KFAS 한국수산과학회지 Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences
한수지 59(5), 545-556, 2026

Original Article
Korean J Fish Aquat Sci 59(5),545-556,2026

수온 변화에 따른 연어(*Oncorhynchus keta*) 치어의 스트레스 반응

김두호 · 김주경[1] · 최종국 · 김승혁[2] · 윤병선[3] · 오승용[4]*

한국수산자원공단 동해생명자원센터, [1]한국수산자원공단 남해본부, [2]코워커넷, [3]다한생태연구소, [4]한국해양과학기술원 해양생명자원연구부

Stress Response of Juvenile Chum Salmon (*Oncorhynchus keta*) to Changes in Water Temperature

Doo Ho Kim, Ju Kyoung Kim[1], Jong Kok Choi, Seung Hyuk Kim[2], Byoung Sun Yoon[3] and Sung-Yong Oh[4]*

Aquatic Living Resources Center of East Sea, Korea Fisheries Resources Agency, Yangyang 25041, Republic of Korea
[1]Southern Sea Office, Korea Fisheries Resources Agency, Yeosu 59753, Republic of Korea
[2]COWORKERNET Co., Ltd., Seoul 03395, Republic of Korea
[3]Dahan Ecological Research Institute, Gangneung 25417, Republic of Korea
[4]Marine Biotechnology & Bioresource Research Department, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Busan 49111, Republic of Korea

Chum salmon (*Oncorhynchus keta*) are a cold-water species whose growth, survival, and physiology are strongly influenced by water temperature. This study evaluated the stress responses of juvenile chum salmon to identify their optimal habitat temperature. In the rearing temperature experiment, fish were reared at 10, 12, 14, 16, and 18°C; in the temperature change experiment, the water temperature was rapidly decreased from 12°C to 6°C and 8°C or increased to 16°C and 18°C. In the rearing temperature experiment, cortisol and glucose levels were lowest at 12–16°C and lactate levels at 12–14°C, and these levels increased at the other temperatures. After rapid temperature changes, cortisol levels increased significantly with both cooling and warming, peaking when the temperature was decreased to 6°C. Glucose did not differ from the control at 16°C but increased at 6, 8, and 18°C. Triglyceride and Cl^- levels differed significantly upon cooling (6°C and 8°C), whereas lactate levels increased under all temperature change conditions. Na^+ concentrations were unaffected by the temperature changes, whereas cholesterol levels were affected only by the most rapid change (1.0°C/4 h). Overall, juvenile chum salmon experienced the least stress at 12–16°C, and the stress response was greatest when the water temperature dropped sharply below 10°C.

Keywords: Chum salmon, Temperature stress, Cortisol, Hematology

서 론

세계적으로 인구와 기대 수명이 증가하면서 각국의 식량안보에 대한 인식이 강화되고 안전하고 영양가 있는 식량과 식재료 생산에 대한 사회 전반의 관심이 높아지면서 식량으로서 수산생물의 중요도가 크게 증가하고 있다(Naylor et al., 2021; Ho et al., 2022; Lee, 2025; Park and Lee, 2025; Kim and Han, 2026). 수산물은 종류가 다양하고, 단위면적당 단백질의 함량이 높고 비타민, 오메가-3 등 다양한 기능성 물질이 다량 함유되어 있으며(Zhang and Jang, 2011; Kang et al., 2024), 다른 단백질 공급원에 비해 이산화탄소 배출량이 적은 환경친화적인 식품으로 넓은 해양 공간을 활용해 대량생산이 가능하다(Subasinghe et al., 2009; Martins et al., 2010; Gupta et al., 2024). OECD 회원국의 연간 수산물 소비량은 평균 24.7 kg, 선진국은 22.7 kg, 개발도상국은 19.6 kg, 최빈국은 13.2 kg으로 나타나 소득 수준이 높을수록 수산물의 소비가 많은 것으로 알려져 있다(Lee and Lee, 2025). 국가별 수산물 소비량을 살펴보면 2013–2015년 기준으로 1인당 연간 수산물 소비량은 우리나라가 58.4 kg으로 1위였고, 노르웨이가 53.3 kg, 일본이 50.2 kg, 중국 39.5 kg, 베트남 35.4 kg, 미국 23.7 kg, EU 22.0 kg 등

***Corresponding author:** Tel: +82. 51. 664. 3310 Fax: +82. 51. 955. 3981
E-mail address: syoh@kiost.ac.kr

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, provided the original work is properly cited.

https://doi.org/10.5657/KFAS.2026.0545
Korean J Fish Aquat Sci 59(5), 545-556, October 2026
Received 15 August 2026; **Revised** 29 September 2026; **Accepted** 6 October 2026
저자 직위: 김두호(연구원), 김주경(연구원), 최종국(연구원), 김승혁(연구원), 윤병선(연구원), 오승용(연구원)

의 순으로 수산물을 많이 소비하는 것으로 나타났다(Oh et al., 2013; Park, 2017).

수산물의 소비가 지속적으로 증가하고 있지만 국내 수산자원은 어업기술의 발달과 어선세력의 증가, 남획 등에 따른 어업강도의 증가와 연안의 매립, 간척사업 및 해상공사 등의 개발, 환경오염, 장기적인 수온 상승과 글로벌 기후변화 등으로 자원량이 감소하고 있다(Fujita, 1987; Yotsui and Maesako, 1993; Staudinger et al., 2021; Lee et al., 2023; Lee and Kim, 2024). 우리나라 연근해의 수산물 총어획량은 1971–2024년 동안 평균 122.6만톤이 어획되었지만, 최근 5년인 2020–2024년에는 평균 90.6만톤으로 어획량이 크게 감소하였다(KOSIS, 2026). 우리나라는 어획량이 감소함에 따라 양식 생산량이 증가하고 있는데, 육상의 축제식 양식이나 해상에서의 가두리 양식, 부유식 양식 등 다양한 방법으로 양식이 이루어지고 있다. 우리나라에서 2006–2025년에 해면양식을 통해 생산된 수산물은 평균 186.5만톤으로 이 중에서 어류는 8.6만톤으로 전체의 4.6%의 비율로 낮았지만, 내수면양식에서는 수산물 34,303톤이 생산되었고 이 중에서 어류는 27,411톤으로 79.9%를 차지하여 해면양식에 비해 높은 비율을 차지하는 것으로 나타났다(KOSIS, 2026). 우리나라에서 생산되는 연어류는 대부분 내수면에서 양식된 무지개송어(*Oncorhynchus mykiss*)로 연어류 총생산의 90.6%를 차지하며, 연어(*Oncorhynchus keta*)와 송어(*Oncorhynchus masou*)는 9.4%로 생산 비율이 낮았다(KOSIS, 2026). 하지만 연어(*O. keta,* chum salmon)와 무지개송어(*O. mykiss*)는 손상된 조직의 재생을 촉진하고 염증을 감소시켜 세포 재생을 촉진하는 생리활성 물질인 폴리데옥시리보뉴클레오티드(polydeoxyribonucleotide)가 다량 함유되어 있는 것으로 알려지면서 양식 생물로의 중요성이 증가하고 있다(Squadrito et al., 2017; Chae et al., 2025; Marques et al., 2025).

연어는 회귀 경로가 길고 3–4년의 회귀 시간이 소요될 뿐만 아니라 대양의 환경 변화와 먹이생물 변동 등의 외생 변수로 인한 낮은 회귀율로(Shaklee et al., 1999; Choi, 2025) 양식에 대한 관심이 크게 증가하고 있다. 연어는 하천에서 부화하여 3개월 정도 생활하다가 바다로 이동하는 특성을 가지고 있는데, 이 시기에 은화(smoltification)가 진행되어 해양 환경에 적합하게 체형, 채색 및 아가미의 형태가 변화하며 해수 환경에 적응하면서 많은 스트레스를 받는다(Myoung and Kim, 1993; Zhang et al., 1995; Thomaz et al., 1997; Cho et al., 2022). 또한 냉수성 어종인 연어류에서 수온의 변화는 성장, 성숙과 생존, 먹이 섭취 및 체내 대사생리에 영향을 미칠 뿐만 아니라 양식 시 사료효율에도 큰 영향을 미치는 중요한 환경 인자이다(Thodesen et al., 1999; Bermudes et al., 2010; Lee and Balasubramanian, 2023; Liang et al., 2024). 연어류의 서식 수온과 관련하여 왕연어(*Oncorhynchus tshawytscha*) 치어의 적정 수온은 13–16℃이며, 고수온에서는 성장 저하, 은화 감소, 포식에 대한 회피 능력이 감소한다고 알려져 있다(Marine and Cech, 2004). 또한 홍연어(*Oncorhynchus nerka*)와 대서양연어(*Salmo salar*)의 최적 성장 수온은 15–16℃로 23℃ 이상이 되면 성장이 저하되고 사료 섭취량 및 비만도가 감소, 그리고 폐사율이 증가한다고 보고되어 있다(Koskela et al., 1997; Chen et al., 2013; Hvas et al., 2017).

어류는 스트레스를 받게 되면 가장 급격한 변화로 시상하부-뇌하수체-간신축(hypothalamic–pituitary–interrenal axis)이 활성화되면서 cortisol 농도가 증가하고 다양한 호르몬들이 분비된다(Chang et al., 2001; Marine and Cech, 2004; Näslund et al., 2013; Lee et al., 2023). Cortisol 농도가 증가하고 다양한 스트레스 관련 호르몬이 증가하면 스트레스에 대항하기 위하여 에너지를 소비하면서 2차적 반응으로 혈당(glucose, GLU)을 비롯하여 젖산(lactate, LAC), 콜레스테롤(cholesterol, CHOL)과 중성지방(triglyceride, TG), 나트륨(sodium, Na^+), 염소(chloride, Cl^-)의 농도 등이 변화하는 체내 생리·생화학적 현상이 나타난다(Blasco et al., 2001; Jentoft et al., 2005; Min et al., 2013). 어류가 스트레스를 지속적으로 받게 되면 성장 저하, 항상성(homeostasis) 유지 능력 저하, 면역력 저하에 따른 질병 감염률 증가가 나타나며 심할 경우 폐사가 발생한다(Ban, 2001; Jang et al., 2022; Akbarzadeh et al., 2024; Sun et al., 2025).

연어의 부화 초기 적정 서식 수온은 10–12℃, 연안 해역으로 이동하여 생활하는 시기에는 13–14℃로 알려져 있으며, 15℃ 이상이 되면 깊은 수심으로 이동하는 특성이 있다(Fukuwaka and Kaeriyama, 1994; Fukuwaka and Suzuki, 2000; Minegishi et al., 2019; Kim et al., 2025). 즉, 연어는 성장에 따른 서식 적합 수온이 변화하는 특성이 있어 양식 과정에서 먹이 효율과 성장률 및 생존율을 높이기 위해서는 성장 시기를 고려한 적정 수온을 유지해야 한다. 이전의 연구 보고에서 언급된 바와 같이 적정 수온의 범위를 벗어나는 변화는 연어 치어의 항상성 유지를 위한 체내 스트레스 반응을 수반한다는 것을 알 수 있다(Ban, 2001; Blasco et al., 2001; Jentoft et al., 2005; Min et al., 2013; Jang et al., 2022; Akbarzadeh et al., 2024; Sun et al., 2025). 따라서 본 연구에서는 수온 변화에 따른 연어 치어의 체내 혈액학적 스트레스 반응을 조사하여 적정 서식 수온을 규명하기 위한 기초 자료를 제시하고자 한다.

재료 및 방법

실험 어류 및 사육 관리

수온의 변화에 대한 스트레스 실험에 사용된 연어 치어는 2021년에 부화한 개체들로 한국수산자원공단 동해생명자원센터(경상북도 울진군)에서 해수 순치된 전장 16.7 ± 1.0 cm, 체중 33.6 ± 7.1 g인 개체들을 사용하였다. 실험 전 연어 치어는 16톤 유수식 원형 수조(지름 4.6 m, 높이 1.2 m)에서 수온 12–13℃, 염분 31–33 psu, 수소이온농도 pH 7.1–7.6, 그리고 용존산소 8.5–9.5 mg/L 범위에서 사육하였다. 연어 치어의 먹이는 하루

에 3회(8–9 h, 12–13 h, 그리고 17–18 h)에 걸쳐 먹이 반응이 없을 때까지 충분히 공급하였다.

수온 변화 실험

수온에 따른 연어 치어의 스트레스 반응 실험은 두 가지로 이루어졌다. 첫 번째 실험은 수온 변화 후 5일간 설정된 수온에서 적응시킨 후에, 두 번째 실험은 급격한 수온 변화 후 1일째에 각각 혈액 성상의 변화를 조사하였다. 첫 번째 실험의 경우 실험 수온은 10℃, 12℃, 14℃, 16℃, 그리고 18℃로 설정하였다. 실험 전 연어 치어는 5개의 수조(지름 4.6 m, 높이 1.2 m)에 각각 30마리씩 수용하여 12℃의 수온에서 5일간 순치하였다. 순치 후 수온 변화에 따른 스트레스를 최소화하기 위하여 사육 수온을 0.17℃/4 h 올리거나 내려 실험구별 수온에 도달한 다음 5일 동안 실험구별 수온을 유지한 후 혈액을 채취하였다. 두 번째 실험의 경우 사육 수온 12℃를 대조구로 설정하고 수온이 급격하게 감소하거나 증가하는 조건으로 나누어 실험을 진행하였다. 수온 감소 실험구의 수온은 각각 6℃와 8℃로 설정하였고, 수온 증가 실험구의 수온은 16℃와 18℃로 설정하였으며, 모든 실험구는 앞선 첫 번째 실험과 동일한 수조에서 유사한 크기와 마리 수의 연어를 사용하였다. 연어 치어는 12℃ (대조구)의 수온에서 5일간 순치시키고, 1일 동안 각각 0.67℃/4 h와 1.00℃/4 h의 속도로 증가시키거나 감소시켜 설정 수온으로 변화시키고 24시간 동안 유지한 후 혈액을 채취하였다. 혈액 채취는 모든 실험에서 마지막 먹이를 공급하고 약 15–16시간이 지난 후에 실시하였다.

연어 치어의 혈액 채취 및 분석

혈액 채취는 각 실험구별 사용한 30개체 중 무작위로 선정된 10개체를 대상으로 이루어졌으며, 핸들링 등에 따른 스트레스를 최소화하기 위하여 2-phenoxyethanol (Junsei Chemical Co., Ltd., Tokyo, Japan) 150 mg/L의 농도로 마취시켜 진행하였다. 연어 치어의 혈액을 채취하기 전에 전장과 체중을 측정하였고, 혈액은 소형 주사기(1 mL; Korea Vaccine Co., Ltd., Ansan, Korea)를 이용하여 미병부의 혈관에서 채혈하였다. 채취한 혈액은 즉시 2 mL microtube (Axygen Scientific Inc., Union City, CA, USA)에 옮겨 원심분리기(Pro CF-10; DAIHAN Scientific Co., Ltd., Wonju, Korea)로 원심분리(6,000 rpm, 15 min)한 후 상등액인 혈청을 채취하여 분석에 사용하였다. 혈청은 분석 전까지 초저온 냉동고(MDFU 5086WBT; Sanyo Electric Co., Ltd., Osaka, Japan)에서 -70℃로 동결 보관한 후 분석 전에 냉장고에서 해동하여 사용하였다. 분석 항목은 cortisol, GLU, CHOL, TG, LAC, Na^+, 그리고 Cl^-이었으며, cortisol 분석은 cortisol ELISA kit (EK750001; AFG Bioscience LLC, Northbrook, IL, USA)를 사용하였고, 그 외 항목은 자동 생화학 분석기(FUJI DRI-CHEM 3500i; Fujifilm Corp., Tokyo, Japan)를 사용하였다.

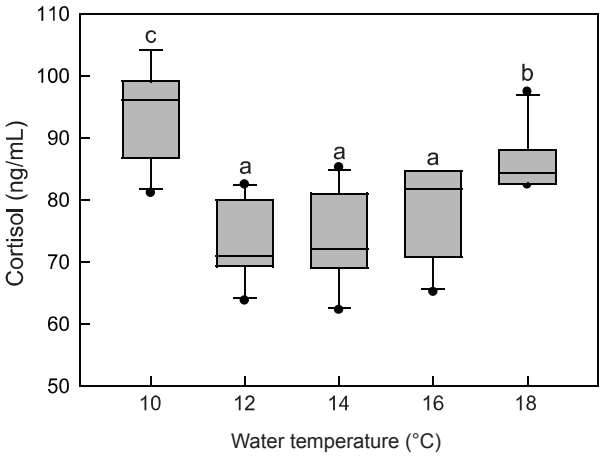


Fig. 1. Changes in cortisol concentrations in blood of juvenile chum salmon *Oncorhynchus keta* exposed to different water temperatures. Values (n=10) with different letters denote significant differences (ANOVA, P<0.05).

통계분석

실험구별로 각각 10개체에서 채취한 혈액을 분석하여 산출된 데이터(n=10)들은 분석 단위로 사용하였고 실험구별로 정리하여 분석 값을 mean±SD로 나타내었으며, 실험구 간의 차이에 대한 유의성은 통계 프로그램(SPSS 11.5; SPSS Inc., Chicago, IL, USA)을 사용하여 일원분산분석(one-way ANOVA)을 실시하였다. 통계분석에서 유의한 차이가 있는 분석 항목은 Duncan's multiple range test로 95% 신뢰수준에서 사후 검정을 실시하였다.

결 과

사육 수온에 따른 연어 치어의 스트레스 반응

사육 수온에 따른 연어 치어의 cortisol 농도를 분석한 결과는 Fig. 1에 나타내었다. 수온 12℃, 14℃와 16℃ 실험구의 평균 cortisol 농도는 각각 72.9±6.2 ng/mL, 74.0±7.5 ng/mL와 78.2±7.3 ng/mL로 유의한 차이가 없었지만(P>0.05), 10℃와 18℃에서는 평균 93.8±7.8 ng/mL와 86.2±5.0 ng/mL로 cortisol 농도가 유의하게 높았다(P<0.05). 연어 치어의 GLU, CHOL, TG, 그리고 LAC 농도는 Fig. 2에 나타내었다. GLU의 농도는 12℃, 14℃와 16℃ 실험구에서 각각 평균 104.6±14.8 mg/dL, 103.4±10.6 mg/dL와 108.0±8.3 mg/dL로 유의한 차이가 없었지만(P>0.05), 10℃와 18℃에서는 128.8±10.9 mg/dL와 121.5±13.5 mg/dL로 유의하게 높았다(P<0.05). CHOL은 12–18℃에서는 213.0–217.7 mg/dL의 범위로 유의한 차이가 없었지만(P>0.05), 수온이 가장 낮은 10℃에서 247.7±27.9 mg/dL로 높은 값을 보였다(P<0.05). TG 농도는 265.6–300.0

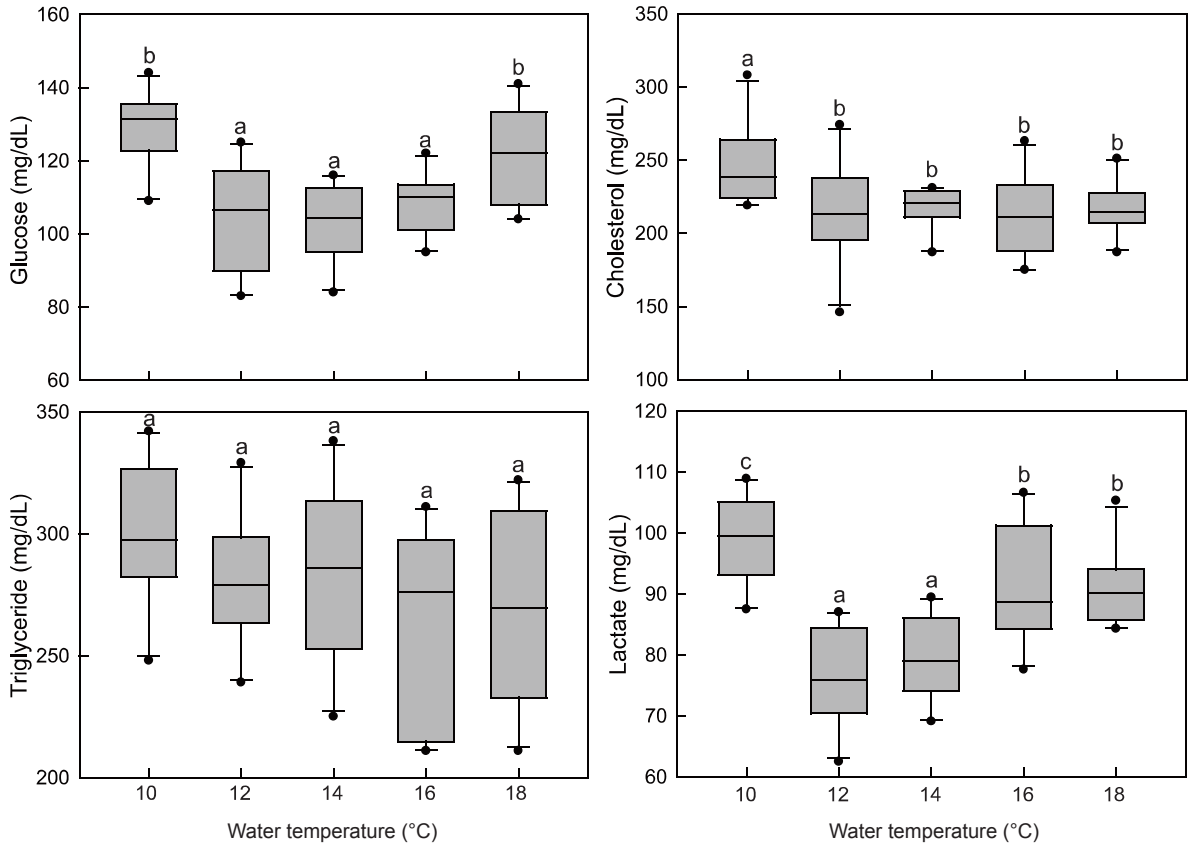


Fig. 2. Changes in glucose, cholesterol, triglyceride and lactate concentrations in blood of juvenile chum salmon *Oncorhynchus keta* exposed to different water temperatures. Values (n=10) with different letters denote significant differences (ANOVA, P<0.05).

mg/dL의 범위를 보여 실험구 사이에 유의한 차이가 없었다(P>0.05). LAC의 농도는 12℃ (76.4±8.1 mg/dL)와 14℃ (79.8±6.7 mg/dL)에서 가장 낮았고, 16℃ (91.1±9.6 mg/dL)와 18℃ (90.8±6.3 mg/dL)에서 LAC의 농도는 증가하였으며, 10℃에서 98.9±7.2 mg/dL로 가장 높았다(P<0.05). Na^+의 농도는 12℃에서만 164.8±4.8 mmol/L로 낮은 값을 보였고(P<0.05), Cl^-의 농도는 10–18℃에서 147.4–149.4 mmol/L의 범위로 유의한 차이가 없었다(Fig. 3, P>0.05).

수온의 급격한 변화에 따른 연어 치어의 스트레스 반응

연어 치어의 사육 수온이 급격하게 변화한 후 혈액 내 cortisol 농도는 Fig. 4에 나타내었다. 대조구(12℃)에서 cortisol 농도는 평균 70.2±12.5 ng/mL를 보였으며, 수온을 4℃ 증가시킨 16℃에서는 77.0±6.6 ng/mL로 유의한 차이가 없었지만(P>0.05), 6℃ 증가시킨 18℃ (87.7±9.4 ng/mL)와 4℃ 낮춘 8℃ (99.8±8.5 ng/mL)에서 cortisol의 농도가 증가하였고, 6℃에서 109.0±12.1 ng/mL로 cortisol 농도가 가장 높았다(P<0.05). GLU 농도는 대조구(즉, 12℃, 102.2±9.3 mg/dL)와 16℃ (108.3±7.9 mg/dL) 간에는 유의한 차이가 없었지만(P>0.05), 18℃ (126.0±6.9 mg/dL), 8℃ (134.3±6.2 mg/dL)와 6℃ (144.0±8.0 mg/dL)에서는 GLU 농도가 증가하였다(Fig. 5, P<0.05). CHOL은 대조구(12℃)와 16℃에서 각각 223.9±34.8 mg/dL와 221.9±33.2 mg/dL로 6℃ (260.0±34.8 mg/dL)에 비해 유의하게 낮았지만(P<0.05), 8℃ (246.1±21.6 mg/dL)와 18℃ (247.3±17.4 mg/dL)는 다른 수온과 유의한 차이가 없었다(P>0.05). TG는 대조구(12℃)와 16℃에서 각각 260.5±47.1 mg/dL와 251.6±23.8 mg/dL로 6℃ (323.5±47.6 mg/dL)와 8℃ (326.4±47.4 mg/dL)에 비해 낮았지만(P<0.05), 18℃ (289.0±25.6 mg/dL)와는 유의한 차이가 없었다(P>0.05). LAC 농도는 대조구(12℃)에서 84.8±6.6 mg/dL로 유의하게 낮았지만, 이외 수온(즉, 6, 8, 16과 18℃)에서는 95.6–102.1 mg/dL의 범위로 유의한 차이가 없었다(P>0.05). Na^+의 농도는 실험 수온 범위에서 평균 175.5–181.9 mmol/L의 범위로 유의한 차이가 없었고(P>0.05), Cl^- 농도는 6℃ (142.8±6.0 mmol/L)와 8℃ (142.0±4.3 mmol/L)에서 낮은 농도를 보였지만(P<0.05) 대조구(12℃), 16℃와 18℃에서는 149.2–149.5 mmol/L 범위로 유의한 차이가 없었다(Fig. 6, P>0.05).

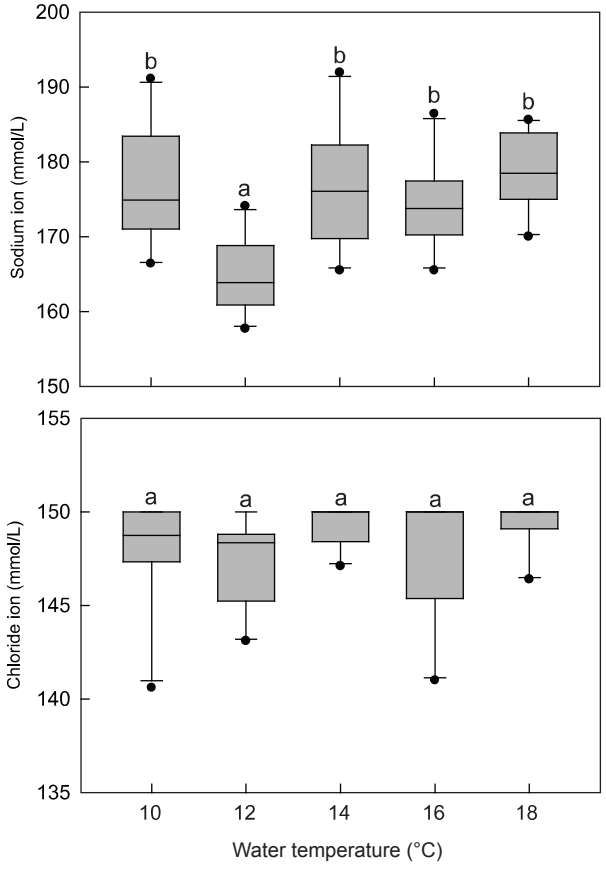


Fig. 3. Changes in Na^+ and Cl^- concentrations in blood of juvenile chum salmon *Oncorhynchus keta* exposed to different water temperatures. Values (n=10) with different letters denote significant differences (ANOVA, P<0.05).

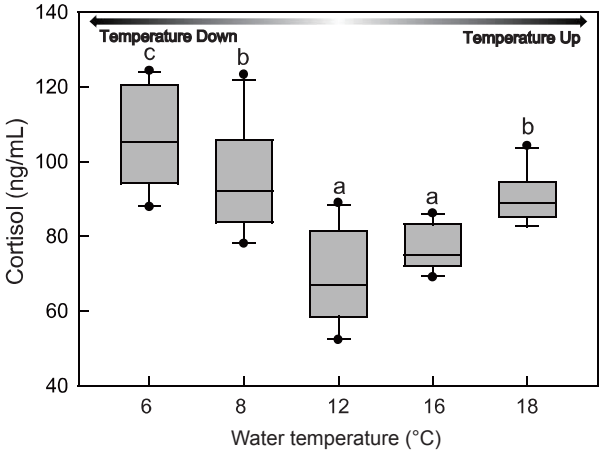


Fig. 4. Changes in cortisol concentrations in blood of juvenile chum salmon *Oncorhynchus keta* due to rapid changes in water temperature. Values (n=10) with different letters denote significant differences (ANOVA, P<0.05).

고 찰

연어(*O. keta*)는 냉수성 어종으로 성장하면서 적정 수온이 변화하는 특징을 가지고 있는데, 산란 및 부화 과정에서는 8–12℃, 자어기에는 10–12℃, 하천에서 바다로 가입되는 시기에는 13–14℃의 수온이 적합한 것으로 알려져 있다(Groot and Margolis, 1991; Myoung and Kim, 1993; Zhang et al., 1995; Fukuwaka and Suzuki, 2000). 바다로 가입된 연어 치어는 8–9 cm까지 성장하고 수온이 15℃ 이상이 되면서 깊은 수심으로 이동한다는(Kim et al., 2025) 연구 결과들을 볼 때에 연어는 성장 시기에 따라 적정 수온이 증가하는 경향을 보이는 것으로 판단된다. 연어과 어류들은 수온 변화와 같은 열충격, 미생물의 감염, 독소, 저산소 등 다양한 환경적 요인들에 의해 스트레스를 받게 되면 체내의 생리학적 변화가 발생한다(Basu et al., 2003; Greenberg et al., 2021). 스트레스로 인한 생리학적 변화는 연어의 성장과 생체량의 변동을 유발하며, 연어 치어는 스트레스의 정도가 심할 경우 폐사에 이르게 된다(Specker and Schreck, 1980; Han et al., 2003; Georgakopoulou et al., 2007). 따라서 사육 수온에 따른 연어의 생리 반응 정도의 차이를 구명하고 수온 변화 방법에 대한 대응 전략을 수립하는 것은 연어의 안정적 양식을 위해 필수적이다(Lund et al., 2002; Olsen et al., 2005; Breau et al., 2011).

스트레스를 받지 않은 안정 상태에서 연어과 어류의 혈중 cortisol 농도는 30–40 ng/mL로 알려져 있지만(Wedemeyer et al., 1990; Nakano et al., 2014), 어체의 크기와 사육 환경 등에 따라 차이를 보인다. Jonsson (2023)에 따르면 연어류의 생존 저수온은 0℃에 가깝고 생존 고수온은 20–30℃ 범위이며, 대부분 연어류의 적정 수온은 약 15℃라고 하였다. 특히, 연어류의 대부분은 20℃ 이상이 되면 스트레스를 받기 때문에 20℃ 이하의 수온에서 사육하는 것이 적합하다고 보고된 바 있어, 본 연구의 실험 1과 2에서 대표적인 스트레스 지표인 cortisol 농도가 유의하게 낮게 나타난(Fig. 1과 4) 12–16℃ 수온 범위와 유사하였다. Balasubramanian et al. (2025)는 연어 치어를 10, 14, 18과 22℃의 수온에서 실험한 결과 10℃와 22℃에서는 성장이 느리고, cortisol 농도는 10℃와 14℃는 유의한 차이가 없었지만 18℃에서 가장 높고 22℃에서 가장 낮다고 하였다. 하지만 열충격 단백질(heat shock protein, HSP)인 HSP70과 HSP90 mRNA 발현은 18℃와 22℃에서 유의한 차이를 보이며, 특히 22℃에서 급격하게 상승하며 스트레스가 발생한다고 하여 연어의 적정 사육 온도는 10℃ 초과 18℃ 미만이라고 하였다. 연어의 전장이 27.8±2.0 cm, 체중이 73.7±13.0 g인 개체들에 대한 스트레스 실험(Seo et al., 2023)에서 대조구(16℃)에서 수온을 변화시켰을 때 12℃에서는 cortisol의 농도가 대조구와 유의한 차이를 보이지 않았지만 20℃에서는 스트레스가 증가하면서 cortisol의 농도가 상승하고 24℃가 되면 실험 개체들이 1주

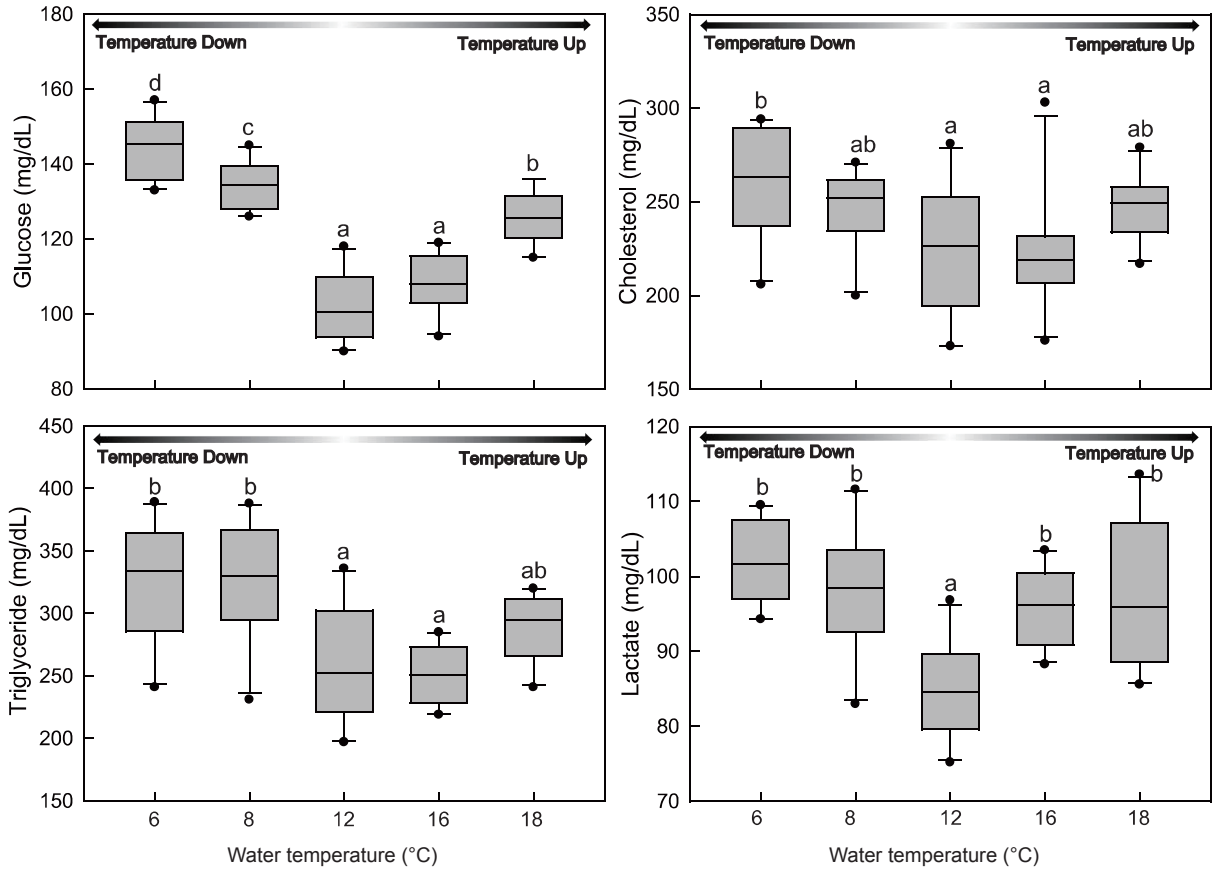


Fig. 5. Changes in glucose, cholesterol, triglyceride and lactate concentrations in blood of juvenile chum salmon *Oncorhynchus keta* due to rapid changes in water temperature. Values (n=10) with different letters denote significant differences (ANOVA, P<0.05).

만에 폐사한다고 하여, 사육이 가능한 수온은 12–20°C라고 하였다. 본 연구에서 수온에 따른 cortisol 농도의 유의한 차이가 없었던 12–16°C의 범위는 연어 치어(약 15–17 cm)에게 스트레스로 작용하지 않아 사육하기에 적절한 수온으로 판단된다.

일반적으로 어류가 스트레스를 받게 되면 cortisol 농도가 상승하고 높아진 cortisol은 포도당 신생합성(gluconeogenesis)을 촉진시켜 GLU의 혈중 분비를 증가시키는 것으로 알려져 있다(Seo et al., 2023; Madaro et al., 2024). 본 연구에서도 cortisol 농도가 가장 낮게 나타난 12–16°C의 수온 범위에서 GLU 농도가 유사하게 낮았지만, 10°C와 18°C에서는 GLU가 높아져 cortisol과 유사한 경향을 보였다(Barton and Schreck, 1987; Madaro et al., 2024).

Park et al. (2017)은 붉바리(*Epinephelus akaara*)를 12°C의 낮은 수온에서 사육하였을 때에 강한 스트레스를 받아 cortisol과 GLU의 농도가 다른 수온에 비해 유의하게 높아진다고 보고하였고, 대서양연어(*S. salar*) 역시 적정 수온에 비해 5°C 높은 20°C의 고수온에서 사육하였을 때에도 cortisol과 GLU의 농도가 증가한다고 하여(Kang et al., 2018) 본 연구와 유사한 경향을 보였다. 반면 CHOL과 TG는 수온에 따라 유의한 차이를 보이지 않거나 수온이 가장 낮았던 10°C에서만 CHOL의 농도가 증가한 것으로 나타났다. 어류의 지질 에너지 저장원인 CHOL은 어류의 영양 상태와 환경 변화에 따라 변화하고(Babin and Vernier, 1989), 스트레스를 받을 경우 체내 항상성 및 대사 유지를 위한 에너지원으로 단백질보다 지질이 우선적으로 사용된다고 알려져 있다(Hung et al., 1997; Kim et al., 2018). 본 연구에서 연어 치어가 10–18°C의 수온에 노출되었지만 대부분의 수온에서 지질 에너지원들의 농도가 차이가 없었던 것은 각 수온에서 5일 동안의 적응을 통해 항상성 유지를 위한 지질 에너지 소비의 유의적 차이 없이 안정화된 것으로 생각되지만, 향후 보다 더 장기간의 모니터링을 통한 대사 반응 연구가 있어야 할 것으로 사료된다. 어류는 낮은 수온 또는 높은 수온에 노출되면 혐기성 에너지인 글리코겐을 사용하면서 LAC이 증가하고 근육에서 혈액으로 LAC이 방출되는 것으로 알려져 있는데(Goolish, 1989; Galloway and Kieffer, 2003), 본 연구에서도 수온이 10°C인 실험구와 비교적 높은 수온 범위인 16–18°C에서 LAC의 농도가 높아 유사한 경향을 보였다. 본 실험 결과 Na^+과 Cl^-

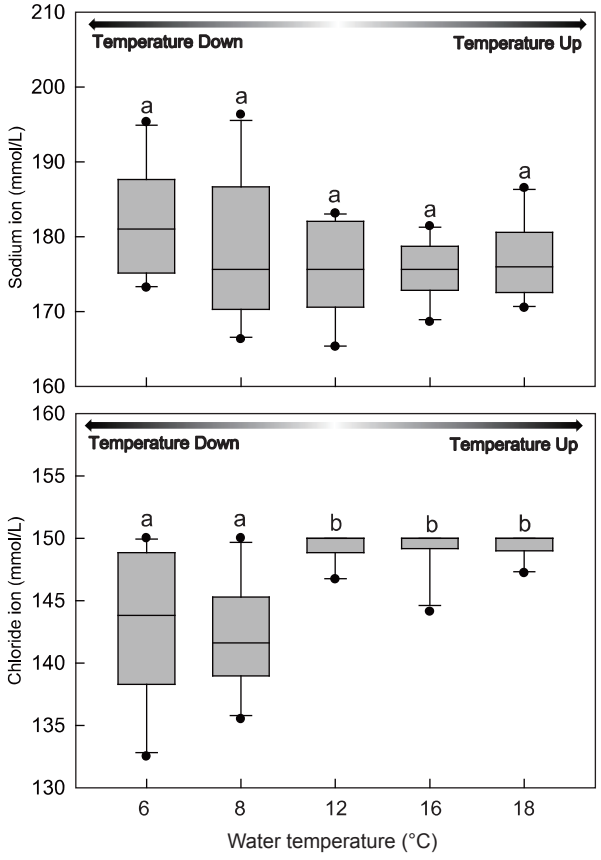


Fig. 6. Changes in Na^+ and Cl^- concentrations in blood of juvenile chum salmon *Oncorhynchus keta* due to rapid changes in water temperature. Values (n=10) with different letters denote significant differences (ANOVA, P<0.05).

의 농도는 수온 간 차이가 없거나 12℃에서만 낮은 경향을 보였다. Balasubramanian et al. (2025)도 10, 14, 18과 22℃의 수온에서 Na^+과 Cl^-의 농도는 유의한 차이를 보이지 않는다고 하였고, Jang et al. (2022)도 8, 11, 14와 17℃의 수온 실험에서 Na^+과 Cl^-의 농도가 유의한 차이가 없다고 하여 본 연구와 유사한 결과를 보였다. 일반적으로 어류가 스트레스를 받을 경우 생리활성의 변화와 삼투압 조절의 혼란에 의해 어체로부터 이온이 배출되어 전해질 농도의 차이를 유발하는 것으로 알려져 있다(Nolan et al., 1999; Choi et al., 2007; Park et al., 2017). 하지만 본 연구에서 설정한 수온은 일반적으로 알려져 있는 연어의 서식 가능한 수온(Seo et al., 2023; Balasubramanian et al., 2025)으로 수온 변화가 Na^+과 Cl^-의 농도에 미치는 영향이 미미하여 삼투압 조절과 같은 생리 변화는 적은 것으로 판단된다.

어류들은 사육 수온이 일정하게 유지되다가 수온이 크게 변화할 때에 스트레스가 급격하게 증가하여 먹이 섭취의 감소, 신진대사의 변화, 성장의 저해와 함께 대량 폐사가 발생하는 등 다양한 영향을 미친다(Fukuwaka and Suzuki, 2000; Hong et al., 2004; Breau et al., 2011; Jang et al., 2022; Seo et al., 2023). 본 실험 결과 급격한 수온 변화에 노출된 연어 치어의 cortisol 농도 변화를 볼 때 높은 수온 또는 낮은 수온 변화 모두 유의한 스트레스 영향이 나타났다. 하지만 Seo et al. (2023)은 16℃에서 사육 중인 연어(*O. keta*)를 20℃와 24℃로 급격하게 상승시킬 경우 cortisol 농도가 크게 상승하였지만 12℃로 낮출 경우 농도의 차이가 없다고 하여 본 연구와 차이를 보였다. 이것은 본 연구의 첫 번째 실험에서 12–16℃의 범위에서 cortisol 농도의 차이를 보이지 않는 것으로 볼 때 실험 조건의 차이에 기인한 것으로 생각된다. 즉, Seo et al. (2023)이 보고한 16℃에서 12℃로의 변화는 적정 사육 수온 범위 내에서의 변화였던 반면 본 실험의 12℃에서 8℃로의 변화는 적정 사육 수온 범위를 벗어난 보다 낮은 수온으로의 변화였기 때문에 cortisol의 농도가 유의하게 증가한 것으로 생각된다. 특히 연어류는 일간 8℃ 이상 변화하거나 시간당 최대 1.4℃ 이상 변화할 경우 수온 스트레스로 인하여 폐사한다고 알려져 있다(Lund et al., 2002; Galloway and Kieffer, 2003; Fowler et al., 2009). Quigley and Hinch (2006) 역시 왕연어(*O. tshawytscha*) 치어가 급격히 수온이 상승하는 하천에 노출되었을 때에 폐사가 발생하거나 불규칙적인 유영, 비정상적인 자세와 같은 스트레스 및 회피 행동을 보고하여, 급격한 수온 변화가 연어의 스트레스 인자로 작용하는 것을 알 수 있다.

Gallant et al. (2017)은 대서양연어의 수온 변화에 따른 GLU 농도의 변동을 조사한 결과 급격한 수온 증가 15시간 후 GLU 농도가 최고치를 보이고, 23시간이 지나면 점차 감소하기 시작한다고 하여 본 연구와 유사한 경향을 보였다. Nakano et al. (2014)는 은연어(*Oncorhynchus kisutch*)에게 수온 스트레스를 줄 경우 GLU 농도는 2.5시간 만에 최고치를 보이고, 17.5시간 이후부터 감소하기 시작하여 48시간이 지나면 GLU 농도가 안정화된다고 보고하여, GLU 역시 cortisol과 함께 급격한 수온 변화에 반응하는 주요 인자로 판단된다. 연어과 어류는 급격한 수온 증가로 인한 스트레스를 받을 경우 에너지원으로 단백질보다 지질을 우선적으로 사용하는 것으로 알려져 있다(Love, 1980; Shearer et al., 2012). 본 연구에서 CHOL은 8–18℃, TG는 12–18℃의 수온에서 농도의 차이가 없었지만, 수온이 낮아질 경우 TG는 6℃와 8℃에서, CHOL은 6℃에서 증가한 것으로 나타났다. Torao (2022)는 4, 8, 10, 13, 18과 23℃ 수온에서 연어 치어의 TG가 4–13℃에서는 높은 농도를 유지하였지만 18℃ 이상이 되면서 감소한다고 하여 저수온에서 높았던 본 연구와 유사한 결과를 보였다. 반면, Lee et al. (2025)는 대서양연어를 10℃에서 1℃/2 h 증가시켜 14, 18과 22℃로 변화시켰을 때에 CHOL과 TG의 농도는 유의한 차이가 없다고 하였고, Lahnsteiner and Dünser (2024)는 무지개송어(*O. mykiss*)를 9.4±0.1℃에서 1.8±1.0℃로 수온을 낮추었을 때에도 TG의 농도는 변화가 없다고 하여 연어류는 수온이 낮아질 때에 CHOL과 TG의 차이를 보이지만 cortisol과 GLU의 변화에 비

해서는 상대적으로 미미한 것으로 판단된다. 연어류는 수온 변화에 대한 급성 스트레스를 받게 되면 LAC을 생성하는 것으로 알려져 있는데(Perry and Reid, 1993; Galloway and Kieffer, 2003), 본 연구에서 수온을 0.67℃/4 h와 1.00℃/4 h로 낮추거나 증가시킨 실험구에서 LAC의 농도가 증가한 것으로 나타났다. 어류는 수온이 급격히 변화하면 혈액의 LAC이 증가하는 것으로 알려져 있는데(Goolish, 1989; Galloway and Kieffer, 2003), Clark et al. (2008)의 왕연어 연구와 Clark et al. (2012)의 은연어(*O. kisutch*) 연구에서 수온이 증가할수록 혈중 LAC이 크게 증가한다고 하였고, Foss et al. (2012)은 대서양연어가 급격한 저수온으로의 변화에서 LAC이 크게 증가한다고 하여 연어류는 수온 변화에 따라 혈중 LAC의 농도가 증가하는 것으로 판단된다. 하지만 연어(*O. keta*)는 적정 수온의 범위보다 높거나 낮은 온도에 노출되어도 은연어(*O. kisutch*), 대서양연어(*S. salar*) 등 다른 연어류에 비해 LAC 농도 변화가 적은 것으로 알려져 있는데, 이는 연어가 다른 연어류에 비해 서식할 수 있는 수온의 범위가 넓기 때문에 장시간의 수온 변화에 대해 상대적으로 높은 적응력을 가지고 있기 때문으로 판단된다(Jeon et al., 2000; Hong et al., 2004; Kang et al., 2018). 급격한 수온 변화에서 Na^+의 농도는 유의한 차이가 없었지만, Cl^-는 6℃와 8℃의 낮은 수온에서는 농도가 낮게 나타났다. Horning and Pearson (1973)은 냉수성 어종이라도 일정 수온에 적응하면 고수온으로의 변화보다는 낮은 수온으로의 변화에 민감하게 반응한다고 보고하고 있어, 본 연구의 고수온으로의 변동보다 저수온으로의 변동에서 Cl^-의 농도가 영향을 받은 것으로 생각된다.

이상의 결과에서 연어 치어는 12–16℃의 범위에서 스트레스가 가장 적었으며, 20℃ 이하의 수온 조건에서는 높은 수온(즉, 16℃와 18℃)으로의 변화보다 10℃ 이하의 낮은 수온(즉, 6℃와 8℃)으로의 급격한 변화에 노출되었을 때 더 높은 스트레스를 받는 것으로 나타났다. Jang et al. (2022)는 본 연구보다 작은 크기의 연어(전장 5.70±0.24 cm, 체중 1.22±0.03 g)는 11–17℃의 범위에서 사육이 가능하고 최적 수온은 14℃라고 보고하였고, Seo et al. (2023)은 본 연구보다 큰 크기의 연어(전장 20–30 cm)의 사육 가능 수온은 12–20℃로 보고하고 있어 냉수성 어종이라도 성장할수록 양식 가능한 수온이 높아지는 것으로 나타났다. 따라서 향후 연어의 성장 단계별 사육에 적절한 수온 범위에 대한 스트레스 연구와 급격한 수온 변동이 유발할 수 있는 스트레스 반응에 대한 정량화 연구를 통한 최적의 사육 관리 구축이 요구된다.

사 사

본 연구는 2026년도 한국수산자원공단 동해생명자원센터 수산종자자원관리사업(FIRA-RP-26-001)의 지원으로 수행되었습니다.

References

Akbarzadeh A, Ming TJ, Schulze AD, Kaukinen KH, Li S, Günther OP, Houde ALS and Miller KM. 2024. Developing molecular classifiers to detect environmental stressors, smolt stages and morbidity in coho salmon, *Oncorhynchus kisutch*. Sci Total Environ 951, 175626. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175626.

Babin PJ and Vernier JM. 1989. Plasma lipoproteins in fish. J Lipid Res 30, 467-489.

Balasubramanian B, Kim KY, Kim JW, Hwang DS, Yun EY, Kim YC and Lee JW. 2025. Chronic thermal effects on growth, osmoregulation, and stress physiology in chum salmon (*Oncorhynchus keta*) smolt. Fishes 10, 616. https://doi.org/10.3390/fishes10120616.

Ban M. 2001. Effects of handling stress on osmoregulation of juvenile sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) in seawater. Bull Natl Salmon Resour Cent 4, 1-5.

Barton BA and Schreck CB. 1987. Metabolic cost of acute physical stress in juvenile steelhead. Trans Am Fish Soc 116, 257-263. https://doi.org/10.1577/1548-8659(1987)116<257:MCOAPS>2.0.CO;2.

Basu N, Kennedy CJ and Iwama GK. 2003. The effects of stress on the association between hsp70 and the glucocorticoid receptor in rainbow trout. Comp Biochem Physiol A 134, 655-663. https://doi.org/10.1016/S1095-6433(02)00372-0.

Bermudes M, Glencross B, Austen K and Hawkins W. 2010. The effects of temperature and size on the growth, energy budget and waste outputs of barramundi (*Lates calcarifer*). Aquaculture 306, 160-166.

Blasco J, Marimón I, Viaplana I and Fernández-Borrás J. 2001. Fate of plasma glucose in tissues of brown trout in vivo: Effects of fasting and glucose loading. Fish Physiol Biochem 24, 247-258. https://doi.org/10.1023/A:1014084313207.

Breau C, Cunjak RA and Peake SJ. 2011. Behaviour during elevated water temperatures: Can physiology explain movement of juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*) to cool water? J Anim Ecol 80, 844-853. https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2011.01828.x.

Chae DB, Oh SW, Choi YS, Kang DJ, Park CW, Lee JS and Seo WS. 2025. First report on microbial-derived polydeoxyribonucleotide: A sustainable and enhanced alternative to salmon-based polydeoxyribonucleotide. Curr Issues Mol Biol 47, 41. https://doi.org/10.3390/cimb47010041.

Chang YJ, Hur JW, Lim HK and Lee JK. 2001. Stress in olive flounder (*Paralichthys olivaceus*) and fat cod (*Hexagrammos otakii*) by the sudden drop and rise of water temperature. J Korean Fish Soc 34, 91-97.

Chen Z, Anttila K, Wu J, Whitney CK, Hinch SG and Farrell AP. 2013. Optimum and maximum temperatures of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) populations hatched at different temperatures. Can J Zool 91, 265-274. https://doi.org/10.1139/cjz-2012-0300.

Cho KS, Jang SW, Lee YJ, Kang DY and Kang HS. 2022. Effect

of salinity on survival, growth and physiological response of juvenile chum salmon (*Oncorhynchus keta*). J Mar Life Sci 7, 180-186. https://doi.org/10.23005/ksmls.2022.7.2.180.

Choi CY, Min BH, Jo PG and Chang YJ. 2007. Molecular cloning of PEPCK and stress response of black porgy (*Acanthopagrus schlegeli*) to increased temperature in freshwater and seawater. Gen Comp Endocrinol 152, 47-53. https://doi.org/10.1016/j.ygcen.2007.02.019.

Choi JK. 2025. Ecological and physiological studies for enhancing the productivity of chum salmon, *Oncorhynchus keta*. Doctoral dissertation, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea, 167pp.

Clark TD, Donaldson MR, Pieperhoff S, Drenner SM, Lotto A, Cooke SJ, Hinch SG, Patterson DA and Farrell AP. 2012. Physiological benefits of being small in a changing world: Responses of coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) to an acute thermal challenge and a simulated capture event. PLoS One 7, e39079. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0039079.

Clark TD, Sandblom E, Cox GK, Hinch SG and Farrell AP. 2008. Circulatory limits to oxygen supply during an acute temperature increase in the Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*). Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol 295, R1631-R1639. https://doi.org/10.1152/ajpregu.90461.2008.

Foss A, Grimsbø E, Vikingstad E, Nortvedt R, Slinde E and Roth B. 2012. Live chilling of Atlantic salmon: Physiological response to handling and temperature decrease on welfare. Fish Physiol Biochem 38, 565-571. https://doi.org/10.1007/s10695-011-9536-6.

Fowler SL, Hamilton D and Currie S. 2009. Comparison of the heat shock response in juvenile and adult rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) — implications for increased thermal sensitivity with age. Can J Fish Aquat Sci 66, 91-100. https://doi.org/10.1139/f08-192.

Fujita D. 1987. The report of interview to fisherman on "Isoyake" in Taisei-Cho, Hokkaido. Suisanzoshoku 35, 135-138.

Fukuwaka M and Kaeriyama M. 1994. A back-calculation method for estimating individual growth of juvenile chum salmon by scale analysis. Sci Rep Hokkaido Salmon Hatchery 48, 1-9.

Fukuwaka M and Suzuki T. 2000. Density-dependence of chum salmon in coastal waters of the Japan Sea. North Pac Anadr Fish Comm Bull 2, 75-81.

Gallant MJ, LeBlanc S, MacCormack TJ and Currie S. 2017. Physiological responses to a short-term, environmentally realistic, acute heat stress in Atlantic salmon, *Salmo salar*. FACETS 2, 330-341. https://doi.org/10.1139/facets-2016-0053.

Galloway BJ and Kieffer JD. 2003. The effects of an acute temperature change on the metabolic recovery from exhaustive exercise in juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*). Physiol Biochem Zool 76, 652-662. https://doi.org/10.1086/376921.

Georgakopoulou E, Sfakianakis DG, Kouttouki S, Divanach P, Kentouri M and Koumoundouros G. 2007. The influence of temperature during early life on phenotypic expression at later ontogenetic stages in sea bass. J Fish Biol 70, 278-291. https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2007.01305.x.

Goolish EM. 1989. The scaling of aerobic and anaerobic muscle power in rainbow trout (*Salmo gairdneri*). J Exp Biol 147, 493-505.

Greenberg L, Jonsson B, Norrgård JR, Erlandsson A and Bergman E. 2021. Body shape and fin size in juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*): Effects of temperature during embryogenesis. Can J Zool 99, 381-389. https://doi.org/10.1139/cjz-2020-0101.

Groot C and Margolis L. 1991. Pacific Salmon Life Histories. UBC Press, Vancouver, Canada, 564pp.

Gupta S, Makridis P, Henry I, Velle-George M, Ribicic D, Bhatnagar A, Skalska-Tuomi K, Daneshvar E, Ciani E, Persson D and Netzer R. 2024. Recent developments in recirculating aquaculture systems: A review. Aquac Res 2024, 6096671. https://doi.org/10.1155/are/6096671.

Han HK, Kang DY, Jun CY and Chang YJ. 2003. Effect of salinity change on physiological response and growth of yearling sea bass, *Lateolabrax japonicus*. Aquaculture 16, 31-36.

Ho HC, Brodersen J, Gossner MM, Graham CH, Kaeser S, Reji Chacko M, Seehausen O, Zimmermann NE, Pellissier L and Altermatt F. 2022. Blue and green food webs respond differently to elevation and land use. Nat Commun 13, 6415. https://doi.org/10.1038/s41467-022-34132-9.

Hong KP, Kim PK, Jeon JK, Kim YH, Park YJ, Myoung JG and Kim JM. 2004. Serum stress responses during seawater acclimation in coho salmon, *Oncorhynchus kisutch*. Ocean Polar Res 26, 433-438. https://doi.org/10.4217/OPR.2004.26.3.433.

Horning WB and Pearson RE. 1973. Growth temperature requirements and lower lethal temperatures for juvenile smallmouth bass (*Micropterus dolomieui*). J Fish Res Board Can 30, 1226-1230. https://doi.org/10.1139/f73-194.

Hung SSO, Liu W, Li H, Storebakken T and Cui Y. 1997. Effect of starvation on some morphological and biochemical parameters in white sturgeon, *Acipenser transmontanus*. Aquaculture 151, 357-363. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(96)01506-2.

Hvas M, Folkedal O, Imsland A and Oppedal F. 2017. The effect of thermal acclimation on aerobic scope and critical swimming speed in Atlantic salmon, *Salmo salar*. J Exp Biol 220, 2757-2764. https://doi.org/10.1242/jeb.154021.

Jang SW, Kang HS, Kang DY and Cho KS. 2022. Effect of rearing water temperature on growth and physiological response of juvenile chum salmon (*Oncorhynchus keta*). Korean J Environ Biol 40, 651-659. https://doi.org/10.11626/KJEB.2022.40.4.651.

Jentoft S, Aastveit AH, Torjesen PA and Andersen Ø. 2005.

Effects of stress on growth, cortisol and glucose levels in non-domesticated Eurasian perch (*Perca fluviatilis*) and domesticated rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Comp Biochem Physiol A 141, 353-358. https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2005.06.006.

Jeon JK, Kim PK, Park YJ, Myoung JG and Kim JM. 2000. Changes of serum cortisol concentration and stress responses in coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) to netting. J Korean Fish Soc 33, 115-118.

Jonsson B. 2023. Thermal effects on ecological traits of salmonids. Fishes 8, 337. https://doi.org/10.3390/fishes8070337.

Kang HW, Kim KI, Lim HJ and Kang HS. 2018. Effect of water temperature on the expression of stress related genes in Atlantic salmon (*Salmo salar*) fry. Korean J Environ Biol 36, 131-139.

Kang SI, Yoon IS, Kim MK, Lee JS and Heu MS. 2024. Food functionalities of various enzyme hydrolysates prepared from olive flounder *Paralichthys olivaceus* steam-dried roe concentrate. Korean J Fish Aquat Sci 57, 515-529. https://doi.org/10.5657/KFAS.2024.0515.

Kim BH and Han GD. 2026. The importance of sweet potatoes for addressing the climate change and food security. J Asian Agric Biotechnol 41, 1-18. https://doi.org/10.51711/JAAB.2025.41.2.1.

Kim DH, Kim JK, Choi JK, Yoon BS and Oh SY. 2025. Coastal distribution and movement of juvenile chum salmon *Oncorhynchus keta* released in Namdaecheon, Gangwon-do, Korea. Korean J Fish Aquat Sci 58, 540-550. https://doi.org/10.5657/KFAS.2025.0540.

Kim WJ, Lee JY, Shin YK and Won KM. 2018. Growth and blood characteristics of red sea bream *Pagrus major* by starvation and stocking density during red tide. J Fish Pathol 31, 285-295. https://doi.org/10.7847/jfp.2018.31.4.285.

KOSIS (Korea Statistical Information Service). 2026. Survey on the Status of Fish Culture. Retrieved from https://kosis.kr/index/index.do on Jan 20, 2026.

Koskela J, Pirhonen J and Jobling M. 1997. Feed intake, growth rate and body composition of juvenile Baltic salmon exposed to different constant temperatures. Aquac Int 5, 351-360. https://doi.org/10.1023/A:1018316224253.

Lahnsteiner F and Dünser A. 2024. Hematological and physiological changes in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*, exposed for 30 days to critical low temperature. Aquac Res 2024, 2925959. https://doi.org/10.1155/2024/2925959.

Lee BJ and Lee SH. 2025. Analysis of the factors influencing the consumption of seafood products considering food hazards and consumption propensities. J Fish Bus Adm 56, 51-66. https://doi.org/10.12939/FBA.2025.56.2.051.

Lee HI and Kim JK. 2024. Analysis of influence factors on the public acceptance of Jeju Island's offshore wind power policy. J Korean Policy Stud 24, 169-189.

Lee HJ, Park GC and Oh HT. 2023. The status and implications of marine environmental impact review of floating offshore wind farm projects in Ulsan sea area. J Fish Mar Sci Educ 35, 1091-1102.

Lee JW and Balasubramanian B. 2023. Impacts of temperature on the growth, feed utilization, stress, and hemato-immune responses of cherry salmon (*Oncorhynchus masou*). Animals 13, 3870. https://doi.org/10.3390/ani13243870.

Lee YJ. 2025. Effects of water temperature on growth, hematological parameters and gene expression of Atlantic salmon (*Salmo salar*) parr in recirculating aquaculture system. Master's thesis, Pukyong National University, Busan, Korea, 48pp.

Lee YJ, Cho KS, Kim HH, Jeon HC and Lee SH. 2025. Effects of water temperature on growth, hematological measurements and stress-related gene expression of Atlantic salmon (*Salmo salar*) parr reared in a recirculating aquaculture system. Animals 15, 3048. https://doi.org/10.3390/ani15203048.

Liang S, Liu C, Sun S, Pan Y, Hu G and Yin X. 2024. Adaptability of masu salmon (*Oncorhynchus masou*) to constant and fluctuating warm water conditions: A physiological perspective. SSRN. https://doi.org/10.2139/ssrn.4904648.

Love RM. 1980. Feeding and starvation. In: The Chemical Biology of Fishes, Vol 2: Advances 1968-1977. Academic Press, London, U.K., 133-229.

Lund SG, Caissie D, Cunjak RA, Vijayan MM and Tufts BL. 2002. The effects of environmental heat stress on heat-shock mRNA and protein expression in Miramichi Atlantic salmon (*Salmo salar*) parr. Can J Fish Aquat Sci 59, 1553-1562. https://doi.org/10.1139/f02-117.

Madaro A, Lai F, Fjelldal PG, Hansen T, Gelebart V, Muren B, Rønnestad I, Olsen RE and Stien LH. 2024. Comparing physiological responses of acute and chronically stressed diploid and triploid Atlantic salmon (*Salmo salar*). Aquac Rep 36, 102041. https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2024.102041.

Marine KR and Cech JJ Jr. 2004. Effects of high water temperature on growth, smoltification, and predator avoidance in juvenile Sacramento River Chinook salmon. N Am J Fish Manage 24, 198-210.

Marques C, Porcello A, Cerrano M, Hadjab F, Chemali M, Lourenço K, Hadjab B, Raffoul W, Applegate LA and Laurent AE. 2025. From polydeoxyribonucleotides (PDRNs) to polynucleotides (PNs): Bridging the gap between scientific definitions, molecular insights, and clinical applications of multifunctional biomolecules. Biomolecules 15, 148. https://doi.org/10.3390/biom15010148.

Martins CIM, Eding EH, Verdegem MCJ, Heinsbroek LTN, Schneider O, Blancheton JP, Roque d'Orbcastel E and Verreth JAJ. 2010. New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability. Aquac Eng 43, 83-93. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2010.09.002.

Min BH, Park MS, Myeong JI and Hwang HK. 2013. Physiological stress responses in black seabream *Acanthopagrus schlegelii* subjected to acute hypoxia. Korean J Fish Aquat Sci 46, 819-826. https://doi.org/10.5657/KFAS.2013.0819.

Minegishi Y, Wong MK-S, Kanbe T, Araki H, Kashiwabara T, Ijichi M, Kogure K and Hyodo S. 2019. Spatiotemporal distribution of juvenile chum salmon in Otsuchi Bay, Iwate, Japan, inferred from environmental DNA. PLoS One 14, e0222052. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222052.

Myoung JG and Kim YU. 1993. Morphological study of *Oncorhynchus* spp. (Pisces: Salmonidae) in Korea-I, Egg development and morphology of alevin, fry and smolt of chum salmon, *Oncorhynchus keta*. Korean J Ichthyol 5, 53-67.

Nakano T, Kameda M, Shoji Y, Hayashi S, Yamaguchi T and Sato M. 2014. Effect of severe environmental thermal stress on redox state in salmon. Redox Biol 2, 772-776. https://doi.org/10.1016/j.redox.2014.05.007.

Näslund J, Rosengren M, Del Villar D, Gansel L, Norrgård JR, Persson L, Winkowski JJ and Kvingedal E. 2013. Hatchery tank enrichment affects cortisol levels and shelter-seeking in Atlantic salmon (*Salmo salar*). Can J Fish Aquat Sci 70, 585-590. https://doi.org/10.1139/cjfas-2012-0302.

Naylor RL, Kishore A, Sumaila UR, Issifu I, Hunter BP, Belton B, Bush SR, Cao L, Gelcich S, Gephart JA, Golden CD, Jonell M, Koehn JZ, Little DC, Thilsted SH, Tigchelaar M and Crona B. 2021. Blue food demand across geographic and temporal scales. Nat Commun 12, 5413. https://doi.org/10.1038/s41467-021-25516-4.

Nolan DT, Op't Veld RLJM, Balm PHM and Wendelaar Bonga SE. 1999. Ambient salinity modulates the response of the tilapia, *Oreochromis mossambicus* (Peters), to net confinement. Aquaculture 177, 297-309. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00093-9.

Oh HT, Lee WC, Song CM, Kim HC, Kim JB and Jung RH. 2013. The Norwegian model of fisheries bio-resources management. Korean J Fish Aquat Sci 46, 111-118. https://doi.org/10.5657/KFAS.2013.0111.

Olsen RE, Sundell K, Mayhew TM, Myklebust R and Ringø E. 2005. Acute stress alters intestinal function of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum). Aquaculture 250, 480-495. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.03.014.

Park HJ and Lee SH. 2025. Governance, agricultural productivity, and food security nexus: Investigating the heterogeneity between developed and developing countries. J Korean Soc Int Agric 37, 97-112.

Park HJ, Min BH and Kim SY. 2017. Behavior, survival and blood physiological responses of red-spotted grouper *Epinephelus akaara*, at different water temperature. Korean J Environ Biol 35, 128-133.

Park YJ. 2017. The demand analysis of major domestic fishery product using almost ideal demand system. Master's thesis, Pukyong National University, Busan, Korea, 56pp.

Perry SF and Reid SD. 1993. β-adrenergic signal transduction in fish: Interactive effects of catecholamines and cortisol. Fish Physiol Biochem 11, 195-203. https://doi.org/10.1007/BF00004567.

Quigley JT and Hinch SG. 2006. Effects of rapid experimental temperature increases on acute physiological stress and behaviour of stream dwelling juvenile Chinook salmon. J Therm Biol 31, 429-441. https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2006.02.003.

Seo YS, Lee HB, Jeong JH, Mun SJ and Lim HK. 2023. Change in plasma cortisol and glucose levels of *Oncorhynchus keta* according to water temperature. Fish Aquat Sci 26, 117-132. https://doi.org/10.47853/FAS.2023.e10.

Shaklee JB, Beacham TD, Seeb L and White BA. 1999. Managing fisheries using genetic data: Case studies from four species of Pacific salmon. Fish Res 43, 45-78. https://doi.org/10.1016/S0165-7836(99)00066-1.

Shearer GC, Savinova OV and Harris WS. 2012. Fish oil—how does it reduce plasma triglycerides? Biochim Biophys Acta 1821, 843-851. https://doi.org/10.1016/j.bbalip.2011.10.011.

Specker JL and Schreck CB. 1980. Stress responses to transportation and fitness for marine survival in coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) smolts. Can J Fish Aquat Sci 37, 765-769. https://doi.org/10.1139/f80-102.

Squadrito F, Bitto A, Irrera N, Pizzino G, Pallio G, Minutoli L and Altavilla D. 2017. Pharmacological activity and clinical use of PDRN. Front Pharmacol 8, 224. https://doi.org/10.3389/fphar.2017.00224.

Staudinger MD, Lynch AJ, Gaichas SK, Fox MG, Gibson-Reinemer D, Langan JA, Teffer AK, Thackeray SJ and Winfield IJ. 2021. How does climate change affect emergent properties of aquatic ecosystems? Fisheries 46, 423-441. https://doi.org/10.1002/fsh.10606.

Subasinghe R, Soto D and Jia J. 2009. Global aquaculture and its role in sustainable development. Rev Aquac 1, 2-9. https://doi.org/10.1111/j.1753-5131.2008.01002.x.

Sun S, Pan Y, Hu P, Dong H, Chen C, Liu S and Yin X. 2025. Acute salinity challenges in *Oncorhynchus masou* under warm temperature: Differential responses of osmolality, plasma ions, hormone levels, and immune parameters. Aquac Res 2025, 1889801. https://doi.org/10.1155/are/1889801.

Thodesen J, Grisdale-Helland B, Helland SJ and Gjerde B. 1999. Feed intake, growth and feed utilization of offspring from wild and selected Atlantic salmon (*Salmo salar*). Aquaculture 180, 237-246. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00204-5.

Thomaz D, Beall E and Burke T. 1997. Alternative reproductive tactics in Atlantic salmon: Factors affecting mature parr success. Proc R Soc Lond B 264, 219-226. https://doi.org/10.1098/rspb.1997.0031.

Torao M. 2022. Effect of water temperature on the feed intake, growth, and feeding efficiency of juvenile chum salmon *Oncorhynchus keta* after seawater transfer. Aquac Sci 70, 97-106.

Wedemeyer GA, Barton BA and McLeay DJ. 1990. Stress and acclimation. In: Schreck CB and Moyle PB (eds.) Methods for Fish Biology. American Fisheries Society, Bethesda, MD, U.S.A., 451-489.

Yotsui T and Maesako N. 1993. Restoration experiments of *Eisenia bicyclis* beds on barren grounds at Tsusima islands. Suisanzoshoku 41, 67-70.

Zhang CF and Jang YS. 2011. A study on the seafood consumer's value analysis and market segmentation. J Fish Bus Adm 42, 47-68.

Zhang CI, Sohn MH, Seong KB and Park IS. 1995. Yolk absorption and growth of chum salmon, *Oncorhynchus keta* alevin. J Korean Fish Soc 28, 539-548.