

## Article

## 새만금방조제 축조에 따른 지형 및 입도특성의 변화

이희준<sup>1\*</sup> · 조형래<sup>2</sup> · 김민지<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국해양연구원 해양환경연구본부  
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29호  
<sup>2</sup>안동대학교 지구환경과학과  
(760-749) 경상북도 안동시 송천동 388

## Topographical Changes and Textural Characteristics in the Areas Around the Saemangeum Dyke

Hee Jun Lee<sup>1\*</sup>, Hyung Rae Jo<sup>2</sup>, and Min Ji Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Marine Environment Research Department, KORDI  
Ansan, P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

<sup>2</sup>Department of Earth and Environmental Sciences  
Andong National University, Andong 760-749, Korea

**Abstract :** The topography of the sea floor and textural characteristics of surface sediments are documented in areas off sectors 1, 2, and 4 of the Saemangeum dyke and inside the dyke. These were investigated during the years 2002 to 2005, when the dyke construction almost came to an end, and were compared with natural topographic analogs before the dyke construction from the maritime maps of 1982 and 1994. Along and across the dyke are a number of erosional troughs formed by intensified currents during the dyke construction. The sea floor off sector 4 has undergone gradual accumulation of sands moving from the north by currents varying in direction from normal to parallel to the dyke. This is in a strong contrast with a slight erosional environment prevailing over the sea floor before dyke construction. Off sectors 1 and 2, a topography with an alternative pattern of erosional troughs and sand shoals develops normal to the dyke. Eroded materials from the troughs seem to have added to the sand shoals. As a result, the troughs, former natural tidal channels, have become increasingly deeper, whereas the sand shoals have become somewhat shallower. The sea floor inside the dyke has also been remarkably shallower with expanding tidal flats due to trapping by the dyke of continuous sediment input from the Dongjin and Mangyeong rivers. Sands, all of which are considered to have originated originally from the two rivers, dominate the entire Saemangeum area.

**Key words :** topography, texture, Saemangeum dyke, dyke effect, Yellow Sea

## 1. 서 론

하구역(Estuary) 환경은 하천수와 해수가 만나는 전이 지대로 조류와 파랑의 영향을 받으며 육상기원 퇴적물이 해양으로 유입되는 곳이다(Schubel and Kennedy 1984;

Dyer 1989). 해양지질학적으로 하구역은 삼각주와는 다른 환경으로 분류되며, 여러 가지 환경요인들이 작용하는 곳이기 때문에 하구역에 대하여 다양한 정의가 제시되어 왔다(Pritchard 1967; Dalrymple *et al.* 1992). 전세계적으로 하구역은 대도시들이 발달하고 경제활동이 극히 활발한 지역 중의 하나이기 때문에 퇴적물 이동과 퇴적 현상이 국가적인 차원에서 지대한 관심 대상이 될 수 밖에 없다.

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

새만금 해역은 만경강과 동진강에 의해 주도되는 자연 하구역으로 바로 북쪽의 금강보다는 퇴적물 유입이 작기 때문에 상대적으로 퇴적학자의 관심을 끌지 못하였다. 그러나 방조제 건설이 시작되면서 두 개의 강으로부터 유입되는 모래와 부유물질은 예상보다 커다란 영향을 주고 있음을 곧 깨닫게 되었다(해양수산부 2004). 또한, 방조제 자체에 의해 주변의 해류 패턴과 지형의 변화가 두드러지게 되었고, 방조제 남측의 연안환경이 직, 간접적으로 퇴적물유입의 차단으로 말미암아 미래의 장, 단기적 환경변화를 예측하기 힘든 상황이 되었다(해양수산부 2005). 이러한 새만금 방조제 건설은 전세계적으로 그 유래를 찾아볼 수 없는 거대 규모의 하구 건설사업으로서 이와 비슷한 규모의 인공구조물로 인한 하구 환경변화를 퇴적학적으로 다룬 외국의 연구사례는 문헌에서 찾아보기가 매우 힘들다. 중국 양자강의 경우, 하천내의 댐 건설과 관개시설로 인한 하천수의 이용이 급증함으로써 전반적으로 하천의 부유물질량이 크게 줄어들 것이라는 연구결과가 발표되었으나(Yang *et al.* 2002), 하구역의 공사와 관련된 환경변화는 아니다. 그 외에는 인공구조물에 의한 소규모 지질 및 수리환경변화가 이따금 보고되고 있을 뿐이다(Plant and Griggs 1992; Kang 1999; Miles *et al.* 2001; Ruggiero and McDougal 2001; El-Asmar and White 2002; Jaramillo *et al.* 2002; Thomalla and Vincent 2003). 따라서 새만금 방조제 근처에서 일어나는 퇴적환경 변화는 인공구조물이 해양에 가할 수 있는 여러 가지 영향을 잘 보여주는 좋은 실험장이 되며 이를 체계적으로 밝히는 것은 향후 수행될 수 있는 서해안과 남해안의 연안역 개발에 중요한 본보기와 지침이 될 것이다.

본 연구에서는 지난 3년간 획득한 새만금방조제 주변 해역에 대한 수심도와 퇴적물 시료를 바탕으로 방조제에 의한 지형변화와 표층퇴적물의 입도변화를 제시하였다. 이들 자료를 통하여 방조제 건설로 인하여 새만금 해역에서 기본적인 퇴적환경이 어떻게 변화되었는가를 정리하고자 하였다.

## 2. 조사해역

조사해역은 새만금 방조제 내외측의 하구역과 연안으로 방조제의 영향을 받는 곳으로 간주되고 있다(Fig. 1). 기본적으로, 만경, 동진강 하구로부터 연장된 큰 사주들이 외해 또는 연안 쪽으로 방사선 형태로 발달하고 있는 것이 새만금해역의 특징이며, 이들 사주 사이에 수로들이 존재한다. 방조제 건설 전에는 북쪽 수로와 남쪽 수로들이 서로 다른 조류의 비대칭을 보여, 전체적으로 반시계 방향으로 순환하는 양상을 보인다고 보고되었다(Park *et al.* 1991). 또한 피스톤 코어분석에 의하면 방조제 건설 전에

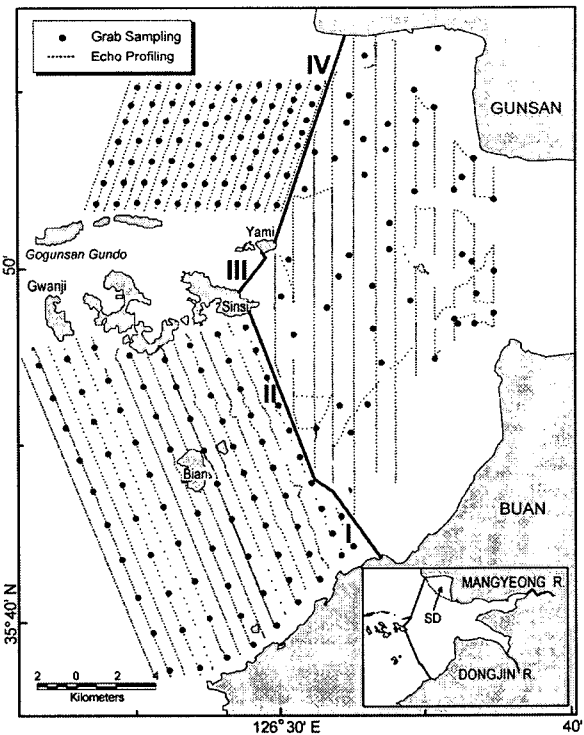


Fig. 1. Map showing the study area with locations of echo sounding and grab sampling. SD = Sandong tidal flat.

는 만경과 동진강에서 공급된 조립질 퇴적물이 주로 하구나 인근 연안에 퇴적되며 대체적으로 수심 10 m 보다 깊은 외해 쪽으로는 거의 분포하지 않는다는 것이 밝혀졌다(Lee 1986). 일반적으로 서해 연안과 조간대에서는 겨울철에 강한 파랑과 조류의 복합적인 영향으로 사주의 모래가 왕성하게 이동되지만 여름철에는 어느 한 방향으로의 순수이동은 거의 없는 것으로 보인다(한국해양연구소 1993; 농어촌진흥공사 1998). 반면 금강, 만경강, 동진강에서 유출된 부유퇴적물은 주변 연안의 조간대와 소규모 만에 쌓이는 것은 물론, 겨울철에 상당부분이 재동되어 위도와 왕동도 사이를 지나 우리나라의 서남해안을 감싸며 발달하고 있는 수심 20~60 m의 흑산나대에 공급되는 것으로 보고 있다(Lee and Chough 1989; Lee and Chu 2001).

탄성과 탐사와 시추공 분석에 의하면, 조사해역은 대부분 20~40 m 두께의 제4기 퇴적층이 음향기반(acoustic basement)을 덮고 있으며 조사해역 전체에 걸쳐 광역적으로 3개의 반사면이 발달하고 있다(농림수산부 1994). 상부에서부터 R1, R2, R3로 명명되었으며, 이에 따라 조사해역의 제4기 퇴적층은 상부에서부터 퇴적단위 A1, A2, A3 그리고 B의 4개로 구분된다. 표면에서 최초로 나타나는 반사면 R1은 해저 아래 6~8 m 깊이에서 비교적 평탄하게 발달하고 있으며, 그 하부의 반사면 R2와 부분적으로 일

치하기도 한다. 반사면 R1과 R2는 퇴적이 일어나는 환경에서 생성된 것으로 보이나, 반사면 R3는 지형적인 기복이 심하고 표면에 다수의 고수로가 발달하고 있기 때문에 해수면 하강 시 대기에 노출되면서 생성된 침식면으로 해석된다(농림수산부 1994). 이들 각 퇴적단위와 반사면에 대한 자세한 기술과 순차층서학(sequence stratigraphy) 적으로 해석한 결과는 한국해양연구소(1999)에서 볼 수 있다.

새만금방조제 외측해역의 조석은 조석형태수가 0.2~0.25로서 반일주조형으로 일반적으로 1일 2회조로 나타난다(농림부 1997). 평균조차는 4.26 m이고 평균해수면은 -0.033 m로서 인천 해수면보다 낮으며 평균고수위는 3.19 m, 평균저수위는 -2.55 m이다(국립지리원 1981). 조류는 반일주조류가 주된 부분을 이루고 있으며 일일주조류와 반일주조류의 비는 0.2 미만으로 1일 2회의 창조류와 낙조류가 일어나는 왕복성 조류이다(농림부 1997). 1992년부터 1997년까지 관측된 파랑의 최대유의파고는 6.58 m(주기는 9.8 sec)로 북서풍이었다(농림부 1997). 최대 파랑은 주로 겨울에 나타나며, 북서풍이 전 계절을 통해 가장 우세하고 특히 11, 12월에는 풍속이 7m/s 이상의 바람이 잦다. 북동풍은 북서풍에 비해 세기가 훨씬 약하며 봄과 가을에 우세하게 분다. 남동풍은 계절에 관계없이 2.5 m/s 정도의 가장 약한 바람이며 전체 계절의 10% 미만으로 가장 적게 나타난다(최 1994).

### 3. 연구재료 및 분석방법

조사해역이 방대하기 때문에 수심측량은 각 해역별로 나누어서 이루어졌으며, 각 조사해역에서의 수심관측선과 표층퇴적물 채취지점은 Fig. 1에서 볼 수 있다. 퇴적물 시료는 각 해역에서 수심관측선을 따라 격자 모양으로 배치된 지점에서 채취하였다.

해저지형조사에는 음향측심기(echo sounder, RESON사 NAVISOUND 215)를 사용하였다. 측정된 수심자료는 국립해양조사원 군산외항 검조소의 조위관측값을 이용하여 기본수준면(약최저저조면)하의 수심으로 경정하였으며, 실측값이 없는 조사측선 사이 해역에 대해서는 보간법

(interpolation)으로 수심을 구하였다. 각 해역에 대한 조사 기간과 수심측량의 총길이는 Table 1에 정리하였다. 장기적인 지형변화를 분석하기 위하여 국립해양조사원에서 1982년에 발간한 해도를 디지털화한 후에 2002~2005년에 관측된 지형들과 비교하였다.

표층퇴적물의 시료는 실험실에서 입도 분석하였다. 퇴적물 시료 약 5 g 정도를 1,000 ml 비아커에 넣은 후 10% 과산화수소수( $H_2O_2$ )로 반응시켜 유기물을 제거하였다. 그리고 조개 파편과 같은 탄산염 물질을 제거하기 위하여 0.1 N 염산(HCl) 용액을 첨가하여 반응시켰다. 이러한 전처리를 거친 후 4 $\phi$ 체를 이용한 습식체질(wet sieving)로 모래의 조립질과 실트와 이토의 세립질 퇴적물로 분리하였다. 조립질 모래 퇴적물은 건조시킨 다음 건식체질(dry sieving)에 의하여 0.25 $\phi$  간격으로 분리하여 각각 무게를 측정하였다. 세립질 이토 퇴적물은 약 2 g의 시료를 채취하여 초음파 분쇄기와 자성 막대로 시료를 고르게 분산시킨 다음 자동입도분석기인 Sedigraph 5100(Micrometrics 사)으로 분석하였다. 각기 다른 방법으로 분석된 조립질과 세립질 퇴적물을 통일된 무게 백분율로 통합한 다음, 모멘트 방법에 따라 작성된 프로그램을 이용하여 퇴적물의 평균입도, 분급도, 왜도 및 첨도 등을 계산하고, 역, 모래, 실트, 점토 등의 상대적 구성 비율을 구하였다. 퇴적상의 분류는 Folk(1968)의 방법을 따랐다.

### 4. 4호 방조제 외측해역

#### 해저지형

2002년도 해저지형은 Fig. 2A에서 볼 수 있다. 전체적으로 수심은 4~13 m의 범위를 보이며, 조사해역의 남서단인 고군산군도 북측에 수심 40 m 이상의 골짜기가 국부적으로 발달한다. 방조제로부터 대략 4 km 이상의 외해 해역은 바다 쪽으로 서서히 수심이 깊어지는 평탄한 지형을 보인다. 반면, 4 km 이내의 방조제 인접해역에서는 동서방향 내지 불규칙한 모양의 골짜기가 발달한 복잡한 지형을 보이며, 방조제에 접근할수록 수심이 급속히 깊어진다. 북측과 남측에 얕은 지형이 분포하고(최소수심 3 m), 당시의 방조제 개방부 쪽으로 깊어지는 경향을 보인다. 개

Table 1. Summary of topographic investigations and surface-sediment sampling.

Area	Topography		Sediment sampling	
	Duration	<sup>a</sup> Length (km)	Duration	Number
Offshore sectors 1 and 2	4-9 May 2003	190	25-26 May 2003	82
Offshore sector 4	4-6 Sep. 2002	130	6-7 Sep. 2002	72
	26-30 Mar. 2005	130	31 Mar.-1 Apr. 2005	72
Inside dyke	4-7 Aug. 2003	170	7-9 Aug. 2003	46

<sup>a</sup>Line-kilometers of echo sounding.

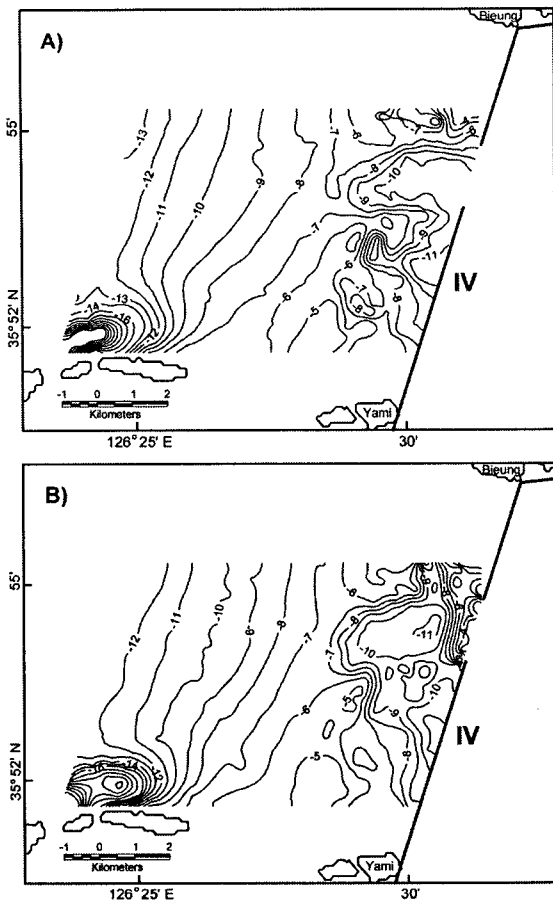


Fig. 2. Topography off sector 4 of the Saemangeum dyke in (A) September 2002, and (B) March 2005. Depth in meter relative to the lowest low water level.

방부 전면에 발달한 동-서 방향의 골짜기는 폭 2.5 km, 길이 4.5 km 정도이며, 최대수심은 11 m 이상이다(Fig. 2A). 이 골짜기의 남측에 또 다른 큰 골짜기가 발달하는데, 방조제와 평행한 방향으로 약 4.5 km, 동서방향으로 약 2 km의 너비를 가지며, 중심부의 수심은 12 m 이상에 이른다. 그 외에도 방조제에서 2~3 km 떨어진 해역에 상대적으로 소규모의 골짜기들이 국부적으로 분포하며 최대수심은 8~10 m 정도이다(Fig. 2A). 소나 영상에 의하면, 개방부 전면 골짜기 서쪽 끝인 수심 9 m 정도의 해저면에 파형의 층면구조(*bedform*)가 발달하고 있음이 밝혀졌다(해양수산부 2003). 이들의 파장은 10~30 m이며 높이는 0.4~1.0 m이고 남서쪽으로 전진하는 것으로 해석된다.

2005년도 해저지형은 Fig. 2B에서 볼 수 있다. 전반적인 지형분포는 2002년도와 매우 유사하지만 두 개의 지형도를 비교한 결과, 일부 해역에서 상당한 변화가 보인다

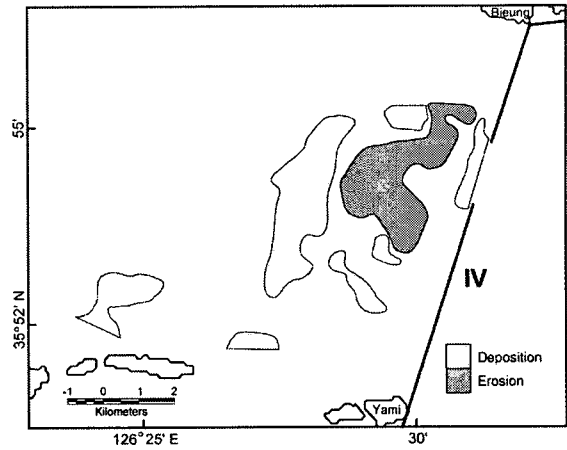


Fig. 3. Distribution of areas of erosion and deposition during the period of September 2002-March 2005. The remainder shows topographical changes below the estimated accuracy of  $\pm 0.5$  m.

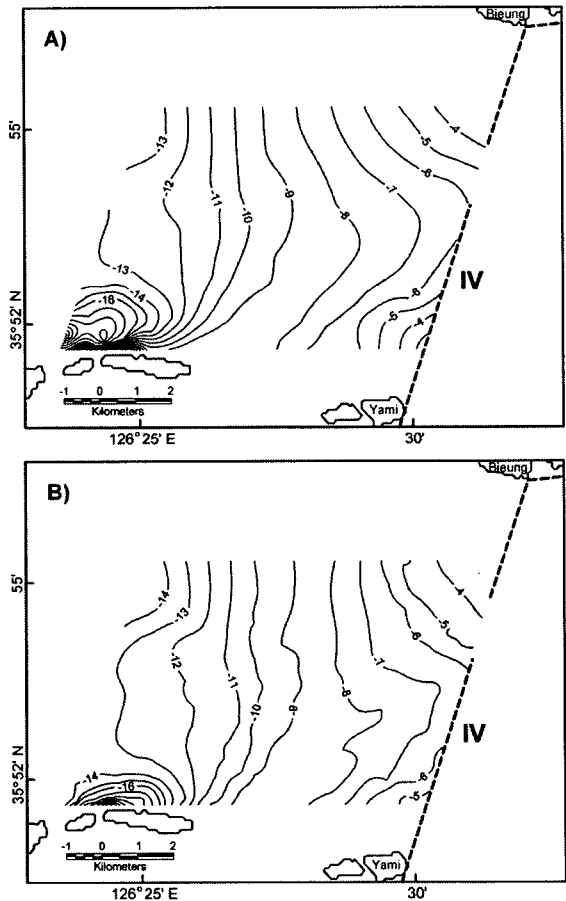


Fig. 4. Topography of the years (A) 1982 and (B) 1994. Digitized from the corresponding maritime map. Depth in meter relative to the lowest low water level. Dotted line denotes the location of the present dyke.

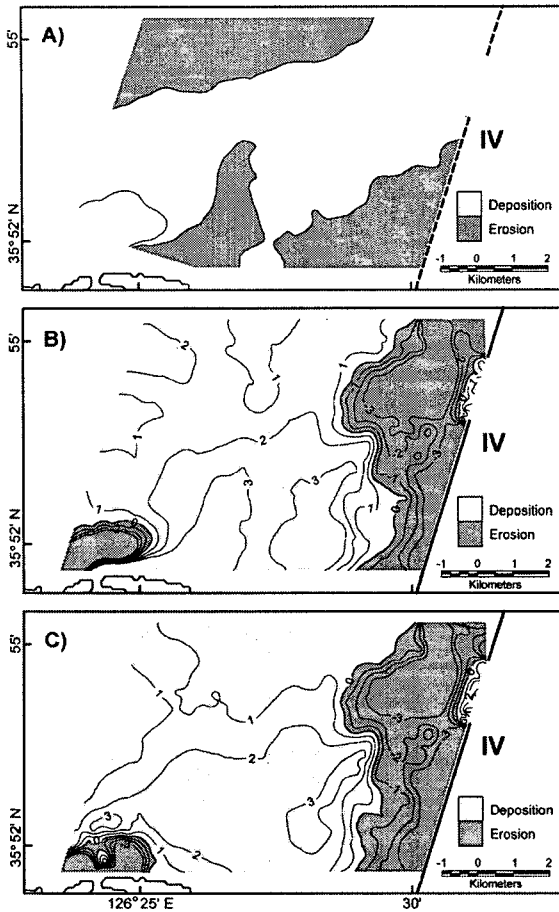


Fig. 5. Distribution of areas of erosion and deposition during the periods of (A) 1982-1994, (B) 1994-2005, and (C) 1982-2005. (A) The remainder shows topographical changes below the estimated accuracy of  $\pm 0.5$  m. Dotted line denotes the location of the present dyke. (B) and (C) Negative values indicate the amounts of depth increase by erosion, whereas positive ones indicate the amounts of depth decrease by deposition. Values in meter.

(Fig. 3). 지난 3년 동안에 골짜기를 중심으로 침식이 일어났으나 외해역의 일부와 골짜기 주변부에서는 퇴적이 일어났다. 이러한 단기간의 변화 파악에 있어서 조석보정과 수심측정에 수반되는 불확실성을 감안하여 약 50 cm의 오차를 설정하였으며, 이 값보다 큰 변화만을 도시하였다 (Fig. 3). 이와 아울러, 방조제 건설 전후의 지형변화를 알아보기 위하여 1982년과 1994년에 발간된 해도(상왕등도)에서 어청도, 고군산군도 및 부근(Fig. 4)들을 2005년도 해저지형과 함께 서로 비교하였다(Fig. 5). 그 결과, 4호 방조제로부터 4 km 외측해역은 방조제가 건설되기 전에는 점진적으로 침식이 일어나는 환경이었으나(Fig. 5A)

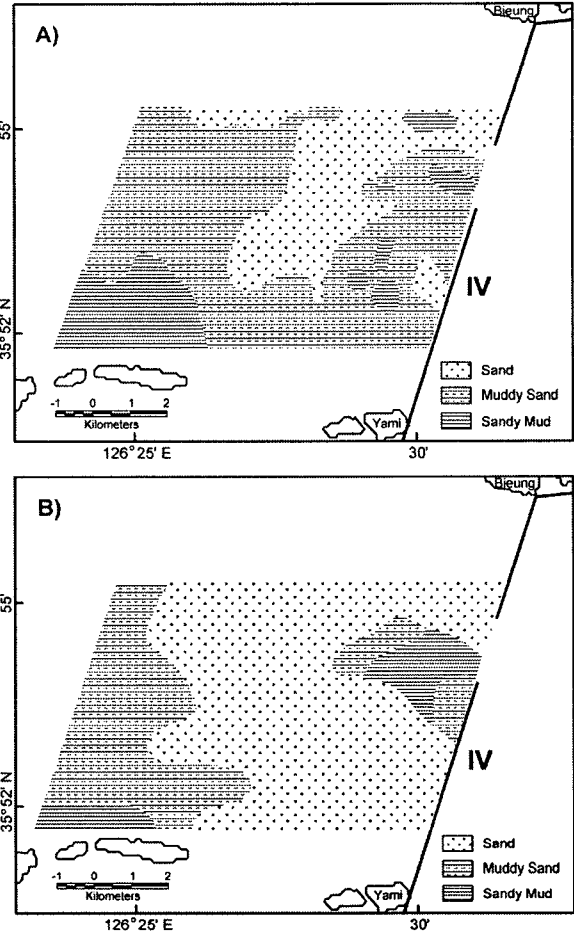


Fig. 6. Distribution of surface sediment facies off sector 4 of the Saemangeum dyke in (A) September 2002, and (B) March 2005. According to Folk's (1968) scheme.

건설 후에는 급격히 퇴적환경으로 바뀌었음을 알 수 있다 (Fig. 5B, C).

입도특성

조사해역에 대한 2002년 9월 표층퇴적물의 퇴적상 분포는 Fig. 6A에서 볼 수 있다. 가장 두드러진 퇴적상은 조사해역 중앙부에 넓게 분포하는 모래층으로서, 대부분 100%에 가까운 모래 함량을 보이고 있다. 평균입도의 범위는 1.3~3.3 $\phi$ 이며 평균값은 2.81 $\phi$ 가 된다. 사질펄(sandy mud) 퇴적상은 고군산군도 바로 북쪽해역의 가장 깊은 곳을 포함한 주변부에 주로 분포하고 있다(Fig. 6A). 또한 방조제의 개방부 바로 전면에 존재하는 골짜기의 가장 깊은 곳과 주변의 다른 골짜기에 국부적으로 나타난다. 이들 사질펄 퇴적상은 10~50%(평균 34%)의 모래, 30~35%(평균 46%) 실트 그리고 10~35%(평균 20%)의 니트로 구성

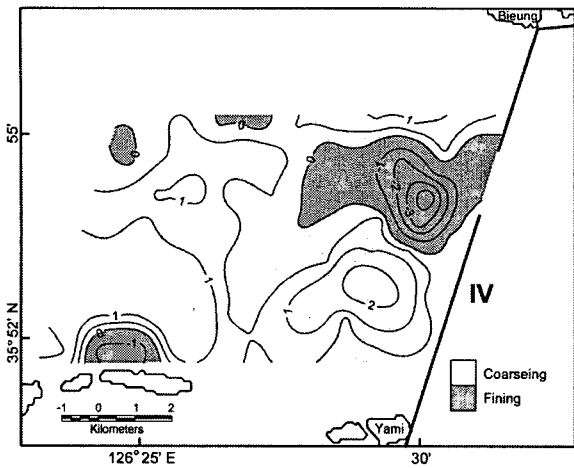


Fig. 7. Distribution of changes in mean grain size during the period of September 2002-March 2005. Positive and negative values (unit,  $\phi$ ) stand for the amount of becoming coarser and finer relative to the size of 2002, respectively.

되어 있다. 평균입도는 5.2~7.3 $\phi$ 의 범위를 가지며 평균값은 5.90 $\phi$ 이다. 나머지 조사해역은 가장 흔한 펄질모래 (muddy sand) 퇴적상으로서 모래 50~90%(평균 74%), 실트 5~45%(평균 20%), 그리고 니트는 0~25%(평균 6%)의 범위를 갖는다. 이에 따라 평균입도는 3.3~5.5 $\phi$ (평균 4.06 $\phi$ )로 미세모래 또는 실트로 대변된다.

2005년 3월 표층퇴적상 분포는 Fig. 6B에서 볼 수 있다. 2002년 분포에 비해 모래퇴적상이 크게 확장된 것이 두드러진다. 그러나 방조제 개방부 전면의 골짜기에서는 사질펄 퇴적상이 약간 확장되었다. 이와 같이 모래 영역이 확장됨으로써 전반적으로 퇴적상의 분포가 상당히 단순해졌으며 대부분의 해역에서 입도가 조립해졌음을 알 수 있다(Fig. 7).

### 5. 1, 2호 방조제 외측해역

#### 해저지형

2003년 해저지형은 방조제의 영향을 잘 보여주고 있다 (Fig. 8A). 전체적으로 수심은 1~35 m의 범위를 보이며, 방조제와 수직인 북동-남서 방향으로 골짜기 지형이 발달하고 골짜기 사이에는 얇은 지형이 분포하는 특성을 보인다. 이러한 지형특성은 방조제로부터 외해 쪽으로 약 8~9 km 범위 내에서 뚜렷하며, 보다 외해 지역은 수심 8~12 m로 완만한 지형을 보인다. 신시도 남측의 신시 개방부에 발달한 골짜기가 가장 깊은 수심을 보이는데, 방조제 전면에서 최고수심 35 m가 되며 무녀도 남측에서도 수심이 28 m에 이른다(Fig. 8A). 이 골짜기는 외해 쪽으로

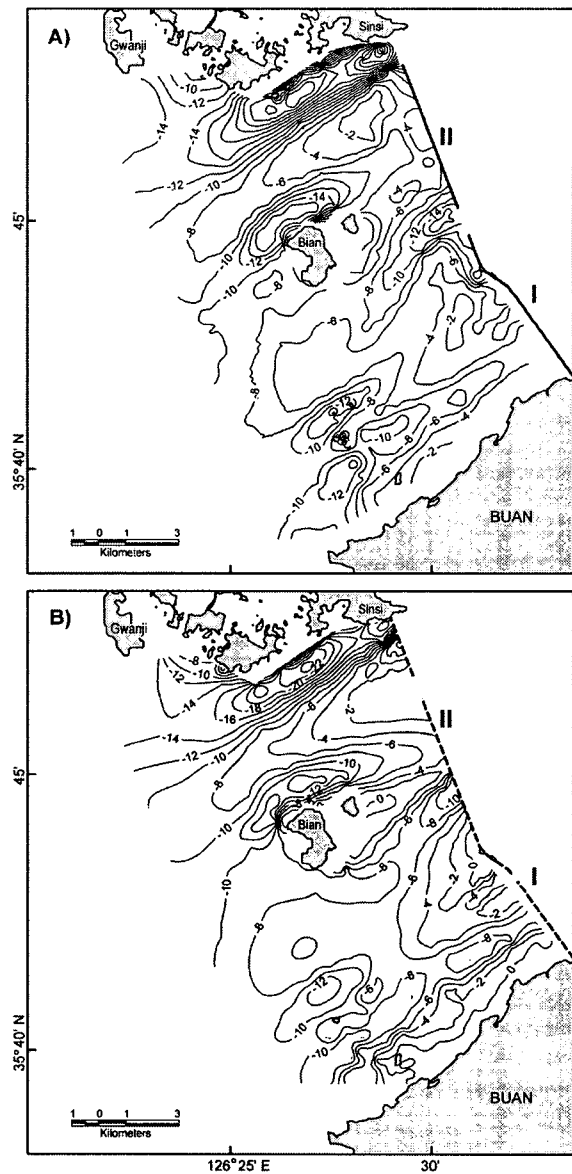


Fig. 8. Topography off sectors 1 and 2 of the Saemangeum dyke in (A) 2003 and (B) 1982. Depths in meter relative to the lowest low water level.

가면서 알아져 관지도 남측에서는 골짜기 형태가 사라진다. 가력도 개방구간 전면에서도 최고수심 17 m의 골짜기가 발달해 있다(Fig. 8A). 이것 또한 외해 쪽으로 알아져서 비안도 남쪽에서 골짜기 형태가 희미해진다. 그 외에 비안도 바로 북측과 변산반도 근처에 비교적 작은 골짜기들이 나타나고 있다. 골짜기 사이의 얇은 지형 또한 전체적으로 북동-남서의 방향성을 보인다(Fig. 8A). 방조제에 가까운 해역은 대체로 수심이 1~4 m 정도이고 외해 방향으로 수심이 서서히 깊어지는 경향을 보인다. 변산반도 해

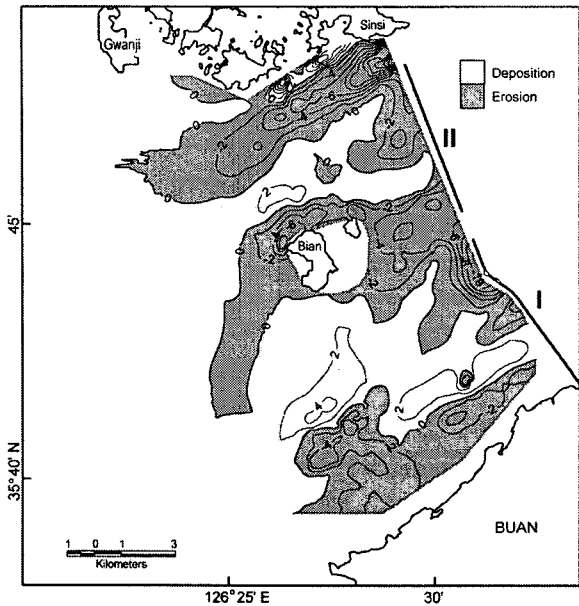


Fig. 9. Distribution of areas of erosion and deposition during the period of 1982-2003. Negative values indicate the amounts of depth increase by erosion, whereas positive ones indicate the amounts of depth decrease by deposition. Values in meter.

안에서 0.5~1.0 km 이내에서는 수심이 2 m 이내로 매우 얇다.

1982년에 발간된 해도(상왕등도에서 어청도)에 나타난 해저지형은 전반적으로 2003년 지형과 비슷하다(Fig. 8B). 신시도의 남측, 비안도의 북측과 남측, 그리고 변산반도 근처에 북동-남서 방향의 골짜기가 발달해 있고 골짜기 사이는 얇은 지형으로 구성되어 있는 등 전체적인 지형특성은 2003년 지형과 크게 다르지 않다. 그러나 골짜기와 얇은 곳 모두 수심이 상당히 달라졌으며, 특히 방조제로부터 3~4 km 이내의 인접해역에서 큰 수심변화를 보인다(Fig. 9). 방조제 건설로 말미암아 골짜기는 더욱 깊어졌으며 골짜기 사이는 더욱 얇아졌다. 신시도 개방부 전면의 골짜기는 최고 20 m 이상의 수심증가를 보이며, 가력 개방부의 골짜기도 최고 12m가 깊어졌다. 반면 골짜기 사이에서는 대개 4 m 이내의 수심감소를 보인다(Fig. 9).

**입도특성**

1, 2호 방조제 외측해역에서 표층퇴적물은 모래가 우세한 퇴적상을 보인다(Fig. 10). 비안도를 중심으로 가운데 위치하는 실트질 모래상과 고군산군도와 변산반도 쪽으로 각각의 모래상이 삼등분하고 있다. 그러나 신시 개방부 근처에서는 자갈을 일부 함유한 펄질 모래가 나타나고, 가력 개방부 근처에서는 펄이 드러나 있다(Fig. 10). 1호 방조제 기점과 변산반도로 둘러싸인 대항리 조간대 바로 전면

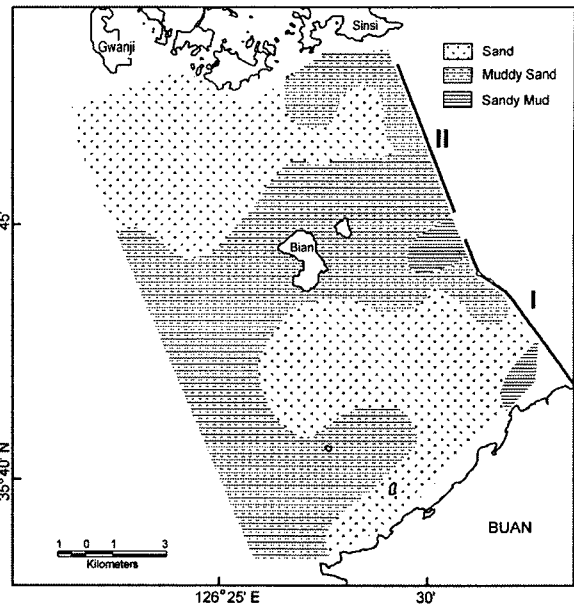


Fig. 10. Distribution of surface sediment facies off sectors 1 and 2 of the Saemangeum dyke in May 2003. According to Folk's (1968) scheme.

에는 실트가 퇴적되어 있다. 고군산군도 근처의 모래상은 모래량이 60~100%이고 실트 1~25%, 니토 0~10%로 평균값은 모래 92%, 실트 6%, 니토 2%가 된다. 변산반도의 근처의 모래상도 모래량이 85~100%, 실트 0~10%, 니토 0~5%로 평균값들이 고군산군도 근처의 모래상과 매우 유사하다. 이들 모래의 평균입도는 2.5~3.5 $\phi$ (평균 3.0 $\phi$ )이다. 조사해역 가운데 분포하는 실트질 모래 또는 모래질 실트상은 모래량이 20~90%, 실트 5~60% 그리고 니토는 0~20%의 범위를 가지며 평균값은 각각 62%, 30% 그리고 8%가 된다. 평균입도는 3.5~6.0 $\phi$ (평균 4.3 $\phi$ )의 범위를 갖는다.

**6. 방조제 내측해역**

**해저지형**

방조제 내측의 북부와 남부 등 수심이 낮거나 양식장이 설치되어 있어 접근이 어려운 해역을 제외한 전체 해역에 대해 2003년도 해저지형도를 작성하였다(Fig. 11A). 전체적으로 하구로부터 방조제를 향해 방사상으로 수로와 얇은 지형이 발달하는 특성을 보인다. 수로를 제외하면 대부분 해역이 수심 2 m 이하이며, 방조제 근처에서 수심이 깊어지는 특성을 보인다. 0 m의 등수심선은 약최저저조면을 나타내므로 이보다 얇은 지역은 조간대로 볼 수 있다. 이에 따라 조간대가 방조제 내측에 매우 넓게 발달하고 있음을 알 수 있다.

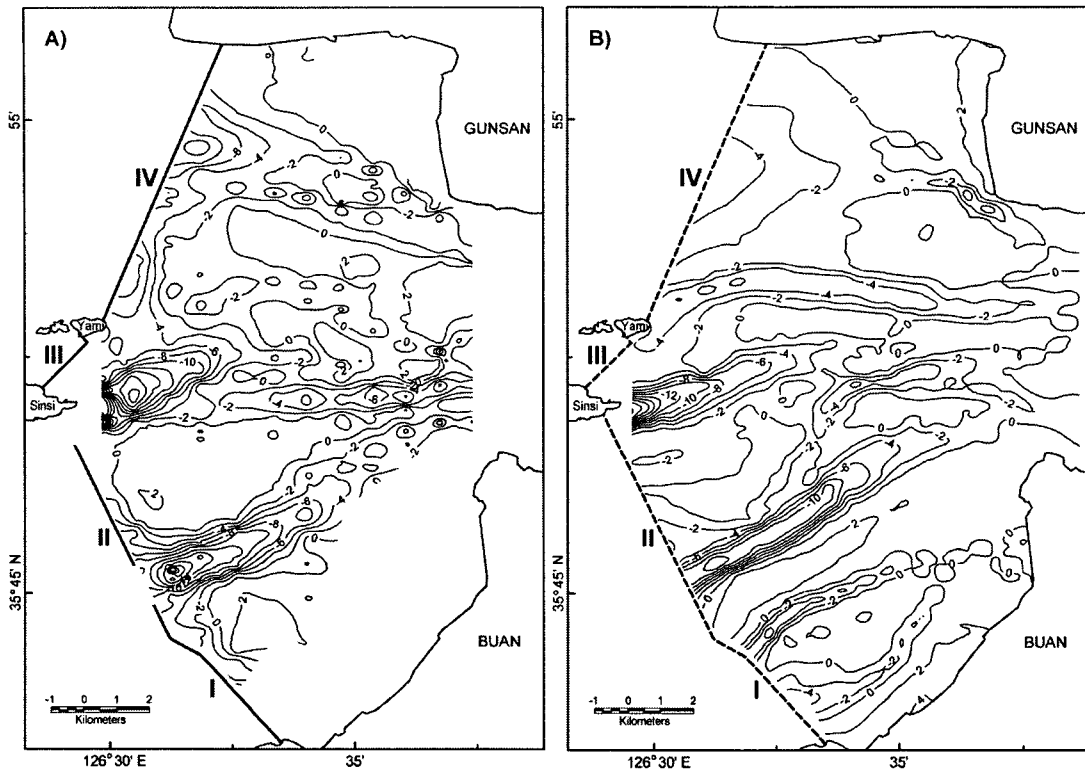


Fig. 11. Topography of areas inside the Saemangeum dyke in (A) 2003 and (B) 1982. Ship-borne data are lacking on much of the tidal flat owing to extreme shallowness. Depths in meter relative to the lowest low water level.

하구로부터 방조제를 향해 3개의 수로가 발달하고 있다 (Fig. 11A). 가력개방부를 향해 북동-남서 방향으로 발달한 수로가 가장 큰 규모를 보이는데, 방조제 방향으로 수심이 깊어져 최대 22 m 깊이에 이른다. 신시개방부를 향해 동-서 방향으로 발달한 또 하나의 수로는 하구 근처에서 최대 8 m의 수심을 보이고 서쪽으로 알아지는 경향을 보이다가 신시도 동측에 발달한 깊은 골짜기(최대 수심 약 20 m)로 이어진다. 4호 방조제의 중앙을 향해 북서-남동 방향으로 발달한 수로는 수심 2~6 m 정도로 얇은 편이다.

1982년도 해도(Fig. 11B)와 2003년도 해저지형을 비교하였다. 전반적으로 퇴적이 우세하게 일어났으나, 수로를 중심으로 침식이 진행된 것으로 나타난다. 조사해역의 북부와 남부 그리고 중부의 조간대 지역을 중심으로 퇴적에 의해 수심이 얕아졌는데, 대개 6 m 이내의 수심 감소를 보여준다. 1호 방조제 동측에서는 1982년에 발달해 있었던 수로가 퇴적에 의해 없어지고 대부분 얇은 조간대 지역으로 바뀐 변화를 보인다. 침식은 수로와 방조제 인접해역에서 일어났는데, 대개 6 m 이내의 범위에서 수심이 증가하였으나 신시와 가력 개방부의 동측에서는 10 m 이상에 달하는 수심변화를 보인다(Fig. 11A, B). 1982년에 야

미도 동측에 동서 방향으로 발달하였던 수로는 2003년에는 0~6 m 정도의 퇴적에 의해 사라졌으나, 4호 방조제 중앙부 동측에 새롭게 수로가 발달하였다.

**입도특성**

방조제 내측의 퇴적상은 대체로 간단하여, 북쪽의 세립질 퇴적물이 쌓이는 해역에서 실트질 모래상을 보이고 일부 하구역 근처에서 펄질 또는 실트질 모래상이 나타나지만 나머지 해역에서는 거의 대부분 모래상으로 되어 있다 (Fig. 12). 그러나 이러한 결과는 조하대에 국한되며 조간대에 대한 자료는 대부분 포함되지 않았다. 북쪽의 실트질 모래상은 모래 50~90%, 실트 10~40% 그리고 니토 0~10%로 구성되어있다. 이 해역의 입도는 모우드가 2.75φ와 3.75φ 두개로서 북모우드의 특징을 가지며 평균 입도는 3.6~5.1φ의 범위를 보인다. 방조제 내측의 모래상은 대부분 85~100%로서 펄의 함량은 평균 5% 밖에 되지 않는다. 전체 평균값으로서 모래 함량은 95%, 실트 3% 그리고 니토 2%가 된다. 2.75φ에서 모우드 값을 가지며 평균입도는 2.9φ이다. 방조제 인접지역에서는 모래질 펄이 나타나기도 하는데 이 지역은 대부분 침식이 활발했던 곳이다.



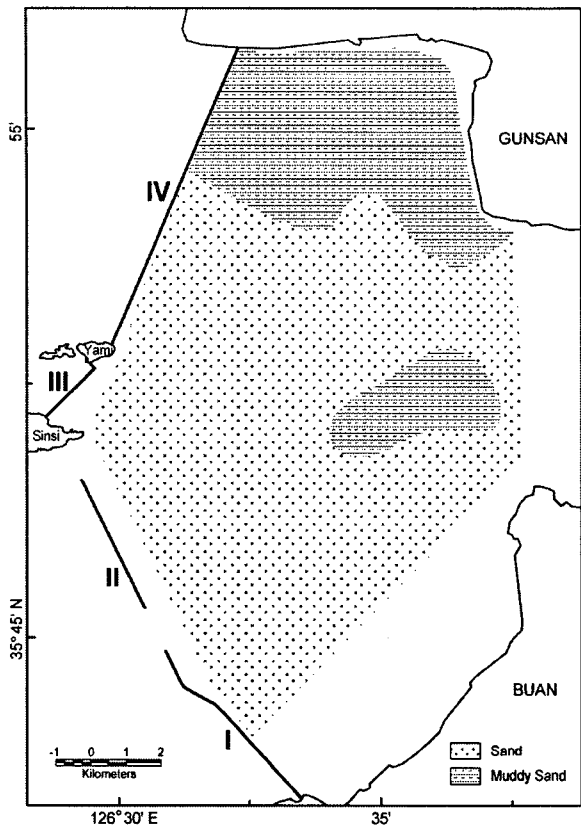


Fig. 12. Distribution of surface sediment facies inside the Saemangeum dyke in August 2003. According to Folk's (1968) scheme.

7. 토 의

4호 방조제 전면해역에 분포하는 모래층은 2003년에 길다란 대상형태를 보이는데, 북쪽에서 남쪽으로 갈수록 평균입도가 미세하게 감소하는 경향을 보인다(1.97 $\phi$ -3.21 $\phi$ ) (해양수산부 2003). 이러한 평균입도의 변화는 모래의 근원지가 북쪽이라는 의미를 나타낸다. 또한 4호 방조제 전면해역의 일부에서 얻은 해저면의 영상자료는 남서쪽으로 이동하는 sand wave들이 모래층위에 잘 발달하고 있음을 보여준다(해양수산부 2003). 2002년과 2005년도 퇴적물 특성자료도 모래가 북쪽에서 남쪽으로 이동한다는 것을 극명하게 보여주고 있다(Fig. 6). 2002년 퇴적상에 비해 3년 동안에 모래층은 조사해역의 대부분을 뒤덮었으며 이는 북쪽에서 끊임없이 모래가 공급되었기 때문으로 보여진다. 이러한 모래의 남하는 4호 방조제에 의해 해류방향이 동서에서 남-북으로 바뀌고 겨울철 파랑에 의해 야기되는 파랑류 또한 방조제에 의해 남-북 방향으로 우세해진 결과로 해석된다.

4호 방조제 전면해역에는 현재 모래가 우세하지만 방조

제 개방부 앞의 해저골에서는 여전히 펄질 퇴적물이 표층에 나타난다(Fig. 6B). 이러한 펄질 퇴적물은 현생 펄이 아니라 과거에 쌓인 퇴적물로서 그 위에 있었던 모래가 사라지면서 현재 드러난 일종의 침식작용의 부산물로 해석된다. 즉, 방조제 건설이 진행되면서 개방부를 중심으로 해류가 강해지면서 침식이 활발했던 것으로 추측된다. 이러한 침식작용은 해저골에서 채취된 퇴적물이 고화된 mud ball을 다량 함유한 것으로도 알 수 있다(해양수산부 2003). 또한 탄성파탐사 자료에 의하면 4호 방조제 개방부 앞 해저골의 가장 깊은 곳에서 하루로부터 해지면 표층으로 가스가 상승하고 있다(해양수산부 2003). 이는 침식에 의해 하중이 약해졌기 때문에 펄질 퇴적물 공극에 녹아있던 가스들이 위로 이동할 수 있었던 것으로 보여진다. 4호 방조제뿐만 아니라 1, 2호 방조제 주변의 해저골에서도 이러한 펄질 퇴적물이 드러나 있다.

방조제 내측 해역에서는 수로와 방조제 인접지역을 제외하고는 모두 퇴적이 진행되었다. 이는 만경강과 동진강에서 꾸준히 퇴적물을 유출하기 때문으로, 1982년 해도의 지형과 2003년 지형을 비교하여 지형변화량을 계산하고 이를 모래의 부피와 질량으로 환산하면, 1년에 약 10만톤의 모래가 퇴적되어 온 것으로 추정된다. 이러한 모래의 퇴적현상으로 말미암아 조간대의 면적이 늘어났으며 조하대 또한 계속 수심이 얕아지고 있다. 펄 또한 조간대에 지속적으로 쌓이고 있는 것으로 보인다. 특히, 4호 방조제 북쪽 끝 부근의 내측에 위치한 산동조간대(Fig. 1)의 표층 퇴적물은 방조제 건설에 의해 모래질 퇴적물에서 펄질 퇴적물로 급속히 바뀌게 되었다(Fig. 12). 4호 방조제에 의해 만경강에서 유출된 부유물질은 수로를 통해 방조제 쪽으로 향하다가 시계방향으로 산동조간대 쪽으로 회전하는 것이 자동관측시스템(TISDOS) 자료에 의해 규명되었다(해양수산부 2006). 이러한 커다란 해수의 회전에 의해 펄이 침전하기 적절한 저에너지의 환경이 산동조간대 위에 형성되어 있다.

반면, 방조제 내측의 수로는 일부를 제외하고는 대부분 방조제 건설에 의해 더욱 깊어졌다(Fig. 11A). 이들은 주로 방조제 개방부와 연결되어 있는데, 이 개방부를 통해 해수의 출입이 가능하고 이에 따라 유속이 가장 강한 곳이 되었기 때문이다. 그러나 4호 방조제의 중앙에 위치하였던 개방부가 점차 좁아지고 최근에 막힘에 따라 이와 연결된 수로가 급속히 얕아지면서 사라지고 있음이 2002년과 2003년 수심자료를 비교한 결과 드러났다(해양수산부 2004). 그 외에도 3호 방조제 방향으로 발달되어있던 자연 수로가 방조제에 의해 사라졌으며 1호 방조제 내측에 발달했던 비교적 작은 2개의 수로 또한 방조제에 의해 사라져서 조간대로 바뀌었다(Figs. 11A, B). 이러한 사실들은 방조제 건설에 의해 방조제 내측은 기본적으로 퇴적환경

이 되었음을 또한 지시한다.

1, 2호 방조제 외측의 모래들은 서로 매우 비슷한 입도 특성들을 가지고 있으며 방조제 내측의 모래와도 매우 유사하다(해양수산부 2003). 새만금해역에서 채취된 시추퇴적물과 탄성파탐사 자료를 보면, 이러한 모래층은 만경강과 동진강 입구에서 방조제로 연장되고 있음을 알 수 있다(한국해양연구소 1997). 이는 해수면 상승 당시의 하구역에서 퇴적된 모래들의 집합체로 해석될 수 있다. 따라서 현재 새만금해역의 모래는 만경강과 동진강을 기원으로 하고 있다고 해석된다. 1, 2호 방조제 외측의 지형 또한 방조제에 크게 영향을 받았으며, 개방부와 연관된 해저침식골이 존재하고 이들 골 사이에는 현재 알아진 모래퇴적체들이 앞으로 방조제에 수직으로 나열되어 있다(Fig. 8A). 방조제에 의해 내측 모래의 공급이 끊긴 상황에서 대신 해저골에서 침식된 모래가 그 옆의 모래층으로 이동된 것으로 보이며, 이러한 현상이 방조제 완공 후에는 상대적으로 저에너지 환경에서 어떻게 변할 것인가는 매우 흥미로운 연구주제가 될 수 있다.

## 8. 결 론

새만금방조제 건설에 의하여 만경, 동진강 하구역과 변산반도 연안역에서 일어난 해저지형변화와 표층퇴적물의 입도특성을 알아보기 위하여, 방조제 내측, 4호 방조제 외측, 그리고 1, 2호 방조제 외측 해역에 대해 각각 조사를 실시하였다. 조사기간은 2002~2005년으로, 방조제 건설전의 해저지형을 알아보기 위하여 1982년 또는 1994년 해도를 이용하였다.

4호 방조제 외측해역은 방조제 건설 전에는 급격한 수심변화가 없는 평탄한 지형을 보였으나 방조제 건설 후에는 방조제로부터 4 km 이내에서 방조제와 개방구간을 따라 침식에 의한 해저골들이 나타났다. 또한 4 km 이후에서도 해저면은 완만한 침식환경에서 상당한 퇴적이 일어나는 환경으로 변화하여 방조제의 영향을 받고 있음을 알 수 있었다. 이러한 퇴적환경은 방조제에 의해 북쪽의 모래들이 남쪽으로 이동하였기 때문이다. 따라서 원래의 모래질 펄이나 펄질 모래 퇴적상이 대부분 모래상으로 현재 급속히 바뀌고 있다.

1, 2호 방조제 외측해역은 4호 방조제 외측에서와 마찬가지로 방조제와 개방구간을 따라 침식골들이 나타나고 있다. 그러나 개방구간을 따라 유출입되는 조류의 영향으로 해저골 사이에 얇은 모래사주들이 발달하여, 전체적으로 방조제에 수직으로 등수심들이 놓인 지형을 보인다. 방조제 건설 전에도 현재의 개방구간에는 자연수로가 존재했지만 방조제 건설 후에는 강력해진 조류에 의해 침식을 크게 받아 매우 깊어졌다. 반면 수로사이의 모래사주들은

수로에서 침식된 퇴적물들을 공급받아 방조제 건설 전에 비해 상당히 얇아졌다. 현재 전반적으로 1, 2호 방조제 외측해역에서도 모래퇴적물이 우세하다.

방조제 내측해역에서는 방조제 건설 후에 만경, 동진강에 의해 전반적으로 퇴적이 크게 일어났다. 이에 따라 조간대는 더욱 넓어지고 조하대도 수로를 제외하고는 얇아졌다. 방조제 건설 전의 기존수로는 방조제 건설 후에 개방구간과 연계되어 침식에 의해 더욱 깊어졌다. 조간대를 제외하고는 나머지 대부분의 해역에서 모래가 우세하다. 그러나, 방조제 건설에 의해 조류에너지가 크게 약해진 북쪽 산동조간대에서는 현재 펄질 퇴적물이 급속히 쌓이고 있다.

## 사 사

본 연구는 해양수산부과제 “새만금 해양환경보전대책을 위한 조사연구(해저지형분야)”와 한국해양연구원 기판고유과제인 “하구역의 관리 및 기능회복 기술개발”의 지원에 의해 수행된 연구결과와 일부를 이용하였습니다. 본 논문을 세심하게 검토해 주신 익명의 두분 심사위원께 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- 국립지리원. 1981. 연안해역 기본조사 보고서(군산지구). 건설부. 63 p.
- 농림부. 1997. '97 새만금지구 수리실험 및 파랑관측 보고서. 농어촌진흥공사 연구보고서, 97-11-03. 853 p.
- 농림수산부. 1994. 새만금 종합개발 사업: 어업피해 보상 조사연구: 제 IV편 지질해양학적 조사. 364 p.
- 농어촌진흥공사. 1998. 방조제 축조 후 연안의 해안지형과 퇴적환경 변화 연구(II). 농어촌진흥연구원 연구보고서, 98-05-32. 177 p.
- 최경식. 1994. 한국 서해 만경강 동진강 연근해역 해저퇴적층의 퇴적학적 연구. 석사학위논문, 서울대학교. 183 p.
- 한국해양연구소. 1993. 방조제 축조에 따른 퇴적환경 변화 연구(I). 한국해양연구소 연구보고서, BSPN 00208-626-5. 175 p.
- 한국해양연구소 1997. 해저층 퇴적물 이동관측 및 예측기술 (I). 한국해양연구소 연구보고서, BSPN 00302-933-5. 255 p.
- 한국해양연구소. 1999. 새만금 방조제 주변 부유물질의 거동 특성과 인공갯벌의 조성에 관한 연구. 한국해양연구소 연구보고서, BSPE 99772-00-1232-5. 211 p.
- 해양수산부. 2003. 새만금 해양환경보전대책을 위한 조사연구(1차년도) - 지질, 갯벌분야. 한국해양연구원 연구보고서, BSPM 139-06-1514-5. 293 p.
- 해양수산부. 2004. 새만금 해양환경보전대책을 위한 조사연구

- 구(2차년도) - 지질, 갯벌분야. 한국해양연구원 연구보고서, BSPM 195-05-1581-5. 357 p.
- 해양수산부. 2005. 새만금 해양환경보전대책을 위한 조사연구(3차년도) - 지질, 갯벌분야. 한국해양연구원 연구보고서, BSPM 26008-1691-5. 663 p.
- 해양수산부. 2006. 새만금 해양환경보전대책을 위한 조사연구(4차년도) - 지질, 갯벌분야. 한국해양연구원 연구보고서, BSPM 32007-1764-5. 487 p.
- Dalrymple, R.W., B.A. Zaitlin, and R. Boyd. 1992. Estuarine facies models: Conceptual basis and stratigraphic implications. *J. Sediment. Petrol.*, 62, 1130-1146.
- Dyer, K.R. 1989. Sediment processes in estuaries: Future research requirements. *J. Geophys. Res.*, 94(C10), 14327-14339.
- El-Asmar, H. and K. White. 2002. Changes in coastal sediment transport processes due to construction of New Banietta Harbour, Nile Delta, Egypt. *Coast. Eng.*, 46, 127-138.
- Folk, R.L. 1968. *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill Publishing, Austin, Texas. 170 p.
- Jaramillo, E., H. Contrearras, 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.
- Kang, J.W. 1999. Changes in tidal characteristics as a result of the construction of sea-dyke/sea-walls in the Mokpo coastal zone in Korea. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 48, 429-438.
- Lee, H.J. 1986. Some geotechnical properties of selected sediment cores from the Korean seas. M.S. Thesis, Seoul National Univ., Seoul, Korea. 142 p.
- Lee, H.J. and S.K. Chough. 1989. Sediment distribution, dispersal and budget in the Yellow Sea. *Mar. Geol.*, 87, 195-205.
- Lee, H.J. and Y.S. Chu. 2001. Origin of inner-shelf mud deposit in the southeastern Yellow Sea: Huksan mud belt. *J. Sediment. Res.*, 71, 144-154.
- Miles, J.R., P.E. Russel, and D.A. Huntley. 2001. Field measurements of sediment dynamics in front of a seawall. *J. Coast. Res.*, 17, 195-206.
- Park, Y.A., H.J. Kang, and Y.I. Song. 1991. Sandy sediment transport mechanism on tidal sandy bodies, west coast of Korea. *Kor. J. Quart. Res.*, 5, 33-46.
- Plant, N.G. and G.B. Griggs. 1992. Interactions between nearshore processes and beach morphology near a seawall. *J. Coast. Res.*, 8, 183-200.
- Pritchard, D.W. 1967. What is an estuary: physical viewpoint. p. 1-10. In: *Estuaries*. ed. by G.H. Lauff. American Association for the Advancement of Science, Washington, DC.
- Ruggiero, P. and W.G. McDougal. 2001. An analytic model for the prediction of wave setup, longshore currents and sediment transport on beaches with seawalls. *Coast. Eng.*, 43, 161-182.
- Schubel, J.R. and V.S. Kennedy. 1984. The estuary as a filter: an introduction. p. 1-11. In: *The Estuary as a Filter*. ed. by V.S. Kennedy. Academic Press, New York.
- Thomalla, F. and C.E. Vincent. 2003. Beach response to shore-parallel breakwaters at Sea Palling, Norfolk, UK. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 56, 203-212.
- Yang, S.-L., Q.-Y. Zhao, and I.M. Belkin. 2002. Temporal variation in the sediment load of the Yangtze River and the influences of human activities. *J. Hydrol.*, 263, 56-71.

Received Jun. 1, 2006

Accepted Jul. 13, 2006