

## 농업생태계 기후변화 지표식물 7종의 분포 특성과 기후변화에 따른 영향 예측

남형규 · 송영주 · 권순익 · 어진우 · 김명현\*

농촌진흥청 국립농업과학원

**Potential Changes in the Distribution of Seven Agricultural Indicator Plant Species in Response to Climate Change at Agroecosystem in South Korea.** Nam, Hyung-Kyu (0000-0002-9619-2478), Young-Ju Song (0000-0003-5590-6622), Soon-Ik Kwon (0000-0002-4882-0548), Jinu Eo (0000-0003-3577-9942) and Myung-Hyun Kim\* (0000-0002-5590-6622) (National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Republic of Korea)

**Abstract** This study was carried out to predict the current and future potential distribution and to identify the factors affecting potential distribution of 7 plants (*Lamium amplexicaule* L., *Trigonotis peduncularis* (Trevir.) Benth. ex Hemsl., *Capsella bursa-pastoris* (L.) L. W. Medicus, *Taraxacum officinale* Weber, *Veronica persica* Poir., *Conyza sumatrensis* E. Walker, *Hypochaeris radicata* L.) selected as indicators for climate change in agricultural ecosystem. We collected presence/absence data of 7 indicator plants at 108 sites in South Korea and applied the Maxent model. According to future climate scenario, the distribution area of *C. bursa-pastoris* (L.) L. W. Medicus, *T. officinale* Weber, and *V. persica* Poir. was expected to be reduced, but the distribution range was to be maintained. The distribution areas and range of the *C. sumatrensis* E. Walker and *H. radicata* L. were expected to be increased. The distribution area and range of *T. peduncularis* (Trevir.) Benth. Ex Hemsl. and *L. amplexicalue* L. were rapidly decreased. Non-climatic factors such as land cover and altitude were the most important environmental variable for *T. officinale* Weber, *C. bursa-pastoris* (L.) L.W.Medicus, *V. persica* Poir., *T. peduncularis* (Trevir.) Benth. Ex Hemsl., and *L. amplexicalue* L.. Climatic factors were the most important environmental variable for *C. sumatrensis* E. Walker and *H. radicata* L.. It is expected that the future potential distribution of 7 indicator plants response to climate change will be used to monitor and to establish the management plan.

**Key words:** agroecosystem, climate change, indicator plant, Maxent model, species distribution

### 서 론

기후변화와 생물의 분포에 관한 연구는 20세기 초반부터 시작했으며, 기후변화는 생물학에서 더 이상 새로운 주

제가 아니다(Parmesan, 2006; Rosenzweig *et al.*, 2008). 기후변화가 생물 종의 자연적인 분포 변화에 크게 영향을 미친다는 것은 생물지리학의 핵심 전제이며(Woodward, 1987; Huntley, 1999; Davis and Shaw, 2001), 기후변화로 인해 생태계에 미치는 영향을 조사한 많은 연구들에서 일관된 변화 패턴을 확인할 수 있다(Sparks and Menzel, 2002; Parmesan and Yohe, 2003; Root *et al.*, 2003). Ford (1945)는 영국에서 나비 종의 분포가 북상하여 확장하는 것을 확인했

Manuscript received 8 May 2018, revised 24 August 2018, revision accepted 28 August 2018  
\* Corresponding author: Tel: +82-63-238-2503, Fax: +82-63-238-3823, E-mail: wildflower72@korea.kr

으며, 이는 여름철 기온 상승과 관련 있다고 밝혔다. 또한 1930년대와 1940년대의 기후 온난화의 영향으로 아이슬란드나 핀란드, 영국의 조류 분포 범위가 북쪽으로 확장되기도 했다(Kalela, 1949; Harris, 1964). 최근 생물 종 분포 경향과 화석 기록을 통해 기후변화가 생물 종의 분포 범위를 확장하거나 축소하는 데 큰 영향을 미친다는 것을 확인하고 있다(Hughes, 2000; McCarty, 2001; Walther *et al.*, 2002).

기후변화가 심각한 문제로 인식되면서 전지구적으로 기후변화에 대응하기 위한 기후변화 협의체(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change)가 설립되었으며, 제40차 총회에서 채택된 제5차 기후변화평가보고서(Fifth Assessment Report)의 생태계 부분에서는 리스크 평가 및 적응에 대해 강조하였다(Noble *et al.*, 2014). 국외에서는 기후변화에 따른 생물이 받는 영향과 그 결과에 대한 연구들이 다양한 분류군에서 진행되었고 이러한 연구 결과를 근거로 생물종 특성에 따른 리스크를 평가하고 적응 대책을 수립하고 있다(Mawdsley *et al.*, 2009; Webster *et al.*, 2016; Alderman and Hobday, 2017). 우리나라 역시 정책적으로 다양한 분야에서 기후변화 대응에 관한 리스크 평가 및 적응 대책을 수립하고 관리하기 위한 체계로 전환하기 시작하였고(KEI, 2014), 기후변화와 관련한 생물의 반응에 관한 국내 연구들이 다양하게 진행되고 있다(Jo and Ahn, 2008; Yun *et al.*, 2011; Lee and Ahn, 2013; Hong *et al.*, 2015; Ahn *et al.*, 2016; Yeo *et al.*, 2017; Kim and Ki, 2018).

우리나라 농업분야에서도 기후변화에 의한 심각성을 인지하고 다양한 연구들이 수행되어 왔다. 농업분야에서 수행된 연구는 기후변화 평가 방법 개발에 관한 연구(Shin *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2013), 토양 유실에 관한 연구(Oh *et al.*, 2012), 농업용 저수지 수자원 변화에 관한 연구(Lee *et al.*, 2010), 작물 생산량이나 분포 범위 변화에 관한 연구(Chung *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2007; Kwak *et al.*, 2008; Shim *et al.*, 2011; Hwang *et al.*, 2012; Nam *et al.*, 2012) 등이 수행되었다. 대부분 작물의 생산량에 영향을 미치는 직·간접적인 요소들과 기후변화의 관련성에 관한 연구가 주를 이루었으며, 생태학적 관점에서의 농업 생태계와 기후변화에 관한 연구는 극히 미비하다(Lee *et al.*, 2008). 생태학적 관점에서의 폭 넓은 이해가 고려되어야 지속적인 농업생태계의 생물다양성 관리가 가능하다(Miguel, 1999). 따라서 기후변화에 따른 농업생태계의 변화 역시 생태학적 관점에서 접근이 필수적이다.

최근 우리나라 농업에서도 생태학적 관점에서 기후변화에 대한 현상을 이해하고, 효과적인 리스크 평가 및 적응대책 수립을 위해 농업생태계에서 확인되는 여러 생물 분류

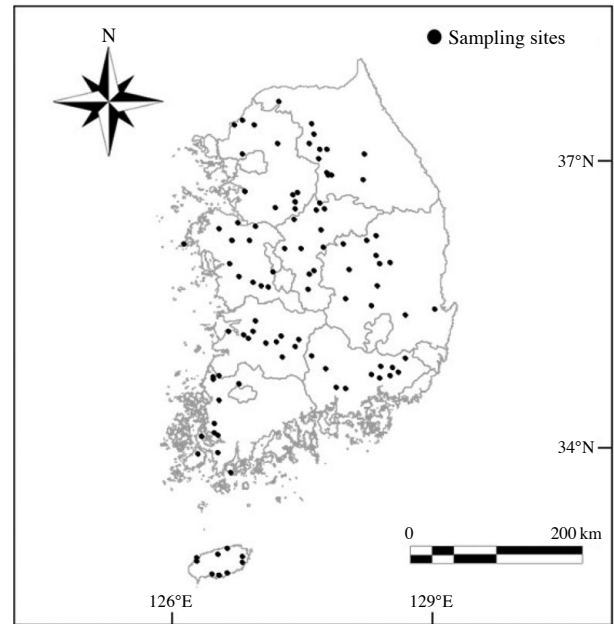


Fig. 1. Map of South Korea and sampling sites (black dots). The number of total sampling sites are 108.

군을 대상으로 연구들을 수행 중에 있으며, 기후변화에 민감한 농업생태계 내 지표생물을 여러 생물분류군에서 선정하는 연구를 수행하였다(NAAS, 2017). 본 연구는 선정된 여러 지표생물분류군들 중에서 식물을 대상으로 기후변화에 따른 분포 예측과 분포에 미치는 요인에 대해 확인하고자 수행되었다. 이를 통해 지표식물의 향후 모니터링 방향과 관리 계획 수립을 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

## 재료 및 방법

### 1. 농업생태계 기후변화 지표식물

농업생태계 기후변화 지표식물 선정은 전문가 자문회의를 통해 선정 기준을 설정하고, 그 기준에 따라 전문가 추천 57종을 선정하였다. 선정 기준은 (1) 기후 민감성(기후에 의해 생물 분포 범위 또는 개화시기와 같은 생물계절의 변화 특성이 뚜렷한 종), (2) 농업생태계 상징성(농업생태계에서 주요 기능군으로 역할을 하는 종), (3) 종 조사 용이성(야외에서 관찰이 용이하고 저비용으로 조사가 가능한 종), (4) 종 분류 용이성(일반인도 현장이나 실험실에서 동정이 가능한 종), (5) 대중성(사회적, 경제적, 문화적으로 중요하여 일반 대중들에게 잘 알려진 종)이다. 또한 문헌조사와 현장조사를 통해 전문가 추천종과 별개로 21종을 선정하였다. 전문가 추천과 조사(문헌 및 현장 조사)를 통해

**Table 1.** The candidacy and indicator species in relation to climate change according to field and literature survey and researcher recommendation in agroecosystem.

Family	Species	Field and literature survey	Researcher recommendation	Candidacy species	Indicator species
Aizoaceae	<i>Tetragonia tetragonoides</i> (Pall.) Kuntze	O			
Amaranthaceae	<i>Amaranthus spinosus</i> L.		O		
	<i>Amaranthus viridis</i> L.		O		
	<i>Achyranthes fauriei</i> H.Lév. & Vaniot		O		
Asclepiadaceae	<i>Metaplexis japonica</i> (Thunb.) Makino		O		
Boraginaceae	<i>Trigonotis peduncularis</i> (Trevir.) Benth. ex Hemsl.	O	O	O	O
Brassicaceae	<i>Raphanus sativus</i>		O		
	<i>Cardamine parviflora</i> L.		O		
Cannabaceae	<i>Humulus japonicus</i> Siebold & Zucc.		O		
Caryophyllaceae	<i>Arenaria serpyllifolia</i> L.	O			
	<i>Cerastium glomeratum</i> Thuill		O		
Chenopodiaceae	<i>Suaeda japonica</i> Makino		O		
	<i>Suaeda maritima</i> (L.) Dumort.		O		
Commelinaceae	<i>Commelina communis</i> L.		O		
Compositae	<i>Lapsanastrum apogonoides</i> (Maxim.) J.H.Pak & K.Bremer	O	O	O	
	<i>Aster tripolium</i> L.		O		
	<i>Coreopsis drummondii</i> (D.Don) Torr. & A.Gray		O		
	<i>Tagetes minuta</i> L.		O		
	<i>Hypochaeris radicata</i> L.	O	O	O	O
	<i>Taraxacum officinale</i> Weber	O	O	O	O
	<i>Gnaphalium calviceps</i> Fernald		O		
	<i>Conyza bonariensis</i> (L.) Cronquist	O	O	O	
	<i>Artemisia princeps</i> Pamp.		O		
	<i>Crassocephalum crepidioides</i> (Benth.) S.Moore		O		
Convolvulaceae	<i>Carduus crispus</i> L.		O		
	<i>Conyza sumatrensis</i> E.Walker	O	O		O
	<i>Sonchus asper</i> (L.) Hill		O		
Cruciferae	<i>Cuscuta pentagona</i> Engelm.		O		
Cucurbitaceae	<i>Draba nemorosa</i> L.		O		
	<i>Capsella bursa-pastoris</i> (L.) L.W.Medicus	O	O	O	O
Cyperaceae	<i>Sicyos angulatus</i> L.		O		
	<i>Melothria japonica</i> (Thunb.) Maxim.		O		
Cyperaceae	<i>Cyperus amuricus</i> Maxim.		O		
Equisetaceae	<i>Equisetum arvense</i> L.		O		
Euphorbiaceae	<i>Acalypha australis</i> L.		O		
	<i>Phyllanthus urinaria</i> L.		O	O	
Gramineae	<i>Eragrostis japonica</i> (Thunb.) Trin.	O	O	O	
	<i>Alopecurus aequalis</i> Sobol.		O		
	<i>Paspalum dilatatum</i> Poir.		O		
Iridaceae	<i>Alopecurus japonicus</i> Steud.	O			
	<i>Sisyrinchium angustifolium</i> Mill.		O		
Labiatae	<i>Lamium amplexicaule</i> L.	O	O	O	O
	<i>Lamium album</i> var. <i>barbatum</i> (Siebold & Zucc.) Franch. & Sav.	O			
	<i>Ajuga decumbens</i> Thunb.		O		
	<i>Lamium purpureum</i> L.		O		
Malvaceae	<i>Modiola caroliniana</i> (L.) G.Don		O		
Onagraceae	<i>Oenothera laciniata</i> Hill		O		
Papaveraceae	<i>Corydalis incisa</i> (Thunb.) Pers.		O		
Plantaginaceae	<i>Plantago major</i> f. <i>yezomaritima</i> (Koidz.) Ohwi		O		
	<i>Plantago asiatica</i> L.		O		
Polygonaceae	<i>Persicaria longiseta</i> (Bruijn) Kitag.		O		
	<i>Fallopia dumetorum</i> (L.) Holub		O		
	<i>Persicaria nepalensis</i> (Meisn.) H.Gross	O			

Table 1. Continued.

Family	Species	Field and literature survey	Researcher recommendation	Candidacy species	Indicator species
	<i>Rumex crispus</i> L.		O		
Pontederiaceae	<i>Monochoria vaginalis</i> var. <i>plantaginea</i> (Roxb.) Solms	O			
Primulaceae	<i>Anagallis arvensis</i> var. <i>caerulea</i> (L.) Gouan	O	O	O	
	<i>Lysimachia japonica</i> Thunb.	O	O	O	
Rosaceae	<i>Agrimonia pilosa</i> Ledeb.		O		
Rubiaceae	<i>Hedyotis diffusa</i> Willd.	O			
Scrophulariaceae	<i>Lindernia crustacea</i> (L.) F.Muell.		O		
	<i>Mazus pumilus</i> (Burm.f.) Steenis	O			
	<i>Veronica persica</i> Poir.	O	O	O	O
Solanaceae	<i>Solanum nigrum</i>		O		
	<i>Solanum carolinense</i> L.	O			
Spariganaceae	<i>Sparganium erectum</i> L.		O		
Umbelliferae	<i>Centella asiatica</i> (L.) Urb.		O		
No. of species		21	57	12	7

중복되는 12종을 후보종으로 확인하였다. 후보종을 대상으로 전문가 평가를 통하여 최종적으로 광대나물 *Lamium amplexicaule* L., 꽃마리 *Trigonotis peduncularis* (Trevir.) Benth. ex Hemsl, 냉이 *Capsella bursa-pastoris* (L.) L. W. Medicus, 서양민들레 *Taraxacum officinale* Weber, 큰개불알풀 *Veronica persica* Poir., 큰망초 *Conyza sumatrensis* E. Walker, 서양금혼초 *Hypochoeris radicata* L.와 같이 7종을 기후변화 지표식물로 선정하였다(Table 1).

## 2. 조사방법

2013년부터 2015년까지 전국을 대상으로 총 108개 지점(각 도별 12개 지점)을 무작위적으로 선정하고 각 조사 지점을 2회(5~6월, 8~9월) 방문하여 7종의 기후변화 지표식물의 분포 유무를 확인하였다. 조사 지점은 경작지인 밭, 논, 과수원을 대상으로 각각 36개 지점을 선정하였다. 지표식물 조사는 조사 지점을 중심으로 나타나는 농경지(밭, 논, 과수원)와 주변부(논둑, 밭둑)를 도별로 이동하면서 육안으로 출현 유무를 확인하였다. 식물명은 국가생물종지식정보시스템(www.nature.go.kr)의 국가표준식물목록을 기준으로 하였다.

## 3. 환경변수

중분포모형에 이용한 환경변수들은 크게 기후 인자(온도 및 강수량과 관련된 인자들), 고도, 경사도, 토지피복도였다. 기후 인자는 WorldClim에서 제공하는 자료를 이용하였으며(Hijmans *et al.*, 2006; 자료 출처: <http://www.worldclim.org>) (Table 2), 고도와 경사도는 온라인상에 제

Table 2. Environmental variables used to model the distribution of seven indicator plant species for climate change of agro-ecosystem in South Korea.

Code	Description
Altitude	Altitude (m)
Slope	Slope (°)
Land	Land cover
Bio1	Annual Mean Temperature (°C)
Bio2	Mean Diurnal Range (°C)
Bio3	Isothermality (Bio2/Bio7) (*100) (°C)
Bio4	Temperature Seasonality (°C)
Bio5	Max Temperature of Warmest Month (°C)
Bio6	Min Temperature of Coldest Month (°C)
Bio7	Temperature Annual Range (°C)
Bio8	Mean Temperature of Wettest Quarter (°C)
Bio9	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 (mm)
Bio16	Precipitation of Wettest Quarter (mm)
Bio17	Precipitation of Driest Quarter (mm)
Bio18	Precipitation of Warmest Quarter (mm)
Bio19	Precipitation of Coldest Quarter (mm)

공되는 SRTM (Shuttle Radar Topography) 자료를 이용하였다(자료 출처: [www2.jpl.nasa.gov/srtm/](http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/)). 미래 기후 시나리오 자료는 전 지구 기후 모델(GCMs; Global Climate Models)인 HadGEM2-AO 모형으로 예측된 2050년대의 기후 자료를 사용하였다(자료 출처: <http://www.worldclim.org>). 이 기후 예측 자료는 IPPC (Intergovernmental Panel

**Table 3.** Environmental variables (Mean  $\pm$  standard deviation) of seven indicator plant species for climate change based on their occurrence data. Differences among the seven species were tested using Kruskal-Wallis test. Pairwise comparisons were performed using Mann-Whitney U test by applying Bonferroni correction. The values with different letters are significantly different. Numbers in parentheses are sample size.

	LA (n = 37)	TP (n = 69)	CB (n = 89)	TO (n = 83)	VP (n = 65)	CS (n = 14)	HR (n = 11)	$\chi^2$	p-value
Altitude (m)	85.43 $\pm$ 73.26 (5~315)a	104.32 $\pm$ 94.87 (5~614)a	105.11 $\pm$ 109.19 (2~614)a	114.84 $\pm$ 113.36 (1~614)a	95.85 $\pm$ 103.27 (1~551)a	62.00 $\pm$ 58.8 (1~207)a	52.36 $\pm$ 61.32 (2~207)a	11.162	0.083
Slope (°)	2.16 $\pm$ 1.83 (0~7)a	2.00 $\pm$ 1.76 (0~8)a	1.92 $\pm$ 1.77 (0~8)a	1.92 $\pm$ 1.78 (0~8)a	1.89 $\pm$ 1.79 (0~7)a	1.79 $\pm$ 1.310 (0~4)a	1.36 $\pm$ 1.36 (0~4)a	1.8923	0.929
Land cover	Cropland (81.08%)	Cropland (75.36%)	Cropland (78.65%)	Cropland (75.90%)	Cropland (84.62%)	Cropland (85.71%)	Cropland (90.91%)	—	—
Bio1	12.9 $\pm$ 1.6 (10~15.8)c	11.9 $\pm$ 1.3 (8~15.8)c	12.3 $\pm$ 1.5 (8~15.8)bc	12.1 $\pm$ 1.4 (8~15.4)c	12.8 $\pm$ 1.5 (10.1~15.8)b	15 $\pm$ 0.7 (13.6~15.8)a	14.5 $\pm$ 0.6 (13.6~15.4)a	66.175	***
Bio2	9.7 $\pm$ 1.7 (6.6~11.6)a	10.7 $\pm$ 1.3 (6.6~12.3)a	10.4 $\pm$ 1.5 (6.6~12.3)ab	10.6 $\pm$ 1.4 (6.6~12.3)a	10 $\pm$ 1.7 (6.6~12.1)ab	7.2 $\pm$ 0.7 (6.6~9.1)c	7.7 $\pm$ 1.1 (6.6~9.4)c	61.774	***
Bio3	2.7 $\pm$ 0.2 (2.4~3.1)a	2.8 $\pm$ 0.2 (2.4~3.2)a	2.8 $\pm$ 0.2 (2.4~3.2)a	2.8 $\pm$ 0.2 (2.4~3.2)a	2.8 $\pm$ 0.2 (2.4~3.2)a	2.5 $\pm$ 0.1 (2.4~2.7)c	2.5 $\pm$ 0.1 (2.4~2.8)bc	43.068	***
Bio4	890.7 $\pm$ 105.5 (706.5~1029)a	955.7 $\pm$ 76 (701.4~1041.2)a	928.6 $\pm$ 90.8 (701.4~1041.2)ab	942.1 $\pm$ 80.6 (725.4~1041.2)a	897.1 $\pm$ 93.2 (701.4~1029)b	744.9 $\pm$ 58.4 (701.4~891.1)c	782.8 $\pm$ 63.4 (725.4~889.1)c	68.389	***
Bio5	29.7 $\pm$ 0.5 (28~30.5)a	29.7 $\pm$ 0.7 (25.6~30.6)a	29.7 $\pm$ 0.7 (25.6~30.7)a	29.6 $\pm$ 0.7 (25.6~30.7)a	29.8 $\pm$ 0.6 (28~30.7)a	29.5 $\pm$ 0.5 (28.6~30.5)a	29.7 $\pm$ 0.6 (28.6~30.5)a	5.6911	0.459
Bio6	-4.9 $\pm$ 4.3 (-10.7~2.5)c	-7.6 $\pm$ 3.2 (-12.4~2.4)c	-6.6 $\pm$ 3.8 (-12.4~2.5)bc	-7.2 $\pm$ 3.4 (-12.4~2.2)c	-5.2 $\pm$ 3.8 (-10.5~2.5)b	1.1 $\pm$ 1.9 (-3.4~2.5)a	-0.1 $\pm$ 2.2 (-3.4~2.2)a	70.557	***
Bio7	34.6 $\pm$ 4.4 (27~40.1)a	37.3 $\pm$ 3.1 (27~41.2)a	36.2 $\pm$ 3.7 (27~41.2)ab	36.8 $\pm$ 3.3 (27.3~41.2)a	35 $\pm$ 3.9 (27~40.1)b	28.4 $\pm$ 2.2 (27~33.8)c	29.8 $\pm$ 2.7 (27~33.7)c	70.536	***
Bio8	23.9 $\pm$ 0.7 (21.5~25.2)b	23.5 $\pm$ 0.8 (19.5~24.7)b	23.6 $\pm$ 0.9 (19.5~25.2)ab	23.5 $\pm$ 0.9 (19.5~25.2)ab	23.9 $\pm$ 0.7 (21.8~25.2)ab	24.2 $\pm$ 0.5 (23.4~25.2)a	24.3 $\pm$ 0.5 (23.4~25.2)a	28.049	***
Bio9	2 $\pm$ 4.7 (-3.2~12.8)c	-0.7 $\pm$ 2.8 (-5.2~9.1)c	0.4 $\pm$ 3.9 (-5.2~12.8)bc	-0.2 $\pm$ 3.4 (-5.2~12.8)c	1.7 $\pm$ 4.1 (-3~12.8)b	8.4 $\pm$ 3.2 (2~12.8)a	6.5 $\pm$ 3.8 (2~12.8)a	67.33	***
Bio10	24.1 $\pm$ 0.6 (22.1~25.2)c	23.8 $\pm$ 0.7 (20.1~25.1)c	23.9 $\pm$ 0.8 (20.1~25.2)c	23.8 $\pm$ 0.8 (20.1~25.2)c	24.1 $\pm$ 0.7 (21.8~25.2)bc	24.7 $\pm$ 0.4 (24~25.2)a	24.6 $\pm$ 0.3 (24~25.2)ab	45.518	***
Bio11	1.2 $\pm$ 3.2 (-3.2~6.9)c	-0.8 $\pm$ 2.4 (-5.2~6.9)c	0 $\pm$ 2.9 (-5.2~6.9)bc	-0.5 $\pm$ 2.6 (-5.2~6.2)c	1 $\pm$ 2.9 (-3~6.9)b	5.5 $\pm$ 1.5 (2~6.9)a	4.5 $\pm$ 1.5 (2~6.2)a	68.741	***
Bio12	1324.1 $\pm$ 167.6 (1146~1795)a	1268.1 $\pm$ 109.4 (1042~1657)a	1296.1 $\pm$ 143.7 (1042~1795)a	1276.6 $\pm$ 127.7 (1001~1795)a	1310.9 $\pm$ 162.9 (1057~1795)a	1504.1 $\pm$ 231.1 (1162~1795)a	1363.7 $\pm$ 256.6 (1146~1795)a	9.6657	0.14
Bio13	276.2 $\pm$ 55.4 (180~454)a	298.4 $\pm$ 49.6 (201~454)a	290.2 $\pm$ 53.5 (180~454)a	292.6 $\pm$ 52.7 (180~454)a	274.3 $\pm$ 42.2 (180~417)ab	240.4 $\pm$ 31.8 (180~282)b	226.4 $\pm$ 36 (180~282)b	40.183	***
Bio14	31.3 $\pm$ 9.1 (19~50)c	26.1 $\pm$ 6.4 (16~46)c	28 $\pm$ 7.9 (16~50)bc	27.0 $\pm$ 7.0 (16~50)bc	30 $\pm$ 8.4 (20~50)b	42.7 $\pm$ 6.5 (29~50)a	39.1 $\pm$ 7.7 (30~50)a	53.766	***

Table 3. Continued.

	LA (n = 37)	TP (n = 69)	CB (n = 89)	TO (n = 83)	VP (n = 65)	CS (n = 14)	HR (n = 11)	$\chi^2$	p-value
Bio15	72.2 ± 13.8 (50 ~ 104)a	80.7 ± 10.9 (53 ~ 105)a	77.3 ± 12.8 (50 ~ 105)ab	78.8 ± 11.7 (50 ~ 105)a	72.8 ± 11.5 (50 ~ 98)b	55.4 ± 5.1 (50 ~ 65)c	57.5 ± 5.5 (50 ~ 65)c	68.813	***
Bio16	683.1 ± 87.2 (497 ~ 912)a	698.9 ± 74.6 (545 ~ 912)a	696.3 ± 85.7 (497 ~ 912)a	694.6 ± 83.7 (497 ~ 912)a	680.5 ± 76 (497 ~ 872)a	674.9 ± 101.7 (497 ~ 804)a	625.5 ± 111.9 (497 ~ 804)a	7.0421	0.317
Bio17	111.8 ± 37 (69 ~ 197)c	90.9 ± 23.4 (62 ~ 181)c	98.9 ± 30.4 (62 ~ 197)bc	94.7 ± 25.5 (62 ~ 197)bc	107.7 ± 33.1 (68 ~ 197)b	163.3 ± 30.2 (111 ~ 197)a	145.8 ± 35.1 (111 ~ 197)a	62.861	***
Bio18	668 ± 85.1 (497 ~ 894)a	687.8 ± 72.7 (519 ~ 894)a	684.5 ± 83.1 (497 ~ 894)a	684 ± 81.2 (497 ~ 894)a	667.1 ± 75.4 (497 ~ 859)a	633.4 ± 83.5 (497 ~ 759)a	602.1 ± 100.3 (497 ~ 759)a	14.526	0.024
Bio19	112.6 ± 38.5 (69 ~ 204)c	91 ± 23.5 (62 ~ 182)c	99.4 ± 31.3 (62 ~ 204)bc	95.1 ± 26.4 (62 ~ 204)bc	108.4 ± 34.1 (68 ~ 204)b	165.9 ± 31.1 (111 ~ 204)a	148.1 ± 37.2 (111 ~ 204)a	63.233	***

\*\*\*p &lt; 0.001

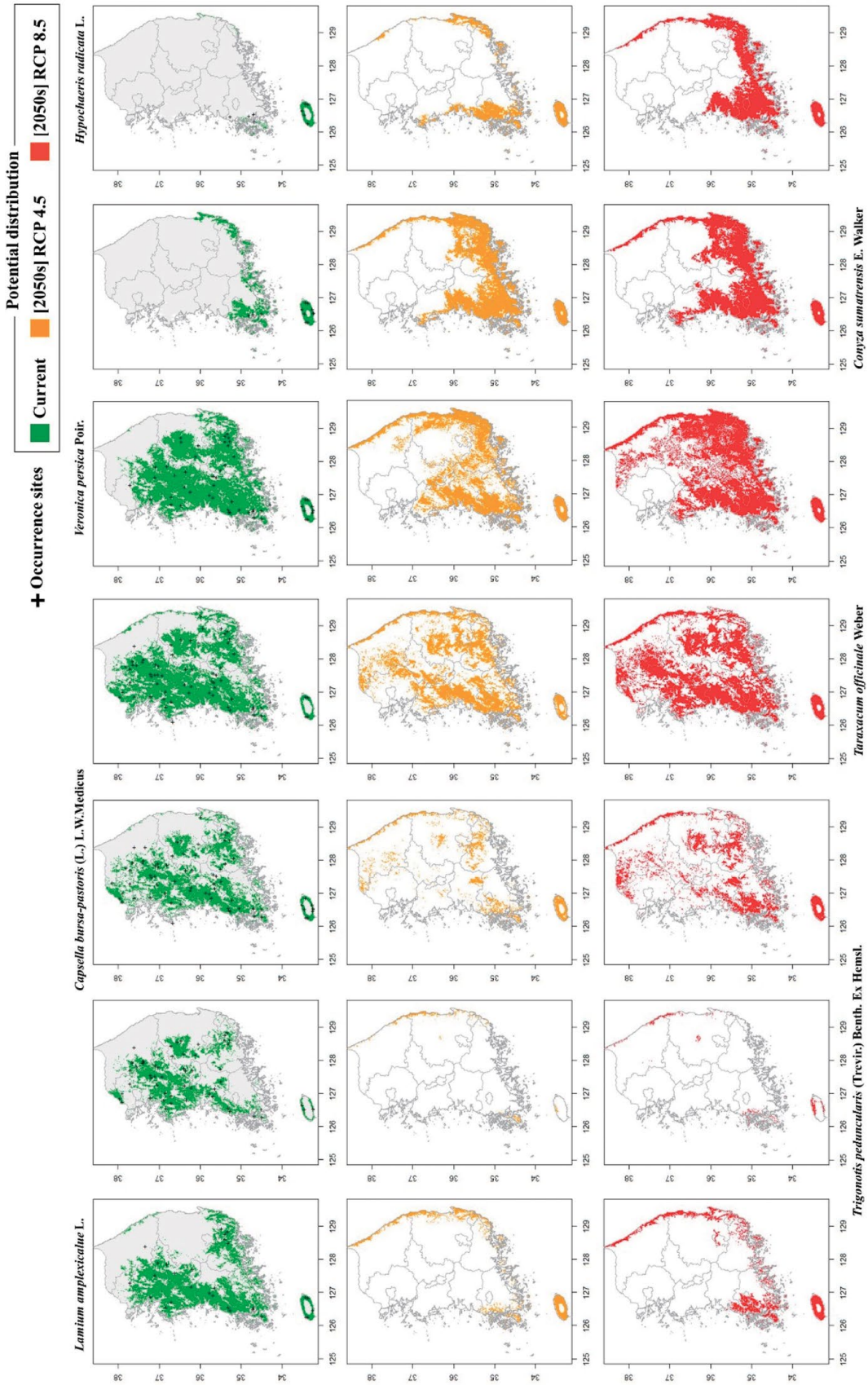
LA: *Lamium amplexicaule* L., TP: *Trigonotis peduncularis* (Trevir.) Benth. ex Hemsl, CB: *Capsella bursa-pastoris* (L.) L. W. Medicus, TO: *Taraxacum officinale* Weber, VP: *Veronica persica* Poir., CS: *Coryza sumatrensis* E. Walker, HR: *Hypochoeris radicata* L.  
See Table 2 for definition of environmental variables.

on Climate Change) 5차 평가 보고에서 사용한 기후변화 시나리오에 기반을 두고 있다 (Edenhofer *et al.*, 2014). 본 연구에서는 온실가스 저감 정책이 상당히 실행되는 경우 (RCP 4.5)와 현 추세로 온실가스가 배출되는 경우 (RCP 8.5)를 선택하여 2050년대의 잠재적인 분포 범위를 예측 하였다. 토지피복도는 GLC 2000 (Global Land cover 2000 Project)으로부터 얻은 31개의 범주로 나누어진 토지 피복 자료를 이용하였다 (자료 출처: <http://bioval.jrc.ec.europa.eu/products/glc2000/products.php>). 대부분의 조사 지점은 경작지가 75% 이상으로 확인되었다 (반경 500 m). 모든 변수의 공간 해상도는 1 km로 동일하게 통일시켰다.

#### 4. 분석방법

농업생태계 기후변화 지표식물의 실제 출현 지점에서 환경요인을 추출한 후 환경 변수의 특성을 종별로 확인 하였다. 추출된 환경 변수의 중간 차이를 확인하기 위해 Kruskal-Wallis test를 수행하였고 사후검증으로 Bonferroni 보정을 적용한 Mann-Whitney U test를 실시하였다. 지표 식물의 잠재적 분포 예측은 Maxent 모형을 통해 확인하였다 (Version 3.4.1; Phillips *et al.*, 2017). Maxent 모형은 기계식 학습 모형의 하나로 출현 자료만을 활용하여 출현 확률을 예측하기 때문에 적은 표본 수에도 예측력이 높다 (Hernandez *et al.*, 2006; Wisz *et al.*, 2008). 지표식물의 실제 출현 자료를 종속변수로, 22개의 현시점의 환경변수들과 미래 기후 시나리오상의 환경변수들을 독립변수로 이용하여 Maxent 모형을 구축하였다 (Table 2). 각각의 모델은 10회의 교차 검증을 수행하였으며, 무작위적으로 선택된 1,000개의 지점 중에서 출현 자료의 75%는 training으로 25%는 testing으로 분할하였다. 모형의 정확성 검증은 ROC (Receiver Operating Characteristics) 검증을 통해 곡선의 하부 면적 값인 AUC (Area Under the Curve) 값을 이용하여 측정하였다. AUC 값은 0에서 1까지 범위로 1에 가까울수록 성공적으로 모형이 예측되었다는 것을 의미하며, 0.75 이상일 경우 분포 지역을 예측하는 데 유용하다고 볼 수 있다 (Elith, 2000). 지표식물이 분포하는 지점에서의 환경변수들의 기여도는 쥘나이프 테스트의 결과 확인되는 평균 기여율 (average percent distribution)로 결정하였다. 예측된 확률분포에서 확인된 임계값 (threshold) 이상의 지역을 최종적인 잠재적인 분포 지역으로 선정하였다 (Pearson *et al.*, 2007).

모든 분석은 R 통계 프로그램 (버전 3.4.3)을 이용하였고 (R Development Core Team, 2017), 출현지점에서의 환경요인 추출은 raster package (Hijman *et al.*, 2017), 종 분포



**Fig. 2.** Distribution map of seven indicator plant species for climate change of agroecosystem in South Korea. Predicted range of the seven indicator plant species under current (green) and future (yellow and red) climate scenarios. The prediction ranges are more than the threshold value. Future predictions are based on two climate change scenarios, RCP 4.5 and RCP 8. Plus sign indicates occurrence site.

모형 분석은 Maxent (version 3.4.1)를 통계프로그램인 R에 탑재하여 dismo package (Hijman *et al.*, 2017)와 함께 구동하여 분석을 수행하였다.

## 결 과

### 1. 지표식물 분포 특성

108개 조사지점에서 7종의 지표식물의 분포를 확인한 결과 광대나물, 꽃마리, 냉이, 서양민들레, 큰개불알풀 5종은 각각 83개 지점(출현율: 76.85%), 89개 지점(82.41%), 65개 지점(60.19%), 69개 지점(63.89%), 37개 지점(34.26%)에서 출현했으며, 대부분이 전국에 걸쳐 넓게 분포하는 특성을 확인할 수 있었다(Table 3 and Fig. 2). 그에 반해, 큰망초와 서양금혼초는 각각 14개 지점(12.96%), 11개 지점(10.19%)에서 출현했고, 제주도과 한반도 남부 일부지역(주로 전라남도 서해안에 인접한 지역)에서만 출현하는 특성을 확인할 수 있었다(Table 3 and Fig. 2).

### 2. 지표식물 서식 환경 특성

연평균기온 (Bio1), 평균일교차 (Bio2), 기온의 계절성 (Bio4), 평균연교차 (Bio7), 최저강수분기의 평균기온 (Bio9), 최한랭분기의 평균기온 (Bio11), 강수량의 계절성 (Bio15)은 큰망초와 서양금혼초 2종, 꽃마리, 서양민들레 2종, 나머지 3종 간에 서로 차이가 있었다(Table 3). 고도 (Altitude), 경사도 (Slope), 최한월의 최고기온 (Bio5), 연평균강수량 (Bio12), 최고강수분기의 강수량 (Bio16), 최온난분기의 강수량 (Bio18)에서는 모든 종에서 차이가 없었다(Table 3).

### 3. 종 분포 모형

기후, 고도, 경사도, 토지피복도와 같은 환경변수를 이용한 7종의 기후변화 지표식물의 종 분포 모형의 교차검증

에 의한 모델링 결과 AUC 값은 광대나물이 0.989, 꽃마리가 0.903, 냉이가 0.775, 서양민들레가 0.739, 큰개불알풀이 0.764, 큰망초가 0.963, 서양금혼초가 0.809로 나타났다(Table 4). Maxent 모형에서 분석된 큰망초를 제외한 나머지 6종의 지표식물은 실제 분포 지역과 유사한 것을 확인할 수 있다(Fig. 2). 큰망초의 경우 실제 분포 지역은 전라남도 서해안에 인접한 지역에서만 나타났지만 잠재적인 분포 예측에서는 전라남도 남해안, 경상남도 남해안, 경상북도 동해안에 인접한 지역까지 넓게 분포할 것으로 예측되었다(Fig. 2).

모형에서 높은 기여도를 나타낸 상위 5개의 변수를 살펴보면 토지피복도(Land cover)가 6종에서 중요한 인자로 나타났고, 최한월의 최저기온(Bio6)이 5종, 고도(Altitude)가 4종, 평균일교차(Bio2)가 4종, 최한월의 최고기온(Bio5)이 4종, 평균연교차(Bio7)가 4종으로 나타났다(Table 4). 종 분포 모형에서 확인된 전국적으로 넓게 분포하는 종인 광대나물, 꽃마리, 냉이, 서양민들레, 큰개불알풀 5종은 토지피복도나 고도가 높은 기여도를 나타냈고, 남부지역에 제한적으로 나타나는 큰망초와 서양금혼초 2종은 평균연교차(Bio7), 최한월의 최저 기온(Bio6), 최온난분기의 평균기온(Bio10), 강수량의 계절성(Bio15)이 높은 기여도를 나타냈다(Table 4).

미래 기후 시나리오 RCP 4.5와 8.5를 적용하여 2050년대의 한반도 농업생태계 기후변화 지표식물 7종에 대한 잠재적인 분포 지역을 살펴보면 냉이, 서양민들레와 큰개불알풀 3종의 경우 일부 분포 지역이 줄어들기는 하지만 전국적인 분포를 유지하고 있고(냉이, RCP 4.5: 72.60% 감소, RCP 8.5: 41.58% 감소, 서양민들레, RCP 4.5: 31.93% 감소, RCP 8.5: 4.59% 감소, 개불알풀, RCP 4.5: 34.82% 감소, RCP 8.5: 4.77% 감소), 큰망초와 서양금혼초 2종은 남부지역에서 점점 분포 면적이 북쪽으로 증가하는 것으로 예측되었다(큰망초, RCP 4.5: 238.68% 증가, RCP 8.5: 284.77% 증가, 서양금혼초, RCP 4.5: 472.98% 증가, RCP 8.5: 1127.15% 증

**Table 4.** Evaluation statistics and relative contribution of different environmental variables to Maxent model among seven indicator plant species for climate change of agroecosystem in South Korea.

Species	AUC	Threshold	Contributed variable		
			1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>
<i>Lamium amplexicaule</i> L.	0.809	0.333	Altitude (30.3%)	Land (22.2%)	Bio9 (12.8%)
<i>Trigonotis peduncularis</i> (Trevir.) Benth. ex Hemsl	0.903	0.533	Land (26.6%)	Altitude (21.6%)	Bio7 (19.4%)
<i>Capsella bursa-pastoris</i> (L.) L. W. Medicus	0.775	0.040	Land (34.1%)	Altitude (16.7%)	Bio6 (13.6%)
<i>Taraxacum officinale</i> Weber	0.739	0.310	Altitude (25.7%)	Land (23.4%)	Bio2 (16.4%)
<i>Veronica persica</i> Poir.	0.764	0.212	Bio1 (24.4%)	Land (21.1%)	Bio6 (19.6%)
<i>Conyza sumatrensis</i> E. Walker	0.963	0.027	Bio7 (65.7%)	Bio6 (11.0%)	Bio10 (5.8%)
<i>Hypochoeris radicata</i> L.	0.989	0.518	Bio7 (38.3%)	Bio6 (19.7%)	Bio15 (10.0%)



가). 광대나물, 꽃마리 2종은 분포 면적이 급격히 줄어들어 국지적으로 분포하거나 해안가 인접한 지역에만 분포하는 것으로 예측되었다(광대나물, RCP 4.5: 79.51% 감소, RCP 8.5: 68.06% 감소, 꽃마리, RCP 4.5: 92.23% 감소, RCP 8.5: 94.02% 감소).

## 고 찰

농업생태계 기후변화 지표식물 7종을 대상으로 현재 기후와 미래 기후 시나리오를 통한 분포를 예측했을 때 중별 다양한 분포 특성이 나타났다. 현재 기후에서는 광대나물, 꽃마리, 냉이, 서양민들레, 큰개불알풀은 전국적으로 분포하는 종으로 예측되었고, 큰망초, 서양금혼초는 남부 일부 지역에서만 분포하는 종으로 예측되었다. 이들을 대상으로 미래 기후 시나리오를 통한 분포를 예측했을 때, 전국적으로 분포하는 종은 다시 서양민들레와 큰개불알풀과 같이 전국적인 분포를 유지할 것으로 예측되는 그룹과 광대나물, 꽃마리, 냉이와 같이 분포 지역이 급격히 줄어들 것으로 예측되는 그룹으로 나누어졌고, 남부 일부지역에서만 분포했던 큰망초와 서양금혼초는 분포가 복잡하면서 분포 범위가 내륙으로 확대될 것으로 예측되는 그룹으로 나누어졌다. 미래 기후 시나리오를 통한 농업생태계 기후변화 지표식물 7종의 분포의 형태는 (1) 그대로 유지되는 형태, (2) 축소되는 형태, (3) 확대되는 형태와 같이 3가지 형태의 미래 분포 패턴을 보일 것으로 예측되었다.

현재 기후에서 전국적으로 분포하는 광대나물, 꽃마리, 냉이, 서양민들레, 큰개불알풀과 같은 기후변화 지표식물 5종들의 분포를 결정하는 인자는 기후인자보다 토지피복도나 고도와 같은 비기후인자가 상대적으로 중요도가 큰 것으로 확인되었다. 이는 5종들은 전국에 걸쳐 분포하고 있기 때문에 생육 온도 범위가 현재 한반도의 기후 범위에 포함되어 기후인자의 중요도가 비기후인자에 비해 상대적으로 낮게 나타난 것으로 판단된다. 토지피복도는 인간의 활동이 반영된 자료의 형태로 생물다양성 및 생물의 분포에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Turner, 1994; Lee *et al.*, 2010; Jung *et al.*, 2013; Samie *et al.*, 2017). 본 연구에서 전국적으로 분포할 것으로 예측된 지표식물 5종은 모두 경작지가 넓게 발달한 지역에서 관찰되었고 이러한 지역은 농업인의 활동에 의해 지표식물이 충분히 분포에 영향을 받을 수 있을 것으로 판단된다.

잠재적인 분포 범위가 남부지역으로 예측된 큰망초와 서양금혼초는 온도와 관련된 기후인자들이 분포를 결정하는 요인으로 확인되었다. 특히 최한월의 최저기온(Bio6)은

식물의 분포를 결정하는 중요한 요소라고 잘 알려져 있다(Sakai and Weiser, 1973; Larcher, 1983; Woodward, 1991). 본 연구에서도 기후변화 지표식물들의 잠재적인 분포에 영향을 미치는 중요한 요인으로 확인되어 기존의 연구결과를 뒷받침하고 있다. 농업생태계 기후변화 지표식물 7종의 현재 분포 예측에 영향을 미친 기후인자들의 중요도를 확인해 보면, 강수량과 관련된 기후인자들보다는 온도와 관련된 기후인자들의 영향이 뚜렷이 나타났다. 일반적으로 강수량보다 온도가 식물의 특성(traits)을 결정하는 중요한 요소로 알려져 있다(Reich and Oleksyn, 2004; Swenson and Enquist, 2007). 식물의 특성은 생태적 지위와 내성 범위를 결정하여 결국 실제 분포에 제한 요소로 작용한다(Thuiller *et al.*, 2004). 본 연구에서 온도와 관련된 기후 인자들 역시 지표식물 7종의 분포의 제한 요소로 충분히 작용하는 것으로 판단된다.

지표식물의 중별 다양한 미래 분포 형태는 기후변화로 인한 지표식물의 다양한 반응이 나타날 수도 있음을 의미한다(Bakkenes *et al.*, 2002; Kelly and Goulden, 2008). 기후변화에 따른 지표식물의 분포 특성은 농업생태계의 기후변화 모니터링 시에 충분히 고려해볼 사항으로 판단된다. 분포 범위가 증가할 것으로 예측된 큰망초와 서양금혼초는 서해안과 동해안으로 분포 범위가 복잡해지는지, 전라남도, 경상남도 내륙지역으로 분포 범위가 확대되는지 여부를 중점적으로 모니터링해야 하며, 분포 범위가 감소할 것으로 예측된 광대나물, 꽃마리의 경우 경기도와 충청남도를 중심으로 분포 범위가 감소하는지 여부를 중점적으로 모니터링해야 한다. 분포 범위가 그대로 유지되는 냉이, 서양민들레, 큰개불알풀의 경우 분포 범위의 변화보다 개화시기의 변화를 중점적으로 모니터링해야 한다. 이러한 다각적인 지표식물의 반응을 모니터링할 경우 기후변화에 따른 지표식물종의 변화를 명확히 확인할 수 있을 것으로 기대된다.

일반적으로 식물분류군에서 기후변화에 대한 연구는 특정 기후대에만 제한적으로 분포하는 종을 대상으로 진행하는 경우가 많다(Grabherr *et al.*, 1994; Pauli *et al.*, 1996; Gottfried *et al.*, 1998; Calanca, 2007; Wipf *et al.*, 2009; Buytaert *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2011). 그러나 본 연구에서는 우리나라를 포함하여 전세계적으로 흔히 관찰되는 7종의 식물을 대상으로 기후변화의 영향을 확인하였다(Weber and Gut, 2005; Balezentiene, 2011; Cho *et al.*, 2013). 농업생태계에서 흔히 관찰되는 종들의 분포 변화를 종합적으로 평가하여 기후변화의 영향을 예측하였다.

본 연구에서 농업생태계 기후변화 지표식물 연구의 목적으로 수행되었기 때문에 경작지가 우점하는 지역이 주요 조사지역으로 선정되었다. 따라서 지표식물 7종의 한반

도 전체 분포에 대한 설명으로는 제한적이다. 또한 활용한 미래 기후 시나리오는 현 시점의 토지 이용 형태가 동일하다는 전제로 미래 분포를 예측했으며, 구체적인 한반도 기후시나리오가 아닌 전지구적인 시나리오를 적용했기 때문에 미래 예측의 한계를 가진다. 뿐만 아니라 실제 식물의 분포 범위의 변화와 관련 있는 새로운 지역에서의 성공적인 정착은 상당히 복잡한 요인들에 의해 결정되기 때문에(Grime, 1993; Solomon and Cramer, 1993; Dyer, 1995) 농업생태계 기후변화 지표식물 7종의 정확한 미래 예측에는 한계가 있다. 좀 더 구체적인 모니터링 및 관리 계획 설정을 위해서 향후 지표식물 7종의 실제 조사 지점을 추가하여 조사할 필요가 있으며 한반도 세부 시나리오 적용을 통한 모델 검증이 필요하다. 그러나 본 연구는 예측을 통해 하나의 가능성을 시사하고 있다는 측면에서 의의를 가지며, 지표식물의 모니터링 및 관리 계획 설정에 충분히 고려해 볼만한 것으로 기대된다.

## 적 요

본 연구는 농업생태계 기후변화 지표식물의 현재와 미래의 분포 특성을 예측하고 분포에 영향을 미치는 요인을 파악하고자 수행되었다. 전국을 대상으로 총 108개 지점에서 지표식물 7종(광대나물, 꽃마리, 냉이, 서양민들레, 큰개불알풀, 큰망초, 서양금혼초)의 실제 분포 유무 자료를 수집하고 Maxent 모형을 적용하여 현재와 기후시나리오에 따른 미래의 잠재적 분포를 예측하였다. 기후변화에 따른 미래 분포 예측에서 냉이, 서양민들레, 큰개불알풀 3종은 전체 분포 면적은 감소하였지만 분포 범위는 그대로 유지되는 것으로 예측되었고, 큰망초와 서양금혼초 2종은 분포 면적과 범위가 모두 확대되는 것으로 예측되었다. 광대나물과 꽃마리 2종은 분포 면적이 급격히 줄어들어 국지적으로 분포하거나 일부 해안가에만 나타나는 것으로 예측되었다. 광대나물, 꽃마리, 냉이, 서양민들레, 큰개불알풀의 경우 토지피복도나 고도와 같은 비기후인자가 상대적으로 중요한 것으로 나타났고 큰망초와 서양금혼초는 기후인자가 중요한 것으로 확인되었다. 이와 같은 기후변화 지표식물의 분포 예측 특성은 향후 지표식물의 모니터링 방향과 관리 계획 설정에 활용될 것으로 기대된다.

## 사 사

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ01346301)의 지원에 의해 이루어진 것임.

## REFERENCES

- Ahn, K.H., Y.H. You and K.T. Cho. 2016. Growth response to light, moisture and nutrients for the conservation measures of *Bupleurum latissimum* (Apoaceae, endangered species) under future climate environment (elevated CO<sub>2</sub> concentration and temperature). *Korean Journal of Environment and Ecology* **30**(5): 803-809.
- Alderman, R. and A.J. Hobday. 2017. Developing a climate adaptation strategy for vulnerable seabirds based on prioritization of intervention options. *Deep-Sea Research Part II* **140**: 290-297.
- Altieri, M.A. 1999. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture Ecosystem and Environment* **74**: 19-31.
- Bakkenes, M., J.R.M. Alkemade, F. Ihle, R. Leemans and J.B. Latour. 2002. Assessing effects of forecasted climate change on the diversity and distribution of European higher plants for 2050. *Global Change Biology* **8**: 390-407.
- Balezientiene, L. 2011. Alpha-diversity of differently managed agro-ecosystems assessed at a habitat scale. *Polish Journal of Environmental Studies* **20**(6): 1387-1394.
- Buytaert, W., F. Cuesta-Camacho and C. Tobón. 2011. Potential impacts of climate change on the environmental services of humid tropical alpine regions. *Global Ecology and Biogeography* **20**(1): 19-33.
- Calanca, P. 2007. Climate change and drought occurrence in the Alpine region: How severe are becoming the extremes?. *Global and Planetary Change* **57**(1-2): 151-160.
- Cho, K.J., Y.J. Oh, K.K. Kang, M.S. Han, Y.E. Na, M. Kim, L.J. Choe and M.H. Kim. 2013. Occurrence and distribution of C4 Plants under diverse agricultural field types in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **15**(2): 85-101.
- Chung, U., K.S. Cho and B.W. Lee. 2006. Evaluation of site-specific potential for rice production in Korea under the changing climate. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **8**(4): 229-241.
- Davis, M.B. and R.G. Shaw. 2001. Range shifts and adaptive responses to Quaternary climate change. *Science* **292**(5517): 673-679.
- Dyer, J.M. 1995. Assessment of climatic warming using a model of forest species migration. *Ecological Modelling* **79**: 199-219.
- Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Frahani, S. Kadner, K. Seyboth, K. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx. 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.

- Elith, J. 2000. Quantitative methods for modeling species habitat: Comparative performance and an application to Australian plants, p. 39-58. *In: Quantitative Methods for Conservation Biology* (Ferson, S. and M. Burgman eds.). Springer, New York, USA.
- Ford, E.B. 1945. Butterflies. London: Collins.
- Gottfried, M., H. Pauli and G. Grabherr. 1998. Prediction of vegetation patterns at the limits of plant life: A new view of the alpine-nival ecotone. *Arctic and Alpine Research* **30**(3): 207-221.
- Grabherr, G., M. Gottfried and H. Pauli. 1994. Climate effects on mountain plants. *Nature* **369**: 448.
- Grime, J.P. 1993. Vegetation functional classification system as approaches to predicting and quantifying global vegetation change, p. 293-305. *In: Vegetation Dynamics Modelling and Global Change* (Shugart, H.H. and A.M. Solomon eds.). Chapman and Hall, London.
- Harris, G. 1964. Climatic changes since 1860 affecting European birds. *Weather* **19**(3): 70-79.
- Hernandez, P.A., C.H. Graham, L.L. Master and D.L. Albert. 2006. The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modelling methods. *Ecography* **29**(5): 773-385.
- Hijman, R.J., J. van Etten, J. Cheng, M. Mattiuzzi, M. Summer, J.A. Greenberg, O.P. Lamigueiro, A. Bevan, E.B. Racine, A. Shortridge and A. Ghosh. 2017. The raster Package: Geographic data analysis and modeling, version 2.6-7.
- Hijman, R.J., S.E. Cameron, J.L. Parra, P.G. Jones and A. Jarvis. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* **25**(15): 1965-1978.
- Hijmans, R.J., S. Phillips, J. Leathwick and J. Elith. 2017. The dismo Package: Species distribution modeling, version 1.1-4.
- Hong, M.J., W.S. Lee and J.C. Yoo. 2015. Effects of weather change, human disturbance and interspecific competition on life-history and migration of wintering Red-crowned cranes. *Korean Journal of Environment and Ecology* **29**(5): 681-692.
- Hughes, L. 2000. Biological consequences of global warming: is the signal already apparent?. *Trends in Ecology and Evolution* **15**(2): 56-61.
- Huntley, B. 1999. Species distribution and environmental change: considerations from the site to the landscape scale, p. 115-130. *In: Ecosystem Management: Questions for Science and Society* (Maltby, E., M. Holdgate, M. Acremand and A. Weir eds.). Royal Holloway Institute for Environmental Research, Virginia Water, UK.
- Hwang, J.H., H.J. Kim and S.W. Lee. 2012. Specialization strategy for regional agriculture based on the relationship between development on specialized crops and impact of climate change - focused on orchard crop -. *Korean Society of Rural Planning* **18**(3): 149-164.
- Jo, H.K. and T.W. Ahn. 2008. Differences in phenological phases of plants subsequent to microclimate change. *Korean Journal of Environment and Ecology* **22**(3): 221-229.
- Jung, T.J., H.C. Shin, Y.K. Shin and M.J. Kim. 2013. Correlations between spatial distribution of alien plants and land cover. *Journal of Environmental Impact Assessment* **22**(5): 455-466.
- Kalela, O. 1949. Changes in geographic ranges in the avifauna of northern and central Europe in response to recent changes in climate. *Bird-Banding* **20**: 77-103.
- KEI. 2014. Prospect for Climate Environment Risk and National Strategy. Korea Environment Institute, Sejong, Republic of Korea.
- Kelly, A.E. and M.L. Goulden. 2008. Rapid shifts in plant distribution with recent climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **105**(33): 11823-11826.
- Kim, C.S., J.S. Lee, J.Y. Ko, E.S. Yun, U.S. Yeo, J.H. Lee, D.Y. Kwak, M.S. Shin and B.G. Oh. 2007. Evaluation of optimum rice heading period under recent climatic change in Yeongnam area. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **9**(1): 17-28.
- Kim, H.J., J.K. Hong, S.C. Kim, S.H. Oh and J.H. Kim. 2011. Plant phenology of threatened species for climate change in sub-alpine zone of Korea: Especially on the summit area of Mt. Deogyusan. *Korean Journal of Plant Resources* **24**(5): 549-556.
- Kim, S.J., S.M. Kim and S.M. Kim. 2013. A study on development of vulnerability assessment criteria for agricultural infrastructure according to climate change. *Journal of Agriculture & Life Science* **47**(1): 205-213.
- Kim, Y.J. and K.S. Ki. 2018. Temporal changes of *Hyalessa fuscata* songs by climate change. *Korean Journal of Environment and Ecology* **32**(2): 244-251.
- Kwak, T.S., J.H. Ki, Y.E. Kim, H.M. Jeon and S.J. Kim. 2008. A study of GIS prediction model of domestic fruit cultivation location changes by the global warming. *Journal of Korea Spatial Information Society* **10**(3): 93-106.
- Larcher, W. 1983. Physiological Plant Ecology. 2nd ed. Springer-Verlag, New York, USA.
- Lee, C.K., J. Kim, J. Shon, W.H. Yang, Y.H. Yoon, K.J. Choi and K.S. Kim. 2012. Impacts of climate change on rice production and adaptation method in Korea as evaluated by simulation study. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **14**(4): 207-221.
- Lee, D.B., K.M. Kim, J.H. Kim, K.A. Pho and G.Y. Kim. 2010. Impacts of arable land conversion on the vulnerability of water resource. *Climate Change Research* **1**(1): 75-83.
- Lee, D.K., J.U. Kim and C. Park. 2010. A prediction of forest vegetation based on land cover change in 2090. *Journal of Environmental Impact Assessment* **19**(2): 117-125.
- Lee, S.H., I.H. Heo, K.M. Lee, S.Y. Kim, Y.S. Lee and W.T. Kwon. 2008. Impacts of climate change on phenology and growth of crops: In the case of Naju. *Journal of the Korean*

- Geographical Society* **43**(1): 20-35.
- Lee, S.J. and Y.H. Ahn. 2013. Change prediction for vegetation structure, species diversity and life-form of evergreen broad-leaved forest by climate change in Gageo-Do Island, Korea. *Journal of Environmental Science International* **22**(8): 979-997.
- Mawdsley, J.R., R. O'Malley and D.S. Ojima. 2009. A review of Climate Change Adaptation Strategies for wildlife management and biodiversity conservation. *Conservation Biology* **23**(5): 1080-1089.
- McCarty, J.P. 2001. Ecological consequences of recent climate change. *Conservation Biology* **15**(2): 320-331.
- Nam, Y.S., S.R. Yang, Y.H. Song and H.J. Park. 2012. Research on the change of milled rice production under climate change in Korea: based on RCP 8.5. *The Korean Agricultural Economics Association* **53**: 61-88.
- NAAS. 2017. Development of Climate Change Indicator Species in Agroecosystem. National Institute of Agricultural Science, Wanju, Republic of Korea.
- Noble, I.R., S. Huq, Y.A. Anokhin, J. Carmin, D. Goudou, F.P. Lansigan, B. Osman-Elasha and A. Villamizar. 2014. Adaptation needs and options. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea and L.L. White eds.). Cambridge University Press, New York.
- Oh, Y.J., M.H. Kim, Y.E. Na, S.H. Hong, W.K. Paik and S.T. Yoon. 2012. Vulnerability assessment of soil loss in farm area to climate change adaptation. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* **45**(5): 711-716.
- Parmesan, C. 2006. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics* **37**: 637-669.
- Parmesan, C. and G. Yohe. 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* **421**(6918): 37-42.
- Pauli, H., M. Gottfried and G. Grabherr. 1996. Effects of climate change on mountain ecosystems - upward shifting of alpine plants. *World Resource Review* **8**: 3.
- Pearson, R.G., C.J. Raxworthy, M. Nakamura and A.T. Peterson. 2007. Predicting species distributions from small number of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography* **34**(1): 102-117.
- Phillips, S.J., M. Dudík and R.E. Schapire. 2017. Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3.4.1). [http://biodiversityinformatics.amnh.org/open\\_source/maxent/](http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/) [Accessed on 2018-03-08].
- R Development Core Team. 2017. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Available at <http://www.R-project.org>. accessed 26 March 2018.
- Reich, P.B. and J. Oleksyn. 2004. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **101**(30): 11001-11006.
- Root, T.L., J.T. Price, R.H. K.R. Hall, S.H. Schneider, C. Rosenzweig and L.A. Pounds. 2003. Fingerprints of global warming on wild animal and plants. *Nature* **421**(6918): 57-60.
- Rosenzweig, C., D. Karoly, M. Vicarelli, P. Neofotis, Q. Wu, G. Casassa, A. Menzel, T.L. Root, N. Estrella, B. Seguin, P. Tryjanowski, C. Liu, S. Rawlins and A. Imeson. 2008. Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change. *Nature* **453**(7193): 353-357.
- Sakai, A. and C.J. Weiser. 1973. Freezing resistance of trees in North America with reference to tree regions. *Ecology* **54**(1): 118-126.
- Samie, A., X. Deng, S. Jia and D. Chen. 2017. Scenario-based simulation on dynamics of land-use-land-cover change in Punjab Province, Pakistan. *Sustainability* **9**(8): 1285.
- Shim, K.M., S.H. Min, D.B. Lee, G.Y. Kim, H.C. Jeong, S.B. Lee and K.K. Kang. 2011. Simulation of the effects of the A1B climate change scenario on the potential yield of winter naked barley in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **13**(4): 192-203.
- Shin, K.M., G.Y. Kim, K.A. Roh, H.C. Jeong and D.B. Lee. 2008. Evaluation of agro-climatic indices under climate change. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **10**(4): 113-120.
- Solomon, A.M. and W.P. Cramer. 1993. Biospheric implications of global environmental change, p. 25-52. In: *Vegetation Dynamics Modelling and Global Change* (Solomon, A.M. and H.H. Shuqart eds.). Chapman and Hall, New York, USA.
- Sparks, T.H. and A. Menzel. 2002. Observed changes in the seasons: an overview. *International Journal on Climatology* **22**(14): 1715-1725.
- Swenson, N.G. and B.J. Enquist. 2007. Ecological and evolutionary determinants of a key plant functional trait: wood density and its community-wide variation across latitude and elevation. *American Journal of Botany* **94**(3): 451-459.
- Thuiller, W., S. Lavorel, G. Midgley, S. Lavergne and T. Rebelo. 2004. Relating plant traits and species distributions along bioclimatic gradients for 88 Leucadendron Taxa. *Ecology* **85**(6): 1688-1699.
- Turner, B.L. 1994. Local faces, global flows: the role of land use and land cover in global environmental change. *Land Degradation & Development* **5**(2): 71-78.
- Walther, G.R., E. Post, P. Convey, A. Menze, C. Parmesan, T.J.C. Beebee, J.M. Fromentin, O. Joegh-Guldberg and F. Bairlein. 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature* **416**(6879): 389-395.
- Weber, E. and D. Gut. 2005. A survey of weeds that are increas-

- ingly spreading in Europe. *Agronomy for Sustainable Development* **25**(1): 109-121.
- Webster, M.S., M.A. Colton, E.S. Darling, J. Armstrong, M.L. Pinsky, N. Knowlton and D.E. Schindler. 2017. Who should pick the winners of climate change?. *Trends in Ecology & Evolution* **32**(3): 167-173.
- Wipf, S., V. Stoeckli and P. Bebi. 2009. Winter climate change in alpine tundra: plant responses to changes in snow depth and snowmelt timing. *Climatic Change* **94**(1-2): 105-121.
- Wisz, M.S., R.J. Hijimans, J. Li, A.T. Peterson, C.H. Graham, A. Guisan and NCEAS Predicting Species Distributions Working Group. 2008. Effects of sample size on the performance of species distribution models. *Diversity and Distributions* **14**(5): 763-773.
- Woodward, F.I. 1987. *Climate and Plant Distribution*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Woodward, F.I. and L. Rocherfort. 1991. Sensitivity analysis of vegetation diversity to environmental change. *Global Ecology and Biogeography Letters* **1**: 7-23.
- Yeo, I.H., H.J. Bae and S.B. Hong. 2017. A study on categorizing ecosystem groups for climate change risk assessment. *Journal of Environmental Impact Assessment* **26**(6): 385-403.
- Yun, J.H., J.H. Kim, K.H. Oh and B.Y. Lee. 2011. Distributional change and climate condition of warm-temperate evergreen broad-leaved trees in Korea. *Korean Journal of Environment and Ecology* **25**(1): 47-56.