

Prediction of Distribution Tendency of Amphibians in South Korea according to Climate Change using MaxEnt Modeling

Do min seock

(Department of Biology, Kyung Hee University, Seoul 130-701, SouthKorea)

Abstract

For the last 10 years, studies of the decrease and extinction of amphibians under the influence of climatic change have been conducted around the world. This study used Maximum Entropy (MaxEnt) modeling of 16 species of amphibians to predict their distribution tendency to be changed with climate change and check its applicability. Using the distribution of amphibians in the data of the 3rd Korean Nationwide Survey on Natural Environments and seven climate variables of the present and future, this study checked their distribution at this point in time and that in the future (2050 and 2070). The range of the average AUC of the 16 species extracted as a result of analysis was 0.555 to 0.991. As compared to the 2014 Projection, it was predicted that the distribution of amphibians in the 2050 Projection and 2070 Projection would decrease, and because of the climate variables of Temp 4 and Prec 17, it was predicted that the distribution would increase more in the 2070 Projection than 2050 Projection. For three species with high decreasing tendency (*Hynobius leechii*, *Rana rugosa* and *Bombina oritalis*) out of 14 species, it is judged that there was an influence of climate on the adaptability of the distributed species, while it is judged that the increase of two species resulted from not using the habitat variable. In addition, of the seven climate variables that contributed to the change in the distribution of 16 species of amphibians, mostly, temperature-related variables had influences. There had been prediction results that the northeast area might be suitable for most species, while this study did not use various different environmental variables other than climate variables, and it has a short research period and limitation that did not consider various variables such as secondary risk factors, the transition of vegetation, natural disturbances and the adaptation of organisms. Therefore, for the preservation and promotion of amphibians according to climatic change in South Korea, it is necessary to monitor them systematically in the long-term.

Key words : Amphibian, Climate change, Maxent model, Distribution



1. 서론

최근 10년 동안 양서류 종의 감소와 멸종에 대한 연구는 세계 곳곳에서 진행되고 있으며 (e.g. Alford and Richards, 1999; Houlahan et al., 2000), 지구상에 서식하고 있는 양서류의 개체군들은 다양한 원인으로 인해 40%이상이 급격하게 감소하고 있다(Corey and Waite 2008). 이러한 감소의 원인은 서식지 파괴와 교란(habitat destruction and perturbation), 개발(overexploitation), 오염(pollution), 살충제의 사용(pesticide use), 도입 종(introduced species), 증가된 자외선(increased ultraviolet-B radiation(UV-B)), 질병(disease) 과 기후변화(climate change)의 요인들로 인해 나타나고 있다고 연구되고 있다(Blaustein and Wake 1990; Houlahan et al. 2000; Blaustein and Kiesecker 2001; Parmesan 2006; Whitfield et al. 2007).

기후변화에 대한 가설은 다양한 연구들을 통해 사실임이 입증되고 있다(Alford and Richards, 1999; Gibbons et al., 2000; Kiesecker et al., 2001; Carey and Alexander, 2003; Collins and Storer, 2003; Corn, 2005). 양서류의 감소가 기후변화로 인해 진행되는 가설의 검증은 연구종의 생활사에 따른 공간적인 규모(spatial scales)의 변수들이 영향을 미치기 때문이다(Araujo, et al., 2006). 예를 들어 온도와 습도의 변화에 민감한 양서류는 번식을 위해 연못이나 하천으로 이동하며, 번식시기는 계절에 따라서 일어난다. 또한 대부분의 온대 종의 경우, 추운 겨울이나 더운 여름을 피하기 위해 비 활동시기를 보낸다. 따라서 기후변화의 영향으로 인한 기온과 강수량의 변화는 종의 생활사에 영향을 미치는 중요한 요소가 되며, 양서류 종의 감소와 멸종에 영향을 줄 수 있다(Pounds and Crump, 1994; Terhivuo, 1988; Beebee, 1995; Blaustein et al., 2001; Tryjanowski et al., 2003).

기후변화는 특정지역이 아닌 전 지구적 규모에서 발생하는 현상으로, 지역에 따라 양서류 종들에게 미치는 영향은 매우 다양한 양상으로 나타난다(Araujo, et al., 2006). 기후변화의 영향으로 1960년에서 2005년까지 약 100년간 전 세계 평균기온은 0.74°C 상승하였고 1912년에서 2008년까지 한반도의 연평균기온은 1.7°C 상승하여 세계 평균기온의 상승 폭에 비해 1.41배가 높다. 한반도의 경우, 향후 100년 후 전 지역의 기후는 4°C, 남한 내륙지역은 3.8°C가 상승하고, 강수량도 약 17% 증가하며, 주로 기온상승이 큰 지역에서 강수량이 많아질 것이라고 예측하고 있다(김호걸, 2012, 오근석, 서명석, 2013). 이러한 기후변화 예측이 실현되면, 단순한 기온상승만이 아닌 2차적인 위협요소(예; 질병의 전파(항아리곰팡이), 자외선의 증가 등)로 인해 양서류 종은 감소와 멸종에 처할 수 있다(Gibbons, et al., 2000). 따라서 기후변화에 따른 양서류 종 분포의 예측과 필요성 및 보전방안에 대한 연구들은 증대되고 있다(Gibbons, et al., 2000; Araujo, et al., 2006).

기후변화가 양서류의 개체수 감소와 멸종에 영향을 미칠 것 이라는 분포 예측은 다양한 모델링 프로그램을 이용하여 연구되고 있으며, 종의 서식지로 가능한 잠재적 지역과 같은 지리적 분포를 제공한다(Phillips et al., 2006). 이중 Maxent 모형은 회귀분석을 기반으로 하는 모형으로 최대 엔트로피 접근법(Maximum entropy approach)으로 높은 예측 결과를 가질 수 있다(Phillips et al., 2004). 그러나 국내에서는 야생동물의 분포자료와 서식밀도에 관련된 기초자료가 적고 Maxent 모형(Maximum Entropy Modeling)의 적용연구와 주요 야생동물의 서식분포 예측능력은 부족한 실정이다(서창완 등, 2008b). 현재까지 국내에서는 Maxent 모형을 적용한 연구들은 Maxent 모형을 이용한 생물종 분포모형 연구(서창완 등, 2008a), Maxent 모형을 이용한 서식지 잠재력 평가 연구(이동근, 김호걸, 2010), Maxent 모형을 이용한 종분포 모형 적용(권혁수, 2011), Maxent 모형과 ANN을 이용한 종분포 모형 연구(송원경, 2011),

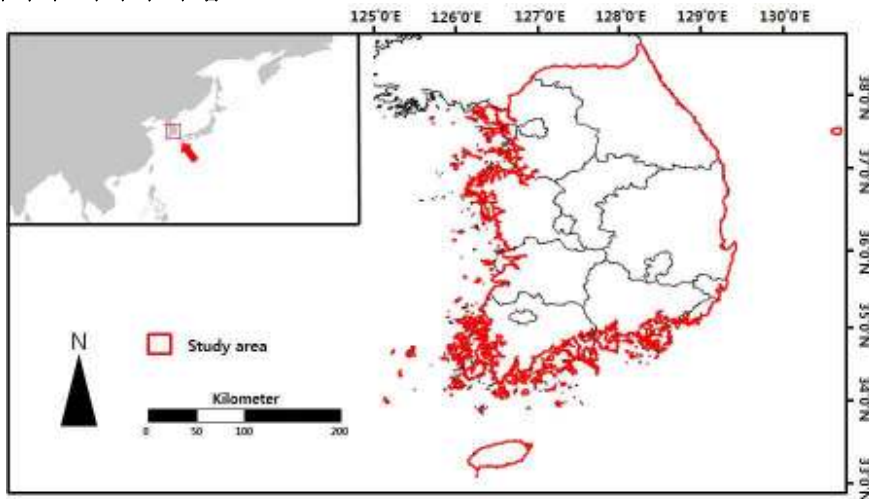


고라니서식지 분석을 위한 기계학습식 종 분포모형 비교(송원경, 김은영, 2012) 등으로 종분포모형과 관련된 기계학습식 모형 적용 연구가 진행되었다.

본 연구의 목적은 제 3차 자연환경조사에 포함된 양서류의 분포 자료를 이용해 Maxent 모형을 구동시켜 기후변화에 따라 국내에 서식하고 있는 양서류의 현재 잠재적 분포패턴의 경향과 향후 기후변화로 인해 변화될 분포경향의 예측에 대한 적용가능성과 한계점을 확인하기 위해 진행되었다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사지역과 데이터 수집



<그림 1> Map of study site in Republic of Korea.

국내에 서식하고 있는 양서류의 현재 분포를 확인하기 위해 국립환경과학원에서 제공하는 제 3차 전국자연환경조사를 참고하여 양서류 분야의 정보를 추출하였다. 제 3차 전국자연환경조사의 경우 2006부터 2012년 까지 각 분류군의 전문가들이 전국을 대상으로 조사한 보고서로 조사지역에 존재하는 종을 확인할 수 있다. 한 개의 조사지역 면적은 3×4km²로, 전체 조사지역의 면적은 93420km²였으며, 총 7785개의 조사지역에서 관찰된 양서류를 확인하였다 (그림 1). 또한 각 지역의 중앙 좌표값을 산출하여 종의 존재 유무를 확인하였다. 본 연구에 사용된 Maxent 모형의 경우, 좌표의 개수가 최소 6개 이상이 되어야 예측이 가능하기 때문에, 무미류인 수원청개구리와 유미류인 고리도롱뇽은 총 관찰된 지역이 6개미만으로 분석에서 제외하였다. 따라서 국내에 서식하는 총 18종의 양서류 중 16종의 양서류를 분석에 사용하였다.

2.2 종 분포 모델

기후변화에 따라 국내에 서식하고 있는 양서류 16종의 분포 변화를 예측하기 위해 Maxent 모형을 이용하였다. 본 모형은 오직 종 출현정보만을 활용하여 관찰된 지점에서 나타나는 생물학적, 기후적, 지형학적인 변수를 이용해 출현 확률을 예측하는 방법으로 통계적 측면에서 우 수성이 입증된 모형이며, 관찰 지점의 숫자가 많지 않을 때도 적합한 분석이 가능



하다(Phillips and Dudik, 2008). 그렇기 때문에 현재까지 많은 동물과 식물의 분포 모형에 이용되고 있다. 본 연구에서는 제 3차 전국자연환경조사에서 추출된 종 출현 격자의 중앙지점을 종속변수로 이용하고, 기후변수를 독립변수로 이용하는 현재의 잠재적인 서식분포 모형을 구축하였으며, 현재시점의 모형에 미래시점의 기후변수를 입력하여 15회 반복구동을 실시해 현재와 미래의 서식지 분포를 예측하였다. 모형 설명력의 검증은 ROC (Receiver operating characteristics) 검증을 통해 곡선의 하부면적 값인 AUC (Area under the curve) 값을 구하여 실시하였다. 측정된 AUC값은 Swets(1988)의 선행연구에 따라 5개의 구간으로 분류 하여 검증의 설명력을 규정하였다. 0.90-1.00 (excellent), 0.80-0.90 (good), 0.70-0.80 (fair), 0.60-0.70 (poor), 0.50-0.60 (fail).

2.3 현재 기후 시나리오

현재의 기후변수의 구축을 위해 Worldclim (<http://www.worldclim.com/current>) 에서 제공하고 있는 현재(1950년 ~ 2000년 평균값)기후자료를 활용하였다. 기후자료는 분석에 적합한 2.5 arc-minutes resolution (약 4.5Km의 격자단위)로 다운 스케일링된 총 19개의 Bioclim변수 중 선행 연구들에 따라 양서류의 생태 생리학(ecophysiological)에 적합한 7개의 기후변수를 선정하였다(Caldwell 1987; HutchisonandDupré 1992; Duellman 1999). 7개의 Bioclim변수는 기온의 계절적 변동(표준편차 * 100) (Temp4), 가장 따뜻한 달의 최대 온도 (Temp5), 가장 추운 분기의 평균기온 (Temp11), 강수량의 계절적 변동(변동 계수) (Prpc15), 가장 습한 분기의 강수량 (Prpc16), 가장 건조한 분기의 강수량 (Prpc17), 가장 따뜻한 분기의 강수량(Prpc18)을 포함하고 있다(표 1).

<표 1> Description of Climate variables used in the models.

| Acronym | Climate variables and descriptions | Range |
|-------------|--|--------------|
| Temp4 | Temperature seasonality (standard deviation * 100) | 706.2-1042.6 |
| Temp5 (°C) | Maximum temperature of warmest month | 21.4-31.0 |
| Temp11 (°C) | Mean temperature of coldest quarter | -8.5-6.7 |
| Prpc15 (mm) | Precipitation seasonality | 23-105 |
| Prpc16 (mm) | Precipitation of wettest quarter | 381-964 |
| Prpc17 (mm) | Precipitation of driest quarter | 59-256 |
| Prpc18 (mm) | Precipitation of the warmest quarter | 376-964 |

2.4 미래 기후 시나리오

미래 기후변수의 구축을 위해 Worldclim (http://www.worldclim.com/cmip5_2.5m)에서 제공하고 있는 미래(2050년 : 2041년 ~ 2060년 평균값; 2070년 : 2061년 ~ 2080년 평균값)기후자료를 활용하였다. 기후자료는 현재 기후 시나리오 자료와 동일한 크기의 2.5 arc-minutes resolution(약 4.5Km의 격자단위)로 다운 스케일링된 7개의 Bioclim변수를 추출하였다. 본 기



후자료의 경우, CCSM4 (Community Climate System Model Version 4)에 포함된 RCP 4.5 시나리오를 이용하였다. CCSM4의 경우, 일반적인 기후 모델로 대기와 대륙, 해양 요소들 사이에 변화하는 흐름과 상태의 정보를 구성하고 있으며, 다양한 분야의 연구에 사용되고 있으며(Cent, et al. 2011), RCP 4.5 시나리오는 온실가스 저감정책이 상당히 실행되는 경우로 본 정책이 실현된다면 21세기 말까지 3.4°C 기온상승과 17.3% 강수량이 증가될 것이라고 예상하고 있다(기상청 2012).

2.5 통계분석

기후변화 시나리오에 따른 현재, 2050년, 2070년에 예측된 양서류의 분포 변화 차이를 각각 알아보기 위해 비모수 통계법인 Mann-Whitney U test를 이용하였으며, 7가지 기후변수의 상관관계를 분석하기 위해 Spearman rank correlation을 이용하였다. 통계적인 분석은 통계프로그램인 Statistical Package for the Social Sciences (SPSS, Ver 18.0)를 사용하였다.

3. 결과

제 3차 전국자연환경조사 자료에 따르면 총 7785개의 조사지역에서 관찰된 국내산 양서류 16종 중 가장 많은 지역에서 관찰된 양서류는 참개구리(*Rana nigromaculata*)로 3680개의 지역에서 관찰되었고, 청개구리(*Hyla japonica*)는 3289지역, 북방산개구리(*Rana dybowskii*)는 2573지역 순으로 높게 관찰되었다. 반면 가장 적은 지역에서 관찰된 양서류는 이끼도롱뇽(*Karsenia koreana*)으로 10개의 지역에서 관찰되었고, 금개구리(*Rana plancyi chosonia*)는 20개 지역, 제주도도롱뇽(*Hynobius quepaertensis*)은 58개 지역 순으로 적게 관찰되었다(표 2).

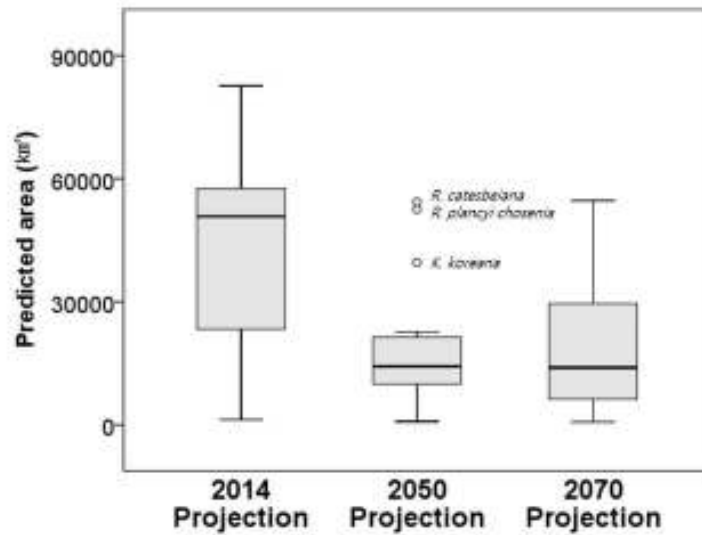
<표 2> Korean amphibian species include in this study and the number of collection sites used for Maxent modelling, excluding Ko-ri salamander (*Hynobius yangi*) and Suweon-tree frog (*Hyla suweonensis*).

| Order | Family | Species | Site (n) |
|-----------|----------------|--------------------------------|----------|
| Caudata | Hynobiidea | <i>Hynobius leechii</i> | 2498 |
| Caudata | Hynobiidea | <i>Hynobius quepaertensis</i> | 58 |
| Caudata | Hynobiidea | <i>Onychodactylus fischeri</i> | 205 |
| Caudata | Plethodontidae | <i>Karsenia koreana</i> | 10 |
| Salientia | Bombinatoridae | <i>Bombina oritalis</i> | 2254 |
| Salientia | Bufoidea | <i>Bufo gargarizans</i> | 1131 |
| Salientia | Bufoidea | <i>Bufo stejnegeri</i> | 195 |
| Salientia | Hylidae | <i>Hyla japonica</i> | 3289 |
| Salientia | Microhylidae | <i>Kaloula borealis</i> | 80 |
| Salientia | Ranidae | <i>Rana coreana</i> | 1238 |
| Salientia | Ranidae | <i>Rana dybowskii</i> | 2573 |
| Salientia | Ranidae | <i>Rana huanrenensis</i> | 705 |
| Salientia | Ranidae | <i>Rana nigromaculata</i> | 3680 |
| Salientia | Ranidae | <i>Rana plancyi chosonia</i> | 20 |
| Salientia | Ranidae | <i>Rana rugosa</i> | 1342 |
| Salientia | Ranidae | <i>Rana catesbeiana</i> | 1350 |



양서류 16종 모형의 신뢰성을 나타내는 AUC값 범위는 0.553 에서 0.992 이였으며, Excellent 범위에 속해있는 종은 1종, Good은 5종, Fair은 1종, Poor은 5종, Fail은 4종이 속해 있었다(표 3).

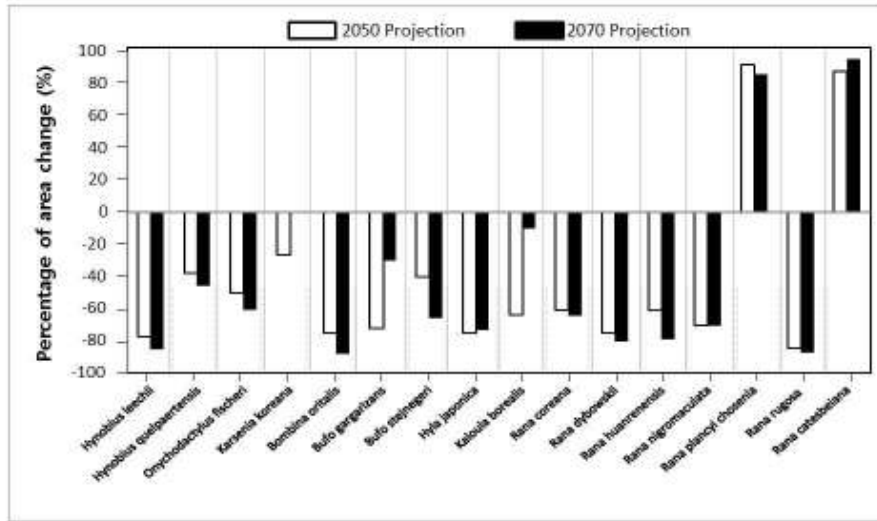
3.1 기후변화에 따른 양서류의 분포 변화



<그림 2> 16 Korean amphibian species occupy predicted region as climate change, modelled using three climate change prediction, calculated by intersecting predicted species presence for each climate change model with predicted species presence under current climate conditions.

국내산 양서류 16 종이 차지하는 예측 가능한 지역은 2014 projection과 2050 projection, 2070 projection의 경우, 각각 평균 42682km², 19457km², 20514km²로 2014 projection에 비해 2050 projection과 2070 projection이 차지하는 지역이 적을 것이라고 예측되었으며, 2050 projection보다 2070 projection에서 양서류의 분포가 증가 될 것이라고 예측하였다. 예측된 각각의 projection이 차지하는 지역은 통계적으로 유의한 차이가 나타났다(2014:2050 ; U=39.000 ,df=1 ,P<0.05, 2014:2070 ; U=25.000 ,df=1 ,P<0.001, 2050:2070 ; U=61.000 ,df=1 ,P<0.05, 그림 2).





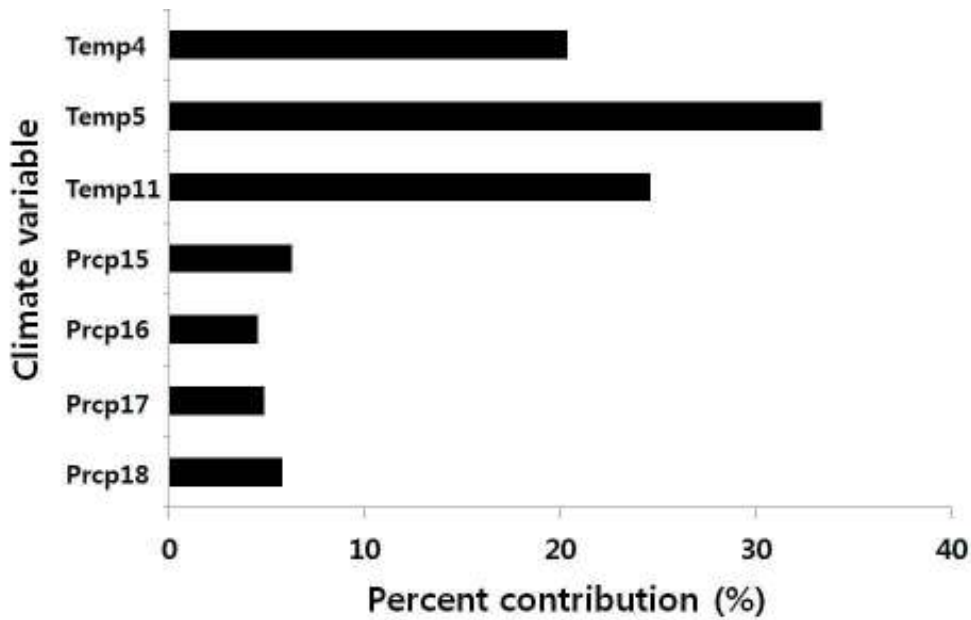
<그림 3> Projected changes in area (percentage of area gained or lost) per species comparing current climate conditions with future climate change conditions.

2014 projection에 대비하여 2050 projection 과 2070 projection의 기후 변화에 따라 분포가 감소할 것이라고 예측된 양서류는 총 14종이었고, 2050 projection에서 50%이상 감소될 것이라고 예측된 종은 총 11종, 2070 projection에서 50%이상 감소될 것이라고 예측된 종은 총 10종 이었다. 각각의 종에 따라 2014 projection에 대비하여 미래의 분포감소를 확인한 결과, 2050 projection에서는 움개구리(*Rana rugosa*)가 -84%, 도롱뇽(*Hynobius leechii*)이 -78%. 무당개구리(*Bombina oritalis*)가 -75%순으로 높게 감소하였으며, 2070 projection에서는 무당개구리(*Bombina oritalis*)가 -89%, 움개구리(*Rana rugosa*)가 -88%, 도롱뇽(*Hynobius leechii*)이 -86%순으로 높게 감소하였다. 반면 2014 projection에 대비하여 증가되는 양서류는 *Rana*속에 속해있는 2종으로, 2050 projection에서는 금개구리(*Rana plancyi chosonia*)가 92%, 황소개구리(*Rana catesbeiana*)가 88% 순으로 증가하였으며, 2070 projection에는 황소개구리(*Rana catesbeiana*)가 95%, 금개구리(*Rana plancyi chosonia*)가 86% 로 증가할 것이라고 예측되었다 (그림 3).

3.2. 양서류의 분포에 기여한 기후변수

양서류 16종의 분포변화에 기여한 7개의 기후변수 중 Temp5변수가 $33.4 \pm 8.4\%$ 로 가장 높게 나타났으며, 다음으로 높게 기여한 변수는 Temp11로 $24.6 \pm 6.2\%$, Temp4는 $20.4 \pm 5.1\%$ 로 다음으로 높게 기여했다(그림 4).





<그림 4> Contributed climate variables as climate changes for Korean amphibian 16 species.

각각의 종에게 기여한 기후변수를 확인하기 위해 높은 기여도를 나타낸 변수 2개를 표기하였다. 첫 번째로 높게 기여한 기후변수는 Temp5이 7종에서 가장 높은 기여도를 나타냈고, Temp11이 6종, Temp4가 2종, Prcp18이 1종에서 기여하였고, 두 번째로 높게 기여한 환경변수는 Temp4가 6종, Temp11이 5종, Temp5가 3종, Prcp18 과 Prcp17이 각각 1종에서 높은 기여도를 나타냈다(표 3).

<표 3> Predictions of 16 Korean amphibian species using the Maxent Model and evaluation of the Contributed climate variable.

| Species | AUC | | Contributed climate variable | |
|--------------------------------|-------|-----------|------------------------------|-----------------|
| | Value | Estimate | 1 st | 2 nd |
| <i>Hynobius leechii</i> | 0.589 | Fail | Temp5 | Temp4 |
| <i>Hynobius quelpaertensis</i> | 0.992 | Excellent | Temp11 | Temp4 |
| <i>Onychodactylus fischeri</i> | 0.840 | Good | Temp5 | Temp11 |
| <i>Karsenia koreana</i> | 0.637 | Poor | Temp5 | Temp11 |
| <i>Bombina oritalis</i> | 0.649 | Poor | Temp4 | Prcp18 |
| <i>Bufo gargarizans</i> | 0.639 | Poor | Temp4 | Temp11 |
| <i>Bufo stejnegeri</i> | 0.877 | Good | Temp11 | Temp5 |
| <i>Hyla japonica</i> | 0.553 | Fail | Temp11 | Temp5 |
| <i>Kaloula borealis</i> | 0.803 | Good | Temp11 | Temp5 |
| <i>Rana coreana</i> | 0.668 | Poor | Temp5 | Temp4 |
| <i>Rana dybowskii</i> | 0.584 | Fail | Temp11 | Temp4 |
| <i>Rana huanrenensis</i> | 0.796 | Fair | Temp11 | Temp4 |
| <i>Rana nigromaculata</i> | 0.561 | Fail | Temp5 | Prcp17 |
| <i>Rana plancyi chosenia</i> | 0.842 | Good | Temp5 | Temp4 |
| <i>Rana rugosa</i> | 0.639 | Poor | Temp5 | Temp11 |
| <i>Rana catesbeiana</i> | 0.814 | Good | Prcp18 | Temp11 |



대부분 높은 기여도를 나타낸 기후변수는 온도와 관련된 변수였으며, Temp11 과 Temp5의 상관관계는 양의관계를 나타냈다($r=0.60$, $P<0.01$). 반면 Temp4 와 Temp5의 상관관계는 음의관계를 나타냈고($r=-0.09$, $P<0.01$), Temp4 와 Temp11 또한 음의관계가 나타났다($r=-0.81$, $P<0.01$; 표 4).

<표 4> Spearman rank correlation coefficients between 7 Climate variables.

| Climate Variable | Temp4 | Temp5 | Temp11 | Prcp15 | Prcp16 | Prcp17 | Prcp18 |
|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| Temp4 | | | | | | | |
| Temp5 | -0.09** | | | | | | |
| Temp11 | -0.81** | 0.60** | | | | | |
| Prcp15 | 0.93** | -0.03* | -0.71** | | | | |
| Prcp16 | -0.42** | -0.31** | -0.53** | 0.51** | | | |
| Prcp17 | -0.67** | -0.22** | 0.34** | -0.79** | -0.80** | | |
| Prcp18 | 0.51** | -0.27** | -0.58** | 0.58** | 0.97** | -0.15** | |

* : $P<0.05$, ** : $P<0.01$

3.3 기후변화에 따른 종 분포의 방향

2014 projection에 비해 감소된 분포경향을 나타낸 2050projection과 2070 projection의 양서류 14종 중 9종의 경우, 북동쪽으로 주로 분포할 것으로 예상되었으며 1종의 경우 동쪽, 1종은 서쪽, 3종은 불규칙하게 감소하는 경향을 나타냈다. 2014 projection에 비해 증가된 분포경향을 보인 2종의 경우, 1종의 경우 남쪽으로 증가하는 경향을 보였고, 1종은 서북쪽으로 증가하는 경향이 나타났다(Appendix 2).

4. 고찰

본 연구는 국내에 서식하고 있는 양서류 16종의 현재 잠재적 분포패턴의 경향과 향후 기후 변화로 인해 변화될 분포경향의 예측에 대한 적용가능성을 확인하기 위해 7가지의 기후변수를 이용하여 현재의 잠재적인 서식분포 모형을 구축하였으며, 현재시점의 모형에 미래시점의 기후변수를 입력하여 미래의 서식지 분포를 예측하였다. 분석에 이용된 총 16종 중 AUC 값의 범위가 Excellent에 속해있는 종은 1종, Good은 5종, Fair은 1종, Poor은 5종, Fail은 4종으로, 전체적으로 높은 설명력을 나타내지 못하였다. 대부분의 연구에서는 기후변수를 포함한 서식지 변수인 고도와 경사도, 하천과의 거리등을 이용한 다양한 변수들을 이용하여 모형을 이용하고 있지만(이동근, 김호걸, 2010; 송원경, 김은영, 2012), 제 3차 자연환경 조사의 경우, 개체의 정확한 지점을 확인할 수 없기 때문에 종분포 모형을 적용하는데 한계를



나타냈다고 예상된다.

국내산 양서류 16 종이 차지하는 예측 가능한 지역은 2014 projection에 비해 2050 projection의 경우, 2.1배 감소한다고 예측되었으며, 2070 projection의 경우, 2.2배 감소한다고 예측되었다. 또한 각각의 projection에 차지하는 지역에 따라 유의한 차이가 나타났으며, 2050 projection에 비해 2070 projection에 차지하는 양서류의 천체적인 지역이 증가하였다. 이러한 이유는 비록 2050년에 비해 2070년도의 가장 따뜻한 달의 최대온도가 증가하였지만, 기온의 계절적 변동이 감소하며, 가장 건조한 분기의 강수량이 증가하였기 때문이라고 예상된다(Appendix 1). 한국산 양서류 16종 중 기후변화에 따라 분포지역이 가장 많이 감소될 종은 2050 projection과 2070 projection에서 움개구리, 무당개구리, 도롱뇽이라고 예측하고 되었다. 이러한 이유는 현재 기후로 예측된 3종의 분포 기후로 인한 종의 생존 적응성이 원인이 되었다고 예상된다. 2014 projection의 분포예측 지역을 확인한 결과, 다른 종들에 비해 수직방향으로 남쪽, 수평방향으로 동쪽에 주로 분포하고 있었으며 대부분 서쪽에서는 분포하고 있지 않다고 예측되었다(Appendix 2). 일반적으로 한반도의 북쪽보다 남쪽, 동쪽보다 서쪽에 더 높은 기온을 가지며, 기후변화에 따라 한반도 전체지역의 기온이 증가할 것이라고 예측하고 있다(기상청, 2012). 따라서 서쪽에 분포하고 있던 종들은 동쪽에만 분포하고 있는 종들보다 감소의 폭이 적었지만 동쪽에만 분포하고 있던 종들은 비교적 감소의 폭이 높게 분석되었다고 예상된다. 그러나 두 종의 AUC값 평가기준은 움개구리가 Poor, 무당개구리가 Poor, 도롱뇽이 Fail 로 높은 설명력을 가질 수 없기 때문에 설명력이 높은 예측이 되지 않았다고 판단된다. 반면 금개구리와 황소개구리는 증가될 것이라고 예측하였다. 두 점종의 AUC값은 금개구리와 황소개구리 모두 Good 으로 높은 설명력을 가졌지만, 본 연구 결과는 기후변수만을 이용한 한계라고 판단된다. 금개구리의 경우, 산림지역보다 주로 습지역과 논 지역에서 서식하고 있으며, 1970년대 후반 화학비료 및 농약의 사용으로 인해 개체수가 급속히 감소하였다(심재한, 2001; 이상철, 2004). 뿐만 아니라 황소개구리의 경우, 주로 저수지와 하천, 강 주변에 서식하고 있으며, 최초 국내에 도입 후 무단으로 방사 되었을 때 개체수가 급증하였지만 현재는 다양한 포식자의 출현으로 인해 개체수가 안정화 되었다(심재한, 2005). 따라서 기후 변수 이외에도 서식지의 변수, 관행농업과 유기농업 논지역의 변수, 포식자의 분포를 포함시킬 수 있다면 더 정확한 예측을 할 수 있다고 판단된다.

양서류 16종의 분포감소에 기여한 7가지의 기후변수들 중 가장 따뜻한 달의 최대 온도(Temp 5), 가장추운분기의 평균기온(Temp 11), 기온의 계절적 변동(Temp 4)변수들의 기여도가 높게 나타났으며, 대부분 기온과 관련된 변수들이 높은 영향을 미칠 것 이라고 예측하였다. 일반적으로 기후변화로 인한 기온과 강수량의 변화가 양서류 개체군의 급속한 감소를 가져온다는 연구는 다양하게 이루어지고 있다(Gibbons et al., 2000; Corn, 2005; Araujo, et al., 2006). 예를 들어 미국 서부 코스타리카의 양서류 개체군의 급격한 감소는 기온의 상승, 강우유형의 변화와 연관이 있다(Pounds et al, 1999). 이중 기온상승의 경우, 산림에 서식하고 있는 양서류 개체군의 생활사에 따른 이동에 큰 영향을 미친다(Walther et al., 2002). 대부분의 온대지역에 서식하고 있는 양서류의 경우, 추운 겨울이나 더운 여름을 피하기 위해 비 활동시기를 보내며, 계절의 변화에 따라 번식활동을 한다. 따라서 기온의 상승은 양서류 종의 감소와 멸종에 영향을 줄 수 있다(Pounds and Crump, 1994; Terhivuo, 1988; Beebee, 1995; Blaustein et al., 2001; Tryjanowski et al., 2003). 그렇기 때문에 본 연구에서도 기온에 대한 기후변수가 양서류의 분포감소에 큰 영향을 미쳤다고 판단된다.

2014 projection에 대비해 감소된 분포경향을 나타낸 2050projection 과 2070 projection의



양서류 14종 중 대부분 종들은 남서쪽의 분포가 줄어들고 주로 북동쪽에 분포할 경향을 나타내었다. 이러한 이유는 앞서 고찰한 북동쪽이 남서쪽보다 비교적 기온이 낮기 때문이라고 예상 된다. 본 연구와 비슷한 결과가 나타난 유럽지역에서의 기후변화에 따른 양서류의 분포예측에 대한 연구에 따르면, 2050년 양서류의 서식에 적합한 지역은 남서쪽에서 줄어들었고 북쪽지역에서는 증가하는 경향을 나타냈다. 이러한 이유는 북아메리카의 건조한 기후가 유럽의 남서쪽에 영향을 주었기 때문이라고 판단하였다(Araujo, et al., 2006). 뿐만 아니라 국내의 기후변화 취약종인 맹꽁이와 북방산개구리를 대상으로 서식분포를 예측한 선행연구를 따르면 현재에 비해 미래시점에 북동쪽으로 이동할 것이라고 예측하고 있다(김호걸, 2012). 따라서 본 연구의 대부분 양서류가 서식하기에 적합한 기후는 남서쪽 보다 주로 북동쪽에 조성될 것으로 예상된다. 그러나 양서류의 경우, 세력권이 크지 않으며, 번식지역의 귀소성으로 인한 분산 능력의 한계를 고려했을 경우, 기후변화가 부정적인 영향을 줄 수 있다고 판단된다.

본 연구의 결과는 다음과 같은 한계점을 가지고 있다. 첫째 연구에 사용된 Maxent 모형은 현재 시점자료와 환경변수, 기후변수, 간의 관계를 기반으로 모형을 구축하고 미래시점을 예측하는 모형이다. 하지만 기후변수 이외 다른 다양한 환경변수를 이용하지 못하였으며, 식생의 천이, 자연적 교란(산불, 산사태, 홍수 등), 생물의 적응에 대하여 고려하지 못한다는 한계가 있다(김호걸, 2011). 따라서 예측된 결과를 해석할 때 이러한 점을 충분히 숙지할 필요성이 있다. 둘째, 기후 변화에 취약한 양서류의 경우, 기후변화로 인한 2차적인 위험요소를 분석할 수 없는 한계가 있다. 일반적으로 양서류의 경우 증가된 자외선과 상승된 기온으로 증가된 항아리 곰팡이와 같은 질병으로 인해 많은 개체군이 감소하고 있다(Gibbons, et al., 2000). 셋째, 현장조사를 통한 검증에 한계가 있다. 기후변화에 따라 종의 분포를 예측하기 위해서는 일반적으로 최소 30년 이상의 장기적인 모니터링 데이터가 필요하지만(Araujo, et al., 2006), 본 연구의 분석에 이용된 제 3차 자연환경 조사의 경우, 전국의 모든 격자의 조사 기간이 1년이기 때문에 장기간에 걸쳐 조사되지 못하는 한계를 나타냈다. 유럽의 경우 최소 30년 이상의 종 분포자료를 구축하고 있으며, 이로 인해 기후변화에 따라 정의 서식지 변화의 파악과 보전계획에 큰 도움이 되고 있다. 따라서 국내에서도 기후변화에 따른 양서류의 보전 및 증진을 위해서 장기적이고 체계적인 모니터링을 실시하여 기후 변화와 같은 장기적인 환경 영향을 고려한 양서류의 보전 계획을 수립할 수 있는 기초조사 자료를 마련할 필요성이 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구를 이용할 수 있게 도와주신 제3차 자연환경조사의 조사원님들과 국립생태원의 장환진, 김대인 전문위원님께 감사드립니다. 또한 프로그램의 사용에 대하여 교육시켜주신 경희대학교 동물생태 실험실의 유정철 교수님과 이진원 박사님, 권용수 박사님, 노희진 학생에게 감사드리며, 논문작성에 도움을 주신 남기백 박사님, 남형규 선배님, 신주열 선배님, 김관목 선배님, 서울대학교 야생동물연구실의 정지화 학생과 고 심재한 박사님께 감사드립니다.



5. 참고문헌

- 권혁수(2011). "보호지역계획을 위한 생물다양성 통합평가모형-지리산과 덕유산, 가야산 권역을 대상으로" 서울대학교 대학원 박사학위논문.
- 기상청(2012). "한반도 기후변화 전망보고서"
- 김호걸(2012). "기후변화에 따른 생물종의 서식분포 변화 예측 및 보호구역 설정 방안 연구." 서울대학교 대학원 조경학석사학위 논문.
- 서창완·박유리·최윤수(2008a). "위치자료의 종류에 따른 생물종 분포모형 비교연구." 『한국지형 공간정보 학회지』 16(4), 59-64.
- 서창완·최태영·최윤수·김동영(2008b). "설악산 산양을 대상으로 한 야생동물 서식지 적합모형에 관한 연구." 『한국환경복원녹화기술학회지』 11(3), 28-38.
- 송원경(2011). "공간그래프 이론을 적용한 숲 서식지 네트워크 모형 개발." 서울대학교 대학원 박사학위 논문.
- 송원경·김은영(2012). "고라니 서식지분석을 위한 기계학습식 종분포모형 비교." 『한국원격탐사학회지』 28(1), 171-180.
- 심재한(2001). "생명을 노래하는 개구리" 다른세상.
- 오석근·서명석(2013). "RegCM4를 이용한 RCP(2.6, 4.5, 6.0, 8.5)시나리오별 남한에서의 상세 기후변화 전망." 『기후연구』 8(4), 291-307
- 이동근·김호걸(2010). "Maxent 모형을 이용한 서식지 잠재력 평가- 하천으로부터거리, 하천의 차수, 토지이용을 중심으로." 『한국환경복원녹화기술학회지』 13(6), 161-172.
- 이상철(2004). "무미 양서류 금개구리(*Rana plancyi chosenia*)의 현지 내·외 보전 및복원 전략에 관한 연구." 인천대학교 대학원 석사학위 논문.
- 심재한·정인실·신광하·이정옥·이상철·조형진·이지영·오광석(2005). "황소개구리 감소요인에 대한 연구" 『환경부』
- Araujo, M. B., Thuiller, W. and Pearson, R. G. (2006). Climate warming and the decline of amphibians and reptiles in Europe. *Journal of Biogeography*. 33, 1712-1728.
- Alford, R.A. and Richards, S.J. (1999). Global amphibian declines: a problem in applied ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 30, 133-165.
- Beebee, T.J.C. (1995). Amphibian breeding and climate. *Nature*, 374, 219-220.
- Blaustein, A.R. and Wake, D.B. (1990). Declining amphibian populations: a global phenomenon? *Trends in Ecology and Evolution* 5: 203-204.
- Blaustein, A.R. and Kiesecker, J.M. (2001). Complexity in conservation: lessons from the global decline of amphibian populations. *Ecology Letters* 5: 597-608.
- Blaustein, A.R., Belden, L.K., Olson, D.H., Green, D.M., Root, T.L. and Kiesecker, J.M. (2001). Amphibian breeding and climate change. *Conservation Biology*, 15, 1804-1809.
- Caldwell, J.P. (1987). Demography and life history of two species of chorus frogs (Anura: Hylidae) in South Carolina. *Copeia* 1987: 114-127.
- Carey, C. and Alexander, M.A. (2003). Climate change and amphibian declines: is there a link? *Diversity and Distributions*, 9, 111-121.
- Corn, P.S. (2005). Climate change and amphibians. *Animal Biodiversity and Conservation*, 28, 59-67.



Corey, S.J. and Waite, T.A. (2008). Phylogenetic autocorrelation of extinction threat in globally imperilled amphibians. *Diversity and Distributions* 14: 614–629.

Duellman, W.E.E. (1999). *Patterns of Distribution of Amphibians*. Baltimore, MD, USA: Johns Hopkins University Press.

Gent, P. R., Danabasoglu, G., Donner, L. J., Holland, M. M., Hunke, E. C., Jayne, S. R., Lawrence, D. M., Neale, R. B., Rasch, P. J., Vertenstein, M., Worley, P. H., Yang, Z., Zhang, M. (2011). The Community Climate System Model Version 4. *JOURNAL OF CLIMATE*, 24, 4973–4991.

Gibbons, J.W., Scott, D.E., Ryan, T.J., Buhlmann, K.A., Tuberville, T.D., Metts, B.S., Greene, J.L., Mills, T., Leiden, Y., Poppy, S. and Winner, C.T. (2000). The global decline of reptiles, de'ja' vu amphibians. *BioScience*, 50, 653–661.

Houlahan, J.E., Findlay, C.S., Schmidt, B.R., Meyer, D.R. and Kuzmin, S.L. (2000). Quantitative evidence for global amphibian population declines. *Nature*, 404, 752–755.

Hutchison, V.H. and Dupré, K. (1992). Thermoregulation. In: *Environmental Physiology of the Amphibia*, ed. M.E. Feder and W.W. Burggren, pp. 206–49. Chicago, Illinois, USA: University of Chicago Press.

Johnson, E. A. and Klemens, M. W. (2005). *Natural in fragments : the legacy of sprawl*. Columbia University Press, New York.

Kiesecker, J.M., Blaustein, A.R. and Belden, L.K. (2001) Complex causes of amphibian population declines. *Nature*, 410, 681–684.

Parnesan, C. (2006). Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review Ecology and Systematics* 37: 637–669.

Phillips, S., Dudik M and Schapire, R. (2004). Maximum entropy approach to species distribution modeling. proceeding of the 21st international conference on machine learning, Banff, Canada.

Phillips, S., Anderson, R. and Schapire., R. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distribution, *Ecological modeling*, 190, 231–259.

Phillips, S. and Dudik M., (2008). Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* 31: 161–175.

Pounds, J.A. and Crump, M.L. (1994). Amphibian declines and climate disturbance: the case of the golden toad and the harlequin frog. *Conservation Biology*, 8, 72–85.

Pounds, J.A., Fogden, M. P. L. and Campbell, J. H. (1999). Biological response to climate change on a tropical mountain. *Nature*, 398, 611–615.

Swets, J. A. 1988. Measuring the accuracy of diagnostic system. *Science*, 240, 1285–1293.

Terhivuo, J. (1988). Phenology of spawning of the common frog (*Rana temporaria*) in Finland from 1846 to 1986. *Annales Zoologica Fennici*, 25, 165–175.

Tryjanowski, P., Mariusz, R. and Sparks, T.H. (2003). Changes in spawning dates of common frogs and common toads in western Poland in 1978–2002. *Annales Zoologica Fennica*, 40, 459–464.

Walther G. R., Post, E., Convey, P. Menzel, A., Parmesank, C., Beebee, T. J. C.,



Fromentin, J. M., Guldberg, O. H. and Bairlein, F. (2002). Ecological response to recent climate change. *Nature*. 416, 389-395

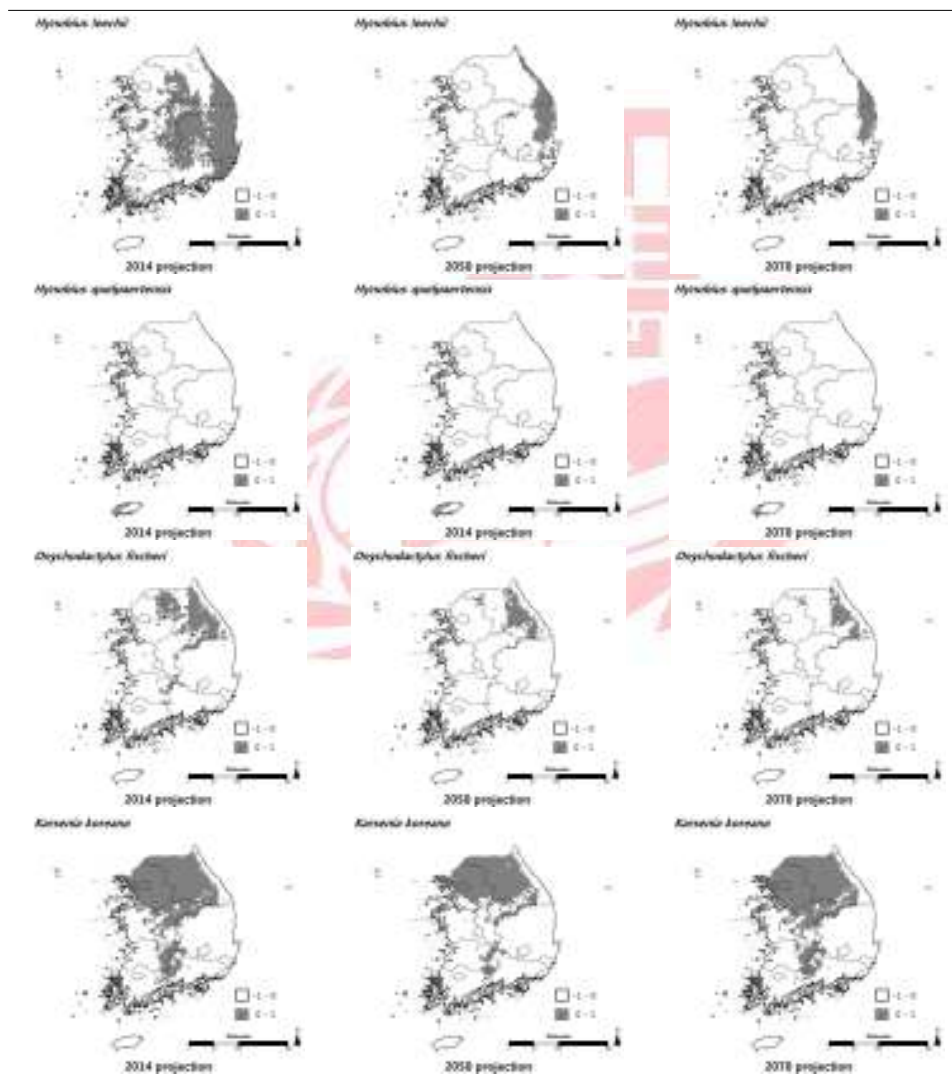
Whitfield, S.M., Bell, K.E., Philippi, T., Sasa, M., Bolaños, F., Chaves, G., Savage, J.M. and Donnelly, M.A. (2007). Amphibian and reptile declines over 35 years at La Selva, Costa Rica. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 104: 8352–8356.

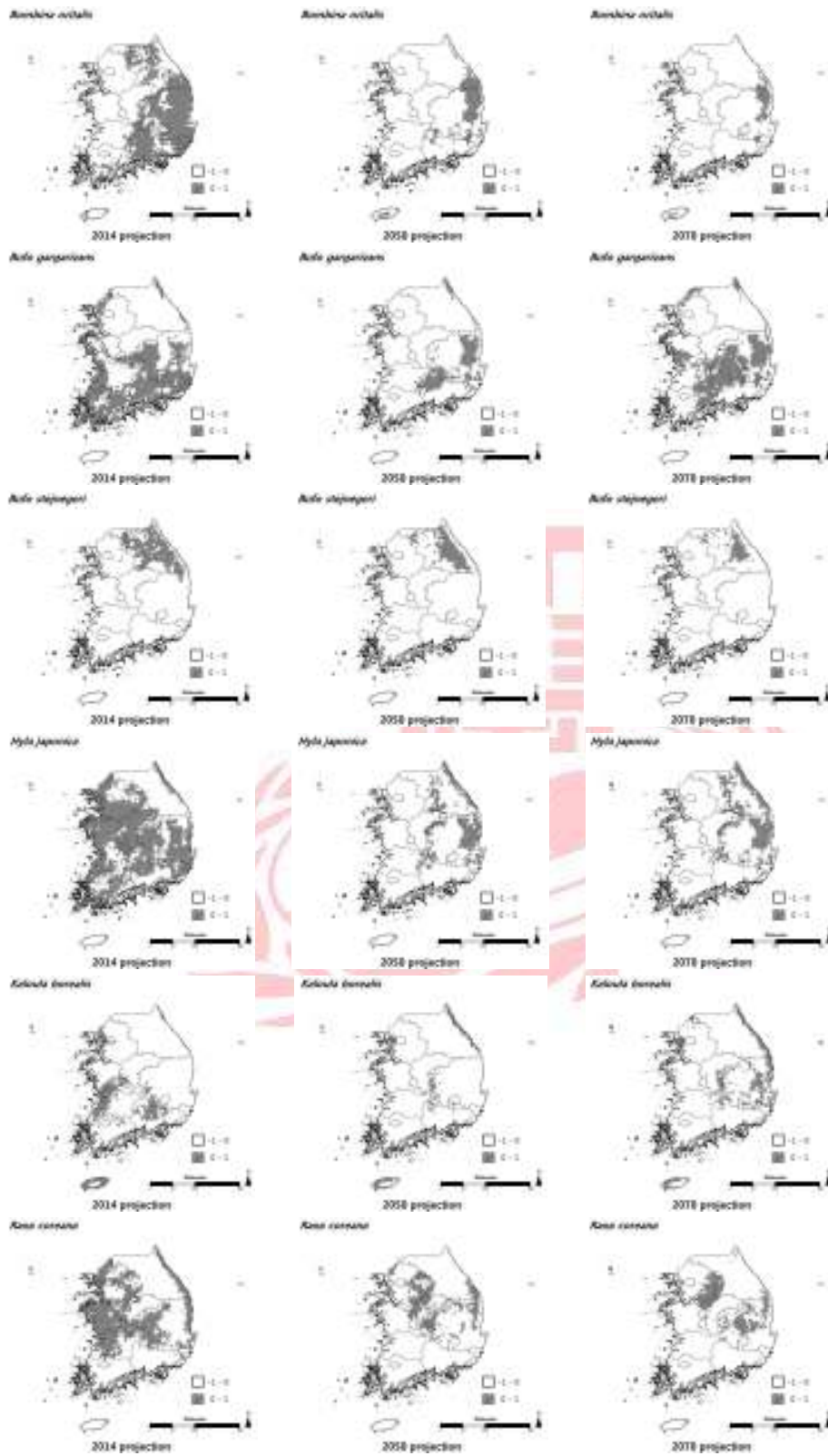


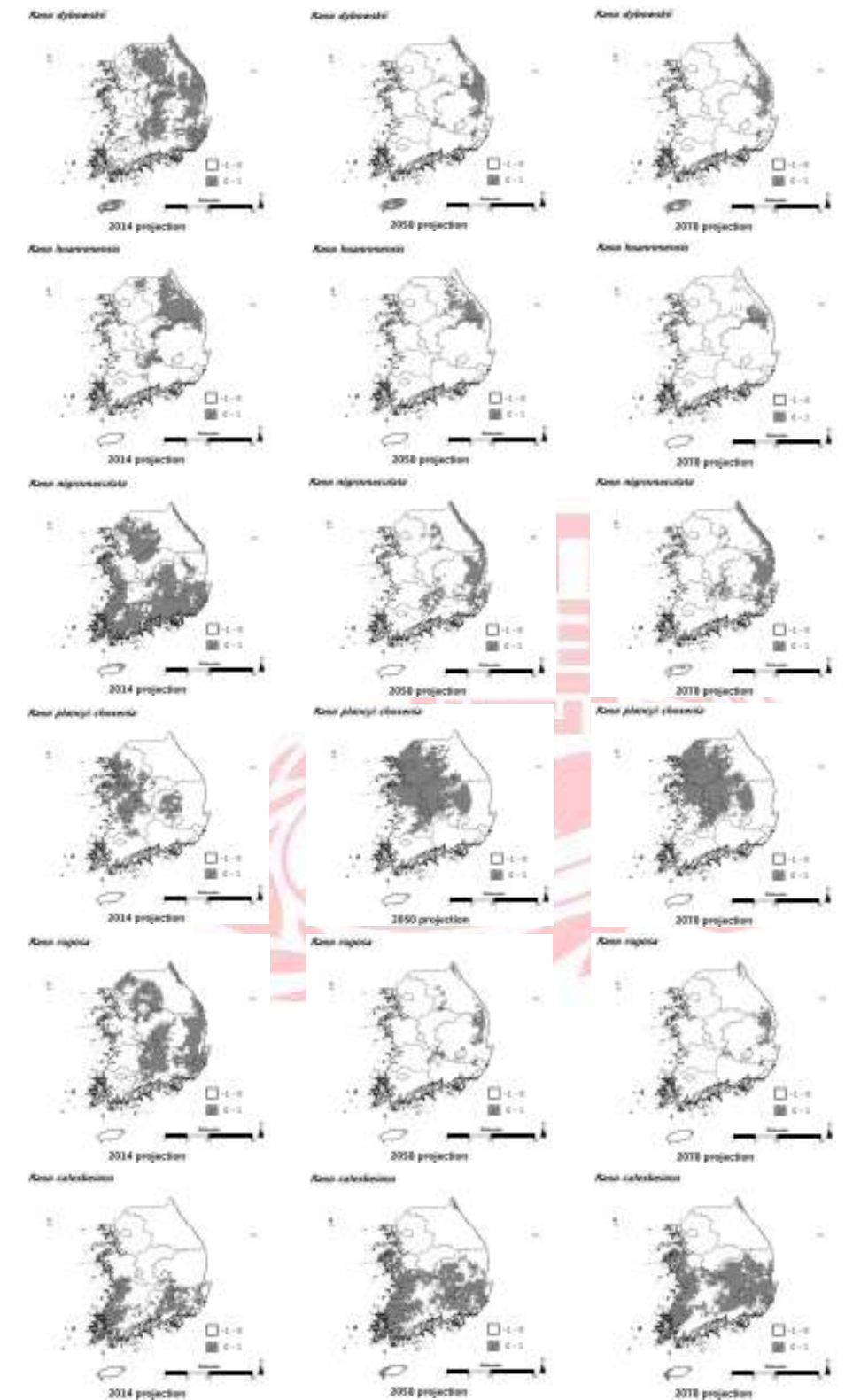
Appendix 1. Climate of present and future in Rcp 4.5 of CCSM4 (Community Climate System Model Version 4).

| | Temp4 | Temp5 (°C) | Temp11 (°C) | Prcp15 (mm) | Prcp16 (mm) | Prcp17 (mm) | Prcp18 (mm) |
|----------------------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|------------------------|----------------|
| 2014 Projection | 929.96 | 28.60 | -1.11 | 76.77 | 711.83 | 100.04 | 698.11 |
| 2050 Projection | 930.62 | 30.43 | 0.77 | 76.43 | 742.64 | 98.38 | 721.57 |
| 2070 Projection | 927.19 | 30.54 | 1.14 | 80.04 | 811.99 | 103.46 | 793.42 |

Appendix 2. Distribution of 16 Korean amphibian species as climate changes used for Maxent modelling.







Maxent 모형을 이용한 기후변화에 따른 국내산 양서류(Amphibian)의 분포 경향 예측

도민석
(경희대학교 일반대학원 생물학과 박사과정)

국문초록

최근 10년 동안 기후변화의 영향으로 인한 양서류 종의 감소와 멸종에 대한 연구는 세계 곳곳에서 진행되고 있다. 본 연구는 기후변화로 인해 변화될 분포 경향 예측과 적용가능성을 확인하기 위해 총 16종의 양서류를 대상으로 Maxent 모형(Maximum Entropy Modeling)을 이용하였다. 제 3차 전국자연환경조사자료 중 양서류의 분포와 현재와 미래의 7가지 기후변수를 이용하여, 현재시점의 분포와 미래시점(2050년, 2070년)의 분포를 확인하였다. 분석결과 추출된 16종의 평균 AUC값 범위는 0.555에서 0.991이었다. 2014 projection에 대비하여 2050 projection과 2070 projection의 양서류 분포는 감소할 것이라고 예측되었으며, Temp4와 Prcp17의 기후변수로 인해 2050 Projection 보다 2070 Projection에서 증가될 것이라고 예측되었다. 감소된 14종 중 높은 감소경향을 나타낸 3종(*Hynobius leechii*, *Rana rugosa*, *Bombina oritalis*)의 경우, 기후에 따라 분포하고 있는 생물종의 적응성이 영향을 미쳤다고 판단되며, 증가된 2종은 서식지변수를 이용하지 못한 결과라고 판단된다. 또한 양서류 16종의 분포변화에 기여한 7가지의 기후변수들 중 대부분 기온과 관련된 변수가 영향을 미쳤다. 대부분 종들은 북동쪽에서 서식이 적합할 것이라는 예측결과가 나타났지만 본 연구의 경우, 기후변수 이외의 다른 다양한 환경변수를 이용하지 못하였으며, 단기간의 조사기간, 2차적인 위협요소, 식생의 천이, 자연적 교란, 생물의 적응 등 다양한 변수에 대하여 고려하지 못한다는 한계점을 나타내고 있다. 따라서 국내에서 기후변화에 따른 양서류의 보전 및 증진을 위해서 장기적이고 체계적인 모니터링이 실시될 필요성이 요구된다.

주제어 : 양서류, 기후변화, Maxent 모형, 분포

