

<Original article>

여수 연안 표층에 출현하는 동물플랑크톤과 미세플라스틱

강희승[†] · 서민호^{1,†} · 양윤석 · 박은옥² · 윤양호
김대진³ · 정현경^{4,*} · 서호영^{*}

전남대학교 해양기술학부, ¹바다생태연구소, ²전남대학교 수산과학연구소,
³전남대학교 선박실습센터, ⁴국립해양생물자원관 국가해양생명자원센터

Zooplankton and Neustonic Microplastics in the Surface Layer of Yeosu Coastal Areas

Hui Seung Kang[†], Min Ho Seo^{1,†}, Yun Seok Yang, Eun-Ok Park², Yang Ho Yoon,
Daejin Kim³, Hyeon Gyeong Jeong^{4,*} and Ho Young Soh^{*}

Faculty of Marine Technology, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea

¹Marine Ecology Research Center, Yeosu 59697, Republic of Korea

²Fisheries Science Institute, Yeosu 59626, Republic of Korea

³Training Ship Administrative Center, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea

⁴Marine Bio-Resources and Information Center, National Marine Biodiversity Institute of Korea,
Seocheon 33662, Republic of Korea

Abstract - In planktonic ecosystems, the microplastics are considered as a potential food source for the zooplankton. To study a relationship between the zooplankton and the neustonic microplastics, a research experiment was carried out during May in the surface layers of the Yeosu coastal areas including Yeoja Bay, Gamak Bay, Yeosuhae Bay, and Botdol Sea. A neustonic zooplankton net (mesh size 300 μm ; mouth area 30 cm \times 18 cm) was towed from the side of the ship in the event that it would not be affected by waves crashing by the ship at a speed of ca. 2.5 knots. All of the microplastic particles were separated from the zooplankton. The zooplankton and microplastics were appearing in a range of 61 to 763 indiv. m^{-3} and 0.0047 to 0.3471 particle m^{-2} , respectively. It was noted that the *Acartia omorii*, *Paracalanus parvus* s. l., *Labidocera euchaeta*, *A. hongii*, decapod larvae, and cirriped larvae were predominantly seen in the experiment. For verifying relationships between zooplankton and environmental factors in addition to microplastics, a model redundancy analysis (RDA) was performed. The zooplankton were divided into two groups on the basis of feeding types (i.e. particle feeders, and carnivores), and the associated zooplankton larvae were also separately considered. A review of the additional environmental factors such as water temperature, salinity, turbidity, chlorophyll-*a* concentration, diatom density, and dinoflagellate density were also contained in the analysis. The results showed that a noted zooplankton abundance had no close relation with the occurring number of microplastic particles, but rather was significantly related with other noted environmental factors such as temperature, salinity, turbidity, and chlorophyll-*a*

[†] This authors contributed equally to this work.

* Corresponding author: Hyeon Gyeong Jeong, Tel. 041-950-0735,
Fax. 041-950-0715, E-mail. hgjeong@mabik.re.kr
Ho Young Soh, Tel. 061-659-7147, Fax. 061-659-7149,
E-mail. hysoh@jnu.ac.kr

concentration. This fact implies that most zooplankton can feed themselves as a unit, by selecting the most likely available nutritious foods, rather than microplastics under the circumstance of food-richness areas, such what food resources are available as in the location of coastal waters.

Keywords : neuston, environmental factors, redundancy analysis, coastal areas, feeding types

서 론

해양에 존재하는 플라스틱 조각(Plastic marine debris; PMD)의 해양생태계에 미치는 부정적인 영향은 전세계의 해양에서 보고되고 있다(Ryan *et al.* 1988; Barreiros and Barcelos 2001; Boerger *et al.* 2010; Franeker *et al.* 2011). 현재 바다를 떠다니는 플라스틱 조각은 약 5조 2,500억 개, 무게만 무려 268,940톤에 달하는 것으로 알려져 있다(Eriksen *et al.* 2014). 플라스틱 조각이 해양 동물들에게 섭취되어 영향을 줄 경우 먹이섭식 능력이 저하되고, 생식기능이 제한되며, 운동능력 또한 떨어지는 등 직접적인 위협을 줄 수 있다(Crimmins *et al.* 2002; Cole *et al.* 2013; Wright *et al.* 2013). 해양의 PMD 80%가 육상에서 유입되는 것으로 추정되고 있으며(Allsopp *et al.* 2006), PMD의 증가는 인간의 소비 활동, 산업 활동 그리고 부적절한 폐기물 관리에 기인한다. 유입된 PMD는 가볍기 때문에 해류를 따라 전 해양의 표층에 널리 분포하게 된다. 이렇게 바다에 분포한 PMD는 화학작용 없이 태양복사, 마모, 물과 바람의 움직임과 같은 요인에 영향을 받아 점진적으로 작은 조각으로 분해된다(Pichel *et al.* 2007). 그 중 일반적으로 크기가 333 μm 이상, 5 mm 이하일 경우 미세플라스틱(Microplastic)이라 정의하며 그보다 작은 크기 또한 미세플라스틱이라 정의하지만 발견하기 어렵다(Arthur *et al.* 2009). 미세플라스틱이 해양 생물에 의해 섭취(Browne *et al.* 2008)될 경우 잠재적으로 먹이사슬을 통해 전달되며, 이는 결국 해양생태계에 주요한 문제를 야기시킬 수 있다(Barnes *et al.* 2009; Hirai *et al.* 2011). 특히 많은 연구 결과는 해양생태계 먹이 사슬에서 일차소비자로서 중요한 역할을 하는 동물플랑크톤이 미세플라스틱을 먹이와 함께 섭취함을 보고하고 있다(Wright *et al.* 2013; Setälä *et al.* 2014; Desforges *et al.* 2015). 동물플랑크톤이 미세플라스틱을 섭취했을 경우 소화되지 않고 배출되는데 까지 7일간 몸 속에 축적되며, 이 기간 동안 동물플랑크톤의 식물플랑크톤 섭취 속도는 느려지고, 운동능력, 짝짓기, 포식자 회피 기능 등이 제한된다(Cole *et al.* 2013). 또한 상위포식자의 포식활동에 의한 미세플라스틱 농축은 인간에게 까지 영향을 미친다.

본 연구 지역은 남해중앙부에 위치한 여자만, 가막만, 여수해만, 붓돌바다를 포함하고 있으며, 각각 뚜렷한 해양환경 특징을 보이고 있다. 여자만은 보존가치가 매우 높은 것

별과 염습지 및 갈대밭으로 이루어져 독특한 연안 생태계가 발달하였다. 여자만으로 별교천, 동천, 이사천으로부터 육수가 유입되지만, 육수의 유입량이 적은 전형적인 해안 만입형으로 하천 상류에는 공업단지 등의 특별한 오염원이 없으며, 하류 쪽은 경작지로 이루어져 비교적 청정해역을 유지하고 있다(Choi *et al.* 2004). 가막만은 전형적인 반폐쇄성 내만으로 기초 생산력이 높아 각종 어패류 양식이 활발히 행해지고 있으며, 인접도시로부터 산업폐수와 도시하수 등에 의한 오염물질이 유입되므로 동물플랑크톤의 종조성 및 출현 양상은 수질 환경과 해수 순환에 커다란 영향을 받을 가능성이 높다(Soh *et al.* 2002). 여수 해만은 1988년에 교통안전특정해역으로 지정된 이래 선박 출·입항 척수 및 톤수 등이 크게 증가하고 있다. 1988년 선박 출·입항 척수 5,516척, 톤수 19,745,008톤이었으나 2007년 선박 출·입항 척수 11,991척, 톤수 38,554,328톤, 2015년 선박 출·입항 척수는 12,579척, 톤수 116,819,298톤으로 입항 선박 척수는 약 3배, 톤수는 약 8배 증가하였다(Yeosu Regional Office of Oceans and Fisheries 2016). 또한 여수 해만은 광양 컨테이너항과 여수 신항으로 입항하는 각종 국내외 선박의 정박지로 지정되어 있을 뿐만 아니라, 여수 수도에 의해 섬진강과 연결되어 있어 지속적으로 육수가 유입되고 있다. 붓돌바다는 여자만 입구에서 금오열도, 소리도 및 고흥반도, 나로도에 둘러싸인 해역으로 북쪽에서 유입되는 육수의 영향과 남쪽의 개방된 만구로 인하여 유입되는 외해수의 영향을 모두 받는 해역이다. 남해 연안 중앙역에서 북서-남동으로 위치한 직사각형의 개방형 만으로 붓돌바다의 안쪽 해역에서 바깥쪽 해역으로 갈수록 수심이 완만하게 깊어지는 해저 지형을 나타내고 있다(Choi *et al.* 2004).

본 연구는 여러 해역 특성을 보이고 있는 여자만, 가막만, 여수 해만, 여수 붓돌바다를 대상으로 미세플라스틱의 출현 현황과 동물플랑크톤의 잠재적 섭식물로서 미세플라스틱이 동물플랑크톤 군집 구조에 미치는 영향을 여러 환경요인과 비교 분석하고자 하였다.

재료 및 방법

여수 주변해역(여자만, 가막만, 여수 해만, 붓돌바다)에서

표층 미세플라스틱과 동물플랑크톤 조사를 위해 뉴스톤 네트(HYDRO-BIOS Co. Germany)를 이용해 총 10개의 정점에서 2015년 5월 12일부터 14일까지 총 3일간 실시하였다(Fig. 1).

뉴스톤 네트는 가로 0.3 m와 세로 0.18 m 직사각형 망구에 망목 300 μm 의 원추형 그물을 설치해 수표층을 채집할 수 있도록 설계되어 있다. 동물플랑크톤 채집은 수표성 동물플랑크톤의 특성을 고려해 선박 뱃머리 물결에 영향을 받지 않도록 뉴스톤 네트를 선박 측면에 설치하였으며, 평균 예망 속도는 2.5 knot로 약 20분간 표층 채집하였다. 동물플랑크톤의 정량분석을 위하여 유량계(HYDRO-BIOS Co., Germany)를 뉴스톤 네트 입구에 부착하여 여과 해수량을 측정하였다. 채집된 시료는 선상에서 중성 포르말린을 이용하여 최종농도 5%가 되도록 고정하였다.

채집된 동물플랑크톤을 종 수준까지 동정하기 위하여 해부현미경(Nikon SMZ645, Japan)을 주로 사용하였다. 그러나 종 동정할 때 보다 세밀한 관찰이 필요한 경우 종 동정에 필요한 부분을 해부, 슬라이드 표본을 만들어 고배율 복합현미경(Nikon ECIPSE E200, Japan)으로 확인한 후 종을 특정하였다.

동물플랑크톤과 미세플라스틱의 분리는 중력에 의한 자유낙하 방법(Collignon *et al.* 2012)에 따라 실시하였다. 즉, 눈금이 달린 1,000 mL 매스실린더에 채집된 시료를 넣고 잘 혼합한 후 자유 낙하시킨다. 24시간이 경과하면 동물플랑크톤은 아래로 플라스틱은 표층으로 떠오르게 된다. 이때 떠오른 플라스틱 조각을 뽑아낸 후 5 mm 이상은 제거하고 5 mm 이하의 것만 해부현미경(Nikon SMZ645, Japan)을 통해 계

수하였다. 이렇게 분리된 미세플라스틱과 동물플랑크톤은 건조기(KS/VS-1202D4N, VISION SCIENTIFIC Co., Korea)를 이용해 60°C에서 24시간 건조시켰다. 이후 정밀저울(DE/CP-225D, SARTORIUS, Germany)을 통해 건조중량을 측정하였다. 또한 동물플랑크톤은 먹이 습성에 따라 입자식성(Particle Feeder Zooplankton; PFZ)과 육식성(Carnivorous Zooplankton; CZ)으로 구분하였다(Landry 1978; Paffenhofer 1984; Saiz and Kiorboe 1995; Calbet *et al.* 2007; Giesecke and Gonzalez 2008; Zamora-Terol *et al.* 2014). 초기 먹이습성이 잘 알려지지 않은 동물플랑크톤 유생(Zooplankton Larvae; ZL)과 요각류 미성체(Copepodite)는 따로 구분하였다.

동물플랑크톤 군집에 영향을 미칠 수 있는 수온, 엽분, Chlorophyll-*a* 농도(Chl-*a*), 탁도를 형광센서와 탁도계가 부착되어 있는 잠수형 형광광도계(JFE Advantech Co., ASTD 102)를 이용해 측정하였다. 식물플랑크톤은 표층해수 1,000 mL를 플라스틱 표본병에 채수한 다음, 루골 용액으로 2%가 되도록 고정하여, 광분해를 차단하기 위해 알루미늄 호일로 차광하였다. 고정시료는 실험실에서 48시간 정치 침전하는 침전법으로 수 차례 용기를 축소시키면서 최종농도가 10 mL가 되도록 100배 농축하여 검경 시료로 사용하였다. 식물플랑크톤 정량 및 정성분석을 위한 검경 시료는 농축된 시료를 균일하게 희석한 후 1.0 mL를 Sedgwick Rafter Chamber에 취하여 DIC가 장착된 광학현미경(Olympus BX50)으로 100~400 \times 수준까지 동정, 계수하였다(Cupp 1943; Chihara and Murano 1997; Hallegraeff *et al.* 2010; Omura *et al.* 2012). 식물플랑크톤 현존량은 단위체적당 세포수(cells mL⁻¹)로 환산하였다.

환경요인과 동물플랑크톤 관계를 분석하기 위해 Redundancy analysis (RDA)를 사용하였다(CANOCO ver. 4.5). RDA는 변수의 전진선택(forward selection)을 통해 동물플랑크톤 분류군과 가장 밀접하게 관련된 것을 선택하고 그 관련성을 정량화하기 위해 사용되었다(Mialet *et al.* 2011; Vieira 2011). 또한 RDA 분석에 의한 유의성을 보기 위하여 Pearson's Correlation Analysis을 실시하였다(SPSS ver. 23, IBM).

결 과

1. 환경요인

수온은 14.7~17.8°C 범위로, 가막만의 정점 5에서 가장 낮으며, 여자만의 정점 2에서 가장 높았다. 엽분은 31.6~33.2 범위로, 여자만의 정점 2에서 가장 낮았으며, 봇돌바다의 정점 8에서 가장 높았다. Chl-*a* 농도는 0.95~6.69 $\mu\text{g L}^{-1}$

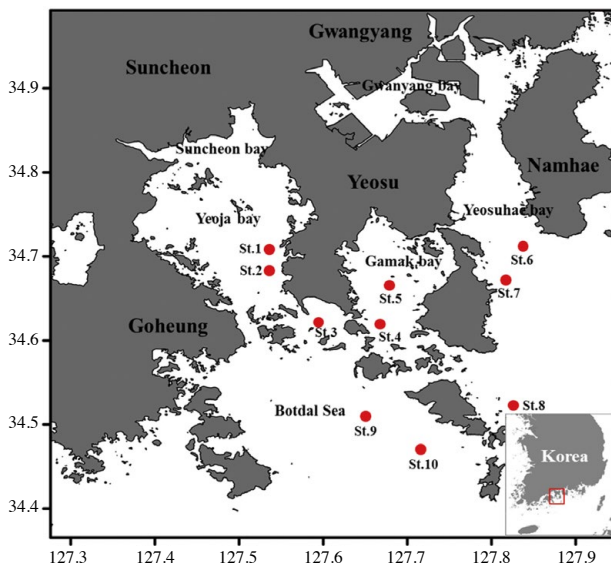


Fig. 1. Map showing the sampling location.

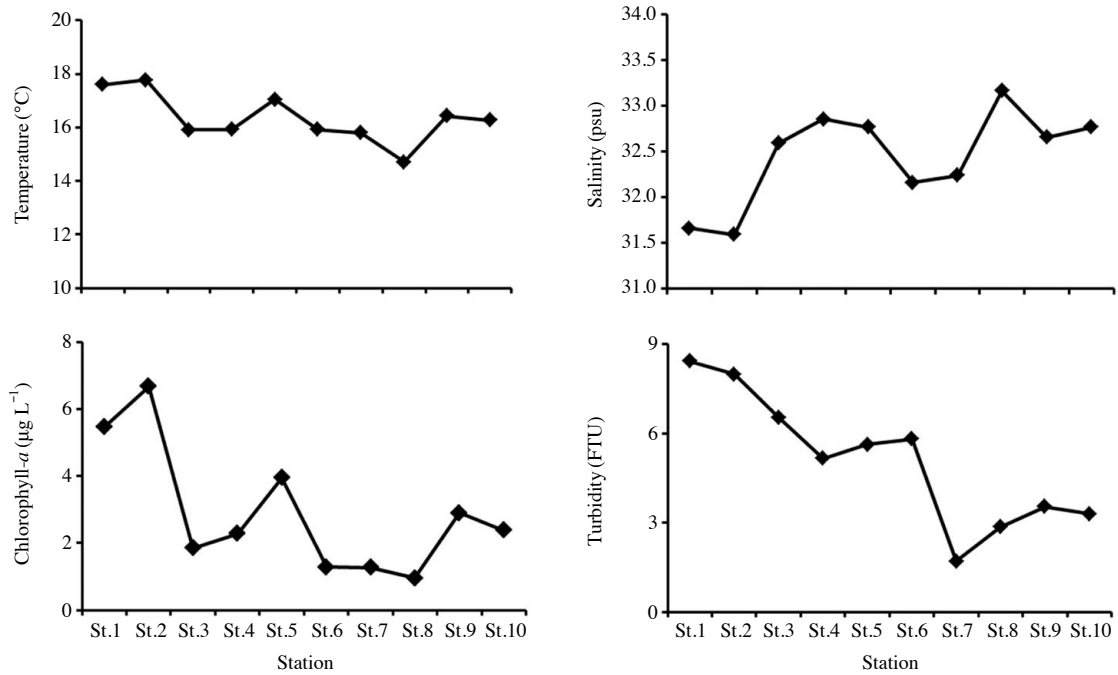


Fig. 2. Environmental factors in the study area.

Table 1. Abundance of phytoplankton (dinoflagellates, diatoms) during study period

	St.1	St.2	St.3	St.4	St.5	St.6	St.7	St.8	St.9	St.10
Dinoflagellates	0.3	0.7	0.1	0	0.4	1.2	0	0.2	7.4	3.7
Diatoms	1.2	1.2	11.2	3,196.8	24.0	285.3	639.7	85.4	4.4	2.3
Total (cells mL ⁻¹)	1.5	1.9	11.3	3,196.8	24.4	286.5	639.7	85.6	11.8	6.0

범위로, 붓돌바다의 정점 8에서 가장 낮으며, 여자만의 정점 2에서 가장 높았다. 탁도의 범위는 1.7~8.4 FTU 범위로, 여수 해만의 정점 7에서 가장 낮으며, 여자만의 정점 1에서 가장 높았다(Fig. 2).

식물플랑크톤 중 와편모조류는 가막만의 정점 4, 여수 해만의 정점 7에서는 출현하지 않았으며, 그 이외의 정점에서는 0.1~7.4 cells mL⁻¹ 범위로 붓돌바다의 정점 9에서 가장 높은 출현 밀도를 보였다. 규조류는 1.1~3196.8 cells mL⁻¹ 범위로 여자만의 정점 1에서 가장 낮은 출현 밀도를, 가막만의 정점 4에서 가장 높은 출현 밀도를 보였다. 평균 세포밀도는 규조류가 와편모조류보다 400배 이상 높았다(Table 1).

2. 미세플라스틱 분포양상

채집된 미세플라스틱의 종류는 스티로폼 조각, 페인트 조각, 섬유 조각 등이었다. 단위면적당 미세플라스틱 조각은 0.0047~0.3470 particle m⁻² 범위로, 여자만의 정점 2에서 가장 낮았으며 여수 해만의 정점 7에서 가장 높았다. 또한 미

세플라스틱의 건조중량은 0.0002~0.18808 mg m⁻² 범위로, 여자만의 정점 2에서 가장 낮았으며 붓돌바다의 정점 9에서 가장 높았다(Fig. 3).

3. 동물플랑크톤 출현양상

동물플랑크톤은 총 26개 분류군이 출현하였으며, 이 중 13종의 요각류가 동정되었다. 이외에 지각류, 모약류, 요각류 미성체, 십각류 유생 등이 출현하였다.

동물플랑크톤 출현개체수는 61~763 indiv. m⁻³로 붓돌바다의 정점 8번에서 가장 낮았으며, 여자만의 정점 1번에서 가장 높았다. 동물플랑크톤 건조중량의 경우 0.73~5.89 mg m⁻³으로 붓돌바다의 정점 8번에서 가장 낮았으며, 가막만의 정점 5번에서 가장 높았다(Fig. 4).

출현한 동물플랑크톤 주요 분류군 중 *Acartia* 속이 전체의 39.02% (*Acartia omorii* 35.6%, *A. hongii* 2.46%, *A. hudsonica* 0.97%)로 우점하였으며, 요각류 미성체 (Copepodite)가 25.63%, *Paracalanus parvus* s. 1.가 23%, *Labidocera* 속이

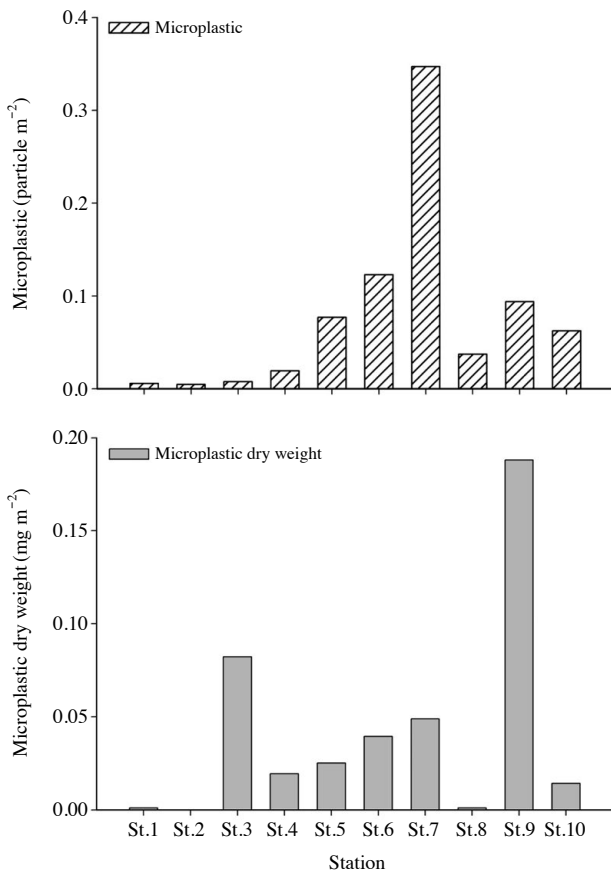


Fig. 3. Number of microplastic particle and microplastic dry weight in the study area.

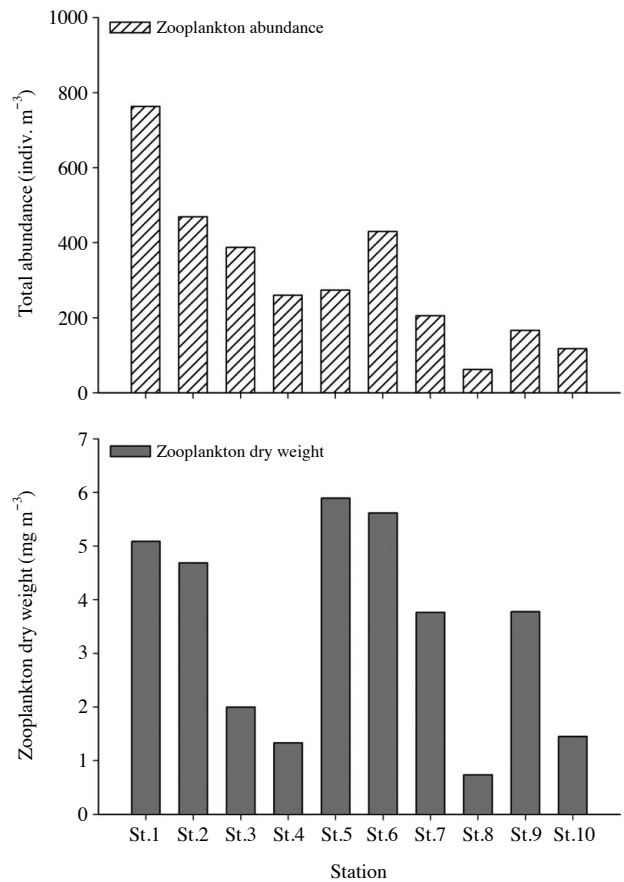


Fig. 4. Zooplankton abundance and dry weight.

4.84% (*Labidocera euchaeta* 4.37%, *L. rotunda* 0.47%), 요각류를 제외한 동물플랑크톤 각종 유생이 3.29% (Decapod larvae 1.84%, Cirriped larvae 1.38%, Polychaeta larvae 0.04%, *Ophiopluteus* larvae 0.02%, Gastropoda larvae 0.01%), *Corycaeus* spp.가 2.81%로 나타났다. 그 중 입자식자에 해당하는 요각류 (*A. omorii*, *A. hongii*, *A. hudsonica*, *Ce. abdominalis*, *Ce. tenuiremis*, *C. sinicus*, *P. parvus* s. l.), 지각류 (*Ev. nordmanni*, *Ev. tergestina*, *Po. polyphemoides*), 원생생물 (*Noctiluca* sp.)이 전체의 총 63.07%를, 육식자에 해당하는 요각류 (*L. euchaeta*, *L. rotunda*, *Corycaeus* spp., *Oithona* spp., *E. pacifica*, *T. derjugini*), 모약류 (*S. crassa*, *S. enflata*), 단각류 (unidentified amphipods)가 전체의 총 8.01%를 차지하였다 (Table 2).

4. 동물플랑크톤과 환경요인과의 관계

동물플랑크톤 군집에 영향을 미치는 환경요인을 알아보기 위해 RDA를 실시하였다. 동물플랑크톤 분류군으로는 입

자식성 동물플랑크톤 (PFZ), 육식성 동물플랑크톤 (CZ), 동물플랑크톤 유생 (ZL), 요각류 미성체 (Codites), 동물플랑크톤 건조중량 (ZDW), 환경요인으로는 수온 (Tem.), 염분 (Sal.), Chl-a 농도 (Chl-a), 탁도 (Turb.), 미세플라스틱 개수 (Plastic), 미세플라스틱 건조중량 (MPDW), 식물플랑크톤은 와편모조류 (Dinoflagellates; Dino)와 규조류 (Diatoms)로 구분하였다 (Table 3).

RDA 결과 제1축과 제2축은 각각 0.88, 0.17의 고유값을 나타냈으며, 제1축과 제2축의 전 분산에 대한 누적 기여율은 89.9%를 나타냈다. 또한 제1축과 제2축에서 8개의 환경요인 (수온, 염분, Chl-a 농도, 탁도, 와편모조류 세포밀도, 규조류 세포밀도, 미세플라스틱 건조중량, 미세플라스틱 개수)과 5개 그룹으로 나눈 동물플랑크톤 (PFZ, CZ, ZL, 요각류 미성체, 동물플랑크톤 건조중량)을 99% 설명하였다 (Table 4). RDA 그래프에서 1축을 기준으로 모든 동물플랑크톤 그룹 (ZL, Copepodites, PFZ, CZ, 동물플랑크톤 건조중량)이 수온, 탁도, Chl-a 농도와 양의 상관성을 보였고, 규조류 및 와편모조류 세포밀도, 염분, 미세플라스틱 개수, 미세플라스틱 건

Table 2. List and abundance of zooplankton during study period

	St.1	St.2	St.3	St.4	St.5	St.6	St.7	St.8	St.9	St.10
<i>Acartia hongii</i>	**	**	**							**
<i>Acartia omorii</i>	***	***	***	***	***	***	***	**	**	**
<i>Acartia hudsonica</i>	*		**					*		*
<i>Calanus sinicus</i>				*						
<i>Centropages abdominalis</i>	*	*		*	*	*	*	*		
<i>Centropages tenuiremis</i>	*						*			
<i>Corycaeus</i> spp.	*	*	**	*	*	*	*	**	*	*
<i>Eurytemora pacifica</i>		*	*		*					
<i>Labidocera euchaeta</i>	**	**	**	*	*		*	*	**	**
<i>Labidocera rotunda</i>	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
<i>Oithona</i> spp.					*					
<i>Paracalanus parvus</i> s. l.	***	***	***	**	**	**	*		**	**
<i>Tortanus derjugini</i>	*					*				
<i>Evadne nordmanni</i>					*		*	*		*
<i>Evadne tergestina</i>	*						*			
<i>Podon polyphemoides</i>						*	*			
<i>Sagitta crassa</i>	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
<i>Sagitta enflata</i>	*	*	*							
Cirreped larvae (nauplii and cypris stage)	*	*	*	*	*	**	*	*	*	*
Decapoda larvae (zoea and mysid stage)	*	*	*	**	*	**	*	*	*	*
Unidentified Amphipods				*						
Unidentified Harpacticoida				*				*		*
<i>Noctiluca</i> sp.			*							
Gastropoda larvae		*								
Ophiopluteus larvae						*				
Polycheata larvae	*									*
Copepodite	***	**	**	**	**	***	**	**	**	**
Total abundance (indiv. m ⁻³)	763.01	468.52	387.07	259.51	273.97	429.95	205.30	61.84	166.26	117.13

Asterisks indicate abundance of zooplankton (*: <10, **: <100, ***: <1000).

Table 3. Integrated data for redundancy analysis

	PFZ	CZ	ZL	Codites	Z-DW	MP	Tem.	Sal.	Chl- <i>a</i>	Turb.	Dino.	Diatoms	M.P-DW
		(indiv. m ⁻³)			(mg m ⁻³)	(particle m ⁻²)	(°C)	(psu)	(µg L ⁻¹)	(FTU)	(× 10 ³ cells L ⁻¹)		(mg m ⁻²)
St.1	431.17	20.74	5.55	233.94	5.09	0.0058	17.6	31.66	5.47	8.43	340	1140	0.00109
St.2	357.89	47.21	11.92	39.43	4.68	0.0047	17.8	31.59	6.69	8.00	700	1240	0.00002
St.3	266.6	48.19	1.05	54.54	2.00	0.0077	15.9	32.59	1.86	6.54	70	11220	0.08221
St.4	168.54	15.07	11.72	49.35	1.33	0.0192	15.9	32.85	2.29	5.16	0	3196800	0.01937
St.5	178.07	16.97	11.58	51.56	5.89	0.0769	17.0	32.76	3.95	5.63	350	23950	0.02517
St.6	265.08	8.62	44.72	85.39	5.62	0.1229	15.9	32.16	1.28	5.82	1200	285300	0.03949
St.7	140.67	7.39	3.86	40.87	3.76	0.347	15.8	32.24	1.27	1.70	0	639700	0.04888
St.8	31.87	14.99	3.78	8.40	0.73	0.0372	14.7	33.16	0.95	2.86	130	85430	0.00112
St.9	80.41	45.65	5.11	26.87	3.78	0.0939	16.4	32.65	2.91	3.54	7360	4430	0.18808
St.10	55.51	25.83	3.63	24.46	1.45	0.0624	16.3	32.77	2.38	3.29	3670	2330	0.01423

The labels are: PFZ (Particle feeder zooplankton), CZ (Carnivorous zooplankton), ZL (Zooplankton larvae), Codites (Copepodite), Z-DW (Zooplankton dry weight), MP (Number of microplastic particle), Tem. (Water temperature), Sal. (Salinity), Chl-*a* (Chlorophyll *a* concentration), Turb. (Turbidity), Dino. (Dino-flagellates), M.P-DW (Microplastic dry weight).

조중량과 음의 상관성을 나타냈다. PFZ, 요각류 미성체, 동물플랑크톤 건조중량은 상대적으로 탁도, 수온, Chl-*a* 농도, 염분과 강한 상관성을 나타냈으며, 미세플라스틱 개수, 규조류 및 와편모조류 세포밀도와와의 상관성은 낮게 나타났다. 동물플랑크톤 유생 (ZL)은 미세플라스틱 건조중량, 와편모조류 세포밀도와 음의 상관성을 보였다. 육식성 동물플랑크톤

(CZ)은 규조류 세포밀도, 미세플라스틱 밀도와 음의 상관성을 보였다. 동물플랑크톤 분류군과 환경요인을 통해 나타난 정점별 특징은 크게 두 개 정점 그룹으로 대별된다. 그룹 1 (정점 1, 2, 3, 6)은 동물플랑크톤 유생 (ZL), 동물플랑크톤 건조중량, 요각류 미성체, 입자식성 동물플랑크톤 (PFZ), 탁도, 수온, Chl-*a*와 연관성이 있으며, 그룹 2 (정점 4, 5, 7, 8, 9, 10)

Table 4. Summary of redundancy analysis between zooplankton and environmental factors

Axes	1	2	3	4	Total variance
Eigenvalues:	0.883	0.017	0.007	0.003	1
Species-environment correlations:	0.985	0.636	0.414	0.527	
Cumulative percentage variance of species data:	88.3	89.9	90.6	90.9	
of species-environment relation:	97.1	99	99.7	100	
Sum of all eigenvalues					1
Sum of all canonical eigenvalues					0.909

Table 5. Pearson's correlation analysis between zooplankton and environment factors

	Plastic	Tem.	Sal.	Chl- <i>a</i>	Turb.	Dino.	Diatoms	M.P-DW
PFZ	-0.14	0.677*	-0.791**	0.571	0.823**	-0.383	0.040	-0.149
CZ	-0.62	0.416	-0.105	0.500	0.399	0.426	-0.317	0.369
ZL	0.02	0.213	-0.284	0.152	0.269	-0.071	0.226	-0.218
Codites	-0.08	0.604	-0.683*	0.427	0.694*	-0.249	0.050	-0.120
Z-DW	0.19	0.656*	-0.655*	0.502	0.464	-0.006	-0.354	0.042

Asterisks indicate that correlation is significant at the 0.05 (*) and 0.01 (**) levels (2-tailed), respectively.

PFZ (Particle feeder Zooplankton), CZ (Carnivorous Zooplankton), ZL (Zooplankton Larvae), Codites (Copepodite), Z-DW (Zooplankton dry weight), Tem. (Water temperature), Sal. (Salinity), Chl-*a* (Chlorophyll *a* concentration), Turb. (Turbidity), Dino. (Dinoflagellates), M.P-DW (Microplastic dry weight).

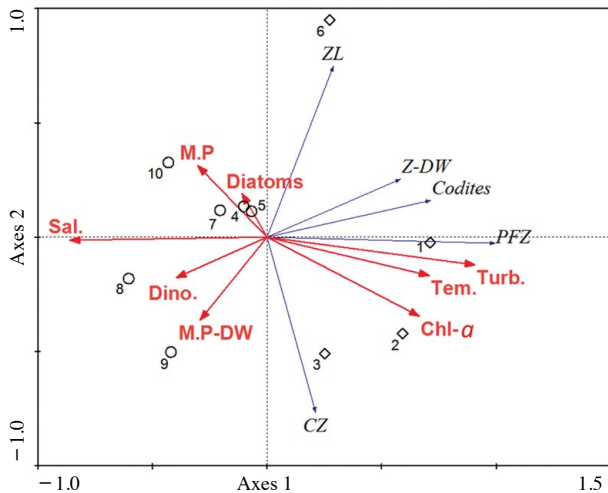


Fig. 5. Redundancy analysis bi-plot for environmental factors (red arrows) and zooplankton taxon (blue arrows). PFZ (Particle feeder zooplankton), CZ (Carnivorous zooplankton), ZL (Zooplankton larvae), Codites (Copepodite), Z-DW (Zooplankton dry weight), M.P (Number of microplastic particle), Tem. (Water temperature), Sal. (Salinity), Chl-*a* (Chlorophyll *a* concentration), Turb. (Turbidity), Dino. (Dinoflagellates), M.P-DW (Microplastic dry weight).

는 규조류 및 와편모조류의 세포밀도, 염분, 미세플라스틱 개수, 미세플라스틱 건조중량과 상관성을 보였다(Fig. 5).

동물플랑크톤 군집에 미치는 환경요인의 유의성 검증을 실시한 결과 입자식성 동물플랑크톤(PFZ)은 수온, Chl-*a* 농도, 염분, 탁도와 의미 있는 관계($p < 0.05$ 또는 $p < 0.01$)를

보인 반면, 미세플라스틱과는 관련성이 낮았다($p = 0.69$). 요각류 미성체는 탁도와 유의한 관련성을 보였고($p < 0.05$), 동물플랑크톤 건조 중량은 수온, 염분과 밀접한 관계를 보였다($p < 0.05$). 그러나, 육식성 동물플랑크톤(CZ)과 동물플랑크톤 유생(ZL)은 어떠한 환경요인과의 상관성을 나타내지 않았으며, 특히 미세플라스틱은 동물플랑크톤 어느 항목과도 유의하지 않았다($p = 0.06$) (Table 5).

고찰

본 연구지역에서 출현한 동물플랑크톤은 13종의 요각류 이외에 지각류, 모약류, 요각류 미성체, 십각류 유생 등이었다. 요각류는 해역간 다소 차이는 보이지만 일반적으로 *Acartia omorii*가 가장 우점하였고, *Paracalanus parvus* s. l., *Labidocera euchaeta*, *Corycaeus* spp. 순으로 우점하였다. 이러한 출현 경향은 *L. euchaeta*를 제외하면 기존 연구와 비슷하였다(Soh *et al.* 2002; Moon *et al.* 2010). 본 연구에서 *L. euchaeta*의 우점적 출현은 이 종의 생태학적 특성 때문일 수 있다. 즉 *L. euchaeta*는 온대지역의 표층수(0~30 cm)에 서식하는 진정수표종으로(Sherman 1963), 소음이나 진동에 매우 민감하게 반응한다. 그러므로 선박으로 행해진 수직이나 경사채집에 의한 방법으로는 이 종을 효과적으로 채집할 수 없으며, 이는 결국 진정수표종의 생물량을 과소평가하게 되는 원인일 수 있다.

동물플랑크톤과 거의 동일한 크기를 가진 미세플라스틱

은 수표층에서 동물플랑크톤의 생물량보다 많이 분포하지만 (Moore *et al.* 2001; Lima *et al.* 2014), 식물플랑크톤, 유기쇄설물 등과 크기가 잘 구별되지 않을 뿐만 아니라, 일부는 부착 조류의 부착기저로 이용되어 (Boerger *et al.* 2010) 동물플랑크톤 및 치어 등에 의해 잘못 먹이화되기도 한다 (Cole *et al.* 2013). 또한 미세플라스틱을 먹이로 삼는 상위영양단계 생물들은 이를 섭취하면서 소화가 되지 않는 만큼 체내에 잔류하면서 이 생물들의 생존에 영향을 준다 (Collignon *et al.* 2012). 여수 연안에서 채집된 미세플라스틱의 종류는 스티로폼 조각, 페인트 조각, 섬유 조각 등으로 단위면적당 미세플라스틱 개수는 평균 $0.432 \text{ particle m}^{-2}$, 건조중량은 평균 0.233 mg m^{-2} 범위를 보였다. 이와 같은 미세플라스틱의 양은 우리나라 진해-거제만 (Kang *et al.* 2015), 북태평양 환류 지역 (Moore *et al.* 2001), 캘리포니아 남부 해안 (Moore *et al.* 2002), 남캘리포니아 산타모니카 만 (Lattin *et al.* 2004) 보다 낮은 수준이지만, 대서양, 카리브해, 메인 만, 지중해보다는 10~400배 높은 값이다 (Law *et al.* 2010; Collignon *et al.* 2012).

동물플랑크톤의 잠재적 섭식물로서 미세플라스틱이 동물플랑크톤 군집에 미치는 영향을 파악하기 위해 동물플랑크톤을 5개 그룹으로 나누어 미세플라스틱을 포함한 환경요인과 상관관계를 실시한 결과 미세플라스틱 (조각 개수, 건조중량)과 동물플랑크톤은 유의미한 상관성을 보이지 않았고 ($p=0.69$), 오히려 수온, 염분, 탁도, Chl-*a* 농도와 유의한 상관성을 보였다 ($p<0.05$). 이는 동물플랑크톤 분류군 중 가장 많은 개체수가 출현한 입자식성 동물플랑크톤 (PFZ)은 기계적으로 여과하여 먹이를 섭식하는 것이 아니라 크기나 영양가가 다른 개별 입자를 선택하기 위해 복잡하고 능동적인 섭식행위를 할 수 있을 뿐만 아니라 (Price 1988), 입자크기에 따라 선택적으로 섭식할 수 있고, 먹이 입자의 포획 효율을 높이고 비 먹이 입자를 피하기 위한 섭식과정을 통해 비 먹이 입자인 플라스틱 조각을 섭식하지 않는다 (Donaghay and Small 1979)는 기존의 연구결과와 일치한다. 한편 Huntley *et al.* (1983)는 동물플랑크톤 중 요각류 *Calanus pacificus*는 먹이를 선택하는데 있어 여과하여 섭식하기 쉬운 규조류와 와편모조류를 먹이로 선호하지만, 사이즈가 작은 플라스틱 비드도 같이 섭식하여 미세플라스틱이 섭식에 영향을 줄 수 있음을 보였다. Cole *et al.* (2013)은 동물플랑크톤이 미세플라스틱을 섭식할 뿐만 아니라 이에 따른 부작용도 함께 나타나며, 나아가 군집구조에도 영향을 미칠 수 있다고 기술하였다. Setälä *et al.* (2014)은 동물플랑크톤 주요 분류군인 곤쟁이류, 요각류, 지각류, 윤충류, 다모류 유생, 섬모충류 등이 $10 \mu\text{m}$ 형광물질로 표시된 폴리스티렌 수지로 만들어진 구슬을 먹이로 섭식하는지에 관한 관찰 실험을 통해 다모류 유

생이 가장 많은 구슬을 섭식하였으며, 그 다음 12시간 내에 곤쟁이류와 요각류가 구슬을 먹는 것을 확인하였으며, 그 다음 3시간 후에는 곤쟁이류가 구슬을 먹은 요각류를 섭식하는 것을 관찰하였다. 하지만 후자의 두 연구 모두 실험실에서 제한된 공간과 먹이 환경에서, 미세플라스틱을 지속적으로 노출시켜 얻어진 결과로 먹이자원이 풍부한 연안에서는 미세플라스틱이 먹이로서 효용성이 떨어질 수 있다. 그러나 먹이요소가 제한되는 외양에서 미세플라스틱의 체류시간이 더 길어지고, 이를 미생물이 기질로 이용한다면 미세플라스틱이 동물플랑크톤에 먹이로 중요할 수 있으며, 이는 결국 먹이사슬을 통해 생태계에 악영향을 끼칠 수 있을 것이다 (Zettler *et al.* 2013).

그럼에도 불구하고 본 연구에서 채집된 미세플라스틱은 $300 \mu\text{m}$ 이상의 크기로 동물플랑크톤이 먹이로서 이용하기에는 적절하지 않을 수 있을 뿐만 아니라, 그 섭식 여부를 판단할 수 있는 분석도 실시되지 않았다. 한편 기존 연구는 동물플랑크톤 섭식 습성을 고려하지 않고 섭식 여부만을 판단하고 있어, 미세플라스틱이 동물플랑크톤에 미치는 영향이 과대평가될 수 있는 문제점을 안고 있다. 따라서 향후 동물플랑크톤 먹이로서 중요할 수 있는 $300 \mu\text{m}$ 이하 크기의 미세플라스틱에 대한 연구와 함께 동물플랑크톤 먹이 습성에 따른 미세플라스틱 섭식 여부를 조사할 필요가 있다. 또한 동물플랑크톤 군집에 미치는 미세플라스틱의 영향 평가를 위해서는 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.

적 요

동물플랑크톤과 미세플라스틱과의 상관성을 파악하기 위해 2015년 5월 12일부터 14일까지 여수근해(여자만, 가막만, 여수해만, 봇돌바다) 총 10개의 정점에서 수표성 동물플랑크톤과 미세플라스틱을 채집하였다. 동물플랑크톤은 요각류 13종을 포함해 총 26개의 분류군이 출현하였고, 그 중 요각류가 가장 높은 비율을 차지하였다. 동물플랑크톤의 출현 개체수는 $61\sim 763 \text{ indiv. m}^{-3}$, 미세플라스틱은 $0.0047\sim 0.3471 \text{ particle m}^{-2}$ 의 범위였다. 미세플라스틱은 주로 스티로폼, 페인트 조각, 섬유 조각 등이 발견되었다. *Acartia omorii*, *Paracalanus parvus* s. l., *Labidocera euchaeta*, *A. hongii*, 십각류 유생, 따개비 유생이 우점적으로 출현하였다. 동물플랑크톤을 먹이식성에 따라 입자식성 동물플랑크톤과 육식성 동물플랑크톤으로 구분하였고, 동물플랑크톤 건조중량도 측정하였으며, 동물플랑크톤 유생은 따로 구분하였다. 이밖에 측정된 환경요인으로는 수온, 염분, 탁도, Chl-*a* 농도, 식물플랑크톤(규조류, 와편모조류) 밀도를 조사하였다. 동물플랑크톤과

미세플라스틱과의 상관성을 분석하기 위해 RDA를 실시한 결과 동물플랑크톤은 미세플라스틱보다 다른 환경요인인 수온, 염분, 탁도, Chl-*a* 농도와 밀접한 상관성을 나타냈다. 이는 연안해역과 같이 먹이가 풍부한 해역에서 미세플라스틱이 동물플랑크톤 주요 먹이로서 과대평가되어 있음을 시사할 수 있다.

사 사

이 연구를 수행하기 위하여 채집에 도움을 준 전남대학교 실습선 청경호 선원 분들과 해양실습에 참석한 학생들께 경의를 표합니다.

REFERENCES

- Allsopp M, A Walters, D Santillo and P Johnston. 2006. Plastic debris in the world's oceans. UNEP Report. p. 44.
- Arthur C, J Baker and H Bamford. 2009. In proceedings of the international research workshop on the occurrence, effects and fate of microplastic. Marine Debris. NOAA. p. 530.
- Barnes DKA, F Galgani, RC Thompson and M Barlaz. 2009. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. Philos. Trans. R. Soc. B-Biol. Sci. 364:1985-1998.
- Barreiros JP and J Barcelos. 2001. Plastic ingestion by a leatherback turtle *Dermochelys coriacea* from the Azores (NE Atlantic). Mar. Pollut. Bull. 42:1196-1197.
- Boerger C, G Lattin, SL Moore and CJ Moore. 2010. Plastic ingestion by planktivorous fishes in the North Pacific Central Gyre. Mar. Pollut. Bull. 60:2275-2278.
- Browne MA, A Dissanayake, TS Galloway, DM Lowe and RC Thompson. 2008. Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel, *Mytilus edulis* (L.). Environ. Sci. Technol. 42:5026-5031.
- Calbet A, F Carlotti and R Gaudy. 2007. The feeding ecology of the copepod *Centropages typicus* (Kroyer). Progr. Oceanogr. 72:137-150.
- Chihara M and M Murano. 1997. An Illustrated Guide to Marine Plankton in Japan. Tokai Univ. Press, Tokyo. p. 1547.
- Choi YK, SC Eun and YH Lee. 2005. Distributions of temperature and salinity in relation to ebb, turn of tide and flood of the Bottol Bada in July, 2004. J. Environ. Sci. Int. 14:165-175.
- Cole M, P Lindeque, E Fileman, C Halsband, R Goodhead, J Moger and TS Galloway. 2013. Microplastic ingestion by zooplankton. Environ. Sci. Technol. 47:6646-6655.
- 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.
- Crimmins BS, PD Brown, DP Kelso and GD Foster. 2002. Bioaccumulation of PCBs in aquatic biota from a tidal freshwater marsh ecosystem. Arch. Environ. Contam. Toxicol. 42:396-404.
- Cupp EE. 1943. Marine plankton diatoms of the west coast of north America. Bull. Scripps Inst. Oceanogr. Univ. California 5:1-237.
- Desforges JP, M Galbraith and PS Ross. 2015. Ingestion of microplastics by zooplankton in the Northeast Pacific Ocean. Arch. Environ. Contam. Toxicol. 69:320-330.
- Donaghay PL and F Small. 1979. Food selection capabilities of the estuarine copepod *Acartia clause*. Mar. Biol. 52:137-146.
- Eriksen M, LCM Lebreton, HS Carson, M Thiel, CJ Moore, JC Borerro, F Galgani, PG Ryan and J Reisser. 2014. Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea. Plos One 9:1-15.
- Franeker JA, C Blaize and J Danielsen. 2011. Monitoring plastic ingestion by the northern fulmar *Fulmarus glacialis* in the North Sea. Environ. Pollut. 159:2609-2615.
- Giesecke R and EH Gonzalez. 2008. Reproduction and feeding of *Sagitta enflata* in the Humboldt Current system off Chile. ICES J. Mar. Sci. 65:361-370.
- Hallegraeff GM, CJS Bolch, DRA Hill, I Jameson, JM LeRoi, A McMinn, S Murray, MF de Salas and K Saunders. 2010. Algae of Australia: Phytoplankton of Temperate Coastal Waters. CSIRO Publishing, Canberra. p. 432.
- Hirai H, H Takada, Y Ogata, R Yamashita, K Mizukawa, M Saha and ER Zettler. 2011. Organic micropollutants in marine plastics debris from the open ocean and remote and urban beaches. Mar. Pollut. Bull. 62:1683-1692.
- Huntley ME, KG Barthel and JL Star. 1983. Particle rejection by *Calanus pacificus*: discrimination between similarly sized particles. Mar. Biol. 74:151-160.
- Kang JH, OY Kwon and WJ Shim. 2015. Potential threat of microplastics to zooplanktivores in the surface waters of the Southern Sea of Korea. Arch. Environ. Contam. Toxicol. 69:340-351.
- Landry MR. 1978. Predatory Feeding Behavior of a Marine Copepod, *Labidocera trispinosa*. Limnol. Oceanogr. 23:1103-1113.
- Lattin GL, CJ Moore, AF Zeller, SL Moore and SB Weisberg. 2004. A comparison of neustonic plastic and zooplankton at different depths near the southern California shore. Mar.

- Pollut. Bull. 49:291–294.
- Law K, S Moret-Ferguson, N Maximenko, G Proskurowski, E Peacock, J Ganfer and C Reddy. 2010. Plastic accumulation in the North Atlantic Subtropical Gyre. *Science* 329: 1185–1188.
- Lima ARA, MF Costa and M Barletta. 2014. Distribution patterns of microplastics within the plankton of a tropical estuary. *Environ. Res.* 132:146–155.
- Mialet B, J Gouzou, F Azemar, T Maris, C Sossou, N Toumi, S Van Damme, P Meire and M Tackx. 2011. Response of zooplankton to improving water quality in the Scheldt estuary Belgium. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 93:47–57.
- 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.
- Moore CJ, SL Moore, MK Leecaster and SB Weisberg. 2001. A comparison of plastic and plankton in the North Pacific central gyre. *Mar. Pollut. Bull.* 42:1297–1300.
- Moore CJ, SL Moore, SB Weisberg, GL Lattin and AF Zellers. 2002. A comparison of plastic and zooplankton abundance in southern California's coastal waters. *Mar. Pollut. Bull.* 44:1035–1038.
- Omura T, M Iwataki, VM Borja, H Takayama and Y Fukuyo. 2012. Marine Phytoplankton of the Western Pacific. *Kouseisha Kouseikaku*, Tokyo. p. 160.
- Paffenhofer GA. 1984. Does *Paracalanus* feed with a leaky sieve? *Limnol. Oceanogr.* 29:155–160.
- Pichel WG, JH Churnside, TS Veenstra, DG Foley, KS Friedman, RE Brainard and P Clemente-Colon. 2007. Marine debris collects within the North Pacific subtropical convergence zone. *Mar. Pollut. Bull.* 54:1207–1211.
- Price HJ. 1988. Feeding mechanisms in marine and freshwater zooplankton. *Bull. Mar. Sci.* 43:327–343.
- Ryan PG, AD Connell and BD Gardner. 1988. Plastic ingestion and PCBs in seabirds: Is there a relationship? *Mar. Pollut. Bull.* 19:174–176.
- Saiz E and T Kiorboe. 1995. Predatory and suspension feeding of the copepod *Acartia tonsa* in turbulent environments. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 122:147–158.
- SCOR-UNESCO. 1966. Determination of photosynthetic pigments. *Monogr. Oceanogr. Methodology* 1:11–18.
- Setälä O, V Fleming-Lehtinen and M Lehtiniemi. 2014. Ingestion and transfer of microplastics in the planktonic food web. *Environ. Pollut.* 185:77–83.
- Sherman K. 1963. Pontellid copepod distribution in relation to surface water types in the central North Pacific. *Limnol. Oceanogr.* 8:214–227.
- Soh HY, IT Lee, YH Yoon, SD Choi, SN Lee, MI Han and WB Lee. 2002. Species composition and occurrence patterns of zooplankton in Gamag Bay. *Korean J. Environ. Biol.* 20: 118–129.
- Vieira NBA. 2011. Spatial and temporal variability of water quality and zooplankton in an artisanal salina. *J. Sea Res.* 65:293–303.
- Wright SL, RC Thompson and TS Galloway. 2013. The physical impacts of microplastics on marine organisms: a review. *Environ. Pollut.* 178:483–492.
- Yeosu Regional Office of Oceans and Fisheries. 2016. <http://yoesu.mof.go.kr>.
- Zamora-Terol S, DA Mckinnon and E Saiz. 2014. Feeding and egg production of *Oithona* spp. in tropical waters of North Queensland, Australia. *J. Plankton Res.* 36:1047–1059.
- Zettler ER, TJ Mincer and LAA Zettler. 2013. Life in the “plastisphere”: microbial communities on plastic marine debris. *Environ. Sci. Technol.* 47:7137–7146.

Received: 14 November 2017

Revised: 22 February 2018

Revision accepted: 25 February 2018