

Original article

인공증식된 멸종위기종 여울마자의 포식 위험원 노출에 따른 포식자 인지 변화

허문성 · 장민호¹ · 윤주덕*

국립생태원 멸종위기종복원센터, ¹공주대학교 생물교육과

Change of Predator Recognition Depends on Exposure of Predation Risk Source in Captive Breed Endangered Freshwater Fish, *Microphysogobio rapidus*. Moon-Seong Heo (0000-0002-8782-0786), Min-Ho Jang¹ (0000-0003-2331-4232) and Ju-Duk Yoon* (0000-0003-1667-327x) (Research Center for Endangered Species, National Institute of Ecology, Yeongyang 36531, Republic of Korea; ¹Department Biology Education, Kongju National University, Gongju 32588, Republic of Korea)

Abstract Captive breeding and reintroduction are crucial strategies for conserving endangered species populations. However, fish raised in predator-free environments, show a lack of recognition of predation-related stimuli such as chemical and visual signals. It is critical to recognize chemical signals from injured conspecifics, also known as alarm signals, and the order or shape of predators to indicate the spread of predation risk in the habitat. We conducted a laboratory experiment to determine and adjust the optimal exposure period to induce appropriate anti-predator behavior response to different types of stimuli (Chemical, Visual and Chemical + Visual) for the endangered species *Microphysogobio rapidus*. Our results demonstrate that predator avoidance behavior varies depending on the types of stimuli and the duration of predation risk exposure. First, the results showed captive-breed *M. rapidus* show lack of response against conspecific alarm signal (Chemical cue) before the predation risk exposure period and tend to increase response over predation risk exposure time. Second, response to predator (visual cue) tend to peak at 48 hours cumulative exposure, but show dramatic decrease after 72 hours cumulative exposure. Finally, response to the mixed cue (Chemical + visual) tend to peak prior to the predation risk exposure period and show reduced response during subsequent exposure periods. This experiment confirms the lack of responsiveness to conspecific alarm signals in captive-bred *M. rapidus* and the need for an optimal nature behavior enhancement program prior to release of endangered species. Furthermore, responsiveness to predator visual signal peak at 48 hours cumulative exposure, suggest an optimal predation risk exposure period of up to 48 hours.

Key words: predator cognition, captive breeding, chemical signal, visual signal, endangered fish, exposure

서론

Manuscript received 13 December 2023, revised 19 December 2023,
revision accepted 19 December 2023
* Corresponding author: Tel: +82-54-680-7360, Fax: +82-54-680-7329
E-mail: grandblue@nie.re.kr, zmszmsqkek@hanmail.net

담수어류의 개체수 및 종 다양성은 전 세계에서 지속적
으로 감소하고 있다고 알려져 있으며, 양서류 다음으로 절

© 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.

멸위험이 높은 분류군 중 하나이다 (Bruton, 1995). 담수어류의 개체군 확보 및 유지를 위한 서식처 복원 (Geist and Hawkins, 2016), 인공증식 및 방류 (Lamothe *et al.*, 2019; Day *et al.*, 2017), 유전적 다양성 확보 (Fraser, 2008) 등 다양한 보전 및 관리 방안이 제시되고 있다.

어류의 인공증식 및 방류는 멸종위기에 처한 어류의 개체군 회복에 가장 많이 사용되는 대표적인 방법이다 (Edwards *et al.*, 2021). 그러나 다양한 외부 위협요인으로부터 차단된 상태로 통제된 환경에서 사육된 어류들은 야생의 개체와 비교하여 서식지 내 포식자에 대한 인지 행동 등과 같은 생존에 필수적인 행동 학습이 이루어지지 않아 야생에 방류 시 생존율이 자연개체에 비하여 낮게 나타나는 경향이 있다 (Stunz and Minello, 2001; Álvarez and Nicieza, 2003; Malavasi *et al.*, 2004; Johnsson *et al.*, 2014; Clarke *et al.*, 2015). 특히 방류 후 포식자들에 의한 생존율의 감소는 복원에 악영향을 끼치는 것으로 알려져 있다 (Archer and Crowl, 2014).

방류 전 인공증식 개체의 자연성 증진을 위한 대표적인 훈련은 증식 개체의 유영능력 향상 (Bergendahl *et al.*, 2017), 먹이 활동 능력 향상 및 야생 먹이원 적응훈련 (Brown and Laland, 2001), 포식자 인지 능력 증진 훈련 (Berejikian *et al.*, 2003; Olson *et al.*, 2012; Edwards *et al.*, 2021) 등이 있다. 이러한 자연성 증진을 위한 훈련은 주로 사육 환경 풍부화 (Environmental Enrichment)를 통해 시설에서 증식된 개체에게 야생에서 접할 수 있는 다양한 환경을 경험할 기회를 높이는 방식을 통해 진행된다 (Bergendahl *et al.*, 2016). 일반적인 포식자 인지 훈련 방법은 포식자에 직접 노출하는 방식과 동종의 손상된 피부조직에서 나오는 화학적 자극에 노출시켜 포식자의 위험성을 인지시키는 방식이다 (Edwards *et al.*, 2021). 포식자 인지에서 사용되는 대표적인 화학적 자극 중 하나인 알람신호 (Alarm cue)는 포식자 등 위협요인으로 인해 손상된 피부조직에서 흘러나와 동종간 화학적인 정보를 전달하는 때 개체 역할을 하며 포식자로 인해 자극을 받은 개체로부터 분비되어 이를 수신한 개체가 포식의 위험성을 파악하고 지역의 회피, 유영 속도 감소, 무리 행동 등 방어하기 적합한 행동을 취하게 한다고 알려져 있다 (Bairos-Novak *et al.*, 2019; Maximino *et al.*, 2019).

방류 후 생존율을 높이기 위한 자연성 증진에 관한 연구는 북미, 오세아니아, 유럽 등 다양한 국가에서 진행하고 있으나 (Göz, 1941; Mirza and Chivers, 2000; Hawkins *et al.*, 2008; Kopack *et al.*, 2016; Lamothe *et al.*, 2019; Michael *et al.*, 2023), 국내에서는 이러한 자연성 증진에 관한 연구는 부족한 실정이다. 그러나 국내 담수어류를 대상

으로 진행된 방류 전 자연성 증진 연구는 전혀 이루어지지 않은 채 꼬치동자개, 좁수수치, 묵납자루 등과 같은 멸종위기종 개체군 보강을 위한 증식 및 방류는 지속적으로 수행되고 있다.

이번 실험의 대상종인 여울마자 (*Microphysogobio rapidus*)는 잉어목 잉어과의 모래무지아과에 속하는 한국 고유종으로 현재 개체수와 서식지가 급감하여 환경부 지정 멸종위기 야생생물 I급으로 지정되었으며, 최근 심각한 절멸위험으로 인하여 복원을 위한 인공증식 및 방류가 이루어지고 있다. 본 연구에서는 인공증식된 여울마자의 방류 후 생존율 향상을 위하여 국내 최초로 포식자 인지 능력 증진을 위한 연구를 진행하였다. 따라서 본 연구의 목표는 인공 증식된 여울마자의 포식자 인지능력을 포식자 (시각적 자극)와 동종의 알람신호 (화학적 자극)를 이용하여 자극원 노출 기간에 따른 각각의 자극에 대한 여울마자의 포식자 인지 능력의 변화와 두 자극이 동시 (복합적 자극)에 주었을 때의 효과를 확인하여 방류 전 자연성 증진을 위한 최적 훈련 조건 및 훈련시간 파악하여 방류 시 활용가능성을 평가하였다.

재료 및 방법

1. 수중 포식위험 자극원 노출 실험

본 실험은 대한민국 경상북도 영양군에 위치한 국립생태원 멸종위기종 복원센터 어류사육실에서 진행되었다. 실험에 사용된 인공증식 여울마자는 남강유역에서 포획된 친어에게서 얻은 만 1년생으로 성장 기간 동안 포식자를 접한 경험이 없는 개체를 사용하였다. 멸종위기종 포획 허가는 낙동강유역환경청으로부터 허가를 취득하였으며 (허가증 제 2020-29호, 허가증 제 2021-8호), 국립생태원의 동물실험윤리위원회의 승인 후 연구를 수행하였다 (NIEACUC-2021-026).

1) 개체준비

증식개체 준비를 위해 부모로 활용된 야생개체들은 남강 유역에서 산란기인 4~5월 중 포획하여 공기발생기 부착된 수조를 이용하여 연구실로 이송 후 인공수정을 통해 F₁개체를 생산하였다. 실험에 사용된 여울마자는 실험실에서 인위적으로 증식된 개체로 부화 후 만 1년이 지난 250개체를 사용하였다 (60±6 mm, 1.6±0.6 g TL, BW). 이 개체들은 연구실에서 인공부화 이후 일생동안 야생의 포식자를 마주친 경험이 없는 조건을 유지한 개체로, 먹이는 식물성 와퍼 (Hikari, Japan)와 냉동 장구벌레를 급여하였

Table 1. Individual average distance score (mean \pm SD) before and after treatment (Chemical cue, Visual cue, Chemical + visual cue) depend on exposure time (0H: 0 hour, 24H: 24 hour, 48H: 48 hour, 72H: 72 hour).

	0H		24H		48H		72H	
	Before	After	Before	After	Before	After	Before	After
Chemical cue		3.11 \pm 0.22		3.93 \pm 0.26		4.39 \pm 0.29		4.59 \pm 0.17
Visual cue	3.24 \pm 0.12	3.80 \pm 0.21	3.25 \pm 0.22	3.47 \pm 0.31	3.42 \pm 0.17	4.43 \pm 0.26	3.49 \pm 0.13	3.06 \pm 0.24
Chemical + Visual		3.97 \pm 0.26		3.75 \pm 0.18		3.35 \pm 0.25		3.70 \pm 0.23

다. 훈련에 사용할 포식성 어류로는 여울마자 서식처의 대표적인 어식성 어종인 꺾지를 선택하였으며, 꺾지는 여울마자의 주요 서식지이며 복원을 위한 방류지인 낙동강 일대에서 포획 후 실험실로 이송하여 180 L 수조에 순치한 뒤, 인근 하천에서 포획한 어류(버들치, 갈겨니 등)를 주 2회 급이하였다.

실험에 사용된 개체의 측정은 MS-222 (Ethyl 3-amino-benzoate methanesulfonate, Sigma-aldrich, Darmstadt, Germany)를 75 ppm 농도로 준비한 수조에 1분간 개체를 넣어 준 뒤 평형 능력 상실을 확인 후 수조에서 꺼내 전장(TL, mm), 체장(BL, mm), 무게(BW, 0.01 g)를 측정하였다.

2) 자극원 노출 수조 및 실험 수조 준비

(1) 자극원 노출 수조 준비

포식자 인지를 위한 시각, 화학적 자극 노출은 트랙 수조 (450 \times 150 cm)에서 진행하였으며, 여울마자가 포식자를 시각적으로 경험할 수 있도록, 격벽(230 \times 49.5 \times 57 cm)을 수조 가운데에 설치하였다(Fig. 1). 수심과 유속은 여울마자 서식지 환경을 반영하여 수심 20 cm, 최대 유속 1.0 m s⁻¹, 수온 20도로 유지하였다. 격벽에는 화학적 자극의 확산을 위해 지름 5 cm의 구멍을 5 cm 간격으로 조성 후 개체의 이동을 방지하기 위해 그물망으로 이동 방지망을 설치하였다.

(2) 실험수조 준비

여울마자의 자극원 노출 기간 및 자극원(알람신호, 포식자, 포식자+알람신호) 유무에 따른 기피행동 확인 실험은 100 \times 45 \times 40 cm 크기의 수조에서 진행하였으며, 수조 내부 공간을 가로 25 cm씩 4등분한 뒤 우측 첫 번째 공간을 그물망으로 분리하여 포식자 혹은 알람신호를 투입할 자극원 구역으로 사용하였다. 포식자 공간 좌측의 실험 공간은 3구역으로 나누어 포식자 구역에 가까울수록 위험 구역(Danger zone), 중립 구역(Neutral zone), 안전 구역(Safe zone)으로 구분한 뒤, 여울마자의 수조 내부의 밝기를 균

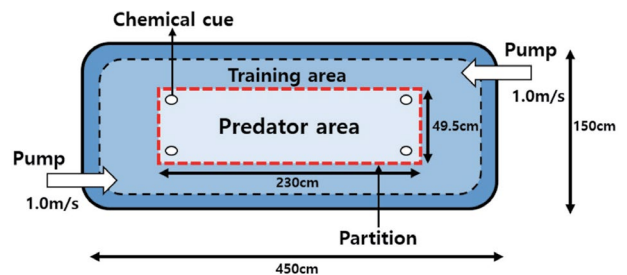


Fig. 1. Schematic diagram of holding tank for training of *Microphysogobio rapidus* (viewed from above). Training area: area for *M. rapidus*. Predator area: area for predatory species, Partition: transparent acryl plate to block predator, Pump: water pump to generate water flow (maximum surface speed = 1.0m/s), Chemical cue: water bottles containing 100ml of prepared conspecific alarm signal.

등하게 하기 위해 수조 20 cm 상공에 조명을 설치하였다. 수조의 전면부는 외부환경으로 인한 자극을 최소화하기 위해 검은색 스펀지를 이용하여 가려주었다.

(3) 알람신호 준비

포식자 인식 실험을 위한 알람신호(화학적 자극원)는 Wisenden (2011)의 연구를 참고하여 사육도중 폐사한 여울마자의 사체를 활용하여 분리한 피부조직 5g을 분쇄한 뒤 증류수 400 mL에 30분간 침전 후 11 μ m 여과 필터로 여과 후 100 mL씩 소분하여 2 L 채수병 4개에 희석한 뒤 훈련 및 실험에 사용하였다.

3) 훈련 진행 (포식자/알람신호 인지 훈련)

포식자 인지 훈련은 수조 중심부에 설치한 격리벽 외부에 준비한 여울마자를 넣어준 뒤 72시간 동안 순치한 후 진행하였다. 훈련 시간은 개체가 가장 활발한 활동을 보이는 오전 10시부터 오후 4시까지 6시간씩 진행하였으며, 훈련 시작 한 시간 전(오전 9시) 여울마자와 꺾지에게 먹이(식물성 와퍼 또는 살아있는 어류) 급이 1시간 후 훈련을 진행하였다.

포식자 노출을 통한 시각적 자극을 위하여 격리벽 내부에 포식자(꺀지)를 넣은 뒤 준비한 알람신호를 채수병에 담아 격리벽 내부의 각 모서리에 설치하여 알람신호의 확산을 유도하였다. 훈련 6시간이 지난 후 넣어둔 포식자는 holding tank에 다시 격리하고 알람신호를 담아둔 채수병을 제거한 뒤 수조 내부의 물을 전량 환수하였다. 여울마자의 포식자 인지 행동 분석은 누적 훈련시간이 24시간을 때마다 무작위로 개체를 선별하여 준비한 실험용 수조로 옮긴 뒤 행동 분석을 진행하였다(Hutchison *et al.*, 2012).

2. 행동 분석 실험

여울마자의 포식자 반응 행동 분석 실험은 준비한 사각 수조(Fig. 2)에서 진행되었다. 훈련 수조에서 무작위로 선별된 10개체를 실험 공간에 옮긴 뒤 30분간 순치 후 실험을 진행하였다. 여울마자의 위치 변화를 기록하기 위하여 수조 수직 상공에 카메라와 조명을 설치하여 여울마자의 행동을 촬영하였다. 촬영은 총 30분간 진행되었으며 아무런 자극을 가하지 않은 15분(대조군), 자극원 공간에 포식자(시각적 자극), 알람신호(화학적 자극), 포식자+알람신호(복합 자극) 중 하나를 넣어 준 뒤 15분(실험군) 간 촬영을 진행하였다. 자극원을 넣는 동안 실험 개체에게 가해지는 자극을 최소화하기 위해 알람신호는 15 mL 코니칼 튜브에 5 mL을 넣은 뒤 수조의 물을 가득 채운 후 자극원 구역에 투입하여 확산을 유도하였다. 포식자 투입 또한 실험 개체에 가해지는 자극을 줄이기 위하여 실험 수조의 뒤에서 파문이 일어나지 않도록 자극원 구역에 넣어주었다. 촬영을 마친 개체는 훈련수조로 다시 옮겨주었으며, 실험 수조는 전량 환수 및 잔여물 제거를 위해 청소 후 실험을 진행하였다. 실험은 누적 훈련 기간 24시간 간격으로 진행하였으며 훈련 전(0H), 24시간 훈련 후(24H), 48시간 훈련 후(48H) 촬영은 자극원별 6번 반복하여 진행하였으며, 72시간 훈련 후(72H)는 개체수 부족으로 인하여 4번 반복하여 촬영을 진행하였다.

3. 분석

자극원 투입 전과 후 15분간 촬영된 영상은 재생프로그램을 이용하여 15초 간격으로 60프레임으로 나눈 뒤 각 프레임별 구분된 수조 내부 3개의 구역에 위치한 여울마자의 개체수를 기록하였다. 여울마자의 위치는 양쪽 눈 사이를 기준으로 하여 기록하였으며, 공간별 개체의 구분을 위하여 자극원 구역에서 멀어질수록 높은 점수(위험구역 1점, 중립구역 3점, 안전구역 5점)를 부여하였다.

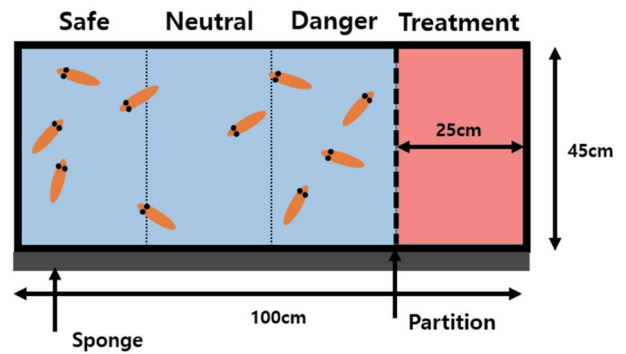


Fig. 2. Schematic diagram of behavior test tank for *Microphysogobio rapidus* (viewed from above) Safe, Neutral, Danger zone (blue): experimental area for *M. rapidus*, each zone equally divided from treatment zone. Treatment: zone (red): three different type of cue treated during behavior test.

각 프레임별로 구역에 위치한 여울마자 개체수에 배경된 점수를 곱한 뒤 모든 구역의 점수를 합한 후 평균을 구하여 각 프레임(f)당 개체별 평균 거리 점수를 구하였다. 실험군(자극원 투입 후)과 대조군(자극원 투입 전)에 해당되는 60프레임의 개체별 평균 거리 점수를 비교하였다. 통계분석은 SPSS (PASW statistics 18, Chicago, US)를 이용하여 자극원 투입 전과 후의 프레임당 개체별 평균 거리 점수(P_f)를 일원배치분산분석(one way ANOVA)을 이용하여 분석하였다(유의수준 $p < 0.01$).

프레임(f)의 개체별 평균 거리 점수(P_f)

$$P_f = \frac{i + 3j + 5k}{n}$$

i = 위험구역 개체수, j = 중립구역 개체수, k = 안전구역 개체수, n = 총 개체수

결 과

포식자 인지 훈련 누적 기간에 따른 여울마자의 행동 반응 변화를 기록 및 분석한 결과 훈련 누적 기간에 따라 주어진 자극원에 대한 반응이 달라짐을 확인하였다.

알람신호에 노출된 여울마자의 훈련 전(0H) 개체별 평균 거리 점수는 알람신호 투입 전과 후 유의미한 차이를 보이나 ($3.24 \pm 0.12 \rightarrow 3.11 \pm 0.24$, $\text{mean} \pm \text{SD}$, $p = 0.017$) 알람신호 투입 후 자극원과 거리를 줄이는 경향이 나타났다. 훈련이 진행됨에 따라 자극원과 거리를 벌리려는 경향이 늘어나 누적 훈련 시간 72시간 후 가장 큰 행동 점수 변화 ($3.49 \pm 0.13 \rightarrow 4.59 \pm 0.17$, $p < 0.01$)를 보여주어 포식

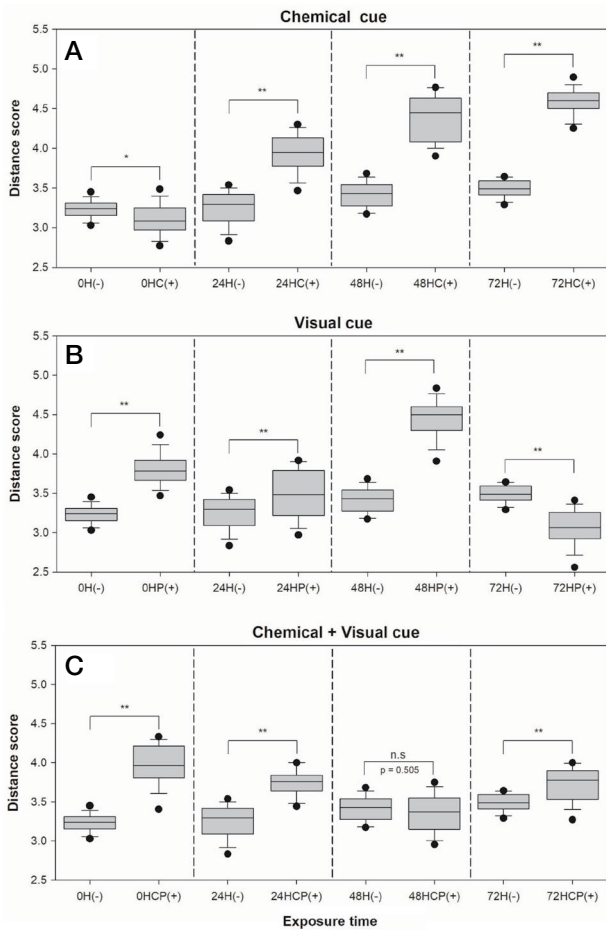


Fig. 3. Before (-) and after (+) individual average distance score of *Microphysogobio rapidus* depend on exposure time (0H: 0 hour, 24H: 24 hour, 48H: 48 hour, 72H: 72 hour) and treatment [C: chemical cue, P: visual (predator) cue, CP: mixed cue (chemical + visual cue)], A: Distance score exposed to chemical cue, B: Distance score exposed to visual (predator) cue, C: Distance score exposed to mixed cue, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, n.s.: not-significant $p > 0.05$.

자 인지 훈련을 통한 점수 변화가 주어진 3가지 자극원 중 가장 크게 나타남을 확인하였으며, 자극원 노출 기간이 길어질수록 큰 점수 변화를 보였다(Fig. 3A).

포식자에 노출된 여울마자의 훈련 전(0H) 개체별 평균 거리 점수는 포식자 투입 전과 후에 증가하는 경향을 보이며($3.24 \pm 0.12 \rightarrow 3.80 \pm 0.21$, $p < 0.01$) 누적 노출 시간 48시간 이후 가장 큰 점수 증가($3.42 \pm 0.17 \rightarrow 4.43 \pm 0.26$, $p < 0.01$)를 보여주었다. 그러나 훈련 72시간 이후 포식자 노출로 인한 거리 점수가 감소($3.49 \pm 0.13 \rightarrow 3.06 \pm 0.24$, $p < 0.01$)하는 것을 확인하였다(Fig. 3B).

알람신호와 포식자에 동시에 노출된 여울마자의 훈련 전(0H) 개체별 평균 거리 점수는 3가지 자극원 중 가장 큰

폭의 점수 변화($3.24 \pm 0.12 \rightarrow 3.97 \pm 0.26$, $p < 0.01$)를 보였으며, 누적 노출 기간이 길어질수록 점수 변화 폭이 감소하여 누적 노출시간 48시간 후 자극원 투입 전 후 점수는 유의미한 차이를 보이지 않았다($3.42 \pm 0.17 \rightarrow 3.35 \pm 0.25$, $p = 0.505$). 누적 노출 기간 72시간 이후 다시 점수가 증가하는($3.49 \pm 0.13 \rightarrow 3.70 \pm 0.23$, $p < 0.01$) 경향이 나타남을 확인하였다(Fig. 3C).

고찰

인공적인 환경에서 증식된 여울마자의 포식 위험 자극원에 대한 회피 행동을 분석한 결과 후각(알람신호) 자극에 대한 여울마자의 회피 반응은 자극원 누적 노출 기간이 길어짐에 따라 반응성이 증가하는 경향을 보였으며, 시각(포식자) 자극 혹은 복합 자극(포식자와 알람신호)에 대한 여울마자의 반응은 누적 노출 기간이 길어짐에 따라 반응성이 감소하는 경향을 확인하였다.

먹이 정보, 포식 위험성, 동족의 다양한 자극이 혼재하는 수중 환경에서 필요한 정보와 불필요한 정보를 선별하는 과정은 다양한 상황에서 유연한 행동 결정을 수행에 중요한 역할을 한다(Larson and McCormick, 2005). 그중 지속적으로 큰 포식 위험성에 노출되는 환경에서 피식자는 포식자의 모습과 체취, 동족의 알람신호와 같은 자극에 적응하여 반응이 무너지는 행동의 습관화(Habituation)는(Ferrari *et al.*, 2010) 이러한 행동 양상의 변화는 먹이 생물이 자극원에 지속적으로 노출되었을 때 방어 행동에 소모되는 에너지와 먹이 활동을 통해 얻는 에너지 사이의 적절한 균형을 이루어 가장 효율적인 방법을 선택하는 것이 가능하게 하는 일종의 생존 전략으로 기능하는 것으로 알려져 있다(Brown *et al.*, 2006).

포식자 인지 훈련 기간이 길어짐에 따라 여울마자는 포식자에 대한 반응성이 48시간 훈련 후 가장 높은 개체별 평균 거리점수를 보였으나, 훈련 72시간 후 개체별 평균 거리점수는 감소하여, 훈련 이전보다 낮은 개체별 평균 거리점수를 보인 것은 훈련 48시간 이후부터 습관화(Habituation)로 인해 포식자에 대한 반응성이 떨어지기 시작하는 것으로 판단된다(Vilhunen, 2006). 그러나 먹이 생물들이 포식자로부터 얻는 정보는 포식자의 크기와 움직임과 같은 시각적인 자극만이 아니라 포식자의 체취와 같은 포식자를 특징하는 후각적 자극인 카이로몬(Kairomone)을 통해서 위험을 인지하는 것으로 알려져 있다(Bairos-Novak *et al.*, 2019). 따라서 위 두 자극의 노출 시간에 따른 행동 반응 실험을 통해 여울마자가 포식자로

부터 얻는 시각적 자극과 후각적 자극 중 어떤 종류의 자극에 주로 반응하는지 그리고 어떤 자극의 반응성이 먼저 무뎠는지 등을 확인하여 보다 효율적인 훈련 기간 설정에 도움이 될 것으로 생각된다.

포식자(시각적 자극)에 노출된 실험군과는 다르게 알람 신호(화학적 자극)에 노출된 실험군은 훈련 이전에는 알람 신호가 투입 후 자극원과 가까워지려는 경향을 보였으나, 훈련이 진행될수록 자극원과 거리를 벌리려는 경향이 훈련 기간이 길어질수록 커지는 반응을 보였다. 이러한 결과는 알람신호를 통한 화학적인 자극은 먹이생물들의 기피 행동을 유발하여 위험원에서 멀어지게 하는 작용을 하지만(Wishingrad *et al.*, 2014), 이러한 행동은 후천적인 학습을 통해 획득되어 훈련 이전과 이후의 변동 폭이 가장 큰 것으로 생각된다.

포식자와 알람신호 동시(복합적 자극)에 노출된 실험군은 훈련 이전 가장 큰 차이를 보인 뒤 24시간 훈련 이후 변동 폭이 줄어든 상태가 72시간 훈련 이후에도 유지되는 반응을 보였다. 이러한 결과는 알람신호와 포식자 동시 노출로 인한 predation risk가 가장 높은 환경으로 인해 자극에 대한 습관화가 일어나 변동 폭이 줄어든 것으로 판단된다(Imre *et al.*, 2016). 또한 포식자 혹은 포식자와 알람신호에 동시에 노출된 실험군은 훈련 이전에도 기피 행동을 보이는 것으로 보아 시각적 자극에 대한 회피 반응은 후천적으로 얻어지는 것보다 본능적인 선천적인 특징을 보여, 방류 전 후천적 학습을 통해 인지능력을 얻게 되는 화학적 자극에 대한 훈련의 필요성이 더욱 높다고 판단된다.

인공 증식되어 야생으로 방류된 개체의 낮은 생존율은 여러 방류 사업에 지속적으로 발생되고 있는 사항이다(Salvanes and Braithwaite, 2006; Billman *et al.*, 2011). 미국 클리어워터 강에서 인공증식 왕연어(*Oncorhynchus tshawytscha*)의 방류 전과 후 방류지의 대표 포식성 어종인 Northern pikeminnow(*Ptychocheilus oregonensis*)의 위장 내용물을 확인한 결과 방류 24시간 후 내용물의 54%, 7일 후 86%의 위장 내용물이 연어 치어로 나타나 도착 포식성 어류로 인한 방류 효율 저하가 확인되어(Shively, 1996) 방류 전 포식 위험성을 줄이는 방법의 개발이 필요하다. 국외에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 방류 전 포식자에 대한 인지 훈련을 수행하고 있으나, 훈련을 통한 방류 개체의 생존율이 크게 변화하지 않는 경우와(Berejikian *et al.*, 1999), 두배 가까이 상승하는 경우가(D'Anna *et al.*, 2012) 나타나 방류 개체에 대한 최적 훈련 조건과 기간 파악 연구를 통한 개체별 맞춤 훈련 일정의 확립이 방류 후 생존율 상승에 큰 역할을 할 것으로 판단된다. 또한 방류 후 지속적인 모니터링을 통해 생존율 감소 원인을 지속적

으로 파악하고 방류 개체의 동태를 확인하는 연구도 함께 이루어질 필요가 있다고 판단된다.

적 요

어류의 시각적 및 화학적 정보를 토대로 포식자를 인지하는 능력은 개체가 자연에서 생활하는 동안 학습을 통해서 확보된다. 하지만 인공증식된 멸종위기종들의 경우 자연적응력 부족으로 인한 복원효율성 저하가 지속적으로 발생하고 있다. 따라서 본 연구에서는 복원을 위해 인공증식된 멸종위기종 여울마자의 자연적응력 증진을 위해 포식자 인지 능력 증진을 수행하였다. 연구결과 포식자 인지 훈련 기간에 따라 자극원에 대한 반응성이 달라짐을 확인할 수 있었으며, 인공증식된 여울마자는 동종의 알람신호를 통해 위험을 인지하는 능력이 떨어져 있었으며, 이는 포식 위험원 노출을 통한 훈련으로 개선이 가능하였고, 포식자에 노출되었을 때 포식자와 알람신호에 동시에 노출되었을 경우 훈련 기간이 길어짐에 따라 자극에 대한 반응성이 줄어드는 것을 확인하였다. 알람신호에 대한 반응 시간이 지날수록 커지는 경향을, 포식자에 대한 반응은 훈련 48시간 후 가장 높은 반응을 보이고 72시간 후 반응성이 떨어지는 경향을, 알람신호와 포식자 동시 노출에 대한 반응은 훈련 이전 가장 높은 반응을 보인 뒤 반응성이 낮아진 채로 유지되는 경향을 보였다. 따라서 방류 전 인공증식 개체의 동종의 알람신호(화학적 자극)에 대한 반응성을 높이기 위한 프로그램이 필요하며, 포식자(시각적 자극)에 대한 반응성도 높게 나타난 48시간가량의 포식 위험원 노출이 적합하다고 판단된다. 본 실험을 통해 인공증식 여울마자의 동종 알람신호 자극에 대한 반응성 부족이 확인되었으며 멸종위기종 방류전 자연성 증진 프로그램의 운용의 필요성이 확인되었다.

저자정보 윤주덕(국립생태원 멸종위기종복원센터 책임연구원), 허문성(국립생태원 멸종위기종복원센터 전문위원), 장민호(공주대학교 생물교육과 교수)

저자기도 연구책임: 윤주덕, 개념설정: 윤주덕, 허문성, 장민호, 연구 수행: 허문성, 자료 분석: 허문성, 윤주덕, 논문 작성: 허문성, 윤주덕

이해관계 이 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없음

연구비 본 논문은 환경부의 지원을 받아 수행하였습니다(NIE-고유연구-2023-47).

REFERENCES

- Álvarez, D. and A.G. Nicieza. 2003. Predator avoidance behaviour in wild and hatchery-reared brown trout: the role of experience and domestication. *Journal of Fish Biology* **63**: 1565-1577.
- Archer, S.K. and T.A. Crowl. 2014. Retention of learned predator recognition in an endangered sucker *Chasmistes liorus liorus*. *Aquatic Biology* **20**: 195-202.
- Bairos-Novak, K.R., M.C.O. Ferrari and D.P. Chivers. 2019. A novel alarm signal in aquatic prey: Familiar minnows coordinate group defences against predators through chemical disturbance cues. *Journal of Animal Ecology* **88**: 1281-1290.
- Berejikian, B.A., R.J.F. Smith, E.P. Tezak, S.L. Schroder and C.M. Knudsen. 1999. Chemical alarm signals and complex hatchery rearing habitats affect antipredator behavior and survival of chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) juveniles. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **56**(5): 830-838.
- Berejikian, B.A., E.P. Tezak and A.L. LaRae. 2003. Innate and enhanced predator recognition in hatchery-reared chinook salmon. *Environmental Biology of Fishes* **67**: 241-251.
- Bergendahl, A.I., A.G.V. Salvanes and V.A. Braithwaite. 2016. Determining the effects of duration and recency of exposure to environmental enrichment. *Applied Animal Behaviour Science* **176**: 163-169.
- Bergendahl, A.I., S. Miller, C. Depasquale, L. Giralico and V.A. Braithwaite. 2017. Becoming a better swimmer: structural complexity enhances agility in a captive-reared fish. *Journal of Fish Biology* **90**(3): 1112-1117.
- Billman, E.J., J.E. Rasmussen and J. Watson. 2011. Evaluation of Release Strategies for Captive-Reared June Sucker Based on Poststocking Survival. *Western North American Naturalist* **71**(4): 481-489.
- Brown, C. and K. Laland. 2001. Social learning and life skills training for hatchery reared fish. *Journal of Fish Biology* **59**: 471-493.
- Brown, G.E., A.C. Rive, M.C.O. Ferrari and D.P. Chivers. 2006. The dynamic nature of antipredator behavior: prey fish integrate threat-sensitive antipredator responses within background levels of predation risk. *Behavioral Ecology Sociobiology* **61**: 9-16.
- Bruton, M.N. 1995. Have fishes had their chips? The dilemma of threatened fishes. *Environmental Biology of Fishes* **43**: 1-27.
- Clarke, C.N., D.J. Fraser and C.F. Purchase. 2015. Lifelong and carry-over effects of early captive exposure in a recovery program for Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Animal Conservation* **19**(4): 350-359.
- D'Anna, G., V.M. Giacalone, T.V. Fernández, A.M. Vaccaro, C. Pipitone, S. Mirto, S. Mazzola and F. Badalamenti. 2012. Effects of predator and shelter conditioning on hatchery-reared white seabream *Diplodus sargus* (L., 1758) released at sea. *Aquaculture* **356-357**: 91-97.
- Day, J.L., J.L. Jacobs and J. Rasmussen. 2017. Considerations for the Propagation and Conservation of Endangered Lake Suckers of the Western United States. *Journal of Fish and Wildlife Management* **8**(1): 301-312.
- Edwards, M.C., C. Ford, J.M. Hoy, S. FitzGibbon and P.J. Murray. 2021. How to train your wildlife: A review of predator avoidance training. *Applied Animal Behaviour Science* **234**: 105170.
- Ferrari, M.C.O., C.K. Elvidge, C.D. Jackson, D.P. Chivers and G.E. Brown. 2010. The responses of prey fish to temporal variation in predation risk: Sensory habituation or risk assessment? *Behavioral Ecology* **21**(3): 532-536.
- Fraser, D.J. 2008. How well can captive breeding programs conserve biodiversity? A review of salmonids. *Evolutionary Applications* **1**(4): 535-586.
- Geist, J. and S.J. Hawkins. 2016. Habitat recovery and restoration in aquatic ecosystems: current progress and future challenges. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystem* **26**: 942-962.
- Göz, H. 1941. Über den Art-und Individualgeruch bei Fischen. *Zeitschrift Vergleichende Physiologie* **29**: 1-45.
- Hawkins, L.A., A.E. Magurran and J.D. Armstrong. 2008. Ontogenetic learning of predator recognition in hatchery-reared Atlantic salmon, *Salmo salar*. *Animal Behaviour* **75**: 1663-1671.
- Hutchison, M., D. Stewart, K. Chilcott, A. Butcher, A. Henderson, M. McLennan and P. Smith. 2012. Strategies to improve post release survival of hatchery-reared threatened fish species. *Murray-Darling Basin Authority, Publication* **135**(11).
- Imre, I., R.T. Di Rocco, G.E. Brown and N.S. Johnson. 2016. Habituation of adult sea lamprey repeatedly exposed to damage-released alarm and predator cues. *Environmental Biology of Fishes* **99**: 613-620.
- Johnsson, J.I., S. Brockmark and J. Näslund. 2014. Environmental effects on behavioural development consequences for fitness of captive-reared fishes in the wild. *Journal of Fish Biology* **85**: 1946-1971.
- Kopack, C.J., E.D. Broder, E.R. Fetherman, J.M. Lepak and L.M. Angeloni. 2016. The effect of a single prerelease exposure to conspecific alarm cue on poststocking survival in three strains of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Canadian Journal of Zoology* **94**(9): 661-664.
- Lamothe, K.A., D.A.R. Drake, T.E. Pitcher, J.E. Broome, A.J. Dextrase, A. Gillespie, N.E. Mandrak, M.S. Poesch, S.M. Reid and N. Vachon. 2019. Reintroduction of fishes in Canada: a review of research progress for SARA-listed species. *Environmental Reviews* **27**(4): 575-599.
- Larson, J.K. and M.I. McCormick. 2005. The role of chemical alarm signals in facilitating learned recognition of novel chemical cues in a coral reef fish. *Animal Behaviour*

- 69(1): 51-57.
- Malavasi, S., V. Georgalas, M. Lugli, P. Torricelli and D. Mainardi. 2004. Differences in the pattern of antipredator behaviour between hatchery-reared and wild European sea bass juveniles. *Journal of Fish Biology* **65**: 143-155.
- Maximino, C., R.X. do Carmo Silva, K. dos Santos Campos, J.S. de Oliveira, S.P. Rocha, M.P. Pyterson, D.P. dos Santos Souza, L.M. Feitosa, S.R. Ikeda, A.F. Pimentel and P.N. Ramos. 2019. Sensory ecology of ostariophysan alarm substances. *Journal of Fish Biology* **95**(1): 274-286.
- Michael, H., B. Adam and N. Andrew. 2023. Conditioning to predators improves survival of stocked Murray cod (*Maccullochella peelii*) fingerlings. *Marine and Freshwater Research* **74**: 1039-1049.
- Mirza, R.S. and D.P. Chivers. 2000. Predator-recognition training enhances survival of brook trout: evidence from laboratory and field-enclosure studies. *Canadian Journal of Zoology* **78**(12): 2198-2208.
- Olson, J.A., J.M. Olson, R.E. Walsh and B.D. Wisenden. 2012. A Method to Train Groups of Predator-Naive Fish to Recognize and Respond to Predators When Released into the Natural Environment. *North American Journal of Fisheries Management* **32**(1): 77-81.
- Salvanes, A.G.V. and Braithwaite, V. 2006. The need to understand the behaviour of fish reared for mariculture or restocking. *ICES Journal of Marine Science* **63**(2): 345-354.
- Shively, R.S., T.P. Poe and S.T. Sauter. 1996. Feeding Response by Northern Squawfish to a Hatchery Release of Juvenile Salmonids in the Clearwater River, Idaho. *Transactions of the American Fisheries Society* **125**(2): 230-236.
- Stunz, G.W. and T.J. Minello. 2001. Habitat-related predation on juvenile wild-caught and hatchery-reared red drum *Sciaenops ocellatus* (Linnaeus). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **260**(1): 13-25.
- Vilhunen, S. 2006. Repeated antipredator conditioning: a pathway to habituation or to better avoidance?. *Journal of Fish Biology* **68**: 25-43.
- Wisenden, B.D. 2011. Quantifying anti-predator response to chemical alarm cues, p. 49-60. *In: Zebrafish Behavioral Protocols* (Kalueff, A.V., P. Hart, J. LaPorte, eds.). Humana Press (Springer Science).
- Wishingrad, V., M.C. Ferrari and D.P. Chivers. 2014. Behavioural and morphological defences in a fish with a complex anti-predator phenotype. *Animal Behaviour* **95**: 137-143.