

서해 곰소만에 출현하는 동물플랑크톤 군집의 시·공간적 변동 특성

정영석¹, 서민호², 최서열³, 추서휘⁴, 김동영², 이성훈⁵, 한경호^{4,6}, 서호영^{1,3,4,7,*}

¹전남대학교 환경해양학과, ²주바다생태연구소, ³전남대학교 ICT수산자원관리연구소,

⁴전남대학교 빅데이터수산자원관리협동과정, ⁵전남대학교 수산해양산업관광레저융합학과,

⁶전남대학교 양식생물학과, ⁷전남대학교 해양융합학과

Characteristics of temporal-spatial variations of zooplankton community in Gomso Bay in the Yellow Sea, South Korea

Young Seok Jeong¹, Min Ho Seo², Seo Yeol Choi³, Seohwi Choo⁴, Dong Young Kim², Sung-Hun Lee⁵, Kyeong-Ho Han^{4,6} and Ho Young Soh^{1,3,4,7,*}

¹Department of Environmental Oceanography, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea

²Marine Ecology Research Center, Yeosu 59697, Republic of Korea

³Fishery Resource Management Research Institute Based on ICT, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea

⁴Interdisciplinary Program of Bigdata Fishery Resources Management, Graduate School, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea

⁵Department of Fishery, Marine, Industry, Tourism, and Leisure, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea

⁶Department of Aquaculture, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea

⁷Department of Ocean Integrated Science, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea

Contribution to Environmental Biology

- This study is essential as basic research to understand seasonal variations in zooplankton communities in Gomso Bay, Yellow Sea, South Korea, and to investigate the environmental factors influencing zooplankton variations.
- The zooplankton in Gomso Bay are significantly influenced by tides, temperature, and prey, resulting in the formation of a single community in season.

*Corresponding author

Ho Young Soh

Tel. 061-659-7147

E-mail. hysoh@chonnam.ac.kr

Received: 20 November 2023

First revised: 19 December 2023

Second revised: 27 December 2023

Revision accepted: 28 December 2023

Abstract: To understand the spatiotemporal distribution pattern of zooplankton and the environmental factors influencing zooplankton abundance in Gomso Bay, major harvesting area of Manila clam (*Venerupis philippinarum*) in South Korea, zooplankton sampling was conducted four times in autumn (October 2022), winter (January 2023), early spring (March 2023), and spring (May 2023). Among the environmental factors of Gomso Bay, water temperature, chlorophyll *a* concentration (Chl-*a*), dissolved oxygen (DO), and pH observed different patterns, while salinity and suspended particulate matter (SPM) showed no significant statistical differences between the survey periods. The zooplankton in Gomso Bay occurred 33, 29, 27, and 29 taxonomic groups during each respective survey period. In October 2022 and May 2023, arthropod plankton were dominated, while in January and March 2023, protozoa were primarily dominant. Among the Arthropods, copepods including *Acartia hongii*, *Paracalanus parvus* s. l.,

Corycaeus spp., and *Oithona* spp. commonly found along Korean coastal areas of the Yellow Sea, were dominated. Cluster analysis based on zooplankton abundance indicated a single community (stable condition) in each season, attributed to low dissimilarity distances, while three distinct clusters (autumn, winter-early spring, spring) between seasons indicated a highly seasonal environment in Gomsu Bay.

Keywords: zooplankton community, environmental factors, statistical analyses, temporal-spatial variation, Gomsu Bay

1. 서 론

연안은 인간 활동의 영향이 큰 환경으로, 서식하는 생물에게 긍정적 또는 부정적인 영향을 모두 미칠 수 있다(Oh and Kang 2022; Liu *et al.* 2023). 풍부한 영양염 제공을 통한 먹이의 증가, 즉 생물의 생산성에 긍정적인 영향을 미칠 수 있지만, 영양염 과다로 인한 환경의 부영양화는 식물플랑크톤의 광합성 방해, 생물의 성장 저해, 빈산소(hypoxia) 환경 등을 유발하여 생물에게 부정적인 영향을 미치고 있다(Ansari and Matondkar 2014; Vieira *et al.* 2015; Lee *et al.* 2022). 동물플랑크톤(zooplankton)은 해양생태계에서 1차 생산자와 상위 소비자를 연결하는 중간자 역할을 할 뿐만 아니라, 환경 변화에 대한 민감성이 높아 비생물적(abiotic)과 생물적(biotic) 요인의 변동을 이해하는데 필수적인 분류군으로 연구되고 있다(Richardson 2008; Choi *et al.* 2021, 2023). 동물플랑크톤의 종 구성과 분포는 주로 수괴(water masses), 해류(ocean current), 지형(topography), 주변 하천, 육지로부터의 거리 등과 같은 다양한 역학적인 특성(dynamic characteristics)에 의해 달라질 수 있다(Seo *et al.* 2021; Shin *et al.* 2022; Choo *et al.* 2023; Jeong *et al.* 2023). 대형 하천과 연결된 하구-연안 환경에 서식하는 동물플랑크톤은 주로 염분 경사(salinity gradient)와 지형적 조건(topographic conditions)에 의해 분포가 결정되고(Sabatès *et al.* 1989; Hall and Burns 2002), 하천과 같은 다량의 담수 유입이 없는 연안 환경에서는 조석, 지형적 특성, 인간 활동에 의한 영향이 이들의 분포에 큰 영향을 미친다고 보고된 바 있다(Youn and Choi 2008; Ryu *et al.* 2014; Zhao *et al.* 2021).

곰소만은 전라북도 고창군과 부안군 사이에 위치하는 반폐쇄성 만이다. 곰소만의 입구는 약 8 km, 입구로부터 내만까지 약 20 km, 평균 수심은 10 m인 매우 얇고 전체 면적의 80% 이상이 조간대 환경이다(Yang *et al.* 2003). 또한 주요 수로(main waterway)는 만 입구에서 곰소항까지 북쪽 해안을 따라 길게 발달해 있으며, 최대 수

심은 만 입구에서 약 18.5 m, 최대 폭은 약 900 m에 이른다(Chang *et al.* 2007). 만 안으로 갈곡천과 인천강과 같은 소형 하천이 존재하지만 담수의 대량 유입이 거의 없고(Yang *et al.* 2003; Lee *et al.* 2008), 한국 바지락(*Venerupis philippinarum*)의 생산량의 약 40%를 차지하는 주요 산지로 알려져 있다. 바지락과 같은 이매패류는 입자여과식자(particle filter feeder)로 수질 정화의 역할을 수행하지만, 이들의 과도한 밀집 양식은 해양생태계 내에서 먹이 고갈(pre depletion), 생물학적 침전물(biodeposition)의 증가를 초래할 수 있다(Gibbs 2007; Ferreira *et al.* 2018; Silva *et al.* 2019). 이와 관련하여, 곰소만 조간대에서 수중 및 퇴적물 내 화학적인 요인(인, 질소 등)의 거동(Yang and Kim 2002; Yang *et al.* 2003; Jeong *et al.* 2006; Choi *et al.* 2015b), 지형 조사(Xu *et al.* 2016; Park *et al.* 2022), 저서 미세조류에 관한 연구(Lee *et al.* 2012b)가 많이 수행된 바 있다.

동물플랑크톤의 시·공간적 분포와 군집 구조를 파악하는 것은 동물플랑크톤을 먹이생물로 이용하는 상위 소비자(유용수산자원)의 양적인 변동을 이해하는 데 중요하다(Matthews and Mazumder 2005; Lan *et al.* 2021). 이러한 중요성에도 불구하고, 곰소만 환경에서 동물플랑크톤의 시·공간적 분포와 출현 특성에 미치는 환경요인에 대해 생태학적 관점에서 보고한 연구가 거의 없었다. 따라서, 본 연구는 곰소만에서 출현하는 동물플랑크톤의 시·공간적인 출현 특성과 이에 미치는 환경요인들을 탐색하고, 수심이 얇고 바지락 양식이 많은 곰소만 환경과 동물플랑크톤의 연관성을 생태적으로 해석하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 해양환경 및 동물플랑크톤 조사

곰소만 환경조사를 2022년 10월부터 2023년 5월까지 곰소만 10개 정점에서 총 4회(가을; 2022년 10월, 겨울; 2023년 1월, 초봄; 2023년 3월, 봄; 2023년 5월) 실시하였다(Fig.

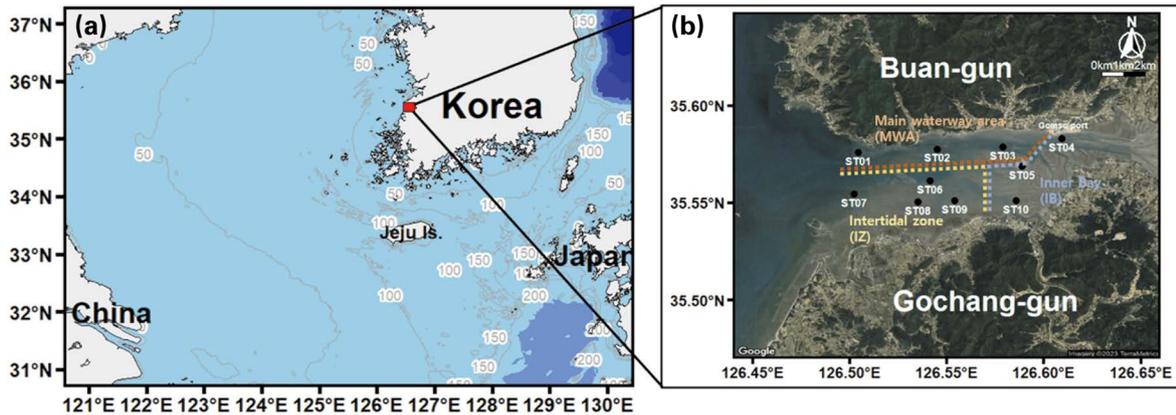


Fig. 1. Map showing the sampling stations in Gomso Bay. (a) Korea, (b) Gomso Bay. The survey area was divided into three areas as follows: MWA; Main waterway area (ST01–03), IZ; Intertidal zone (ST06–09), and IB; Inner Bay (ST04–05, 10).

1). 조사 시기별 수온 (water temperature), 염분 (salinity), 용존산소 (dissolved oxygen, DO), pH는 CTD (model 6600; YSI, Yellow Springs, Ohio, USA)를 이용하여 측정하였다. 엽록소-*a* 농도 (chlorophyll-*a* concentration, Chl-*a*), 부유입자물질 (suspended particulate matter, SPM)은 Van Dorn 채수기를 이용해 채수한 후, 해양환경공정시험기준 (MOE 2018)에 따라 측정하였다.

동물플랑크톤 채집은 저층에서 표층까지 원추형 네트 (망목 220 μm , 망구 직경 45 cm)를 이용하여 1 m s^{-1} 의 속도로 수직 채집하였으며, 수심이 낮은 경우 출현 개체수 확보를 위해 2~4회 반복 채집하였다. 채집된 시료는 즉시 현장에서 중성포르말린을 사용하여 최종 농도 5%가 되도록 고정하였다. 동물플랑크톤 출현 개체수의 정량 분석을 위하여 네트 입구에 유량계 (Model 488115; Hydro-Bios Co., Germany)를 부착하여 여과 해수량을 측정하였다. 또한, 종 조성 및 출현 개체수 파악을 위해 시료의 분할이 필요한 경우 Folsom식 분할기를 이용하여 1/2~1/64까지 분할한 후, Bogorov 계수판에서 해부 현미경 (SMZ645; Nikon, Japan)을 사용하여 종 수준까지 동정하였다. 동정 시, 보다 세밀한 관찰이 필요한 경우에는 동정에 필요한 부속지를 해부하여 고배율 광학현미경 (ECLIPSE 80i; Nikon, Japan)에서 분류하였다. 동물플랑크톤 출현 개체수는 1 m^3 당 개체수 (inds. m^{-3})로 환산하였다.

2.2. 자료 분석

동물플랑크톤의 시·공간적 출현 양상을 파악하기 위하여 동물플랑크톤 자료는 $\log_{10}(x+1)$ 지수로 변환하여

자료 간 편향성 (bias)을 줄이고 정규화 (standardization) 하였다. 수심이 얇은 곰소만의 환경요인들 (수온, 염분, Chl-*a*, DO, SPM, pH)에 대해서는 표층 자료를 사용하였고, *z*-score 표준화를 수행하여 비교 가능하도록 하였다. 또한 각 조사 시기별로 분산 분석 (analysis of variance, ANOVA)을 수행하여 계절 간 환경요인의 차이를 확인하였다. 각 요인은 변수별로 집단의 분산 동질성 (homogeneity of variances)이 확보되지 않았고, 집단의 표본 수가 적기 때문에 Dunnett T3 post-hoc test를 수행하였다. 각 변수 간 차이는 유의 확률 (*p*-value; significance probability)은 $p < 0.05$ 와 $p < 0.001$ 수준에서 검정하였다. 계절에 따른 군집 특성을 파악하기 위해 Bray-Curtis dissimilarities를 기반으로 하는 Ward's link method에 따라 계층적 클러스터 분석 (hierarchical clustering analysis)을 실시하였다. 비계량적 다차원 척도 배열법 분석 (non-metric multi-dimensional scaling ordination analysis, nMDS)은 Jeong *et al.* (2022, 2023)과 Choo *et al.* (2023)에 따라 수행하였다. 이후 계절별 군집 특성에 따른 계절 군에 미치는 환경요인을 탐색하기 위하여 정준상관분석 (canonical correspondence analysis, CCA)을 수행하였다. 모든 데이터 작업 및 통계 분석은 R program (version 4.1.0, R Core Team 2022)과 dplyr (Wickham *et al.* 2023), reshape2 (Wickham 2007), vegan (Oksanen *et al.* 2022), factoextra (Alboukadel and Mundt 2017), NbClust (Charrad *et al.* 2014), ggplot2 (Wickham 2016), ggmap (Kahle and Wickham 2013) packages를 이용하였다.

3. 결 과

3.1. 환경요인(수온, 염분, Chl-a, SPM, DO, pH)

2022년 10월(가을)의 수온은 16.2~16.4°C의 범위를 보였다(Fig. 2). 연구 지역을 세 구역으로 나누어 수온을 비교하였을 때(Fig. 1), IB의 ST10에서 16.2°C로 수온이 낮게 관측되었고, MWA와 IZ에서 모두 최고 수온(16.4°C)이 관측되었다. 2023년 1월(겨울)의 수온은 2.8~5.1°C의 범위를 보였다(Fig. 2). IZ의 ST06에서 2.8°C로 수온이 낮게 관측되었고, IB의 ST05에서 5.1°C로 최고 수온이 관측되었다. 2023년 3월(초봄)의 수온은 7.6~9.4°C의 범위를 보였다(Fig. 2). MWA의 ST01에서 7.6°C로 수온이 낮게 관측되었고, IB의 ST10에서 9.4°C로 최고 수온이 관측되었다. 2023년 5월(봄)의 수온은 16.2~17.8°C의 범위를 보였다

(Fig. 2). IB의 ST10에서 16.2°C로 수온이 낮게 관측되었고, IZ의 ST07에서 17.8°C로 최고 수온이 관측되었다. 또한 수온은 계절 간에 통계적인 차이를 나타내었다($p < 0.05$).

2022년 10월(가을)의 염분은 29.6~31.3의 범위를 나타내었다(Fig. 2). 각 정점 간의 염분 차이가 가장 큰 구역은 MWA (29.6~31.1)로, 염분 경사(salinity gradient) 환경이 조성되었다. 그러나, IZ (31.2~31.3)와 IB (31.3)에서는 정점 간에 염분 차이가 나타나지 않았다. 2023년 1월(겨울)의 염분은 29.7~31.4의 범위를 나타내었다(Fig. 2). IB (29.7~31.0), IZ (30.7~31.1), MWA (31.1~31.4) 순으로, 정점 간 염분 차이가 많이 나는 경사 환경이 조성되었다. 2023년 3월(초봄)의 염분은 31.0~31.4의 범위를 나타내었다(Fig. 2). 각 구역 간에서 염분의 차이가 크지 않았다. 2023년 5월(봄)의 염분은 30.5~32.3의 범위를 나타내었다(Fig. 2). MWA (30.5~32.3), IB (30.6~31.3), IZ (31.0~31.3)

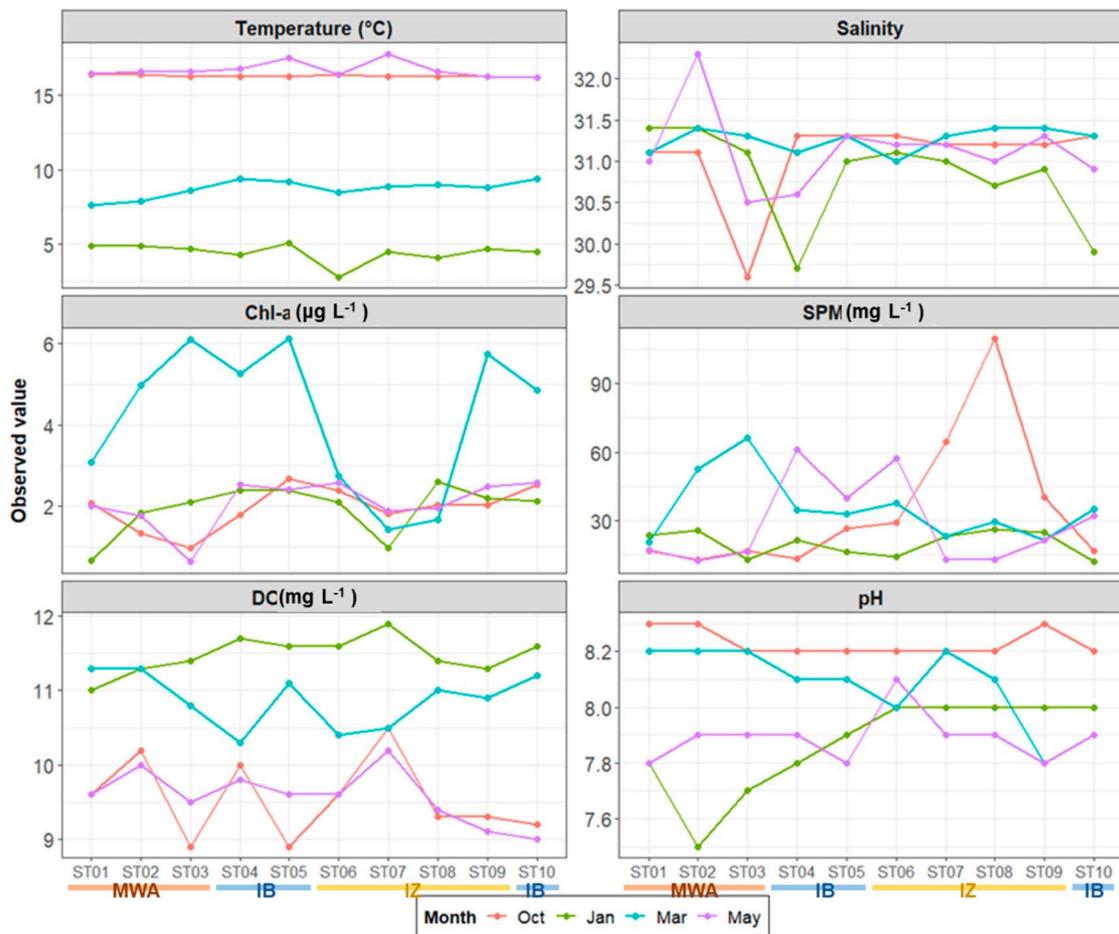


Fig. 2. The pattern of environmental factors (water temperature, salinity, Chl-a, SPM, DO, and pH) across different stations during survey periods in Gomsu Bay. SPM: suspended particulate matter, DO: dissolved oxygen.

순으로, 정점 간 염분 차이가 많이 나는 경사 환경이 조성되었다. 염분은 조사 시기 내에서 각 정점별로 염분의 차이가 나타났음에도 불구하고, 정점별과 계절 간에 염분이 통계적인 차이를 나타내지 않았다($p > 0.05$).

2022년 10월(가을)의 Chl-*a*는 $0.97 \sim 2.67 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위를 나타내었다(Fig. 2). IB의 ST05에서 $2.67 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 높은 Chl-*a* 값을 보였으며, MWA의 ST03에서 $0.97 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 낮은 Chl-*a* 값을 나타내었다. 2023년 1월(겨울)의 Chl-*a*는 $0.67 \sim 2.60 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위를 나타내었다(Fig. 2). IZ의 ST08에서 $2.60 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 높은 Chl-*a* 값을 보였으며, MWA의 ST01에서 $0.67 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 낮은 Chl-*a* 값을 나타내었다. 2023년 3월(초봄)의 $1.42 \sim 6.12 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위를 나타내었다(Fig. 2). IB의 ST05에서 $6.12 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 높은 Chl-*a* 값을 보였으며, IZ의 ST07에서 $1.42 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 낮은 Chl-*a* 값을 나타내었다. 2023년 5월(봄)의 Chl-*a*는 $0.64 \sim 2.58 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위를 나타내었다(Fig. 2). IB의 ST10에서 $2.58 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 높은 Chl-*a* 값을 보였으며, MWA의 ST03에서 $0.64 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 낮은 Chl-*a* 값을 나타내었다. Chl-*a*는 2022년 10월(가을)과 2023년 3월(초봄), 2023년 1월(겨울)과 3월(초봄), 2023년 3월(초봄)과 5월(봄) 조합에서 통계적인 차이를 나타내었지만($p < 0.05$), 나머지 조사 시기 간에는 통계적인 차이가 나타나지 않았다($p > 0.05$).

2022년 10월(가을)의 SPM은 $12.9 \sim 109.7 \text{ mg L}^{-1}$ 의 범위를 나타내었다(Fig. 2). IZ ($29.0 \sim 109.7 \text{ mg L}^{-1}$)에서 각 정점 간의 SPM 농도 차이가 가장 큰 SPM 농도 경사 환경이 조성되었다. IB와 MWA에서도 각 정점 간의 SPM 농도가 차이가 났지만, MWA의 ST02에서 12.9 mg L^{-1} 로 최저 값을 나타내었다. 2023년 1월(겨울)의 SPM은 $11.9 \sim 26.0 \text{ mg L}^{-1}$ 의 범위를 나타내었다(Fig. 2). IZ의 ST08에서 2.60 mg L^{-1} 로 가장 높은 SPM 값을 보였으며, IB의 ST10에서 11.9 mg L^{-1} 로 가장 낮은 SPM 값을 나타내었다. 2023년 3월(초봄)의 SPM은 $20.3 \sim 66.1 \text{ mg L}^{-1}$ 의 범위를 나타내었다(Fig. 2). MWA의 ST01에서 20.3 mg L^{-1} 로 최저 값을, ST03에서 66.1 mg L^{-1} 로 최고 값이 관측되었으며, 각 정점 간 SPM 농도 차이가 매우 커 SPM 농도 경사 환경이 조성되었다. 2023년 5월(겨울)의 SPM은 $12.4 \sim 61.3 \text{ mg L}^{-1}$ 의 범위를 나타내었다(Fig. 2). 모든 정점에서 SPM 농도 경사 환경이 조성되었으며, 가장 큰 경사를 나타내는 영역은 IB ($31.9 \sim 61.3 \text{ mg L}^{-1}$), 그 다음은 IZ ($12.7 \sim 57.4 \text{ mg L}^{-1}$), MWA ($12.4 \sim 16.9 \text{ mg L}^{-1}$)이었다. SPM은 계절 간의 통계

적인 차이가 나타나지 않았다($p > 0.05$).

2022년 10월(가을)의 DO는 $8.9 \sim 10.5 \text{ mg L}^{-1}$ 의 범위를 나타내었다(Fig. 2). IZ의 ST07에서 10.5 mg L^{-1} 로 가장 높은 DO 값을 나타내었고, 그 다음은 MWA ($8.9 \sim 10.2 \text{ mg L}^{-1}$), IB ($8.9 \sim 10.0 \text{ mg L}^{-1}$) 순이었다. 2023년 1월(겨울)의 DO는 $11.0 \sim 11.9 \text{ mg L}^{-1}$ 의 범위를 나타내었다(Fig. 2). IZ의 ST07에서 11.9 mg L^{-1} 로 가장 높은 DO 값을 나타내었고, 그 다음은 IB ($11.6 \sim 11.7 \text{ mg L}^{-1}$), MWA ($11.0 \sim 11.4 \text{ mg L}^{-1}$) 순이었다. 2023년 3월(초봄)의 DO는 $10.3 \sim 11.3 \text{ mg L}^{-1}$ 의 범위를 나타내었다(Fig. 2). MWA의 ST01과 ST02에서 11.3 mg L^{-1} 로 가장 높은 DO 값을 나타내었고, 그 다음은 IB ($10.3 \sim 11.2 \text{ mg L}^{-1}$), IZ ($10.4 \sim 11.0 \text{ mg L}^{-1}$) 순이었다. 2023년 5월(봄)의 DO는 $9.0 \sim 10.2 \text{ mg L}^{-1}$ 의 범위를 나타내었다(Fig. 2). IZ의 ST07에서 10.2 mg L^{-1} 로 가장 높은 DO 값을 나타내었고, 그 다음은 MWA ($9.5 \sim 10.0 \text{ mg L}^{-1}$), IB ($9.0 \sim 9.8 \text{ mg L}^{-1}$) 순이었다. DO는 계절 간에 통계적인 차이를 나타내었다($p < 0.05$).

2022년 10월(가을)의 pH는 $8.2 \sim 8.3$ 의 범위를 나타내었다(Fig. 2). 모든 구역에서 $8.2 \sim 8.3$ 의 범위로, 큰 차이를 나타내지 않았다. 2023년 1월(겨울)의 pH는 $7.5 \sim 8.0$ 의 범위를 나타내었다(Fig. 2). IZ의 ST06~09와 IB의 ST10에서 8.0 으로 pH가 높은 값을 나타내었고, MWA에서 $7.5 \sim 7.8$ 로 가장 낮은 pH 범위를 나타내고 있었다. 2023년 3월(초봄)의 pH는 $7.8 \sim 8.2$ 의 범위를 나타내었다(Fig. 2). MWA의 ST01~03과 IZ의 ST07에서 8.2 로 가장 높은 pH 값을 나타내었지만, IB ($7.9 \sim 8.1$)과 큰 값의 차이를 나타내지 않았다. 2023년 5월(봄)의 pH는 $7.8 \sim 8.1$ 의 범위를 나타내었다(Fig. 2). IZ의 ST06에서 8.1 로 가장 높은 pH 값을 나타내었지만, MTA의 ST01, IZ의 ST09, IB의 ST05에서 7.8 로 가장 낮은 pH 값이 관측되었다. pH는 계절 간에 통계적인 차이를 나타내었다($p < 0.05$).

3.2. 동물플랑크톤 출현 분류군 수

조사 기간 동안 곰소만에서 출현한 동물플랑크톤 분류군은 절지동물(Arthropoda), 자포동물(Cnidaria), 원생동물(Protozoa), 연체동물(Mollusca), 모악동물(Chaetognatha), 환형동물(Annelida), 척삭동물(Chordata), 극피동물(Echinodermata)이었으며, 2022년 10월과 2023년 5월에는 절지동물이 우점 출현하였고, 2023년 1월과 3월에는 원생동물이 우점하였다(Fig. 3).

2022년 10월(가을)에 출현한 동물플랑크톤은 총 33 분

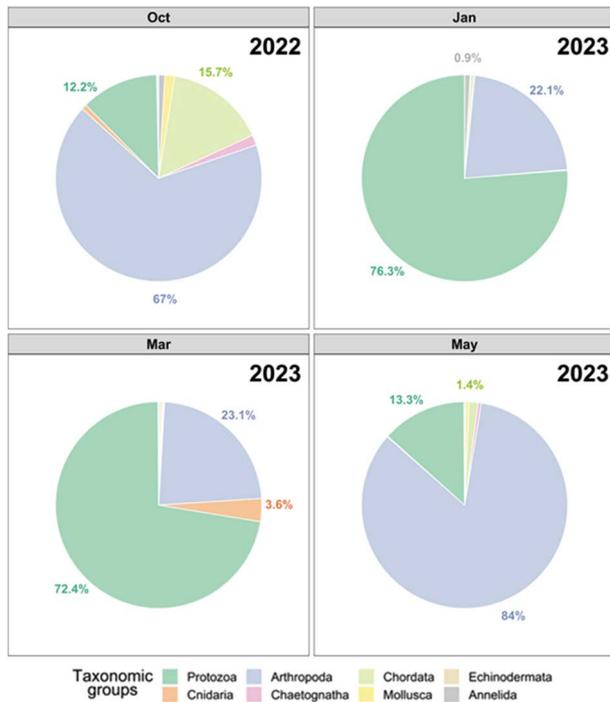


Fig. 3. Pie chart of zooplankton's taxonomic group of Gomso Bay in the study periods (Oct., 2022, Jan., 2023, Mar., 2023, and May 2023).

류군으로, IB의 ST05에서 19 분류군으로 가장 적게 출현하였고 IZ의 ST08에서 31 분류군으로 가장 많이 출현하였다(Fig. 4). 2023년 1월(겨울)에 출현한 동물플랑크톤은 총 29 분류군으로, IZ의 ST08에서 14 분류군으로 가장 적게 출현하였고 IZ의 ST07에서 22 분류군으로 가장 많이 출현하였다(Fig. 4). 2023년 3월(초봄)에 출현한 동물플랑크톤은 총 33개 분류군으로, IB의 ST05에서 18 분류군으로 가장 적게 출현하였고 IZ의 ST06에서 25개 분류군으로 가장 많이 출현하였다(Fig. 4). 2023년 5월(봄)에 출현한 동물플랑크톤은 총 27 분류군으로, MWA의 ST03와 IZ의 ST06~09, IB의 ST10에서 16 분류군으로 가장 적게 출현하였고 MWA의 ST01에서 22 분류군으로 가장 많이 출현하였다(Fig. 4).

3.3. 동물플랑크톤 출현 개체수 및 우점 요각류 출현 양상

조사 시기와 정점별로 출현한 동물플랑크톤 개체수를 살펴보면, 2022년 10월(가을)에 평균 3,203 inds. m⁻³이었다(Fig. 5a). IB의 ST05에서 동물플랑크톤은 1,512 inds. m⁻³으로 가장 적게 출현하였으며, MWA의 ST02에서 동

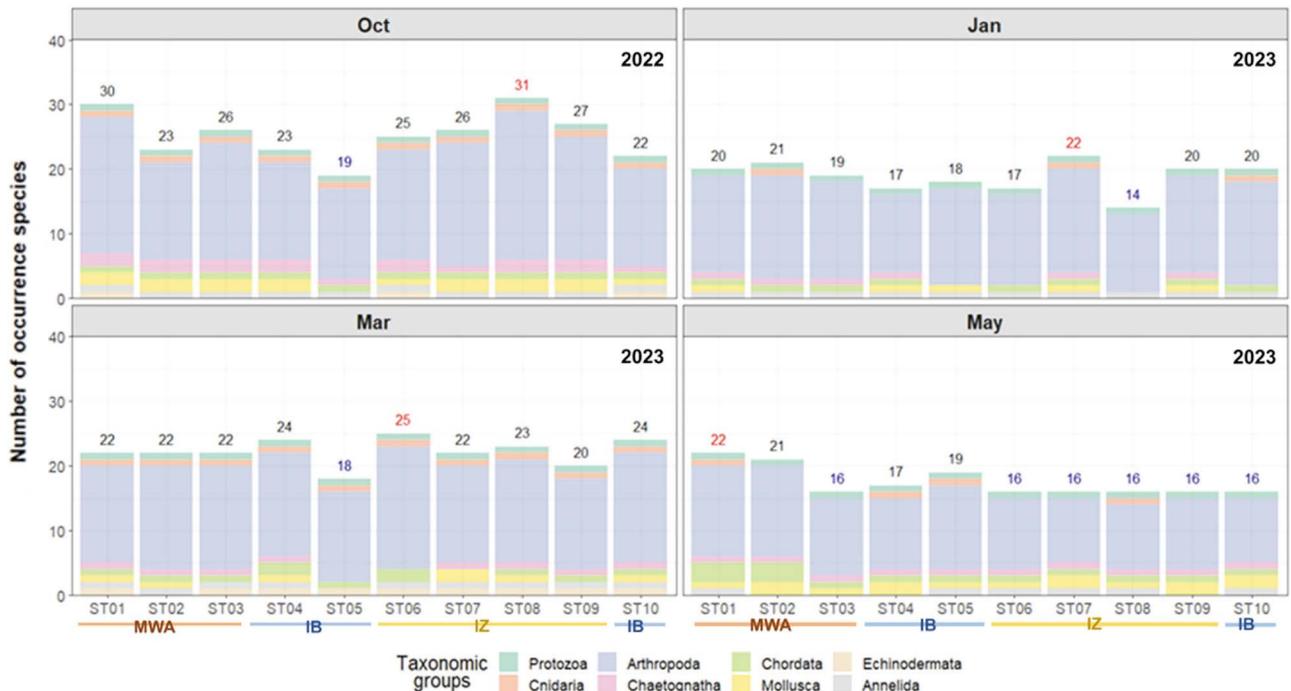


Fig. 4. Temporal-spatial differences in the number of occurrence species. The red color indicates high values, while the blue color indicates low values for survey periods.



Fig. 5. Temporal-spatial differences in (a) the abundance (inds. m⁻³) of zooplankton, and (b) the relative abundance (%) of dominant taxa except for copepodites and nauplius. The color numbers indicate that occurrence percent (%) of dominant taxa by period-station.

물플랑크톤은 3,938 inds. m⁻³으로 가장 많이 출현하였다. 조사 시기에 출현한 동물플랑크톤 중 *Corycaeus* spp.는 24~60% (평균 개체수: 1,056 inds. m⁻³), *Oikopleura* spp.는 15.9~34.0% (평균 503 inds. m⁻³)으로 우점 출현하였다(Fig. 5b). 2023년 1월(겨울)에 동물플랑크톤의 출현 개체수는 평균 4,312 inds. m⁻³이었다(Fig. 5a). IB의 ST10에서 동물플랑크톤은 959 ind. m⁻³으로 가장 적게 출현하

였으며, IZ의 ST7에서 동물플랑크톤은 17,059 inds. m⁻³으로 가장 많이 출현하였다. 조사 시기에 출현한 동물플랑크톤 중 *Noctiluca scintillans*는 75.5~92% (평균 3,292 inds. m⁻³)으로 우점 출현하였다(Fig. 5b). 2023년 3월(초봄)에 동물플랑크톤의 출현 개체수는 평균 9,089 inds. m⁻³이었다(Fig. 5a). IZ의 ST7에서 동물플랑크톤은 4,139 inds. m⁻³으로 가장 적게 출현하였으며, MWA의 ST02에

서 동물플랑크톤은 10,055 inds. m^{-3} 으로 가장 많이 출현하였다. 조사 시기에 출현한 동물플랑크톤 중 *N. scintillans*는 70.7~89.6% (평균 6,579 inds. m^{-3}), *Acartia hongii*는 2.7~29.2% (평균 325 inds. m^{-3})으로 우점 출현하였다(Fig. 5b). 2023년 5월(봄)에 동물플랑크톤의 출현 개체수는 평균 4,383 inds. m^{-3} 이었다(Fig. 5a). IZ의 ST07에서 동물플랑크톤은 2,543 inds. m^{-3} 으로 가장 적게 출현하였으며, IZ의 ST08에서 동물플랑크톤은 8,344 inds. m^{-3} 으로 가장 많이 출현하였다. 조사 시기에 출현한 동물플랑크톤 중 *A. hongii*는 25.1~71.9% (평균 1,303 inds. m^{-3}), *Paracalanus parvus* s. l.은 2.9~39.7% (평균 1,021 inds. m^{-3})으로 우점 출현하였다(Fig. 5b). 조사 기간 동안 곰소만에 출현한 동물플랑크톤은 Table 1에 정리하였다.

3.4. 집괴분석

동물플랑크톤 출현 개체수를 기반으로 한 집괴분석 결과를 살펴보면, 곰소만은 조사 시기에 따라 2~3개의 정점군으로 구분되었다(Fig. 6a). 2022년 10월(가을)에는 다음과 같이 3개의 정점군이 구분되었다; Group A (MWA), Group B (IB)와 Group C (IZ). 2023년 1월(겨울)에는 다음과 같이 2개의 정점군으로 구분되었다; Group A (MWA와 일부 IZ 정점), Group B (IB와 일부 IZ 정점). 2023년 3월(초봄)에는 다음과 같이 2개의 정점군으로 구분되었다; Group A (MWA와 IZ), Group B (IB). 2023년 5월(봄)에는 다음과 같이 2개의 정점군으로 구분되었다; Group A (MWA), Group B (IZ와 IB). 계절 내에서는 정점군끼리 높은 유사도가 관측되었으며, 계절 간에서는 계절군이 뚜렷하게 구분된 것을 확인할 수 있었다(Fig. 6b).

3.5. 계절별 주요 동물플랑크톤 출현 양상에 미치는 환경요인

2022년 10월 CCA 결과를 살펴보면, 제1, 2축의 전체 자료에 대한 기여율은 각각 67.1%와 25.4%를 나타냈고, 주요 동물플랑크톤 개체수 변동의 92.5%를 설명하였다(Fig. 7a, Table 2). 그래프의 제1 사분면에 영향을 주는 환경요인은 SPM, DO, 수온으로 나타났고, 이에 영향을 받는 생물로는 Bivalve larvae, *Aid. crassa*, *T. forcipatus*로 나타났다. 제4 사분면에 영향을 주는 환경요인은 SPM, 염분, Chl-*a*로 나타났으며, 이에 영향을 받는 생물로는 *P. parvus*

s. l.과 *Acartia hongii*로 나타났다. 2023년 1월 CCA 결과를 살펴보면, 제1, 2축의 전체 자료에 대한 기여율은 각각 58.0%와 23.2%를 나타냈고, 주요 동물플랑크톤 개체수 변동의 81.2%를 설명하였다(Fig. 7b, Table 2). 그래프의 제1 사분면에 영향을 주는 환경요인은 염분과 Chl-*a*로 나타났고, 이에 영향을 받는 생물로는 Bivalve larvae, *A. hongii*, Polychaeta larvae로 나타났다. 제2 사분면에 영향을 주는 환경요인은 DO로 나타났으며, 이에 영향을 받는 생물로는 *Aid. crassa*로 나타났다(Fig. 7b). 제3 사분면에 영향을 주는 환경요인은 수온이었으며, 이에 영향을 받는 생물로는 *P. parvus* s. l., *Par. crassirostris*, *Corycaeus* spp., Cirriped larvae로 나타났다. 제4 사분면에 영향을 주는 환경요인은 SPM으로 나타났으며, 이에 영향을 받는 생물로는 *Oithona* spp.과 *Noctiluca scintillans*이었다. 2023년 3월 CCA 결과를 살펴보면, 제1, 2축의 전체 자료에 대한 기여율은 각각 53.0%와 32.1%를 나타냈고, 주요 동물플랑크톤 개체수 변동의 85.1%를 설명하였다(Fig. 7c, Table 2). 그래프의 제1 사분면에 영향을 주는 환경요인은 수온, 염분, DO로 나타났고, 이에 영향을 받는 생물로는 Polychaeta larvae, *Corycaeus* spp.로 나타났다. 제2 사분면에 영향을 주는 환경요인은 SPM과 Chl-*a*로 나타났으며, 이에 영향을 받는 생물로는 *Par. crassirostris*, *Oithona* spp., Unidentified Trachymedusae, *N. scintillans*으로 나타났다. 제3 사분면에 영향을 주는 환경요인은 Chl-*a*로 나타났으며, 이에 영향을 받는 생물로는 *A. hongii*, *P. parvus* s. l., Cirriped larvae로 나타났다. 제4 사분면에 영향을 주는 환경요인은 DO로, 이에 영향을 받는 생물로는 *Aid. crassa*와 Bivalve larvae로 나타났다. 2023년 5월 CCA 결과를 살펴보면, 제1, 2축의 전체 자료에 대한 기여율은 각각 45.5%와 31.0%를 나타냈고, 주요 동물플랑크톤 개체수 변동의 76.5%를 설명하였다(Fig. 7d, Table 2). 그래프의 제1 사분면에 영향을 주는 환경요인은 수온과 DO로 나타났고, 이에 영향을 받는 생물로는 Cirriped larvae, Bivalve larvae, *Corycaeus* spp.로 나타났다. 제2 사분면에 영향을 주는 환경요인은 SPM과 염분으로 나타났으며, 이에 영향을 받는 생물로는 Polychaeta larvae로 나타났다. 제3 사분면에 영향을 주는 환경요인은 Chl-*a*로 나타났으며, 이에 영향을 받는 생물로는 *C. sinicus*, *Cen. abdominalis*, *P. parvus* s. l., *Oikopleura* spp.로 나타났다. 제4 사분면에 영향을 주는 환경요인은 SPM과 염분으로, 이에 영향을 받는 생물로는 *A. hongii*,

Table 1. Seasonal occurrence list of zooplankton in the Gomso Bay. Asterisks indicate that abundance of zooplankton (* ≤ 500 inds. m⁻³, ** 500 inds. m⁻³ <, ≤ 1,000 inds. m⁻³, *** > 1,000 inds. m⁻³)

Phylum	Species	Oct. 2022	Jan. 2023	Mar. 2023	May 2023
Protozoa	<i>Noctiluca scintillans</i>	***	***	***	***
Cnidaria	Unidentified Siphonophora	*			
	Unidentified Trachymedusae	*	*	***	*
Arthropoda	<i>Evadne</i> spp.	*			
	<i>Podon</i> spp.			*	
	<i>Acartia hongii</i>	*	***	***	***
	<i>Acartia hudsonica</i>			*	
	<i>Acartia ohtsukai</i>	*			
	<i>Acartia omorii</i>				*
	<i>Acartia pacifica</i>	*			
	<i>Acartia</i> copepodites	*	***	***	***
	<i>Calanus sinicus</i>	*	*	*	*
	<i>Calanus</i> copepodites	*	**	**	**
	<i>Centropages abdominalis</i>		*	*	**
	<i>Centropages tenuiremis</i>	*			
	<i>Centropages</i> copepodites	*	*	*	*
	<i>Eurytemora pacifica</i>		*	*	*
	<i>Eurytemora</i> copepodites			**	
	<i>Labidocera euchaeta</i>	*	*	*	
	<i>Labidocera rotunda</i>	*			
	<i>Labidocera</i> copepodites	*			
	<i>Paracalanus parvus</i> s. l.	**	*	**	***
	<i>Paracalanus</i> copepodites	***			
	<i>Parvocalanus crassirostris</i>	*			*
	<i>Pseudodiaptomus marinus</i>	*			*
	<i>Pseudodiaptomus</i> copepodites	*			*
	<i>Tortanus forcipatus</i>	*			
	<i>Tortanus</i> copepodites	*			
	<i>Corycaeus</i> spp.	***	*	*	*
	<i>Oithona</i> spp.	**	***	**	*
	Unidentified Harpacticoids	*			
	Copepod copepodites	*			*
	Copepod nauplius	*	*	*	*
	<i>Hyperia</i> spp.		*	*	*
	Decapod larvae				*
Euphausiid larvae	*				
Unidentified Cumaceans	*	*			
Unidentified Mysids		*	*		
Cirriped larvae	***	*	*	**	
Chaetognatha	<i>Aidanosagitta crassa</i>	*	*	*	*
	<i>Flaccisagitta enflata</i>	*			
Mollusca	Bivalve larvae	*	*	*	*
	Gastropod larvae	*		*	*
Annelida	Polychaeta larvae	*	*	*	*
Echinodermata	Ophiopluteus larvae	*		*	
	Stichopus larvae	*			
Chordata	<i>Oikopleura</i> spp.	***	*	*	**
	Fish larvae				*
	Fish egg			*	*

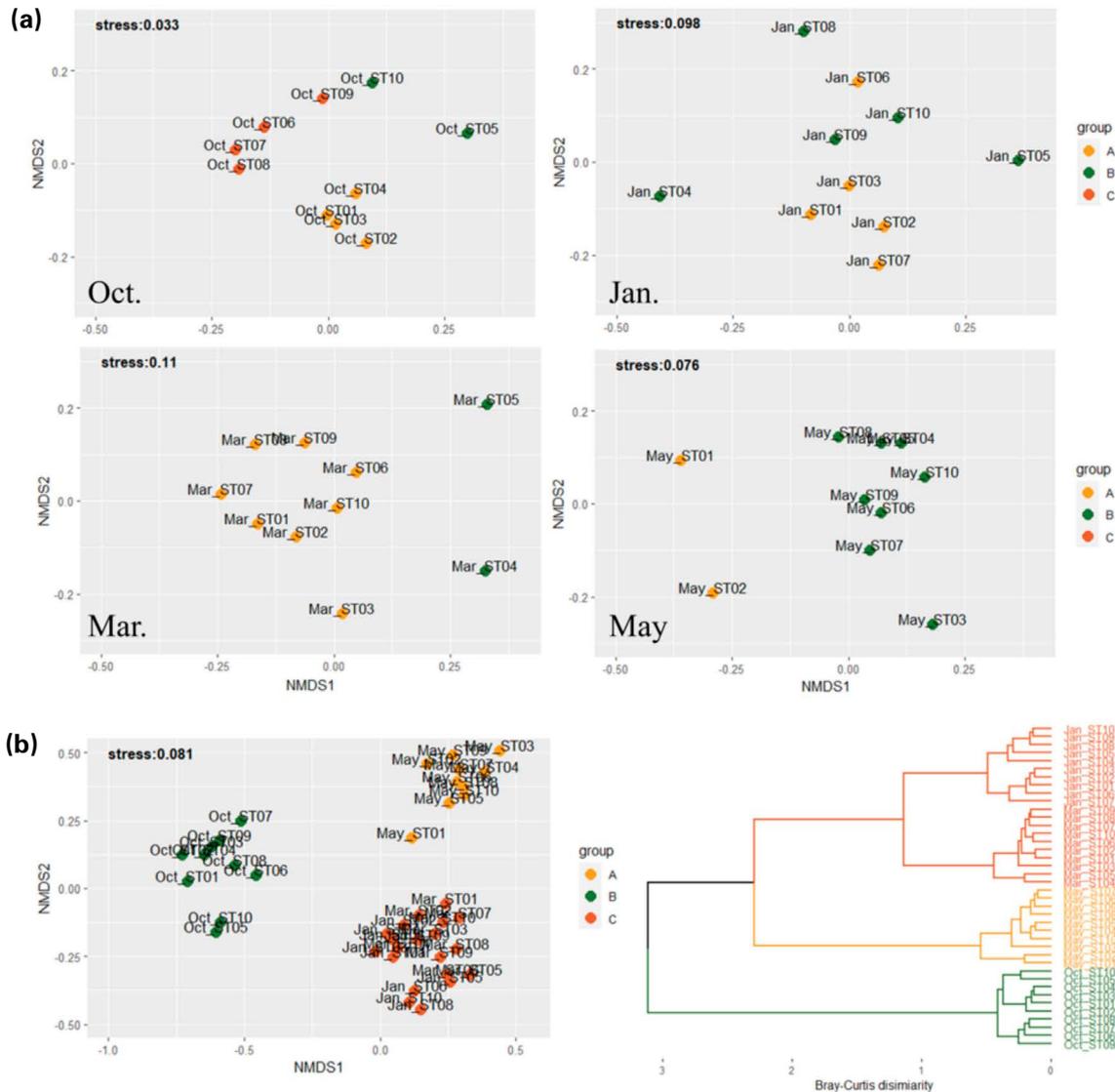


Fig. 6. (a) Temporal-spatial comparison in survey period of nMDS ordination plot. (b) Season-integrated dendrogram and nMDS ordination plot. These plots show cluster groups based on the Bray-Curtis dissimilarity index and Ward's linkage method.

Aid. crassa, *Oithona* spp.로 나타났다. 그러나 이러한 환경 요인과 크게 상관성을 보이지 않는 *A. hongii*를 제외하고 다른 두 종은 SPM과 염분에 대해 음의 상관성을 나타내었다.

4. 고찰

일반적으로 하천 시스템과 연결되지 않는 조석 수로 (tidal waterway)는 한국 서해안의 갯벌에서 나타나는 고

유한 특징이지만 (Choi *et al.* 2013), 물리화학적 및 생물 지리적으로 구명되지 않은 점들이 많이 남아있다. 그럼에도 불구하고 조석 수로는 여전히 강수나 해빙에 의한 계절적 유량 변동에 의해 수로 형태에 많은 영향을 받고 있고 (Murphy and Voulgaris 2006; Choi and Jo 2015), 수로 형태에 따라 서식하는 개체군의 유지 전략에 대해서는 명확하게 밝혀지지 않았다. 또한, 대형 하천과 연결되어 있는 만 환경에서 생물의 분포는 염분에 의해 크게 좌우된다고 알려져 있지만 (Lee *et al.* 2017; Seo *et al.* 2021; Jeong *et al.* 2022), 조석의 큰 영향과 주변 하천 시스템에 큰 영향을 받

지 않는 곰소만 환경은 일반적인 하천 시스템과 매우 다르다(Yang *et al.* 2003; Lee *et al.* 2008). 특히 곰소만은 바지락(*Venerupis philippinarum*) 양식장으로부터 유입되는 영양염(질소, 인 등)과 표층 퇴적물에 존재하는 저서 규조류의 재부유, 계절적인 강우 현상으로 인한 영양염의 유입으로 인해 서식 생물에게 좋은 먹이 환경이 조성된다(Yang and Kim 2002; Yang *et al.* 2003; Jeong *et al.* 2006; Lee *et al.* 2012b; Choi *et al.* 2015b). 그러나 한국의 서해 연안은 최대 조차가 10 m에 달하는 큰 조석 간만의 차로 인해 침전되어 있던 퇴적물들이 재부유하여 탁한 해수를 형성한다고 알려져 있는데(Kellermann and Koh 1999), 본 연구에서 염분과 SPM이 계절 간에 차이가 나타나지 않는 이유는 조사의 발생으로 조사 시기마다 저층 퇴적물이 재부유(resuspension)하여 탁한 환경이 조성되는 서해의 특성에 기인한 것으로 판단된다.

곰소만의 바지락은 외부에서 반입한 치패를 살포하여 양식하지만, 양식 개체의 산란에 의해 어린 개체가 가입된다고 보고된 바 있다(Lim 2016). 전 조사 시기에 출현한 이매패류 유생(Bivalve larvae)은 계절적으로 수온, DO, Chl-*a*, SPM과 양의 상관성을 나타냈으며, 이러한 출현 양상은 인위적인 영양염 공급(anthropogenic supply of nutrients) 또는 강한 조석 활동에 의한 저서 퇴적물의 재부유 또는 강우로 인한 영양염 유입과 같은 자연발생적(inherent) 결과와 환경적 요인을 복합적으로 고려해야 할 필요가 있으나, 종별로 구분되지 않았기 때문에 특성을 구분 짓기에는 한계가 있었다. 또한 전 계절 출현한 동물플랑크톤인 만각류 유생(Cirriped larvae)과 일부 요각류 입자식자, 특히 *Acartia hongii*, *Paracalanus parvus* s. l., *Parvocalanus crassirostris* 등은 Chl-*a*에 높은 관련성을 보였다. Jang *et al.* (2010)은 국내 남해 거제 장목만에서 출현한 만각류 유생이 조사 기간 동안 높은 개체수를 유지할 수 있었던 이유에 대해서 섭식 가능한 식물플랑크톤의 높은 생물량에 기인한다고 보고하였다. Hwang *et al.* (2011)과

Choi *et al.* (2015a)은 부산 오륙도 인근 해역과 거제 장목만에서 채집된 만각류 유생은 수온이 낮고 염분이 높은 봄과 겨울에는 출현이 가장 낮은 반면에, 수온이 높고 염분이 낮은 여름과 가을에는 출현이 가장 높은 출현 특성을 보이고 수온과 염분이 만각류 유생의 개체수 분포에 영향을 미친다고 보고하였다. 이러한 선행 연구를 토대로 종합해보면, 만각류 유생은 계절적으로 수온과 염분뿐만 아니라 먹이 요인 또한 만각류 유생의 개체수 분포에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

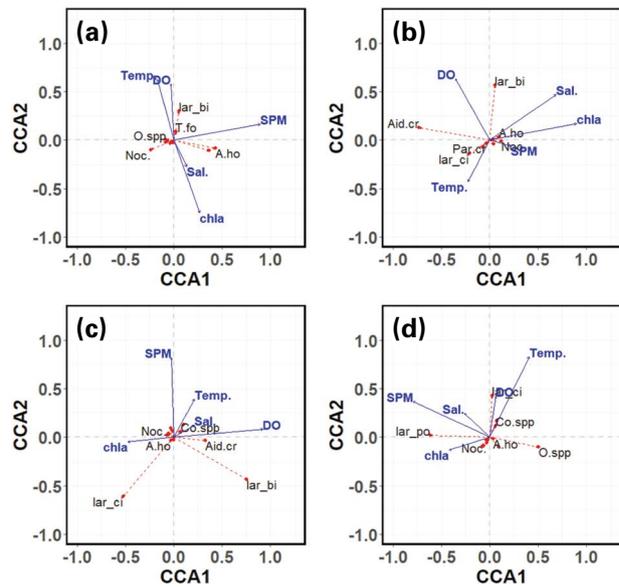


Fig. 7. Ordination plot of the canonical correspondence analysis (CCA) showing the major species and seasonal occurred species in relation to the physicochemical and biological factors. (a) Oct. 2022, (b) Jan. 2023, (c) Mar. 2023, (d) May 2023. Refer to the table included in this figure for the abbreviation of each species. Abbreviations as follows: Noc.; *Noctiluca scintillans*, A.ho; *Acartia hongii*, C.si; *Calanus sinicus*, Cen.ab; *Centropages abdominalis*, Ppa; *Paracalanus parvus* s. l., Par.cr; *Parvocalanus crassirostris*, T.fo; *Tortanus forcipatus*, Aid.cr; *Aidanosigitta crassa*, O.spp; *Oithona* spp., Co.spp; *Corycaeus* spp., Oik.spp; *Oikopleura* spp., lar_ci; Cirriped larvae, lar_bi; Bivalve larvae, lar_po; Polychaeta larvae, Unid.Tra; Unidentified Trachymedusae.

Table 2. Summary of canonical correspondence analysis (CCA) for the zooplankton matrix with environmental factors used as constraints

	Oct.		Jan.		Mar.		May	
	CCA1	CCA2	CCA1	CCA2	CCA1	CCA2	CCA1	CCA2
Eigenvalue	0.0262	0.0099	0.0325	0.0130	0.0304	0.0184	0.0284	0.0193
Proportion (%)	67.1	25.4	58.0	23.2	53.0	32.1	45.5	31.0
Cumulative proportion (%)	67.1	92.5	58.0	81.2	53.0	85.1	45.5	76.5

본 연구는 3개의 조사 시기(가을: 2022년 10월, 겨울~초봄: 2023년 1월과 3월, 봄: 2023년 5월)에 동물플랑크톤 채집이 수행되었다. 본 연구에서 출현한 동물플랑크톤 분류군은 조사 시기 모두 내만중에 의해 군집이 유지되고 있었으며(Table 1), 서해의 경기만(Youn and Choi 2003), 시화호(Yoo *et al.* 2010), 아산만(Lee *et al.* 2006), 만경·동진강(Suh *et al.* 1991), 서해 연안(Moon *et al.* 2011, 2012; Seo *et al.* 2018; Jeong *et al.* 2023)의 동물플랑크톤 선행 연구에서 보고한 종 구성에서 큰 차이점은 발견되지 않았다. 그러나, 조사 시기 동안 우점 출현한 요각류 중 *Acartia hongii*는 가을(2022년 10월)에 2~92 inds. m^{-3} , 겨울(2023년 1월)에 31~544 inds. m^{-3} , 초봄에 336~1,303 inds. m^{-3} , 봄에 281~2,318 inds. m^{-3} 으로 나타나, 가을에서 봄으로 갈수록 점차 양적으로 증가하는 경향을 나타내었다. *A. hongii*는 황해에서 겨울과 봄에 우점 출현하는 고유종(endemic species)으로 알려져 있고(Seo *et al.* 2018), 조사 시기 내에서 이러한 양적 분포 양상을 확인할 수 있었다. 또한, 한국 전 연안에 걸쳐 우점하는 *Paracalanus parvus* s. l.은 가을에 0~230 inds. m^{-3} , 겨울에 0~139 inds. m^{-3} , 초봄에 18~116 inds. m^{-3} , 봄에 42~2,484 inds. m^{-3} 으로 나타나, 시기상 가을에서 겨울~초봄으로 갈 때에는 이들의 개체수가 감소하고, 봄에 다시 증가하는 경향을 나타내었다. 일반적으로, *P. parvus* s. l.은 여름에 활발한 생식 활동을 하여 가을에 우점 출현하는 광온-광염종(eurythermal-euryhaline species)으로 알려져 있는데(Moon *et al.* 2011), 본 연구해역에서는 가을에 개체수가 매우 적게 나타나고 봄에 매우 많이 나타나는 경향을 보였다. 한국 근해에서 *P. parvus* s. l.은 계절성이 뚜렷하지 않으며 서식 해역에 따라, 같은 해역이라도 해마다 같은 양상을 보이지 않는다고 보고된 바 있다(Lee *et al.* 2006; Lee *et al.* 2012a). 따라서, 본 연구 결과만으로 *P. parvus* s. l. 개체군의 출현 특성을 파악하기에는 무리가 있었다. 추후 이러한 한계를 극복하기 위해 더 짧은 간격의 모니터링 조사가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서 조사 시기별 집괴 분석 결과는 곰소만 환경에서 지형적으로 구분한 영역(주요 수로 영역, 조간대, 만안쪽)과 동물플랑크톤 출현 개체수에 따른 정점군이 일치하는 양상을 나타내었다. 그러나, 조사 시기별로 구분된 정점군들의 비유사도 거리가 매우 낮아, 사실상 하나의 군집으로 구성된 동일한 해역임을 시사하고 있었다. Jeong *et al.* (2022)은 정점군 간의 비유사도 거리가 매우 낮은 경우에도 데이터상에서 개체수의 비유사도를 기준으로 정점이

구분되기 때문에 여름철 여수해만에서 동물플랑크톤 군집이 3개로 구분되었음에도 하나의 군집으로 판단하였고, 본 연구에서 또한 동일한 판단을 하였다. 그리고 곰소만 해역을 조사 시기별(가을, 겨울, 초봄, 봄)로 집괴 분석한 결과, 명확한 계절군(가을, 겨울~초봄, 봄)으로 구분되었다. 본 연구에서 여름이 포함되지는 않았지만 곰소만은 계절성이 뚜렷한 해역으로 판단된다.

5. 결 론

곰소만의 환경요인들 중 수온, Chl-*a*, DO, pH은 조사 시기 간에 다른 양상을 보였으며, 염분과 SPM은 조사 시기 간의 통계적인 차이를 보이지 않았다. 조사 해역에서 다양한 분류군들이 출현함에도 2022년 10월과 2023년 5월에는 절지동물이, 2023년 1월과 3월에는 원생동물이 우점하였다. 우점 출현한 동물플랑크톤은 아광충, *Acartia hongii*, *Paracalanus parvus* s. l., *Corycaeus* spp., *Oithona* spp., *Aidanosagitta crassa*, *Oikopleura* spp., Cirriped larvae, Bivalve larvae, Polychaeta larvae 순으로 분석되었다. 조사 시기별로 곰소만에서 우점 출현하는 동물플랑크톤에 미치는 환경요인은 크게 수온과 먹이요인(Chl-*a*와 SPM)으로 나타났다. 곰소만 환경은 계절 내에서는 정점 간 동물플랑크톤의 출현 개체수의 유사도가 매우 높아 단일 군집(안정된 상태)과 계절 간에 구분된 동물플랑크톤 군집(가을, 겨울~초봄, 봄)은 뚜렷한 계절성을 시사하였다.

적 요

국내 바지락 주요 산지인 곰소만에서 동물플랑크톤의 시간적 변동과 동물플랑크톤 개체수에 미치는 환경요인을 파악하기 위하여, 2022년 10월, 2023년 1월, 3월, 5월, 총 4번에 걸쳐 10개의 정점에서 동물플랑크톤 채집을 수행하였다. 곰소만의 환경요인들 중 수온, Chl-*a*, DO, pH은 조사 시기 간에 다른 양상을 보였으며, 염분과 SPM은 조사 시기 간의 통계적인 차이를 보이지 않았다. 곰소만의 동물플랑크톤은 각 조사 시기별로 33개, 29개, 27개, 29개의 분류군이 출현하였으며, 2022년 10월과 2023년 5월에는 절지동물이, 2023년 1월과 3월에는 원생동물이 주로 우점하였다. 절지 동물 중 가장 많은 비율을 차지하는 요

각류(Copepods) 중 우점종은 *Acartia hongii*, *Paracalanus parvus* s. l., *Corycaeus* spp., *Oithona* spp.로, 국내 전 연안과 황해 연안에 주로 분포하는 종들이었다. 동물플랑크톤 개체수를 기반으로 수행한 집괴 분석 결과는 계절 내에서 정점 간 유사도가 낮아 군집이 구분되지 않는 안정된 상태(stable condition)였으며, 계절 간에서는 3개의 군집(가을, 겨울~초봄, 봄)으로 뚜렷하게 구분되어 이 해석은 계절성이 매우 강한 환경을 시사하고 있다.

CRedit authorship contribution statement

YS Jeong: Software, Data curation, Formal analysis, Visualization, Writing - Original draft. **MH Seo:** Investigation, Resources, Validation, Data curation, Formal analysis, Writing - Original draft. **SY Choi:** Data curation, Formal analysis, Visualization. **S Choo:** Software, Data curation, Formal analysis, Visualization. **DY Kim:** Investigation, Resources, Formal analysis. **SH Lee:** Investigation, Resources, Writing - Review & editing. **KH Han:** Conceptualization, Writing - Review & editing, Funding acquisition. **HY Soh:** Conceptualization, Methodology, Resources, Writing - Original draft, Writing - Review & editing, Supervision, Funding acquisition.

Declaration of Competing Interest

The authors declare no conflicts of interest.

사 사

이 논문은 2023년 해양수산부 재원으로 해양수산기술진흥원(20180384, 수산전문인력양성), 고창군 해양수산과 재원으로 고창군 곰소만 패류(바지락) 양식장 해양환경 조사의 지원을 받아 수행된 연구임을 밝힙니다.

REFERENCES

Alboukadel K and F Mundt. 2017. Factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. R Package Ver-

sion 1.0.7. <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>. Accessed November 20, 2023.

Ansari ZA and SGP Matondkar. 2014. Anthropogenic activities including pollution and contamination of coastal marine environment. *J. Ecophysiol. Occup. Health* 14:71-78. <https://doi.org/10.18311/jeoh/2014/1674>

Chang JH, SO Ryu and YJ Jo. 2007. Long-term variation of tidal-flat sediments in Gomsu Bay, west coast of Korea. *J. Korean Earth Sci. Soc.* 28:357-366. <https://doi.org/10.5467/JKESS.2007.28.3.357>

Charrad M, N Ghazzali, V Boiteau and A Niknafs. 2014. NbClust: An R package for determining the relevant number of clusters in a data set. *J. Stat. Softw.* 61:1-36. <https://doi.org/10.18637/jss.v061.i06>

Choi J, J Kang and W Park. 2015a. Monthly variations of cirriped larvae near Oryuk Islets off Busan, Korea. *Korean J. Environ. Biol.* 33:230-239. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2015.33.2.230>

Choi K and JH Jo. 2015. Morphodynamics of tidal channels in the open coast macrotidal flat, Southern Ganghwa Island in Gyeonggi Bay, west coast of Korea. *J. Sediment Res.* 85:582-595. <https://doi.org/10.2110/jsr.2015.44>

Choi K, CM Hong, MH Kim, CR Oh and JH Jung. 2013. Morphologic evolution of macrotidal estuarine channels in Gomsu Bay, west coast of Korea: Implications for the architectural development of inclined heterolithic stratification. *Mar. Geol.* 346:343-354. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.10.005>

Choi M, IS Lee, CS Kim, HC Kim and DW Hwang. 2015b. Distributions of organic matter and trace metals in surface sediments around a manila clam *Ruditapes philippinarum* farming area in Gomsu Bay, Korea. *Korean J. Fish. Aquat. Sci.* 48:555-563. <https://doi.org/10.5657/kfas.2015.0555>

Choi SY, B Hyun, PG Jang, K Shin, HY Soh, JH Kang and MC Jang. 2021. Effects of hypoxia on the distribution of calanoid copepod eggs in the seabed sediments of the eutrophic Masan Bay, Korea. *Water* 13:3116. <https://doi.org/10.3390/w13213116>

Choi SY, HY Soh, K Shin, SW Jung and MC Jang. 2023. Effects of hypoxia on benthic eggs of calanoid copepods in the Southern Sea of Korea. *Front. Mar. Sci.* 10:1132851. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1132851>

Choo S, MT Kwak, YK Cho, YH Yoon and HY Oh. 2023. Effects of water masses on the zooplankton community structure in the northern East China Sea during the East Asian Summer Monsoon in 2020. *Ecol. Indic.* 154:110847. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110847>

Ferreira JG, RA Corner, H Moore, SB Bricker and R Rheault. 2018. Ecological carrying capacity for shellfish aquaculture - sustainability of naturally occurring filter-feeders and cultivated bivalves. *J. Shellfish Res.* 37:709-726. <https://doi.org/10.2983/>

- 035.0370404
- Gibbs MT. 2007. Sustainability performance indicators for suspended bivalve aquaculture activities. *Ecol. Indic.* 7:94–107. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2005.10.004>
- Hall CJ and CW Burns. 2002. Environmental gradients and zooplankton distribution in a shallow, tidal lake. *Arch. Hydrobiol.* 154:485–497. <https://doi.org/10.1127/archiv-hydrobiol/154/2002/485>
- Hwang OM, KS Shin, SH Baek, WJ Lee, SA Kim and MC Jang. 2011. Annual variations in community structure of mesozooplankton by short-term sampling in Jangmok Harbor of Jinhae Bay. *Ocean Polar Res.* 33:235–253. <https://doi.org/10.4217/OPR.2011.33.3.235>
- Jang MC, KS Shin, PG Jang and WJ Lee. 2010. Relationship between environmental factors and short-term variations of mesozooplankton during summer in Jangmok Bay, south coast of Korea. *Ocean Polar Res.* 32:41–52. <https://doi.org/10.4217/OPR.2010.32.1.041>
- Jeong YH, YT Kim, KH Kim, SY Kim, BH Kim and JS Yang. 2006. Mass balance of salts, DIP, DIN, and DON in the Gomso Tidal Flat. *The Sea: J. Korean Soc. Oceanogr.* 11:68–81.
- Jeong YS, S Choo and HY Soh. 2022. Influence of rainfall events on zooplankton community characteristics and feeding habits in estuarine-coastal environments. *Front. Mar. Sci.* 9:950695. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.950695>
- Jeong YS, SJ Lee, S Choo, YH Yoon, H Cho, DJ Kim and HY Soh. 2023. The seasonal environmental factors affecting copepod community in the Anma Islands of Yeonggwang, Yellow Sea. *Ocean Polar Res.* 45:1–13. <https://doi.org/10.4217/OPR.2023004>
- Kahle DJ and H Wickham. 2013. ggmap: spatial visualization with ggplot2. *R J.* 5:144–161. <https://doi.org/10.32614/RJ-2013-014>
- Kellermann A and CH Koh. 1999. Korean Tidal Flats: The West Pacific Mirror of the European Wadden Sea. *Wadden Sea Newsletter No. 1. Common Wadden Sea Secretariat. Wilhelmshaven, Germany.* pp. 7–8.
- Lan B, L He, Y Huang, X Guo, W Xu and C Zhu. 2021. Temporal-spatial variations of zooplankton communities in relation to environmental factors and the ecological implications: A case study in the hinterland of the Three Gorges Reservoir area, China. *PLoS One* 16:e0256313. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0256313>
- Lee CR, C Park, SR Yang and YS Sin. 2006. Spatio-temporal variation of mesozooplankton in Asan Bay. *The Sea: J. Korean Soc. Oceanogr.* 11:1–10.
- Lee EH, MH Seo, YH Yoon, SD Choi and HY Soh. 2017. Environmental factors affecting zooplankton community in Gwangyang Bay. *Korean J. Environ. Biol.* 35:631–639. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2017.35.4.631>
- Lee EH, SY Choi, MH Seo and HY Soh. 2022. Impacts of hypoxia on the mesozooplankton community structure in a semi-enclosed bay. *Front. Mar. Sci.* 9:1005442. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1005442>
- Lee JK, C Park, DB Lee and SW Lee. 2012a. Variations in plankton assemblage in a semi-closed Chunsu Bay, Korea. *The Sea: J. Korean Soc. Oceanogr.* 17:95–111. <https://doi.org/10.7850/jkso.2012.17.2.095>
- Lee OM, MS Yoo, BI Lee and AS Lim. 2008. The distribution and standing crop of phytoplankton at the estuaries of Galgok stream and Incheon River in Jeollanam-do. *Algae* 23:257–268. <https://doi.org/10.4490/ALGAE.2008.23.4.257>
- Lee YW, MO Park, JH Yoon and SB Hur. 2012b. Temporal and spatial variation of microalgal biomass and community structure in seawater and surface sediment of the Gomso Bay as determined by chemotaxonomic analysis. *The Sea: J. Korean Soc. Oceanogr.* 17:87–94. <https://doi.org/10.7850/jkso.2012.17.2.087>
- Lim HS. 2016. Growth of the manila clam (*Ruditapes philippinarum*) cultured in Gomso tidal flat, Korea. *Korean J. Malacol.* 32:189–195. <https://doi.org/10.9710/kjm.2016.32.3.189>
- Liu Z, A Yang, J Liu, C Xing, S Huang, Y Huo, Z Yang, J Huang and W Liu. 2023. Turnover of phytoplankton and zooplankton communities driven by human-induced disturbances and climate changes in a small urban coastal wetland. *Ecol. Indic.* 157:111271. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111271>
- Matthews B and A Mazumder. 2005. Consequences of large temporal variability of zooplankton $\delta^{15}\text{N}$ for modeling fish trophic position and variation. *Limnol. Oceanogr.* 50:1404–1414. <https://doi.org/10.4319/lo.2005.50.5.1404>
- MOE. 2018. Standard Methods for the Examination of Seawater. National Institute of Biological Resources and Ministry of Environment. Incheon and Sejong, Korea. pp. 46–49.
- Moon SY, MH Seo and HY Soh. 2011. Distribution characteristics of two dominant paracalanids on temperature and salinity in the brackish and coastal waters from the west and south coasts of Korea. *Korean J. Environ. Biol.* 29:11–16.
- Moon SY, MH Seo, YS Shin and HY Soh. 2012. Seasonal variation of mesozooplankton communities in the semi-enclosed Muan Bay, Korea. *Ocean Polar Res.* 34:1–18. <https://doi.org/10.4217/OPR.2012.34.1.001>
- Murphy S and G Voulgaris. 2006. Identifying the role of tides, rainfall and seasonality in marsh sedimentation using long-term suspended sediment concentration data. *Mar. Geol.* 227:31–50. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2005.10.006>
- Oh Y and Y Kang. 2022. Spatial distribution of phytoplankton in Gamak Bay in spring, with emphasis on small phytoplankton. *Korean J. Environ. Biol.* 40:374–386. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2017.35.4.631>

- KJEB.2022.40.4.374
- Oksanen J, G Simpson, F Blanchet, R Kindt, P Legendre, P Minchin, R O'Hara, P Solymos, M Stevens, E Szoecs, H Wagner, M Barbour, M Bedward, B Bolker, D Borcard, G Carvalho, M Chirico, M De Caceres, S Durand, H Evangelista, R Fitz-John, M Friendly, B Furneaux, G Hannigan, M Hill, L Lahti, D McGlenn, M Ouellette, E Ribeiro Cunha, T Smith, A Stier, C Ter Braak and J Weedon. 2022. *vegan*: community ecology package. R package version 2.6-4. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>. Accessed November 20, 2023.
- Park K, HJ Woo, HS Jung, JB Jeong, JH Ryu and JH Lee. 2022. A geological environment characteristics dataset of tidal flat surface sediments: A 2021 pilot study of the Gomso Bay Tidal Flat Area to use of sediment type data. *Geo Data* 4:9-22. <https://doi.org/10.22761/dj2022.4.2.002>
- R Core Team. 2022. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. <https://www.R-project.org>. Accessed December 14, 2023.
- Richardson AJ. 2008. In hot water: Zooplankton and climate change. *ICES J. Mar. Sci.* 65:279-295. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsn028>
- Ryu J, J Nam, J Park, BO Kwon, JH Lee, SJ Song, S Hong, WK Chang and JS Khim. 2014. The Saemangeum tidal flat: Long-term environmental and ecological changes in marine benthic flora and fauna in relation to the embankment. *Ocean Coast. Manage.* 102:559-571. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.07.020>
- Sabatès A, JM Gili and F Pagès. 1989. Relationship between zooplankton distribution, geographic characteristics and hydrographic patterns off the Catalan coast (Western Mediterranean). *Mar. Biol.* 103:153-159. <https://doi.org/10.1007/bf00543342>
- Seo MH, HJ Kim, SJ Lee, SY Kim, YH Yoon, KH Han, SD Choi, MT Kwak, MK Jeong and HY Soh. 2021. Environmental factors affecting the spatiotemporal distribution of copepods in a small mesotidal inlet and estuary. *Diversity* 13:389. <https://doi.org/10.3390/d13080389>
- Seo MH, SY Choi, EO Park, D Jeong and HY Soh. 2018. Species diversity of planktonic copepods and distribution characteristics of its major species in coastal waters of Korea. *Korean J. Environ. Biol.* 36:525-537. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2018.36.4.525>
- Shin SS, SY Choi, MH Seo, SJ Lee, HY Soh and SH Youn. 2022. Spatiotemporal distribution characteristics of copepods in the water masses of the northeastern East China Sea. *J. Mar. Sci. Eng.* 10:754. <https://doi.org/10.3390/jmse10060754>
- Silva E, LHP Garbossa, APO Nuñez and KR Lapa. 2019. Hydrodynamic modelling of the dispersion and deposition of bio-deposits from marine bivalve mollusc farming under neap and spring tides in Santa Catarina Island Bays. *Aquaculture* 501:507-514. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.11.001>
- Suh HL, HY Soh and SS Cha. 1991. Salinity and distribution of zooplankton in the estuarine system of Mankyong River and Dongjin River. *J. Oceanol. Soc. Korea* 26:181-192.
- Vieira LR, L Guilhermino and F Morgado. 2015. Zooplankton structure and dynamics in two estuaries from the Atlantic coast in relation to multi-stressors exposure. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 167:347-367. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.10.012>
- Wickham H. 2007. Reshaping data with the reshape package. *J. Stat. Softw.* 21:1-20. <https://doi.org/10.18637/jss.v021.i12>
- Wickham H. 2016. *ggplot2. Elegant Graphics for Data Analysis.* Springer. Cham, Switzerland.
- Wickham H, R François, L Henry, K Müller and D Vaughan. 2023. *dplyr: A grammar of data manipulation.* R package version 1.1.3. <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>. Accessed December 14, 2023.
- Xu Z, DJ Kim, SH Kim, YK Cho and SG Lee. 2016. Estimation of seasonal topographic variation in tidal flats using waterline method: A case study in Gomso and Hampyeong Bay, South Korea. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 183:213-220. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.10.026>
- Yang JS and YT Kim. 2002. The distribution of phosphorus in the Gomso bay tidal flat. *The Sea: J Korean Soc. Oceanogr.* 7:171-180.
- Yang JS, KH Kim and YT Kim. 2003. Distribution of nitrogen components in seawater overlying the Gomso tidal flat. *The Sea: J. Korean Soc. Oceanogr.* 8:251-261.
- Yoo JK, CS Myung, JK Choi, HP Hong and ES Kim. 2010. Spatial and temporal variation of mesozooplankton community in Lake Sihwa, Korea. *Ocean Polar Res.* 32:187-201. <https://doi.org/10.4217/OPR.2010.32.3.187>
- Youn SH and JK Choi. 2003. Spatio-temporal distribution of zooplankton community in Kyeonggi Bay, Yellow Sea. *The Sea: J. Korean Soc. Oceanogr.* 8:243-250.
- Youn SH and JK Choi. 2008. Distribution pattern of zooplankton in the Han River estuary with respect to tidal cycle. *Ocean Sci. J.* 43:135-146. <https://doi.org/10.1007/BF03020694>
- Zhao Z, H Li, Y Sun, Q Yang and J Fan. 2021. Contrasting the assembly of phytoplankton and zooplankton communities in a polluted semi-closed sea: Effects of marine compartments and environmental selection. *Environ. Pollut.* 285:117256. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117256>