

〈Original article〉

마산만 봉암갯벌에 서식하는 대형저서동물의 하계 분포양상

서진영 · 김정현 · 최진우*

한국해양과학기술원 위해성분석연구센터

Distribution Patterns of Macrobenthos during Recent Summer Seasons at the Bongam Sand Tidal Flat of Masan Bay, Korea

Jin-Young Seo, Jeong-Hyun Kim and Jin-Woo Choi*

Risk Assessment Research Center, KIOST, Geoje 53201, Republic of Korea

Abstract - In this study, a series of survey were conducted to identify the distribution patterns of macrobenthos at the Bongam sand tidal flat in Masan Bay. We collected macrobenthos at 9 sampling sites twice in June and September of every year from 2012 to 2017 using a box core sampler (collecting area, 0.025 m²). There was a total of 50 species with a community density of 6,388 ind.m⁻² and a biomass of 313.9 g wet m⁻² during the study period. Polychaetes had the highest number of species and density among the macrofauna, but the mollusks had the largest biomass. The number of species ranged from 10 to 25 during study period but increased to over 20 species in 2014. The density which ranged from 1,508 ind.m⁻² to 12,008 ind.m⁻² rapidly increased in 2015. The dominant species were all polychaetes such as *Heteromastus filiformis*, *Prionospio japonicus*, *Hediste diadroma*, and *Neanthes succinea*. The mean diversity index ranged from 1.2 to 1.9, richness index from 1.2 to 2.4, and evenness index from 0.5 to 0.9. From the cluster analysis results, there was a spatial difference in the similarity of faunal composition of macrobenthos and this pattern was maintained throughout the study period, that is, the temporal similarities were higher than the spatial similarities. There was a change in community composition from June 2014 to June 2015 in most of the sampling sites. During this time, the dominant species also changed from *H. filiformis* and *N. succinea* to *H. filiformis* and *H. diadroma*. The density of opportunistic species such as *Capitella capitata* and *Polydora ligni* decreased compared to the early 2000s while the population of *H. diadroma* increased from 2015. There was little ecological information on *H. diadroma* such as when and where this species occurred.

Keywords : macrobenthos, distribution patterns, tidal flat, Bongam, Masan Bay

서론

조간대 연안 습지는 생태계의 매우 중요한 부분을 차지하

고 있으며, 해양과 육지를 연결하는 특수한 위치에 있기 때문에 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 최근 도시화 및 산업화에 따른 매립으로 인해 습지 생태계는 위협에 노출되고 있다. 실제 전 세계적으로 연안 염습지의 50% 이상이 인간의 활동으로 인해 소실되거나 쇠퇴하고 있는 실정이다(Barbier *et al.* 2011). 조간대에 서식하는 대형저서동물 군집은 인간과 관

* Corresponding author: Jin-Woo Choi, Tel. 055-639-8550, Fax. 055-639-8509, E-mail. jwchoi@kiost.ac.kr

련되거나 혹은 자연적인 교란에 노출되어 개체군의 규모 및 생체량에 위협을 받고 있다(Nishijima *et al.* 2013). 조간대 서식 대형저서동물은 조석, 바람, 파도 등과 같은 물리 화학적 요인들에 의해 매일 혹은 계절별로 영향을 받고, 태풍과 같은 일시적이고 급격한 환경 변동으로 인해 대형저서동물 군집은 심각한 수준의 영향을 받기도 한다(Chainho *et al.* 2007; Nishijima *et al.* 2013). 그 외에도 조간대 서식 대형저서동물 군집은 염분과 퇴적상에 의해 영향을 받는다. 홍수와 가뭄과 같은 자연 현상은 일시적으로 조간대 지역의 염분 농도를 변화시킨다. 이러한 염분 스트레스와 함께 홍수 및 가뭄으로 야기된 퇴적물의 침식과 퇴적으로 인한 퇴적상 변동은 조간대 서식 대형저서동물에게는 매우 중요한 교란이다(Salen-Picard *et al.* 2003; Cardoso *et al.* 2008).

봉암갯벌은 마산만에 위치한 작은 하구형 갯벌로 면적은 약 20만 m^2 규모의 마산만 유일의 자연 모래갯벌이다. 봉암갯벌은 주변에 하천을 따라 주거지역과 창원국가산업단지가 위치하고 있다. 이러한 인위적 오염원의 하천을 통한 유입으로 인해 갯벌 생태계가 위협에 노출되어 있다. 봉암갯벌의 조차는 연평균 2m이고, 마산만의 내부로 유입되는 봉암천에 의해 형성되었다. 강수기에는 염분의 감소가 있는 기수성 모래갯벌이다(Seo *et al.* 2007).

국내 갯벌에 대한 연구는 국내 갯벌 면적의 80% 이상을 차지하고 있는 서해안 갯벌에 집중되어있다. 남해안 갯벌에 대한 조사는 해양수산부의 연안습지 기초조사로 수행한 강진만 갯벌, 사천 진주만 갯벌에 대한 조사 등이 있다(MOF 2005, 2013a, b). 봉암갯벌에 서식하는 대형저서동물군집에 대한 조사는 분포양상을 파악하기 위해 갯벌 내 12개 정점을 선정하

여 2004년 3월에 1회 조사한 연구(Seo *et al.* 2007), 연안습지 기초조사의 일환으로 2013년에 수행한 연구 결과가 있다(MOF 2013). 그 외에는 환경에 대한 연구는 퇴적물 내 중금속 함량(Lee *et al.* 2010)에 대한 연구가 일부 수행되었으나 여전히 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 봉암갯벌 서식환경 특히 퇴적상의 변동 양상에 따른 대형저서동물 군집의 연변동양상 및 종다양도 변동 양상들을 파악하고, 환경요인과 군집구조 및 주요 우점종 간 상관관계를 산출하여 봉암갯벌의 대형저서동물 군집구조의 시·공간적 변동 양상에 대해 파악해 보고자 한다.

재료 및 방법

1. 서서환경

서서환경분석을 위해 퇴적물의 총 유기탄소 함량, 평균입도를 측정하였다. 총 유기탄소량(Total Organic Carbon; TOC) 측정은 채취된 표층 퇴적물 시료를 동결건조기를 이용하여 완전히 건조시킨 후 막자사발로 곱게 갈아주었다. 이후 10% HCl 용액을 첨가하여 탄산염을 제거하고 다시 건조시킨 다음 막자사발로 곱게 갈아주었다. 퇴적물 시료는 미세저울을 이용해 주석용기(Tin capsule)에 약 15 mg 정도를 담아 CHN analyzer (EA 2000)를 통해 유기물 함량을 분석하였다.

퇴적물 입도분석은 채취된 표층 퇴적물 시료를 비이커에 담아 35% 과산화수소수(H_2O_2)를 반응이 일어나지 않을 때까지 조금씩 첨가하여 유기물을 제거하였다. 이후 4 ϕ 체로 습

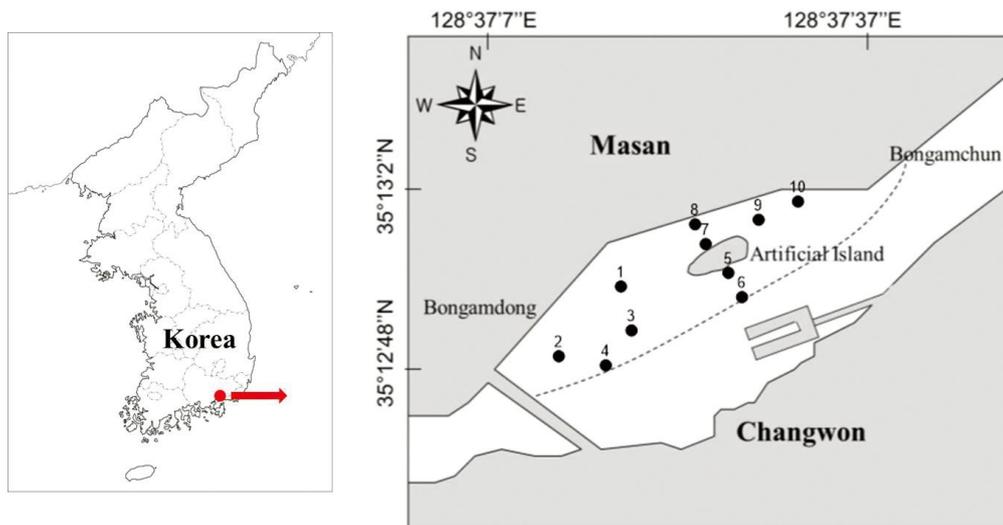


Fig. 1. The study area and sampling sites in the Bongam tidal flat of Masan Bay.

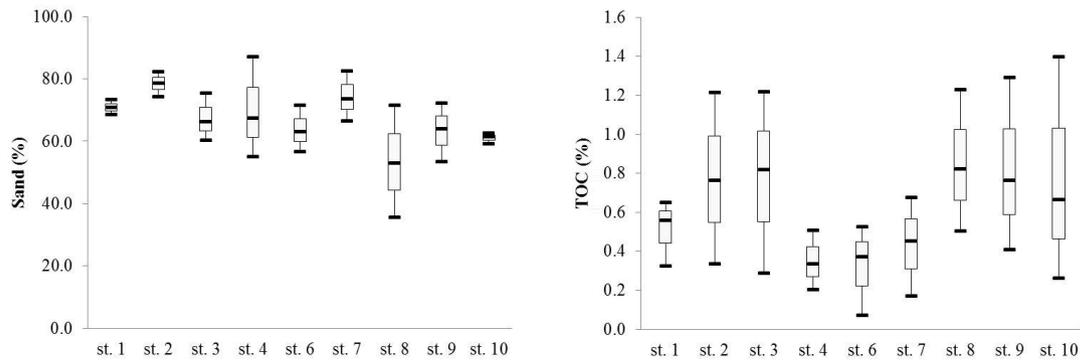


Fig. 2. The spatial variations in the sand contents (left) and TOC contents (right) of surface sediments at each site presented by Box-and-whisker plots (maximum, 75%, 50%, 25% and minimum).

식 체질하여 조립질과 세립질을 구별하였으며 조립질 시료는 1 Ø 간격으로 건식 체질하여 입도별로 무게를 측정하였다. 세립질 시료는 X-선 자동입도분석기인 sedigraph WD5100을 이용하여 분석하였다.

2. 대형저서동물

대형저서동물의 채집은 현장에 10개 정점을 선정하여 2012년부터 2017년까지 6월과 9월(연 2회)에 현장조사를 수행하였다. 조사는 간조 시에 상자형 코어 샘플러(채집면적 0.025 m²)를 사용하여 정점 당 4회씩 채집하였다. 채집된 퇴적물은 현장에서 망목크기 1 mm의 체를 이용하여 거른 후 분리된 저서동물들을 10% 중성 포르말린으로 고정하였다. 고정한 시료는 실험실에서 주요 분류군별로 선별한 후 전자저울을 사용하여 습중량을 측정하였고, 현미경으로 가능한 중 수준까지 동정 및 계수하였다.

대형저서동물 군집분석을 위해 각 정점 간 출현 종수, 서식 밀도, 생물량, 우점종 등을 단위면적(m²)으로 환산하여 분석하였다. 종조성의 유사도는 Bray-Curtis similarity를 이용하여 집괴분석(cluster analysis)와 다차원척도법(non-metric Multidimensional Scaling; nMDS)을 실시하였고, 집괴분석 결과를 바탕으로 각 그룹에 대한 대형저서동물의 기여도를 파악하기 위해 SIMPER(similarity percentage) 분석을 실시하였다. 위 모든 분석에는 군집분석 프로그램인 Primer vs. 7.0을 사용하였다. 생태지수는 종다양성지수, 종균등도지수, 종풍부도지수를 매월 각 정점별로 계산하였다. 자료분석은 PRIMER 7.0을 사용하였다. 대형저서동물의 출현종수, 서식밀도 및 생물량과 환경요인들과의 상관관계를 파악하기 위해 spearman rank correlation 분석을 수행하였다. 상관관계 분석에는 통계 프로그램인 SPSS vs. 17.0을 이용하였다.

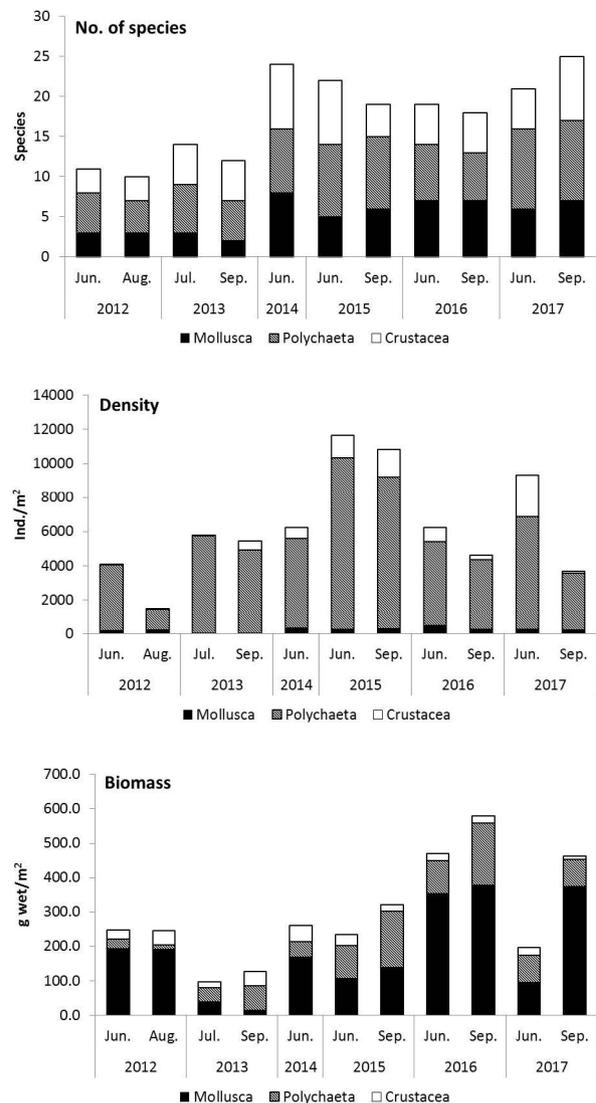


Fig. 3. The temporal variations in the number of species, density and biomass of major fauna groups in the Bonam tidal flat during the study period.

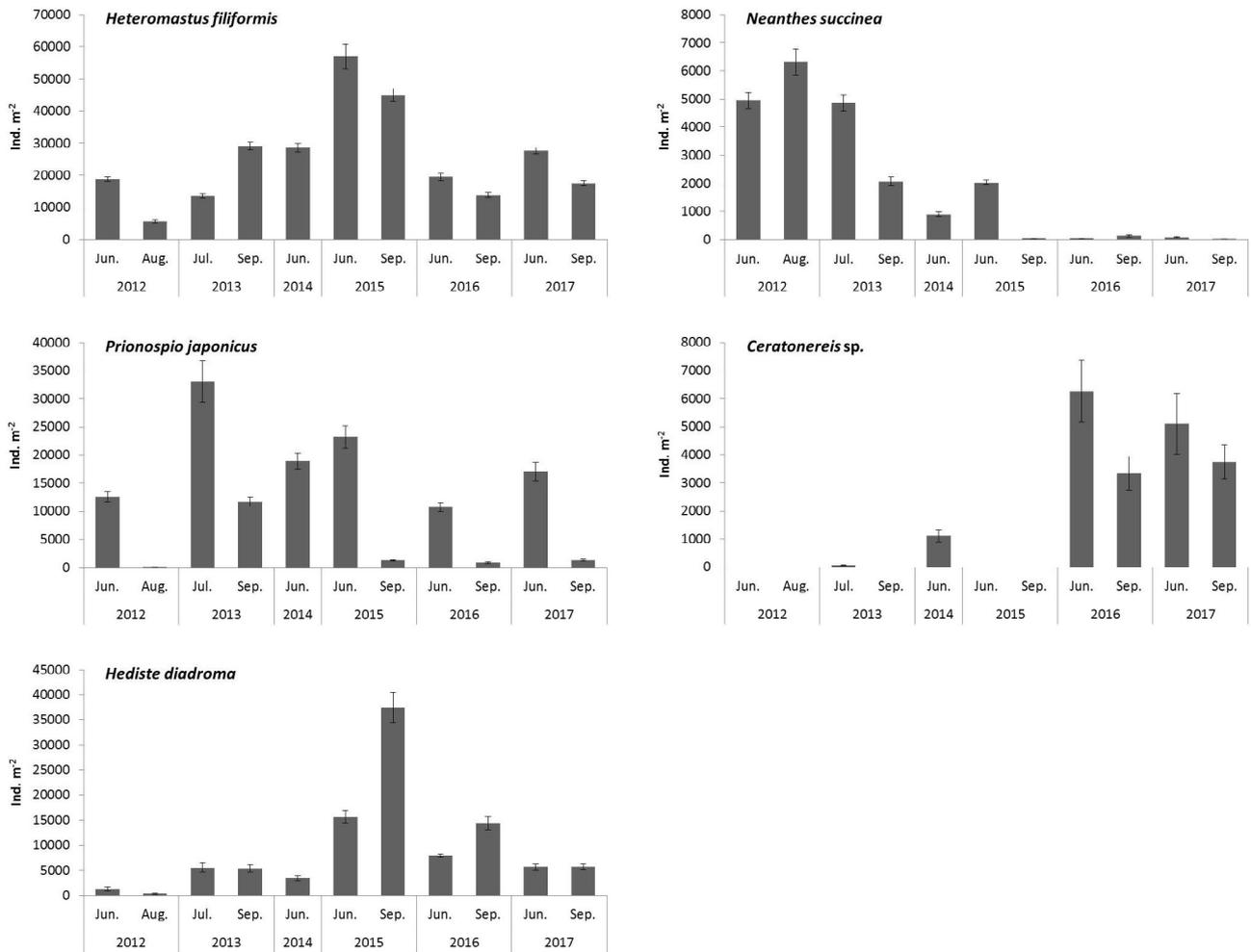


Fig. 4. The temporal abundance patterns of dominant species in the Bongam tidal flat.

결 과

1. 저서환경

2013년부터 2017년까지 퇴적상 변동 양상을 살펴본 결과, 정점 1에서는 모래 함량이 평균 $69 \pm 3.7\%$, 정점 2에서는 $78 \pm 3.0\%$, 정점 3에서는 $87 \pm 5.9\%$ 로 4년간 큰 변동을 보이지 않았다(Fig. 2). 그 외 정점들에서도 모래 함량이 계절에 따라 다소 변동을 하였으나 60~80% 수준으로 나타났다. 그러나 정점 4에서는 모래 함량이 2013년 9월에는 87.2%였으나, 2015년 9월에는 62.6%, 2016년 9월에는 55.0%로 2013년에 비해 30% 이상 감소하였다. 정점 8에서도 2013년과 2014년에는 모래 함량이 70~80% 수준으로 나타났으나, 2015년 이후 50%로 감소하였고, 2017년에는 모래 함량이 35.5%로 크게 감소하였다.

TOC 함량은 조사기간 동안 평균 0.3~0.9%로 정점 4에서

가장 낮았고, 정점 3에서 가장 높았다(Fig. 2). 조사기간 동안 TOC 함량의 변동이 가장 심하였던 곳은 정점 10으로 2014년에 비해 2017년에는 1% 이상 TOC 함량이 감소하였다. 그 외 정점들에서는 2014년 조사 이후 TOC 함량이 2017년까지 큰 변동을 보이지 않았다. 그러나 정점 8과 9에서는 2014년에 비해 2017년에 TOC 함량이 다소 증가하는 경향을 보였다.

2. 대형저서동물 군집구조

2012년부터 2017년까지 봉암갯벌에서 출현한 대형저서동물은 총 50종, 서식밀도는 $6,388 \text{ ind. m}^{-2}$ 였고, 생물량은 $313.9 \text{ g wet m}^{-2}$ 였다. 분류군별 출현종수는 다모류가 42%로 가장 높았고, 연체동물과 절지동물은 각각 29%였다. 분류군별 서식밀도는 다모류가 전체의 85%로 가장 높았고, 절지동물과 연체동물의 순으로 나타났다. 생물량은 연체동물이 전체의 63%

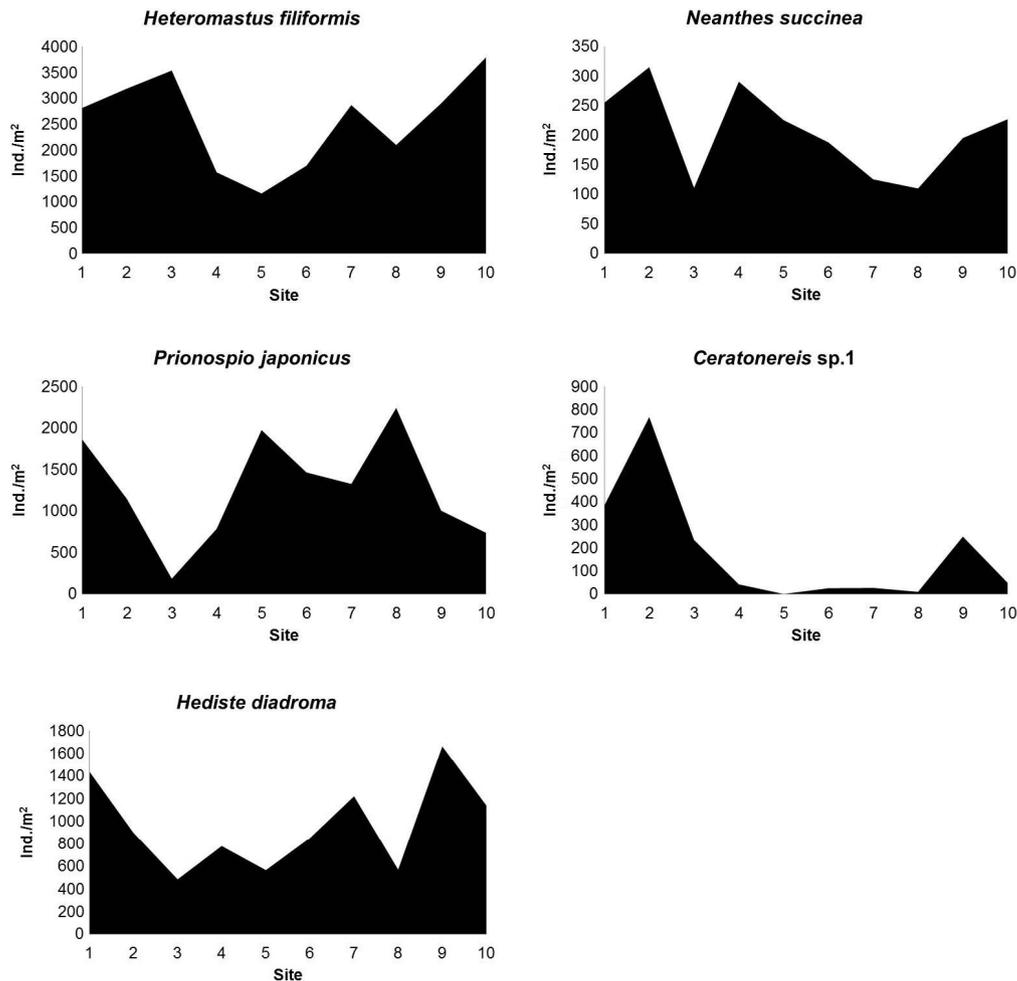


Fig. 5. The spatial distributions of dominant species in the Bongam tidal flat.

로 가장 높았고, 다모류, 절지동물의 순으로 나타났다. 출현종수의 연 변동양상을 살펴보면, 2012년과 2013년에는 출현종수가 10종 내외였으나, 2014년 조사 이후 출현종수가 20종 이상으로 증가하였고, 2017년 9월에 출현종수가 25종으로 가장 높게 나타났다(Fig. 3). 정점별 출현종수는 평균 8~10종 내외로 정점 간 큰 차이를 보이지 않았다. 서식밀도는 1,439~11,996 ind.m⁻²의 범위를 보였다. 서식밀도는 2015년 6월 이후 급격히 증가하는 양상을 보였고, 특히 다모류의 개체수가 급증하였다. 정점별 서식밀도는 2014년 6월 이전에는 갯벌의 상류지역인 정점 8과 9에서 상대적으로 낮았으나, 2015년 6월 이후 정점 4에서 서식밀도가 가장 낮게 나타났다. 생물량은 95.1~641.7 g wet m⁻²의 범위를 보였다. 생물량은 2013년에 가장 낮게 나타났고, 2016년에 급격히 증가하였다. 특히 연체동물의 생물량이 높게 나타났으며, 2017년 9월에도 연체동물의 생물량이 높게 나타났다.

3. 우점종

봉암갯벌에서 조사기간 동안 출현한 대형저서동물 중 주요 우점종을 살펴보면, 다모류의 *Heteromastus filiformis*, *Prionospio japonicus*, *Hediste diadroma*, *Neanthes succinea*, *Ceratonereis* sp. 등이 있다. 그 외에도 절지동물의 *Sinocorophium sinensis*, *Grandidierella japonica*, 연체동물의 *Laternula marilina* 등이 우점하였다. 그 중 조사기간 동안 봉암갯벌에서 가장 우점한 종은 다모류의 *H. filiformis*였다. 이 종은 2012년 6월부터 2017년 9월까지 모든 조사 시기에 출현하였고, 2015년 6월에 정점 4~6을 제외한 모든 정점에서 개체수가 급증하였다. 2016년 이후 개체수는 감소하였으나, 2017년에도 모든 정점에서 가장 우점하는 것으로 나타났다(Figs. 4, 5). *P. japonicus*는 조사기간 동안 6월에 서식밀도가 증가하고 9월에 서식밀도가 감소하는 경향을 보였다. 2013년에는 7월에 현장

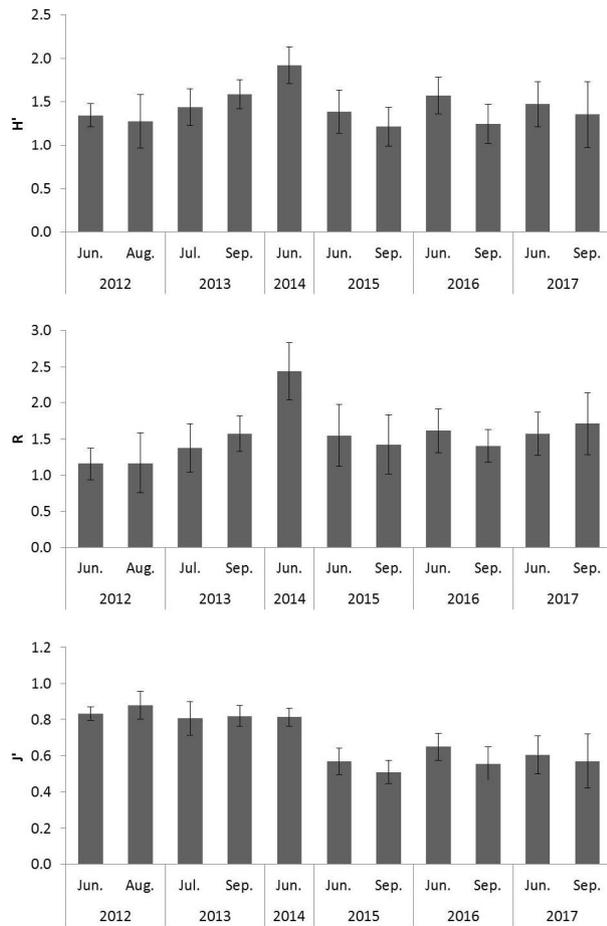


Fig. 6. Temporal variations in the species diversity index (H'), richness index (R) and evenness index (J').

조사를 수행하였는데 이때 조사기간 중 최고 서식밀도를 보였고, 특히 정점 10에서 높게 나타났다. *N. succinea*는 2012년부터 2015년 6월까지 봉암갯벌에서 우점하였으나, 2015년 9월 이후 개체수가 급감하였다. 반면 *H. diadroma*는 2012년부터 2014년까지는 정점 6, 7 등 인공섬 주변 정점에서만 우점하였으나, 2015년 9월에 서식밀도가 급증하였고, 특히 정점 3, 정점 9, 10 등에서 높은 서식밀도를 보였다. *Ceratonereis* sp.는 2013년 9월까지는 거의 봉암갯벌에서 출현하지 않았으며, 2014년 6월에 일시적으로 출현하였다. 그러나 2016년 6월부터 갯벌의 입구에 위치한 정점 2에서 서식밀도가 급증하였으며, 2017년 6월에는 정점 1에서 높은 서식밀도를 보였다.

4. 군집지수

조사기간 동안 종다양도지수는 평균 1.2~1.9, 종풍부도지수는 1.2~2.4, 종균등도지수는 0.5~0.9의 범위를 보였다(Fig. 6). 종다양성지수와 종풍부도지수는 2014년 6월에 조사기간

중 가장 높게 나타났고, 그 외 계절에는 큰 차이를 보이지 않았다. 종균등도지수는 2012년 6월부터 2014년 6월까지 0.8~0.9의 범위를 보여 큰 변동이 없었으나, 2015년 6월 이후 0.6으로 감소하였고, 2017년 9월까지 0.5~0.7의 범위를 보여 감소한 것으로 나타났다. 정점별 종다양도지수는 정점 6에서 조사기간 동안 1.0~2.1 (평균 1.6)로 가장 높았고, 정점 9에서도 1.0~2.0 (평균 1.6)로 높게 나타났다. 반면, 종다양도지수가 가장 낮았던 정점은 정점 8과 10으로 조사기간 동안 평균 1.3였다. 종풍부도지수는 정점 6에서 평균 1.8로 가장 높았고, 정점 8에서 1.3으로 가장 낮았다. 종균등도지수는 모든 정점에서 평균 0.7로 동일하였다.

5. 유사도 분석

조사기간 동안 출현한 모든 생물을 대상으로 cluster 및 nMDS 분석을 수행한 결과, 봉암갯벌은 정점 간 유사도 보다는 계절 간 유사도가 높은 것으로 나타났다. 2012년 6월부터 2013년 9월까지 모든 정점, 2014년 6월 정점 8과 10, 2015년 6월 정점 8, 2016년 9월 정점 1, 2017년 9월 정점 7이 하나의 그룹을 형성하였고(Group A), 2014년 6월부터 2017년 9월까지 Group A에 포함된 5개 정점을 제외한 모든 정점이 하나의 그룹을 형성하였다(Group B).

Cluster 및 nMDS 분석 결과, 인공섬 서쪽의 정점 1~4는 유사도 50% 수준에서 2개의 그룹으로 구분이 되었다(Fig. 7). 2012년과 2013년이 하나의 그룹을 형성하였고(Group A), 2014~2017년이 하나의 그룹을 형성하였다(Group B). SIMPER 분석 결과, 정점 1~4에서 Group A의 형성에 기여도가 높은 종은 모두 다모류의 *H. filiformis*였다(Table 1). 그 외 정점 1과 4에서는 *N. succinea*, 정점 2에서는 *P. japonicus*의 기여도가 높은 것으로 나타났다. 그러나 Group B에서는 모든 조사 시기에 *H. filiformis*와 *H. diadroma*의 기여도가 높은 것으로 나타났다.

정점 5는 가장 해안가에 인접한 정점으로 대조기를 제외하면 간조 시에도 물이 완전히 빠지지 않는 곳이다. 정점 5는 2015년까지는 조사가 진행되었으나, 2016년과 2017년에는 조사를 수행하지 못하였다. 정점 5에서는 2012~2014년이 하나의 그룹을 형성하였고(Group A), 2015년이 하나의 그룹을 형성하였다(Group B) (Fig. 7). Group A의 평균 유사도는 44.69%였고, 그룹 내 기여도가 가장 높은 종은 다모류의 *P. japonicus* (44.5%)와 *H. filiformia* (39.4%)였다(Table 1). Group B의 평균 유사도는 39.42%였고, 기여도가 높은 종은 절지동물의 *G. japonica* (34.4%), *H. filiformis* (24.4%), *H. diadroma* (22.6%)였다.

정점 6은 유사도 50% 수준에서 2개의 그룹으로 구분이

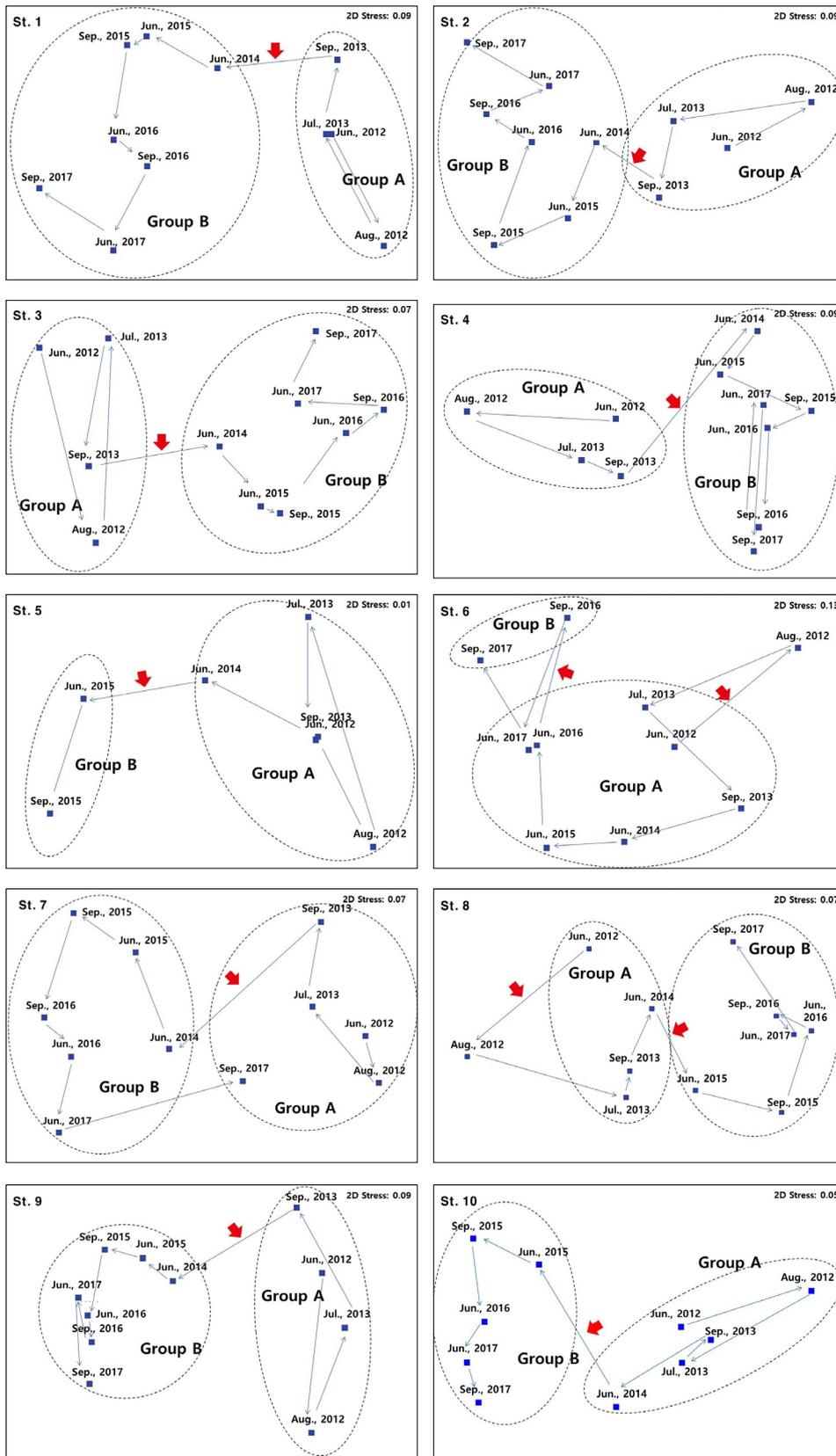


Fig. 7. The nMDS plot based on the abundance data of macrobenthic fauna in the Bongam tidal flat.

Table 1. The results of SIMPER analysis for the site groups in the Bongam tidal flat during the study period

	Group A			Group B		
	Species	Abun.	Con.	Species	Abun.	Con.
st. 1	Average similarity: 38.84			Average similarity: 47.29		
	<i>Heteromastus filiformis</i>	205	56.0	<i>Heteromastus filiformis</i>	325	62.9
	<i>Neanthes succinea</i>	60	22.2	<i>Hediste diadroma</i>	225	22.2
st. 2	Average similarity: 55.06			Average similarity: 52.19		
	<i>Heteromastus filiformis</i>	260	62.8	<i>Heteromastus filiformis</i>	353	57.4
	<i>Prionospio japonicus</i>	182	25.6	<i>Hediste diadroma</i>	137	17.0
st. 3	Average similarity: 40.52			Average similarity: 50.12		
	<i>Heteromastus filiformis</i>	217	76.2	<i>Heteromastus filiformis</i>	433	67.9
				<i>Hediste diadroma</i>	74	10.7
st. 4	Average similarity: 48.41			Average similarity: 47.47		
	<i>Heteromastus filiformis</i>	169	53.6	<i>Heteromastus filiformis</i>	150	61.0
	<i>Neanthes succinea</i>	74	34.7	<i>Hediste diadroma</i>	90	19.7
st. 5	Average similarity: 44.69			Average similarity: 39.42		
	<i>Prionospio japonicus</i>	233	44.5	<i>Grandidierella japonica</i>	160	34.4
	<i>Heteromastus filiformis</i>	105	39.4	<i>Heteromastus filiformis</i>	143	24.4
st. 6	Average similarity: 55.92			Average similarity: 56.95		
	<i>Prionospio japonicus</i>	203	41.2	<i>Heteromastus filiformis</i>	139	72.4
	<i>Heteromastus filiformis</i>	201	35.7			
st. 7	Average similarity: 40.40			Average similarity: 38.58		
	<i>Heteromastus filiformis</i>	180	48.5	<i>Heteromastus filiformis</i>	416	51.0
	<i>Prionospio japonicus</i>	124	22.5	<i>Hediste diadroma</i>	168	21.6
st. 8	Average similarity: 40.45			Average similarity: 56.68		
	<i>Heteromastus filiformis</i>	218	45.2	<i>Heteromastus filiformis</i>	243	58.8
	<i>Prionospio japonicus</i>	351	44.7	<i>Hediste diadroma</i>	100	19.7
st. 9	Average similarity: 42.74			Average similarity: 51.30		
	<i>Heteromastus filiformis</i>	138	62.5	<i>Heteromastus filiformis</i>	579	60.8
	<i>Neanthes succinea</i>	42	22.1	<i>Prionospio japonicus</i>	213	16.6
st. 10	Average similarity: 66.67			Average similarity: 52.66		
	<i>Heteromastus filiformis</i>	216	73.1	<i>Heteromastus filiformis</i>	619	66.1
				<i>Hediste diadroma</i>	249	14.4

Abun.: Abundance, Con.: Contribution

되었다. 2012년 8월과 다른 계절들로 구분이 되었다. 2012년 8월을 제외한 계절들은 다시 2개의 군집으로 구분이 되었는데 2016년 9월과 2017년 9월이 하나의 그룹을 형성하였고 (Group B), 2012년부터 2017년까지 6월에 조사된 결과와 2013년 9월 조사결과가 하나의 그룹을 형성하였다(Group A) (Fig. 7). 2012년 8월은 하나의 시기만이 포함되어 SIMPER 분석을 수행할 수 없었으나, 이 기간에 가장 우점한 종은 연체동물의 *L. marilina*였고, 그 외에도 다모류의 *N. succinea*, *H. filiformis* 등이 우점하였다. 2012년 8월은 *L. marilina*의 일시적 우점으로 인해 다른 계절과 차이를 보인 것으로 판단된다. 그룹 A의 그룹 내 평균 유사도는 55.92%였고, 기여도가 높은 종은 *P. japonicus*, *H. filiformis*로 기여도는 각각 41.2%, 35.7%였다(Table 1). 그룹 B의 그룹 내 평균 유사도는 56.95%였고, 그룹 내 기여도가 높은 종은 *H. filiformis*로

기여도는 72.44%였다.

정점 7~10에서는 조사 시기에 따라 2~3개의 그룹으로 구분이 되었다. 인공섬 북동쪽에 위치한 정점들은 시기별로 군집조성에 다소 차이를 보였는데, 정점 7과 10은 2015년 6월 이후 군집 조성이 이전 시기와 차이를 보였고, 정점 8은 2015년 9월부터, 정점 9는 2014년 6월 이후 군집조성이 이전 시기와 차이를 보였다. 2012년 조사 이래 *H. filiformis*와 함께 정점 7과 8에서는 *P. japonicus*의 기여도가 높은 것으로 나타났다, 정점 9에서는 *N. succinea*의 기여도가 높게 나타났다(Group A) (Fig. 7). 그러나 군집조성이 변동된 이후(Group B), 모든 정점에서 *H. filiformis*와 *H. diadroma*의 기여도가 높은 것으로 나타났고, 정점 9에서는 2014년 이후로 *Ceratonereis* sp.의 기여도 역시 높게 나타났다. 이처럼 봉암갯벌의 군집조성은 정점별로 시기에 다소 차이는 있으나, 2014년과

Table 2. The Spearman rank correlation coefficients between environmental factors and biological parameters of macrozoobenthic community

	H'	R	J'	Species	Density	<i>H. filiformis</i>	<i>H. diadroma</i>	<i>N. succinea</i>
Sand	.316*							
Mud	-.308*							
Mz	-.300*		-.402**					-.352*
TOC					.394**	.332*		
Species	.365**	.703**	-.550**					
Density			-.457**	.385**				
<i>H. filiformis</i>			-.455**	.303**	.802**			
<i>P. japonicus</i>					.380**			
<i>H. diadroma</i>			-.423**	.276**	.575**	.431**		
<i>N. succinea</i>	-.197*	-.398**	.523**	-.632**	-.237*	-.202*	-.243*	
<i>Ceratonereis</i> sp.								-.224*

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, H': diversity index, R: richness index, J': Evenness index

2015년 사이에 대부분의 정점에서 *H. filiformis*와 함께 *N. succinea*, *P. japonicus*가 우점하던 환경에서 *H. filiformis*와 *H. diadroma*가 우점하는 환경으로 변화하였다.

6. 상관 분석

본 연구결과 출현종수는 2014년 6월부터 증가하는 경향을 보였고, 서식밀도는 2015년에 *H. filiformis*와 *H. diadroma*의 대량출현으로 인해 급격히 증가하였다. 그러나 *N. succinea*는 2015년 이후 서식밀도가 급격히 감소하였다. 이러한 요인으로 인해 출현종수는 서식밀도, *H. filiformis*, *H. diadroma*의 개체수와 양의 상관관계를 보였고, *N. succinea*의 개체수와 양의 상관관계를 보였다($p < 0.01$, $p < 0.05$) (Table 2). 서식밀도는 TOC, *H. filiformis*, *P. japonicus*, *H. diadroma*의 개체수와 양의 상관관계를 보였고, *N. succinea*의 개체수와 양의 상관관계를 보였다. 이처럼 서식밀도의 증가는 *H. filiformis*, *P. japonicus*, *H. diadroma*의 대량 출현과 관련이 있으며, 이 중 *H. filiformis*는 TOC와 양의 상관관계를 보여 유기물 함량 증가와 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났다. 종다양도지수는 모래 함량과는 양의 상관관계를 보였고, 니질 함량과는 음의 상관관계를 보였다. *N. succinea*의 개체수는 종균등도지수와 양의 상관관계를 보였고, 출현종수, 서식밀도, 종다양도지수, 종풍부도지수, *H. filiformis*, *H. diadroma*, *Ceratonereis* sp.의 개체수와 양의 상관관계를 보였다.

고 찰

1. 저서환경

봉암갯벌은 창원천과 남천이 합류되는 지점에서 시작된다. 창원천과 남천 주변에는 창원 기계공업단지를 비롯한 각

종 산업 단지가 인접해 있어 그로부터 유입되는 산업폐수와 생활 폐수가 하천들을 거쳐 마산만으로 유입된다. 마산만은 2000년에 특별관리해역으로 지정되었고, 2000년대 후반부터 오염 총량제가 도입되어 배출한계를 조절하는 등 환경개선을 위해 노력하고 있다. 봉암갯벌 인공섬 주변에서 채집된 퇴적물 내 중금속 함량은 2006년에는 Pb, Zn, Mn, Cu가 Sediment Quality Guideline에 의하면 매우 심하게 오염된 상태로 나타났고, 2013년에 제정된 국내 해양환경기준에 의하면 Pb, Zn, Cd, Cu가 관리기준을 초과하는 것으로 나타났다(Kwon and Lee 1996). 특히 창원천 지류쪽에 위치한 정점에서 농도가 높게 나타났다. 그러나 2009년 조사에서는 2006년에 비해 중금속 농도가 감소하였고, Zn만 관리기준을 초과하였고, Pb, Cd, Cu 등은 주의기준을 초과하는 것으로 나타나 지속적인 관리에 의해 오염도가 감소한 것으로 나타났다(Lee et al. 2010). 이는 마산만의 오염총량제실시와 함께 봉암갯벌이 습지 보호지역으로 선정되어 관리되고 있기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 봉암갯벌의 퇴적상은 2004년 조사에 비해 본 연구결과 세립해진 것으로 나타났다. 2004년 조사에서는 모래함량이 62~100% 범위로 나타났으나(Seo et al. 2007), 본 연구에서는 36~80% 범위로 갯벌의 상류지역을 중심으로 니질 함량이 증가한 것으로 나타났고, 탄소의 함량은 2004년에 0.4~1.1%의 범위를 보인 반면(Seo et al. 2007), 본 연구에서는 TOC 함량이 0.1~1.6%의 범위를 보였다. 일반적으로 니질 함량은 TOC 함량과 양의 상관관계를 보이며, 중금속 함량 역시 니질 함량이 높은 곳에서 높게 나타난다. 본 연구에서 봉암갯벌 퇴적물의 중금속 함량을 측정하지는 않아 현 상태를 판단할 수는 없으나, 추후 조사를 통해 현 상태 파악 및 관리가 필요할 것으로 판단된다.

2. 대형저서동물 군집구조

국내 갯벌에 대한 연구는 가장 분포 면적이 넓은 서해안에

집중되어 있다. 남해안 갯벌 연구는 강진만 갯벌, 진주만 갯벌에 대한 조사가 있으며, 봉암갯벌에 대한 연구는 2004년 봄철 대형저서동물의 분포양상에 대한 연구만이 수행되었다 (MOF 2005, 2013a, b; Seo *et al.* 2007). 강진만 갯벌은 봉암갯벌과 유사한 모래 갯벌로 주요 우점종은 *H. filiformis*, *Ceratonereis erythraensis*, 이매패류의 바지락 (*Ruditapes philippinarum*) 등이었다. 강진만 갯벌에서는 각 조사 지역의 환경 특색에 따라 독립적인 군집이 형성되어 있었다. 봉암갯벌에서는 2004년 조사에서 모든 정점에서 *P. japonicus*, *Polydora ligni*, *Capitella* sp., *N. succinea* 등이 우점하였다 (Seo *et al.* 2007). 이 중 *P. japonicus*는 서식밀도가 약 11,000 ind.m⁻² 이상으로 매우 높았다. 본 연구에서 *P. japonicus*의 평균 서식밀도는 11,886 ind.m⁻²로 2004년과 큰 차이를 보이지 않았고, 6월 평균 서식밀도는 19,251 ind.m⁻²로 더 높게 나타났다. *H. filiformis*는 2004년 조사에서도 우점하였으나, 서식밀도는 260 ind.m⁻²에 불과하였다. 본 연구에서 평균 서식밀도는 25,067 ind.m⁻²로 2004년에 비해 100배 이상 증가한 것으로 나타났다.

3. 우점종 조성

2004년 연구결과 봉암갯벌에서는 *Capitella* sp., *Capitella capitata*, *P. ligni* 등이 우점하였다. 주로 인공섬에서 해안가 쪽에 위치한 정점에서 높은 서식밀도를 보였다. 이 종들은 유기물 함량이 증가하면 급격히 개체수를 늘리는 오염지시종들로 마산만, 시화호, 가두리 양식장 등 유기물 부하량이 높은 해역에서 우점하는 종들이다 (Pearson and Rosenberg 1978; Choi *et al.* 2005). 특히 *C. capitata*는 오염지시종 중에서도 가장 극심하게 오염된 해역에서 우점하는 것으로 알려져 있고, 마산만과 진해만에서 1990년대부터 2000년대에 우점하는 것으로 보고되었다 (Pearson and Rosenberg 1978; Choi *et al.* 2005; Lim *et al.* 2007). 이러한 종들은 유기물 함량이 높은 니질 퇴적상에 주로 서식한다. 인공섬 하부지역은 이러한 오염지시종이 개체군을 형성하기에 좋은 환경 조건을 가지고 있다. 따라서 2000년대 초반에는 이러한 오염지시종들이 니질 함량이 상대적으로 높았던 인공섬 하부 및 갯벌의 하류 지역에 주로 분포하고 있었다. *C. capitata*, *P. ligni*가 최우점 하였던 인공섬 하부 정점이 2016년 이후 간조 시에도 노출되지 않아 샘플링을 수행하지 못하였다. 그러나 2012년부터 2015년까지 이미 이 지역에서는 이 두 오염지시종이 전혀 출현하지 않았다. 그러나 이러한 결과를 봉암갯벌의 환경개선으로 단정하기는 어렵다. Spionidae에 속하는 *Polydora* species의 개체수 감소는 유기물 감소와 같은 환경 개선과 일부 관련이 있는 것으로 판단되나, *Capitella* species는 유기물 함량과 함

께 온도 역시 개체군 형성에 큰 역할을 한다. *Capitella* species는 주로 동계에 유기물 함량이 높은 해역에서 고밀도로 분포한다 (Tsutsumi 2005). *Capitella* species가 우점하는 것으로 보고한 서 등의 2004년 연구에서는 3월에 현장조사를 수행하였다 (Seo *et al.* 2007). 그러나 본 연구는 주로 하계인 6~9월에 현장조사를 수행하였다. 따라서 *Capitella* species 종의 출현 유무에 대한 판단은 동계 조사 후 가능할 것으로 보인다.

봉암갯벌에서는 2015년 이후 우점종 조성이 변하여, *H. diadroma*가 새로이 우점종으로 출현하였다. *Hediste* species는 수심이 얕은 기수역에 주로 서식한다. 전 세계적으로 5종이 분포하고 있는 것으로 알려져 있으며 *Hediste diversicolor*는 유럽 및 북미 대서양 연안에 주로 분포하고, *Hediste limnicola*는 북미 태평양 연안에 서식하는 것으로 알려져 있으며, *Hediste japonica*, *H. diadroma*, *Hediste atoka*는 국내를 포함한 동아시아 지역에 분포하는 것으로 알려져 있다 (Nishizawa *et al.* 2014). *H. diversicolor*는 해수부터 기수역까지 폭넓게 서식하고 있으며, 갑각류, 어류와 새 등의 먹이원으로 중요한 위치를 차지하고 있다 (Burlinson and Lawrence 2007; Cong *et al.* 2014; Cu villier-Hot *et al.* 2018). 또한 실험실에서 쉽게 사육가능하며, 낚시 미끼 등 경제적인 측면에서도 활용도가 높아 유럽지역을 중심으로 생물학적 연구와 생태학적 기초 연구가 많이 진행되었다. 국내에서 *H. japonica*는 인천, 서천 등 서해안에 분포하며, 순천만 갯벌에서도 서식하는 것으로 알려져 있고, *H. atoka*는 인천과 동해안, *H. diadroma*는 남해도, 거제도, 섬진강 하구역에 서식하는 것으로 알려져 있다 (Choi 2016; Seo *et al.* 2017; ZKMA 2017). 그러나 *Hediste* 속에 대한 국내 연구는 미비한 실정이며, 국제적으로도 *H. diversicolor*에 대한 연구만이 일부 진행되었을 뿐 그 외종들에 대한 생태학적 정보는 거의 알려진 것이 없다.

봉암갯벌에서는 Nereididae에 속하는 3종 (*H. diadroma*, *N. succinea*, *Ceratonereis* sp.)이 우점하였다. 2000년대 초부터 2010년 초반에는 *N. succinea*가 우점하였고 (Seo *et al.* 2007), 2010년대 후반 *N. succinea*의 개체수가 감소한 반면, *H. diadroma*와 *Ceratonereis* sp.가 우점하였다. 일반적으로 Nereididae를 포함한 ragworm들은 온도, 염분, hypoxia에 대한 내성이 강하다 (Scaps 2002). *N. succinea*는 hypoxia에 대한 내성이 강한 오염지시종으로 알려져 있으며 (Bosch *et al.* 2015), *Hediste* species는 부영양화 해역에서 개체수가 증가하는 유기물 오염 지시종으로 알려져 있다 (Aberson *et al.* 2016). 또한 동일 속에 속하는 이 종들은 섭식유형도 surface deposit feeder or carnivorous로 유사하며, 서식지 환경 역시 sandy mud 혹은 muddy sediment를 선호한다 (Scaps 2002; Aberson *et al.* 2016). 따라서 현재로서는 두 종의 교체가 이루어진 이

유에 대해 명확히 확인할 수는 없었다. 두 종 간 경쟁에 의한 결과인지 서식지 환경 혹은 먹이원에 의한 변동인지 추가 조사가 필요할 것으로 판단된다.

*H. filiformis*는 유기물 함량이 증가하면 개체수가 증가하는 2차 오염지시종에 속한다(Borja *et al.* 2000). 2004년 조사에서 *H. filiformis*의 평균 서식밀도는 260 ind.m⁻²였고, 최대 서식밀도는 870 ind.m⁻²였다(Seo *et al.* 2007). 본 연구에서도 2004년에 최대 서식밀도를 보인 정점과 인접한 정점 3에서 높은 서식밀도를 보였다. 그러나 최대 서식밀도는 2004년에 비해 3배 이상 증가한 것으로 나타났다. 그 외에도 정점 10(본 연구)에서 평균 3,000 ind.m⁻² 이상의 높은 서식밀도를 보였다. 본 연구결과 *H. filiformis*의 서식밀도는 TOC 함량, 그리고 서식밀도와 양의 상관관계를 보였다. 이 종은 봉암곶벌에 위치한 모든 정점에서 우점하였으나, TOC 함량이 상대적으로 낮았던 정점 4~6에서 낮은 서식밀도를 보였다. 반면, 상대적으로 TOC 함량이 높았던 정점 3과 정점 10에서 높은 서식밀도를 보여서 유기물함량 증가로 인해 서식밀도가 증가한 것으로 판단된다.

적 요

본 연구는 마산만 하구에 위치한 모래곶벌인 봉암곶벌에 서식하는 대형저서동물의 하계 군집구조 변동양상을 파악하기 위해 2012년부터 2017년까지 하계에 연 2회씩 총 11회에 걸쳐 현장조사가 수행되었다. 봉암곶벌은 모래 함량이 70% 이상인 모래 곶벌로 알려져 있으나, 실제 조사결과 곶벌의 상부지역을 중심으로 니질 함량이 증가하고 있는 것으로 나타났다. TOC 함량도 2000년대 초반에 비해 증가한 것으로 나타났다. 최대 TOC 함량이 1% 수준으로 심각한 수준의 유기물 증가가 나타나지는 않았다. 봉암곶벌의 대형저서동물 군집구조는 2000년대 초반에 비해 출현종수 및 서식밀도가 크게 증가하였다. 또한 2000년대 초반에 비해 오염지시종의 출현종수 및 서식밀도는 감소하였고, 종다양도지수를 비롯한 군집지수는 크게 증가하는 등 환경 개선의 결과가 일부 나타나고 있다. 마산만의 입구에 위치한 봉암곶벌은 마산만의 영향을 크게 받는다. 마산만 특별관리해역 지정 및 오염총량제 실시로 인해 오염물질의 농도가 감소하였고, 그로 인해 봉암곶벌로 유입되는 오염물질의 농도 역시 감소되었을 것으로 판단된다. 그러나 환경자료의 부재 및 조사 시기의 차이 등으로 인해 본 연구 결과만으로 환경이 개선되었다고 단정 지을 수 없다. 추후 환경 및 대형저서동물의 개체군, 군집에 대한 추가 조사를 통한 환경개선 유무에 대한 평가가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국연구재단 이공분야기초연구사업(신진연구사업; NRF-2018R1C1B6007458)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Aberson MJR, SG Bolamb and RG Hughes. 2016. The effect of sewage pollution on the feeding behaviour and diet of *Hediste (Nereis diversicolor)* (O.F. Müller, 1776) in three estuaries in south-east England, with implications for salt-marsh erosion. *Mar. Pollut. Bull.* 105:150-160.
- Barbier EB, SD Hacker, C Kennedy, EW Koch, AC Stier and BR Silliman. 2011. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecol. Monogr.* 81:169-193.
- Borja A, J Franco and V Perez. 2000 A marine biotic index to establish the ecological quality of soft-bottom benthos within European estuarine and coastal environments. *Mar. Pollut. Bull.* 40:1100-1114.
- Bosch JA, C Jeffrey, W Cornwell and K Michael. 2015. Short-term effects of nereid polychaete size and density on sediment inorganic nitrogen cycling under varying oxygen conditions. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 524:155-169.
- Burlinson FC and AJ Lawrence. 2007. A comparison of acute and chronic toxicity tests used to examine the temporal stability of a gradient in copper tolerance of *Hediste diversicolor* from the Fal estuary, Cornwall, UK. *Mar. Pollut. Bull.* 54:66-71.
- Cardoso PG, D Raffaelli, AI Lillebø, T Verdelhos and MA Pardal. 2008. The impact of extreme flooding events and anthropogenic stressors on the macrobenthic communities' dynamics. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 76:553-565.
- Chainho P, JL Costa, ML Chaves, DM Dauer and MJ Costa. 2007. Influence of seasonal variability in benthic invertebrate community structure on the use of biotic indices to assess the ecological status of a Portuguese estuary. *Mar. Pollut. Bull.* 54:1586-1597.
- Choi HK. 2016. A systematics and ecological notes on marine polychaetes (Annelida, Polychaeta) from Korea, with the secondary production of *Hediste japonica* population in Suncheon Bay. PhD. Thesis. Chosun Univ. pp. 248-284.
- Choi JW, JY Seo, CH Lee, TK Ryu, CG Sung, GM Han and S Hyun. 2005. Spatial distribution patterns of macrobenthic communities during winter and summer in the Masan Bay special management area, southern coast of Korea. *Ocean Polar Res.* 27:381-395.
- Cong Y, GT Banta, H Selck, D Berhanu, E Valsami-Jones and

- VE Forbes. 2014. Toxicity and bioaccumulation of sediment-associated silver nanoparticles in the estuarine polychaete, *Nereis (Hediste) diversicolor*. *Aquat. Toxicol.* 156: 106–115.
- Cuvillier-Hot V, SM Gaudron, F Massol, C Boidin-Wichlacz, T Pennel, L Lesven, N Sopheak, C Papot, J Ravaux, X Veke-mans, G Billon and A Tasiemski. 2018. Immune failure reveals vulnerability of populations exposed to pollution in the bioindicators species *Hediste diversicolor*. *Sci. Total Environ.* 613/614:1527–1542.
- Kwon YT and CW Lee. 1996. Evaluation of heavy metal contamination by multiple ecological risk indices. *Environmental Research Institute, Kyungnam Univ.* 18:151–162.
- Lee CW, HP Jeon and SJ Lee. 2010. Evaluation of heavy metal contamination for Bongam tidal flat sediments in Masan Bay, Korea. *J. Wet. Res.* 12:15–20.
- Lim KH, HC Shin, SM Yoon and CH Koh. 2007. Assessment of benthic environment based on macrobenthic community analysis in Jinhae Bay, Korea. *The Sea* 12:9–23.
- MOF. 2005. Korea tidal flat: Characteristics of Natural Ecology. ISBN 89-5832-194-6, Tidal flat series #1. Ministry of Oceans and Fisheries.
- MOF. 2013a. Basic survey of coastal wetlands in 2012 -Precise investigation-. 11-1192000-000003-10. Ministry of Oceans and Fisheries.
- MOF. 2013b. Basic survey of coastal wetlands in 2012 -Basic investigation-. 11-1192000-000004-10. Ministry of Oceans and Fisheries.
- Nishijima W, Y Nakano, S Nakai, T Okuda, T Imai and M Okada. 2013. Impact of flood events on macrobenthic community structure on an intertidal flat developing in the Ohta River Estuary. *Mar. Pollut. Bull.* 74:364–373.
- Nishizawa R, M Sato, T Furota and H Tosuji. 2014. Cryptic invasion of northeast Pacific estuaries by the Asian polychaete, *Hediste diadroma* (Nereidae). *Mar. Biol.* 161:187–194.
- Pearson TH and R Rosenberg. 1978. Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.* 16:229–311.
- Salen-Picard C, D Arlhac and E Alliot. 2003. Responses of a mediterranean soft bottom community to short-term (1993–1996) hydrological changes in the Rhone river. *Mar. Environ. Res.* 55:409–427.
- Scaps P. 2002. A review of the biology, ecology and potential use of the common ragworm *Hediste diversicolor* (O.F. Müller) (Annelida: Polychaeta). *Hydrobiologia* 470:203–218.
- Seo JY, JH Kim and JW Choi. 2017. Spatial distributions of macrozoobenthic communities in the Seomjin River Estuary. *Ocean Polar Res.* 39:23–34.
- Seo JY, SM An and JW Choi. 2007. Spatial distribution of macrozoobenthos during spring season in the estuarine sandy tidal flat of Masan Bay, Korea. *The Sea* 12:211–218.
- Tsutsumi H. 2005. Production of planktonic and nonplanktonic larvae in a single brood of *Capitella* sp. I and its implications for population persistence in disturbed environment due to organic enrichment of the sediments. *Benthos Res.* 60:17–24.
- ZKMA. 2017. Identification of guide for the Nereididae (Polychaeta: Annelida) in Korean waters. *Zoobank of Korean Marine Annelids.* pp. 38–43.

Received: 28 November 2018

Revised: 13 December 2018

Revision accepted: 14 December 2018