

Article

저층수 용존산소가 당동만 저서다모류군집 구조의 시간적 변동에 미친 영향

양진경 · 신현출*

전남대학교 수산해양대학 해양융합과학과
(59626) 전남 여수시 대학로 50

The Influence of the Dissolved Oxygen of Bottom Water on the Temporal Variation of the Benthic Polychaetous Community Structure in Dangdong Bay

Jin Kyeong Yang and Hyun Chool Shin*

Department of Ocean Integrated Science, College of Fisheries and Ocean Sciences,
Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea

Abstract : This study was carried out at 5 sites 11 times over two years to identify the variation of benthic environments and benthic polychaetous community and analyze the benthic healthiness in Dangdong Bay, a small semi-enclosed inner bay of Jinhae Bay. The temperature of bottom water showed the typical temporal fluctuation of a temperate zone and was in the range of 5.94 ~ 23.94°C. The salinity did not change significantly during the study period and was in the range of 32.93 ~ 35.72 psu. The concentration of dissolved oxygen of bottom water fluctuated a great deal and was in the range of 0.31 ~ 10.20 mg/L. The lowest DO value was recorded in July 2015, as 0.31±0.04 mg/L corresponding to the hypoxic water mass. The hypoxic water mass was formed continuously at some sites also in July and August 2016. The mean grain size was in the range of 7.57 ~ 9.81 ϕ and the average was 8.89±0.20 ϕ . The surface sediments were mainly composed of fine sediment (mud) above 85%. The mean of TOC was 3.09±0.22% and LOI was 13.30±0.47%, showing very high levels in Korean coastal waters. The concentration of AVS was in the range of 0.33 ~ 1.28 mgS/g-dry. The high values of organic contents and AVS indicated that there had been the serious organic enrichment in Dangdong Bay. The number of species and the density of the benthic polychaetous community in Dangdong Bay were in the range of 2 ~ 38 species and 2 ~ 2,185 ind./m² during the study period. The number of species and density were highly sustained in winter and spring, and then decreased gradually with the formation of a hypoxic water mass in summer, and the lowest number of species and density were recorded in autumn. In September and November 2015, the dead zone expanded to almost the whole study area. Dominant polychaetous species were *Capitella capitata*, *Lumbrineris longifolia*, *Paraprionospio patiens* and *Sigambra tentaculata*, each known as opportunistic species and potential organic pollutant indicator species. In particular, *Paraprionospio patiens* showed a very high population density of 2,019 ind./m² in December 2016. Polychaetous communities at each sampling time were classified into 4 temporal groups according to dominant species in each period by cluster analysis and nMDS. 'Period Group AI' was formed in winter and spring of 2015, dominated by *Capitella capitata*, 'Period AII' in summer dominated by *Lumbrineris longifolia*, 'Period B' in autumn with no fauna in the dead zone, and particularly 'Period C' in winter of 2016 dominated by *Paraprionospio patiens*. As a result of analysis of benthic healthiness, the study area was estimated to be in a Fair~Very Poor condition by AMBI

*Corresponding author. E-mail: shinhc@jnu.ac.kr

and in a Poor~Very Poor condition by BPI during the study period. Both AMBI and BPI showed that the study area was in a Very Poor condition in September and November 2015, and when the dead zone occurred. In Dongdong Bay, the fact that the formation of a hypoxic water mass occurred in summer and a dead zone in autumn were confirmed. In addition, the dominance of opportunistic and organic pollutant indicator species was also observed clearly. The benthic healthness indexes such as AMBI and BPI showed that organic enrichment was serious in Dangdong Bay.

Key words : dissolved oxygen, benthic polychaetous community, benthic healthness index, temporal variation, Dangdong bay

1. 서 론

우리나라 남해 연안해역은 1970년대 이후 임해공업단지의 조성이 확대되고, 이로 인한 인구의 급증으로 생활하수 및 산업폐수가 대량으로 유입되어 반폐쇄성 내만은 해양오염으로 인해 거의 황폐화되어 가고 있는 실정이다. 또한 무분별한 어장 개발 및 어장 노후화에 기인한 양식장자가 오염으로 연안역의 황폐화가 가속화되고 있다(Jung et al. 2002). 해수 순환과 유동이 약한 내만에서는 하계 수온 상승에 의한 수온 성층화와 유역의 담수 유입 및 대기로부터 강수 유입에 의한 염분 성층화 현상이 빈발하고 있다(Cho et al. 2002). 이로 인하여 해양 수괴의 저층은 표층으로부터 산소공급이 차단되고, 유기퇴적물 등의 활발한 분해 작용으로 용존산소(Dissolved Oxygen, DO)가 급속히 소모됨으로써 빈산소수괴(hypoxia, DO 농도가 3 mg/l 이하의 수괴)가 발생하게 된다(Lee et al. 2008). 용존산소의 양이 더욱 감소하여 0.2 ppm (0.2 mg/l) 이하가 되면 이때는 무산소수괴(anoxia) 상태라고 하며, 그 결과 대형저서생물이 모두 폐사하는 무생물대(azoic zone, dead zone)가 생성되는 것이 보고되었다(Shin 1995; Hong et al. 1997). hypoxia 및 anoxia의 경우 세계적으로 2 ppm 및 0.2 ppm으로 정의하고 있다(Pearson and Rosenberg 1978, Lim et al. 2006). 우리나라의 경우 수산양식의 측면에서 고려해야하기 때문에 기준을 강화하여 3 ppm으로 정의하고 사용하고 있다. 이와 같이 발생된 빈산소수괴는 우리나라와 같이 폐쇄성 해역이 많은 해양환경 조건에서는 발생 지역과 기간이 매년 지속적으로 늘어나고 있어 해양생태계에 큰 피해를 입히고 있는 실정이다(Lee et al. 2008; Jang and Shin 2016).

대형저서동물은 제한된 이동성과 비교적 긴 생활사로 인해 환경변화에 직접적으로 노출될 가능성이 상대적으로 크며, 노출 이후 군집 차원에서의 반응이 명확하고 일관된 것이 특징이다(Bilyard 1987; Warwick 1993). 특히 연안 내만역에서의 대형저서동물 군집 구조는 퇴적상, 유기물오염, 빈산소수괴 등과 같은 환경 요인에 의해 군집이 조절된다(Choi et al. 2003; Lim et al. 2006; Anderson 2008;

Yoon et al. 2008). 따라서 연안역의 저서동물은 육/해상기원 유기물오염에 의해 군집 구조와 우점종이 변동하기 때문에 오염을 평가하거나 생태계를 모니터링하는데 유용하게 사용되고 있다(Pearson and Rosenberg 1978; Lim and Hong 1994a). 다모류는 저서동물 중 개체수와 종 수가 가장 풍부한 그룹으로서 (Fauchald and Jumars 1979) 환경교란에 빨리 반응하는 능력과 영양단계의 유연성으로 인해 (Tomassetti and Porrello 2005; Sutherland et al. 2007) 연성기질의 환경 변화를 가장 잘 반영하는 분류군이다(Belan 2004). 또한 기회주의종과 같은 일부 다모류의 출현 여부는 저서환경의 상태와 건강성을 판단할 수 있는 훌륭한 지표로 알려져 있다(Rygg 1985; Tsutsumi 1990; Pocklington and Wells 1992; Del-Pilar-Ruso et al. 2009; Martinez-Garcia et al. 2013).

본 연구지역인 당동만이 위치하는 진해만은 저층 퇴적물이 높은 유기물함량을 보이고, 기회주의종이 대량 출현하고, 매년 빈산소수괴 형성으로 인한 무생물 현상이 나타나는 등의 특징을 보여 (Seo et al. 2015) 대형저서동물군집에 대한 많은 연구가 진행되어왔다. 진해만 일대 (Lim 1993; Lim et al. 2007), 진해만 남서부 해역 (Lim et al. 1992), 진해만 입구에서 마산만 내만 해역과 진해만 중앙해역 (Lim and Hong 1994b), 마산만과 거제도 북부해역 (Paik and Yoon 2000), 진해만 북동부 해역 (Lim and Shin 2005), 마산만 내부 해역부터 거제도 서쪽해역 (Seo et al. 2015) 등 많은 연구가 활발히 진행되고 있다.

당동만은 진해만 서부 해역에 위치한 소규모 만으로 해수의 흐름이 원활하지 못한 반폐쇄성 특징을 가지고 있다. 만 주변에는 산업단지가 발달해 있고, 만 내에는 수하식 양식장이 대규모로 위치하고 있다. 이에 따라 유기물 유입이 증가하여 저층 퇴적물 내에 축적되면서 심각한 유기물 오염이 야기되고 있으며, 여름철 빈산소수괴가 형성되는 등 해양환경 및 해양생태계에 미치는 부정적인 영향에 대해 관심이 고조되고 있는 해역이다(MOF 2016).

본 연구는 진해만 서쪽 연안에 위치하는 소규모 반폐쇄성 당동만에서 용존산소를 포함한 제반 환경 인자와 저서다모류군집의 시간적 변동을 살펴보고, 이들 환경 요인과

저서동물군집 변동 간의 관계를 파악하고자 하였으며, 특히 하계 빈산소수괴 형성과 저서동물군집의 무생물해역과의 관련성을 살펴보고자 하였다. 그리고 저서다모류군집의 건강도지수를 분석하여 당동만 해역의 저서생태계의 저서 건강도를 평가하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

연구지역

2015년 1월부터 2016년 12월까지 2년에 걸쳐 5개의 정점에서 총 11회 조사를 실시하였다(Fig. 1). 2015년 1월, 4월, 6월은 당동만의 안쪽 정점에서 조사하였으나 (정점 1 ~ 5), 2015년 7월부터 2016년 12월에는 하계 빈산소수괴가 형성되는 만 중앙부에서 만 입구역까지의 해역으로 정점의 위치를 옮겨 현장조사를 실시하였다(정점 D1 ~ D5).

저서환경요인 측정 및 분석

저층수의 수온(°C), 염분(psu), 용존산소(mg/L)은 YSI 6600를 이용하여 퇴적층 바닥으로부터 상부 1 m까지 센서를 내려 측정하였다.

표층 퇴적물의 입도는 Ingram (1971)의 분석법에 따랐으며, 퇴적물의 평균입도, 분급 등의 통계적 입도 상수는 Folk and Ward (1957)의 공식을 사용하여 계산하였다. 표층퇴적물의 유기물함량은 총유기탄소(Total Organic Carbon; %)와 강열감량(Loss on Ignition; %)을 기준으로 분석하였다. 총유기탄소는 원소분석기 EA-1110 (Thermo Quest, Italia)를 이용하였으며, 강열감량은 퇴적물 내 유기물을 회화시킨 후 건중량에 대한 백분율로 계산하였다. 산 휘발성 황화물량(AVS)은 황산 산성 하에서 황화수소를 추출

시켜 검지관법으로 측정하였다. 저서미세조류 생물량은 분광광도계(Kontron Co., UVI-KON922)를 이용하여 흡광도를 측정한 후 Lorenzen (1967)의 식에 따라 퇴적물 단위 체적당 Chl-*a*량 ($\mu\text{g}/\text{cm}^3$) 및 Phaeo-pigment량 ($\mu\text{g}/\text{cm}^3$)을 계산하였다.

저서다모류군집 분석

각 조사정점에서 개량형 van Veen Grab (면적 : 0.1 m^2)을 사용하여 퇴적물을 2회씩 채집한 후 선상에서 망목크기 1 mm 체를 사용하여 해수로 퇴적물을 씻어 냈다. 체에 걸러진 저서생물은 10% 중성 포르말린으로 고정하여 실험실로 운반한 후 저서동물을 선별하였다. 선별된 저서동물을 광학현미경 (Nikon Eclipse 50i)과 실체현미경 (Carl-Zeiss Stermi 2000-C)을 이용하여 환형동물문 저서다모류를 가능한 종 수준까지 동정하고 계수하였다.

저서다모류군집의 특성을 알아보기 위해 생태지수인 종다양성지수(H') (Shannon and Weaver 1963), 종풍부도지수(R) (Margalef 1958), 종균등도지수(J) (Pielou 1966), 우점도지수(D) (McNaughton 1968)를 정점별로 계산하였다. 조사해역 내 시기별 유사성을 알아보기 위해 종조성의 유사도를 기초로 집괴분석(Cluster Analysis, CA)과 비계량다차원척도법(non-metric Multidimensional Scaling, nMDS)을 병행하여 분석하였다. 집괴분석은 저서다모류 전 출현종을 대상으로 실시하였으며, 자료의 편중을 피하기 위해 $\log(x+1)$ 를 하였다. 유사도지수는 Bray-Curtis similarity (Bray and Curtis 1957), 결합법은 Group average mode를 사용하였다. 모든 군집분석을 위한 자료분석은 PRIMER 6을 이용하였다.

저서환경건강도 분석을 위해 AMBI (Azti's Marine Bio-

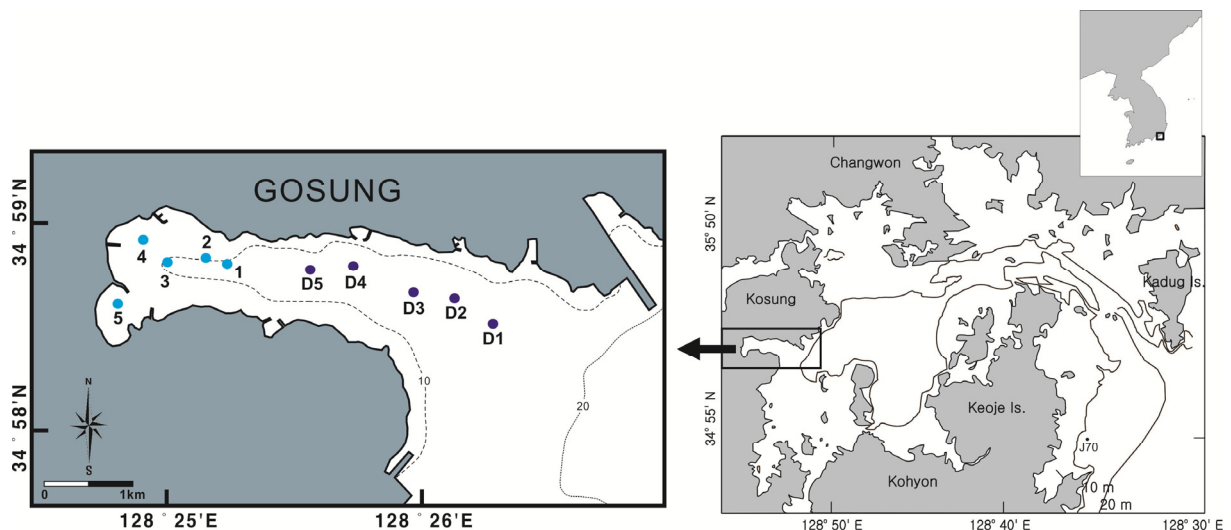


Fig. 1. A map showing the sampling stations and bathymetry in Dangdong Bay

Table 1. The classification criteria of each benthic biotic index

Ecological Quality Status	AMBI	BPI
Excellent	0.0-1.2	60-100
Good	1.2-3.3	40-60
Fair	3.3-5.0	30-40
Poor	5.0-6.0	20-30
Very Poor	6.0-7.0	0-20

tic Index) (Borja et al. 2000)와 BPI (Benthic Pollution Index) (Choi et al. 2003; Choi and Seo 2007; Seo 2016)를 사용하였다. 각 지수 값에 따른 생태학적 건강도 평가등급 및 범위는 Table 1에 제시하였다.

3. 결 과

저서환경

당동만 저층수의 수온은 계절 변동이 뚜렷하게 나타났다(Fig. 2). 하계인 2015년 8월에 평균 $23.94 \pm 0.26^\circ\text{C}$ 로 가장 높게 나타났고, 동계인 2016년 2월에 평균 $5.94 \pm 0.02^\circ\text{C}$ 로 가장 낮게 나타났다. 저층수의 염분은 계절 변동이 크지는 않았으나, 강수량이 상대적으로 적었던 춘계인 2015년 4월에 평균 35.63 ± 0.15 psu로 가장 높게 나타났고, 태풍 등으로 인하여 강수량이 많았던 2015년 9월에 평균 32.93 ± 0.00 psu로 가장 낮게 나타났다.

저층수의 용존산소는 동계에 높고, 하계에 낮은 계절 변동이 뚜렷하게 나타났으며, 수온과는 반대 경향을 보였다. 동계인 2016년 1월에 평균 10.20 ± 0.03 mg/L로 가장 높게 나타났고, 하계가 시작되는 2015년 7월에 평균 0.31 ± 0.04 mg/L로 가장 낮게 나타났다. 2015년 6월에 이미 3개 정점에서 3 mg/L 이하의 빈산소수괴(hypoxia)가 나타났으며, 7월에는 5개 모든 정점에서 빈산소수괴가 형성되었다. 참고로 2015년 8월에는 태풍 '고니'가 지나간 다음 날 현장조사를 실시하여 저층수의 용존산소가 높게 관측되었지만, 실제로는 8월 동안 계속 당동만 일대 해역의 저층수에서 빈산소수괴가 유지되었다(MOF 2016). 2016년 6월에도 2개 정점에서 빈산소수괴가 형성되었다.

당동만 표층 퇴적물의 평균입도 및 퇴적물 조성은 조사 시기별로 변동이 심하지는 않았다(Fig. 3). 평균입도는 $7.57 \sim 9.81\phi$ 의 범위를 보였으며 평균 $8.89 \pm 0.20\phi$ 로 나타났다. 대부분 Mud 함량(87.13 ~ 98.76%)이 높은 세립질 퇴적물로 나타났으며, Sand 함량은 1.23 ~ 9.12%, Gravel 함량은 0.0 ~ 3.76%의 범위이었다. 표층퇴적물의 유기물 함량은 상당히 높은 값을 보였다. 총유기탄소함량(TOC)은 평균

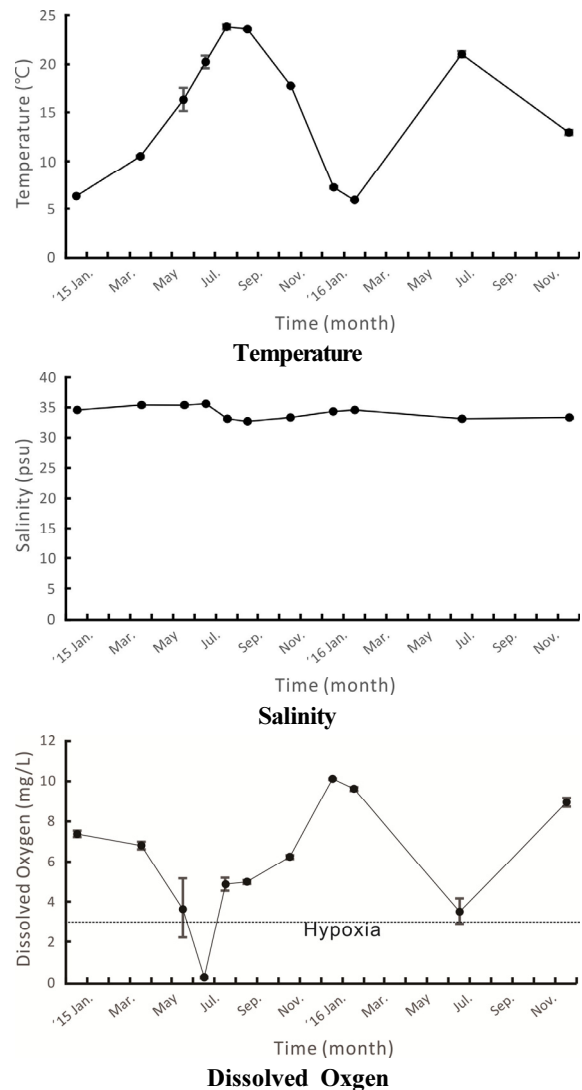


Fig. 2. Temporal variations of temperature ($^\circ\text{C}$), salinity (psu) and dissolved oxygen (mg/L) of bottom water in Dangdong Bay

$3.09 \pm 0.22\%$ 이었으며, 2015년 9월에 $4.02 \pm 0.63\%$ 로 가장 높게 나타났다. 강열감량(LOI)은 평균 $13.30 \pm 0.47\%$ 이었으며, 2015년 8월에 $15.45 \pm 0.53\%$ 로 가장 높게 나타났고, 가장 낮은 2015년 1월에도 $10.71 \pm 0.60\%$ 으로 매우 높은 값을 보였다. 표층 퇴적물의 황화물량(AVS) 역시 평균 0.79 ± 0.08 mgS/g-dry으로 상당히 높은 값을 보였으며, 특히 2015년 9월에는 1.28 ± 0.62 mgS/g-dry로 매우 높게 나타났다. 당동만 표층퇴적물 내 서식하는 저서미세조류의 생물량을 대표하는 Chl-a량은 평균 3.36 ± 0.62 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ 이었으며, 뚜렷한 계절 변동을 보이지는 않았다. Phaeo-pigment량은 평균 34.43 ± 5.25 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ 이었으며, 2016년에는 지속적으로 증가하였다.

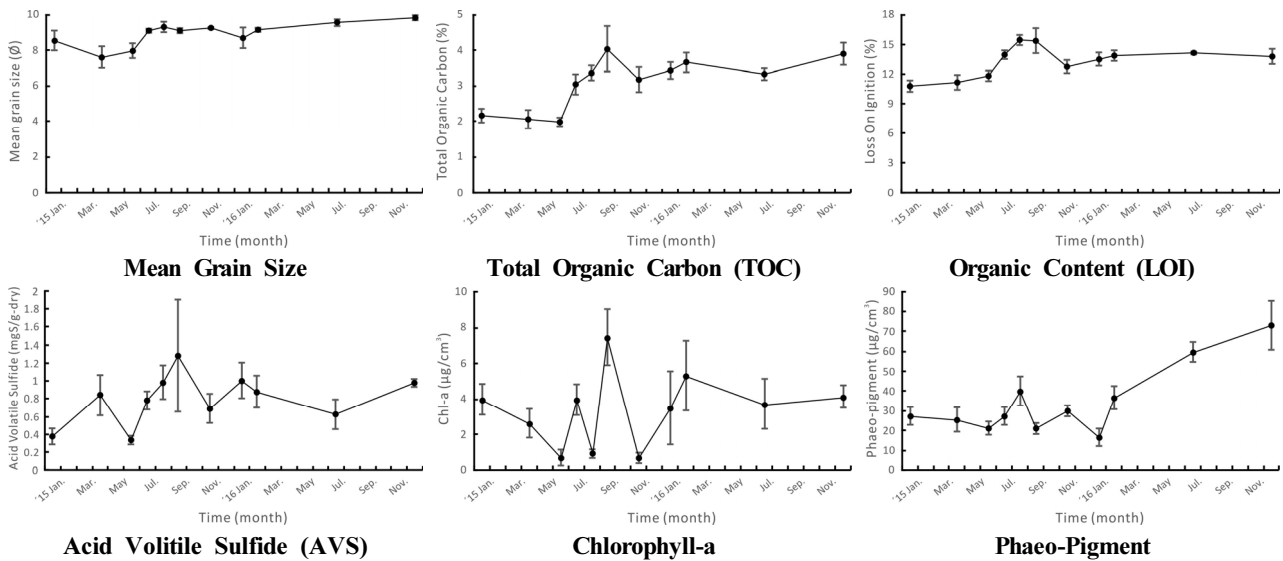


Fig. 3. Temporal variations of mean grain size, TOC, LOI, AVS, chl-a and phaeo-pigment of surface sediment in Dangdong Bay

저서다모류군집

출현종수 및 서식밀도 분포

당동만에서 채집된 저서다모류의 출현종수와 서식밀도의 변동은 Fig. 4와 같다. 출현종수와 서식밀도의 조사시기별 변동은 매우 심하게 나타났다. 출현종수와 서식밀도 변동은 비슷한 양상을 보였으며 특히 계절에 따라 뚜렷한 변화를 보였다. 총 출현종수는 2015년 6월에 38종으로 가장 많이 출현하였고, 2015년 9월에 2종으로 가장 적게 출현하였다. 평균 서식밀도는 2016년 12월에 2,185 ind./m²로 가장 높게 나타났고, 2015년 9월에 2 ind./m²로 가장 낮게 나타났다. 출현종수와 서식밀도는 주로 하계와 추계에 극히 빈약하였고, 동계와 춘계에 풍부하였다.

2015년 6월 빈산소수괴가 형성된 직후까지 비교적 높은 출현종수와 서식밀도를 유지하다가, 이후 7월에 급감하였으며 빈산소수괴가 유지되는 8월까지 낮은 서식밀도를 나타냈다. 빈산소수괴가 해소되기 시작하는 9월에 가장 낮은 출현종수와 서식밀도를 보였으며, 저층수의 용존산소가 6.0 mg/L 이상으로 완전히 회복된 11월에도 출현종수 4종, 평균 서식밀도 11 ind./m²로 여전히 낮은 값을 보였다. 또한 9월, 11월 대부분의 정점에서 무생물 해역(Dead Zone)이 나타났다. 2016년 1월, 2월에는 추계에 비해 출현종수와 서식밀도가 크게 증가하여 생물상이 회복되었고, 빈산소수괴가 형성되는 7월에 다시 감소하여 낮은 값을 보였다. 12월에는 출현종수는 낮게 나타났지만 서식밀도가 높게 나타났는데, 이는 *Paraprionospio patiens*의 극우점으로 인한 것이었다.

우점종 분포

당동만에서 조사기간 동안 전체 저서다모류 중 총 60% 이상을 차지한 주요 우점종은 *Capitella capitata*, *Lumbrineris longifolia*, *Paraprionospio patiens*, *Sigambra tentaculata*의 4종이었다(Table 2). 이들 주요 우점종들은 4종 모두 빈산소수괴가 형성되는 시기를 전후하여 서식밀도가 감소하거나 소멸되다가, 빈산소수괴가 해소되고 수괴내 용존산소가 충분히 회복되는 동계에 서식밀도가 다시 증가하는 양상을 보였다.

*Capitella capitata*는 2015년 1월 ~ 6월까지 높은 서식밀도를 유지하다가 7월에는 1개의 정점에서만 소량 출현하였으며, 8월, 9월에는 모든 정점에서 출현하지 않았으며, 11월에 2개 정점에서만 낮은 서식밀도로 출현하였다. 2016년 1월, 2월 다시 높은 서식밀도를 기록하다가 7월에는 2개의 정점에서만 매우 낮은 밀도로 출현하였다. 특히 2016년 12월에는 동계임에도 불구하고 2015년과는 달리 모든 정점에서 출현하지 않는 등 개체군이 회복되지 않았다. *Lumbrineris longifolia* 역시 2015년 1월 ~ 6월에 높은 서식밀도를 보이다가 7월, 8월에 서식밀도가 급격히 낮아졌으며, 9월에는 모든 정점에서 출현하지 않았다. 이후 2016년에는 동계를 지나 7월까지 서서히 개체군 밀도가 증가하다가 12월에 오히려 다시 급감하였다. *Paraprionospio patiens*는 2015년 1월 ~ 6월까지의 소량 서식하다가 7월부터 서식밀도가 급격히 낮아졌다. 11월에는 모든 정점에서 출현하지 않았으며, 2016년 7월까지 개체군 밀도가 회복되지 않다가 12월에 2,019 ind./m²로 폭발적 증가를 보였다. *Sigambra tentaculata*는 2015년 1월 ~ 6월까지

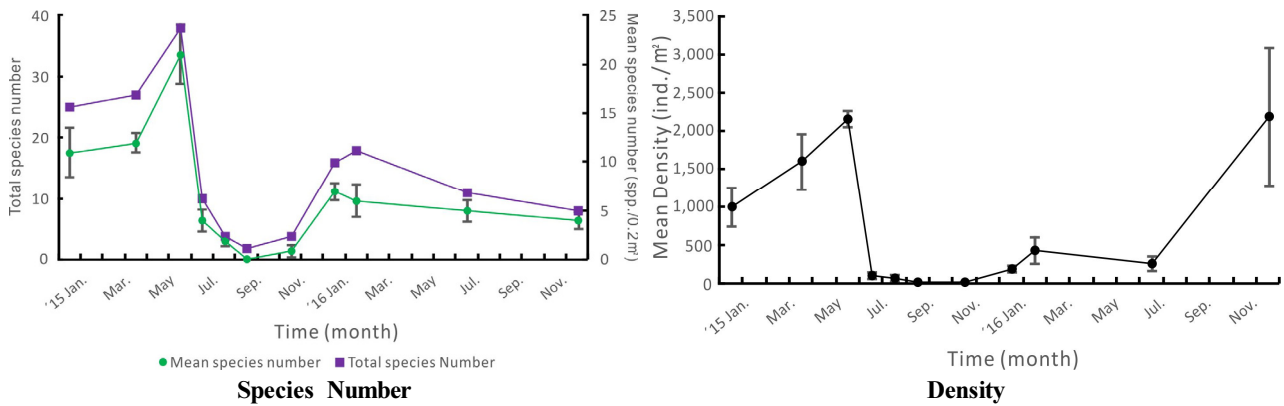


Fig. 4. Temporal variations of species number and density of benthic polychaetous community in Dangdong Bay

Table 2. Density variations of four dominant benthic polychaetes collected in the Dangdong Bay (Unit: ind./m²)

	2015							2016			
	Jan.	Apr.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Nov.	Jan.	Feb.	Jul.	Dec.
<i>Capitella capitata</i>	294	883	638	1	-	-	4	146	421	2	-
<i>Lumbrineris longifolia</i>	286	283	662	54	35	-	1	14	20	167	30
<i>Paraprionospio patiens</i>	71	32	46	3	9	1	-	2	1	1	2,019
<i>Sigambra tentaculata</i>	78	135	171	16	16	1	5	21	9	39	38

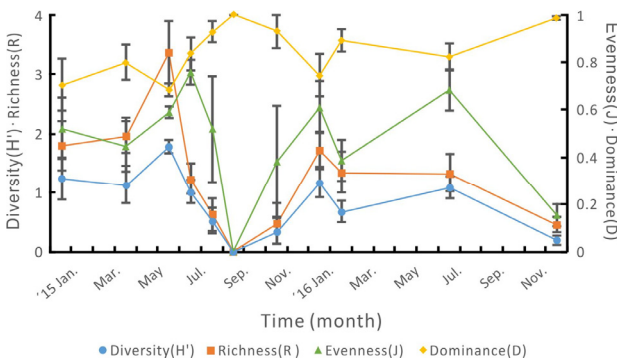


Fig. 5. Temporal variations of ecological indices in Dangdong Bay

지 비교적 높은 서식밀도를 보이다가 7월부터 급격히 감소하였다. 이후 11월까지 매우 낮은 서식밀도를 유지하다가 이후 약간 증가하였다. 특징적으로 빈산소수괴가 형성된 시기에도 *T. tentaculata*는 꾸준히 출현하고 있었다.

계절에 따라 우점종의 변동이 극심하게 진행되고 있었으며, 하계와 추계에 걸쳐 빈생물해역 혹은 무생물해역이 나타났다. 즉 이를 요약하면 2015년 동계 ~ 춘계 *Capitella capitata*, 춘계 ~ 하계 *Lumbrineris longifolia*, 하계 *Sigambra tentaculata* 혹은 빈생물 시기, 하계 ~ 추계 무생물 시기, 2016년 동계 *Capitella capitata*, 하계 *Lumbrineris longifolia*,

동계 *Parapriono patiens*의 순으로 우점종이 변동하였다.

생태지수

당동만 저서다모류군집의 생태지수의 계절 변동은 Fig. 5와 같다. 조사기간 동안 종다양도지수는 0.84 ± 0.16 , 종풍부도지수는 1.30 ± 0.28 , 종균등도지수는 0.46 ± 0.07 , 우점도지수는 0.85 ± 0.03 의 값을 나타냈다. 전반적으로 종다양도지수, 종균등도지수가 매우 낮고, 우점도지수가 매우 높게 나타났으며, 이는 조사 해역의 저서다모류군집은 특정 종의 극우점 출현이 매우 심함을 의미한다. 시기적으로는 출현종수와 서식밀도가 높게 나타난 2015년 6월에 종다양도지수와 종풍부도지수가 각각 1.79 ± 0.11 , 3.38 ± 0.52 로 가장 높은 값을 보였고, 출현종수와 서식밀도가 낮게 나타난 2015년 9월에 우점도지수를 제외한 생태지수 모두 가장 낮은 값을 보였다.

시기군(period group) 분석

조사기간 동안 당동만에서 채집한 저서다모류군집의 종조성에 기초하여 집괴분석(Cluster Analysis) 및 비계량 다차원척도법(non-metric Multidimensional Scaling)을 이용하여 시기군 분석을 실시한 결과는 Fig. 6과 같다. 시기군은 모든 조사시기 중 군집 종조성의 유사도가 높은 시기들을 동일 군으로 묶어서 정리하였다.

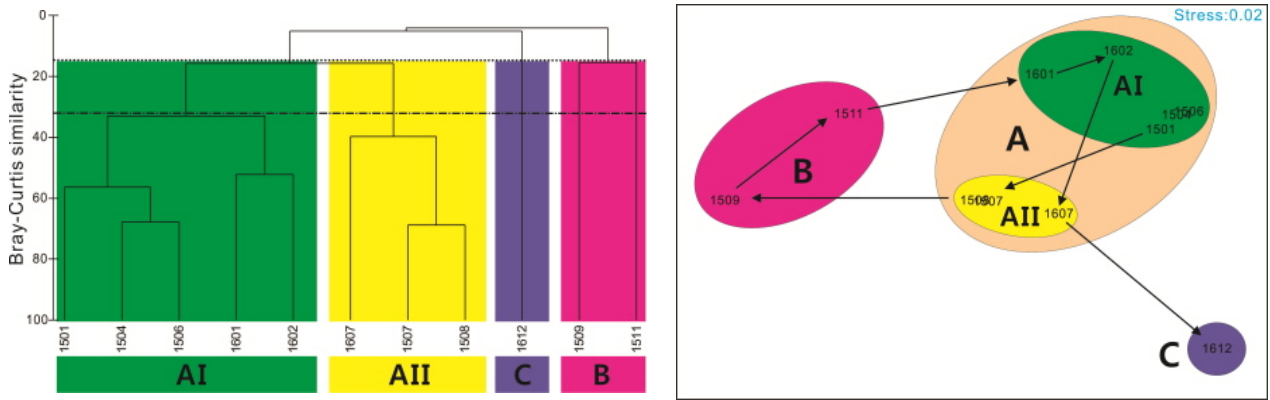


Fig. 6. Dendrogram of sampling periods from cluster analysis and two dimensional plot from the non-multidimensional scaling ordinations (nMDS) based on the benthic polychaetous species composition with sampling period

Table 3. Environmental and biological parameters for each period group separated by cluster analysis based on the benthic polychaetous species composition data in Dangdong Bay

Period Group	AI	AII	B	C
Sampling Period	1501, 1504, 1506, 1601, 1602	1507, 1508, 1607	1509, 1511	1612
Environmental Factors				
Bottom water				
Temperature (°C)	9.31±1.94	21.74±1.12	20.73±2.93	12.95
Salinity (psu)	35.02±0.25	34.10±0.81	33.16±0.23	33.54
DO (mg/L)	7.57±1.16	2.95±1.38	5.69±0.62	8.99
Sediment				
Mean grain size (Ø)	8.35±0.27	9.29±0.14	9.16±0.06	9.81
TOC (%)	2.65±0.36	3.23±0.10	3.59±0.43	3.88
LOI (%)	12.18±0.62	14.50±0.48	14.05±1.29	13.79
AVS (mgS/g-dry)	0.68±0.14	0.80±0.10	0.98±0.30	0.97
Benthic Polychaete Community				
Total Species No.	25±4	8±2	3±1	8
Mean Sp.No.(spp./0.2 m ²)	11±3	4±1	1±1	4
Mean Density (ind./m ²)	1,062±364	134±56	7±5	2,185
Ecological Indices				
Diversity (H')	1.21±0.18	0.88±0.18	0.18±0.18	0.19
Richness (R)	2.04±0.35	1.07±0.22	0.24±0.24	0.46
Evenness (J)	0.51±0.04	0.65±0.07	0.19±0.19	0.15
Dominance (D)	0.77±0.04	0.86±0.03	0.97±0.04	0.99
Benthic Polychaete Community				
Domineant species (%)	<i>Capitella capitata</i> (54.23±11.20)	<i>Lumbrineris longifolia</i> (60.58±3.93)	Defaunation or Dead zone	<i>Paraprionospio patiens</i> (92.40)
Benthic Polychaete Community Healthiness				
AMBI	Fair	Poor	Very Poor	Poor
BPI	Very Poor	Very Poor	Very poor	Very Poor

각 조사시기별로 크게 3개의 시기군(A, B, C)으로 나눌 수 있었고, 시기군 A는 다시 시기군 AI, AII로 세분할 수 있었다. ‘시기군 AI’은 동계 ~ 춘계, ‘시기군 AII’는 하계, ‘시기군 B’는 추계이었으며, ‘시기군 C’는 동계임에도 불구하고 ‘시기군 AI’으로 순환 변동하지 않고, 상황에 따라 ‘시기군 C’로 변화하기도 함을 보여주고 있다.

시기군별 생태학적 특징을 살펴보면 Table 3과 같다. ‘시기군 AI’은 *Capitella capitata* (54.2%)가 우점한 시기로 동계에서 춘계에 걸쳐 나타났다. 저층수의 용존산소는 비교적 풍부하며, 퇴적물 내 유기물질 함량과 AVS는 4 시기군 중 가장 낮게 나타났다. 출현종수는 가장 많았고, 서식밀도 역시 매우 높게 나타났다. 따라서 다양도지수, 풍부도지수는 가장 높고, 우점도지수는 가장 낮게 나타났다. 건강도지수를 살펴보면, AMBI는 평균적으로 Fair 상태, BPI는 Very Poor 상태로 나타났다.

‘시기군 AII’는 *Lumbrineris longifolia* (60.6%)가 우점한 시기로 하계에 나타났다. 저층수에 빈산소수괴가 형성되는 시기로, 퇴적물 내 유기물질 함량과 AVS가 매우 높은 값을 보이고 있다. 출현종수와 서식밀도가 급감하였으며, 따라서 다양도지수와 풍부도지수는 매우 낮은 값을 우점도지수는 높은 값을 보였다. 대부분 정점에서 *Lumbrineris longifolia*가 우점하여 나타났지만, 일부 정점에서 *Sigambra tentaculata*가 소량 출현하는 빈생물 해역이 나타났다. 건강도지수를 살펴보면 AMBI는 Poor 상태, BPI는 Very Poor 상태로 나타났다.

‘시기군 B’는 빈생물 및 무생물 해역 (dead zone)이 형성되는 시기로 추계에 나타났다. 저층수의 용존산소는 어느 정도 수준으로 회복되었으나 퇴적물 내 유기물질 함량과 AVS는 여전히 매우 높은 값을 보이고 있다. 출현종수와 서식밀도는 4 시기군 중 가장 낮게 나타났다. 추계 2회 조사시기의 10개 정점 중 5개 정점이 무생물해역이었다. 무생물해역을 제외한 나머지 정점들에서도 다양도지수와

풍부도지수는 거의 0.0에 가까운 매우 낮은 값을, 우점도지수는 1.0에 가까운 매우 높은 값을 보였다. 건강도지수는 AMBI와 BPI 모두 Very Poor 상태로 나타났다.

‘시기군 C’는 *Paraprionospio patiens* (92.4%)가 극우점한 시기로 2016년 12월 동계에 나타났다. 용존산소는 8.99 mg/L로 4 시기군 중 가장 높게 나타났으며, 평균입도는 9.81 \emptyset , TOC는 3.88%, LOI는 13.79%, AVS는 0.97 mgS/g-dry로 나타났다. 총 출현종수는 8종, 평균 서식밀도는 2,185 ind./m², 다양도지수는 0.19, 풍부도지수는 0.46, 균등도지수는 0.15, 우점도지수는 0.99로 나타났다. 모든 정점에서 *Paraprionospio patiens*가 극우점한 것으로 나타났다. 건강도지수를 살펴보면, AMBI는 Poor 상태, BPI는 Very Poor 상태로 나타났다.

각 조사시기별 모든 조사정점을 대상으로 통합 집괴분석을 실시한 결과 (Fig. 7) 역시 시간에 따른 군집 구조의 변동을 잘 보여주고 있다. 그러나 정점에 따라서는 약간 차이가 나는 군집들이 형성되어 있었다. 2015년 1월 ~ 6월까지는 *C. capitata*와 *L. longifolia*가 중심이 되는 군집을, 7월과 8월에는 *L. longifolia*와 *S. tentaculata*가 중심이 되는 군집을, 9월과 11월에는 무생물해역과 빈생물해역이 집중적으로 나타났으며, 2016년 1월과 2월에는 *L. longifolia*가 거의 대부분의 정점에서 *C. capitata*, 7월에는 *L. longifolia*가 중심이 되는 군집으로 반복되는 변화 패턴을 보여주었으며, 12월에는 특이하게 모든 정점들에서 *P. patiens*가 중심이 되는 군집으로 변화하였다.

이로 보아 당동만 저서다모류군집은 계절에 따라 반복적 종조성 패턴이 순환하는 형태로 나타남을 알 수 있었다. 2015년 동계에서 춘계로 넘어가는 시기에는 *Capitella capitata*가 우점하여 나타났고, 2015년 하계에는 *Lumbrineris longifolia*의 우점하고, 일부 무생물 및 빈생물 해역이 출현하였으며, 2015년 추계에 전반적으로 무생물해역으로 변화하였다. 2016년 동계도 마찬가지로 *Capitella capi-*

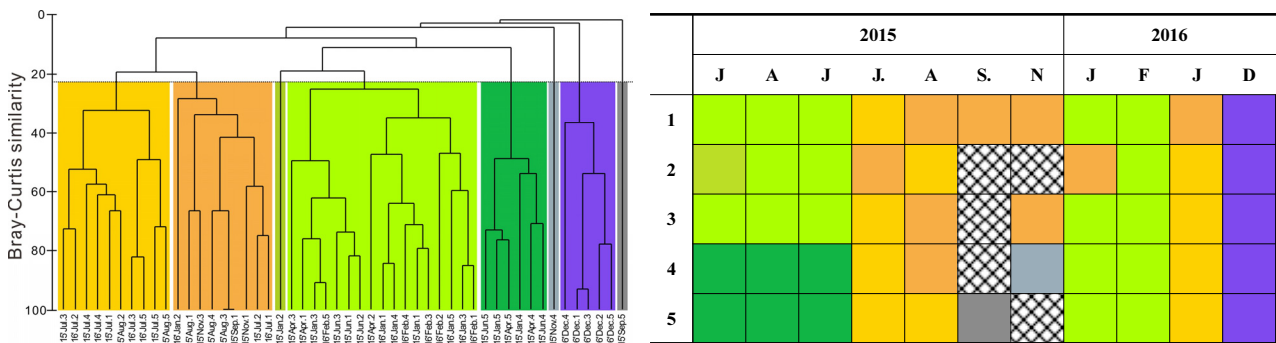


Fig 7. Dendrogram and table of sampling site from cluster analysis based on the Bray-Curtis similarity based on the benthic polychaetes data of Dangdong Bay. (Dominant species of each group : ■, *C. capitata*, / ■, *L. longifolia*, *C. capitata* / ■, *L. longifolia* / ■, *S. tentaculata*, poor-zoic zone, : dead zone / ■, *P. patiens*)

tata가 우점하여 나타났고, 2016년 하계에 *Lumbrineris longifolia*의 우점 및 빈생물 해역이 출현하였다. 2016년 12월에는 이러한 반복적인 패턴과는 다르게 *Paraprionospio patiens*가 극우점하여 나타났다.

저서다모류군집의 건강도 평가

당동만의 저서다모류군집의 건강도를 평가하기 위해 AMBI (Azti's Marine Biotic Index) 및 BPI (Benthic Pollution Index)를 구하였다(Fig. 8). 출현종수가 3종 이하이거나, 서식밀도가 10 ind./m² 이하인 빈생물 및 무생물 해역에는 제일 낮은 5등급을 부여하여 지수값을 산출하였다.

AMBI

조사기간 동안 당동만의 AMBI는 4.58 ~ 7.00의 범위로 나타났으며, 평균 5.63±0.26으로 Poor 상태를 보였다. 2015년 9, 11월에 7.0으로 가장 높게 나타났고 (Dead Zone 형성), 2015년 6월에 4.58±0.24로 가장 낮게 나타났다. 2015년 1월 ~ 6월에는 일부 정점을 제외하고는 Fair 상태를 유지하다가, 하계에 AMBI 값이 급격히 높아지면서 Very Poor 상태의 오염 범위가 확대되었다. 2015년 추계에는 빈생물해역과 무생물해역이 나타나면서 모든 정점이 Very

poor 상태를 나타냈다. 2016년 동계에는 Fair ~ Poor 상태를 보였고, 2016년 하계에는 다시 오염 수준이 상승하면서 Very Poor 상태인 해역이 나타났지만, 2015년 7월에 비해 오염 범위가 넓지 않았다. 2016년 동계에도 Fair ~ Very Poor 상태가 나타났다.

BPI

조사기간 동안 BPI는 0 ~ 23.84의 범위로 나타났으며, 평균 9.29±2.49로 Very Poor 상태를 보였다. 2015년 6월에 23.84±4.44로 가장 높게 나타났고, 2015년 9, 11월에 0.0으로 가장 낮게 나타났다. 2015년 1월에 Fair ~ Very Poor 상태가 나타났다가 춘계 ~ 하계로 가면서 Poor ~ Very Poor 상태가 증가하고 있었다. 2015년 추계에는 모든 정점이 Very Poor 상태를 나타냈다. 2016년에는 일부 시기의 일부 정점을 제외하고는 거의 대부분의 정점이 Very Poor 상태를 유지하였다.

전체적으로 AMBI와 BPI 변동을 비교해 볼 때, 조사기간 동안 평균 지수값들은 비슷한 패턴으로 변동하였으나, 환경 등급은 BPI가 AMBI보다 더 낮게 나타났다.

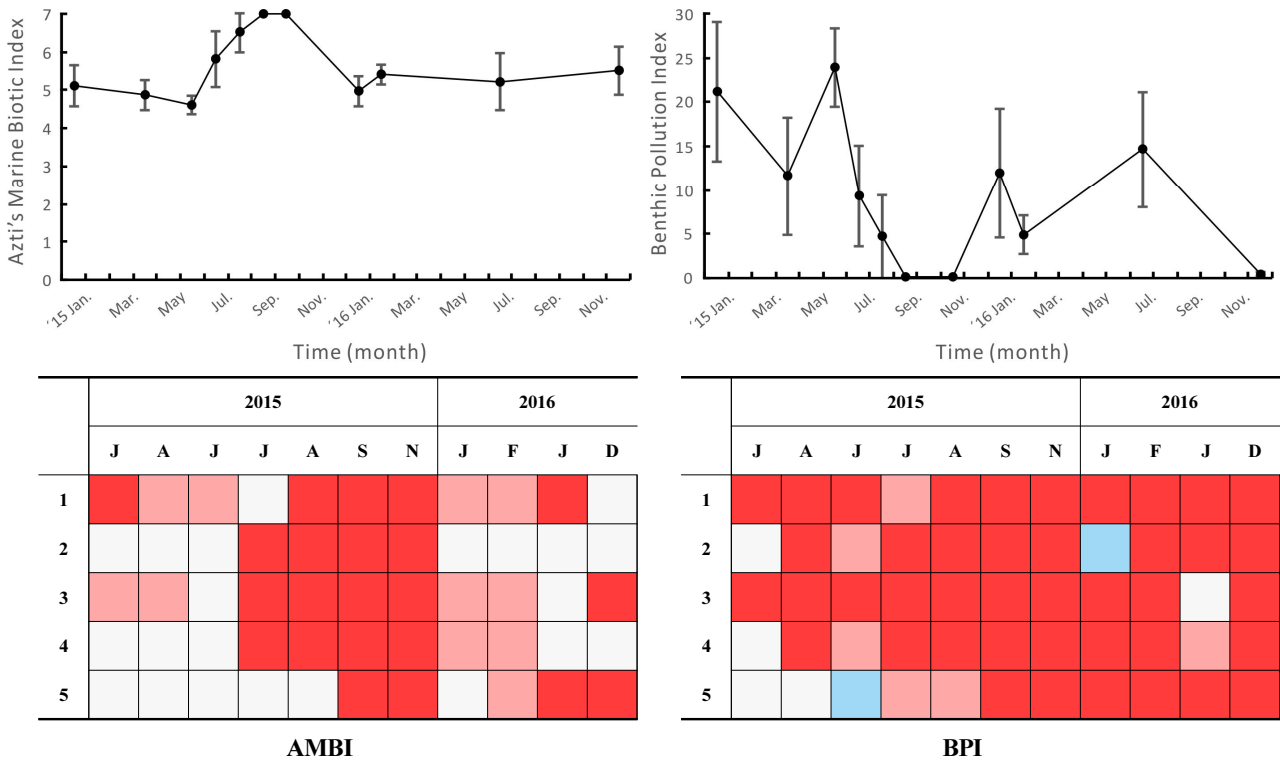


Fig. 8. Temporal variations of AMBI(Azti's Marine Biotic Index)and BPI (Benthic Pollution Index) in Dangdong Bay. The colors indicate the grades of benthic ecological quality status as ■ Excellent, ■ Good, ■ Fair, ■ Poor and ■ Very Poor

4. 고찰

조사기간 동안 저층수의 수온은 5.94 ~ 23.94°C의 범위로 하계 고수온, 동계 저수온의 전형적인 온대 해역의 계절적 변동 양상을 보였다. 염분은 32.93 ~ 35.72 psu의 범위로 조사기간 동안 큰 변동은 없었다. 2015년 당동만에서 수괴 성층의 형성/소멸과 용존산소 변동에 대해 조사한 결과에 의하면, 저층수 빈산소수괴의 형성기인 5월에 표층에서 약한 성층이 형성되었고, 빈산소수괴의 지속기인 6월, 7월에 표층과 저층 사이의 수온 차이가 더 심해져서 성층이 강화되었으며, 9월에 성층이 해소되었다(Park 2016). 또한 당동만은 몇몇 소하천이 존재하지만 주요 담수 유입원은 존재하지 않아서 표층과 저층의 염분 변화의 차이는 크게 나타나지 않았다. 즉 당동만은 2015년 5월부터 표층과 저층의 수온 차이에 의한 수온 성층이 형성되고 9월에 해소된 것으로 보이며, 염분 차이에 의한 염분 성층은 형성되지 않는 것으로 보인다. 진해만은 전반적으로 퇴적상과 염분의 지역별 차이가 거의 없어 이들 요인이 저서생물의 분포에 큰 영향을 미치는 것은 아닌 것으로 알려져 있고, 여름철 성층에 의한 빈산소수괴의 형성이 주요인일 가능성이 제시된 바 있다(Lim et al. 1992). 당동만도 이와 마찬가지로 여름철 성층에 의한 빈산소수괴 형성-소멸이 저서생물 군집의 종조성 변동에 영향을 준 것으로 생각된다.

본 연구에서 저층수의 용존산소는 0.31 ~ 10.20 mg/L의 범위로 변동하였으며, 수온과 반대의 변동 양상을 보였다. 2015년 7월에 용존산소가 평균 0.31±0.04 mg/L로 가장 낮게 나타났고, 이 시기에 5개 조사 정점 모두에서 0.5 mg/L 이하의 매우 낮은 값으로 빈산소수괴가 형성되었다. 또한 2015년 6월 3개의 정점과 2016년 7월 2개의 정점에서도 빈산소수괴가 형성되었다. 본 연구에서 2015년 8월에 저층수의 용존산소가 5.0 mg/L 이상의 높은 값을 기록하였으나, 현장조사 전날 태풍 ‘고니’가 발생하여 저층 용존산소 농도에 영향을 준 것으로 생각된다. MOF (2016)에서 조사된 결과에 의하면 2015년 5월 용존산소 농도는 1.39 ~ 2.72 mg/L, 2016년 5월 용존산소 농도는 1.99 ~ 2.59 mg/L, 2016년 8월 용존산소 농도는 0.41 mg/L로 나타났다. 이로 보아 본 연구지역인 당동만에서의 빈산소수괴는 5월부터 형성되어 8월까지 지속되는 것으로 보인다.

퇴적환경을 살펴보면, 평균입도는 평균 8.89±0.200이였으며, 표층 퇴적상은 대부분 Mud 함량이 우세한 세립한 퇴적상을 보였다. 저서동물 군집에 영향을 미치는 퇴적물 내 요인은 여러 가지가 있으나, 비교적 오래전부터 주목받았으며 현재까지도 주요 요인으로 꼽히고 있는 요인 중 하나가 퇴적물 내 유기물함량이다(Essink 2003; Gamito 2008; Weston 1990). 생물이 서식하기 위한 적당량의 유기물은 필요할 수 있으나, 유기물이 과도하게 많을 경우

적조 현상의 발생 및 무생물/무산소 지대를 야기시킬 수 있다(Bae 2015). 당동만의 유기물함량 분석 결과 TOC는 1.98 ~ 4.02%. LOI는 10.71 ~ 15.45%의 범위로 나타났다. 유기물함량은 입도 조성이 세립할 수록 높게 나타났다. 국내 빈산소수괴 발생 해역들과 비교했을 때, TOC는 가막만에서 평균 2.0% (Seo et al. 2012), 영산강 하구 1.14% (Woo et al. 2014), 시화호 1.0% (Kim et al. 2008), 진해-마산만 2.3% (Seo et al. 2015)이었으나, 본 연구지역인 당동만에서는 3.09%로 나타났다. LOI는 천수만 4.1% (Kim and Jang 2014), 남대천 하구 7.5 ~ 9.0% (Kwon et al. 2010), 가막만 7.5% (Jang and Shin 2016)이었으나, 본 연구지역인 당동만에서는 13.3%로 나타났다. 즉 TOC와 LOI 모두 국내 빈산소수괴가 출현한 다른 해역보다 당동만에서 매우 높은 수준임을 알 수 있었다. 내만에서 퇴적물 내 유기물함량이 높은 것은 주위에서 유입되는 유기물량이 많음에도 불구하고 미약한 해수유동으로 인해 외해로의 확산이 제한되어 유기물이 계속 집적되고, 세립질 퇴적물 입자가 우세한 환경이며, 특히 한국 연안은 양식장으로부터 유출되는 생물 기원 유기물 유입량이 많기 때문에 생각된다(Lim and Hong 1994b). AVS는 0.33 ~ 1.28 mg/g-dry의 범위로 평균 0.76±0.08 mg/g-dry로 나타났다. 일본에서 수산생물의 보호를 위하여 생물에 영향을 주는 기준농도로 AVS에 대하여 0.2 mg/g-dry를 설정해 놓고 있는데 (Yokoyama 2000), 조사기간 동안 모두 기준치를 초과하여 높게 나타났다. 즉 당동만의 유기물함량과 AVS 수치는 당동만이 심각한 유기물 오염에 노출되어 있음을 의미한다.

저서다모류는 총 출현종수 63종, 서식밀도는 평균 364 ind./m²로 나타났다. 출현종수는 2015년 6월에 38종으로 가장 많이 출현하였고, 2015년 9월에 2종으로 가장 적게 출현하였다. 서식밀도는 2016년 12월에 평균 2,185 ind./m²로 가장 높은 값을 보였지만, 출현종수와 마찬가지로 2015년 6월에도 높은 서식밀도를 보였고, 2015년 9월에 평균 2 ind./m²로 가장 낮게 나타났다. 출현종수와 서식밀도는 2015년 6월부터 빈산소수괴가 형성되었음에도 불구하고 높은 값을 유지했으며, 빈산소수괴가 정상수괴로 회복된 2015년 9월에 가장 낮은 값을 보였고 무생물해역이 크게 확장되었다. 진해만에서 수행된 Seo et al. (2015)의 연구에 의하면, 진해만의 생물량은 빈산소수괴가 형성되는 여름철 급감하였고, 빈산소 현상 종료 후 새로운 종이 가입되는 가을에 최저값을 보이다 겨울과 봄을 거쳐 생물이 성장하면서 최대값을 보이는 것으로 나타났으며, 이는 본 연구 결과와 비슷한 양상이라고 할 수 있다. 즉 고수온기를 중심으로 빈산소가 지속됨에 따라 기회주의종마저도 폐사하는 defaunation 현상이 발생하고, 이후 수온이 낮아져서 산소농도가 정상 범위로 회복하여도 생물의 가입

과 성장이 정상 수준으로 돌아오지 않는 등 (Kim 2017), 빈산소수괴 형성-쇠퇴와 생물상 변동 사이에 시간 지연 효과(Time delay effect)가 있음을 보여주고 있다.

본 연구에서 조사기간 동안 전체 저서다모류 중 60% 이상을 차지한 주요 우점종은 기회주의종 및 잠재적 유기물 오염지시종으로 알려진 *Capitella capitata*, *Lumbrineris longifolia*, *Paraprionospio patiens*와 *Sigambra tentaculata*로 나타났다. 우점종들은 대체로 여름철 빈산소수괴 형성 시기를 전후하여 증가/감소를 반복하는 양상을 보였다. 저층수의 용존산소량이 빈산소 농도에 이르면 대형저서동물은 폐사하기 시작하고, 그 이하의 상태에서는 개체군의 적응 내성이 뛰어난 소수의 기회주의종만이 살아남게 되어 매우 빈약한 생물상을 보이게 된다(Pearson and Rosenberg 1978). 특히 *Capitella capitata*는 한국과 일본을 비롯한 아시아권뿐만 아니라, 미국, 유럽 등 범세계적으로 출현하는 유기물오염 지시종으로, 유기물 오염이 진행되기 쉬운 어류 양식장 부근에서 우점 출현했다는 보고가 많았으며 (Bannister et al. 2014; Neofitou et al. 2010), 극심한 유기물 오염 환경에서 높은 서식밀도를 보이는 것으로 알려진 종이다(Cho et al. 2013). 당동만은 수하식 양식장이 밀집하고 있고, 퇴적물 내 유기물함량이 높게 나타나는 환경으로 본 연구에서도 *Capitella capitata*가 높은 서식밀도를 보였으며, 빈산소수괴 형성-쇠퇴에 따라 가장 민감하게 반응하는 것을 볼 수 있었다. *Lumbrineris longifolia*는 한국 서·남해 연안의 유기물오염이 진행되고 있는 지역에서 우점종으로 출현하고 있는 기회주의 종으로써, 잠재적 유기물 오염지시종으로 알려져 있다(Yi et al. 1982; Shin et al. 1989; 1992; Shin and Koh 1990). 본 연구에서 *Lumbrineris longifolia*는 두번째로 높은 서식밀도를 나타낸 종으로 연구지역인 당동만의 유기물 오염을 지시하는 지표생물 중 하나로 사료된다. *Paraprionospio patiens*는 과거 *Paraprionospio pinnata*로 동정되었다가 최근 분류학적으로 종이 구분된 3종 중 한 종으로 (Yokoyama and Choi 2010), 진해만에서 TOC 함량이 높고, 빈산소수괴가 형성되는 해역을 중심으로 우점하는 기회주의종으로 알려져 있다(Seo 2016). *Paraprionospio patiens*는 총 11번의 조사시기 중 3 시기에만 우점종으로 나타났고, 특히 2016년 12월에 개체수가 급증하여 당동만에서 세 번째 주요 우점종으로 나타났다. 이는 *Capitella capitata*, *Lumbrineris longifolia*와 달리 조사기간 중 낮은 서식밀도를 유지하다가 2016년 12월에 개체수가 급증하는 등의 저서다모류군집이 새로운 방향으로의 천이가 일어난 것으로 보인다. 이 종은 당동만과 인접한 진해만 내 소규모 당항포만과 원문만에서 높은 서식밀도를 보이며 최우점종으로 나타나는 등 (MOF 2016; Kim 2017), 당동만 인근 해역에서 극우점 출현하고 있다. 즉 당동만에서 우점 다모류

의 교호 출현 등 군집 천이를 보이는 현상에 대해 추가 연구가 필요한 것으로 사료된다. *Sigambra tentaculata*는 유기물 함량이 높은 진해만의 내만 해역에서 서식밀도가 높아 유기물오염 지표종으로서의 가능성이 제시된 바 있고 (Lim 1993), 일본에서도 동일 속의 *Sigambra hanaokai*가 오염지표종으로 평가되고 있다(Jung et al. 2014a). 본 연구에서는 빈산소수괴가 형성된 시기에도 앞의 우점종들과는 달리 모든 정점에서 출현하였으며, 서식밀도는 낮지만 모든 계절에서 꾸준히 출현하였다. 이는 넓은 서식처를 가지는 생태적 지위와 이들의 번식 특성이 반영된 결과로 보이며 (Lim 1993) 앞으로 지속적인 모니터링이 필요한 종으로 판단된다(Lim and Hong 1997a). 진해만은 전반적으로 유기물함량이 높은 해역에서 다량 출현하는 기회주의적 특성을 가진 종들이 많이 분포한다고 알려져 있으며 (Lim and Hong 1997b; Paik and Yoon 2000), 당동만도 이처럼 기회주의종 및 잠재적 유기물 오염지시종이 우점하여 나타난 것을 볼 수 있었다.

당동만 저서다모류군집에 대한 군집분석 결과, 시기별로 4 그룹으로 나뉘었는데 시기군 AI는 *Capitella capitata*가 우점하는 동계 ~ 춘계 시기, 시기군 AII는 *Lumbrineris longifolia*가 우점하는 하계 시기, 시기군 B는 무생물 해역이 나타나는 추계 시기로 매년 계절별로 군집 패턴이 반복되는 것으로 나타났다. 특이하게 2016년 12월의 동계에는 *Capitella capitata*가 아니라 *Paraprionospio patiens*가 우점하는 시기군 C가 나타났다. 이는 본 연구에서 나타난 주요 우점종이 조사기간 동안 전체 저서다모류 중 60% 이상을 차지하여 출현하기 때문에 이 주요 우점종들에 따라서 시기 그룹이 명확히 구분되었다.

최근에 이르러 저서환경의 건강도 평가를 위한 다양한 생물지수(biotic index)들이 지속적으로 개발 및 소개되어 여러 형태로 적용되고 있으며 (Jung et al. 2014b), 생물평가지수들은 서로 다른 형태의 교란으로부터 해당 생태계의 장·단기적인 감시와 질적인 상태를 평가하는데 있어 효율적인 수단으로 인식되고 있다(Borja et al. 2004). 그 중 AMBI 지수는 전 세계적으로 무산소와 빈산소해역, 부영양화해역, 영양염 과부하 해역, 준설 및 유류오염해역과 생활 및 산업오·폐수 유출해역 등과 같이 인위적인 교란을 받는 환경에 대한 감지와 평가능력이 높은 것으로 입증되고 있다(Borja et al. 2000). 본 연구에서 AMBI는 조사기간 동안 Fair 이상의 상태를 보였고, 평균 Poor 상태를 보였으며, 특히 무생물해역이 형성된 시기에는 Very poor 상태를 보였다. BPI 지수도 우리나라에서 다양한 연구에 보편적으로 적용되고 있다(Choi et al. 2003; Jung et al. 2014b; Seo 2016). 본 연구에서 BPI는 조사기간 동안 Poor 이상의 상태를 보였고, 평균 Very Poor 상태를 보여 AMBI보다 높은 등급을 나타냈다. 이로 보아 당동만은 저

서환경의 유기물오염 및 교란이 상당히 진행된 해역이라 평가할 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 당동만의 5개 정점에서 2년에 걸쳐 총 11회 조사를 실시하였다. 수온은 전형적인 온대 해역의 계절적 패턴을 보였고, 용존산소 농도 3 mg/L 이하의 빈산소수괴는 2015년 5월부터 형성되어 8월까지 지속된 것으로 나타났다. 퇴적물 입도조성은 대부분 Mud 함량이 높은 세립질로 나타났으며, 국내 빈산소수괴 발생 해역들과 비교했을 때, TOC와 LOI 모두 매우 높은 수준으로 나타났다. AVS는 조사기간 동안 일본에서 수산생물의 보호를 위하여 생물에 영향을 주는 기준농도인 0.2 mgS/g-dry을 초과하여 높은 수준으로 나타났다.

출현종수와 서식밀도는 계절적 변동이 뚜렷하게 나타났다. 2015년 빈산소수괴 형성 직후까지의 시기까지 높게 나타났으며, 빈산소수괴 형성시기인 7월과 8월에 급감하였다. 빈산소수괴가 해소되고 용존산소 농도가 정상범위로 회복되기 시작한 9, 11월에는 오히려 무생물 해역이 나타났다. 빈산소수괴 형성과 생물상 사이에 시간 지연 효과(time delay effect)가 있음을 보여주고 있다. 이후 다시 겨울철부터 증가하였다. 주요 우점종은 기회주의종 및 잠재적 유기물 오염지시종으로 알려진 *Capitella capitata*, *Lumbrineris longifolia*, *Paraprionospio patiens*와 *Sigambra tentaculata* 4종으로 나타났다. 주요 우점종은 대체로 빈산소수괴 형성에 따라 증가/감소하는 양상을 보였다. 특히 *Capitella capitata*, *Lumbrineris longifolia*는 빈산소수괴 형성에 민감하게 반응하였고, *Paraprionospio patiens*는 2016년 12월에 급증하여 나타났으며 이에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 생각된다. *Sigambra tentaculata*는 조사기간 동안 빈산소수괴가 형성되는 시기에도 꾸준히 출현했다. 군집 분석 결과, 시기별로 4개의 그룹으로 나뉘었으며 각 계절별로 우점종에 따라 반복적인 패턴을 보였다.

저서다모류군집의 건강도 분석 결과, AMBI와 BPI는 빈산소수괴 형성시기와 무생물해역이 나타난 시기에 대부분 Very Poor 상태로 오염이 매우 심화된 해역으로 나타났다.

당동만은 저서다모류군집의 출현종수와 서식밀도의 계절적 변동 범위가 크게 나타나고 무생물 해역까지도 나타났다. 또한 유기물함량이 높게 나타난 본 연구지역에서 기회주의종 및 잠재적 유기물오염지시종이 극심하게 우점하는 것을 볼 수 있었으며 이러한 양상은 당동만의 유기물오염 상태를 잘 보여준다고 생각해 볼 수 있다. 저서건강도에 따르면 대부분 오염된 환경으로 나타났다. 이는 용존산소 농도에 따른 계절적 빈산소수괴 형성과 유기물오

염에 의한 것이라 생각되며, 계속해서 당동만의 빈산소수괴와 유기물오염을 해소하기 위한 방안을 모색하기 위해서 저서생물군집 변동에 대한 지속적인 모니터링과 연구가 필요할 것으로 사료된다.

사 사

진심어린 두 분 심사위원의 심사에 감사드립니다.

참고문헌

- Anderson M (2008) Animal-sediment relationships re-visited: Characterising species distributions along an environmental gradient using canonical analysis and quantile regression splines. *J Exp Mar Biol Ecol* **366**:16-27
- Bae HN (2015) Spatial and seasonal variations of macrozoobenthic communities of south-west part of Jinhae Bay, Korea. MS Thesis. Seoul National University, 65 p
- Bannister RJ, Valdemarsen T, Hansen PK, Holmer M, Ervik A (2014) Changes in benthic sediment conditions under an Atlantic salmon farm at a deep, well-flushed coastal site. *Aquacult Environ Interact* **5**:29-47
- Belan TA (2004) Marine environmental quality assessment using polychaete taxocene characteristics in Vancouver Harbour. *Mar Environ Res* **57**:89-101
- Bilyard GR (1987) The value of benthic infauna in marine pollution monitoring studies. *Mar Pollut Bull* **18**:581-585
- Borja A, Franco J, Pérez V (2000) A marine biotic index to establish the ecological quality of soft-bottom benthos within European estuarine and coastal environments. *Mar Pollut Bull* **40**(12):1100-1114
- Borja A, Franco J, Valencia V, Bald J, Muxika I, Belzune MJ, Solaun O (2004) Implementation of the European water framework directive from the Basque country (northern Spain): A methodological approach. *Mar Pollut Bull* **48**:209-218
- Bray JR, Curtis JT (1957) An ordination of the upland forest communities of southern Wisconsin. *Ecol Monogr* **27**:325-349
- Cho HY, Chae JW, Chun SY (2002) Stratification and DO concentration changes in Chinhae-Masan Bay. *J Korean Soc Coast Ocean Eng* **14**(4):295-307
- Cho YS, Lee WC, Kim JB, Hong SJ, Kim HC, Kim CS (2013) Establishment of environmental assessment using sediment total organic carbon and macrobenthic polychaete community in shellfish farms. *J Korean Soc Mar Environ Safe* **19**(5):430-438
- Choi JW, Hyun SM, Chang M (2003) The summer benthic environmental conditions assessed by the functional groups

- of macrobenthic fauna in Gwangyang Bay, southern coast of Korea. *Korean J Environ Biol* **21**(2):101-113
- Choi JW, Seo JY (2007) Application of biotic indices to assess the health condition of benthic community in Masan Bay, Korea. *Ocean Polar Res* **29**(4):339-348
- Del-Pilar-Ruso, Y, De-La-Ossa-Carretero JA, Loya-Fernandez A, Ferrero-Vicente LM, Gimenez-Casaiduero F, Sanchez-Lizaso JL (2009) Assessment of soft bottom Polychaeta assemblage affected by a spatial confluence of impacts: Sewage and brine discharge. *Mar Pollut Bull* **60**:1930-1938
- Essink K (2003) Response of an estuarine ecosystem to reduced organic waste discharge. *Aquat Ecol* **37**:65-76
- Fauchald K, Jumars PA (1979) The diet of worms: A study of polychaete feeding guilds. *Oceanogr Mar Biol* **17**:193-284
- Folk RL, Ward WC (1957) Razos river bar: A study in the significance of grain size parameters. *J Sediment Petrol* **27**:3-26
- Gamito S (2008) Three main stressors acting on the Ria Formosa lagoonal system (Southern Portugal): Physical stress, organic matter pollution and the land-ocean gradient. *Estuar Coast Shelf S* **77**:710-720
- Hong JS, Jung RH, Sea IS, Yoon KT, Choi BM, Yoo JW (1997) How are the spatio-temporal distribution patterns of benthic macrofaunal communities affected by the construction of Shihwa Dike in the west coast of Korea? *J Korean Fish Soc* **30**(5):882-895
- Ingram RL (1971) Sieve analysis. In: Carver RE (ed) *Procedures in sedimentary petrology*. Willy-Interscience, California, pp 49-67
- Jang SY, Shin HC (2016) Differences in the community structures of macrobenthic polychaetes from farming grounds and natural habitats in Gamak Bay. *J Korean Soc Mar Environ Energy* **19**(4):297-309
- Jung, RH, Lim HS, Kim SS, Park JS, Jeon, KA, Lee YS, Lee, JS, Kim KY, Go WJ (2002) A study of the macrozoobenthos at the intensive fish farming grounds in the southern coast of Korea. *The Sea* **7**(4):235-246
- Jung RH, Sea IS, Choi MK, Park SR, Choi BM, Kim MH, Kim YJ, Yun JS (2014a) Community structure and health assessment of macrobenthic assemblages during spring and summer in the shellfish farming ground of Wonmun Bay, on the southern coast of Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* **47**(6):908-926
- Jung RH, Sea IS, Lee WC, Kim HC, Park SR, Kim JB, Oh CW, Choi BM (2014b) Community structure and health assessment of macrobenthic assemblages at spring and summer in Cheonsu Bay, wet coast of Korea. *The Sea* **19**(4):272-286
- Kim JG, Jang HS (2014) Evaluation of characteristics of particle composition and pollution of heavy metals for bottom sediments in Cheonsu Bay, Korea - Comparison of the sediments environment of farming area and non-farming area. *J Korean Soc Mar Env Safe* **20**(4):358-371
- Kim KT, Kim ES, Cho SR, Park JK, Kim JK, Lee JM (2008) Distribution of TOC and metal in the surface sediments of the Lake Shihwa. In: *The Korean Society of Marine Environment and Safety, Spring Annual Conference 2018*, Mokpo National Maritime University, 13 May 2008, pp 159-164
- Kim YJ (2017) Fluctuation of benthic environment and benthic polychaete community in hypoxia waters of Jinhae Bay. MS Thesis, Junnam National University, 135 p
- Kwon KY, Lee YH, Shim JM, Lee PY (2010) Occurrence and variation of oxygen deficient water mass in the Namdae stream estuary, Yangyang, Korea. *The Sea* **15**(3):115-123
- Lee IC, Gong HH, Yoon SJ (2008) Numerical prediction for reduction of oxygen deficient water mass by ecological model in Jinhae Bay. *J Ocean Eng Tech* **22**(5):75-82
- Lim HS (1993) Ecology on the macrozoobenthos in Chinhae Bay of Korea. Ph.D. Thesis, Pusan National University, 311 p
- Lim HS, Diaz RJ, Hong JS, Schaffner LC (2006) Hypoxia and benthic community recovery in Korean coastal waters. *Mar Pollut Bull* **52**:1517-1526
- Lim HS, Choi JW, Je JG, Lee JH (1992) Distribution pattern of macrozoobenthos at the farming ground in the western part of Chinhae Bay, Korea. *Bull Korean Fish Soc* **25**(2):115-132
- Lim HS, Hong JS (1994a) An environmental impact assessment based on the benthic macrofauna in Chinhae Bay, Korea - An application of some graphic methods by distribution pattern of individuals among species. *Bull Korean Fish Soc* **27**(5):659-672
- Lim HS, Hong JS (1994b) Ecology of the macrobenthic community in Chinhae Bay, Korea 1. Benthic environment. *Bull Korean Fish Soc* **27**(2):200-214
- Lim HS, Hong JS (1997a) Ecology of the macrobenthic community in Chinhae Bay, Korea 2. Distribution pattern of the major dominant species. *J Korean Fish Soc* **30**(2):161-174
- Lim HS, Hong JS (1997b) Ecology of the macrobenthic community in Chinhae Bay, Korea 3. Community structure. *J Korean Fish Soc* **30**(2):175-187
- Lim KH, Shin HC (2005) Temporal and spatial distribution

- of benthic polychaetous community in the northern Jinhae Bay. Korean J Environ Biol **23**(3):238-249
- Lim KH, Shin HC, Yoon SM, Koh CH (2007) Assessment of benthic environment based on macrobenthic community analysis in Jinhae Bay, Korea. The Sea **12**(1):9-23
- Lorenzen CJ (1967) Determination of chlorophyll and pheopigments: Spectrophotometric equations. Limnol Oceanogr **12**:343-346
- Margalef R (1958) Information theory in ecology. Gen Syst **3**:157-175
- Martinez-Garcia E, Sanchez-Jerez P, Aguado-Gimenez F, Avila P, Guerrero A, Sanchez-Liazo JL, Fernandez-Gonzalez V, Gonzalez N, Gairin JL, Carballeria C, Garcia-Garcia B, Carreras J, Macias JC, Carballeria A, Collado C (2013) A meta-analysis approach to the effects of fish farming on soft bottom polychaeta assemblages in temperate regions. Mar Pollut Bull **69**:165-171
- McNaughton SJT (1968) Structure and function in California grasslands. Ecology **49**(5):962-972
- MOF (2016) Development of hypoxic water mass restoration technology in a inner bay. Ministry of Oceans and Fisheries, Seoul, 1138 p
- Neofitou N, Vafidis D, Klaoudato S (2010) Spatial and temporal effects of fish farming on benthic community structure in a semi-enclosed gulf of the Eastern Mediterranean. Aquacult Environ Interact **1**:95-105
- Paik SG, Yun SG (2000) Community structure of the macrobenthos in Chinhae Bay, Korea. J Korean Fish Soc **33**(6):572-580
- Park SY (2016) Organic matter and nutrient dynamics with the development of hypoxia in Jinhae Bay, Korea. MS Thesis, Pusan National University, 97 p
- Pearson TH, Rosenberg R (1978) Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. Oceanogr Mar Biol **16**:229-311
- Pielou EC (1966) The measurement of diversity in different types of biological collections. J Theoret Biol **13**:131-144
- Pocklington P, Wells PG (1992) Polychaetes: Key taxa for marine environmental quality monitoring. Mar Pollut Bull **24**:593-598
- Rygg B (1985) Distribution of species along pollution-induced diversity gradients in benthic communities in Norwegian Fjords. Mar Pollut Bull **16**:469-474
- Seo JY (2016) A Study on the determination of threshold value of benthic community health and application of Benthic Pollution Index (BPI) to special management areas the southern coasts of Korea. Ph.D. Thesis. Pusan National University, 138 p
- Seo JY, Lim HS, Choi JW (2015) Spatio-temporal distribution of macrobenthic communities in Jinhae Bay, Korea. Ocean Polar Res **37**(4):295-315
- Seo JY, Park SH, Lee JH, Choi JW (2012) Structural changes in macrozoobenthic communities due to summer hypoxia in Gamak Bay. Ocean Sci J **47**(1):27-40
- Shannon CE, Weaver W (1963) The mathematical theory of communication. University of Illinois Press, Urbana, 125 p
- Shin HC (1995) Benthic polychaetous community in Kamak Bay, southern coast of Korea. J Korean Soc Oceanogr **30**(4):250-261
- Shin HC, Choi JW, Koh CH (1989) Faunal assemblages of benthic macrofauna in the inter-and subtidal region of the inner Kyeonggi Bay, west coast of Korea. J Oceanol Soc Korea **24**(4):184-193
- Shin HC, Choi SS, Koh CH (1992) Seasonal and spatial variation of polychaetous community in Youngil Bay, spitheastern Korea. J Oceanol Soc Kor **27**(1):46-54
- Shin HC, Koh C (1990) Temporal and spatial variation of polychaete community in Kwangyang Bay, southern coast of Korea. J Oceanol Soc Kor **25**(4):205-216
- Sutherland TF, Levings CD, Petersen SA, Poon P, Piercey B (2007) The use of meiofauna as an indicator of benthic organic enrichment associated with salmonid aquaculture. Mar Pollut Bull **54**:1249-1261
- Tomassetti P, Porrello S (2005) Polychaetes and indicator of marine fish farm organic enrichment. Aquacult Intern **13**:109-128
- Tsutsumi H (1990) Population persistence of *Capitella* sp. (Polychaeta; Capitellidae) on mud flat subject to environmental disturbance by organic enrichment. Mar Ecol-Prog Ser **63**:147-156
- Warwick RM (1993) Environmental impact studies on marine communities: Pragmatical considerations. Austral J Ecol **18**:63-80
- Weston D (1990) Quantitative examination of macrobenthic community changes along an organic enrichment gradient. Mar Ecol-Prog Ser **61**:233-244
- Woo JS, Choi HS, Lee HJ, Kim TH (2014) Organic matter in the sediments of Youngsan river estuary : Distribution and sources. J Env Sci Int **23**(7):1375-1383
- Yi SK, Hong JH, Lee JH (1982) A study on the subtidal benthic community in Ulsan Bay, Korea. Bull KORDI **4**:17-26
- Yokoyama H (2000) Environmental quality criteria for aquaculture farms in Japanese coastal area - A new policy and its potential problems. Bull Nat Res Inst Aquacult **29**:123-134
- Yokoyama H, Choi JW (2010) New records of three *Paraprionospio* species (Polychaeta: Spionodae) from Korean

waters. *Ocean Sci J* **45**(1):55-61

Yoon SP, Kim YJ, Jung RH, Moon CH, Hong SJ, Lee WC, Park JS (2008) Benthic environments and macrobenthic polychaete community structure in the winter of 2005-2006 in Gamak Bay, Korea. *The Sea* **13**(1):67-82

Author's Information

Jin Kyeong Yang

Researcher, Chonnam Natinal University

Hyun Chool Shin

Professor, Chonnam Natinal University

Received Aug. 5, 2020

Revised Sep. 1, 2020

Accepted Sep. 1, 2020