

Original article

멸종위기 야생생물I급 흰수마자의 모래 선택과 잠입 행동에 관한 연구

김근식 · 허문성 · 김 진 · 박창득 · 윤주덕*

국립생태원 멸종위기종복원센터

Substrate Selection and Burying Behaviour of Sand-dwelling Endangered Freshwater Fish, *Gobiobotia naktongensis*. Keun-Sik Kim (0000-0002-2081-2589), Moon-Seong Heo (0000-0002-8782-0786), Jin Kim (0000-0002-7981-2444), Chang-Deuk Park (0000-0002-7832-2806) and Ju-Duk Yoon* (0000-0003-1667-327X) (Research Center for Endangered Species, National Institute of Ecology, Yeongyang 36531, Republic of Korea)

Abstract To determine the cause of the population decline in *Gobiobotia naktongensis*, substrate preference and burying behaviour were investigated in this study. In general, the species was shown to prefer a substrate size of 1 mm or less, depending on the flow. In addition, the burying depth varied according to the size of the fish and increased with a decrease in water temperature. Our findings showed that the main cause of the population reduction was the physical changes in the substrate structure due to the dams or barrages construction. Notably, the accumulation of silt and mud in the substrate upon the formation of an upstream lentic water region for structural construction and bed armouring caused by scouring and reduced downstream inflow of fine sediment were deterministic in the fish habitat changes, causing problems in burying. As sand substrate structure is critical for the survival and inhabitation of psammophilous species, efficient strategies should be developed with proper habitat management to reduce the anthropogenic damage

Key words: substrate composition, conservation, restoration, in-stream structure, sediment, burying depth, water flow, habitat selection, predator avoidance, psammophily

서 론

담수어류는 생존, 산란, 성장 등을 위한 서식처가 필요하며, 이를 위한 서식처는 하천, 호수, 습지 등 다양한 형태로 존재한다(Mattews, 1998; Thompson and Larsen, 2004). 서식처 선택과 행동은 생물의 생존과 건강성에 영향을 미친다(Poff *et al.*, 1997; Valeix *et al.*, 2009). 또한, 생활사의 특성은 미소서식지와 밀접한 관련이 있다(Prior and Weather-

head, 1996). 담수어류는 물이라는 특수한 환경 속에서 생활하면서 물 안에 바위나 돌 틈 또는 모래 등을 서식지로 선택하여 생활하며, 그에 맞게 생태적으로 진화하였다(Zuanon *et al.*, 2006). 하지만 서식지 환경이 항상 동일하지 않기 때문에 환경의 변화에 따라 서식지 선택이 지속적으로 변하는 특성을 보인다(Stamps, 1983; Valeix *et al.*, 2009; McElory *et al.*, 2018). 따라서, 각 종들이 환경에 따라 언제, 왜, 어떠한 서식지를 선택하는지에 대하여 이해하는 것이 생물종을 관리 및 보전하는 데 있어서 중요한 역할을 한다.

모래잠입생물(psammophily)은 모래하상에 서식하면서 하상에 잠입하는 특성을 가진 생물을 의미한다. 일반적으로 어류는 포식을 피하고, 먹이를 잡거나 에너지 보존을 위해 모래

Manuscript received 7 December 2023, revised 13 December 2023, revision accepted 13 December 2023

* Corresponding author: Tel: +82-54-680-7360, Fax: +82-54-680-7329
E-mail: grandblue@nie.re.kr; zmszmsqkek@hanmail.net

© 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.

잠입 행동을 하는 것으로 알려져 있다(Daniels, 1989; Gibson and Robb, 2000; Stoner and Ottmar, 2003; Zuanon *et al.*, 2006). 모래에 잠입하는 담수어류의 일반적인 외형은 작은 체구에 큰 눈 그리고 투명한 체색을 보인다(Zuanon *et al.*, 2006). 전 세계적으로 모래잠입하는 생물에 대한 연구는 주로 해양종을 대상으로 잠입하는 어류의 형태 및 행동적 특성, 군집(Syms and Jones, 2004; Morioka, 2005; Gidmark *et al.*, 2011; McKee *et al.*, 2016)에 대한 연구가 주로 수행되었다. 특히, 담수에 서식하며 모래잠입 행동을 보이는 종에 대한 연구는 드물게 수행되고 있으며(Zuanon *et al.*, 2006), 대상종도 제한적이다(e.g. *Ammocrypta pellucida*, Daniels, 1989; Drake *et al.*, 2008; O'Brien and Facey, 2008; Thompson *et al.*, 2017).

한국 고유종인 흰수마자(*Gobiobotia naktongensis*)는 잉어과 모래무지아과 꾸구리속에 속하는 소형 담수어류로(Kim *et al.*, 2005), 전형적인 모래잠입 어류의 특성을 나타낸다. 낙동강 본류와 지류, 금강, 임진강, 한강에 분포하며(Jeon and Son, 1983; Chae, 2004) 유속이 다소 느리고 가는 크기의 모래하상에 서식한다(Kim *et al.*, 2005). 야행성으로 밤에 먹이활동을 하고 낮에는 모래 속에 들어가 숨는 특성을 가지고 있다. 먹이원은 모래하상에 주로 서식하는 수서곤충을 주로 이용한다(Ko *et al.*, 2013). 지속적으로 개체군이 감소하여 환경부에서 멸종위기 야생생물 I급으로 지정하여 보호하고 있다.

모래에 잠입하는 특이한 행동으로 인해 생존에 이득이 있음에도 불구하고 개체군이 줄어드는 흰수마자에 대한 연구는 기초적인 생태(Uchida, 1939; Chae, 2004; Kim *et al.*, 2014; Won, 2017), 분포(Jeon and Son, 1983; Seo *et al.*, 2009), 증식 연구(Ko *et al.*, 2013), 유전적 연구(Yoo, 2016) 등이 이루어졌으나 감소원인에 대한 파악은 이루어지지 않은 상태이다. 흰수마자는 동일한 유속과 수심에서도 하상의 입자크기에 따라 출현 유무가 달라져 하상구조가 매우 중요한 제한요인(limit factor)으로 작용하는 것으로 알려져 있으나(Kim *et al.*, 2014), 현재까지는 흰수마자를 포획한 지점을 대상으로 모래입자 크기 분석에 대한 연구만 이루어졌고, 서식지 선택 및 이용과 관련된 연구는 수행된 바가 없는 상황이다. 따라서 본 연구는 모래 하상을 서식처로 활용하는 흰수마자를 대상으로 유량변화라는 환경조건에 따른 모래입자 크기 선택을 파악하고, 계절별 모래 이용을 파악하기 위하여 수온별 잠입 깊이를 평가하였다. 또한 이러한 흰수마자의 생태적 생존 특성에 따른 감소원인을 파악하여, 모래잠입 특성을 나타내는 멸종위기종인 흰수마자의 보전을 위한 서식지 및 개체군 관리전략을 평가하였다. 뿐만 아니라 해당 결과를

토대로 국내에 서식하고 있는 모래잠입 어류의 보전 및 관리에 대한 전략도 제시하였다.

재료 및 방법

1. 대상어류 준비

멸종위기야생생물 I급 흰수마자의 연구는 낙동강유역환경청으로부터 허가를 받은 후 수행되었다(허가번호 2019-19호). 흰수마자의 포획은 국내 최대 서식지인 남강 일대에서 2019년 6월 죽대(망목 4×4 mm)를 이용해 포획하였다. 포획한 개체들은 현장에서 Oxytetracycline (Samu median, KOREA)을 100 ppm 농도로 1시간 동안 약욕 처리를 한 이후, 60 L 플라스틱 통에 하천수를 채우고 차량용 공기공급장치(Intermax, KOREA)로 공기를 공급하며 멸종위기종복원센터로 운반하였다. 이송된 개체는 200 L PVC 수조에 수온 25°C를 유지하며 사육하였고, 먹이공급은 냉동장구벌레(Hikari, JAPAN)와 침강사료(EP1, Otohime, Japan)를 공급하였다. 모든 연구는 '국립생태원 동물실험윤리 위원회'의 승인을 받아 수행되었다(승인번호 NIEIACUC-2020-009).

2. 실험 방법

1) 하상 선택성 연구

하상 선택성 실험을 위한 모래입도의 구성은 야생 흰수마자가 확인되는 하상크기를 기준으로(Seo *et al.*, 2009), 4개의 크기로 구분(0.50 mm 미만, 0.50 mm 이상 1.00 mm 미만, 1.00 mm 이상 2.00 mm 미만, 2.00 mm 이상)하여 준비하였다(Wentworth, 1922). 실험을 위한 하상은 3가지 망목(2 mm, 1 mm, 0.5 mm)의 입도분석용 test sieve (ChungGye, Korea)를 이용하여 구분하였다. 실험수조(length 100 cm, width 45 cm, height 40 cm)에서 하상 조건에 따른 구분을 위해서 플라스틱 container(length 24 cm, width 45 cm, height 10 cm)를 제작하여 각 하상크기별로 구분하고, 하상크기를 작은 것부터 큰 것까지 순서별로 배치하였다. 유량에 따른 하상 선택성 파악을 위해 16 L min⁻¹, 32 L min⁻¹ 두 종류의 실험구를 준비하였다. 수조 내 흐름을 유지하기 위해 수조 양쪽 끝에 유입부와 유출부를 설치하였으며, 유입부는 수조 내 전반적으로 균일한 흐름을 유지하기 위해 45 cm의 PVC 파이프에 1 cm 간격으로 구멍을 뚫어 흐름을 조절하였다. 수위는 흰수마자가 일반적으로 서식하는 수위 자료를 토대로(10~50 cm, NIBR, 2019) 10 cm를 유지하였고, 유출부를 10 cm로 유지한 이후 유입유량을 조절하여 각 유량을 설정하

였다. 하상구조는 작은 크기 하상이 흐름으로 인한 재부유를 방지하기 위해 유입부부터 큰하상에서 작은하상크기로 세팅하였으며, 수온은 25°C로 유지하였다. 실험을 위해 각 수조별로 3년생 이상 성체인 흰수마자 6개체 (standard length 42~48 mm)를 투입하여 2일간의 안정화 이후 본 실험을 수행하였다. 모래 선호도는 매일 오전 11시에 확인하였으며, 총 실험기간은 20일간 수행되었다. 실험개체들에 대한 먹이공급은 냉동장구벌레 (Hikari, JAPAN)와 침강사료 (EP1, Otohime, Japan)를 오후 5시에 일괄적으로 공급하였다.

2) 잠입 행동 연구

수온변화에 따른 잠입 깊이 실험을 위해서 활용된 개체의 선발은 체장을 기준으로 하였다. 본 실험에 사용된 개체는 체장을 1/20 mm dial caliper (Mitutoyo Corp, JAPAN)로 0.1 mm까지 측정된 다음 체장 빈도분포법 연구 결과 (Ricker, 1971; Kim *et al.* 2014)를 참고하여 연령을 산출하였다. 3년생 (체장 42 mm 이상) 2개체 (체장 43 mm, 42 mm)와 1년생 (체장 25~30 mm) 2개체 (체장 25 mm, 26 mm)를 이용해 실험을 진행하였다. 200 L 수조 (length 100 cm, width 45 cm, height 40 cm)에 1 mm 이하의 크기를 가진 모래를 30 cm 쌓은 아크릴 수조 (length 100 cm × height 80 cm × width 2 cm)를 넣고, 아크릴 수조의 물 높이를 총 15 cm가 되도록 유지하였다. 실험 수온을 자연과 유사하게 설정하기 위해 흰수마자가 서식하고 있는 내성천 수온 자료를 물환경정보시스템 (<http://water.nier.go.kr>)에서 확보하여 활용하였다. 수온은 30°C부터 시작하여 10°C까지 매일 1°C씩 낮춰가면서 잠입 깊이를 측정하였다. 잠입 깊이 측정은 야행성인 흰수마자의 생태 특성상 잠입 후 휴식하는 시간인 오전 11시를 기준으로 하였으며, 광주기는 주간 06:00~18:00, 야간 18:00~06:00로 세팅하였다. 모래에 잠입한 개체의 깊이 확인은 상층부터 모

래를 붓으로 긁어 흰수마자 체표가 완전히 보이는 곳을 확인하였으며, 모래 표면에서 체표가 보이는 지점까지의 깊이를 측정하였다.

3. 자료 분석

유량에 따른 하상구조의 선택은 조사 회차별, 하상크기별 개체수로 정리되었다. 통계분석을 위해 분석에 사용된 모든 자료에 대한 기초 분석 수행 시 Levene's test를 통과하지 못해 비모수분석을 이용하였다. 유량에 따른 하상크기별 차이는 Mann-Whitney U test를 통해 차이를 확인하였다. 흰수마자 개체별 모래잠입 깊이 자료를 토대로 선형 regression 분석을 수행하여 패턴을 확인하였으며, 해당 자료의 분석은 SigmaPlot 10.0 (Systat Software Inc, California, US)을 활용하였다. 흰수마자의 연령별 (1년생, 3년생), 온도대별 (10~15, 15~20, 20~25, 25~30°C) 모래잠입 깊이 비교는 Kruskal-Wallis test를 이용하였다. 본 논문에 활용된 모든 통계분석은 SPSS (PASW statistics 18, Chicago, US)를 이용하였다.

결 과

1. 모래 선택성

흰수마자 모래입자 선택 평가 결과 모래크기별 전체 출현 개체수 비율은, 유량 16 L min⁻¹ 실험군에서는 모래크기별로 0.5 mm 이하 35.8%, 0.5~1 mm는 34.2%, 1~2 mm는 17.5%, > 2 mm는 9.2% 선택하는 것으로 확인되었다. 반면 유량이 두 배인 32 L min⁻¹ 실험군에서는 0.5 mm에서는 28.3%, 0.5~1 mm는 20.8%, 1~2 mm는 35.8%, > 2.00 mm

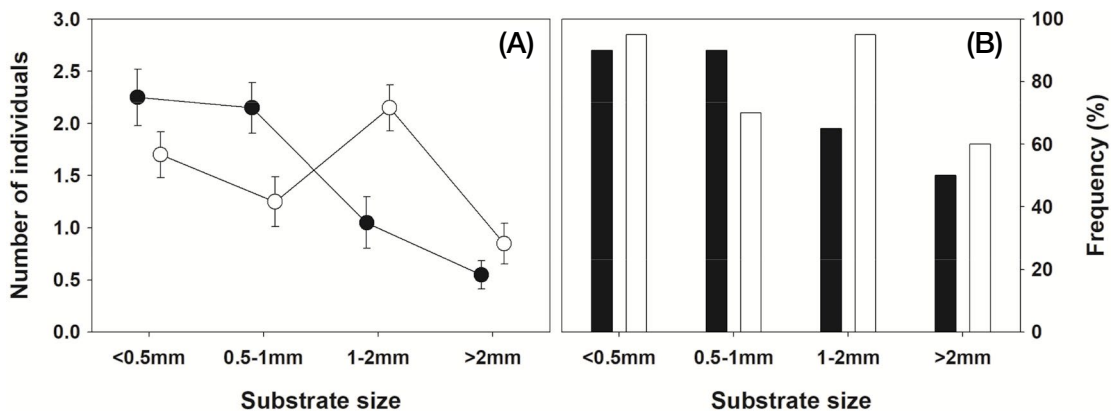


Fig. 1. Selection of substrate sizes by *G. naktongensis* with two different discharges. (A) is average number of individuals and (B) is occurrence frequency (%) identified by substrate sizes. The black color indicates discharge 16 L min⁻¹, and white color indicate 32 L min⁻¹.

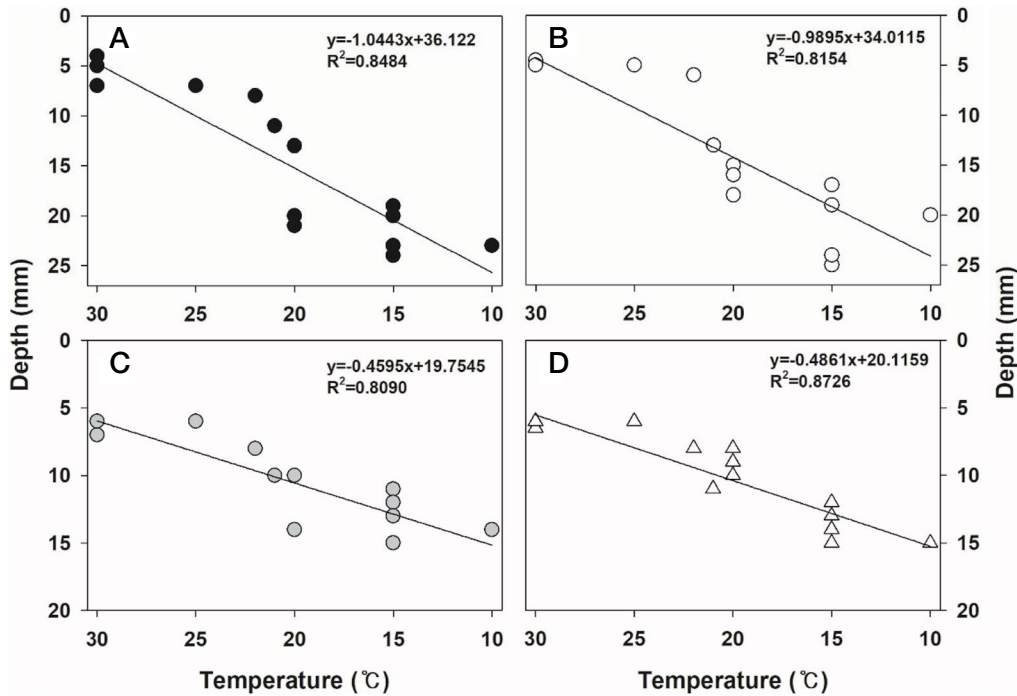


Fig. 2. Relationship between temperature and burying depth of *G. naktongensis* by SL (A: 43 mm, B: 42 mm, C: 26 mm, D: 25 mm). Burying depth is gradually increased with decrease of water temperature.

는 14.2%로 달라지는 것이 확인되었다. 평균출현 개체수는 16 L min^{-1} 실험군에서는 0.5 mm 이하 2.25, 0.5~1 mm는 2.15, 1~2 mm는 1.05, > 2 mm는 0.55였고, 32 L min^{-1} 에서는 0.5 mm 1.7, 0.5~1 mm 1.25, 1~2 mm 2.15, > 2.00 mm 0.85였다(Fig. 1A). 유량에 따라서 가장 작은 크기(< 0.5 mm)와 가장 큰 크기(> 2 mm)의 모래크기 선택 개체수 비율은 변화가 없었으나(Mann-Whitney U Test, $p > 0.05$) 중간 크기의 입자(0.5~1 mm, 1~2 mm) 선택 개체수 비율은 차이가 발생(Mann-Whitney U Test, 1~2 mm, $p = 0.015$; 2~4 mm, $p = 0.002$)하여 유량에 따라 선택성에 차이가 확인되었다. 유량별 모래크기 선택 빈도에서는 두 조건의 유량에서 < 0.5 mm 모래의 선택이 가장 높았으나, 다른 모래크기 선택 빈도는 유량에 따라 차이가 나타났다(Fig. 1B). 16 L m^{-1} 에서는 1 mm 이하의 모래에 대한 선택 빈도가 낮아졌으나, 32 L m^{-1} 은 1~2 mm 모래가 가장 높은 것으로 확인되었다.

2. 잠입 행동

흰수마자는 수온이 낮아질수록 모래를 깊이 파고들어가는 패턴을 보였으며(Fig. 2), 수온이 15°C 에서 표층에서 25 mm 까지 가장 깊게 잠입하는 것으로 확인되었다. 개체별 비교에서도 모든 개체가 수온이 낮아지면서 모래에 깊이 잠입하는

Table 1. Mean (\pm standard deviation) burying depth of *Gobiobotia naktongensis* by age and water temperature. Minimum and Maximum burying depth is indicated in the parenthesis.

Temperature ($^\circ\text{C}$)	Depth (mm)	
	Age 1	Age 3
30~26	6.15 ± 0.34 (6~7)	5.00 ± 0.78 (4~7)
25~21	8.17 ± 2.04 (6~11)	8.33 ± 3.08 (5~13)
20~16	10.17 ± 2.04 (8~14)	17.17 ± 3.06 (13~21)
15~10	13.58 ± 1.38 (11~15)	20.92 ± 2.78 (17~25)

것이 확인되었다. 특히, 20°C 이하로 낮아지면서 잠입 깊이가 깊어졌으며, 크기가 큰 개체들이 더 깊이 파고들어가는 것으로 나타났다. $26\sim 30^\circ\text{C}$ 의 수온 조건에서 1년생 흰수마자의 평균 모래잠입 깊이는 $6.15 \pm 0.34 \text{ mm}$, 3년생 흰수마자의 평균 모래잠입 깊이는 $5.00 \pm 0.78 \text{ mm}$ 였다. $21\sim 25^\circ\text{C}$ 의 수온 조건에서 1년생($8.17 \pm 2.04 \text{ mm}$)과 3년생($8.33 \pm 3.08 \text{ mm}$)의 평균 모래잠입 깊이는 연령별로 차이가 없는 것으로 확인되었다. 반면 수온 20°C 이하로 낮아지면서 차이가 발생하였고, 3년생이 1년생에 비해 깊이 잠입하는 것으로 확인되었다(Table 1). 통계적으로도 21°C 이상의 조건에서는 3년생과 1년생간 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았으나, 20°C 이

하의 조건에서는 연령별 통계적으로 유의한 차이가 확인되었다(Kruskal-wallis test, $p < 0.001$).

고찰

본 실험을 통해 확인된 흰수마자의 모래 선택은 야생에서 확인된 흰수마자의 서식환경 특성과 유사한 것으로 확인되었다. 2020년에 조사된 국내 흰수마자 출현지역(6개 하천, 9개 지점)의 하상구조 분석결과(Yoon unpublished data), 대부분 출현지역의 하상구조가 1 mm 이하의 크기가 90% 이상 차지하는 것으로 나타났으나, 일부 지역들에서는 1~2 mm, 2 mm 이상 크기의 하상구조에서도 흰수마자가 출현하는 것으로 확인되었으며(Fig. 3), 이는 본 연구의 결과와 동일하였다. 전반적으로 흰수마자는 1 mm 이하의 하상구조를 가장 선호하는 것으로 확인되었으며, 이는 Chae (2004)의 연구 결과와도 일치한다. 하지만 지천(JS2), 황강(HR), 미호강(MHR) 흰수마자 서식 지역에서 1~2 mm의 하상의 비율이 높아지는 것을 확인하였을 때, 본 연구 결과와 유사하게 1~2 mm의 하상도 주요한 서식처로 활용되고 있는 것으로 판단된다. 또한, 2 mm 이상의 하상이 우점적으로 나타나는 사미천(SMS)에서도 흰수마자의 서식이 확인되어, 선호도는 높지 않지만 2 mm 이상의 하상도 서식처로 활용이 되고 있음을 확인할 수 있다. 본 연구 결과와 현장 조사 결과를 통해, 0.25~1 mm의 하상을 서식처로 선호하지만, 환경에 따라 1 mm 이상의 하상도 서식처로 활용함을 확인하였다. 담수어류는 일시적인 환경 변화에 대해서 환경이 개선될 때까지 버틸수 있는 능력이 있기 때문에, 흰수마자의 2 mm 이상 하상에 대한 서식처 선택은 일시적인 선택으로 추정된다.

유량, 수온 등 하천 환경의 변화는 담수어류 서식처 선택

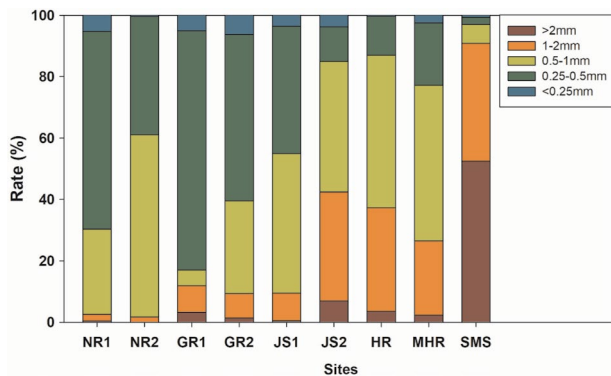


Fig. 3. Substrate composition of streams that *G. naktongensis* currently inhabit (NR: Nam River, GR: Geum River, JS: Ji Stream, HR: Hwang River, MHR, Miho River, SMS: Sami Stream).

에 영향을 미친다(e.g. Poff and Allan, 1995; Reyjol *et al.*, 2001; Labonne *et al.*, 2003; Kanno *et al.*, 2012; Alexandre *et al.*, 2016). 특히, 하천 내 유속과 수온은 어류의 집단이동에 영향을 미치는 주요 환경 변수로 집단이동의 속도와 방향에 큰 영향을 미친다(Jonsson, 1991). 기존 연구에서 흰수마자는 수심이 얇고 물의 흐름이 있는 여울의 모래 하상을 선호한다(NIBR, 2019). 본 연구에서 흰수마자는 유량이 적은 환경에서 1 mm 이하의 모래 하상을 선호하는 반면 유량이 많은 환경에서 1 mm보다 큰 모래 하상을 선택하는 경향을 통해 유량이 흰수마자의 미소서식지 선택에 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 본 실험은 단일면적의 동일한 수조 환경에서 유량만을 두 배로 늘렸기 때문에 실험 조건의 유속 역시 두 배로 차이가 난다. 어류는 유속이 증가하면 서식지의 차이를 인지하는 능력이 감소하는 것으로 보고된 바 있다(Tyler and Clapp, 1995). 하지만, 흰수마자의 경우 유량과 무관하게 2 mm 이상의 하상 선택성이 낮은 것으로 보아 인지력의 감소와 관련 없이 환경 변화에 따른 하상크기 선택성이 달라진 것으로 판단된다.

많은 담수어류들이 겨울철 낮은 수온을 극복하기 위해 월동에 돌입한다(Cunjak, 1996; Shuter *et al.*, 2012). 흰수마자의 overwintering에 대한 연구는 수행된 적이 없지만, 겨울철 조사에서도 흰수마자는 타시기와 동일한 지역에서 포획이 됨에 따라 월동을 위한 이동을 수행하지는 않는 것으로 판단된다. 수온이 낮아지는 월동기(15°C 이하)에 흰수마자는 월동기보다 더 깊은 지역으로 이동하는 것으로 확인되었다. 상대적으로 월동기보다 2배 정도 깊은 지역으로 이동하여 머무르는 것으로 보아 월동을 위해 모래 속으로 더 깊이 이동하는 것으로 판단된다. 잠입 깊이는 3년생의 성어가 더 깊은 것으로 확인되었는데, 이는 일반적으로 어류는 크기가 커질수록 유영능력을 비롯한 운동능력이 높아지기 때문으로 판단된다(Shiau *et al.*, 2020). 모래잠입성 어류 *Cepola rubescens*의 잠입 깊이와 너비를 비교한 결과 전장이 클수록 잠입 깊이가 증가한 것으로 보고된 바 있고(Atkinson and Pullin, 1996), 흰수마자의 경우 출현지점의 유속과 수심 범위가 당년생보다 1년생 이상의 성어가 더욱 넓은 것으로 판단할 때(Kim *et al.*, 2014), 크기에 따른 운동 능력의 차이로 판단된다.

국내 하천에 분포하는 흰수마자의 전체적인 분포 및 개체 수는 이전에 비해 심각하게 감소하고 있는 상황이다(NIBR, 2019). 특히, 흰수마자가 집중적으로 서식하던 낙동강 본류와 지류인 내성천, 감천, 황강 등 모래하상으로 구성된 하천에서 최근 개체 확인이 어려운 실정이다. 이와 관련하여 댐과 보의 건설이 큰 영향을 주는 것으로 판단된다. 댐이나 보는 하천의 자연 흐름을 변형시킴으로써 모래의 퇴적에 영향

을 미친다(Power *et al.*, 1996; Poff and Hart, 2002; Clarke *et al.*, 2008). 하상의 실트 퇴적은 모래잠입종이 모래 서식처로 파고드는 데 영향을 준다(e.g. Daniels, 1989; Tessler *et al.*, 2012; Thompson *et al.*, 2017). 낙동강은 2010~2011년 4대강 사업으로 본류에 건설된 8개의 대형보로 인해 유속이 느려짐에 따라 퇴적도가 하상에 쌓이면서 모래잠입 어류인 흰수마자의 서식에 부정적인 요인으로 작용하고 있다. 동일한 사례로, 모래잠입 특성을 가진 Eastern sand darter (*Ammocrypta pellucida*)는 서식처에 1 mm 미만의 미세한 퇴적물이 쌓이면서 하상 내 산소 감소와 난 생존, 잠입행동 저해로 인한 개체군 감소가 확인되고 있다(Daniels, 1993; Holm and Mandrak, 1996; Facey, 1998).

또한 내섬천의 경우 상류에 건설된 영주댐의 영향으로 하류로 이송되어야 하는 기는 하상의 이송이 막히면서, 댐 건설 이전에 비해 2 mm 이상의 하상 비율이 높아지면서 하류 하상구조가 조립화되고 있다(ME and Kwater, 2017). Thompson *et al.* (2017)도 모래잠입 특성을 가진 희소종의 댐으로 인한 하상구조 변화와 서식처 선택에 대한 유사한 결과를 제시하였다. 따라서 하천의 물리적 변형으로 인한 하상구조의 변화는 흰수마자와 같은 모래잠입 어류의 생존 및 분포에 심각한 제한 요인으로 작용할 수 있는 것으로 판단된다.

댐과 보의 철거는 하천의 형태를 과거로 복원시키고 이에 따라 담수어류도 회복된다(Bednarek, 2001; Gardner *et al.*, 2013; Watson *et al.*, 2018). 낙동강과 동일하게 흰수마자가 서식하고 있던 금강은 4대강 사업으로 본류에 3개의 보가 건설되었고, 이에 따른 정수 환경으로의 변화로 인해 흰수마자 분포가 급격하게 감소하였다(NIE, 2019). 이후 2018년부터 순차적으로 보를 개방하면서 현재 흰수마자의 분포 지역이 보 구간을 따라 지속해서 확대되고 있다(Yoon unpublished data). 보의 개방 초기에는 대부분 지역의 하상에 빨이 덮여 있어서 일부 모래가 드러난 지역에서만 흰수마자의 서식이 확인되었으나 여름 강우 이후 빨층이 씻겨 내려가고 모래 서식처가 확대되면서 흰수마자의 서식 가능지역이 증가하고 있다. 현재 금강의 하상구조(GR2)는 흰수마자가 선호하는 하상으로 회복되었으며(Fig. 3), 향후 낙동강도 보 개방을 통해 물의 흐름과 하상 구성이 변화되면, 금강과 동일하게 흰수마자의 서식처가 확보되고 이에 따라 개체군이 회복될 것으로 예상된다.

국내에 서식하고 있는 모래잠입종은 흰수마자와 함께, 모래무지, 미호종개 등이 있다. 모래잠입종의 잠입 행동은 크기가 작은 담수어류에 있어서 매우 중요한 생존 전략으로, 특히 포식자회피에 상당히 효과적이다. 실제로 국내에 서식하고 있는 주요 육식종인 배스(Jang *et al.*, 2006; Ko *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2013; Jo *et al.*, 2014, 2016; Park *et al.*, 2019), 쏘

가리(Song *et al.*, 2017), 꺾지(Byeon, 2017)의 먹이원 연구 결과, 모래잠입 어류가 확인되지 않았다. 그뿐만 아니라 흰수마자는 야행성 종으로 포식자들의 영향에서 보다 자유로워서, 흰수마자에게 포식과 같은 생물학적 요인은 개체군 감소의 주된 요인으로 작용하지 않을 것으로 판단된다.

모래잠입종의 주요 감소원인은 퇴적, 침식과 같은 물리적인 하천의 교란이 영향을 주는 것으로 확인되었다(e.g. O'Brien and Facey, 2008; Thompson *et al.*, 2017). 수질이나 다른 환경적 요인에 대한 영향이 아직 밝혀지지 않았기 때문에 확신할 수는 없으나, 흰수마자의 경우도 물리적인 교란으로 인한 서식지의 환경 변화가 주요 요인인 것으로 판단된다. 따라서 흰수마자의 보전 및 복원을 위해서는 서식지 환경 조성이 가장 시급한 것으로 판단되며, 이와 더불어 생태적인 특성을 고려한 맞춤형 보전 및 복원 전략이 수립되어야 할 것으로 사료된다. 현재까지 국내의 모래에 서식하는 종들에 대한 연구는 전반적으로 부족한 상황이었다. 흰수마자 연구 결과를 토대로 모래를 서식지로 살아가는 다른 종들에 대한 연구도 함께 진행하여 모래잠입 어류에 대한 전반적인 보전 전략을 수립한다면 더욱 효율적일 것으로 판단된다.

적 요

모래잠입 어류는 모래 하상에 잠입하여 살아가는 생물로, 잠입을 통해 포식자 회피, 먹이 포획, 에너지 보존 등 생존에 이득이 있다. 국내에 서식하는 흰수마자는 전형적인 모래잠입 특성을 보임에도 불구하고 지속적인 개체군 감소로 인해 멸종위기종으로 지정되어 있다. 본 연구에서는 흰수마자의 감소원인 파악을 위하여 모래크기 선호도 및 잠입 행동을 평가하였다. 전반적으로 1 mm 이하의 모래를 선호하는 것으로 확인되었으며, 유량에 따라 모래크기의 선택이 차이가 발생하였다. 또한 수온이 낮아짐에 따라 모래에 보다 깊이 잠입하였고, 잠입하는 깊이는 흰수마자의 크기별로 차이가 있는 것으로 나타났다. 흰수마자의 모래 선호도 연구 결과 전반적으로 개체군이 감소하는 원인은 댐, 보 등의 건설로 인한 물리적인 하상구조의 변화로 사료되었다. 특히, 구조물 건설 상류부의 정수역 형성으로 인한 실트와 진흙의 하상 내 축적과 하류부에 세립질 퇴적물 유입 감소 및 침식으로 인한 장갑화로 서식처 변형이 발생하여 잠입에 문제가 발생한 것으로 판단되었다. 흰수마자를 비롯한 모래잠입 어류는 모래 하상 구조가 생존 및 서식에 중요한 역할을 하기 때문에 이를 관리할 수 있는 효율적 전략 수립 및 서식지 관리가 필요하다.

저자 정보 윤주덕(국립생태원 멸종위기종복원센터 책임연구원), 김근식(국립생태원 멸종위기종복원센터 선임연구원),

박창득(국립생태원 멸종위기종복원센터 전임연구원), 허문성(국립생태원 멸종위기종복원센터 전문위원), 김진(국립생태원 멸종위기종복원센터 전문위원)

저자 기여도 개념설정: 윤주덕, 김근식, 자료수집: 김진, 허문성, 박창득, 분석: 윤주덕, 김근식, 김진, 원고작성: 윤주덕, 김근식, 김진, 과제관리: 윤주덕

이해관계 이 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없습니다.

연구비 본 논문은 환경부의 지원을 받아 수행하였습니다(NIE-고유연구-2023-47). This work was supported by a grant from the Ministry of Environment (MOE) of the Republic of Korea (NIE-고유연구-2023-47).

REFERENCES

- Alexandre, C.M., P.R. Almeida, T. Neves, C.S. Mateus, J.L. Costa and B.R. Quintella. 2016. Effects of flow regulation on the movement patterns and habitat use of a potamodromous cyprinid species. *Ecohydrology* **9**: 326-340.
- Atkinson, R.J.A. and R.S. Pullin. 1996. Observations on the Burrows and Burrowing Behaviour of the Red Band-Fish, *Cepola rubescens* L. *Marine Ecology* **17**(1-3): 23-40.
- Bednarek, A.T. 2001. Undamming rivers: a review of the ecological impacts of dam removal. *Environmental Management* **27**: 803-814.
- Byeon, H.K. 2017. Studies on the Feeding Habits of Korean aucha perch, *Coreoperca herzi* in the Geum River, Korea. *Korean Journal of Environment and Ecology* **31**(5): 472-478 (in Korean).
- Chae, B.S. 2004. Current status of *Gobiobotia naktongensis* Mori and management plan. 2004 Korean Society of Ichthyology Autumn Symposium abstract: 47-57.
- Clarke, K.D., T.C. Pratt, R.G. Randall, D.A. Scruton and K.E. Smokorowski. 2008. Validation of the flow management pathway: effects of altered flow on fish habitat and fishes downstream from a hydropower dam. *Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences* **2784**: 111.
- Cunjak, R.A. 1996. Winter habitat of selected stream fishes and potential impacts from land-use activity. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **53**(S1): 267-282.
- Daniels, R.A. 1989. Significance of burying in *Ammocrypta pellucida*. *Copeia* **1989**(1): 29-34.
- Daniels, R.A. 1993. Habitat of the Eastern Sand Darter, *Ammocrypta pellucida*. *Journal of Freshwater Ecology* **8**: 287-295.
- Drake, D.A.R., M. Power, M.A. Koops, S.E. Doka and N.E. Mandrak. 2008. Environmental factors affecting growth of eastern sand darter (*Ammocrypta pellucida*). *Canadian Journal of Zoology* **86**(7): 714-722.
- Facey, D.E. 1998. The status of the eastern sand darter, *Ammocrypta pellucida*, in Vermont. *Canadian Field-Naturalist* **112**(4): 596-601.
- Gardner, C., S.M. Coghlan Jr, J. Zydlewski and R. Saunders. 2013. Distribution and abundance of stream fishes in relation to barriers: implications for monitoring stream recovery after barrier removal. *River Research and Applications* **29**(1): 65-78.
- Gibson, R.N. and L. Robb. 2000. Sediment selection in juvenile plaice and its behavioural basis. *Journal of Fish Biology* **56**: 1258-1275.
- Gidmark, N.J., J.A. Strother, J.M. Horton, A.P. Summers and E.L. Brainerd. 2011. Locomotory transition from water to sand and its effects on undulatory kinematics in sand lances (Ammodytidae). *Journal of Experimental Biology* **214**(4): 657-664.
- Holm, E. and N.E. Mandrak. 1996. The status of the eastern sand darter, *Ammocrypta pellucida*, in Canada. *Canadian field-naturalist. Ottawa ON* **110**(3): 462-469.
- Jang, M.H., G.J. Joo and M.C. Lucas. 2006. Diet of introduced largemouth bass in Korean rivers and potential interactions with native fishes. *Ecology of Freshwater Fish* **15**: 315-320.
- Jeon, S.R. and Y.M. Son. 1983. Studies on the distribution of *Gobiobotia naktongensis* Mori (Gobiobotinae, Cyprinidae) from Korea. *Korean Journal of Limnology* **16**(1): 21-26. (in Korean)
- Jo, H., J.A. Gim, K.S. Jeong, H.S. Kim and G.J. Joo. 2014. Application of DNA barcoding for identification of freshwater carnivorous fish diets: Is number of prey items dependent on size class for *Micropterus salmoides*? *Ecology and Evolution* **4**(2): 219-229.
- Jo, H., J.D. Yoon, J.H. Kim, K.S. Jeong, Y. Do and G.J. Joo. 2016. Diet shifts and delayed piscivory specialisation during the ontogenesis of the largemouth bass *Micropterus salmoides* (Lacepede, 1802) in the Nakdong River and Upo Wetlands, South Korea. *Indian Journal of Fisheries* **63**(4): 48-54.
- Jonsson, N. 1991. Influence of water flow, water temperature and light on fish migrations in rivers. *Nordic Journal of Freshwater Research* **66**: 20-35.
- Kanno, Y., C.U. Schmidt, S.B. Cook and H.T. 2012. Mattingly. Variation in microhabitat use of the threatened spotfin chub (*Erimonax monchus*) among stream sites and seasons. *Ecology of Freshwater Fish* **21**: 363-374.
- Kim, H.S., H. Yang and Y.K. Hong. 2014. Population ecology of endangered fish *Gobiobotia naktongensis* inhabiting the Gamcheon Stream, Nakdonggang River (Pisces: Gobiioninae). *Korean Journal of Ichthyology* **26**(1): 1-10. (in Korean)
- Kim, I.S., Y. Choi, C.R. Lee, Y.J. Lee, B.J. Kim and J.H. Kim. 2005. Illustrated Book of Korean Fishes. KyoHak, Seoul. 615pp. (in Korean)
- Kim, I.T., J.R. Park and W.J. Kim. 2013. Indirect Evaluation of Aquatic Animal Diversity in Ilsan Lake through the Analysis of the Growing Condition and Stomach Contents of Largemouth Bass, *Micropterus salmoides*. *Journal of Korean*

- Society of Environmental Engineers* **35**(12): 953-959. (in Korean)
- Ko, M.H., I.R. Lee and I.C. Bang. 2013. Egg development and early life history of endangered species *Gobiobotia naktongensis* (Pisces: Cyprinidae). *Korean Journal of Ichthyology* **25**(1): 9-16. (in Korean)
- Ko, M.H., J.Y. Park and Y.J. Lee. 2008. Feeding Habits of an Introduced Large Mouth Bass, *Micropterus salmoides* (Perciformes; Centrarchidae), and Its Influence on Ichthyofauna in the Lake Okjeong, Korea. *Korean Journal of Ichthyology* **20**(1): 36-44. (in Korean)
- Labonne, J., S. Allouche and P. Gaudin. 2003. Use of a generalized linear model to test habitat preferences: the example of Zingel asper, an endemic endangered percid of the River Rhône. *Freshwater Biology* **48**: 687-697.
- Matthews, W.J. 1998. Patterns in Freshwater Fish Ecology. Kluwer Academic Publishers, Massachusetts. 756pp.
- McElroy, K.N., M.P. Beakes and J.E. Merz. 2018. Hide and seek: Turbidity, cover, and ontogeny influence aggregation behavior in juvenile salmon. *Ecosphere* **9**(4): e02175.
- McKee, A., I. MacDonald, S.C. Farina and A.P. Summers. 2016. Undulation frequency affects burial performance in living and model flatfishes. *Zoology* **199**(2016): 75-80.
- ME (Ministry of Environment) and Kwater. 2017. Ecological Health Investigation of Naseong Stream for conservation and restoration of Endangered Freshwater Fish. ME, Sejong. 152pp. (in Korean)
- Morioka, T. 2005. Onset of burying behavior concurrent with growth and morphological changes in hatchery-reared Japanese sandfish *Arctoscopus japonicus*. *Fisheries Science* **71**: 242-244.
- NIBR (National Institute of Biological Resources). 2019. Red Data Book of Republic of Korea (2 ed). Volume 3. Freshwater Fishes. NIBR, Incheon. 250pp. (in Korean)
- NIE (National Institute of Ecology). 2019. The detailed investigation of endangered *Gobiobotia naktongensis* in the Geum River watershed. NIE, Yeongyang. 87pp. (in Korean)
- O'Brien, M.S. and D.E. Facey. 2008. Habitat use by the Eastern Sand Darter, *Ammocrypta pellucida*, in two Lake Champlain tributaries. *Canadian Field-Naturalist* **122**(3): 239-246.
- Park, J.S., S.H. Kim, H.T. Kim, J.G. Kim, J.Y. Park and H.S. Kim. 2019. Study on Feeding Habits of *Micropterus salmoides* in Habitat Types from Korea. *Korean Journal of Ichthyology* **31**(1): 39-53 (in Korean).
- Poff, N.L. and D.D. Hart. 2002. How dams vary and why it matters for the emerging science of dam removal: an ecological classification of dams is needed to characterize how the tremendous variation in the size, operational mode, age, and number of dams in a river basin influences the potential for restoring regulated rivers via dam removal. *BioScience* **52**(8): 659-668.
- Poff, N.L. and J.D. Allan. 1995. Functional organizational of stream fish assemblages in relation to hydrological variability. *Ecology* **76**(2): 606-627.
- Poff, N.L., J.D. Allan, M.B. Bain, J.R. Karr, K.L. Prestegard, B.D. Richter, R.E. Sparks and J.C. Stromberg. 1997. A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience* **47**: 769-784.
- Power, M.E., W.E. Dietrich and J.C. Finlay. 1996. Dams and downstream aquatic biodiversity: potential food web consequences of hydrologic and geomorphic change. *Environmental Management* **20**: 887-895.
- Prior, K.A. and P.J. Weatherhead. 1996. Habitat Features of Black-Rat Snake *Hibernacula* in Ontario. *Journal of Herpetology* **30**: 211-218.
- Reyjol, Y., P. Lim, A. Belaud and S. Lek. 2001. Modelling of microhabitat used by fish in natural and regulated flows in the river Garonne (France). *Ecological Modelling* **146**(2001): 131-142.
- Ricker, W.E. 1971. Methods for assessment of fish production in freshwater (IBP hand book, no. 3). published for the International Biological Programme, by Blackwell Scientific. 313pp.
- Seo, J.W., H.S. Kim, H.S. Yi and S.A. Jeong. 2009. Preference of Physical Microhabitat on the 1st-class Endangered Species, *Gobiobotia naktongensis* inhabiting the Gam Stream, Tributary of the Nakdong River. *Korean Journal of Ecology and Environment* **42**(4): 495-501. (in Korean)
- Shiau, J., J.R. Watson, R.L. Cramp, M.A. Gordos and C.E. Franklin. 2020. Interactions between water depth, velocity and body size on fish swimming performance: Implications for culvert hydrodynamics. *Ecological Engineering* **156**(2020): 105987.
- Shuter, B.J., A.G. Finstad, I.P. Helland, I. Zweimüller and F. Höller. 2012. The role of winter phenology in shaping the ecology of freshwater fish and their sensitivities to climate change. *Aquatic Sciences* **74**: 637-657.
- Song, M.Y., S.Y. Kim, Y.K. Hong and W.O. Lee. 2017. Studies on the feeding habits of Mandarin fish, *Siniperca scherzeri* in the Soyang lake, Korea. *Korean Journal of Ichthyology* **29**(2): 124-129. (in Korean)
- Stamps, J.A. 1983. The relationship between ontogenetic habitat shifts, competition and predator avoidance in a juvenile lizard (*Anolis aeneus*). *Behavioral Ecology and Sociobiology* **12**: 19-33.
- Stoner, A.W. and M.L. Ottmar. 2003. Relationships between size-specific sediment preferences and burial capabilities in juveniles of two Alaska flatfishes. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **282**(2003): 85-101.
- Syms, C. and G.P. Jones. 2004. Habitat structure, disturbance and the composition of sand-dwelling goby assemblages in a coral reef lagoon. *Marine Ecology Progress Series* **268**: 221-230.
- Tessler, N.R., J.F. Gottgens and M. Kibbey. 2012. The first observations of the Eastern sand darter, *Ammocrypta pellucida*

- (Agassiz), in the Ohio portion of the Maumee River Mainstem in Sixty-five years. *American Midland Naturalist* **167**: 198-204.
- Thompson, L.C. and R. Larsen. 2004. Fish habitat in fresh water stream. UCANR Publications, California. 12pp.
- Thompson, P.A., S.A. Welsh, A.A. Rizzo and D.M. Smith. 2017. Effect of substrate size on sympatric sand darter benthic habitat preferences. *Journal of Freshwater Ecology* **32**(1): 455-465.
- Tyler, J.A. and D.P. Clapp. 1995. Perceptual constraints on stream fish habitat selection effects of food availability and water velocity. *Ecology of Freshwater Fish* **4**(1): 9-16.
- Uchida, K. 1939. The fishes of Tyosen (Korea). Fisheries Experiment Station, Busan. 458pp. (in Japanese)
- Valeix, M., A.J. Loveridge, S. Chammille-Jammes, Z. Davidson, F. Murindagomo, H. Fritz and D.W. Macdonald. 2009. Behavioural adjustments of African herbivores to predation risk by lions: Spatiotemporal variations influence habitat use. *Ecology* **90**: 23-30.
- Watson, J.M., S.M. Coghlan, J. Zydlewski, D.B. Hayes and I.A. Kiraly. 2018. Dam Removal and Fish Passage Improvement Influence Fish Assemblages in the Penobscot River, Maine. *Transactions of the American Fisheries Society* **147**(3): 525-540.
- Wentworth, C.K. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology* **30**: 377-392
- Won, J.S. 2017. Microhabitat segregation of Sand-dwelling fishes in the Naeseong Stream, Korea. Master thesis, Inha University, Incheon. 33pp. (in Korean)
- Yoo, D.U. 2016. Habitat environment, genetic and morphological variation of *Gobiobotia naktongensis* (Cyprinidae, Gobiominae). Master thesis, Kyungpook National University, Daegu. 93pp. (in Korean).
- Zuanon, J., F.A. Bockmann and I. Sazima. 2006. A remarkable sand-dwelling fish assemblage from central Amazonia, with comments on the evolution of psammophily in South American freshwater fishes. *Neotropical Ichthyology* **4**: 107-118.