

제주도 남부 사계리 연안 저서무척추동물 출현양상 및 군집구조 특성 (2016–2023)

고준철* · 김보연¹ ·곽정현 · 김민선 · 김지현 · 조운찬² · 이관철³

국립수산과학원 아열대수산연구소, ¹국립수산과학원 해조류연구소, ²(주)챌린저, ³가을파도

Occurrence Patterns and Community Structure of Macrobenthic Invertebrates in the Coastal Waters of Sagye-ri, Jeju Island, Korea from 2016 to 2023

Jun-Cheol Ko*, Bo-Yeon Kim¹, Jung-Hyun Kwak, Min-Sun Kim, Ji-Hyun Kim, Woon-Chan Jo² and Kwan-Cheol Lee³

Subtropical Fisheries Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Jeju 63068, Republic of Korea

¹Seaweed Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Haenam 59002, Republic of Korea

²Challenger Co., Ltd., Jeju 63072, Republic of Korea

³Gaupado, Jeju 63070, Republic of Korea

Here, we aimed to determine and compare the community structures of macrobenthic invertebrates in the coastal waters of Sagye-ri in the southern part of Jeju Island from 2016 to 2023. In total, 461 species were identified in this study. Mollusks comprised 238 species (51.6%), arthropods 68 (14.8%), Poriferans 45 (9.8%), Echinodermata 31 (6.7%), Bryozoans 24 (5.2%), Annelida 24 (5.2%), and others, including Cnidarians 19 (4.1%). The density and biomass were estimated to be 188 ind./m² and 1,017.4 gwwt/m², respectively. Gastropoda was the most dominant taxon in terms of abundance (87 ind./m²) and number of species. Meanwhile, Gastropoda was predominant in biomass (321.7 gwwt/m²). The dominant species of Gastropoda, Crustacea, Ascidiacea and Stellerioidea were *Bittium alutaceum*, *Perampithoë* sp., *Herdmania monus*, *Bittium variegatum*, *Ophiomastix mixta* Lütken, and *Bittium glareosum* at 5–20 m. Based on cluster analysis, the study area was divided into two groups. The annual biodiversity, evenness, and richness index appeared as follows: H'=3.381-4.458, E'=0.672-0.838, R=16.706-25.021. The dominance index was the highest in 2017 and lowest in 2019.

Keywords: Macrobenthic invertebrates, Community structure, Jeju Island, Climate change, Subtropical waters

서론

제주도 남부 연안은 가파른 수직 및 수평 암반 경사에 따라 수심 변화가 큰 해저지형을 형성하고 있어 외해수와 연안수 사이의 활발한 혼합으로 기초생산력이 높고(Pang and Kim, 1993), 동중국해에서 북상하는 대마난류수의 직접적인 영향을 받아 연중 수온이 높게 형성된다(Kim and Rho, 1994). 또한, 전 세계 기후변화에 따라 열대 및 아열대 해역에서 서식하는 해양생물들이 대마난류수에 편승되어 제주도 연안에 유입이 지속되고

있으며, 이로 인해 제주연안의 해양생물 종다양성이 높게 나타난다(Choi and Lee, 2010; Kim and An, 2010). 저서무척추동물 군집은 시·공간적으로 환경변화에 쉽게 반응하면서 복잡하고 다양한 생물군집 특성을 나타내고, 그 해역의 환경과 건강도를 평가하는 지표로써 이용되며, 해양생태계 변화를 이해하기 위한 중요한 위치를 차지하고 있다. 또한, 개체밀도와 생물량이 풍부하여 먹이사슬을 연결하는 에너지 전달자 역할을 수행하며, 이를 먹이원으로 이용하는 유영생물들의 생물다양성과 풍도 변화에 영향을 미칠 수 있다(Cohen et al., 1982; Thouzeau

*Corresponding author: Tel: +82. 64. 750. 4375 Fax: +82. 64. 743. 5883

E-mail address: kjc3410@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.2025.0732>

Korean J Fish Aquat Sci 58(6), 732-756, December 2025

Received 9 September 2025; Revised 14 October 2025; Accepted 18 October 2025

저자 직위: 고준철(연구사), 김보연(연구사), 곽정현(연구사), 김민선(연구원), 김지현(연구원), 조운찬(연구원), 이관철(연구원)

et al., 1991; Paik and Yun, 2000). 조하대 저서무척추동물은 해조류에 의해서 제공되는 부착기질이나 공간에서 서식하며, 해조류를 기반으로 서식공간을 활용하는 다양한 해양생물이 모여 들게 된다. 제주연안 조하대는 해조류가 부착된 암반지형을 기반으로 연체동물, 절지동물 및 자포동물의 군집밀도가 높게 나타나며(Ko et al., 2011), 엽상해조류와 감태, 모자반 등 대형 갈조류의 부착기에서 소형 복족류 및 다모류 등 다양한 저서동물이 서식하게 된다(Park et al., 2014). 그러나, 최근, 제주도 연안의 해조류 서식양상은 대형 갈조류의 감소와 유·무절 산호조류의 증가로 인해 암반 기반구조가 해조류 기반에서 산호류 기반으로 변화하고 있으며(Hwang et al., 2017, Kim et al., 2023), 특히, 제주도 남부 연안을 중심으로 암반 부착생물 중 산호충류(그물코돌산호, 빛단풍돌산호 등)의 서식면적이 빠르게 확산되고 있다. 이러한 측면에서 제주도 연안에서 보고된 과거의 연구들과 현재의 저서생물 군집양상은 다르게 나타날 것이며, 제주연안의 아열대화에 따라 저서생태계 군집구조의 다양한 변화가 예상되고 있다.

제주도 연안은 온대와 아열대성 해양생물들이 다양하게 서식하고 있으며 우리나라 연안 중에서도 종다양성이 매우 높게 나타나 과거부터 저서생물 군집구조의 연구가 활발히 진행되어 왔다(Lee and Jwa, 1988; Lee and Hyun, 2002; Yang et al., 2007; Ko et al., 2011, 2016; Kim et al., 2016), 그러나, 앞선 연구들은 기후변화에 따른 해양생태계 변화가 인지된 초입 시기의 연구들이 대부분이며, 단기간에 수행된 결과들로, 장기간에 걸친 환경변화 즉, 수온상승으로 인한 저서생물상 변화를 파악하기에는 기초자료가 부족하다. 따라서, 본 연구는 8개년 동안 제주도 남부연안의 저서생물상 분포실태를 조사하여 출현종의 서식특성과 각 분류군에 대한 연도별, 계절별 및 수심별 군집구조 특성을 파악해 기후변화에 따른 해양생태계 군집구조 장기 변화에 대한 과학적 기초자료를 제공하고자 한다.

재료 및 방법

제주도 남부 사계리 연안 조하대에 분포하는 저서동물 군집구조 파악하기 위해 2016년부터 2023년까지 8개년 동안 분기별(2, 5, 8, 11월) 잠수조사를 실시하였다(Table 1, Fig. 1).

각 정점별 해양환경(수온, 염분) 조사는 YSI (6600-V2)를 이용하여 측정하였고, 수중잠수 조사는 고정된 5 m, 10 m, 20 m 층에서 50×50 cm 방형구를 이용하여 각 수심별 3회 반복 채집

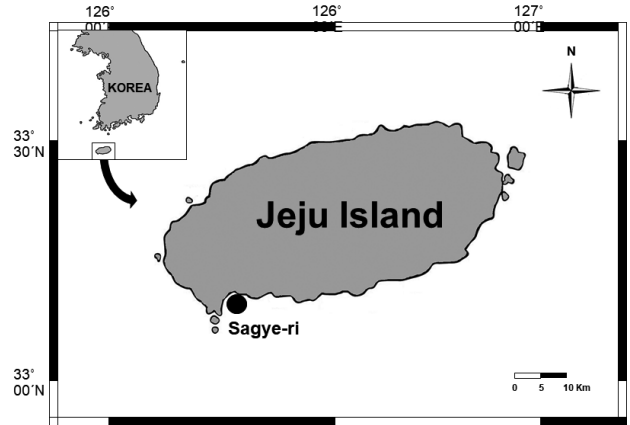


Fig. 1. A map of study site in the coastal waters of Sagye-ri, southern part of in Jeju Island from 2016 to 2023.

하였다. 방형구내 대형 저서동물은 끌칼 등을 이용하여 부착기질에 탈락 후 채집망에 넣고, 해조류 속에 서식하는 소형 저서동물들은 해조류 전체를 채집하여 10% 해수 포르말린 수용액으로 고정하여 실험실로 운반하였다. 채집된 시료는 확대경과 해부현미경을 이용하여 분류·동정하였고, 출현종의 크기와 무게는 0.1 mm, 0.1 g까지 측정하였다. 시료 동정은 출현 동물문별로 연체동물(Okutani and Habe, 1990; Choe, 1992; Nishimura, 1995), 절지동물의 십각류(Dai and Yang, 1991; Farfante and Kensley, 1997)의 연구를 참고하였고, 유사출현종의 세부 동정 방법 등은 Hong (2006), 각 종들의 분류체계는 한국동물분류학회(The Korean Society of Systematic Zoology, 1997) 결과를 근거로 실시하였다. 분석된 자료들은 McNaughton (1967)의 군집우점도(dominance index)를 이용하여 각 수심별로 방형구 면적 당 총 개체수를 참고하여 우점도를 계산하였고, 종다양성 분석은 Shannon and Weaver (1949)의 종다양도지수(species diversity index H'), Pielou (1969)의 균등도지수(E')와 Margalef (1958)의 종풍도지수(R)를 사용하였다. 연도별 우점양상에 기여한 종의 분석은 K-dominance 곡선을 이용하였고(Lambshead et al., 1983), 연도별로 출현한 종의 생체량 결과에 따라 유사도(similarity)를 분석하였으며(Bray and Curtis, 1957), 그룹 간 유의차는 SIMPROF (similarity profile) test로 검정하였다. 그룹 간 유의차를 확인 후 SIMPER (similarity percentage) 분석으로 비유사도(dissimilarity)에 기여하는 종을 파악하였고, 군집유사도 분석은 PRIMER version 6 (Clarke and Gorley, 2006)를 이용하여 2016년부터 2023년까지 분류군별 출현 종 목록은 부록 Table A1에 나타났다.

결 과

해양환경

2016년부터 2023년까지 계절별, 수심별로 조사된 저층 수

Table 1. Latitude, longitude of sampling stations and depth of coastal waters in Jeju Island

Study area	Depth (m)	Latitude	Longitude
Sagye-ri	5	33° 13'298"	126° 18'394"
	10	33° 13'283"	126° 18'618"
	20	33° 12'982"	126° 19'045"

온, 염분 결과를 Fig. 2에 나타냈다. 연도별 수온·염분 변화는 2016년 14.8–28.9°C, 28.9–35.1 psu (연평균 19.8°C, 33.7 psu), 2018년 15.1–25.1°C, 33.3–35.1 psu (연평균 20.3°C, 34.6 psu), 2020년 15.5–26.1°C, 30.1–34.9 psu (연평균 19.6°C, 33.5 psu), 2023년 15.0–26.9°C, 32.7–34.6 psu (연평균 20.4°C, 33.9 psu)로 조사되었다.

연도별(2016–2023) 수온 범위는 13.5–28.9°C로 평균 수온의 경우 2023년에 20.4°C로 가장 높게 나타났고, 2017년에 19.1°C로 가장 낮았으며, 평균 수온 최대값은 2016년에 28.9°C, 최소값은 2022년에 13.5°C로 나타났다. 염분 범위는 28.2–35.8 psu로 평균 염분의 경우 2018년에 34.6 psu로 가장 높고, 2021년에 33.3 psu로 가장 낮았으며, 평균 염분 최대값은 2017년에 35.8

psu, 최소값은 2021년에 28.2 psu로 나타났다. 또한, 조사기간 동안 하계 평균 수온은 25.8°C로 최고 수온은 2021년 28.0°C, 최저 수온은 2018년 24.9°C였고, 동계 평균 수온은 15.1°C로 최고 수온은 2021년 15.9°C, 최저 수온은 2022년 13.6°C였다. 수심별 평균 수온 변화는 5 m 수심에서 20.0°C, 10 m 수심 19.8°C, 20 m 수심 19.5°C로 수심이 깊을수록 수온이 낮게 나타났으며, 5 m 및 20 m 수심에서 0.5°C 수온차를 보였다. 평균 염분 변화는 5 m 수심에서 34.0 psu, 10 m 수심 34.0 psu, 20 m 수심 33.8 psu로 수심이 깊을수록 염분 값이 낮게 나타났다. 조사기간 동안 동계 평균 수온의 추세는 2016년(14.8°C)에 비해 2023년(15.1°C)에 0.3°C 높았고, 하계 평균 수온은 2016년(25.5°C)에 비해 2023년(26.6°C)에 1.1°C 높게 나타났다.

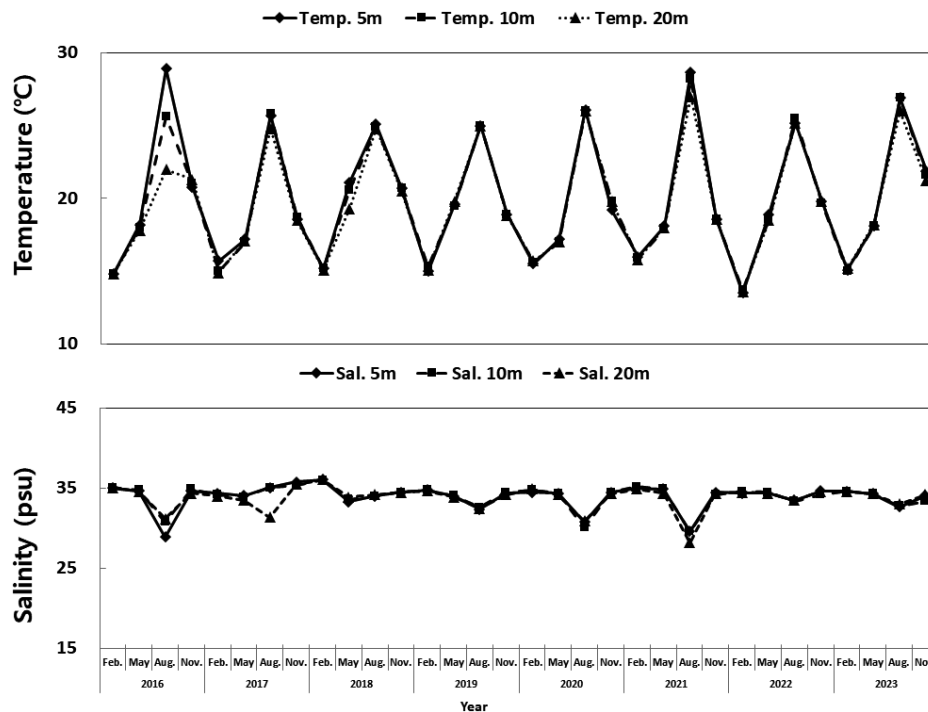


Fig. 2. Annual variations of temperature (°C) and salinity (psu) at study site in the coastal waters of Sagye-ri, southern part of Jeju Island from 2016 to 2023.

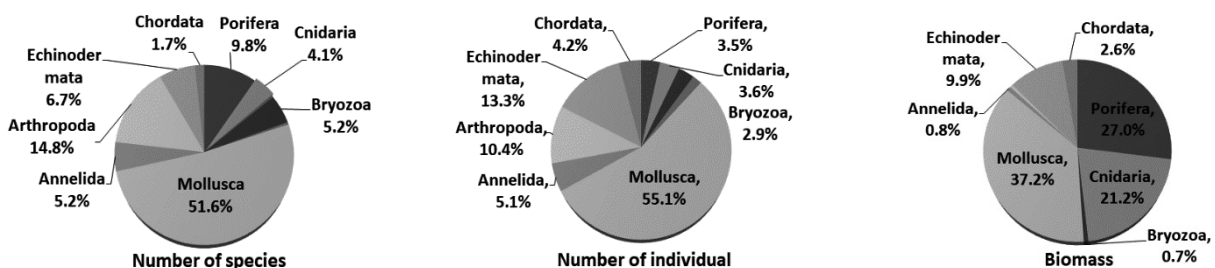


Fig. 3. Species composition, number of individual and biomass of macrobenthic invertebrates in coastal waters of Sagye-ri, southern part of Jeju Island from 2016 to 2023.

종조성

2016년부터 2023년까지 제주도 남부연안에서 조사된 저서 무척추동물은 총 10문 18강 70목 196과 461종으로 나타났다 (Fig. 3). 동물문 군집조성은 연체동물(Mollusca)이 2강 29목 79과 238종, 104개체/m², 378.6 gwwt/m²로 조사된 분류군 중 출현종수(51.6%), 개체수(55.1%) 생체량(37.2%) 모두 높은 비율을 차지하였고, 이 중 복족류가 169종(36.7%), 이매패류 58종(12.6%), 다판류 11종(2.4%)으로 복족류의 점유율이 가장 높

게 나타났다. 절지동물(Arthropoda)은 2강 5목 29과 68종, 20개체/m², 5.3 gwwt/m²로 출현종수 14.8%, 개체수 10.4%, 생체량 0.5%를 차지하였다.

다음은 해면동물(Porifera) 1강 10목 21과 45종(9.8%), 7개체/m² (3.5%), 274.7 gwwt/m² (27.0%), 극파동물(Echinodermata)은 5강 10목 21과 31종(6.7%), 25개체/m² (13.3%), 100.4 gwwt/m² (9.9%), 태형동물(Bryozoa) 2강 2목 13과 24종 (5.2%), 7.5 gwwt/m² (0.7%)로 나타났다. 환형동물(Annelida)은 1강 4목 12과 24종(5.2%), 10개체/m² (5.1%), 7.9 gwwt/m²

Table 2. Annual variations of Species composition, number of individual and biomass of macrobenthic invertebrates in the coastal waters Sagye-ri, southern part of Jeju Island from 2016 to 2023

Phylum	Years								Total (%)
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	
No. of Species	204	153	141	168	202	200	231	219	461 (100.0)
Porifera	26	21	20	15	20	20	18	18	45 (9.8)
Cnidaria	10	11	8	9	7	8	6	7	19 (4.1)
Platyhelminthes	-	-	-	-	-	1	-	1	2 (0.4)
Bryozoa	16	15	12	10	12	10	12	11	24 (5.2)
Sipuncula	1	1	1	1	2	2	2	2	2 (0.4)
Mollusca	94	65	61	77	89	103	119	116	238 (51.6)
Annelida	15	7	9	11	14	11	16	12	24 (5.2)
Arthropoda	21	14	15	23	34	26	33	31	68 (14.8)
Echinodermata	16	14	10	17	16	15	20	16	31 (6.7)
Chordata	5	5	5	5	8	4	5	5	8 (1.7)
Density (ind./m ²)	136	155	121	130	203	229	273	258	188 (100.0)
Porifera	9	6	6	7	7	6	5	6	7 (3.5)
Platyhelminthes	-	-	-	-	-	0.1	-	0.1	0.2 (0.1)
Sipuncula	2	1	2	2	5	8	4	3	3 (1.8)
Mollusca	50	106	68	70	83	119	180	154	104 (55.1)
Annelida	8	3	5	8	18	16	12	8	10 (5.1)
Arthropoda	17	5	6	11	37	26	24	32	20 (10.4)
Echinodermata	24	12	10	18	32	34	32	38	25 (13.3)
Chordata	10	8	12	7	7	5	7	7	8 (4.2)
Biomass (gwwt/m ²)	1,045.6	615.0	839.8	868.4	1,432.2	1,337.3	1,004.3	996.8	1,017.4 (100.0)
Porifera	418.5	193.2	215.9	209.7	411.9	418.9	132.0	197.1	274.7 (27.0)
Cnidaria	200.5	160.8	169.2	150.8	268.1	276.6	270.3	230.3	251.8 (21.2)
Platyhelminthes	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bryozoa	4.0	3.0	5.8	5.2	11.1	10.4	7.7	12.3	7.5 (0.7)
Sipuncula	0.2	0.1	0.2	0.2	0.5	0.9	0.4	0.2	0.3 (0.1)
Mollusca	198.2	143.3	306.1	332.6	543.2	539.3	525.5	440.6	378.6 (37.2)
Annelida	16.6	0.7	19.4	1.5	19.7	1.8	0.8	3.1	7.9 (0.8)
Arthropoda	2.1	8.2	4.2	2.8	12.0	5.6	3.3	4.3	5.3 (0.5)
Echinodermata	145.5	86.5	93.3	133.8	135.2	60.2	47.1	101.3	100.4 (9.9)
Chordata	60.0	19.2	25.8	31.8	30.5	23.6	17.2	7.5	27 (2.6)

(0.8%), 자포동물(Cnidaria)은 2강 5목 13과 19종(4.1%), 215.8 gwwt/m² (21.2%)로 이 중 산호충류가 11종, 213.2 gwwt/m²로 대부분을 차지하였다. 다음으로는 척삭동물(Chordata) 1강 3목 5과 8종(1.7%), 8개체/m² (4.2%), 26.9 gwwt/m² (2.6%), 편형동물(Platyhelminthes) 1강 1목 2과 2종(0.4%), 0.1개체/m² (0.1%), 0.1 gwwt/m² (0.1%), 성구동물(Sipunculida) 1강 1목 1과 2종(0.4%), 3개체/m² (1.8%), 0.3 gwwt/m² (0.1%)의 순으로 나타났다.

연도별 출현양상

연도별로 출현한 분류군의 출현종수, 개체밀도, 생체량에 대한 결과를 Table 2에 나타냈다. 2016–2019년까지 출현종수는 141–204종, 개체밀도 121–155개체/m², 생체량 615.0–1,045.6 gwwt/m² 범위로 조사기간 중 출현종수 및 개체밀도는 2018년, 생체량은 2017년에 가장 낮게 나타났다. 반면, 2020–2023년까지 출현종수는 200–231종, 개체밀도 203–273개체/m², 생체량 996.8–1,432.2 gwwt/m² 범위로 조사기간 중 출현종수 및 개체

Table 3. Seasonal variations of Species composition, number of individual and biomass of macrobenthic invertebrates in the coastal waters Sagye-ri, southern part of Jeju Island from 2016 to 2023

Phylum	Season				Total (%)
	Spring	Summer	Autumn	Winter	
No. of Species	278	269	279	271	461 (100.0)
Porifera	23	32	29	32	45 (9.8)
Cnidaria	14	5	9	13	19 (4.1)
Platyhelminthes	0	0	0	2	2 (0.4)
Bryozoa	14	17	14	19	24 (5.2)
Sipuncula	2	2	2	2	2 (0.4)
Mollusca	144	137	138	126	238 (51.6)
Annelida	17	13	19	14	24 (5.2)
Arthropoda	36	35	42	35	68 (14.8)
Echinodermata	20	23	21	21	31 (6.7)
Chordata	8	5	5	7	8 (1.7)
Density (ind./m ²)	235.4	139.9	176.4	200.7	188 (100.0)
Porifera	6	7	7	7	7 (3.5)
Platyhelminthes	0	0	0	0.2	0.1 (0.1)
Sipuncula	3	3	3	4	3 (1.8)
Mollusca	135	66	102	111	104 (55.1)
Annelida	10	9	8	11	10 (5.1)
Arthropoda	29	19	14	16	20 (10.4)
Echinodermata	20	24	29	27	25 (13.3)
Chordata	15	4	4	8	8 (4.2)
Biomass (gwwt/m ²)	867.5	890.9	1,253.9	1,057.5	1,017.4 (100.0)
Porifera	184.2	256.0	322.5	335.9	274.7 (27.0)
Cnidaria	222.4	238.5	228.3	174.1	251.8 (21.2)
Platyhelminthes	-	-	-	0.1	0.1 (0.1)
Bryozoa	10.4	6.2	5.2	8.0	7.5 (0.7)
Sipuncula	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3 (0.1)
Mollusca	275.4	329.4	525.6	384.0	378.6 (37.2)
Annelida	18.6	0.9	10.7	1.4	7.9 (0.8)
Arthropoda	7.1	2.7	7.0	4.5	5.3 (0.5)
Echinodermata	73.7	51.0	145.2	131.6	100.4 (9.9)
Chordata	75.4	5.8	9.0	17.7	27 (2.6)

밀도는 2022년, 생체량은 2020년에 가장 높게 나타났다. 또한, 2020년 이후부터 출현종수와 개체밀도가 증가한 분류군은 연체동물, 환형동물, 절지동물 및 극피동물이었고, 생체량이 증가한 분류군은 자포동물, 태형동물, 연체동물이었으며, 해면동물의 경우 2016–2019년까지 출현종수 및 개체밀도가 증가 후 2020년부터 감소한 것으로 나타났다. 특히, 조사기간 중 2022년에 출현종수(231종)가 가장 높게 나타났고, 출현종수 증가에 기인한 분류군은 연체동물, 환형동물, 절지동물 및 극피동물이었다. 개체밀도의 경우도 2022년(273개체/m²)에 가장 높았고, 연체동물의 개체밀도가 기타 분류군에 비해 월등히 높게 나타났다. 생체량 변화는 2020년에 1,432.2 gwwt/m²로 조사기간 중 가장 높았고, 생체량 증가에 기인한 분류군은 연체동물, 환형동물, 절지동물 및 극피동물로 나타났다.

계절별 출현양상

2016년부터 2023년까지 8개년 자료를 분석한 각 분류군의 계절별 출현양상을 Table 3에 나타냈다. 출현종수 및 생체량은 춘계, 개체수는 춘계에 가장 높게 나타난 반면, 하계에 출현종수 및 개체수, 춘계에 생체량이 가장 낮게 나타났다. 계절별 연체동물의 출현종수, 개체밀도 및 생체량은 10개로 분류된 동물문 중 기타 출현동물에 비해 가장 높게 나타났다.

각 분류군별 출현종수 변화는 춘계에 279종으로 가장 높았고, 춘계 278종, 동계 271종이었으며, 하계에 269종으로 가장 낮았다. 춘계에 출현종수가 증가한 분류군은 환형동물(19종), 절지동물(42종)이었고, 출현종수 비율이 높은 연체동물은 춘계에 144종으로 높고, 동계에 126종으로 낮게 나타났다. 춘계–하계에 출현종수가 높은 분류군은 해면, 자포, 연체동물 및 극피동물이었고, 춘계–동계에는 해면, 태형, 환형동물 및 절지동물로 나타났다.

개체밀도 계절변화는 전반적으로 춘계에 높고, 하계에 낮게 나타나는 특징을 보였다. 개체밀도 비율이 높은 연체동물은 춘계에 135개체/m²로 가장 높고, 하계 66개체/m²로 가장 낮게 나타났다. 춘계에 개체밀도가 높은 분류군은 연체, 절지동물 및 척삭동물이었고, 하계–추계에서 개체밀도가 가장 낮은 분류군은 연체, 환형, 절지동물 및 척삭동물이었다.

각 분류군별 생체량 변화는 춘계(1,253.9 gwwt/m²)에 가장 높고, 춘계(867.5 gwwt/m²)에 가장 낮은 것으로 나타났다. 생체량 비율이 높은 연체동물은 춘계에 525.6 gwwt/m²로 가장 높고, 춘계 275.4 gwwt/m²로 가장 낮게 나타났다. 춘계에 생체량이 높게 나타난 분류군은 연체동물 및 극피동물이었고, 태형동물은 가장 낮은 생체량을 보였다. 춘계–하계에 생체량이 높게 나타난 분류군은 자포, 태형, 환형, 절지동물 및 척삭동물이었고, 춘계–동계에는 연체, 극피동물 및 해면동물로 나타났다.

계절별로 출현한 각 분류군의 출현비율을 Fig. 4에 나타냈다. 출현종수 비율은 전체 분류군 중 연체동물(51.6%)과 절지동물(14.8%)의 점유율이 높게 나타났고, 연체동물은 춘계 51.8%,

절지동물은 추계 15.1%, 해면동물은 하계와 동계에 각각 11.9%, 극피동물은 하계 8.6% 순으로 나타났다. 개체밀도 비율은 전체 분류군 중 연체동물(55.0%)과 극피동물(13.3%)의 점유율이 높게 나타났고, 연체동물은 춘계 57.3%, 피동물은 추계 16.2%, 절지동물은 춘계 12.3%, 환형동물은 동계 5.7% 순으로 나타났다. 생체량 비율은 전체 분류군 중 연체동물(37.2%)과 해면동물(27.0%)의 점유율이 높게 나타났고, 연체동물은 추계 41.9%, 해면동물은 동계 31.8%, 극피동물은 추계 11.6%, 환형동물은 춘계 2.1% 순으로 나타났다.

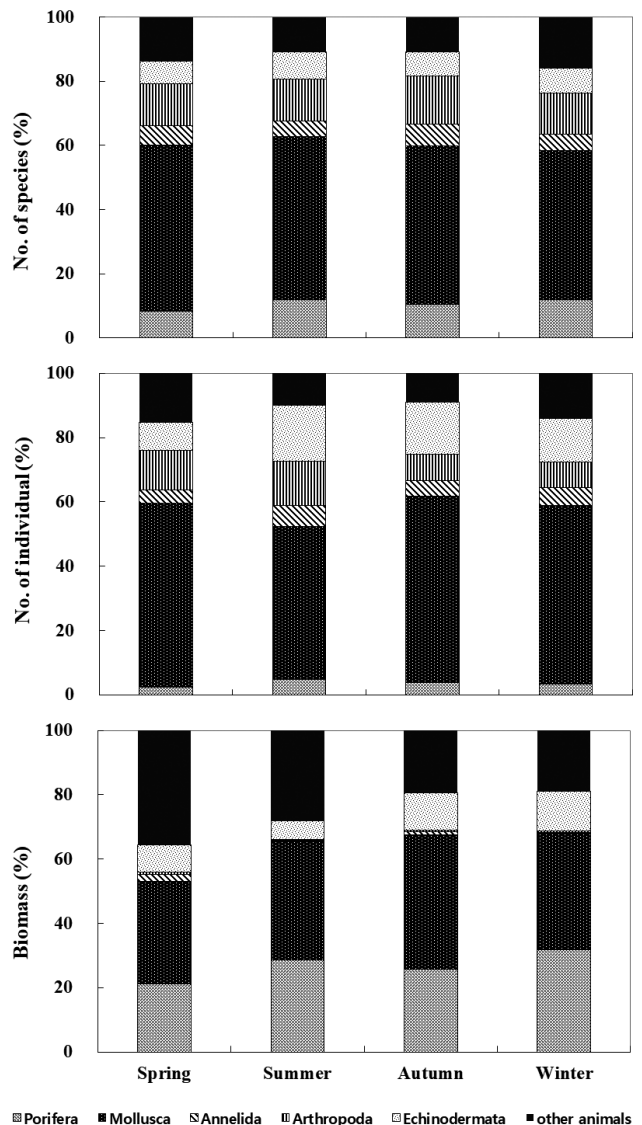


Fig. 4. Seasonal variations of species composition, number of individual and biomass at each class of macrobenthic invertebrates in coastal waters Sagye-ri, southern part of Jeju Island from 2016 to 2023.

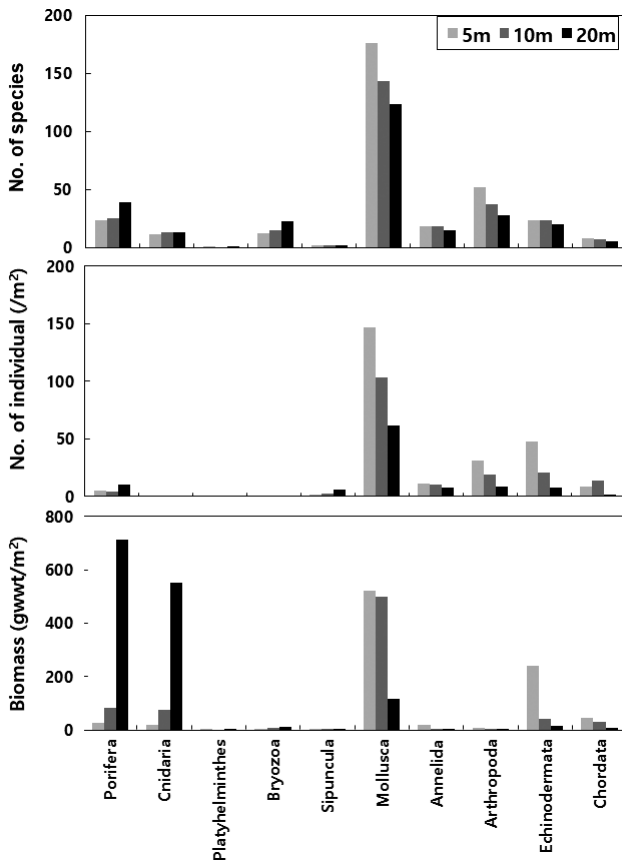


Fig. 5. Species composition, numbers of individual and biomass of macrobenthic invertebrates at three water depths in coastal waters Sagye-ri, southern part of Jeju Island from 2016 to 2023.

수심별 출현양상

조사해역 정점에서 분류군별 수심에 따른 출현비율 결과를 Fig. 5에 나타냈다. 출현종수 변화는 5 m 326종, 10 m 283종, 20 m 271종으로 5 m에서 높게 나타났다. 분류군의 출현양상을 살펴보면, 해면동물(39종)과 자포동물(13종)은 20 m 수심에서 출현종수가 높게 나타났지만, 연체(176종), 환형(18종), 절지(52종), 극피동물(23종) 및 척삭동물(8종)은 5 m 수심에서 높게 나타났다.

개체밀도 변화의 경우도 5 m 266개체/m², 10 m 182개체/m², 20 m 116개체/m²로 출현종수 변화와 같은 양상으로 5 m 수심에서 개체밀도가 높고, 20 m 수심에서 감소한 것으로 나타났다. 해면동물(10개체/m²)과 성구동물(6개체/m²)은 20 m 수심에서 높게 나타났지만, 연체(147개체/m²), 환형(11개체/m²), 절지동물(31개체/m²) 및 극피동물(48개체/m²)은 5 m 수심에서 높고, 10–20 m의 수심이 깊을수록 감소한 것으로 나타났다.

생체량 변화는 출현종수 및 개체밀도와 상이하게 5 m 888.0 gwwt/m², 10 m 745.2 gwwt/m², 20 m 1,419.2 gwwt/m²로 수심이 깊을수록 증가하는 경향을 나타냈다. 특히, 해면동물과 자포동물은 20 m 수심에서 각각 713.6 gwwt/m², 552.4 gwwt/m²로 5 m 수심에 비해 월등히 높은 값이 나타났고, 편형, 태형동물 및 성구동물도 수심이 깊을수록 생체량이 증가하였다. 그러나, 연체, 환형, 절지, 극피동물 및 척삭동물은 10–20 m 층에 비해 5 m 층에서 생체량이 가장 높았고, 20 m 층에서 높은 생체량을 보였던 해면동물 및 자포동물이 5 m 층에서는 가장 낮은 값을 나타냈다.

Table 4. Annual variations of dominant species and community dominance index in coastal waters Sagye-ri, southern part of Jeju Island from 2016 to 2023

Year	Dominant species and index (CDI)									
	No. 1 Dominant species	CDI	No. 2 Dominant species	CDI	No. 3 Dominant species	CDI	No. 4 Dominant species	CDI	No. 5 Dominant species	CDI
2016	<i>Perampithoë</i> sp.	7.0	<i>Herdmania monus</i>	5.2	<i>Ophionereis dubia dubia</i>	4.2	<i>Bittium alutaceum</i>	3.8	<i>Musculus viridulus</i>	3.8
2017	<i>Bittium alutaceum</i>	34.1	<i>Bittium glareosum</i>	5.6	<i>Herdmania monus</i>	4.2	<i>Petrasma japonica</i>	3.5	<i>Ophiomastix mixta Lütken</i>	3.2
2018	<i>Bittium alutaceum</i>	13.9	<i>Herdmania monus</i>	9.4	<i>Cerithium kobelti</i>	4.7	<i>Astrarium haematragum</i>	3.5	<i>Ergalatax contracta contracta</i>	3.5
2019	<i>Bittium alutaceum</i>	10.5	<i>Ophiomastix mixta Lütken</i>	5.2	<i>Astrarium haematragum</i>	3.9	<i>Bittium variegatum</i>	3.5	<i>Herdmania monus</i>	3.5
2020	<i>Perampithoë</i> sp.	7.8	<i>Bittium alutaceum</i>	5.1	<i>Ophiothrix exigua</i>	4.2	<i>Ophiomastix mixta Lütken</i>	3.9	<i>Astrarium haematragum</i>	3.6
2021	<i>Bittium alutaceum</i>	13.2	<i>Perampithoë</i> sp.	5.6	<i>Bittium variegatum</i>	4.6	<i>Ophiothrix exigua</i>	4.3	<i>Zafra mitriformis</i>	3.6
2022	<i>Bittium alutaceum</i>	26.0	<i>Bittium variegatum</i>	5.5	<i>Pentacta doliolum</i>	3.1	<i>Perampithoë</i> sp.	3.0	<i>Zafra mitriformis</i>	3.0
2023	<i>Bittium alutaceum</i>	12.8	<i>Bittium variegatum</i>	6.7	<i>Zafra mitriformis</i>	5.1	<i>Pentacta doliolum</i>	4.6	<i>Ophionereis dubia dubia</i>	4.3

군집 우점종

연도별, 계절별 및 수심별로 출현한 각 분류군의 전체 개체 밀도 중 상위 3% 이상 점유율을 차지하는 우점종 및 우점지수에 대한 결과를 Table 4, Table 5, Table 6에 나타냈다. 조사해역의 연도별 우점종 현황을 살펴보면 2016년의 최우점종은 참옆새우류(*Perampithoë* sp.), 차우점종은 분홍멍게(*Herdmania monus*), 제3 우점종 줄박지거미불가사리(*Ophionereis dubia dubia*), 제4 우점종 얼룩덜룩갈줄고둥(*Bittium alutaceum*), 제5 우점종 줄꼬마담치(*Musculus viridulus*)의 순으로 우점지수(community dominance index, CDI)는 3.8–7.0 범위로 참옆새우류가 최상위 우점종으로 나타났다. 2017–2019년까지 3년 동안 최상위 우점종은 얼룩덜룩갈줄고둥으로 나타났으며, 이외에 눈줄고둥(*Bittium glareosum*), 분홍멍게(*H. monus*), 빨간등거미불가사리(*Ophiomastix mixta* Lütken), 갯장짜부락고둥(*Cerithium kobelti*), 바퀴고둥(*Astrarium haematragum*), 햇살비단조개(*Petrasma japonica*), 갈줄고둥(*Bittium variegatum*), 탐뽀고둥(*Ergalatax contracta contracta*) 이 차우점종–제5우점종에 각각 포함되어 연도별로 서로 다르게 나타났다. 2020년의 최우점종은 참옆새우류(*Perampithoë* sp.), 차우점종은 얼룩덜룩갈줄고둥, 제3 우점종 짧은가시거미불가사리(*Ophiothrix exigua*), 제4 우점종 빨간등거미불가사리, 제5 우점종 바퀴고둥의 순으로 CDI는 3.6–7.8 범위로 참옆새우류가 최상위

우점종이었다. 2021–2023년까지 3년 동안 최상위 우점종은 2017–2019년과 같은 양상으로 얼룩덜룩갈줄고둥이 최상위 우점종이었고, 이외에 참옆새우류, 갈줄고둥, 오각해삼(*Pentacta doliolum*), 붓솔무늬(*Zafra mitriformis*), 짧은가시거미불가사리, 줄박지거미불가사리가 우점순위를 달리하며 차우점종–제5 우점종을 차지하였다. 이와 같이 군집 우점종들에 대한 연도별 우점지수는 2017년 0.55, 2018년 0.45로 각각 높았고, 2019년 0.33으로 가장 낮게 나타났다(Table 4).

조사기간 동안의 계절별 군집 우점종은 춘계에 최우점종 얼룩덜룩갈줄고둥, 차우점종 참옆새우류, 제3 우점종 분홍멍게, 제4 우점종 갈줄고둥, 제5 우점종 붓솔무늬의 순으로 군집지수 3.5–19.0 범위로 춘계에 최상위 우점종은 얼룩덜룩갈줄고둥으로 나타났다. 하계 최우점종은 참옆새우류, 차우점종 바퀴고둥, 제3 우점종 오각해삼, 제4 우점종 탐뽀고둥, 제5 우점종은 줄박지거미불가사리의 순으로 군집지수 3.6–4.7 범위로 하계에 최상위 우점종은 참옆새우류였다. 추계 최우점종은 얼룩덜룩갈줄고둥, 차우점종 갈줄고둥, 제3 우점종 붓솔무늬, 제4 우점종 빨간등거미불가사리, 제5 우점종 오각해삼 순으로 군집지수 3.2–15.0 범위로 추계에 최상위 우점종은 얼룩덜룩갈줄고둥으로 나타났다. 동계 최우점종은 얼룩덜룩갈줄고둥, 차우점종 분홍멍게, 제3 우점종 빨간등거미불가사리, 제4 우점종 짧은가시거미불가사리, 제5 우점종은 갈줄고둥의 순으로 군집지

Table 5. Seasonal variations of dominant species and community dominance index in coastal waters Sagye-ri, southern part of Jeju Island from 2016 to 2023

Season	Dominant species and index (CDI)									
	No. 1 Dominant species	CDI	No. 2 Dominant species	CDI	No. 3 Dominant species	CDI	No. 4 Dominant species	CDI	No. 5 Dominant species	CDI
Spring	<i>Bittium alutaceum</i>	19.0	<i>Perampithoë</i> sp.	6.3	<i>Herdmania monus</i>	4.9	<i>Bittium variegatum</i>	4.3	<i>Zafra mitriformis</i>	3.5
Summer	<i>Perampithoë</i> sp.	4.7	<i>Astrarium haematragum</i>	4.2	<i>Pentacta doliolum</i>	4.2	<i>Ergalatax contracta contracta</i>	3.9	<i>Ophionereis dubia dubia</i>	3.6
Autumn	<i>Bittium alutaceum</i>	15.0	<i>Bittium variegatum</i>	4.8	<i>Zafra mitriformis</i>	4.4	<i>Ophiomastix mixta</i> Lütken	3.8	<i>Pentacta doliolum</i>	3.2
Winter	<i>Bittium alutaceum</i>	20.2	<i>Herdmania monus</i>	3.5	<i>Ophiomastix mixta</i> Lütken	3.3	<i>Ophiothrix exigua</i>	3.0	<i>Bittium variegatum</i>	3.0

Table 6. Depths variations of dominant species and community dominance index in coastal waters Sagye-ri, southern part of Jeju Island from 2016 to 2023

Depth (m)	Dominant species and index (CDI)									
	No. 1 Dominant species	CDI	No. 2 Dominant species	CDI	No. 3 Dominant species	CDI	No. 4 Dominant species	CDI	No. 5 Dominant species	CDI
5	<i>Bittium alutaceum</i>	12.9	<i>Perampithoë</i> sp.	5.4	<i>Ophiomastix mixta</i> Lütken	4.4	<i>Ophionereis dubia dubia</i>	3.5	<i>Ophiothrix exigua</i>	3.0
10	<i>Bittium alutaceum</i>	20.0	<i>Herdmania monus</i>	6.4	<i>Zafra mitriformis</i>	4.3	<i>Perampithoë</i> sp.	4.1	<i>Pentacta doliolum</i>	3.3
20	<i>Bittium alutaceum</i>	14.3	<i>Bittium variegatum</i>	6.3	<i>Zafra mitriformis</i>	3.4	<i>Phascolosoma agassizii</i>	3.0	<i>Pentacta doliolum</i>	3.0

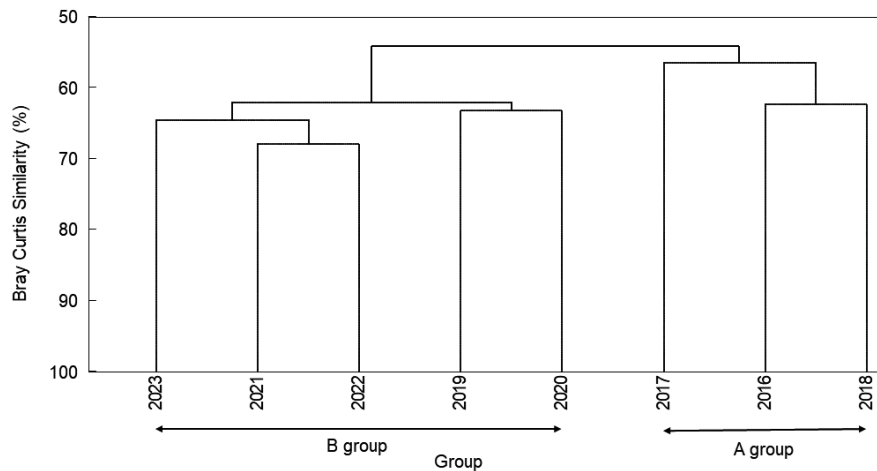


Fig. 6. Results of cluster analysis performed on bray curtis similarity from standardized species presence/absence transformed data. The dotted lined indicate no significant difference among at each year and four months from 2016 to 2023 (SIMPROF test).

수 3.0–20.2 범위로 동계에 최상위 우점종은 춘계, 추계와 같은 양상으로 얼룩덜룩갈줄고등으로 나타났다. 계절별 우점지수는 춘계 0.38, 하계 0.24, 추계 0.34, 동계 0.36으로 춘계에 높고, 하계에 낮게 나타났다(Table 5).

수심별 군집 우점종의 경우 5 m 수심에서 최우점종은 얼룩덜룩갈줄고등, 차우점종 참옆새우류, 제3 우점종 빨간등거미불가사리, 제4 우점종 줄파지거미불가사리, 제5 우점종 짧은가시거미불가사리였으며, 군집지수는 3.0–12.9 범위로 5 m 수심에서 최상위 우점종은 얼룩덜룩갈줄고등이었다. 10 m 수심의 최우점종은 얼룩덜룩갈줄고등, 차우점종 분홍명게, 제3 우점종 붓솔무늬, 제4 우점종 참옆새우류, 제5 우점종 오각해삼이었고, 군집지수는 3.3–20.0 범위였다. 20 m 수심의 최우점종 또한 5 m, 10 m와 같은 양상으로 얼룩덜룩갈줄고등이었으며, 갈줄고등, 붓솔무늬, 아가시즈별벌레(*Phascolosoma agassizii*), 오각해삼 순으로 나타났다. 수심별 우점지수는 5 m 0.36, 10 m 0.41, 20 m 0.33으로 10 m 수심에 높고, 20 m 수심에서 낮게 나타났다(Table 6).

군집지수

연도별, 계절별, 수심별 조사결과에 따른 출현종과 생물량과의 관계를 나타내는 군집지수 결과를 Table 7에 나타냈다. 연도별 군집지수 변화의 경우 우점도 지수(DI)는 0.33–0.55 범위로 2017년에 높고, 2019년에 낮았다. 종다양도(H') 및 균등도(E') 지수는 2016년에 4.458, 0.838로 높은 값을 보였고, 2017년에 3.381, 0.672로 낮게 나타났으며, 종 풍도지수(R)는 2018년에 최저값을 나타낸 후 점차 증가하여 2022년에 25.021로 가장 높게 나타났다.

계절별 군집지수 변화의 경우 우점도 지수(DI)는 0.24–0.38 범위로 춘계에 높고, 하계에 낮게 나타났다. 종다양도(H') 및 균등도(E') 지수는 하계에 4.614, 0.826로 높게 나타났지만, 춘계

에 4.125, 0.733로 4계절 중 가장 낮게 나타났고, 종 풍도지수(R)는 추계에 최고값, 동계에 최저값을 나타냈다.

수심별 군집지수 변화의 경우 우점도 지수(DI)는 0.33–0.41 범위로 10 m 수심에서 높고, 20 m 수심에서 낮게 나타났다. 종다양도(H') 및 균등도(E') 지수는 20 m 수심에서 각각 4.344,

Table 7. Variations of community indices in coastal waters Sagyeri, southern part of Jeju Island from 2016 to 2023

	Community indices			
	Dominance index (DI)	Diversity index (H')	Evenness index (E')	Richness index (R)
Year				
2016	0.34	4.458	0.838	23.895
2017	0.55	3.381	0.672	17.624
2018	0.45	3.965	0.801	16.706
2019	0.33	4.269	0.833	19.759
2020	0.34	4.410	0.831	22.590
2021	0.34	4.196	0.792	22.065
2022	0.40	3.894	0.715	25.021
2023	0.40	4.190	0.777	23.865
Season				
Spring	0.38	4.125	0.733	28.446
Summer	0.24	4.614	0.826	28.750
Autumn	0.34	4.290	0.762	29.420
Winter	0.36	4.183	0.747	28.189
Depth (m)				
5	0.36	4.277	0.739	32.025
10	0.41	4.067	0.720	28.870
20	0.33	4.344	0.778	28.435

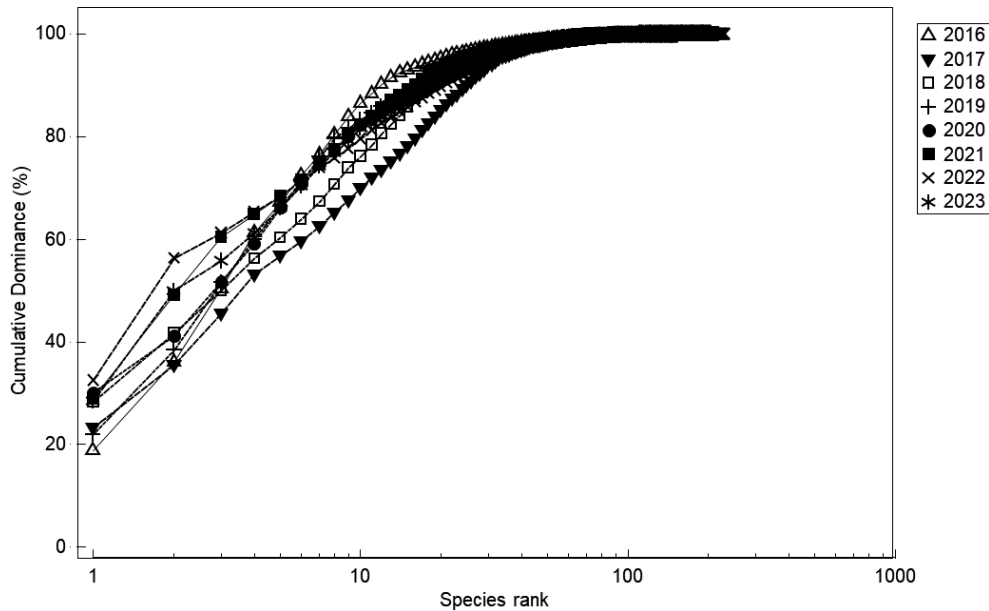


Fig. 7. K-dominance curves (x-axis logged) of total biomass at each years in coastal waters Sagye-ri, southern part of Jeju Island from 2016 to 2023.

0.778로 높게 나타났지만, 10 m 수심에서는 4.067, 0.720로 조사 수심 중 가장 낮게 나타났고, 종 풍도지수(R)는 5 m 수심에서 32.025로 가장 높고, 20 m 수심에서 가장 낮게 나타났다.

군집 유사도

조사기간 동안 분석된 전체 출현종들의 생체량에 대한 연도별로 유사도 분석을 Fig. 6에 나타냈다. 자료 분석 결과 통계적 유의차를 보이는 그룹은 2개로 나뉘었고, 그룹 A (2016–2018년), 그룹 B (2019–2023년)로 구분되어 그룹 간 연도별 차이를 보였다. 각 그룹별 유사도는 그룹 A, 56.6%, 그룹 B, 62.1%였고, A, B 그룹 간 유사도는 54.3%로 나타났다(SIMPROF test, $P < 0.05$). 2개로 구분된 그룹 간 차이(비유사성, dissimilarity)에 기여하는 종을 확인하기 위해 SIMPER 분석을 실시한 결과, A, B 그룹 간 비유사도에 기여한 종은 소라(*Turbo cornutus*), 굽은나선별해면(*Stirastrella insignis*), 나선별해면(*Stirastrella panis*), 톱니턱굴(*Dendostrea crenulifera*), 호박해면(*Cliona celata*)의 순으로 나타났다. 또한, 연도별 출현종들의 생체량 자료를 이용하여 우점종들에 대한 K-dominance 곡선으로 연도별 종다양도를 비교 분석하였다(Fig. 7). K-dominance 곡선 상 60% 이내에 포함된 종수를 연도별로 살펴보면, 2016년 4종, 2017년 6종, 2018년 5종, 2019년 4종, 2020년 4종, 2021년 3종, 2022년 3종, 2023년 4종으로 종다양도는 2017–2018년에 높고, 2022–2023년에 낮게 나타났다. 연도별 생체량 최상위 우점종은 2종으로 나타났으며, 2016년–2017년까지 거품돌산호(*Avelophora japonica*), 2018–2023년까지 소라(*T. cornutus*)로 나타났다.

고 찰

제주도 연안 조하대 기반구조는 우리나라 남해안과 서해안의 사니질로 구성된 기반과 달리 대부분 넓게 발달한 수평·수직구조의 공간형 암반 형태로 연체, 자포 및 절지동물의 군집 밀도가 높게 나타난다(Ko et al., 2008). 또한, 암반을 기반으로한 조하대 저서생물상은 부착기질, 수온, 수심 및 조류 등에 직접적 영향을 받고, 다양한 생물들의 서식처 공간경쟁으로 군집 우점양상이 다르게 나타난다(Neushul, 1967).

본 연구는 8년간의 조사기간 동안 총 461종이 출현하였고, 연도별 출현종수는 2016년 204종, 2017년 153종, 2018년 141종, 2019년 168종, 2020년 202종, 2021년 200종, 2022년 231종, 2023년 219종으로 2020년 이후 출현종수가 증가하는 추세로 특히, 2022년에 출현종수가 가장 높게 나타났다. 저서무척추동물 종수 출현양상을 제주도 연안에서 보고된 결과들과 비교해 보면, 제주도 연안 마을어장 166종(Ko et al., 2011), 제주도 남부 문섬 112종(Ko et al., 2008), 차귀도 연안 201종(Yang et al., 2007)의 결과보다 월등히 높게 나타났지만, 최근에 보고된 제주도 연안 5개 해역의 629종(Ko et al., 2016)에 비해 낮게 나타났다. 그러나, 앞선 연구는 제주연안 방향별 5개 해역에서 조사된 결과로써 본 연구와 동일한 해역(사계리)의 출현종수와 비교하면 341종, 본 연구는 461종으로 26.0% 증가한 것으로 나타났다. 분류군별 출현 종수는 연체동물이 238종으로 전체 출현동물 중 51.6%로 가장 높은 비율을 차지하였고, 연체동물 중 복족류가 169종(36.7%)으로 가장 높게 나타났다. 다음으로 절지

동물 68종, 해면동물 45종, 극피동물 31종, 환형동물 24종, 자포동물 19종, 척삭동물 8종, 성구 및 편형동물이 각각 2종 순으로 나타났다.

저서동물은 태풍, 풍랑 등 환경적 교란에 취약하고, 저서생물상은 시간이 지나면서 점차 회복하게 되며, 환경이 변화함에 따라 다양한 종의 우점 현상으로 개체밀도가 증가하게 된다(Yu et al., 2004). 조사기간 동안 평균한 개체밀도 및 생체량은 각각 188개체/m², 1,017.4 gwwt/m²로 최근에 보고(Ko et al., 2016)된 142개체/m², 1,000.1 gwwt/m² 결과에 비해서도 높게 나타났다. 연도별 종조성 변화는 2016–2019년까지 종수, 개체수 및 생체량이 낮았지만, 2020년 이후부터 종조성이 증가한 것으로 나타났고, 특히, 군집구조 증가에 기인한 분류군은 연체동물, 절지동물 및 극피동물이었다. 또한, 2020년 이후 출현종수, 개체수가 증가한 분류군은 연체, 절지 및 극피동물이었고, 생체량이 증가한 분류군은 자포, 태형 및 연체동물로 나타났다. 이처럼 연도별 군집구조 증가 경향은 열대 및 아열대 해역에서 기원한 새로운 종들의 지속적 유입, 서식 적응 및 활발한 번식본능에 의해 그 해역의 종다양성을 증가시키는 요인으로 판단된다(Snelgrove and Butman, 1994).

계절별 출현양상은 춘계에 개체밀도가 증가하였고, 추계에는 출현종수 및 생체량이 증가한 것으로 나타났다. 하계에는 출현종수 및 개체밀도가 다른 계절에 비해 감소 경향이 크게 나타났고, 동계에는 추계의 증가 경향보다는 감소하지만, 추계에 이어 다른 계절보다 증가 경향이 유지되고 있었다. 춘계와 추계의 출현종수는 각각 278종, 279종으로 추계에 1종 높게 나타났지만, 그 출현종수 차이에 기인한 분류군은 연체동물이었고, 특히, 환형동물과 절지동물의 증가로 인해 추계에 가장 높은 출현종수를 나타냈다. 춘계의 개체밀도 증가에 기인한 분류군은 연체, 절지 및 척삭동물이었고, 추계의 생체량은 연체동물 및 극피동물 증가로 인해 가장 높게 나타났다. 제주연안 계절별 저서동물 군집조성 변화는 수온이 증가하는 하계에 산란기를 앞둔 어류 및 상위동물의 왕성한 먹이활동으로 인해 다관류, 복족류 및 이매패류로 구성된 연체동물의 종조성이 감소한다(Ko et al., 2016). 본 연구에서도 하계에 연체동물의 개체밀도가 가장 낮게 나타났으며, 같은 시기에 환형, 절지, 극피 및 척삭동물의 생체량이 가장 낮게 나타난 결과로 보아 암반에 노출되어 서식하는 연체동물을 비롯한 다양한 저서동물들이 어류 및 기타 동물의 포식압력 증가로 인해 하계에 종조성이 낮아지는 앞선 보고와 유사한 경향을 뒷받침해준다.

수심에 따른 저서동물의 출현양상은 5 m 층에서 출현종수와 개체밀도가 높게 나타났고, 20 m 층의 경우 출현종수 및 개체밀도는 감소한 반면, 생체량이 높게 나타났다. 5–10 m 수심에서 출현종수 및 개체밀도가 증가한 분류군은 연체, 환형, 절지, 극피 및 척삭동물이었고, 20 m 수심에서는 해면, 자포, 태형 및 성구동물의 생체량이 높게 나타났다. 또한, 5 m 층에서는 전체 수심대에 걸쳐 동일하게 연체, 환형, 절지, 극피 및 척삭동물과 같

은 특정 동물문의 종조성이 다른 수심에 비해 높게 나타난 특징을 보였다. 이처럼, 각 분류군의 수심별 출현양상이 다르게 나타난 요인은 대체로 크기가 작은 연체, 절지 및 환형동물 등은 포식자로부터 보호받기 쉽고, 해조류 생물량이 높은 얕은 수심대에 주로 서식하고, 개체 크기가 크고, 군체를 이루며 독립생활을 하는 해면, 자포 및 태형동물은 깊은 수심의 서식처 환경을 선호하는 생존전략의 보고와 일치한 결과를 나타냈다(Ko et al., 2011, 2016).

조사기간 동안 연도별, 계절별 및 수심별로 출현한 군집 우점종을 분석한 결과 최상위 우점종은 얼룩덜룩갈고둥과 참옆새우류였으며, 차우점종은 분홍명게, 바퀴고둥, 갈줄고둥, 눈줄고둥, 빨간등거미불가사리로 나타났다. 이후 제3 우점종부터 서로 다른 종들이 우점 순위를 차지하였지만, 대부분 연체, 절지 및 극피동물로 암반위 해조류 사이 공간에서 서식하는 개체밀도가 높은 작은 생물들로 나타났다. 기 보고된 결과에 의하면, 바퀴고둥과 분홍명게가 제주연안에서 출현한 최상위 우점종이었다(Yang et al., 2007; Ko et al., 2011, 2016). 그러나, 이종의 우점양상은 본 연구기간 중 차순위로 바뀌었고, 얼룩덜룩갈고둥과 참옆새우류가 최상위 우점종으로 나타났다. 최근, 제주도 연안의 해조상 변화는 대형갈조류(감태, 모자반)의 감소와 산호조류(방황산호말, 돌레산호말 등)의 생물량 증가가 뚜렷하게 나타나고 있다(Kim et al., 2023). 이처럼, 본 연구에서 나타난 최상위 우점종 군집특성은 크기가 작으면서, 개체밀도가 높아 산호조류 속에 서식하는 적합한 생태습성에 기인하여 이들 종의 우점현상은 앞으로 지속될 것으로 판단된다.

종 다양도지수(H')를 연도별, 계절별 및 수심별로 평균한 결과 4.095–4.303 범위였고, 2016년(4.46), 하계(4.61), 20 m 수심(4.34)에 가장 높게 나타났다. 종 다양도 지수 결과를 기존 보고들과 비교하면, 제주도 문섬 해역 2.71–3.41 (Ko et al., 2008), 차귀도 주변해역 3.21–3.74 (Yang et al., 2007), 제주도 비양도 연안 3.27–3.75 (Lee and Kim, 1993) 및 제주도 마을어장 1.59–2.95 (Ko et al., 2011)의 결과보다 높았고, 제주연안 5개 해역 4.28–4.78 (Ko et al., 2016)에 비해 낮게 나타났으나, 결과 값은 비교적 유사한 수준이었다. 이처럼, 본 연구에서도 높은 종 다양성 결과를 보인 것은 제주도 남부연안을 중심으로 아열대 해양생물들이 지속적으로 유입되고, 미기록종 및 미등정 종들의 적응 서식과 개체밀도 확산에 따라 출현 동물문별로 군집밀도 증가에 기인한 것으로 판단된다.

제주도 연안은 해역별로 해양환경 특성이 다르게 나타나고, 저서동물 군집구조 또한 서로 다른 특징이 나타나 해역별 서식 유형 차이를 보인다. 특히, 제주도 남부연안은 다른 해역에 비해 저서동물의 출현종수가 높고, 분류군 중 다관류, 복족류 및 이매패류로 구성된 연체동물의 출현량이 높게 나타난다(Ko et al., 2016). 본 연구에서도 전체 출현동물문 중 연체동물이 238종, 104개체/m², 378.6 gwwt/m², 평균 출현율 48.0%로 조사기간 내내 연체동물의 점유율이 가장 높게 나타났다. 이처럼, 본

조사해역은 소규모 만 형태의 해안지형 특성과 해조류 생물량이 다른 해역에 비해 높고, 다양한 해양생물들이 가입될 기회가 높은 요인으로 인해 연체동물 종조성이 높게 나타난 것으로 판단된다.

8년간의 조사기간 동안 연도별 출현종수 변화는 조사기간 초반(2016–2019년)에 비해 중·후반(2020–2023년)에 높게 나타났고, 2018년의 최저 출현종수(141종)에 비해 2022년은 231종으로 약 39% 증가하였다. 또한, 생체량을 기준 한 연도별 유사도는 A, B의 2개 그룹으로 나뉘었고, 이들 그룹 간 차이는 조사기간 초반 및 후반의 출현종수와 생체량 증감에 기인한 것으로 나타났다. 연도별 출현종수 변화를 평균 수온 관측값과 비교해보면, 2016년 연평균 수온은 19.8°C였으나, 2023년은 20.4°C로 0.6°C 증가하였고, 2023년 기준 계절별 평균수온의 경우도 2016년에 비해 하계 1.1°C, 동계 0.3°C 각각 증가한 것으로 나타났다. 제주도 남부연안은 대마난류수의 직접적인 영향을 받아 연중 높은 수온이 유지되고(Ko et al., 2003), 제주도 연안은 동계수온 상승으로 인해 다양한 아열대 해양생물 유입으로 해양생태계 구조가 변화하고 있다(Jang et al., 2006; Choi and Lee, 2010). 이처럼, 연평균 수온의 최대, 최소값이 조사기간 중·후반으로 갈수록 높게 나타나는 추세와 더불어 본 연구해역의 저서동물 종조성이 증가한 것으로 판단된다.

최근, 제주도 연안 조하대의 저서생물상 변화 중 가장 주목해야 할 특징은 해조류의 서식밀도 감소와 산호충류(경산호류) 생체량 증가로 인해 저서암반 구조가 해조류 기반에서 산호충류 기반으로 변화하고 있다는 사실이다. 즉, 저서암반 위를 뒤덮고 서식하며 아열대 해양생물로 구분된 그물코돌산호(*Psammocora profundacella*)와 빗단풍돌산호(*Montipora trabeculata*)가 조사기간 내내 출현하였고, 서식 수심도 5–20 m층까지 확산되는 추세로 나타났다. 이 돌산호류는 2000년 초반부터 제주도 남부연안을 중심으로 출현했으며, 2010년 초·중반부터 서부, 동부 및 북부연안으로 확산되었고, 서식수심도 5–20 m까지 넓게 분포한 것으로 나타났다(Ko et al., 2016). 본 연구에서 이들 돌산호류에 대한 서식면적은 산출하지 못하였지만, 잠수조사 결과 돌산호류의 서식면적이 증가하고 있었고, 육안으로 관찰한 피도 또한, 해마나 증가한 것으로 나타났다. 이처럼, 본 연구해역은 아열대 해양환경 및 저서생물상 변화를 가장 먼저 받아들이는 곳으로 저서생태계 군집구조는 남부해역을 중심으로 변화할 것이며, 향후, 제주도 전 연안으로 확산 가능성은 크다고 할 수 있다. 따라서, 제주도 연안은 아열대 해양생태계로 변화함에 따라 저서생태계 연구방향도 아열대 생태연구로의 전환이 필요하다고 할 수 있다.

사 사

본 연구는 국립수산물학원 아열대수산연구소「제주주변 연근해어업 및 환경생태조사 R2025013」의 지원으로 수행된 연구입니다.

References

- Choe BL. 1992. Illustrated Encyclopedia of Fauna and Flora of Korea. Vol. 33. Mollusca (II). Ministry of Education, Seoul, Korea, 1-860.
- Choi Y and Lee HH. 2010. Redescription of the glasseye snapper *Heteropriacanthus cruentatus* (Perciformes: Priacanthidae) from the Coastal waters of Jeju Island, Korea. Korean J Ichthyol 22, 126-128.
- Clarke KR and Gorley RN. 2006. PRIMER V6: User Manual/Tutorial. PRIMER-E Ltd., Plymouth, U.K., 1-190.
- Cohen EB, Grosslein MD, Sissenwine MP, Steimle FW and Wright WR. 1982. Energy budget of Georges Bank. In: Multispecies Approaches to Fisheries Management Advice. Mercer MC, ed. Can Spec Publ Fish Aquat Sci 59, 95-107.
- Dai A and Yang S. 1991. Crabs of the China Sea. China Ocean Press, Beijing, China, 1-606.
- Farfante IP and Kensly BF. 1997. Penaeoid and Sergestoid shrimps and prawns of the world: Keys and diagnoses for the families and genera. Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, France, 1-233.
- Hong SY. 2006. Marine Invertebrates in Korean Coasts. Academy Publishing, Seoul, Korea, 1-479.
- Hwang SI, Kim DK, Sung BJ, Jun SK, Bae JI and Jeon BH. 2017. Effects of climate change on whitening event proliferation the coast of Jeju. Korean J Environ Ecol 31, 529-536. <http://doi.org/10.13047/KJEE.2017.31.6.529>.
- Kim BJ and An JH. 2010. New record of blenny *Omobranchius loxozonus* (Perciformes: Blenniidae) from Jeju Island, Korea. Korean J Ichthyol 22, 61-64.
- Kim BY, Han SH, Kim JN and Ko JC. 2023. Monitoring of marine algal flora and community structure in subtidal zone around Jeju Coasts, Korea (2016-2018). Korean J Fish Aquat Sci 56, 691-700. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2023.0691>.
- Kim BY, Ko JC and Choi HG. 2016. Rock type difference and benthic community structures in the coast of Jeju, Korea. Korean J Environ Ecol 30, 996-1008. <http://doi.org/10.13047/KJEE.2016.30.6.996>.
- Kim IO and Rho HK. 1994. A study on China coastal water appeared in the neighbouring seas of Cheju Island, Korea. Bull Korean Fish Soc 27, 515-528.
- Ko JC, Kim BY, Sonh MH, Jo WC and Lee KC. 2016. Short-term changes of community structure of microbenthic invertebrates in the coastal waters Jeju Island, Korea from 2013 to 2015, Korea. Korean J Malacol 32, 297-328. <https://doi.org/10.9710/kjm.2016.32.4.297>.
- Ko JC, Kim JT, Kim SH and Rho HK. 2003. Fluctuation Characteristics of Temperature and Salinity in Coastal Waters around Jeju Island, Korea. J Kor Fish Soc 36, 306-316. <https://doi.org/10.5657/kfas.2003.36.3.306>.
- Ko JC, Koo JH and Yang MH. 2008. Characteristics of ocean environmental factors and community structure of mac-

- robenthos around Munseom, Jeju Island, Korea. Korean J Malacol 24, 215-228.
- Ko JC, Koo JH, Lee SJ, Chang DS and Jo SH. 2011. Community structure of macrobenthic invertebrates of fishing grounds in the coastal waters of Jeju Island. Korean J Malacol 27, 229-246.
- Jang SM, Kim SS, Choi YC and Kim SG. 2006. A study of correlations between air-temperature of Jeju and SST around Jeju Island. Korean J Mar Environ Energy 9, 55-62.
- Lambshead PJD, Platt HM and Shaw KM. 1983. The detection of differences among assemblages of marine benthic species based on an assessment of dominance and diversity. J Nat Hist 17, 859-874. <https://doi.org/10.1080/00222938300770671>.
- Lee JJ and Hyun JM. 2002. Species diversity and community structure of macrobenthic invertebrate inhabiting intertidal zone near Songacksan area, Jeju Island. Korean J Malacol 18, 41-52.
- Lee JJ and Jwa YW. 1988. Ecological study on the intertidal zone around Cheju Island - 1. Estimation of plankton production and community structure of marine shells - Community structure of molluscan shells. Korean J Malacol 4, 17-29.
- Lee JJ and Kim JC. 1993. Bioecological studies of the western coastal area in Cheju Island. - Distribution and seasonal community changes of the benthic macroinvertebrates on the rocky intertidal zone of Biyangdo. Korean J Malacol 9, 68-84.
- Margalef DR. 1958. Information theory in ecology. Gen Syst 3, 36-71.
- McNaughton SJ. 1967. Relationship among functional properties of California grassland. Nature 216, 168-169. <https://doi.org/10.1038/216168b0>.
- Neushul M. 1967. Studies of subtidal marine vegetation in western Washington. Ecology 48, 83-94. <https://doi.org/10.2307/1933420>.
- Nishimura S. 1995. Guide to Seashore Animals of Japan With Color Pictures and Keys. Vol. II. Hoikusha Publishing Co. Ltd., Osaka, Japan, 425.
- Okutani T and Habe T. 1990. The mollusks of Japan. In: Gakken Illustrated Nature Encyclopedia. Gakken Publishing Co., Tokyo, Japan, 301.
- Paik SG and Yun SG. 2000. Community structure of the macrobenthos in Chinhae Bay, Korea. J Korean Fish Soc 33, 572-580.
- Park SK, Lee JR, Heo JS, An DS, Lee HP and Choi HG. 2014. Marine algal flora and ecological role of *Eisenia bicyclis* in Dokdo, East Sea, Korea. Korean J Environ Ecol 28, 613-623. <https://doi.org/10.13047/KJEE.2014.28.6.613>.
- Pang IC and Kim TH. 1993. Upwelling of the western coastal water in Cheju Island. Bull Nat Cheju Univ 17, 1-12.
- Pielou EC. 1969. An Introduction to Mathematical Ecology. John Weley and Sons, Inc., Hoboken, NJ, U.S.A., 291-331.
- Shannon CE and Wiener W. 1949. The Mathematical Theory of Communication. University of Illinois Press, Urbana, IL, U.S.A., 125.
- Snelgrove PVR and Butman CA. 1994. Animal-sediment relations revisited: Cause versus effect. Oceanogr Mar Biol Annu Rev 32, 111-177.
- The Korean Society of Systematic Zoology. 1997. List of Animals in Korea (Excluding Insects). Academy Press, Seoul, Korea, 489.
- Thouzeau G, Robert G and Ugarte R. 1991. Faunal assemblages of benthic mega-invertebrates inhabiting sea scallop grounds from eastern Georges Bank, in relation to environmental factors. Mar Ecol Prog Ser 74, 61-82. <https://doi.org/10.3354/meps074061>.
- Yang MH, Moon TS, Yu JT, Ko JC and Chang DS. 2007. Species appearance and seasonal variation of macrobenthic invertebrate in the coastal water of Chagwi-do, Jeju Island. Korean J Malacol 23, 235-243.
- Yu OH, Koh BS, Lee HG and Lee JH. 2004. Effect of environmental variables on changes in macrobenthic communities in the coastal area of Incheon, Korea. J Kor Fish Soc 37, 423-432. <https://doi.org/10.5657/kfas.2004.37.5.423>.

부 록

Table A1. List of macrobenthic invertebrate species collected from the coastal waters Sagye-ri, southern part of Jeju Island from 2016 to 2023

Phylum & Species	Year							
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Phylum Porifera								
<i>Tphakellia foliacea</i>						○		
<i>Raspailia hirsuta</i>			○				○	
<i>Esperiopsis plumosa</i>					○			
<i>Clathria gombawuiensis</i>	○	○	○	○	○	○		○
<i>Forcepia japonica</i>		○	○					
<i>Lissodendoryx firma</i>								○
<i>Myxilla incrustans</i> sp.1		○			○	○	○	
<i>Myxilla incrustans</i>	○	○	○	○	○		○	
<i>Myxilla producta</i>	○							
<i>Myxilla setoensis</i>			○					
<i>Myxilla sigmatifera</i>	○				○			○
<i>Haliclona permollis</i>	○							
<i>Haliclona densaspicula</i>				○		○	○	○
<i>Callyspongia</i> sp.1	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Callyspongia confoederata</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Callyspongia differentiata</i>	○							
<i>Callyspongia elegans</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Callyspongia patula</i>	○	○	○					
<i>Callyspongia serpentina</i>	○	○						
<i>Amphimedon complanata</i>			○					
<i>Petrosia corticata</i>	○	○		○	○			
<i>Petrosia ushitsuensis</i>	○	○	○		○	○	○	
<i>Halichondria okadai</i>		○						
<i>Halichondria oshora</i>	○	○						
<i>Hymeniacidon sinapium</i>	○	○					○	
<i>Topsentia salomonensis</i>								○
<i>Spheciospongia</i> sp.1	○	○	○	○	○	○	○	
<i>Cliona celata</i>	○	○	○		○	○		
<i>Cliona lobata</i>				○	○	○	○	
<i>Spheciospongia panis</i>		○	○		○	○	○	○
<i>Spirastrella abata</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Stirastrella insignis</i>	○		○	○	○	○		○
<i>Asteropus simplex</i>				○		○		
<i>Jaspis wondoensis</i>		○						
<i>Caminus awashimensis</i>							○	
<i>Erylus bahamensis</i>	○					○	○	○
<i>Penares incrustans</i>	○	○	○	○	○	○	○	○

Appendix 1. Continued

Phylum & Species	Year							
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
<i>Tetillidae</i> sp.1	○							
<i>Vulcanella doederlein</i>	○							
<i>Hymeniacidon hirta</i>	○		○	○	○	○	○	○
<i>Psammocinia</i> sp.1						○	○	○
<i>Psammocinia rubra</i>					○			
<i>Tethya aurantium</i>	○		○	○				○
<i>Tethya songakensis</i>								○
<i>Chondrilla australiensis</i>	○	○						
Phylum Cnidaria								
<i>Coryne pusilla</i>			○					
<i>Sertularella gotoi</i>	○	○	○		○	○		
<i>Plumularia</i> sp.1		○	○	○				
<i>Thecocarpus niger</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Dentitheca habereri</i>		○						
<i>Aglaophenia suensonii</i>	○							
<i>Aglaophenia whiteleggei</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Macrorhynchia phoenicea</i>	○	○				○		○
<i>Corynactis</i> sp.1		○						
<i>Verrucella umbraculum</i>	○							
<i>Anthoplexaura dimorpha</i>				○				
<i>Acabaria undulata</i>				○				
<i>Anthopleura japonica</i>				○	○	○		
<i>Anthopleura kurogane</i>	○	○		○	○			○
<i>Scleractinia</i> sp.1	○							
<i>Alveopora japonica</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Montipora trabeculata</i>	○	○	○					○
<i>Psammocora profundacella</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Oulangia stokesiana miltoni</i>						○	○	
Phylum Platyhelminthes								
<i>Placocera multitentaculata</i>						○		
<i>Pseudoceros</i> sp. 3								○
Phylum Bryozoa								
<i>Bryozoa</i> sp.1	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Bryozoa</i> sp.2			○					
<i>Jellyella tuberculata</i>	○	○	○				○	
<i>Membranipora villosa</i>	○	○	○	○	○			
<i>Bugula neritina</i>		○						
<i>Bugula subglobosa</i>	○							
<i>Virididentula dentata</i>	○		○					○
<i>Tricellaria occidentalis</i>	○	○		○	○	○	○	○
<i>Catenicella triangulifera</i>				○				

Appendix 1. Continued

Phylum & Species	Year							
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
<i>Watersipora subtorquata</i>	○							
<i>Parasmittina pyriformis</i>	○		○					
<i>Cheiloporina haddoni</i>	○							
<i>Amastigia rudis</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Amastigia xishaensis</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Caberea boryi</i>	○	○			○	○	○	○
<i>Licornia diadema</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Caberea lata</i>	○	○					○	○
<i>Adeonella lichenoides</i>	○	○		○	○	○	○	
<i>Iodictyum axillare</i>		○	○					
<i>Reteporellina denticulata</i>		○	○	○	○	○	○	○
<i>Onchoporella selenoides</i>		○			○			
<i>Petraliella magna</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Disporella novaehollandiae</i>					○	○	○	
<i>Patinella radiata</i>								○
Phylum Sipunculida								
<i>Phascolosoma scolops</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Phascolosoma agassizii</i>					○	○	○	○
Phylum Mollusca								
<i>Ischnochiton boninensis</i>	○					○		
<i>Ischnochiton comptus</i>	○	○		○		○	○	○
<i>Trioplax albrechtii</i>								○
<i>Ischnochiton hakodadensis</i>	○							
<i>Lepidozona coreanica</i>							○	○
<i>Mopalia retifera</i>				○	○		○	
<i>Liolophura japonica</i>					○		○	
<i>Rhyssoplax kurodai</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Onithochiton hirasei</i>	○			○		○	○	○
<i>Acanthochitona achates</i>					○	○	○	
<i>Cryptoplax japonica</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Haliotis diversicolor</i>	○	○					○	
<i>Haliotis supertexta</i>	○		○	○	○			
<i>Tugali decussata</i>	○							
<i>Montfortisra oldhamiana</i>					○			
<i>Diodora quadriradiata</i>			○		○	○		○
<i>Macroschisma dilatata</i>	○							
<i>Diodora sieboldii</i>					○		○	
<i>Patellidae</i> sp.1						○	○	
<i>Cellana toreuma</i>				○	○	○	○	○
<i>Patelloida saccharina lanx</i>		○				○		
<i>Patelloida pygmaea signatoides</i>								○

Appendix 1. Continued

Phylum & Species	Year							
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
<i>Patelloida pygmaea</i>							○	
<i>Lottia luchuana</i>	○							
<i>Lottia kogamogai</i>								○
<i>Lottia langfordi</i>				○		○		
<i>Nipponacmaea radula</i>	○		○					
<i>Erginus moskalevi</i>	○							
<i>Turbo cornutus</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Astrarium haematragum</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Pomaulax japonicus</i>				○				
<i>Pomaulax japonicus</i> sp.	○							
<i>Chlorostoma lischkei</i>	○		○					○
<i>Cantharidus hirasei</i>				○				○
<i>Cantharidus japonicas</i>	○			○		○	○	○
<i>Cantharidus jessoensis</i>			○				○	○
<i>Trochus rota</i>			○	○	○	○	○	
<i>Clanculus microdon</i>	○	○	○	○	○		○	○
<i>Cantharidus callichroa</i>					○	○	○	
<i>Komaitrochus pulcher</i>	○					○	○	○
<i>Alcyna ocellata</i>	○		○	○	○	○	○	○
<i>Cantharidus bisbalteatus</i>	○							
<i>Stomatolina rubra</i>	○					○		○
<i>Conotalopia mustelina</i>								○
<i>Lirularia pygmaea</i>	○							
<i>Gigahomalopoma nocturnum</i>							○	○
<i>Collonista glareosa</i>	○							
<i>Neocollonia pilula pilula</i>						○		○
<i>Hilota variabilis</i>								○
<i>Phasianella solida</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Calliostoma crossleyae</i>								○
<i>Tristichotrochus haliarchus</i>					○	○		
<i>Tristichotrochus unicus</i>	○	○		○	○	○	○	○
<i>Tegula pfeifferi carpenteri</i>		○			○		○	
<i>Tegula rustica</i>								○
<i>Tegula turbinata</i>				○	○	○	○	
<i>Euchelus atratus</i>					○			
<i>Hybochelus cancellatus</i>	○				○		○	
<i>Granata lyrata</i>	○			○		○	○	○
<i>Vitreobalcis temnopleuricola</i>								○
<i>Teinostoma radiatum</i>							○	
<i>Assimineea estuarina</i>							○	
<i>Pusillina plicosa</i>						○	○	

Appendix 1. Continued

Phylum & Species	Year							
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
<i>Alvania ogasawarana</i>				○	○	○	○	○
<i>Rissoina plicatula</i>					○		○	○
<i>Rissoina costulata</i>	○			○	○	○		
<i>Petalconchus renisectus</i>	○							
<i>Thylacodes adamsii</i>		○			○	○	○	○
<i>Petalconchus tokyoensis</i>							○	○
<i>Naria helvola</i>	○				○		○	○
<i>Cypraeidae</i> sp.1				○	○			
<i>Purpuradusta gracilis</i>	○	○		○		○	○	○
<i>Palmadusta artuffeli</i>		○			○			○
<i>Lyncina vitellus</i>		○						○
<i>Hespererato scabriuscula</i>						○		
<i>Monoplex parthenopeus</i>	○		○		○		○	
<i>Cymatium (Monoplex) comptum</i>						○		
<i>Rhinoclavis kochi</i>	○	○			○			
<i>Rhinoclavis kochi</i> sp. 1						○		
<i>Bittium</i> sp.							○	○
<i>Cerithium dialeucum</i>	○	○	○					
<i>Clypeomorus bifasciata</i>	○			○	○	○		
<i>Argyropeza schepmaniana</i>						○		
<i>Bittium glareosum</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Cerithium alutaceum</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Cacozeliana variegata</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Ittibittium parcum</i>						○		
<i>Cerithidium diplax</i>						○		
<i>Cerithidium perparvulum</i>		○						
<i>Diala stricta</i>		○						
<i>Triphoridae</i> sp.1						○	○	○
<i>Cautor</i> sp. 1							○	○
<i>Cerithiopsis</i> sp.						○	○	
<i>Viriola tricineta</i>	○	○	○		○	○	○	○
<i>Inella sagamiensis</i>		○		○	○		○	○
<i>Inella japonica</i>	○	○		○		○	○	
<i>Litharium kurodai</i>	○	○	○	○				○
<i>Coriophora fusca</i>							○	
<i>Mastonia millepunctata</i>		○	○	○	○	○	○	○
<i>Obesula turricula</i>			○			○		
<i>Mastonia thetis</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Bouchettriphora otsuensis</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Cautor granulatus</i>	○			○			○	○
<i>Bouchettriphora confusa</i>	○	○	○	○	○	○	○	○

Appendix 1. Continued

Phylum & Species	Year							
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
<i>Mastonia undata</i>	○		○	○				
<i>Aclophoropsis mcmichaeli</i>	○	○	○	○	○	○	○	
<i>Iniforis fusiformis</i>	○	○			○	○	○	○
<i>Nototriphora alba</i>					○	○	○	○
<i>Cerithiopsidae</i> sp.1	○							
<i>Cerithiopsis subreticulata</i>				○				○
<i>Joculator marileutes</i>	○							
<i>Seila morishimai</i>				○				
<i>Seila japonica</i>	○							
<i>Reticunassa fraterculus</i>	○	○		○				
<i>Iredalea pygmaea</i>							○	
<i>Pseudodaphnella leuckarti</i>				○		○		○
<i>Obesotoma tenuilirata</i>	○							
<i>Hemicythara octangulata</i>		○				○		
<i>Guraleus deshayesii</i>	○							
<i>Lienardia roseotincta</i>								○
<i>Etrema subauriformis</i>						○		
<i>Ceratostoma fourneri</i>		○	○					
<i>Ocinebrellus inornatus</i>								○
<i>Lataxiena fimbriata</i>							○	○
<i>Bedevina birileffi</i>							○	○
<i>Ergalatax contracta</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Thais bronni</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Reishia luteostoma</i>	○		○	○	○	○	○	
<i>Coralliophila rubrococcinea</i>				○				
<i>Mipus arbutum</i>					○			
<i>Mancinella echinulata</i>		○						
<i>Morula iostoma</i>	○			○	○			○
<i>Morula spinosa</i>					○		○	○
<i>Columbellidae</i> sp.1	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Euplica scripta</i>	○	○	○	○	○		○	○
<i>Pyrene flava</i>	○	○					○	○
<i>Pardalinops testudinarius</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Pyrene testudinaria subcibraria</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Mitrella bicincta</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Mitrella burchardi</i>		○		○	○	○	○	○
<i>Mitrella anachisoides</i>							○	○
<i>Mitrella nympha</i>		○		○		○		
<i>Pyreneola semipicta</i>				○				
<i>Pyreneola pleurotomoides</i>	○		○		○	○	○	○
<i>Anachis miser</i>		○		○	○	○	○	○

Appendix 1. Continued

Phylum & Species	Year							
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
<i>Zafra mitriformis</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Mokumea divaricata</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Metaachis marquesa</i>							○	
<i>Mitrella lischkei</i>					○	○		
<i>Mitrella albuginosa</i>		○				○	○	○
<i>Mitrella mindorensis</i>					○			
<i>Phos roseatus</i>				○				
<i>Conus lischkeanus</i>	○							
<i>Kelletia lischkei</i>		○						
<i>Polia subrubiginosus</i>				○			○	
<i>Engina</i> sp.1					○	○	○	○
<i>Siphonalia spadicea</i>					○			
<i>Neptunea cumingii</i>	○							
<i>Heliacus</i> sp.1					○			
<i>Pyrgulina</i> sp.1						○		
<i>Pyrgulina casta</i>						○		
<i>Pyrgulina pupaeformis</i>					○			
<i>Turbonilla candida</i>								○
<i>Decorifer insignis</i>							○	
<i>Decorifer matusimanus</i>						○		
<i>Haloa nigropunctata</i>							○	
<i>Aplysia kurodai</i>			○					
<i>Aplysia japonica</i>	○	○	○					○
<i>Chromodoris</i> sp.1						○		○
<i>Chromodoris orientalis</i>	○	○	○				○	○
<i>Goniobranchus tinctorius</i>	○	○						
<i>Ceratosoma tenue</i>			○					
<i>Glossodoris misakinobogae</i>		○						
<i>Hypselodoris festiva</i>	○		○			○		
<i>Dendrodoris arborescens</i>						○		○
<i>Phyllidia ocellata</i>	○		○			○		
<i>Phyllidiella pustulosa</i>							○	
<i>Platydorid tabulata</i>								○
<i>Platydorid ellioti</i>								○
<i>Tayuva lilacina</i>						○	○	
<i>Protaeolidiella atra</i>			○					
<i>Nucula paulula</i>					○			
<i>Solemya japonica</i>		○	○	○		○	○	○
<i>Leiosolenus lischkei</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Modiolus kurilensis</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Modiolus margaritaceus</i>							○	

Appendix 1. Continued

Phylum & Species	Year							
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
<i>Modiolus nipponicus</i>	○	○		○			○	○
<i>Musculus</i> sp.1				○				
<i>Septifer keenae</i>	○	○	○	○	○	○	○	
<i>Brachidontes mutabilis</i>				○				○
<i>Tricomusculus semigranatus</i>	○							
<i>Musculus pusio</i>						○		
<i>Musculus viridulus</i>	○			○	○	○	○	
<i>Musculus cumingiana</i>					○			
<i>Lamarcka avellana</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Tetrarca boucardi</i>	○		○			○	○	○
<i>Barbatia stearnsii</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Acar plicata</i>					○			○
<i>Samacar strabo</i>	○							
<i>Didimacar tenebrica</i>						○		
<i>Ctenoides lischkei</i>	○		○			○	○	○
<i>Limaria hirasei</i>	○				○		○	
<i>Pinctada fucata</i>							○	
<i>Isognomon ephippium</i>						○	○	○
<i>Streptopinna saccata</i>								○
<i>Hyotissa hyotis</i>				○		○	○	○
<i>Dendostrea sandvichensis</i>				○	○	○	○	○
<i>Magallana nippona</i>			○					
<i>Saccostrea kegaki</i>				○				
<i>Crassostrea nigromarginata</i>						○		
<i>Ostrea circumpicta</i>				○	○	○	○	○
<i>Saccostrea kegaki</i>				○				
<i>Dimya japonica</i>	○							
<i>Laevichlamys cuneata</i>	○		○	○	○		○	○
<i>Veprichlamys jousseaumei</i>								○
<i>Chlamys nipponensis</i>		○			○			
<i>Spondylus butleri</i>							○	○
<i>Spondylus varius</i>		○						○
<i>Scaechlamys lemniscata</i>	○							○
<i>Anomia chinensis</i>						○		
<i>Plicatula horrida</i>					○		○	
<i>Dimya japonica</i>	○							
<i>Chamidae</i> sp.1						○		
<i>Chama dunkeri</i>					○	○	○	○
<i>Chama japonica</i>	○							
<i>Chama fragum</i>			○			○	○	○
<i>Chama limbula</i>			○		○		○	○

Appendix 1. Continued

Phylum & Species	Year							
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
<i>Pseudochama retroversa</i>			○				○	○
<i>Amphichama argentata</i>							○	
<i>Phlyctiderma japonicum</i>						○		
<i>Irus irus</i>					○		○	○
<i>Basterotia recluzi</i>	○							
<i>Scintilla violescens</i>							○	
<i>Kellia porculus</i>	○							
<i>Cardita leana</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Fluvia undatopicta</i>					○			
<i>Sphenia coreanica</i>							○	
<i>Cucurbitula cymbium</i>							○	
<i>Pandora wardiana</i>	○							
Phylum Annelida								
<i>Polychaeta</i> sp.1	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Nereidae</i> sp.1							○	
<i>Perinereis linea</i>	○		○	○	○	○	○	○
<i>Perinereis euiini</i>					○		○	
<i>Nereis neoneanthes</i>			○	○	○	○	○	○
<i>Caratonereis hircinicola</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Platynereis bicanaliculata</i>					○	○	○	○
<i>Aphrodita aculeata</i>	○			○	○	○		○
<i>Halosydna brevisetosus</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Lepidonotus tenuisetosus</i>	○		○	○	○	○	○	○
<i>Lepidonotus dentatus</i>							○	
<i>Sthenolepis japonica</i>	○			○			○	
<i>Amphicteis gunneri</i>	○							
<i>Terebellides stroemii</i>	○							
<i>Terebellidae</i> sp.1		○						
<i>Thelepus setosus</i>	○		○	○	○	○	○	○
<i>Acrocirrus validus</i>		○		○	○		○	
<i>Daylithos parmatius</i>	○							
<i>Diopatra sugokai</i>	○	○			○	○	○	
<i>Eunice aphroditois</i>	○		○		○			○
<i>Leodice antennata</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Lysidice collaris</i>								○
<i>Filograna implexa</i>	○							
<i>Serpula vermicularis</i>							○	
Phylum Arthropoda								
<i>Pantopoda</i> sp.1		○			○	○	○	○
<i>Ammonothea hedgpethi</i>	○							
<i>Crustacea</i> sp.1	○							

Appendix 1. Continued

Phylum & Species	Year							
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
<i>Crustacea</i> sp.2	○							
<i>Cymodoce japonica</i>				○	○	○	○	○
<i>Holotelson tuberculatus</i>		○	○	○	○	○	○	○
<i>Cleantiella isopus</i>		○						
<i>Perampithoe</i> sp.1	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Caprellidae</i> sp.1					○	○	○	○
<i>Caprella mutica</i>	○		○	○	○	○		
<i>Decapoda</i> sp.1					○			
<i>Decapoda</i> sp.2					○			
<i>Decapoda</i> sp.3					○			
<i>Solenocera melantho</i>			○					
<i>Metapenaeopsis dalei</i>						○		
<i>Leptochela sydniensis</i>	○							
<i>Rhynchocinetes uritai</i>								○
<i>Palaemon carinicauda</i>	○							
<i>Alpheidae</i> sp.1						○		
<i>Synalpheus tumidomanus</i>				○				
<i>Synalpheus neomeris</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Latreutes</i> sp.1								○
<i>Latreutes planirostris</i>					○			
<i>Pandalus gracilis</i>					○			
<i>Plesionika izumiae</i>					○			
<i>Eualus spathulirostris</i>					○		○	
<i>Heptacarpus acuticarinatus</i>						○		
<i>Paguristes</i> sp.1							○	
<i>Paguristes ortmanni</i>	○		○	○	○	○	○	
<i>Diogenes nitidimanus</i>				○				○
<i>Areopaguristes hirsutimanus</i>					○		○	
<i>Paguridae</i> sp.1	○							
<i>Pagurus filholi</i> sp.1		○	○					
<i>Pagurus japonicus</i>			○	○	○	○	○	○
<i>Pagurus nigrivittatus</i>				○	○	○	○	○
<i>Pagurus pectinatus</i>	○	○		○	○		○	○
<i>Pagurus proximus</i>	○							
<i>Pagurus rubrior</i>	○		○		○		○	○
<i>Pagurus decimbrachiae</i>	○	○		○	○		○	
<i>Boninpagurus pilosipes</i>								○
<i>Porcellanopagurus japonicus</i>				○				
<i>Galathea pubescens</i>	○		○	○	○	○	○	
<i>Galathea orientalis</i>	○		○	○	○	○	○	○
<i>Pisidia serratifrons</i>	○					○		

Appendix 1. Continued

Phylum & Species	Year							
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
<i>Petrolisthes japonicus</i>							○	
<i>Paradorippe granulata</i>							○	
<i>Holthuija cognata</i>								○
<i>Anatolikos japonicus</i>			○					
<i>Charybdis bimaculata</i>				○				
<i>Thalamita sima</i>	○	○	○	○				○
<i>Xanthidae</i> sp.1								○
<i>Actaea semblatae</i>	○	○		○	○	○	○	○
<i>Atergatis reticulatus</i>		○	○	○		○		○
<i>Neoxanthops truncatus</i>	○				○		○	○
<i>Gaillardiiellus orientalis</i>					○			
<i>Leptodius affinis</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Medaeops granulatus</i>							○	
<i>Atergatis floridus</i>					○			
<i>Zosimus aeneus</i>		○						
<i>Arcotheres sinensis</i>							○	○
<i>Heteropilumnus ciliatus</i>							○	
<i>Pilumnus minutus</i>							○	
<i>Echinoecus nipponicus</i>		○			○	○	○	○
<i>Achaeus</i> sp.1						○	○	
<i>Achaeus tuberculatus</i>	○				○	○	○	○
<i>Gaetice depressus</i>					○	○		○
<i>Menaethius monoceros</i>				○		○	○	○
<i>Scyra ferox</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Pugettia intermedia</i>				○	○	○	○	○
<i>Hyastenus elongatus</i>					○			○
<i>Oregonia gracilis</i>	○						○	
<i>Thoracica</i> sp.1						○		
Phylum Echinodermata								
<i>Comatulidae</i> sp.1					○		○	○
<i>Anneissia japonica</i>						○		
<i>Anthodon serrata</i>					○			
<i>Certonardoa semiregularis</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Ophidiaster cribrarius</i>	○	○	○	○	○	○	○	
<i>Aquilonastra batheri</i>	○		○	○				○
<i>Patiria pectinifera</i>		○					○	
<i>Henricia pacifica</i>	○	○			○	○	○	○
<i>Henricia nipponica</i>							○	
<i>Henricia reniessa</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Asteriidae</i> sp.1							○	
<i>Coscinasterias acutispia</i>						○		

Appendix 1. Continued

Phylum & Species	Year							
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
<i>Ophiactis savignyi</i>	○	○		○			○	○
<i>Ophiopholis mirabilis</i>				○				
<i>Ophiothrix exigua</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Ophioplocus japonicus</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Ophionereis dubia dubia</i>	○			○	○	○	○	○
<i>Ophiodermatidae</i> sp.1	○							
<i>Ophiarachnella gorgonia</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Ophiomastix mixta</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Temnopleureus reevesii</i>				○			○	
<i>Hemicentrotus pulcherrimus</i>		○		○				
<i>Pseudocentrotus depressus</i>		○						
<i>Mesocentrotus nudus</i>					○			
<i>Heliocidaris crassispina</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Toxopneustes pileolus</i>								○
<i>Diadema savignyi</i>							○	
<i>Eupentacta quinquesemita</i>	○			○		○	○	○
<i>Pentacta doliolum</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Holothuria</i> sp.1					○			
<i>Holothuria hilla</i>	○				○	○	○	○
Phylum Chordata								
<i>Aplidium pliciferum</i>	○	○			○			○
<i>Didemnum</i> sp.1		○		○	○	○	○	○
<i>Didemnum moseleyi</i>	○		○	○	○		○	○
<i>Leptoclinides madara</i>	○	○	○	○	○	○	○	○
<i>Chelyosoma dofleini</i>	○		○	○	○	○	○	
<i>Botrylloides violaceus</i>		○	○		○			
<i>Pyuridae</i> sp.1					○			
<i>Herdmania monus</i>	○	○	○	○	○	○	○	○