

염분 조건에 따른 벤자리(*Parapristipoma trilineatum*) 치어의 생존율, 생리 및 조직학적 반응

임강희 · 백성일 · 박진우*

국립수산과학원 아열대수산연구소

Survival, Physiological, and Histological Responses of Juvenile Threeline Grunt (*Parapristipoma trilineatum*) under Different Salinity Conditions

Kang Hee Im, Seong Il Baek and Jin Woo Park*

Subtropical Fisheries Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Jeju 63610, Republic of Korea

The objective of this study was to characterize the salinity tolerance of juvenile threeline grunt (*Parapristipoma trilineatum*) and analyze its physiological and histological responses under different salinity conditions to assess its viability as a prospective aquaculture species. Juvenile threeline grunt individuals (51.1 ± 1.6 g) were exposed to salinities of 31.7 (control), 25, 20, 15, 10, and 5 psu for 10 days. Cumulative survival remained high (96–98%) between 31.7 and 10 psu; conversely, all fish died within 72 h at 5 psu. Plasma Na^+ and Cl^- concentrations, as well as osmolality, decreased with decreasing salinity. However, plasma ALT, AST, cortisol, and glucose concentrations were not significantly different among the experimental groups. Neither Na^+/K^+ -ATPase concentration in the gill and kidney nor hepatic antioxidant responses (SOD, CAT, and MDA) were significantly affected by salinity. Histological structures of the gill, kidney, and liver were also not markedly affected. These results show that juvenile threeline grunt can tolerate salinities as low as 10 psu, indicating that the species may inhabit environments with a wide range of salinities. The defined salinity tolerance range provides valuable insights for future assessments of this species' aquaculture potential.

Keywords: *Parapristipoma trilineatum*, Salinity tolerance, Physiological response, Osmoregulation, Histological structure

서론

최근 해산어 양식 환경은 기후변화에 따른 해양환경의 변동성으로 사육 안정성이 저하되는 문제가 나타나고 있다. 특히 고수온과 더불어 강우 패턴의 변화는 연안 해역에서 단기간 내 염분을 급격히 변동시켜 양식 어류에게 스트레스 요인으로 작용한다(Marium et al., 2023). 특히 염분 변동은 어류 체내 이온 균형을 교란하고 삼투조절을 저해하여 생리적 항상성 유지에 영향을 미치며, 결과적으로 생존율 저하와 생리 기능 이상을 초래할 수 있어 양식 환경에서 중요한 관리 요소로 인식되고 있다(Shin et al., 2021; Hur, 2022; Jin et al., 2023; Shi et al., 2024; Song et al., 2024). 어류의 삼투조절은 아가미와 신장 등의 기관에서 이

루어지는 이온의 흡수와 배출 과정을 통해 체내 항상성을 유지하는 방식으로 이루어진다(Fridman, 2020; Song et al., 2024). 이러한 삼투 조절 능력은 어종 및 생리적 상태에 따라 다르게 나타날 수 있으므로, 양식 대상 어종의 염분 내성 범위를 규명하는 것은 양식 환경에서의 안정적인 사육 조건 설정과 신규 양식 대상종 개발에 있어 중요한 의미를 가진다.

지난 몇 년간 급격한 환경 변화로 인해 넙치와 조피볼락 등 기존 양식 품종에서 대량 폐사와 생산성 저하 문제가 발생하고 있어(KOSIS, 2026), 신규 양식 대상종 개발에 대한 관심이 높아지고 있다. 이러한 상황에서 고수온 환경에 대한 적응성이 높은 벤자리(*Parapristipoma trilineatum*)가 주목받고 있으며, 남해안 해사가두리 및 제주 지역의 육상양식장을 중심으로 양식 시

*Corresponding author: Tel: +82. 64. 780. 5420 Fax: +82. 64. 780. 5409

E-mail address: pjw1446@korea.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.2026.0299>

Korean J Fish Aquat Sci 59(4), 299-308, August 2026

Received 29 May 2026; Revised 30 June 2026; Accepted 21 July 2026

저자 직위: 임강희(연구원), 백성일(연구원), 박진우(연구사)

도가 이루어지고 있다. 벤자리는 농어상목(Acanthuriformes) 하스돔과(Haemulidae)에 속하는 어종으로, 인도-서태평양의 온난 연안에 분포하며 쿠로시오 난류의 영향을 받는 한국 남해 및 일본 남부 연안에서도 서식한다(Kim et al., 2018). 벤자리는 약 12–30°C의 비교적 넓은 수온 범위에서 안정적인 사육이 가능하며, 고수온 환경에서도 높은 생존율을 나타내는 것으로 보고된 바 있다(Park et al., 2024). 이러한 특성은 벤자리가 환경 변동성에 대응 가능한 신규 양식 대상종으로서 높은 잠재력을 지니고 있음을 시사한다.

그러나 신규 양식 대상종으로 개발되기 위해서는 고수온뿐만 아니라 염분 변동과 같은 환경 변화에도 안정적으로 대응할 수 있는 생리적 특성이 확인되어야 한다. 현재까지 벤자리의 염분 내성 범위와 이에 따른 생리 및 조직학적 변화에 관한 연구는 보고된 바 없다. 따라서 본 연구에서는 벤자리 치어를 대상으로 다양한 염분 조건(자연해수, 25, 20, 15, 10 및 5 psu)에 10일간 노출시켜 생존 가능 범위를 조사하고, 염분 변화에 따른 삼투조절과 스트레스, 항산화, 조직학적 변화 관련 생리 지표를 분석함으로써 벤자리의 염분 내성 범위를 규명하고자 하였다. 이를 통해 벤자리의 서식 특성에 대한 이해를 높이고, 양식 생산에 활용 가능한 기초자료를 제공하고자 하였다.

재료 및 방법

본 연구의 모든 실험 절차는 동물실험의 윤리적 기준을 준수하였으며, 국립수산물과학원(NIFS)의 동물실험윤리위원회(IA-CUC) 승인(승인번호: 2024-NIFS-IACUC-56)을 받아 수행되었다.

실험어와 사육조건

실험어는 국립수산물과학원 아열대수산연구소에서 생산된 벤자리 치어(평균 전장 14.5 ± 0.1 cm, 평균 체중 51.1 ± 1.6 g) (평균 $\pm$ 표준오차) 300마리를 사용하였다. 염분 내성 범위 조사를 위해 실험구는 5, 10, 15, 20, 25 psu 및 자연해수로 설정하였으며, 각 실험구는 수조별 반복구 없이 구성하였다. 실험 전 실험수조 적응을 위해 1.5 ton 원형 수조 6개에 각 50마리씩 수용하여 7일간 순치하였다. 순치 기간 자연해수 조건에서 유수식으로 사육하였으며 수온은 $19.69 \pm 0.06^\circ\text{C}$, 용존산소(Dissolved oxygen, DO)는 7.94 ± 0.05 mg/L, pH는 7.80 ± 0.03 , 염분은 32.02 ± 0.03 psu로 유지하였다. 순치 후 실험을 위한 사육수의 염분 농도는 자연해수에 담수를 혼합하는 방법으로 조절하였으며, 시간당 1 psu씩 염분을 감소시켜 각 실험구의 목표 염분 농도에 도달하도록 조절하였다. 실험은 목표 염분에 도달한 시점부터 10일간 지수식으로 진행하였으며, 수질관리를 위해 매일 1회(16:00) 각 수조 사육수의 약 50%를 환수하였다. 환수 시에는 각 실험구와 동일한 염분농도의 보충수를 사용하였다. 실험 기간 동안 수온, DO, pH 및 염분은 다항목 수질측정기(YSI ProDSS; YSI Inc., OH, USA)를 이용하여 일일 2회

(09:00, 18:00) 측정하였으며, 염분을 제외한 사육 조건은 수온 $20.72 \pm 0.06^\circ\text{C}$, DO 8.11 ± 0.21 mg/L, pH 7.59 ± 0.01 로 유지하였다. 실험 기간 염분 조건은 Table 1에 나타내었다.

샘플 수집

염분 농도에 따른 벤자리의 생리학적 변화를 평가하기 위해 실험 종료 시 각 수조의 전 개체를 채집하여 2-phenoxyethanol (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA) 200 ppm으로 마취하였다. 이후 500 IU/mL 농도의 헤파린이 처리된 주사기를 이용하여 미부혈관(caudal vein)에서 채혈하였다. 채취한 혈액은 4°C , 8,000 rpm에서 15분간 원심분리하여 혈장을 분리한 후 분석 전까지 -80°C 에 보관하였다. 채혈 후 동일 개체로부터 아가미, 신장 및 간 조직을 적출하였다. 아가미와 신장은 삼투조절 관련 지표 분석을 위해, 간은 항산화 관련 지표 분석을 위해 -80°C 에 보관하였다. 또한 조직학적 분석을 위해 일부 조직은 10% 중성 포르말린 용액에 고정하였다.

혈장 생화학, 삼투질 농도 및 생리 지표 분석

모든 실험구에서 확보된 시료를 이용하여 생화학적 및 삼투 관련 지표를 분석하였다. 혈장 내 alanine aminotransferase (ALT), aspartate aminotransferase (AST), glucose, Na^+ , K^+ 및 Cl^- 농도는 자동 생화학 분석기(Fuji Dry-Chem 7000i; Fujifilm Co., Tokyo, Japan)를 이용하여 분석하였으며, 혈장 삼투질 농도는 삼투압 측정기(Vapro 5800; Wescor Co., Logan, UT, USA)를 이용하여 측정하였다. 혈장 cortisol 농도는 상업용 ELISA kit (MBS704055; MyBioSource, San Diego, CA, USA)를 이용하여 분석하였다.

삼투조절, 항산화 및 스트레스 관련 지표 분석을 위해 상업용 ELISA kit (MyBioSource)를 사용하였으며, 분석 항목은 Na^+/K^+ -ATPase (NKA, MBS044830), superoxide dismutase (SOD, MBS282055), catalase (CAT, MBS705697) 및 malondialdehyde (MDA, MBS1601664)이었다.

아가미 및 신장 조직은 NKA 분석을 위해 PBS로 균질화[조직

Table 1. Water quality parameters of experimental groups during the 10 day experimental period

Experimental group	Temperature ($^\circ\text{C}$)	DO (mg/L)	pH	Actual salinity (psu)
Control	20.57 ± 0.24	7.52 ± 0.10^d	7.61 ± 0.02	31.7 ± 0.02^a
25	20.65 ± 0.23	7.68 ± 0.05^{cd}	7.61 ± 0.02	24.95 ± 0.02^b
20	20.76 ± 0.24	7.85 ± 0.07^{bc}	7.53 ± 0.03	20.06 ± 0.02^c
15	20.89 ± 0.23	8.30 ± 0.08^b	7.58 ± 0.02	15.04 ± 0.02^d
10	20.88 ± 0.23	8.52 ± 0.07^{ab}	7.60 ± 0.03	10.04 ± 0.01^e
5	20.87 ± 0.23	8.69 ± 0.07^a	7.60 ± 0.02	5.02 ± 0.03^f

DO, dissolved oxygen. Data are presented as mean $\pm$ SE (n=10). Different letters indicate significant differences among the experimental groups ($P < 0.05$).

중량(g): PBS 부피(mL)=1:10]한 후 사용하였으며, 간 조직은 PBS로 균질화[조직 중량(g): PBS 부피(mL)=1:9]한 후 SOD, CAT 및 MDA 분석에 사용하였다. 모든 분석 과정은 제조사의 지침에 따라 수행하였다. 흡광도는 microplate reader (Sunrise; Tecan Group Ltd., Männedorf, Switzerland)를 이용하여 450 nm에서 측정하였으며, Magellan software version 17.2 (Tecan)를 이용하여 표준곡선을 기반으로 각 항목의 값을 산출하였다.

조직학적 분석

조직표본 제작을 위해 고정된 아가미, 신장 및 간 조직은 tissue processor (TP1020; Leica Microsystems GmbH, Wetzlar, Germany)를 이용하여 탈수, 투명화 그리고 파라핀 침투 과정을 거쳤다. 파라핀으로 치환된 조직은 paraffin embedding system (HistoCore Arcadia H and C; Leica Microsystems)을 이용하여 포매하였다. 포매된 조직 블록은 마이크로톰(RM2135, Leica Microsystems)을 사용하여 4–5 µm 두께로 절편을 제작 후, Gill's hematoxylin (Gill's hematoxylin; Merck KGaA, Darmstadt, Germany)과 0.2% eosin Y solution (Sigma-Aldrich)을 이용하여 염색하였다. 염색된 조직 절편은 광학현미경(DM3000, Leica Microsystems)과 Zen imaging software version 3.1 (ZEN 3.1; Carl Zeiss Microscopy GmbH, Jena, Germany)를 이용하여 염분 변화에 따른 조직학적 변화를 관찰하였다.

생존율 분석

급성 염분 노출 후 실험 종료 시까지 12시간 간격으로 수조 내 잔존 개체 수를 측정하여 누적 생존율(cumulative survival, %)을 계산하였다. 폐사 개체는 Seo et al. (2019)의 기준에 따라 수조 바닥에 가라앉아 유영 능력을 상실하고 측면으로 기울어진 상태에서 1분 이상 아가미 호흡이 확인되지 않는 개체로 정의하였다. 생존율은 다음 식에 따라 계산하였다.

$$\text{생존율 (\%)} = [(\text{총 개체수} - \text{폐사 개체수}) / \text{총 개체수}] \times 100$$

통계 분석

모든 데이터는 평균 ± 표준오차(mean ± standard error, SE)로 나타내었다. 혈장 생화학, 삼투질 농도 및 조직 생리 지표 분석에서 통계분석에 사용한 n은 염분 실험구별 수조 내 개체 5마리로 구성된 독립적인 pooled sample 수를 의미하며(n=7), 처리된 pooled sample로 통계분석을 수행하였다. 실험구 간 유의성은 one-way analysis of variance (ANOVA)를 이용하여 검정하였으며, 유의한 차이가 나타난 경우 Tukey's honestly significant difference (HSD) test를 통해 사후 분석을 수행하였다. 모든 통계 분석은 IBM SPSS 24 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)를 활용하였으며, 유의수준은 P<0.05로 설정하였다.

결 과

혈장 이온, 삼투질 및 Na⁺/K⁺-ATPase 농도 변화

혈장 이온, 삼투질 및 NKA 농도 분석 결과를 Fig. 1에 제시하였다. 혈장 이온인 Na⁺와 Cl⁻ 농도는 염분 농도가 감소함에 따라 감소하는 경향을 보였다. Na⁺ 농도는 대조구가 다른 모든 실험구에 비해 유의적으로 높게 나타났으며(P<0.05), Cl⁻ 농도는 15, 10 psu 실험구가 대조구에 비해 유의적으로 낮았다(P<0.05). K⁺ 농도는 10 psu 실험구가 대조구보다 유의적으로 낮았다(P<0.05). 혈장 삼투질 농도(osmolality)는 염분 농도가 감소함에 따라 감소하는 경향을 나타냈으며, 대조구가 다른 모든 실험구보다 유의적으로 높은 값을 나타냈다(P<0.05). 아가미와 신장의 NKA 농도는 모든 실험구 간 유의적인 차이는 나타나지 않았으나(P>0.05), 10 psu 실험구에서 가장 높게 나타났다.

혈중 생화학적 지표 변화

혈장 내 생화학적 지표인 ALT, AST 활성과 cortisol 및 glucose 농도 분석 결과를 Fig. 2에 제시하였다. 혈장 ALT, AST 활성은 각각 12.9–30.3 U/L와 39.3–81.6 U/L 범위를 나타냈으며, cortisol 및 glucose 농도는 각각 69.6–93.3 ng/mL와 70.6–92.3 mg/dL 범위를 보였다. 혈장 내 ALT, AST 활성과 cortisol, glucose 농도는 염분 농도 변화에 따른 뚜렷한 경향을 나타내지 않았으며, 실험구 간 유의적인 차이도 확인되지 않았다(P>0.05).

항산화 지표 변화

간 내 항산화 효소인 SOD 및 CAT활성과 산화지표인 MDA 농도 분석 결과를 Fig. 3에 제시하였다. 간 내 SOD와 CAT 활성은 각각 10.0–11.1 IU/mL 및 793.2–1,089.7 mU/mL의 범위를 나타냈으며, 모든 실험구 간 유의적인 차이는 나타나지 않았다(P>0.05). 간 내 MDA 농도는 2.2–2.4 nmol/mL의 범위를 나타냈으며, 실험구 간 유의적인 차이는 확인되지 않았다(P>0.05).

조직학적 관찰

염분 변화에 따른 아가미, 신장 및 간 조직의 정성적 관찰 결과는 Fig. 4에 제시하였다. 아가미의 경우 모든 실험구에서 정상적인 형태를 보였으며, 조직 내 새엽(primary lamellae, PL), 새판(secondary lamellae, SL), 점액세포(mucous cell, MC), 염세포(chloride cell, CH) 및 혈구세포(hemocytes, HC)가 명확하게 관찰되었다. 또한 저염분 노출에 따른 뚜렷한 구조적 이상은 확인되지 않았다.

대조구와 25, 20 psu 실험구에서는 전반적으로 정상적인 신장 조직 구조가 관찰되었다. 신소체(renal corpuscle, RC) 내 사구체(glomerulus)와 보우먼주머니(Bowman's capsule)가 명확히 구분되었으며, 세뇨관(renal tubules, RT)의 상피 구조 또한 잘 보존된 상태를 나타냈다. 이들 실험구에서는 멜라노-대식세포

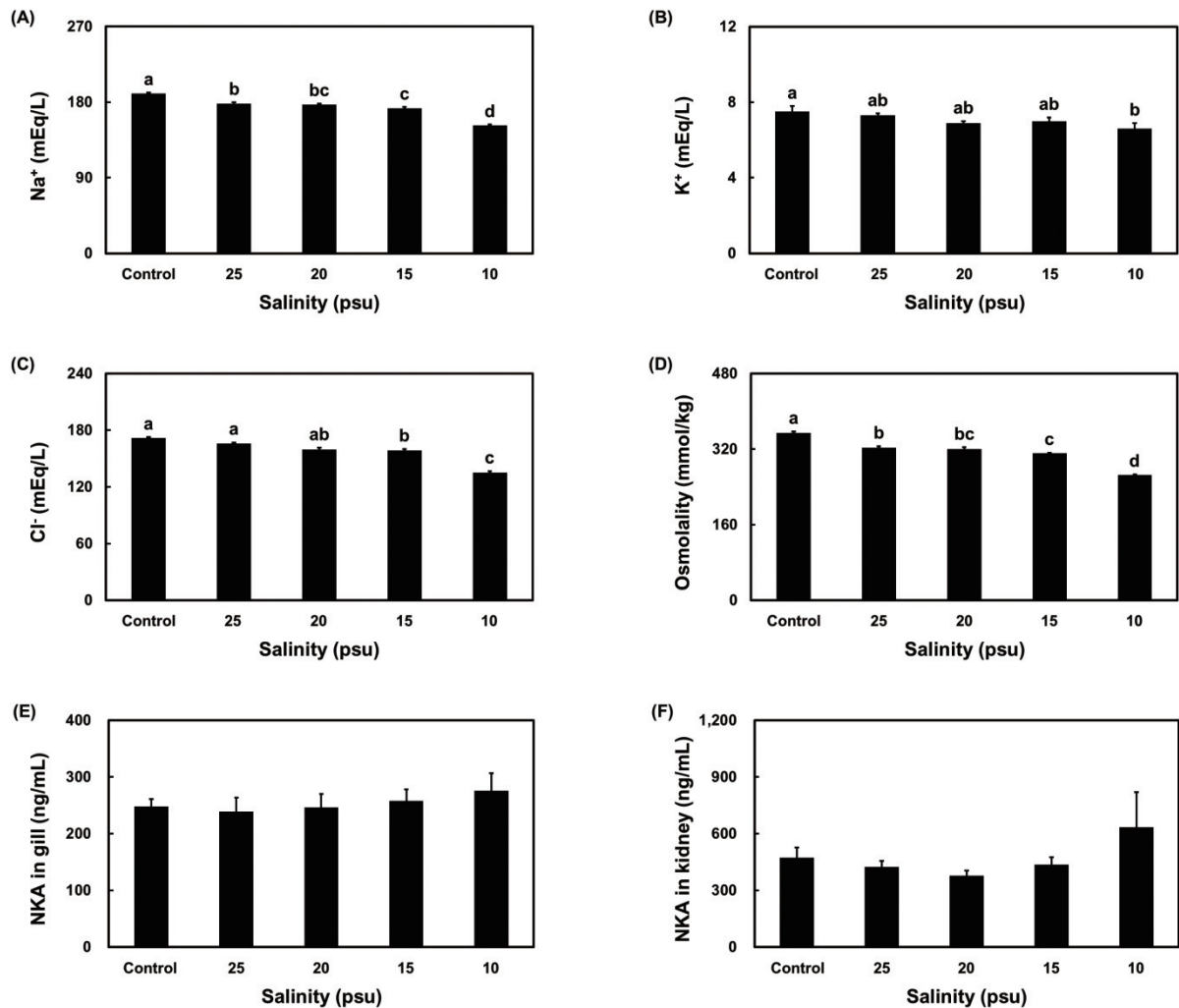


Fig. 1. Plasma ions (Na^+ , K^+ , and Cl^-), osmolality, and Na^+/K^+ -ATPase in the gill and kidney of juvenile threeline grunt exposed to different salinity conditions. A, plasma Na^+ concentration; B, plasma K^+ concentration; C, plasma Cl^- concentration; D, plasma osmolality; E, gill Na^+/K^+ -ATPase concentration; F, kidney Na^+/K^+ -ATPase concentration. Data are presented as mean $\pm$ SE (n=7). Different letters denote significant differences among the experimental groups ($P<0.05$).

포(melanomacrophage, M)가 신장 실질 내에 산재되어 관찰되었다. 반면 15, 10 psu 실험구에서는 신장 실질 내 멜라노-대식세포 중심(melanomacrophage center, MMC)의 형성이 확인되었다.

대조구의 간 조직에서는 혈관(sinusoid)을 중심으로 간세포가 방사형으로 배열된 형태가 관찰되었으며, 모든 실험구에서 크고 작은 지방방울(lipid droplets, LDs)들이 관찰되었다. 그 외에 간세포의 구조적 붕괴, 염증성 변화 및 괴사성 병변은 모든 실험구에서 확인되지 않았다.

생존율

다양한 염분에 급성 노출 후 총 10일간 벤자리의 누적생존율을 조사한 결과, 대조구 및 25, 20, 15, 10 psu 실험구의 누적생

존율은 각각 98.0, 96.0, 98.0, 98.0 및 96.0%로 나타났으며, 염분 변화에 따른 뚜렷한 차이는 확인되지 않았다(Fig. 5). 반면 5 psu 실험구에서는 염분 노출 직후부터 폐사가 발생하기 시작하였으며, 노출 12시간 후 누적생존율은 70%, 24시간 후에는 42%로 감소하였다. 이후 폐사가 지속적으로 발생하여 노출 72시간 후에는 전 개체가 폐사하였다. 이로 인해 5 psu 실험구의 혈액 및 조직 샘플의 미확보로 생화학, 삼투질 농도, 생리 지표 및 조직학적 분석은 수행되지 않았다.

고 찰

어류는 서식환경 내 염분변화가 일어날 때, 외부 염분 농도와 체내 체액 사이의 차이로 인해 체내 삼투압 조절로 항상성을

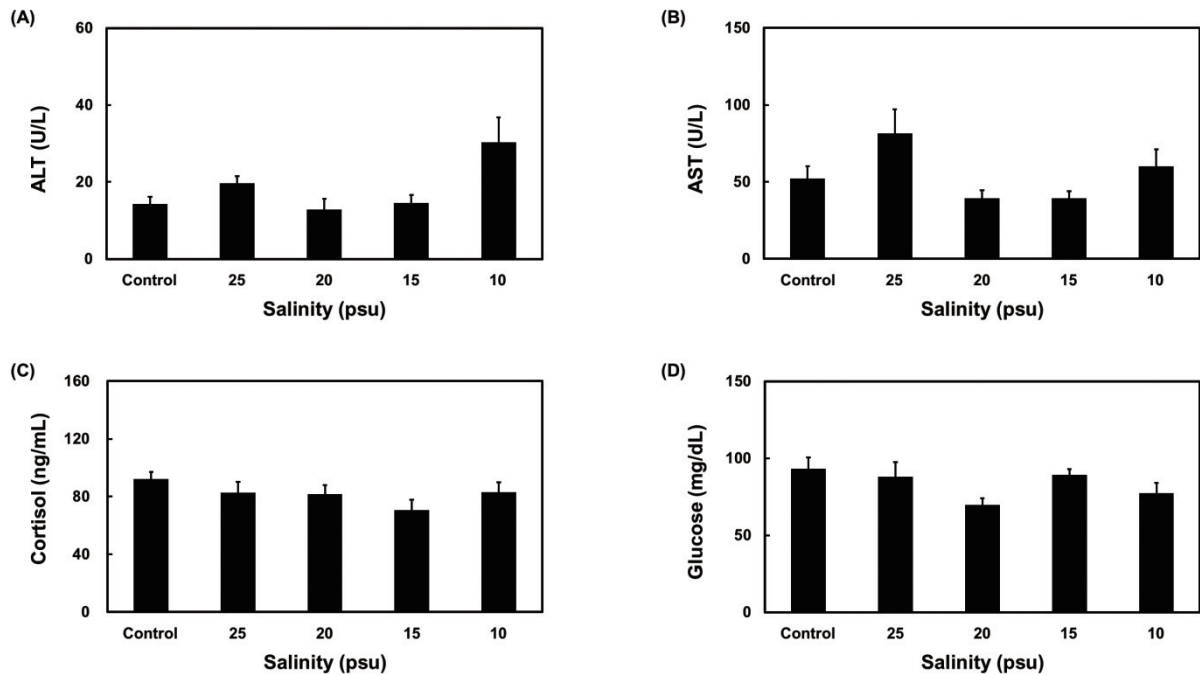


Fig. 2. Plasma biochemical parameters of juvenile threeline grunt exposed to different salinity conditions. Note: A, alanine aminotransferase activity; B, aspartate aminotransferase activity; C, cortisol concentration; D, glucose concentration. Data are presented as mean±SE (n=7). No significant differences ($P>0.05$) were observed among the experimental groups for any parameters.

유지하고자 하며, 일부 어종의 경우 광염성(euryhaline) 특성으로 넓은 염분 범위에 적응할 수 있는 것으로 알려져 있다(Bœuf and Payan, 2001). 그러나 급격한 환경변화로 인한 삼투압 조절은 대부분의 어류에게 생리학적 부담으로 작용할 수 있다. 따라서 양식어류의 염분 내성의 범위는 생리학적 반응에 기인하여 명확히 파악할 필요가 있다. 본 연구에서는 최근 고수온 대응 신규 양식품종으로 개발 중인 벤자리의 염분 내성을 규명하기 위해 염분변화에 따른 체내 생리학적 변화를 조사하였다. 일반적으로 벤자리와 같은 하스돔과 어류는 해수 염분조건에 서식하는 품종으로 알려져 있으나(Froese and Pauly, 2026), 본 연구의 결과에서 생존율을 포함한 다양한 생리학적 지표는 벤자리가 일반적인 해산어의 범주에 속하면서도 비교적 넓은 염분 내성 범위를 지닐 가능성을 시사하였다.

벤자리의 혈장 내 Na^+ , K^+ , Cl^- 와 삼투질 농도는 염분(자연 해수-10 psu)이 낮아질수록 감소하는 경향을 보였다. 해산어가 저염분 환경에 노출 시 수중의 염분 농도가 체액보다 낮아져 체내로 유입되는 수분량이 증가하고, 동시에 아가미 상피를 통한 이온 손실이 촉진되면서 혈장 이온 농도가 감소하는 일반적인 삼투 반응과 일치한다(McDonald and Milligan, 1992; Beyenbach, 2004; Evans, 2008). 이와 같은 결과는 저염분 환경에 적응한 감성돔(*Acanthopagrus schlegelii*)의 체내 삼투반응에서도 보고된 바 있으며(Yuan et al., 2026), Van fish *Alburnus tarichi*의 담수 적응 과정에서 보고된 삼투조절 반응과도 유사하

다(Oğuz, 2015). 따라서 벤자리의 결과도 저염분 환경에 적응하는 과정에서 나타난 생리적 반응으로 해석될 수 있다. 아가미의 NKA 농도는 염분 변화에 따라 유의적인 차이를 보이지 않았으나, 10 psu에서 다소 증가하는 경향이 확인되었다. 이는 저염분 환경에서 손실되는 Na^+ 와 Cl^- 를 보충하기 위한 능동적 이온 흡수가 일부 촉진되었을 가능성을 시사한다. 이러한 반응은 해산어가 저염분 환경으로 이동할 때 이온 배출에서 흡수 중심으로 조절이 전환된다는 Evans (2008)의 설명과 부합하며, 감성돔의 저염분 노출(10 psu) 연구에서 아가미 NKA 농도가 증가한 결과와도 유사하다(Yuan et al., 2026). 신장의 NKA 농도 역시 아가미와 마찬가지로 염분 변화에 따른 유의한 차이를 나타내지 않았다. 신장은 아가미와 다르게 외부 환경과 직접 이온을 교환하는 기관이 아니라 체액 조절과 이온 재흡수에 관여하는 기관으로, 호르몬 신호, 영양 상태, 대사 수준 등 다양한 내부 요인의 영향을 함께 받는 기관이다(Wood et al., 2020; Takvam et al., 2021). 따라서 신장의 NKA 농도는 단순히 염분변화에 의한 반응이라기보다 체내 항상성 유지상태를 반영하는 간접적 지표로 해석할 수 있다(Jumah, 2020). 아가미와 신장의 NKA 농도는 서로 다른 기관에서 나타난 반응이지만 두 기관 모두 염분변화에 따른 유의한 차이를 나타내지 않았다는 점은 벤자리가 저염분 환경에 적응하기 위해 체내 생리적 조절이 잘 작동하고 있음을 보여주는 결과로 해석할 수 있다. 이와 같은 벤자리의 저염분 적응에 따른 체내 항상성 유지 능력은 혈장과 간의 스트레스

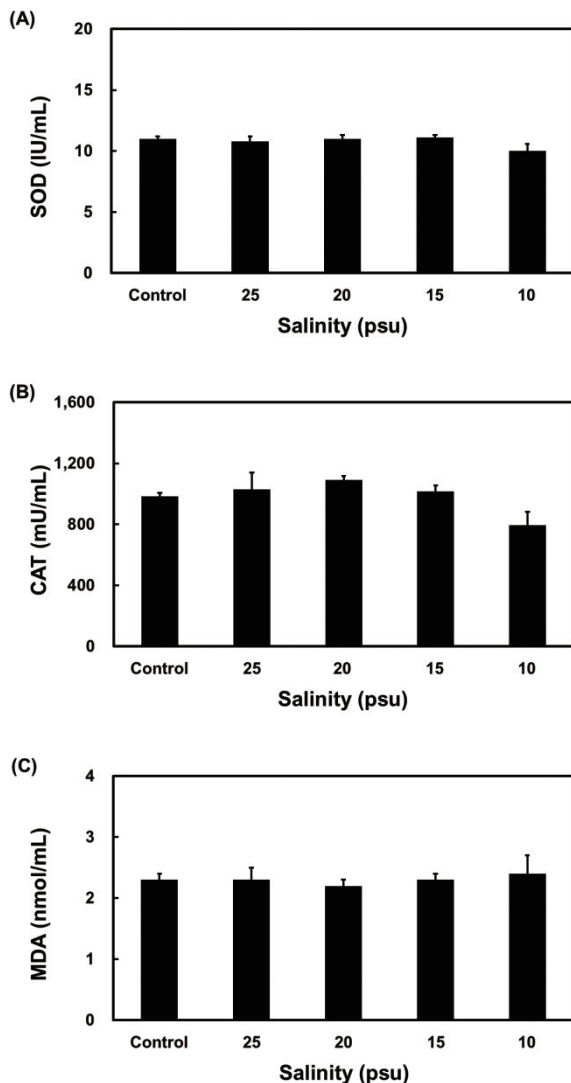


Fig. 3. Hepatic antioxidant-related responses of juvenile threeline grunt exposed to different salinity conditions. Note: A, superoxide dismutase activity; B, catalase activity; C, malondialdehyde concentration. Data are presented as mean±SE (n=7). No significant differences ($P>0.05$) were observed among the experimental groups for any parameters.

및 항산화 지표에서도 확인할 수 있었다.

어류의 간 기능과 대사 상태를 평가하는 지표인 ALT와 AST는 환경스트레스에 노출 시 증가하는 경향이 있다(Fazio et al., 2021). 또한 어류에서 대표적인 1차 스트레스 반응 지표인 cortisol과 이에 따른 에너지원으로 사용되는 2차 지표인 glucose도 역시 삼투 스트레스 조건에서 상승하는 것으로 알려져 있다(Barton, 2002; Kim et al., 2021). 본 연구에서 혈장 내 이 지표들이 실험구 간에 유의적인 차이를 보이지 않았으며, 이와 같은 결과는 벤자리가 염분 변화에도 스트레스와 관련한 생리학적

반응이 안정적으로 유지되었음을 의미한다. 간 조직 내 SOD 및 CAT 활성과 MDA 농도 역시 실험구 간에 유의한 차이를 보이지 않았다. SOD와 CAT는 활성산소 제거에 관여하는 효소이고, MDA는 지질과산화 수준을 반영하는 지표로 이들의 활성과 농도 값의 수준이 서로 다른 염분농도에도 비교적 일정하게 유지되었다는 것은 염분농도의 감소가 벤자리 간 조직의 산화적 항상성에 큰 영향을 주지 않았음을 의미한다. 즉, 본 실험 조건에서 벤자리는 저염분 환경에 노출되더라도 항산화계를 과도하게 조절하지 않은 채 내부 균형을 유지한 것으로 해석된다. 특히, 10 psu의 저염분 조건에서도 과도한 스트레스로 작용하지 않았다는 점은 벤자리가 저염분 조건에 비교적 잘 적응하며, 저염분에 높은 생리학적 내성을 지닌 품종일 가능성을 시사한다. 염분 변화에 적응하기 위한 내분비 반응의 크기는 어종과 실험 조건에 따라 다르게 나타날 수 있지만(Barton, 2002), 일정 범위의 저염분 환경에서도 항산화 지표 및 스트레스 반응이 안정적으로 유지되는 사례는 주로 광염성 어종에서 보고되어 왔다(Kim et al., 2021; Shin et al., 2021; Jeon et al., 2022). 이는 염분 변동에 대한 적응 범위가 넓은 어종일수록 저염분 환경에서도 체내 항상성을 유지할 수 있음을 보여준다. 본 연구에서 벤자리의 혈장과 간 내 스트레스 및 항산화 지표가 10 psu까지도 유의하게 변화하지 않은 점을 미루어 볼 때 벤자리는 협염성(stenohaline)보다는 광염성에 가까운 어종일 가능성을 배제할 수 없다.

어류의 내부 기관은 환경변화에 민감하게 반응하며 특히 아가미, 신장, 간의 구조적 안정성은 생리적 항상성과 건강 상태를 평가하는 주요 지표로 활용된다(Van der Oost et al., 2003; Sharmin et al., 2021). 염분 변화에 따른 조직학적 분석 결과, 아가미의 경우 모든 실험구에서 염세포와 점액세포가 대조구(자연해수)와 유사한 형태를 보였다. 모든 실험구에서 염세포가 명확히 관찰된 것은 저염분 조건에서도 아가미의 조직학적 구조에 이상이 없었음을 시사한다. 일반적으로 해산어는 저염분 환경에서 삼투압 불균형을 보상하기 위해 염세포 재배치나 점액 분비 증가를 보이는 것으로 보고되지만(Azodi et al., 2021; Ordóñez-Grande et al., 2021), 본 연구의 벤자리에서는 이러한 구조적 변화가 나타나지 않았다. 이는 벤자리가 비교적 넓은 염분 범위에서 아가미 구조의 안정성을 유지할 수 있음을 보여준다. 신장에서는 모든 실험구에서 멜라노-대식세포(M)가 관찰되었으며, 세포 손상 등의 조직학적 병변(lesion)은 관찰되지 않았다. 다만, 15–10 psu 실험구에서는 다른 실험구에 비해 멜라노-대식세포 중심(MMC)이 관찰되었는데, 이는 조직 손상보다는 저염분 적응 과정에서 나타난 면역·대사적 반응으로 해석된다. 실제로 소화성 어류인 *A. tarichi*를 대상으로 한 연구에서도 저염분 조건의 환경 변화 시 다양한 크기와 형태의 MMC가 관찰된 바 있으며, 이는 어류에서 환경변화에 대한 면역, 대사적 적응과정에서 나타날 수 있는 조직학적 반응으로 설명하고 있다(Erdemir and Oğuz, 2026). 이러한 선행 연구로 미루어 볼

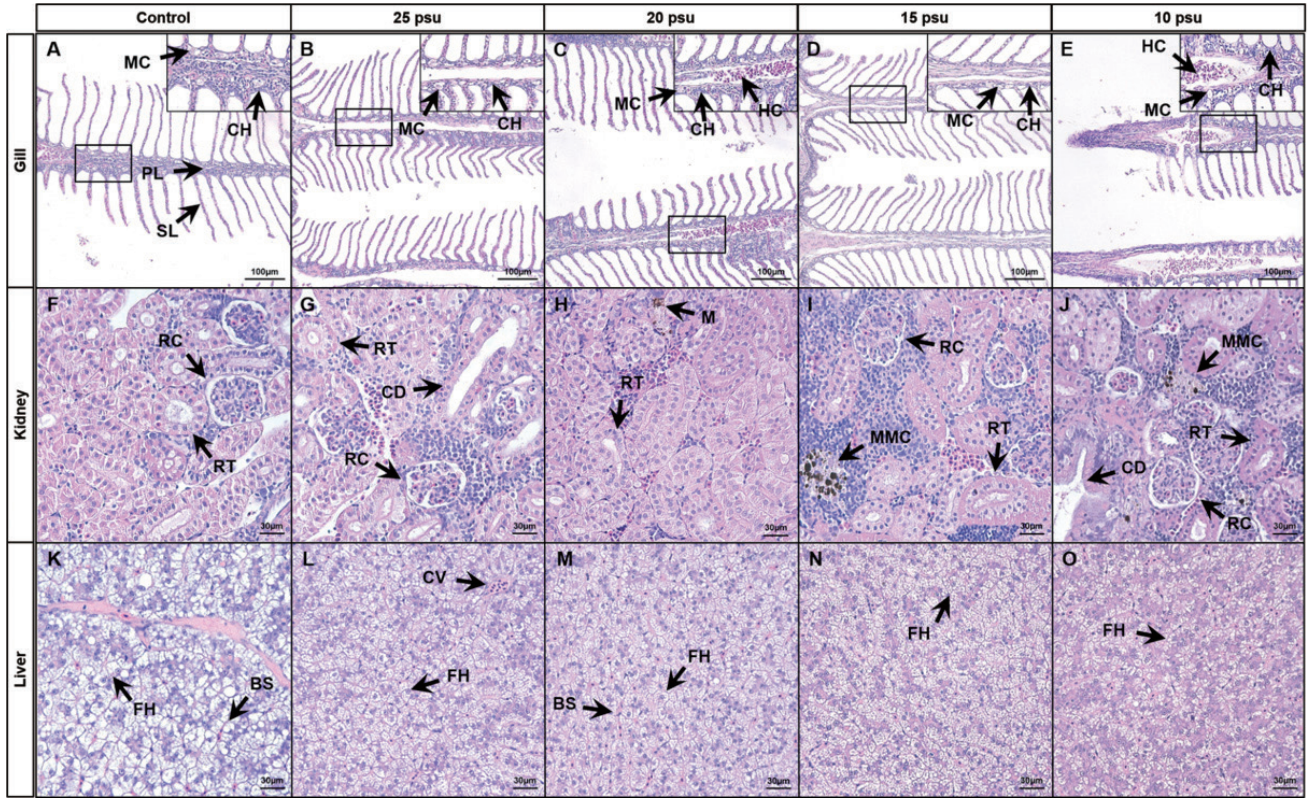


Fig. 4. Histological sections of the gill, kidney, and liver of juvenile threeline grunt exposed to different salinity conditions. Note: A–E, gill sections; F–J, kidney sections; K–O, liver sections. Abbreviations: PL, primary lamellae; SL, secondary lamellae; MC, mucous cells; CH, chloride cells; HC, hemocytes; RC, renal corpuscles; RT, renal tubules; M, melanomacrophages; MMC, melanomacrophage center; CD, collecting duct; FH, fatty vacuolized hepatocytes; BS, blood sinusoids; CV, central vein. Scale bar=100 µm in gill and 30 µm in kidney and liver.

때, 벤자리에서 관찰된 MMC는 저염분 조건에 적응하는 과정에서 나타난 일반적인 면역 반응으로 해석될 수 있다. 간 조직도 모든 실험구에서 염분변화에 따른 손상은 나타나지 않았으며, 다양한 크기의 지방방울(LDs)이 관찰되었다. LDs는 생성-성장-분해-소기관 상호작용을 반복하는 매우 동적인 소기관으로, 지방을 저장하고 필요 시 세포에 에너지를 공급한다. 또한 세포의 대사 상태, 영양 조건, 삼투조절과 같은 환경 변화에 따라 크기, 수 및 분포가 빠르게 달라질 수 있으며, 이러한 변화는 어종과 개체 상태에 따라 상이하게 나타난다(Olzman and Carvalho, 2019; Mathiowetz and Olzman, 2024). 광염성 어종으로 알려져 있는 중국바다농어(*Lateolabrax maculatus*)의 경우 저염분 노출 시 간세포에 LDs가 관찰되었고, 이는 삼투 조절 과정에서 일어나는 생리적 적응 반응으로 해석된 바 있다(Yang et al., 2021). 따라서 벤자리의 간에서 관찰된 LDs는 세포 수준에서 염분 변화에 적응하기 위해 에너지를 효율적으로 쓰는 방식으로 몸의 대사를 다시 조정하고 있다는 신호로 볼 수 있다.

일반적으로 어류는 5 mg/L 이상의 DO 농도에서 정상적인 생리활동과 성장을 유지하는 것으로 알려져 있고, 이보다 낮은 저

산소 환경에서는 성장 저하, 스트레스 증가 및 생리기능 저하가 나타날 수 있다(Marium et al., 2023). 본 연구에서 모든 실험구의 DO는 7.52 ± 0.10 - 8.69 ± 0.07 mg/L로 적정 범위를 충분히 유지하며 생리적으로 안정적인 환경조건에 해당하였다. 본 연구에서 염분이 감소할수록 DO 농도가 유의적으로 증가하는 경향을 나타냈는데 이는 동일 수온 조건에서 염분이 낮을수록 수중에 산소가 더 많이 용해되는 물리화학적 특성일 수 있으며(Bok et al., 2023), 실험구 간 생존율 및 생리학적 반응에 미치는 영향은 미미했을 것으로 판단된다.

본 연구에서 벤자리는 대조구부터 10 psu까지의 염분 범위에서 96–98%의 높은 생존율을 보였으나 5 psu 실험구에서는 모든 개체가 폐사하였다. Barton (2002)에 따르면 어류는 환경 변화의 강도와 지속 시간, 그리고 종의 적응 범위에 따라 스트레스 반응이 다르게 나타나며, 어체가 적응할 수 있는 일정 범위 내의 염분 변화에서는 생리적 조절을 통해 항상성이 유지될 수 있다. 그러나 염분 변화가 생리적 허용 범위를 초과할 경우 삼투압 조절 기능의 불균형이 유발되고, 에너지 소비 증가 및 조직 손상과 같은 생리적 이상이 나타날 수 있다. 특히, 자연 서식 환경과

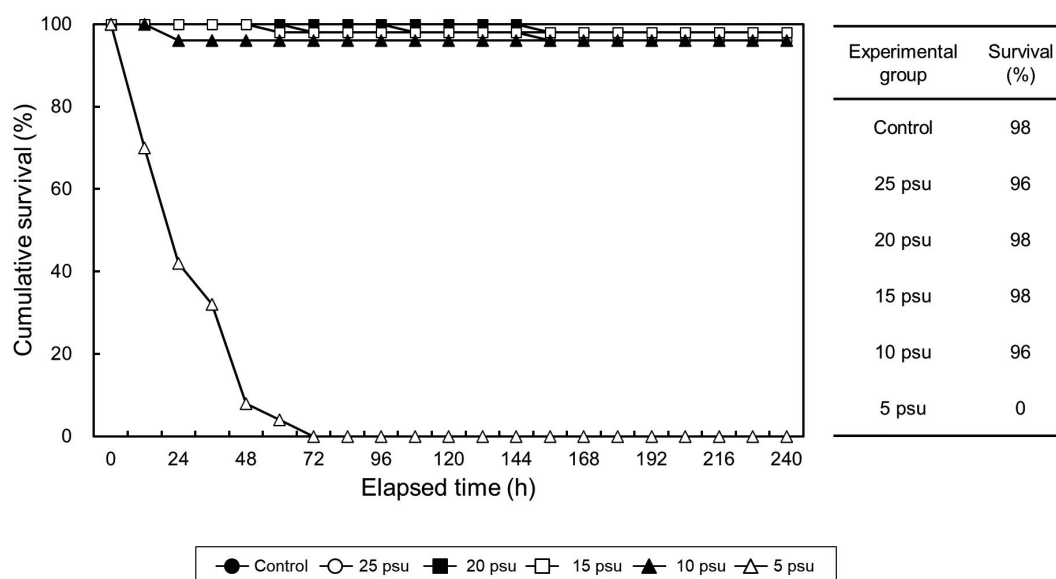


Fig. 5. Cumulative survival (%) of juvenile threeline grunt exposed to different salinity conditions during the 10-day experimental period.

큰 차이를 보이는 극단적인 저염분 환경에서는 생존율이 현저히 감소하는 사례들이 보고된 바 있다(Shi et al., 2024; Chen et al., 2025). 이러한 관점에서 5 psu는 벤자리의 생리적 적응 한계를 초과하는 염분 조건으로 판단되며, 10 psu 이상은 생존을 포함한 생리적 반응에 큰 영향을 주지 않는 범위일 수 있다. 그러나 벤자리의 적응 가능한 저염분 한계를 보다 명확히 규명하기 위해서는 5–10 psu 사이의 염분 구간에 대한 추가 실험은 필요할 것으로 생각된다.

본 연구의 결과를 종합하면, 벤자리 치어는 10 psu까지의 급성 저염분 노출에서도 생존율 뿐만 아니라 혈장 이온 농도, 삼투압, 간 효소 반응, 스트레스 호르몬, 항산화 효소 활성 등 주요 생리 및 생화학적 지표가 비교적 안정적으로 유지되었다. 또한 아가미와 신장, 간 조직에서도 뚜렷한 구조적 이상이 관찰되지 않아, 벤자리가 10 psu의 저염분 환경에도 체내 항상성을 유지할 수 있음을 확인했다. 따라서 벤자리는 비교적 넓은 염분 범위에 적응하며 서식할 수 있는 품종으로 판단된다. 광범위한 염분 조건에서도 안정적으로 생존할 수 있는 품종은 양식생산 과정에서 다양한 장점을 가진다. 이러한 특성은 계절적 강우나 담수 유입 등으로 인한 급격한 수질변화 상황에서도 안정적인 생존율과 생산성을 유지하는 데 유리하게 작용할 수 있다. 본 연구에서는 10 psu 이상의 저염분 및 기수 조건에서 단기간 생존이 가능함을 확인하였으며, 이는 일시적인 염분 저하가 발생하는 양식 환경에서도 생존성을 유지할 수 있는 가능성을 시사한다. 벤자리가 기후변화 대응에 신규 양식품종으로 개발이 추진되고 있는 만큼, 본 연구의 결과는 환경변화에 안정적인 생산이 가능한 품종으로서 양식 적용 가능성 평가를 위한 기초자료로서 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 향후에는 다양한 성장 단계에서의 염

분 적응 특성과 적정 사육 염분 조건을 규명하기 위한 추가 연구가 필요하며, 장기적인 저염분 사육이 성장, 생리 및 면역 특성에 미치는 영향에 대한 검토도 이루어져야 할 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 2026 국립수산물과학원 해수 수산생물 정보존 연구(R2026016)에 의해 수행되었습니다.

References

- Azodi M, Bahabadi MN, Ghasemi A, Morshedi V, Mozanzadeh MT, Shahraki R, Khademzadeh O, Hamed S and Avizhgan S. 2021. Effects of salinity on gills' chloride cells, stress indices, and gene expression of Asian seabass (*Lates calcarifer*, Bloch, 1790). *Fish Physiol Biochem* 47, 2027-2039. <https://doi.org/10.1007/s10695-021-01024-6>.
- Barton BA. 2002. Stress in fishes: A diversity of responses with particular reference to changes in circulating corticosteroids. *Integr Comp Biol* 42, 517-525. <https://doi.org/10.1093/icb/42.3.517>.
- Beyenbach KW. 2004. Kidneys sans glomeruli. *Am J Physiol Renal Physiol* 286, F811-F827. <https://doi.org/10.1152/ajprenal.00351.2003>.
- Bœuf G and Payan P. 2001. How should salinity influence fish growth? *Comp Biochem Physiol Part C Toxicol Pharmacol* 130, 411-423. [https://doi.org/10.1016/S1532-0456\(01\)00268-X](https://doi.org/10.1016/S1532-0456(01)00268-X).
- Bok F, Moog HC and Brendler V. 2023. The solubility of oxygen in water and saline solutions. *Front Nucl Eng* 2, 1158109.

- <https://doi.org/10.3389/fnuen.2023.1158109>.
- Chen Z, Liu W, Zheng A, Jin M, Huang S, Zhao L, Tang S, Moses Mkulo E, Wang L, Zhang H, Lu J, Mwemi HM, Tang B, Zhou H, Wang B, Huang J and Wang Z. 2025. Effects of salinity on growth, survival, tissue structure, osmoregulation, metabolism, and antioxidant capacity of *Eleutheronema tetradactylum* (Shaw, 1804). *Front Mar Sci* 12, 1553114. <https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1553114>.
- Erdemir AN and Oğuz AR. 2026. Histological and immunohistochemical responses of the kidney in Van fish (*Alburnus tarichi*) during upstream migration. *Fish Physiol Biochem* 52, 8. <https://doi.org/10.1007/s10695-025-01624-6>.
- Evans DH. 2008. Teleost fish osmoregulation: What have we learned since August Krogh, Homer Smith, and Ancel Keys. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 295, R704-R713. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.90337.2008>.
- Fazio F, Saoca C, Capillo G, Iaria C, Panzera M, Piccione G and Spanò N. 2021. Intra-variability of some biochemical parameters and serum electrolytes in rainbow trout (Walbaum, 1792) bred using a flow-through system. *Heliyon* 7, e06361. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06361>.
- Fridman S. 2020. Ontogeny of the osmoregulatory capacity of teleosts and the role of ionocytes. *Front Mar Sci* 7, 709. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00709>.
- Froese R and Pauly D. 2026. FishBase. World Wide Web electronic publication. Retrieved from <https://www.fishbase.org> on May 18, 2026.
- Hur JW. 2022. Stress response of olive flounder *Paralichthys olivaceus* and Japanese croaker *Nibea japonica* on changes of water temperature. *Fish Aquat Sci* 25, 441-449. <https://doi.org/10.47853/FAS.2022.e40>.
- Jeon SH, Choi J, Kim KT, Byun SG, Lim HJ, Kim YK and Sohn SB. 2022. Blood physiological changes and gene expression on walleye pollock *Gadus chalcogrammus* stress response to salinity fluctuation. *J Kor Soc Fish Mar Edu* 34, 1140-1150. <https://doi.org/10.13000/JFMSE.2022.12.34.6.1140>.
- Jin YG, Gil HW, Kim DJ, Hwang H and Kim HW. 2023. Survival, physiological responses and histological changes in Korean rockfish *Sebastes schlegelii* exposed to artificial increase of water temperature. *Korean J Ichthyol* 35, 236-243. <https://doi.org/10.35399/ISK.35.4.3>.
- Jumah YU. 2020. A review on the activity of Na⁺/K⁺-ATPase in branchial ionocytes and its role in salinity adaptation among diadromous species. *World J Adv Res Rev* 6, 201-211. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2020.6.2.0158>.
- Kim KH, Hong SW, Moon HN and Yeo IK. 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 JH, Jeong EH, Jeon YH, Kim SK and Hur YB. 2021. Salinity-mediated changes in hematological parameters, stress, antioxidant responses, and acetylcholinesterase of juvenile olive flounders (*Paralichthys olivaceus*). *Environ Toxicol Pharmacol* 83, 103597. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2021.103597>.
- KOSIS (Korean Statistical Information Service). 2026. Fishery production and aquaculture statistics. Retrieved from https://www.index.go.kr/unity/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=2748 on April 1, 2026.
- Marium A, Chatha AMM, Naz S, Khan MF, Safdar W and Ashraf I. 2023. Effect of temperature, pH, salinity and dissolved oxygen on fishes. *J Zool Syst* 1, 1-12. <https://doi.org/10.56946/jzs.v1i2.198>.
- Mathiowetz AJ and Olzmann JA. 2024. Lipid droplets and cellular lipid flux. *Nat Cell Biol* 26, 331-345. <https://doi.org/10.1038/s41556-024-01364-4>.
- McDonald DG and Milligan CL. 1992. Chemical properties of the blood. In: *Fish Physiology*. Hoar WS, Randall DJ and Farrell AP, eds. Academic Press, San Diego, CA, U.S.A., Vol. 12, 55-133. [https://doi.org/10.1016/S1546-5098\(08\)60009-6](https://doi.org/10.1016/S1546-5098(08)60009-6).
- Oğuz AR. 2015. A histological study of the kidney structure of Van fish (*Alburnus tarichi*) acclimated to highly alkaline water and freshwater. *Mar Freshw Behav Physiol* 48, 135-144. <https://doi.org/10.1080/10236244.2015.1004838>.
- Olzmann JA and Carvalho P. 2019. Dynamics and functions of lipid droplets. *Nat Rev Mol Cell Biol* 20, 137-155. <https://doi.org/10.1038/s41580-018-0085-z>.
- Ordóñez-Grande B, Guerreiro PM, Sanahuja I, Fernández-Alacid L and Ibarz A. 2021. Environmental salinity modifies mucus exudation and energy use in European sea bass juveniles. *Animals* 11, 1580. <https://doi.org/10.3390/ani11061580>.
- Park JW, Cho JH, Baek SI, Im KH and Ryu YW. 2024. Artificial induction of spawning in threeline grunt *Parapristipoma trilineatum* under controlled environmental conditions. *Fishes* 9, 453. <https://doi.org/10.3390/fishes9110453>.
- Seo S, Choi EJ and Park JH. 2019. Acute toxicity effects of nitrate nitrogen on juvenile black porgy, *Acanthopagrus schlegelii*. *Korean J Fish Aquat Sci* 52, 268-273. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2019.0268>.
- Sharmin S, Islam MT, Sadat MA, Jannat R, Alam MR and Shahjahan M. 2021. Sumithion induced structural erythrocyte alteration and damage to the liver and kidney of Nile tilapia. *Environ Sci Pollut Res* 28, 36695-36706. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13263-4>.
- Shi H, Li J, Li X, Ru X, Huang Y, Zhu C and Li G. 2024. Survival pressure and tolerance of juvenile greater amberjack (*Seriola dumerili*) under acute hypo- and hyper-salinity stress. *Aquac Rep* 36, 102150. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2024.102150>.
- Shin YK, Choi YJ and Gil HW. 2021. Survival, growth and physiological response of the juvenile hybrid grouper (*Epinephelus akaara*♀×*E. lanceolatus*♂) exposed to different

- water salinity levels. Korean J Fish Aquat Sci 54, 426-433. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2021.0426>.
- Song M, Lee GS, Kang PJ, Park HM and Oh SY. 2024. Water temperature and salinity affect oxygen consumption in the black sea bream *Acanthopagrus schlegelii*. Korean J Fish Aquat Sci 57, 547-553. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2024.0547>.
- Takvam M, Wood CM, Kryvi H and Nilsen TO. 2021. Ion transporters and osmoregulation in the kidney of teleost fishes as a function of salinity. Front Physiol 12, 664588. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.664588>.
- Van der Oost R, Beyer J and Vermeulen NP. 2003. Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment: A review. Environ Toxicol Pharmacol 13, 57-149. [https://doi.org/10.1016/S1382-6689\(02\)00126-6](https://doi.org/10.1016/S1382-6689(02)00126-6).
- Wood CM, Pelster B, Braz-Mota S and Val AL. 2020. Gills versus kidney for ionoregulation in the obligate air-breathing *Arapaima gigas*, a fish with a kidney in its air-breathing organ. J Exp Biol 223, jeb232694. <https://doi.org/10.1242/jeb.232694>.
- Yang Y, Yu W, Lin H, Shu H, Huang X, Li T, Huang Z, Wang P, Huang Q and Xun P. 2021. Effects of acute low salinity stress on the liver structure, physiology and biochemistry of juvenile Chinese sea bass (*Lateolabrax maculatus*). Isr J Aquac-Bamidgeh 73, 1-13. <https://doi.org/10.46989/001c.19033>.
- Yuan Z, Li Y, Li Y, Gao P, Jia C, Meng Q and Lai Q. 2026. Effects of low salinity stress on the survival and osmotic regulation of two sizes of juvenile *Acanthopagrus schlegelii*. Mar Biotechnol 28, 40. <https://doi.org/10.1007/s10126-026-10589-3>.