

미국가재(*Procambarus clarkia*)의 국내 출현 및 잠재 분포 지역 평가

이대성¹ · 박영석^{1,2,*}

¹경희대학교 생물학과, ²경희대학교 나노의약생명과학과

Evaluation of Potential Distribution Area of the Red Swamp Crayfish (*Procambarus clarkia*) in South Korea. Dae-Seong Lee¹ (0000-0001-7288-0156) and Young-Seuk Park^{1,2,*} (0000-0001-7025-8945) (¹Department of Biology, Kyung Hee University, Dongdaemun-gu, Seoul 02447, Republic of Korea; ²Department of Life and Nanopharmaceutical Sciences, Kyung Hee University, Dongdaemun-gu, Seoul 02447, Republic of Korea)

Abstract The red swamp crayfish (*Procambarus clarkia*) originated from the North America distribute widely as invasive species throughout the world including Europe, Asia, Africa, North America and South America. The red swamp crayfish is also an invasive species in South Korea. We aimed to characterize the occurrence and distribution pattern of the red swamp crayfish, and evaluate the potential distribution of this species in South Korea. In South Korea, the red swamp crayfish was firstly reported in Seoul in 1996, and recently its occurrence is frequently reported at streams or reservoirs at different regions, showing the expansion of its distribution area. The red swamp crayfish has high potential to occur in the nationwide scale in South Korea because of their biological adaptation, effects of climate change, changes of their habitat condition, and various types of human activities. Finally, our results revealed the necessary to conduct an extensive field survey, to keep up a monitoring program for the occurrence of alien species, and to implement a strategy to prevent the dispersal of alien species in the natural ecosystems.

Key words: invasive species, current distribution, potential distribution area, effects of climate change

서 론

산업과 과학 기술 발전, 인구 증가로 국내뿐만 아니라 국제 간에 인적 및 물적 교류가 활발히 이루어지고 있다. 그 결과 다양한 경로로 한 지역에 서식하는 생물종이 다른 새로운 지역으로 이동하여 정착 및 서식하는 일이 빈번하게 일어나고 있다 (Bang *et al.*, 2004). 이러한 생물종의 이주 및 정착은 생물종의 자연적 확산에 의해서 뿐만 아니라 인간 활동에 의한 확산에 의해 야기될 수 있으며, 많은

경우 자연적 확산보다는 인간 활동에 의한 직간접적 영향으로 일어난다. 인간 활동에 의한 확산은 농업, 관광, 애완용 등 특정 목적을 위해 생물종을 의도적으로 옮기는 경우와 다른 활동 중 부수적으로 비의도적으로 옮기는 경우가 있다 (Hellmann *et al.*, 2008; Kawai *et al.*, 2015; Choi *et al.*, 2017; Lee *et al.*, 2017). 우리나라의 생물다양성 보전 및 이용에 관한 법률에서는 이와 같이 외국으로부터 인위적 또는 자연적으로 유입되어 그 본래의 원산지 또는 서식지를 벗어나 존재하게 된 생물을 외래생물이라 정의하고 있다 (Park and Kim, 2015).

최근 인간 활동에 의해 나타나는 외래생물은 정착한 자연 생태계와 서식지에서 생물다양성을 감소시키는 등 생태계 교란을 일으키고, 농업, 임업, 수산업 등 다양한 분야

Manuscript received 16 December 2019, revised 23 December 2019, revision accepted 23 December 2019

* Corresponding author: Tel: +82-2-961-0946, Fax: +82-2-961-0244, E-mail: parkys@khu.ac.kr

© The Korean Society of Limnology. 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, provide the original work is properly cited.

에서 경제적 손실을 유발하여 우리나라뿐만 아니라 전 세계적으로 그 문제가 심화되고 있다(Auckland, 2000; CBD, 2002; Bang *et al.*, 2004). 현재 많은 국가 및 지역국가 공동체에서 침입 외래종에 의한 피해를 방지 혹은 최소화하기 위해 많은 노력을 기울이고 있다(Henttonen and Huner, 1999; Bang *et al.*, 2004; Pimentel *et al.*, 2005; Xu *et al.*, 2006; Oreska and Aldridge, 2011; Scalera *et al.*, 2012). 우리나라 역시 이러한 외래종으로 인한 피해가 지속적으로 발생하고 있으며, 이를 방지하고자 2013년 ‘생물다양성 보전 및 이용에 관한 법률’을 제정하고 외래생물종, 생태계교란위험종, 위해우려종 등을 지정하여 관리하고 있다. 그러나 이러한 노력에도 불구하고 국내 유입된 외래종은 2009년 894종에서 2013년 2,167종으로 나타나 매년 크게 증가하는 추세이다(Ministry of Environment, 2014). 유입된 외래종 중 동물은 어류가 885종으로 가장 많고 다음으로 파충류 332종, 포유류 202종, 곤충류 145종, 조류 135종, 곤충을 제외한 무척추동물 103종 등으로 보고되었다(국립생태원, <http://kias.nie.re.kr>).

최근 미국가재(십각목, 가재과) *Procambarus clarkia* (Decapoda, Cambaridae) (이명: 붉은가재, 영명: red swamp crayfish)가 국내 공공 수역에서 출현하여 사회적, 학술적으로 많은 관심을 받고 있다. 미국가재는 멕시코 북동부 및 미국 중남부가 원산지로서, 스페인, 프랑스, 이탈리아 등의 유럽 뿐 아니라 중국 장쑤성, 후베이성 및 일본, 필리핀, 대만 등 동아시아로도 확산되어 많은 문제를 야기하고 있다(Xinya, 1988; Huner, 2002; Gherardi, 2006). 미국가재는 낮은 용존 산소에 내성이 있는 것으로 알려져 있으며(Bissattini *et al.*, 2015), 서식지에서 굴을 파는 습성 때문에 서식지 안전성을 감소시켜 자연생태계를 교란시킬 수 있다(Haubrock *et al.*, 2019). 이에 따라 세계자연보전연맹(IUCN; <https://www.iucn.org>)과 DAISIE (Delivering Alien Invasive Species Inventories for Europe)에서는 미국가재를 최악의 외래생물 100종 중 하나로 선정하였다(Vilà *et al.*, 2009).

미국가재는 최근 우리나라에서도 서식하고 있음이 확인되었고(Song *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2019), 그 분포 영역은 지속적으로 확대될 것으로 예상된다. 일반적으로 외래생물의 분포는 물리 화학적인 서식지 및 온도 분포 등에 따른 기후 인자에 의해 크게 영향을 받는다(Hellmann *et al.*, 2008). 따라서 본 연구에서는 우리나라 지역별 온도 분포 특성에 근거하여 미국가재의 잠재적 분포 영역을 평가하고, 기후변화의 영향으로 변할 수 있는 잠재적 분포 영역을 평가하고자 하였다. 이를 통해 미국가재의 분포 확산을 억제하고 관리를 위한 기초적인 생태 자료를 제공하고 자 하였다.

재료 및 방법

문헌 자료와 세계자연보전연맹(IUCN; <https://www.iucn.org>) 및 CAB International (Centre for Agriculture and Bioscience International; CABI; <https://www.cabi.org>)이 제공하는 외래생물종 DB에서 미국가재의 세계적인 분포를 조사하였으며, 문헌 조사 및 온라인 검색을 하여 우리나라에서 미국가재의 출현 및 분포 지역을 조사하였다. 그리고 우리나라에서 미국가재의 도입 또는 유입 기록을 확인하기 위해 네이버(www.naver.com), 구글(www.google.com) 등 국내의 검색엔진을 사용하여 미국가재에 대해 과거 자료를 조사하였다. 확인된 미국가재의 국내의 분포는 지리정보시스템(GIS)을 사용하여 나타내었다(ArcGIS 10.1, ESRI). 추가적으로 ‘구글 트렌드(Google Trend; <https://trends.google.com>)’를 활용하여 국내에서 미국가재와 관련된 핵심어(미국가재 또는 붉은 가재)의 검색률을 연도별로 조사하였다.

다음으로 국내의 문헌을 통해 미국가재 분포에 영향을 미치는 기후적 요인을 확인한 후, 우리나라에서 미국가재의 잠재적 분포 영역을 산출하였다. 우리나라에서 외래생물이 공공 수역에 유입되는 경우 월동 가능성 유무가 자연생태계 서식 분포 가능성에 크게 영향을 미친다(Bae *et al.*, 2012; Kawai *et al.*, 2015). 따라서 본 연구에서는 현재 온도 분포에 따른 잠재적 분포 영역을 평가하고, 미래에 기후변화에 따른 영향을 평가하기 위하여 2050년에 잠재적 분포 영역을 평가하였다. 사용한 온도 자료는 평년 1월 평균 기온과 연평균 기온을 사용하였다. 평년 기후자료는 기상청 기후정보포털(<http://www.climate.go.kr>)에서 제공하는 한반도 지역 기후변화 시나리오(RCP 4.5, 6.0 시나리오, 격자 크기: 12.5 km)와 국가농림기상센터에서 제작한 농업용 미래 상세 전자 기후도(응용 SERS A1B 시나리오, 격자 크기: 30 m)를 종합하여 사용하였고, 미래 기상 정보는 한반도 지역 기후변화 RCP 4.5 시나리오를 사용하였다.

결과 및 고찰

1. 미국가재의 분포와 국내 유입

IUCN과 CABI에 따르면, 미국가재는 중앙 및 라틴아메리카, 아프리카, 유럽 전역, 동아시아 지역 내 33개 국가에 분포하고 있으며(<https://www.cabi.org/isc/datasheet/67878>), 이 중 미국을 제외한 32개 국가에서 외래생물종으로 기록되었다(Fig. 1a). 그러나 우리나라에서 분포는 아직 CABI 등에 등록되어 있지 않으므로 우리나라를 추가하면 세계적

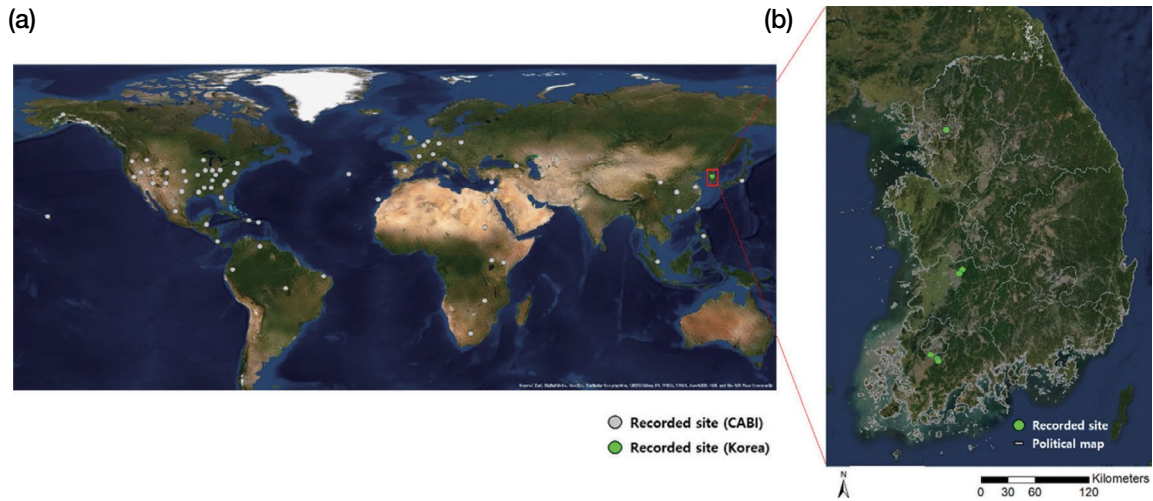


Fig. 1. Distribution of *Procambarus clarkia* recorded until December, 2019. (a) Global distribution map based on CAB International, and (b) location of *P. clarkia* observed in Korea. The number of recorded area ($n=33$) (Background image sources: Esri, DigitalGlobe, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, GeoEye, USDA FSA, USGS, Aerogrid, IGN, IGP, and the GIS User Community).

으로 34개국에 분포하는 것이 기록된다. 미국의 경우, 미국 본토뿐만 아니라 아열대 기후에 속하는 하와이와 툰드라 기후가 지배적인 알래스카 지역까지 분포하고 있다. 이는 미국가재의 분포 지역의 연중 평균기온 $15\sim 30^{\circ}\text{C}$, 가장 추운 달의 평균기온 $2\sim 10^{\circ}\text{C}$ (CABI, <https://www.cabi.org>)라고 하는 범위를 벗어나는 것으로 이러한 기준보다 훨씬 더 낮은 기온 조건에서 서식할 수 있음을 보인다. 이는 일반적으로 생물이 가지는 특성으로 새로운 환경 조건에 적응하는 결과이다.

우리나라에서 미국가재는 서울시 용산가족공원에서 1997년 9월에 처음 발견되었으며, 2006년에도 여러 개체가 발견되어 (Kim *et al.*, 2008) 해당 지역에서 지속적인 서식 가능성을 보였다. 한편, 국립생태원 조사에서 2018년 전남 나주시 지석천에서 미국가재가 서식하고 있는 것이 확인되었고, eDNA를 통해 미국가재 서식 여부를 추정할 결과, 전라남도 나주시 지석천뿐만 아니라 전라북도 익산시 왕궁면과 서울특별시 중랑구 면목동 내 조사지점에서도 PCR 양성반응을 보여, 해당 지역에서 미국가재의 서식 가능성이 있는 것으로 나타났다 (Song *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2019). 2019년에는 만경강의 지류인 백현지와 울소재, 대간선수로 등 3곳에서 보고되었다 (연합뉴스 2019.07.17) (Fig. 1b).

국내에서 미국가재의 출현 및 서식 분포지가 증가하고 있는 것은 자연적 확산보다 인위적 요인에 의한 유입으로 여겨진다 (Kim *et al.*, 2019). 반도에 위치한 우리나라 지리학적 특성상 민물가재인 미국가재는 인위적 요인에 의해

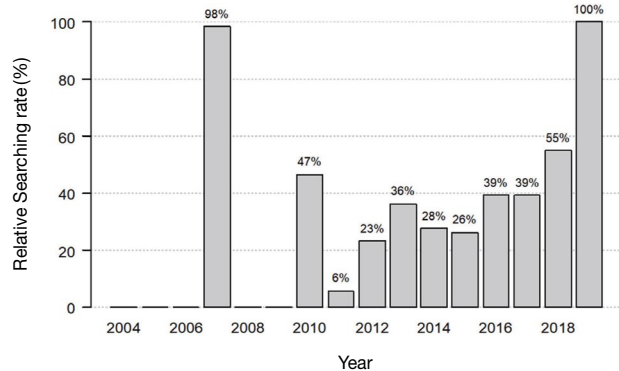


Fig. 2. Changes of searching rate for *Procambarus clarkia* using Google Trend with keywords “미국가재 (American freshwater crayfish)” or “붉은가재 (red swamp crayfish)” in Korea. Relative searching rate was rescaled according to the ratio against the maximum year.

국내 유입된 것으로 추론된다. 미국과 중국에서 미국가재는 대부분 식용을 위해 양식되어, 양식장에서 주변 하천이나 농경지로 유입되나, 우리나라의 경우 관상용으로 미국가재를 들여온 후 가정 등에서 사육 후 자연 방사되는 것이 주 원인으로 여겨진다.

온라인 검색 엔진을 이용하여 국내에서 미국가재를 검색한 기록을 조사한 결과, 2007~2008년도부터 꾸준히 애완용 미국가재에 대한 온라인 기록을 확인할 수 있었다. 또한 ‘구글 트렌드 (Google trend)’를 활용하여 ‘미국가재’, ‘붉은가재’라는 두 핵심어에 대한 검색 기록을 확인한 결과, 2007년에 상대적으로 많은 검색이 된 후 감소하였으

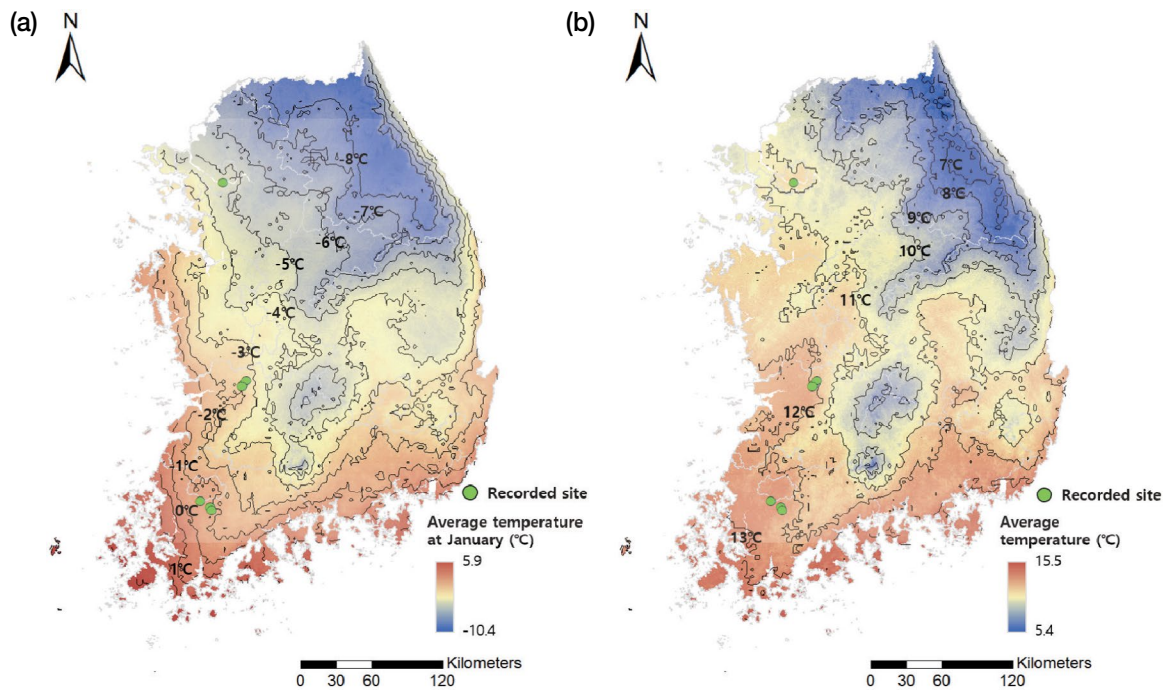


Fig. 3. Distribution of estimated current temperature in South Korea in common years. (a) Average temperature in January, and (b) annual average temperature.

나, 2011년 이후 지속적으로 증가하여 2019년 12월 초 현재 가장 높은 검색 빈도를 보였다(Fig. 2). 이러한 검색 경향은 관상용으로서 미국가재에 대한 관심과 함께 외래생물로서 미국가재 서식이 보고되면서 사회적 관심이 증가하였기 때문으로 여겨진다. 특히, 2019년의 높은 검색율은 2018년 국립생태원 조사 결과가 대중매체를 통해 방송된 이후, 미국가재에 대한 높아진 여론의 관심이 반영된 것으로 생각된다.

2. 미국가재의 잠재적 분포 가능 지역

미국가재가 세계 각국에서 위협적인 생태계 교란종으로 작용함에 따라, 미국가재에 대한 다방면의 연구가 활발히 진행되고 있으며, 미국가재의 생활사 및 서식지 환경, 확산 양산 등에 대한 연구 결과가 많이 보고되었다(Espina and Herrera, 1993; Daniels *et al.*, 1994; Ackefors, 1999; Gherardi *et al.*, 2002; Dong *et al.*, 2015). 다수의 연구에서 기온 및 수온 등의 온도가 미국가재에 있어 가장 중요한 환경 요인으로 작용하였다. 알려진 미국가재의 최적 온도 범위는 21~27°C, 최적 선호 온도는 23.4°C이고, 12°C 이하에서는 성장하지 않는 것으로 알려져 있다(Ackefors, 1999; Espina and Herrera, 1993). 그러나 최근 연구에서 연평균

수온이 13.3°C일 때 최적의 서식지 선호성을 보였다는 연구 결과가 보고된 바 있으며(Peruzza *et al.*, 2015), 앞서 언급했듯이 미국 알래스카 지역에서도 미국가재의 분포가 확인되어 온도가 매우 낮은 조건에서도 적응 서식할 수 있음을 보였다(Fig. 1a).

CABI에서 제시한 가장 추운 달(1월)의 평균 기온과 연평균 기온을 제한 요소로 사용하여 우리나라에서 미국가재의 잠재적 분포 가능 지역을 평가하였다. 우리나라의 1월 평균 기온과 연평균 기온은 Fig. 3과 같다. 우리나라에서 미국가재가 관찰된 지점의 1월 평균기온은 $-1.9 \pm 1.4^\circ\text{C}$ (평균±표준편차), 연평균 기온 $12.3 \pm 0.5^\circ\text{C}$, 연평균 강수량은 1263.7 ± 34.2 mm이었다. 관찰 지점의 1월 평균 기온은 최저 -4.6°C 까지 기록하였다. 이러한 정보를 바탕으로 1월 평균 기온과 연평균 기온을 기준으로 국내에서 미국가재의 잠재적 서식지를 재추정하면, 2018년 국립생태원 조사에서 미국가재가 발견된 나주시를 포함해 전라북도 김제시 및 익산시와 충청남도 논산시 일부가 포함되며, 경상남도 창원군과 밀양시 일부가 포함된다. 1월 평균 기온을 기준으로는 충청남도 태안군 및 서산시를 포함한 서해안 일대까지 미국가재의 잠재적 서식 가능 지역으로 나타났다. RCP 4.5 미래 기후 시나리오 자료를 이용해 예상한 2050년 미래 기후도를 제작한 결과(Fig. 4), 현재(평

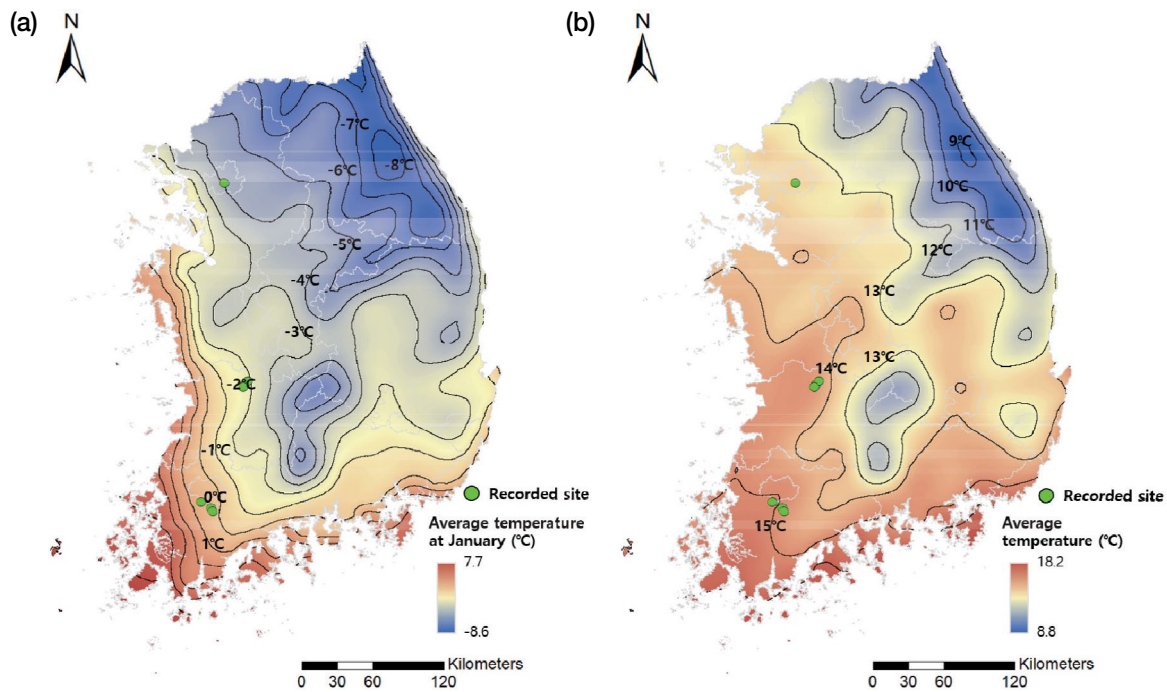


Fig. 4. Distribution of temperature estimated with RCP 4.5 scenario in South Korea in 2050. (a) Average temperature in January, 2050, and (b) annual average temperature in 2050. Future temperature data in 2050 were obtained from Korea Meteorological Administration.

년) 기후에 비해 미래 1월 평균 기온 및 연평균 기온이 상승하며 미국가재의 서식 가능 영역이 매우 광범위하게 넓어졌다. 1월 평균 기온을 기준으로 2050년 미국가재의 잠재적 서식지는 경상북도 포항시와 인천광역시 일부까지 포함하는 것으로 나타났다.

생물의 서식지는 기후 등의 요인에 의해 전반적으로 분포 영역이 결정되지만 실제 지역적인 분포는 물리화학적, 생물학적 환경 요인을 포함하는 다양한 서식지 조건에 의해 영향을 받는다(Li *et al.*, 2014; Lee *et al.*, 2018). 따라서 미국가재의 보다 정확한 지역적인 분포는 서식지 조건, 즉, 수질, 유속, 하상 구성, 먹이 등 다양한 조건이 고려된 평가가 필요하다. 최근 Kim *et al.* (2019)은 영상강 지역에서 미국가재의 국내 발생에 대한 보고와 함께 서식 지역의 다양한 환경 조건을 조사하고 보고하였다. 그러나 국내 분포 조건을 보다 정확하게 파악하기 위해서는 현재까지 미국가재의 서식이 보고된 지역의 다양한 환경 조건의 조사가 필요하다.

3. 미국가재의 생태계 위협성

미국가재는 우리나라 토종 가재와 달리 수질 인자에 대한 넓은 내성 범위를 가지고 있어(Huner and Barr, 1991;

Bissattini *et al.*, 2015) 중하류 하천에서 서식이 가능하다. 그리고 번식기에 접어든 미국가재의 수컷은 4일 동안 17 km를 이동할 수 있을 정도로 높은 이동성을 가지고 있다(Gherardi *et al.*, 2002).

또한 미국가재는 주로 온난한 지역에 서식하지만 동절기에 온도가 2.5°C에서도 생존하여 추위에도 내성이 있는 것으로 보고 되었으며(Vesely *et al.*, 2015), 유럽지역 중 프랑스 및 벨기에, 네덜란드 북부 등에서 관찰되어(Souty-Grosset *et al.*, 2006), 미국가재의 월동에 대한 가능성이 제기되고 있다(Haubrock *et al.*, 2019). 미국가재는 건조하거나 온도가 매우 높아지면 생존을 위해 깊이 40 cm 이상의 굴을 파는 것으로 알려져 있는데(Ingle, 1997), 이러한 생태적 행위가 월동과 연관이 있을 것으로 여겨진다. 미국가재의 월동은 우리나라에서도 일어날 수 있다. 이미 이와 유사하게 국내 담수 외래생물 중 하나인 왕우렁이(*Pomacea canaliculata*)의 분포 및 서식 사례가 있다(Bae *et al.*, 2012). 이는 미국가재가 하천, 호수 등 우리나라 공공 수역의 자연 환경에서 월동을 할 수 있는 가능성을 제시해 준다.

국내에서 미국가재에 대한 연구는 최근 국내 분포 서식지에서 진행되었으나(Song *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2019) 생물학적 및 생태학적 연구는 미미한 실정이다. 현재 국내에서 관찰된 미국가재의 분포는 제한적으로 나타났다

CABI 등에서 제시되는 기온에 따른 분포 가능 범위 또한 국내에서 서해안 및 남해안 지역으로 제한적으로 나타났다. 그러나 이미 2006년부터 서식이 확인된 서울의 경우 1월 평균 최저 기온이 -7°C 로 CABI에서 제시되는 서식 가능 범위를 벗어나고 있다. 또한 연중 및 1월 기온이 낮은 알래스카에서도 분포가 확인되어 미국가재의 실제 분포 영역은 매우 낮은 기온 지역까지 확대될 수 있다. 이러한 특성은 서식지 바닥에 굴을 파고 서식하는 미국가재의 특성과 환경에 대한 적응 능력에 기인하는 것으로 평가된다.

미국가재는 포식자로 먹이 사슬에서 상위에 위치하며, 토착 가재와 서식지 및 먹이 등의 경쟁을 하여 토착 가재의 분포에 영향을 미친다(Hernandez-Suarez and Nejadhas-hemi, 2018). 또한 미국가재가 생태계 내 생물 군집 밀도의 감소와 같은 생물적 교란(Gherardi and Acquistapace, 2007) 뿐 아니라 수질 및 퇴적층의 성질 등과 같은 서식지 환경에도 영향을 준다는 보고가 있다(Angeler *et al.*, 2001). 따라서 미국가재는 우리나라 담수 생태계를 교란시키고 피해를 줄 수 있는 잠재적 위험 요소가 될 것으로 판단된다.

최근 해외 애완 동물 거래는 국내외에서 크게 증가하고 있고, 국내뿐만 아니라 국제 거래도 활발히 이루어지고 있다. 이러한 애완 동물 산업은 담수 가재를 포함한 많은 외래생물 확산의 원천이 되기 쉽다(Chucholl, 2013; Kawai *et al.*, 2015). 우리나라 담수생태계 내 미국가재의 발생은 애완용으로 사육되던 개체들이 자연 생태계로의 유입되면서 나타난 것으로 판단된다. 미국가재와 같은 외래생물은 한번 생태계로 유입되면, 완벽한 박멸은 매우 어려우며, 한번 교란된 생태계 역시 원상태로 회복되기는 쉽지 않다. 외래생물에 의한 생태계 교란과 사회 및 경제적 피해를 막기 위해서는 무엇보다도 외래생물의 국내 유입을 막는 것이 가장 중요하다. 따라서 현재 분포 지역에서 외래생물을 제거하고 이들이 새로운 지역에서 발생 및 확산을 억제 제한하여 생태계 교란을 방지하고 사회적 경제적 손실을 최소화하여야 한다. 또한 현재 외래생물 유입의 원인으로 여겨지는 관상용 및 양식용 외래생물의 자연 생태계 유입을 막기 위해 정책 및 제도 마련, 외래생물의 위해성에 대한 사회적 인식 확대 등을 위한 노력이 필요한 것이다.

결 론

미국가재는 현재 우리나라에서 일부 지역에서 관찰이 되었으나, 미국가재의 환경에 대한 적응성, 기후변화 및 서식지 환경 변화 등으로 이들의 발생 및 자연 서식 가능 지역은 지속적으로 증가된 것으로 판단된다. 따라서 미국가

재에 의한 생태계 교란을 최소화하기 위해서는 공공수역에서 지속적인 모니터링과 함께 관상용 외래생물이 자연 생태계로 유입되는 것을 방지하는 정책적 제도적 노력이 필요하다.

저자정보 이대성(경희대학교 대학원생), 박영석(경희대학교 교수)

저자기여도 이대성: 자료 수집 및 분석, 원고 작성, 박영석: 연구 설계, 자료 분석, 원고 작성

이해관계 이해관계가 없습니다.

연구비 본 연구는 한국연구재단 연구과제(NRF-2016R1A2B4011801 & 2019R1H1A2080107)의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- Ackefors, H. 1999. The positive effects of established crayfish introduction in Europe. p. 31-49. *In: Crayfish in Europe as Alien Species: How to Make the Best of a Bad Situation?* (Gherardi, F. and D.M. Holdich, eds.). Balkema, Brookfield, Rotterdam.
- Angeler, D.G., S. Sánchez-Carrillo, G. García and M. Alvarez-Cobelas. 2001. The influence of *Procambarus clarkii* (Cambaridae, Decapoda) on water quality and sediment characteristics in a Spanish floodplain wetland. *Hydrobiologia* **464**(1-3): 89-98.
- Auckland, N.Z. 2000. Guidelines for the Prevention of Biodiversity Loss Caused by Alien Invasive Species. IUCN, Gland, CH.
- Bae, M.-J., Y.-S. Kwon and Y.-S. Park. 2012. Effects of global warming on the distribution of overwintering *Pomacea canaliculata* (Gastropoda: Ampullariidae) in Korea. *Korean Journal of Limnology* **45**(4): 453-458.
- Bang, S.-W., M.H. Kim and T.H. Ro. 2004. Development of Integrated Management Plan for Abating the Threats from Invasive Alien Species in Korea. Korea Environment Institute, Seoul.
- Bissattini, A.M., L. Traversetti, G. Bellavia and M. Scalici. 2015. Tolerance of increasing water salinity in the red swamp crayfish *Procambarus clarkii* (Girard, 1852). *Journal of Crustacean Biology* **35**(5): 682-685. doi:10.1163/1937240x-00002366.
- CBD. 2002. Decision VI/23* of the Conference of the Parties to the CBD, Annex, Footnote to the Introduction. Convention on Biological Diversity, Montreal, Canada.
- Choi, W.I., H.J. Song, D.S. Kim, D.-S. Lee, C.-Y. Lee, Y. Nam, J.-B. Kim and Y.-S. Park. 2017. Dispersal patterns of pine

- wilt disease in the early stage of its invasion in South Korea. *Forests* **8**(11): 411. doi:10.3390/f8110411.
- Chucholl, C. 2013. Invaders for sale: trade and determinants of introduction of ornamental freshwater crayfish. *Biological Invasions* **15**: 125-141.
- Daniels, W.H., L.R. D'Abramo and K.F. Graves. 1994. Ovarian development of female red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*) as influenced by temperature and photoperiod. *Journal of Crustacean Biology* **14**: 530-537.
- Dong, C., S. Bai and L. Du. 2015. Temperature regulates circadian rhythms of immune responses in red swamp crayfish *Procambarus clarkii*. *Fish & Shellfish Immunology* **45**: 641-647.
- Espina, S. and F.D. Herrera. 1993. Preferred and avoided temperatures in the crawfish *Procambarus clarkii* (Decapoda, Cambaridae). *Journal of Thermal Biology* **18**: 35-39.
- Gherardi, F. 2006. Crayfish invading Europe: the case study of *Procambarus clarkii*. *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology* **39**: 175-191.
- Gherardi, F. and P. Acquistapace. 2007. Invasive crayfish in Europe: the impact of *Procambarus clarkii* on the littoral community of a Mediterranean lake. *Freshwater Biology* **52**: 1249-1259.
- Gherardi, F., E. Tricarico and M. Ilhéu. 2002. Movement patterns of an invasive crayfish, *Procambarus clarkii*, in a temporary stream of southern Portugal. *Ethology Ecology & Evolution* **14**: 183-197.
- Haubrock, P.J., A.F. Inghilesi, G. Mazza, M. Bondoni, L. Solari and E. Tricarico. 2019. Burrowing activity of *Procambarus clarkii* on levees: analysing behaviour and burrow structure. *Wetlands Ecology and Management* **27**: 497-511.
- Hellmann, J.J., J.E. Byers, B.G. Bierwagen and J.S. Dukes. 2008. Five Potential Consequences of Climate Change for Invasive Species. *Conservation Biology* **22**(3): 534-543.
- Henttonen, P. and J.V. Huner. 1999. The introduction of alien species of crayfish in Europe: An introduction. p. 13-22. *In: Crayfish in Europe as Alien Species: How to Make the Best of a Bad Situation?* (Gherardi, F. and D.M. Holdich, eds.). Balkema, Rotterdam.
- Hernandez-Suarez, J.S. and A.P. Nejadhashemi. 2018. A review of macroinvertebrate- and fish-based stream health modeling techniques. *Ecohydrology* **11**(8): e2022. doi:10.1002/eo.2022.
- Huner, J.V. 2002. *Procambarus*. p. 541-584. *In: Biology of Freshwater Crayfish* (Holdich, D. ed.). Blackwell, Oxford.
- Huner, J.V. and J.E. Barr. 1991. *Red Swamp Crayfish: Biology and Exploitation*. Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana, USA.
- Ingle, R.W. 1997. *Crayfishes, Lobsters, and Crabs of Europe: an illustrated guide to common and traded species*. Chapman & Hall, London.
- Kawai, T., Z. Faulkes and G. Scholtz. 2015. *Freshwater Crayfish: A Global Overview*. CRC Press.
- Kim, J.M., J.H. Kil, Y.H. Kim, S.C. Park, D.B. Lee, S.H. Kim, K.S. Koh and S.J. Lee. 2008. *Alien Species in Korea (I)*. National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea.
- Kim, S.H., H.-J. Baek and G.B. Yang. 2019. Report on settlement of alien species red swamp crawfish (*Procambarus clarkii*) in Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **52**: 333-339.
- Lee, D.-S., Y. Nam, W.I. Choi and Y.-S. Park. 2017. Environmental factors influencing on the occurrence of pine wilt disease in Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **50**(4): 374-380. doi:10.11614/KSL.2017.50.4.374.
- Lee, D.-Y., M.-J. Bae, Y.-S. Kwon, C.-W. Park, H.M. Yang, Y. Shin, T.-S. Kwon and Y.-S. Park. 2018. Characteristics of spatiotemporal patterns in benthic macroinvertebrate communities in two adjacent headwater streams. *Korean Journal of Ecology and Environment* **51**(2): 192-203. doi:10.11614/ksl.2018.51.2.192.
- Li, F., Y.S. Kwon, M.J. Bae, N. Chung, T.S. Kwon and Y.S. Park. 2014. Potential impacts of global warming on the diversity and distribution of stream insects in South Korea. *Conservation Biology* **28**(2): 498-508. doi:10.1111/cobi.12219.
- Ministry of Environment. 2014. *Ecosystem Protection Countermeasure Against the Introduction of Alien Species*. Ministry of Environment, Sejong, Korea.
- Oreska, M.P. and D.C. Aldridge. 2011. Estimating the financial costs of freshwater invasive species in Great Britain: a standardized approach to invasive species costing. *Biological Invasions* **13**: 305-319.
- Park, Y.H. and J. Kim. 2015. *Climate Change and Ecosystem-Based Management Strategies of Invasive Alien Species*. Korea Environment Institute, Seoul, Korea.
- Peruzza, L., F. Piazza, C. Manfrin, L.C. Bonzi, S. Battistella and P.G. Giulianini. 2015. Reproductive plasticity of a *Procambarus clarkii* population living 10°C below its thermal optimum. *Aquatic Invasions* **10**: 199-208.
- Pimentel, D., R. Zuniga and D. Morrison. 2005. Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States. *Ecological Economics* **52**: 273-288.
- Scalera, R., P. Genovesi, F. Essl and W. Rabitsch. 2012. *The impacts of invasive alien species in Europe* European Environment Agency Technical Report, 16. European Environment Agency, Luxembourg.
- Song, H.-R., N.Y. Kim, S.H. Kim, D.E. Kim, D.-H. Lee, D.R. Choi, H. Lee, H.-J. Baek, D. Kim, M.J. Kim, T.B. Ryu, Y.-C. Kim and S. Sim. 2018. *Investigating Ecological Risk of Alien Species (V)*. National Institute of Ecology, Seocheon, Korea.
- Souty-Grosset, C., D.M. Holdich, P.Y. Noel, J.D. Reynolds and P. e. Haffner. 2006. *Atlas of Crayfish in Europe*. Muséum

- National d'Histoire Naturelle, Paris.
- Veselý, L., M. Buřič and A. Kouba. 2015. Hardy exotics species in temperate zone: can “warm water” crayfish invaders establish regardless of low temperatures? *Scientific Reports* **5**: 16340.
- Vilà, M., C. Basnou, S. Gollasch, M. Josefsson, J. Pergl and R. Scalera. 2009. One hundred of the most invasive alien species in Europe. p. 265-268. *In*: Handbook of Alien Species in Europe (DAISIE ed.). Springer, Dordrecht.
- Xinya, S. 1988. Crayfish and its cultivation in China. *Freshwater Crayfish* **7**: 391-395.
- Xu, H., H. Ding, M. Li, S. Qiang, J. Guo, Z. Han and F. Wan. 2006. The distribution and economic losses of alien species invasion to China. *Biological Invasions* **8**: 1495-1500.