

기후변화에 따른 한국꼬리치레도롱뇽(*Onychodactylus koreanus*)의 분포 예측에 대한 연구^{1a}

이수연² · 최서윤³ · 배양섭⁴ · 서재화⁵ · 장환진⁶ · 도민석^{7*}

Distribution Prediction of Korean Clawed Salamander (*Onychodactylus koreanus*) according to the Climate Change^{1a}

Su-Yeon Lee², Seo-yun Choi³, Yang-Seop Bae⁴, Jae-Hwa Suh⁵, Hoan-Jin Jang⁶, Min-Seock Do^{7*}

요약

기후변화는 동·식물의 서식지와 개체군을 감소, 소멸시키며, 생물다양성 보존에 위협이 되고 있다. 특히, 도롱뇽과(Hynobiidae)에 속한 종들은 다른 분류군들에 비해 행동권이 작고, 분산 능력이 극히 제한되기 때문에 기후변화에 매우 취약한 분류군이다. 본 연구에서는 한국꼬리치레도롱뇽(*Onychodactylus koreanus*)의 관찰지점과 종 분포 모델링 기법을 바탕으로 국내 서식하고 있는 한국꼬리치레도롱뇽의 주요 분포지역과 서식특성을 파악하고 기후변화에 따른 분포변화를 예측하였다. 그 결과 고도가 그들의 분포에 가장 주요한 영향을 끼친 환경변수로 확인되었으며, 강원도와 경상북도과 같은 고도가 높은 산림 지역에 밀집된 분포 형태를 보였다. 이처럼 종 분포 모델에서 예측된 공간적 분포 범위와 서식특성은 선행 조사 결과를 충분히 포함하고 있었다. 기후변화에 따른 분포변화를 확인한 결과, 한국꼬리치레도롱뇽은 현재 분포 범위에 비해 RCP4.5 시나리오에서 62.96%가 감소할 것으로, RCP8.5 시나리오에서는 98.52% 감소할 것으로 예측되어 기후변화로 인해 서식 적합 공간들이 급격하게 감소하는 것으로 확인되었다. 모델의 AUC 값은 현재에서 0.837, RCP4.5에서 0.832, RCP8.5에서 0.807로 높게 측정되었다. 이러한 결과들은 기후변화로 인해 영향을 받는 양서류의 보전 대책 수립에 중요한 기초자료가 될 수 있을 것이다. 추후, 한국꼬리치레도롱뇽의 생활사에 따른 서식지 특성과 미세한 서식 요인들이 반영된 다양한 분석기법을 통한 추가적인 연구가 수행된다면 종 감소에 영향을 끼치는 주요환경 요인들을 밝혀낼수 있을 것으로 판단된다.

주요어: 양서류, 유미류, 도롱뇽과, 종 분포 모델, 기후 온난화

1 접수 2021년 6월 9일, 수정 (1차: 2021년 9월 28일), 게재확정 2021년 10월 7일

Received 9 June 2021; Revised (1st: 28 September 2021); Accepted 7 October 2021

2 인천대학교 생명과학부 학생 Division of Life Sciences, Incheon National University, Incheon 22012, South Korea

3 국립생물자원관 동물자원과 전문위원 Animal Resources Division, National Institute of Biological Resources, Incheon 22689, South Korea

4 인천대학교 생명과학부 교수 Division of Life Sciences, Incheon National University, Incheon 22012, South Korea

5 국립생물자원관 동물자원과 환경연구관 Animal Resources Division, National Institute of Biological Resources, Incheon 22689, South Korea

6 국립생태원 외래생물연구팀 연구원 Invasive Alien Species Research Team, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, South Korea

7 국립생물자원관 동물자원과 환경연구사 Animal Resources Division, National Institute of Biological Resources, Incheon 22689, South Korea

a 본 논문은 정부(환경부)의 재원으로 국립생물자원관의 지원(NIBR202102102, NIBR202108101)을 받아 수행하였음.

* 교신저자 Corresponding author: viper@korea.kr

ABSTRACT

Climate change poses great threats to wildlife populations by decreasing their number and destroying their habitats, jeopardizing biodiversity conservation. Asiatic salamander (Hynobiidae) species are particularly vulnerable to climate change due to their small home range and limited dispersal ability. Thus, this study used one salamander species, the Korean clawed salamander (*Onychodactylus koreanus*), as a model species and examined their habitat characteristics and current distribution in South Korea to predict its spatial distribution under climate change. As a result, we found that altitude was the most important environmental factor for their spatial distribution and that they showed a dense distribution in high-altitude forest regions such as Gangwon and Gyeongsanbuk provinces. The spatial distribution range and habitat characteristics predicted in the species distribution models were sufficiently in accordance with previous studies on the species. By modeling their distribution changes under two different climate change scenarios, we predicted that the distribution range of the Korean clawed salamander population would decrease by 62.96% under the RCP4.5 scenario and by 98.52% under the RCP8.5 scenario, indicating a sharp reduction due to climate change. The model's AUC value was the highest in the present (0.837), followed by RCP4.5 (0.832) and RCP8.5 (0.807). Our study provides a basic reference for implementing conservation plans for amphibians under climate change. Additional research using various analysis techniques reflecting habitat characteristics and minute habitat factors for the whole life cycle of Korean-tailed salamanders help identify major environmental factors that affect species reduction.

KEY WORDS: AMPHIBIANS, URODELA, HYNOBIIDAE, SPECIES DISTRIBUTION MODEL, GLOBAL WARMING

서론

지난 100년 동안 지구의 지표 온도는 1°C 가까이 상승했고, 현재 추세대로 온실가스가 증가할 경우, 2100년도 지구의 평균온도는 현재 대비 섭씨 0.8~3.5°C 상승하여 현재보다 더 강력하고 장기적인 가뭄 발생에 대해 경고하고 있다 (IPCC, 1990 and 2007, 2014; UNEP, 1997; Kim *et al.*, 2016). 이러한 기후변화는 동·식물의 서식지와 개체군을 감소, 소멸시키며, 생물다양성 보존에 위협이 되고 있다 (Pounds *et al.*, 1999; Moritz *et al.*, 2008; Pimm, 2008). 특히, 다른 분류군에 비해 양서류는 기후변화에 취약하여 서식하는 전체 종 중 1/3이 위협 및 멸종될 위험에 처해있다 (Sutton *et al.*, 2015). 이를 방지하기 위해 양서류를 대상으로 보전학과 생태학, 지리학에 초점을 맞춘 다양한 종 분포 예측 연구들이 수행되고 있다 (Penman *et al.*, 2010; Blank and Blaustein, 2012; Do *et al.*, 2017; Choi *et al.*, 2018; Borzée *et al.*, 2019). 기후변화에 따른 양서류 분포 예측 연구는 연구 종의 서식지 특성을 파악하고 분포 변화양상을 예측하여 종 보전 전략 수립에 중요한 정보를 제공한다

(Fauth and Resetarits, 1991; Lovejoy and Hannh, 2005; Sutton *et al.*, 2015).

양서류는 곤충과 같은 1차 소비자를 포식하고, 조류와 포유류와 같은 상위 포식자의 먹이원이 되는 등 먹이사슬의 중간자적 자리에 위치하여 생태계 균형을 유지 시킨다 (Gardner, 2001; Whiles *et al.*, 2006; Cho and Sim, 2016; Park and Cho, 2017). 또한 전 생활사에 걸쳐 수생 및 육상 생활을 하는 분류군으로 환경변화에 민감하게 반응하기 때문에 환경오염과 교란을 평가하는 지표종으로 이용된다 (Carignan and Villard, 2002; Sewell and Griffiths, 2009). 더욱이 피부 호흡과 같은 양서류 고유의 생리적 특성과 생태적 특성(e.g. 귀소성, 제한된 이동성)은 생존에 있어서 기후변화로 인한 많은 피해를 받기 때문에 전 세계적으로 멸종 위험에 처한 분류군으로 간주되고 있다 (Donnelly, 1998; Carey and Alexander, 2003; Wake and Vredenburg, 2008). 특히, 도롱뇽과(Hynobiidae)에 속한 종들은 다른 분류군들에 비해 낮은 이동성으로 분산 능력이 극히 제한되기 때문에 기후변화에 매우 취약하다 (Velo-Antón *et al.*, 2013; Sutton *et al.*, 2015; Van Riemsdijk *et al.*, 2017). 결과적으

로 도롱뇽에 속한 종들을 대상으로 기후변화에 따른 분포변화를 예측하는 것은 다양한 동·식물들의 기후변화에 따른 위험을 예측할 수 있는 지표로 이용 가능하며, 나아가 생태계를 안정적으로 유지시키고, 보전 및 관리하는데 중요한 역할을 할 수 있다(Welsh and Hodgson, 2013; Sutton *et al.*, 2015).

한국꼬리치레도롱뇽(*Onychodactylus koreanus*)은 한국과 중국과 일본, 러시아에 분포하는 종이며 1급수에 서식하는 환경 지표종으로 알려져 있다(Lee *et al.*, 2011; Hong, 2017). 다른 도롱뇽들과는 달리 2~3년간의 긴 유생기를 물속에서 보내기 때문에 제한된 행동권으로 인해 기후변화에 취약할 것으로 예상되며, 국내에서는 고산지대인 강원도에 주로 분포한다고 알려져 기후변화 뿐만 아니라 산림개발과 같은 서식지 파괴로도 개체군이 지속적으로 감소하고 있는 종이다(Park, 1994; Lee *et al.*, 2008). 그럼에도 불구하고 한국꼬리치레도롱뇽의 서식 환경 특성에 관한 연구는 드물게 이루어지고 있으며, 현재까지 국내 전 지역을 대상으로 한 서식 환경 분석과 기후변화에 따른 분포변화에 대해서는 알려진 바 없다(Hong, 2017). 본 연구의 목적은 국내에 서식하는 한국꼬리치레도롱뇽의 지리적 환경 정보를 통해 분포 범위와 서식 환경 특성을 파악하고, 기후변화에 따른 분포양상을 알아보는 것이다. 이를 위해 먼저, 지리정보시스템을 적용하여 한국꼬리치레도롱뇽이 관찰된 지점을 통해 분포한 지역의 고도와 서식지와 같은 환경정보를 추출하였고, 그들이 선호하는 서식 환경을 확인하였다. 다음으로 종 분포 모델링을 적용하여 현재와 미래의 기후자료를 통해 기후변화에 따른 미래 분포변화를 예측하였다.

연구방법

1. 연구지역

본 연구지역인 제주도를 포함한 한반도는 국토의 약 65%는 산림, 약 20%는 농경지로 구성되어 있다. 동부지역은 태백산맥이 위치해 고도가 높지만, 서부지역은 논 습지와 같은 평야가 위치해 고도가 낮은 지형으로 구성되어 있다(Figure 1). 한국의 기후는 대륙성 기후로 4계절이 뚜렷하며, 겨울은 춥고 건조하지만 여름은 덥고 습하다.

2. 종 분포 자료

우리나라에 서식하고 있는 한국꼬리치레도롱뇽의 관찰 자료는 2005년부터 2017년까지 2월부터 10월 사이에 수행된 국립생태원 제3차, 제4차 전국자연환경조사의 262개 지

점, 국립공원 자연자원조사의 12개 지점, 국립생물자원관 멸종위기 야생생물 전국 분포조사의 7개 지점, 국립생물자원관 생물표본 정보의 17개 지점으로 총 298개의 관찰지점을 이용하였다(Figure 1). 모든 현장 조사는 양서·파충류 전문가들에 의해 수행되었고, 조사지역의 지리적 범위는 전국을 대상으로 내륙과 여러 도서 지역들이 포함되어 있다.

3. 지리적 환경 자료

한국꼬리치레도롱뇽의 분포 모델을 구축하기 위해 지리적 변수는 GLC 2000의 토지피복도(출처: <http://forobs.jrc.ec.europa.eu>)와 고도 자료(DEM)를 이용하였으며, 기후변수는 Worldclim v. 1.4 (Hijmans *et al.*, 2005)의 현재 기후 자료(평균 1960~1990년)와 미래 기후자료(2050년)를 이용하였고, 모든 격자의 크기는 0.019 도 (약 2 km)로 통일하였다(Do *et al.*, 2016 and 2017). 기후변수들은 서로 높은 상관관계를 가지고 있기 때문에 다중 공선성에 대한 영향을 최소화하기 위해 상관관계가 높은 변수(Pearson's correlation coefficients (r) > 0.8)를 분석에서 제외하였다(Pradhan, 2016; Yi *et al.*, 2016). 결과적으로 본 연구에서 이용된 기후변수는 평균 일교차(bio2), 등온선(bio3), 기온의 계절적 변동(bio4), 여름철 최대 온도(bio5), 겨울철 최소 온도(bio6), 연평균 강수량(bio12), 여름철 강수량(bio13), 겨울철 강수량(bio14) 으로 총 8가지 기후변수들이 이용되었다.

기후변화에 따른 분포변화를 예측하기 위해 2014년, 기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)로부터 5차 평가 보고서(AR5)로 인정된 대표 농도 경로(RCP, Representative Concentration Pathway)의 시나리오 2개를 이용하였다(Van Vuuren *et al.*, 2011; Collins *et al.*, 2013). RCP4.5는 대략 2040년경 저감 정책에 따라 온실가스 배출량이 감소된 낙관적 시나리오이며, RCP8.5는 대략 2100년경 온실가스 배출이 현재 수준으로 지속된 비관적인 시나리오로, 본 연구에서는 CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization)와 BOM(Bureau of Meteorology)로부터 구축된 국제 기후 변화 모델인 ACCESS 1.0을 이용하였다.

4. 종 분포 모델링

잠재적 분포지역을 예측하기 위해 Maxent version 3.4.1을 이용하여 종 분포 모델을 생성하였다(Phillips and Dudík, 2008). Maxent 모형은 회귀분석을 기반으로 하는 모형으로 최대 엔트로피 접근법(Maximum entropy approach)을 통해 높은 예측 결과를 가질 수 있으며(Phillips *et al.*, 2004), 출현자료만을 이용하여, 적은 표본수로도 예측이 가능하다(Hernandez

et al., 2006; Wisz *et al.*, 2008). 이러한 예측방법은 다른 유미 양서류 종들에서도 다양하게 사용되고 있는 방법이다 (e.g. Sutton *et al.*, 2015; Milanovich *et al.*, 2010; Borzée *et al.*, 2019; Jacobsen *et al.*, 2020).

중 분포 모델은 한국꼬리치레도롱뇽의 출현자료를 종속 변수로, 환경변수들(총 10개의 환경변수)을 독립변수로 구축하였다. 각각의 모델들은 총 10회에 걸쳐 반복구동 하였으며, 무작위적으로 선택된 출현자료의 70%는 training으로 30%는 testing으로 분할시켰고, 표본의 오류를 감소시키기 위해 최대 반복 구동을 5,000회로 설정하였다(Do *et al.*, 2016 and 2017; Yun *et al.*, 2020). 모형 설명력의 검증은 ROC (Receiver Operating Characteristics) 검증을 통해 곡선의 하부면적 값인 AUC (Area Under the Curve) 값을 구하여 실시하였다. 대부분 서식지 예측 프로그램을 이용한 연구들에서는 모형의 성과를 평가하기 위해 AUC 값들을 이용하고 있지만, 표본수나 상대적인 배경의 크기와 같은 모형의 조건에 따라 매우 민감하게 영향을 받을 수 있다 (Lobo *et al.*, 2008; Phillips and Dudík, 2008; Phillips *et al.*, 2009). 이에 대한 대안으로 몇몇 중 분포 모델에 관련된 연구들에서는 AUC 값 이외에도 오차율을 함께 제시하고 있다(Lee *et al.*, 2014; Do *et al.*, 2016 and 2018). 따라서 본 연구에서도 AUC값 뿐만 아니라 10% Training presence에서 나타난 오차율도 확인하였다(Jiménez-Valverde *et al.*, 2012). 한국꼬리치레도롱뇽의 분포에 중요한 영향을 끼친 각각의 환경변수들의 기여도는 잭나이프 테스트(Jackknife test)를 통한 평균 기여율(Average percent contribution)에 의해 결정되었다. 추출된 중 분포 모델들은 DIVA-GIS 7.5 (Hijmans *et al.*, 2012)를 통해 1은 완전한 서식 적합 지역, 0은 완전한 서식 불가능 지역으로 표현되었으며, 10%

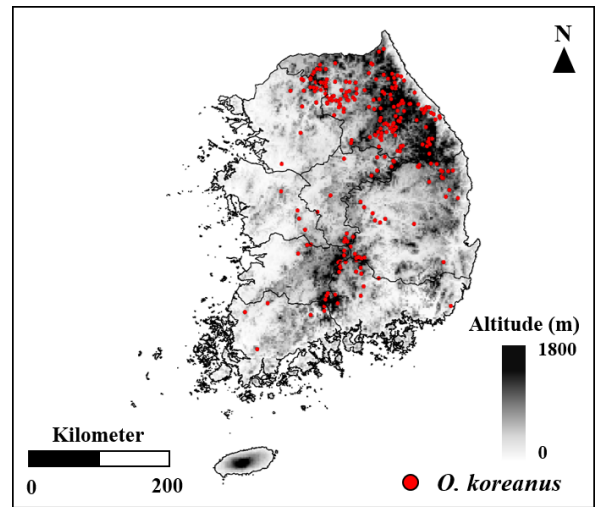


Figure 1. The topographic map of South Korea. Red points represent the occurrence of the Korean clawed salamander (*O. koreanus*).

Training presence의 한계값을 기준으로 이분법적인(있다/없다) 래스터를 생성하였다(Do *et al.*, 2016 and 2017; Yun *et al.*, 2020).

결 과

1. 서식 분포 특성

우리나라에 서식하고 있는 한국꼬리치레도롱뇽이 관찰된 지점 수는 총 298개로 제주도를 제외한 모든 행정구역에 분포는 것으로 확인되었다(Figure 1). 한국꼬리치레도롱뇽

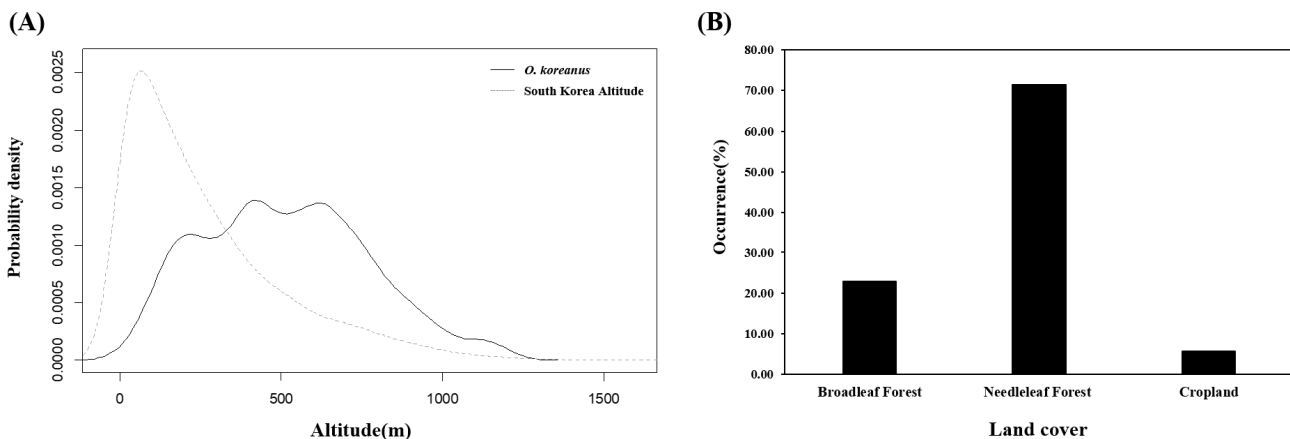


Figure 2. (A) Kernel density plot of the occurrence of the Korean clawed salamander (*O. koreanus*) according to the altitude of South Korea. (B) Bar graph of the occurrence of the Korean clawed salamander (*O. koreanus*) according to three habitat types in South Korea.

Table 1. The summary of species distribution models for Korean clawed salamander (*O. koreanus*) using the Maxent modelling

Scenarios	Present	RCP4.5	RCP8.5	Average
Training AUC	0.847	0.857	0.860	0.857
Test AUC	0.837	0.832	0.807	0.821
Logistic threshold*	0.233	0.307	0.227	0.264
Training omission*	0.099	0.099	0.099	0.099
Test omission*	0.068	0.137	0.110	0.129

*10 percentile training presence

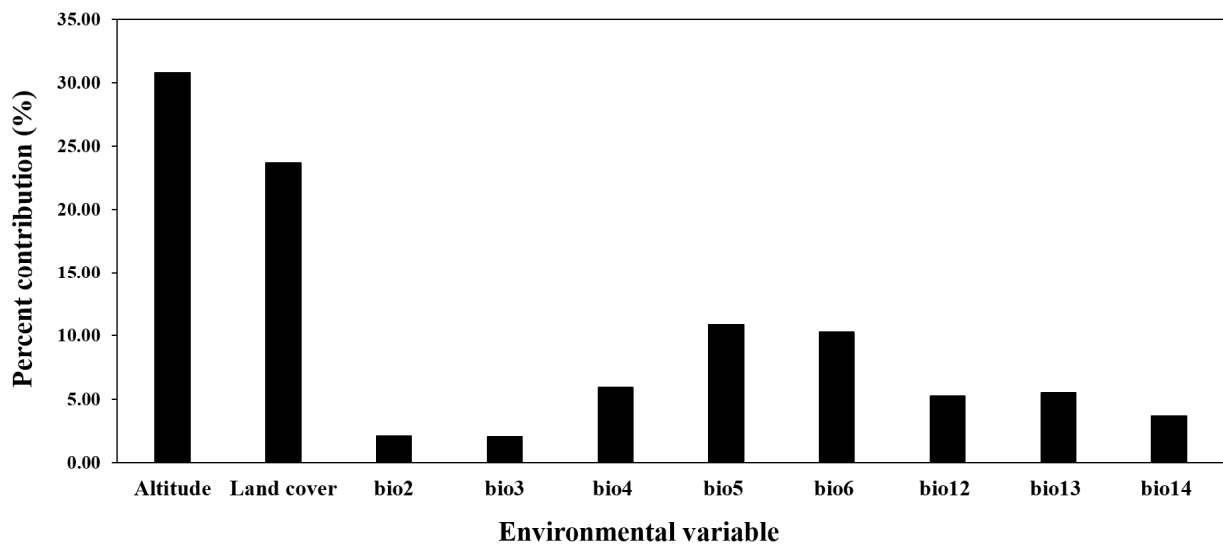


Figure 3. The bar graph of average percentage contribution of each variable in the 10 Maximum Entropy model for Korean clawed salamander (*O. koreanus*) in the South Korea.

은 한국에 형성된 지리적인 고도 범위(169.00m(1st-3rd quartiles: 64.00-341.00m)보다 높은 고도 범위(526.00m (quartiles: 327.25-684.00m)에 분포하였다(Figure 1A; 2A). 한국꼬리치레도롱뇽이 가장 많이 관찰된 토지피복도의 서식지는 침엽수림(71.38%)으로 확인되었고, 다음으로 활엽수림(22.90%), 경작지(5.72%) 순으로 확인되었다(Figure 2B).

2. 종 분포 모델

Maxent 모형을 이용한 한국꼬리치레도롱뇽의 AUC 값은 현재 기후에서 0.837로 나타났고, RCP4.5 및 RCP8.5 시나리오에서 각각 0.832와 0.807로 나타났다(Table 1). 테스트 샘플의 10% training 오류값은 현재 기후와 RCP4.5, RCP8.5 시나리오에서 모두 0.099로 낮은 오류값을 나타냈다(Table. 1). 한국꼬리치레도롱뇽의 분포에 기여한 주요 환

경변수는 잭나이프 테스트를 통해 평가되었다. 가장 높게 기여한 환경변수는 고도(30.76%)였으며, 다음으로 토지피복도(23.66%), 여름철 최대온도(BIO5; 10.89%) 순이었다(Figure 3).

한국꼬리치레도롱뇽 예측 모델의 현재 분포 형태를 확인한 결과, 한국꼬리치레도롱뇽은 고도가 낮은 서부지역과 제주도를 제외한 대부분 지역에 분포할 것으로 예측되었으며, 강원도를 비롯해 경상도와 전라도 분기 지역에서 서식 가능성이 높게 예측되었다(Figure 4).

3. 기후변화에 따른 분포변화

한국꼬리치레도롱뇽의 현재 대비 미래 분포변화를 확인하기 위해 10% training presence의 한계값을 기준으로 존재 가능한 격자수를 확인한 결과, 현재 대비 RCP4.5 시나리오에서는 62.96% 감소, RCP8.5 시나리오에서는 98.52%

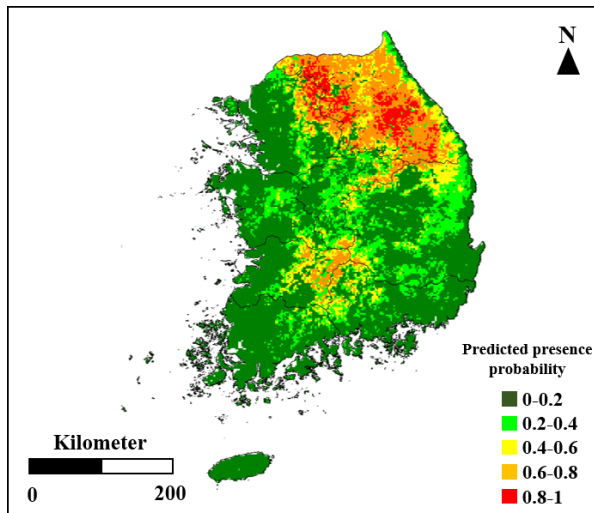


Figure 4. The spatial prediction of the Korean clawed salamander (*O. koreanus*) distribution in South Korea. Different colors represent degrees of the occurrence probabilities of the Korean clawed salamander.

감소할 것으로 예측되었다(Table 2).

예측된 분포범위를 확인한 결과 RCP4.5 시나리오에서는 강원도와 충청북도지역에 주로 분포할 것으로 예측되었으며, RCP8.5 시나리오에서는 강원도와 경상도 분기 지역의 극히 좁은 범위에서만 분포할 것으로 예측되었다(Figure 5).

고찰

본 연구에서는 국내에 분포한 한국꼬리치레도롱뇽의 지점 정보를 바탕으로 그들이 분포한 지리적 서식 범위와 선호하는 환경 특성을 파악하였다. 또한 종 분포 모델링을 적용하여 한국꼬리치레도롱뇽의 분포에 영향을 끼친 주요 환경변수를 확인하였고, 기후변화에 따른 분포양상을 알아보았다. 그 결과, 한국꼬리치레도롱뇽의 분포에 영향을 끼친 주요 환경 변수는 고도와 토지피복도로 나타났고, 선호한 서식지는 침엽수림으로 확인되었으며, 주요 분포지역은 태백산맥 주변 지역으로 확인되었다. 한국꼬리치레도롱뇽은 기후 온난화가 진행될수록 현재와 비교해 미래의 분포 범위가 극심하게 감소할 것으로 예측되었다.

고도는 양서류의 분포에 중요한 영향을 끼치는 환경변수로 알려져 있다(Do *et al.*, 2017 and 2018, 2021). 본 연구에서도 총 10개의 환경변수 중 고도는 한국꼬리치레도롱뇽의 분포에 영향을 미친 주요 환경변수로 구축된 모델에 가장 높은 기여도를 나타냈다. 한국꼬리치레도롱뇽은 한국에 형성된 지형의 고도 범위보다 높은 526.00m(quartiles: 327.25-684.00m)에 분포하고 있었다. 선행연구들에서도 한국꼬리치레도롱뇽이 주로 관찰되는 지역은 평균 372.6±263.8m 인 높은 고도에 서식한다고 알려져 있다(Song and Lee, 2009; Hong, 2017). 더욱이, 출현한 지점들은 태백산맥과 지리산 주변과 같이 고도가 높은 산지 주변에 밀집되어 있었으며, 서식지 분석 결과 또한 대부분 개체들은 90% 이상

Table 2. Predicted spatial information of the Korean clawed salamander (*O. koreanus*) distribution under the current and two future (RCP4.5 and RCP8.5) climatic conditions. Cell numbers represent their distribution ranges (with 2.5 arc-min unit per cell)

Species	Cell numbers (Present)	Cell numbers (RCP4.5)	Cell numbers (RCP8.5)	Percentage of change (RCP4.5)	Percentage of change (RCP8.5)
<i>O. koreanus</i>	6288	2329	93	-62.9612	-98.521

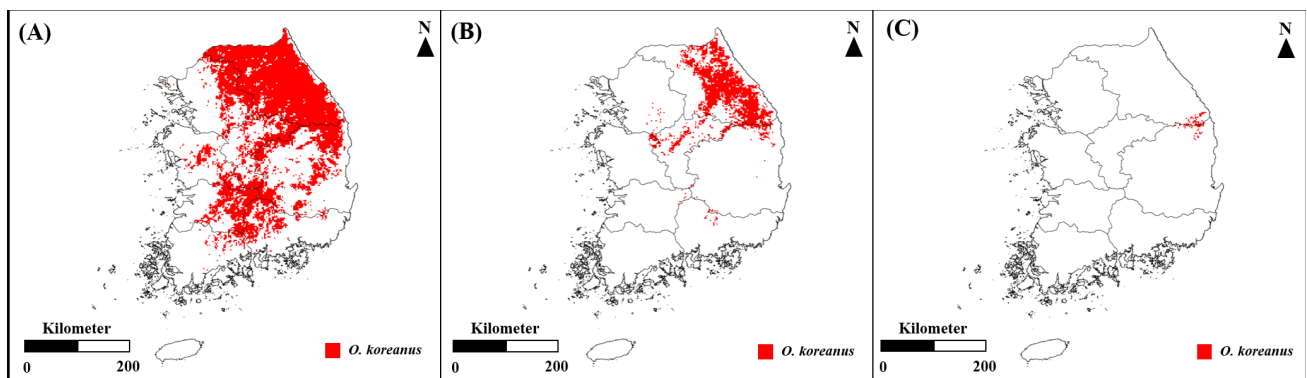


Figure 5. Changes in spatial distribution of the Korean clawed salamander (*O. koreanus*) in South Korea following current(A), RCP4.5(B) and RCP8.5(C) scenario. Red cells represent stable distribution ranges.

이 침엽수와 활엽수와 같은 산림지역에 분포하고 있었다. 우리나라에 서식하는 한국꼬리치레도롱뇽은 강원도와 경상도, 전라남도, 충청남도에 분포한다고 알려져 있으며, 가장 많은 개체군이 확인된 지역은 고산지대가 밀집한 강원도와 경상북도로 알려져 있다(Kim, 2009; Jang and Suh, 2010). 일반적으로 한국꼬리치레도롱뇽은 높은 고도의 산림지역에 위치한 계곡과 하천 주변에 서식하며, 지하수가 흐르는 공간과 동굴과 같은 지역에서 번식한다(Lee *et al.*, 2011). 더욱이 다른 도롱뇽들보다 한국꼬리치레도롱뇽 성체는 낮은 기온과 수온을 선호하며, 유생은 산소요구량이 상대적으로 높은 지역에서 생활하기 때문에 1급수에서만 서식하는 환경 지표종으로 잘 알려져 있다(Manenti *et al.*, 2009; Hong, 2017). 종합적으로 본 연구에서 예측된 한국꼬리치레도롱뇽의 공간적 분포 범위와 분포에 영향을 끼친 주요 환경요인들인 고도 범위와 서식지 선택은 다른 선행연구들에서 수행된 한국꼬리치레도롱뇽의 생태와 생리학적 특성들을 적절하게 반영하고 있었다(Manenti *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2011; Hong, 2017).

기후변화로 인해 도롱뇽과(Hynobiidae)에 속한 많은 종들의 분포는 감소할 것으로 알려져 있으며, 특히, 산지와 같은 높은 고도 범위에서 낮은 기온을 선호하는 생태적 습성을 가진 몇몇 종들은 기후 온난화에 매우 취약하다고 알려져 있다(Milanovich *et al.*, 2010; Sutton *et al.*, 2015; Jacobsen *et al.*, 2020). 예를 들어, 850m 이상의 높은 고도 구간에 주로 서식하는 Cow knob salamander (*Plethodon punctatus*)는 낮은 기온과 높은 습도를 선호하는 생태적 습성을 가지고 있지만, 기후변화로 상승한 기온과 감소한 강우량으로 인해 현재 분포 범위에 비해 RCP 8.5 시나리오에서 2050년에는 88.7%, 2100년에는 100.0%의 서식지가 감소할 것으로 예측되었다(Jacobsen *et al.*, 2020). 또한 국내에 서식 중인 이끼도롱뇽(*Karsenia koreana*)은 296m(1st-3rd quartiles: 189-347m)의 비교적 높은 고도 구간에 분포하며, 기온이 낮고, 습한 산림의 계곡 주변에서만 서식한다고 알려져 있다(Do *et al.*, 2018; Jung *et al.*, 2019). 이끼도롱뇽은 기후변화로 인해 현재 분포 범위에 비해 RCP 8.5 시나리오에서 2070년에는 18.0%를 제외한 서식지 적합 공간이 모두 사라질 것으로 예측되었다(Borzée *et al.*, 2019). 본 연구에서 한국꼬리치레도롱뇽은 기후 온난화가 심해질수록 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오에서 각각 62.96%와 98.52%로 서식 가능한 대부분의 공간이 사라질 것으로 예측되었다. 일반적으로 한국은 기후변화의 가속화로 지속적으로 기온이 상승하고, 강수량이 증가할 것으로 알려져 있다(Jeung, 2019). 따라서 기후온난화로 상승하는 기온은 낮은 기온과 수온을 선호하는 한국꼬리치레도롱뇽의 성장과 생존에 부정적인 영향을 끼칠 가능성이 클 것으로 판단된다

(Manenti *et al.*, 2009). 종합적으로 기후변화에 취약하다고 알려진 고산지대에 서식하는 다른 도롱뇽들과 마찬가지로 한국꼬리치레도롱뇽 또한 기후변화로 인해 서식 적합 공간들이 급감하는 것으로 확인되었다.

본 연구에서는 종 분포 모델을 적용하여 현재와 기후변화에 따른 미래의 한국꼬리치레도롱뇽이 서식 가능한 지역들을 예측하였다. 그러나 본 연구 결과는 다음과 같은 몇몇 한계점을 가지고 있다. 먼저, 번식과 같은 생활사에 따른 서식 특성이 정밀하게 반영되지 못했다. 예를 들어 한국꼬리치레도롱뇽의 번식공간은 지하공간 또는 동굴과 같은 지도상에 표현되지 않는 서식공간으로 실제 조사를 통해 확인되지 못한 관찰지점들이 다수 존재할 것으로 판단되며, 분석에 이용된 서식지 지도에서도 이러한 정보들은 반영되지 않았다. 다음으로 기후변화 이외에도 다양한 요인들이 복합적으로 한국꼬리치레도롱뇽의 개체군 감소에 영향을 끼칠 수 있다. 예를 들어 성충권의 오존 감소로 UV-B 방사선이 증가하여 피부병을 유발할 뿐만 아니라 전염성 질병과 스트레스와 같은 다양한 요인을 통해 개체군 유지에 부정적인 영향을 미칠 수 있다(Blaustein and Kiesecker, 2002). 즉, 기후변화 이외에도 자연 상태에서 발생할 수 있는 다양하고 복잡한 요인들을 반영하지 못하는 한계점을 가지고 있다(Pearson and Dawson, 2003; D'Amen *et al.*, 2011). 추후 Maxent 프로그램 이외에도 다양한 분석기법(e.g. Non-parametric multiplicative regression Model (NPMR))을 통한 한국꼬리치레도롱뇽의 분포 예측에 최적화된 모형을 개발하는 것도 필요할 것으로 판단되며(Allen and McMullin, 2019), 한국꼬리치레도롱뇽의 생활사에 따른 서식지 특성과 미세한 서식 요인들을 반영하여 다양한 분석기법을 통한 추가적인 연구가 수행될 필요가 있을 것이다.

감사의 글

전국자연환경조사와 국립공원자연자원조사, 멸종위기종 분포조사 등 양서·파충류분야 분야 담당자와 현장 조사에 참여해주신 모든 조사원분들께 감사의 말씀을 전합니다. 본 논문은 정부(환경부)의 재원으로 국립생물자원관의 지원을 받아 수행하였습니다(NIBR202102102, NIBR202108101).

REFERENCES

- Allen, J.L. and R.T. McMullin(2019). Modeling algorithm influence on the success of predicting new populations of rare species: Ground-truthing models for the Pale-Belly Frost

- Lichen(*Physconia subpallida*) in Ontario. Biodiversity and Conservation 28(7): 1853-1862.
- Blank, L. and L. Blaustein(2012) Using ecology niche modeling to predict the distributions of two endangered amphibian species in aquatic breeding sites. Hydrobiologia 693: 157-167.
- Blaustein, A.R. and J.M. Kiesecker(2002) Complexity in conservation: Lessons from the global decline of amphibian populations. Ecology Letters 5(4): 597-608.
- Borzée, A., D. Andersen, J. Groffen, H.T. Kim, Y.H. Bae and Y.K. Jang(2019) Climate change-based models predict range shifts in the distribution of the only Asian plethodontid salamander: *Karsenia koreana*. Scientific Reports 9(1): 1-9.
- Carey, C. and M.A. Alexander(2003) Climate change and amphibian declines: Is there a link? Diversity and Distributions 9(2): 111-121.
- Carignan, V. and M.A. Villard(2002) Selecting indicator species to monitor ecological integrity: A review. Environmental Monitoring and Assessment 78: 45-61.
- Cho, D.G. and Y.J. Shim(2016) Planning of Narrow-mouth Frog (*Kaloula borealis*) habitat restoration using Habitat Suitability Index (HSI). Ecology and Resilient Infrastructure 3(1): 062-069. (in Korean with English abstract)
- Choi, W.J., D. Park, J.K. Kim, J.H. Lee, D.I. Kim and I.H. Kim(2018) Changes in the Reproductive Population Size of the Huanren Brown Frog (*Rana huanrenensis*) and Wonsan Salamander (*Hynobius leechii*), which Breeding in Mountain Valleys, According to Climate Change. Korean Journal of Environmental and Ecology 32(6): 582-590. (in Korean with English abstract)
- Collins, M., R. Knutti, J. Arblaster, J.L. Dufresne, T. Fichefet, P. Friedlingstein, X. Gao, W.J. Gutowski, T. Johns, G. Krinner, M. Shongwe, C. Tebaldi, A.J. Weaver, M.F. Wehner, M.R. Allen, T. Andrews, U. Beyerle, C.M. Bitz, S. Bony and B.B.B. Booth(2013) Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: T.F. Stocker, D. Qin, G.K. Plattner, M.M.B. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley(eds.), Climate Change 2013-The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, New York, pp.1029-1136.
- D'Amen, M., P. Bombi, P.B. Pearman, D.R. Schmatz, N.E. Zimmermann and M.A. Bologna(2011) Will climate change reduce the efficacy of protected areas for amphibian conservation in Italy? Biological Conservation 144(3): 989-997.
- Do, M.S., H.J. Jang, D.I. Kim and J.C. Yoo(2016) Interspecific Competition and spatial Ecology of three Species of Vipers in Korea: An Application of Ecological niche-based Models and GIS. Korean Journal of Environment and Ecology 30(2): 173-184. (in Korean with English abstract)
- Do, M.S., H.J. Jang, D.I. Kim, K.S. Koo, S.C. Lee and H.K. Nam(2018) The study on habitat analysis and ecological niche of Korean Brown Frogs (*Rana dybowskii*, *R. coreana* and *R. huanrenensis*) using the species distribution model. Korean Journal of Herpetology 9: 1-11. (in Korean with English abstract)
- Do, M.S., J.W. Lee, H.J. Jang, D.I. Kim, J.W. Park and J.C. Yoo(2017) Spatial Distribution Patterns and Prediction of Hotspot Area for Endangered Herpetofauna Species in Korea. Korean Journal of Environment and Ecology 31(4): 381-396. (in Korean with English abstract)
- Do, M.S., S.J. Son, G. Choi, N.K. Yoo, K.S. Koo and H.K. Nam(2021). Anuran Community Patterns in the rice fields of the mid-western region of the Republic of Korea. Global Ecology and Conservation 26: 1-15. (in Korean with English abstract)
- Donnelly, M.A. and M.L. Crump(1998) Potential Effects of Climate Change on Two Neotropical Amphibian Assemblages. Climatic Change 39: 541-561.
- Fauth, J.E. and W.J. Resetarits(1991) Interactions Between the Salamander *Siren intermedia* and the Keystone predator *Notophthalmus Viridescens*. Ecological Society of America 72(3): 827-838.
- Gardner, T.(2001) Declining amphibian populations: A global phenomenon in conservation biology. Animal Biodiversity and Conservation 24: 25-44.
- 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): 773-785.
- Hijmans, R.J., L. Guarino and P. Mathur(2012) DIVA-GIS. Version 7.5. A geographic information system for the analysis of species distribution data. Bioinformatics 19.
- Hijmans, 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: 1965-1978.
- Hong, N.R.(2017) Habitat environmental characteristics of Korean clawed salamander (*Onychodactylus koreanus*) at Mt. Baegun in Gwangyang, Jeonnam province. Master's thesis, Seoul National University.
- IPCC(1990) Climate change: The IPCC scientific assessment report. University Press.
- IPCC(2007) Climate change 2007, Mitigation of Climate Change. Contribution Working Group III Contribution to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, New york, USA, 176pp.
- 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. IPCC, Geneva, Switzerland, 151pp.
- Jacobsen, C.D., D.J. Brown, W.D. Flint, T.K. Pauley, K.A. Buhlmann and J.C. Mitchell(2020) Vulnerability of high-elevation endemic salamanders to climate change: A case study with the Cow Knob Salamander (*Plethodon punctatus*). *Global Ecology and Conservation* 21: 1-12.
- Jang, H.J. and J.H. Suh(2010) Distribution of Amphibian species in South Korea. *Korean Journal of Herpetology* 2: 45-51. (in Korean with English abstract)
- Jung, S., J. Park, D. Yang and B. Kim(2019) The Future of Extreme Climate Change in the Korean Peninsula Using National Standard Climate Change Scenarios and the ETCCDI Index. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 19(7): 105-115. (in Korean with English abstract)
- Jiménez-Valverde, A.(2012) Insights into the area under the receiver operating characteristic curve (AUC) as a discrimination measure in species distribution modelling. *Global Ecology and Biogeography* 21(4): 498-507.
- Jung, J.H., E.J. Lee, W.S. Lee and C.D. Park(2019) Habitat suitability models of Korean crevice salamander (*Karsenia koreana*) at forested area in Daejeon metropolitan city, Republic of Korea. *Journal of Forest Research* 24(6): 349-355.
- Kim, J.B.(2009) Taxonomic list and distribution of Korean Amphibians. *Korean Journal of Herpetology* 1(1): 1-13. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.H., J.H. Lee, M.J. Park and J.G. Joo(2016) Effect of Climate Change Scenarios and Regional Climate Models on the Drought Severity-Duration-Frequency Analysis. *The Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 16(2): 351-361. (in Korean with English abstract)
- Lee, J.H., H.J. Jang and J.H. Suh(2011) Ecological Guide Book of Herpetofauna in Korea. NIER, Incheon. (in Korean)
- Lee, J.H., N.Y. Ra, J.H. Eom and D.S. Park(2008) Population Dynamics of the Long-tailed Clawed Salamander Larva, *Onychodactylus fischeri*, and Its Age Structure in Korea. *Journal of Ecology and Environment* 31(1): 31-36. (in Korean with English abstract)
- Lee, J.W., H.J. Noh, Y.J. Lee, Y.S. Kwon, C.H. Kim and J.C. Yoo(2014) Spatial patterns, ecological niches, and interspecific competition of avian brood parasites: Inferring from a case study of Korea. *Ecology and Evolution* 4(18): 3689-3702. (in Korean with English abstract)
- Lobo, J.M., A. Jiménez-Valverde and R. Real(2008) AUC: A misleading measure of the performance of predictive distribution models. *Global Ecology and Biogeography* 17(2): 145-151.
- Lovejoy, T.E. and L. Hannah(2005) Climate change and biodiversity. Yale University Press, Michigan, 387pp.
- Manenti, R., G.F. Ficetola and F.D. Bernardi(2009) Water, stream morphology and landscape: Complex habitat determinants for the fire salamander *Salamandra salamandra*. *Amphibia-Reptilia* 30(1): 7-15.
- Milanovich, J.R., W.E. Peterman, N.P. Nibbelink and J.C. Maerz(2010) Projected Loss of a Salamander Diversity Hotspot as a Consequence of Projected Global Climate Change. *PLOS One* 5(8): 1-10.
- Moritz, C., J.L. Patton, C.J. Conroy, J.L. Parra, G.C. White and S.R. Beissinger(2008) Impact of a Century of Climate Change on Small-Mammal Communities in Yosemite National Park, USA. *Science* 322(5899): 261-264.
- Park, B.S.(1994) Amphibia and Reptilia Fauna by Sport and Leisure Complex-Amphibia and Reptilia Fauna in Minjujisan Area, Korea-. *Ecology and Resilient Infrastructure* 8(1): 68-73. (in Korean with English abstract)
- Park, S.H. and K.H. Cho(2017) Comparison of Health Status of Japanese Tree Frog (*Hyla japonica*) in a Rural and an Urban Area. *Korean Society of Ecology and Resilient Infrastructure* 4(1): 71-74. (in Korean with English abstract)
- Pearson, R.G. and T.P. Dawson(2003) Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: Are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography* 12(5): 361-371.
- Penman, T.D., D.A. Pike, J.K. Webb and R. Shine(2010) Predicting the impact of climate change on Australia's most endangered snake, *Hoplocephalus bungaroides*. *Diversity and Distributions* 16(1): 109-118.
- Phillips, S.J. and M. Dudík(2008) Modelling of species distributions with Maxent: New extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* 31(2): 161-175.
- Phillips, S.J., M. Dudík and R.E. Schapire(2004) A Maximum entropy approach to species distribution modeling. *Proceeding of the 21st International Conference on Machine Learning*, Banff, Canada.
- Phillips, S.J., M. Dudík, J. Elith, C.H. Graham, A. Lehmann, J. Leathwick and S. Ferrier(2009) Sample selection bias and presence-only distribution models: Implications for background and pseudo-absence data. *Ecological Applications* 19(1): 181-197.
- Pimm S.L.(2008) Biodiversity: Climate change or habitat loss-which will kill more species? *Current Biology* 18(3): 117-119.
- Pounds, J.A., M.P.L. Fogden and J.H. Campbell(1999) Biological response to climate change on a tropical mountain. *Nature* 398: 611-614.
- Pradhan, P.(2016) Strengthening MaxEnt modelling through screening of redundant explanatory bioclimatic variables with

- variance inflation factor analysis. *Researcher* 8(5): 29-34.
- Sewell, D. and R.A. Griffiths(2009) Can a Single Amphibian Species Be a Good Biodiversity Indicator? *Diversity* 1(2): 102-117.
- Song, J.Y. and I. Lee(2009) Elevation distribution of Korean Amphibians. *Korean Journal of Herpetology* 1(1): 15-19. (in Korean with English abstract)
- Sutton, W.B., K. Barrett, A.T. Moody, C.S. Loftin, P.G. DeMaynadier and P. Nanjappa(2015) Predicted Changes in Climatic Niche and Climate Refugia of Conservation Priority Salamander Species in the Northeastern United States. *Forests* 6(1): 1-26.
- United Nations Environment Programme(UNEP)(1997) Negotiating a sustainable future land.
- Van Riemsdijk, I., J.W. Arntzen, S. Bogaerts, M. Franzen, S.N. Litvinchuk, K. Olgun and B. Wielstra(2017) The Near East as a cradle of biodiversity: A phylogeography of banded newts (genus *Ommatotriton*) reveals extensive inter-and intraspecific genetic differentiation. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 114: 73-81.
- Van Vuuren, D.P., J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomson, K. Hibbard, G.C. Hurtt, T. Kram, V. Krey, J.F. Lamarque, T. Masui, M. Meinshausen, N. Nakicenovic, S.J. Smith and S.K. Rose(2011) The representative concentration pathways: An overview. *Climate Change* 109: 5-31.
- Velo-Antón, G., J.L. Parra, G. Parra-Olea and K.R. Zamudio(2013) Tracking climate change in a dispersal-limited species: Reduced spatial and genetic connectivity in a montane salamander. *Molecular Ecology* 22(12): 3261-3278.
- Wake, D.B. and V.T. Vredenburg(2008) Are we in the midst of the sixth mass extinction? A view from the world of amphibians. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105 (Supplement 1): 11466-11473.
- Welsh Jr, H.H. and G.R. Hodgson(2013). Woodland salamanders as metrics of forest ecosystem recovery: A case study from California's redwoods. *Ecosphere* 4(5): 1-25.
- Whiles, M.R., K.R. Lips, C.M. Pringle, S.S. Kilham, R.J. Bixby, R. Brenes, S. Connelly, J.C. Colon-Gaud, M. Hunte-Brown, A.D. Huryn, C. Montgomery and S. Peterson(2006) The effects of amphibian population declines on the structure and function of Neotropical stream ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment* 4(1): 27-34.
- Wisz, M.S., R.J. Hijmans, J. Li, A.T. Peterson, C.H. Graham and A. Guisan(2008) Effects of sample size on the performance of species distribution models. *Diversity and Distributions* 14(5): 763-773.
- Yi, Y.J., X. Cheng, Z.F. Yang and S.H. Zhang(2016) Maxent modeling for predicting the potential distribution of endangered medicinal plant (*H. riparia* Lour) in Yunnan, China. *Ecological Engineering* 92: 260-269.
- Yun, S., J.W. Lee and J.C. Yoo(2020) Host-parasite interaction augments climate change effect in an avian brood parasite, the lesser cuckoo *Cuculus poliocephalus*. *Global Ecology and Conservation* 22: 1-12. (in Korean with English abstract)