

여름 남해 서부 해역에 출현하는 수표성 동물플랑크톤에 미치는 환경요인

최장한, 김대진^{1,*,\dagger}, 서호영^{2,*,\dagger}

전남대학교 환경해양학과, ¹전남대학교 선박실습센터, ²전남대학교 해양융합학과

Environmental factors affecting neustonic zooplankton in the southwestern area of Korea in summer

Jang Han Choi, Dae-Jin Kim^{1,*,\dagger} and Ho Young Soh^{2,*,\dagger}

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

¹Training Ship Administrative Center, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea

²Department of Ocean Integrated Science, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea

*Corresponding author

Ho Young Soh

Tel. 061-659-7147

E-mail. hysoh@jnu.ac.kr

Dae-Jin Kim

Tel. 061-659-7116

E-mail. djkim@jnu.ac.kr

^{\dagger}These authors contributed equally to this work as co-corresponding authors.

Received: 29 June 2020

Revised: 16 September 2020

Revision accepted: 16 September 2020

Abstract: This study was conducted in the southwestern area of Korea using a neuston net in September (14 stations) 2017 to understand the environmental factors affecting neustonic zooplankton. Temperature, salinity, chlorophyll *a* concentration, suspended solids, and microplastics were included as environmental factors. Based on the density of the copepods, the study area was divided into three regions: the Seomjin River water influence area, the frontal mixing area, and the warm water affected area (Jeju warm current and Tsushima warm current). In the latter two areas, the major species were *Pontella chierchiae*, *Canthocalanus pauper*, and *Oncaea* spp. Also, neustonic zooplankton showed a significant relationship between the density of phytoplankton and microplastics in the frontal mixing area, and temperature and suspended solids in the warm water affected area, respectively ($p < 0.05$). This indicates that microplastics can affect the offshore zooplankton community.

Keywords: neuston, environmental factors, microplastics, feeding habits, East China Sea

서 론

수표 환경은 지속적으로 강한 자외선에 노출될 뿐만 아니라, 파랑 작용, 급격한 수온 및 염분 변화, 계절적 해류 변동, 상위 포식자 위협 등의 영향에 상시 노출되어 있어 부유 생물에게는 극한적인 환경일 수 있다(Holdway and Maddock 1983; Davenport and Rees 1993). 특히, 수표층에서의 자외선 노출은 식물플랑크톤의 생산력 감소(Ha

et al. 2010), 동물플랑크톤과 자치어의 사망률 증가(Lima and Chretiennot-Dinet 1984; Zagarese et al. 1994; Leech and Williamson 2000), 요각류의 대사량 증가 및 형태적 변형(Marshall et al. 1935; Zagarese et al. 1994; Leech and Williamson 2000) 등을 유발하는 것으로 알려져 있다. 이러한 부정적인 영향에도 불구하고, 수표층은 식물플랑크톤, 동물플랑크톤 및 유기 쇄설물 등 먹이 자원이 풍부하기 때문에, 치어류 혹은 크릴류와 같은 대형 부유 생물 등의 중요한

서식처로 여겨져 왔다 (Zaitsev 1971; Kingsford and Choat 1986; Brodeur 1989). 또한, 수표성 동물플랑크톤은 수괴 특성, 해류 변화 등과 같은 해양환경변화를 반영하기 때문에 오래전부터 해양환경지시자로 이용되어 왔다 (Holdway and Maddock 1983; Padmavati and Goswami 1996).

한편 최근의 플라스틱 사용량의 증가와 함께 다양한 경로로 해양에 유입된 큰 플라스틱은 태양의 자외선, 파도, 바람 또는 플라스틱 자체의 화학 작용에 의해 5 mm 보다 작은 크기의 미세플라스틱으로 잘게 부서진다. 특히, 흠집이나 틈이 있는 1 mm 이하의 플라스틱 조각은 빠르게 부서지는 것으로 알려져 있다 (Cózar *et al.* 2014). 작게 부서진 플라스틱은 해양생태계 먹이망에서 일차생산자인 식물플랑크톤을 섭식하고 상위 포식자들에게 영양을 전달하는 동물플랑크톤에 부정적인 영향을 미친다. 동물플랑크톤이 먹이 생물로 오인하여 섭식한 경우, 장에 축적되거나 배설물 (fecal pellet)로 배출되며, 이후 다른 상위 포식자에 의해 섭취된다 (Turner 1984, 2015; Cole *et al.* 2016). 또한 낮은 영양 단계에서 섭취된 미세플라스틱은 먹이사슬을 타고 올라가 높은 영양 단계의 생물에게 농축되어 결국 인류에게까지 위협이 될 수 있다 (Li *et al.* 2015).

본 연구 지역인 남해 서부 해역은 여수와 제주도 사이의 수심 200 m 미만의 대륙붕이 넓게 발달한 지역으로 다양한 수괴가 영향을 미치고 있다. 가장 큰 영향을 미치는 쓰시마난류 (Tsushima warm current)는 북태평양의 서부를 따라 북상하는 쿠로시오 해류에서 분지되어 제주도 동쪽과 대한 해협을 경유해 동해로 빠져나간다. 계절적으로 여름에는 동중국해에서 중국 연안을 따라 남하하는 중국 연안수 (Chinese coastal water)와 제주난류 (Jeju warm current)가 혼합되어 제주 해협을 통과한다 (Lie and Cho 2016). 또한, 양쯔강 희석수 (Yangtze diluted water)가 유입되면, 남해에 뚜렷한 성층 작용이 발생하여 저염화 현상 및 염분 전선이 형성되기도 하며 (Cho and Kim 1994), 겨울에는 북서풍에 의해 남해 연안수가 외해로 확장되면서 제주난류와의 사이에 수온 전선을 형성한다 (Na *et al.* 1990). 이처럼 특성이 다른 각 수괴 간에 형성된 전선의 생성, 이동, 소멸은 수괴의 시간적 및 공간적 변동을 유도하며 (Jang *et al.* 2012), 이동이 제한적인 동물플랑크톤 분류군의 종 조성 및 개체수에 영향을 미쳐 분포 양상을 변화시키는 주요인으로 작용한다 (Smith and Vidal 1986; Park *et al.* 1998).

본 연구는 다양한 수괴가 존재하는 한국 남해 서부 해역에 출현한 1. 수표성 동물플랑크톤의 출현 양상과 2. 부유

플라스틱의 현존량 파악, 3. 수표성 동물플랑크톤 분포에 미치는 환경요인을 살펴보고자 하였다. 환경요인으로는 수온과 염분, chlorophyll *a* 농도, 식물플랑크톤 밀도 등 기존 요소 이외에 최근 해양환경 오염문제로 부각되고 있는 부유플라스틱의 출현 현황에 대해서도 조사하였다.

재료 및 방법

1. 환경요인

우리나라 남해 서부 해역에서 수행된 현장조사는 주변 해류의 특성 (Lie and Cho 2016)을 고려하여 9월 19~21일

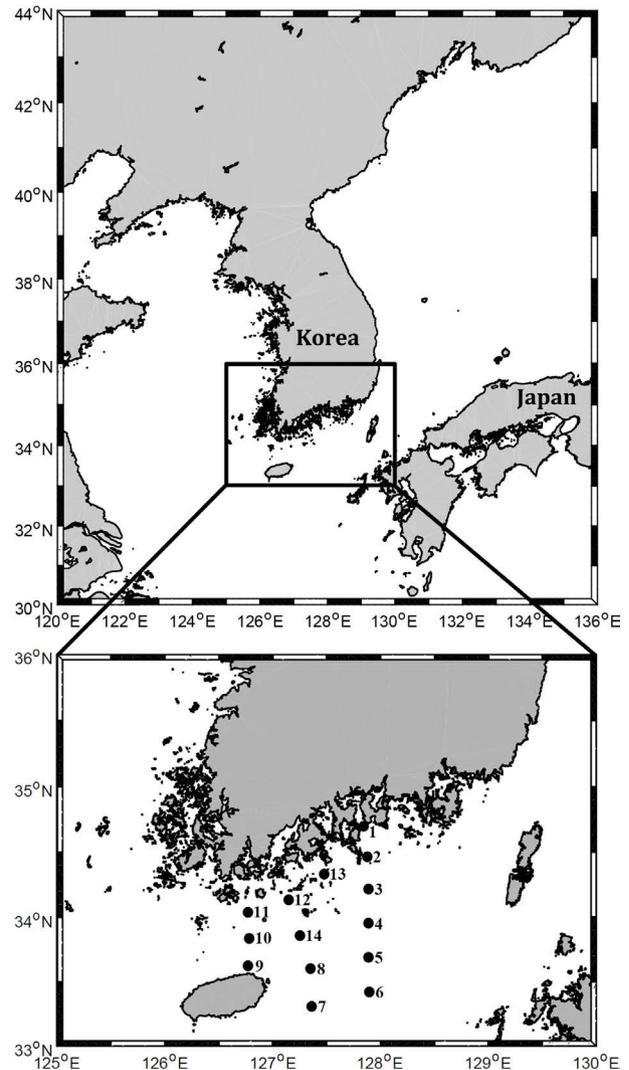


Fig. 1. Map showing the sampling stations in the southwestern area of Korea (Stations 1-14, September 2017).

까지 14개 정점에서 3일간 연속적으로 수행하였다 (Fig. 1). 조사 해역의 수온과 염분은 수온, 염분, 수심 연속측정 장비 (CastAway-CTD, Sontek, USA)를 사용하여 측정하였다. 부유 물질 (Suspended solids; SS)은 측정에 앞서 실험실에서 GF/F 여과지를 증류수로 세척한 후, 건조기 (KS/VS-1202D4N, Vision scientific Co., Korea)를 이용해 60°C에서 24시간 건조하였다. 건조된 여과지는 정밀 저울 (CP-225D, Sartorius, Germany)로 건조량을 측정된 뒤, 페트리 디쉬에 밀봉하여 다음 단계를 준비하였다. 현장에서 표층 30 cm 이내 500 mL의 해수를 채수하여 준비된 GF/F 여과지로 여과하고 냉동 (-20°C)하여 실험실로 운반한 뒤, 건조기 (110°C)에서 2시간 건조하고 부유 물질의 건조량을 측정하였다. Chlorophyll *a* 농도 (Chl-*a*) 측정은 현장에서 채수 (표층 30 cm 이내)된 해수 500 mL를 0.2 µm 막막여과지 (Membrane filter, Advantec, Japan)로 여과, 15 mL tube에 넣어 냉동보관 (-20°C)하였다. 실험실에서 90% (v/v) 아세톤 10 mL를 주입하여 24시간 냉암소에서 색소를 추출한 후에 3200 rpm에서 12분간 원심 분리시켜 상등액을 취해 형광 광도계 (Optizen 2120UV, Mecasys Co., Korea)를 사용하여 측정하였다 (SCOR-UNESCO 1966). 식물플랑크톤 채집은 채수된 해수 500 mL를 루골 용액 (Lugol solution)으로 최종 농도 2%가 되도록 고정하였고, 알루미늄 호일로 차광 보관하였다. 운반 후, 자유 낙하방법으로 최종 농도 10 mL가 되도록 농축한 후, 시료 0.1 mL를 마이크로피펫으로 Sedwick-Rafter 챔버에 취해 고배율 광학현미경 (ECLIPSE

80i, Nikon, Japan)을 이용하여 200~400 X 하에서 돌말류와 와편모조류의 출현 세포수 (cells mL⁻¹)에 의한 현존량을 파악하였다 (Chihara and Murano 1997).

수표층의 부유플라스틱과 동물플랑크톤 채집을 위한 선미 채집 방식은 선박 추진 장치인 스크류 프로펠러에서 발생하는 충격파에 의하여 동물플랑크톤의 회피 현상으로 종 구성과 생물량 변동을 유발할 수 있다 (Sohn *et al.* 2010). 이러한 단점을 보완하기 위해 선박 측면에서 뱃머리에 의해 형성된 파의 영향을 받지 않도록 뉴스톤 네트 (David-Hempel neuston net, model 300, Hydro-Bios Co., Germany; 망목 300 µm)를 멀리 설치하여 20분간 평균 2.5 knots의 속도로 수평 채집하였다 (Fig. 2). 정량 분석을 위해 유량계 (model 438-115, Hydro-Bios Co., Germany)를 뉴스톤 네트 입구에 설치하여 여과 해수량을 측정하였다. 채집된 시료는 선상에서 해수를 제거한 후 99.5% 에틸 알코올로 고정하여 실험실로 운반하였다. 표면에 부유하는 미세플라스틱은 복족류, 십각류 유생 등 생물이 부착하게 되면 밀도가 증가하여 저층에 가라앉으므로 표층에 떠있는 플라스틱만을 계수하는 자유낙하방법은 적절하지 않을 수 있다 (Collignon *et al.* 2012). 따라서, 분할 없이 광학현미경 (SMZ645, Nikon, Japan) 하에서 크기에 따라 부유플라스틱을 미세플라스틱 (microplastic: 0.3~5.0 mm)과 중형플라스틱 (mesoplastic: 5.0 mm 초과)으로 분리, 선별하고 페트리 디쉬에 보관하였다. 증류수와 GF/F 여과지를 사용하여 여과, 건조기 (60°C)에서 24시간 건조하고 정밀 저울로

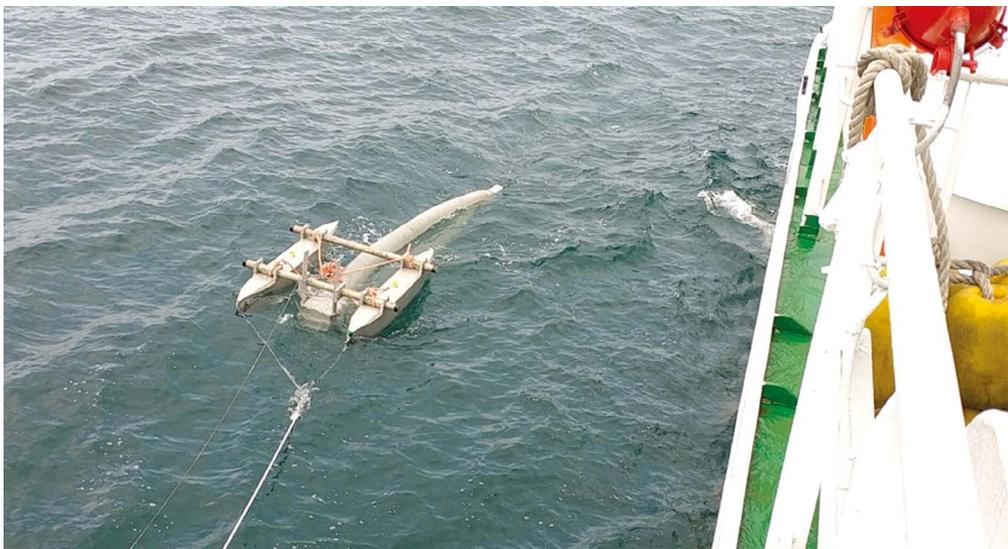


Fig. 2. Sampling equipment: David-Hempel neuston net towed from the side of the research vessel.

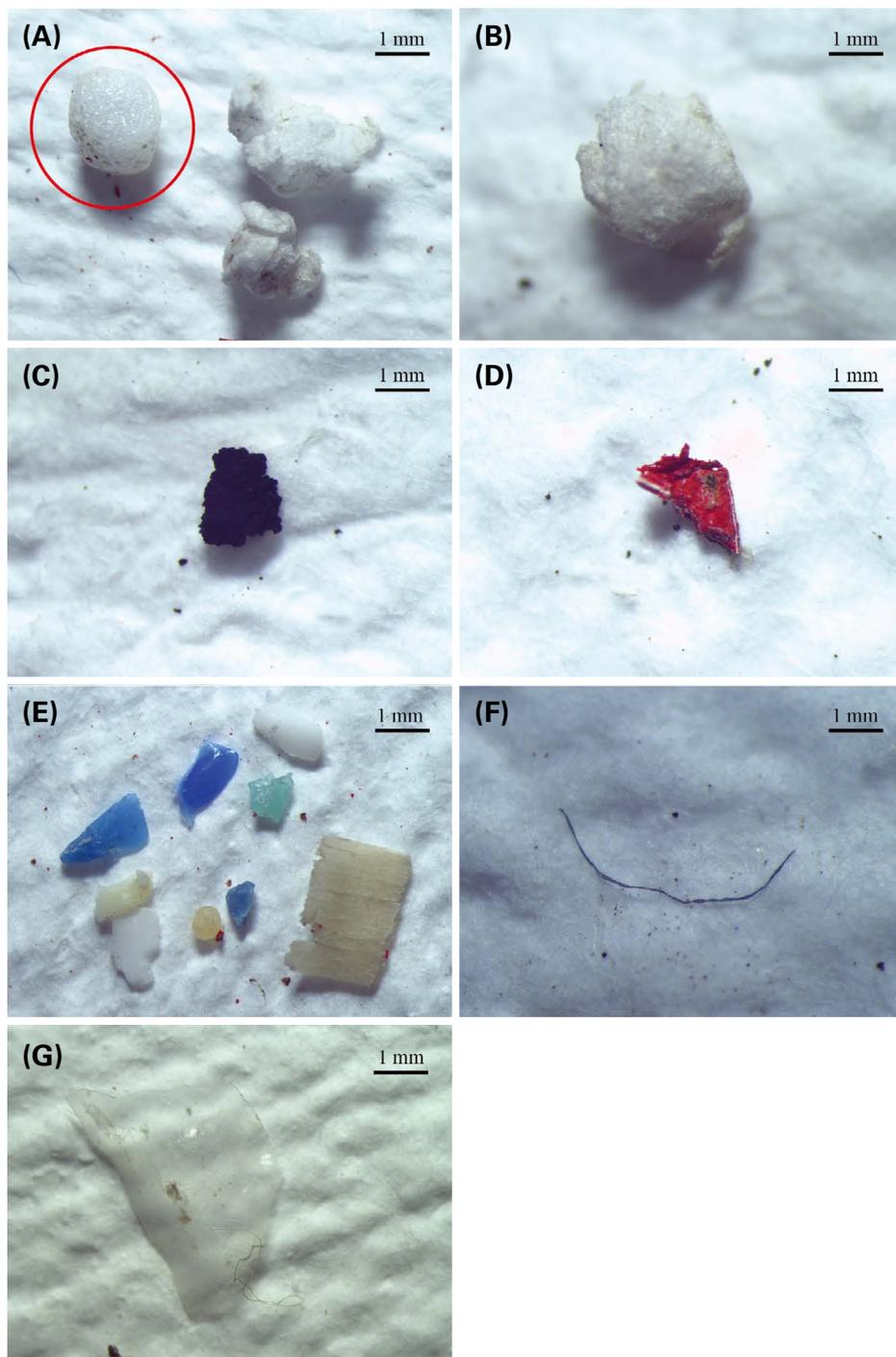


Fig. 3. Floating plastics appeared in the study area: (A) styrofoam sphere, (B) styrofoam fragment, (C), (D) Paint particles, (E) hard plastics, (F) fiber, and (G) film.

건중량을 측정하였다. 측정 후, 광학현미경으로 여과지 위 부유플라스틱을 섬유 조각 (fiber), 필름 (film), 하드 플라스틱 (hard plastic), 페인트 조각 (paint particle), 스티로폼 파

편 (styrofoam fragment), 구형 스티로폼 (styrofoam sphere), 기타 (others)로 구분, 계수하였다 (Fig. 3). 부유플라스틱의 사진 촬영 및 길이 측정은 광학현미경 (SMZ745T, Nikon,

Japan)과 아이솔루션 프로그램(version Lite, IMT i-Solution Inc., Canada)을 이용하였다. 부유플라스틱 계수는 공기 중의 플라스틱 유입 방지를 위해 흙 후드(CLD-101-05, CHCLAB Co., Korea) 내에서 실시하였다.

2. 동물플랑크톤

흙 후드에서 부유플라스틱 시료 처리 후, 광학현미경을 이용하여 수표성 동물플랑크톤의 종 동정과 출현 개체수를 파악하였다. 종 동정을 위해 세밀한 관찰이 필요한 경우, 형태 동정에 필요한 부속지를 70% 락토페놀(Lactophenol solution)을 떨어뜨린 슬라이드 글라스 위에서 해부한 후, 고배율 광학현미경(ECLIPSE E200, Nikon, Japan)으로 형태를 관찰 종을 특정하였다. 계수된 출현 개체수는 단위 체적

당 출현 개체수(ind. m⁻³)로 환산하였다.

3. 자료 분석

PRIMER 프로그램(PRIMER-E version 6.1.6, New Zealand)으로 환산된 동물플랑크톤 출현 개체수를 로그(log(x+1)) 지수로 변환하였고, Bray-Curtis 유사도 지수를 근거로 집괴 분석(Clarke and Gorley 2006)과 SIMPER(Bray and Curtis 1957) 분석을 실시하였다. 동물플랑크톤과 환경요인 간의 상관 관계를 설명하기 위해 중복 분석(Redundancy analysis)과 피어슨 상관 분석(Pearson's correlation analysis)을 R packages version 3.6.1 vegan를 이용하여 실시하였다(Oksanen *et al.* 2014).

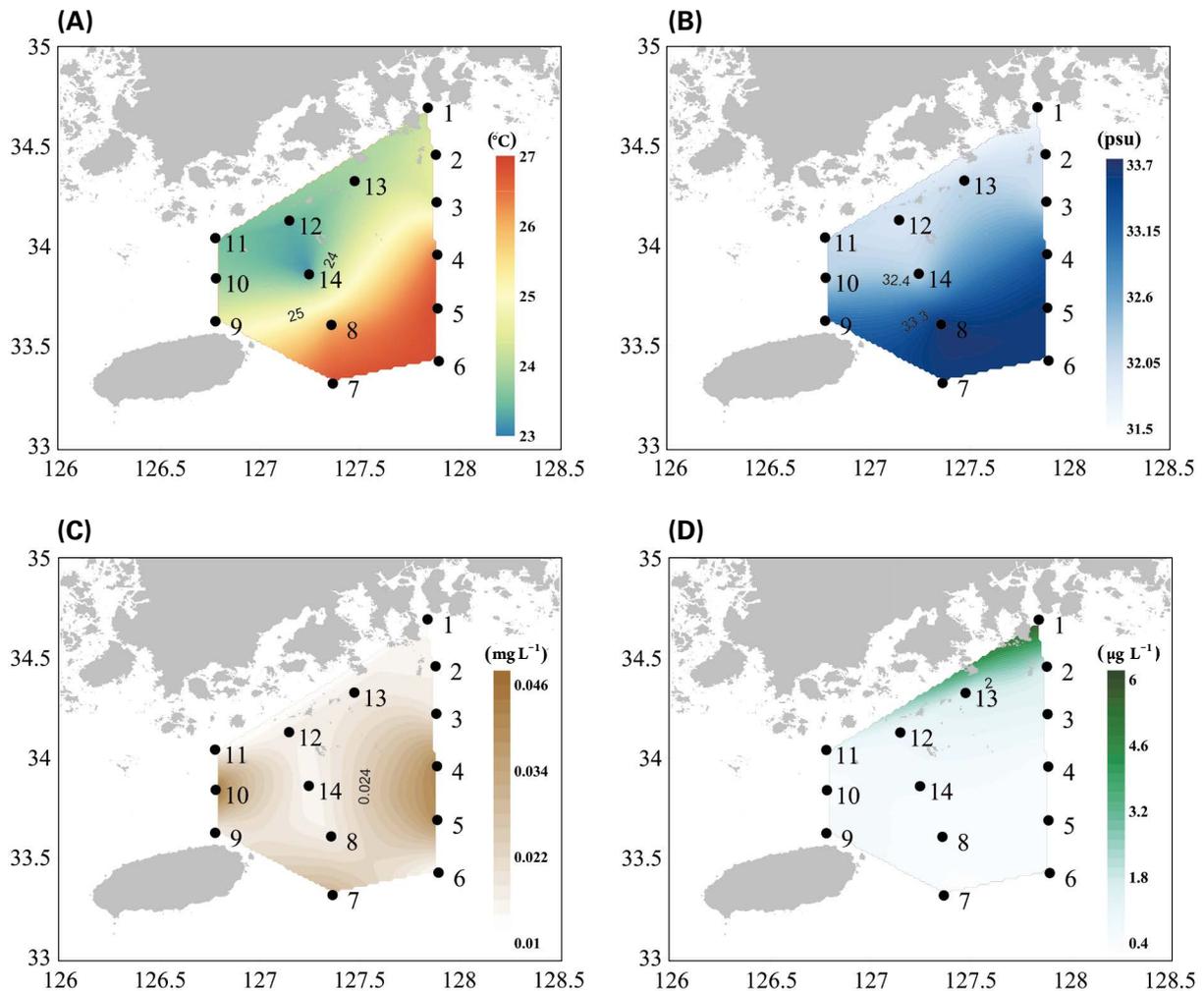


Fig. 4. Environmental factors in the sampling stations in September, 2017. (A) water temperature, (B) salinity, (C) suspended solids, and (D) chlorophyll *a* concentration.

Table 1. Density of phytoplankton (diatoms and dinoflagellates) at the sampling stations in September, 2017

| Stations | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|---------------------------------|-------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Diatoms | 173.5 | 15.1 | 11.5 | 0.3 | 1.1 | 0.3 | 0.6 | 2.4 | 1.3 | 1.0 | 2.2 | 1.3 | 2.2 | 0.9 |
| Dinoflagellates | 1.5 | 1.8 | 3.9 | 0.1 | 0.1 | 0.3 | 0.5 | 0.5 | 0.4 | 0.4 | 0.6 | 0.6 | 0.3 | 0.9 |
| Total (cells mL ⁻¹) | 175.0 | 16.9 | 15.4 | 0.4 | 1.2 | 0.6 | 1.1 | 2.9 | 1.7 | 1.4 | 2.8 | 1.9 | 2.5 | 1.8 |

결 과

1. 수온, 염분, 부유 물질 농도, Chl-a 농도, 식물플랑크톤 밀도

표층 수온과 염분은 각각 23.2~26.9°C와 31.50~33.69의 범위로 나타났다(Fig. 4A, B). 제주도 동쪽과 외해역(Sts. 4~8)에서 평균 26.7°C로 높게 나타난 반면, 나머지 정점에서는 평균 23.9°C로 남해 연안 인접 해역 및 거문도 주변 해역에서 낮게 나타났다. 표층 염분은 제주도 인근 해역(St. 9), 제주도 동쪽 및 외해역(Sts. 4~8)에서 평균 33.51로 나타났고 남해 연안 해역(Sts. 1~3, 10~13)과 거문도 남쪽 해역(St. 14)에서 평균 32.04로 1.47의 차이를 보였다. 부유 물질은 2.85~12.10 mg L⁻¹의 범위로 제주 해협의 St. 10에서 가장 높았고 보길도 인근 해역(St. 11)에서 가장 낮았다(Fig. 4C). Chl-a 농도는 0.38~6.19 µg L⁻¹의 범위로 여수 해만(St. 1)에서 6 µg L⁻¹ 이상으로 매우 높은 농도를 보였으며(Fig. 4D), 그 외 정점에서는 평균 1.11 µg L⁻¹로 낮았다. 식물플랑크톤 중 돌말류의 밀도는 0.3~173.5 cells mL⁻¹의 범위로 나타났고, 와편모조류 밀도는 0.1~3.9 cells mL⁻¹의 범위로 나타났다(Table 1). 돌말류 밀도는 여수를 중심으로 높게 나타났으며, 외해역으로 갈수록 감소하는 양상을 보였다.

2. 부유플라스틱 분포 및 구성

부유플라스틱 전체 입자수는 0.043~0.736 particle m⁻³의 범위로 금오도 남쪽 해역(St. 3)에서 가장 높았고 거문도 북쪽 해역(St. 12)에서 가장 낮았다(Fig. 5). 미세플라스틱 건중량은 제주도 동쪽 외해역(St. 6)에서 0.034 mg m⁻³로 가장 높았고 남해 연안 해역(Sts. 12, 13)과 거문도 남쪽 해역(St. 14)에서 평균 0.0003 mg m⁻³로 가장 낮았다. 중형플라스틱의 건중량은 제주도 인근 해역(St. 9)에서 0.287 mg m⁻³로 가장 높았으며, 외나로도 인근 해역(St. 13)에서 0.0002 mg m⁻³로 가장 낮았다. 부유플라스틱의 구성은 Fig. 6과 같

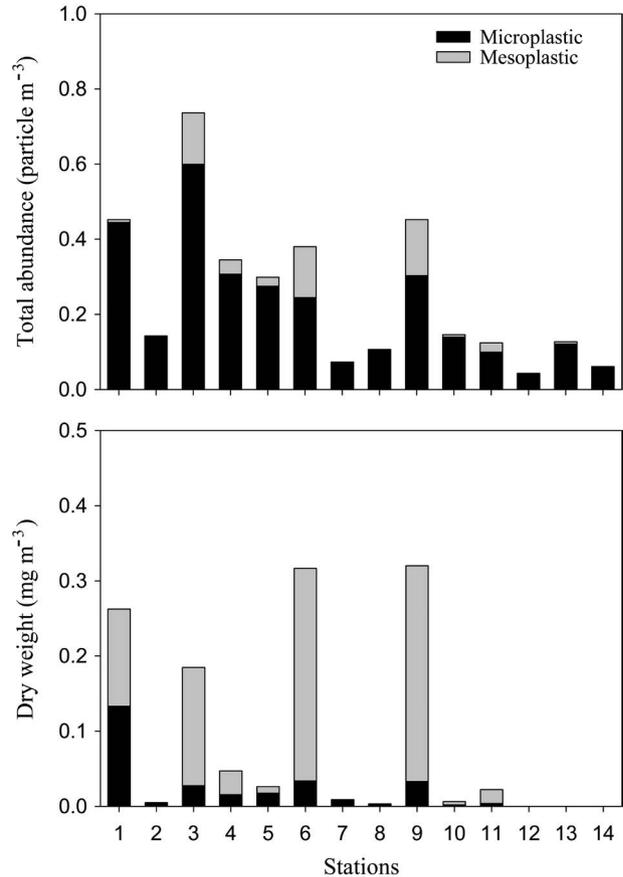


Fig. 5. Total abundance and dry weight of micro- and meso-plastic at the sampling stations in September 2017.

이 나타났다. 전 해역에서 섬유 조각이 분포하였으며, 일부 해역을 제외한 정점에서 미세플라스틱 크기의 페인트 조각과 스티로폼 파편이 나타났다. 중형플라스틱의 경우, 제주도(St. 9)와 보길도 인근 해역(St. 11), 금오도 남쪽 해역에서 제주도 동쪽 외해역(Sts. 3~6)까지 스티로폼 파편과 구형 스티로폼이 50% 이상 차지하였다.

3. 동물플랑크톤 출현 양상과 환경요인과의 관계

동물플랑크톤은 미동정된 분류군을 포함하여 81개 분

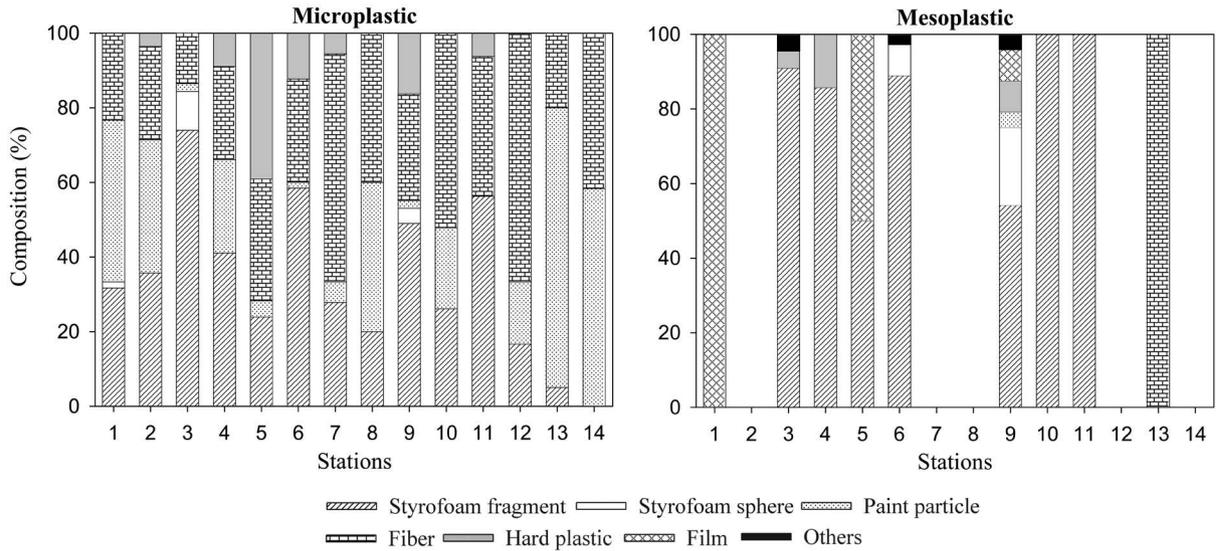


Fig. 6. Composition of micro- and meso-plastic at the sampling stations in September 2017.

류군이였다 (Table 2). 해역별 출현 개체수는 5.3~217.8 ind. m⁻³의 범위였다. 거문도 남쪽 해역 (St. 14)에서 가장 높았고, 금오도 인근 해역 (St. 2)에서 가장 낮았다 (Fig. 7). 출현한 동물플랑크톤 가운데 요각류가 평균 52.5%로 최우점 분류군이였다. 제주도 동쪽 및 외해역 (Sts. 5~8) 이외의 정점에서는 해파리류가 출현하였으며, 다른 정점에 비해 St. 4에서 바다솔통류와 미충류가 높은 점유율을 차지하였다.

조사 해역별 동물플랑크톤 출현과 환경요인과의 관계를 살펴보기 위해 대부분 종 동정이 이루어진 요각류의 출현 개체수를 통해 얻은 집괴 분석 결과 (Fig. 8), 점진강 수의 영향을 받는 A해역 (St. 1), 외해수와 만나 연안전선을 형성하는 B해역 (Sts. 2, 3) 그리고 제주난류와 쓰시마난류의 영향권인 C해역으로 구분되었다. 또한 C해역은 제주난류의 영향을 강하게 받는 C1해역 (Sts. 4, 8~14)과 쓰시마난류의 직접적인 영향을 받는 C2해역 (Sts. 5~7)으로 구분하였다. SIMPER 분석을 통해 각 해역 구분에 영향을 미친 종을 살펴본 결과 (Table 3), B해역은 *Pontella chierchiae*가 48.64%로 가장 높은 기여율을 보였고, *Corycaeus* spp.가 18.36%, *Acartia erythraea*가 13.41%의 기여율을 보였다. C1해역에서는 *Canthocalanus pauper*가 19.99%로 가장 높은 기여율을 보였으며, *Paracalanus* spp. (12.99%), *P. gracilis* (11.89%), *Corycaeus* spp. (10.64%) 순

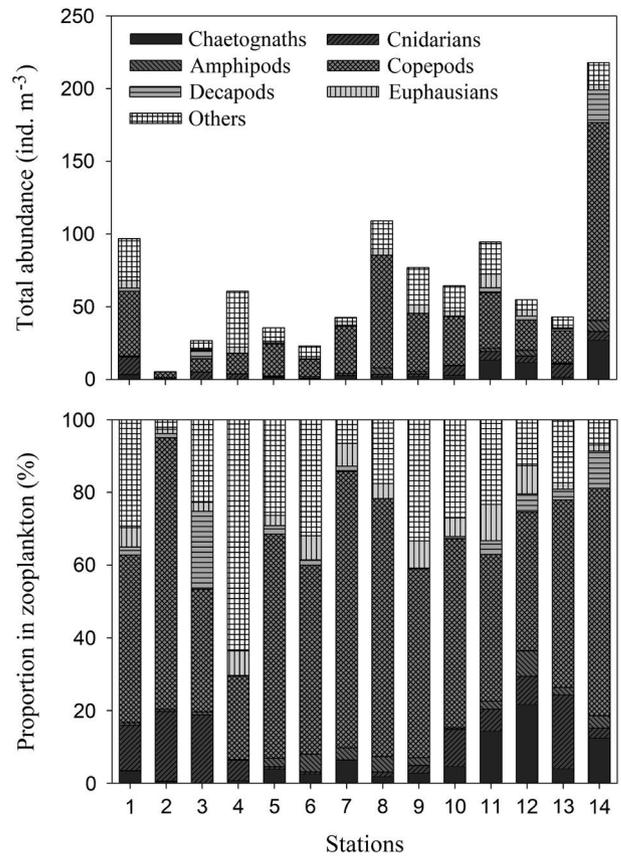


Fig. 7. Variations in total abundance and the proportion of zooplankton major taxa at each sampling station in September 2017.

Table 2. List of zooplankton occurring in the study areas

| Taxon / species | | |
|------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| Dinoflagellata | <i>Nannocalanus minor</i> | <i>Temora discaudata</i> |
| <i>Noctiluca scintillans</i> | <i>Undinula vulgaris</i> | <i>Oithona</i> spp. |
| Cnidaria | <i>Candacia curta</i> | <i>Oncaea</i> spp. |
| Siphonophorae | <i>C. furcatus</i> | <i>Corycaeus affinis</i> |
| Leptomedusae | <i>Candacia</i> spp. | <i>Corycaeus</i> spp. |
| Mollusca | <i>Clausocalanus arcuicornis</i> | <i>Farranula gibbula</i> |
| Gastropoda larvae | <i>C. farrani</i> | <i>Copilia mirabilis</i> |
| Bivalvia larvae | <i>C. furcatus</i> | <i>Sapphirina</i> spp. |
| Annelida | <i>C. minor</i> | Unidentified Siphonostomatoidea |
| Polychaeta larvae | <i>Clausocalanus</i> spp. | Unidentified Harpacticoida |
| Arthropoda | <i>Eucalanus</i> spp. | Copepodites |
| Cladocera | <i>Euchaeta concinna</i> | Chaetognatha |
| <i>Evadne tergestina</i> | <i>E. indica</i> | <i>Sagitta</i> spp. |
| <i>Penilia avirostris</i> | <i>E. rimana</i> | Chordata |
| Copepoda | <i>Calanopia elliptica</i> | <i>Oikopleura</i> spp. |
| <i>Acartia erythraea</i> | <i>Labidocera acuta</i> | <i>Doliolum</i> spp. |
| <i>A. pacifica</i> | <i>L. acutifrons</i> | <i>Pyrosoma</i> sp. |
| <i>Acartia</i> spp. | <i>L. detruncata</i> | Echinodermata |
| <i>Acrocalanus gibber</i> | <i>L. kroyeri</i> | Ophiopluteus larvae |
| <i>Acrocalanus</i> spp. | <i>L. rotunda</i> | Others |
| <i>Paracalanus aculeatus</i> | <i>Labidocera</i> sp. | Amphipoda larvae |
| <i>P. gracilis</i> | <i>Pontella chierchiae</i> | Ostracoda larvae |
| <i>P. parvus</i> s. l. | <i>P. fera</i> | Cirripedia larvae |
| <i>Paracalanus</i> spp. | <i>P. princeps</i> | Isopoda larvae |
| <i>Calocalanus pavo</i> | <i>P. rostraticauda</i> | Euphausiacea larvae |
| <i>Calocalanus</i> sp. | <i>P. securifer</i> | <i>Cumacea</i> sp. |
| <i>Calanus pacificus</i> | <i>Pontella</i> sp. | Decapoda larvae |
| <i>C. sinicus</i> | <i>Pontellina morii</i> | <i>Lucifer</i> sp. |
| <i>Calanus</i> sp. | <i>P. plumata</i> | Fish larvae |
| <i>Canthocalanus pauper</i> | <i>Pontellopsis armata</i> | Fish eggs |
| <i>Cosmocalanus darwini</i> | <i>P. yamadae</i> | |

으로 나타났다. C2해역에서 22.33%로 가장 높은 기여율을 보인 분류군은 *Oncaea* spp.였으며, *C. pauper*가 17.23%, *Clausocalanus furcatus*가 10.72%로 나타났다. SIMPER 분석 결과를 바탕으로 해역 구분에 영향을 미친 분류군을 식성에 따라 입자식자 (Particle feeder copepods; PC)와 육식자 (Carnivorous copepods; CC)로 구분하고, 그중 10% 이상의 기여도를 보인 주요 분류군을 대상으로 수온 (Temp.), 염분 (Sali.), 부유 물질 (SS), Chlorophyll *a* 농도 (Chl-*a*), 돌말류 (DT), 와편모조류 (DF), 미세플라스틱 (Microplastic), 중형플라스틱 (Mesoplactic) 등 환경요인과의 상호 연관성을 파악하였다. 그 결과 A해역을 제외한 모든 해역은 제1축과 2축 각각 5.907과 4.786의 고유값을 나타냈으며, 누적

기여율은 82.7%를 나타냈다 (Table 4). B해역 (Sts. 2, 3)에 출현한 *Corycaeus* spp., *P. chierchiae*, PC, CC, *A. erythraea*는 Chl-*a* 농도, DT, DF, Microplastic, Mesoplactic과 밀접한 양의 방향성을 보였다 (Fig. 9). C2해역 (Sts. 5~7)에서는 CC, *Oncaea* spp., PC, *C. pauper*, *C. furcatus*는 수온, 염분, SS와 양의 방향성을 나타냈다. 반면, C1해역 (Sts. 4, 8~14)에서 출현한 요각류는 수온, 염분, SS와 음의 방향성을 보였다. 유의성 검정을 위한 상관 분석 결과, B해역 (▼)에 출현한 요각류는 DT, DF, Microplastic, Mesoplactic과 약한 양의 관계를 나타냈고 ($p < 0.05$), C2해역 (◆)의 분류군들은 수온, 염분, SS에 약한 양의 관계를 나타내었다 ($p < 0.05$) (Fig. 10).

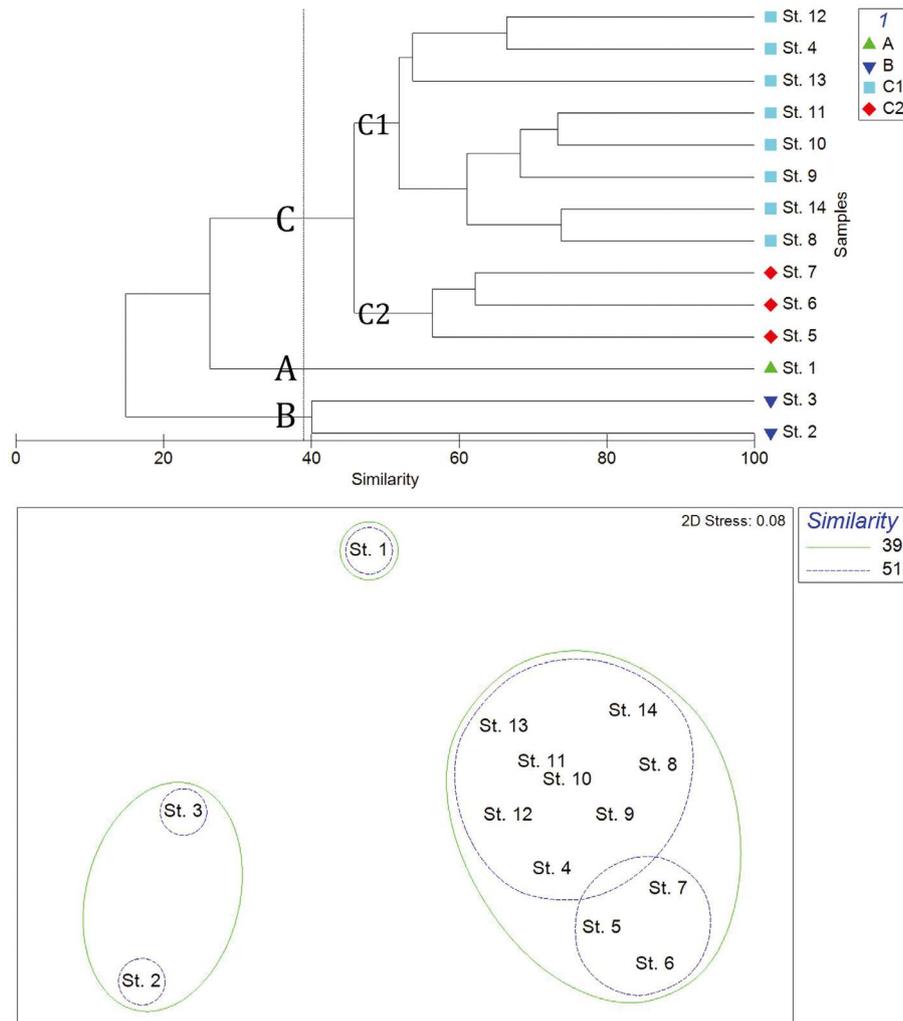


Fig. 8. Dendrogram and representative groups with more than 39% similarity by cluster analysis based on the abundance of copepod in September 2017.

고 찰

Lie and Cho (2016)는 남해 서부 해역이 여름에 동중국해에서 중국 연안을 따라 남하하는 중국 연안수(Chinese coastal water)와 제주난류(Jeju warm current)가 혼합되어 제주 해협을 통과하는 수괴가 존재할 수 있음을 주장하였다.

본 연구에서 여름(9월)에 출현한 수표성 동물플랑크톤, 특히 요각류 종을 대상으로 집괴분석을 실시한 결과 조사 해역은 크게 여수 연안(A 해역), 난류수 영향 해역(C해역) 그리고 이들의 중간 수역(B해역)으로 구분되었다. 난류수 영향 해역은 제주난류의 영향을 받는 해역(C1해역)

과 쓰시마난류의 영향을 직접적으로 받는 해역(C2해역)으로 세분되었다(Fig. 8). B해역에서는 *P. chierchia*, *Corycaeus* spp., *A. erythraea*가 높은 기여율을 보였다. C1해역에서는 *C. pauper*, *Paracalanus* spp., *P. gracilis*, *Corycaeus* spp.가, C2해역에서는 *Oncaea* spp., *C. pauper*, *C. furcatus*가 주요종으로 출현하였다. 이 중 *P. chierchia*와 *C. pauper*, *P. gracilis*, *Oncaea* spp., *C. furcatus*는 쓰시마난류 및 쿠로시오 해류의 유입을 지시하는 지표종으로 알려져 있다(Hsieh et al. 2004; Jeong et al. 2008). 특히, *P. chierchia*가 여수 해만에 우점하여 출현한 것은 시기적으로 쓰시마난류의 세력 확장으로 인한 출현 증가로 보이며, 이는 선행연구와 비슷하게 나타났다(Moon et al. 2010; Jeong et al. 2014).

Table 3. Results of similarity percentages procedure (SIMPER) analysis for dominant copepods and their feeding habits in the four areas

| Group | Species | Contribution (%) | Feeding habits | References | |
|-------|---------------------------------|--------------------------------------|-----------------|------------------------------|--------------------------------|
| A | Less than 2 samples in group | | | | |
| B | <i>Pontella chierchiaie</i> | 48.64 | Carnivorous | Ohtsuka and Onbé (1991) | |
| | <i>Corycaeus</i> spp. | 18.36 | Carnivorous | Gophen and Harris (1981) | |
| | <i>Acartia erythraea</i> | 13.41 | Particle feeder | Sheng <i>et al.</i> (2010) | |
| | <i>Acrocalanus</i> spp. | 9.76 | Particle feeder | Tseng <i>et al.</i> (2008) | |
| C1 | <i>Canthocalanus pauper</i> | 19.99 | Particle feeder | Hu <i>et al.</i> (2014) | |
| | <i>Paracalanus</i> spp. | 12.99 | Particle feeder | Paffenhöfer (1984) | |
| | <i>Paracalanus gracilis</i> | 11.89 | Particle feeder | - | |
| | <i>Corycaeus</i> spp. | 10.64 | Carnivorous | - | |
| | <i>Paracalanus parvus</i> s. l. | 9.11 | Particle feeder | - | |
| | <i>Oncaea</i> spp. | 8.58 | Carnivorous | Go <i>et al.</i> (1998) | |
| | <i>Acartia pacifica</i> | 7.68 | Carnivorous | - | |
| | <i>Clausocalanus furcatus</i> | 3.68 | Particle feeder | Uttieri <i>et al.</i> (2008) | |
| | <i>Paracalanus aculeatus</i> | 3.01 | Particle feeder | - | |
| | <i>Temora discaudata</i> | 2.93 | Carnivorous | Tseng <i>et al.</i> (2008) | |
| C | <i>Oncaea</i> spp. | 22.33 | Carnivorous | - | |
| | <i>Canthocalanus pauper</i> | 17.23 | Particle feeder | - | |
| | <i>Clausocalanus furcatus</i> | 10.72 | Particle feeder | - | |
| | <i>Corycaeus</i> spp. | 7.83 | Carnivorous | - | |
| | <i>Paracalanus gracilis</i> | 7.11 | Particle feeder | - | |
| | <i>Pontellina morii</i> | 4.87 | Carnivorous | Ohtsuka and Onbé (1991) | |
| | C2 | <i>Labidocera detruncata</i> | 4.41 | Carnivorous | Fleminger (1975) |
| | | <i>Paracalanus</i> spp. | 4.02 | Particle feeder | - |
| | | <i>Paracalanus aculeatus</i> | 3.65 | Particle feeder | - |
| | | <i>Farranula (corycaeus) gibbula</i> | 2.38 | Carnivorous | Dessier and Donguy (1985) |
| | | <i>Euchaeta concinna</i> | 2.28 | Carnivorous | Yen (1985) |
| | | <i>Nannocalanus minor</i> | 2.14 | Particle feeder | Santhanam <i>et al.</i> (2015) |
| | | <i>Eucalanus</i> spp. | 1.80 | Particle feeder | Tester and Turner (1988) |

It was assumed that the feeding habitat of species without reference is the same as that of Genus.

한편, B해역에서 높은 기여율을 보인 *A. erythraea*는 여수 내만에서 여름에 높은 출현 개체수를 보이는 종으로 알려져 있다(Moon *et al.* 2010). 따라서 강내만성종으로 알려진 *A. erythraea*의 B해역까지 출현 분포의 확장은 여름철의 장마와 태풍으로 인한 섬진강 수 유입 증가와 밀접한 관계가 있을 수 있다. 이러한 결과는 우리나라 여름 장마와 태풍에 따른 섬진강 수의 유입 증가가 B해역의 동물플랑크톤 군집 구조에 까지 영향을 미칠 수 있음을 시사하고 있다. 또한, 연안에 우점하는 *Corycaeus affinis*와 다른 *Corycaeus* spp.가 B와 C1해역에서 출현하였다. Seo *et al.* (2018)은 *C. affinis*가 봄과 여름철 남해 연안과 제주 연안에서만 출현하며, 또 다른 종인 *Corycaeus* sp.가 봄과 여름 동해 연안과 제주 연안

해역에서만 출현한다고 보고하였다. 본 조사의 B와 C1해역에서 출현한 *Corycaeus* spp. 또한 이들 종들과는 형태적으로 달랐다. 이러한 사실은 *Corycaeus*속의 종들이 수괴지표 종으로 중요한 역할을 할 수 있음을 보여준다.

해역별 우점 요각류를 식성에 따라 2개 그룹으로 구분하고 중복 분석과 상관 분석한 결과 B해역에 출현한 주요 종들은 식물플랑크톤, 부유플라스틱과 약한 양의 상관 관계를 보였다($p < 0.05$). C2해역에서 출현한 종들은 수온, 염분, 부유 물질과 약한 양의 관계를 나타냈다($p < 0.05$). 이러한 결과는 수표성 동물플랑크톤의 출현 양상이 부유플라스틱의 분포에 부분적으로 영향을 받을 수 있음을 시사한다.

Table 4. Summary of redundancy analysis (RDA) for the relationship between copepods and environmental factors

| Importance of components | RDA1 | RDA2 |
|--------------------------|-------|-------|
| Eigenvalue | 5.907 | 4.786 |
| Proportion Explained | 0.457 | 0.370 |
| Cumulative Proportion | 0.457 | 0.827 |

*Group A (St. 1), less than 2 samples, excluded.

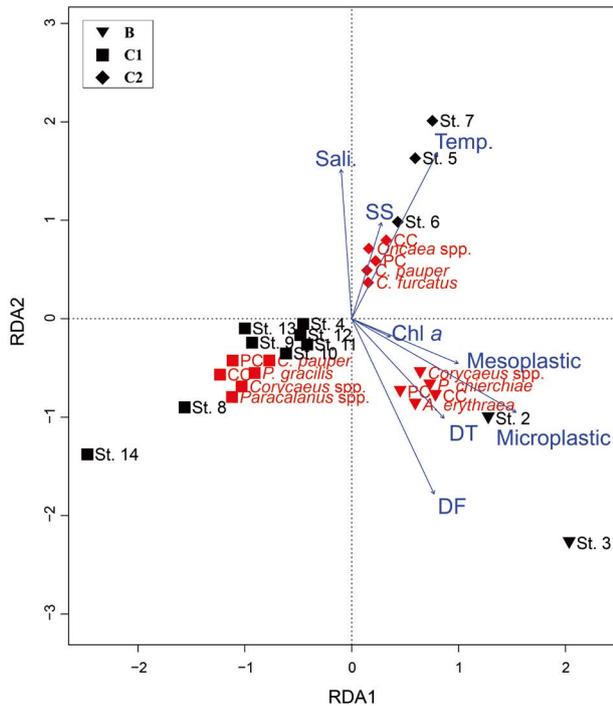


Fig. 9. Redundancy analysis (RDA) ordination diagrams related to environmental factors (blue arrows), stations, and copepods in September 2017. Abbreviations: PC (particle feeder copepods), CC (carnivorous copepods), Sali. (salinity), SS (suspended solids), Temp. (water temperature), Chl-a (chlorophyll a concentration), DT (diatoms), DF (dinoflagellates), microplastic, mesoplastic. The symbols were divided according to the sea areas.

한편, 섭식 형태로 알아본 *P. chierchiae*와 *Corycaeus*속 요각류의 종들은 육식자로 먹이를 움켜쥐고 섭식하는 특징을 가지고 있으며 (Gophen and Harris 1981; Ohtsuka and Onbé 1991), *A. erythraea*와 *Acrocalanus*속의 종들은 전형적인 입자 식자로 수중에 부유하는 작은 먹이를 섭식하는 특징을 가지고 있다 (Tseng et al. 2008; Sheng et al. 2010). Sun et al. (2017)은 남중국해에서 출현한 요각류, 화살벌레류, 해파리류, 새우류, 어류 유생 등 다섯 분류군의 미세플라스틱 섭취를 보고하였으며 또한, 서해에 출현한 다양한 동물

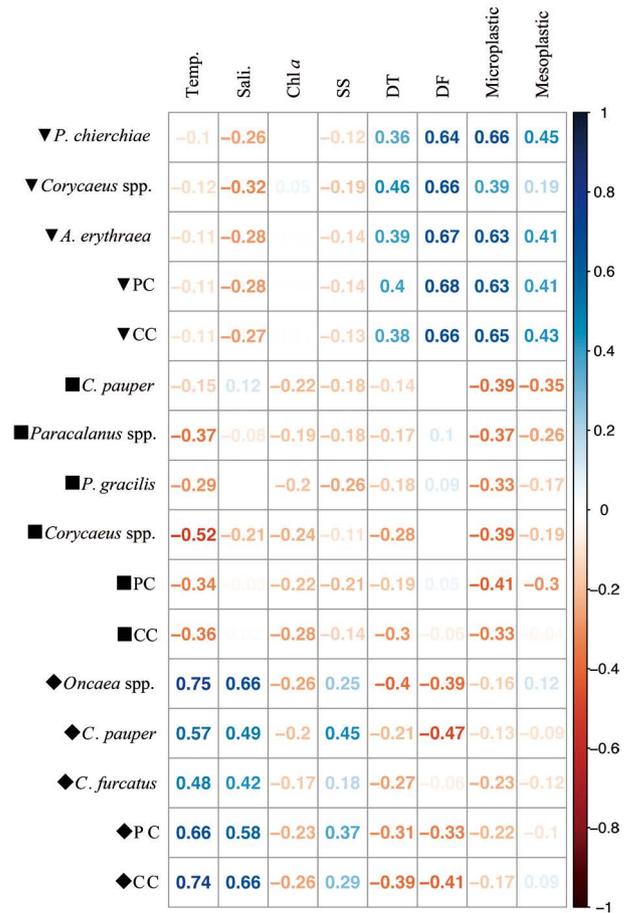


Fig. 10. Results of Pearson's correlation analysis ($p < 0.05$) for the relationship between copepods and environmental factors by sea areas (B area, ▼; C1 area, ■; C2 area, ◆). Abbreviations: PC (particle feeder copepods), CC (carnivorous copepods), Sali. (salinity), SS (suspended solids), Temp. (water temperature), Chl-a (chlorophyll a concentration), DT (diatoms), DF (dinoflagellates), microplastic, mesoplastic.

플랑크톤 분류군의 장 내와 해수 내 존재하는 미세플라스틱 현존량을 비교하였다 (Sun et al. 2018). 한편, Kang et al. (2018)은 먹이가 많은 연안에서 동물플랑크톤의 미세플라스틱 섭식이 중요하지 않음을 시사하였다. 제한적인 먹이 조건의 실험이 아닌 현장의 부유플라스틱 입자수는 식물플랑크톤의 현존량보다 현저히 적었으며, 동물플랑크톤은 mouth parts의 크기를 고려하여 선택적으로 먹이를 섭취하기 때문에, 유의한 결과가 나타났을지라도 입 크기보다 큰 플라스틱을 먹이로 활용하기 어려울 것이라 판단된다. 그럼에도 불구하고 봄철 제주도 인근 해역 (St. 9)에서 출현한 치어류의 위 내용물 분석 결과 페인트 조각과 섬유 조각이 관찰되었으며 (Fig. 11A) (미발표), 여름 제주도 동쪽 해역

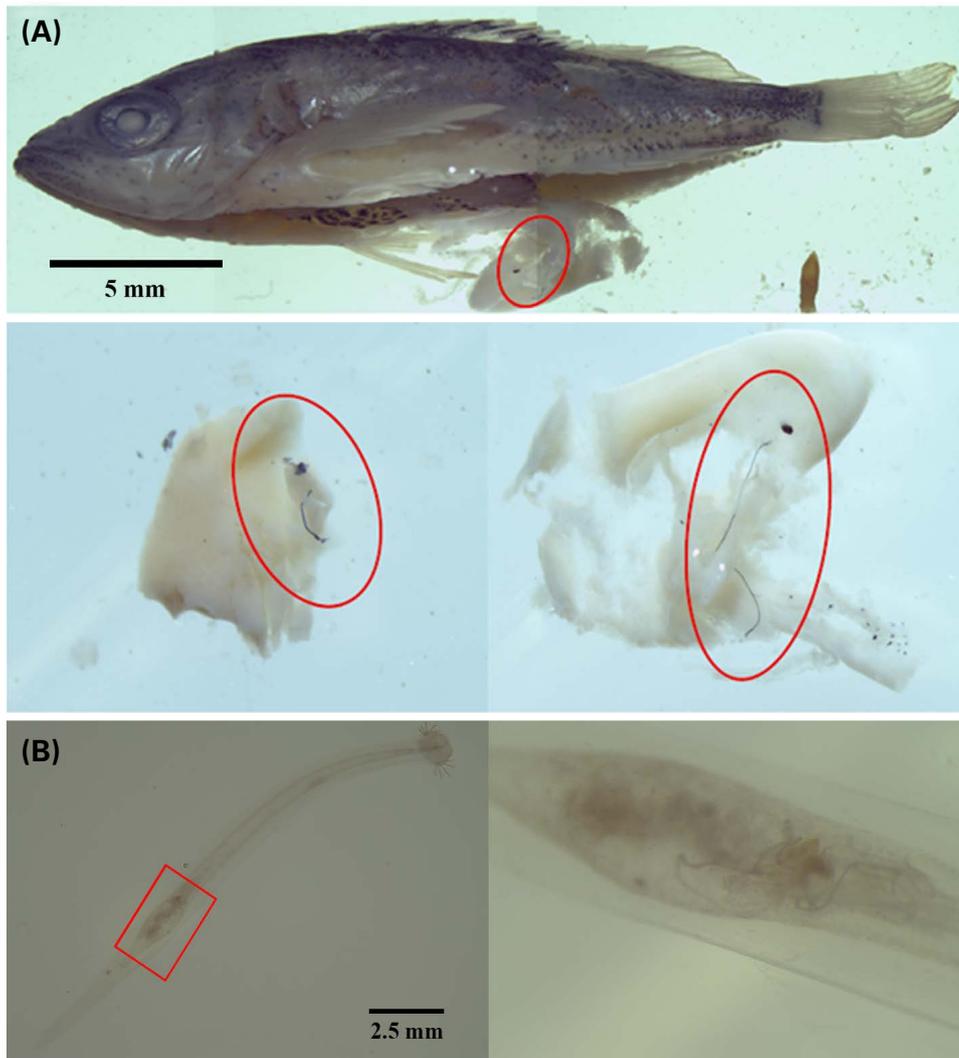


Fig. 11. Photos of microplastics in the stomach contents of fish larvae and *Sagitta* sp.: (A) Fish larvae randomly sorted from St. 9 in May 2017 (unpublished study); (B) *Sagitta* sp. collected from St. 7 in September 2017.

(St. 7)에서는 육식자로 알려져 있는 화살벌레류의 소화관에서 섬유 조각이 관찰되었다(Fig. 11B). 이는 채집과정에서 발생하는 cod end effect에 의한 것일 수 있다.

결론적으로, 우리나라 제주도를 향해 동쪽으로 이동하는 양쯔강 희석수는 매년 여름 강한 경년 변동성이 있기 때문에 확장 범위를 달리하는 것으로 알려져 있다(Park et al. 2017). 본 연구에서는 제주난류와 쓰시마난류의 세력 확장으로 인하여 난수성 및 외양성 종이 여수 연안에서 출현하였다. 연구 해역 내 양쯔강 희석수의 유입과 그에 따른 영향은 제한된 자료만으로는 판단하기 어려우므로 차후 서해 남단 및 제주도 인근 해역에 대한 해류 특성을 파악하고

정확한 분석을 위해 연구 해역을 확장해야 할 것으로 여겨진다.

적 요

여수와 제주도 사이 해역에 출현한 수표성 동물플랑크톤의 군집 분포와 환경요인 간의 관계를 파악하기 위해 2017년 9월 총 14개 정점에서 뉴스톤 네트를 이용하여 선박 측면에서 예인 및 채집하였다. 동물플랑크톤은 총 81개 분류군으로 요각류가 최우점하였다. 동물플랑크톤 출현 개

체수를 기반으로 연안수의 영향을 받는 해역, 연안수와 외해수가 만나는 해역, 외해수의 직접적 영향을 받는 해역으로 구분되었다. 본 연구에서 해역별 우점 요각류, 식성에 따른 요각류를 2개 그룹으로 구분하고 군집에 미치는 환경요인을 분석한 결과 수온과 염분, 식물플랑크톤, 부유플라스틱과 유의미하였다($p < 0.05$). 추가로 연구 해역에 출현한 치어 및 화살벌레류의 위 내용물 분석을 통해 미세플라스틱 섭취를 확인하였다. 낮은 영양단계에서 섭취한 플라스틱이 먹이사슬을 타고 올라가 높은 영양단계로 전달된 것으로 보인다. 결과적으로 우리나라 남해 서부 해역에 출현하는 동물플랑크톤 군집 특성을 볼 때 여름철 확장 범위를 달리하는 섬진강 수, 제주난류, 쓰시마난류의 영향을 받아 군집 분포가 달라지는 것으로 판단된다.

사 사

현장조사에 큰 도움을 주신 전남대학교 동백호 승조원 들께 깊은 감사를 드립니다. Chl-*a* 농도 분석 장비를 사용할 수 있게 해주신 전남대학교 해양융합과학과 윤양호 교수님, 물리적 환경요인에 대한 조언을 해주신 추효상 교수님께도 감사의 말씀을 전합니다.

본 연구는 2017년 전남대 연구비(대학회계) 및 2020년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(ICT기반 수산자원관리 수산전문인력양성)입니다.

REFERENCES

- Bray JR and JT Curtis. 1957. An ordination of the upland forest communities of southern Wisconsin. *Ecol. Monogr.* 27:325-349.
- Brodeur RD. 1989. Neustonic feeding by juvenile salmonids in coastal waters of the Northeast Pacific. *Can. J. Zool.* 67:1995-2007.
- Cihara M and M Murano. 1997. *An Illustrated Guide to Marine Plankton in Japan*. Tokai University Press. Tokyo.
- Cho YK and K Kim. 1994. Characteristics and origin of the cold water in the south sea of Korea in summer. *J. Korean Soc. Oceanogr.* 29:414-421.
- Clarke K and RN Gorley. 2006. PRIMER V6: user manual/tutorial. PRIMER-E. Plymouth, UK.
- Cole M, PK Lindeque, E Fileman, J Clark, C Lewis, C Halsband and TS Galloway. 2016. Microplastics alter the properties and sinking rates of zooplankton faecal pellets. *Environ. Sci. Technol.* 50:3239-3246.
- Collignon A, JH Hecq, F Glagani, P Voisin, F Collard and A Goffart. 2012. Neustonic microplastic and zooplankton in the North Western Mediterranean Sea. *Mar. Pollut. Bull.* 64:861-864.
- Cózar A, F Echevarría, JI González-Gordillo, X Irigoien, B Úbeda, S Hernández-León, ÁT Palma, S Navarro, J García-de-Lomas, A Ruiz, ML Fernández-de-Puelles and CM Duarte. 2014. Plastic debris in the open ocean. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 111:10239-10244.
- Davenport J and EIS Rees. 1993. Observations on neuston and floating weed patches in the Irish Sea. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 36:395-411.
- Dessier A and JR Donguy. 1985. Planktonic copepods and environmental properties of the eastern equatorial Pacific: seasonal and spatial variations. *Deep Sea Res. Part I-Oceanogr. Res. Pap.* 32:1117-1133.
- Fleminger A. 1975. Geographical distribution and morphological divergence in american coastal-zone planktonic copepods of the genus *Labidocera*. *Estuar. Res.* 1:392-419.
- Go Y, B Oh and M Terazaki. 1998. Feeding behavior of the poecilostomatoid copepods *Oncaea* spp. on chaetognaths. *J. Mar. Syst.* 15:475-482.
- Gophen M and RP Harris. 1981. Visual predation by a marine cyclopoid copepod, *Corycaeus anglicus*. *J. Mar. Biol. Assoc. U. K.* 61:391-399.
- Ha SY, SW Kang, MO Park, YN Kim, SH Kang and KH Shin. 2010. Photoinduction of UV-absorbing compounds and photoprotective pigment in *Phaeocystis pouchetii* and *Porosira glacialis* by UV exposure. *Ocean Polar Res.* 32:397-399.
- Holdway P and L Maddock. 1983. Neustonic distributions. *Mar. Biol.* 77:207-214.
- Hsieh CH, TS Chiu and CT Shih. 2004. Copepod diversity and composition as indicators of intrusion of the Kuroshio Branch Current into the Northern Taiwan Strait in Spring 2000. *Zool. Stud.* 43:393-403.
- Hu S, Z Guo, T Li, EJ Carpenter, S Liu and S Lin. 2014. Detecting *in situ* copepod diet diversity using molecular technique: development of a copepod/symbiotic ciliate-excluding eukaryote-inclusive PCR protocol. *PLoS One* 9:e103528.
- Jang MC, SH Baek, PG Jang, WJ Lee and KS Shin. 2012. Patterns of zooplankton distribution as related to water masses in the Korea Strait during winter and summer. *Ocean Polar Res.* 34:37-51.
- Jeong HG, HL Suh, YH Yoon and HY Soh. 2008. Redescription of *Pontella* species (Calanoida, Pontellidae) from Korean waters, with notes on their spatio-temporal distribution. *Ocean Sci. J.*

- 43:209–222.
- Jeong HG, HL Suh, W Lee and HY Soh. 2014. Seasonal variation of the neustonic zooplankton community in southern waters of Korea. *Ocean Sci. J.* 49:167–181.
- Kang HS, MH Seo, YS Yang, EO Park, YH Yoon, D Kim, HG Jeong and HY Soh. 2018. Zooplankton and neustonic microplastics in the surface layer of Yeosu coastal areas. *Korean J. Environ. Biol.* 36:11–20.
- Kingsford MJ and JH Choat. 1986. Influence of surface slicks on the distribution and onshore movements of small fish. *Mar. Biol.* 91:161–171.
- Leech DM and CE Williamson. 2000. Is tolerance to UV radiation in zooplankton related to body size, taxon, or lake transparency? *Ecol. Appl.* 10:1530–1540.
- Li J, D Yang, L Li, K Jabeen and H Shi. 2015. Microplastics in commercial bivalves from China. *Environ. Pollut.* 207:190–195.
- Lie HJ and CH Cho. 2016. Seasonal circulation patterns of the Yellow and East China Seas derived from satellite-tracked drifter trajectories and hydrographic observations. *Prog. Oceanogr.* 146:121–141.
- Lima YDS and MJ Chretiennot-Dinet. 1984. Measurements of biomass and activity of neustonic microorganisms. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 19:167–180.
- Marshall SM, AG Nicholls and AP Orr. 1935. On the biology of *Calanus finmarchicus*. Part VI. Oxygen consumption in relation to environmental conditions. *J. Mar. Biol. Assoc. U. K.* 20:1–27.
- Moon SY, HJ Oh and HY Soh. 2010. Seasonal variation of zooplankton communities in the southern coastal waters of Korea. *Ocean Polar Res.* 32:411–426.
- Na JY, SK Han and DK Cho. 1990. A study on sea water and ocean current in the sea adjacent to Korea peninsula - Expansion of coastal waters and its effect on temperature variations in the South Sea of Korea. *Korean J. Fish. Aquat. Sci.* 23:267–279.
- Ohtsuka S and T Onbé. 1991. Relationship between mouthpart structures and in situ feeding habits of species of the family Pontellidae (Copepoda: Calanoida). *Mar. Biol.* 111:213–225.
- Oksanen J, FG Blanchet, R Kindt, P Legendre, RB O'Hara, GL Simpson, P Solymos, MHH Stevens and H Wagner. 2014. *Vegan: Community Ecology Package*. R package Version 2.2-0. <http://CRAN.Rproject.org/package=vegan>.
- Padmavati G and SC Goswami. 1996. Zooplankton distribution in neuston and water column along west coast of India from Goa to Gujarat. *Indian J. Mar. Sci.* 25:85–90.
- Paffenhöfer GA. 1984. Does *Paracalanus* feed with a leaky sieve? *Limnol. Oceanogr.* 29:155–160.
- Park C, CR Lee and JC Kim. 1998. Zooplankton community in the front zone of the east sea (the sea of Japan), Korea: 2. Relationship between abundance distribution and seawater temperature. *J. Korean Fish. Soc.* 31:749–759.
- Park KA, JE Park, BJ Choi, SH Lee, HR Shin, SR Lee, DS Byun, B Kang and EL Lee. 2017. Schematic maps of ocean currents in the Yellow Sea and the East China Sea for science textbooks based on scientific knowledge from oceanic measurements. *J. Korean Soc. Oceanogr.* 22:151–171.
- Santhanam P, K Jothiraj, N Jeyaraj, S Jeyanthi, AS Devi and S Ananth. 2015. Effect of monoalgal diet on the growth, survival and egg production in *Nannocalanus minor* (Copepoda: Calanoida). *Indian J. Mar. Sci.* 44:1579–1584.
- SCOR-UNESCO. 1966. Determination of photosynthetic pigments. *UNESCO Monogr. Oceanogr. Methodol.* 1:11–18.
- 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.
- Sheng L, L Tao, H Hui, G Zhi-Ling, H Liang-Min and WX Wang. 2010. Feeding efficiency of a marine copepod *Acartia erythraea* on eight different algal diets. *Sheng Tai. Xue Bao.* 30:22–26.
- Smith SL and J Vidal. 1986. Variations in the distribution, abundance, and development of copepods in the southeastern Bering Sea in 1980 and 1981. *Cont. Shelf Res.* 5:215–239.
- Sohn MH, BH Park, YS Choi, SJ Lee, YS Kang and YS Kang. 2010. Swimming behavior study of the zooplankton (Copepod *Calanus sinicus*) by using a holographic particle tracking velocimetry technique. *J. KIMST* 13:941–949.
- Sun X, Q Li, M Zhu, J Liang, S Zheng and Y Zhao. 2017. Ingestion of microplastics by natural zooplankton groups in the northern South China Sea. *Mar. Pollut. Bull.* 115:217–224.
- Sun X, J Liang, M Zhu, Y Zhao and B Zhang. 2018. Microplastics in seawater and zooplankton from the Yellow Sea. *Environ. Pollut.* 242:585–595.
- Tester PA and JT Turner. 1988. Comparative carbon-specific ingestion rates of phytoplankton by *Acartia tonsa*, *Centropages velificatus* and *Eucalanus pileatus* grazing on natural phytoplankton assemblages in the plume of the Mississippi River (northern Gulf of Mexico continental shelf). *Hydrobiologia* 167/168:211–217.
- Tseng LC, R Kumar, HU Dahms, QC Chen and JS Hwang. 2008. Copepod gut contents, ingestion rates and feeding impact in relation to their size structure in the southeastern Taiwan Strait. *Zool. Stud.* 47:402–416.
- Turner JT. 1984. Zooplankton feeding ecology: contents of fecal pellets of the copepods *Acartia tonsa* and *Labidocera aestiva* from continental shelf waters near the mouth of the Missis-

- sippi River. Mar. Ecol. 5:265–282.
- Turner JT. 2015. Zooplankton fecal pellets, marine snow, phyto-detritus and the ocean's biological pump. Prog. Oceanogr. 130:205–248.
- Uttieri M, GA Paffenhöfe and MG Mazzocchi. 2008. Prey capture in *Clausocalanus furcatus* (Copepoda: Calanoida). The role of swimming behaviour. Mar. Biol. 153:925–935.
- Yen J. 1985. Selective predation by the carnivorous marine copepod *Euchaeta elongata*: Laboratory measurements of predation rates verified by field observations of temporal and spatial feeding patterns. Limnol. Oceanogr. 30:577–597.
- Zagarese H, CE Williamson, M Mislivets and P Orr. 1994. The vulnerability of *Daphnia* to UV-B radiation in the Northeastern United States. Adv. Limnol. 43:207–216.
- Zaitsev YP. 1971. Marine Neustonology. Springfield, Virginia.