

2010년대 울산연안의 저서다모류 군집의 구조 및 건강성 평가

박성완¹ · 신현출^{2,†}¹전남대학교 수산해양대학 환경해양학과 대학원생²전남대학교 수산해양대학 해양융합과학과 교수

Community Structure of Macrobenthic Polychaetes and Its Health Assessment in Ulsan Coastal Area of Korea During 2010s

Sung Wan Park¹ and Hyun Chool Shin^{2,†}¹Graduate Student, Department of Environmental Oceanography, College of Fisheries and Ocean Science, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea²Professor, Department of Ocean Integrated Science, College of Fisheries and Ocean Science, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea

요 약

본 연구는 대한민국 동해 연안에 위치한 울산 주변 해역의 저서다모류 군집의 구조특성을 파악하기 위해 계절별로 2011년에는 32개 정점, 2016년에는 15개 정점 등 총 47개 정점에서 현장조사를 실시하였다. 평균입도는 수심이 깊어질수록 증가하였고 퇴적상은 수심 30 m 이하의 연안역에 위치한 정점들에서는 다양한 형태의 퇴적상이 나타났고, 수심 30 m 이상의 외해역에 위치한 정점에서는 니질 함량이 높은 퇴적상이 나타났다. 저서다모류의 총출현종수는 102종, 평균 서식밀도는 717 ind./m² 이었다. 출현종수와 서식밀도는 연안역에 위치한 정점들에서 높게 나타났고, 외해역에서는 낮게 나타났다. 우점종은 *Magelona japonica*, *Lumbrineris longifolia*, *Heteromastus filiformis*, *Spiophanes bombyx* 이었다. *M. japonica*는 연안역에서부터 30m 수심역에서 주로 출현하였고, *L. longifolia*는 외해역에 위치한 정점에서 높은 서식 밀도로 출현하였다. *H. filiformis*는 연안역에 위치한 정점들을 중심으로 대부분의 조사 정점에서 출현하였다. 마지막으로 *S. bombyx*는 사질 함량이 높은 일부 정점에서 집중적으로 출현하였다. 집괴분석(Cluster analysis) 및 비계량다차원척도법(non-metric multidimensional scaling ; nMDS)을 실시한 결과, 대체적으로 정점군들은 수심에 따라 분포하였다. Benthic Pollution Index(BPI)와 AZTI's Marine Biotic Index(AMBI)를 이용하여 저서생태계의 건강도를 평가하였다. BPI와 AMBI는 평균적으로 각각 Good 등급과 Moderate 등급으로 평가되어 유기물오염의 관점에서 살펴볼 때 비교적 건강한 저서생태계가 유지되고 있는 것으로 나타났다.

Abstract – This study was carried out to investigate benthic polychaetous communities on the coast of Ulsan, located on the southern East Sea, area. Two surveys were conducted at a total of 47 stations seasonally in 2011 (32 stations) and 2016(15 stations). From the coastal area to the outer sea, surface sediments turned into fine-grained sediments. There were various sedimentary facies with complex coarse-grained sediments in the coastal zone, while only mud facies in the offshore zone. The benthic polychaetous community comprised a total number of 102 species and showed a mean density of 717 ind./m². The dominant polychaetous species were *Magelona japonica*, *Lumbrineris longifolia*, *Heteromastus filiformis* and *Spiophanes bombyx*. *M. japonica* was distributed at the shallow coastal area below about 30 m of water depth, and *L. longifolia* showed high density at the stations located in the offshore zone. *H. filiformis* occurred at the most stations of the survey area, mainly at the coastal area. Finally *S. bombyx* appeared intensively at the some stations with high sand content. Station groups, divided by the results of the cluster analysis and nMDS ordination, were distributed according to the water depth gradient. Benthic Pollution Index(BPI) and AZTI's Marine Biotic Index(AMBI) were applied to assess the benthic health status of the Ulsan coastal area. The health status from both the mean BPI and AMBI were

†Corresponding author: shinhc@jnu.ac.kr

assessed as Good and Moderate grades, which means that the benthic ecosystem of the Ulsan coast is maintained in a good healthy state, especially in terms of benthic organic enrichment.

Keywords: Benthic Polychaetes(저서다모류), Community Structure(군집구조), Benthic Ecosystem Health(저서 생태계건강도), Ulsan Coast(울산연안)

1. 서 론

연안해역은 육지와 해양의 경계에 인접한 해역으로 수심이 얕으며 강물과 하천을 통해 육상의 오염물질이 다량으로 유입되는 등 물리·화학적, 생물학적 변화가 심한 지역이다. 전 세계적으로 연안해역은 1960년대 이후 공업단지, 각종 편의시설 및 신도시 건설 등으로 해양오염 현상이 증가하고 있다. 또한 유해화학물질의 유입, 매립·준설로 인한 서식지 파괴 등은 군집구조의 변형과 파괴를 초래하여 연안 저서생태계의 질적 저하를 유발하는 주된 요인으로 언급되어왔다(Smith and Shackley[2006]).

한국의 동해안은 서·남해안과 다르게 조차가 2 m 이하인 소조차 해안으로 분류되며 수리물리학적인 환경특성상 조석보다는 파랑의 영향을 우세하게 받는다. 특히 해안에서 멀어질수록 수심이 급격하게 깊어져 뚜렷한 수심 구배를 나타낸다(Yu *et al.*[2011]). 동해 연안의 남부에 위치한 울산 연안은 태화강, 외항강, 회야강으로부터 육수가 유입되며, 1970년대 남동임해공업단지로 조성되면서 석유화학과 비철금속 등 대규모 중화학 공업단지가 발달되었다. 이러한 공단으로부터 방출되는 오염물질로 인해 인접 연안 해저 퇴적물 내 미량금속이 다량으로 축적되고 생물농축현상이 심화되는 등 국내 연안에서 가장 심각한 해양오염 해역 중 한 곳으로 알려져 있다(Ra *et al.*[2013]).

본 연구의 대상생물인 저서동물은 해양생태계 내에 서식하는 생물종의 90% 이상을 차지하며(Thorson[1957]), 어류나 다른 무척추동물의 먹이로 활용되어 이들의 성장효율과 생산량에 영향을 미친다(Daan[1973]). 이들 저서동물들은 생활사의 대부분을 해저의 암반이나 퇴적물 위 혹은 속에서 살아간다. 이러한 서식지에서 먹이 활동을 통하여 퇴적물 내의 영양염을 변화시키며, 퇴적물에서 수괴의 영양염 재순환에 중요한 매개자 역할을 함으로써, 생태계 물질순환에도 중요한 위치를 점유하고 있다. 대형저서동물 군집에 영향을 주는 물리·화학적 환경요인들로 수심(Choi and Koh[1990]), 수온(Lee[1987]; Choi and Koh[1990]), 염분농도(Lim *et al.*[1991]), 퇴적물의 유기물 함량(Pearson and Rosenberg[1978]; Weston[1990]) 등이 있다. 따라서 대형저서동물의 출현 종수, 개체수 및 군집구조의 파악은 해역의 구조적 안정성 및 건강도 평가와 더불어 환경교란의 정도를 감시하는데 있어 필수적이다(Rosenberg and Nilsson[2005]). 이러한 대형저서동물 중에서도 다모류는 현존량이나 종조성에 있어 저서동물 군집에서 매우 중요한 위치를 차지하므로, 다모류 군집의 생태학적 특성을 밝히는 것은 전체 저서동물 군집의 구조적 특성을 이해하는데 도움이 된다(Lee[1976]).

본 연구는 2010년대 한국 동해에 위치한 울산 연안에 서식하는 저서다모류 군집의 군집구조를 파악하고, 이로부터 저서생태계의

건강도를 평가하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

한국 남동연안역에 위치한 울산 주변해역의 저서다모류 군집의 생태학적 특성을 파악하기 위해 2011년 1월, 4월, 8월, 11월에 각 32개 정점, 2016년 1월, 4월, 7월, 10월에 각 15개 정점에서 현장 조사를 실시하였다(Fig. 1). 2011년에는 고리원자력발전소 인근에서부터 회야강 인근까지의 해역에서 계절별 조사를 실시하였고, 5년 후인 2016년에는 간절곶에서부터 태화강 인근까지의 해역에서 계절별 조사를 실시하였다.

표층퇴적물 입도분석을 실시하기 위해 퇴적물 시료는 먼저 과산

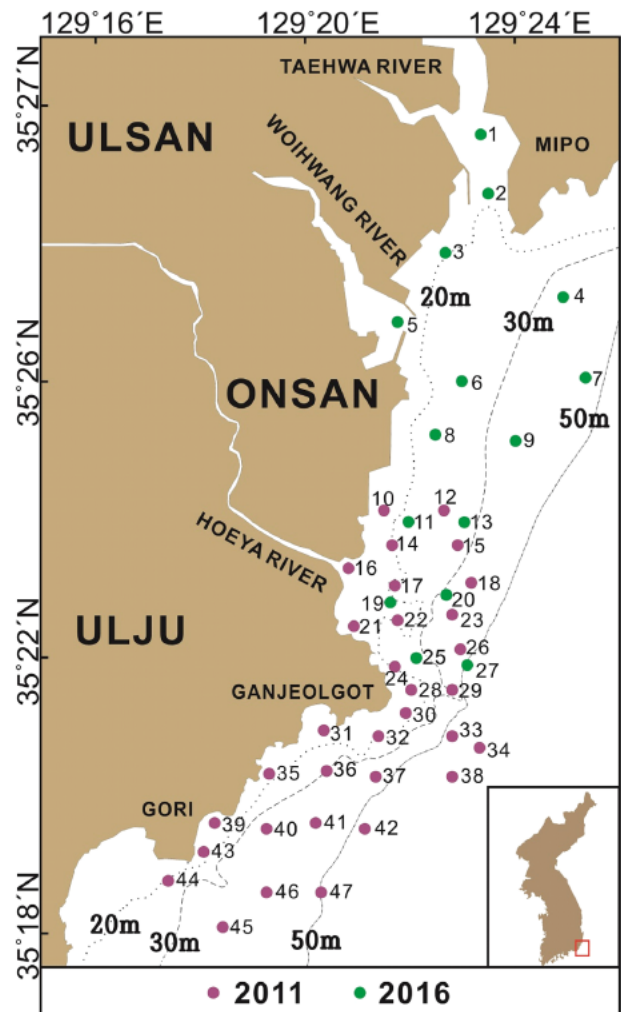


Fig. 1. A map showing the sampling stations and the bathymetry of the Ulsan coast, Korea.

회수소(15%)와 염산(10%)을 차례로 넣어 유기물과 탄산염을 완전히 제거하였다. 전처리 과정이 끝난 퇴적물 시료는 망목 크기가 40인 체를 이용한 습식체질(wet sieving)에 의해 조립질 시료와 세립질 시료로 분리하였다. 분리된 퇴적물 시료 중 조립질 시료는 110 °C에서 24시간 동안 건조시킨 후 표준체를 이용하여 건식체질(dry sieving)로 입도별 무게를 구하였고, 세립질 시료는 X-선 자동입도 분석기(Sedigrahp 5100)로 분석하여 입도의 백분율을 산출하였다. 분석 후 얻어진 자료는 Folk and Ward[1957]의 공식을 사용하여 계산하였다.

저서다모류를 채집하기 위하여 개량형 van Veen Grab채나기(채취면적:0.1 m²)를 사용하여 각 정점에서 2회씩 퇴적물을 채취하였다. 선상으로 인양된 퇴적물은 망목크기 1.0 mm인 체와 해수를 사용하여 퇴적물을 씻어내었다. 체에 걸린 잔존물은 10% 중성포르말린으로 고정된 후 실험실로 운반하여 잔존물 내의 모든 저서동물을 선별하였다. 선별된 저서동물은 실체현미경과 광학현미경하에서 동물군별로 구분하고, 저서다모류는 가능한한 종 수준까지 동정하였으며 이를 다시 계수하고(spp./0.2 m²), 면적당 출현개체수(ind./m²)로 환산하였다. 저서다모류 군집의 특성을 알아보기 위하여 종다양도지수(H')(Shannon and Weaver[1963]), 종풍부도지수(R)(Margalef[1958]), 종균등도지수(J)(Pielou[1966]), 우점도지수(D)(McNaughton[1968])를 정점별로 계산하였다.

종조성의 유사도에 기초하여 정점별로 구분하기 위하여 집괴분석(Cluster analysis; CA)을 실시하였다. 분석시 사용한 자료는 저서다모류 전 출현종을 대상으로 대수변환하였고, 정점간 유사도 지수는 Bray-Curtis similarity index(Bray and Curtis[1957])를 사용하였으며, 정점간의 결합은 Group average mode를 사용하였다. 또한 집괴분석 결과를 비교 검증하고, 분석의 정확성을 기하기 위하여 다차원척도법(non-metric Multidimensional Scaling; nMDS)을 실시하였다. 그리고 군집구분에 영향을 미치는 저서다모류 종류를 파악하기 위해 유사도 비율(SIMPER; similarity percentages)분석을 실시하였다. 생태지수를 포함한 자료분석은 PRIMER ver 5.0을 이용하였다.

저서생물 군집의 종조성을 활용하여 저서생태계의 건강도를 평가하기 위하여 BPI(Benthic Pollution Index)와 AMBI(Azti's Marine Biotic Index)를 사용하였다. 저서다모류의 생물학적 정보는 (KORDI [1995]; Choi and Seo[2007]; Seo[2016]) 및 AZTI 해양연구소에서 공식적으로 제공하는 software program(<http://www.azti.es>)을 이용하였다. 그리고 BPI에 대한 등급 평가 기준치는 Seo et al.(2014)의 기준을 적용하였다. 각 지수별 산출식과 분석 값에 따른 저서생태

계 등급 구분 기준은 Table 1과 같이 적용하였다.

2011년과 2016년 모두 계절별 조사를 실시하였으며, 조사 결과 계절에 따른 차이가 거의 나타나지 않아 자료를 시간적으로 분리하지 않고 하나의 data-set으로 합쳐서 표현하였다. 퇴적물 입도 분석 자료 및 저서다모류 군집의 서식밀도는 4계절 결과를 평균값으로 표현하였다. 그리고 종 수의 경우에는 각 계절당 2회(0.2 m²)씩 반복 채집한 결과를 합산하였기 때문에 총채집면적인 0.8 m²로 표시하였다.

3. 결 과

3.1 저서퇴적환경

울산 연안에서 측정한 표층 퇴적물의 입도분석 결과는 Fig. 2와 같다. 조사해역의 니질 함량은 평균 73.4%±27.1 이었고 평균입도(Φ)는 7.1±2.3Φ로 세립질 퇴적물이 우세한 환경이었다. 연안에 인접한 정점들은 니질 함량은 평균 53.1%, 평균입도는 6Φ 이하로 비교적 조립하게 나타났고, 특히 회야강 입구와 간절곶 주변은 니질 함량은 평균 26.3%, 평균입도는 3Φ 이하로 상대적으로 가장 조립하게 나타났다. 수심이 깊어질수록 니질 함량과 평균입도는 증가하였으며, 수심 30 m 이상에 위치한 정점들의 니질 함량은 평균 92.1%, 평균입도는 8Φ 이상으로 세립질 퇴적물이 매우 우세하게 나타났다. 간절곶 북쪽 정점들은 니질 함량은 평균 75.6%, 평균입도는 7Φ 이상으로 세립질 퇴적물이 우세하였다. 퇴적상을 살펴보면 연안에 인접한 정점들은 muddy sand, gravelly muddy sand, sandy mud, slightly gravelly sandy mud, gravelly mud 등 퇴적상이 다양하였다. 반면 수심 30 m 이상의 외해역 정점들은 니질 함량이 크게 증가하며 대부분 mud 퇴적상으로 나타났다. 간절곶 북쪽 정점들은 연안에 인접한 정점들도 니질 함량이 평균 78%로 gravelly sandy mud의 세립질성 퇴적상이 나타났다.

3.2 저서다모류 군집

3.2.1 출현종수 및 서식밀도

울산 연안에서 출현한 저서다모류 군집의 생태학적 특징은 Table 2, Fig. 3과 같다. 총 출현종수는 102종, 정점당 평균 출현종수는 35±15 spp./0.8 m²으로 나타났다. 그리고 평균 서식밀도는 717 ind./m²로 나타났다. 태화강 외해역에 위치하는 정점 4에서 11종이 출현하여 가장 적었고, 간절곶 남쪽 연안의 정점 31에서 67종으로 가장 많았다. 출현종수는 대체적으로 수심이 얇은 연안역에 위치한 정점에서 주로 높은 값을 보였고, 수심이 깊은 외해역에서 낮은 값을 보였다. 수심 30 m 이하의 정점들에서는 평균 43종이 출현하였고, 수심 30 m 이상의 정점들에서는 평균 26종이 출현하였다. 평균 서식밀도는 회야강 외해역에 위치하는 정점 20에서 39 ind./m²로 가장 낮았고, 고리 외해역의 정점 42에서 1,260 ind./m²로 가장 높았다. 서식밀도 역시 출현종수 분포와 유사하게 수심이 얇은 연안역에 위치한 정점에서 주로 높은 값을 보였다. 그런데 간절곶 남쪽에서는 외해역에 위치한 정점에서도 높은 서식밀도가 나타나기도 하였다.

Table 1. The classification criteria of each benthic biotic index

Ecological Quality Status	BPI	AMBI
High	>60	≤1.2
Good	41~60	1.3~3.3
Moderate	31~40	3.4~5.0
Poor	21~30	5.1~6.0
Bad	≤20	>6.0

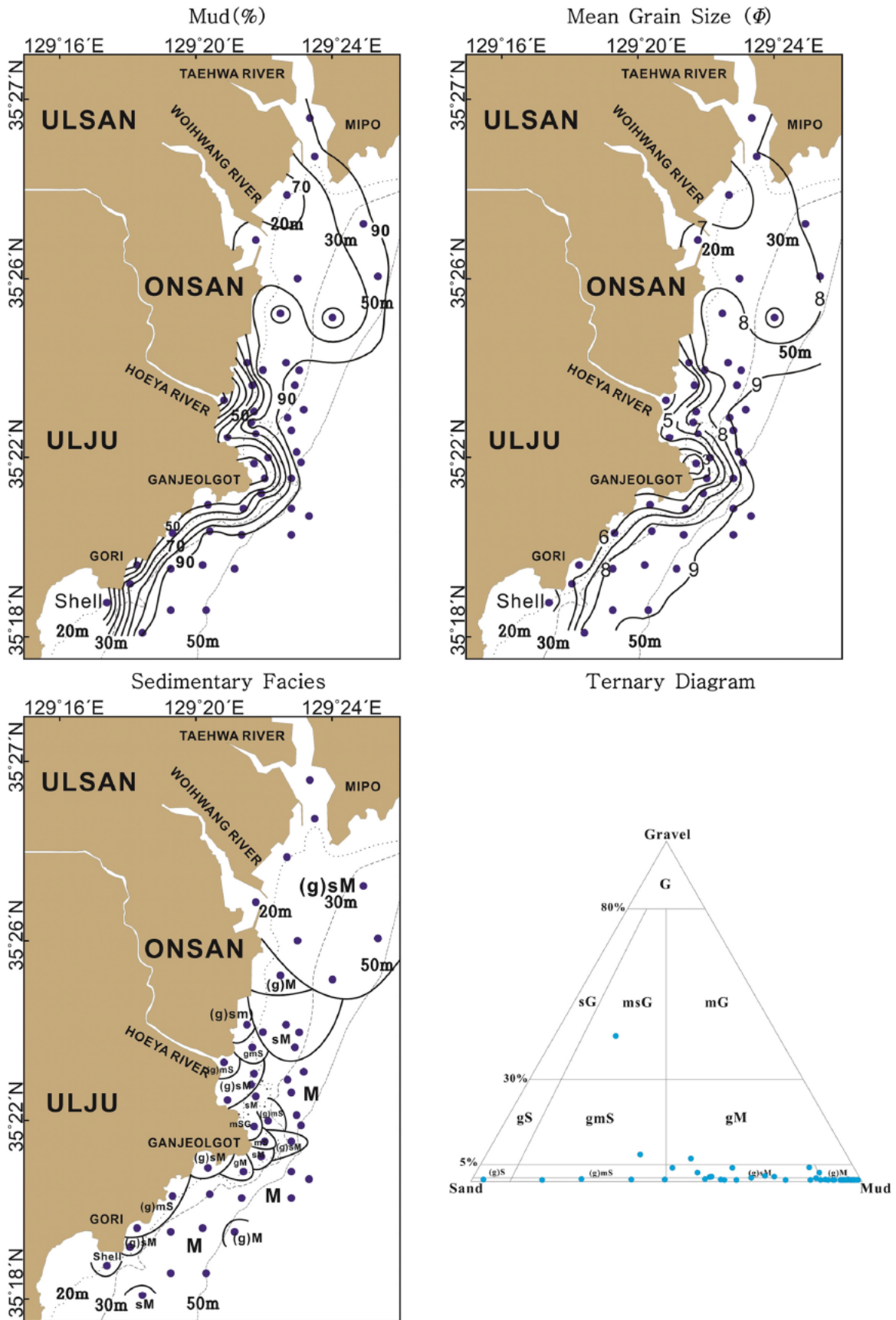


Fig. 2. Distribution of mud content (%), mean grain size (Φ) and surface sedimentary facies from a ternary diagram in the study area.

Table 2. Ecological Characteristics of benthic polychaetes in the study area

Ecological Parameters	
Total Species Number	102
Mean Species Number (spp./0.8 m ²)	35±15
Mean Density (ind./m ²)	717±389
Ecological Indices	
Diversity (H')	2.08±0.67
Richness (R)	5.48±2.02
Evenness (J)	0.59±0.15
Dominance (D)	0.59±0.18

종다양도지수(H')는 평균 2.08±0.67로 낮은 편이었고, 연안에 위치한 정점들에서 3.0 이상의 비교적 높은 값이 나타났다. 정점당 출현종수가 비교적 많은 편이기 때문에 종풍부도지수가 평균 5.48±2.02로 높은 값을 보였고, 우점도지수가 평균 0.6 정도의 수준으로 상당히 낮은 것이 특징적이다.

3.2.2 우점 저서다모류

울산 연안에서 출현한 저서다모류 중 개체수 기준 상위 5.0% 이상 점유율을 보이는 우점종은 *Magelona japonica*, *Lumbrineris longifolia*, *Heteromastus filiformis*, *Spiopahnes bombyx*의 4종이었다(Table 3). 각 우점종들의 분포 현황은 Fig. 4와 같으며, 각각의 우점종들은 종마다 특징적인 분포 형태를 보이며 나타났다.

조사해역의 제1 우점종은 *M. japonica*로 평균 서식밀도는 115 ind./m²(20.1%)로 나타났고 총 40개의 정점에서 출현하였다. 회야강과 간절곶 주변의 정점과 조사해역의 가장 외해역에 위치한 정점들을 제외한 거의 모든 정점들에서 출현하였지만 주로 수심 30m를 전후한 정점들에서 집중적으로 출현하였고, 상대적으로 간절곶 이북 해역에서는 좀 더 낮은 수심대에서도, 간절곶 이남 해역에서는 좀 더 깊은 수심대에서 출현하였다. 제2 우점종인 *L. longifolia*는 평균 서식밀도 103 ind./m²(18.0%)로 나타났고 총 45개 정점에서 출현하였다. 회야강 입구와 간절곶 인근에 위치한 정점을 제외하고 모든 정점들에서 출현하였지만, 주로 수심 30 m 이상의 외해역에

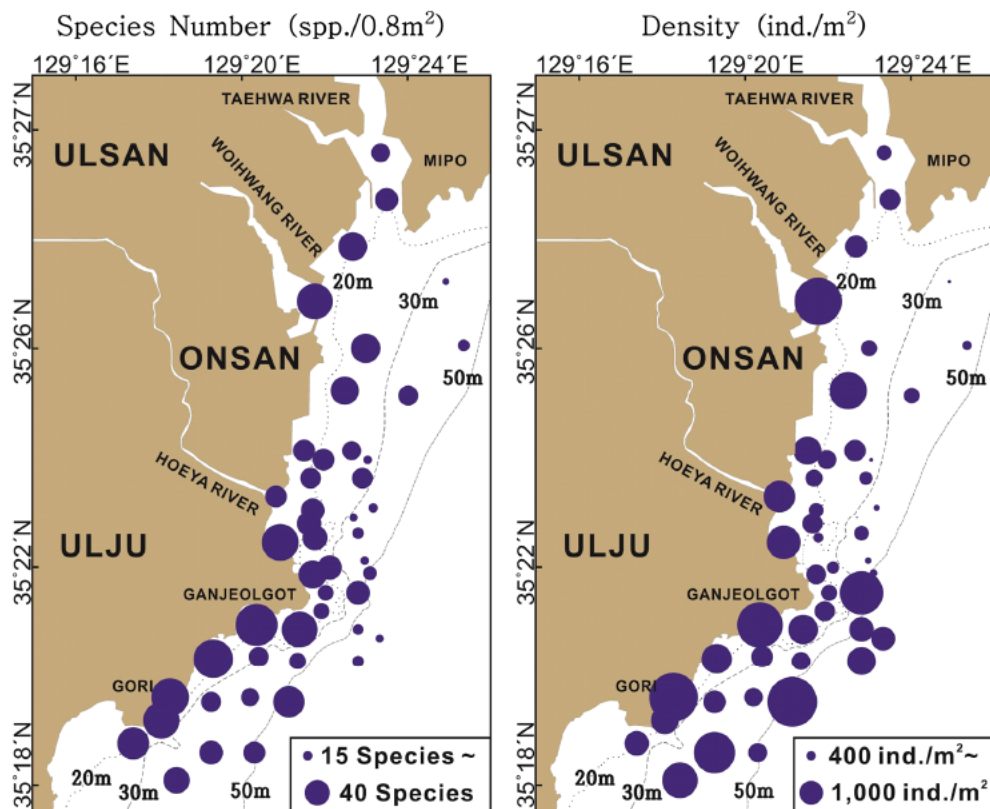


Fig. 3. The distribution of benthic polychaetous species number and density in the study area. The size of the circle is shown in proportion to a given criterion.

Table 3. Dominant polychaete species above 5.0% percentage among total individual number collected in study area

Dominant Species	Mean Density (ind./m ²)	Percentage (%)	Frequency
<i>Magelona japonica</i>	115±155	20.1%	40
<i>Lumbrineris longifolia</i>	103±176	18.0%	45
<i>Heteromastus filiformis</i>	46±53	8.1%	43
<i>Spiopahnes bombyx</i>	40±244	7.0%	9

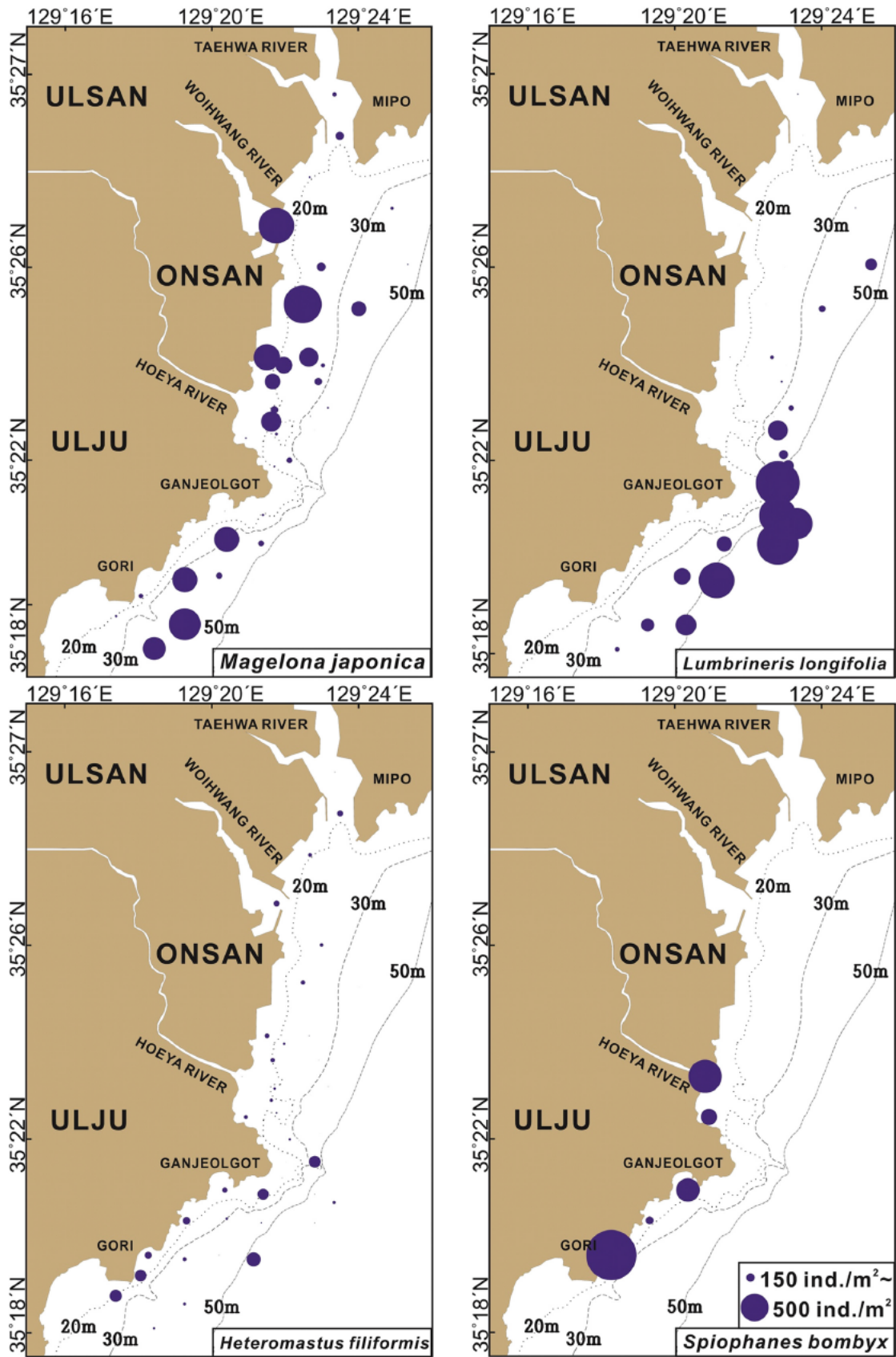


Fig. 4. Density (ind./m²) distribution of four dominant polychaetous species in the study area. The size of the circle is shown in proportion to a given criterion.

서 서식밀도가 높았고, 수심이 깊어질수록 서식밀도가 증가하였다. 제3 우점종은 *H. filiformis*로 평균 서식밀도 46 ind./m²(8.3%)로 나타났고 총 43개 정점에서 출현하였다. 간절곶 이북 외해역에 위치한 정점들에서 출현하지 않았다. 주로 연안에 인접한 수심이 낮은 정점들에서 서식밀도가 높았고, 간절곶 남쪽에서는 외해역에 위치한 일부 정점들에서도 높은 서식밀도로 출현하기도 하였다. 제4 우점종인 *S. bombyx*는 평균 서식밀도 40 ind./m²(7.0%)로 나타났으며 다른 우점종들과는 다르게 총 9개 정점에서만 출현하였다. 연안에 인접하고 사질 함량이 비교적 높은 5개 정점에서 높은 서식밀도로 출현하였고, 다른 정점에서는 거의 출현하지 않았다.

3.2.3 정점군 분포

울산 연안에서 채집된 저서다모류의 종조성과 정점간 유사도지수에 근거하여 집괴분석(CA)과 비계량적다차원척도법(nMDS)을 실시한 결과는 Fig. 5와 같다. 집괴분석 결과 조사해역은 연안역 정점군 A와 외해역 정점군 B로 크게 2개의 정점군으로 구분되었다. 그리고 연안역 정점군 A는 수심에 따라, 혹은 지리적 위치에 따라 정점군 AI, AII, AIII으로 세분되었다.

정점군 AI는 회야강 주변과 간절곶 주변의 정점들로 구성되었다. 그리고 정점군 AII는 간절곶 이남 해역 중 수심 10 m 이내의 얕은 천해역을 중심으로 위치하였다. 반면 정점군 AIII는 간절곶을 중심으로 남, 북 해역에서 수심에 따라 분포 형태가 약간 차이를 보였

다. 즉 간절곶 남쪽 해역에서는 수심 30 m~50 m 해역에 위치한 정점들로 구성되었고, 간절곶 이북 해역에서는 수심 30 m 이하에 위치한 정점들로 구성되었다. 그리고 마지막 정점군 B는 가장 외해역에 위치한 정점들로 구성되었다. 대체적으로 연안에서 외해역으로 가면서 수심에 따라 정점군이 배치되는 형태의 분포가 나타났다.

각 정점군의 구분에 영향을 미친 종을 파악하기 위해 SIMPER 분석을 실시한 결과(Table 4), 각 정점군별로 기여종이 확연히 달라지지는 않고, 각 주요 종들의 기여도, 우점 순위, 혹은 평균 개체수 등에서 차이를 보였다. 정점군 AI는 *Pisone* sp.가 13.9%로 기여도가 가장 높았고, *D. matushimaensis*와 *Exogone* sp.가 11.1%, 7.0%의 기여율을 보였다. 정점군 AII는 *H. filiformis*가 6.9%로 기여도가 가장 높았고, *A. arctica*와 *S. bombyx*가 각각 4.7%, 4.0%의 기여율을 보였다. 정점군 AIII는 *M. japonica*가 12.6%로 기여도가 가장 높았고, *H. filiformis*와 *Sigambra tentaculata*가 각각 8.6%, 6.1%의 기여율을 보였다. 정점군 B는 *L. longifolia*가 30.8%로 매우 높은 기여율을 보였고, *S. tentaculata*와 *M. japonica*가 13.5%, 8.3%의 기여율을 보였다. 즉 연안역의 정점군들에서는 *M. japonica*, *H. filiformis*가 외해역 정점군에서는 *L. longifolia*의 기여율에 의해 정점군이 구분되는 특징을 보이고 있다. 각 정점군을 대표하는 기여종 및 우점도 등에 따라서 정점군 AI는 *Pisone-Dorvillea* Assemblage, 정점군 AII는 *Heteromastus-Spiophanes* Assemblage, 정점군 AIII은 *Magelona-Heteromastus* Assemblage, 외해역의 정

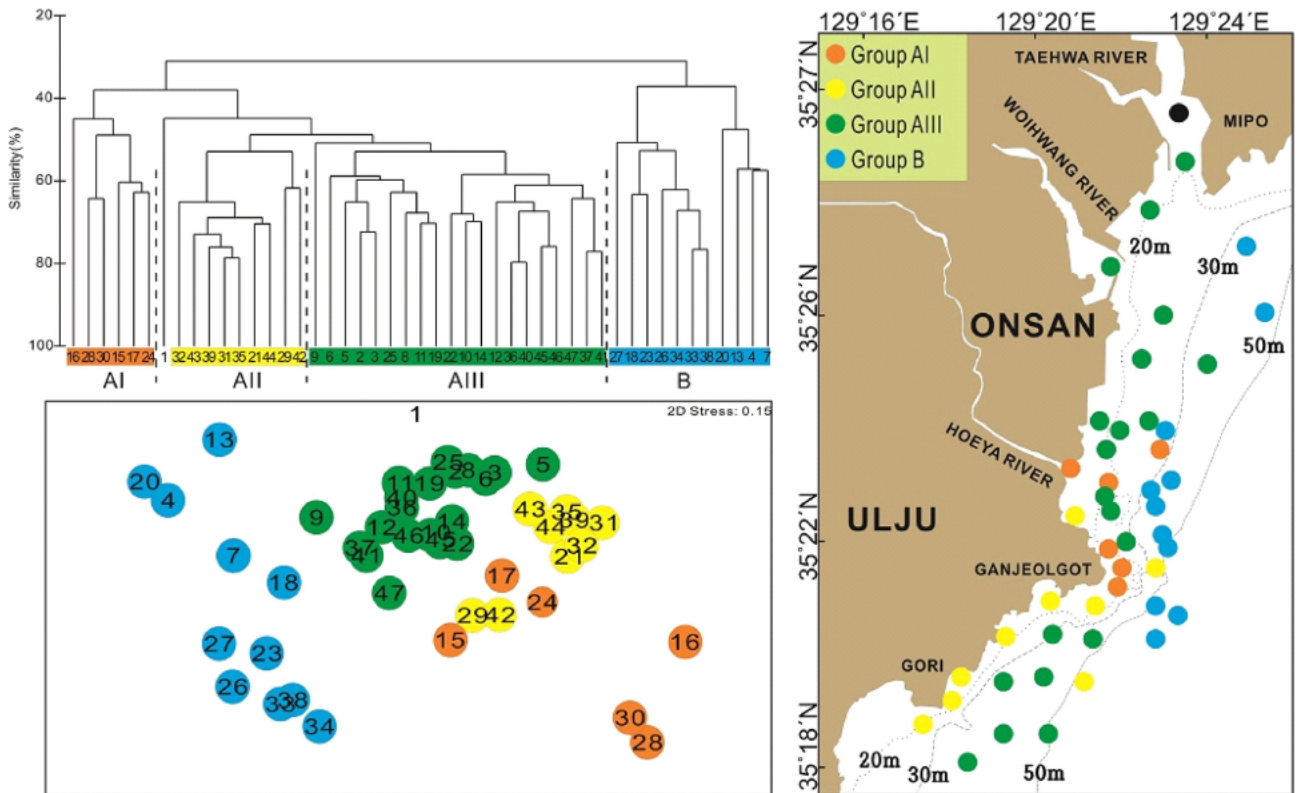


Fig. 5. Distribution of station groups which were divided by the cluster analysis (CA) and non-multidimensional scaling ordinations (nMDS) plot based on the species composition.

Table 4. The results of SIMPER analysis. Contribution of the representative species determining into each station group by the cluster analysis

	Species	Average abundance	Average similarity	Con. %	Cum. %
Group AI	<i>Pisone</i> sp.	4.4	7.1	13.9	13.9
	<i>Dorvillea matushimaensis</i>	3.6	5.7	11.1	25.1
	<i>Exogone</i> sp.	3.0	3.6	7.0	32.1
Group AII	<i>Heteromastus filiformis</i>	4.8	4.4	6.9	6.9
	<i>Ampharete arctica</i>	3.5	3.0	4.7	11.7
	<i>Sigambra tentaculata</i>	3.0	2.5	4.0	15.7
Group AIII	<i>Magelona japonica</i>	5.1	7.2	12.6	12.6
	<i>Heteromastus filiformis</i>	3.6	4.9	8.6	21.2
	<i>Sigambra tentaculata</i>	2.7	3.4	6.1	27.3
Group B	<i>Lumbrineris longifolia</i>	4.5	14.3	30.8	30.8
	<i>Sigambra tentaculata</i>	1.9	6.3	13.5	44.4
	<i>Magelona japonica</i>	1.8	3.8	8.3	52.7

Table 5. Comparison of the ecological characteristics between each station group determined by the cluster analysis

Station Group	AI	AII	AIII	B
Location		Coastal region		Offshore region
Assemblage Name	<i>Pisone-Dorvillea</i> Assemblage	<i>Heteromastus-Spiophanes</i> Assemblage	<i>Magelona-Heteromastus</i> Assemblage	<i>Lumbrineris</i> Assemblage
Station Number	6	9	20	11
Sedimentary Environment				
Mean Grain Size (Φ)	4.47±2.91	5.34±2.25	7.59±1.38	8.95±0.42
Mud Content (%)	43.97±33.34	51.95±24.59	78.90±18.12	95.53±4.51
Sand Content (%)	49.06±31.13	35.48±20.45	20.24±17.12	4.10±3.70
Ecological indices				
Diversity (H')	2.20±0.32	2.79±0.46	2.17±0.48	1.25±0.41
Richness (R)	5.32±1.12	8.23±0.77	5.86±1.14	2.80±0.49
Evenness (J)	0.63±0.07	0.69±0.11	0.60±0.11	0.46±0.17
Dominance (D)	0.55±0.09	0.43±0.14	0.58±0.15	0.78±0.11
Benthic Community				
Total Species No.	65	89	91	51
Mean Sp. No. (spp./0.8 m ²)	33	55	37	16
Mean density (ind./m ²)	612±195	1,178±292	739±303	378±293
Dominant Species (ind./m ² , %)	<i>Pisone</i> sp. (91, 18.6%)	<i>Spiophanes bombyx</i> (156, 16.6%)	<i>Magelona japonica</i> (239, 40.5%)	<i>Lumbrineris longifolia</i> (221, 73.0%)
	<i>Spiophanes bombyx</i> (80, 16.3%)	<i>Heteromastus filiformis</i> (134, 14.2%)	<i>Lumbrineris longifolia</i> (60, 10.1%)	<i>Magelona japonica</i> (15, 5.0%)
	<i>Dorvillea matushimaensis</i> (43, 8.8%)	<i>Lumbrineris longifolia</i> (131, 13.9%)	<i>Heteromastus filiformis</i> (42, 7.1)	<i>Ammotrypane aulogaster</i> (15, 5.0%)

점군 B는 *Lumbrineris* Assemblage로 명명할 수 있겠다.

각 정점군들의 생태학적 특징을 비교해보면 Table 5와 같다. 연안역에 위치한 정점군 A(AI, AII, AIII)에서 외해역에 위치한 정점군 B보다 총출현종수 및 정점당 평균출현종수와 평균서식밀도가 월등히 높게 나타났다. 간절곶과 회야강 주변에 위치한 정점군 AI의 총출현종수는 65종, 정점당 평균출현종수는 33종, 평균서식밀도는 612 ind./m²이었으며, 대표적인 출현종은 *Pisone* sp.와 *S. bombyx*이었다. 간절곶 남쪽 연안역에 위치한 정점들이 대부분인 정점군 AII는 총출현종수 89종, 정점당 평균출현종수 55종, 평균서식밀도 1,178 ind./m²으로 본 조사에서 출현종수와 서식밀도가 가장 높은 정점군이었다. 따라서 종다양성지수, 종풍부도지수가 가

장 높았고, 우점도지수는 가장 낮았다. 정점군 AII의 대표적인 출현종은 *S. bombyx*와 *H. filiformis*이었다. 수심 30m 정도에 위치한 정점들이 대부분이며 조사해역에서 가장 넓은 분포대를 차지하고 있는 정점군 AIII는 총출현종수 91종, 정점당 평균출현종수 37종, 평균서식밀도 739 ind./m²이었다. 정점수가 많이 포함된 만큼 총출현종수가 가장 많았다. 정점군 AIII의 대표적인 출현종은 *M. japonica*와 *L. Longifolia*이었다. 마지막으로 외해역에 위치한 정점들로 구성된 정점군 B는 총출현종수 51종, 정점당 평균출현종수 16종, 평균서식밀도 378 ind./m²로 가장 출현종수와 서식밀도가 낮은 정점군이었다. 외해역 정점군 B의 대표적인 출현종은 *L. longifolia*로 이종의 출현율이 73%에 달할 정도로 우점이 심한 출현종이었다.

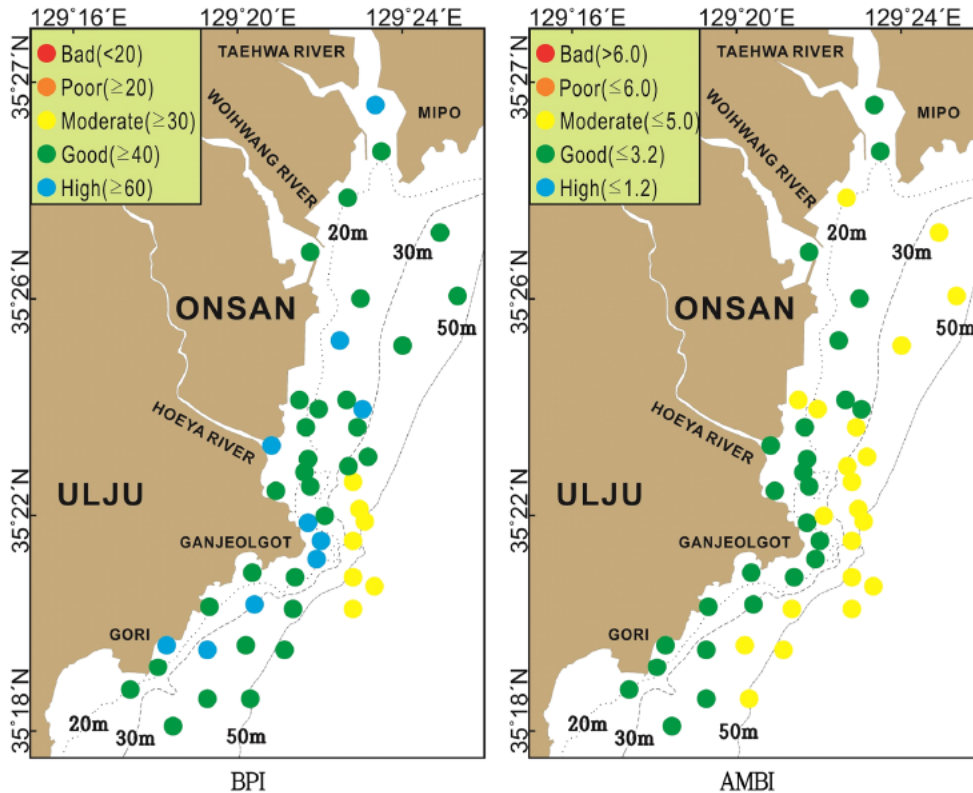


Fig. 6. Evaluation of benthic healthiness of the coast of Ulsan, estimated by Benthic Pollution Index (BPI) and Azti's Marine Biotic Index (AMBI).

3.3 저서생태계 건강도 평가

조사해역에서 출현한 저서다모류를 이용하여 먹이 식성을 기초로 산출하는 BPI(Benthic Pollution Index)와 유기오염도에 대한 민감대성 정도를 기초로 산출하는 AMBI(Azti's Marine Biotic Index)를 계산하여 저서생태계의 건강도를 평가한 결과는 Fig. 6과 같다. BPI는 33~82의 범위에 평균 52 ± 10 이었으며, 이로써 판정한 건강도는 평균 Good 등급이었다. 간절곶 외해역에 위치한 정점들에서 Moderate 등급을 보였고, 그 외의 정점들에서는 모두 Good과 High 등급을 보였다. AMBI는 2.04~4.46의 범위에 평균 3.32 ± 0.56 이었으며, 평균 Moderate 등급으로 나타났다. 주로 수심 30m 이내의 연안역에 위치한 정점들에서는 Good 등급을, 상대적으로 수심이 깊은 외해역에 위치한 정점들에서 Moderate 등급으로 나타났다. 두 건강도 평가 지수 모두 공통적으로 외해역보다 연안역에서 양호한 등급 상태를 보여주었다. 그리고 두 건강도 평가 지수 모두에서 Poor 등급과 Bad 등급이 나타나지 않아 저서다모류 군집으로 살펴본 울산 연안역의 저서환경은 상당히 양호한 해역으로 평가할 수 있다.

4. 고 찰

울산 연안의 저서다모류 군집을 분석한 결과, 수심이 얇은 연안에 인접한 정점들에서 높은 출현종수를 보였고, 수심이 깊은 외해역에 위치한 정점들에서는 낮게 나타났다(Fig. 3). 일반적으로 대형저서동물 군집은 단일 퇴적상보다는 다양한 이질성 퇴적상에서 다양한

종조성을 보인다(Nishijima *et al.*[2015]). 본 연구해역은 수심이 깊어질수록 니질 함량이 증가하여 주로 mud 퇴적상이 나타났고 수심이 얇은 연안에 인접한 곳에서는 비교적 니질 함량이 적었고, 다양한 퇴적상이 나타났다(Fig. 2). 이러한 결과는 일반적인 저서동물과 퇴적환경 간의 관계를 잘 보여주는 결과이다. 퇴적물의 입도 조성은 저서동물의 종조성과 서식밀도의 변화에 영향을 주는 것으로 잘 알려져 있다(Fager[1964]). 동해에서 수행된 이전 연구들을 보면 강릉 연안해역(Je *et al.*[2000])은 수심에 의해, 후포 주변해역(Paik *et al.*[2007])과 울산만(Yoon *et al.*[2009])에서는 수심, 평균입도와 유기물 함량에 의해 대형저서동물 군집과 환경요인 간 상관성이 높게 나타났다. 이러한 결과는 수심이 깊고, 평균입도가 증가할수록 출현종수가 감소한다는 것을 의미하는 것으로 본 연구에서도 수심이 깊고 평균입도가 높은 정점에서 출현종수가 적게 나타난 결과와 잘 일치하고 있다(Fig. 3).

본 연구지역의 우점종은 *M. japonica*, *L. longifolia*, *H. filiformis*와 *S. bombyx*로 나타났다(Table 3, Fig. 4). 이 중 *M. japonica*와 *L. longifolia*는 본 조사해역과 인접한 지역인 울산연안(Yi *et al.*[1982]; Shin *et al.*[2001]; Yoon *et al.*[2009]), 울진연안(Yu *et al.*[2011]; Kwon *et al.*[2017]), 후포(Paik *et al.*[2007]; Kwon *et al.*[2017]), 고리(Kim *et al.*[2011]; Kwon *et al.*[2017])에서도 우점종으로 나타났다. 본 조사에서 제1 우점종인 *M. japonica*는 간절곶 남쪽에서는 수심 약 30m의 해역에서 높은 밀도로 출현하였고, 간절곶 북쪽 지역에서는 회야강과 외항강 사이의 연안역 정점에서 집중적으로 출현하였다.

그런데 Paik *et al.*[2007]은 수심 조건이 충족되는 mud 퇴적상에서 뚜렷한 선호도를 보였다고 하였는데 이는 본 조사에서의 간절곶 남쪽에 위치한 정점들에서와 유사한 결과이고, Kim *et al.*[2011]은 sand 함량 20~50% 범위의 혼합질 퇴적물에서 우점한다고 하였는데, 이는 본 조사의 간절곶 북쪽에 위치한 정점들에서와 유사한 분포 패턴을 보여주는 결과이다. 따라서 *M. japonica*의 생태학적 특성과 분포에 관하여 지속적인 연구, 관찰이 필요하다고 하겠다. 제2 우점종인 *L. longifolia*는 국내에서 유기물 오염과 관련된 종으로 보고되고 있고, 생태학적으로 니질 함량이 높은 혼합된 퇴적물에서 주로 출현하는 등 서식처 환경요인과의 상관성에서 수심, 퇴적물의 유기물 및 니질 함량과 양의 상관관계를 보이는 것으로 알려져 있다(Jung *et al.*[2002]). 본 연구에서 *L. longifolia*는 수심 30 m 이상의 니질 함량이 높은 정점에서 우점하며 출현하였고, 특히 수심 50 m 이상의 정점에서 더욱 높은 서식밀도를 보였다 (Fig. 4). 제3 우점종인 *H. filiformis* 역시 유기물 오염이 진행된 해역 또는 교란된 저서환경의 지표종으로 알려져 있다(Weston[1990]; Tsutsumi *et al.*[1991]). *H. filiformis*는 울산 연안역에 대한 이전 연구들에서는 주요 우점종으로 나타나지 않았는데, 본 조사에서는 간절곶 남쪽의 정점들을 중심으로 거의 모든 정점에서 출현하였고, 주로 수심이 얇은 연안에 인접한 정점에서 서식밀도가 높았다. 마지막 우점종인 *S. bombyx*는 다른 우점종들과는 다르게 특정 조건 하에서 우점하는 경향을 보였다. *S. bombyx*는 동해안에서 일반적으로 우점하여 출현하는 종으로 사질 퇴적물에서 주로 출현한다(Yu *et al.*[2013]). 본 연구에서는 5개 정점에서만 집중적으로 출현하였고, 사질 함량이 높은 시기에 우점하며 출현하였다. 이처럼 조사해역에서 주요 우점종들은 각각의 종마다 특징적인 분포패턴을 가지며 그 분포패턴은 수심, 퇴적환경과 밀접한 연관이 있는 것으로 추정된다.

대형저서동물의 분포와 군집구조는 서식처의 기질 특성에 의해 종조성 및 생물량(개체수 및 생체량)이 달라지고(Weston[1988]), 수심 등을 포함한 다양한 물리적 환경요인이 종내 또는 종간의 생물학적 상호작용과 교합하여 지역 간 또는 계절 간에 차이를 보이며(Gray[1981]), 우리나라의 경우 동일한 퇴적상으로 구성되었다 하더라도 우점종 조성에 있어서는 차이가 있는 것으로 알려져 있다(Je *et al.*[2000]). 저서다모류의 군집분석을 실시한 결과, 주로 수심구배에 따라 정점군이 구분되었다(Fig. 6). 특히 회야강 남쪽에 위치한 정점들에서 그 특징이 잘 나타났다. 회야강과 간절곶 인근의 정점들과 대화강 인접의 정점 1을 제외하면, 연안에 인접한 정점들, 중간 수심(약 30 m)에 위치한 정점들, 그리고 외해역(수심 30 m 이상)에 위치한 정점들로 정점군이 구분되었다. 연안에 위치한 정점군은 상대적으로 출현종수가 많았고, 외해역에 위치한 정점군은 출현종수가 적었다. 울산해역은 수심에 따른 퇴적환경의 변화가 잘 나타나는 지역(Paik *et al.*[2007])으로 본 연구의 결과에서도 그 특징이 잘 나타났다(Fig. 2). 수심에 따른 퇴적환경의 차이는 저서다모류 군집의 출현종수, 서식밀도 그리고 우점종 분포에 큰 영향을 미치고(Seo *et al.*[2009]), 출현종수와 우점종 분포의 차이는 조사 결과에서도 잘 나타났다(Fig. 3, Fig. 4). 이 같은 특징은 동해의 저

서동물 군집 분포의 대표적 특징 중 하나이다(Paik *et al.*[2007]; Seo *et al.*[2009]; Kwon *et al.*[2017]). 본 해역에서 저서다모류 군집의 차이가 발생하는 요인은 수심과 퇴적물의 특성(니질함량, 평균입도)으로 추론할 수 있다.

BPI와 AMBI 지수를 사용하여 울산연안의 저서건강도를 평가하였다. 다모류는 현존량이나 종조성에 있어 저서동물 군집에서 매우 중요한 위치를 차지하는 것으로 잘 알려져 있다(Lee[1976]). 조사 지역인 울산연안 역시 대형저서동물 군집 중 다모류가 주요 우점 생물군으로 보고되고 있다. Yi *et al.*[1982]이 수행한 최초 울산연안역 연구와 이후의 대형저서동물 군집상에 대한 조사에서도 저서다모류는 전체 저서동물 군집에서 42.0%~64.3%를 차지하며 주요 동물군으로 나타났다(Shin *et al.*[2001]; Yoon *et al.*[2009]; Kim *et al.*[2011]; Yu *et al.*[2011]). 그렇기 때문에 저서다모류 자료만을 이용한 저서건강도 평가도 유의미한 의미를 가질 것으로 판단된다. BPI는 저서생물의 섭식유형에 따라 총 4개 그룹으로 분류한 후 각각의 그룹에 가중치를 달리 적용하여 건강도를 평가하는 지수이다(Seo[2016]). BPI 지수가 개발된 후 우리나라 여러 해역에서 적용하여 해역의 건강도를 평가하고 있다(KORDI[1995], Seo[2016]). 본 연구에서 조사해역의 BPI는 Moderate~High 등급으로 평가되어 울산연안 해역의 저서다모류 군집상으로 살펴본 저서생태계는 비교적 건강한 상태인 것으로 보인다. AMBI는 중의 유기물 오염에 대한 민감대성 정보를 이용하여 건강도를 평가하는 지수이다(Borja *et al.*[2003]). AMBI는 유럽 연안 해역에서 폭 넓게 이용되는 지수로써 환경교란의 요인이 달라도 잘 적용된다는 점에서 보편적으로 사용되고 있고(Borja *et al.*[2003]), 다양한 장소(인도양, 발트해, 지중해, 북해 및 중국의 발해만)와 다양한 교란인자(무산소와 빈산소, 부영양화, 영양염 부하, 유류오염, 준설 및 양식해역)를 대상으로 유효한 지수임이 검증되었다(Muxika *et al.*[2005]; Borja *et al.*[2009]). 본 연구에서 AMBI는 해역을 Good과 Moderate 등급으로 평가하여 비교적 건강한 저서생태계가 유지되고 있음을 알 수 있으며, 이는 BPI의 평가와 유사한 결과이다(Fig. 6).

울산연안은 해양환경관리법에 의해 특별관리해역으로 구분되어 지속적인 모니터링을 실시하고 있는 지역이다. 그러나 연안에서는 유기물 오염과 관련한 종들의 우점이 적었고, BPI와 AMBI 결과에서도 비교적 건강한 군집상태가 나타났다. 그러나 국내에서 대표적 기회주의종에 속하는 *L. longifolia*와 *H. filiformis*가 주요 우점종으로 출현한 결과로 보아 울산해역의 지속적인 모니터링과 관리가 필요하다.

후 기

이 논문은 2021년 해양수산부 재원으로 해양수산진흥원의 지원을 받아 수행된 과제입니다(ICT기반 수산자원관리연구센터). 그리고 두 분 심사위원께서 좋은 지적과 의견을 주셔서 논문을 잘 마무리 지을 수 있게 되었습니다. 감사드립니다.

References

- [1] Borja, A., Muxika, I. and Franco, J., 2003, The Application of a Marine Biotic Index to Different Impact Sources Affecting Soft-Bottom Benthic Communities Along European Coast, *Mar. Pol. Bull.*, 46, 835-845.
- [2] Borja A., Muxika, I. and Rodríguez, J.G., 2009, Paradigmatic Responses of Marine Benthic Communities to Different Anthropogenic Pressures, Using M-AMBI, within the European Water Framework Directive, *Mar. Ecol.*, 30, 214-227.
- [3] Bray, J.R. and Curtis, J.T., 1957, An Ordination of the Upland Forest Communities of Southern Wisconsin, *Ecol. Monogr.*, 27, 325-349.
- [4] Choi, J.W. and Koh, C.H., 1990, Distribution Pattern of Polychaete Worms on the Continental Shelf and Slope of the East Sea (southwestern Sea of Japan), *Korea, J. Oceanol. Soc. Korea*, 25(1), 36-48.
- [5] Choi, J.W. and Seo J.Y., 2007, Application of Biotic Indices to Assess the Health Condition of Benthic Community in Masan Bay, Korea, *Ocean Pol. Res.*, 29(4), 339-348.
- [6] Daan, N., 1973, A Quantitative Analysis of the Food of North Sea Cod, *Gadus morhua*, Netherlands. *J. Sea Res.*, 6, 479-517.
- [7] Fager, Z.W., 1964, Marine Sediments: Effects of a Tube-Building Polychaete, *Science*, 143, 356-359.
- [8] Folk, R.L. and Ward, W.C., 1957, Brazos River bar: A Study in the Significance of Grain Size Parameters, *J. Sed. Petrol.*, 27, 3-26.
- [9] Gray J., 1981, *The Ecology of Marine Sediments - an Introduction to the Structure and Function of Benthic Communities*, Cambridge University Press, New York, 185.
- [10] Je, J.G., Lee, J.H., Lim, H.S. and Choi, J.W., 2000, Distributional Pattern of Macrobenthic Invertebrates on the Shallow Subtidal Sandy Bottoms Near Kangrung, East Coast of Korea, *J. Korean Soc. Oceanogr. The Sea*, 5(4), 346-356.
- [11] Jung, R.H., Lim, H.S., Kim, S.S., Park, J.S., Jeon, K.A., Lee, Y.S., Lee, J.S., Kim, K.Y. and Go, W.J., 2002., A Study of the Macrozoobenthos at the Intensive Fish Farming Grounds in the Southern Coast of Korea, *J. Korean Soc. Oceanogr. The Sea*, 7(4), 235-246.
- [12] Kim, D.I., Seo, I.S., Moon, C.H., Choi, B.M., Jung, R.H. and Son, M.H., 2011, Community Structure of Macrobenthic Assemblages Around Gijang Province, East Sea of Korea, *J. Korean Soc. Oceanogr. The Sea*, 16(2), 97-105.
- [13] Korea Ocean Research & Development Institute (KORDI), 1995, *Marine Environment Assessment Based on The Benthic Faunal Communities*. KORDI, Ansan, Korea (in Korean).
- [14] Kwon, S.H., Lee, J.H. and Yu, O.H., 2017, Environmental Effects on the Benthic Polychaete Communities Around the Power Plant Areas in the East Sea of Korea, *J. Korean Soc. Oceanogr. The Sea*, 22(1), 18-30.
- [15] Lee, J.H., 1976, A Study on the Benthic Fauna along the Busan Coast, Korea, *Publ. Inst. Mar. Sci., Natl. Fish. Univ. Pusan*, 9, 49-70.
- [16] Lee, J.H., 1987, Distributional Pattern of Polychaetes in the Benthic Community of the Yellow Sea, *Korean. Fish. Soc.*, 20(3), 224-229.
- [17] Lim, H.S., Je, J.G., Choi, J.W. and Lee, J.H., 1991, Distribution Pattern of the Macrozoobenthos at Yoja Bay in Summer, *Ocean Res.*, 13(2), 31-46.
- [18] Margalef, R., 1958, Information Theory in Ecology, *Gen. Syst.*, 3, 157-175.
- [19] McNaughton, S.T., 1968, Structure and Function in California Grasslands, *Ecology*, 49(5), 962-972.
- [20] Muxika, I., Borja, A., and Bonne, W., 2005, The Suitability of the Marine Biotic Index (AMBI) to New Impact Sources along European Coasts, *Ecological Indicators*, 5(1), 19-31.
- [21] Nishijima, W., Umehara, A., Okuda, T. and Nakai, S., 2015, Variations in Macrobenthic Community Structures in Relation to Environmental Variables in the Seto Inland Sea, Japan, *Mar. Pollut. Bull.*, 92, 90-98.
- [22] Paik, S.G., Kang, R.S., Jeon, J.O., Lee, J.H. and Yun, S.G., 2007, Distribution Patterns of Sandy Bottom Macrobenthic Community on the Hupo Coastal Area, in the East Sea of Korea, *Ocean and Polar Res.*, 29, 123-134.
- [23] Pearson, T.H. and Rosenberg, R., 1978, Macrobenthic Succession in Relation to Organic Enrichment and Pollution of the Marine Environment, *J. Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 16, 229-311.
- [24] Pielou, E.C., 1966, The Measurement of Diversity in Different Types of Biological Collections, *J. Theoret. Biol.*, 13, 131-144.
- [25] Ra, K.T., Kim, E.S., Kim, K.T., Kim, J.K., Lee, J.M. and Choi, J.Y., 2013, Assessment of Heavy Metal Contamination and its Ecological Risk in the Surface Sediments along the Coast of Korea, *J. Coast Res.*, 65(sp1), 105-110.
- [26] Rosenberg, R. and Nilsson, H.C., 2005, Deterioration of Soft-Bottom Benthos along the Swedish Skagerrak Coast, *J. Sea Res.*, 54, 231-242.
- [27] Seo, I.S., Moon, H.T., Choi, B.M., Kim, H.M., Kim, D.I., Yun, J.S., Byun, J.Y., Choi, H.C. and Son, M.H., 2009, Community Structure of Macrobenthic Assemblages Around the Wolsong Nuclear Power Plant, East Sea of Korea, *Korean, J. Environ. Biol.*, 27(4), 341-352.
- [28] Seo, J.Y., 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.
- [29] Seo, J.Y., H.S. Lim and J.W. Choi. 2014, Distribution Patterns of Macrobenthic Fauna Communities in Deukryang Bay, One of the Environment Conservation Areas of Korea, *Ocean Sci. J.*, 49, 97-113.
- [30] Shannon. C.E. and Weaver, W., 1963, *The Mathematical Theory of Communication*, Univ. Illinois Press, Urbana, 177.
- [31] Shin, H.C., Yoon, S.M., and Koh, C.H., 2001, Spatial distribution of benthic macrofaunal community in Ulsan Bay and Onsan

- Bay, eastern coast of Korea, Korea, *J. Korean Soc. Oceanogr. The Sea*, 6(3), 180-189.
- [32] Smith, J. and Shackley, S.E., 2006, Effects of the Closure of a Major Sewage Outfall on Sublittoral, Soft Sediment Benthic Communities, *Mar. Pollut. Bull.*, 52(6), 645-658.
- [33] Thorson, G., 1957, Bottom Communities (Sublittoral or Shallow Shelf), In: (ed.) Hedgpeth, J.W. *Treat. Mar. Ecol. Paleoecol.*, Vol.1. Ecology. Geol. Soc. Am. Mem. 67, 461-534.
- [34] Tsutsumi, H., Kikuchi, T., Tanaka, M., Higashi, T., Imasaka, K. and Miyazaki, M., 1991, Benthic Faunal Succession in a Cove Organically Polluted by Fish Farming, *Mar. Pollut. Bull.*, 23, 233-238.
- [35] Weston, D.P., 1988, Macrobenthos-Sediment Relationships on the Continental Shelf Off Cape Hatteras, North Carolina, *Cont. Shelf Res.*, 3, 267-286.
- [36] Weston, D.P., 1990, Quantitative Examination of Macrobenthic Community Changes along an Organic Enrichment Gradient, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 61, 223-244.
- [37] Yi, S.K., J.S. Hong. and J.H. Lee., 1982, A study on the subtidal benthic community in Ulsan Bay, Korea, *Bull. KORDI*, 4, 17-26.
- [38] Yoon, S.P., Jung, R.H., Kim, Y.J., Kim, S.G., Choi, M.K., Lee, W.C., Oh, H.T. and Hong, S.J., 2009, Macrobenthic Community Structure along the Environmental Gradients of Ulsan Bay, Korea, *J. Korean Soc. Oceanogr. The Sea*, 14(2), 102-117.
- [39] Yu, O.H., Lee, H.G., Lee, J.H., Kim, K.T., Myung, C.S., Moon H.T. and Byun, J.Y., 2013, Spatial Variation in Macrobenthic Communities Affected by the Thermal Discharge Volumes of a Nuclear Power Plant on the East Coast of Korea, *Ocean and Polar Res.*, 35(4), 299-312.
- [40] Yu, O.H., Paik, S.G., Lee, H.G. and Lee, J.H., 2011, Spatio Temporal Distribution of Macrobenthic Communities in the Coastal Area of Uljin and its Relation to Environmental Variables, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 33(4), 421-434.

Received 7 October 2021

1st Revised 16 November 2021, 2nd Revised 7 February 2022

Accepted 15 February 2022