

반폐쇄적 여자만 동물플랑크톤 군집의 계절변화에 따른 환경요인의 영향

문성용 · 김희용^{1*} · 이미희 · 정진호 · 유세라

국립수산과학원 남해수산연구소, ¹국립수산과학원 연근해자원과

Effects of Environmental Factors on the Seasonal Variations of Zooplankton Communities in the Semi-enclosed Yeoja Bay, Korea

Seong Yong Moon, Heeyong Kim^{1*}, Mi Hee Lee, Jin Ho Jung and Se Ra Yoo

South Sea Fisheries Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Yeosu 59780, Republic of Korea

¹Fisheries Resources Management Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Republic of Korea

Effect of environmental factors on the seasonal variations of zooplankton communities was investigated in the semi-enclosed Yeoja Bay, Korea from February, April to August, and November 2021. Out of a total 49 species of zooplankton were collected with a predominant of neritic copepods (mainly *Paracalanus orientalis*, *Acartia omorii*, *Acartia ohtsukai*, *Centropages abdominalis*, *Ditrichocorycaeus affinis*, and *Oithona* sp.), accounting for 58.9% of the total abundance of zooplankton. The diversity indices indicated a relatively highest in July, suggesting that diversity is influenced by seasonal temperature, *N. scintillans*, and neritic copepods species. A cluster analysis with non-metric multidimensional scaling revealed four groups of zooplankton communities. The February sample clustered into Group A, having the lowest mean total abundance and species diversity of zooplankton, consisting mainly of *N. scintillans* located the whole region. Cluster Group B from the spring season (April to May) and contained the species diversity with some neritic copepods. Cluster Group C from the summer season (June to August) mainly comprised *P. orientalis*, *A. ohtsukai*, *Oithona* sp., and hydromedusae. Cluster Group D from the autumn season (November) mainly comprised *P. orientalis*, *Temora discaudata*. Redundancy analysis indicated that abundance is positively correlated with temperature, salinity, and pico chlorophyll-*a* concentrations. This study showed that planktonic larvae (such as branchyura larvae) and some copepods (including *A. omorii*, *A. ohtsukai*, *C. sinicus*, and *C. abdominalis*) were significantly vulnerable to zooplankton community of temperature, salinity, and pico chlorophyll-*a* concentrations.

Keywords: Zooplankton community, Environmental factors, Species diversity, Redundancy analysis, Yeoja Bay

서론

해양생물의 다양성과 생물량 따른 분포, 군집구조 및 동태를 파악하는 것은 해양생태계를 이해하는데 있어 중요한 요소이며(Sun et al., 2010), 해양생물의 군집구조를 평가하고 이들 군집 집단의 형성과 환경 요인이 상호 작용하는 방식을 결정하는 것은 자원관리 정책과 중 보존에 실질적인 영향을 미칠 수 있다(Bruggeman and Koojiman, 2007). 해양생태계를 구성하는 다양한 생물군 중 동물플랑크톤은 대부분의 해역에서 분포하고, 1차 생산자인 식물플랑크톤을 주 먹이로 하여 얻게 되는 영양

분을 재분배하고 생지화학적 순환을 조절함으로써 해양생태계에서 중요한 역할을 담당하고(Richardson, 2008; Salvador and Bersano, 2017), 다른 해양생물에 비해 크기가 작고 양이 풍부하며 생활사가 짧은 특징을 가진다(Yebra et al., 2020). 게다가 동물플랑크톤은 해양생태계 내의 먹이 사슬을 통한 물질 수송 및 에너지 흐름 뿐만 아니라 상향 및 하향 조절(top-down and bottom-up control)를 통해 다양한 해양생물 집단의 군집구조 및 개체군 규모를 제어하는 중요한 역할도 담당한다(Griffith et al., 2019). 동물플랑크톤의 종 조성은 해양의 물리화학적, 생물학적 및 미생물학적 요인들과 같은 환경 변화에 신속하게 반

*Corresponding author: Tel: +82. 51. 720. 2280 Fax: +82. 51. 720. 2277

E-mail address: heeyongkim@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.2023.0054>

Korean J Fish Aquat Sci 56(1), 54-65, February 2023

Received 24 December 2022; Revised 30 January 2023; Accepted 11 February 2023

저자 직위: 문성용(연구사), 김희용(연구관), 이미희(연구원), 정진호(연구원), 유세라(연구원)

응한다(Siokou-Frangou et al., 1998; Marcus, 2004). 동물플랑크톤의 시·공간적 분포와 군집구조는 수온, 염분 및 부영양화(Zhang et al., 2019; Annabi-Trabelsi et al., 2022), 해양산성화(Fischer et al., 2001), 기후변화(Richardson, 2008; Brodeur et al., 2019)의 잠재적 영향을 평가하는 중요한 지표로 활용된다. 때로는 식물플랑크톤 및 부유성 요각류의 종 조성과 생물량이 국지적인 해역에서의 부영양화의 영향과 초기 과정을 조사하기 위한 생태학적 지표로도 활용되기도 한다(Annabi-Trabelsi et al., 2022).

우리나라 남해 중부에 위치하는 여자만은 만 입구에 낭도와 적금도 등의 크고 작은 섬들로 이루어져 있고, 남측 조발도 부근의 수심이 최고 44 m에 이르며, 만 입구가 협소하면서 급경사를 이루고 있는 반폐쇄적인 내만이다(Choi et al., 2005). 여자만은 1982년부터 국토의 계획 및 이용에 관한 법률에 따라 수산자원보호구역으로 고시되어 관리되고 있으며, 남쪽의 만 입구를 제외한 대부분은 보존가치가 매우 높은 갯벌과 염습지 및 잘피밭(eelgrass bed)으로 이루어진 연안 생태계가 발달한 곳이다(Lee et al., 2020). 특히, 여자만은 어류의 초기 생활사 단계에서 산란 또는 성육장으로써의 역할이 중요한 것으로 알려져 있다(Ryu et al., 2011; Kim et al., 2015). 하지만, 여자만은 천해의 환경조건을 가지고 있음에도 불구하고, 반폐쇄적인 지형학적인 특성으로 인해 장마철 집중 강우에 따른 다량의 담수가 유입되면 염분이 낮아지는 현상이 발생할 가능성이 높고, 주변의 중소도시들의 지속적인 발달과 연안어장의 이용이 가중됨에 따라 어장관리상의 다양한 문제점들이 발생하는 해역이기도 하다(Lee et al., 2020).

여자만과 같은 내만에서 출현하는 동물플랑크톤의 시·공간적 분포와 군집은 반폐쇄적인 지형학적 특성과 계절에 따른 해양학적 특성에 의해서 영향을 받을 수 있다(Wang et al., 2020; Moon et al., 2022a). 게다가 이러한 동물플랑크톤의 종 조성과 군집은 이들을 주요 먹이생물로 이용하는 자치어와 소형 부어류와 같은 수산자원의 계절적인 영향학적 가치 변화에 영향을 미칠 수 있다(Bedford et al., 2018). 여자만을 대상으로 수행된 선행연구에서 동물플랑크톤 군집은 연안성 요각류와 십각류 유생들의 군집 기여도가 높으며, 계절에 따른 수온과 chlorophyll-a 농도 및 야광충(*Noctiluca scintillans*)의 출현개체수 변화에 따라서 이들의 시·공간적 분포와 군집이 조절되는 특성을 나타낸다(Moon et al., 2010). 우리나라 주변해역 표층수온의 증가에 따른 해양생태계 변화가 나타나면서 동물플랑크톤 종 조성과 군집특성에도 다양한 변화가 예상되지만 2006년에 수행되었을 뿐(Moon et al., 2010), 이후에는 수행되지 않았다. 따라서 여자만과 같은 반폐쇄적 내만의 생태계에서 환경요인이 수반된 동물플랑크톤의 종 조성, 출현개체수 및 생체량을 밝히는 것은 조사해역의 생태학적 특성을 판단할 수 있을 뿐 아니라 생물생산력을 가늠하는 지표로 활용될 수 있다(Beaugrand et al., 2003).

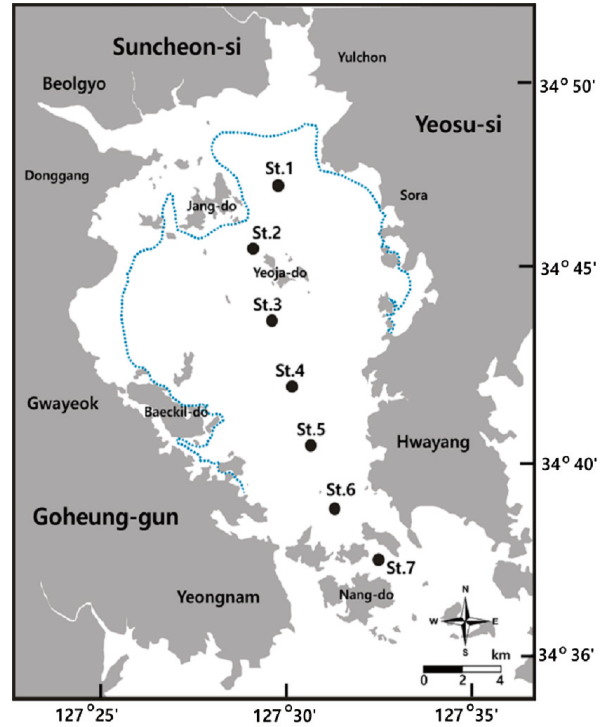


Fig. 1. A map showing the zooplankton sampling stations (●) in the semi enclosed Yeoja Bay, Korea.

본 연구에서는 멸치를 포함한 수산자원들이 여자만에 가입하여 산란 및 성육하는 시기에 동물플랑크톤의 시·공간적 분포와 군집에 영향을 주는 주요 분류군을 파악하고, 이를 통해 수산자원학적으로 중요한 여자만의 생물생산력 추정을 위한 동물플랑크톤 연구 정보를 확보하는데 목적을 두었다.

재료 및 방법

해양환경 및 시료 분석

여자만에서 해양환경 측정 및 동물플랑크톤 채집은 연안어선을 이용하여 2021년 2월, 4-8월, 11월에 총 7개 정점을 대상으로 월 1회 조사하였다(Fig. 1). 수온과 염분은 RBRconcercto3 (conductivity, temperature and depth; RBR Ltd., Ottawa, Canada)를 사용하여 표층과 저층까지 측정하였다. 식물플랑크톤 크기그룹별 (>20 μm, 3-20 μm, <3 μm) chlorophyll-a (chl.-a) 농도 분석을 위해 각 정점의 표층과 저층에서 Niskin 채수기로 채수하였다. 세포 직경이 3 μm 이하인 초미소식물플랑크톤 (picophytoplankton)의 chl.-a 농도 분석을 위해 200-500 mL를 해수를 공극크기 3 μm의 여과지(NY3, Millipore, Billerica, MA, USA)에 여과 후, 공극크기 0.7 μm인 여과지(GF/F 47 mm)에 다시 여과한 후 분석 전까지 냉동 보관하였다. 세포 직경이 3-20 μm의 미소식물플랑크톤(nanophytoplankton)의 chl.-a

농도 분석은 공극크기 20 μm 여과지(NY20; Millipore)로 여과한 후, 공극크기 0.7 μm 여과지(GF/F 47 mm; Whatman[®], Maidstone, UK)에 다시 여과하여 측정할 값에서 초미소식물 플랑크톤 chl.-a 농도를 감하여 산출하였다. 세포 직경이 20 μm 이상인 소형식물플랑크톤(microphytoplankton)의 chl.-a 농도는 총 chl.-a 농도에서 초미소, 미소식물플랑크톤 chl.-a 농도를 감하여 산출하였다. Chl.-a 농도는 보관된 GF/F 여과지를 90% 아세톤 10 mL가 담긴 빛을 차단한 시험관에 넣고 12시간 경과 후 형광분광분석기(10-AU; Turner Designs[®], San Jose, CA, USA)를 사용하여 측정하였다(Parsons et al., 1984).

동물플랑크톤 채집 및 시료 분석

본 연구에서는 부어류들과 자치어들의 먹이생물로 이용되는 소형동물플랑크톤을 함께 채집하기 위해 원추형 네트(망구직경 45 cm, 망목크기 100 μm)를 사용하여 해양환경을 조사한 정점에서 저층에서 표층까지 수직 채집한 후, 중성포르말린으로 최종농도가 5%가 되도록 고정하였다. 채집된 동물플랑크톤 시료의 정량적 분석을 위해서 네트 망구 입구에 부착된 유량계(model 438115; Hydro-Bios, Altenholz, Germany)를 이용하여 여수량을 산출하였다. 동물플랑크톤 시료를 분석하는 과정에서 분할이 필요한 경우에는 Folsom식 부차시료기를 이용하여 시료를 분할하여 Bogorov식 계수판(model 435 012; Hydro-Bios)에 옮긴 후 UNSCO식 계수판에 옮겨 분류 및 계수하였다. 동물플랑크톤 중 동정은 해부현미경(SZ40; Olympus)을 사용하여 주요 요각류를 중심으로 실시하였고, 종 동정이 어려운 분류군들은 목(order)과 속(genus) 수준까지 분류 및 계수하였다. 요각류의 세밀한 종 동정이 필요한 경우는 동정에 필요한 부속지를 해부한 후, 고배율 광학현미경(BX51; Olympus)으로 관찰하여 최종 판별하였다. 계수가 완료된 시료는 유량계로 산출된 여수량 값을 활용하여 단위체적당 개체수(ind. m^3)로 환산하였다. 동물플랑크톤의 종 동정 및 분류체계는 Chihara and Murano (1997), Boxshall and Halsey (2004) 및 Ueda et al. (2022)을, 분류군들의 유효명(valid name)은 WoRMS (2022)를 따랐다. 동물플랑크톤의 정량분석은 분류군별 출현개체수, 출현 빈도, 그리고 출현개체수로 표현하였다.

동물플랑크톤 군집 및 환경요인 분석

동물플랑크톤의 종 다양성 파악을 위해 생태학적 지수 중 하나인 종 다양성 지수(H')를 구하였으며(Shannon and Weaver, 1963), 조사시기에 따른 군집 특성 파악을 위해 전체 출현개체수 순위 상위 1% 이상의 출현 빈도를 보인 분류군들에 대해서 다변량분석법인 분류법(classification)과 배열법(ordination)을 이용하여 군집분석을 수행하였다. 군집분석 시 이용된 분류군별 출현개체수는 조사시기와 종간의 개체군 밀도의 자료 편중을 피하고 정규화를 위해 로그($\log x+1$) 지수로 변환한 자료를 이용하였다. 동물플랑크톤 군집의 정점 간 유사도 측정에는 Bray-

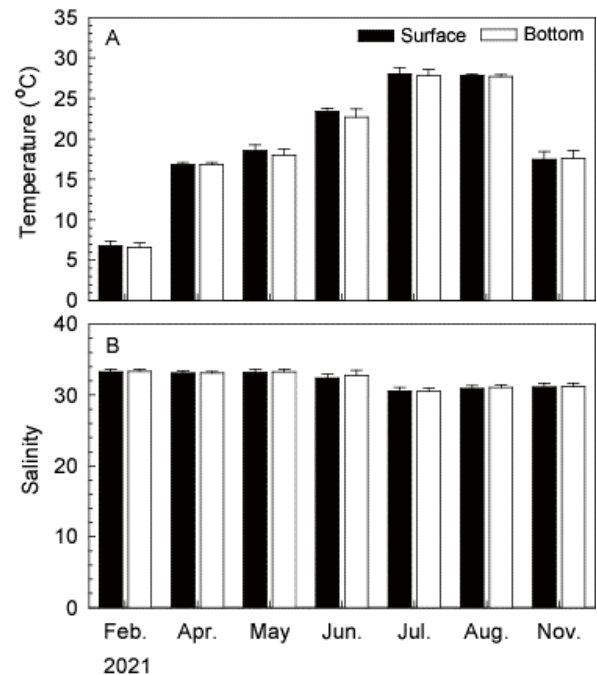


Fig. 2. Monthly variations in temperature and salinity in the semi enclosed Yeolja Bay, Korea. A, Temperature; B, Salinity. Data are mean with standard deviation indicated by error bars.

Curtis 유사도 지수를 근거로 비가중 산술평균(unweighted pair group method with arithmetic mean)을 이용해 군집화하는 계보적 집괴분석(hierarchical cluster analysis)을 도출한 후, 이를 nMDS (non-metric multidimensional scaling) 배열법으로 분석하였다. 군집분석 결과에 따라 각 군집에 영향을 미치는 분류군 파악을 위한 SIMPER (similarity-percentages procedure) 분석은 PRIMER (version 6) 프로그램을 이용하였다(Clarke and Gorley, 2014). 동물플랑크톤 군집에 기여하는 주요 분류군에서 점유율 2% 이상을 대상으로 시·공간적 분포와 조사한 환경요인과의 관계를 설명하기 위해 수온, 염분, 식물플랑크톤 크기 그룹별 chl.-a 농도 및 수심 자료를 매개 변수로 하여 CANOCO (canonical community ordination; version 4.5) 프로그램으로 중복분석(redundancy analysis, RDA)을 수행하였다.

결 과

수온, 염분 및 크기그룹별 Chl.-a

조사기간 동안 여자만의 수온은 표층에서 5.8–29.1°C, 저층에서 5.9–28.7°C의 범위였으며, 월 평균 수온은 2월 6.7°C, 4월 16.8°C, 5월 18.3°C, 6월 23.1°C, 7월 27.9°C, 8월 27.8°C, 11월 17.5°C로 나타났다(Fig. 2A). 표층 수온은 겨울철인 2월에 여자만 중부해역에서 8°C 이하로 낮은 수온을 보였지만, 4월부터 수

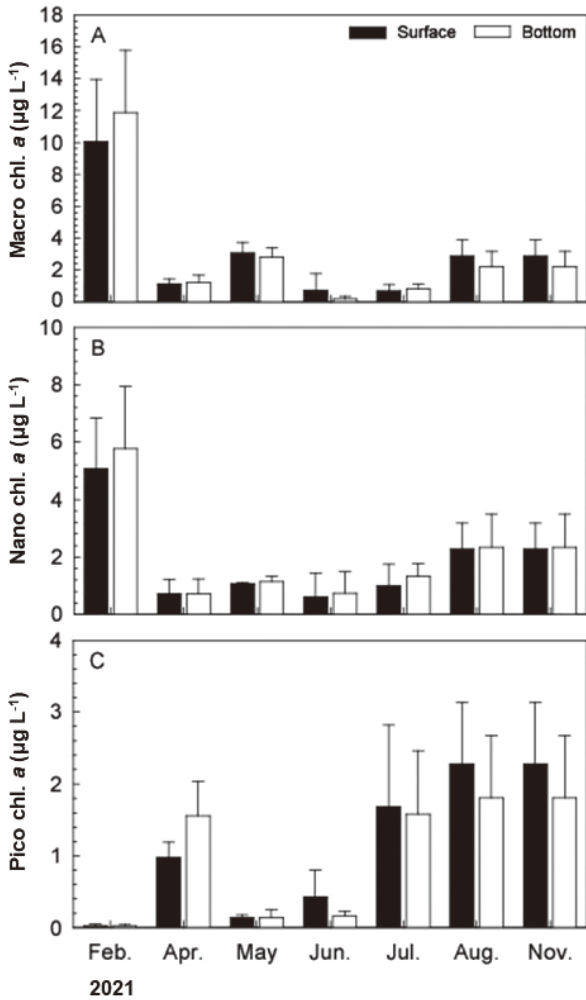


Fig. 3. Monthly variations in size classes chlorophyll-a concentrations in the semi enclosed Yejoa Bay, Korea. A, Macro chlorophyll-a; B, Nano chlorophyll-a; C, Pico chlorophyll-a. Data are mean with standard deviation indicated by error bars.

온이 16–17°C 범위로 상승하기 시작하다가 7월부터 여자만 입구를 제외한 전 해역의 표층과 저층에서 28°C 이상의 고수온이 8월까지 관측되었으며, 11월로 접어들면서 전 해역의 수온이 20°C 미만으로 하강하였다.

염분은 표층에서 29.9–33.7, 저층에서 30.1–33.6의 범위였으며, 월 평균 염분은 2월 33.3, 4월 33.1, 5월 33.2, 6월 32.6, 7월 30.6, 8월 30.9, 11월 31.2로 시간적으로 변동이 크게 나타났으며, 특히 여름철인 7월과 8월에 여자만 북부 해역에서 낮은 염분이 분포하였다(Fig. 2B)

크기그룹별 chl.-a 농도를 분석한 결과, 소형식물플랑크톤은 2월에 표층이 4.8–17.5 µg L⁻¹ (평균 10.1 µg L⁻¹), 저층이 4.9–14.9 µg L⁻¹ (평균 11.9 µg L⁻¹)의 범위였으며, 4월에 감소한 이후, 5월에 다시 증가하다가 6월부터 대부분의 정점에서 1 µg L⁻¹ 이

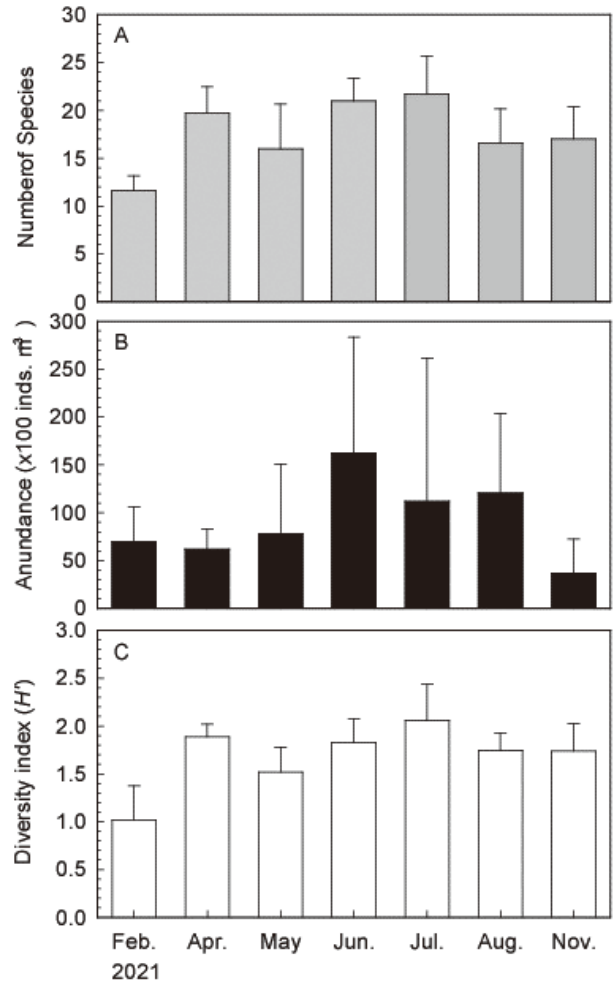


Fig. 4. Monthly variations in number of species, abundance, and species diversity index of zooplankton collected in the semi enclosed Yejoa Bay, Korea. A, Number of species; B, Abundance; C, Species diversity (H'). Data are mean with standard deviation indicated by error bars.

하의 농도를 나타냈지만, 이후 다시 증가하였다(Fig. 3A). 미소 식물플랑크톤은 2월에 표층과 저층에서 각각 3.5–8.7 µg L⁻¹ (평균 5.1 µg L⁻¹), 3.5–9.5 µg L⁻¹ (평균 5.8 µg L⁻¹)의 범위를 나타냈으며, 소형식물플랑크톤의 월 변화와 유사한 양상이었다(Fig. 3B). 초미소식물플랑크톤 2월에는 모든 해역에서 1 µg L⁻¹ 이하의 낮은 농도를 보이다가 4월의 표층과 저층에서 각각 0.7–1.3 µg L⁻¹ (평균 0.9 µg L⁻¹), 0.7–2.1 µg L⁻¹ (평균 1.6 µg L⁻¹)로 농도가 증가한 이후에 5월에 다시 감소하였지만, 6월부터 11월까지 지속적인 증가하는 특징을 나타냈다(Fig. 3C).

종조성, 출현개체수 및 종 다양도지수

여자만의 동물플랑크톤은 총 49개 분류군이 출현하였으며, 요각류가 15속 21분류군으로 가장 우점하였다. 월별 출현 분류

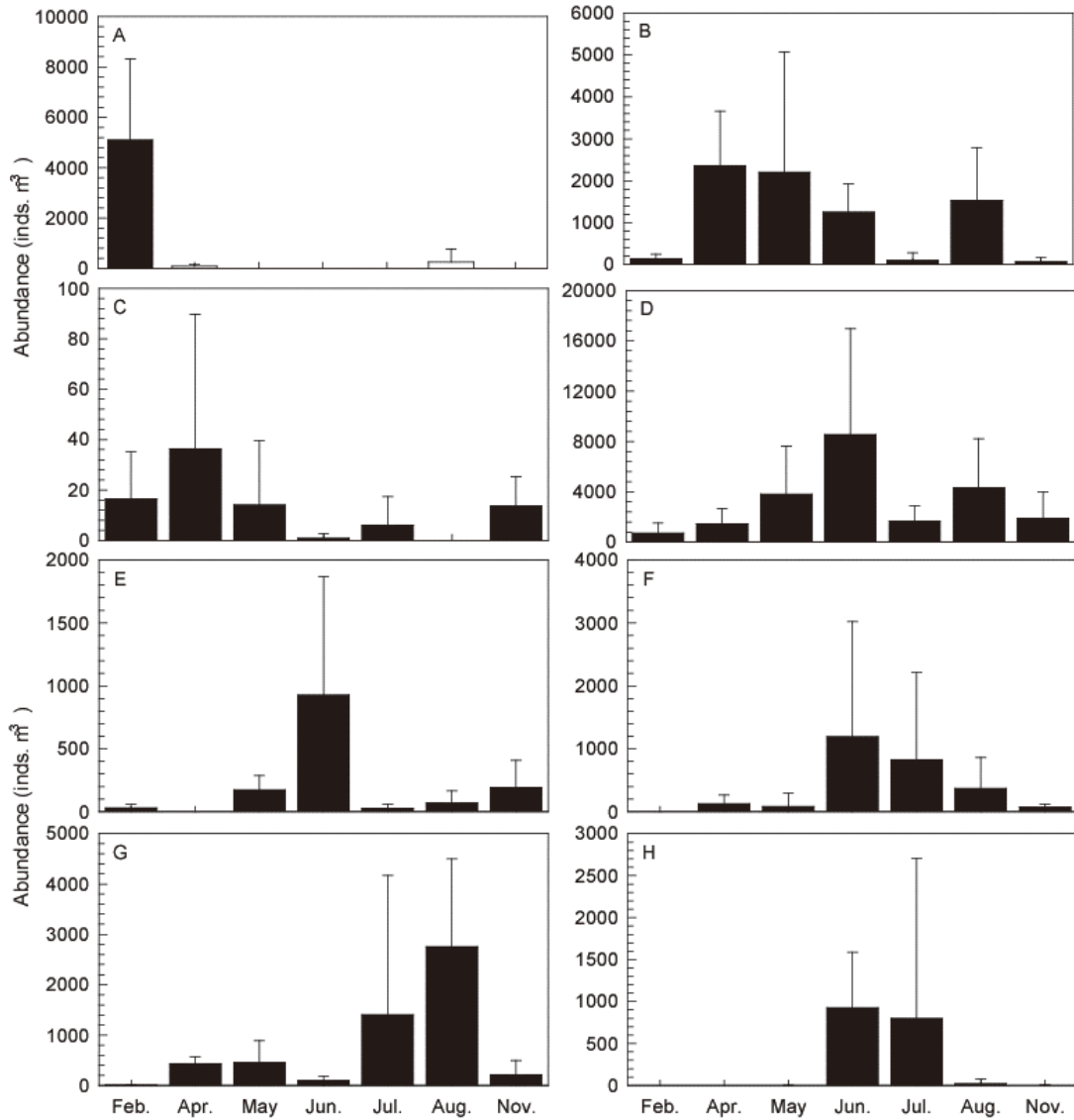


Fig. 5. Monthly variations in the abundance of the dominant zooplankton taxa in the semi enclosed Yeosu Bay, Korea. A, *Noctiluca scintillans*; B, *Acartia omorii*; C, *Calanus sinicus*; D, *Paracalanus orientalis*; E, *Districhocorycaeus affinis*; F, *Acartia ohtsukai*; G, *Appendicularia* sp.; H, *Evadne nordmani*. Data are mean with standard deviation indicated by error bars.

군은 14-31개 범위로 2월에 가장 낮았고, 7월에 가장 높게 나타났으며, 8월에 감소하다가 11월에 30개 분류군으로 증가하는 특징이었다(Fig. 4A). 조사기간 동안 출현했던 동물플랑크톤 주요 분류군들 중 요각류의 월별 종조성은 평균 11-22개 분류군으로 2월에 가장 낮았으며, 7월에 가장 높게 나타나 시기별 차이를 보였으며(Fig. 4A), 동물플랑크톤의 평균 출현개체수는 3,649-16,234 inds. m⁻³의 범위였다(Fig. 4B). 2월의 평균 출현개체수는 6,971 inds. m⁻³로 낮았다가 4월부터 6월까지 증가한 이후 11월까지 감소하는 특징이었고, 만의 북부에서 남부 해역으로 갈수록 출현개체수가 증가하는 양상이었으며, 대부분 내

만성 요각류가 우점하는 특징을 보였다. 동물플랑크톤의 종 다양도 지수(H)는 0.53-2.52의 범위로 시·공간적으로 큰 변동을 나타냈다. 월 평균 1.02-2.05의 범위로 2월에 가장 낮았고, 7월에 가장 높게 나타났으며(Fig. 4C), 이 시기에는 정점 4에서 2.52로 조사기간 동안 가장 높은 종 다양도 지수를 나타냈다

주요 분류군의 월 평균 출현개체수를 살펴보면(Fig. 5), *N. scintillans* (야광충)의 월별 평균 출현개체수는 출현하지 않은 5-7월, 11월을 제외하면 87-5,093 inds. m⁻³의 범위로 2월에 가장 높았으며, 4월에 가장 낮은 특징을 보였다(Fig. 5A). 조사기간 동안 지속적으로 출현했던 *Acartia omorii*의 월별 평균 출현

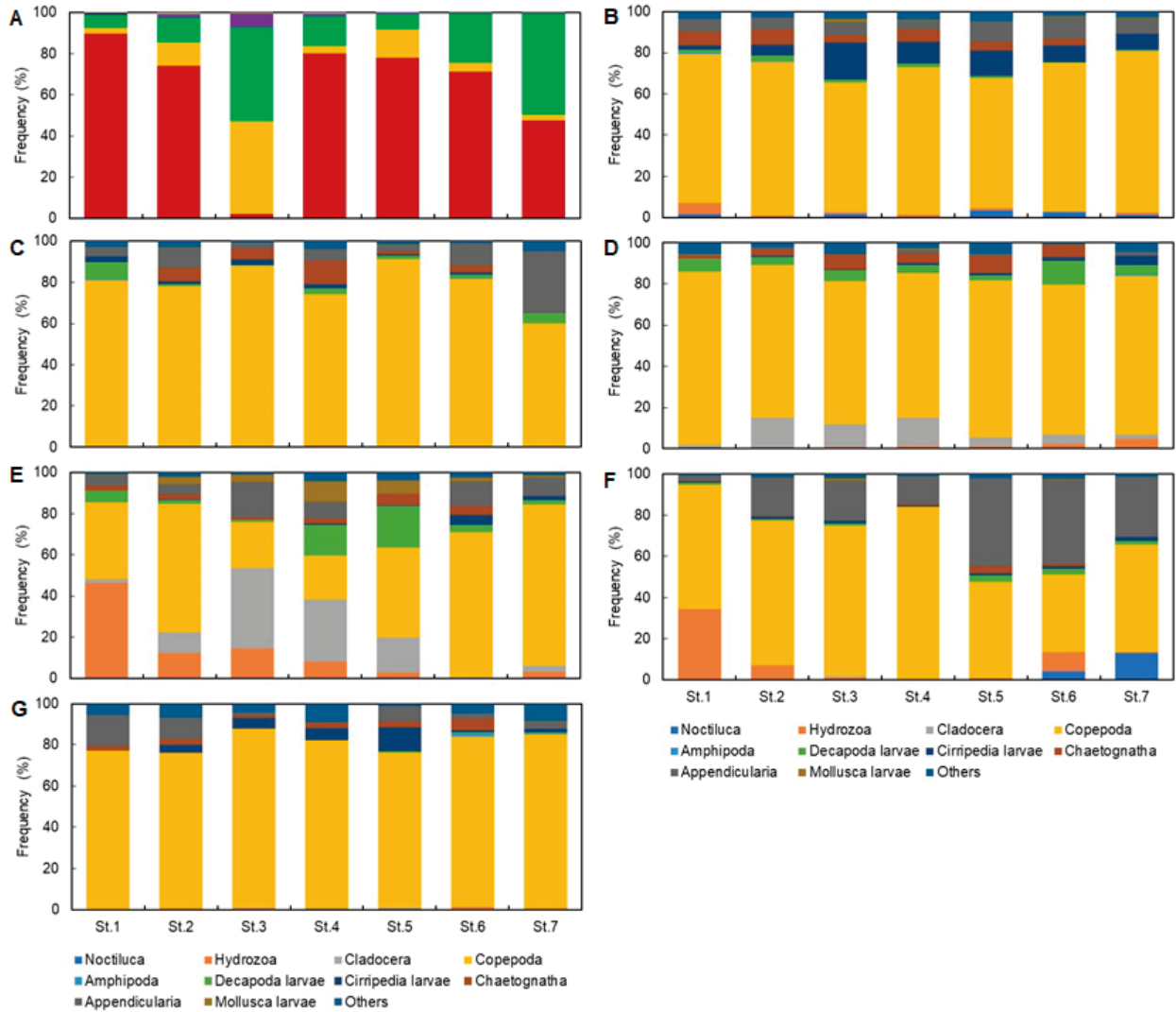


Fig. 6. Monthly variations in frequency (%) of zooplankton in the semi enclosed Yeosu Bay, Korea. A, February; B, April; C, May; D, June; E, July; F, August; G, November 2021.

개체수는 177–2,858 inds. m⁻³의 범위로 4월에 가장 높았고, 11월에 가장 낮았다(Fig. 5B). *Calanus sinicus*는 8월을 제외한 시기에 출현하였으며, 월별 평균 출현개체수는 6–36 inds. m⁻³의 범위로 4월에 가장 높게 나타났다(Fig. 5C). *Paracalanus orientalis*는 701–8,541 inds. m⁻³의 범위로 2월에 가장 낮았으며, 6월에 가장 높았고(Fig. 5D), *Ditrichocorycaeus affinis*는 출현하지 않은 4월을 제외하면 28–940 inds. m⁻³의 범위로 6월에 가장 높았지만, 계절적으로 변동폭이 크게 나타났다(Fig. 5E). 4월부터 11월까지 지속적으로 출현한 *Acartia ohtsukai*의 월별 평균 출현개체수는 71–1,193 inds. m⁻³의 범위로 여름철인 6월과 7월에 각각 1,193 inds. m⁻³, 825 inds. m⁻³의 로 출현하는 특성을 나타냈다(Fig. 5F). 미충류(Appendicularia)는 2월부터 11월까지 지속적인 출현 특성을 보였고, 여름철인 7–8월에 높은

평균 출현개체수를 나타냈지만, 11월에는 평균 100 inds. m⁻³ 미만으로 감소하였다(Fig. 5G), 지각류 *Evadne nordmani*는 2월과 4월을 제외한 시기에 출현하였고, 6월과 7월에 증가하였지만, 8월부터 감소하는 특성을 보였다(Fig. 5H). 특히, 여름철(6–8월)에는 *A. ohtsukai*, *Centropages dorsispinatus*, *Labidocera pavo*, *Temora discaucata*와 같은 난수성 종들이 출현하였으며, 11월에는 외양성 요각류인 *Eucalanus* sp.가 출현하는 특징을 나타냈다.

출현 빈도 및 군집 특성

여자만에서 출현한 동물플랑크톤 출현 빈도의 월별 변동 양상을 살펴보면(Fig. 6), 시·공간적으로 큰 차이를 보였지만, 요각류의 출현 빈도가 동계인 2월을 제외하고 대부분의 정점에

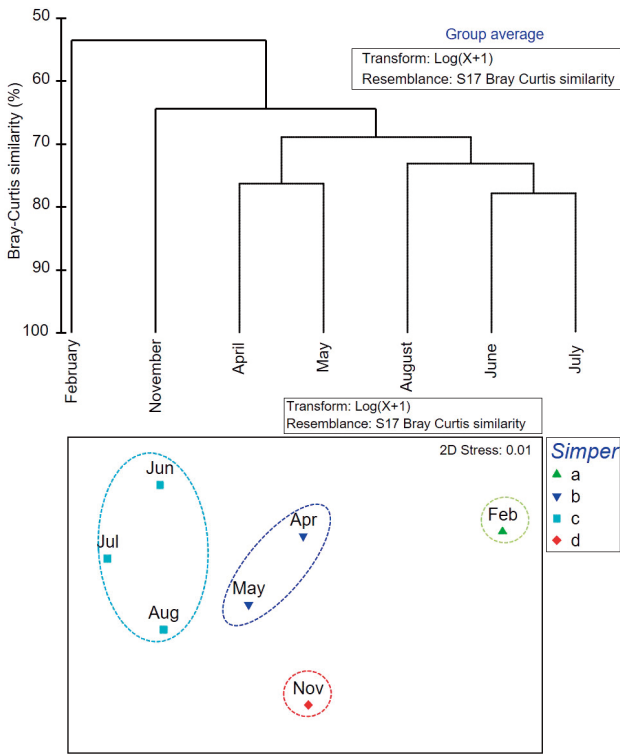


Fig. 7. Non-metric multidimensional scaling (nMDS) ordinations plot of sampling stations based on zooplankton abundance in the semi enclosed Yeolja Bay, Korea.

서 50% 이상을 차지하여 가장 우점하였으며, 2월에는 야광충의 출현 빈도가 높은 것이 특징적이었다. 봄철인 4월과 5월에는 요각류의 출현 빈도가 60% 이상으로 높았으며, 여름철인 6-8월 동안 소폭 감소한 반면, 지각류(Cladocera), 미충류(Appendicularia), 십각류 유생(Decapoda larvae), 연체동물 유생(Mollusca larvae)의 출현 빈도가 증가하는 양상이었고, 11월에는 요각류의 출현 빈도가 다시 70% 이상으로 증가하는 특성을 보였다.

동물플랑크톤 월별 출현개체수 자료를 활용하여 Bray-Curtis 유사도 지수와 nMDS 배열법으로 군집분석을 수행한 결과 (Fig. 7), 유사도 65%를 기준으로 2월이 A그룹, 4, 5월이 B그룹, 6-8월이 C그룹, 11월이 D그룹으로 모두 4개 그룹으로 구분되었다. 각 군집에 기여하는 분류군들을 파악한 결과, 연안과 내만성 요각류가 대부분을 차지하였으며(Table 1), A그룹은 야광충, *P. orientalis*, 히드라해파리류(Hydromedusae), B그룹은 *Acartia omorii*, *P. orientalis*, 미충류, C그룹은 *P. orientalis*, *A. ohtsukai*, D그룹은 *P. orientalis*, *T. discaudata*가 각 군집의 기여도가 큰 분류군으로 확인되었다.

주요 분류군과 환경요인 분석

여자만에서 출현한 동물플랑크톤 주요 분류군들과 환경요인(

수온, 염분, 소형식물플랑크톤, 미소식물플랑크톤, 초미소식물플랑크톤)을 RDA 한 결과, 제1축과 제2축의 고유치(eigenvalue)는 각각 0.241과 0.124이었고, 제1축과 2축의 전체 자료 분석에 대한 누적 기여율은 42.3%로 확인되었다(Table 2). 제1축과 2축에서 환경요인에 대한 주요 분류군들과 환경요인과의 관

Table 1. Simper list of taxa contributing mostly to similarities within the following periods, with a cut-off at 95%

| Taxon | Group (average similarity) | Contribution (%) | Cumulative contribution (%) |
|---------------------------------|----------------------------|------------------|-----------------------------|
| A-group (February) | | | |
| <i>Noctiluca scintillans</i> | - | 73.1 | 73.1 |
| <i>Paracalanus orientalis</i> | - | 10.2 | 83.3 |
| Hydromedusae | - | 7.9 | 91.2 |
| <i>Centropages abdominalis</i> | - | 3.3 | 94.8 |
| B-group (April-May) | | | |
| <i>Acartia omorii</i> | 6.42 | 8.40 | 8.40 |
| <i>Paracalanus orientalis</i> | 6.14 | 8.05 | 16.45 |
| Appendicularia sp. | 5.32 | 6.97 | 23.42 |
| <i>Adianosagitta</i> sp. | 4.89 | 6.36 | 29.78 |
| <i>Ditricocorycaeus affinis</i> | 4.72 | 6.18 | 35.97 |
| C-group (June-August) | | | |
| <i>Paracalanus orientalis</i> | 5.30 | 7.09 | 7.09 |
| <i>Acartia ohtsukai</i> | 4.45 | 5.95 | 13.04 |
| <i>Oithona</i> sp. | 4.21 | 5.64 | 18.68 |
| Hydromedusae | 4.08 | 5.46 | 24.15 |
| Appendicularia sp. | 4.08 | 5.46 | 29.61 |
| D-group (November) | | | |
| <i>Paracalanus orientalis</i> | - | 51.6 | 51.6 |
| <i>Temora discaudata</i> | - | 7.8 | 59.4 |
| <i>Oithona</i> sp. | - | 7.8 | 67.2 |
| <i>Ditricocorycaeus affinis</i> | - | 5.3 | 72.5 |

Table 2. Summary of redundancy analysis (RDA) for dominant taxa and different environmental factors in Yeolja Bay, Korea

| | Axes-1 | Axes-2 | Axes-3 | Axes-4 |
|--|--------|--------|--------|--------|
| Eigenvalues | 0.241 | 0.124 | 0.030 | 0.018 |
| Species-environmental correlations | 0.904 | 0.732 | 0.627 | 0.523 |
| Cumulative percentage variance of species data | 24.1 | 36.5 | 39.5 | 41.2 |
| Species-environment relation | 56.9 | 86.3 | 93.4 | 97.5 |
| Sum of all eigenvalues | 1.000 | | | |
| Sum of all canonical eigenvalues | 0.423 | | | |

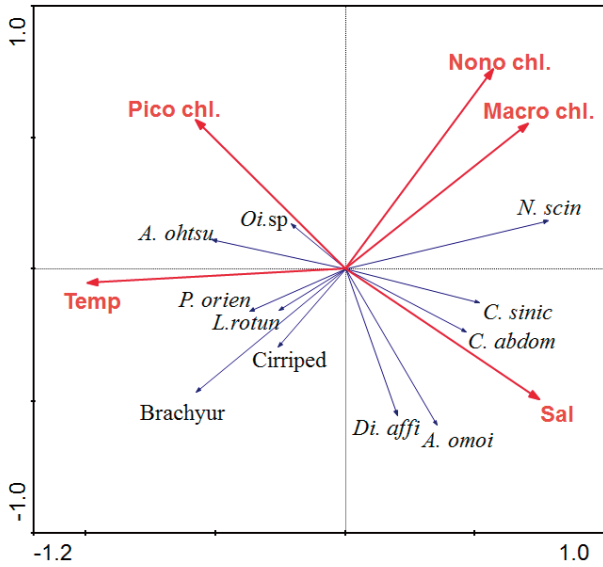


Fig. 8. RDA biplot for environmental factors (red arrows) and dominant copepods (blue arrows). Labels are: Temp, Temperature; Sal, Salinity; Macro chl., Macro chlorophyll-*a*; Nano chl., Nano chlorophyll-*a*; Pico chl., Pico chlorophyll-*a*; *N. scin*, *Noctiluca scintillans*; *A. omoi*, *Acartia omoi*; *A. ohtsu*, *Acartia ohtsukai*; *C. sinic*, *Calanus sinicus*; *C. abdom*, *Centropages abdominalis*; *Di. affi*, *Ditricocorycaeus affinis*; *L. rotun*, *Labidocera rotunda*; *Oi. sp*, *Oithona sp.*; Cirriped, Cirripedia larvae; Brachyur, Brachyuran larvae.

계는 각각 56.9%, 86.3%로 설명되었다. 중복분석 결과에서 수온, 미소식물플랑크톤, 초미소식물플랑크톤의 농도가 동물플랑크톤 군집에 영향을 주는 환경요인으로 파악되었다(Table 3). 동물플랑크톤 주요 분류군들과 환경요인 간의 분석 결과(Fig. 8), 야광충은 소형식물플랑크톤과 미소식물플랑크톤과 양의 상관성을 나타냈으며, *A. ohtsukai*는 수온 및 초미소식물플랑크톤과 양의 상관성을 나타냈고, 수온은 계류 유생(Brachyuran larvae), 염분은 *A. omoi*, *C. sinicus*, *C. abdominalis*와 양의 상관성을 나타냈을 뿐, 나머지 분류군들은 환경요인과의 상관

Table 3. Conditional effects and correlations of environmental variables with the redundancy analysis (RDA) axes

| Environmental factors | λ | F-value | P-value | Correlation | |
|-----------------------|-------|---------|---------|-------------|---------|
| | | | | Axis-1 | Axis-2 |
| Temperature | 14.66 | 0.002 | 0.008 | -0.8972 | -0.0374 |
| Salinity | 1.91 | 0.068 | 0.176 | 0.6767 | -0.3608 |
| Macro chl.- <i>a</i> | 1.01 | 0.414 | 0.060 | 0.6369 | 0.4054 |
| Nano chl.- <i>a</i> | 7.18 | 0.002 | 0.002 | 0.5168 | 0.5561 |
| Pico chl.- <i>a</i> | 3.14 | 0.008 | 0.008 | -0.5214 | 0.4155 |

chl.-*a*, Chlorophyll-*a*.

성은 뚜렷하게 나타나지 않았다.

고찰

여자만 동물플랑크톤 군집은 겨울철에 야광충(*N. scintillans*)의 대량 발생을 제외하면 대부분 연안과 내만에서 출현하는 요각류들의 시·공간적 분포 양상에 의해 군집이 변동하는 특징을 나타냈다. 이전 여자만 동물플랑크톤 군집 특성 연구에서 야광충은 겨울철과 봄철에 출현 빈도가 높은 점에서(Moon et al., 2010), 본 연구와 차이가 있었지만, 연안과 내만성 요각류에 의해 군집이 유지되는 점은 인근의 득량만(Han et al., 1995)과 가막만(Moon et al., 2006)과 유사하였다. 하지만, 2월 야광충 대량 발생 이후 봄철에 요각류의 출현빈도가 40% 이상으로 증가하면서 가을철까지 지속된 반면, 여름철인 6-7월에 지각류(Cladocera)의 대량 발생으로 인해 요각류의 출현 빈도가 감소하는 특징을 보였다. 특히, 야광충의 개체군 변동은 대부분의 동물플랑크톤과 같은 수온, 염분, 그리고 chl.-*a* 농도와 밀접한 연관성이 있으며(Piontkovski et al., 2021), 지각류는 수온과 염분(Kodama et al., 2021), 식물플랑크톤 chl.-*a* 농도(Turner et al., 2008)와 연관성이 있다. 야광충은 전 세계적으로 한대에서 온대해역의 근해, 연안, 내만까지 일시적으로 분포하는 특징이 있다(Piontkovski et al., 2021; Kodama et al., 2021). 야광충의 대발생(bloom)은 생물학적 요인뿐 아니라, 해류에 의해 축적된 야광충 개체군은 먹이생물, 수온 및 수위가 안정되면 대발생이 일어날 수 있는 최적의 조건을 갖추게 된다(Kang, 2020; Piontkovski et al., 2021). 특히, 이전 연구와는 달리 본 연구에서는 겨울철에 대발생이 나타나는 특징을 보였는데, 이 때의 환경적인 특징으로 먹이인 크기별 chl.-*a* 농도의 범위는 소형식물플랑크톤이 4.8-17.5 $\mu\text{g L}^{-1}$, 미소식물플랑크톤이 3.5-9.46 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 다른 계절보다 유독 높게 나타난 점에서 chl.-*a* 농도 범위가 높은 시기에 출현한 야광충의 개체수가 상대적으로 높다는 기존의 사례(Huang and Qi, 1997; Kang, 2010; Baek et al., 2013)와 잘 일치하였다. 또한, 여름철에 출현 비율이 증가한 지각류는 부영양화 된 내만에서 처녀생식(parthenogenetic reproduction)을 통해서 짧은 시기에 폭발적으로 증가한다는 종의 특성을 고려할 때(Bedikoğlu et al., 2022), 여자만 북부에 위치하는 크고 작은 하천으로부터 지속적인 담수와 영양염 공급(Yoon and Lee, 2020), 그리고 지각류가 대발생할 수 있는 적정 수온(Bedikoğlu et al., 2022)과 우점 먹이생물의 변화(Kodama et al., 2021)가 영향을 준 것으로 보인다

조사기간 동안 여자만에서 출현한 동물플랑크톤은 총 49개 분류군이 출현하였고, 요각류가 우점하였으며, 평균 출현개체수는 3,649-16,234 inds. m^3 의 기준에 수행된 연구 결과(Moon et al., 2010) 보다 5-20배 수준의 차이를 보였는데, 이러한 결과는 네트의 망구와 망목의 크기, 인망시간 및 속도, 채집방법 및 시기 등이 동물플랑크톤 분포와 출현개체수에 직접적인 영향을 준 것으로 판단된다(Tseng et al., 2011; Mack et al., 2012). 겨울

철인 2월은 야광충과 히드라해파리류의 대량 발생이 전체 출현 개체수에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히, 히드라해파리류 개체군이 만 중부해역에서 1,622 inds. m⁻³로 높은 밀도로 출현한 반면, 요각류는 비교적 낮은 밀도를 유지하는 특성을 보였다. 크기가 작은 히드라해파리류가 내만에서 대량 발생하게 되면 요각류 알에 대한 포식압이 증가하므로(Purcell et al., 2015; Sun et al., 2020), 요각류의 개체군 발생에도 영향을 줄 수 있다. 우리나라 연안에서 모두 29종이 출현하는 히드라해파리류는 해역에 따라 종류와 생태적 특성이 다르지만(Park, 2012), 히드라해파리류의 대량 발생이 동물플랑크톤 군집에 미치는 영향에 대한 연구는 보고된 바가 없기 때문에 향후 이에 대한 연구의 필요성이 높다.

종 다양도 지수(H')는 0.53–2.52의 범위로 시·공간적으로 크게 변동하였고, 겨울철인 2월에 가장 낮았고 여름철인 7월에 가장 높았다. 해양생태계는 다양한 생물군들로 구성되어 있기 때문에 종 다양도 지수는 해역에서 출현하는 생물군들의 생태학적 지표로 활용된다(Dvoretzky and Dvoretzky, 2014). 동물플랑크톤 종 다양도 지수는 계절에 따라 출현하는 분류군의 특성, 조사해역의 범위 및 지리적인 특성, 환경요인 등 다양한 요인에 의해 조절될 수 있다(Huntly and Boyd, 1984; Dvoretzky and Dvoretzky, 2014). 여자만과 같은 반폐쇄적 내만에서 여름철의 높은 종 다양도 지수는 겨울철 이후 야광충의 출현 빈도가 낮아지면서 내만성 요각류와 지각류의 출현 종수가 증가했기 때문으로 볼 수 있다(Moon et al., 2010, 2022a). 결론적으로 여자만 동물플랑크톤의 종 다양도 변화는 반폐쇄적인 해역의 특성 상 계절적으로 출현하는 내만성 요각류의 출현 양상이 중요한 요인으로 작용했을 가능성이 높다고 판단된다.

여자만 동물플랑크톤 군집은 모두 4개의 그룹으로 구분되어 나타났으며, 각 그룹에 영향을 미치는 주요 분류군들은 주로 야광충, *P. orientalis*, *A. omorii*, *A. ohtsukai*, *D. affinis*, *C. abdominalis*, 히드라해파리류로 나타났다. 각 군집에 기여하는 분류군들의 분포 특성을 파악한 결과에서 야광충은 겨울철에 높은 출현개체수를 보였고, 근접한 광양만과 가막만 동물플랑크톤 계절군집에 영향을 미치는 주요 분류군들과 차이를 보였다(Moon et al., 2010). 특히, 여자만 동물플랑크톤 군집에 기여도가 높은 요각류의 알에 대한 야광충의 높은 포식압의 증가에 따라서 유생의 가입 잠재성을 낮추게 되어 요각류 개체군 변동에 영향을 줄 수 있지만(Fork and Greve, 2002), 반면에 야광충이 요각류의 일일 알 생산력의 50% 이상을 섭식함에도 불구하고 요각류 개체군 변동에 영향을 받지 않는다는 보고도 있다(Zhang et al., 2017). 야광충은 다양한 해양 환경에서 분포하는 광온·광염성 종으로 다양한 먹이를 이용하지만, 특히, 식물플랑크톤의 현존량이 높고 정체된 수역에서 대발생이 일어나는 것으로 알려져 있다(Kang, 2010; Baek et al., 2011; Piontkovski et al., 2021). 중복 분석 결과에서 소형 및 미소식물플랑크톤과 양의 상관성을 나타내 야광충의 대발생(bloom)에 영향을 미치

는 것으로 여겨진다. 겨울철 야광충이 대발생을 보일 때 요각류의 출현이 거의 없었으며, 야광충의 출현이 없었던 봄철과 여름철에는 요각류 개체군 발생이 급격하게 증가하였다. 여자만의 야광충 대발생인 인접한 광양만에서도 확인할 수 있었는데(Kang, 2010), 현미경 관찰 시 야광충의 식포(food vacuole)에서 식물플랑크톤과 요각류이 알이 관찰되었고, 수온이 낮았음에도 불구하고 먹이가 되는 식물플랑크톤 chl.-a 농도와 변이가 높다는 점에서 겨울철 여자만 동물플랑크톤의 군집은 야광충의 발생유무에 따른 식물플랑크톤 현존량과 요각류 알(egg)의 포식압 변화에 의해 조절될 가능성이 높다.

여자만 동물플랑크톤 군집에 우점하였던 주요 분류군들 중 *P. orientalis* (as *P. parvus* s. l.)와 *D. affinis*는 남해 연안과 내만에서 연중 출현하면서(Han et al., 1995; Moon et al., 2006, 2010, 2022a), 멸치를 포함한 소형 부어류와 자치어들의 중요 먹이생물로 이용된다(Kim et al., 2013; Sassa et al., 2021). 그 동안 우리나라와 일본 연안에서 출현하는 *P. parvus*와 *P. indicus*가 분류학적으로 정립되지 않아 두 종간의 분류형질들이 복합적으로 관찰되어 *P. parvus* s. l.로 분류되었지만(Ueda, 1997), 2022년에 형태학적 형질(Ueda et al., 2022)과 미토콘드리아 시토크롬 옥시다제(mtCO1)의 염기서열 분석결과(Hidake et al., 2016)를 근거로 *P. orientalis*라는 신종으로 발표되었다(Ueda et al., 2022). 특히, *P. orientalis*와 *D. affinis*는 내만의 먹이생물 종조성과 현존량은 소형 부어류들의 가입량을 결정하는 성장과 생존에 중요하며(Basilone et al., 2006; Yasue et al., 2010), 산란·성육장(Yoo et al., 2017; Moon et al., 2022b)을 중심으로 분포하기 때문에 소형 부어류들이 내만으로 가입하는 메커니즘을 밝히는데 매우 중요한 정보로 활용될 수 있다. 또한, 여름철인 7월과 8월에 여자만 내에는 26°C의 고수온이 발생하였고, 장마 기간 동안 만내로 유입된 담수의 영향으로 염분이 일시적으로 낮아지면서 *A. ohtsukai*의 출현개체수 변동에 영향을 미치는 것으로 보인다. *A. ohtsukai*는 동해를 제외한 우리나라의 담수가 유입되는 하구역과 내만에 분포하는 광온·광염성 요각류로(Moon et al., 2008), 서식환경이 악화되면 휴면란(resting egg)을 형성하는 종이며(Choi et al., 2021), 하구역과 내만에 걸쳐서 여름철의 동물플랑크톤 군집에 영향을 주는 분류군이다(Moon et al., 2010, 2020, 2022a). 사계절 중에 4월과 5월에는 여자만 북부를 중심으로 출현하다가 8월에는 만 전체로 분포 범위가 확장하는 특징을 보였는데, 이는 여자만 북부에 위치하는 벌교천, 동천, 그리고 이사천 등의 하천으로부터 다량의 담수와 영양염 공급(Yoon and Lee, 2020)에 따라서 염분 저하와 초미소식물플랑크톤 chl.-a 농도가 *A. ohtsukai*의 개체군 증식에 영향을 주는 것으로 여겨진다. 여자만에서 사계절 동안 출현하는 동물플랑크톤 주요 분류군의 군집에 영향을 주는 환경요인들은 RDA로 확인한 결과, 수온, 미소식물플랑크톤, 초미소식물플랑크톤으로 확인되었다. 수온은 *P. orientalis*, *Labidocera rotunda*, 파개비 유생, 소형식물플랑크톤과 미소식물플랑크톤은 야광충,

초미소식물플랑크톤은 *A. ohtsukai*와 양의 상관성을 나타냈다. 내만의 동물플랑크톤 군집은 요각류의 개체군 발생에 따른 유생의 가입 잠재력에 따라서 결정이 되며, 이를 위해서는 먹이생물의 풍도와 질이 중요한 요소로 작용한다(Vargas et al., 2010; Bi and Sommer, 2020), 여자만의 경우, 겨울철에 소형플랑크톤과 미소플랑크톤, 봄철 이후에는 수온이 증가하면서 초미소플랑크톤의 발생이 동물플랑크톤 군집과 유지에 필요한 먹이 환경을 조성해 주고 있다.

본 연구는 2006년에 이후 유사 동물플랑크톤 군집 특성 연구가 수행되지 않았던 여자만을 대상으로 이들의 군집 특성과 환경요인에 대해서 분석하였다. 멸치를 포함한 어류의 초기 생활사 단계의 산란·성육장으로 중요한 해역인 여자만 동물플랑크톤 군집의 계절 변화는 겨울철 야광충, 봄과 가을철까지는 소형 부어류들의 주요 먹이생물인 요각류, 그리고 여름철에는 지각류의 출현 빈도에 의해서 조절되는 특징이었다. 또한, 동물플랑크톤 군집에 기여한 주요 분류군들은 수온, 미소식물플랑크톤, 초미소식물플랑크톤 chl.-a 농도가 영향을 주는 것으로 나타났으며, 반폐쇄적인 해역의 특성과 여름철 장마 기간에 유입되는 담수의 영향은 일시적인 염분 저하와 기수성 요각류의 출현도 군집에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 그러나, 이를 명확히 밝히기 위해서는 조사기간과 해역을 늘리고 크기별 생체량 분석, 그리고 이들의 시·공간적 분포와 군집에 영향을 주는 환경인자에 대한 추가적인 조사와 분석할 필요가 있다.

사 사

이 연구는 2023년 국립수산물과학원(수산과학연구사업 R2023 010)에 의해 수행되었습니다.

References

- Annabi-Trabelsi N, Guermazi W, Leignel V, Al-Enezi Y, Karam Q, Ali M, Ayadi H and Belmonte G. 2022. Effects of eutrophication on plankton abundance and composition in the gulf of Gabès (Mediterranean Sea, Tunisia). *Water* 14, 2230. <https://doi.org/10.3390/w14142230>.
- Baek SH, Kim D, Choi HW and Kim YO. 2013. Hydrographical and bio-ecological characteristics of heterotrophic red tide dinoflagellate *Noctiluca scintillans* in semi-enclosed Gwangyang Bay, Korea. *Korean J Environ Biol* 31, 308-321. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2013.31.4.308>.
- Baek SH, Shin HH, Kim DS and Kim YO. 2011. Relationship between distributional characteristics of heterotrophic dinoflagellate *Noctiluca scintillans* and environmental factors in Gwangyang Bay and Jinhae Bay. *Korean J Environ Biol* 29, 81-91.
- Basilone G, Guisande C, Partti B, Mazzola S, Cuttitta A, Bonanno A, Vergara AR and Maneiro I. 2006. Effect of habitat conditions on reproduction of the European anchovy (*Engraulis encrasicolus*) in the Strait of Sicily. *Fish Oceanogr* 15, 271-280. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2419.2005.00391.x>.
- Beaugrand G, Reid PC, Ibañez F, Lindley JA and Edwards M. 2003. Reorganization of North Atlantic marine copepod biodiversity and climate. *Science* 296, 1692-1694. <https://doi.org/10.1126/science.1071329>.
- Bedford J, Johns D, Greenstreet S and McQuatters-Gollop A. 2018. Plankton as prevailing conditions: A surveillance role for plankton indicators within the Marine Strategy Framework Directive. *Mar Policy* 89, 109-115. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2017.12.021>.
- Bedikoğlu D, Yilmaz IN and Demirel N. 2022. Reproductive strategies and population characteristics of key Cladoceran species in the Sea of Marmara. *Reg Stud Mar Sci* 54, 102450. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2022.102450>.
- Bi R and Sommer U. 2020. Food quantity and quality interactions at phytoplankton-zooplankton interface: Chemical and reproductive responses in a calanoid copepods. *Fornt Mar Sci* 7, 274. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00274>.
- Boxshall GA and Halsey SH. 2004. *An Introduction to Copepod Diversity*. The Ray Society Press, London, U.K., 966.
- Brodeur RD, Auth TD and Phillips AJ. 2019. Major shifts in pelagic micronekton and macrozooplankton community structure in an upwelling ecosystem related to an unprecedented marine heatwave. *Front Mar Sci* 6, 212. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00212>.
- Bruggeman J and Kooijman SA. 2007. A biodiversity-inspired approach to aquatic ecosystem modeling. *Limnol Oceanogr* 52, 1533-1544. <https://doi.org/10.4319/lo.2007.52.4.1533>.
- Chihara M and Murano M. 1997. *An Illustrated Guide to Marine Plankton in Japan*. Tokai University Press, Tokyo, Japan, 1574.
- Choi JM, Lee YG and Woo HJ. 2005. Seasonal and spatial variations of tidal flat sediments in Yeolja Bay, south coast of Korea. *J Korean Earth Sci Soc* 26, 253-267.
- Choi SY, Lee EH, Soh HY and Jang MC. 2021. Effect of temperature and salinity on egg production, hatching, and mortality rates in *Acartia ohtsukai* (Copepoda, Calanoida). *Front Mar Sci* 8, 704479. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.704479>.
- Clarke KR and Gorley RN. 2014. *Change in Marine Communities: An Approach to Statistical Analysis and Interpretation*, 3rd ed. Primer-E Ltd., Plymouth, U.K.
- Dvoretzky V and Dvoretzky AG. 2014. The biodiversity of zooplankton communities of the west arctic seas. *Russian J Mar Biol* 40, 95-99. <https://doi.org/10.1134/S1063074014020035>.
- Fischer JM, Frost TM and Ives AR. 2001. Compensatory dynamics in zooplankton community responses to acidification: Measurement and mechanisms. *Ecol Appl* 11, 1060-1072. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2001\)011\[1060:CDIZCR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2001)011[1060:CDIZCR]2.0.CO;2).
- Fork H and Greve W. 2002. Analysis and interpretation of re-

- current spatio-temporal patterns in zooplankton dynamics: A case study on *Noctiluca scintillans* (Dinophyceae) in the German Bight (North Sea). *Mar Biol* 140, 59-73. <https://doi.org/10.1007/s002270100685>.
- Griffith GP, Hop H, Vihtakari M, Wold A, Kalhagen K and Gabrielsen GW. 2019. Ecological resilience of Arctic marine food webs to climate change. *Nat Clim Change* 9, 868-872. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0601-y>.
- Han DH, Hong SY and Ma CW. 1995. Distribution of Zooplankton in Deukryang Bay, Korea. *J Korean Fish Soc* 28, 517-532.
- Hidaka K, Itoh H, Hirai J and Tsuda A. 2016. Occurrence of the *Paracalanus parvus* species complex in offshore waters south of Japan and their genetic and morphological identification to species. *Plankton Benthos Res* 11, 131-143. <https://doi.org/10.3800/pbr.11.131>.
- Huang C and Qi Y. 1997. The abundance cycle and influence factors on red tide phenomena of *Noctiluca scintillans* (Dinophyceae) in Dapeng Bay, the South China Sea. *J Plankton Res* 19, 303-318. <https://doi.org/10.1093/plankt/19.3.303>.
- Huntly M and Boyd C. 1984. Food limited growth of marine zooplankton. *Am Nat* 124, 455-478.
- Kang JH. 2010. Distributional characteristics and carrying capacity of the potentially risky species *Noctiluca scintillans* at international Korea seaports. *Ocean Pol Res* 32, 449-462. <https://doi.org/10.4217/OPR.2010.32.4.449>.
- Kang JH. 2020. Observation of item fed by *Noctiluca scintillans* around Dokdo in spring. *The Sea J Korean Soc Oceanog* 25, 160-172. <https://doi.org/10.7850/jkso.2020.25.4.160>.
- Kim JK, Ryu JH, Kim JB, Lee WC, Kim HC, Moon SY and Kim HY. 2015. Growth of young sea bass *Lateolabrax japonicus* in the eelgrass beds of Gamak and Yeolja Bays in relation to environmental variables. *Korean J Fish Aquat Sci* 48, 920-928. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2015.0920>.
- Kim MJ, Youn SH, Kim JY and Oh CW. 2013. Feeding characteristics of the Japanese anchovy, *Engraulis japonicus* according to the distribution of zooplankton in the coastal waters of southern Korea. *Korean J Environ Biol* 31, 275-287. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2013.31.4.275>.
- Kodama T, Ohshimo S, Tanaka H, Ashida H, Kameda T, Tanabe T, Okazaki M, Ono T and Tanaka Y. 2021. Abundance and habits of marine cladocerans in the Sea of Japan over two decades. *Prog Oceanog* 194, 102561. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102561>.
- Lee MO, Kim JK and Kim BK. 2020. Marine environmental characteristics of Yeolja Bay, Korea, A review on a basis of previous studies. *J Korean Soc Mar Environ Energy* 23, 233-245. <https://doi.org/10.7846/JKOSMEE.2020.23.4.233>.
- Mack HR, Conroy JD, Blockson KA, Stein RA and Ludsin SA. 2012. A comparative analysis of zooplankton field collection and sample enumeration methods. *Limnol Oceanog Meth* 10, 41-53. <https://doi.org/10.4319/lom.2012.10.41>.
- Marcus N. 2004. An overview of the impacts of eutrophication and chemical pollutants on copepods of the coastal zone. *Zool Stud* 43, 211-217.
- Moon SY, Kim HY and Oh HJ. 2020. Seasonal variation of the zooplankton community of Gamak Bay, Korea. *Korean J Environ Biol* 38, 231-247. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2020.38.2.231>.
- Moon SY, Lee MH, Jung KM, Kim H and Jung JH. 2022a. Spatial and temporal distribution and characteristics of zooplankton communities in the southern coast of Korea from spring to summer period. *Korean J Fish Aquat Sci* 55, 154-170. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2022.0154>.
- Moon SY, Lee MH, Jung KM, Kim H and Jung JH. 2022b. Spatial and temporal distribution of fish larvae in the southern coast of Korea from spring to summer. *Korean J Fish Aquat Sci* 55, 461-477. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2022.0461>.
- Moon SY, Oh HJ and Soh HY. 2010. Seasonal variation of zooplankton communities in the southern coastal waters of Korea. *Ocean Pol Res* 32, 411-426. <https://doi.org/10.4217/OPR.2010.32.4.411>.
- Moon SY, Ohtsuka S, Ueda H and Soh HY. 2008. *Acartia* (*Odontacartia*) *ohtsukai* Ueda and Bucklin, 2006 (Copepoda, Calanoida, Acartiidae): first record of its occurrence in Korean waters and habitat segregation from its sibling species *A. pacifica* Steuer, 1915. *Zootaxa* 1841, 61-64. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.1841.1.5>.
- Moon SY, Yoon HS, Soh HY and Choi SD. 2006. Environmental factors and variation characteristics of zooplankton communities in Gamak Bay. *Ocean Polar Res* 28, 79-94. <https://doi.org/10.4217/OPR.2006.28.2.079>.
- Park JH. 2012. Cnidaria: Hydrozoa: Hydromedusae. Thecates. In: *Invertebrate Fauna of Korea*. Vol. 4, No. 3. Flora and fauna of Korea. National Institute of Biological Resources, Incheon, Korea, 1-77.
- Parsons TR, Y Maita and GM Lalli. 1984. *A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis*. Pergamon Press, Oxford, U.K., 173.
- Piontkovski SA, Serikova IM, Evstigneev VP, Prusove IY, Zagorodnaya YA, Al-Hashmi KA and Al-Abri NM. 2021. Seasonal blooms of the dinoflagellate algae *Noctiluca scintillans*: Regional and global scale aspects. *Reg Stud Mar Sci* 44, 101771. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101771>.
- Purcell JE, Milisenda G, Rizzo A, Steven AC, Serena Z, Sabina A, Giacomo Z, Letterio G, Ferdinando B, Thomas KD and Stefano P. 2015. Digestion and predation rates of zooplankton by the pleustonic hydrozoan *Velella velella* and widespread blooms in 2013 and 2014. *J Plankton Res* 37, 1056-1067. <https://doi.org/10.1093/plankt/xfbv031>.
- 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 JH, Kim JB and Kim JK. 2011. Temporal and spatial varia-

- tion in fish larvae in Gamak Bay and Yeosu Bay, South Sea of Korea. *Fish Aqua Sci* 14, 55-61. <https://doi.org/10.5657/fas.2011.14.1.055>.
- Sassa C, Kitajima S and Takahashi M. 2021. Interannual variations in diet of Japanese jack mackerel (*Trachurus japonicus*) juveniles in the southwestern Sea of Japan in relation to recent growth rate. *Fish Oceanogr* 30, 772-786. <https://doi.org/10.1111/fog.12558>.
- Salvador B and Bersano JGF. 2017. Zooplankton variability in the subtropical estuarine system of Paranaguá Bay, Brazil, in 2012 and 2013. *Estuar Coast Shelf Sci* 199, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.09.019>.
- Shannon CE and Weaver W. 1963. The mathematical theory of communication. *Bell Sys Tech J* 27, 379-423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>.
- Siokou-Frangou I, Papanastasiou E, Lepretre A and Frontier S. 1998. Zooplankton assemblages and influence of environmental parameters on them in a Mediterranean coastal area. *J Plankton Res* 20, 847-870. <https://doi.org/10.1093/plankt/20.5.847>.
- Sun S, Huo Y and Yang B. 2010. Zooplankton functional groups on the continental shelf of the yellow sea. *Deep Sea Res Part II Top Stud Oceanogr* 57, 1006-1016. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2010.02.002>.
- Sun X, Sun X, Zhu L, Li Z and Sun S. 2020. Seasonal and spatial variation in abundance of the copepod *Calanus sinicus*: Effects of decreasing dissolved oxygen and small jellyfish bloom in northern Yellow Sea, China, nearshore waters. *Mar Poll Bull* 161, 111653. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111653>.
- Tseng LC, Dahms HU, Hung JJ, Chen QC and Hwang JS. 2011. Can different mesh size affect the results of copepod community studies?. *J Exp Mar Biol Ecol* 398, 47-55. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2010.12.007>.
- Turner JT, Hopcroft RR, Lincoln JA, Huestis CS, Tester PA and Roff J. 2008. Zooplankton feeding ecology: Grazing by marine copepods and cladocerans upon phytoplankton and cyanobacteria from Kingston Harbour, Jamaica. *Mar Ecol* 19, 195-208. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0485.1998.tb00462.x>.
- Ueda H. 1997. Family Paracalanidae. In: *An Illustrated Guide to Marine Plankton in Japan*. Chihara M and Murano M, eds. Tokai University Press, Tokyo, Japan, 844-851.
- Ueda H, Itho H, Hirai J and Hidaka. 2022. *Paracalanus orientalis* n. sp. (Copepoda, Calanoida), formerly referred to as *P. parvus* in Japanese coastal waters. *Plankton Benthos Res* 17, 221-230. <https://doi.org/10.3800/pbr.17.221>.
- Vargas CA, Martínez RA, Escribano R and Lagos NA. 2010. Seasonal relative influence of food quantity, quality, and feeding behavior on zooplankton growth regulation in coastal food webs. *J Mar Biol Assoc U K* 90, 1189-1201. <https://doi.org/10.1017/S0025315409990804>.
- Wang W, Sun S, Sun X, Zhang G and Zhang F. 2020. Spatial patterns of zooplankton size structure in relation to environmental factors in Jiaozhou Bay, South Yellow Sea. *Mar Poll Bull* 150, 110698. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110698>.
- WoRMS (World Register of Marine Species). 2022. Copepoda. Retrieved from <http://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=1080> on Dec 20, 2022.
- Yasue N, Doiuchi R, Yoshimoto and Takaeuchi T. 2010. Diet of late larval Japanese anchovy *Engraulis japonicus* in the Kii Channel, Japan. *Fish Sci* 76, 63-73. <https://doi.org/10.1007/s12562-009-0181-2>.
- Yebra L, Espejo E, Putzeys S, Giráldez A, Gómez-Jakobsen F, León P, Salles S, Torres P and Mercado JM. 2020. Zooplankton biomass depletion event reveals the importance of small pelagic fish top-down control in the Western Mediterranean coastal waters. *Front Mar Sci* 7, 608690. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.608690>.
- Yoo JT, Kim YH, Lee SH and Kim JK. 2017. Community structure of larval fish assemblage in the coastal waters of south-central Korea during spring and summer. *Korean J Ichthyol* 29, 80-86.
- Yoon YH and Lee HJ. 2020. A characteristics of marine environments in a blood cockle farms of the northwestern Yeosu Bay, Korea 2. Spatio-temporal distribution of water quality and phytoplankton community. *J Korean Acad-Indust Coop Soc* 21, 579-592. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.8.579>.
- Zhang K, Jiang F, Chen H, Dibar DT, Wu Q and Zhou Z. 2019. Temporal and spatial variations in zooplankton communities in relation to environmental factors in four floodplain lakes located in the middle reach of the Yangtze River, China. *Environ Pollut* 251, 277-284. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.139>.
- Zhang S, Harrison PJ, Song S, Chen M, Kung HS, Lau WK, Guo C, Wu C, Xu J and Liu H. 2017. Population dynamics of *Noctiluca scintillans* during a bloom in a semi-enclosed bay in Hong Kong. *Mar Pollut Bull* 121, 238-248. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.025>.