

갯벌 모사 환경에서 지온 및 염분 스트레스에 따른 동죽(*Mactra quadrangularis*)의 생존한계와 생리학적 반응

전채연¹ · 정희도^{1,2} · 김유철¹ · 황운기¹ · 조영관^{1*}

¹국립수산과학원 갯벌연구센터, ²국립수산과학원 양식연구과

Survival Limits and Physiological and Immunological Responses of the Surf Clam *Mactra quadrangularis* to Temperature and Salinity Stress under Simulated Tidal Flat Conditions

Chae-Yeon Jeon¹, Hee-Do Jeung^{1,2}, Yu-Cheol Kim¹, Un-Ki Hwang¹ and Young-Ghan Cho^{1*}

¹Tidal Flat Research Center, National Institute of Fisheries Science, Gunsan 54042, Republic of Korea

²Aquaculture Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Republic of Korea

This study evaluated the survival limits and physiological and immunological responses of the surf clam *Mactra quadrangularis* under simulated tidal emersion conditions with environmental stressors. Unlike conventional constant-submersion experiments, a tidal cycle simulation was applied: Seawater was fully drained once daily, and clams were exposed to target ground temperatures via infrared irradiation for 4 h, followed by resubmersion. Three stress regimes were tested: Low-temperature emersion (7°C→12, 17, 22°C), high-temperature emersion (25°C→30, 35, 40°C), and low salinity under continuous submersion (6, 8, 10 psu). Under high-temperature emersion, median lethal time (LT50) values were extremely short (4.0, 2.2, and 2.1 days at 30, 35, and 40°C, respectively), while the 7°C→22°C treatment showed an LT50 of 11.4 days. Low-salinity stress also caused rapid mortality (LT50: 3.7 days at 6 psu). The condition index showed no significant change under emersion stress but decreased at 6 psu. Total carbohydrate levels were depleted under high-temperature emersion, whereas protein levels increased markedly in a temperature-dependent manner. The total hemocyte count and phagocytosis rate showed stress-type-specific patterns, including a biphasic immune response and an inverse total hemocyte count (THC)–phagocytosis relationship. These results provide the first quantitative survival thresholds for *M. quadrangularis* under simulated tidal emersion conditions.

Keywords: *Mactra quadrangularis*, Tidal flat, Emersion stress, Survival limit, Physiological responses

서론

전 지구적 기후변화로 인한 해수 표층 온도 상승, 기상 급변, 집중호우에 따른 염분 변동 등은 조간대 생태계에 서식하는 수산 무척추동물의 생존과 생리에 직접적인 영향을 미치고 있다(IPCC, 2021). 특히, 우리나라는 지난 100여 년간(1912–2014년) 연평균 기온이 약 1.9°C 상승하여 전 지구 평균 상승률의 1.4–2.6배에 달하는 빠른 온난화를 보이고 있으며(Park et al., 2017), 해역 표층 수온 역시 최근 57년간(1968–2024년) 1.58°C

상승하여 전 지구 평균(0.74°C)의 2배 이상 빠르게 증가하였다(NIFS, 2025). 실제로 2024년에는 고수온(해양열파)으로 인한 우리나라 양식생물 피해액이 1,430억 원에 달해 역대 최대를 기록한 바 있다(NIFS, 2025).

우리나라 서해안은 조차가 4–10 m에 달하는 대조차 환경으로, 광활한 조간대 갯벌이 발달해 있다. 서해안 갯벌은 2021년 유네스코 세계자연유산으로 등재될 만큼 생물다양성과 생태적 가치가 높은 지역으로(UNESCO, 2021), 바지락(*Ruditapes philippinarum*), 동죽(*Mactra quadrangularis*), 백합(*Meretrix*

*Corresponding author: Tel: +82. 63. 472. 8608 Fax: +82. 63. 467. 2675

E-mail address: youngghan@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.2026.0309>

Korean J Fish Aquat Sci 59(4), 309-316, August 2026

Received 29 May 2026; Revised 25 June 2026; Accepted 9 July 2026

저자 직위: 전채연(연구원), 정희도(해양수산연구원), 김유철(해양수산연구원), 조영관(해양수산연구원), 황운기(해양수산연구원, 센터장)

lusoria) 등 다양한 이매패류의 주요 서식지이자 생산지이다. 조간대 갯벌의 패류는 조석 주기에 따라 하루 수 시간 동안 대기 중에 노출되며, 이 기간 동안 직사광선에 의한 지온(ground temperature) 상승, 건조, 우천 시 급격한 저염분화 등 복합적인 환경 스트레스에 직면한다. 기후변화에 따른 여름철 이상 고온은 갯벌 노출 시 지온을 40°C 이상까지 상승시킬 수 있으며(Nam et al., 2018), 겨울-봄 해빙기에도 대기 중 노출 시간 동안의 급격한 온도 변동이 갯벌 패류의 대량 폐사를 유발하는 주요 원인으로 지목되고 있다(Zeon et al., 2022).

동죽은 개량조개과(Mactridae)일본 연안의 조간대-수심 20 m 사이의 사니질 저질에 서식한다. 특히 중국에서는 수산업적으로 가장 중요한 갯벌 패류종 중 하나로 활용되고 있으며(Sun et al., 2022), 우리나라에서도 서해안과 남해안의 갯벌에 널리 분포하여 지역 어업인의 소득과 직결되는 수산 자원이다.

이매패류의 환경 스트레스 반응에 관한 기존 연구는 주로 바지락(*R. philippinarum*), 굴(*Crassostrea gigas*), 홍합(*Mytilus* spp.) 등을 대상으로 수행되어 왔으며, 대부분 항온 수조에서의 수중(submersed) 노출 조건으로 설계되었다. 그러나 실제 갯벌에서 패류가 경험하는 열 스트레스는 단순한 수온 상승이 아니라, 간출 시 일사에 의한 급격한 지온 상승과 재침수의 반복적 주기(tidal cycle)로 구성되므로, 기존의 항온 수조 실험만으로는 현장 환경에서의 생리적 반응을 충분히 반영하기 어렵다. 반면, 동죽을 대상으로 수온 및 염분 변화에 따른 생리·면역학적 반응을 통합적으로 평가한 연구는 국내외적으로 거의 보고된 바 없으며, 특히 조석 노출을 모사한 실험 설계를 적용한 사례는 전무한 실정이다.

따라서 본 연구는 동죽을 대상으로 조석 주기를 모사한 실험 설계를 적용하여, 저수온기 지온 변화(7°C→12, 17, 22°C), 고수온기 지온 변화(25°C→30, 35, 40°C), 그리고 저염분(6, 8, 10 psu) 조건에서의 누적 폐사율, 비만도, 총 탄수화물 및 단백질 함량, 혈구 면역 반응을 측정·분석하여, 동죽의 환경 스트레스별 생존 임계점과 생리·면역학적 반응 양상을 규명하고자 하였다.

재료 및 방법

실험생물

본 연구에 사용된 동죽(*M. quadrangularis*)은 전라북도 고흥만 갯벌 조간대에서 채집하였다. 저수온기 간출 지온 실험 및 고수온기 지온 실험을 위한 시료는 2024년 4월과 7월에 각각 채집하였으며, 저염분 실험에 사용된 개체는 2025년 5월에 채집하였다. 사용된 개체의 각장은 평균 2.8-4.2 cm 크기로 실험별로 450개체를 이용하였다. 시료는 채집된 지역의 해수와 수온 및 염분이 동일한 조건의 순환여과 수조 시스템에서 3일간 순치하였다.

저수온기 지온 실험

저수온기 지온 실험은 실제 갯벌의 조석 주기를 모사하여 설계된 순환여과 수조 시스템을 이용하여 수행하였다. 생물은 모래에 잠입할 수 있도록 사질 퇴적물을 깔아 수조를 구성하였으며, 갯벌 간출 시 대기 중 노출을 재현하기 위하여, 하루 2회 수조 상부 해수가 하부로 자동 배수되어 표층 또는 생물이 공기 중에 노출되도록 하였다. 그 중 1회(낮)는 적외선 램프를 이용하여 4시간 동안 목표 온도의 지온 조건을 부여하였다. 이때, 온도 센서는 동죽이 잠입하는 3 cm 내외의 퇴적물 층에 위치하여 적외선 램프가 목표 지온에 도달하면 자동으로 꺼지고 미달하면 즉시 가동되도록 설치하여 목표 지온을 유지하였다. 4시간 노출이 종료된 후에는 기준 수온의 해수가 하부에서 상부로 이동하도록 설정하여 침수 조건을 복원하였다. 이러한 노출-침수 주기를 실험 기간(28일) 동안 매일 반복하였으며, 순치 후 7일, 14일 및 28일째에 시료를 채취하였다. 이때, 기준 수온은 저수온기 7°C였으며, 목표 지온은 기준 수온에서 각각 5°C, 10°C, 15°C 상승시킨 12°C, 17°C 및 22°C였다.

고수온기 지온 실험

고수온기 지온 실험은 저수온기 지온 실험과 동일한 조석 모사 방식으로 설계하였다. 기준 수온은 25°C로 설정하였으며, 목표 지온은 기준 수온에서 각각 5°C, 10°C, 15°C 상승시킨 30°C, 35°C 및 40°C로 설정하였다.

저염분 실험

저염분 실험은 염분을 6, 8, 10 psu로 설정하여 항온 수조에서 지속적인 수중 노출(continuous submersion) 조건으로 수행하였다. 염분은 매일 2회 측정하여 변화를 확인하였으며, 모든 측정값 간 변동폭은 0.2 psu 이내에서 안정적으로 유지되었다. 순치 후 5일 및 7일째에 시료를 채취하였으며, 생존율이 급격히 감소하는 시점에서 추가 시료를 채취하였다.

누적폐사율 및 반수치사일 산정

동죽의 폐사율은 매일 기록하여 실험 종료일 기준 누적 폐사율을 산정하였다. 또한, 실험 집단의 절반이 폐사하는 시간(일)을 의미하는 반수치사일(median lethal time, LT50)과 95% 신뢰구간은 probit 회귀분석(Finney, 1952)을 활용하여 SPSS v21.0 (IBM Corp., Armonk, NY, USA)에서 분석하였다.

비만도 및 생화학 분석

동죽의 비만도(condition index)는 육질 건중량(tissue dry weight)과 패각 건중량(shell dry weight)의 비로 산정하였다. 생화학 분석은 각 실험구별로 15개체(실험 개시일 30개체)를 개별적으로 분석하였으며, 별도의 수조 반복구는 두지 않았다. -80°C에서 냉동보관한 연체부 조직을 동결건조하여 분쇄한 뒤, 조직 내 탄수화물 함량은 페놀-황산법(phenol-sulfuric

acid method, Dubois et al., 1956)으로 분석하였으며, 정량은 glucose를 표준물질로 한 표준곡선을 이용하였다. 단백질 함량은 위와 동일한 방식으로 준비된 균질화 조직을 대상으로 BCA (bicinchoninic acid assay)를 활용하여 정량하였다. 탄수화물 및 단백질 함량은 모두 조직 건중량 기준(mg/g dry weight)으로 산출하였다.

혈구 면역학적 분석

면역 반응을 평가하기 위하여 1 mL 주사기를 사용하여 폐각근에서 혈림프액을 채취한 뒤, 유세포 분석기(CytoFLEX; Beckman Coulter, Inc., Brea, CA, USA)를 이용하여 분석하였다. 총 혈구 수(total hemocytes count, THC) 분석을 위해 혈림프액을 SYBR Green I (Invitrogen, Eugene, OR, USA)으로 염색한 후 측정하였다. 식세포 활성 분석은 형광비드(2.0 μ m, Polysciences Inc., Warrington, PA, USA)를 혈림프액에 희석시킨 후 실온에서 암반응시켜 측정하였다.

통계 분석

모든 생화학 및 면역학적 분석 결과는 평균 $\pm$ 표준편차(mean $\pm$ SD)로 나타내었다. 자료의 정규성과 등분산 여부는 Shapiro-Wilk 검정과 Levene 검정으로 확인하였으며, 그 결과 정규성 조건이 충족되어 실험 내 모든 처리구 및 시점을 포함하여 일원분산분석(one-way ANOVA) 후 Tukey의 다중비교 검정 (Tukey's honestly significant difference, HSD)을 적용하였다. 유의수준은 $P < 0.05$ 로 설정하였으며, 통계 분석은 SPSS v21.0 (IBM Corp.)를 사용하여 수행하였다.

결 과

누적폐사율 및 반수치사일

저수온기 지온 실험에서는 기준 수온(7°C)으로부터의 간출 지온 상승폭이 클수록 폐사율이 높게 나타났다(Fig. 1A). 7°C→12°C(간출 지온 5°C 상승) 및 7°C→17°C(10°C 상승) 실험구에서는 실험 종료 시점(28일)까지 누적 폐사율이 각각 약 28.0%와 26.7%로 비교적 낮게 유지되었으며, LT50은 각각 71.6일(95% confidence interval, 95% CI: 56.3–101.5)과 65.1일(95% CI: 52.4–89.0)로 산정되어 총 실험 기간(28일)을 크게 초과하였다(Table 1). 반면, 7°C→22°C(15°C 상승) 실험구에서는 노출 8일째부터 폐사가 본격적으로 시작되어 LT50이 11.4일(95% CI: 9.1–13.8)로 급격히 단축되었으며, 28일째에는 거의 전량 폐사하였다.

고수온기 간출 지온 실험에서는 모든 처리구에서 매우 짧은 LT50이 산정되었다(Fig. 1B; Table 1). 25°C→30°C 실험구의 LT50은 4.0일(95% CI: 3.7–4.4)이었으며, 25°C→35°C와 25°C→40°C 실험구는 각각 2.2일(95% CI: 2.0–2.5)과 2.1일(95% CI: 1.8–2.3)로 노출 2–3일 내 반수 이상이 폐사하였다.

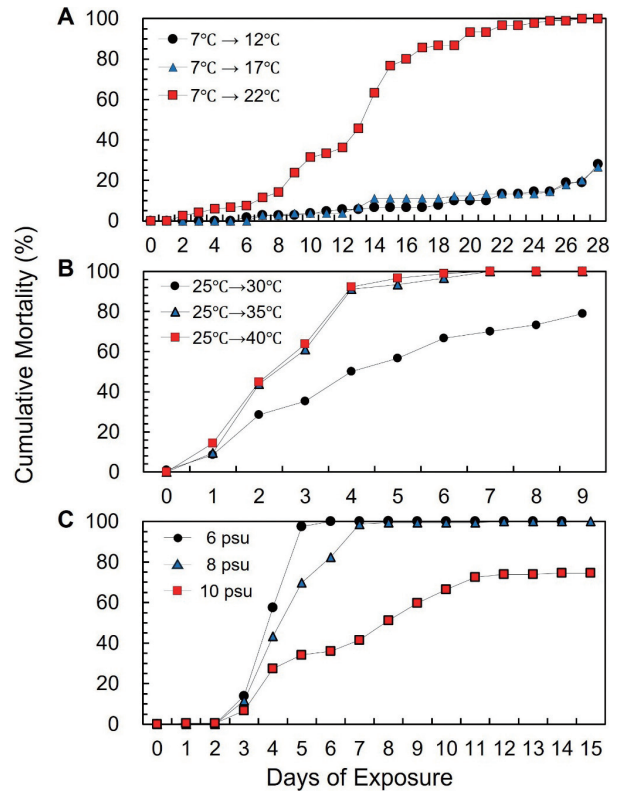


Fig. 1. Cumulative mortality (%) of *Mactra quadrangularis* exposed to (A) low-temperature emersion stress (7°C→12°C, 7°C→17°C, 7°C→22°C) for 28 days, (B) high-temperature emersion stress (25°C→30°C, 25°C→35°C, 25°C→40°C) for 9 days, and (C) low-salinity stress (6, 8, 10 psu) for 15 days. Animals were subjected to 4 h daily emersion under infrared irradiation at target temperatures (A, B), or continuous submersion under low-salinity conditions (C).

Table 1. LT50 and 95% CI for *Mactra quadrangularis* exposed to low-temperature emersion stress, high-temperature emersion stress, and low-salinity stress

Experiment	Treatment	LT50 (days)	95% CI (days)
Low-temperature emersion	7°C→12°C	71.6	56.3–101.5
	7°C→17°C	65.1	52.4–89.0
	7°C→22°C	11.4	9.1–13.8
High-temperature emersion	25°C→30°C	4.0	3.7–4.4
	25°C→35°C	2.2	2.0–2.5
	25°C→40°C	2.1	1.8–2.3
Low-salinity	6 psu	3.7	3.6–3.8
	8 psu	4.2	4.0–4.4
	10 psu	7.6	7.1–8.2

LT50, median lethal time; 95% CI, confidence interval. LT50 values were estimated using survival analysis. Values exceeding the experimental period were estimated by extrapolation.

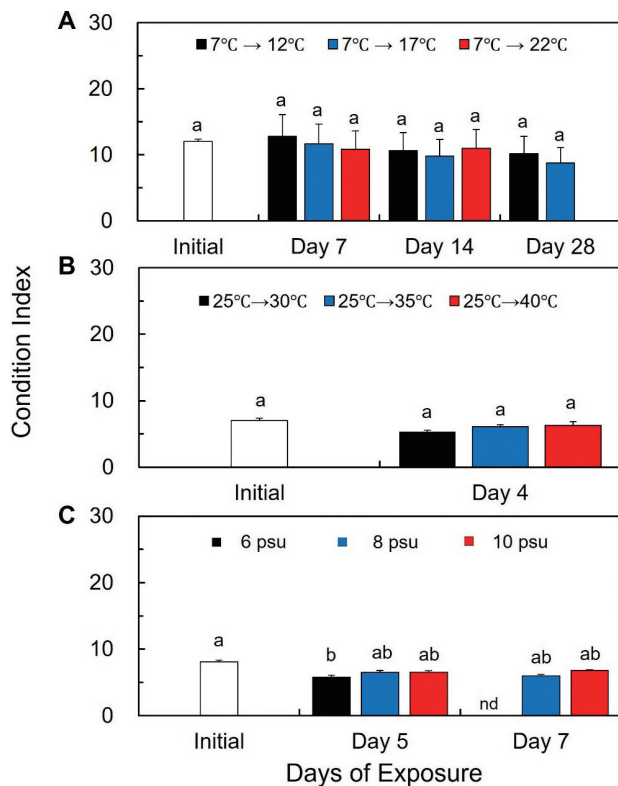


Fig. 2. Condition index of *Mactra quadrangularis* exposed to (A) low-temperature emersion stress (7°C→12°C, 7°C→17°C, 7°C→22°C), (B) high-temperature emersion stress (25°C→30°C, 25°C→35°C, 25°C→40°C), and (C) low-salinity stress (6, 8, 10 psu) during the experimental periods. Values are expressed as mean±SD ($n=15$; Initial, $n=30$). Different letters indicate significant differences among groups (one-way ANOVA, Tukey's HSD, $P<0.05$). nd, no data due to total mortality.

또한, 25°C→35°C와 25°C→40°C 실험구는 노출 4일째에 누적 폐사율이 90% 이상에 달하였다.

저염분 실험(지속 침수 조건)에서도 모든 처리구에서 높은 누적폐사율이 관찰되었다(Fig. 1C; Table 1). 염분 6 실험구의 LT50은 3.7일(95% CI: 3.6–3.8)로 가장 짧았으며, 염분 8은 4.2일(95% CI: 4.0–4.4), 염분 10은 7.6일(95% CI: 7.1–8.2)로 나타났다. 염분 6 실험구에서는 5일째에 95%의 폐사율에 도달하여 거의 전량 폐사하였다.

비만도(condition Index) 변화

저수온기 간출 지온 실험에서 비만도는 모든 처리구와 시점에 유의한 차이가 나타나지 않았다($P>0.05$)(Fig. 2A). 고수온기 간출 지온 실험에서도 실험개시일과 노출 4일차의 모든 처리구 간에 유의한 차이가 없었다($P>0.05$)(Fig. 2B). 저염분 실험에서 비만도는 실험 개시일 대비 노출 5일차 실험구에서 유

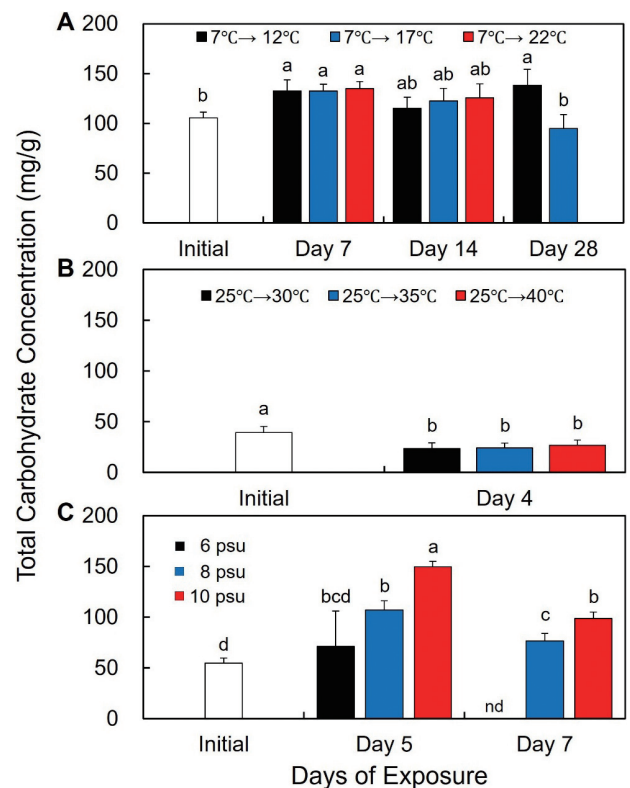


Fig. 3. Total carbohydrate concentration (mg/g) of *Mactra quadrangularis* exposed to (A) low-temperature emersion stress, (B) high-temperature emersion stress, and (C) low-salinity stress during the experimental periods. Values are expressed as mean±SD ($n=15$; Initial, $n=30$). Different letters indicate significant differences among groups (one-way ANOVA, Tukey's HSD, $P<0.05$). nd, no data due to total mortality.

의하게 감소하였다($P<0.05$)(Fig. 2C). 종합하여 볼 때, 지속적인 저염분 노출이 간헐적 지온 노출보다 비만도에 더 직접적인 영향을 미친 것으로 나타났다.

총 탄수화물 함량 변화

저수온기 간출 지온 실험에서 총 탄수화물 함량은 실험 개시일에 비해 노출 7일차에서 모든 처리구가 유의하게 증가하였다($P<0.05$)(Fig. 3A). 노출 14일차에서는 중간 수준을 나타내었으며, 실험 종료시점에서는 12°C 실험구가 가장 높았다. 고수온기 간출 지온 실험에서는 실험 개시일 대비 노출 4일차의 모든 처리구에서 탄수화물 함량이 유의하게 감소하였다($P<0.05$)(Fig. 3B).

저염분 실험에서는 실험개시일에 비해 노출 5일차에서 염분이 높을수록 함량이 증가하여 10 psu > 8 psu > 6 psu 순으로 나타났다(Fig. 3C). 노출 7일차에서는 염분 6 실험구의 전량 폐사로 데이터를 확보할 수 없었으며, 염분 8 실험구와 염분 10 실험

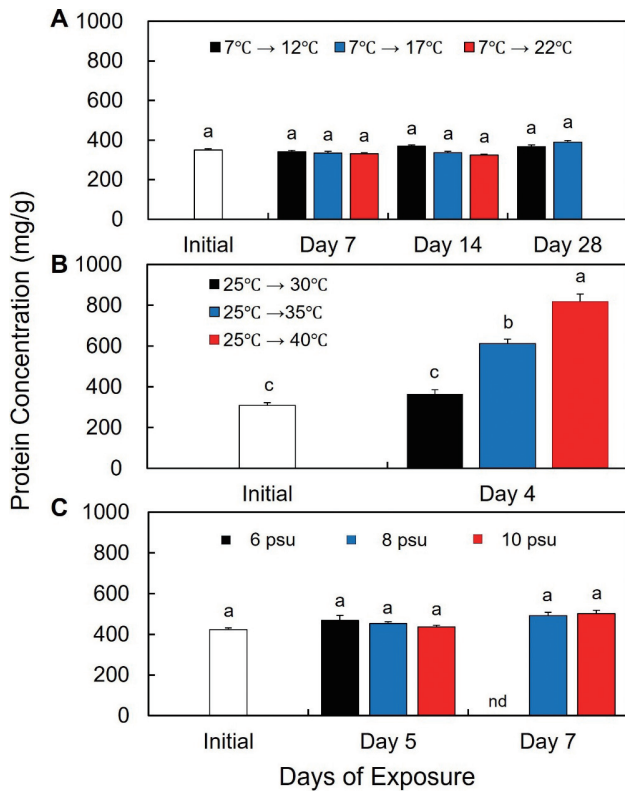


Fig. 4. Total protein concentration (mg/g) of *Mactra quadrangularis* exposed to (A) low-temperature emersion stress, (B) high-temperature emersion stress, and (C) low-salinity stress during the experimental periods. Values are expressed as mean±SD ($n=15$; Initial, $n=30$). Different letters indicate significant differences among groups (one-way ANOVA, Tukey's HSD, $P<0.05$). nd, no data due to total mortality.

구 간에도 유의한 차이가 확인되었다.

단백질 함량 변화

저수온기 간출 지온 및 저염분 실험에서 단백질 함량은 모든 처리구와 시점에서 유의한 차이가 나타나지 않았다($P>0.05$) (Fig. 4A, 4C). 반면, 고수온기 간출 지온 실험에서는 뚜렷한 온도 의존적 증가가 나타났다(Fig. 4B). 특히, 실험 개시일 대비 25°C→35°C 그룹과 25°C→40°C 실험구 간에는 모두 유의한 차이가 관찰되었다.

혈구 면역 반응

저수온기 간출 지온 실험에서 THC는 실험개시일(9.5×10^5 cells/mL)과 노출 14일차 7°C→22°C 실험구에서 유의적으로 높았으며, 그 외 그룹에서는 전반적으로 낮은 수준을 유지하였다(Fig. 5A). 고수온기 간출 지온 실험에서는 25°C→30°C 그룹에서 유의하게 감소한 반면, 그 외 그룹에서는 실험개시일과 유사하거나(25°C→35°C) 오히려 높은 경향(25°C→40°C)을 보였

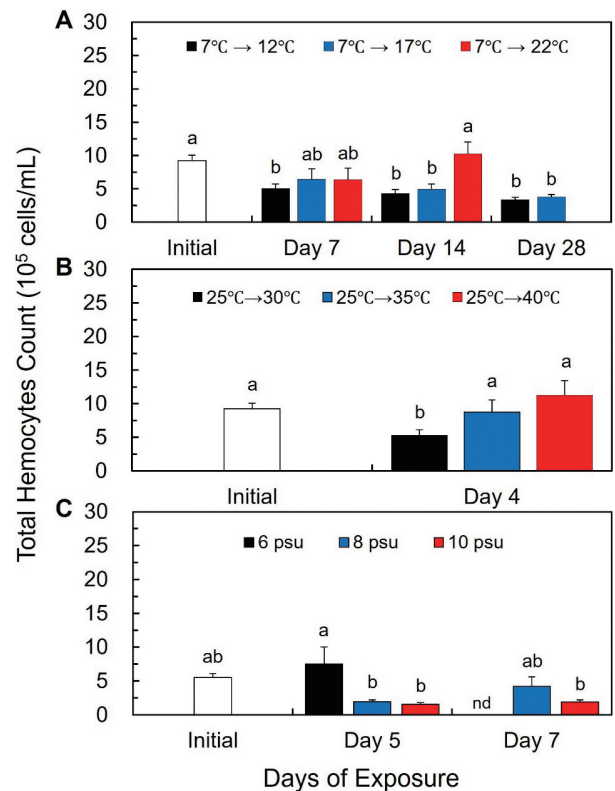


Fig. 5. Total hemocyte count ($\times 10^5$ cells/mL) of *Mactra quadrangularis* exposed to (A) low-temperature emersion stress, (B) high-temperature emersion stress, and (C) low-salinity stress during the experimental periods. Values are expressed as mean±SD ($n=15$; Initial, $n=30$). Different letters indicate significant differences among groups (one-way ANOVA, Tukey's HSD, $P<0.05$). nd, no data due to total mortality.

다(Fig. 5B). 저 염분 실험에서는 노출 5일차 염분 6 그룹에서 가장 높고 염분 8 및 10 그룹에서 유의하게 감소하였다(Fig. 5C).

식세포활성의 경우, 저수온기 간출 지온 실험에서 시간 경과에 따라 뚜렷한 변화를 보였다(Fig. 6A). 노출28일차에서 7°C→12°C 그룹이 가장 높았으며, 노출 14일차 7°C→22°C 그룹에서 가장 낮은 값을 기록한 후 전량 폐사하였다. 고수온기 간출 지온 실험에서는 25°C→30°C 그룹에서 식세포 활성이 유의하게 증가한 반면, 25°C→40°C 그룹에서는 실험개시일과 유사하거나 감소하였다(Fig. 6B). 저염분 실험에서는 노출 5일차 염분 10 그룹에서 가장 높았으며, 노출 7일차에서는 모든 처리구에서 감소하였다(Fig. 6C). 노출 7일차 염분 6 그룹은 전량 폐사로 데이터를 확보할 수 없었다.

고 찰

본 연구는 서해안 갯벌의 주요 패류 자원인 동족을 대상으로

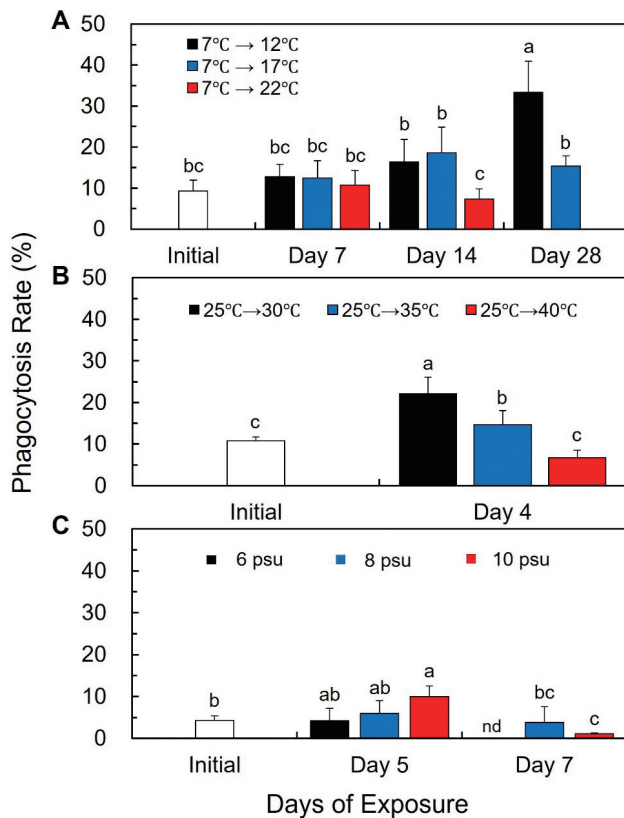


Fig. 6. Phagocytosis rate (%) of hemocytes in *Mactra quadrangularis* exposed to (A) low-temperature emersion stress, (B) high-temperature emersion stress, and (C) low-salinity stress during the experimental periods. Values are expressed as mean±SD ($n=15$; Initial, $n=30$). Different letters indicate significant differences among groups (one-way ANOVA, Tukey's HSD, $P<0.05$). nd, no data due to total mortality.

실제 갯벌의 조석 주기를 모사한 실험 설계를 적용하여, 환경 스트레스가 생존, 비만도, 에너지 대사 및 면역 기능에 미치는 영향을 평가하였다. 기존의 이매패류 환경 스트레스 연구가 대부분 항온 수조에서의 지속적 수중 노출 조건으로 수행된 데 반해, 본 연구는 간출-침수의 반복적 주기와 적외선에 의한 지온 상승을 도입함으로써 실제 갯벌 환경에서 패류가 경험하는 열 스트레스를 보다 현실적으로 반영하였다는 점에서 차별성을 갖는다.

동죽의 생존 임계점과 타 이매패류와의 비교

동죽의 LT50을 통한 정량적 생존한계 평가 결과, 고수온기 간출 지온 실험에서 25°C→30°C의 LT50은 4.0일, 25°C→35°C에서 2.2일, 25°C→40°C에서 2.1일로 산정되어, 여름철 갯벌 간출 시 동죽의 생존이 극도로 제한됨이 확인되었다. 저수온기 간출 지온 실험에서는 7°C→22°C 실험구의 LT50이 11.4일로 나타나, 해빙기 간출 시 15°C 이상의 급격한 지온 상승 역시 동죽

에 치명적임이 확인되었다. 따르며 최근 서해안 지역의 여름철 최고기온이 35°C를 넘는 폭염일수가 증가하고 있어, 간출 시 갯벌 지온은 본 실험의 고수온 처리 범위(35–40°C)에 근접하거나 초과할 수 있다. 따라서 이 연구에서 산정된 LT50은 향후 갯벌 패류 폐사 위험을 예측하는 현장성 높은 지표로 활용될 수 있다.

본 연구 결과는 동일한 조건대 서식 환경의 대표 종인 바지락을 대상으로 한 간출 실험 결과와 비교 해석할 수 있다. He et al. (2022)은 남중국해 바지락을 대상으로 40°C 및 50°C의 대기 노출 실험을 수행하였으며, 50°C에서 2일 만에 100% 폐사를 보고하였으나, 40°C 이하의 간출 조건에서는 생존이 유지됨을 확인하였다. 또한 Nie et al. (2020)은 바지락의 고온(28°C) 간출 후 재침수 실험에서 재침수 12시간부터 폐사가 시작되어 48시간째 폐사 피크에 도달하였음을 보고하였으며, 이는 재산소화(reoxygenation)에 따른 산화 스트레스가 간출 자체의 스트레스에 더해짐을 보여준다. 본 연구의 동죽이 고수온 간출 조건에서 짧은 LT50을 보인 것은 지온 상승뿐만 아니라 매일 반복되는 간출-재침수 주기에 따른 누적 스트레스가 복합적으로 작용한 결과로 판단된다.

유럽바지락(*Ruditapes decussatus*)을 대상으로 한 실험에서도 유사한 비교가 가능하다. Rato et al. (2022)은 *R. decussatus* 성체를 대상으로 수온-염분 복합 스트레스 하에서 LT50을 산정하였으며, 고수온(32–35°C)과 정상 염분(>15 psu) 조건에서 성체의 LT50이 약 30시간(1.25일)임을 보고하였다. 이는 본 연구의 동죽(30°C 간출 지온 LT50: 4.0일) 보다 짧은 수치로, 지속적인 수중 노출과 주기적인 간출-재침수라는 실험 설계의 차이가 이매패류의 생존 임계점에 결정적인 영향을 미침을 보여준다. 즉, 간출과 재침수가 반복되는 조건에서는 재침수 기간 동안 부분적 회복이 가능하여 지속 노출 조건보다 LT50이 다소 길어질 수 있다. 다만, 간출 시 수반되는 건조 및 저산소 등의 복합 스트레스가 생존율에 미치는 시너지 효과 또한 배제할 수 없으므로, 단순한 수온 비교를 넘어선 환경 변수들의 상호작용적 해석이 요구된다.

저염분 실험에서 동죽의 LT50은 염분 6에서 3.7일, 염분 10에서 7.6일로 나타나 저염분에 대한 내성이 매우 좁음이 확인되었다. 특히, 본 연구에서 동죽의 저염분 실험은 지속 침수 조건에서 수행되었으므로 간출에 의한 부가적 스트레스는 배제되었으나, 그럼에도 불구하고 매우 짧은 LT50이 산정된 것은 동죽의 삼투압 조절 능력이 본질적으로 제한적임을 시사한다.

비만도와 에너지 대사 반응

동죽의 비만도는 저수온기와 고수온기 간출 지온 실험 모두에서 처리구 간 유의한 차이가 나타나지 않았다. 이는 Jeung et al. (2025)의 돌비늘백합(*Mercenaria mercenaria*) 연구에서도 36°C를 제외한 모든 처리구에서 비만도에 유의차가 없었던 결과와 유사하다. 비만도는 장기적 영양 상태를 반영하는 지표로서, 단기간의 간헐적 스트레스 노출에서는 민감도가 낮은 것으

로 판단된다.

반면, 저염분 실험에서 염분 6 처리구의 비만도가 유의하게 감소한 것은 지속적 저염분 노출에 의한 삼투압 스트레스가 직접적인 조직 질량 감소를 유발하였음을 의미한다. Podbielski et al. (2022)은 극한 저염분에 노출된 해양 무척추동물에서 삼투에 따른 세포 내 수분 함량 변화가 비만도 산출에 영향을 미칠 수 있음을 보고한 바 있어, 건중량 기반 비만도 해석 시 주의가 필요하다.

에너지 대사 반응은 스트레스 유형에 따라 구별되는 패턴을 보였다. 저수온기와 저염분 스트레스에서는 탄수화물만 변동하고 단백질은 유의한 변화가 없었으나, 고수온기 간출 지온 실험에서는 탄수화물 감소와 단백질 급증이 동시에 나타났다. Jeung et al. (2025)의 돌비늘백합 연구에서도 고수온(35°C)에서 7일 이내 탄수화물의 급격한 감소가 확인되어 고수온 스트레스에 의한 에너지 고갈이 이매패류에서 공통적으로 나타나는 현상임을 시사한다. 본 연구에서 고수온 처리구의 단백질 급증은 열충격단백질(HSP70, HSP90) 등 스트레스 방어 단백질의 발현 증가에 기인한 것으로 추정되며(Jing et al., 2023), 이는 1차 에너지원(탄수화물)에서 2차 에너지원(단백질)으로의 대사 전환이 고수온 간출 조건에서 가장 뚜렷하게 나타남을 보여준다.

면역 반응의 스트레스 특이적 패턴

동족의 혈구 면역 지표는 스트레스 유형에 따라 특이적인 반응 패턴을 보였다. 저수온기 간출 지온 실험에서 7°C→12°C 실험구의 식세포 활성이 노출 28일차에 최고값에 도달한 것은 적절한 수준의 간출 스트레스에 대한 면역 적응이 가능성을 시사한다. 이와 유사하게 Jeung et al. (2025)은 돌비늘백합에서 적정 저온에 해당하는 4°C 처리구의 식세포율이 유의하게 증가하여 면역 활성화가 일어남을 보고한 바 있다.

고수온기 간출 지온 실험에서는 THC와 식세포 활성의 역전 패턴이 관찰되었다. THC는 25°C→30°C에서 감소하고 25°C→35-40°C 그룹에서 유지 또는 증가한 반면, 식세포율은 25°C→30°C 그룹에서 가장 높고 25°C→40°C 그룹에서 가장 낮았다. 30°C 간출 노출 시에는 혈구가 손상 조직으로 동원되어 혈림프 내 THC는 감소하였으나 남은 혈구의 기능적 활성은 유지된 것으로 보이며, 40°C에서는 혈구 수가 유지 또는 증가하였음에도 개별 혈구의 식세포 활성은 억제되었다. 이처럼 혈구 수가 증가하는 동시에 식세포 활성이 감소하는 현상은, 동원된 혈구가 기능적으로 부분 손상 또는 피로한 상태에 있거나 미성숙·기능 저하 혈구의 비율이 증가하였음을 의미한다. 즉, 동족은 극한 열 스트레스 하에서 혈구 수를 늘리는 양적 방어 전략으로 항상성을 유지하고자 하였으나, 개별 혈구의 면역 효율은 오히려 저하되어 전반적인 방어 능력이 약화된 불안정한 항상성 상태에 놓인 것으로 판단된다. Jeung et al. (2025)의 돌비늘백합 연구에서도 고수온에서 THC가 증가하는 동시에 식세포율이 감

소하는 유사한 역전 패턴이 관찰되어, 고수온 스트레스에서 혈구 수의 증가가 반드시 면역 기능 향상을 의미하지 않음을 보여준다. de la Ballina et al. (2022)도 이매패류에서 온도 스트레스가 식세포율에 미치는 부정적 영향을 강조한 바 있다.

본 연구의 의의 및 한계

본 연구는 동족을 대상으로 조석 주기를 모사한 간출-침수 반복 조건에서 환경 스트레스가 생존, 비만도, 에너지 대사, 면역 기능에 미치는 영향을 통합적으로 평가한 최초의 연구 사례이다. LT50에 기반한 정량적 생존한계 설정과 함께, 동족의 환경 스트레스 취약성을 객관적으로 평가하였다는 점에서 의의가 있다. 이러한 결과는 다음과 같은 측면에서 활용성이 있다. 첫째, 고수온기 갯벌 간출 시 지온이 30°C 이상에 도달할 경우 동족은 수일 내 대량 폐사할 수 있으며(LT50: 2.1-4.0일), 이는 여름철 갯벌 패류 자원 관리에서 간출 시 지온 모니터링의 중요성을 강조한다. 둘째, 저염분 10 psu 이하에서도 LT50이 7.6일 이내로 나타난다.

다만 본 연구는 단일 수조를 사용하여 수조 수준의 독립 반복이 확보되지 않은 점, 단일 스트레스 요인만을 평가하여 자연 갯벌의 복합 스트레스(고수온+저염분, 간출 시 건조+고온 등) 환경에서의 상호작용을 반영하지 못한 점에서 한계를 갖는다. 향후 연구에서는 수조 수준의 독립 반복을 갖춘 실험 설계와 분자생물학적 접근(HSP 발현, 항산화 효소 활성, 세포자멸사 관련 유전자)과의 통합 분석, 그리고 간출-침수 조건에서의 타 패류 종과의 직접 비교 실험이 필요할 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 해양수산부 국립수산물과학원 수산시험연구 “서해안 바지락 인공종자 자급화를 위한 대량생산 기술개발(R2026024)”의 지원으로 수행되었습니다. 연구 수행에 도움을 주신 국립수산물과학원 갯벌연구센터 연구원 분들께도 감사드립니다.

References

- de la Ballina NR, Maresca F, Cao A and Villalba A. 2022. Bivalve haemocyte subpopulations: A review. *Front Immunol* 13, 826255. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2022.826255>.
- Dubois M, Gilles KA, Hamilton JK, Rebers PA and Smith F. 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Anal Chem* 28, 350-356. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>.
- Finney DJ. 1952. *Probit Analysis: A Statistical Treatment of the Sigmoid Response Curve*, 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- He G, Zou J, Liu X, Liang F, Liang J, Yang K, Masanja F, Xu Y, Zheng Z, Deng Y and Zhao L. 2022. Assessing the impact of atmospheric heatwaves on intertidal clams. *Sci*

- Total Environ 841, 156744. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156744>.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K
- Jeung HD, Kim M, Kang HS, Ahn HM, Kim YC, Hwang UK and Cho YG. 2025. Survival and physiological responses of the hard clam *Mercenaria mercenaria* under extreme environmental conditions. J Mar Life Sci 10, 159-168. <https://doi.org/10.23005/ksmls.2025.10.2.159>.
- Jing H, Zhou L, Gao Y, Liu Z, Wu B, Sun X and Tu K. 2023. Transcriptomics and metabolomics reveal the molecular and metabolic adaptation to heat stress in Manila clam *Ruditapes philippinarum*. Front Mar Sci 10, 1204598. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1204598>.
- Nam KW, Jeung HD, Song JH, Park KH, Choi KS and Park KI. 2018. High parasite burden increases the surfacing and mortality of the Manila clam (*Ruditapes philippinarum*) in intertidal sandy mudflats on the west coast of Korea during hot summer. Parasit Vectors 11, 42. <https://doi.org/10.1186/s13071-018-2620-3>.
- Nie H, Jiang K, Zhou Z, Guo B, Li D and Yan X. 2020. Modulated expression and activities of *Ruditapes philippinarum* enzymes after oxidative stress induced by aerial exposure and reimmersion. Front Physiol 11, 500. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.00500>.
- NIFS (National Institute of Fisheries Science). 2025. 2025 Briefing book on the impacts of climate change in the marine and fisheries sector. Retrieved from https://nifs.go.kr/cmmn/file/climatechange_05.pdf on May 5, 2026.
- Park BJ, Kim YH, Min SK, Kim MK, Choi Y, Boo KO and Shim S. 2017. Long-term warming trends in Korea and contribution of urbanization: An updated assessment. J Geophys Res Atmos 122, 10637-10654. <https://doi.org/10.1002/2017JD027167>.
- Podbielski I, Hiebenthal C, Hajati MC, Bock C, Bleich M and Melzner F. 2022. Capacity for cellular osmoregulation defines critical salinity of marine invertebrates at low salinity. Front Mar Sci 9, 898364. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.898364>.
- Rato A, Joaquim S, Matias AM, Roque C, Marques A and Matias D. 2022. The impact of climate change on bivalve farming: Combined effect of temperature and salinity on survival and feeding behavior of clams *Ruditapes decussatus*. Front Mar Sci 9, 932310. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.932310>.
- Sun Y, Liu X, Xie X, Bai Y, Wang S, Teng W, Li D, Li H, Yu Z, Zhang M, Zhou Z, Liu X, Nie H, Du S, Li X, Li Q and Wang Q. 2022. A high-quality chromosome-level genome assembly of the bivalve mollusk *Macraa veneriformis*. G3 12, jkac229. <https://doi.org/10.1093/g3journal/jkac229>.
- UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization). 2021. Getbol, Korean Tidal Flats. World Heritage List. Retrieved from <https://whc.unesco.org/en/list/1591> on May 5, 2026.
- Zeon SR, Koo JH, Park JW, Jeung HD, Choi YH and Cho Y. 2022. Estimation of potential habitats for three species of bivalves using the habitat variables in Gomso Bay tidal flat, Korea. Ocean Sci J 57, 607-617. <https://doi.org/10.1007/s12601-022-00085-9>.