한국환경생태학회지 36(4): 368−380, 2022
Korean J. Environ. Ecol. 36(4): 368-380, August 2022
ISSN 1229-3857(Print) ISSN 2288-131X(Online)
https://doi.org/10.13047/KJEE.2022.36.4.368

생물모니터링 및 환경유전자(eDNA)를 이용한 침입외래종 미국가재(*Procambarus clarkii*)의 한국분포 현황[1a]

정상우[2] · 이재하[3] · Tadashi Kawai[4] · 김필재[5] · 김수환[6*]

Distribution Status of Invasive Alien Species (*Procambarus clarkii* (Girard, 1852)) Using Biomonitoring with Environmental DNA in South Korea[1a]

Sang Woo Jung[2], Jae-Ha Lee[3], Tadashi Kawai[4], Phil-Jae Kim[5], SuHwan Kim[6*]

요 약

국내 침입외래종 미국가재(*Procambarus clarkii*)의 생물모니터링을 환경유전자 분석과 함께 2021년 2월부터 10월까지 완주군, 함평군, 나주시, 구례군 청주시, 5지점에서 수행하였다. 조사방법은 우산형통발과 둥근뜰채를 이용하였으며, eDNA 분석을 위해 8~10 L의 물을 채수하였다. 조사지 내의 동소종인 저서성 대형무척추동물과 함께 과거 분포기록 및 국내 가재류 유통 현황도 분석하였다. 조사결과 미국가재는 총 122개체가 확인되었으며, 함평군에서 59개체(48.36%)로 가장 많은 개체수와 높은 환경유전자(eDNA)가 검출되었고 계절상 5월달에 출현 빈도가 가장 높았다. 암컷과 수컷의 비율은 21:5로 암컷이 우세하였으며, 크기는 암컷이 72.2±21.1 mm, 수컷이 80.5±15.6 mm, 어린개체가 25.3±9.8 mm이었다. 국내에 유입된 미국가재는 남서쪽 지역을 중심으로 확산되고 있는 것으로 파악되었으며, 과거에 출현 기록이 있는 서울지역에서는 확인되지 않았다. 미국가재에 외부공생하는 끈거머리지렁이류는 확인되지 않았으며, 국내의 출현한 미국가재는 일본에서부터 수입된 개체로 추정되었다. 국내에서 유통되고 있는 외래 가재류는 8종 이상이었으며, 이중 마블가재(*Procambarus virginalis*)는 2021년에 환경부에서 유입주의 생물로 지정된 종으로 파악되었다. 미국가재 조사지역 일대에 서식하는 저서성 대형무척추동물은 총 3문 5강 39과 69종이 출현하였으며, 잠자리목이 24.62%, 딱정벌레목과 노린재목이 각각 16.92%로 우세하게 나타났다. 이 중 한반도고유종 1종, 적색목록 범주의 준위협(NT)으로 구분되는 1종, 갑각류는 총 6종이 출현하였다. 섭식기능군에서는 잡아먹는무리가 서식기능군에서는 기어오르는무리가 전체적으로 우세하여 출현하였다. 조사지역 내의 미국가재는 수초와 수변부 식생이 풍부한 지역을 선호하며, 수질이 탁한 곳에서도 내성이 강한 것으로 분석되었다. 잡식성인 미국가재는 동소종에서 우세하게 출현하는 육식성 저서생물과 상호 경쟁관계를 유지할 것으로 보이며, 먹이사슬에 따른 생태계 교란이 지속적으로 일어날 것으로 판단된다.

주요어: 가재, 외래종, 분포, 환경유전자, 한국

1 접수 2022년 2월 25일, 수정 (1차: 2022년 6월 14일), 게재확정 2022년 6월 23일
Received 25 February 2022; Revised (1st: 14 June 2022); Accepted 23 June 2022
2 다살이생물자원연구소 대표 DASARI Research Institute of BioResources, Daejeon 35203, Korea (elmidae79@gmail.com)
3 다살이생물자원연구소 선임연구원 DASARI Research Institute of BioResources, Daejeon 35203, Korea (ckoom@naver.com)
4 Central Fisheries Research Institute, 238 Hamanaka, Yoichi, Hokkaido 046-8555, Japan (tadashikawai8@gmail.com)
5 국립생태원 연구원 National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Korea (swubio@naver.com)
6 국립생태원 선임연구원 National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Korea (ksh0814@nie.re.kr)
a 이 논문은 환경부의 재원으로 국립생태원의 지원(과제번호 NIE-법정연구-2022-09)을 받아 수행되었음.
* 교신저자 Corresponding author: Tel: +82-41-950-5805, Fax: +82-41-950-6103, E-mail: ksh0814@nie.re.kr

ABSTRACT

Biomonitoring of an invasive alien crayfish species, *Procambarus clarkii* (Girard, 1852), was performed from February to October 2021, along with environmental DNA analysis, at five locations including Wanju-gun, Hampyeong-gun, Naju-si, Gurye-gun, and Cheongju-si. For the investigation, an umbrella-shaped trap for adults and a hand net for young crayfish were used, and 8 to 10L of freshwater was collected for eDNA analysis. The current status and past distributional records of crayfish in Korea were analyzed along with benthic macroinvertebrates at each survey site. As a result of the investigation, a total of 122 individuals were identified, and Hampyeong-gun recorded the largest number of populations with 59 individuals (48.36%) and the highest environmental DNA (eDNA). The frequency of appearance of *P. clarkii* was highest in May. The ratio of females to males was 21:5, and the body size was 72.2±21.1mm for female, 80.5±15.6mm for male, and 25.3±9.8mm for young crayfish. *P. clarkii* introduced into Korea is mainly spreading in the southwest region and it has not been observed in Seoul where there had been a record of appearance in the past. No external symbiosis (Branchiobdellida) of *P. clarkii* has been identified, and *P. clarkii* that has appeared in Korea was presumed to be imported from Japan. There are more than eight kinds of exotic crayfish distributed in Korea, and among them, the marbled crayfish (*P. virginalis*) was identified as a harmful species to the ecosystem of Korea by the Ministry of Environment in 2021. The identified species of benthic macroinvertebrates inhabiting the survey area where *P. clarkii* has appeared were 69 belonging to 39 families, 15 orders, five classes, and three phyla. Among them, Odonata were the most abundant (16 spp.; 24.62%), followed by Coleoptera (11 spp.; 16.92%) and Hemiptera (11 spp.; 16.92%). In the survey area, one Korean endemic species (*Rhoenanthus coreanus*), one species (*Helophorus auriculatus*) classified as Near Threatened (NT) on the Korean Red List, and six species of Crustaceans appeared. In the functional feeding group, the predators appeared predominantly while in habitat oriented group, the climbers appeared to be abundant. It was confirmed that *P. clarkii* in the survey area prefers an area rich in aquatic vegetation with waterside vegetation, and has high resistance to turbid water quality. The omnivore invader *P. clarkii* is expected to maintain a competitive relationship with carnivorous benthic macroinvertebrates that are predominant in the same species, and is expected to continue to generate ecosystem disturbance along the food chains.

KEY WORDS: CRAYFISH, ALIEN SPECIES, DISTRIBUTION, eDNA, SOUTH KOREA

서 론

국내 미국가재(*Procambarus clarkii*)의 첫 보고는 과거 1997년 서울시 용산가족공원의 연못에서 시작되었다. 한반도에는 북한을 포함하여 가재(*Cambaroides similis*)와 만주가재(*Cambaroides dauricus*) 1속 2종이 분포하고 있으며, 깨끗한 계곡의 계류에 분포하는 것으로 알려져 있다. 하지만, 계곡의 인위적 개발과 환경오염으로 인해 분포면적은 축소되고, 적응력이 뛰어난 애완용 외래 가재류들은 국내에 급속도로 도입되고 있어 국내 토종 가재의 피해가 우려되고 있다(Jung *et al*., 2009). 미국가재는 세계자연보전연맹(IUCN)에서 최악의 외래생물 중 하나이며, 현재 우리나라를 포함하여 34개의 국가에 퍼져있는 것으로 보고되고 있다(Lee and Park, 2019). 빠르게 확산되고 유입되는 외래생물은 21세기 가장 심각한 생물다양성 감소의 원인으로 부각되고 있으며(Mathers *et al*., 2020), 특히 심각한 전염성 물곰팡이로 인한 토종 가재류의 지역적 전멸 등 갑갑류 다양성의 감소로 이어지고 있다(Richman *et al*., 2015; Martin-Torrijos *et al*., 2018).

2019년에 환경부는 미국가재의 뛰어난 적응력과 번식력으로 인해 확산이 가속화 되고 있다고 판단하여 생태계교란생물로 지정하였다. 아직까지 국내에 정확한 피해 상황과

생물다양성 감소의 원인은 분석되지 않았지만, 일반적으로 가재 전염병(*Aphanomyces astaci*)이라고 불리우는 질병에 대한 토착종들의 전멸(Rezinciuc *et al*., 2015)과 농경지와 저수지 주변에 굴파는 활동 때문에 일어나는 생태계 교란과 피해사례들(Hobbs *et al*., 1989; Correia and Ferreira, 1995; Delsinne *et al*., 2013; Haubrock *et al*., 2019)은 국내에 일어날 가능성이 잠재되어 있다. 이로 인해 세계 곳곳에서 자국의 생물자원과 환경을 보호하기 위해 침입외래종인 미국가재의 행동학, 분류학, 생태학, 분자생물학 등의 다양한 연구를 수행하며 적용하고 있다(Loureiro *et al*., 2015; Kawai, 2017; Yi *et al*., 2018; Yi *et al*, 2020). 또한, 물속의 침입외래종 유입을 현장 조사로만 확인할 수 없어 환경유전자(environmental DNA, eDNA)를 통해서 초기 탐지하고 검증하는 연구도 수행되고 있다(Mauvisseau *et al*., 2019; King *et al*., 2022). 국내에서도 차세대 첨단기법의 eDNA를 활용하기 위해서 2021년 한국환경유전자학회(Korean Society of Environmental DNA)가 창립되고 수생태계 생물다양성 연구에 적용하기 위한 효율적인 활용방안을 도출하고 있다(Kwak *et al*., 2021).

담수생태계에서 미국가재를 포함하고 있는 저서성 대형무척추동물은 개체수가 풍부하고 다양성이 높은 분류군으로 2차소비자의 먹이사슬 및 하천생태계의 물질순환에 매우 중요한 위치에 있다(Merrit *et al*., 2008; Jung *et al*., 2017). 이중 미국가재와 같은 십각목(Decapoda)은 새뱅이과(Atyidae), 징거미새우과(Palaemonidae), 가재과(Cambaridae), 바위게과(Grapsidae), 달랑게과(Ocypodidae)를 포함하여 국내 총 20종이 담수 및 기수역에 분포하고 있다. 일부 산간계곡에 출현하는 분류군을 제외하고는 모든 저서성 대형무척추동물이 미국가재의 유입으로 교란받을 수 있으며(Correia and Anastácio, 2008), 그 피해와 영향은 앞으로 더 확장되고 심각한 수준에 도달할 거라 판단된다. 특히, 동일한 서식처 내의 갑각류들은 다양한 질병에 노출되어 먹이사슬의 큰 흐름을 변화시킬 수 있다.

국내 외래종으로 지정된 미국가재를 대상으로 실시된 연구로는 Kim *et al*.(2019b)에 의해 국내 첫 자연생태계 정착에 관한 기록이 있으며, Lee and Park(2019)에 의해 미국가재의 국내 잠재 분포지역 평가를 수행하였다. 또한, Park *et al*.(2020)에 의해 미국가재의 국내 서식 분포에 관한 연구와 Choi *et al*.(2021)에 의한 영산강 유역(지석천)의 미국가재의 분산 패턴 연구가 수행되었다. 환경부 국립생태원에서는 매년 생물다양성 보전 및 이용에 관한 법률에 따라 “외래생물 정밀조사”와 “생태계교란 생물 모니터링”을 수행하고 있다. 미국가재에 대한 정밀조사는 2006년, 2018년 2회에 걸쳐 수행되었으며(Kim *et al*., 2006; Song *et al*., 2018), 국내 미국가재가 분포하는 수계 현황 및 모니터링 역시 2019년, 2021년 2차례 진행되었다(Kim *et al*., 2019a; Invasive Alien Species Research Team, 2021).

본 연구는 2019년 생태계교란 생물로 지정된 미국가재(*P. clarkii*)의 현재 분포현황 및 개체수 조사를 통한 국내 분포 서식지의 효과적인 방안을 마련하며, 동소종(sympatric species)인 저서성 대형무척추동물의 현황을 함께 파악하여 생태계교란 생물이 자연생태계에 확산됨에 따라 생물상 변화에 대한 기초자료를 제공하고자 한다.

연구방법

1. 조사지점 및 시기

침입외래종 미국가재에 대한 정밀조사는 전라북도에서 1지점(완주군: WJ), 전라남도에서 3지점(함평군: HP, 나주시: NJ, 구례군: GR)의 총 4지점에서 수행하였으며, 2021년 청주시(CJ) 생태공원에서 미국가재가 관찰되어 출현지점의 동소종인 저서성 대형무척추동물을 추가하여 조사를 수행하였다. 조사시기는 2021년 3월~10월까지 2개월의 기간을 두고 3월, 5월, 7월, 9월에 걸쳐 총 4회 실시하였으며, 조사지점과 서식처는 다음과 같다(Figure 1). 환경유전자(eDNA)를 위한 물 시료의 채수는 2월, 6월, 9월, 10월에 수행하였다.

- WJ(완주군): 전라북도 완주군 고산면 서봉리 백현저수지 (N 35° 59′ 30″, E 127° 12′ 22″)
- HP(함평군): 전라남도 함평군 해보면 해보리 모산저수지 (N 35° 10′ 05″, E 126° 36′ 07″)
- NJ(나주시): 전라남도 나주시 남평읍 오계리 지석천 (N 35° 00′ 32″, E 126° 51′ 56″)
- GR(구례군): 전라남도 구례군 간전면 양천리 섬진강 (N 35° 11′ 23″, E 127° 32′ 41″)
- CJ(청주시): 충청북도 청주시 서원구 산남동 산남천 (N 36° 36′ 46″, E 127° 28′ 07″)

2. 조사방법 및 분석

국내에 미국가재가 서식하고 있는 지점의 현장조사는 트랩조사와 정성조사를 병행하여 수행하였다. 트랩조사는 야간에 먹이활동을 하는 성충을 포획하기 위해 우산통발(umbrella type trap, Ø=90 cm, mesh size=5 mm)을 이용하여 각 지점에 5개씩 설치하여 1일 후 수거하였으며, 정성조사는 어린개체(치가재)를 포획하기 위해 둥근뜰채(hand net, mesh size=1 mm)를 이용하여 미국가재가 서식할 만한

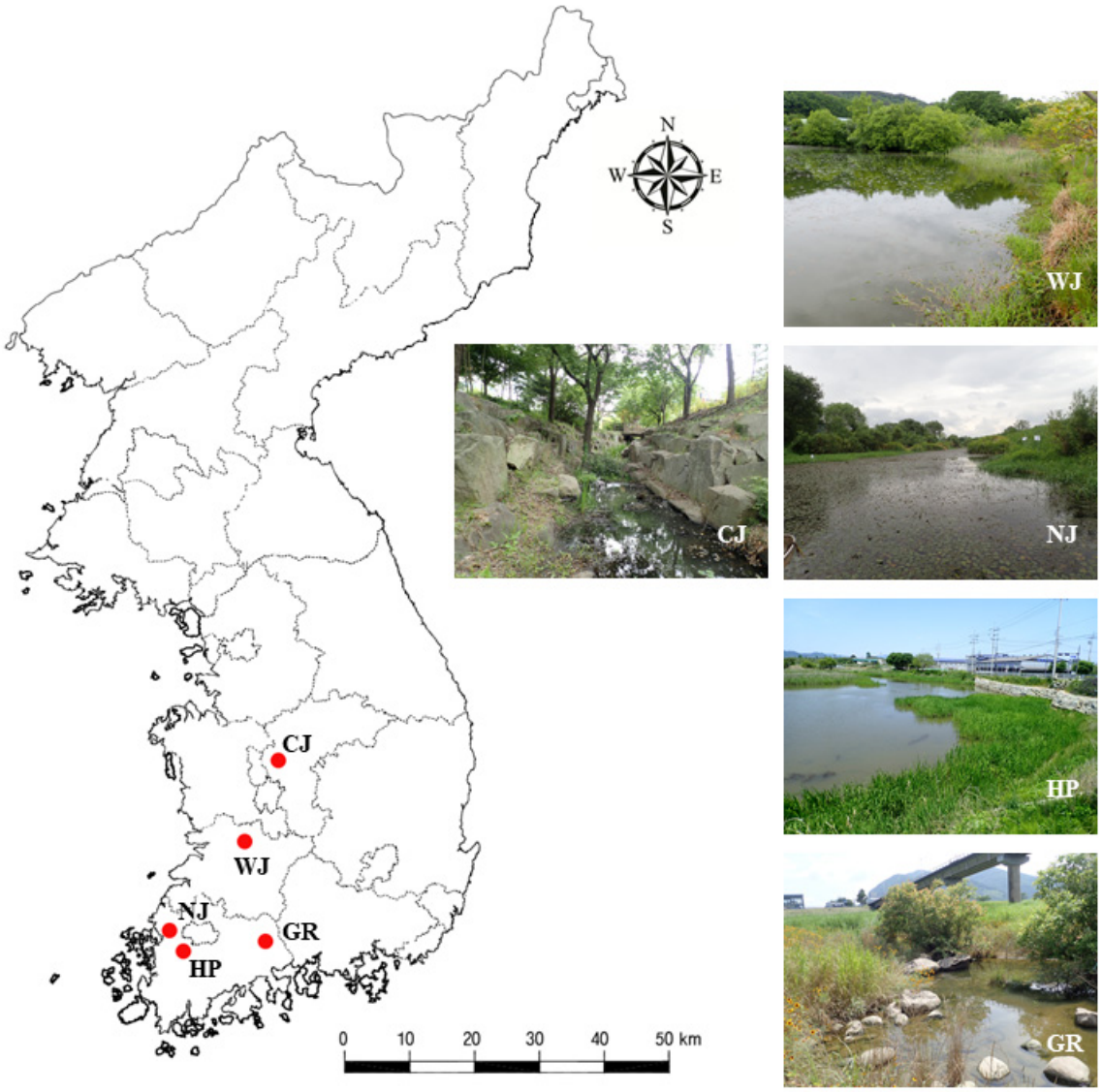

Figure 1. Study area indicating sampling sites with habitats (CJ: Cheongju-si, WJ: Wanju-gun, NJ: Naju-si, HP: Hampyeong-gun, GR: Gurye-gun) in South Korea.

수변부의 수초지역 및 하상이 진흙(silt)으로 구성된 지역(미국가재 굴 포함)을 집중적으로 채집하였다(Figure 2). 채집된 미국가재 샘플은 현장에서 96% Ethanol로 고정하였으며, 실험실로 운반 후 성별을 확인하여 골라내기(sorting) 작업을 수행하였다. 버니어캘리퍼스(Vernier calipers)를 이용하여 암컷(famale), 수컷(male), 치가재(Young Crayfish)의 개체크기(mm)를 측정하였으며(Figure 3), Prism 7(GraphPad Software, San Diego, California USA)을 이용하여 그래프를 분석하였다.

과거부터 현재까지 미국가재 출현 지역과 연도를 분석하여 우리나라 전역 지도에 표기하였으며, 현재 우리나라에서 판매되고 유통될 수 있는 국외 가재류에 대해서 검색엔진(네이버(naver.com), 구글(google.com) 등)을 활용하여 실태를 분석하였다.

동소종인 저서성 대형무척추동물은 미국가재가 출현한 지역을 중심으로 둥근뜰채(hand net, mesh size=1 mm)를 이용하여 정성채집을 수행하였다. 채집된 표본은 Yoon (1995), Kwon(1990), Jung(2011), Kim *et al.*(2013), Kwon *et al.*(2013)을 참고하여 동정하였으며, 일부 유충의 형태적 종 동정이 어려운 분류군은 과(family) 또는 속(genus) 수준에서 동정하여 분석에 활용하였다. 조사지점에 따른 미국가재와의 섭식과 서식처 공존에 따른 경향성 분석을 위해 섭

Figure 2. Habitats of *Procambarus clarkii*. (Left) Umbrella type trap in the silt area, (Right) Freshwater crayfish hole.

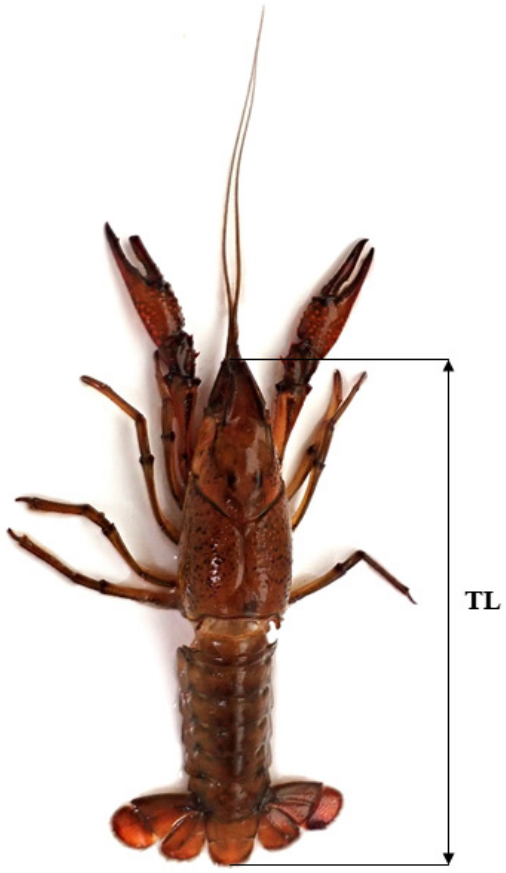

Figure 3. Measurement of total body length (TL) for *Procambarus clarkii*.

식기능군(Functional feeding groups: FFGs)과 서식기능군(Habitat orientation groups: HOGs)을 분석하였다(Ro, 2002; Ro and Chun, 2004; Merrit *et al*., 2008).

3. 환경유전자(Environmental DNA: eDNA) 분석

국내에 분포하고 있는 미국가재에 대한 환경유전자 분석을 위해 5개 지점에서 물 시료를 채수하였다. eDNA 시료

Table 1. Species-specific primers information applied to this study

Target species	Name	Primers and Probe sequences (5'→3')	References
Procambarus clarkii	SPY_ProCla_F	AACTAGGGGTATAGTTGAGAG	Tréguier et al., 2014
	SPY_ProCla_R	CAGAAGCTAAAGGAGGATAA	
	SPY_ProCla_Probe	FAM-AGGAGTTGGAACAGGATGGACT-MBG	

확보를 위해 조사지점에서 10~20 m 당 1 L로 총 8~10 L를 채수하였다. 채수한 물 중 1 L를 0.45 ụm cellulose nitrate membrane으로 여과 후 실리카겔과 함께 실험실로 운반 후 −20℃에 냉동보관 하였다. eDNA 분석에서 종 특이마커(Table 1)의 검증을 위해 양성대조군으로 미국가재의 Genomic DNA(gDNA)를 사용하였으며, 검출된 eDNA의 정량을 계산하기 위해 qPCR분석을 수행하였다.

DNA의 추출은 DNeasy Blood and Tissue Kit(Qiagen, USA)를 이용하였으며, 각 시료에 대한 Cycle threshold value(Ct)를 확보하였다. qPCR 분석을 통해 정량곡선을 제작하였으며, 종 특이마커에 대한 PCR 효율성 및 검출한계값(Limit of detection, LOD)과 정량한계값(Limit of quantitative, LOQ)을 추정하였다(Bustin *et al*., 2009; Yusop *et al*., 2012). eDNA 시료에 대한 qPCR 분석은 3반복으로 진행되었으며, 정량곡선에서 확보한 수식으로부터 LOD값과 LOQ값을 참고하여 모니터링 지점 및 분포확산 조사지점에서 검출된 미국가재 DNA 양을 계산하고 미국가재의 서식 여부를 추정하였다.

qPCR 반응조건은 5 ㎕ DNA, 10 ㎕의 TaqMan probe buffer, 2 ㎕의 DEPC water, primer(Forward, Reverse) 와 probe에 대하여 각각 1 ㎕를 사용하여 총 20 ㎕였으며, PCR 증폭은 Applied Biosystems quantitative PCR을 이용하여 최초 95℃에서 3분간 사전 변성(pre-denaturation)시킨 후 95℃에서 10초, 60℃에서 30초를 45회 실시하였다. 모든 조사지점의 eDNA 시료 농도는 qPCR 분석에 적합한 농도임을 확인 후 수행하였다.

수온에 따른 미국가재 eDNA 방출량을 비교하기 위해 항온항습기를 10℃, 20℃, 30℃로 설정하여 각각의 온도 조건에서 염소를 제거한 수돗물에 미국가재 1개체를 24시간 두었을 때의 샘플과 미국가재를 제거 후 24시간이 지난 샘플을 확보하여 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 국내 미국가재 지역별 분포 현황

2021년 현재 미국가재의 국내 분포는 “전라북도 완주군, 전라남도 함평군, 나주시, 구례군, 충청북도 청주시” 5군데에서 확인되었다. 이중 청주시는 최근(2021년 3월)에 확인된 지역으로 18개체가 확인되었으며(Invasive Alien Species Research Team, 2021), 완주군에서는 4개체(88.5±29.3 mm), 함평군에서 59개체(46.2±27.7 mm), 나주시에서 54개체(42.3±27.5 mm), 구례군에서 5개체(42.1±26.9 mm)가 확인되었다(Figure 4). 전체 122개체의 암컷과 수컷의 비율은 21:5로 암컷이 우세하게 출현하였으며, 어린개체들은 함평군과 나주시에서 각각 33개체(46.5%), 35개체(49.3%)로 높게 나타났다. 시기적으로는 5월에 가장 많은 개체수가 확인되었고 장마의 영향으로 7월은 상대적으로 3월보다 적은 개체수가 확인되었다(Figure 5). 어린개체들은 확인되지 않고 성체만 출현한 완주군 지점은 지점 내에서 번식하는 개체라고 판단하기보다는 주변에 안정된 서식처에서 아래쪽으로 유입되어 나타난 결과로 추정된다. 따라서, 조사지점을 확대하여 조사할 필요성이 있다고 제안한다. 구례군 지점에서는 어린개체가 섬진강어류생태관에서 섬진강으로 유입되는 실개천에서 확인되어 섬진강으로 유입되고 있는 것으로 판단된다. 완주군과 구례군의 개체수가 상대적으로 적은 것은 주변 생태계의 천적으로 자연 조절되고 있는 것으로 추정되며, 피해 규모는 다른 지점에 비해 다소 적을 거라 판단된다. 하지만, 함평군과 나주시에는 어린개체 뿐만 아니라 성체들의 개체수도 매우 높게 나타나 현재 온전히 정착하여 번식하고 있는 것으로 판단된다. 함평군의 저수지는 주변의 농경지와 흐르는 하천과 연결되어 있어 주변으로 확산 속도가 점차 증가할 것으로 보이며, 농경지의 피해도 점차 확대될 것으로 판단된다. 나주시 역시 매년 장마 이후 미국가재의 확산이 인근 하천과 영산강까지 퍼질 거라 판단되어 장마시기의 대책 마련이 필요하다. 미국가재와 같은 외래생물이 정착할 수 있었던 원인 중의 하나로 국내 기후변화로 인한 아열대화 및 하천정비사업으로 인한 오염 및 수생태계의 정수화도 하나의 원인으로 판단되며(Lee and Park, 2019; Choi *et al*., 2021), 그에 따른 생물다양성 감소는 외래종이 유입되어 번식할 수 있는 긍정적인 영향을 준 것으로 판단된다.

처음으로 미국가재가 확인되었던 서울시 용산구(1997년, 2006년) 지역은 현재(2021년) 서식 개체들은 확인되지 않고 있으며, 전라남도 나주시에서 2018년 출현을 기점으로 전라남도 화순군, 광주시, 장성군(2019년), 전라북도 완주

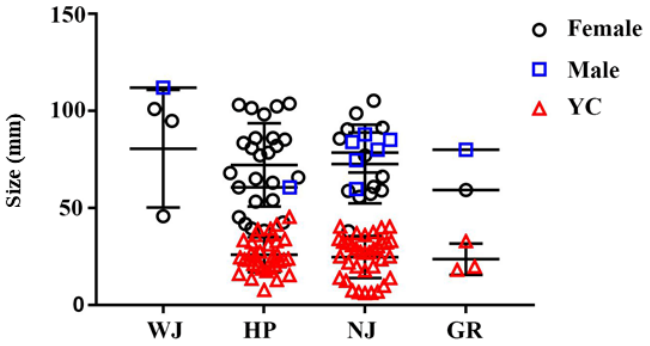

Figure 4. Scatter plots and mean±sd of *Procambarus clarkii* size measured in the four sampling sites (WJ: Wanju-gun, HP: Hampyeong-gun, NJ: Naju-si, GR: Gurye-gun, YC: Young Crayfish).

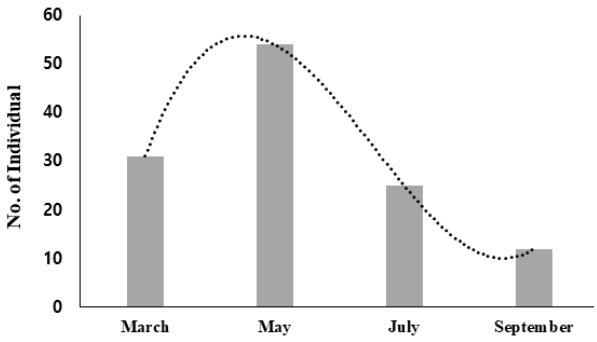

Figure 5. Change in number of individuals of *Procambarus clarkii* from March to September in 2021.

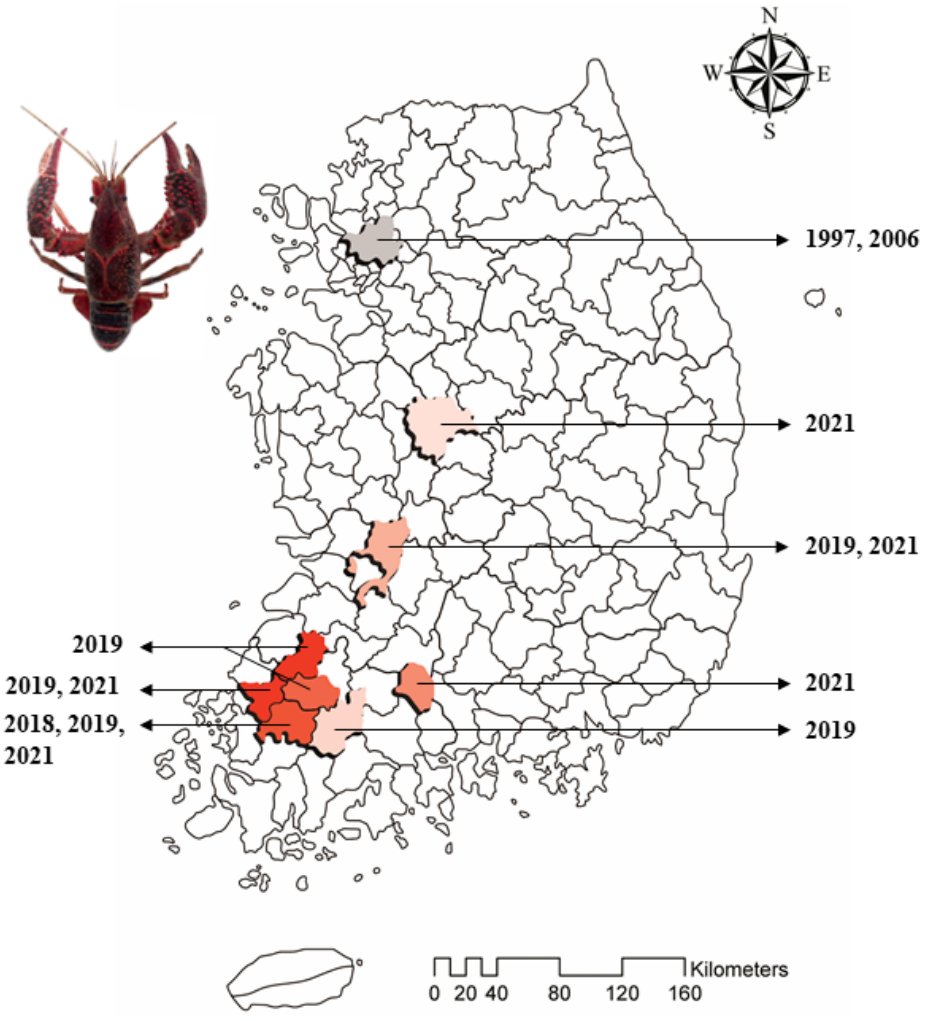

Figure 6. Map showing regional occurrence of *Procambarus clarkii* from 1997 to 2021 years in South Korea.

군과 전라남도 함평군(2019년, 2021년), 전라남도 구례군과 충청북도 청주시(2021년)에서 확인되었다(Figure 6). 대체로 기온과 수온이 높은 남쪽 지역을 중심으로 산발적으로 확산하여 북쪽으로 올라올 가능성이 클 것으로 예상한다.

2. 미국가재의 생태학적 위치

세계적으로 악성 외래생물로 지정되어 있는 미국가재(*Procambarus clarkii*)는 십각목(Decapoda) 가재과(Cambaridae)로 국내에서는 학명에 기초하여 “클라키(Clarkii)” 또는 “미국가재”, “붉은가재”로 알려져 있다. 전체적으로 채색은 붉은색이지만 사육 개체 내에서는 파란색, 흰색, 오렌지 등의 다양한 채색을 띠어 관상용으로도 인기가 높은 가재류이다. 생태학적으로는 내성이 넓고, 성장 속도가 빠르며, 높은 번식력과 질병에 대한 저항력이 강해 자연생태계 내에 제거가 어렵고 확산 속도가 빠르다(Gherardi and Barbaresi, 2000). 또한, 저서성 대형무척추동물, 수생식물, 어류, 양서파충류까지 다양하게 섭식하는 잡식성으로 생태계 먹이사슬의 교란과 서식지 구조의 물리적 변화를 일으켜 주변 생태계의 구조와 기능에 큰 영향을 미치고 있다(Correia, 2002; Geiger *et al*., 2005; Alcorlo and Baltanás, 2013). 생태계 먹이사슬에 있어서는 1차소비자와 2차소비자의 중간에 위치하고 있는 것으로 판단되며, 상위 포식자로 먹이 경쟁에 따른 생물 군집의 밀도 감소 등 동일한 서식처 내에서도 다양한 영향을 미칠 거라 판단된다.

주변 타 국가인 일본(1927년 도입)과 중국(1920년 도입)에서도 현재 미국가재는 담수생태계에 이주를 완전히 성공한 것으로 보고되고 있으며(Kawai *et al*., 2003; Kawai and Kobayashi, 2006; Li *et al*., 2015), 자생종들의 피해와 이주, 가재 전염병 및 서식처 파괴로 인한 경제적 손실에 대해서 심각성을 인지하고 있다. 국내 외래종의 유입은 애완동물산업이 큰 역할을 한 것으로 판단되며, 유입에 따른 확산은 국내 수생태계의 정체성, 장마로 인한 범람, 인위적인 방생 및 동물 매개 분산과 같은 생태학적 요인에 의해 촉진될 거라 판단된다(Yue *et al*., 2010).

국내에서 현재까지 채집된 미국가재는 외부공생하는 끈거머리지렁이목(Branchiobdellida)의 관찰이 확인되지 않았다. 외부공생하는 이 거머리는 대부분 높은 고유종을 나타내 숙주 가재류의 기원에 대한 중요한 정보를 제공하고 있어(Gelder and Ohtaka, 2000) 지속적으로 국내 출현 개체에 면밀한 관찰이 필요할 것으로 판단된다. 국내 서식 개체에서 현재 끈거머리지렁이류가 발견되지 않은 것은 일본에서 채집되고 확산된 미국가재와 동일한 패턴으로(Kawai and Kobayasi, 2006) 아마도 국내에 확산된 개체들은 일본에서부터 수입되어 온 개체일 것으로 추정된다. 앞으로 미국가재에 대한 국내 생태적 지위는 점차 확고해지고 다양한 분야에 영향을 미칠 수 있다고 판단된다. 다양한 측면의 활용을 고려하여 국한적인 지위를 부여받을 수 있도록 지속적인 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

3. eDNA을 활용한 미국가재 검출

1) 수온에 따른 미국가재 eDNA 방류량 비교

미국가재 조사지점에서의 연중 최저 및 최고 수온 범위를 벗어나지 않는 10℃, 20℃, 30℃로 설정한 온도 조건에서 미국가재 개체를 24시간 두었을 때와 제거 후 24시간 후 확보한 시료로부터 분석된 Ct값은 10℃에서보다 20℃, 30℃에서 차이가 더 크게 나타났다. 분석 시료로부터 측정된 각각의 Ct값은 개체가 있을 때보다 제거 후 시료에서 증가하였으며, 각각에 대한 평균치는 10℃에서 0.55, 20℃는 2.2, 30℃는 2.53의 차이가 발생하였다. 실온에서 24시간 처리한 시료에서는 27.79의 Ct값이 측정되었다. 해당 결과를 통해서 10℃에서는 24시간 동안 미국가재 DNA 분해율이 높지 않은 것으로 나타났으며, 낮은 온도에서의 미국가재 DNA 검출량 영향이 적음은 수중에서의 먹이활동 및 번식을 위한 생식 활동 등의 원인으로 판단된다. 낮은 수온에서 DNA 보존력이 더 뛰어나기 때문에 활성 저하로 인해 방출률이 떨어진다 하더라도 검출확률은 더 높을 것으로 판단된다. eDNA 분석법에 의한 미국가재 DNA 검출률 여부는 종의 분산과 조사지점 내의 수환경요인, 동소 서식종 다양성 등의 요인에 의한 영향이 더 높을 것으로 추정된다.

2) eDNA 분석결과

미국가재 gDNA와 종 특이마커에 대한 정량곡선 분석 결과 $y = -3.1003x + 46.4136$ (r^2=0.9951)로 검출된 DNA copy 수 계산에 활용할 수식을 확보하였으며, PCR 효율 계산 결과는 110%로 확인되었다. 따라서 LOD 추정에 의한 qPCR 분석에 따른 Ct값 43.6 이상은 검출할 수 없는 값으로 나타났고, LOQ 추정 결과 1 L 당 미국가재 DNA 549,211 copies 이하는 계량 불가로 확인되었다.

조사지점에서의 eDNA 시료의 qPCR 분석 결과, 함평군(HP)에서는 3반복 모두 양성반응이 나타났으며, Ct값은 2월(28.6), 6월(24.3), 9월(11.6)에 나타났으며(Table 2), 10월은 검출되지 않았다. 다른 조사지점과 비교하여 미국가재 DNA 검출률은 함평군 조사지점에서 가장 높게 검출되었다. 하지만 10월 미국가재 DNA의 미검출의 결과로 이동성 있는 개체의 eDNA 추적효율은 항상 일정하지 않은 불안정한 요인도 함께 나타났다. 나주시(NJ) 지점에서의 eDNA결과 미국가재 DNA는 검출되지 않았으며, 이는 미국가재의 종 특이마커와 확보된 eDNA 시료로 검출 가능한 역치값보다 낮아 검출반응이 일어나지 않은 것으로 판단된다. 따라서 eDNA 분석과 함께 현장 조사의 모니터링을 병행하여 다방면의 가능성을 열어두고 미국가재의 서식 결과를 판단해야 할 것으로 사료된다. 구례군(GR) 지점에서는 2월

Table 2. The result of the Cycle threshold(Ct) value and eDNA concentration(copies/L) in the sampling sites. HP, Hampyeng-gun; NJ, Naju-si; GR, Gurye-gun; WJ, Wanju-gun; CJ, Cheongju-si

Analysis Value	Date	Sampling Site				
		HP	NJ	GR	WJ	CJ
Repetition(n/3) Ct value DNA copies	Feb.	3/3	0/3	1/3	0/3	3/3
		28.6	-	44.1	-	28.2
		1,149,153	-	-	-	1,174,957
	Jun.	3/3	0/3	0/3	0/3	-
		24.3	-	-	-	-
		1,426,545	-	-	-	-
	Sep.	3/3	0/3	3/3	3/3	0/3
		11.6	-	11.24	16.7	-
		2,245,821	-	2,269,045	1,916,821	-
	Oct.	0/3	0/3	0/3	3/3	-
		-	-	-	27.79	-
		-	-	-	1,201,406	-

eDNA 시료에 대하여 Ct값이 한번 검출된 것으로 확인되었으며, 미국가재 gDNA를 활용하여 제작한 정량곡선에서 확보한 LOD, LOQ에 따른 결과검증 단계를 통해 양성 반응이 나타난 것으로 판단된다. 장마 직후 9월 조사에서만 Ct값이 11.24로 분석되어 미국가재는 국내에서 9월에 가장 높은 DNA 방출량을 보이는 생활사 또는 가장 많은 생물량을 보이는 시기인 것으로 판단하였다. 완주군(WJ) 지점에서는 하반기에 이루어진 조사에서 Ct값이 9월(16.7)과 10월(27.79)에 확인되었다. 9월 조사에서 양성반응은 다른 조사지점과 같은 원인으로 판단되며, 가장 높은 DNA 수치를 기록하였다. 청주시(CJ) 조사지점에서는 산남천 유출부 에서만 미국가재 DNA가 검출되어 28.2의 Ct값이 확보되었으며, 이후에는 검출되지 않았다. 이는 올해(2021년) 처음으로 유입된 시점에 아직 주변 다른 곳에 미국가재가 정착하지 못한 것으로 추정되며, 추후 현장조사와 함께 지속적인 검출여부를 판단할 필요가 있다고 판단된다. 실제로 해외에서 미국가재 서식처를 대상으로 수행한 연구 결과에서 약 59%(Tréguier *et al*., 2014)와 70%(Mauvisseau *et al*., 2017)의 미국가재의 검출률이 보고되었다. 다양한 서식처 내의 조건과 미국가재의 밀도 및 서식반경에 따라 검출률이 낮아질 수는 있지만, 국내에서도 eDNA의 다양한 활용방안이 도입되어야 할 것으로 판단된다.

4. 동소종(저서성 대형무척추동물) 현황 및 특성

미국가재 조사지역 일대에서 관찰된 저서성 대형무척추동물은 총 3문 5강 15목 39과 65종이 조사되었다(Figure 7). 동소종인 저서성 대형무척추동물의 현황을 파악하는 것은 미국가재와 같은 외래종 유입시 같은 군집에 영향을 받는 생물군의 변화를 파악하기 위함이며, 현재 많은 연구결과에서 미국가재가 수생태계에 유입되어 정착했을 때 갑각류 및 담수생태계 교란과 군집변화에 미치는 영향 등을 심각하게 받아들이고 있는 것으로 파악되었다(Usio and Townsend, 2004; McCarthy *et al*., 2006; Souty-Grosset *et al*., 2016). 전체 조사지점 중 완주군(WJ) 지점에서는 총 3문 4강 19과 22종이 서식하는 것으로 나타났으며, 함평군(HP)과 나주시(NJ) 지점에서는 종 구성은 다르지만, 각각 3문 4강 18과 23종, 구례군(GR) 지점에서는 3문 4강 35과 47종, 청주시(CJ) 지점에서는 3문 5강 20과 26종의 저서성 대형무척추동물이 서식하는 것으로 분석되었다. 이중 갑각류는 미국가재를 포함하여 총 6종(물벌레(*Asellus hilgendorfii*), 옆새우류(*Gammarus* sp.), 줄새우(*Palaemon paucidens*), 새뱅이(*Cardina denticulata*), 징거미새우(*Macrobrachium nipponense*), 미국가재)이 출현하였으며, 환형동물문 3종, 연체동물문 9종, 수서곤충류 47종으로 총 65종이 출현하였다. 한반도 고유종으로는 강하루살이(*Rhoenanthus coreanus*) 1종이 출현하였으며, 환경부 적색목록 범주의 준위협(Near Threatened, NT)에 해당되는 투구물땡땡이(*Helophorus auriculatus*) 1종이 확인되었다. 국내 생물 주권 확립의 핵심 자원인 고유종 및 전멸위기 상태의 위치에 있는 종들이 외래종 유입에 위협받을 수 있으며, 앞으로 다양한 군집변화를 초래할 수 있음을 시사하였다.

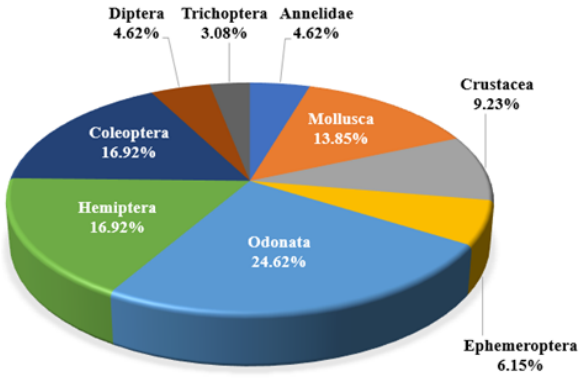

Figure 7. The relative abundance of benthic macroinvertebrates species in the sampling sites.

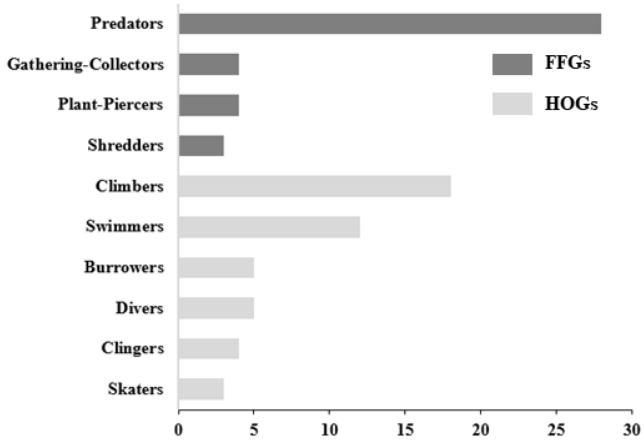

Figure 8. Composition of functional feeding groups (FFGs) and habitat orientation groups (HOGs) of benthic macroinvertebrates in the sampling sites.

섭식기능군(FFgs)과 서식기능군(HOGs)을 분석한 결과(Figure 8), 잠자리목, 딱정벌레목, 노린재목의 Predators(28종, 71.79%)가 매우 높게 나타났으며, Climbers(18종, 38.30%)와 Swimmers(12종, 25.53%) 같은 수중에서 호흡하는 종들보다 직장호흡과 대기호흡을 하는 분류군들이 우점하고 있었다. 따라서 미국가재는 수초와 수변부 식생이 풍부한 서식처를 선호하는 것으로 판단되며, 용존산소가 적고 수질이 탁한 곳에서도 내성이 강한 것으로 판단된다. 담수생태계의 저서성 대형무척추동물의 교란은 외래종(미국가재)의 유입지역 및 외래생물의 정착에 따른 군집의 특성에 따라 다르지만(Nyström *et al.* 1999), 미국가재와 같은 잡식성의 가재류는 서로 다른 기능군의 분류군들을 교란함으로써 먹이사슬의 영양단계 수준에 심각한 영향을 미치고 있는 것으로 확인되었다(Correia, 2002; Usio and Townsend, 2002, 2004; Zhang *et al.*, 2004). 앞으로 국내 발생지역에서 미국가재는 공동서식처 내의 육식성 저서생물과 상호 경쟁관계를 유지할 것으로 나타나며, 먹이사슬과 천적 관계 등 지속적인 모니터링을 통해 다양한 접근 방법으로 군집변동 추세를 분석해야 할 것으로 판단된다.

5. 국내 애완가재 유통 현황 및 문제점

2019년 미국가재가 외래생물로 지정된 이후로 국내 애완가재의 현 상황을 분석하기 위해 다양한 방법으로 유통되고 있는 가재류에 관한 이동 경로를 조사한 결과 다양한 종류의 가재류들이 유통하고 있는 것으로 나타났다. 조사된 가재류는 원산지가 호주인 *Cherax destructor*(불루크로우), *Cherax tenuimanus*(블로마론) 2종, 원산지가 미국인 *Procambrus alleni*(알레니), *Procambarus enoplosternum*(블랙머틸드), *Cambarellus texanus*(텍사누스), *Cambarellus puer*(미니블루) 4종, 원산지가 독일인 *Procambarus virginalis* (마블가재) 1종, 그리고 genus *Cherax* spp. 로 다양하게 불리고 있는 가재류(보에세마니, 레드브릭, 블루문, 파푸아 등) 들이 유통되고 있는 것으로 확인되었다. 이중 마블가재(*P. virginalis*)는 최근 유입주의 생물로 선정된 종으로 국내에 유입될 경우 우리나라 고유 생태계 안정성에 영향을 미칠 수 있는 종이다. 하지만, 이미 국내에 들어와 유통되고 있는 것으로 파악되었다. 마블가재뿐만 아니라 해외에서 들여온 다양한 가재류에 대한 전반적인 전수조사가 필요할 것으로 판단되며, 유통시 주의사항 및 관련기관의 신고 절차를 지키는 제도가 필요할 것으로 파악된다. 또한, 국내 미성숙한 아이들이 집 근처의 하천과 연못에 집에서 키우고 있는 가재들을 가져와 놀이를 하는 것으로 탐문 조사에서 확인되었으며, 해외 유입종들이 국내 자연생태계에 유입 시 어떤 영향을 미치는지 교육기관이나 가정에서도 철저한 교육이 이루어져야 할 것으로 판단된다. 현재 인근 일본에서는 2020년 11월부터 자생종을 제외한 가재과(family Cambaridae)에 속하는 모든 종을 특정 외래생물로 지정하였으며(https://www.env.go.jp/nature/intro/), 십각목(Decapoda) 중의 Astacidae, Cambaridae, Cambaroididae, Parastacidae, Varunidae 과(family) 대부분의 종을 지정하여 신고하는 절차를 마련하였다. 국내에서도 유통 현황을 신속히 파악하여 다양한 방법으로 외래종 유입을 줄이는 방안을 마련해야 할 필요가 있다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립생태원의 지원을 받아

수행하였습니다(과제번호 NIE-법정연구-2022-09)

REFERENCES

Alcorlo, P. and A. Baltanás(2013) The trophic ecology of the red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*) in Mediterranean aquatic ecosystems: A stable isotope study. Limnetica 32(1): 121-138.

Bustin, S.A., V. Benes, J.A. Garson, J. Hellemans, J. Huggett, M. Kubista, R. Mueller, T. Nolan, M.W. Pfaffl, G.L. Shipley and J. Vandesompele(2009) The MIQE guidelines: Minimum information for publication of quantitative real-time PCR experiments. Clinical Chemistry 55(4): 611-622.

Choi, J.Y., S.K. Kim, J.C. Kim and J.H. Yun(2021) Invasion and Dispersion of the Exotic Species *Procambarus clarkii* (Decapoda Cambaridae) in Yeongsan River Basin, South Korea. Animals 11: 3489.

Correia, A.M. and O. Ferreira(1995) Burrowing behavior of the introduced red swamp crayfish *Procambarus clarkii* (Decapoda: Cambaridae) in Portufal. Journal of Crustacean Biology 15(2): 248-257.

Correia, A.M. and P.M. Anastacio(2008) Shifts in aquatic macroinvertebrate biodiversity associated with the presence and size of an alien crayfish. Ecological Research 23: 729-734.

Correia, A.M.(2002) Niche breadth and trophic diversity: Feeding behaviour of the red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*) towards environmental availability of aquatic macroinvertebrates in a rice field (Portugal). Acta Oecologia 23: 421-429.

Delsinne, T., R.M. Lafontaine, R.C. Beudels and H. Robert(2013) Risk analysis of the Louisiana Crayfish *Procambarus clarkii* (Girard, 1852).-Risk analysis report of non-native organisms in Belgium from the Royal Belgian Institute of Natural Sciences for the Federal Public Service Health, Food Chain Safety and Environment, 63pp.

Geiger, W., P. Alcorlo, A. Baltanás and C. Montes(2005) Impact of an introduced Crustacean on the trophic webs of Mediterranean wetlands. Biological Invasions 7: 49-73.

Gelder, S.R. and A. Ohtaka(2000) Description of a new species and a redescription of *Cirrodrilus aomorensis* (Yamaguchi, 1934) with a detailed distribution of the branchiobdellidans (Annelida: Clitellata) in northern Honshu, Japan. Proceedings of Biological Society of Washington 113(3): 633-643.

Gherardi, F. and S. Barbaresi(2000) Invasive crayfish: Activity patterns of *Procambarus clarkii* in the rice fields of the Lower Guadalquivir (Spain). Archiv fur Hydrobiologie 150: 153-168.

Haubrock, P.J., A.F. Inghilesi, G. Mazza, M. Bendoni, L. Solari and E. Tricarico(2019) Burrowing activity of *Procambarus clarkii* on levees: Analysing behaviour and burrow structure. Wetlands Ecol Manage 27: 497-511.

Hobbs, H.H.III, J.P. Pass and J.V. Huner(1989) A review of global crayfish introductions with particular emphasis on two North American species (Decapoda, Cambaridae). Crustaceana 56: 299-316.

Invasive Alien Species Research Team(2021) Monitoring of Invasive Alien Species Designated by the Act on the Conservation and Use of Biological Diversity. National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea, 348pp. (in Korean)

Jung, J.H., M.S. Kim, D.H. Ahn and G.S. Min(2009) Growth Rate, Sex Ratio, Age Structure and Mating Period of Korean Crayfish Cambaroides similis Natural Population. Journal of Aquaculture 22(1): 16-22. (in Korean with English abstract)

Jung, K.S.(2011) Odonata Larvae of Korea. Nature and Ecology, Seoul, 399pp. (in Korean)

Jung, S.W., Y.C. Cho and H.G. Lee(2017) Community Characteristics and Biological Quality Assessment on Benthic Macroinvertebrates of Bongseonsa Stream in Gwangneung Forest, South Korea. Korean Journal of Environmental Ecology 31(6): 508-519. (in Korean with English abstract)

Kawai, T. and Y. Kobayashi(2006) Origin and current distribution of the alien Crayfish, *Procambarus clarkii* (Girard, 1852) in Japan. Crustaceana 78(9): 1143-1149.

Kawai, T.(2017) A Review of the Spread of *Procambaus clarkii* across Japan and its Morphological Observations. Freshwater Crayfish 23(1): 41-53.

Kawai, T., H. Chokki, JCC(Japan Crayfish Club), K. Nakata, T. Kobayashi and K. Arai(2003) Introduction and distribution of *Procambarus clarkii* in Japan. Journal of Natural Histroy of Aomori 8: 1-8. (in Japanese)

Kim, J.M., J.H. Kil, W.M. Kim, J.H. Seo, H.C. Shin, W.H. Kim, J.Y. Ban, U.G. Kim, J.Y. Lee, G.S. Go, S.H. Park and H.S. Oh(2006) A Study of Detailed Survey on Invasive Alien Species in Korea and Designation of Invasive Alien Species in Foreign Countries. National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea, 408pp. (in Korean with English abstract)

Kim, M.C., S.P. Chun and J.K. Lee(2013) Invertebrates in Korean Freshwater Ecosystems. Geobook, Seoul, 483pp. (in Korean)

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(4): 333-339. (in Korean with English abstract)

Kim, S.H., H.J. Baek, G.B. Yang, S.J. Kwon, Y.C. Jeon, S.P. Cheon, H.Y. Kwon, Y.J. Kwon, S.M. Jeong, D.H. Ahn, J.G. Kim, H.S. Shin, M.G. Oh, S.W. Jung and C.W. Park(2019) Survey of American Freshwater Crayfish Distribution in Korea Water System. National Institute of Ecology, Seocheon, Korea, 38pp.

(in Korean with English abstract)

King, A.C., R. Krieg, A. Weston and A.K. Zenker(2022) Using eDNA to simultaneously detect the distribution of native and invasive crayfish within an entire country. Journal of Environmental Management 302: 113929.

Kwak, I.S., Y.S. Park and K.H. Chang(2021) Application and Utilization of Environmental DNA Technology for Biodiversity in Water Ecosystems. Korean Journal of Ecology and Environment 54(3): 151-155. (in Korean with English abstract)

Kwon, O.K.(1990) Illustrated encyclopedia of fauna & flora of Korea vol.32 Mollusca(I). Ministry of Education Republic of Korea, 446pp. (in Korean)

Kwon, S.J., Y.C. Jun and J.H. Park(2013) Benthic Macroinvertebrates. Nature and Ecology, Seoul, 791pp. (in Korean)

Lee, D.S. and Y.S. Park(2019) Evaluation of Potential Distribution Area of the Red Swamp Crayfish (*Procambarus clarkia*) in South Korea. Korean Journal of Ecology and Environment 52(4): 340-347. (in Korean with English abstract)

Li, Y., X. Guo, L. Chen, X. Bai, X. Wei, X. Zhou, S. Huang and W. Wang(2015) Inferring invasion history of red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*) in China from mitochondrial control region and nuclear intron sequences. International Journal of Molecular Science 16: 14623-14639.

Loureiro, T.G., P.M.S.G. Anastácio, P.B. Araujo, C. Souty-Grosset and M.P. Almerão(2015) Red swamp crayfish: Biology, ecology and invasion-an overview. Nauplius 23(1): 1-19.

Martin-Torrijos, L., T. Kawai, J. Makkonen, J. Jussila, H. Kokko and J. Diéguez-Uribeondo(2018) Crayfish plague in Japan: A real threat to the endemic *Cambaroides japonicus*. PLoS ONE 13(4): e0195353.

Mathers, K.L., J.C. White, S. Guareschi, M.J. Hill, J. Heino and R. Chadd(2020) Invasive crayfish alter the long-term functional biodiversity of lotic macroinvertebrate communities. Functional Ecology 34: 2350-2361.

Mauvisseau, Q., A. Coignet, C. Delaunay, F. Pinet, D. Bouchon and C. Souty-Grosset(2017) Environmental DNA as an efficient tool for detecting invasive crayfishes in freshwater ponds. Hydrobiologia 805: 163-175.

Mauvisseau, Q., S. Tönges, R. Andriantsoa, F. Lyko and M. Sweet(2019) Early detection of an emerging invasive species: eDNA monitoring of a parthenogenetic crayfish in freshwater systems. Management of Biological Invasions 10(3): 461-472.

McCarthy, J.M., C.L. Hein, J.D. Olden and M.J. Vander Zanden(2006) Coupling long-term studies with meta-analysis to investigate impacts of non-native crayfish on zoobenthic communities. Freshwater Biology 51: 4-235.

Merrit, R.W., K.W. Cummins and M.B. Berg(2008) An Introduction to the Aquatic Insects of North America (4h ed.). Kendall/Hunt Publish. Co. Dubuque, Iowa, 1158pp.

Nyström, P., C. Brönmark and W. Granéli(1999) Influence of an exotic and a native crayfish species on a littoral benthic community. Oikos 85: 545-553.

Park, C.W., J.W. Kim, Y.J. Cho, J.G. Kim, M.J. Lee and S.H. Kim(2020) Distribution of Invasive Alien Species Red Swamp Crawfish (*Procambarus clarkii*) in Korea. Korean Journal of Ecology and Environment 53(4): 331-335. (in Korean with English abstract)

Rezinciuc, S., J.V. Sandoval-Sierra, B. Oidtmann and J. DiéguezUribeondo(2015) The biology of crayfish plague pathogen *Aphanomyces astaci*: current answers to most frequent questions, Section 2: Crayfish: New developments. In: T. Kawai, Z. Faulkes and G. Scholtz(eds.), Freshwater Crayfish: A Global Overview. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, pp.182-204.

Richman, N.I. et al.(2015) Multiple drivers of decline in the global status of freshwater crayfish (Decapoda: Astacidea). Philosophical Transactions of the Royal Society B 370: 20140060.

Ro, T.H. and D.J. Chun(2004) Functional feeding group categorization of Korean immature aquatic insects and community stability analysis. The Korean Journal of Limnology 37(2): 137-148. (in Korean with English abstract)

Ro, T.H.(2002) Categorization and Ecological Importance of Functional Feeding Groups as Essential Units in Lotic Ecosystems. Bulletin of the KACN 21: 67-93. (in Korean)

Song, H.R., N.Y. Kim, S.H. Kim, D.E. Kim, D.H. Lee, D.H. Choi, H.J. Lee, H.J. Baek, D.K. Kim, M.J. Kim, T.B. Ryu, Y.C. Kim and S.W. Sim(2018) Investigating Ecological Risk of Alien Species (V). National Institute of Ecology, Seocheon, Korea, 89pp. (in Korean with English abstract)

Souty-Grosset, C., P.M. Anastácio, L. Aquiloni, F. Banha, J. Choquer, C. Chucholl and E. Tricarico(2016) The red swamp crayfish *Procambarus clarkii* in Europe: Impacts on aquatic ecosystems and human well-being. Limnologica 58: 78-93.

Tréguier, A., J.M. Paillisson, T. Dejean, A. Valentini, M.A. Schlaepfer and J.M. Roussel(2014) Environmental DNA surveillance for invertebrate species: Advantages and technical limitations to detect invasive crayfish *Procambarus clarkii* in freshwater ponds. Journal of Applied Ecology 51: 871-879.

Usio, N. and C.R. Townsend(2002) Functional significance of crayfish in stream food webs: Roles of omnivory, substrate heterogeneity and sex. Oikos 98: 512-522.

Usio, N. and C.R. Townsend(2004) Roles of crayfish: Consequences of predation and bioturbation for stream invertebrates. Ecology 166: 807-822.

Yi, S., L. Zhang, Y. Li, L. Shi, J. Chen, W. Wang, L. She and J.

He(2020) Genetic diversity and phenotypic variation of the red swamp crayfish, Procambarus clarkii (Girard, 1852) (Decapoda: Astacidea: Astacidae), in China. Journal of Crustacean Biology 1-10.

Yi, S., Y. Li, L. Shi, L. Zhang, Q. Li and J. Chen(2018) Characterization of Population Genetic Structure of red swamp crayfish, Procambarus clarkii, in China. Scientific Reports 8: 5586.

Yoon, I.B.(1995) Aquatic Insects of Korea. Junghaengsa, Seoul, 262pp. (in Korean)

Yue, G.H., J. Li, Z. Bai, C.M. Wang and F. Feng(2010) Genetic diversity and population structure of the invasive alien red swamp crayfish. Biological Invasions 12: 2697-2706.

Yusop, M.H.M., S. Mustafa, Y.B.C. Man, A.R. Omar and N.F.K. Mokhtar(2012) Detection of Raw Pork Targeting Porcine-Specific Mitochondrial Cytochrome B Gene by Molecular Beacon Probe Real-Time Polymerase Chain Reaction. Food Analytical Methods 5: 422-429.

Zhang, Y., J.S. Richardson and J.N. Negishi(2004) Detritus processing, ecosystem engineering and benthic diversity: A test of predator-omnivore interference. Journal of Animal Ecology 73: 756-766.