한국 동해 남부해역 대륙붕에 서식하는 대형저서동물군집 공간분포를 결정하는 환경요인

이정호¹ · 이정석² · 박영규³ · 강성길⁴ · 최태섭² · 김병모² · 류종성^{1,*}

¹안양대학교 해양바이오시스템공학과

²(주)네오엔비즈 환경안전연구소

³한국해양과학기술원 해양순환기후연구부

⁴한국해양과학기술원 선박해양플랜트연구소 해양CCS사업단

Environmentally Associated Spatial Distribution of a Macrozoobenthic Community in the Continental Shelf off the Southern Area of the East Sea, Korea

JUNG-HO LEE¹, JUNG-SUK LEE², YOUNG-GYU PARK³, SEONG-GIL KANG⁴, TAE SEOB CHOI²,
BYEONG-MO GIM² AND JONGSEONG RYU^{1,*}

¹Department of Marine Biotechnology, Anyang University, Ganghwa, Incheon 417-833, Korea

²Institute of Environmental Protection and Safety, NeoEnbiz Co., Bucheon, Gyeonggi 420-806, Korea

³Ocean Circulation and Climate Research Division, Korea Institute of Ocean Science and Technology,
Ansan, Gyeonggi 426-744, Korea

⁴Offshore CCS Research Unit, KRISO, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Daejeon 305-343, Korea

본 연구는 동해 남부 이산화탄소 해저지중저장 후보지 주변 수심 100-500 m 해역에서 저서생태계의 공간분포와 이를 결정하는 환경요인을 이해하기 위해 수행되었다. 2012년 8월-9월 총 16개 정점에서 대형저서동물군집과 환경요인을 조사하였다. 총 158종의 저서동물이 채집되었으며, 평균 서식밀도는 843 indiv/m², 평균 생물량(습중량)은 26.2 g WW/m²로 나타났으며, 생물다양성이 높은 지역에서 주로 서식밀도가 높았다. 측정된 33개 환경변수를 대상으로 주성분분석을 실시한 결과 조사해역의 저서환경은 크게 퇴적물환경, 저층해수환경, 수심에 의해 지배된다. 저서동물의 분포는 세 가지 주성분과 밀접한 관련을 보였는데, 특히 사질함량이 많은 정점일수록 출현종수가 많아지고 생물량은 적어지는 경향이 관찰되었다. 조개 2종을 포함한 우점종 6종은 Ω aragonite, Ω calcite 농도가 높은 곳을 선호하였는데, 이 종들은 이산화탄소 유입으로 인해 해양산성화가 진행되면 가장 먼저 피해를 입을 수 있는 생물로 판단된다. 저서동물 상위 1% 우점종의 종조성을 바탕으로 집괴분석한 결과 지리적으로 뚜렷하게 구분되는 4개의 정점군이 분류되었다. 각 정점군은 고유의 저층해수 및 퇴적물 환경을 보이고 있으며, 대표적인 특성종으로는 A) *Ampelisca miharaensis*, B) *Edwardsioides japonica*, C) *Maldane cristata*, D) *Spiophanes kroeyeri*를 들 수 있다. 측정이 용이한 5개의 환경요인(수심, 사질함량, 수온, 염분, pH)을 이용하여 4개의 정점군을 정확도 100%로 예측할 수 있는 판별함수모델을 제시하였다. 조사지역의 저서동물군집은 환경요인과 밀접한 관계를 보이고 있으며, 이는 환경변수에 기반하여 저서동물 분포를 예측할 수 있는 통계적모델 개발 가능성을 시사한다.

This study aims to understand environmental factors that determine spatial distribution of macrozoobenthic community in the southern area (ca 100-500 m depth) of East Sea, Korea, known as a candidate site for carbon storage under the seabed. From sixteen locations sampled in the summer of 2012, a total of 158 species were identified, showing density of 843 indiv/m² and biomass of 26.2 g WW/m², with increasing faunal density towards biologically higher diverse locations. Principal component analysis showed that a total of 33 environmental parameters were reduced to three principal components (PC), indicating sediment, bottom water, and

depth, respectively. As sand content was increasing, number of species increased but biomass decreased. Six dominant species including two bivalve species favored high concentrations of Ω aragonite and Ω calcite, indicating that the corresponding species can be severely damaged by ocean acidification or CO_2 effluent. Cluster analysis based on more than 1% density dominant species classified the entire study area into four faunal assemblage (location groups), which were delineated by characteristic species, including (A) *Ampelisca miharaensis*, (B) *Edwardsioides japonica*, (C) *Maldane cristata*, (D) *Spiophanes kroeyeri*, and clearly separated in terms of geography, bottom water and sediment environment. Overall, a discriminant function model was developed to predict four faunal assemblages from five simply-measured environmental variables (depth, sand content in sediment, temperature, salinity and pH in bottom water) with 100% accuracy, implying that benthic faunal assemblages are closed linked to certain combinations of abiotic factors.

Key words: Zoobenthos, Community composition, Multivariate analysis, Ecological model

서론

해양수산부는 지난 2012년 4월 한국 동해 남부해역 울릉분지 인근 해저 퇴적층에 50억 톤 규모의 이산화탄소 저장이 가능한 후보지를 발표한 바 있다. 해저퇴적층에 이산화탄소를 저장할 경우 향후 유출가능성에 대비하여 환경에 미치는 잠재적인 영향을 평가해야 한다. 만일 해저퇴적층에 저장된 이산화탄소가 유출될 경우 해수 내 pH 변화로 인해 해양에 서식하는 생물 대부분이 유의한 생리적인 피해를 입을 수 있다(Doney *et al.*, 2009; Waldbusser *et al.*, 2011). 또한 고농도 이산화탄소가 해수에 유입되면 해수내 탄산염 조성에 변화를 초래하여 석회질을 이용하는 생물들에게 심각한 영향을 미치게 된다(Dove and Sammut, 2007; Green *et al.*, 2009; Miller *et al.*, 2009).

대형저서동물은 퇴적물과 수층의 경계면에 서식하고 있기 때문에 퇴적물과 저층 해수 양쪽의 시스템의 특징을 잘 반영한다(Snelgrove and Butman, 1994). 또한 한곳에 오래 머무르고 동물플랑크톤이나 중형저서동물에 비해 생활사가 상대적으로 길기 때문에 주변 환경의 급작스런 변화와 만성적인 영향을 잘 구분할 수 있게 해준다(Reiss and Kröncke, 2005). 따라서 대형저서동물로 구성되는 연성저질의 동물군집은 해양환경의 누적영향을 잘 반영하기 때문에 해양의 건강성을 잘 나타내는 지시자로 이용될 수 있다(Rakocinski *et al.*, 1997; Blanchet *et al.*, 2008).

조하대 연성저질환경에서 저서동물군집 분포를 결정하는 일차적인 환경요인으로는 퇴적물환경을 들 수 있다. 특히 퇴적물 입도는 유속, 유기물함량, 중금속, 유기화합물 등 다양한 환경요인들과 관련되어 있어 중요한 환경인자이다(Gray, 1974; Buchanan, 1984; Snelgrove and Butman, 1994). 그러나 넓은 공간적 규모에서는 퇴적물 뿐만 아니라 저층해수와 수심이 저서동물의 분포를 결정하는 중요한 요인으로 작용할 수 있다(Choi and Koh, 1988). 환경을 잘 반영하는 대형저서동물군집의 특성을 잘 이용하면 조간대와 조하대를 포함하는 다양한 환경에서 저서동물군집 분포의 변화를 예측할 수 있는 효과적인 통계학적 모델을 개발할 수 있다(Ysebaert *et al.*, 2002; Thrush *et al.*, 2003; Ellis *et al.*, 2006; Meissner *et al.*, 2008; Gogina *et al.*, 2010; Ryu *et al.*, 2011b). 따라서 본 조사지역에서 저서동물군집 모니터링을 통해 저서환경과 저서동물군집의 관계를 명확히 이해하면 향후 발생할 수 있는 이산화탄소 유출에 의한 저서생태계의 피해정도를 예측할 수 있게 된다.

우리나라 동해의 저서대형동물 군집에 대한 연구는 주로 연안

역과 도시주변에 집중되어 있으며(Paik *et al.*, 2007; Shin *et al.*, 2001), 동해 대륙붕 및 대륙사면에 걸치는 해역에 대한 연구는 1980년대에 수행된 Choi and Koh (1986, 1988, 1989, 1990), 독도 근해 심해역에 대한 연구(Choi *et al.*, 2002) 있으나 저서동물 군집 분포에 치우쳐 있으며 환경요인과의 관계가 충분히 토의되지 못하였다. 과거 연구에 대해 본 연구가 갖는 차별성은 동해 남부해역 대륙붕 및 대륙사면에 걸치는 지역에 대해 33항목의 환경요인을 조사하여 저서동물군집을 결정하는 환경요인을 밝히고자 함에 있다.

본 연구의 목적은 첫째 저서생태계를 지배하는 주요 환경요인을 도출하고, 둘째 환경에 민감하게 반응하는 저서동물 우점종의 분포를 파악하며, 셋째 pH를 포함한 환경요인을 이용해 저서동물군을 예측하는 모델을 개발하는 것이다. 이를 위해 다변량분석기법(주성분분석, 집괴분석, 판별분석)을 충분히 활용하였다. 특히 해수산성화 정도에 민감한 저서동물 우점종을 파악하여 향후 발생할지 모르는 이산화탄소 유출에 의한 해양저서생태계 피해를 이해하고자 하였다.

재료 및 방법

채집 및 실험

포항에서 부산에 이르는 동남해역 대륙붕의 대형저서동물군집을 파악하기 위해 저서생태계의 생태학적 과정이 극대화되는 여름철에 조사를 실시하였다(Lim *et al.*, 2012). 2012년 8월 31일부터 9월 7일에 걸쳐 수심 100-500 m 범위의 총 16개 정점을 조사하였다(Fig. 1). 각 정점에서는 저서동물을 채집하였고, 저서생태계 환경을 파악하기 위해 저층해수와 퇴적물과 관련된 총 33개 항목의 환경요인이 측정되었다.

퇴적물 시료채집은 0.1 m² 채집면적의 Smith-McIntyre grab을 사용하여 정점당 2회씩 채집하였다. 선상으로 인양된 퇴적물을 망목크기 1.0 mm 체를 사용하여 거른 후 체에 남은 시료를 10% 중성 포르말린으로 고정한 후 실험실로 운반하여 담수로 포르말린을 세척한 후 핀셋을 이용하여 저서동물을 골라내었다. 해부현미경과 광학현미경을 이용하여 저서동물을 종수준까지 동정하였다. 각 종별로 개체수를 기록한 후 0.01 g 까지 측정할 수 있는 저울을 사용하여 습중량을 측정하였다. 서식밀도와 습중량은 단위면적 당(1 m²) 수치로 나타내었다.

저층해수 환경을 파악하기 위해 CTD를 이용해 수온, 염분, 알

Fig. 1. Map showing the sampling area and locations in the southern area of the East Sea, Korea. The line shows the water depth with intervals as noted.

칼리도, pH를 측정하였고, CTD와 함께 장착된 로젯샘플러(Rosette sampler)를 이용해 가능한 한 해저면에 근접한 수심에서 저층해수를 채집하였다. 채집된 해수는 선상에서 전처리를 한 후 실험실로 옮겨서 질산염(nitrate), 인산염(phosphate), 규산염(silicate), Ω aragonite, Ω calcite 농도를 측정하였다. 퇴적물 시료는 저서동물 채집을 위해 채취한 grab내 표층퇴적물을 이용하여 퇴적물 일반항목 8종(평균 입도, 분급도, 왜도, 첨도, 모래함량, 실트함량, 클레이함량, 유기탄소함량), 중금속 14종(Al, Fe, Mn, Li, Cs, As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, V, Zn, Hg), 그리고 다환방향족탄화수소(PAH)를 측정하였다. 저층 해수 및 퇴적물 환경요인 측정실험은 해양환경공정시험법에 의거하여 실시하였다.

자료분석

조사지역의 환경을 지배하는 요인을 파악하기 위해 측정된 총 33개 환경항목에 대해 주성분분석(PCA)을 실시하였다. 주성분분석을 하기에 앞서 자료의 정규분포를 위해 0-100% 범위를 보이는 모래, 실트, 클레이함량은 $\arcsin(\sqrt{x})$ 변환, 나머지 30개 항목은 $\log(x+1)$ 변환을 실시하였다(Zar, 1984). 주성분은 고유값 1이상이면 추출하였다.

조사지역을 지배하는 환경을 분석한 후에는 우점종의 분포와 관련있는 환경을 파악하기 위해 33개 환경요인과 20개 우점종을 대상으로 주성분분석을 실시하여 주성분공간에 배열하였다. 우점종 20종은 아래에 기술된 집괴분석에 의해 분류된 4개 정점군에 대해 각 정점군마다 특징종 5개를 선택하였다. 환경자료 변환은 위

의 환경항목 주성분분석과 동일하며 우점종 개체수 자료는 m^2 당 출현서식밀도를 $\sqrt{\sqrt{\quad}}$ 변환한 값을 입력하였다.

저서군집구조가 유사한 조사정점을 분류하기 위해 전체 개체수의 1% 이상 출현한 우점종을 이용하여 집괴분석을 실시하였다. 개체수 자료를 m^2 당 서식밀도 환산한 값을 다시 $\sqrt{\sqrt{\quad}}$ 변환한 뒤 Bray-Curtis 유사도지수를 이용하여 정점간 유사도행렬을 구하였다. $\sqrt{\sqrt{\quad}}$ 변환은 log 변환에 비해 단위에 관계없이 적용되는 장점이 있다(Field *et al.*, 1982). 정점 분류를 위한 수지도(dendrogram)은 그룹평균결합법(group average linking)을 이용하여 도시하였다. 또한 동일한 유사도행렬을 이용하여 다차원척도법(Multidimensional scaling, MDS)을 실시하여 정점을 2차원 공간에 배열하였다. 분류된 정점군을 대표하는 특징종(characteristic species)을 선택하기 위해 정점군 내의 전체 개체수에 대한 각 종의 개체수가 차지하는 비율(Dominance, DOM), 정점군 내의 모든 정점수에 대해 각 종이 출현하는 정점수(Constancy, CON), 각 종이 전체 지역에서 출현한 개체수에 대해 정점군 내 출현한 개체수의 비율(Degree of association regarding individuals, DAI), 각 종이 전체 지역에서 출현한 정점수에 대한 정점군 내에서 출현한 정점수의 비율(Degree of association regarding stations, DAS)을 계산하였다(Salzwedel *et al.*, 1985). 이 4가지 지수값 중에서 $DOM > 0.05$, $CON > 0.5$, $DAI > 0.6$, $DAS > 0.6$ 인 기준을 적용하여 3가지 이상의 기준을 만족하는 경우를 특징종으로 선정하였다.

집괴분석과 MDS로 분류된 정점군을 환경요인만을 가지고 구별해낼 수 있는지를 알아보기 위해 판별분석을 실시하였다. 판별

분석에 이용한 환경요인은 주성분분석에서 추출된 주성분을 가장 잘 설명하면서 측정이 용이한 것을 선정한 것으로 5가지 요인, 즉 수심, 모래함량, 수온, 염분, pH이며 모래함량은 $\arcsin(\sqrt{x})$ 변환, 나머지 4개 요인은 $\log(x+1)$ 변환을 하였다(Zar, 1984). 판별분석 후 5개 환경요인으로 정점군을 예측할 수 있는 정확도를 제시하였다. 판별분석은 그동안 저서군집 연구에는 많이 활용되지 않았으나 (Weston, 1988), 최근들어 적용사례가 증가하고 있다(Paul *et al.*, 2001; Muxika *et al.*, 2007; Ryu *et al.*, 2011c). 판별분석의 개념, 목적, 응용에 관한 사항은 Muxika *et al.* (2007)에 자세히 제시되어 있다.

집괴분석과 MDS는 PRIMER를 사용하여 분석하였고(Clarke and Gorley, 2006), 주성분분석과 판별분석에는 SPSS 12.0을 이용하였다.

결과 및 고찰

조사지역 환경

동남해역 대륙붕 저층해수 및 퇴적물의 33개 환경변수를 지배하는 주요 요인을 추출하기 위해 주성분분석을 수행하여 고유치 1 이상의 주성분 4개를 추출하였다. 추출된 주성분 4개의 성격은 각각 퇴적물 환경성분, 수질성분, 수심성분, 그리고 알칼리도로 규정할 수 있다. 33개 환경요인들이 주성분과 갖는 관련성을 비교하기 위해 주성분 1과 2, 그리고 주성분 1과 3의 공간에 환경요인들을 각각 배열했다(Fig. 2).

퇴적물 환경으로 대변되는 주성분 1은 퇴적물 일반항목 4종(평균입도, 모래, 실트, 클레이함량)과 중금속 12종(Cu, Cs, Ni, Zn, Li, V, Hg, Fe, Pb, Cr, Cd, Al), PAH, 유기탄소함량 등 총 21개 항목과 상관관계수 0.9 이상의 높은 상관관계를 보였다. 또한 As ($r=0.898$), 웨도($r=-0.833$), Mn ($r=0.777$)과도 높은 상관관계를 보였다. 수질 환경을 나타내는 주성분 2는 Ω aragonite와 Ω calcite 농도, 질산염, pH와 상관관계수 0.9 이상의 높은 관련성을 보였으며, 규산염($r=-0.874$), 수온($r=0.778$), 염분($r=0.753$)과도 높은 상관성을 보였다. 영양염(질산염, 인산염, 규산염)은 모두 주성분 2와 강한 음의 상관관계를 보였다. 수심을 나타내는 주성분 3은 수심($r=-0.775$), 분급도($r=-0.969$), 침도($r=0.650$)와 상관관계가 좋으며, 주성분 4는 알칼리도($r=0.640$)와 관련이 깊은 것으로 나타났다. 조사해역의 범위가 남북 100 km, 동서 80 km에 달하며 정점 간 간격도 10 km 이상임을 감안하면 이 정도 공간규모에서 저서환경을 결정하는 환경요인은 퇴적물, 저층해수, 수심으로 나눌 수 있다.

중금속 농도는 정점 1, 8, 14, 15, 16에서 Cs으로 입도보정한 Zn 농도가 해양환경관리법에 따른 해양환경기준의 해저퇴적물 주의기준을($Zn=68.4$ ppm)을 초과하는 것으로 나타나 Zn으로 인한 부정적인 생태영향이 발현될 가능성이 있는 것으로 나타났다. 이 정점들은 모두 니질환경으로 평균입도가 6.9-7.9의 범위를 보이며, 니질함량은 모두 95% 이상이었다. 특히 정점 14는 조사 정점들 중에 가장 깊은 수심 500 m가 넘는 대륙사면에 위치하고 있으며, 이 정점에서 Zn 농도가 높은 원인에 대해 추후 연구할 필요가 있다.

종수, 서식밀도, 생물량 분포

조사지역 16개 정점에 출현한 저서동물은 총 158종이었다. 환

Fig. 2. Ordination of 33 environmental variables in two-factor PCA space with principal component (PC) 1 and 2 (a), and PC 1 and 3 (b). Term abbreviations: Sal.-Salinity, Temp.-Water temperature, TA-Total alkalinity, Mz-Mean size, So-Sorting, Sk-Skewness, Ku-Kurtosis, TOC-Total organic carbon.

형동물이 76종으로 전체 출현종의 48%를 차지하여 가장 우점 하였으며, 절지동물 43종, 연체동물 24종, 극피동물 8종이 출현하였고, 자포동물, 유형동물, 성구동물 등 기타 분류군 7종이 관찰되었다. 조사지역 전체 평균 서식밀도는 843 indiv./m²이며 분류군별 서식밀도는 출현종수와 마찬가지로 환형동물(372 indiv./m²), 절지동물(241 indiv./m²), 연체동물(164 indiv./m²), 극피동물(39 indiv./m²)의 순서로 높았으며, 기타 분류군은 26 indiv./m²의 서식밀도를 보였다. 평균 생물량(습중량)은 26.2 gWW/m²이며, 생물량이 가장 많은 분류군은 극피동물(10.8 gWW/m²)로 전체의 41%를 차지하였으며, 그 다음으로 기타 분류군(6.8 gWW/m²), 환형동물(6.0 gWW/m²), 연체동물(1.7 gWW/m²), 절지동물(1.0 gWW/m²)의 순서로 높은 값을 보였다. 따라서 분류군들의 우점순서가 생물량은 출현종수, 서식밀도와는 다르게 나타났다.

출현종수, 서식밀도, 생물량의 공간분포를 정점지도 위에 표시 하였다(Fig. 3). 출현종수는 정점 7에서 가장 많은 40종이 출현하였으며, 35종 이상 출현한 정점은 5곳(정점 3, 6, 9, 10, 12)이었다. 1번 정점을 제외하면 연안에 근접한 지역에서는 대체로 30종 미

Fig. 3. Distribution of the number of species, density and biomass of macrobenthos in the study area.

만의 낮은 생물다양성을 보였다(정점 8, 15, 16). 수심이 가장 깊은 정점 14에서는 가장 적은 출현종수가 기록되었고(11종), 절지동물이 전혀 출현하지 않았다.

생물다양성이 가장 높은 정점 7에서 가장 높은 서식밀도인 2325 indiv./m²가 기록되었다. 이 중 절지동물이 1480 indiv./m²로 전체 서식밀도의 64%를 차지하였는데 이는 안경옆새우류인 *Ampelisca miharaensis*와 바다반딧불이 *Varugra hilgendorffii*가 각각 655 indiv./m², 475 indiv./m²의 높은 서식밀도를 보였기 때문이다. 서식밀도가 1000 indiv./m² 이상 출현한 지역은 정점 10(1400 indiv./m²), 정점 9(1295 indiv./m²), 정점 6(1115 indiv./m²)이었으며 이 정점들의 출현종수는 모두 35종 이상이였다. 가장 낮은 서식밀도 145 indiv./m²를 기록한 정점 14에서는 가장 낮은 생물다양성을 보였다.

생물량이 높은 정점의 분포를 보면 정점 15에서 가장 높은 73 gWW/m²를 기록했는데, 자포동물 벌레붙이말미잘 *Edwardsioides japonica*이 전체 생물량의 65%를 차지했다. 생물량이 40 gWW/m² 이상으로 상대적으로 높은 정점 9(66.8 gWW/m²)와 정점 13(41.4 gWW/m²)에서는 극피동물인 은족해삼 *Molpadia oolitica*의 생물량비율이 각각 67%, 63%를 차지했고, 정점 8(54.0 gWW/m²)에서는 *E. japonica*의 비율이 75%에 달했다. 그 밖의 정점에서는 30 gWW/m² 미만의 낮은 생물량을 보였으며, 정점 5에서는 2.6 gWW/m²의 가장 낮은 생물량을 나타냈다.

동남해역 대륙붕의 저서동물 분포는 대체로 생물다양성이 높은 지역에서 서식밀도가 높은 것으로 나타났는데, 이는 특정한 기회종이 우점하는 경우가 적기 때문이다. 일반적으로 물리적 또는 화학적으로 퇴적환경이 교란된 지역에서는 특정 기회종이 우점하게 되어 출현종수가 적고, 서식밀도가 높은 것이 특징인 것으로 알려져 있다(유기물오염 일반모델: Pearson and Rosenberg, 1978; 항구오염, Warwick *et al.*, 1990, Ryu *et al.*, 2011a; 부영양화, Weston, 1990, Simboursa *et al.*, 1995; 광산폐수, Somerfield *et al.*, 1994; 산업폐수: Ahn *et al.*, 1995). 또한 Choi and Koh(1990)가 동해 대륙붕 및 대륙사면에서 보고한 다모류 출현종수 112종과 평균서식밀도 300 indiv./m²와 비교하면 본 연구의 다모류 출현종수 76종, 평균서식밀도 372 indiv./m²는 비슷한 값을 보인다.

우점종 분포와 환경요인의 관계

우점종 분포와 관련있는 환경요인을 파악하기 위해 환경요인 33종과 우점종 20종을 대상으로 주성분분석을 실시하여 그 결과를 주성분 1과 2의 2차원 공간에 도시하였다(Fig. 4). 고유치가 1 이상인 주성분이 총 7개 추출되었고, 이 중에서 우점종 분포와 관련하여 유의미한 해석이 가능한 주성분은 4개였다. 주성분 1은 퇴적물 일반항목, 중금속, PAH 농도와 상관관계수 0.9 이상의 매우 밀접한 상관관계를 보이고 있어 퇴적물 환경을 의미한다고 해석할

Fig. 4. Ordination of 33 environmental variables and 20 dominant species in two-factor PCA space with PC 1 and 2. Term abbreviations: Sal.-Salinity, Temp.-Water temperature, TA-Total alkalinity, Mz-Mean size, So-Sorting, Sk-Skewness, Ku-Kurtosis, TOC-Total organic carbon, SN-Species number.

수 있다. 퇴적물 환경(주성분 1)은 생물량($r=0.53$)과 출현종수($r=0.51$)와도 높은 상관관계를 보이고 있어, 사질함량이 많을수록 출현종수가 많아지고, 생물량은 적어지는 경향을 나타내고 있다. 산발유령갯지렁이 *Polycirrus nervosus* ($r=-0.79$), 달갈얼굴갯지렁이류 *Spio martinensis* ($r=-0.63$)의 서식밀도는 퇴적물 환경과 매우 강한 음의 상관관계를 보이는데, 이 두 종들은 사질함량 80% 이상 되는 정점 5, 6, 10, 11에서 높은 밀도로 출현하는 양상을 보여주었다. 그 밖에 퇴적물 환경(평균입도)과 강한 상관관계($r>0.5$)를 보이는 우점종은 예쁜얼굴갯지렁이류 *Prionospio depauperata* (+), 빨가시거미불가사리 *Amphipus ancistrotus* (+), 바다반딧불이 *Vargula hilgendorfi* (-), 안경옆새우류 *Ampelisca miyabaraensis* (-)였다. 퇴적물환경과 양의 상관관계를 보이는 우점종은 니질환경을 선호하고, 음의 상관관계를 보이는 우점종은 사질환경을 선호한다.

주성분 2는 수온($r=0.83$), 염분($r=0.88$), pH ($r=0.83$), 질산염($r=-0.91$), 인산염($r=-0.87$), 규산염($r=-0.76$), Ω aragonite ($r=0.95$), Ω calcite ($r=0.94$) 등과 모두 0.8 이상의 높은 상관계수를 보이고 있는 것으로 보아 저층해수 환경을 의미한다고 볼 수 있다. 저층해수

환경(주성분 2)은 띠대나무갯지렁이 *Clymenella koellikeri* ($r=0.76$), 얼굴갯지렁이류 *Spiophanes kroeyeri* ($r=0.76$), 작은비단조개 *Petrasma pusilla* ($r=0.76$), 흰바탕무늬조개 *Oblimopa japonica* ($r=0.76$), 수슬대나무갯지렁이 *Asychis gotoi* ($r=0.76$), 민숭대나무갯지렁이 *Maldane cristata* ($r=0.63$)의 서식밀도와 매우 강한 양의 상관관계를 보여주었다. 따라서 이들 우점종 6종은 수온, 염분, pH, Ω aragonite, Ω calcite가 높고 영양염이 낮은 환경을 선호한다. 특히 이 우점종들에는 이매패류 2종이 포함되어 있으며 Ω aragonite, Ω calcite 농도가 높은 곳을 선호하는 것으로 볼 때 CO_2 가 해수 중으로 녹아들어가 해양산성화가 진행되어 Ω aragonite, Ω calcite 농도가 낮아지면 이들 우점종 6종의 서식지가 위협을 받을 수 있다. 해양산성화는 대기 중 이산화탄소가 녹는 것 이외에도 담수유입, 오염물질, 퇴적물 침식 등으로 인해 야기될 수 있다고 알려져 있다(Green *et al.*, 2009; Kelly *et al.*, 2011; Waldbusser *et al.*, 2011). 우점종 6종이 주로 서식하는 조사지역 남부해역(정점 1, 2, 3)의 저서환경은 pH가 높고 영양염이 낮은 환경을 보이고 있으며 이산화탄소 유입으로 해양산성화가 진행되면 이들 우점종의 서식이 크게 위협을

받을 것으로 예상된다.

주성분 3은 환경요인과 상관관계를 보이지 않았으나 *E. japonica* ($r=0.77$), 별난가시갯지렁이류 *Paraonis gracilis* ($r=0.70$), 황금빨 사슴갯지렁이 *Melinna elisabethae* ($r=0.69$), *P. depauperata* ($r=0.68$), *A. ancistrotus* ($r=0.67$), 전체평균 생물량($r=0.59$)과 강한 양의 상관관계를 보였다. 따라서 주성분 3은 전체평균 생물량과 다섯 우점종의 분포를 결정하는 미지의 요인이다. 이들 다섯 우점종은 저서동물 생물량이 높은 곳을 선호한다.

주성분 4도 환경요인과 높은 상관관계를 보이는 경우는 없었으나 버들갯지렁이류 *Mediomastus californiensis* ($r=0.65$), 구슬수염갯지렁이류 *Schistomeringos* sp. ($r=0.65$), 전체평균 서식밀도($r=0.54$)와는 강한 양의 상관관계를 보였다. 따라서 이들 우점종 2종은 저서동물 서식밀도가 높은 곳을 선호한다. 또한 주성분 2와 강한 양의 상관관계를 보여준 다섯 우점종은 주성분 4와는 강한 음의 상관관계를 보여주었는데, 이들 다섯 우점종 *C. koellikeri* ($r=-0.59$), *S. kroeyeri* ($r=-0.59$), *P. pusilla* ($r=-0.59$), *O. japonica* ($r=-0.59$), *A. gotoi* ($r=-0.59$)은 저서동물 서식밀도가 낮은 곳을 선호하는 것으로 나타났다. 따라서 주성분 4는 전체평균 서식밀도를 포함한 생물변수 8개의 분포를 결정하는 미지의 요인이다.

정점군 특성

집괴분석을 이용하여 개체수 상위 1% 우점종의 서식밀도를 바탕으로 Bray-Curtis 유사도 30%를 기준으로 정점을 분류한 결과 저층해수, 퇴적물 환경 및 지리적으로 뚜렷하게 구분되는 4개의 정점군이 분류되었다(Fig. 5, Table 1). 정점군 A는 사질함량이 높고 수온이 낮은 정점 9개로 구성되며 조사지역 중앙에 위치한다. 정점군 B는 니질함량이 95% 이상이고 낮은 수온을 보이며 pH와 Ω aragonite 농도가 가장 낮은 정점들로 구성되면 연안에 인접한 북쪽정점 3개와 가장 수심이 깊은 정점 14가 포함되었다. 정점군 C는 니질함량이 높고 중간 수온을 보이며 조사지역의 가장 남쪽에 위치한 정점 2개로 구성되었다. 정점군 D는 동쪽으로 가장 멀리 떨어진 정점 3개로 구성되며 수온, pH와 Ω aragonite 농도가 가장 높다. 앞서 각 정점군에서 특성종 5종씩을 선정하여 총 20개의 우점종과 환경요인 33개를 함께 주성분분석을 실시한 바 있으며, 각 주성분들과 높은 상관관계를 보이는 우점종들은 각 정점군의 특성종들로 주로 구성되었다. 따라서 정점군의 환경은 주성분에 의해 잘 설명되었다.

정점 14의 경우 집괴분석 수지도에서는 정점군 B로 분류하였으나, MDS 평면에서는 정점군 B의 정점들과 유사도 거리가 다소 먼 것으로 나타났다. 정점 14는 수심 521 m로 조사지역에서 가장 깊은 곳으로 저층해수의 수온, pH, Ω aragonite이 가장 낮고, 영양염 농도는 가장 높은 환경을 지니고 있다. 또한 정점군 B의 특성종이 전혀 출현하지 않고 있어서 정점군 B로 분류하는데 무리가 있을 수 있으나, 상위 1% 우점종 종조성의 유사도 30%로 정점군을 분류한 기준에 따라 정점군 B에 포함시켰다.

정점군 판별분석

앞서 분류된 4개의 정점군을 환경요인 만을 가지고 구분할 수 있는지를 확인하기 위해 판별분석을 실시하였다(Ryu et al., 2011c). 앞서 환경요인 33개에 대한 주성분분석 결과 수심, 퇴적물, 저층

Fig. 5. (a) Cluster analysis and (b) non-metric MDS ordination of 16 locations based on dominant species occupying over 1% of total individuals.

해수 환경을 나타내는 3개의 주성분이 추출되었는데, 이를 이용하여 판별분석에 사용되는 환경요인을 선정하였다. 즉 주성분을 반영하면서 현장에서 간편하게 측정이 가능한 5개 환경요인(수심, 사질함량, 수온, 염분, pH)을 선정하였다. 판별분석 결과로 도출되는 판별함수는 식 (1)과 같다.

$$DF = a \cdot \text{Depth} + b \cdot \text{Sand} + c \cdot \text{Temp} + d \cdot \text{Sal} + e \cdot \text{pH} \quad (1)$$

a, b, c, d는 각 환경요인의 표준화된 정준판별계수로서 Table 2에 제시되어 있다. 카이제곱검정 결과 4개의 정점군을 판별할 수 있는 2개의 판별함수가 유의한 것으로 판정되었다. 제1판별함수는 89.6%, 제2판별함수는 10.3%의 판별능력을 갖는다.

표준화된 정준판별계수는 판별함수를 이용하여 각 정점의 판별점수를 계산하는데 기여하는 정도를 나타낸다. 따라서 이 계수를 비교하면 정점군 간 환경변수의 상대적 중요도를 알 수 있게 된다(Weston, 1988). 판별함수 1에서는 수온(-2.01), 사질함량(1.86), pH(1.79) 순으로 상대적 기여도가 높다. 판별함수 2에서는 염분(0.90)의 기여도가 높게 나타났다. 또한 판별함수와 환경변수 간의 피어슨 상관계수를 나타내는 구조행렬은 정점군을 판별하는 환경요인을 결정하는데 사용될 수 있으며 판별함수를 축으로 하는 2차원 공간에 벡터로 나타낼 수 있다(Fig. 6). 판별함수 1은 사질함량(0.39)을 반영하며 정점군 A와 나머지 정점군을 구분하는데 탁월하다. 판별함수 B는 염분(0.96), 사질함량(0.59), 수온(0.48)을 반영하며 정점군 B, C, D를 잘 구분해낸다.

판별분석으로 도출된 2개의 판별함수는 5개의 환경요인만을 가

Table 1. Characteristics of four location groups by cluster analysis in the southern East Sea, Korea. All values are given as a mean for all locations within the corresponding group

	Group A	Group B	Group C	Group D
Number of station group	9	4	2	1
Environmental properties				
Depth	187	209	127	137
Sand content	76.3	1.2	13.3	64.8
Temperature	2.2	2.1	7.8	13.7
Salinity	34.1	34.1	34.2	34.3
pH	7.78	7.74	7.81	7.92
Ω aragonite	1.2	1.0	1.4	2.0
Benthic macrofauna				
Total species number	127	41	52	37
Mean density (indiv./m ²)	998	574	830	540
Biomass (g WW/m ²)	21.2	45.7	28.1	13.2
Dominant species (indiv/m ²)				
<i>Ampelisca miharaensis</i>	102	-	-	-
<i>Amphipus ancistrotus</i>	1	19	-	-
<i>Asychis gotoi</i>	-	-	-	15
<i>Clymenella koellikeri</i>	-	-	-	15
<i>Edwardsioides japonica</i>	2	34	-	-
<i>Felaniella usta</i>	26	4	-	-
<i>Lumbrineris longifolia</i>	-	-	20	-
<i>Maldane cristata</i>	2	-	220	30
<i>Mediomastus californiensis</i>	-	-	60	-
<i>Melinna elisabethae</i>	1	4	-	-
<i>Oblinopa japonica</i>	-	-	-	15
<i>Ophiura sarsii</i>	1	3	73	-
<i>Paraonis gracilis</i>	1	24	-	-
<i>Petrasma pusilla</i>	-	-	-	10
<i>Polycirrus nervosus</i>	51	-	18	-
<i>Prionospio depauperata</i>	-	9	-	-
<i>Schistomeringos sp.</i>	-	-	10	-
<i>Spio martinensis</i>	52	-	-	-
<i>Spiophanes kroeyeri</i>	-	-	-	120
<i>Vargula hilgendorfi</i>	64	-	-	-

지고도 4개의 정점군을 정확도 100%로 구분해 낼 수 있음을 보여주었다. 즉 16개로 구성된 전체 조사지역 정점의 군집특성을 5개의 환경요인만을 가지고 100% 구분해 낼 수 있다는 의미이다. 따라서 본 조사와 유사한 지역을 유사한 계절에 조사하게 된다면 5개의 환경요인, 즉 수심, 사질함량, 저층 수온, 저층 염분, 저층 pH를 가지고 저서생물상을 예측할 수 있게 된다.

본 연구에서는 5개의 환경요인을 가지고 한국 동해 남부해역의 저서동물군집의 4개 정점군을 100% 정확도로 예측할 수 있는 판별함수 모델을 제시하였다. 본 기법을 실제 생태계 조사에 적용하기 위해서는 반드시 지켜야할 전제조건이 있다. 조사하고자 하는 지역의 시공간 범위와 규모(정점 간격, 조사시기 간격)가 기존 판별함수모델 개발에 사용된 자료와 유사해야 한다.

판별함수모델이 저서동물군집을 예측할 수 있는 가장 큰 이유는 저서동물 분포가 환경과 밀접한 관계를 보이기 때문이다. 따라서

Fig. 6. Ordination of location groups (Group A, B, C, and D) in two-factor discriminant space (solid square: centroid of the location group). Vectors indicating the relative orientation of the environmental variables are also shown, which were determined from the correlation coefficients between two discriminant functions and five environmental variables. Term abbreviations: Sal.-Salinity, Temp.-Water temperature.**Table 2.** Discriminant analysis of environmental parameters among the four location groups of benthic community in the southern East sea, Korea

Discriminant function (DF)	DF1	DF2			
Details					
Relative percent of dicriminating power	89.6	10.3			
Eigen value	53.95	6.21			
Canonical correlation	0.991	0.928			
Test of significance					
Chi-squared value	76.43	42.42			
Significance level	p<0.001	p<0.01			
Degree of freedom	15	8			
Standardized canonical discriminant function coefficients					
Depth	-0.68	0.15			
Sand	1.86	0.33			
Temperature	-2.01	-0.15			
Salinity	-0.62	0.90			
pH	1.79	0.06			
Total structure coefficient (correlations between DFs and variables)					
Depth	0.04	-0.04			
Sand	0.39	0.59			
Temperature	-0.10	0.48			
Salinity	-0.16	0.96			
pH	0.00	0.25			
Classification matrix for 16 cases (locations)					
Original group	No. of stations	Predicted groups			
		A	B	C	D
A	9	9 (100%)	0	0	0
B	4	0	4 (100%)	0	0
C	2	0	0	2 (100%)	0
D	1	0	0	0	1 (100%)

환경요인에 대한 저서동물의 안정적인 분포와 맞물려 판별분석모델은 매우 강력한 예측력을 보여주었다. 이러한 기법은 조하대 뿐만 아니라 조간대 저서동물 군집을 예측하는데 적용될 수 있다 (Ryu *et al.*, 2011c). 연성저질에 서식하는 저서동물 군집의 정점 군을 나타내는 해양생태도를 제작하고자 할 때 본 논문에서 제시하는 기법은 매우 강력한 도구가 될 수 있다. 기존에 조사된 자료를 토대로 이 기법을 적용하여 판별함수모델의 데이터베이스를 구축하게 되면 향후 간단한 물리지질학적 조사자료, 심지어 원격탐사로 얻어지는 환경자료를 통해 단기간의 저서동물군집의 종류를 예측하는 것이 가능해 진다. 새로운 서식환경이나 장기간의 저서군집의 경우는 새로운 판별함수를 개발하여 적용해야 하기 때문에 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

사 사

이 논문은 2013년 해양수산부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(CO₂ 해양지중저장 기술개발). 또한 2013년 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 2013028926). 논문을 심사해 주신 두 분의 심사위원께 감사드립니다.

참고문헌

- Ahn, I.Y., Y.C. Kang, J.W. Choi, 1995. The influences of industrial effluents on intertidal benthic communities in Panweol, Kyeonggi Bay (Yellow Sea) on the coast of Korea. *Mar. Pollut. Bull.*, **30**: 200–206.
- Buchanan, J.B., 1984. Sediment analysis. In: *Methods for the study of marine benthos*, edited by Holme, N.A. and A.D. McIntyre, Blackwell Scientific Publications, Oxford and Edinburgh, pp. 41–65.
- Blanchet, H., N. Lavesque, T. Ruellet, J.C. Dauvin, P.G. Sauriau, N. Desroy, C. Desclaux, M. Leconte, G. Bachelet, A.-L. Janson, C. Bessineton, S. Duhamel, J. Jourde, S. Mayot, S. Simon, X. de Montaudouin, 2008. Use of biotic indices in semi-enclosed coastal ecosystems and transitional waters habitats-implications for the implementation of the European Water Framework Directive. *Ecol. Indicators*, **8**: 360–372.
- Choi, J.-W., C.-H. Koh, 1986. The distribution and feeding characteristics of some dominant polychaetes in the continental shelf of the East Sea, Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **21**: 236–244.
- Choi, J.-W., C.-H. Koh, 1988. The Polychaete assemblages on the continental shelf off the southeastern coast of Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **23**: 169–183.
- Choi, J.-W., C.-H. Koh, 1989. Polychaete feeding guilds from the continental shelf off the southeastern coast of Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **24**: 84–95.
- Choi, J.-W., C.-H. Koh, 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**: 36–48.
- Choi, J.-W., S. Hyun, D. Kim, W.-S. Kim, 2002. Macrobenthic faunal assemblages on the soft-bottoms around Dokdo in the East Sea, Korea. *Ocean Polar Res.*, **24**: 429–442.
- Clarke, K.R., R.M. Gorley, 2006. *PRIMER v6: user manual/tutorial*. PRIMER-E, Plymouth.
- Doney, S.C., V.J. Fabry, R.A. Feely, J.A. Kleypas, 2009. Ocean acidification: the other CO₂ problem. *Annu. Rev. Mar. Sci.*, **1**: 169–192.
- Dove, M.C., J. Sammut, 2007. Impacts of estuarine acidification on survival and growth of Sydney rock oysters *Saccostrea glomerata*. *J. Shell. Res.*, **26**: 519–527.
- Ellis, J., T. Ysebaert, T. Hume, A. Norkko, T. Bult, P. Herman, S. Thrush, J. Oldman, 2006. Predicting macrofaunal species distributions in estuarine gradients using logistic regression and classification systems. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **316**: 69–83.
- Field, J.G., K.R. Clarke, R.M. Warwick, 1982. A practical strategy for analyzing multispecies distribution patterns. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **8**: 37–52.
- Gogina, M., M. Glockzin, M.L. Zettler, 2010. Distribution of benthic macrofaunal communities in the western Baltic Sea with regard to near-bottom environmental parameters. 2. Modelling and prediction. *J. Mar. Syst.*, **80**: 57–70.
- Gray, J.S., 1974. Animal-sediment relationships. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, **12**: 223–262.
- Green, M.A., G.G. Waldbusser, S.L. Reilly, K. Emerson, S. O'Donnell, 2009. Death by dissolution: sediment saturation state as a mortality factor for juvenile bivalves. *Limnol. Oceanogr.*, **54**: 1037–1047.
- Kelly, R.P., M.M. Foley, W.S. Fisher, R.A. Feely, B.S. Halpern, G.G. Waldbusser, M.R. Caldwell, 2011. Mitigating local causes of ocean acidification with existing laws. *Science*, **332**: 1036–1037.
- Lim, H.-S., J.-W. Choi, S.-D. Choi, 2012. Spatial distribution of macrobenthos in Sueocheon stream estuary at the northern part of Gwangyang Bay, Korea. *The Sea (J. Kor. Soc. Oceanogr.)*, **17**: 76–86.
- Messiner, K., A. Darr, E. Rachor, 2008. Development of habitat models for *Nephtys* species (Polychaeta: Nephtyidae) in the German Bight. *J. Sea Res.*, **60**: 276–291.
- Miller, A.W., A.C. Reynolds, C. Sorbino, G.F. Riedel, 2009. Shellfish face uncertain future in high CO₂ world: influence of acidification on oyster larvae calcification and growth in estuaries. *PLoS Biology*, **4**: e5661.
- Muxika, I., A. Borja, J. Bald, 2007. Using historical data, expert judgement and multivariate analysis in assessing reference conditions and benthic ecological status, according to the European Water Framework Directive. *Mar. Pollut. Bull.*, **55**: 16–29.
- Paik, S.-G., R.-S. Kang, J.O. Jeon, J.-H. Lee, S.G. Yun, 2007. Distribution patterns of sandy bottom macrobenthic community on the Hupo coastal area, in the East Sea of Korea. *Ocean Polar Res.*, **23**: 123–134.
- Paul, J., K.J. Scott, D.E. Campbell, J.H. Gentile, C.S. Strobel, R.M. Valente, S.B. Weisberg, A.F. Holland, J.A., Ranasinghe, 2001. Developing and applying a benthic index of estuarine condition for the Virginian Biogeographic Province. *Ecol. Indicators*, **1**: 83–99.
- Pearson, T.H., R. Rosenberg, 1978. Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, **16**: 229–311.
- Rakocinski, C.F., S.S. Brown, G.R. Gaston, R.W. Heard, W.W. Walker, J.K. Summers, 2000. Species-abundance-biomass responses

- by estuarine macrobenthos to sediment chemical contamination. *J. Aqua. Ecosyst. Stress Recov.*, **7**: 201–214.
- Reiss, H., I. Kröncke, 2005. Seasonal variability of benthic indices: an approach to test the applicability of different indices for ecosystem quality assessment. *Mar. Pollut. Bull.*, **50**: 1490–1499.
- Ryu, J., J.S. Khim, S.-G. Kang, D. Kang, C.-H. Lee, C.-H. Koh, 2011a. The impact of heavy metal pollution gradients in sediments on benthic macrofauna at population and community levels. *Environ. Pollut.*, **159**: 2622–2629.
- Ryu, J., H.-C. Kim, J.S. Khim, Y.H. Kim, J. Park, D. Kang, J.H. Hwang, C.-H. Lee, C.-H. Koh, 2011b. Prediction of macrozoobenthic species distribution in the Korean Saemangeum tidal flat based on a logistic regression model of environmental parameters. *Ecol. Res.*, **26**: 659–668.
- Ryu, J., J.S. Khim, J.-W. Choi, H.C. Shin, S. An, J. Park, D. Kang, C.-H. Lee, C.-H. Koh, 2011c. Environmentally associated spatial changes of a macrozoobenthic community in the Saemangeum tidal flat, Korea. *J. Sea Res.*, **65**: 390–400.
- Salzwedel, H., E. Rachor, D. Gerdes, 1985. Benthic macrofauna communities in the German Bight. *Veroff. Inst. Meeresforsch. Bremerh.*, **20**: 199–267.
- Shin, H.C., S.M. Yoon, C.H. Koh, 2001. Spatial distribution of benthic macrofaunal community in Ulsan Bay and Onsan Bay, eastern coast of Korea. *J. Kor. Soc. Oceogr.*, **6**: 180–189.
- Simboura, N., A. Zenetos, P. Panayotidis, A. Makra, 1995. Changes of benthic community structure along an environmental gradient. *Mar. Pollut. Bull.*, **30**: 470–474.
- Somerfield, P.J., J.M. Gee, R.M. Warwick, 1994. Benthic community structure in relation to an instantaneous discharge of waste water from a tin mine. *Mar. Pollut. Bull.*, **28**: 363–369.
- Snelgrove, P.R.V., C.A. Butman, 1994. Animal-sediment relationships revisited: cause versus effect. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, **32**: 111–177.
- Thrush, S.F., J.E. Hewitt, A. Norkko, P.E. Nicholls, G.A. Funnell, J.I. Ellis, 2003. Habitat change in estuaries: predicting broad-scale responses of intertidal macrofauna to sediment mud content. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **263**: 101–112.
- Warwick, R.M., H.M. Platt, K.R. Clarke, J. Agard, J. Gobin, 1990. Analysis of macrobenthic and meiobenthic community structure in relation to pollution and disturbance in Hamilton Harbor, Bermuda. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **139**: 119–142.
- Waldbusser, G.G., E.R. Voigt, H. Bergschneider, M.A. Green, R.I.E. Newell, 2011. Biocalcification in the eastern oyster (*Crassostrea virginica*) in relation to long-term trends in Chesapeake Bay pH. *Estuaries Coasts*, **34**: 221–231.
- Weston, D.P., 1988. Macrobenthos-sediment relationships on the continental shelf off Cape Hatteras, North Carolina. *Cont. Shelf Res.*, **8**: 267–286.
- Weston, D.P., 1990. Quantitative examination of macrobenthic community changes along an organic enrichment gradient. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **61**: 233–244.
- Ysebaert, T., P. Meire, P.M. Herman, H. Verbeek, 2002. Macrobenthic species response surfaces along estuarine gradients: prediction by logistic regression. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **225**: 79–95.
- Zar, J.H., 1984. *Biostatistical analysis*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

2014년 2월 2일 원고접수

2014년 2월 20일 수정본 접수

2014년 2월 20일 수정본 채택

담당편집위원: 신현출