Article

새만금 4호 방조제 연결 후 군산갯벌 대형저서동물군집 변화

구본주^{1*} · 신상호¹ · 우한준² · 김은수³ · 제종길⁴¹한국해양연구원 해양생물자원연구부²한국해양연구원 해양위성 · 관측기술연구부³한국해양연구원 새만금해양환경연구단⁴한국해양연구원 정책본부

(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29

Changes in Macrobenthic Community Structure on Gunsan Tidal Flat after the Closing of the Saemangeum 4th Dyke

Bon Joo Koo^{1*}, Sang-Ho Shin¹, Han Jun Woo², Eun-Soo Kim³, and Jong Geel Je⁴¹Marine Living Resources Research Department, KORDI²Ocean Satellite Remote Sensing & Observation Technology Research Department, KORDI³Saemangeum Coastal Research Group, KORDI⁴Policy Center, KORDI

Ansan P.O. Box 29, 425-600, Korea

Abstract : With the reduction of tidal currents by the closing of the Saemangeun 4th dyke, sedimentary environments on the Gunsan tidal flat, the nearest inner flat from the 4th dyke, has been severely changed, which might affect macrobenthic assemblages on the habitats. In order to investigate changes in macrobenthic community structure on Gunsan tidal flat, field surveys were seasonally conducted at seven stations from April 2002 to November, 2005. Sedimentary facies on the study area were shifted into mud-dominant facies. The fine sediment has been greatly deposited on the tidal flat with accumulation of organic materials after closing the water passage of 4th dyke section. These drastic variations in environments gave rise to change in macrobenthic community structure. Since the closure of the 4th dyke, the number of species of macrobenthos has gradually decreased. And the filter feeders and sand-favored species such as *Urothoe convexa*, *Macrophthalmus dilatatus*, *Umbonium thomasi*, and *Macraa veneriformis* have been replaced by the deposit feeders such as *Macrophthalmus japonicus* and *Ilyoplax pingi*. MDS ordination based on Bray-Curtis similarity from forth-root transformed species abundance data showed that the macrobenthic communities have passed through three succession stages from 2002 to 2005. During the third stage of 2005 opportunistic species such as *Prionospio japonica*, *Heteromastus filiformis* and *Sinocorophium sinensis* increased in population on the tidal flat.

Key words : Macrobenthic community, sediment deposition, tidal flat, 4th dyke, Saemangeum

1. 서 론

자연 상태의 군집은 서식지의 고유한 환경을 반영하여

존재한다. 군집을 구성하는 각각의 종은 환경요인에 대해 반응하는 정도가 다르기 때문에 군집의 구조는 다양한 환경요인의 조합에 의해 결정된다(Warwick and Clarke 1991). 특히, 저서동물은 대부분이 고착성이거나 이동성이 제한되어 있어 환경변화에 대처할 능력이 부족하다. 그러

*Corresponding author. E-mail : bjoo@kordi.re.kr

므로 저서동물 군집 구조는 환경의 변화를 반영하는 지시자 역할을 한다(Simboura *et al.* 1995). 조간대의 경우에는 서식지의 환경구배와 생물 상호 간의 관계에 의해 저서동물의 분포가 결정된다(Raffaelli and Hawkins 1996). 그러나 갯벌의 경우에는 포식과 피식의 관계가 먹이사슬에서 특정 동물끼리 연결되어 있지 않아 먹이망이 상대적으로 느슨하기 때문에 생물학적 작용 보다는 조석작용에 의해 수반되는 여러 가지 환경요인이 저서동물의 분포를 결정하는 일차적인 요인이다(고 등 1997). 갯벌 저서동물의 분포에 영향을 주는 물리-화학적 환경요인으로 연속노출시간, 퇴적환경, 염분, 퇴적물 온도, 유기물함량, 그리고 퇴적물 내 공극수 함량 등이 보고되었다(Swinbank and Murray 1981; Koh and Shin 1988; Ysebaert 1998; Herman *et al.* 2001; Rossi *et al.* 2001).

2003년 6월 새만금 4호 방조제가 연결되면서 내측에 위치한 북측해역의 조류세기는 그 전에 비해 큰 폭으로 감소되었고, 이는 갯벌을 포함하는 주변 해역의 퇴적환경을 변화시켰다. 방조제 건설 등과 같은 인공구조물의 축조는 해역의 수리학적 힘의 변형과 함께 퇴적환경의 변화를 유발하여 주변 갯벌과 해안선에 예기치 못한 퇴적과 침식을 야기하며(Lee *et al.* 1999; Jaramillo *et al.* 2002; Thomalla and Vincent 2003), 그 곳에 서식하는 저서동물 군집의 구조에 직·간접적인 영향을 미친다(Herman *et al.* 2001; Koo and Je 2002; 유 등 2006). 큰 규모의 퇴적물 침식은 직접적으로 저서동물의 서식지를 소실시키며, 많은 양의 퇴적은 생물의 호흡과 먹이활동에 영향을 주기도 한다(Bogaards *et al.* 1980). 갯벌 저서동물은 서식지의 퇴적상에 따라 서식범위가 제한되어 있으며, 이는 먹이섭취 기작과 관련이 있다. 해수 중에서 유기물을 걸러먹는 여과물식자(filter feeder)는 펄 성분이 많은 곳에서는 먹이섭취 기관이 막힐 가능성이 높아 모래기질을 더 선호하며, 저서 규조류나 퇴적물 내 유기물을 섭취하는 퇴적물식자(deposit feeder)는 모래보다는 펄 성분에 먹이원이 많기 때문에 세립질 퇴적물을 선호한다. 따라서 퇴적물 입자크기에 대한 식이형별 저서동물의 서식지 분화는 군집의 구조를 결정하는 주요한 요인 중 하나이다. 새만금 4호 방조제 연결로 인한 북측해역의 급격한 퇴적환경의 변화는 저서동물의 군집구조에 직접적인 영향을 주었을 것으로 예상된다.

갯벌 저서동물군집과 관련하여 새만금 갯벌에서 수행된 조사는 매우 제한적이다(e.g. 안과 고 1992; Koo and Koh 2005; 류 2006; 임 2007). 이들의 연구는 갯벌 저서동물의 분포와 구조에 대하여 언급하였다. 한편, 구 등 (2008)은 새만금 방조제 완공 후 급격한 조석 감소에 의해 구분된 영구 노출지역, 조석영향 지역, 영구 침수지역의 저서동물 변화를 분할된 서식지별로 분석하였으며, 극단

적인 환경변화가 저서동물의 사망과 생존에 영향을 주었음을 보였다. 본 연구는 새만금 4호 방조제 연결 시점을 기준으로 변화된 조석환경 및 퇴적환경에 대해 4호 방조제 전면에 위치한 군산갯벌의 대형저서동물 군집이 어떻게 반응하였는지를 생태학적 지수, 군집구조, 섭식형태, 그리고 우점종 조성 등의 변화를 분석함으로써 파악하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

연구지역

새만금 간척사업은 방조제 길이가 33 km에 달하며 간척면적이 40,100 ha(갯벌간척 면적 20,800 ha)에 이르는 세계적으로 유례가 없는 대형 간척사업이다. 1991년 11월에 방조제 공사가 시작되어 2003년 6월에는 4호 방조제의 연결공사가 완료되었다. 이 시점부터는 가덕갑문과 신시갑문 예정지의 개방구간을 통해서만 새만금 내해역과 외해역의 해수가 교환되었다. 4호 방조제 완공 이후에도 개방구간을 통한 조류의 소통으로 인해 새만금 내해역의 평균 조차는 방조제 공사 전의 430 cm와 비교하여 약 5.8 cm 증가에 그쳤다(해양수산부 2004). 그러나 평균조차의 변화가 심하지 않음에도 불구하고 새만금 내해역의 조류속도는 그 전과 비교 해 지역별로 큰 편차를 보였다. 동진강과 만경강의 입구가 두 개방구간과 연장선 상에 있는 지역에서는 조류세기가 오히려 크게 증가한 반면, 북측해역은 4호 방조제 연결과 함께 그 세기가 크게 감소되었다(Lie *et al.* 2008). 이러한 조류속도의 변화는 새만금 내해역의 갯벌 퇴적환경에 영향을 주었다. 조류 세기가 증가한 동진강과 만경강의 주수로 지역에는 침식 및 포락 현상이 나타났으며, 북측해역의 4호 방조제 전면에 위치한 본 조사지역인 군산갯벌에는 많은 양의 세립질 퇴적물이 퇴적되었다(유 등 2006).

현장조사

새만금 4호 방조제 완공(2003년 6월) 이후 군산 갯벌의 퇴적환경과 저서생태계 변화를 파악하기 위하여 조사선(SA Line)을 선정하고, 2002년 4월부터 2005년 8월까지 계절별로 대조기 동안 도보로 현장조사를 실시하였다. 조사 정점은 해안선에서 수직으로 약 500 m 간격으로 총 7개 정점 SA1~7(10 m, 500 m, 1000 m, 1500 m, 2000 m, 2500 m, 2800 m)을 선정하였다(Fig. 1). 처음 현장 조사 시에는 ± 1 cm 해상도의 측량용 DGPS(Ashtec, X-treme)를 이용하여 각 정점의 평균해수면 기준한 고도를 측량하였다. 고도 측량 후 퇴적물 변화를 파악하기 위하여 각 정점에는 30 cm×30 cm 크기의 판을 퇴적물 아래 약 20~30 cm 깊이에 설치하였다. 현장 조사 시에는 버니어캘리퍼스

Fig. 1. Map showing the study area in Saemangeum tidal flat, Korea. Samples of macrobenthos and sediments were collected from a SA transect represented as a rectangle during the study period, and only sediment samples were collected from the other four transects in May 2004.

를 이용하여 갯벌 표층에서 판까지 깊이를 측정하여 고도의 변화를 측정하였으며, 퇴적물 입도 특성 분석을 위한 표층 퇴적물을 채취하였다. 각 정점에서는 채집면적이 0.025 m^2 인 주상시료채니기를 이용하여 대형저서동물을 정량적으로 채집하였다. 저서동물 채집 시에는 주상시료채니기를 이용하여 30 cm 깊이까지의 퇴적물을 파내었으며, 채집된 퇴적물은 현장에서 0.5 mm 체로 걸러 남은 잔존물만을 비닐에 담아 해수로 중화된 10% 포르말린으로 고정하였다. 각 정점에서는 동일한 방법으로 4회씩 반복 채집을 하였다.

시료 및 자료 분석

채집된 저서동물은 실험실로 옮긴 다음, 분류군별로 일차 선별작업을 하였다. 선별된 저서동물은 각 분류군별로 분류 전문가에 의해 해부 현미경하에서 가능한 종 수준까지 동정되었다. 그리고 종별로 개체수를 계수하였다. 표층

퇴적물 시료의 입도분석은 표준입도 분석방법에 따랐으며, 측정된 자료는 그래픽 방법에 의해 평균입도와 분급도 등의 통계적 입도상수를 구하였다. 표층 퇴적물의 유기물 함량 분석을 위한 퇴적물 시료는 4호 방조제가 연결되고 난 후인 2004년 5월에 새만금 갯벌에 설정한 5개 조사선의 37개 정점에서 각각 1회 채취하였다(Fig. 1). 표층 퇴적물의 유기물 함량은 화학적산소요구량(COD), 총유기탄소(TOC), 총질소(TN), 황(S) 등으로 나타내었다.

퇴적물과 표층퇴적물의 평균입도 변화 분석에는 2002년부터 2005년까지 분석된 각 정점별 자료 중 매년 8월의 자료를 취하여 방조제 공사 진척정도에 따른 변화를 비교하였다. 저서동물군집의 변화를 파악하기 위해 각 정점별·시기별로 저서동물 출현 종수, 출현개체수 및 종다양도지수 등의 단변량적 지수를 분석하였다. 그리고 저서동물 종별 섭식형태를 육식자(Carnivore), 여과식자(Filter feeder), 퇴적물식자(Deposit feeder)로 구분하여 종별 그리

고 개체수별 섭식형태의 조성을 연도별로 비교하였다. 이 분석에는 매년 8월 조사 자료가 이용되었으며, 매년 8월에 7개 정점에서 출현한 모든 저서동물을 정점간 구분 없이 합친 후 분석에 이용하였다. 방조제 공사 착수 전에 본 조사와 동일한 지역에서 수행된 안과 고(1992)의 저서동물 중별 개체수 자료를 이용하여 섭식형태를 재분석하였으며, 본 조사 자료의 섭식형태와 비교하였다. 시간에 따른 저서동물 군집의 변화는 4th-root로 변형된 출현개체수 자료간의 Bray-Curtis similarity를 이용하여 다차원배열법(MDS ordination)으로 분석하였다(Clarke and Warwick, 2001). 이때는 ANOSIM test를 통해 구분된 군집 간의 유의성을 검증하였다. 그리고 다차원배열법에서 구분된 시간에 따른 각 군집별로 소멸된 종과 새롭게 출현한 종 등의 정보를 분석하였다.

3. 결 과

퇴적환경 변화

군산 갯벌 조사선(SA Line)의 각 정점의 고도는 평균해수면 기준 $-2.04\text{ m} \sim -2.71\text{ m}$ 사이에 위치하며, 평균 경사도는 0.10° 이었다. 군산 갯벌의 지형 변화를 파악하기 위하여 2002년부터 2005년까지 8월의 퇴적물 집적률 자료를 비교하였다(Fig. 2). 2002년 8월에 비하여 4호 방조제가 연결된 후 2003년 8월에는 SA2를 제외한 곳에서 고도가 증가하였으며, 특히 하부 정점에서 고도 증가가 컸다. 2004년과 2005년 8월에는 갯벌 중부에 위치한 SA2, 3에서 계

Fig. 2. Annual variations of sediment accumulation along the SA transect line established on the Gunsan tidal flat. Each bar stands for net accumulation.

Fig. 3. Annual difference in mean grain size (phi) along the SA transect line on the Gunsan tidal flat.

Fig. 4. Relationship between sediment grain size and organic materials of the surface sediments collected in the Saemangeum tidal flat during May 2004. Symbols represent each station of SA transect (●) and of four other transects (○) shown in Fig. 1.

속 침식이 일어났으며, 특히 SA3에서 20 cm 이상 침식되었다. 그러나 상부에 위치한 SA1과 하부에 위치한 SA6, 7에서는 계속 퇴적되는 경향을 보였다. 하부에 위치한 SA6, 7에서는 처음과 비교하여 2005년 8월에는 20 cm가 퇴적되었다. 그리고 SA4, 5의 경우에는 퇴적과 침식이 반복적으로 일어났다. 전체적으로 군산 갯벌은 불안정한 퇴적환경 특징을 보였다. 4호 방조제가 차단되기 이전인 2002년 8월 군산 갯벌 조사선의 표층 퇴적물 평균입도를 기준으로 2003년, 2004년, 2005년 8월의 퇴적물 평균입도 변화를 비교하였다(Fig. 3). SA1과 2에서는 4호 방조제가 막히기 이전에 비해 2003년 8월에는 퇴적물이 조립화되는 경향을 보였으나, 나머지 정점에서는 4호 방조제 차단 직후인 2003년부터 2005년까지 여름철에 계속하여 퇴적물이 세립화되는 특징을 보였다. 하부 정점에서는 4호 방조제 연결 이후 2φ 이상의 퇴적물 세립화가 진행되었다. 일반적으로 퇴적물내 유기물 함량은 퇴적물 입자크기와 양의 상관관계를 보인다. 군산 갯벌 조사선(SA Line)을 제외한 새만금 갯벌 조사선(UM, GY, GE, GW Line)에서는 이러한 경향이 잘 나타나 있었다. 그러나 군산 조사선(SA Line)의 경우에는 이러한 관계를 크게 벗어나는 유기물 농도가 관찰되었다(Fig. 4). 특히 SA1~4에서는 평균 입도가 1.99~4.98φ로 조립하였으나, 표층퇴적물의 화학적산소요구량(COD)은 11.91~17.24 mg/g범위, 총유기탄소량(TOC)은 0.63~0.93%, 총질소화합물량(TN)은 0.064~0.095% 그리고 황 농도는 0.15~0.20% 범위에 있어 다른 갯벌 보다 높은 유기물 함량을 나타내었다.

대형저서동물 군집 변화

생태학적 제반 지수

2002년 4월부터 2005년 8월까지 군산 갯벌에서 출현한 저서동물 출현종수를 조사시기별로 비교하면 2005년으로 향하면서 점차 감소하는 경향이 있었다(Fig. 5). 2002년과 2003년 봄철까지는 평균 출현 종수가 30~35종/0.1 m²의 분포범위에 있었으나, 이후 약간의 감소 경향을 보였다. 2003년 8월부터 2004년까지는 출현 종수가 25종~30종/0.1 m²이었으며 2005년에는 20종~25종/0.1 m²으로 점차 감소하는 경향을 보였다. 출현 개체 수에 있어서는 뚜렷한 경향을 보이지 않았으며 봄철에 개체수가 증가하였다가 겨울철로 향하면서 감소하는 계절적인 변동을 보였다(Fig. 5). 그러나 특이하게도 2004년 2월에는 조사기간 중 가장 높은 출현개체수가 관찰되었다. 이것은 이 시기동안 띠조개(*Laternula marilina*)가 정점 3을 중심으로 한 평균 해수면 근처 높이에 집중적으로 가입을 하였기 때문이었다. 가입한 치패는 약 일 년 동안 군산 갯벌에서 우점하는 종으로 출현하였으나, 이후 2005년 들어서는 더 이상 개체군을 유지하지 못하였다. 종다양도지수의 시간에 따른 변화

는 크게 나타나지 않았다. 여름과 가을에 종다양도지수가 다소 증가하였으며 다른 계절에 다시 소폭으로 감소하는 계절적 변동을 보였다. 그러나 출현 종수의 경우와 마찬가지로 종다양도지수도 4호 방조제 연결 전에 비하여 소폭이나마 감소하는 경향을 보였다.

저서동물 섭식형태

저서동물 섭식형태의 조성에도 새만금 방조제 공사 전부터 4호 방조제 연결 이후까지 계속적인 변화가 나타나고 있었다. Fig. 6은 방조제 공사 이전부터 2005년 까지 섭식형태별 저서동물의 종수 및 개체 수 조성을 나타낸 것이다. 공사 전(1988년)과 비교하여 여과물식자(FF)의 감소와 퇴적물식자(DF)의 증가 경향이 종수 및 개체 수 조

Fig. 5. Temporal variation of species number, mean density and species diversity of macrobenthos in the SA transect. The vertical bars indicate standard deviation.

Fig. 6. Annual variations in the frequency of feeding modes by species (A) and abundance (B); CAR: carnivores, FF: filter feeders, DF: deposit feeders. ★ 1988 data of An and Koh (1992) were re-analysed.

성에서 뚜렷하게 나타났다. 4호 방조제 연결 이후인 2004년과 2005년에도 퇴적물식자의 증가와 여과물식자의 감소 경향은 계속 되었다.

저서동물 군집 천이

7개의 정점에서 출현한 저서동물 중별 개체수를 조사시 기별로 합친 자료를 이용하여 시기별 저서동물 군집의 변동을 다차원배열법(MDS ordination)으로 분석하였다. 분석결과, 조사기간 동안의 저서동물 군집은 크게 세 개의 군집으로 구분되었다. 2002년부터 4호 방조제가 완공되기 직전인 2003년 5월까지의 군집, 4호 방조제 완공 직후부터 2005년 2월까지의 군집, 그리고 2005년 5월과 8월의 군집으로 크게 구분되었다(Fig. 7). 편의상 상기 순으로 I, II, III 군집으로 칭하여 분석에 이용하였다. ANOSIM test 결과 군집 I, II, III간에는 유의한 수준에서 군집 유사성에 차이가 있었다(Table 1). 4호 방조제가 연결되면서 서식지 환경변화와 함께 곧바로 군집구조에도 변화가 나타났으며, 공사 전의 I군집에서 II의 군집으로 구조의 변화가 있었다. 이러한 변화는 계속 진행되어 2005년에는 III 군집으로 또다시 변화가 나타났다. 즉, 군산 갯벌의 저서동물 군집은 4호 방조제 연결과 함께 군집 I에서 군집 II를 거

Fig. 7. MDS ordination for 15 sampling occasions on SA transect, based on Bray-Curtis similarity from 4th root-transformed species abundance. Three groups were divided from ANOSIM test.

Table 1. One-way analysis of similarities showing significant differences in macrobenthic community structure among the three groups found in the cluster analysis

	Global test		Pairwise test		
	r	p (%)	Group	r	p (%)
Between periods	0.762	0.1	I-II	0.642	0.1
			I-III	0.996	3.6
			II-III	0.929	2.8

쳐 군집 III으로의 천이가 진행되었다. 각 천이 단계별로 어떤 종이 새로 가입을 하였으며, 그리고 어떤 종이 사라졌는지에 대한 분석을 실시하였다. Table 2에서 보여지는 기준에 따라 저서동물을 A-F 형으로 구분하였다. A 형은 I군집에는 존재하였으나 II, III 군집에서는 사라진 종, B 형은 I, II 군집에서는 존재하였으나 III의 군집에서는 사라진 종 등으로 구분하고 각 타입에 해당하는 종의 수를 분석하였으며, 대표종의 천이단계별 서식밀도 변화를 분석하였다. I 군집에서는 출현하였으나 이후의 군집에서는 나타나지 않는, 즉 A 형 종은 42종이었으며, I, II 군집에 출현한 B 형에는 56종이 해당되었다. II 군집에서만 출현한 E 형은 29종이었으며, III 군집에서 새롭게 출현한 D 형은 19종이었다. 그리고 천이 단계에 관계없이 계속 출현하는 F 형에는 57종이 해당되었다.

우점종 변동

I 군집 이후에 사라진 A 형의 대표적 종은 볼록손모래무지옆새우사촌(*Urothoe convexa*)이었으며, I, II 군집 이후에 사라진 B 형 대표종은 서해비단고둥(*Umbonium thomasi*), 민뽕집시조개(*Moerella rutila*), *Aedicira pacifica*,

Table 2. Information on appearance and disappearance of macrofauna with respect to the community succession

Species type	Classification			No of. species	Characteristic species	Mean density (ind./m ²)			Feeding type
						I	II	III	
A	I	x	x	42	<i>Urothoe convexa</i> (C)	131	0	0	FF+SDF
					<i>Umbonium thomasi</i> (M)	64	27	0	FF+SDF
					<i>Moerella rutila</i> (M)	37	14	0	SDF
					<i>Aedicira pacifica</i> (P)	94	12	0	SSDF
B	I	II	x	56	<i>Macrophthalmus dilatatus</i> (C)	16	1	0	SDF
					<i>Ruditapes philippinarum</i> (M)	9	3	0	FF
					<i>Solen strictus</i> (M)	11	4	0	FF
					<i>Callianassa japonica</i> (C)	12	6	0	FF
C	x	II	III	10	<i>Sinocorophium sinensis</i> (C)	0	15	15	FF+SDF
					<i>Sinocorophium japonicum</i> (C)	0	13	32	FF+SDF
					<i>Ilyoplax pingi</i> (C)	2	135	130	SDF
D	x	x	III	19	Oligochaetaindet.	0	0	177	SDF
E	x	II	x	29	<i>Laternula anatina</i> (M)	0	16	0	FF
					<i>Mediomastus californiensis</i> (P)	806	202	187	SSDF
					<i>Nephtys polybranchia</i> (P)	128	40	77	CAR
					<i>Lingula anatina</i> (B)	108	55	53	FF
F	I	II	III	57	<i>Mactra veneriformis</i> (M)	73	26	7	FF
					<i>Protankyra bidentata</i> (E)	14	8	6	SDF
					<i>Perinereis aibuhitensis</i> (P)	24	13	15	SSDF
					<i>Heteromastus filiformis</i> (P)	251	341	994	SSDF
					<i>Prionospio japonica</i> (P)	108	270	969	SDF
					<i>Macrophthalmus japonicus</i> (C)	26	43	67	SDF
					<i>Laternula marilina</i> (M)	79	859	23	FF

P: Polychaeta, M: Mollusca, C: Crustacea, B: Brachiopoda, E: Echinodermata

CAR: carnivore, FF: filter-feeder, SDF: surface deposit-feeder, SSDF: subsurface deposit-feeder.

길게(*Macrophthalmus dilatatus*), 바지락(*Ruditapes philippinarum*), 맛(*Solen strictus*) 등이었다. 그리고 동죽(*Mactra veneriformis*)의 경우에도 III 군집에서 개체수가 유지되긴 하였으나 전에 비해 개체수가 크게 감소되었다(Table 2). 이들 종은 대부분 모래 퇴적상을 선호하는 종이였다. 이와는 반대로 II, III 군집에서 새로이 등장한 종은 펄털콩게(*Ilyoplax pingi*)와 세가시육질꼬리옆새우(*Sinocorophium japonicum*) 등 이었다. 그리고 칠게(*Macrophthalmus japonicus*)도 4호 방조제 연결 이후에 서식밀도가 점차 증가하는 대표적인 종이였다. III 군집에서 새롭게 나타나기 시작한 종의 대표종은 빈모류인 *Oligochaeta* indet.였으며, 운모조개(*L. anatina*)는 II 군집에서만 출현한 대표적인 E 형 종이였다. 이외에 *Mediomastus californiensis*, 광염백금갯지렁이(*Nephtys polybranchia*), 개맛(*Lingula anatina*), 가시땃해삼(*Protankyra bidentata*) 등은 계속하여 개체군이 유지되는 종이였으나 III 군집으로 향하면서 점차 혹은 크게 서식밀도가 감소되었다. 한

편, III 군집으로 향하면서 개체수가 크게 증가한 종은 *Heteromastus filiformis*, *Prionospio japonica* 등이었으며, *Sinocorophium sinensis*도 II, III 단계에 새롭게 출현하는 종이였다(Fig. 8).

4. 고 찰

새만금 4호 방조제 연결은 전면부에 위치한 군산 갯벌의 퇴적환경을 크게 변화시켰다. 방조제 연결 전인 2002년 여름과 후인 2005년 여름철 자료 비교에서 퇴적물은 갯벌 하부를 중심으로 많게는 20 cm 정도 축적되었으며 입자크기도 최대 4φ 이상 세립화 되었다. 본 조사지역 갯벌을 포함한 새만금 갯벌의 2004년 단기 퇴적율은 최대 3.4~6.5 cm/yr 였다(우 등 2006). 이는 인공구조물 건설 등으로 인하여 최근 해수순환이 제한되고 상대적으로 유속이 감소한 강화도 남단 동검도 갯벌의 단기 퇴적율 4.8 cm/yr 와 유사한 정도였다(우와 제 2002). 군산 갯벌의 이

Fig. 8. Temporal changes in the densities of opportunistic species in the SA transect during the study period. ★ 1988 data of An and Koh (1992) were re-analysed.

러한 퇴적환경의 변화는 4호 방조제가 연결된 후 지리적 인 영향으로 북측 수역의 조류세기가 감소하여 생긴 결과 였다(우 등 2006). 퇴적환경의 변화와 함께 북측해역 갯벌 에는 고농도의 유기물이 퇴적물에 축적되었다. 북측해역 의 수문학적인 격리로 해수유동이 감소하면서 동진강과 만경강을 통해 새만금 해역으로 유입된 유기물이 본 조사 지역이 위치한 북측해역에 집적된 것으로 판단된다.

이러한 환경변화는 북측해역에 위치한 본 조사지역 갯벌의 대형저서동물에게도 영향을 미쳤다. 저서동물 출현 종수는 2003년 이후 계속하여 감소하는 경향을 보였으 며, 출현 개체수는 계절적인 변동 폭이 컸다. 일반적으로 퇴적환경이 안정된 곳에서는 대형저서동물의 종수는 시간 에 따른 증가 추세를 보인다(Dittmann 2000). 그러나 많은 양의 퇴적물이 쌓여 갯벌 고도가 증가하는 곳에서는 저서 동물의 서식이 제한되어지며(McLachlan 1996), 또한 퇴적 물 입자크기의 변화가 큰 곳에서는 저서동물 밀도 및 종 수가 불안정한 상태를 보이게 된다(Herman et al. 2001). 한편, 퇴적물 내 높은 유기물 함량은 산소를 고갈시키며 궁극적으로는 황화수소나 황화합물을 발생시켜 저서동물 의 분포에 영향을 준다(Groenendaal 1979). 고농도의 유 기물을 함유한 세립질 퇴적물과 함께 급격하게 높아진 고 도가 군산 갯벌 저서동물의 서식을 제한하는 요인으로 작

용한 것으로 여겨진다.

이러한 환경요인의 변화는 저서동물의 종조성 뿐만 아 니라 저서동물 섭식형태의 비율에도 영향을 미칠 수 있다 (Garcia-Arberas and Rallo 2002). 일반적으로 니질 퇴적물 에는 퇴적물식자(deposit feeder)가 우점하고 사질퇴적물 에는 여과물식자(filter feeder)가 우점한다. Rhoads and Young(1970)은 퇴적물식자가 여과물식자의 가입을 방해 한다는 편해공생 가설(trophic group amensalism hypothesis) 을 통해 그 기작을 설명하였고, Whitlatch(1977)는 니질과 니사질 퇴적상에 퇴적물식자가 우점하고 사질퇴적상에 여 과물식자가 우점한다고 하였다. 새만금 갯벌의 저서동물 분포 조사에서도 고도가 낮고 사질퇴적물이 우세한 지역 에서 여과물식자의 비율이 증가하는 경향을 보였다(류 2006). 조사지역인 군산갯벌에서도 4호 방조제 연결 후 퇴 적물의 세립화와 함께 대형저서동물의 종수 및 개체수 면 에서 여과물식자의 비율은 감소하였으며 퇴적물식자의 비 율이 증가하는 경향을 보였다. 특히, 안과 고(1992)의 방 조제 공사 전(1988년) 자료와 비교하여 4호 방조제 완공 후 큰 폭의 저서동물 섭식형태 변화가 있었다. 방조제 공 사 전(1988년) 군산갯벌 퇴적물은 주로 모래로 구성되어 있었으며 여과물식자의 개체수 비율은 56%에 달했다. 그 러나 4호 방조제가 막히고 난 후 2005년에는 그 비율이

15%로 크게 감소되었으며, 반면에 퇴적물식자의 비율은 33%에서 70%로 크게 증가되었다. 4호 방조제가 막히고 난 후 조사지역 갯벌에서 급격하게 개체수 증가를 보인 종의 하나는 퇴적물식자인 *H. filiformis*였다. 이 지역에서 여과물식자의 감소 원인을 류(2006)는 Rhoads and Young (1970)의 가설에 의거하여 *H. filiformis*에 의해 대표적 여과물식자인 이때패류 유생의 착생이 제거되어 점차 여과물식자의 밀도 및 생물량이 감소한다고 추정한 바 있다.

일반적인 자연환경에서 저서동물군집의 시간적인 변화는 한 방향으로 변하는 천이(succession)가 아닌 계절에 따른 순환변동(oscillation)을 보이는 것이 보통이며, 이러한 변동은 저서동물 군집의 성숙도를 잘 반영한다(Arntz and Rumohr 1982). 그러나 조사지역 갯벌의 군집은 계절에 따른 순환 변동 보다는 4호 방조제 연결시점을 전 후하여 천이 현상을 보였다. 이는 환경요인의 계절성 보다는 방조제 공사에 의한 인위적인 효과가 저서동물 군집의 구조에 영향을 주었음을 의미한다. 이런 결과는 천이단계별 우점종의 개체수 변동에서도 확인할 수 있었다. 4호 방조제 연결 후에 사라진 대표적 종은 볼록손모래무지옆새우사촌(*U. convexa*)이었으며, 서해비단고둥(*U. thomasi*), 민뽕점시조개(*M. rutila*), *Aedicira pacifica*, 길게(*M. dilatatus*), 바지락(*R. philippinarum*), 맛(*S. strictus*) 등도 방조제 연결 직후에 군산갯벌에서 자취를 감추었다. 모래 퇴적물을 선호하는 이들 연체동물과 갑각류는 4호 방조제 완공으로 인한 서식지 퇴적물의 세립화 진행으로 개체군 유지를 하지 못한 것으로 여겨진다. 4호 방조제 연결 후에 새롭게 등장한 종 중 펄털콩게 (*I. pingi*)와 짧은가시육질꼬리옆새우(*S. japonicum*)는 4호 방조제 연결 전 동진강의 입구역에 위치한 광활과 우마 갯벌의 펄 퇴적물이 우세한 중부역을 대표하는 종이었다(Koo and Koh 2005). 이 종들은 4호 방조제가 연결되면서 군산 갯벌의 펄 퇴적물 증가와 함께 이 지역까지 서식지를 확대한 것으로 여겨진다. 그리고 2005년 이후 새롭게 등장한 종은 빈모류인 *Oligochaeta* indet.였으며 상부 갯벌에 한정하여 출현하였다. 새만금 방조제가 완공되기 직전인 2005년에는 해수유통량의 감소와 함께 새만금 내해역의 염분이 과거에 비해 크게 감소하였기 때문에(해양수산부 2005), 저염분 환경에서 서식하는 대상종의 출현이 있었던 것으로 여겨진다.

한편, 4호 방조제 연결 후에는 많은 양의 유기물이 퇴적물 내 축적되었다. 퇴적환경의 급격한 변화가 있을 경우뿐만 아니라 퇴적물 내로 공급되는 유기물 양이 퇴적물에서 소비되는 양을 초과하는 경우에도 저서생태계의 교란이 야기될 수 있다. 유기물 농도의 축적은 산소고갈과 황화합물질 생성 등의 이유로 퇴적물 내에 서식하는 생물의 생존에 직접적인 영향을 미친다. 기존 생물의 사망과 함께

교란된 퇴적물에는 유기물 농도에 적응할 수 있으며 생활사 주기가 짧은 오염지시종의 번무가 수반된다(Pearson and Rosenberg 1978). 군산 갯벌에도 4호 방조제 연결 후에 유기물 오염지시종으로 알려진 *H. filiformis*와 *P. japonica*의 개체수 증가 그리고 *S. sinensis*의 새로운 등장이 있었다. 특히, *S. sinensis*는 시화호 간척사업 초기에 수질 악화와 함께 담수화가 한창 진행되던 시기에 극우점종으로 출현하였던 종이다(홍 등 1997). *S. sinensis*는 갯벌뿐만 아니라 인근의 북측해역 조하대에도 높은 밀도로 출현하였다(해양수산부 2006). 이러한 오염지시종의 대량발생은 북측해역의 조류세기가 감소하면서 유기물이 다량으로 유입되었음을 시사한다. 이상에서와 같이 4호 방조제 연결에 의한 수리학적·퇴적학적 환경요인의 변화로 군산 갯벌의 저서동물 군집은 세립한 퇴적물 환경을 선호하는 군집으로 천이하였으며 유기물 오염지시종의 빈도가 증가된 교란된 군집 특성을 보였다.

사 사

본 논문을 세심하게 검토 해 주신 심사위원님께 깊은 감사를 드립니다. 본 연구는 국토해양부 출연사업인 “새만금해양환경보전 대책을 위한 조사연구 - 갯벌생태/패류자원 분야(PM51006)” 연구의 일환으로 수행되었습니다. 본 연구를 위한 현장조사에 도움을 주신 장승호님께 감사드립니다.

참고문헌

- 고철환, 박철, 유신재, 이원재, 이태원, 장창익, 최중기, 홍재상, 허형택. 1997. 해양생물학. 서울대학교출판부, 654 p.
- 구본주, 신상호, 이석. 2008. 급격한 조석 감소에 의한 새만금 갯벌 대형저서동물 변화. *Ocean and Polar Res.*, **30**(4), 485-495.
- 류종성. 2006. 새만금갯벌 저서동물 군집의 대상 분포 및 이를 결정하는 환경요인. 이학박사 학위논문, 서울대학교. 126 p.
- 안순모, 고철환. 1992. 서해 만경-동진 조간대의 환경과 저서동물 분포. *한국해양학회지*, **27**(1), 78-90.
- 우한준, 최재웅, 안순모, 권수재, 구본주. 2006. 새만금 갯벌의 퇴적환경 변화. *Ocean and Polar Res.*, **28**(4), 361-368.
- 우한준, 제종길. 2002. 강화 남부갯벌의 퇴적환경변화. *Ocean and Polar Res.*, **24**(4), 331-343.
- 유육환, 이형근, 이재학. 2006. 인공구조물에 따른 조간대 대형저서동물군집변화. *J. Kor. Fish. Soc.*, **39**, 132-141.
- 임경훈. 2007. 새만금 방조제 건설에 따른 갯벌 저서환경과 대형저서동물 군집 구조의 변동. 이학박사 학위논문, 전

- 남대학교. 440 p.
- 해양수산부. 2004. 새만금 해양환경보전대책을 위한 조사연구(2차년도) - 물리·유동분야. 한국해양연구원, BSPM 195-10-1581-1. 395 p.
- 해양수산부. 2005. 새만금 해양환경보전대책을 위한 조사연구(3차년도) 평가·예측 분야. 한국해양연구원, BSPM 139-06-1514-5. 293 p.
- 해양수산부. 2006. 새만금 해양환경보전대책을 위한 조사연구(2단계 1차년도, 2006). 한국해양연구원, BSPM 37906-1860-3. 207 p.
- 홍재상, 정래홍, 서인수, 윤건택, 최병미, 유재원. 1997. 시화방조제의 건설은 저서동물군집의 시·공간적인 분포에 어떠한 영향을 미쳤는가? *한국수산학회지*, **30**(5), 882-895.
- Arntz, W.E. and H.R. Rumohr. 1982. An experimental study of macrobenthic colonization and succession, and the importance of seasonal variation in temperate latitudes. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **64**, 17-45.
- Bogaards, R.H., J.W. Francke, R.H.D. Lambeck, and C.H. Borghouts-Biersteker. 1980. De afsluiting van de Grevelingen en de gevolgen voor de aan het substraat gebonden macrofauna. *De Levende Natuur*, **3**, 109-118.
- Clarke K.R. and R.M. Warwick. 2001. Change in Marine Communities: An Approach to Statistical Analysis and Interpretation (2nd ed.). Plymouth Marine Laboratory, UK.
- Dittmann, S. 2000. Zonation of benthic communities in a tropical tidal flat of north-east Australia. *J. Sea Res.*, **43**, 33-51.
- Garcia-Arberas, L. and A. Rallo. 2002. The intertidal soft-bottom infaunal macrobenthos in three Basque estuaries (Gulf of Biscay): A feeding guild approach. *Hydrobiologia*, **475/476**, 457-468.
- Groenendaal, M. 1979. On sulphide and the distribution of *Arenicola marina* in a tidal mud flat in the Dutch Wadden Sea. *Neth. J. Sea Res.*, **13**, 562-570.
- Herman, P.M.J., J.J. Middelburg, and C.H.R. Heip. 2001. Benthic community structure and sediment processes on an intertidal flat: results from the ECOFLAT project. *Continental Shelf Res.*, **21**, 2055-2071.
- Jaramillo, E., H. Contreiras, and A. Bollinger. 2002. Beach and faunal response to the construction of a seawall in a sandy beach of South Central Chile. *J. Coast. Res.*, **18**, 523-529.
- Koh, C.H. and H.C. Shin. 1988. Environmental characteristics and distribution of macrobenthos in a mudflat of the west coast of Korea (Yellow Sea). *Neth. J. Sea Res.*, **22**, 279-290.
- Koo, B.J. and C.-H. Koh. 2005. Macrobenthic communities and their associated environments on Saemangeum tidal flat in the west coast of Korea. 31 p. In: *Proceedings from the 11th Scientific Wadden Sea Symposium*, Esbjerg, Denmark, April 4-8. Ministry of the Environment, Denmark.
- Koo, B.J. and J.G. Je. 2002. A preliminary study on changes in macrobenthic assemblages in the fenced experimental plots for restoring tidal marsh, Hogok-ri tidal flat, west coast of Korea. *Ocean and Polar Res.*, **24**, 63-71.
- Lee, H.J., Y.S. Chu, and Y.A. Park. 1999. Sedimentary processes of fine-grained material and the effect of seawall construction in the Daeho macrotidal flat-nearshore area, northern west coast of Korea. *Mar. Geol.*, **157**(3/4), 171-184.
- Lie, H.-J., C.-H. Cho, S. Lee, E.-S. Kim, and B.J. Koo. 2008. Changes in marine environment by a large coastal development of the Saemangeum Reclamation Project in Korea. *Ocean and Polar Res.*, **30**(4), 475-484.
- McLachlan, A. 1996. Physical factors in benthic ecology: Effects of changing sand particle size on beach fauna. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **131**, 205-217.
- Pearson, T. H. and R. Rosenberg. 1978. Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, **16**, 229-311.
- Raffaelli, D. and S.J. Hawkins. 1996. Intertidal ecology. Chapman & Hall, 356 p.
- Rhoads, D.C. and D.K. Young. 1970. The influence of deposit-feeding organisms on sediment stability and community trophic structure. *J. Mar. Res.*, **28**, 150-178.
- Rossi, F., S. Como, S. Corti, and C. Lardicci. 2001. Seasonal variation of a deposit feeder assemblage and sedimentary organic matter in a brackish basin mudflat (western Mediterranean, Italy). *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **53**, 181-191.
- Simboura, N., A. Zenetos, P. Panayotides, and A. Makra. 1995. Changes in benthic community structure along an environmental pollution gradient. *Mar. Pollut. Bull.*, **30**, 470-474.
- Swinbanks, D.D. and J.W. Murray. 1981. Biosedimentological zonation of Boundary Bay tidal flats, Fraser river delta, British Columbia. *Sedimentology*, **28**, 201-237.
- Thomalla, F. and C.E. Vincent. 2003. Beach response to shore-parallel breakwaters at Sea Palling, UK. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **56**, 203-212.
- Warwick, R.M. and K.R. Clarke. 1991. A comparison of some methods for benthic community structure. *J. Mar. Biol. Ass. U. K.*, **71**, 225-244.
- Whitlatch, R.B. 1977. Seasonal changes in the community structure of the macrobenthos inhabiting the intertidal

sand and mud flats of Barnstable Harbor, Massachusetts.

Biol. Bull., **152**, 275-294.

Ysebaert, T., P. Meire, J. Coosen, and K. Essink. 1998.

Zonation of intertidal macrobenthos in the estuaries of

Schelde and Ems. *Aquat. Ecol.*, **32**, 53-71.

Received Oct. 16, 2008

Accepted Nov. 30, 2008