

Research Paper

한반도 기후변화 적응 대상 식물 종풍부도 변화 예측 연구

신만석*** · 서창완** · 이명우* · 김진용** · 전자영** · 프라딧아디카리** · 홍승범**
전북대학교 대학원 조경학과*, 국립생태원**

Prediction of Potential Species Richness of Plants Adaptable to Climate Change in the Korean Peninsula

Man-Seok Shin*** · Changwan Seo** · Myungwoo Lee* · Jin-Yong Kim** ·
Ja-Young Jeon** · Pradeep Adhikari** · Seung-Bum Hong**

Department of Landscape Architecture, Chonbuk National University*
National Institute of Ecology**

요약: 본 연구는 한반도 기후변화 적응 대상식물을 대상으로 기후변화에 따른 종풍부도 변화를 예측해 보고자 하였다. 대상종은 한반도 기후변화 적응 대상식물 중에서 특산식물 23종, 북방계식물 30종 그리고 남방계식물 36종으로 총 89종을 선정하였다. 기후변화에 따른 개별 종의 잠재서식지를 예측하여 합산하는 방식으로 종풍부도 변화를 예측하였다. 개별 종의 잠재서식지는 10개의 종분포모형 알고리즘을 함께 고려하는 앙상블모형을 구축하였다. 미래 예측 시기는 기후변화 시나리오 RCP4.5와 RCP8.5를 선정하여 2050년과 2070년을 예측하였다. 현재의 종풍부도는 국립공원, 강원도 백두대간 지역 그리고 남해 도서지역을 중심으로 높게 나타났다. 미래 예측 결과, 기존에 높은 종풍부도를 보였던 국립공원과 강원도 백두대간 지역은 낮아졌고 남해안 내륙지역은 보다 더 높아졌다. 종풍부도의 평균값을 비교해 보면 현재 기준으로 국립공원 지역이 남한 전체지역보다 높으면서 큰 차이를 보였다. 하지만 기후변화에 따라서 국립공원 지역과 남한 전체지역의 차이가 줄어들었다. 특산식물과 북방계식물의 다수가 남한지역에서 사라지고 남방계식물이 북상하면서 이와 같은 결과를 보였다. 하지만 적합한 서식지로 이주가 이루어지지 않으면 종풍부도가 급격하게 감소하였다. 분산가능성의 가정에 따라 결과가 다르게 나타났다. 본 연구의 결과는 보전 계획 수립, 보호 지역 설정, 생물종 복원 그리고 기후변화 대응 전략 및 관리 방안 등에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어: 기후변화, 종풍부도, 국립공원, 종분포모형, 앙상블모형

First Author: Man-Seok Shin, Dept. of Landscape Architecture, Chonbuk National University, Jeonju 54896, Korea, Tel: +82-63-270-2594, E-mail: shinms@nie.re.kr

Corresponding Author: Seung-Bum Hong, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Korea, Tel: +82-41-950-5804, E-mail: sbhong@nie.re.kr

Co-Authors: Changwan Seo, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Korea, Tel: +82-41-950-5390, E-mail: dharmascw@nie.re.kr
Myungwoo Lee, Dept. of Landscape Architecture, Chonbuk National University, Jeonju 54896, Korea, Tel: +82-63-270-2598, E-mail: lmw@jbn.ac.kr

Jin-yong Kim, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Korea, Tel: +82-41-950-5855, E-mail: mansan2nd@nie.re.kr

Ja-young Jeon, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Korea, Tel: +82-41-950-5939, E-mail: jyy5161@nie.re.kr

Pradeep Adhikari, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Korea, Tel: +82-41-950-5300, E-mail: pdp2042@nie.re.kr

Received: 11 September, 2018. Revised: 2 December, 2018. Accepted: 5 December, 2018.

Abstract : This study was designed to predict the changes in species richness of plants under the climate change in South Korea. The target species were selected based on the Plants Adaptable to Climate Change in the Korean Peninsula. Altogether, 89 species including 23 native plants, 30 northern plants, and 36 southern plants. We used the Species Distribution Model to predict the potential habitat of individual species under the climate change. We applied ten single-model algorithms and the pre-evaluation weighted ensemble method. And then, species richness was derived from the results of individual species. Two representative concentration pathways (RCP 4.5 and RCP 8.5) were used to simulate the species richness of plants in 2050 and 2070. The current species richness was predicted to be high in the national parks located in the Baekdudaegan mountain range in Gangwon Province and islands of the South Sea. The future species richness was predicted to be lower in the national park and the Baekdudaegan mountain range in Gangwon Province and to be higher for southern coastal regions. The average value of the current species richness showed that the national park area was higher than the whole area of South Korea. However, predicted species richness were not the difference between the national park area and the whole area of South Korea. The difference between current and future species richness of plants could be the disappearance of a large number of native and northern plants from South Korea. The additional reason could be the expansion of potential habitat of southern plants under climate change. However, if species dispersal to a suitable habitat was not achieved, the species richness will be reduced drastically. The results were different depending on whether species were dispersed or not. This study will be useful for the conservation planning, establishment of the protected area, restoration of biological species and strategies for adaptation of climate change.

Keywords : Climate Change, Ensemble Model, National Park, Species Distribution Model, Species Richness

I. 서론

제4차 지구 생물 다양성 전망 보고서 (Global Biodiversity Outlook 4)에서는 인구증가로 인한 환경파괴와 인간의 영향으로 발생한 기후변화는 생물 다양성에 압력을 가하고 있으며, 생물 다양성 보전을 위한 노력을 하지 않으면 우리의 생계, 자연 서식지, 생태계 서비스, 식량 안보에 심각한 위협을 줄 수 있다고 경고하고 있다(Secretariat of the Convention on Biological Diversity 2014). 정부 간 기후변화 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 제5차 평가보고서에 따르면 온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 경우에도 21세기 말에는 전지구 지표온도가 현재(1986~2005년 기준)보다 1.5°C 이상 상승할 가능성이 높다고 보고하고 있다(IPCC

2014). 이처럼 전 인류가 앞으로 온실가스 배출량을 크게 줄이더라도 지금까지 배출한 온실가스에 의해서 기후변화가 진행될 것이며(IPCC 2014), 이러한 기후변화로 인해 2050년에는 15~37%의 종이 멸종될 것으로 예측하고 있다(Thomas et al. 2004). 우리 인간 또한 자연환경에 삶의 터전을 두고 동·식물과 밀접한 상호관계에 있으며, 이러한 생물 다양성의 감소는 언젠가 인류 생존에 위협이 될 것이다(Secretariat of the Convention on Biological Diversity 2014). 국제적으로 생물 다양성 감소 방지와 기후변화에 대응하기 위해서 생물 다양성 협약(Convention on Biological Diversity, CBD), 기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) 그리고 사막화방지협약(United Nations Convention to Combat Desertification,

UNCCD) 등을 통하여 협력할 수 있는 방안을 마련하고 있다.

기후변화에 의한 생태계의 변화가 증가하는 상황에서 그 영향의 정도를 파악하는 것은 중요하다(IPCC 2001). 지역들 간 영향의 정도를 비교하기 위해서는, 객관적이고 상대적으로 비교가 가능한, 정량화 할 수 있는 평가 방법이 필요하다(Kang & Kang 2018). 생물다양성을 정량적으로 평가하는 방법에는 종풍부도(Richness index; Margalef 1958), 종다양도(Biodiversity index; Pielou 1966), 균 등도(Evenness index; Pielou 1975), 희귀성(Rarity index; Usher 1996) 등의 방법이 있다. 종풍부도(Species richness, SR)는 특정한 지리적 단위에서 출현하는 생물종의 총수를 의미하는 것으로, 생물다양성을 평가하는데 가장 간단한 방법으로 널리 사용되고 있다(Whittaker 1972; Kim et al. 2014). 종풍부도를 정량화 하는 것은 지역별 비교에 중요하게 활용될 수 있고, 종풍부도를 최대화 하는 것이 종종 보전 연구의 명확하면서 절대적인 목표가 되기도 한다(May 1988; Cornell 1999; Gotelli & Colwell 2001). 이와 같이 종풍부도의 정보는 보전 전략을 수립하거나 전 지구적 미래 생물다양성의 패턴을 예측하는데 활용될 수 있다(Guisan & Theurillat 2000; Algar et al. 2009; Dubuis et al. 2011).

보전 전략을 수립하는데 종의 분포와 그 종들이 모여 이루는 군집을 파악하는 것은 중요하다(Dubuis et al. 2011). 종풍부도 평가는 이러한 보전 전략에 도움이 될 수 있지만, 종종 정보의 부족으로 넓은 지역을 평가하기에는 한계가 나타난다(Dubuis et al. 2011). 이러한 한계를 극복하기 위해서 종풍부도 우수지역 등을 찾는데 실증적 모형 방법들을 사용할 수 있다(Gioia & Pigott 2000; Parviainen et al. 2009). 이러한 모형 방법들은 생물다양성 패턴과 군집 생성 과정을 이해하는데 도움을 줄 수 있다(Gioia & Pigott 2000; Nogues-Bravo et al. 2008). 생물 종 조사 정보가 부족하고 넓은 지역의 종풍부도를 예측하는 방법으로 종분포모형(Species Distribution Model, SDM)을 활용한 방법이 사용되고 있다(Guisan &

Thuiller 2005; Guisan & Rahbek 2011; Dubuis et al. 2011; Kim et al. 2014).

종분포모형은 연구하고자 하는 종의 서식에 적합한 지역을 찾기 위한 목적으로 사용되는 모형 도구이다. 조사를 통한 종의 발견지점과 기후, 토양, 지형 등과 같은 환경정보와의 관련성을 분석하여 종에게 적합한 서식지를 예측한다(Schimper 1903; Grinnell 1904; Franklin 2010). 이러한 종분포모형을 활용한 종풍부도 예측은 각각의 종들을 독립적으로 예측한 이후에 그 결과를 합산하는 방식이 사용되고 있다(Guisan & Thuiller 2005; Guisan & Rahbek 2011; Dubuis et al. 2011; Kim et al. 2014). 국제적으로는 식물, 양서파충류, 대형 포유류와 조류의 종풍부도를 종분포모형을 활용하여 예측할 뿐 아니라(Araujo et al. 2006; UrquizaúHaas et al. 2009; Duncan et al. 2012), 생물다양성의 패턴을 활용하여 보전지역의 우선지역을 설정하는데 활용하고(Ortega-Huerta & Peterson 2004), 기후변화에 따라 멸종 가능성이 있는 종들을 예측하는 등(Thomas et al. 2004)의 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 국내의 경우 이와 같은 연구가 많이 이루어 지지 못한 실정이다. 지자체 수준에서 평창군, 보령시 그리고 지리산 지역을 대상으로 종풍부도 분석이 이루어 졌고(Jung et al. 2010; Kwon et al. 2012; Shin et al. 2015), 남한 전체지역을 대상으로는 포유류를 대상으로 종풍부도를 분석하여 생물다양성 우수지역을 연구한 사례가 있다(Kim et al. 2014). 하지만 국내에서 기후변화에 따른 종풍부도의 변화를 고려한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 한반도 기후변화 적응 식물을 대상으로 남한지역의 종풍부도를 미래 기후변화에 따라서 예측해 보고자 하였다. 산림청 국립수목원에서는 기후온난화에 대응하기 위한 우선관찰 종으로 기후변화 적응 식물 300종을 지정하고 있다. 좀 더 세부적으로는 3가지 특성(특산식물, 북방계식물, 남방계식물)으로 분류되는 기후변화 적응 식물의 종풍부도를 예측해 보고자 하였다. 식물 특성별로 기후조건에 따라 변하는 남한지역의 식물 종풍부도와 생물다양

성 우수지역으로 알려진 국립공원의 종풍부도는 미래의 기후변화를 고려한 보호지역 지정 및 관리, 보전계획 그리고 대응전략 등에 활용될 수 있을 것이다.

II. 연구의 범위 및 방법

1. 연구대상지 및 대상종

1) 연구대상지역

본 연구는 한반도에서 북한을 제외한 남한지역을 대상으로 하였다. 남한의 면적은 100,266km²로 한반도의 약 44.8%에 해당된다(National Geographic Information Institute 2014). 남한지역은 동경 124도에서 132도 사이, 북위 33도에서 39도 사이에 위치하고 있다. 산림청(<http://www.forest.go.kr/>)의 100대 명산 정보에 따르면 한라산 1947.3m, 지리산 1915.4m 그리고 설악산 대청봉 1708.1m 순으로 높은 지역이 분포하고 있다. 기상청의 날씨누리(국가기상종합정보)에 따르면 우리나라의 기후는 여름에는 덥고 습하지만, 겨울에는 매우 건조하면서 추운 특성이 있다(<http://www.weather.go.kr/>). 1981년에서 2010년까지의 평년값을 기준으로, 연 평균기온은 10~15℃ 이고, 가장 무더운 8월은 23~26℃, 가장 추운 1월은 -6~3℃의 범위를 갖는다. 연 강수량은 1000~1900 mm의 범위에서 지역별 차이가 나타난다(<http://www.weather.go.kr/>). 세부적으로는 위도, 고도, 지리적 위치, 해류, 아시아 몬순, 수륙 분포 그리고 기단 등에 따라서 기후가 다르게 나타난다(National Geographic Information Institute 2016).

우리나라에 살고 있는 생물은 약 10만 종으로 추정하고 있으며, 그 중에서 관속식물은 약 4,300종류가 자생하는 것으로 알려져 있다(Ministry of Environment 2012). 식물구계는 식물종의 분포를 기초로 하여 지역을 구분한 것으로(Kong 2007), 일반적으로 한반도는 북한 지역 3개(관북, 갑산, 관서)와 남한 지역 5개(중부, 남부, 남해안, 제주도, 울릉도)의 아구로 구분한다(Lee & Yim 2002; National Geographic Information Institute 2016). 대한민국 국가지도집 II에 따르면 중부 아구에는 왜솔다리, 황철나무 등의

1,000여 분류군, 남부 아구에는 노각나무, 히어리 등의 1,300여 분류군, 제주도 아구에는 논나무, 담팔수 등의 2,000여 분류군 그리고 울릉도 아구에는 큰연령초, 큰두루미꽃 등의 2,000여 분류군이 생육한다(National Geographic Information Institute 2016).

남한지역은 자연생태계 또는 자연과 문화경관을 대표할 만한 지역을 국립공원으로 지정하여 국가 차원에서 관리하고 있다. 국립공원은 1967년 지리산을 처음으로 2016년 태백산까지 총 22개(산악육지공원 17개소, 해상공원 4개소, 사적공원 1개소) 지역이 지정되어 있다.

2) 연구대상종

연구대상종은 산림청 국립수목원에서 발표한 ‘한반도 기후변화 적응 대상식물 300종’을 후보종으로 고려하였다. 산림청 국립수목원은 한반도 자생식물의 보다 정확한 분포 파악을 위하여 8년 동안(2004-2011) 남한 전 지역을 대상으로 식물 분포지 정보를 수집하였다. 남한의 식물구계(중부아구, 남부아구, 남해안아구, 제주도아구, 울릉도아구)를 기반으로 지역별로 세분화하여 총 643지점에서 조사되었다(Figure 1). 8년 동안의 2,600분류군의 현황자료를

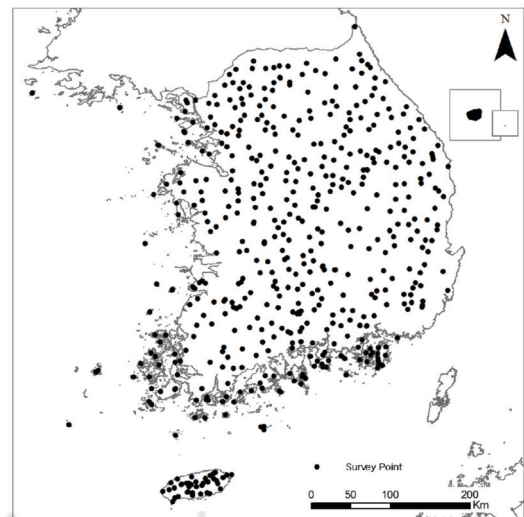


Figure 1. Showing survey point of plants adaptable to climate change in the Korean Peninsula

바탕으로, 기후온난화에 대응하기 위한 우선관찰 식물로서 특산식물, 남방계식물 및 북방계식물을 각각 100종, 총 300종을 선정하였다(Korea National Arboretum 2010). 본 연구를 수행하기 위해 300종의 분포자료를 한반도 관속식물 분포도(Korea National Arboretum 2004; 2005; 2006; 2007; 2008; 2009; 2010b; 2010c; 2011) 보고서를 활용하여 구축하였다. 300종의 식물 중에서, 10회 교차검증(10-fold cross-validation)에 적합한 출현지점이 10개 지점 이상인 식물 89종(특산식물 23종, 북방계 식물 30종, 남방계식물 36종)을 대상으로 하였다(Table 1). 10회 교차검증은 종분포모형의 성능과 오류를 측정하는데 주로 사용되고 있다(Elith et al. 2011; Mateo-Tomas et al. 2012).

종풍부도 분석은 전체 89종을 활용하였고 특산식물, 북방계식물, 남방계식물의 특성별로 나누어서 분석하였다. 전체종을 활용한 종풍부도 분석은 보다 많은 종이 적합한 서식지로 예측된 지역을 판단 할 수 있고, 3가지로 구분된 종풍부도는 식물의 특성별로 보다 더 적합한 서식지의 차이를 판별 할 수 있다.

2. 환경변수 및 종풍부도 모형 개발

1) 환경변수

미래 기후변화를 반영하기 위해서 본 연구는 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 5차 평가보고서의 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP) 시나리오에 따라 생성된 생물기후

Table 1. The list of species used for species richness modeling

Category	Scientific-Korean name	AUC Value	TSS Value	Cutoff Value	Presence Point
Native Plant	<i>Anemone koraiensis</i> Nakai 홀아비바람꽃	0.986	0.921	0.100	19
	<i>Clematis fusca</i> var. <i>coreana</i> (H.Lev. & Vaniot) Nakai 요강나물	0.991	0.947	0.123	11
	<i>Clematis trichotoma</i> Nakai 할미밀망	0.956	0.801	0.251	86
	<i>Hepatica insularis</i> Nakai 새끼노루귀	0.943	0.724	0.117	33
	<i>Berberis koreana</i> Palib. 매자나무	0.988	0.97	0.247	11
	<i>Asarum maculatum</i> Nakai 개족도리풀	0.975	0.874	0.160	30
	<i>Asarum versicolor</i> (K.Yamaki) B.U.Oh 무늬족도리풀	0.969	0.816	0.134	32
	<i>Corydalis maculata</i> B.U.Oh & Y.S.Kim 접현호색	0.973	0.818	0.191	22
	<i>Arabis takesimana</i> Nakai 섬장대	0.973	0.901	0.034	17
	<i>Saxifraga octopetala</i> Nakai 구실바위취	0.985	0.93	0.106	12
	<i>Indigofem koreana</i> Ohwi 좁땅비싸리	0.982	0.925	0.156	15
	<i>Vicia chosenensis</i> Ohwi 노랑갈퀴	0.967	0.834	0.159	53
	<i>Vicia hirticalycina</i> Nakai 나래완두	0.947	0.778	0.279	19
	<i>Dystaenia takesimana</i> (Nakai) Kitag. 섬바디	0.979	0.926	0.154	10
	<i>Lysimachia coreana</i> Nakai 참좁쌀풀	0.965	0.822	0.104	19
	<i>Ligustrum foliosum</i> Nakai 섬쥐똥나무	0.983	0.927	0.116	12
	<i>Salvia chanryoenica</i> Nakai 참배암차즈기	0.944	0.732	0.134	24
	<i>Scrophularia koraiensis</i> Nakai 토현삼	0.921	0.738	0.081	13
	<i>Veronica insularis</i> Nakai 섬꼬리풀	0.973	0.922	0.207	12
	<i>Lonicera subsessilis</i> Rehder 청괴불나무	0.944	0.775	0.109	48
<i>Campanula takesimana</i> Nakai 섬초롱꽃	0.983	0.94	0.142	10	
<i>Cirsium setidens</i> (Dunn) Nakai 고려엉겅퀴	0.958	0.784	0.225	105	
<i>Poa takeshimana</i> Honda 섬포이풀	0.979	0.935	0.160	11	
Northern	<i>Equisetum hyemale</i> L. 속새	0.991	0.931	0.227	22

Table 1. Continue

Category	Scientific-Korean name	AUC Value	TSS Value	Cutoff Value	Presence Point
Northern Plant	<i>Abies nephrolepis</i> (Trautv.) Maxim. 분비나무	0.976	0.862	0.067	12
	<i>Anemone reflexa</i> Steph. & Willd. 회리바람꽃	0.975	0.853	0.134	51
	<i>Clematis serratifolia</i> Rehder 개버무리	0.94	0.749	0.214	10
	<i>Eranthis stellata</i> Maxim. 너도바람꽃	0.969	0.854	0.134	38
	<i>Aristolochia manshuriensis</i> Kom. 등취	0.991	0.965	0.177	21
	<i>Cardamine komarovi</i> Nakai 논쟁이냉이	0.99	0.94	0.115	36
	<i>Mukdenia rossii</i> (Oliv.) Koidz. 돌단풍	0.97	0.853	0.098	38
	<i>Rodgersia podophylla</i> A.Gray 도깨비부채	0.983	0.905	0.277	52
	<i>Malus baccata</i> Borkh. 야광나무	0.932	0.757	0.129	67
	<i>Potentilla centigrana</i> Maxim. 좁쌀기	0.978	0.859	0.148	25
	<i>Spiraea salicifolia</i> L. 꼬리조팝나무	0.941	0.743	0.128	55
	<i>Spiraea trichocarpa</i> Nakai 갈기조팝나무	0.933	0.729	0.203	19
	<i>Waldsteinia ternata</i> (Stephan) Fritsch 나도양지꽃	0.991	0.965	0.103	10
	<i>Acer mandshuricum</i> Maxim. 복장나무	0.986	0.923	0.095	18
	<i>Acer tegmentosum</i> Maxim. 산겨릅나무	0.99	0.945	0.081	14
	<i>Acer triflorum</i> Kom. 복자기	0.963	0.838	0.194	21
	<i>Acer ukurunduense</i> Trautv. & C.A.Mey. 부계꽃나무	0.993	0.979	0.177	10
	<i>Viola diamantiaca</i> Nakai 금강제비꽃	0.966	0.851	0.108	25
	<i>Sanicula rubriflora</i> F. Schmidt ex Maxim. 붉은참반디	0.991	0.936	0.129	10
	<i>Rhododendron micranthum</i> Turcz. 꼬리진달래	0.982	0.861	0.175	17
	<i>Gentians triflora</i> var. <i>japonica</i> (Kusn.) H.Hara 과남풀	0.976	0.894	0.099	31
	<i>Brachybotrys paridiformis</i> Maxim, ex D.Oliver 당개지치	0.982	0.914	0.147	37
	<i>Lonicera chrysantha</i> Turcz. 각시괴불나무	0.982	0.877	0.152	13
	<i>Artemisia rubripes</i> Nakai 텃불쑥	0.974	0.877	0.106	22
	<i>Carpesium macrocephalum</i> Franch. & Sav. 여우오줌	0.945	0.794	0.084	12
	<i>Cirsium pendulum</i> Fisch. ex DC. 큰영경귀	0.955	0.834	0.196	35
	<i>Lloydia triflora</i> (Ledeb.) Baker 나도개감채	0.983	0.89	0.171	30
	<i>Iris odaesanensis</i> Y.N.Lee 노랑무늬붓꽃	0.98	0.921	0.148	17
	<i>Scopolia japonica</i> Maxim. 미치광이풀	0.957	0.81	0.167	41
	Southern Plant	<i>Dicranopteris pedata</i> (Houtt.) Nakaike 발풀고사리	0.97	0.864	0.123
<i>Pteris multifida</i> Poir. 봉의꼬리		0.974	0.873	0.132	32
<i>Castanopsis cuspidata</i> (Thunb.) Schottky 모밀잣밤나무		0.975	0.89	0.133	14
<i>Castanopsis sieboldii</i> (Makino) Hatus. 구실잣밤나무		0.981	0.91	0.121	13
<i>Quercus acuta</i> Thunb. 붉가시나무		0.982	0.92	0.122	12
<i>Ficus erecta</i> Thunb. 천선과나무		0.977	0.901	0.177	39
<i>Boehmeria pinnosa</i> Nakai & Satake 왕모시풀		0.991	0.948	0.154	23
<i>Cinnamomum japonicum</i> Siebold ex Nees 생달나무		0.984	0.898	0.112	16
<i>Litsea japonica</i> (Thunb.) Juss. 까마귀쭈나무		0.991	0.93	0.065	26
<i>Neolitsea sericea</i> (Blume) Koidz. 참식나무		0.966	0.829	0.154	37
<i>Chloranthus fortunei</i> (A.Gray) Solms 옥녀꽃대		0.966	0.853	0.171	25
<i>Eurya emarginata</i> (Thunb.) Makino 우묵사스레피		0.989	0.929	0.318	21
<i>Corydalis incisa</i> (Thunb.) Pers. 자주괴불주머니		0.953	0.791	0.142	37
<i>Pittosporum tobira</i> (Thunb.) W.T.Aiton 돈나무		0.966	0.844	0.157	32

Table 1. Continue

Category	Scientific-Korean name	AUC Value	TSS Value	Cutoff Value	Presence Point
Southern Plant	<i>Raphiolepis indica</i> var. <i>umbellata</i> (Thunb.) Ohashi 다정큼나무	0.982	0.896	0.110	19
	<i>Dunbaria villosa</i> (Thunb.) Makino 여우팔	0.944	0.756	0.124	29
	<i>Mallotus japonicus</i> (Thunb.) Muell. Arg. 예덕나무	0.963	0.835	0.184	78
	<i>Zanthoxylum ailanthoides</i> Siebold & Zucc. 머귀나무	0.986	0.887	0.186	15
	<i>Rhus succedanea</i> L. 검양옻나무	0.982	0.962	0.218	10
	<i>Rhus sylvestris</i> Siebold & Zucc. 산검양옻나무	0.928	0.744	0.210	36
	<i>Meliosma myriantha</i> Siebold & Zucc. 나도밤나무	0.948	0.817	0.200	39
	<i>Ilex crenata</i> Thunb. 팽팽나무	0.978	0.894	0.118	13
	<i>Euonymus chibai</i> Makino 섬회나무	0.995	0.981	0.279	37
	<i>Sageretia theezans</i> (L.) Brongn. 상동나무	0.984	0.905	0.201	20
	<i>Elaeagnus glabra</i> Thunb. 보리장나무	0.974	0.865	0.169	25
	<i>Dendropanax moribiferum</i> H.Lev. 황칠나무	0.986	0.915	0.123	13
	<i>Ardisia crenata</i> Sims 백량금	0.987	0.958	0.120	15
	<i>Ligustrum japonicum</i> Thunb. 팽나무	0.961	0.803	0.148	48
	<i>Argusia sibirica</i> (L.) Dandy 모래지치	0.981	0.88	0.237	10
	<i>Callicarpa mollis</i> Siebold & Zucc. 새비나무	0.961	0.791	0.232	28
	<i>Verbena officinalis</i> L. 마편초	0.952	0.788	0.160	31
	<i>Salvia japonica</i> Thunb. 둥근잎배암차즈기	0.97	0.874	0.179	24
	<i>Viburnum odoratissimum</i> var. <i>awabuki</i> (K.Koch) Zabel ex Rumlper 아왜나무	0.977	0.876	0.213	20
	<i>Wahlenbergia marginata</i> (Thunb.) A.DC. 에기도라지	0.983	0.919	0.130	11
<i>Ainsliaea apiculata</i> Sch.Bip. 좁닥취	0.967	0.846	0.137	20	
<i>Polygonatum cryptanthum</i> H.Lev. & Vaniot 목포용동굴레	0.975	0.871	0.085	18	

적 변수(Bioclimatic Variables, Bioclim)를 사용하였다(Appendix 1). IPCC의 기후변화 시나리오는 1차 평가보고서에서 SA90(Scientific Assessment 1990), 2차 평가보고서에서 IS92(IPCC Scenarios 1992), 3,4차 평가보고서에서 SRES(Special Report on Emissions Scenarios)를 제시하였으며 최근에는 RCP 시나리오를 채택하였다. 이전의 SRES 시나리오에서 인위적 기후변화 요인에서 에어로졸(Aerosol)과 온실가스의 영향에 따른 강제력만을 포함하고 있다면 RCP 시나리오는 인간 활동에 의한 토지이용변화까지 고려하고 있다(Korea Meteorological Administration 2011; Park & Choi 2014). 또한 SRES 시나리오가 1990년대까지의 온실가스 농도만을 사용하였다면 RCP 시나리오는 2005년까지의 온실가스 농도를 반영하여 시나리오의 신뢰성을 높였다(Korea Meteorological Administration 2011). 본

연구에서는 RCP 시나리오의 4가지 온실가스 농도(2.6, 4.5, 6.0, 8.5) 중에서 4.5(온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 경우)와 8.5(온실가스의 저감 없이 현재 추세로 배출되는 경우)를 선택하였다.

Bioclim 변수는 식물, 동물 그리고 생태계 분포 연구에서 주로 사용되고 있고 그들의 분포를 결정하는데 중요하다고 알려져 있다(Araujo et al. 2005; Attorre et al. 2007). Bioclim 변수는 보다 생물학적으로 의미 있는 변수를 만들기 위해서 월간 온도(최소, 최대)와 강수량 값에서 생성된다. 본 연구는 Pearson's r correlation 분석을 통해서 19개의 Bioclim 변수들 중에서 상관성이 높은($r > 0.7$) 변수를 제외한 선행연구를 참고하여 변수를 선택하였다(Koo et al. 2015; Park et al. 2016; Koo et al. 2017; Park et al. 2017; Koo et al. 2018; Shin et al. 2018). 선행 연구와 동일하게 Bioclim 변수를 대표할

Table 2. Bioclimatic variables used for Species Distribution Models of 89 each species (Shin et al. 2018)

Bioclimatic variable	Description
Bio1	Annual mean temperature
Bio2	Mean diurnal range (mean of monthly (max temp -min temp))
Bio3	Isothermality (Bio2/Bio7) (* 100)
Bio12	Annual precipitation
Bio13	Precipitation of wettest month
Bio14	Precipitation of driest month

※Bio7 indicate temperature annual range (max temperature of warmest month - min temperature of coldest month)

수 있고 식물의 적합 서식지를 설명할 수 있는 기온관련 변수 3개와 강수관련 변수 3개, 총 6개의 변수를 선택하였다(Table 2). 미래 기후자료는 전지구 기후모델(Global Climate Model, GCM)인 영국 기상청이 개발한 HadGEM2-AO를 통해 모의된 2050년과 2070년 자료를 활용하였다. 현재와 미래의 Bioclim 변수는 WorldClim(<http://www.worldclim.org/>)에서 제공하는 가장 상세한 30”(30 arc-seconds, 약 1km) 자료를 사용하였다(Hijmans et al. 2005).

2) 종분포모형을 활용한 종풍부도 예측

본 연구에서는 남한 지역을 대상으로 종풍부도를 예측하기 위해서 종분포모형(Species Distribution Model, SDM)을 활용하였다. 우선, 각 종의 분포를 종분포모형을 활용하여 독립적으로 예측한 이후에, 이를 합산하여 종풍부도를 예측하였다(Guisan & Thuiller 2005; Guisan & Rahbek 2011; Dubuis et al. 2011; Kim et al. 2014). 종분포모형은 종의 위치 정보와 공간정보 사이의 관련성을 분석하여, 종이 서식하기에 적합한 환경을 분석하기 위해 활용된다(Schimper 1903; Grinnell 1904; Franklin 2010). 회귀분석과 같이 다양한 방법을 종분포모형에 접목하여 공간적으로 분석할 수 있는데, 최근에는 단일 방법에서 오는 불확실성을 저감하기 위하여, 여러 방법(알고리즘, Algorithm)을 합산하는 앙상블모형이 활용되고 있다(Thuiller et al. 2009; Kwon 2014; Shin et al. 2018). 본 연구에서도 불확실성을 줄이기 위해서 앙상블모형을 적용하였다. 10개 종분포모형 알고리즘(Generalized Linear Model(GLM), Genralized Boosted Model(GBM), Generalized

Additive Model(GAM), Classification Tree Model(CTA), Artificial neural network(ANN), Surface Range Envelop(SRE), Flexible Discriminant Analysis(FDA), Fandom Forest(RF), Multivariable Adaptive Regression Splines(MARS), MaxEnt)을 신뢰수준(True Skill Statistics value ≥ 0.7) 이상의 결과들을 활용하여 가중치로 합산하는 앙상블모형 방식으로 개별 종의 분포를 예측하였다. 여기에서 사용된 가중치는 TSS(True Skill Statistics value) 검증값을 사용하였다(Allouche et al. 2006; Koo et al. 2017; Shin et al. 2018).

개별 종의 분포는 서식할 수 있는 확률값으로 예측된다. 따라서 종풍부도로 합산하기 위해서는 서식지역(출현지역, 1값)과 비서식지역(비출현, 0값)으로 구분이 필요하다. 이를 위해 각 개별 종 모형의 민감도 값(서식지역 예측률, Sensitivity)과 특이도 값(비서식지역 예측률, Specificity)의 합이 가장 큰 값을 기준으로 서식지역과 비서식지역으로 구분하였다(Liu et al. 2005; Kim et al. 2014; Shin et al. 2018). 그렇게 구분된 각 개별 종의 1과 0값을 합산하여 종풍부도를 예측하였다(Dubuis et al. 2011; Kim et al. 2014; Equation (1)). 종풍부도 값, SR은 연구대상지의 특정한 격자 안에서 분포하는 개별 종, Si를 합산하여 산정하였다.

$$SR = \sum_{i=1}^n S_i \tag{1}$$

최종 분석 지역은 환경부의 2009년 토지피복도를 활용하여 식물이 서식할 수 없는 지역(시가화/건조지역, 농업지역, 습지, 나지, 수역)은 제외하고 산림지역과 초지(골프장 제외)지역 만을 대상으로 종풍부도

를 분석하였다. 종분포모형은 새로운 적합 서식지의 이주가 제한 없이 가능한 것으로 가정하므로, 종의 이주가 이루어지지 않았을 경우의 종풍부도 또한 고려하였다. 종풍부도는 전체종과 식물특성별로 특산, 북방계 그리고 남방계로 구분하여 분석하였다. 그리고 생물다양성이 높을 것으로 예측되는 국립공원 중에서 산악육지공원과 남한 전체지역을 비교하였다.

3) 모형 검증

예측된 종풍부도 검증은 개별 종분포모형의 예측 정확도로 검증하였다. 개별 종분포모형의 예측 정확도를 위해 AUC(Area Under the Curve) 값과 TSS(True Skill Statistic) 값을 측정하였다(Allouche et al. 2006; Pearson 2007). AUC 값은 ROC (Receiver Operating Characteristic) 곡선(Curve)을 통해 얻을 수 있다. ROC 곡선은 판별 모형을 평가하기 위해 쓰는 방법으로 민감도 값과 특이도 값을 통해 만들어진다. AUC 값은 종 조사자료(서식지와 비서식지 자료 비율)에 영향을 받지 않지만 종의 분포범위에 따라 영향을 받는다고 알려져 있다(Lobo et al. 2008; Park et al. 2016). 따라서 종분포모형의 검증값에서 주로 쓰이는 AUC 값과 이를 보완하기 위해서 TSS 값을 함께 측정하였다. TSS 값은 종의 분포범위에 영향을 받지 않으면서 AUC 값의 장점을 함께 갖고 있는 신뢰도가 높은 검증방법이다(Allouche et al. 2006).

III. 결과 및 고찰

1. 현재 종풍부도 예측 및 모형 검증

남한지역에서 한반도 기후변화 적응 대상식물 89종을 대상으로 개별 종분포모형을 구축하였고, 이를 활용하여 종풍부도를 예측하였다. 89종의 개별 종분포모형의 예측 정확도는 최종 앙상블결과의 AUC 값과 TSS 값을 측정하였다. AUC는 평균 0.971 값(0.921~0.995 범위)을 TSS는 평균 0.868 값(0.724~0.981 범위)으로 높은 수준의 예측 정확도를 나타냈다(Table 1; Figure 2). 섬피나무(*Euonymus chibai*

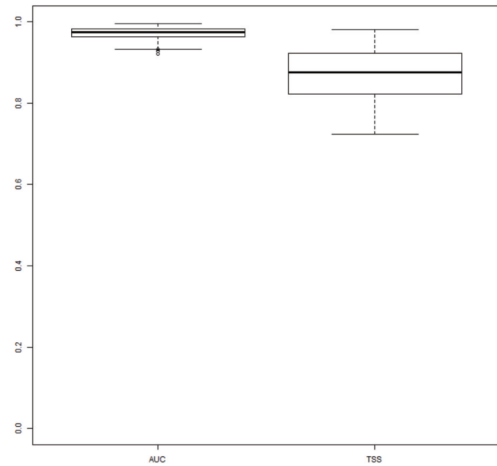


Figure 2. Box plots for assessments of Ensemble Models (Area Under the Curve(AUC), True Skill Statistic(TSS))

Makino)의 종분포모형이 가장 높은 예측 정확도(AUC 값, 0.995; TSS 값, 0.981)를 보여주었다. AUC 값 기준으로 토현삼(*Scrophularia koraiensis* Nakai)이 0.921 값을, TSS 값 기준으로 새끼노루귀(*Hepatica insularis* Nakai)가 0.724 값으로 가장 낮은 예측 정확도를 보여주었다(Table 1). 종풍부도 합산을 위한 기준값(서식지역과 비서식지역 구분을 위한 값)은 개별 종마다 다르게 나타난다. 각 종의 예측모형에서 민감도와 특이도의 합이 최대가 되는 값(Table 1의 Cutoff value)을 기준으로 서식가능 여부를 구분하였다.

한반도 기후변화 적응 대상식물 89종을 대상으로 한 남한지역의 종풍부도는 Figure 3과 같다. 전체종(89종)을 대상으로 한 종풍부도는 0~48까지의 범위로 나타났고, 주요 국립공원 지역, 강원도 백두대간 지역 그리고 남해안의 도서지역을 중심으로 높게 나타났다. 설악산, 오대산 그리고 태백산 국립공원은 공원 전체지역이 높은 종풍부도 값을 보였다. 치악산, 소백산, 월악산, 덕유산, 지리산, 한라산 국립공원은 공원 내에서도 고도가 높은 지역일수록 종풍부도 값이 높게 나타났다. 국립공원과 강원도 백두대간 지역에서는 자생식물과 북방계식물의 많은 종이 적합한 서식지로 예측되었기 때문에 종풍부도가 높게 나타났다.

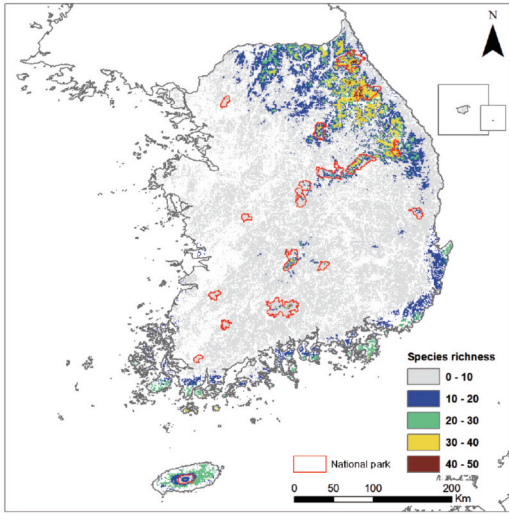


Figure 3. Potential species richness map under current climate conditions. (The red line on the map is mountain area in the national park)

그에 반해 남해안 도서지역은 남방계 식물의 많은 종이 적합한 서식지로 예측되어서 종풍부도가 높게 나타났다. 국립공원과 한반도 전체면적의 종풍부도 평균값을 비교해 보면, 국립공원 지역의 종풍부도 평균값은 13,397로 한반도 전체 평균값인 6,477보다 월등히 높은 값을 보였다(Figure 4, Figure 5, Table 3). 식물 특성별로 나누어서 분석한 종풍부도는

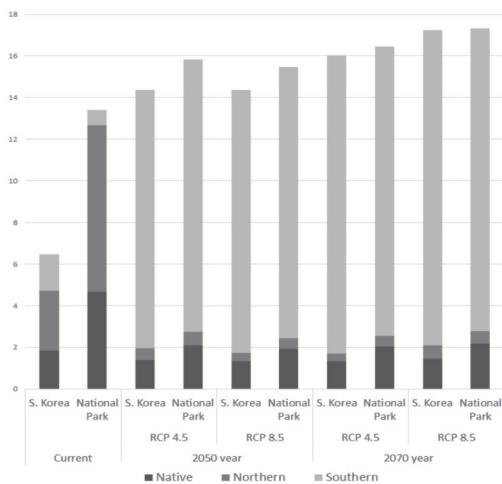


Figure 4. Average value of potential species richness under current and future climate conditions in South Korea and inside the national park.

Figure 6과 같다. 특산식물(23종)을 대상으로 한 경우에는 0~15의 범주로, 북방계식물(30종)을 대상으로 한 경우에는 0~29의 범주로 그리고 남방계식물(36종)을 대상으로 한 경우에는 0~33의 범주로 나타났다. 특산식물 보다는 북방계식물과 남방계식물들이 대체적으로 식물의 특성별로 함께 나타나는 경향을 보였다. 이는 특산식물은 개별 식물별로 특정한 서식지를 갖지만 북방계식물과 남방계식물은 지역별 서식지 특성으로 구분되었기 때문으로 보인다. 특산식물과 북방계식물의 경우 국립공원과 백두대간지역의 종풍부도가 높게 나타나는 비슷한 경향을 보였다. 하지만 특산식물은 남해안 지역과 한라산의 저위도 지역에서 몇몇 종이 적합한 서식지로 나타났지만 동일지역에서 북방계식물은 그렇지 않았다. 남방계식물의 경우 제주도 한라산의 저위도 지역, 전라남도 흑산도에서 경상남도 거제도까지의 남해안지역 그리고 경상북도 포항시 호미곶 지역의 종풍부도가 높게 나타났다. 국립공원의 종풍부도 평균값을 높이는 것은 남방계식물(평균값, 0.72)보다는 북방계식물(평균값, 8.017)과 특산식물(평균값, 4.66)이 많은 기여를 하는 것으로 나타났다(Figure 4, Table 3). 이와 비슷하게 한반도 전체지역의 종풍부도 평균값은 북

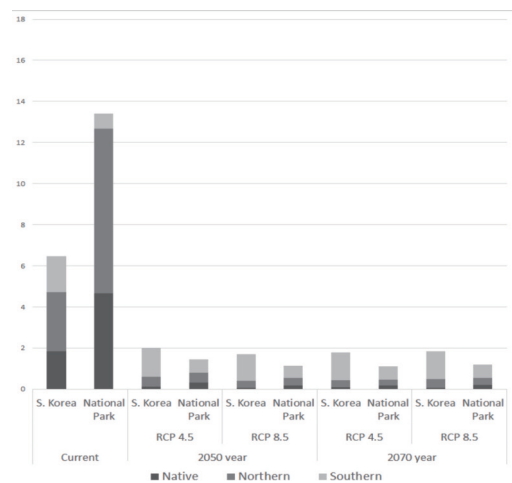


Figure 5. Average value of potential species richness without dispersal under current and future climate conditions in South Korea and inside the national park.

Table 3. Average value of potential species richness in South Korea and inside the national park.

Plant characteristics	Current		2050 year				2070 year			
			RCP 4.5		RCP 8.5		RCP 4.5		RCP 8.5	
	South Korea	National Park	South Korea	National Park	South Korea	National Park	South Korea	National Park	South Korea	National Park
Native Plant	1.837	4.66	1.389 (75.61%)	2.083 (44.7%)	1.336 (72.73%)	1.929 (41.39%)	1.331 (72.46%)	2.051 (44.01%)	1.448 (78.82%)	2.181 (46.8%)
Northern Plant	2.876	8.017	0.564 (19.61%)	0.658 (8.21%)	0.404 (14.05%)	0.495 (6.17%)	0.371 (12.9%)	0.507 (6.32%)	0.65 (22.6%)	0.582 (7.26%)
Southern Plant	1.763	0.72	12.418 (704.37%)	13.089 (1817.9%)	12.637 (716.79%)	13.043 (1811.5%)	14.32 (812.25%)	13.891 (1929.3%)	15.147 (859.16%)	14.574 (2024.1%)
Total Plant	6.477	13.397	14.418 (222.6%)	15.83 (118.16%)	14.377 (221.97%)	15.467 (115.45%)	16.022 (247.37%)	16.428 (122.62%)	17.245 (266.25%)	17.338 (129.42%)

(%) Percentage compared to current

방계식물(평균값, 2.876), 특산식물(평균값, 1.837) 그리고 남방계식물(평균값, 1.763) 순으로 기여를 하였다(Figure 4, Table 3).

2. 미래 종풍부도 변화 예측

기후변화를 고려한 한반도 기후변화 적응 대상식물의 종풍부도는 개별 종의 양상블모형 결과를 활용하였다. 개별 종의 모형에서 RCP 4.5와 8.5 시나리오를 대상으로 2050년과 2070년 시기를 예측하였다. 89종의 미래 종풍부도는 Figure 7과 같이 나타났다. 기존에 종풍부도가 낮게 나타났던 지역들이 높아지면서 2050년 보다 2070년으로 갈수록 전체 종풍부도 평균값이 높아졌다(Figure 4, Table 3). 전체 국립공원지역으로 종풍부도 평균값을 현재와 비교해보면 남한 전체지역과 유사하게 미래로 갈수록 종풍부도가 높아졌다. 하지만 현재 기준으로 종풍부도가 높았던 설악산, 오대산 그리고 태백산 국립공원 지역들과 강원도 백두대간 지역들은 오히려 종풍부도가 낮아졌다. 시기별로 국립공원과 남한 전체지역을 비교해 보면 2050년에서 2070년까지 시나리오에 상관없이 국립공원지역의 종풍부도 평균값이 높게 나타났다. 기후변화에 따라서도 국립공원의 종풍부도가 높게 나타났다. 하지만 그 증가폭은 남한 전체지역이 급속히 증가하여 RCP8.5 시나리오의 2070년의 경우 국립공원과의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 한반도 기후변화 적응 대상식물 89종을 기준으로 살

펴보았을 때, 기존에 생물다양성 우수지역이었던 국립공원이 미래 기후변화에 의해서 일반적인 지역들과 차별성이 사라질 수 있다고 나타났다. 종이 적합한 서식지로의 이주가 전혀 이루어지지 않았을 경우에는 남한 전체지역과 국립공원 모두 종풍부도 평균값이 급격하게 감소하였다(Figure 5, Table 4).

식물 특성별로 나누어서 분석한 미래 종풍부도의 변화는 Figure 8과 같이 나타났다. 특산식물을 대상으로 한 경우에는 국립공원과 강원도 백두대간 지역들의 종풍부도가 급격히 낮아졌다. 아주 높은 종풍부도(9~15 범주)를 나타냈던 지역들 또한 많이 사라지면서, 3종 이하의 종들만 함께 나타나는 지역들이 늘어났다. 남한 전체의 특산식물 종의 종풍부도는 미래로 갈수록 다소 낮아지는 경향을 보였지만 큰 차이를 보이지는 않았다. 하지만 국립공원에서 높은 종풍부도(평균값, 4.66)를 보였던 특산식물은 미래로 갈수록 절반이하로 떨어지며 낮아지는 경향을 보였다(Figure 4, Table 3). 북방계식물을 대상으로 한 종풍부도 또한 미래로 갈수록 낮아졌다. 남한 전체지역과 국립공원의 종풍부도 평균값이 모두 급격히 떨어졌다. 미래로 갈수록 종풍부도 값이 떨어지는 이유는 많은 수의 북방계종들이 남한지역에서 사라지기 때문인 것으로 보인다. 특산식물과 북방계식물과는 반대로 남방계식물의 종풍부도는 남한 전체지역에서 크게 늘어났다. 남해안 도서지역과 제주도 한라산 일부지역에서 높은 종풍부도 값을 보이던 남방계식물

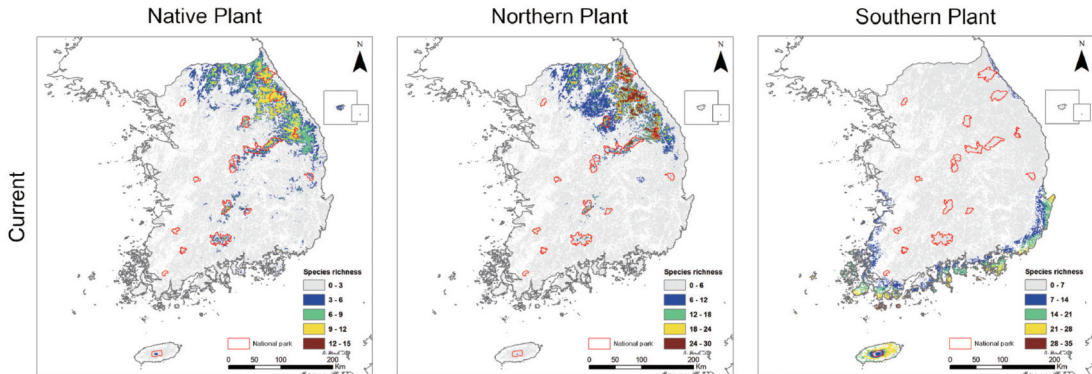


Figure 6. Potential species richness map by three kinds of plant characteristics under current climate conditions. (The red line on the map is mountain area in the national park)

Table 4. Average value of potential species richness without dispersal in South Korea and inside the national park.

Plant characteristics	Current		2050 year				2070 year			
			RCP 4.5		RCP 8.5		RCP 4.5		RCP 8.5	
	South Korea	National Park	South Korea	National Park	South Korea	National Park	South Korea	National Park	South Korea	National Park
Native Plant	1.837	4.66	0.12 (6.53%)	0.319 (6.85%)	0.049 (2.67%)	0.167 (3.58%)	0.08 (4.35%)	0.175 (3.76%)	0.057 (3.1%)	0.207 (4.44%)
Northern Plant	2.876	8.017	0.484 (16.83%)	0.481 (6%)	0.354 (12.31%)	0.362 (4.52%)	0.339 (11.79%)	0.271 (3.38%)	0.436 (15.16%)	0.344 (4.29%)
Southern Plant	1.763	0.72	1.416 (80.32%)	0.658 (91.39%)	1.286 (72.94%)	0.618 (85.83%)	1.37 (77.71%)	0.65 (90.28%)	1.341 (76.06%)	0.638 (88.61%)
Total Plant	6.477	13.397	2.02 (31.19%)	1.458 (10.88%)	1.689 (26.08%)	1.147 (8.56%)	1.789 (27.62%)	1.088 (8.12%)	1.835 (28.33%)	1.189 (8.88%)

(%) Percentage compared to current

은 미래로 갈수록 남해안의 내륙지역과 제주도 대부분의 지역에서 종풍부도가 높아졌다. 특산식물과 북방계식물의 종풍부도 값이 낮아지는 것에 비해 남방계식물의 종풍부도 값이 보다 더 높아졌다. 이로 인해 남방계식물은 남한지역과 국립공원의 종풍부도 평균값이 현재 보다 높아지도록 크게 기여하였다.

기후변화 적응 대상식물 89종을 대상으로 미래 종풍부도를 모의해본 결과 새로운 적합 서식지로서의 이주가 제한 없이 가능하다면 많은 수의 특산식물과 북방계식물은 사라지고 남방계식물이 그 자리를 차지하면서 남한지역 식생의 수종변화가 생길 것으로 예상된다. 하지만 새로운 적합 서식지로 이주가 불가능하다면 종풍부도는 급격하게 감소할 것으로 예측되었다(Figure 5, Table4). 특산식물과 북방계식물은 기후변화에 따라서 이주가 불가능하다면 종풍부도가

80% 이상 감소할 것으로 나타났다. 같은 상황에서 남방계식물의 경우에는 종풍부도가 30% 미만으로 감소할 것으로 나타났다. 이주가 불가능한 상황에서 서식지가 확장되는 남방계식물보다 서식지가 줄어들 것으로 예상되는 특산식물과 북방계식물의 종풍부도가 더 큰 악영향을 받을 것으로 보였다. 적합 서식지로 이주가 불가능한 상황에서 남한 전체 지역보다는 국립공원이 특산식물과 남방계식물의 종풍부도를 보다 더 유지하는 것으로 나타났다. RCP4.5 시나리오의 2070년 예측을 제외하면 특산식물과 남방계식물의 감소비율이 남한 전체지역보다 국립공원이 적었다.

3. 종풍부도 예측의 한계와 활용가능성

종분포모형을 활용한 종풍부도는 불확실성을 갖고 있다. 이는 모든 모형이 지니고 있는 불확실성을 중

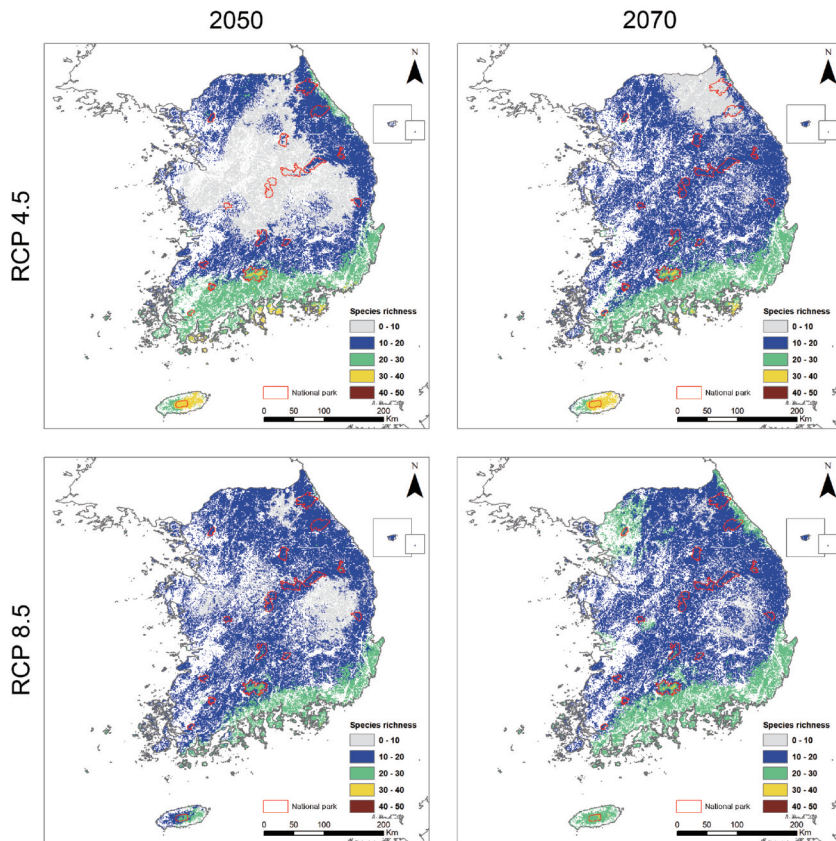


Figure 7. Potential species richness map considering future climate conditions (The red line on the map is mountain area in the national park)

분포모형 또한 지니고 있기 때문이다. 중분포모형에 의한 기후변화 예측은 기후자료, 모형의 방법과 매개 변수(parameter) 등에 의해서 그 결과가 크거나 작게 예측(over-or under-estimation)되기도 한다(Sinclair et al., 2010; Koo et al., 2017). 중분포모형은 고정된 특정한 상태를 예측하는 것으로 다양한 종간의 상호작용(경쟁, 천이, 순응·적응, 분산, 진화 등)을 고려하지 못하는 모형 자체의 한계 또한 지니고 있다(Barry & Elith 2006; Franklin 2010; Wenger et al., 2013; Shin et al., 2018). 그 외에도 모형에서 사용되는 종의 조사 자료의 공간적 편중성, 공간의 시간적 변화(계절변화, 산불, 극한기후 등) 또한 반영되기 어렵다(Sinclair et al., 2010). 그리고 사용되는 기후변화 자료의 해상도는 대부분 1km 이상인 것으로 종의 미소서식지를 반영하기에도 어려움

이 있다(Sinclair et al., 2010). 종의 서식지에 영향을 미치는 상세한 공간자료가 있다고 하더라도 기후변수에 해상도를 맞추면서 어떻게 대표성을 가져가야 할 것인지에 대한 불확실성도 존재한다(Williams et al., 2003; Sinclair et al., 2010).

중분포모형은 이러한 한계를 갖고 있음에도 불구하고 생태계 분야에서 활용될 가능성이 크다. 중분포모형을 활용한 결과들은 명확화하면서 간결하게 기후변화에 대한 생태계의 위협을 제시하면서(Pearson & Dawson 2003; Thuiller et al., 2004; Thomas et al., 2004; McClean et al., 2005; Pearson et al., 2006), 비 과학 분야에서 생태학적인론과 생물다양성 보전의 노력을 증진시켰다(Sinclair et al., 2010). 또한 중분포모형은 생물 지리학적 패턴, 생물 서식지의 이해 그리고 멸종 위기종

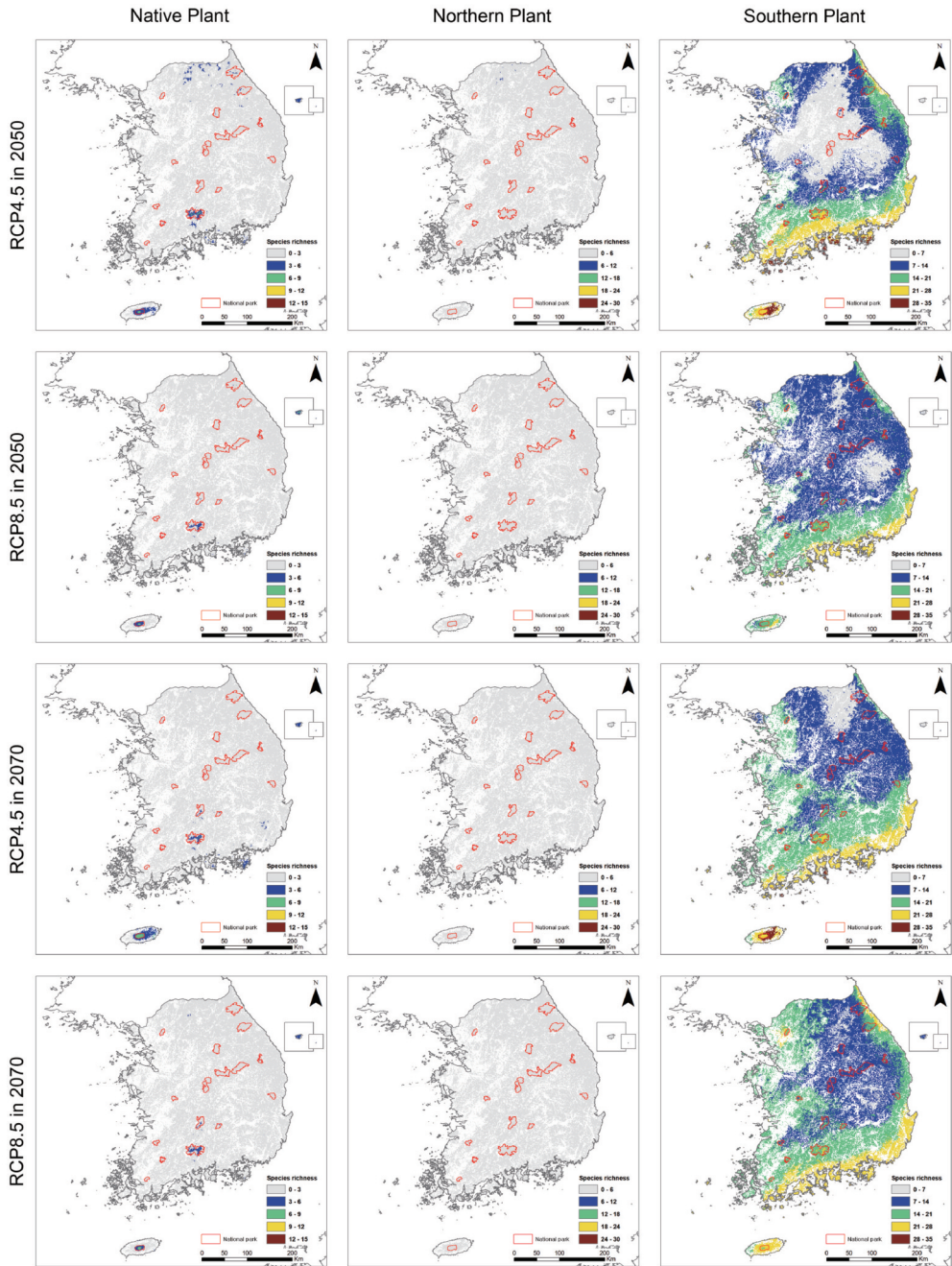


Figure 8. Potential species richness map considering future climate conditions (The red line on the map is mountain area in the national park)

IV. 결론

재도입과 같은 보전전략을 수립하는데 도움이 될 수 있다 (Guisan & Theurillat 2000; Algar et al. 2009; Sinclair et al. 2010; Dubuis et al. 2011).

지금까지 미래 기후변화에 따른 단일 종에 대한 서식지 예측과 평가가 많이 이루어 졌다. 보전 계획과

기후변화 대응 전략 마련을 위해서는 멸종위기종과 같은 단일 종을 포함하여 다수의 종을 함께 고려하는 것 또한 중요하다. 따라서 본 연구는 한반도 기후변화 적응 식물 89종을 대상으로 미래의 종풍부도가 어떻게 변화할 것인지 예측해 보았다. 생물다양성 우수 지역으로 알려진 국립공원의 변화 패턴을 확인하기 위해서 남한 전체 지역과의 비교를 해 보았다. 현재의 종풍부도는 한반도 기후변화 적응 식물 중에서 특산식물과 북방계식물의 다수에 의해서 국립공원과 강원도 백두대간 지역이 높게 나타났다. 그리고 남방계식물의 영향으로 남해안의 도서지역과 그 주변의 종풍부도가 높게 나타났다. 국립공원 지역의 종풍부도 평균값은 남한 전체 지역의 평균값보다 큰 차이를 보였다. 기후변화에 따른 미래 종풍부도의 값은 현재와 다른 양상으로 나타났다. 기존에 높았던 국립공원 지역의 종풍부도 값은 미래로 갈수록 남한 전체지역과의 차이가 없어지는 결과가 나타났다. 이는 특산식물과 북방계식물이 미래로 갈수록 적합한 서식지가 사라지면서 남방계식물이 북상하면서 나타나기 때문으로 판단된다. 하지만 새로운 적합 서식지로의 이주가 불가능하다고 가정하면 미래의 종풍부도는 급격하게 감소하였다. 분산가능성의 가정에 따라 결과가 다르게 나타났다. 본 연구는 종풍부도를 예측함에 있어서 생태계에서 일어날 수 있는 다양한 상호작용을 고려하지 못하였다. 추후에 식물 종 뿐 아니라 다양한 분류군의 보다 많은 종으로 생물다양성을 평가하여 기후변화에 따른 한반도 지역의 영향을 분석하는 연구가 수행되어야 할 것으로 보인다. 하지만 본 연구는 기존에 국내에서 이루어 지지 않았던 기후변화에 따른 종풍부도를 예측하고 식물의 특성별로도 다르게 나타날 수 있는 미래 종풍부도 양상을 분석하였다는 것에 의의가 있다. 이러한 연구는 보전 계획 수립, 보호 지역 설정, 생물종 복원 그리고 기후변화 대응 전략 및 관리 방안 등을 마련하는데 기초자료로 활용 될 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 환경부와 한국환경산업기술원 “201400

1310009(기후변화대응 환경기술개발사업)”의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Algar AC, Kharouba HM, Young ER, Kerr JT. 2009. Predicting the future of species diversity: macroecological theory, climate change, and direct tests of alternative forecasting methods. *Ecography*. 32: 22-33.
- Allouche O, Tsoar A, Kadmon R. 2006. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of applied ecology* 43(6): 1223-1232.
- Araujo MB, Pearson RG, Thuiller W, Erhard M. 2005. Validation of species-climate impact models under climate change. *Global Change Biol*. 11,1504-1513.
- Araujo MB, Thuiller W, Pearson RG. 2006. Climate warming and the decline of amphibians and reptiles in Europe. *J. Biogeogr*. 33: 1712-1728.
- Attorre F, De Sanctis M, Francesconi F, Bruno F. 2007. Comparison of interpolation methods for mapping climatic and bioclimatic variables at regional scale. *International journal of climatology*. 27(13): 1825-1843.
- Barry S & Elith J. 2006. Error and uncertainty in habitat models. *Journal of Applied Ecology*. 43(3): 413-423.
- Cornell HV. 1999. Unsaturation and regional influences on species richness in ecological communities: a review of the evidence. *Ecoscience*. 6: 303-315.
- Dubuis A, Pottier J, Rion V, Pellissier L, Theurillat JP, Guisan A. 2011. Predicting spatial patterns of plant species richness: a

- comparison of direct macroecological and species stacking modelling approaches. *Diversity and Distributions*. 17(6): 1122-1131.
- Elith J, Phillips SJ, Hastie T, Dudik M, Chee YE, Yates CJ. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and distributions*, 17(1), 43-57.
- Franklin J. 2010. Mapping species distributions: spatial inference and prediction. Cambridge University Press.
- Gioia P & Pigott JP. 2000. Biodiversity assessment: a case study in predicting richness from the potential distributions of plant species in the forests of south-western Australia. *Journal of Biogeography*. 27: 1065-1078.
- Golicher DJ, Cayuela L, Newton AC. 2012. Effects of climate change on the potential species richness of Mesoamerican forests. *Biotropica*, 44(3), 284-293.
- Gotelli NJ, Colwell RK. 2001. Quantifying biodiversity: procedures and pitfalls in the measurement and comparison of species richness. *Ecology letters*. 4(4): 379-391.
- Grinnell J. 1904. The origin and distribution of the chest-nut-backed chickadee. *The Auk*. 21(3): 364-382.
- Guisan A, Rahbek C. 2011. SESAM-a new framework integrating macroecological and species distribution models for predicting spatio-temporal patterns of species assemblages. *Journal of Biogeography*. 38(8): 1433-1444.
- Guisan A, Theurillat, JP. 2000. Equilibrium modeling of alpine plant distribution: how far can we go?. *Phytocoenologia*. 30: 353-384.
- Guisan A, Thuiller W. 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*. 8: 993-1009.
- Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25: 1965-1978.
- IPCC. 2001. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability: Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, UK.
- IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Jung, DJ, Kang KH, Heo J, Kim C, Kim SH, Lee JB. 2010. Mapping for Biodiversity Using National Forest Inventory Data and GIS. *J. Environ. Impact Assess.* 19(6): 573-581. [Korea Literature]
- Kang HI & Kang KS. 2018. Evaluation Criteria of Biodiversity in Ecosystem Protected Areas -In Mt. Jiri and Mt. Bukhan National Parks-. *J. Environ. Impact Assess.* 27(2): 114-123. [Korea Literature]
- Kim J, Kwon H, Seo C, Kim M. 2014. A nationwide analysis of mammalian biodiversity hotspots in South Korea. *J. Environ. Impact Assess.* 23(6): 453~465. [Korea Literature]
- Kong WS. 2007. Biogeography of Korean Plants. Seoul. GEOBOOK. 336 page. [Korea Literature]
- Koo KA, Kong WS, Nibbelink NP, Hopkinson CS, Lee JH. 2015. Potential effects of climate change on the distribution of cold-

- tolerant evergreen broadleaved woody plants in the Korean peninsula. *PLoS one*. 10(8): e0134043.
- Koo KA, Park SU, Hong S, Jang I, Seo C. 2018. Future distributions of warm-adapted evergreen trees, *Neolitsea sericea* and *Camellia japonica* under climate change: ensemble forecasts and predictive uncertainty. *Ecological Research*, 33(2), 313-325.
- Koo KA, Park SU, Kong WS, Hong S, Jang I, Seo C. 2017. Potential climate change effects on tree distributions in the Korean Peninsula: Understanding model & climate uncertainties. *Ecological Modelling* 353: 17-27.
- Korea Meteorological Administration. 2011. Case Studies to Understand and Take Advantage of Climate Change Scenarios. 14pp. [Korea Literature]
- Korea National Arboretum. 2004. Distribution maps of vascular plants of Korean peninsula I. South coast province. Korea National Arboretum, Pocheon. [Korea Literature]
- Korea National Arboretum. 2005. Distribution maps of vascular plants of Korean peninsula II. South province (Jeollado & Jirisan). Korea National Arboretum, Pocheon. [Korea Literature]
- Korea National Arboretum. 2006. Distribution maps of vascular plants of Korean peninsula III. Central & South province (Chungcheong-do). Korea National Arboretum, Pocheon. [Korea Literature]
- Korea National Arboretum. 2007. Distribution maps of vascular plants of Korean peninsula IV. Central & south province (Gyeongsangbuk-do). Korea National Arboretum, Pocheon. [Korea Literature]
- Korea National Arboretum. 2008. Distribution maps of vascular plants of Korean peninsula V. Central province (Geonggi-do). Korea National Arboretum, Pocheon. [Korea Literature]
- Korea National Arboretum. 2009. Distribution maps of vascular plants of Korean peninsula VI. Central province (Gangwon-do). Korea National Arboretum, Pocheon. [Korea Literature]
- Korea National Arboretum. 2010a. 300 Target Plants Adaptable to Climate Change in the Korean Peninsula. Korea National Arboretum, Pocheon. [Korea Literature]
- Korea National Arboretum. 2010b. Distribution maps of vascular plants of Korean peninsula VII. South province (Gyeongsangnam-do) and Ulleung-do province. Korea National Arboretum, Pocheon. [Korea Literature]
- Korea National Arboretum. 2010c. Distribution maps of vascular plants of Korean peninsula VIII. Jeju-do province. Korea National Arboretum, Pocheon. [Korea Literature]
- Korea National Arboretum. 2011. Distribution maps of vascular plants of Korean peninsula IX. West & South coast province. Korea National Arboretum, Pocheon. [Korea Literature]
- Kwon H, Seo C, Park CH. 2012. Development of Species Distribution Models and Evaluation of Species Richness in Jirisan region. *Journal of Korean Society for Geospatial Information System*. 20(3): 11-18. [Korea Literature]
- Kwon HS. 2014. Applying Ensemble Model for Identifying Uncertainty in the Species

- Distribution Models. Journal of the Korean Society for Geospatial Information System 22(4): 47-52. [Korea Literature]
- Lee WT, Yim YJ. 2002. Plant Geography. Chuncheon. 414 pages. [Korea Literature]
- Liu C, Berry P, Dawson T, Pearson R. 2005. Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions. *Ecography* 28:385-393.
- Lobo JM, Nez Valverde AJ, Real R. 2008. AUC: A misleading measure of the performance of predictive distribution models. *Global Ecol Biogeogr.* 17(2):145-151.
- Margalef DR. 1958. Information theory in ecology. *International Journal of General Systems.* 3: 36-71.
- Mateo-Tomas P, Olea PP, Sanchez-Barbudo IS, Mateo R. 2012. Alleviating human-wildlife conflicts: identifying the causes and mapping the risk of illegal poisoning of wild fauna. *Journal of Applied Ecology,* 49(2), 376-385.
- May RM. 1988. How many species are there on earth?. *Science.* 241(4872): 1441-1449.
- McClellan CJ, Lovett JC, Kuper W, Hannah L, Henning Sommer J, Barthlott W, Termansen M, Smith GF, Tokumine S, Taplin JRD. 2005. African plant diversity and climate change. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 92:139-152.
- Ministry of Environment. 2012. The Biodiversity of Korea. 132 pages. [Korea Literature]
- National Geographic Information Institute. 2014. The national atlas of Korea 1st Edition. Physical Geography, Suwon. 252pp. [Korea Literature]
- National Geographic Information Institute. 2016. The national atlas of Korea 2st Edition. Physical Geography, Suwon. 243pp. [Korea Literature]
- Nogues-Bravo D, Araujo MB, Romdal T, Rahbek C. 2008. Scale effects and human impact on the elevational species richness gradients. *Nature.* 453: 216-219.
- Ortega-huerta MA & PETERSON AT. 2004. Modelling spatial patterns of biodiversity for conservation prioritization in north-eastern Mexico. *Divers. Distrib.* 10(1): 39-54.
- Park HS, Choi GW. 2014. Applicability Evaluation of RCP Climate Change Scenarios in the Complex Coastal Regions. *Korean Review of Crisis & Emergency Management.* 10(2): 215-230. [Korea Literature]
- Park SU, Koo KA, Seo C, Hong S. 2017. Climate-related range shifts of *Ardisia japonica* in the Korean Peninsula: a role of dispersal capacity. *Journal of Ecology and Environment,* 41(1): 38.
- Park SU, Koo KA, Seo C, Kong WS. 2016. Potential Impact of Climate Change on Distribution of *Hedera rhombea* in the Korean Peninsula. *The Korean Society of Climate Change Research,* 7(3), 325-334. [Korea Literature]
- Parviainen M, Marmion M, Luoto M, Thuiller W, Heikkinen RK. 2009. Using summed individual species models and state-of-the-art modelling techniques to identify threatened plant species hotspots. *Biological Conservation.* 142: 2501-2509.
- Pearson RG, Dawson TP. 2003. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimatic envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography* 12: 361-371.
- Pearson RG, Thuiller W, Araujo MB, Martinez-Meyer E, Brotons L, McClellan C, Miles L,

- Segurado P, Dawson TP, Lees DC. 2006. Model-based uncertainty in species range prediction. *Journal of Biogeography* 2006:1-8.
- Pearson RG. 2007. Species' distribution modeling for conservation educators and practitioners. *Synthesis*. American Museum of Natural History, 50.
- Pielou EC. 1966. Shannon's formula as a measure of specific diversity: Its use and misuse. *The American Naturalist*. 100(914): 463-365.
- Pielou EC. 1975. *Ecological diversity*. John Wiley & Sons Inc. pp. 165.
- Schimper AFW. 1903. *Plant-Geography upon a physiological basis*. Transl. WR Fisher. Oxford, Clarendon Press.
- Secretariat of the Convention on Biological Diversity. 2014. *Global Biodiversity Outlook 4*. Montreal, 155 pages. [Korea Literature]
- Shin MS, Jang RI, Seo CW, Lee MW. 2015. A Comparative Study on Species Richness and Land Suitability Assessment ; Focused on city in Boryeong. *J. Environ. Impact Assess.* 24(1): 35-50. [Korea Literature]
- Shin MS, Seo C, Park SU, Hong S, Kim JY, Jeon JY, Lee M. 2018. Prediction of Potential Habitat of Japanese evergreen oak (*Quercus acuta* Thunb.) Considering Dispersal Ability Under Climate Change. *J. Environ. Impact Assess.* 27(3): 291~306. [Korea Literature]
- Sinclair SJ, White MD, Newell GR. 2010. How useful are species distribution models for managing biodiversity under future climates?. *Ecology and Society*, 15(1).
- Thomas CD, Cameron A, Green RE, Bakkenes M, Beaumont LJ, Collingham YC, Erasmus BFN, Siqueira MF, Grainger A, Hannah L, Hughes L, Huntley B, Jaarsveld AS, Midgley GF, Miles L, Ortega-Huerta MA, Peterson AT, Phillips OS, Williams SE. 2004. Extinction risk from climate change. *Nature* 427: 145-148.
- Thuiller W, Brotons L, Araujo MB, Lavorel S. 2004. Effects of restricting environmental range data to project current and future species distributions. *Ecography* 27:165-172.
- Thuiller W, Lafourcade B, Engler R, Araujo MB. 2009. Biomod-a platform for ensemble forecasting of species distributions. *Ecography* 32(3):369-373.
- Urquiza-haas T, Peres CA, Dolman PM. 2009. Regional scale effects of human density and forest disturbance on large-bodied vertebrates throughout the Yucatan Peninsula, Mexico. *Biol. Conserv.* 142: 134-148.
- Usher MB. 1996. *Wildlife conservation evaluation: Attributes criteria and values*. Chapman & Hall. pp. 3-44.
- Wenger SJ, Som NA, Dauwalter DC, Isaak DJ, Neville HM, Luce CH, Rieman BE. 2013. Probabilistic accounting of uncertainty in forecasts of species distributions under climate change. *Global Change Biology*. 19(11): 3343-3354.
- Whittaker, RH. 1972. Evolution and measurement of species diversity. *Taxon*. 213-251.
- Williams SE, Bolitho EE, Fox S. 2003. Climate change in Australian tropical rainforests and impending environmental catastrophe. *Proceedings of the Royal Society of London B* 270:1887-1892.

Appendix 1. Bioclimatic variables(www.worldclim.org)

Bioclimatic variable	Description
Bio1	Annual mean temperature
Bio2	Mean diurnal range (mean of monthly (max temp -min temp))
Bio3	Isothermality (Bio2/Bio7) (*100)
Bio4	Temperature Seasonality (standard deviation *100)
Bio5	Max Temperature of Warmest Month
Bio6	Min Temperature of Coldest Month
Bio7	Temperature Annual Range (BIO5-BIO6)
Bio8	Mean Temperature of Wettest Quarter
Bio9	Mean Temperature of Driest Quarter
Bio10	Mean Temperature of Warmest Quarter
Bio11	Mean Temperature of Coldest Quarter
Bio12	Annual Precipitation
Bio13	Precipitation of Wettest Month
Bio14	Precipitation of Driest Month
Bio15	Precipitation Seasonality (Coefficient of Variation)
Bio16	Precipitation of Wettest Quarter
Bio17	Precipitation of Driest Quarter
Bio18	Precipitation of Warmest Quarter
Bio19	Precipitation of Coldest Quarter