KOREAN JOURNAL OF ICHTHYOLOGY, Vol. 35, No. 4, 236-243, November 2023
ISSN: 1225-8598 (Print), 2288-3371 (Online). DOI: https://doi.org/10.35399/ISK.35.4.3

Received: October 16, 2023
Revised: November 1, 2023
Accepted: November 6, 2023

인위적 수온 상승에 노출된 조피볼락(*Sebastes schlegelii*) 치어의 생존율 및 스트레스 반응

*진영국 · 길현우 · 김대중 · 황형규 · 김효원**

남해수산연구소 양식산업과

Survival, Physiological Responses, and Histological Changes in Korean Rockfish (*Sebastes schlegelii*) Exposed to Artificial Increase of Water Temperature ***by Young Guk Jin, Hyun Woo Gil, Dae-Jung Kim, Hyung-kyu Hwang and Hyo-Won Kim**** (Aquaculture Industry Research Division, South Sea Fisheries Research Institute, Yeosu 59780, Republic of Korea)

ABSTRACT This study aimed to investigate the survival rates, hematologic responses, and histological responses of juvenile Korean rockfish (*Sebastes schlegelii*) exposed to artificial increase of water temperature. The water temperature was incrementally raised from the initial 23°C to 26°C, 28°C, 30°C, and 31°C, with a 1°C increase every 24 hours. The fish were exposed to each water temperature setting for a period of seven days. No mortality was observed at 26°C and 28°C. However, at 30°C, mortality began on the 4th day of exposure, with an overall survival rate of 1.5% at the end of the seventh day. At 31°C, mortality occurred as early as the first day of exposure, and all fish had perished by the second day. Plasma cortisol and glucose concentrations increased as water temperature rose, with a significant decrease observed at 31°C. No significant difference in plasma GPT concentration was observed across the various experimental temperatures. In contrast, plasma GOT concentration significantly increased at 31°C. Histological examination revealed that both the liver and gills exhibited normal histology at the initial temperature of 23°C and at 26°C. However, at 28°C hepatocellular hypertrophy and gill lamellar epithelial hyperplasia and epithelial cell lifting were observed. At 30°C, hepatocellular condensation and gill lamellar fusion were noted. Finally, at 31°C, severe histological changes were observed, including hepatocellular necrosis, liver congestion, and gill filament necrosis.

Key words: Korean rockfish, high water temperature, stress respone, gill, liver

서 론

수온은 어류의 생리반응 및 대사과정에 직접적인 영향을 주는 중요한 환경 요인으로 적정 범위 이상의 수온은 어류에게 스트레스 요인으로 작용하게 되며(Barton *et al*., 2002; Peck *et al*., 2005; Porz *et al*., 2006), 환경요인에 의한 어류의 스트레스 반응은 어체 크기 및 노출 기간 등에 따라 차이를 보일 수 있다(Kim *et al*., 2003; Pérez-Casanova *et al*., 2008; Recsetar *et al*., 2012). 스트레스에 노출된 어류는 1차적인 반응으로 뇌-교감신경-크롬친화세포 축(brain-sympathetic-chromaffin cell axis, BSC)과 시상하부-뇌하수체-간신선 축(hypothalamus-pituitary-interrenal axis, HPI)의 활성화에 의해 catecholamine과 corticosteroid hormone의 분비가 촉진되고(Wendelaar Bonga, 1997; Mommsen *et al*., 1999), 2차적인 반응으로 혈중 glucose, glutamic oxaloacetic transaminase (GOT), glutamic pyruvic transaminase (GPT) 증가 및 간의 glycogen 감소 등이 유도되며, 최종적으로 생존, 성장 및 면역력 등에 영향을 받는다(Davis and Parker, 1990; Barton *et al*., 2002). 따라서 혈중 catecholamine, cortisol, glucose, GOT 및 GPT 등은 스트레스 반응에 대한 지표로써 널리 이용되고 있다.

저자 직위: 진영국(연구사), 길현우(연구사), 김대중(연구관), 황형규(과장), 김효원(연구사)
*Corresponding author: Hyo-Won Kim Tel: 82-61-690-8976, E-mail: khw0047@korea.kr

조피볼락(*Sebastes schlegelii*)은 쏨뱅이목(Order Scorpaeniformes) 양볼락과(Family Scorpaenidae)에 속하며, 우리나라, 일본 북해도 이남 및 중국 북부 연안의 수심 100 m 내외 암초나 어초 등에 서식하는 상업적으로 중요한 어종이다(Im and Hwang, 2002). 또한, 저수온에 강한 특징을 가지고 있어 우리나라 전 연안에서 월동이 가능하며(Myeong *et al*., 1997), 2022년 우리나라 어류양식 총생산량의 17.9%인 16,185톤을 차지하는 대표적인 해상가두리 양식 대상종이다(KOSIS, 2023). 조피볼락의 사육적정수온은 15~20°C로 수온 23°C 이상에서 먹이섭취량이 감소하고, 수온 25°C 이상에서 생리기능이 저하되어 여름철 고수온에 의한 대량 폐사가 빈번하게 발생하고 있어 양식어가에 경제적 손실을 야기하고 있다(Choi *et al*., 2009; Lee *et al*., 2022).

수온이 조피볼락에 미치는 영향에 대한 연구로 일간 수온 변화(Kim *et al*., 2001), 상한임계수온(Kim *et al*., 2003), 산소 소비 및 혈액성상 변화(Do *et al*., 2015), 수송 시 적정 수온 및 염분(Yang *et al*., 2016), 고수온기 산소 보충에 따른 피해 저감 효과(Lee *et al*., 2022) 등 다양한 연구들이 수행되었으나, 대부분 중간육성어 및 성어를 대상으로 수행되었고 치어를 대상으로 한 연구는 찾아보기 힘든 실정이다.

따라서 본 연구에서는 조피볼락 치어를 대상으로 인위적인 수온 상승에 따른 생존율, 혈중 cortisol, glucose, GOT, GPT 농도 및 아가미와 간의 조직학적 변화를 비교·조사하여 고수온기 피해 예방을 위한 생물학적 기초자료를 확보하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 실험어

실험어인 조피볼락은 충남 태안군 소재 양식장에서 2022년 3월에 생산한 개체들을 2022년 5월에 남해수산연구소 생물사육동으로 운송 후 11톤 유수식 수조(Φ 4×0.9 m)에서 실험개시 전까지 양성하였다. 이때 사육수의 수온, 용존산소, 염분 및 pH는 각 22.0±0.3°C, 7.7±0.1 mg/L, 33.4±0.1 및 8.1±0.1로 유지되었다. 양성기간 동안 사료는 시판되는 조피볼락용 배합사료(Crude protein 52%)를 1일 2회 반복으로 공급하였고, 이때 사료의 크기는 성장에 따라 조절(Φ 1.2~2.5 mm)하여 공급하였다. 실험어는 실험개시 전 24시간 절식 후 실험에 이용하였고, 실험개시 시 실험어의 전장 및 체중은 평균 8.98±0.02 cm 및 13.30±0.10 g이었다.

2. 인위적 수온 상승

실험 수온은 26°C, 28°C, 30°C, 31°C로 설정하였고, 실험어를 500 L 유수식 원형수조(Φ 1×0.6 m)에 각 130마리씩 수용하여 실험을 수행하였다. 수온은 수온조절장치(You won engineering Co., Ulsan, Korea)를 이용하여 실험개시 시 자연수온인 23°C에서 28°C까지 1일 1°C 간격, 28°C부터 31°C까지는 3일 1°C 간격으로 상승 조절하여 실험 수온에 도달시켰다. 실험기간 동안 수온, 용존산소, 염분 및 pH는 수질측정기(Professional plus, YSI Inc., USA)를 이용하여 1일 1회 동일한 시간에 측정하였고, 용존산소는 7.61±0.11 mg/L, 염분은 32.65±0.03 psu, pH는 8.12±0.02로 유지되었다. 사육수의 환수량은 1일 12회전이 되도록 조정하였고, 사료는 공급하지 않았다.

수온에 따른 생존율은 1일 1회 동일한 시간(오전 10시)에 측정하였고, 폐사 여부는 정상적인 유영 능력을 상실하고 복부가 뒤집혀진 개체를 기준으로 판정하였다. 실험은 실험 수온에 도달한 후 7일 동안 수행하였다. 본 실험은 국립수산과학원 동물실험윤리위원회(NIFS-2022-50)의 승인을 받고 수행하였다.

3. 혈중 스트레스 호르몬 변화

수온에 따른 실험어의 혈중 스트레스 호르몬 변화를 분석하기 위해서 실험종료 시 각 실험구마다 7마리씩 무작위로 2-phenoxyethanol (200 ppm, Sigma, USA)에 마취시킨 후 항응고제(heparin) 처리된 주사기를 이용하여 미부혈관에서 채혈하였다. 채혈한 혈액은 원심분리기(Labogene 1730R, Seoul, Korea)로 원심분리(6,000 rpm, 15 min, 4°C)하여 혈장을 분리하고, 분석 전까지 −70°C에서 보관하였다.

혈중 cortisol은 enzyme linked immunosorbent assay kit (EIA-1993, DRG co., USA)를 사용하여 매뉴얼에 따라 분석하였고, 450 nm에서 흡광도를 측정한 후 Magellan (v 17.2, Tecan, Switzerland)으로 농도 값을 계산하였다.

혈중 glucose, GOT 및 GPT는 자동혈액분석기(Dri-chem 4000i, Fuji film co., Japan)를 이용하여 분석하였다.

4. 조직학적 분석

수온 증가에 따른 아가미와 간의 조직학적 변화를 관찰하기 위해 시료를 10% 중성 포르말린(natural formalin)에 고정하였다. 고정된 조직은 흐르는 물에서 24시간 동안 수세한 후 탈수 및 paraffin 포매 과정을 거쳤다. 이후 microtome (RM 2135, Leica, Germany)을 이용해 4~5 μm 두께로 박절하여 연속절편을 제작하였고, 제작된 절편은 H-E (hematoxylin-eosin) 비교 염색 후 광학현미경(DM3000, Leica, Germany)을 이용하여 검경하였다.

5. 통계분석

모든 결과 값은 Mean±SEM으로 나타냈다. 실험구 사이의 유의성은 SPSS statistics 프로그램(v 19.0, IBM, USA)을 이용하여 일원분산분석(one-way ANOVA) 후 Duncan's multiple range test로 분석하였다($p<0.05$).

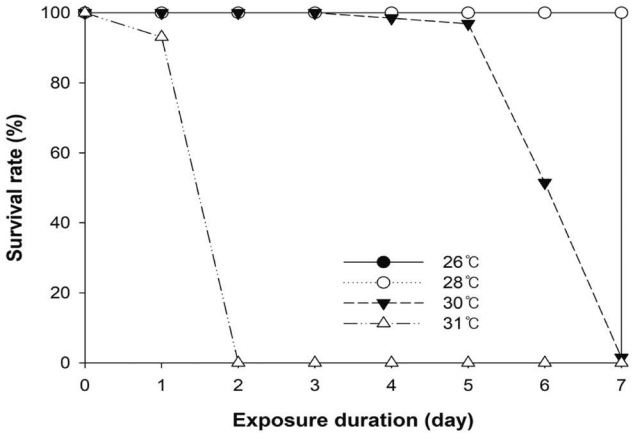

Fig. 1. Effects of exposure to artificial increase of water temperature on survival rate of Korean rockfish, *Sebastes schlegelii*.

결 과

1. 생존율

수온에 따른 조피볼락의 생존율을 조사한 결과, 26°C 및 28°C 실험구는 실험기간 동안 폐사가 발생하지 않았다. 하지만, 30°C 실험구는 노출 4일째부터 폐사가 발생하기 시작하여 실험종료 시 1.5%의 생존율을 보였고, 31°C 실험구는 노출 1일째부터 폐사가 발생하기 시작하여 노출 2일째에 전량 폐사하였다(Fig. 1).

2. 혈중 스트레스 호르몬 및 효소 반응

혈중 cortisol 농도는 실험개시 시 228.6±38.1 ng/mL였고, 실험종료 시 26°C, 28°C, 30°C 및 31°C 실험구는 각각 169.0±48.2 ng/mL, 203.0±109.8 ng/mL, 316.3±62.2 ng/mL 및 73.8±24.5 ng/mL로 나타났다. 실험개시기와 26°C, 28°C, 30°C 실험구 사이에 유의한 차이는 없었으나 수온이 높을수록 증가하는 경향을 보였고($p>0.05$), 31°C 실험구는 실험개시기보다 유의하게 감소하였다(Fig. 2, $p<0.05$).

혈중 glucose 농도는 실험개시 시 111.4±15.3 mg/dL였고, 실험종료시 26°C, 28°C, 30°C 및 31°C 실험구는 각각 179.6±20.4 mg/dL, 192.8±17.4 mg/dL, 239.6±35.3 mg/dL 및 37.6±14.0 mg/dL로 나타났다. 실험개시기보다 26°C, 28°C 및 30°C 실험구가 유의하게 높게 나타났고, 수온 31°C 실험구는 유의하게 낮게 나타났다(Fig. 2, $p<0.05$).

혈중 GOT 농도는 실험개시 시 76.8±14.1 U/I였고, 실험종료 시 26°C, 28°C, 30°C 및 31°C 실험구는 각각 65.2±13.5 U/I, 113.6±19.9 U/I, 86.0±23.7 U/I 및 547.4±143.0 U/I로 나타났다. 실험개시기와 26°C, 28°C, 30°C 실험구 사이에 유의한 차이는 없었으나, 31°C 실험구에서는 유의하게 증가하였다(Fig. 3, $p<0.05$).

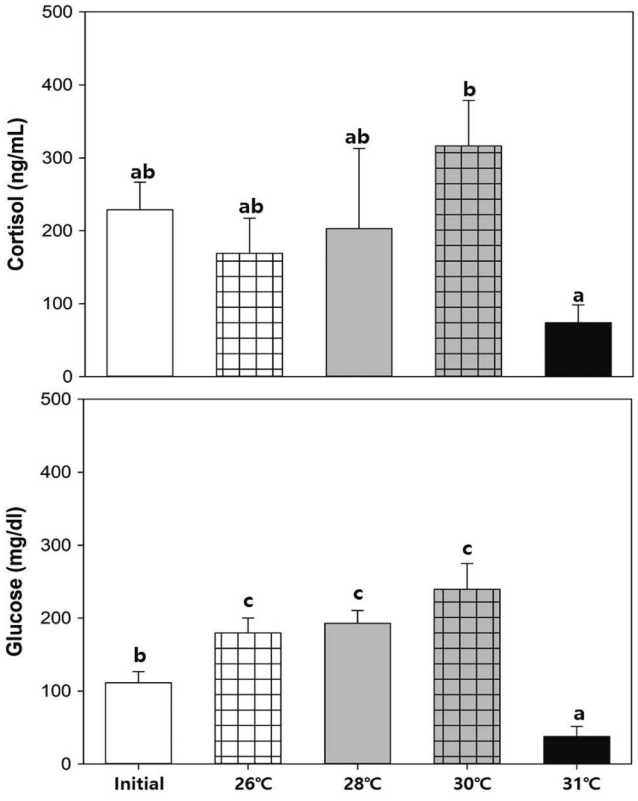

Fig. 2. Effects of artificial increase of water temperature on plasma cortisol, and glucose of Korean rockfish, *Sebastes schlegelii*. The data are represented as the mean±SEM. The different letters indicate statistically significant differences among groups ($p<0.05$).

혈중 GPT 농도는 실험개시 시 34.6±5.5 U/I였고, 실험종료 시 26°C, 28°C, 30°C 및 31°C 실험구는 각각 20.0±3.0 U/I, 33.6±2.9 U/I, 34.0±4.6 U/I 및 35.2±7.3 U/I로 나타나, 실험개시기와 모든 실험구 사이에 유의한 차이는 보이지 않았다(Fig. 3, $p>0.05$).

3. 아가미와 간의 조직학적 변화

조피볼락 간의 조직학적 관찰 결과, 실험개시 시와 26°C 실험구의 간 조직은 다각형의 형태를 가지는 정상적인 간세포들이 관찰되었다(Fig. 4A). 28°C 실험구의 경우 실험개시 시와 26°C 실험구에 비해 간세포의 비대화가 나타났으며(Fig. 4B), 30°C 실험구에서는 오히려 간세포들이 응축되는 현상을 보였다(Fig. 4C). 31°C 실험구에서는 간세포의 응축이 더욱 심화되었으며, 간 조직 내 충혈 및 일부 간세포의 괴사가 나타났다(Fig. 4D).

아가미의 조직학적 관찰 결과, 실험개시 시와 26°C 실험구의 아가미 조직은 새판의 규칙적인 배열과 함께 일반적인 아가미의 구조(Fig. 5A)를 하고 있었다. 그러나, 28°C 실험구의 경우 실험개시 시와 26°C 실험구에 비해 새판 상피세포들의 증식과 새판 상피의 탈락 현상이 두드러지게 관찰되었고(Fig. 5B), 30°C 실

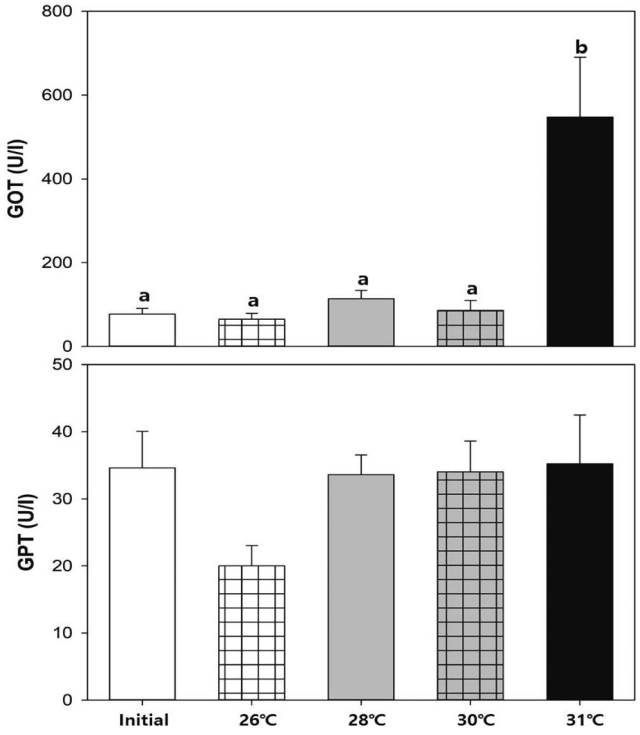

Fig. 3. Effects of artificial increase of water temperature on plasma glutamic oxaloacetic transaminase (GOT), and glutamic pyruvic transaminase (GPT) of Korean rockfish, *Sebastes schlegelii*. The data are represented as the mean ± SEM. The different letters indicate statistically significant differences among groups ($p < 0.05$).

험구의 경우 새판 상피세포들의 증식, 새판 상피의 탈락 및 새판의 융합현상이 나타났다(Fig. 5C). 31°C 실험구의 아가미 조직은 정상적인 기능 수행이 어려울 정도로 새엽과 새판의 괴사가 관찰되었다(Fig. 5D).

고 찰

본 연구는 조피볼락 치어를 대상으로 인위적인 수온 상승에 따른 생존율, 혈중 스트레스 반응 및 아가미와 간의 조직학적 변화를 조사하였다.

인위적인 수온 상승에 따른 조피볼락 치어의 생존율을 조사한 결과, 수온 30°C에서 노출 4일째부터 폐사가 발생하였고, 수온 31°C에서는 노출 1일째부터 폐사가 발생하였으며 노출 2일째 전량 폐사하였다. 이러한 결과는 평균 전장 27.7 ± 0.4 cm인 조피볼락이 수온 30°C에서 노출 1일째 전량 폐사한 이전 연구와 다소 차이를 보였다(Do *et al*., 2015). 어류의 상한임계수온(critical thermal maximum, CTM)은 어종, 형태, 크기, 수온 변화 속도 및 노출 시간 등 다양한 요인에 따라 영향을 받는다고 알려져 있다(Cox, 1974; Becker and Genoway, 1979; Ospina and Mora, 2004). 어체 크기에 따른 상한임계수온을 조사한 연구로 Kim *et al*. (2003)은 전장 27.2 cm보다 21.2 cm인 조피볼락에서 임계수온이 1.5°C 감소한다고 보고하였고, 이와 유사하게 타 어종인 Apache trout (*Oncorhynchus gilae apache*)와 Rio Grande cutthroat trout (*O. clarkii virginalis*)도 치어보다 성어에서 임계수온이 각 0.8°C 및 1.3°C 감소한다고 보고된 바 있다(Recsetar *et al*., 2012). 보고된 연구들 사이에 수온 조절 방법이 다소 차이가 있어 직접적인 비교는 어려우나, 본 연구와 이전 연구(Do *et al*., 2015) 사이의 폐사 경향 및 폐사가 발생한 수온의 차이는 조피볼락의 크기에 밀접한 영향을 받았을 것으로 추정된다. 그러나 보다 명확한 구명을 위해서는 추후 수온 조절 방법 및 실험어의 크기를 다양하게 하여 추가적인 실험이 수반되어야 할 필요가 있다.

일반적으로 스트레스에 노출된 어류는 cortisol과 glucose의 동반 상승이 유도되며, cortisol은 스트레스에 반응하여 1차적으로 증가하는 corticosteroid hormone으로 에너지 대사, 면역기능 및 glucose 생성에 관여한다고 알려져 있다(Wendelaar Bonga, 1997). 본 연구에서도 조피볼락 치어의 혈중 cortisol 및 glucose 농도는 동일한 증가 패턴을 보이며 수온 상승에 따라 수온 30°C에서 가장 높게 나타났고, 수온 31°C에서 급격하게 감소하여 가장 낮게 나타났다. 수온에 따른 혈중 cortisol 농도 변화에 대한 타 어종의 연구로 능성어(*Epinephelus septemfasciatus*)에서도 수온 12~5°C 범위에서 수온이 하강함에 따라 혈중 cortisol 농도가 증가하다가 수온 6°C에서 급격하게 감소하여 본 연구와 유사한 결과를 보고하였으며, 이러한 감소는 내성 범위를 벗어난 수온에 의한 생리적 순응력의 상실로 보고된 바 있다(Park *et al*., 2016).

한편, glucose는 스트레스에 대한 2차적인 반응으로 당신생합성(gluconeogenesis)을 통해 생성되며, 스트레스 상황에서 항상성을 유지하기 위한 에너지원으로 사용된다고 알려져 있다(Davis and Parker, 1990; Cho *et al*., 2020). 수온에 따른 혈중 glucose 농도 변화에 대한 이전 연구에서 조피볼락은 수온 15~30°C 범위에서 혈중 glucose 농도가 수온 상승에 따라 증가하다가 폐사 직전인 30°C에서 유의하게 감소한다고 보고하였고 (Do *et al*., 2015), 교잡종인 Sunshine bass (*Morone chrysops* ♀ × *M. saxatilis* ♂)는 수온 5~30°C 범위에서 혈중 glucose 농도가 수온 상승에 따라 증가하다가 수온 30°C에서 유의하게 감소하여 본 연구와 유사한 결과를 보고하였다(Davis, 2004).

GPT와 GOT는 아미노산과 α-케토산과의 사이에 아미노기 전이반응을 촉매하는 효소로 간세포 손상에 의해 혈액으로 용출되며, 수온, 저산소, pH, 암모니아 등에 의한 스트레스 반응 지표로 널리 이용되고 있다(Pan *et al*., 2003; Kim *et al*., 2018). 본 연구에서 혈중 GPT 농도는 모든 실험구 사이에 차이를 보이지 않았고, 혈중 GOT 농도는 수온 31°C에서 유의하게 증가하여 간

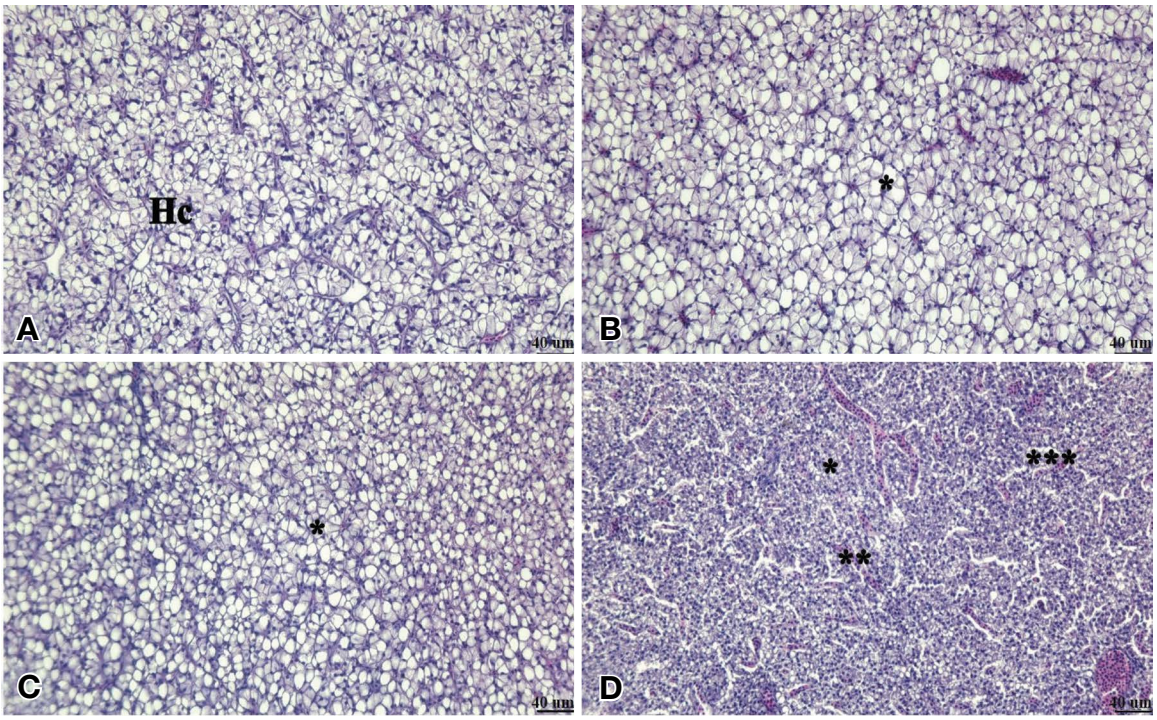

Fig. 4. Light microscope micrographs of Korean rockfish, *Sebastes schlegelii* liver exposed to artificial increase of water temperature. A: Liver exposed to 23 and 26°C. B: Liver exposed to 28°C. The showed hepatocellular hypertrophy (*). C: Liver exposed to 30°C. The showed hepatocellular condensation (*). D: Liver exposed to 31°C. The showed hepatocellular condensation (*), congestion (**) and hepatocellular necrosis (***). Hc: hepatocyte.

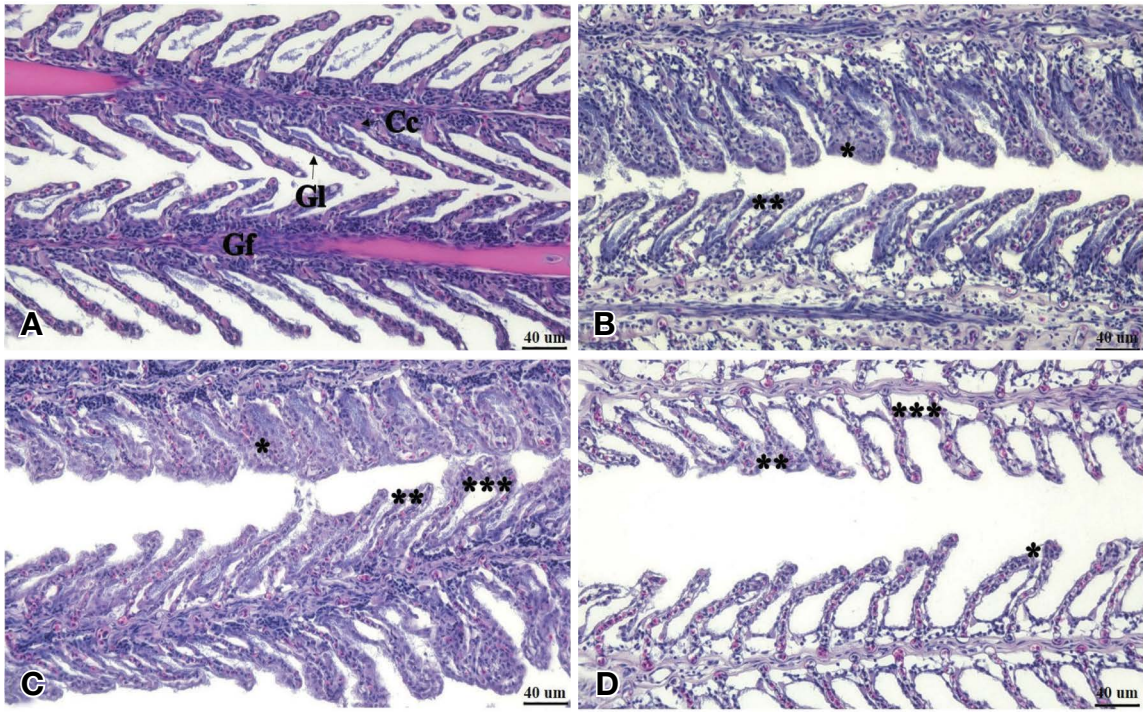

Fig. 5. Light microscope micrographs of Korean rockfish, *Sebastes schlegelii* gills exposed to artificial increase of water temperature. A: Gill exposed to 23 and 26°C. B: Gill exposed to 28°C. The showed epithelium hyperplasia (*) and epithelial lifting (**) at gill lamellar. C: Gill exposed to 30°C. The showed epithelium hyperplasia (*), epithelial lifting (**) and lamellar fusion (***) at gill lamellar. D: Gill exposed to 31°C. The showed epithelial lifting (*), fusion (**) at gill lamellar and necrosis (***) at gill fillament. Cc: chloride cell, Gf: gill fillament, Gl: gill lamellar.

의 조직학적 손상과 연관성을 보였다. 이상의 결과로 보아 수온 31°C 노출은 조피볼락 치어에게 극심한 스트레스로 작용하여 항상성 유지를 위한 에너지 요구량을 증가시키고, cortisol 분비 장애와 간세포 손상을 통한 당신생합성(gluconeogenesis)의 장애를 유발하여 glucose 생성을 억제시키는 것으로 추정된다.

어류의 아가미는 외부 환경에 직접적으로 접촉하는 기관으로 체내 삼투압 조절, 호흡 및 배출 등에 관여하는 중요한 기관이다(Khieokhajonkhet *et al*., 2022). 적정 범위 이상의 고수온 및 저수온 노출은 어류 아가미의 새판 상피층의 비대, 새변 융합, 박리 및 괴사, 핵 응축 및 염세포의 과증식과 같은 구조적 손상을 야기하고, 호흡 및 삼투압 조절 기능 등에 영향을 준다고 알려져 있다(Myeong *et al*., 2013; Amir *et al*., 2022). 본 연구에서 조피볼락의 아가미는 수온 28°C 이상에서 새판 상피세포의 증식 및 탈락, 새판의 융합 및 새엽과 새판의 괴사 등과 같은 구조적 변화가 발생하였고, 수온 31°C에서 가장 심하게 손상되었다. 이러한 고수온 노출에 따른 아가미 손상은 각시붕어(*Rhodeus uyekii*), 큰입선농어(*Lates calcarifer*), 잉어(*Cyprinus carpio*) 및 교잡종 메기(*Clarias gariepinus*♂×*C. macrocephalus*♀)에서도 본 연구와 일치하는 결과들이 보고되었다(Saber *et al*., 2011; Kim, 2015; Amir *et al*., 2022; Khieokhajonkhet *et al*., 2022).

간은 단백질 합성, 해독 및 glycogen 저장 등 다양한 기능을 하는 중요한 기관으로, 고수온, 저수온 및 독성물질 등에 노출되면 간세포의 괴사, 응축 및 공포 등이 발생한다고 보고되었다(Dutta *et al*., 1993; Liu *et al*., 2015). 본 연구에서 조피볼락 치어의 간은 실험개시 시와 수온 26°C에서는 정상적인 조직상을 보였으나, 28°C 이상의 수온에서는 간세포의 비대화가 관찰되었고, 30°C 이상에서는 오히려 세포의 응축, 출혈 및 괴사가 발생하였다. 이와 유사하게 Khieokhajonkhet *et al*. (2022)은 수온 32°C에 노출된 교잡종 메기(*Clarias gariepinus*♂×*C. macrocephalus*♀)의 간에서 세포 비대화, 형태학적 변화 및 괴사가 진행되었고, 수온 37°C에서는 보다 심각하게 손상되었다고 보고하였고, Liu *et al*. (2015)은 수온 32°C에 노출된 넙치(*Paralichthys olivaceus*)에서 간세포의 비대화 및 세포 손상이 발생하였다고 보고하였다.

결론적으로 28°C 이상의 수온 노출은 조피볼락 치어에게 스트레스로 작용하여 혈중 cortisol 및 glucose 분비 촉진, 아가미와 간 조직의 손상을 야기하며, 31°C 노출은 항상성 유지가 어려운 수준의 극심한 스트레스로 작용하여 혈중 cortisol 및 glucose 농도를 감소시키고 아가미와 간 모두 정상적인 기능 수행이 어려울 정도의 심각한 구조적 손상을 받는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 고수온기 조피볼락 치어의 피해 예방 및 안정적인 생산을 위한 기초자료로써 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

요 약

본 연구는 조피볼락 치어를 대상으로 인위적인 수온 상승에 따른 생존율, 혈중 cortisol, glucose, GOT, GPT 농도 및 아가미와 간의 조직학적 변화를 조사하였다. 실험 수온은 26°C, 28°C, 30°C 및 31°C로 설정하였고, 수온은 23°C (initial)~28°C까지는 1일에 1°C씩, 28~31°C까지는 3일에 1°C씩 조절하였다. 실험은 각 실험 수온에서 7일 동안 수행하였고, 실험기간 동안 먹이는 공급하지 않았다. 그 결과, 26°C와 28°C는 폐사가 발생하지 않았으나, 30°C는 노출 4일째부터 폐사가 발생하여 실험종료 시 1.5%의 생존율을 보였고, 31°C는 노출 1일째부터 폐사가 발생하여 노출 2일째 전량 폐사하였다. 혈중 스트레스 관련 지표를 분석한 결과, 혈중 cortisol과 glucose 농도는 수온이 높을수록 증가하였고, 31°C에서 initial보다 유의하게 감소하였다($p<0.05$). 혈중 GPT 농도는 모든 실험구 사이에 유의한 차이를 보이지 않았으나($p<0.05$), 혈중 GOT 농도는 31°C에서 유의하게 증가하였다($p<0.05$). 간과 아가미의 조직학적 관찰 결과, 간과 아가미는 모두 23°C (initial) 및 26°C에서 정상적인 조직상을 보였으나, 28°C는 간세포의 비대화 및 아가미 새판 상피세포의 증식과 새판 상피의 탈락, 30°C는 간세포들이 응축 및 아가미 새판의 융합, 31°C는 간 조직 내 충혈 및 일부 간세포의 괴사 및 아가미 새엽과 새판의 괴사가 관찰되었다.

사 사

본 논문은 2023년 국립수산과학원 수산시험연구사업(자연산 자어를 활용한 붕장어 양식기술 개발, R2023030)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

Amir, F., Z.A. Muchlisin, F.M. Nur, N. Fadli, M.N. Siti-Azizah, M. Wilkes, U.M. Tang, B. Hasan, A.S. Batubara, F.K. Kocabas and K. Marimuthu. 2022. Effect of increasing water temperature on the physiology and gill histology of Barramundi, *Lates calcarifer* (Pisces, Perciformes) fingerlings. Int. Aquat. Res., 14: 263-273. https://doi.org/10.22034/IAR.2022.1965030.1318.

Barton, B.A., J.D. Morgan and M.M. Vijayan. 2002. Physiological and condition-related indicators of environmental stress in fish. In: Adams, S.M. (ed.), Biological Indicators of Aquatic Ecosystem Stress. American Fisheries Society, Bethesda, pp. 111-148.

Becker, C.D. and R.G. Genoway. 1979. Evaluation of the critical thermal maximum for determining thermal tolerance of fresh-

water fish. Environ. Biol. Fishes, 4: 245-256. https://doi.org/10.1007/BF00005481.

Cho, J.H., S.R. Kim, Y.B. Hur, K.M. Lee and J.H. Kim. 2020. Tolerance limit of nitrite exposure to hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus*♀ × *E. lanceolatus*♂): Hematological parameters and plasma components. Korean J. Environ. Biol., 38: 93-100. https://doi.org/10.11626/KJEB.2020.38.1.093.

Choi, H.S., J.I. Myoung, M. Park and M.Y. Cho. 2009. A Study on the summer mortality of Korean rockfish *Sebastes schlegeli* in Korea. J. Fish Pathol., 22: 155-162.

Cox, D.K. 1974. Effects of three heating rates on the critical thermal maximum of bluegill. In: Gibbons, J.W. and R.R. Sharitz, (eds.), Thermal Ecology. Nat. Tech. Inf. Sew., Springfield, VA, pp. 158-163.

Davis, K.B. 2004. Temperature affects physiological stress responses to acute confinement in sunshine bass (*Morone chrysops* × *Morone saxatilis*). Comp. Biochem. Physiol. Part A Mol. Integr. Physiol., 139: 433-440. https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2004.09.012.

Davis, K.B. and N.C. Parker. 1990. Physiological stress in striped bass: effect of acclimation temperature. Aquaculture, 91: 349-358. https://doi.org/10.1016/0044-8486(90)90199-W.

Do, Y.H., B.H. Min, Y.D. Kim and M.S. Park. 2016. Changes on hematological factors and oxygen consumption of Korean rockfish *Sebastes schlegeli* in high water temperature. J. Fish. Mar. Sci. Educ., 28: 738-745. https://doi.org/10.13000/JFMSE.2016.28.3.738.

Dutta, H.M., S. Adhikari, N.K. Singh, P.K. Roy and J.S.D. Munshi. 1993. Histopathological changes induced by malathion in the liver of a freshwater catfish, *Heteropneustes fossilis* (Bloch). Bull. Environ. Contam. Toxicol., 51: 895-900. https://doi.org/10.1007/BF00198287.

Im, Y.J. and S.D. Hwang. 2002. Age and growth of black rockfish, *Sebastes schlegeli*, in western coastal waters of Korea. Korean J. Ichthyol., 14: 143-152.

Khieokhajonkhet, A., S. Sangphrom, N. Aeksiri, P. Tatsapong, K. Wuthijaree and G. Kaneko. 2022. Effects of long-term exposure to high temperature on growth performance, chemical composition, hematological and histological changes, and physiological responses in hybrid catfish [♂*Clarias gariepinus* (Burchell, 1822) × ♀*C. macrocephalus* (Gunther, 1864)]. J. Therm. Biol., 105: 103226. https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2022.103226.

Kim, J.H. 2015. Effects of water temperature on HSP70 family gene and plasma glucose levels in the Korean rose bitterling, *Rhodeus uyekii*. Unpublished Master Dissertation, Pukyong National University, Busan, Korea.

Kim, K.H., Y.J. Hwang and S.R. Kwon. 2001. Influence of daily water temperature changes on the chemiluminescent response and mortality of cultured rockfish (*Sebastes schlegeli*). Aquaculture, 192: 93-99. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(00)00460-9.

Kim, W.J., J.Y. Lee, Y.K. Shin and K.M. Won. 2018. Growth and blood characteristics of red sea bream *Pagrus major* by starvation and stocking density during red tide. Korean J. Ichthyol., 30: 194-204.

Kim, W.S., S.J. Yoon and J.W. Gil. 2003. Critical thermal maximum (CTM) of cultured black rockfish, *Sebastes schlegeli*. Fish. Aquat. Sci., 6: 59-65. https://doi.org/10.5657/fas.2003.6.2.059.

KOSIS (Korean Statistical Information Service). 2023. Fishery production survey. Available at: http://kosis.kr (accessed on September 2023).

Lee, K.M., S.-J. Koh, W.S. Kim and H.W. Kang. 2022. Effects of damage reduction in high water temperature period on the installation of liquefied oxygen and oxygen dissolver in marine net cage. J. Fish. Mar. Sci. Educ., 34: 922-931. https://doi.org/10.13000/JFMSE.2022.10.34.5.922.

Liu, Y., D. Ma, Z. Xiao, S. Xu, Y. Wang, Y. Wang, Y. Xiao, Z. Song, Z. Teng, Q. Liu and J. Li. 2015. Histological change and heat shock protein 70 expression in different tissues of Japanese flounder *Paralichthys olivaceus* in response to elevated temperature. China J. Oceanol. Limnol., 33: 11-19. https://doi.org/10.1007/s00343-015-4028-7.

Mommsen, T.P., M.M. Vijayan and T.W. Moon. 1999. Cortisol in teleosts: dynamics, mechanisms of action, and metabolic regulation. Rev. Fish Biol. Fish., 9: 211-268. https://doi.org/10.1023/A:1008924418720.

Myeong, J.I., B.H. Min, M.S. Park, H.K. Hwang, J.W. Do, K.I. Jeoung, Y.J. Chan and D.S. Jeong. 2013. Tolerance and histological responses to formalin of black seabream *Acanthopagrus schlegelii* juveniles. Korean J. Fish. Aquat. Sci., 46: 923-929. https://doi.org/10.5657/KFAS.2013.0923.

Ospina, A.F. and C. Mora. 2004. Effect of body size on reef fish tolerance to extreme low and high temperatures. Environ. Biol. Fish., 70: 339-343. https://doi.org/10.1023/B:EBFI.0000035429.39129.34.

Pan, C.H., Y.H. Chien and B. Hunter. 2003. The resistance to ammonia stress of *Penaeus monodon* Fabricius juvenile fed diets supplemented with astaxanthin. J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 297: 107-118. https://doi.org/10.1016/j.jembe.2003.07.002.

Park, J.Y., J.M. Park, C.G. Hong, K.M. Kim and J.K. Cho. 2016. Physiological and biochemical response of blood on low temperature stress in sevenband grouper, *Epinephelus septemfasciatus*. Korean J. Ichthyol., 28: 1-8.

Peck, M.A., L.J. Buckley and D. A. Bengtson. 2005. Effects of temperature, body size and feeding on rates of metabolism in young-of-the-year haddock. J. Fish Biol., 66: 911-923. https://doi.org/10.1111/j.0022-1112.2005.00633.x.

Pérez-Casanova, J.C., M.L. Rise, B. Dixon, L.O.B. Afonso, J.R. Hall, S.C. Johnson and A.K. Gamperl. 2008. The immune and stress responses of Atlantic cod to long-term increases in water temperature. Fish Shellfish Immunol., 24: 600-609. https://doi.org/10.1016/j.fsi.2008.01.012.

Portz, D.E., C.M. Woodley and J.J. Cech. 2006. Stress-associated impacts of short-term holding on fishes. Rev. Fish Biol. Fish.,

16: 125-170. https://doi.org/10.1007/s11160-006-9012-z.

Recsetar, M.S., M.P. Zeigler, D.L. Ward, S.A. Bonar and C.A. Caldwell. 2012. Relationship between fish size and upper thermal tolerance. Trans. Am. Fish. Soc., 141: 1433-1438. https://doi.org/10.1080/00028487.2012.694830.

Saber, T.H. 2011. Histological adaptation to thermal changes in gills of common carp fishes *Cyprinus carpio* L. Rafidain J. Sci., 22: 46-55.

Wendelaar Bonga, S.E. 1997. The stress response in fish. Physiol. Rev., 77: 591-625. https://doi.org/10.1152/physrev.1997.77.3.591.

Yang, S.J., J.Y. Lee, J.C. Jun, J.I. Myeong and B.H. Min. 2017. Investigation of suitable temperature and salinity ranges for long-distance transport of the rockfish *Sebastes schlegeli*. Korean J. Fish. Aquat. Sci., 50: 25-31. https://doi.org/10.5657/KFAS.2017.0025.