

## 고 수온 노출에 따른 자연산 볼볼락 *Sebastes thompsoni*의 행동반응 및 내성 한계

윤성진\*, 박진혁

한국해양과학기술원 울릉도-독도해양연구기지

## Behavioral responses and tolerance limits of wild goldeye rockfish *Sebastes thompsoni* to high temperature exposure

Sung-Jin Yoon\* and Jin-Hyeok Park

Ulleungdo-Docdo Ocean Science Station, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Ulleung 40205, Republic of Korea

### \*Corresponding author

Sung-Jin Yoon  
Tel. 054-791-8404  
E-mail. sjyon@kiost.ac.kr

Received: 24 June 2022

First Revised: 16 August 2022

Second Revised: 21 August 2022

Revision accepted: 22 August 2022

**Abstract:** To investigate the tolerance limit and critical thermal maximum (CTM), behavioral responses of wild goldeye rockfish *Sebastes thompsoni* according to exposure to high water temperature were observed using a continuous behavior tracking system. As a result, behavioral index (BI) of *S. thompsoni* in each temperature (20.0, 25.0, and 30.0°C) showed a significant difference ( $p < 0.05$ ) when compared with the value measured in a stable condition of 15.0°C. The activity level of *S. thompsoni* exposed to 25.0°C decreased sharply after 20 hours. Their rest time at the bottom of experiment chamber increased, and their normal swimming and metabolic activities were disturbed. In addition, at a high water temperature of 30.0°C, *S. thompsoni* reached the limit of resistance and showed a sub-lethal reaction of swimming behavior, with energy consumption in the body increased and all test organisms died. In conclusion, the eco-physiological response of *S. thompsoni* to water temperature varied greatly depending on the fluctuation range of the exposed temperature and the exposure time. In addition, the tolerance limit of *S. thompsoni* to high water temperature was predicted to be 25.0–30.0°C. The maximum critical thermal that had a great influence on the survival of this species was found to be around 30.0°C.

**Keywords:** *Sebastes thompsoni*, high temperature exposure, tolerance limit, critical thermal maximum, CTM

## 서 론

솜뱅이목 양볼락류 (Scorpaenidae) 어류는 자원학적뿐만 아니라 경제적으로 가치가 높아 양식산업에 이용하기

위한 다양한 연구가 진행되었다 (Lee *et al.* 2013; Mizanur *et al.* 2014). 국내에서는 볼락류 어류를 대상으로 한 다양한 연구결과가 보고되었는데, 최근에 수행된 연구로는 조피볼락을 대상으로 수온과 저산소에 따른 호흡대사 및 혈

액성상 변화 연구, 수온과 염분 노출에 따른 생존, 대사 및 조직학적 변화 연구 등이 있으며, 볼락의 경우 수온과 광주기에 따른 치어의 산소소비율 및 행동 분석 등의 연구가 주로 수행되었다(Oh and Noh 2006; Heo *et al.* 2016; Yang *et al.* 2016, 2017; Kim 2021a).

이 중 국내에서 ‘열기’라고 부르는 볼락(*Sebastes thompsoni*)은 수요자의 선호도가 높은 종으로 구분하여 양식산업화를 위한 다양한 연구가 시도된 바 있다. 현재까지 진행된 볼락 관련 연구는 현장에서 채집된 성어를 대상으로 한 생식주기, 먹이선호도, 생식생태, 연령 및 성장, 성숙과 산란 특성 등의 연구결과가 보고되었으며(Lee *et al.* 1998; Huh *et al.* 2008; Baeck *et al.* 2010), 자치어를 대상으로 초기 먹이생물 및 생활사와 관련된 기초 연구가 수행된 바 있다(Nagasawa and Kobayashi 1995; Kotita and Omori 1998, 1999; Kim *et al.* 2017). 한편 볼락은 수심 70~50 m의 암반 저층에 서식하는 정착성 어류로써 어획 후 표층으로 올라오는 과정에서 부레에 손상을 주어 현장에서는 생존한 상태로 채집하기 어렵기 때문에 종의 생태 및 생리적 특성이 명확하게 규명되지 않은 상황이다. 일반적으로 볼락은 15°C 이하 수온에서 주로 서식하며, 저 수온기인 1월부터 4월에 채집되는 것으로 알려져 있으나 종에 대한 생태·생리활성에 영향을 미치는 고 수온의 한계점에 대해서는 거의 보고된 바 없다(Yang *et al.* 2016). 특히 본 종은 경제적 가치를 인정받고 있으나 자연에서 채집된 개체를 가두리와 같은 인위적인 환경에서 사육할 때 생태·생리 활동에 영향을 미치는 임계수온 및 아치사 반응을 규명하기 위한 연구는 수행된 바 없다.

환경변화에 따른 생물의 스트레스 반응은 기존의 생태독성평가 방법과 대상생물의 행동관찰을 통해 수집된 영상자료를 수집하여 분석하는 기법이 사용되고 있다. 특히 행동분석은 생물의 움직임을 실시간 연속적으로 관찰하는 방법이 고안됨에 따라 장기간 동안 행동패턴 자료를 수집하고 저장함으로써 생물의 스트레스 반응, 내성한계 및 아치사 반응까지 연속적으로 분석 가능한 수단으로 사용되어 왔다(Kim 2021b; Yoon 2021a).

이에 본 연구는 자연에서 채집한 볼락을 대상으로 고 수온 노출에 따른 생물의 행동반응 및 내성한계(tolerance limit)를 규명하기 위하여 연속적으로 행동관찰이 가능한 추적시스템을 사용하여 노출 수온구간별 행동패턴의 변화, 임계 수온범위 및 아치사 행동반응을 분석하였다.

## 재료 및 방법

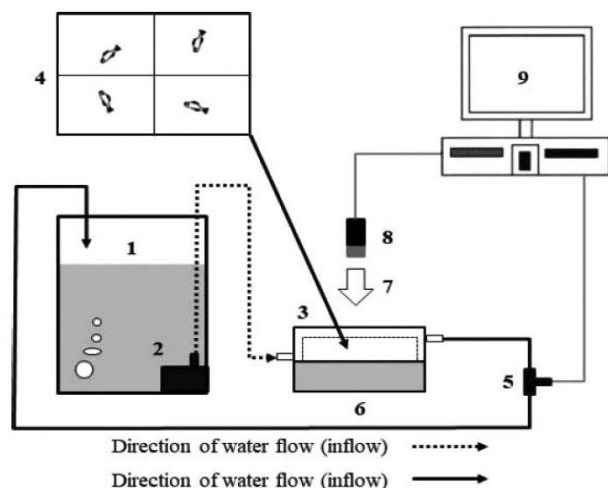
### 1. 실험생물 유지 및 관리

본 연구에 사용된 볼락은 울릉도 연안 수심 70 m 부근에서 어민들이 채집한 200개체(18.3±2.4 cm, 102.3±50.9 gWWt) 가량을 구입하여 실험실 내 2톤 수조로 옮기고, 수온 14.0±1.0°C, 염분 32.0±0.5 psu, pH 7.9±0.1 및 90.0% 이상 산소포화농도 환경에서 실험 전까지 유지하였다. 실험생물 유지기간 동안 먹이는 상업용 EP 사료(Otohime S1 Herame, Japan)를 1일 1회 공급하였으며, 조도는 실험실 환경(≒ 3,000 Lux), 광주기는 12시간 조명과 12시간 무조명(12 h Lightness : 12 h Darkness)을 유지하였다. 사육용수는 1.0 μm 필터를 사용하여 지수식(200 L min<sup>-1</sup>)으로 수조에 공급하였다.

### 2. 실험생물의 행동반응 모니터링

실험생물의 행동관찰은 실험수조 내에서 생물이 수영한 거리(swimming distance), 수영속도(swimming velocity), 프랙탈 차원(fractal dimension) 값을 변수로 하여 각각의 변수마다 측정구간을 나누어 점수를 매긴 후 최종적으로 3개의 변수가 조합된 하나의 행동지수(BI, behavioral index)를 산출하였다(Yoon 2021a). 실험생물의 행동관찰은 4개의 구획으로 구분된 60 L 투명 아크릴 수조 하부에 백색 LED(light emitting diode, 3,000 Lux)를 설치하고, 상부에 웹 카메라를 설치하여 각각의 분할영역에서 움직이는 개체의 행동패턴을 연속적으로 추적하였다(Fig. 1). 본 연구에 사용된 연속 행동 모니터링 시스템은 자체 개발한 장치(continuous behavior monitoring system)를 사용하였으며, 장치의 원리 및 상세한 내용은 기 수행된 연구에 자세히 설명되어 있다(Yoon 2021b).

실험생물은 handling에 의한 생물의 초기 스트레스 반응을 최소화하기 위해 실험생물을 수조에 입식한 후 12시간 이상 적응기간을 거친 후 실험을 수행하였다. 볼락의 행동변화는 첫 번째, 안정된 상태(수온 15.0±1.0°C, 염분 32.0±0.5 psu)에서 120시간가량 생물의 행동패턴을 관찰하였다(normal condition). 두 번째, 수온 노출에 따른 실험생물의 행동반응은 실험초기 15.0±1.0°C 수온에서 48시간 동안 생물의 행동변수를 측정 후(대조수온) 48시간마다 점진적으로 5°C씩 최대 30.0±1.0°C 범위까지 상승



**Fig. 1.** Schematic (not to scale) of apparatus used to observe behavioral pattern in the test organisms. 1: reservoir container, 2: aqua pump, 3: water support chamber, 4: test chamber, 5: temperature sensor, 6: light emitting diode (LED), 7: camera tracking direction, 8: web-camera, 9: computer for data storage.

시켰다 ( $\Delta T = 5^{\circ}\text{C} \cdot 48\text{h}^{-1}$ ). 실험용수는  $1.0\ \mu\text{m}$  필터를 사용하여 순환식 ( $200\ \text{L min}^{-1}$ )으로 행동관찰수조에 공급하였다. 실험용수의 염분은 사육용수와 비슷하게 염분  $32.0 \pm 0.5\ \text{psu}$ , pH  $7.9 \pm 0.1$  및 산소포화농도는 90.0% 이상을 유지하였으며, 3회 반복 실험하였다 (Table 1). 실험생물의 행동은 행동추적프로그램을 이용하여 실시간으로 추적하였으며, 생물의 3가지 행동변수와 BI는 텍스트 파일의 형태로 메인컴퓨터에 저장하여 차후 행동 분석을 위한 자료로 활용하였다.

### 3. 자료분석

실험생물의 행동분석은 KaleidaGraph 프로그램 (Kaleida Graph 4.5, Synergy Software, Germany)을 이용하여 2% weight smooth curve를 통해 측정값의 변동 추이를 분석하였다. BI의 주요 변동패턴 분석은 데이터 중심을 통해 가장 적합한 부드러운 곡선을 그릴 수 있는 가중 최소-제곱 오차방법 (weighted least-squares error method)을 사용하여 최적곡선으로 나타내었다 (Kim *et al.* 2006). 측정된 데이터 값으로부터 각각의 노출 염분별 통계 값을 산출하였으며, 통계 값은 평균  $\pm$  표준편차 (mean  $\pm$  SD)를 계산하여 그래프로 나타내었다. 실험생물의 스트레스 반응 여부는 SPSS statistics version 18.0 (SPSS Inc., USA)의 일원분산분석 (One-way ANOVA)을 통해 대조구에서 측정된 BI 값과

**Table 1.** Experimental condition for measuring behavior responses of the goldeye rockfish *Sebastes thompsoni*. Test animal ( $n=200$ ) were measured  $18.3 \pm 2.4\ \text{cm}$  in length with  $102.3 \pm 50.9\ \text{g}$  in wet weight. Statistical values were computed for each batch from 41,878–60,242 data points measured. Values are presented as mean  $\pm$  SD.

	Experimental condition
Salinity (psu)	$32.0 \pm 0.5$
pH	$7.9 \pm 0.1$
Oxygen saturation (%)	$< 90.0\%$
Chamber volume (L)	60
Volume of test seawater (L)	45
Flow rate ( $\text{mL min}^{-1}$ )	200.0
Duration of the experiment (h)	120.0–168.1
Number of points measured ( $n$ )	41,878–60,242
Total length (cm)	$18.3 \pm 2.4$
Wet weight (gWWt)	$102.3 \pm 50.9$
Number of experiments ( $n$ )	6
Total number of test animals ( $n$ )	24

노출 수온별로 수집된 BI 자료를 비교하여 유의성을 검증하였으며, 유의수준은  $p < 0.05$ 로 설정하였다.

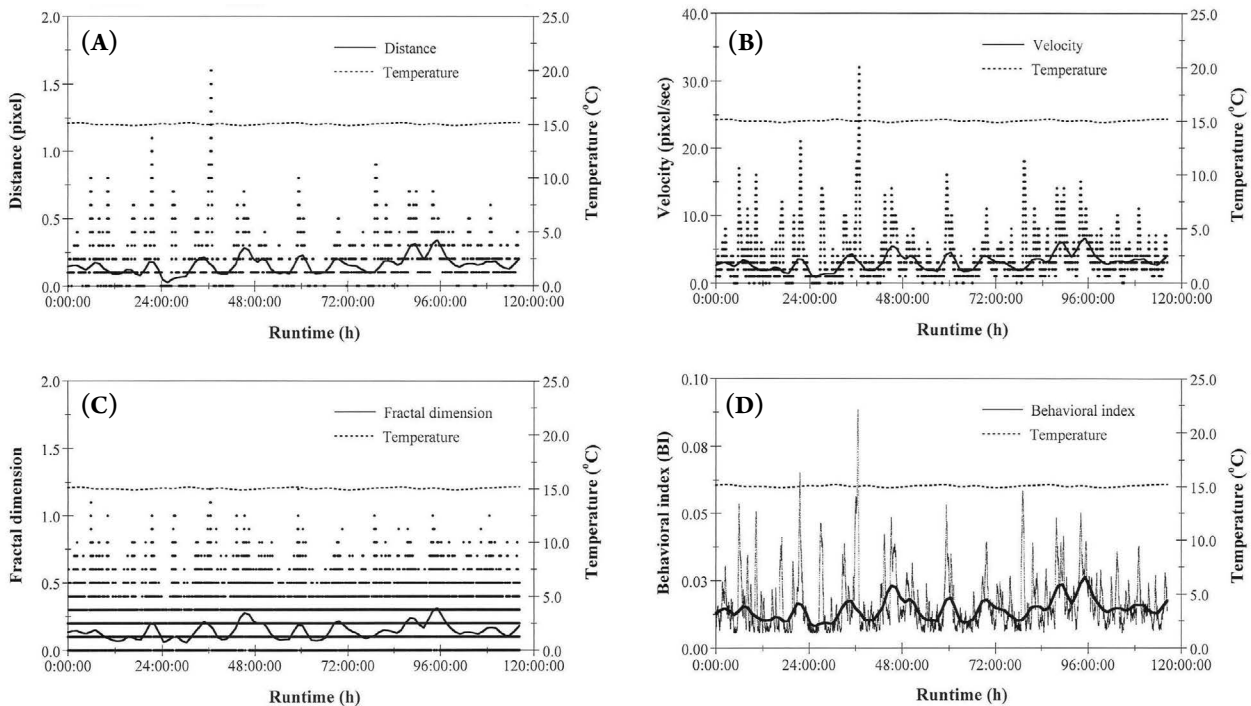
## 결 과

### 1. 안정된 상태에서 불불락의 행동반응

일정한 수온 ( $15.0 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ )과 염분 ( $32.0 \pm 0.5\ \text{psu}$ )을 유지시키며 120시간 동안 관찰한 실험생물 ( $17.1 \pm 0.5\ \text{cm}$ ,  $79.2 \pm 12.0\ \text{gWWt}$ )의 행동변수 (유영거리, 속도 및 프랙탈 차원값) 및 BI는 일정한 간격으로 정점 (peak)을 보이면서 증감의 진폭변화를 반복하였다 (Fig. 2). 불불락의 행동변수를 2% weighted smooth curve를 통해 분석한 결과, 대부분의 변수는 시간이 경과함에 따라 소폭 증가하는 경향을 보였으나 96시간 이후 다시 안정된 행동패턴이 관찰되었다.

### 2. 수온 노출구간별 불불락의 행동반응

본 연구에서 수온 상승에 따른 노출구간별 불불락의 행동반응은 3회 실험 모두 유사한 패턴을 보였으며, 이때 측정된 연속적인 유영거리, 속도 및 프랙탈 차원값 역시 유사한 변동 패턴을 보였다. 대조수온 ( $15.0 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ )에서 48시간 동안 실험수조에서 불불락을 안정시킨 후  $20.0^{\circ}\text{C}$ 로



**Fig. 2.** Behavior patterns of four wild goldeye rockfish *Sebastes thompsoni* during 120 h. Experiments were conducted in constant lightness at 90% oxygen saturation level.

수온을 상승시킨 결과, 수온이 상승하는 10시간 동안 생물의 활동량은 일시적으로 증가하였으며, BI는 역시 유사한 패턴을 보였다(Fig. 3). 그러나 생물의 활동량이 일시적으로 증가하였으나 20.0°C 구간과 25.0°C까지 수온을 상승시킨 초기 60~70시간 동안 수조 내부에서 뚜렷한 행동의 변화 없이 일정한 속도로 안정된 유영 패턴을 보였다. 한편, 25.0°C 수온에 노출된 불볼락은 노출 20시간 경과 후 활동량이 급격하게 저하되어 일시적으로 수조 바닥에 머무르는 행동을 보였다. 또한 수온을 30.0°C까지 상승시킨 경우 생물은 수조 바닥에 정지하는 시간이 증가하였으며, 활동성 지연, 정지행동 등과 같은 정상적인 유영 및 대사활동이 교란되었다. 25.0°C에서 30.0°C 수온구간에 노출된 불볼락은 수온이 상승하는 7~13시간 동안 사망하는 개체가 관찰되었으며, 30.0°C에 노출된 후 10~20시간 이내에 실험생물의 사망률은 100.0%에 도달하였다(Fig. 3).

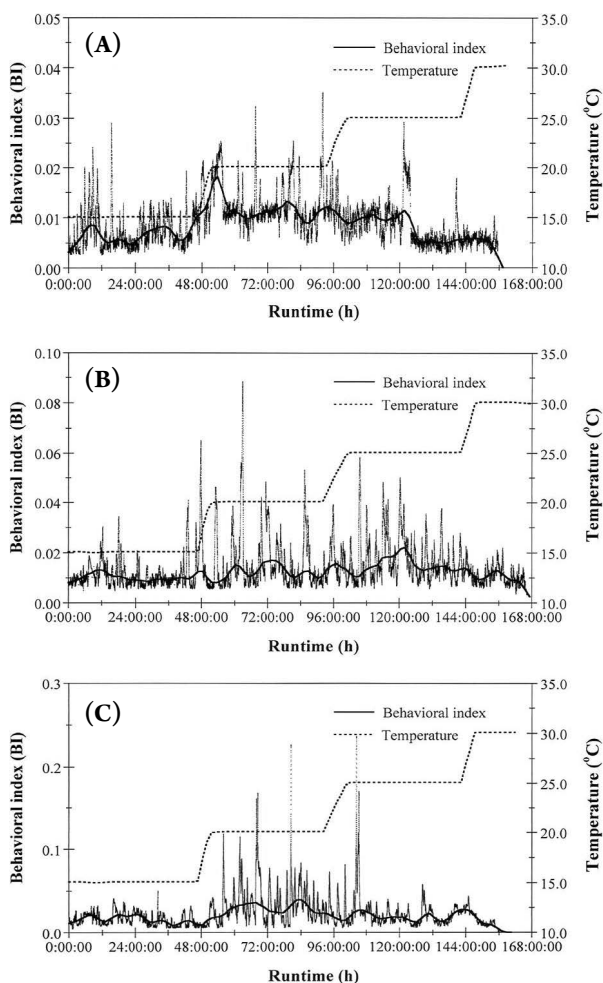
### 3. 수온구간별 불볼락의 행동지수 변화

수온구간별 불볼락의 평균 행동지수의 변화를 분석한 결과 안정된 상태에서 측정된 불볼락의 행동지수는 20.0, 25.0, 30.0°C 노출구간과 뚜렷한 차이를 보였다( $p < 0.05$ ).

대조수온에서 48시간가량 불볼락(18.3 ± 2.4 cm, 102.3 ± 50.9 gWWt)의 BI를 측정 후 160시간 동안 점진적으로 수온을 상승시킨 결과, 160시간가량 실험한 20°C로 수온을 상승시킨 경우 BI는 42.4% 증가하였으며, 25.0°C구간에서는 13.5%로 다소 감소하였다. 수온을 30.0°C까지 상승시킨 결과 실험생물의 BI는 63.6%까지 급격하게 감소하였다(Fig. 4A). 168.1시간 실험에서 실험생물 4개체(19.5 ± 2.4 cm, 126.2 ± 79.2 gWWt)의 BI는 20.0~25.0°C 수온구간에서 대조수온보다 28.2% 증가하였으며, 25.0~30.0°C 구간에서는 33.2%, 30.0°C보다 높은 수온에서는 15.8% 감소하였다(Fig. 4B). 161시간 동안 점진적으로 수온을 상승시킨 경우 20.0°C부터 25.0°C 범위와 25.0~30.0°C 수온구간에서 불볼락(19.5 ± 4.0 cm, 127.93 ± 83.1 gWWt)의 BI는 대조수온보다 각각 53.0%와 30.3% 증가한 반면 30.0°C보다 높은 수온에서는 85.4%로 급격히 감소하였다(Fig. 4C).

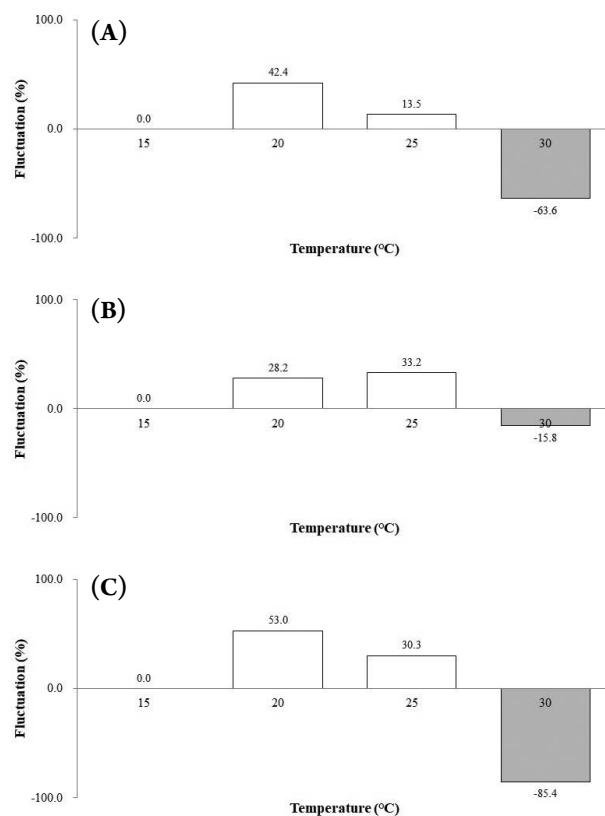
### 고 찰

일반적으로 실험수조에 입식된 어류는 활동량이나 호흡률이 높아진 후 안정화되는 과정을 거치게 되는데, 이



**Fig. 3.** Behavior patterns of three groups (A, B, and C) of wild goldeye rockfish *Sebastes thompsoni* subjected to temperature increases from 15.0 to 30.0°C ( $\Delta T = 5^{\circ}\text{C} \cdot 48\text{h}^{-1}$ ). Mean BI curves through the center of data used a weighted smooth curve of 2%. Dotted line indicated water temperature range. Group A: 18.25 ± 0.44 cm in total length) and 94.83 ± 8.91 g in wet weight; Group B: 19.45 ± 3.83 cm in total length and 126.19 ± 79.16 g in wet weight; Group C: 19.48 ± 3.95 cm in total length and 127.98 ± 83.11 g in wet weight.

는 운반 및 수조에 입식하는 handling에 의한 생물의 일시적인 스트레스 반응의 결과로 해석되었다 (Waring *et al.* 1996; Yoon *et al.* 2003). 이를 해결하기 위한 방법으로 실험 수조에 입식한 어류는 12시간가량의 적응기간을 거친 후 생물이 안정된 상태에서 실험을 시작할 것을 제안하고 있다 (Yoon 2021a). 본 연구에서 불블락은 수조에 입식한 후 일정한 수온과 염분 환경에서 12시간 이상 안정화시킨 후 행동패턴을 관찰하였다. 실험 종료 후 측정된 행동지수 자료를 2% weighted smooth curve를 통해 분석한 결과, 유영



**Fig. 4.** Comparison of mean BI of three groups (A, B, and C) goldeye rockfish *Sebastes thompsoni* by each experimental regime at different temperatures. Group A: 18.25 ± 0.44 cm in total length and 94.83 ± 8.91 g in wet weight; Group B: 19.45 ± 3.83 cm in total length and 126.19 ± 79.16 g in wet weight; Group C: 19.48 ± 3.95 cm in total length and 127.98 ± 83.11 g in wet weight.

거리, 유영속도 및 프랙탈 차원값 등 3개의 행동변수와 BI는 주기적으로 정점 (peak)에 도달한 후 증감을 반복하였으며, 시간이 경과함에 따라 소폭 증가하는 경향을 보인 후 안정된 유영 패턴을 보였다.

본 연구에서 대조수온(15.0°C)을 20.0°C로 상승시킨 결과, BI는 노출 초기 10시간 동안 일시적으로 증가하였으나 60~70시간 동안 뚜렷한 행동의 변화 없이 일정한 속도로 안정된 유영 패턴을 보였다. 그러나 25.0°C 수온에 노출된 불블락의 활동량은 20시간 후 급격하게 저하되어 일시적으로 수조 바닥에 머무르는 행동을 보였으며, 30.0°C 까지 수온구간에서는 수조 바닥에 정지하는 시간이 증가하였으며, 활동성 지연, 정지행동 등과 같은 정상적인 유영 및 대사활동이 교란되었다. 고 수온 환경에 노출된 불블락의 행동은 저 수온에 노출된 경우와 유사한 경향을 보였다. 10.0°C 이하 수온에 노출된 참돔 치어는 무기력한 유영

활동과 바닥에 머무르는 행동을 보였으며, 운동기능 장애, 평형 조절 부족, 신경기능 및 고유의 내인성 리듬의 교란으로 인해 내성능력이 저하되는 것으로 보고되었다(Sala-Rabanal *et al.* 2003; Ibarz *et al.* 2010; Yoon 2021a). 본 연구에서 고 수온에 대한 실험생물의 스트레스 반응은 노출 강도나 시간에 따라 다소 차이를 보였으나 30.0°C 이상의 고수온환경에서는 외부의 자극에 대한 반응이 감소하며, 움직임이 둔해져 활동성이 감소하는 경향을 보였으며 심한 경우에는 방향성을 잃어버리고 일시적인 근육 경련을 일으키는 행동을 보였다(Lutterschmidt and Hutchison 1997; Wiles *et al.* 2020). 이는 임계수온에 도달한 생물은 더 이상 체내 에너지 대사활성의 저하로 인해 생태-생리적 교란작용을 일으키며, 노출시간이 지속됨에 따라 아치사 상태에 도달할 것으로 판단된다.

한편, 25.0°C에서 30.0°C 수온구간에 노출된 불볼락은 고 수온 노출 후 7~13시간 동안 사망하는 개체가 관찰되었으며, 30.0°C 수온구간에서는 10~20시간 이내에 실험생물의 모든 개체가 사망하였다. 불볼락과 같이 냉수성 어종으로 분류되는 조피볼락(*Sebastes schlegeli*)은 성장 최적 수온이 15.0~20.0°C 범위로 알려져 있는데, 본 종은 수온을 25.0°C보다 높게 상승시킨 경우 생리기능이 저하되는 것으로 보고되었으며, 15.0°C에서 하루에 1°C씩 수온을 상승시키면서 측정된 조피볼락의 호흡대사율은 27.0°C에서 급격하게 상승하는 것으로 나타났다(Choi *et al.* 2009; Do *et al.* 2016). 또한 점진적으로 산소포화도를 감소시키면서 호흡대사율과 혈액 성분 변화를 측정된 결과, 호흡률과 혈장 cortisol, 전해질( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ) 및 삼투질 농도는 25.0°C에서 최대값을 보였으며, 모든 수온에서 대조구에 비하여 유의하게 높았다(Kim 2021a). 조피볼락을 24°C에서 순치시킨 후 12시간마다 1°C씩 수온을 상승시켜 산소소비율을 측정된 결과 최대임계수온(CTM)은 29.4~30.9°C 범위에 존재하며, 임계최고수온 이상에서는 산소소비율이 급격하게 상승한 후 치사에 도달하는 것으로 보고되었다(Kim *et al.* 2003). 이와 같은 결과는 본 연구에서도 유사한 경향을 보였는데, 대조수온에서 점차적으로 수온을 상승시킨 결과, 20.0°C로 수온을 상승시킨 경우 BI는 28.2~53.0% 증가하였으며, 25.0°C 구간에서는 13.5~33.2%로 다소 감소하였다. 수온을 30.0°C까지 상승시킨 결과 실험생물의 BI는 15.8~85.4% 범위로 급격하게 감소하여 모든 개체가 사망하였다.

본 연구에서 수온구간별 불볼락의 행동지수는 15.0°C의 수온과 비교할 때 20.0, 25.0, 30.0°C 노출구간과 뚜렷한 차이를 보였다( $p < 0.05$ ). 특히 25.0°C보다 높은 수온에 노출된 개체들은 고 수온 노출에 따른 행동패턴의 교란으로 인해 활동량이 급속히 증가하였으며, 수온이 30.0°C보다 높게 상승하면 움직임이 둔화되거나 시간이 지남에 따라 사망하는 개체가 증가하였다. 국내에 서식하는 대부분의 볼락류 어류는 연안 정착성 어종으로써 활동성이 적고 주로 저층에 서식하는 생태특성을 보이는 종으로 구분된다. 수온에 대한 볼락의 행동 분석 결과, 볼락은 수온의 증감에 따라 다소 차이를 보였으나 15.0~20.0°C 수온범위에서 활동성이 높은 것으로 관찰되어 볼락의 적정 서식수온과 연관성이 있는 것으로 보고되었다(Heo *et al.* 2016). 또한, 볼락류 어류는 여름철 급격한 수온 상승이 체내의 생리조건을 변화시키거나 성장과 생존을 좌우하는 직접적인 스트레스로 작용할 수 있다(Horning and Pearson 1973). 수온의 임계치를 벗어난 대부분의 어류는 복강과 간, 비장, 신장에 산패지방 침착이 발생하여 질병에 대한 감염성을 높여 영양성 스트레스로 성장률 감소가 유발될 수 있으며, 체내 산화 스트레스를 유발시키는 동시에 면역기능을 저해시키는 것으로 보고되었다(Choi *et al.* 2009; Shin *et al.* 2010). 벤자리(*Parapristipoma trilineatum*)의 면역활성 및 혈액생리학적 변화를 조사한 결과, 본 종은 25.0°C보다 높은 고 수온 환경에서 lysozyme 활성 감소, AST (aspartate aminotransferase) 및 ALT (aspartate aminotransferase) 증가 현상이 나타났으며, 수온이 상승함에 따라 에너지 소모 증가로 인해 체중 및 이온 농도가 감소하는 것으로 보고되었다(Kim *et al.* 2018). 따라서, 본 연구에서 25.0°C 이상의 수온에서 관찰된 불볼락의 행동패턴은 고 수온 노출에 따른 체내 스트레스의 증가로 인해 생리활성이 교란되며, 노출 시간이 증가할수록 수온에 대한 내성한계에 도달하는 것으로 해석할 수 있다. 또한, 수온이 30.0°C보다 높게 상승하면서 실험생물은 임계수온에 도달하여 아치사 반응을 보이면서 유영행동이 둔화되며 체내 에너지 소비량이 증가하여 결국 사망에 이르는 것으로 판단할 수 있다.

결론적으로 수온에 대한 불볼락의 생태-생리 반응은 노출 수온의 변동폭과 노출 시간에 따라 큰 차이를 보이는 것으로 해석되는데, 고 수온에 대한 본 종의 내성한계는 25.0~30.0°C 수온으로 판단되며, 아치사 반응을 유발하여 불볼락의 생존에 큰 영향을 미치는 수온은 30.0°C 부근의

수온에 존재하는 것으로 파악된다. 이와 같은 결과는 가두리 양식장과 같은 폐쇄된 환경에서 사육되는 어류의 여름철 폐사원인을 예측하고 치사율을 감소시킴으로써 양식생물의 생산량 증가에 기여할 수 있는 자료로써 활용 가치가 높은 것으로 판단된다.

## 적 요

본 연구는 자연에서 채집한 불볼락(*Sebastes thompsoni*)을 대상으로 고 수온 노출에 따른 생물의 행동반응 및 내성 한계(tolerance limit)를 규명하기 위하여 연속적으로 행동관찰이 가능한 추적시스템을 사용하여 노출 수온구간별 행동패턴의 변화, 임계 수온범위 및 아치사 행동반응을 분석하였다. 실험 결과, 대조수온(15.0°C)을 20.0°C로 높였을 때, BI (behavioral index)는 노출 초기 10시간 동안 일시적으로 증가하였으나 60~70시간 동안 뚜렷한 행동의 변화 없이 일정한 속도로 안정된 유영 패턴을 보였다. 그러나, 25°C에서는 활동량의 급격한 저하, 30°C에서는 활동성 지연과 정지행동 등과 같은 비정상적 유영 및 대사활동 교란이 확인되었으며, 온도의 상승에 따라 개체의 사망률이 높아지는 경향을 보였다. 이러한 결과는, 불볼락의 수온에 대한 내성한계는 25.0~30.0°C이며 생존에 큰 영향을 미치는 수온은 30.0°C 부근임을 나타낸다. 본 연구의 결과가 효과적인 불볼락의 양식을 위한 환경 조건 설정에 도움을 줄 것으로 기대한다.

## CRedit authorship contribution statement

Sung-Jin Yoon: Conceptualization, Methodology, Validation, Formal analysis, Data curation, Writing-Original draft preparation, Writing-Reviewing and Editing, Project administration. Jin-Hyeok Park: Formal analysis.

## 사 사

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1F1A1045925).

## REFERENCES

Baeck GW, SC Park, JH Kim, KI Nam, SH Huh and JM Park.

2010. Reproductive ecology of a goldeye rockfish, *Sebastes thompsoni* (Scorpaeniformes: Scorpaenidae) in the coastal waters of Busan, Korea. Korean J. Ichthyol. 22:34-40.

Choi HS, JI Myoung, MA Park and MY Cho. 2009. A study on the summer mortality of Korean rockfish *Sebastes schlegeli* in Korea. J. Fish Pathol. 22:155-162.

Do YH, BH Min, YD Kim and MS Park. 2016. Changes on hematological factors and oxygen consumption of Korean rockfish *Sebastes schlegeli* in high water temperature. J. Fish. Mar. Sci. Edu. 28:738-745. <https://doi.org/10.13000.JFMSE.2019.3.738>

Heo G, MS Kim and HO Shin. 2016. Behavior analysis of rockfish (*Sebastes inermis*) depending on the temperature and LED lights. J. Korean Soc. Fish. Technol. 52:191-196. <https://doi.org/10.3796/KSFT.2016.52.3.191>

Horning WBI and RE Pearson. 1973. Growth temperature requirement and lower lethal temperature for juvenile smallmouth bass (*Micropterus dolomieu*). J. Fish. Res. Bd. Can. 30:1226-1230. <https://doi.org/10.1139/f73-194>

Huh SH, KM Nam, HG Choo and GW Baeck. 2008. Feeding habits of *Sebastes thompsoni* in the coastal waters off Busan, Korea. J. Korean Fish Soc. 41:32-38. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2017.0818>

Ibarz A, F Padrós, MÁ Gallardo, F Fernández-Borràs and L Tort. 2010. Low-temperature challenges to gilthead sea bream culture: review of cold-induced alterations and "Winter Syndrome". Rev. Fish Biol. Fish. 20:539-556. <https://doi.org/10.1007/s11160-010-9159-5>

Kim HJ, KS Hwang, JH Park, JH Lee, GW Baeck and JM Jeong. 2017. Diet of juvenile gold-eye rockfish *Sebastes thompsoni* in the Yellow Sea bottom cold water. Korean J. Fish Aquat. Sci. 50:818-823. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2017.0818>

Kim HY. 2021a. Changes in metabolic rate and hematological parameters of black rockfish (*Sebastes schlegeli*) in relation to temperature and hypoxia. J. Fish. Pathol. 34:213-224. <https://doi.org/10.7847/jfp.2021.34.2.213>

Kim KH, SW Hong, HN Moon and IK Yeo. 2018. Physiological responses of the chicken grunt *Parapristipoma trilineatum* to high water temperature stress. Korean J. Fish. Aquat. Sci. 51:714-719. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2018.0714>

Kim WS, SJ Yoon and JW Gil. 2003. Critical thermal maximum (CTM) of cultured black rockfish, *Sebastes schlegeli*. J. Fish. Sci. Tech. 6:59-65. <https://doi.org/10.5657/fas.2003.6.2.059>

Kim WS, SJ Yoon, JW Kim, JA Lee and TW Lee. 2006. Metabolic response under different salinity and temperature conditions for glass eel *Anguilla japonica*. Mar. Biol. 149:1209-1215. <https://doi.org/10.1007/s00227-006-0293-5>

Kim YJ. 2021b. Analysis of behavior changes of angelfish (*Pterophyllum scalare*) exposed to stress conditions using video tracking. Pukyong National University. Busan, Korea. p. 51.

- Kokita T and M Omori. 1998. Early life history traits of the gold-eye rockfish, *Sebastes thompsoni*, in relation to successful utilization of drifting seaweed. Mar. Biol. 132:579–589.
- Kokita T and M Omori. 1999. Long distance dispersal of larval and juvenile rockfish, *Sebastes thompsoni*, with drifting seaweed in the Tohoku area, northwest Pacific, estimated by analysis of otolith microstructure. Bull. Mar. Sci. 65:105–118.
- Lee JH, BJ Lee, KW Kim, HS Han, GH Park, JH Lee, HH Yun and SC Bai. 2013. Optimal feeding frequency for juvenile Korean rockfish *Sebastes schlegeli* fed commercial diet at two different water temperatures. Kor. J. Fish. Aquat. Sci. 46:761–768. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2013.0761>
- Lee JS, CM An and SH Huh. 1998. Reproductive cycle of the goldeye rockfish, *Sebastes thompsoni* (Teleostei: Scorpaenidae). Korean J. Fish. Aquat. Sci. 31:8–16.
- Lutterschmidt WI and VH Hutchison. 1997. The critical thermal maximum data to support the onset of spasms as the definitive end point. Can. J. Zool. 75:1553–1560. <https://doi.org/10.1139/z97-782>
- Mizanur RM, H Yun, M Moniruzzaman, F Ferreira, KW Kim and SC Bai. 2014. Effects of feeding rate and water temperature on growth and body composition of juvenile Korean rockfish, *Sebastes schlegeli* (Hilgendorf 1880). Asian Australas. J. Anim. Sci. 27:690–699. <https://doi.org/10.5713/ajas.2013.13508>
- Nagasawa T and T Kobayashi. 1995. The early life history of the rockfish, *Sebastes thompsoni* (Scorpaenidae), in the Sea of Japan. Jap. J. Ichthyol. 41:385–396.
- Oh SY and CH Noh. 2006. Effects of water temperature and photoperiod on the oxygen consumption rate of juvenile dark-banded rockfish, *Sebastes inermis*. J. Aquaculture 19:210–215.
- Sala-Rabanal M, J Sánchez, A Ibarz, J Fernández, J Blasco and MA Gallardo. 2003. Effect of low temperatures and fasting on hematologic and plasma biochemical profiles of gilthead sea bream (*Sparus aurata*). Fish Physiol. Biochem. 29:105–115. <https://doi.org/10.1023/B:FISH.0000035904.16686.b6>
- Shin HS, KW An, NN Kim and CY Choi. 2010. Antioxidant defenses and physiological changes in olive flounder (*Paralichthys olivaceus*) in responses to oxidative stress induced by elevated water temperature. Korean J. Ichthyol. 22:1–8.
- Waring CP, RM Stagg and MG Poxton. 1996. Physiological responses to handling in the turbot. J. Fish. Biol. 48:161–173. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1996.tb01110.x>
- Wiles SC, MG Bertram, JM Martin, H Tan, TK Lehtonen and BB Wong. 2020. Long-term pharmaceutical contamination and temperature stress disrupt fish behavior. Environ. Sci. Technol. 54:8072–8082. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01625>
- Yang JH, JB Lee, HW Lee, HK Cha, SR Kim and YW Heo. 2017. Maturity and spawning of *Sebastes thompsoni* in the coastal waters off Ulleungdo, Korea. Korean J. Fish Aquat. Sci. 49:404–409. <https://doi.org/10.3796/KSFT.2017.53.1.060>
- Yang SJ, JY Lee, YK Shin, HK Hwang and Myeong JI. 2016. Effects of temperature and salinity on survival, metabolism and histological change of the rockfish, *Sebastes schlegeli*. J. Fish. Mar. Sci. Edu. 28:1068–1075. <https://doi.org/10.13000/JFMSE.2016.28.4.1068>
- Yoon SJ. 2021a. Critical low temperature and response of behavioral tolerance in red seabream *Pagrus major* fingerlings exposed to cold shock. JKAIS 22:575–584. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.1.575>
- Yoon SJ. 2021b. Short-term behavioral responses and tolerance limits of red seabream *Pagrus major* fingerlings following sudden low salinity exposure. Korean J. Environ. Biol. 39:495–506. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2021.39.4.495>
- Yoon SJ, CK Kim, JG Myoung and WS Kim. 2003. Comparison of oxygen consumption patterns between wild and cultured black rockfish *Sebastes schlegeli*. Fish. Sci. 69:43–49. <https://doi.org/10.1046/j.1444-2906.2003.00586.x>