게 나타난 지역은 광주광역시였고 격자 위험도 지수가 가장 높게 나타난 지역은 제주도였다. 지역 위험도 지수가 가장 높게 나타난 지역은 경상북도였다. 잠재 서식지 비율과 위험도 지수의 서로 다른 순위는 외래식물의 위험성을 예측할 때 잠재 서식지 비율만을 활용하여 외래식물의 위험성을 예측하는 것보다 외래식물이 부정적 영향을 주는 대상과 결합된 위험도 지수의 필요성을 제시한다. 또한 격자 위험도 지수, 지역 위험도 지수의 서로 다른 순위는 분석의 필요성에 따라서 다양한 평가 기법이 개발될 필요성을 보여준다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청의 공동연구사업(과제번호: PJ01253302)의 지원에 의해 수행되었음.

REFERENCES

- AAS. 2017. Agricultural area statistics. Statistics Korea. Daejeon, Korea. <http://kostat.go.kr/wsearch/search.jsp>. Assessed on 25 August 2017.
- Austin M. 2007. Species distribution models and ecological theory: A critical assessment and some possible new approaches. *Ecol. Model.* 200:1-19.
- Beaumont LJ, RV Gallagher, MR Leishman, L Hughes and PO Downey. 2014. How can knowledge of the climate niche inform the weed risk assessment process? A case study of *Chrysanthemoides monilifera* in Australia. *Divers. Distrib.* 20:613-625.
- Boria RA, LE Olson, SM Goodman and RA Anderson. 2014. Spatial filtering to reduce sampling bias can improve the performance of ecological niche models. *Ecol. Model.* 275: 73-77.

- Brown JL, JR Bennett and CM French. 2017. SDMtoolbox 2.0: the next generation Python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses. *PeerJ* 5:e4095.
- CBD. 2009. Invasive Alien Species: Convention on Biological Diversity. Convention on Biological Diversity. Montreal, Canada. pp. 6–9.
- Choi JY, SH Lee and SH Lee. 2015. Anticipation of the future suitable cultivation areas for Korean pines in Korean Peninsula with climate change. *J. Korean Env. Res. Tech.* 18:103–113.
- Chun JH and CB Lee. 2013. Assessing the effects of climate change on the geographic distribution of *Pinus densiflora* in Korea using ecological niche model. *Korean J. Agric. For. Meteorol.* 15:219–233.
- Costea M and D DeMason. 2001. Stem morphology and anatomy in *Amaranthus* L. (Amaranthaceae) taxonomic significance. *J. Torrey Bot. Soc.* 128:254–281.
- EGIS. 2017. Environmental Spatial Information Service. Ministry of Environment. Sejong, Korea. Available from URL: <http://egis.me.go.kr/atlas/list.do>. Accessed on 15 July 2017.
- 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.
- Fick SE and RJ Hijmans. 2017. Worldclim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* 37:4302–4315.
- Guisan A and W Thuiller. 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecol. Lett.* 8:993–1009.
- KNA. 2014. Korea Biodiversity Information System. Korea National Arboretum. <http://www.nature.go.kr>. Assessed on 22 January 2014.
- Lee SH, HC Jung and JY Choi. 2012. Projecting climate change impact on the potential distribution of endemic plants (*Megaleranthis saniculifolia*) in Korea. *J. Korean Env. Res. Tech.* 15:75–83.
- Lee SH, JY Choi and YM Lee. 2011. Projection of climate change effects on the potential distribution of *Abeliophyllum distichum* in Korea. *Korean J. Agri. Sci.* 38:219–225.
- Lee SH, KH Cho and WJ Lee. 2016a. Prediction of potential distributions of two invasive alien plants, *Paspalum distichum* and *Ambrosia artemisiifolia*, using species distribution model in Korean peninsula. *Ecol. Resil. Infrastruct.* 3:189–200.
- Lee YG, JH Sung, JH Chun and MY Shin. 2014. Effect of climate changes on the distribution of productive areas for *Quercus mongolica* in Korea. *J. Korean For. Soc.* 103:605–612.
- Lee YH, SH Hong, CS Na, IS Sohn, MH Kim, CS Kim and YJ Oh. 2016b. Predicting the suitable habitat of *Amaranthus viridis* based on climate change scenarios by MaxEnt. *Korean J. Environ. Biol.* 34:240–245.
- Lee YH, YJ Oh, SH Hong, CS Na, YE Na, CS Kim and IS Sohn. 2015. Predicting the suitable habitat of invasive alien plant *Conyza bonariensis* based on climate change scenarios. *J. Climate Change Res.* 6:243–248.
- Padalia H, V Srivastava and S Kushwaha. 2014. Modeling potential invasion range of alien invasive species, *Hyptis suaveolens* (L.) Poit. in India: Comparison of MaxEnt and GARP. *Ecol. Inform.* 22:36–43.
- Park HC, JC Lim, JH Lee and GG Lee. 2017. Predicting the potential distributions of invasive species using the landsat imagery and Maxent: focused on “*Ambrosia trifida* L. var. *trifida*” in Korean Demilitarized Zone. *J. Korean Env. Res. Tech.* 20:1–12.
- Park HC, JH Lee and GG Lee. 2014. Predicting the suitable habitat of the *Pinus pumila* under climate change. *J. Environ. Impact Assess.* 23:379–392.
- Park SH. 2009. New Illustration and Photographs of Naturalized Plants of Korea. Ilchokak Publishing, Seoul.
- Phillips SJ, RP Anderson and RE Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecol. Model.* 190:231–259.
- Pimentel D, L Lach, R Zuniga and D Morrison. 2000. Environmental and economic costs of nonindigenous species in the United States. *BioScience* 50:53–65.
- Pimentel D. 2002. Biological invasions: Economic and environmental costs of alien plant, animal, and microbe species. CRC press, Boca Raton, FL. p. 369.
- Qin Z, A DiTommaso, RS Wu and HY Huang. 2014. Potential distribution of two *Ambrosia* species in China under projected climate change. *Weed Res.* 54:520–531.
- Sheglovitova M and RP Anderson. 2013. Estimating optimal complexity for ecological niche models: a jackknife approach for species with small sample sizes. *Ecol. Model.* 269:9–17.
- Smolik MG, S Dullinger, F Essl, I Kleinbauer, M Leitner, J Peterseil, LM Stadler and G Vog. 2010. Integrating species distribution models and interacting particle systems to predict the spread of an invasive alien plant. *J. Biogeogr.* 37: 411–422.
- Stohlgren TJ, P Ma, S Kumar, M Rocca, JT Morisette, CS Jarnevich and N Benson. 2010. Ensemble habitat mapping of invasive plant species. *Risk Anal.* 30:224–235.
- Swets JA. 1988. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science* 240:1285–1293.
- Tereraï F and AR Wood. 2014. On the present and potential dis-

- tribution of *Ageratina adenophora* (Asteraceae) in South Africa. *S. Afr. J. Bot.* 95:152–158.
- Won JG, KS Jang, JE Hwang, OH Kwon, TY Kwon and BC Moon. 2012. Yield response of red pepper by densities of *D. ciliaris* and *A. patulus* in eco-friendly cultivated field. *Weed Turf. Sci.* 1:38–43.
- Youngah L, G Munisamy, C Samuel and H Michael. 2011. Predicting potential invasive species distribution: An application to New Zealand mudsnails in the Pacific Northwest. pp. 24–26. In *Proceedings of Agricultural & Applied Economic Association's 2011 AAEA & NAREA Joint Annual Meeting*. Pittsburgh, Pennsylvania.
- Zimmermann NE, TC Edwards Jr, CH Graham, PB Pearman and JC Svenning. 2010. New trends in species distribution modelling. *Ecography* 33:985–989.

Received: 11 December 2018

Revised: 19 December 2018

Revision accepted: 20 December 2018