

# 기후변화에 따른 금강 유역의 어류 종분포 변화 예측

## Prediction of Shift in Fish Distributions in the Geum River Watershed under Climate Change

배은혜 · 정진호\*

고려대학교 환경생태공학과

Eunhye Bae and Jinho Jung\*

Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 02481, Korea

Received 4 August 2015, revised 10 August 2015, accepted 31 August 2015, published online 30 September 2015

**ABSTRACT:** Impacts of climate change on aquatic ecosystems range from changes in physiological processes of aquatic organisms to species distribution. In this study, MaxEnt that has high prediction power without nonoccurrence data was used to simulate fish distribution changes in the Geum river watershed according to climate change. The fish distribution in 2050 and 2100 was predicted with RCP 8.5 climate change scenario using fish occurrence data (a total of 47 species, including 17 endemic species) from 2007 to 2009 at 134 survey points and 9 environmental variables (monthly lowest, highest and average air temperature, monthly precipitation, monthly lowest, highest and average water temperature, altitude and slope). The fitness of MaxEnt modeling was successful with the area under the relative operating characteristic curve (AUC) of 0.798, and environmental variables that showed a high level of prediction were as follows: altitude, monthly average precipitation and monthly lowest water temperature. As climate change proceeds until 2100, the probability of occurrence for *Odontobutis interrupta* and *Acheilognathus yamatsuataea* (endemic species) decreases whereas the probability of occurrence for *Microphysogobio yaluensis* and *Lepomis macrochirus* (exotic species) increases. In particular, five fish species (*Gnathopogon strigatus*, *Misgurnus mizolepis*, *Erythroculter erythropterus*, *A. yamatsuataea* and *A. koreensis*) were expected to become extinct in the Geum river watershed in 2100. In addition, the species rich area was expected to move to the northern part of the Geum river watershed. These findings suggest that water temperature increase caused by climate change may disturb the aquatic ecosystem of Geum river watershed significantly.

**KEYWORDS:** Aquatic ecosystem, Global warming, MaxEnt, Species distribution, Species richness

**요약:** 기후변화에 의한 수생태계의 영향은 수생생물의 생리작용의 변화에서부터 종분포에 이르기까지 광범위한 것으로 예상된다. 본 연구에서는 기후변화에 따른 금강유역의 어류 종분포를 예측하기 위하여 비출현 정보를 요구하지 않고도 좋은 예측력을 가지고 있는 MaxEnt 모형을 활용하였다. 금강유역 134개 지점의 2007년부터 2009년까지 어류 출현 자료 (고유종 17종 포함 총 47종)와 9개의 환경인자 (월별 최저기온, 최고기온, 평균기온, 강수량, 최저수온, 최고수온, 평균수온, 고도, 경사)를 사용하여, RCP 8.5 기후변화 시나리오에 따라 2050년과 2100년의 어류 종분포를 예측하였다. MaxEnt 모형은 평균 0.798의 적절한 모형 적합도를 보여 주었으며, 종분포 예측에 기여도가 높은 환경인자는 고도, 강수량, 최저수온 순이었다. 기후변화가 진행됨에 따라 얼룩동사리와 줄납자루와 같은 고유종의 출현확률은 감소한 반면, 배스와 블루길과 같은 외래종의 출현확률은 증가하였다. 특히 2100년에는 5종 (줄물개, 미꾸라지, 강준치, 줄납자루, 칼납자루)의 어류가 금강유역에서 더 이상 서식하지 못하는 것으로 예측되었다. 그리고 기후변화에 따라 종풍부도가 높은 지역이 금강유역 내에서 북상하는 것으로 예측되었다. 이러한 결과는 기후변화로 인한 수온 상승이 금강유역 수생태계의 교란을 심화시킬 수 있다는 것을 의미한다.

**핵심어:** 수생태계, 지구온난화, 맥스엔트, 종분포, 종풍부도

\*Corresponding author: jjung@korea.ac.kr

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서론

최근 발간된 IPCC 5차 보고서에 따르면, 지구 온난화로 인한 지구 평균기온은 약 130년간  $0.85^{\circ}\text{C}$  상승하였다 (IPCC 2013). 국내의 경우, 기후변화로 인해 1900년대 후반과 비교하여 2000년대 후반에는 온도가  $3.8^{\circ}\text{C}$  증가할 것으로 예측되고 있다 (NIER 2013). 대기의 온도가 상승함으로써 발생하는 지구 온난화는 장기간에 걸친 온도상승, 강수량 변화, 강우패턴 변화, 가뭄, 해수면 상승 등으로 이어진다.

기후변화에 따른 기온과 강수량의 변화는 하천유량, 수온을 비롯한 수질과 수생태계 전반에 걸쳐 영향을 미치게 되고, 이러한 서식환경의 변화로 인하여 고유종이 멸종되기도 한다 (Kim 2011). 대부분의 어류는 변온동물이기 때문에 체온을 조절하기 위한 물리적 능력이 없으므로 생리적 측면에서 수온의 영향을 크게 받으며, 따라서 수온 증가는 어류의 서식지를 제한하는 요인으로 작용한다 (NIER 2012a). 특히 연어나 송어와 같은 냉수성 어류는 서식처 소실과 관련하여 상당한 문제가 유발된다고 보고되었다 (MOE 2014).

이와 같이 기후변화에 따라 어류 서식이 적합하지 않은 환경이 만들어지면, 이런 환경을 회피하거나 적응하지 못한 어류종이 사멸하게 되어 어류의 종분포가 변화할 수 있다. 따라서 기후변화에 대한 어류의 여러 반응 중 분포의 변화는 가장 먼저 일어나는 반응으로 여겨진다 (Walther et al. 2002). 실제 북서대서양에서 40년간 조사된 연구 결과에 따르면, 기후변화로 인하여 어류종의 절반 이상의 서식지가 북쪽으로 이동하였다 (Rose et al. 2000). 그리고 우리나라 낙동강 상류의 열목어 (*Brachmystaxlenok tsinlingensis*)는 수온상승 현상이 발생하면 지속적으로 상류로 이동하게 되겠지만, 단절된 수계로 인하여 절멸하게 될 가능성이 높다고 예측되고 있다 (Joo et al. 2008). 이와 같이 기후변화로 인한 어류 종분포의 변화는 고유종, 멸종위기종 등의 감소 (종 및 개체수)를 일으키고 생물다양성과 연관되어 생태계의 구조와 기능 변화를 초래할 수 있다 (Wrona et al. 2006).

기후변화가 유의하게 어류 종분포를 변화시킨다는 연구 결과들을 토대로 미래 기후변화 시나리오에 따라 어류의 종분포를 예측하는 연구가 국내외에서

점차 활발해지고 있다 (Chu et al. 2005, Chung et al. 2011, Comte et al. 2013). 종분포를 예측하는 기법 중, 통계를 기반으로 하는 통계적 모형은 종의 서식 특성을 파악하여 공간적 잠재서식지역을 통계적으로 예측하는 모형으로 다양한 환경인자들의 영향을 예측할 수 있다는 장점이 있다. 대표적인 통계적 모형으로는 로지스틱 회귀모형 (Logistic Regression Model), 일반화 선형 모형 (Generalized Linear Model; GLM), 일반화 가법 모형 (Generalized Additive Model; GAM), 분류 및 회귀 트리 (Classification and Regression Tree; CART), 인공신경망 (Artificial Neural Network; ANN), 유전적 알고리즘 (Genetic Algorithm; GARP), MaxEnt (Maximum Entropy) 등이 있다 (Guisan and Thuiller 2005).

본 연구에서 사용한 MaxEnt 모형은 2006년 이래 1000여건 이상의 연구에 사용되었고, 종분포 또는 환경 지위 모델링 연구에 활발히 활용되고 있다 (Elith et al. 2011, Kwon et al. 2012). 이 모형은 회귀분석을 기반으로 하는 공간확률모델로, 생물의 출현정보를 바탕으로 최대 엔트로피 접근법을 통해 생물의 분포를 예측한다 (Kim et al. 2013a). 특히 MaxEnt는 다른 통계적 모형과 다르게 생물종의 비출현 자료를 반드시 요구하지 않기 때문에 출현자료만으로도 높은 예측력을 나타낸다. 대부분의 수생태 조사 자료는 생물종 출현에 대한 정보만을 담고 있기 때문에 MaxEnt의 활용은 큰 장점으로 작용할 수 있다 (Chun 2012). 따라서 본 연구에서는 다양한 생물종의 분포 예측과 관련된 연구에 널리 사용되어 그 유용성이 이미 입증된 종분포 모형인 MaxEnt를 사용하여 기후변화에 따른 금강유역의 어류 종분포 변화를 예측하고자 한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 금강유역 어류 종출현 자료 수집

본 연구에서는 물환경정보시스템 (<http://water.nier.go.kr/>)에서 제공되는 ‘수생태계 건강성 조사 및 평가’ 사업의 결과 중 2007년부터 2009년까지의 금강유역 어류 출현자료를 이용하였다. 이 사업은 한강, 금강, 낙동강, 영산강, 섬진강 대권역의 국가 및 지방 하천 960개 지점에 대한 어류, 부착조류, 저서생물,

식생, 서식환경 및 수변환경 조사를 1년에 2차례 실시하였다. 본 연구의 대상지역인 금강유역은 20개의 중권역을 대상으로 총 134 조사지점을 포함하고 있다. 분석대상 어류종은 금강유역에서 2007년부터 2009년까지 조사된 87종의 어류 중, 출현 지점 수가 20개 미만인 종들을 제외하고 47종을 선정하였다. 종분포 모형에 사용한 47종의 어류 중 고유종은 얼룩동사리, 쉬리, 취리 등을 포함하여 17종이 포함되었다.

## 2.2 환경인자 공간자료 구축

본 연구에서는 어류 종출현을 설명하기 위한 환경인자로서 기후인자 4개, 지형인자 2개, 수온인자 3개 등 총 9개의 인자를 사용하였다 (Table 1). 현재 기후인자는 기상청 (<http://www.kma.go.kr>)에서 제공하는 2007년부터 2009년까지의 일별 최저기온 (°C), 최고기온 (°C), 평균기온 (°C), 강수량 (mm) 자료를 월 단위로 평균을 내어서 일별 최저기온, 최고기온, 평균기온, 강수량 자료로 변환시켜 사용하였다. 그리고 기후변화의 영향을 평가하기 위하여 기상청에서 제공하는 RCP 8.5 시나리오 (2100년 기준 CO<sub>2</sub> 936 ppm)의 2050년과 2100년 일별 최저기온, 최고기온, 평균기온, 강수량 자료를 활용하였다. RCP 8.5 시나리오는 기후변화 온실 가스 배출 시나리오 중 현재의 이산화탄소 배출과 가장 유사한 시나리오이다 (NIER 2013).

하천 수온은 기온뿐만 아니라 강수량, 풍속, 유량,

유속 등의 기상학적인 요인과 토지 이용 등의 지형 특성에 의해서도 영향을 받는다 (Jeong et al. 2013). 그러나 이러한 영향 인자를 모두 고려하여 미래 수온을 예측하는 것은 어려우며 기온과 수온 간의 상관성 결정계수가 0.8-0.9로 높기 때문에 (An and Lee 2013, Kang et al. 2013), 본 연구에서 수온 자료는 현재와 미래의 월별 최저기온, 최고기온, 평균기온 자료로부터 기온 (T<sub>air</sub>) 과 수온 (T<sub>water</sub>) 의 회귀식 (Eq. 1)을 이용하여 계산하였다 (Kim et al. 2013b).

$$T_{\text{water}} = 4.861 + 1.816 * T_{\text{air}} \quad (1)$$

모든 기후 및 수온인자는 래스터 형태로 변환하였고, 1 km의 공간해상도로 구축하였다.

지형인자인 고도와 경사 자료는 환경부에서 제공하는 고해상도 지도 자료를 ESRI사의 ArcGIS (version 10.2.1)를 이용하여 1 km의 공간해상도로 추출하였으며, 현재와 미래에 동일하게 적용되었다.

## 2.3 종분포 모형 구동

금강유역 어류 종분포 예측을 위하여 사용한 통계적 모형은 MaxEnt 3.3.3 (<http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent>, Phillips et al. 2006)이다. 모형의 정확도는 ROC (Receiver Operating Characteristic) 곡선의 AUC (Area Under Cover) 값을 통해 측정하였다. 금강유역을 대상으로 0-1까지의 종출현 확률 지도를 구축하고, 여기에 threshold 값 (Minimum Training Presence) 을 적용하여 0 (비출현) 과 1 (출현) 의 값을 갖는 지도를 구축하였다. 그리고 출현과 비출현으로 결과를 바탕으로 Eq. 2에 따라 종풍부도 (Species Richness, SR) 지도를 작성하였다 (NIER 2012b). 모든 지도는 ArcGIS (version 10.2.1) 를 이용하여 표출하였다.

$$SR = \sum S_i \quad (S_i = \text{개별 종이 출현하는 격자}) \quad (2)$$

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 기후변화에 따른 어류 종출현 확률 변화

본 모형의 적합도 (AUC) 는 0.798 ± 0.07로 나타

**Table 1.** Summary of environmental variables used in this study.

Category	Variables	Code	Unit
Climate factors	Monthly average air temperature	T <sub>avg</sub>	°C
	Monthly highest air temperature	T <sub>max</sub>	°C
	Monthly lowest air temperature	T <sub>min</sub>	°C
	Monthly precipitation	Prcp	mm
Water Temperature factors	Monthly average water temperature	WT <sub>avg</sub>	°C
	Monthly highest water temperature	WT <sub>max</sub>	°C
	Monthly lowest water temperature	WT <sub>min</sub>	°C
Geographical factors	Altitude	Altd	m
	Slope	Slp	%

났는데, 일반적으로 AUC값이 0.9 이상이면 모형 정확도가 높고, 0.7에서 0.9사이이면 적절하다고 판단된다 (Franklin 2009, Kim et al. 2012). 각 종별 AUC값과 상대적으로 중요하게 작용한 환경인자들은 Table 2와 같이 종에 따라 다르게 나타났다. 공통적으로 가장 크게 영향을 미친 환경인자는 고도로 나타났으며, 그 다음으로 월별 강수량, 월별 최저수온 순으로 큰 기여도를 보였다.

고유종들 중 얼룩동사리 (*Odontobutis interrupta*)와 줄납자루 (*Acheilognathus yamatsuatea*)의 현재와 미래 (2050년과 2100년) 기후변화 시나리오에 따른 출현확률 변화는 Fig. 1과 같다. 얼룩동사리와 줄납자루 모두 미래 기후변화에 따라 출현확률이 감소하며 출현지점이 점차 북쪽으로 이동할 것으로 예상된다. 특히 2100년에 얼룩동사리는 금강유역에서 거의 분포하지 않는 것으로 예측되었다. 일반적으로 냉수성 어류의 서식지는 기후변화로 인한 수온 증가에 따라 북쪽으로 이동되거나 축소된다고 알려져 있다 (MOE 2014).

상기 고유종들의 결과와 반대로 외래종인 배스 (*Micropterus salmoides*)와 블루길 (*Lepomis macrochirus*)은 월별 평균기온이 현재보다 약 2°C 가량 올라가는 것으로 예측되는 2050년에는 출현확률이 오히려 증가하는 것으로 예측되었다 (Fig. 1). 기후변화가 지속되면서 월별 평균기온이 3-4°C 가량 증가할 것으로 예상되는 2100년에는 2050년에 비해 출현확률이 감소하지만, 현재보다 출현지점이 증가할 것으로 예상되었다. 배스는 따뜻한 수온을 선호하며 다른 어종에 비해 온화한 기후에서 진화하였기 때문에 기후변화가 진행됨에 따라 적합한 서식지가 증가할 것으로 예상된다 (Rahel and Julian 2008). 그리고 Chu et al. (2005)은 기후변화 시나리오에 따른 캐나다의 담수 어류종의 분포를 예측한 연구에서 기온이 올라감에 따라 배스의 출현확률이 증가한다고 보고하였다. 배스와 블루길은 국내의 새우나 작은 물고기 등을 포식하는 육식어종으로 수생태계의 균형을 무너뜨리는 종으로 알려져 있다 (Azuma 1992, Hong and Son 2003). 이와 같은 고유종의 감소와 외래종의 증가는 수생태계 어류 군집 건강성에 심각한 위협을 초래하는 상승효과를 일으킬 것으로 예상된다 (Dextrase and Mandrak 2006).

### 3.2 기후변화에 따른 어류 종풍부도 변화

어류 47종을 대상으로 현재와 미래 (2050년과 2100년) 기후변화에 따른 종풍부도 변화는 Fig. 2과 같은데, 기후변화가 진행될수록 높은 풍부도를 보이는 지역이 북상하는 것으로 예측되었다. 이것은 기후변화에 따른 수온 증가로 인해 많은 수의 어류 종들이 북쪽 방향으로 이동하였거나 현재 서식지역에서 절멸한 결과로 해석할 수 있다 (Parmesan and Yohe 2003, Joo et al. 2008). 특히 줄물개는 2050년에 금강유역에서 모두 사라지며, 2100년에는 총 5종 (줄물개, 미꾸라지, 강준치, 줄납자루, 칼납자루)이 금강유역에 더 이상 서식하지 않는 것으로 예측되었다. 한편 2100년 줄납자루의 절멸 예측은 랜덤 포레스트 모델을 이용하여 기후변화 시나리오에 따른 한반도의 어류 고유종의 분포를 예측한 결과와 일치하였다 (NIER 2013). 그리고 본 연구와 유사하게 다른 연구들도 기후변화가 어류종의 분포를 북상하게 만들고 일부 종의 절멸을 초래한다고 보고하고 있다 (Rose et al. 2000, MOE 2014).

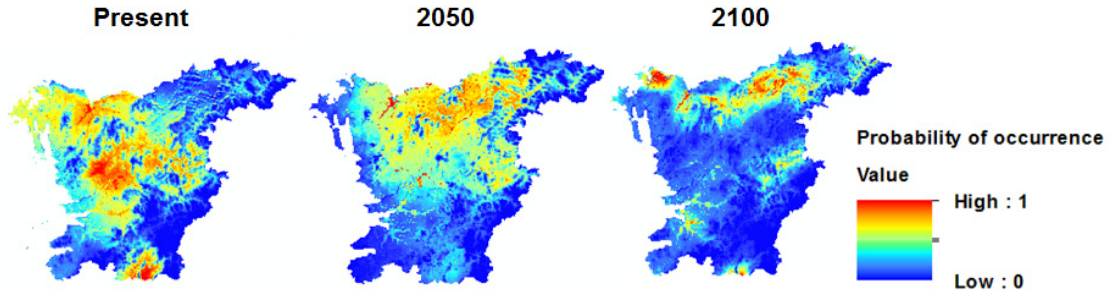
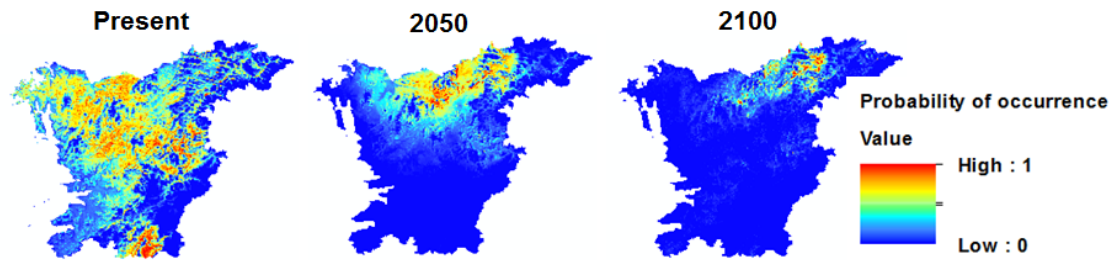
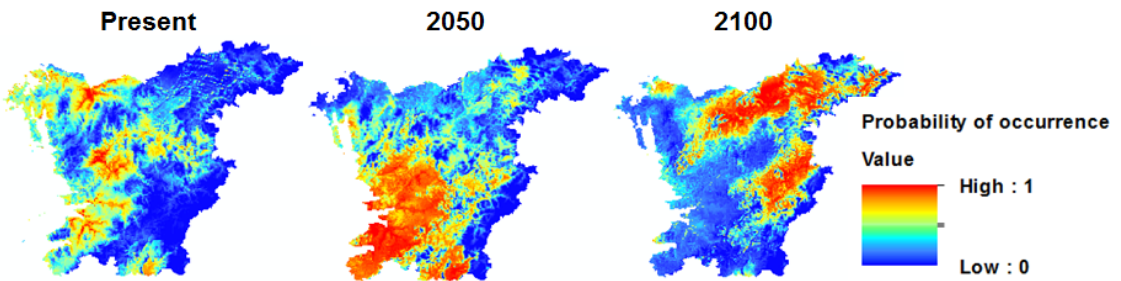
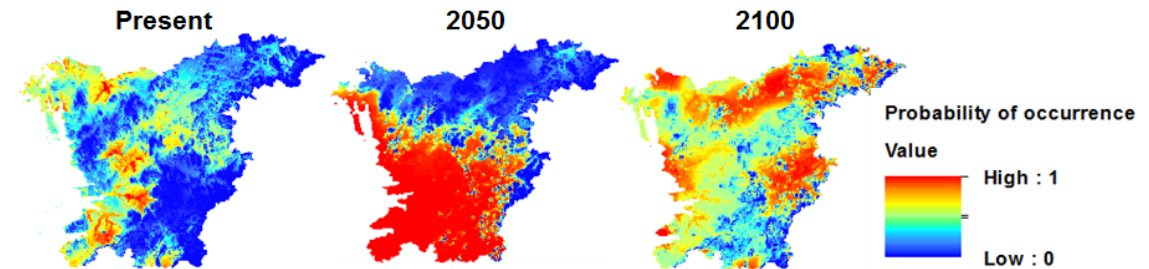
## 4. 결론

본 연구에서는 기후변화에 따른 금강유역의 어류 종분포 변화를 MaxEnt를 이용하여 예측하였다. 어류종 분포에 가장 크게 영향을 미치는 환경인자는 고도였고, 그 다음으로 월별 강수량과 월별 최저수온 순으로 나타났다. 미래 (2050년과 2100년) 기후변화에 따라 고유종인 얼룩동사리와 줄납자루의 출현확률은 현재와 비교하여 감소한 반면, 외래종인 배스와 블루길의 출현확률은 증가하였다. 그리고 미래 기후변화에 따라 높은 종풍부도를 보이는 지역이 북상하며, 2100년에는 총 5종 (줄물개, 미꾸라지, 강준치, 줄납자루, 칼납자루)이 절멸하는 것으로 예측되었다. 따라서 미래 출현 증가가 예상되는 외래종에 대한 관리 강화와 멸종이 예상되는 고유종에 대한 보존 대책이 필요하다고 생각한다. 그리고 현재보다 기온이 증가하는 미래에는 수생태계의 교란이 심화될 것으로 예상되기 때문에, 미래 기온 상승을 방지할 수 있는 온난화가스 배출 저감 노력이 절실하다고 판단된다.

**Table 2.** Overall fitness (AUC: area under the relative operating characteristic curve) of MaxEnt modeling and major environmental factors influencing fish distribution in the Geum river watershed.

Species name	Korean name	AUC	Major Contribution Factor*	
			First factor	Second factor
<i>Abbottina springeri</i>	왜매치	0.729	Aldt	T <sub>min</sub>
<i>Acanthorhodeus gracilis</i>	가시납자리	0.849	Aldt	WT <sub>min</sub>
<i>Acheilognathus koreensis</i>	칼납자루	0.711	Aldt	Prpc
<i>Acheilognathus lanceolatus</i>	납자루	0.823	Aldt	Prpc
<i>Acheilognathus rhombeus</i>	납자리	0.68	Aldt	WT <sub>avg</sub>
<i>Acheilognathus yamatsuatea</i>	줄납자루	0.797	Aldt	SLP
<i>Carassius auratus</i>	붕어	0.837	Aldt	Prpc
<i>Carassius cuvieri</i>	떡붕어	0.885	Aldt	SLP
<i>Cobitis lutheri</i>	점줄종개	0.723	Aldt	WT <sub>min</sub>
<i>Coreoleuciscus splendidus</i>	쉬리	0.773	Aldt	Prpc
<i>Coreoperca herzi</i>	꺼지	0.758	Aldt	Prpc
<i>Cyprinus carpio</i>	잉어	0.844	Aldt	SLP
<i>Erythroculter erythropterus</i>	강준치	0.906	Aldt	WT <sub>min</sub>
<i>Gnathopogon strigatus</i>	줄몰개	0.901	Aldt	WT <sub>avg</sub>
<i>Hamibarbus labeo</i>	누치	0.848	Aldt	Prpc
<i>Hamibarbus longirostris</i>	참마자	0.765	Aldt	Prpc
<i>Hemiculter eigenmanni</i>	치리	0.894	Aldt	SLP
<i>Iksookimia koreensis</i>	참종개	0.690	Aldt	Prpc
<i>Lepomis macrochirus</i>	블루길	0.826	Aldt	SLP
<i>Microphysogobio yaluensis</i>	돌마자	0.777	Aldt	Prpc
<i>Micropterus salmoides</i>	배스	0.830	Aldt	Prpc
<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	미꾸리	0.719	Aldt	Prpc
<i>Misgurnus mizolepis</i>	미꾸라지	0.883	Aldt	Prpc
<i>Odontobutis interrupta</i>	얼룩동사리	0.819	Aldt	Prpc
<i>Odontobutis platycephala</i>	동사리	0.720	Aldt	T <sub>min</sub>
<i>Opsarichthys uncirostris amurensis</i>	고리	0.856	Aldt	WT <sub>min</sub>
<i>Pseudobagrus fulvidraco</i>	동자개	0.751	Aldt	SLP
<i>Pseudobagrus koreanus</i>	눈동자개	0.753	Aldt	Prpc
<i>Pseudogobio esocinus</i>	모래무지	0.803	Aldt	Prpc
<i>Pseudopungtungia nigra</i>	감돌고기	0.811	Aldt	WT <sub>min</sub>
<i>Pseudorasbora parva</i>	참붕어	0.808	Aldt	T <sub>max</sub>
<i>Pungtungia herzi</i>	돌고기	0.737	Aldt	Prpc
<i>Rhinogobius brunneus</i>	밀어	0.709	Aldt	Prpc
<i>Rhodeus notatus</i>	떡납줄갱이	0.858	Aldt	WT <sub>avg</sub>
<i>Rhodeus uyekii</i>	각시붕어	0.742	Aldt	SLP
<i>Rhynchocypris oxycephalus</i>	버들치	0.780	Aldt	Prpc
<i>Sarcocheilichthys nigripinnis morii</i>	중고기	0.740	Aldt	none
<i>Sarcocheilichthys variegatus wakiyae</i>	참중고기	0.733	Aldt	Prpc
<i>Silurus asotus</i>	메기	0.789	Aldt	SLP
<i>Squalidus chankaensis tsuchigae</i>	참몰개	0.852	Aldt	SLP
<i>Squalidus gracilis majimae</i>	긴몰개	0.660	Aldt	Prpc
<i>Squalidus japonicus coreanus</i>	몰개	0.844	SLP	Aldt
<i>Squaliobarbus curriculus</i>	눈불개	0.934	Aldt	T <sub>max</sub>
<i>Tridentiger brevispinis</i>	민물두줄망둑	0.679	Aldt	SLP
<i>Zacco koreanus</i>	참갈겨니	0.727	Aldt	T <sub>max</sub>
<i>Zacco platypus</i>	피라미	0.763	Aldt	Prpc
<i>Zacco temminckii</i>	갈겨니	0.738	Aldt	SLP

\* Abbreviation refers to Table 1

(a) *Odontobutis interrupta*(b) *Acheilognathus yamatsuatea*(c) *Microphysogobio yaluensis*(d) *Lepomis macrochirus*

**Fig. 1.** Predicted probability of occurrence (0–1) for (a) *Odontobutis interrupta*, (b) *Acheilognathus yamatsuatea*, (c) *Microphysogobio yaluensis* and (d) *Lepomis macrochirus* in the Geum river watershed using MaxEnt modeling with RCP 8.5 scenario.



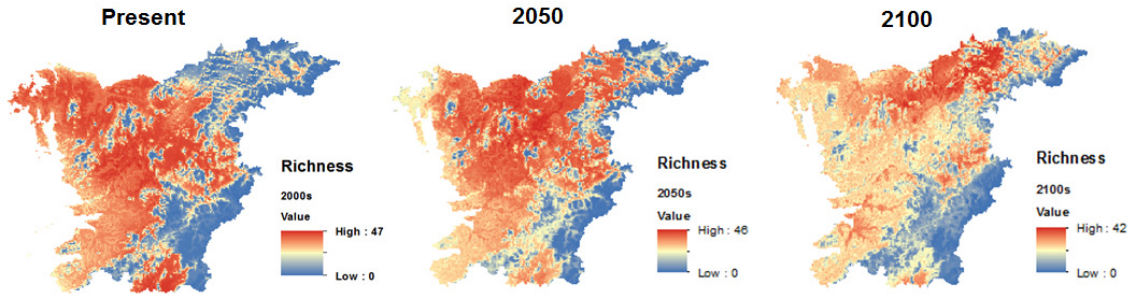


Fig. 2. Predicted fish species richness in the Geum river watershed using MaxEnt modeling with RCP 8.5 scenario.

## 감사의 글

본 연구는 “ARQ201403042 (기후변화 영향 및 취약성 통합평가 모형 요소 기술 개발: 산림, 농업 부문)”의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- An, J.H. and Lee, K.H. 2013. Correlation and hysteresis analysis of air-water temperature in four rivers: preliminary study for water temperature prediction. *Journal of Environmental Policy* 12: 17-32. (in Korean)
- Azuma, M. 1992. Ecological release in feeding behaviour: the case of bluegills in Japan. *Hydrobiologia* 243: 269-276.
- Chu, C., Mandrak, N.E. and Charles, K.M. 2005. Potential impacts of climate change on the distributions of several common and rare freshwater fishes in Canada. *Diversity and Distributions* 11: 299-310.
- Chun, J.H. 2012. Assessing the Effects of Climate Change on the Geographic Distribution of Major Three Species in Korea Using Ecological Niche Model. Ph.D. Dissertation. Kookmin University, Seoul, Korea. (in Korean)
- Chung, N., Park, B. and Kim, K. 2011. Potential effect of increased water temperature on fish habitats in Han river watershed. *Journal of Korean Society on Water Quality* 27: 314-321. (in Korean)
- Comte, L., Buisson, L., Daufresne, M. and Grenouillet, G. 2013. Climate-induced changes in the distribution of freshwater fish: observed and predicted trends. *Freshwater Biology* 58: 625-639.
- Dextrase, A.J. and Mandrak, N.E. 2006. Impacts of alien invasive species on freshwater fauna at risk in Canada. *Biological Invasions* 8: 13-24.
- Elith, J., Phillips, S.J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y.E. and Yates, C.J. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions* 17: 43-57.
- Franklin, J. 2009. *Mapping Species Distributions: Spatial Inference and Prediction*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Guisan, A. and Thuiller, W. 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters* 8: 993-1009.
- Hong, Y.P. and Son, Y.M. 2003. Studies on the interspecific association of community including *Micropterus salmoides* population, introduced fish in Korea. *Korean Journal of Basic Science* 15: 61-86. (in Korean)
- IPCC. 2013. *Climate Change 2013: Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Jeong, D.I., Daigle, A. and St-Hilaire. 2013. Development of a stochastic water temperature model and projection of future water temperature and extreme events in the Ouelle River basin in Québec, Canada. *River research and application* 29: 805-821.
- Joo, G.J., Kim, D.H., Yoon, J.D. and Jeong, K.S. 2008. Climate changes and freshwater ecosystems in South Korea. *Korean Society of Environmental Engineers* 30: 1190-1196. (in Korean)
- Kang, H., Part, M.Y. and Jang, J.H. 2013. Effect of climate change on fish habitat in the Nakdong river watershed. *Journal of Korea Water Resources Association*. 46: 1-12. (in Korean)
- Kim, S.J. 2011. *Impact of Climate Change on Water Resources and Ecological Habitat in a River*

- Basin. Ph.D. Dissertation. Inha University, Incheon, Korea. (in Korean)
- Kim, J., Kwon, H., Park, J., Lee, J., Tho, J.H., Lee, D., Kim, D., Lee, Y., Suh, J., Shin, Y.K., Kim, M. and Seo, C. 2012. A study on the species distribution modeling using national ecosystem survey data. *Journal of Environmental Impact Assessment*. 21: 593-607. (in Korean)
- Kim, H.M., Lee, D.K. and Park, C. 2013a. A study on selection for vulnerable area of urban flooding adaptable capacity using MaxEnt in Seoul. *Journal of Korea Planning Association*. 48: 205-217. (in Korean)
- Kim, S., Noh, H.S., Hong, S.J., Kwak, J.W. and Hung, S. 2013b. Impact of climate change on habitat of the *rhynchocypris Kumgangensis* in Pyungchang river. *Journal of Wetlands Research* 15: 271-280. (in Korean)
- Kwon, H., Ryu, J.E., Seo, C., Kim, J., Lim, D.O. and Suh, M.H. 2012. A study on distribuion characteristics of *Corylopsis coreana* using SDM. *Journal of Environmental Impact Assessment* 21: 735-743. (in Korean)
- MOE. 2014. A Study of Effluent Water Temperature Impacts on Aquatic Ecosystems and Management. Final report. Ministry of Environment, Sejong, Korea. (in Korean)
- NIER. 2012a. Development of an Impact Assessment Model of Water Quality and Ecosystem by Climate Change (II). NIER-SP 2012-274. National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea. (in Korean)
- NIER. 2012b. Species Distribution Modeling Using National Ecosystem Survey (III). NIER-RP 2012-242. National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea. (in Korean)
- NIER. 2013. Development of Integrated Prediction Model in Aquatic Ecosystem (I). NIER-SP 2013-316. National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea. (in Korean)
- Parnesan, C. and Yohe, G. 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 421: 37-42.
- Phillips, S.J., Anderson, R.P. and Schapire, R.E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190: 231-259.
- Rahel, F.J. and Julian, D.O. 2008. Assessing the effects of climate change on aquatic invasive species. *Conservation Biology* 22: 521-533.
- Rose, G.A., Young, B., Kulka, D.W., Goddard, S.V. and Fletcher, G.L. 2000. Distribution shifts and overfishing the northern cod (*Gadus morhua*): a view from the ocean. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* 57: 644-663.
- Walther, G.R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Beebee, T.J.C., Fromentin, J.M., Hoegh-Guldberg, O. and Bairlein, F. 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416: 389-395.
- Wrona, F.J., Prowse, T.D., Reist, J.D., Hobbie, J.E., Levesque, L.M.J. and Vincent, W.F. 2006. Climate change effects on aquatic biota. *Ecosystem Structure and Function* 35: 359-369.