Article

경기만 남부에 발달된 해저지형의 형태적 특징 및 해사채취에 의한 변화

금병철^{1*} · 신동혁¹ · 정섬규² · 장석¹ · 장남도³ · 오재경⁴

¹한국해양연구원 해양환경·방제연구부

²한국해양연구원 해양특성연구단

³한국해양연구원 해양위성·관측기술연구부
(425-600) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

⁴인하대학교 자연과학대학 해양학과
(402-751) 인천광역시 남구 용현동 253

Morphological Features of Bedforms and their Changes due to
Marine Sand Mining in Southern Gyeonggi Bay

Byung-Cheol Kum^{1*}, Dong-Hyeok Shin¹, Seom-Kyu Jung², Seok Jang¹,
Nam-Do Jang³, and Jae-Kyung Oh⁴

¹Marine Environment & Pollution Prevention Research Department, KORDI

²Naval Technology Research Group, KORDI

³Ocean Satellite Remote Sensing & Observation Technology Research Department, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

⁴Department of Ocean Sciences, College of Natural Sciences
Inha University, Incheon 402-751, Korea

Abstract : This study conducted sedimentological and geophysical surveys for 3 years (2006-2008) in southern Gyeonggi Bay, Korea to elucidate temporal changes in subaqueous dune morphology on a sand ridge trending northeast to southwest that has been excavated by marine sand mining. The sand ridge (~20 m in height, ~2 km in width and 3~4 km in length) has a steep slope on the NW side and a gentle slope on the SE side, creating an asymmetric profile. Large (10~100 m in length) and very large (>100 m in length) dunes occurring on the SE side of the ridge show a northeastward asymmetrical shape, whereas dunes on the NW side destroyed by marine sand mining display a southwestward asymmetry. The comparison between Flemming (1988)'s correlation and the height-length correlation of this study indicates that tidal current and availability of sand sediment are major controlling factors to the development and maintenance of dunes. Depth and sedimentary characteristics (grain size) are not likely to be major controlling factors, but indirectly influence dune growth by hydrological and sedimentary processes. The length and the height of dunes decrease toward the southeastern trough away from the crest of the ridge. These features result from the decrease of tidal current and sediment availability. The length and the height of dunes on the southeast side decrease gradually over time. This is a result of the interaction between tidal current and the decrease in sediment availability due to sediment extraction by marine sand mining. Marine sand mining has destroyed the dunes directly, causing irregular shapes of shorter length and lower height. The coarse fraction of suspended sediments is transported and deposited very close to the sand pit. By contrast, relatively fine sediments are transported by the tidal current and deposited over a wide range by the settling-lag effect, resulting in a decrease of sediment grain size in the area where suspended sediments are deposited. In

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

addition, marine sand mining, decreases the height of dunes. Therefore, morphological and sedimentological characteristics of dunes around the sand pits will be significantly changed by future sand mining activities.

Key words : multibeam echosounder, dune, shape parameters, control factors, impacts of marine sand mining

1. 서 론

황해는 평균 수심이 55 m로서 조석우세 퇴적작용을 받아 해저삼각주 퇴적체와 해침성 모래퇴적체 등이 발달되어 있다(Jin 2001). 특히, 황해 동부는 해침성 모래 퇴적체 위에 현재 조류 방향에 평행하게 사퇴(sand ridge)가 발달되어 있고 사퇴 위에는 조류의 직각방향으로 다양한 크기와 형태의 dune이 발달되어 있다(최 등 1992; 방 등 1994a, 1994b; Off 1963; Klein et al. 1982; Chough 1983; Park and Lee 1994; Park and Yoo 1997; Chu 2000; Park et al. 2006). 경기만에 발달된 사퇴는 현재 조류에 따라 변화되는 사퇴인 반면, 중부와 남부에 발달된 사퇴는 표면 위에 발달된 주요 지형이 없어 후빙하기 해침(postglacial transgression)동안 강한 조류에 의해서 형성되고 그 이후 소멸되고 있음을 보이고 있다(최 등 1992; 해양수산부 2005, 2006, 2007; 국립해양조사원 2008; Chu 2000; Park et al. 2003, 2006).

경기만 지역에 존재하는 다양한 크기와 형태의 해저지형은 해수면 상승에 따른 수심변화, 조류의 세기가 해저면에 미치는 영향정도 그리고 한강, 예성강 및 임진강으로부터 홍수기에 유입되는 다량의 퇴적물 등의 상호작용에 의하여 활발하게 발달되어 있다(방 등 1994a, 1994b; Park et al. 2002). 그러나 한강 종합개발 이후 퇴적물 유입량은 급속하게 감소되었으며 시기 또한 홍수기에만 제한되어 나타나고 있다. 특히, 경기만 남부로 유입되는 퇴적물량은 상당히 미미하다(박 1990; 오와 방 2003). 또한 아산만 주변에 인위적인 제방건설을 통해 감소된 조류에너지에 의해 퇴적물 공급이 감소하여 사퇴의 총 퇴적물량이 감소하였고 창조류 강화로 인한 부유 퇴적물 유입의 증가로 표층퇴적물 역시 상대적으로 세립해지고 있어 인위적 작용에 의한 환경적 변화가 발생하고 있다(박 2008; Chang et al. 2010). 이와 더불어 경기만 남부지역은 최근 수십 년 동안 골재자원 확보를 위해 해사(바다모래) 채취가 많이 이루어지고 있다. 우리나라 해사 채취량은 1992년 이후 계속 증가하다가 1998년 이후 크게 감소하였고 2002년도에는 다시 증가하는 추세를 보이며 전체골재에서 차지하는 비중 또한 연도별로 약간의 기복은 있지만 1992년도에 15.3%에서 2002년에는 27.7% 그리고 2005년에는 33.2%로 증가하는 추세를 보이고 있다(건설교통부 2005; 장 2005). 또한, 우리나라에서 행해지는 해사채취방법은

펌프준설선과 바지(barge)선으로 구성된 고정식 준설(anchor dredging) 방법을 주로 사용하는데, 이러한 채취방법은 저층과 표층에 고농도의 부유물을 발생시킬 뿐 아니라 해저에 직경이 수십에서 수백 미터, 깊이는 최대 20 m에 이르는 웅덩이를 형성한다. 이런 현상은 직, 간접적으로 단기 또는 장기적으로 해양생태계를 훼손하고 수산자원을 감소시키는 영향을 미치고 있으며(유 등 2006; 손과한 2007) 모래퇴적물의 감소, 해안침식 등 연안 환경에 큰 변화를 야기시킬 것으로 보인다.

해사채취가 미치는 환경적 영향이 증가함에 따라서 최근에 해사채취에 대한 해양환경 및 대응책을 마련하기 위해 국내외적으로 많은 연구가 진행되어지고 있다(김 등 2005; 해양수산부 2005, 2006, 2007; 유 등 2006; 손과한 2007; Thornton et al. 2006; Kubicki et al. 2007; Kim and Lim 2009). 그러나 대부분의 국내 연구는 해사채취가 생물학적 환경에 미치는 영향 연구에 치우쳐 있으며 지질 또는 지형학적 관점의 연구는 거의 전무한 실정이다. 또한 해사채취는 사질 퇴적체의 급격한 파괴현상을 발생시키고 지형의 수리 역학적 평형상태를 변형시켜 지형 발달 및 유지에 영향을 미치게 될 것이다. 따라서 본 논문은 다중빔음향측심기를 이용해 획득한 연구지역의 3차원 수심자료와 해저면 영상 그리고 퇴적물 특성을 통해서 경기만 내에 발달된 지형의 형태적 특징 및 발달, 유지 제어요인을 알아보고 해사채취에 의한 지형의 변화를 파악하는데 그 목적이 있다.

2. 연구지역

연구지역은 경기 남부 중앙, 선감도와 장안사퇴 중간에 위치하며 연구지역과 장안사퇴 사이에는 넓은 골(trough)이 존재하고 있다(Fig. 1). 경기만 남부해역은 파랑, 조류 그리고 하천 퇴적물 유입, 이 세 가지 요인이 상호 작용하는 경기만의 북쪽 해역과는 다르게 강으로부터의 퇴적물 유입이 상당히 미미한 퇴적학적 특징을 보이며 파랑의 영향 또한 미약하여 대표적인 조석우세 퇴적환경을 보이고 있다(김 등 1977, 1978; 해양수산부 2005, 2006, 2007; 국립해양조사원 2008; Park and Yoo 1997).

연구지역 조석의 형태수는 0.2로서 반일주조가 우세함을 나타내고 대조 평균고조와 평균저조는 각각 1,008.6 cm와 92.0 cm을 보이고 소조의 평균고조와 평균저조는

Fig. 1. Location map of study area (diagonal crossed area). Study area is located between Seongap Island and Jangsan Sandbank. The red star is the location of the estimated tidal current (ME 1999)

880.2 cm와 348.8 cm을 보이고 있다. 조류는 표층에서 5.9~155.8 cm/s, 중층에서 11.1~116.0 cm/s 그리고 저층에서 5.6~91.6 cm/s의 범위로 나타난다. 수층별 최강유속을 살펴보면, 표층에서 낙조시 155.8 cm/s이고 창조시는 137.3 cm/s로 낙조시에 강한 유속을 보이는 반면, 중층에서는 낙조시 96.8 cm/s, 창조시 116.0 cm/s로 창조시에 강한 유속분포를 보이고 있다. 저층에서도 낙조시 61.0 cm/s 그리고 창조시 91.6 cm/s로 중층과 같은 양상을 보이고 있다. 즉 표층에서는 낙조가 우세한 비대칭성을 보이지만 저층으로 향할수록 창조가 우세한 비대칭성을 보이고 있다. 전 수층을 평균한 최강유속의 경우, 낙조시는 104.5 cm/s 그리고 창조시는 114.0 cm/s로 창조류가 약 10 cm/s 정도 크게 나타나고 있다. 창조와 낙조의 지속시간은 거의 유사하며, 전 수층의 평균된 조류의 진행은 창조시는 67.1° 그리고 낙조시 251°로 동북동-서남서 방향으로 이루어지고 있다(환경부 1999; Chu 2000).

3. 재료 및 방법

고해상도 3차원 해저지형자료를 얻기 위해서 2006년 1월 12~13일(중조기), 2007년 9월 13~14일(대조기) 그리고 2008년 8월 15일(중조기)과 20일(대조기)에 다중빔음향측심기를 이용해서 조사가 이루어졌으나, 2008년 8월에는 해상 날씨 악화로 연구지역 중 서부지역을 조사하지 못하였다. 조사시에 이용된 다중빔음향측심기는 SeaBat 8124(Reson사, 미국)로서 200 kHz의 주파수를 가지고 있으며 along-track과 across-track 폭은 각각 1.5°을 나타내고 빔갯수는 81개로서 총 120°의 각도를 가진다. 조사시

조사선의 속도는 4~5 노트(knot)를 유지하도록 했고 측선간 조사면적은 10% 이상 겹치도록 하였다. 조위에 따른 수심오차는 덕적도와 대산 조석 예보치의 중간값을 이용하여 보정하였다. 수중음파속도 및 선박의 방향과 움직임에 대한 보정은 수중음속측정기(Reson사, SVP-15)와 자이로와 모션센서인 Octan(IXSEA)을 이용하였다. 모든 주변 장비들로부터 들어오는 정보들은 획득 프로그램인 Triton ISIS을 이용해서 XTF 파일형식으로 저장하였고 Caris Hips를 이용해서 자료 처리하였으며 지형자료 결과는 Fledermaus 프로그램을 이용해서 나타내었다. 수심 조사에 대한 정밀도는 일반적으로 IHO(International Hydrographic Organization)에서 제시한 수리측량조사 기준에 따라 평가하는데 최신의 고해상도 다중빔음향측심기를 이용한 수심조사는 쉽게 IHO S44 Special Order standards(IHO 1998)에 만족하지만(Wells and Monahan 2002; Heaps 2004) 조사시 시스템 설치 위치와 해양날씨 등에 의해서 차이가 발생할 수 있기 때문에 최대한 오차가 발생하지 않도록 하였다(Ernstsen et al. 2006). 해저면 상황을 파악하기 위해서 사이드 스캔 소나(Side Scan Sonar; GeoAcoustics사 SSS-159D)를 이용해서 2006년 1월에 조사가 이뤄졌다.

연구지역의 표층퇴적물 분포 및 특성을 알아보기 위해서 2006년 1월과 2월에 걸쳐 총 22개의 퇴적물이 채취되었으며 시료는 실험실로 운반되어 입도분석이 실시되었다. 입도분석은 퇴적물에 과산화수소수(H_2O_2)와 염산(HCl)을 넣어 유기물과 탄산염을 제거 후 습식체질(wet sieving)에 의해 4 Φ 이하의 조립질 퇴적물과 그 이상의 세립질퇴적물로 각각 구분하였다. 4 Φ 이하의 조립질 퇴

Fig. 2. Geometric property definitions of the dune

적물은 0.5 Φ 간격으로 건식체질(dry sieving)하여 무게백분율을 구하고, 4 Φ 이상의 세립질 퇴적물은 전체를 대표하는 2 g을 취해 300 ml의 0.1% 확산제 용액을 넣고 초음파 자기진동기로 균일하게 분산시킨 후 자동입도분석기(Sedigaph 5100D)로 분석하였다. 퇴적상(Sediment type)

분류는 Folk(1968) 방법을 따랐으며, 그 외 평균입도(M_z), 분급도(Sorting; Standard Deviation), 왜도(Skewness) 및 첨도(Kurtosis)는 통계 처리하여 각각의 값을 구하였다.

형태학적 분석

다중빔음향측심기로 획득된 3차원 해저지형자료에서 dune를 정의하기 위해서 북동-남서방향으로 발달되어 있는 사퇴와 평행하게 5개의 단면을 설정하였다(Fig. 3). 각 단면에서 정의된 dune은 1987년 SEPM Bedforms and Bedding Structures Research Symposium에서 흐름의 직각방향인 큰 규모의 지형(large-scale flow-transverse bedform)의 명칭을 단순화하고 분류한 Ashley(1990)에 따라서 소형(small; 0.6~5.0 m), 중형(medium; 5.0~10.0 m), 대형(large; 10.0~100.0 m) 그리고 초대형(very large; >100.0 m) dune으로 정의하였다(Table 1).

각 단면에서 정의된 dune의 형태학적 특징을 나타내는

Fig. 3. The 3-D bathymetry of the study area in (a) January 2006, (b) September 2007, and (c) August 2008. Locations of profiles (L-02, L-02, C, R-01, R-02) on the sand ridge are shown. Circles with black and red dotted lines indicate morphological changes before and after sand mining. Geographical datum is WGS-84 and the projection is UTM (zone 52)

Table 1. Classification scheme recommended by the SEPM Bedforms and Bedding Structure Research Symposium (modified from Ashley (1990))

Subaqueous dune				
Size	Small	Medium	Large	Very large
Length	0.6~5.0 m	5.0~10.0 m	10.0~100.0 m	> 100.0 m
Height*	0.075~0.4 m	0.4~0.75 m	0.75~5.0 m	> 5.0 m
	0.04~0.25 m	0.25~0.44 m	0.44~2.8 m	> 2.8 m

*The upper values are calculated using the equation $H = 0.0677L^{0.8098}$ (Flemming, 1988) and the lower is recorrected by Berné et al. (1993)

형태변수인 파장(wavelength), 파고(height), 정부(crest)의 수심, 남서(SW) 방향의 골과 정부 사이의 길이(L1) 및 경사각(α), 북동(NE) 방향의 골과 정부 사이의 길이(L2) 및 경사각(β)를 측정하였다. 또한 파장과 파고의 비(L/H)를 통해서 Vertical Form Index(VFI, Wienberg and Hebbeln 2005)를 정의하였고 반대로 파고와 파장의 비(H/L)를 통해서 dune의 steepness를 구하였다. 그리고 dune의 비대칭 지수(Asymmetry Index)인 경사비(slope ratio)는 남서방향의 경사각(α)과 북동 방향의 경사각(β)의 비(α/β)를 통해서 정의하였다. 경사비가 1보다 크다면 남서방향으로 기울어진 비대칭 형태를 보이고 1보다 작다면 북동방향으로 기울어진 비대칭 형태를 나타낸다(Fig. 2).

4. 결 과

지형 및 형태변수

연구지역 중앙지역에 북동-남서방향의 약 2 km의 폭, 3~4 km 길이 그리고 약 20 m 높이의 사퇴가 존재하고 같은 방향으로 골이 남과 북쪽에 형성되어 있다. 사퇴의 북서측면은 많은 웅덩이(sand pit)들이 나타나고 있는데 이는 해사채취에 의해서 형성된 것으로 보이며, 남동측면의 발달한 dune은 크고 뚜렷한 형태를 보이고 있다. 그리고 사퇴는 북서측면보다 남동측면이 더 길게 나타나고 있어 북서방향으로 기울어진 비대칭 형태를 보이고 있다.

2006년 1월, 2007년 9월 그리고 2008년 8월에 조사된 사퇴 및 그 위에 발달된 대형, 초대형 dune의 지형적 특징 및 dune의 형태 변수의 결과를 나타내었다(Table 2).

2006년 1월

수심은 -25.8~-59.1 m의 범위로 분포하고 평균 -43.2 m을 나타낸다. 사퇴 위에는 정부선이 2차원적, 물결

(sinuous) 형태 그리고 갈라지는(bifurcating) 대형과 초대형 dune이 분포하고 있으며 정부에서 골로 갈수록 북서-남동 방향에서 서북서-동남동 방향으로 반시계방향으로 회전하고 있다. 사퇴 정부의 수심은 북동쪽으로 갈수록 깊어지면서 상대적으로 작은 크기의 dune이 형성되어 있다. 사퇴의 북서측면의 남서지역은 모래채취에 의해 형성된 수많은 웅덩이들이 존재하고 이것들에 의해서 dune 형태가 많이 파괴되어 있다(Fig. 3a; 검은 점선원).

정의된 dune의 개수는 총 65개로서 파장과 파고의 범위는 각각 18.0~322.5 m와 0.7~9.5 m로서 평균 130.3 m와 3.6 m을 나타내며 대형과 초대형 dune이 존재하고 있다. 남서방향으로의 길이(L1)와 경사각(α)는 8.0~241.9 m와 1.0~7.1°의 범위로 분포하며 평균 82.5 m와 3.1°을 나타내고 북동방향으로의 길이(L2)와 경사각(β)은 6.1~136.9 m와 0.8~14.3°의 범위를 보이며 각각 47.8 m와 4.6°의 평균값을 나타낸다. 이는 북동방향으로 기울어진 비대칭 형태의 dune을 나타내고 있다. VFI, steepness 그리고 경사비는 각각 14.0~130.3, 0.01~0.07 그리고 0.1~4.2의 범위를 나타내며 43.5, 0.03 그리고 0.99의 평균값을 나타내고 있다.

2007년 9월

수심은 -27.7~-56.1 m의 범위로 분포하고 평균 -43.5 m을 나타낸다. 2006년 1월 결과에서 해사 채취로 지형파괴가 많이 발생되어 있던 사퇴 정부와 북서측면은 많이 복원되어 웅덩이들의 크기와 수가 감소하였고 새로운 dune이 형성되고 있다(Fig. 3b; 검은 점선원). 그러나 사퇴 북서측면의 북동 지역에서 2006년 1월에 보이지 않던 웅덩이들이 나타나고 있어 해사채취로 인하여 새롭게 웅덩이들이 형성된 것으로 보인다(Fig. 3b; 빨강 점선원). 또한 사퇴 위에는 정부선이 2차원적인 물결형태와 갈라진 대형

Table 2. Shape parameters of dunes which are developed in the survey area in January 2006, September 2007 and August 2008

Date	Jan. 2006			Sep. 2007			Aug. 2008		
No. of dunes	65			76			62		
	Min.	Max.	Mean	Min.	Max.	Mean	Min.	Max.	Mean
Length (m)	18.0	322.5	130.3	28.8	333.2	128.4	28.3	295.4	115.5
Height (m)	0.7	9.5	3.6	0.5	9.1	3.6	0.7	7.8	3.1
water depth (m)	29.0	49.9	40.2	29.3	50.0	40.2	29.6	44.8	40.2
L1 (SW; m)	8.0	241.9	82.5	12.0	238.0	81.9	14.8	228.2	73.8
α (°)	1.0	7.1	3.1	0.8	10.2	3.14	1.0	4.8	2.7
L2 (NE; m)	6.1	136.9	47.8	11.2	154.6	46.5	10.4	103.8	41.7
β (°)	0.8	14.3	4.6	0.7	11.8	5.1	0.8	13.6	4.6
VFI	14.0	130.2	43.5	13.7	98.9	41.3	15.2	167.2	46.4
Steepness	0.01	0.07	0.03	0.01	0.07	0.03	0.01	0.07	0.03
Slope ratio	0.1	4.2	0.99	0.1	6.8	0.93	0.2	3.5	0.93

과 초대형 dune이 존재하며 dune의 정부선이 2006년 1월 보다 북동방향으로 이동하였다(Fig. 3b).

총 76개의 dune이 정의되었으며 파장과 파고의 범위는 28.8~333.2 m와 0.5~9.1 m로서 평균 128.4 m와 3.6 m를 나타내고 있어 2006년 1월과 같이 대형과 초대형 dune이 분포하고 있다. 남서방향의 길이와 경사각은 12.0~238.0 m와 0.8~10.2°의 범위로 분포하고 평균값은 81.9 m와 3.1°을 나타내고 있다. 반면, 북동방향의 길이와 경사각은 11.2~152.6 m와 0.7~11.8°로 평균 46.5 m와 5.1°을 나타내고 있어 북동방향으로 기울어진 비대칭 형태의 dune을 나타내고 있다. VFI, steepness 그리고 경사비는 13.7~98.9, 0.01~0.07 그리고 0.1~6.8의 범위로 평균값은 각각 41.3, 0.03 그리고 0.93을 보이고 있다.

2008년 8월

수심은 -27.2~-55.5 m의 범위로 분포하며 평균 -43.2 m을 나타내고 있다. 2007년 9월과 비교해서 dune의 정부선이 북동쪽으로 이동하였으며 사퇴 북서측면에서는 해사 채취에 의해 형성된 웅덩이들이 많이 복원되어 정부선이 2차원적이고 약간의 물결과 갈라진 형태의 새로운 dune을 형성하고 있다(Fig. 3c; 빨강 점선원). 그러나 2006년 1월과 2007년 9월보다 파장과 파고의 최대값이 감소하고 있는데 이는 해상날씨 악화로 조사를 하지 못한 서부지역에 상대적으로 큰 dune이 존재하기 때문인 걸로 사료된다.

정의된 dune의 개수는 62개로 상대적으로 낮은 값을 보이고 있다. 파장과 파고의 분포 범위는 각각 28.3~295.4 m와 0.7~7.8 m를 나타내며 평균 115.5 m와 3.1 m를 나타내고 있다. 남서방향의 길이와 경사각은 14.8~228.2 m와

1.0~4.8°의 범위를 보이고 평균 73.8 m와 2.7°을 나타내고 있으며 북동방향의 길이와 경사각은 10.4~103.8 m와 0.8~13.6°의 범위로 분포하고 41.7 m와 4.6°의 평균값을 가지고 있어 북동방향으로 기울어진 비대칭 형태의 dune을 나타내고 있다. VFI, steepness 그리고 경사비는 각각 15.2~167.2, 0.01~0.07 그리고 0.2~3.5의 범위로 분포하고 있으며 평균 46.4, 0.03 그리고 0.93을 나타내고 있다.

표층퇴적물의 퇴적학적 특성 및 분포

2006년 1월과 2월에 걸쳐 얻어진 표층퇴적물의 퇴적학적 특성을 보면, 퇴적상은 모래질자갈(sG), 자갈질모래(gS), 약자갈질모래((g)S) 그리고 모래(S)를 나타내고 있다. 모래 퇴적상은 중앙에 위치하는 사퇴 정부에서 나타나고 양쪽 골로 갈수록 자갈이 많이 포함된 자갈질 모래 및 모래질 자갈을 나타내고 있다(Fig. 4a). 조성은 자갈, 모래 그리고 실트함량이 각각 0.0~55.6%, 40.9~100.0% 그리고 0.0~4.2%의 범위로 분포하고 있으며 사퇴에서 모래함량이 상대적으로 높고 골지역으로 갈수록 자갈함량이 증가하고 있다. 조직변수인 평균입도는 -1.0~2.0 ϕ , 분급도는 0.4~2.0 ϕ 의 범위로 분포하고 있으며 사퇴를 중심으로 북서-남동방향으로 갈수록 조립해지는 양상을 보이고 분급도는 뚜렷한 분포양상을 보이지 않지만 골지역으로 갈수록 분급이 상대적으로 불량해지는 양상을 보이고 있다(Fig. 4b, c).

해저면 음향영상

2006년 1월에 GeoAcoustic사의 SSS-159D의 410 kHz 사이드 스캔 소나를 이용하여 조사된 모자이크(mosaic) 결

Fig. 4. Distribution of (a) sedimentary facies, (b) mean grain size, and (c) sorting of surface sediments sampled in January and February 2006

Fig. 5. Mosaic image of study area which is shown by back-scattering strength of side scan sonar. Side scan image collected along the A-A' profile and major morphological features (a~h) are shown. Geographical datum is WGS-84 and the projection is UTM (zone 52)

과를 Fig. 5에 나타내었다.

사이드 스캔 소나 영상에서 어두운 부분은 강한 후방산란 음향강도를 의미하며 밝게 나타나는 부분은 약한 후방산란 음향강도이거나, 음영구역 또는 흡수된 해저면을 의미한다. 조사지역의 해저면 음향영상을 보면, 사퇴가 존재하는 지역에서는 상대적으로 약한 후방산란 음향강도를 나타내고 있으며 반대로 수로에서는 상대적으로 높은 후방산란 음향강도를 보이고 있는데 이는 자갈함량 증가에 따른 결과로 보인다. 사퇴 북서측면에서 수로와 사퇴 경계 지역에서 상대적으로 밝은 부분을 보이는데 이는 북동방향으로 갈수록 넓어지고 있다. 이것은 후방산란 음향강도의 차이에 의해서 북동-남서방향의 연속적으로 줄이 간 흔적을 보이는데 수로에 존재하는 큰 자갈 등이 양방향의 조류에 의해서 comet mark가 아닌 골(furrow)을 형성한

것으로 보이는(Fig. 5a, b) 반면, 더 북쪽지역은 큰 자갈이 분포하지만 골(furrow)은 나타나지 않고 있다(Fig. 5c, d). 사퇴의 남동측면에서는 북서-남동방향의 조류와 직각방향인 초대형 dune이 존재하고 북서측면에서는 소형, 중형 그리고 대형 dune이 존재하고 dune 사이의 골부분에서 자갈이 나타나고 있다(Fig. 5e, f). 연구지역에 사퇴 정부에 존재하는 침몰한 바지선과 해사채취에 의해서 형성된 웅덩이를 보이고 있다(Fig. 5g, h).

형태 변수들의 상관관계

연구지역에서 측정된 dune의 형태변수들의 상관관계를 알아보았다. 연구지역에서 측정된 모든 dune의 파장과 파고의 power 관계식은 $H_{mean} = 0.033L^{0.9446}$ ($r = 0.79$)로서 양의 관계를 나타내고 있으며 Flemming (1988)이 제시한

Fig. 6. Correlations between length and height (a), height and water depth of dunes (b) and length and water depth (c) of total dunes which are developed on the sand ridge

Fig. 7. Correlations among morphological parameters such as length, height, water depth, steepness and slope ratio

관계식과 유사하게 분포하고 있다. 그러나 Flemming (1988)의 평균 관계식보다 높은 지수, 즉 더 급한 경사도를 나타내고 있다. 파장이 약 190 m 이하인 대형과 초대형 dune은 Flemming (1988)의 관계식을 통한 예측 파고보다 낮은 파고를 보이고 반대로 파장이 190 m 보다 큰 초대형 dune은 Flemming (1988)의 예측 파고보다 높은 파고를 보인다(Fig. 6a). 수심과 파고의 상관관계는 Allen (1968)이 제시한 수심과 파고의 관계와는 다른 양상으로 같은 수심에서 다양한 크기의 dune의 파고가 나타나고 있어 독립적인 분포양상을 보이고 있다(Fig. 6b). 파장, 또한 Jackson (1976)이 제시한 관계와 다르게 수심과 독립적인 분포양상을 보이고 있다(Fig. 6c).

다른 변수들의 상관관계를 보면, steepness와 파고 및 파장의 상관관계는 흩어짐(scattering)이 크지만 각각 양과 음의 상관관계를 보이고 있다. 또한 VFI은 상대적으로 낮은 파고와 짧은 파장에서 상대적으로 높은 값을 나타내고 있으며 경사비는 모든 파고와 파장에서 북동방향의 비대칭(<1)이 우세하게 나타나지만 파고가 1~3 m, 파장 150 m 이하에서 상대적으로 남서방향의 비대칭이 높게 나타나고 있다. 즉, 파장이 짧고 파고가 낮은 지형이 상대적으로 높은 VFI와 남서방향의 비대칭 형태를 우세

하게 보이고 있음을 나타내고 있다(Fig. 7). 이런 형태의 지형은 주로 사퇴의 북서측면에서 나타나는데 이는 많은 모래채취를 통해서 형성된 웅덩이들에 의해 파괴된 지형들이 파장이 짧아지고 파고가 낮아져서 나타난 결과로 보인다.

단면별 시간별 형태 변수 변화

연구지역에 발달되어 있는 사퇴의 정부, 북서측면 그리고 남동측면에 총 5개의 단면을 설정하였고 각 단면의 시간적 변화를 Table 3과 Fig. 8에 나타내었다. 그러나 2008년 8월 자료는 해상기상 악화로 연구지역 서부지역을 조사하지 못하여 상대적으로 낮은 파고와 파장을 보이고 있다. 정부(C 단면)와 남동측면의 단면인 R-01과 R-02 단면에서 정의된 dune은 북동방향으로 이동이 뚜렷하게 나타나고 있지만 각 단면별 dune의 형태 변수의 시간적 변화는 뚜렷하지 않다. 그러나 R-01 단면은 시간이 지남에 따라 파장과 파고가 감소하고 있으며 남서방향의 경사각(α)과 북동방향의 경사각(β)이 감소하고 있다. 또한 2008년 8월을 제외하고 2006년 1월과 2007년 9월에서는 정부에서 R-02 단면으로 갈수록 파장과 파고가 감소하고 있다.

사퇴의 북서측면 위에 설정된 단면 L-01과 L-02 단면

Table 3. Mean shape parameters of dunes which are defined in profiles on the sand ridge. Location of profiles are shown in Fig. 3

Jan. 2006.	L-02	L-01	C	R-01	R-02
Length (m)	91.9	78.9	182.0	170.5	152.5
Height (m)	2.3	1.9	4.6	5.7	4.3
Water depth (m)	43.4	41.0	31.5	37.6	43.9
L1 (SW; m)	35.6	32.8	126.7	116.9	114.1
α (°)	3.5	3.0	2.7	3.1	2.6
L2 (NE; m)	56.3	32.8	55.3	53.5	38.3
β (°)	2.5	3.7	4.7	6.4	6.4
VFI	50.0	45.5	42.6	31.5	44.4
Steepness	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03
Slope ratio	1.8	1.14	0.7	0.5	0.5
Sep. 2007	L-02	L-01	C	R-01	R-02
Length (m)	99.0	85.9	184.9	169.67	168.2
Height (m)	2.2	3.0	5.0	5.2	4.6
Water depth (m)	43.2	40.4	31.9	37.8	43.8
L1 (SW; m)	42.7	52.5	119.9	123.6	126.6
α (°)	3.0	4.0	2.8	2.7	2.5
L2 (NE; m)	56.3	33.4	65.0	46.0	41.7
β (°)	2.3	6.0	4.7	6.3	6.7
VFI	53.6	33.0	35.7	38.2	44.9
Steepness	0.02	0.04	0.03	0.03	0.03
Slope ratio	1.6	0.9	0.7	0.4	0.6
Aug. 2008	L-02	L-01	C	R-01	R-02
Length (m)	87.2	84.5	127.7	166.4	150.6
Height (m)	1.5	2.3	3.5	5.1	4.6
Water depth (m)	43.4	41.5	33.0	37.1	42.0
L1 (SW; m)	37.4	55.2	85.6	117.1	111.3
α (°)	2.6	2.9	2.6	2.7	2.67
L2 (NE; m)	49.8	29.4	42.1	49.3	39.3
β (°)	1.9	5.0	5.2	6.1	7.2
VFI	64.3	44.2	36.6	35.4	35.3
Steepness	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03
Slope ratio	1.7	0.8	0.5	0.6	0.4

은 해사채취를 통해서 지형변화가 크게 나타나고 있다. L-01 단면에서 2006년 1월보다 최대 8.8 m의 수심차이를 보이고 있으며 평균 3.1 m 깊이의 모래가 606일 동안 해사채취와 퇴적물 이동으로 인해서 제거된 것으로 보인다. 그러나 2007년 9월에는 웅덩이에 의해서 파괴된 지형들이 다시 형성되면서 전체적으로 파장과 파고가 증가하고 있지만 2008년 8월에는 기상악화로 이 지역을 조사하지 못해 비교할 수가 없다. 그리고 L-01 단면에서 2006년 1월의 평균 경사비가 1.14에서 2007년 9월 이후에는 0.9과 0.8로 낮아지는데, 이는 남서방향으로 기울어진 비대칭 dune

이 북동방향으로 기울어진 비대칭 dune으로 바뀌는 것을 의미하며 해사채취를 통해서 파괴된 지형들이 창조류 방향으로 퇴적물이 이동하면서 새로운 dune을 형성한 것으로 보인다. L-02 단면 또한 L-01 단면과 유사하게 인위적인 해사채취로 인해서 많은 변화를 보이며 특히, L-01 단면과 다르게 북동지역에서 해사채취가 많이 이루어져 해사채취의 흔적인 웅덩이들이 많이 나타나고 남서방향으로의 급경사를 보이는데 이는 남서쪽 방향으로 퇴적물의 이동을 나타내며 이것은 경사비에서 1 보다 큰 값을 나타내는 것과 일치하고 있다.

Fig. 8. Temporal changes of profiles on the sand ridge. Location of profiles show Fig. 3. The differences between profile in January 2006 and profile in September 2007 of L-01 and L-02 profiles show the decrease of sediments due to sand mining

5. 토 의

전 세계적으로 조석우세환경인 대륙붕 해역(tidal shelf sea)에서 대형과 초대형 dune이 많이 분포하고 있으며 dune의 형태는 지역적인 퇴적물 특성, 유용도, 조류 그리고 파랑 등 여러 가지 요인들 사이의 상호작용에 의해서 계속적으로 변하고 있다. 따라서 흐름, 퇴적물 이동 그리고 해저지형(bedform) 사이의 강한 상관관계가 존재함에 따라 흐름과 퇴적물이 다른 환경에서 나타나는 지형의 종류와 형태(dimension) 그리고 이들의 이동과 침식을 예측하고자 하였으나 자연상태의 정확한 지형 파악과 dune 이

동에 대한 현장 관측 그리고 장비의 한계 등의 어려움으로 이런 시도들이 많이 이루어지지 않았다. 그러나 최근 장비의 정밀도가 향상되어 해저지형에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.

일반적으로 Flemming (1988)은 전 세계적 자료($n=1491$; 수조실험자료, 조석우세환경의 대륙붕, 해류우세환경의 대륙붕, 하구, 강)를 통해 매우 좋은 상관관계($r=0.98$)를 가진 power 관계식인 $H_{mean}=0.0677L^{0.8098}$ 을 나타내었으며 파고와 파장의 뚜렷한 상부경계인 $H_{max}=0.16L^{0.84}$ 을 제시하였다. Flemming (1988)의 관계식은 전 세계적인 양상을 나타내며 현재 퇴적학적, 수리학적 환경에 평형을 이

른 상태를 의미하고 이 식으로 예측된 파고보다 높은 파고를 보이는 dune은 현재 환경 하에서 활발하게 형성된 dune으로 해석되어 지고 있다(Kubo et al. 2004; Van Landeghem et al. 2009). 또한 dune의 크기가 커질수록 파장과 파고, 각각의 더 빠른 성장 사이의 평형을 유지하기 위한 제한요인이 퇴적물 공급임을 나타내고 있는데 즉, 정의된 두 직선에서 평균 H/L 관계식이 최대 H/L 관계식보다 더 낮은 경사도를 나타내는 것은 dune의 파장이 더 커질수록 더 높은 파고를 가진 완벽한 형태를 완성하기 위해 필요한 퇴적물이 공급되지 못할 확률이 커짐을 의미한다. 따라서 식에 의해서 예측되는 파고보다 더 낮은 파고를 가진다는 것은 실질적으로 불완전하고 퇴적물 양이 부족한 dune이 형성됨을 나타낸다(Flemming 2000a).

연구지역에서 측정된 dune의 파장과 파고의 상관관계 ($H_{mean} = 0.033L^{0.9446}$, $r = 0.79$)에서 상대적으로 긴 파장의 dune은 사퇴의 남동측면에서 나타나는 반면, 짧은 파장의 dune은 사퇴의 북서측면에서 주로 나타나고 있다. 또한 dune의 파장이 커질수록 Flemming (1988)의 예측파고보다 더 높은 파고를 나타내는데 이는 파장과 파고의 평형이 이루어지기 위해서 강한 조류와 유용할 수 있는 충분한 퇴적물이 필요조건이며 이런 조건이 충족되어 나타난 결과임을 의미한다. 따라서 사퇴 남동측면의 상대적으로 큰 파장과 높은 파고를 가지는 dune은 현재 환경인 충분한 퇴적물 유용도와 강한 조류에 의해서 발달, 유지되고 있다. 그러나 북서측면은 2007년 9월의 전체지형이 2006년 1월 전체지형보다 1,695,470 m^3 퇴적물의 부피가 감소하였는데 이중 대부분은 해사채취에 의한 것으로 보이며 해사채취 이후 새롭게 형성되는 dune 또한 상대적으로 짧은 파장과 낮은 파고를 나타낸다. 따라서 북서측면은 수리적인 변화보다 해사채취에 의한 퇴적물 유용도의 감소에 대한 영향이 더 큰 것으로 볼 수 있다. dune의 파장과 파고를 제어하는 요인 중 수심은 앞에서 언급했듯이 파장과 파고와 독립적인 분포양상을 보이고 있다(Fig. 6b, c). 다른 제어요인인 입도와의 관계에서 일반적으로 입도가 조

립할수록 발달한 dune의 파장과 파고는 증가하고, 반대로 입도가 세립해질수록 파고와 파장은 감소한다(Flemming 2000a; Bartholdy et al. 2002; Ernstsens et al. 2005). 또한 연구지역과 같이 조석우세환경을 나타내는 북해(North Sea) 지역은 dune과 사퇴 발달에 입도가 중요한 요인임을 보이고 있다(Van der Veen et al. 2006). 그러나 사퇴 정상에서 남동쪽 골로 갈수록 입도는 조립해지는 경향성을 보이지만, 파고와 파장은 사퇴 정상에서 골 지역으로 갈수록 감소하고 있다. 이것은 일반적인 양상과 반대의 양상을 보이고 있어 입도가 연구지역 dune 발달에 주요 제한 요인이 아님을 나타낸다. 마지막으로 파랑 또한 dune의 파고와 파장에 영향을 미칠 수 있는 요인으로 연구지역은 서쪽으로 외해와 열려져 있어 서풍계열의 바람에 큰 영향을 받을 수 있지만 파랑은 수심 15 m 이상일 때 대칭적인 움직임으로 상대적으로 미치는 영향이 미미한데 연구지역의 수심은 깊어(약 43 m) 크게 영향을 미치지 않을 것으로 보인다(Van Lijn and Walstra 2002). 이것은 연구지역에 발달되어 있는 dune의 steepness를 통해서도 알 수 있는데, 일반적으로 조석우세 환경에서 활발한 거대연흔(megaripple)과 dune(또는 sand wave)의 steepness는 일반적으로 각각 0.1과 0.01의 값을 나타내며(Swift et al. 1978; Amos and King 1984; Dyer 1986; Ashley 1990), 폭풍우세한 환경에서 거대연흔과 dune의 steepness는 각각 0.01~0.02와 0.003~0.036의 값을 나타내고 있다(Li and King 2007). 상대적으로 폭풍 우세한 환경에서 낮은 steepness 값을 보이는데 이는 강한 파랑의 진동에 의해서 급한 경사를 형성시키지 못하고 파고를 제한시키기 때문이다. 그러나 연구지역은 조석환경에서 나타나는 것보다 높은 steepness(평균 0.03)를 보이고 있어 파랑작용을 거의 받지 않는 조석우세환경임을 의미한다. 따라서 연구지역 dune의 크기는 파랑작용에 영향을 받지 않고 주로 강한 조류와 충분한 퇴적물 유용도에 의해서 제어되며 수심과 입도는 다른 요인과 연관되어 간접적으로 영향을 미칠 것으로 보이며 인위작용인 해사채취에 영향을 받고 있다.

Fig. 9. Temporal correlations of length and height of dunes on the crest, SE side and NW side of sand ridge

해사채취가 직접적으로 미치는 지형적 영향을 알아보기 위해서 중앙에 위치한 사퇴의 북서측면과 남동측면 그리고 정부의 발달한 dune의 파장과 파고의 상관관계를 나타내었다(Fig. 9). 정부에서는 Flemming (1988)의 관계식과 유사하지만 dune의 파장이 커질수록 상대적으로 낮은 파고를 보이는 반면, 남동측면은 반대 양상을 보이고 있다. 상대적으로 높은 파고를 보이는 큰 파장의 dune은 사퇴 위에 존재하고 남동쪽으로 갈수록 파장과 파고가 감소하고 있음을 의미한다. 이는 저층으로 갈수록 조류 속도의 감소와 퇴적물 유용도 감소에 의한 결과로 보인다. 북서측면은 전체적으로 Flemming (1988)의 관계식보다 낮은 파고를 보이고 있는데 이 지역은 많은 해사채취 활동에 의해서 형성된 웅덩이들이 원래 존재하던 dune을 파괴시켜 크기가 작고 불규칙적인 형태로 바꾸고 또한, 해사채취를 통해 퇴적물의 유용도가 감소하여 Flemming (1988) 평균 관계식보다 상대적으로 낮은 파고를 나타내고 있다(Fig. 9). 또한 해사채취가 지형에 미칠 수 있는 간접적인 영향으로 해사채취에 의한 해저퇴적물 교란으로 발생된 부유퇴적물이다. 부유퇴적물은 조류에 따라서 이동하는데 상대적으로 조립한 퇴적물은 가까운 곳에 재퇴적되고 세립한 퇴적물은 더 먼 곳으로 이동되어 퇴적된다(Kim and Lim 2009). 상대적으로 세립한 퇴적물이 퇴적됨으로 해서 표층 퇴적물의 입도가 감소하고, 이런 입도의 감소는 같은 조류 조건에서 상대적으로 낮은 파고를 발생시킨다(Flemming 2000a, 2000b; Ernstsens et al. 2005). 즉, 세립해진 퇴적물은 같은 조류 조건에서 더 많은 퇴적물이 부유 이동되고 부유된 퇴적물은 침강지연효과(settling-lag effect)에 의해서 불특정 위치에 퇴적됨으로 해서 상대적으로 주변지역에 발달되어 있는 dune의 파고를 더 감소시킬 수 있다(McCave 1971). 따라서 만약 해사채취가 계속적이고 집중적으로 이뤄진다면 해저지형 파괴뿐만 아니라 모래퇴적물 유용도 감소와 퇴적물 특성을 변화시켜서 dune의 형태를 변화시킬 것으로 보인다.

6. 결 론

연구지역의 3차원지형자료, 해저면 영상 그리고 퇴적물 특성을 통해 연구지역의 발달되어 있는 dune의 형태 변수와 인위적 작용인 해사채취로 인한 지형학적 변화를 알아 보았다. 연구지역의 사퇴는 북서방향의 급경사를 보이는 비대칭성 사퇴를 보이며 사퇴 남동측면에 발달되어 있는 대형과 초대형 dune은 창조류 방향의 비대칭성을 보이는 반면, 북서측면은 해사채취를 통해서 지형이 많이 파괴되었지만 낙조류방향인 남서방향의 비대칭성이 우세하게 나타나고 있다. 사퇴 위에 발달되어 있는 dune의 파고와 파장의 power 관계식은 $H_{mean} = 0.033L^{0.9446}$ ($r = 0.79$)로서

Flemming (1988)의 관계식과 비교를 통해서 사퇴 위에 존재하는 dune의 발달과 유지를 제어하는 주요 요인은 조류와 퇴적물 유용도임을 나타내고 있다. dune 발달에 영향을 미치는 다른 제한 요인인 수심과 퇴적물 특성은 주요 제한 요인이 아니지만 수리학적 또는 퇴적학적 작용으로 간접적으로 영향을 미칠 것으로 보인다. 또한 정부에서 남동쪽 골로 갈수록 dune의 파장과 파고가 감소하고 있는데 이는 저층으로 갈수록 감소하는 조류와 퇴적물 유용도의 감소에 의한 결과이며 시간이 갈수록 파장과 파고가 감소하는데 이는 해사채취에 의한 급격한 퇴적물 유용도의 감소와 조류의 상호작용에 의한 결과로 보인다.

인위적 작용인 해사채취가 지형학적으로 미치는 영향을 보면, 직접적으로 원래 존재하던 지형을 파괴시켜 짧은 파장과 낮은 파고의 불규칙적인 형태로 만들고 퇴적물 유용도를 감소시켜 시간이 지남에 따라 파고가 낮은 새로운 dune을 형성하고 있다. 그리고 간접적으로 모래퇴적물을 채취하면서 퇴적물을 교란되어 재부유된 세립한 부유된 퇴적물은 침강지연효과에 의해서 불특정 위치에 퇴적됨으로 해서 입도를 감소시켜 상대적으로 주변지역에 발달되어 있는 dune의 파고를 감소시킨다. 따라서 집중적이고 계속적인 해사채취 작용은 퇴적물 유용도의 감소와 퇴적물 특성을 변화시키고 이것은 dune의 형태를 변화시킬 것으로 보인다.

사 사

본 논문은 “시화호 해양환경 개선 사업(PM54793)”의 지원으로 수행되었으며 많은 도움을 주신 이용국 박사님, 이희일 박사님, 권수재 선생님 그리고 이철구 대학원생에게 감사드립니다. 또한 세심한 심사와 교정을 해주신 편집 위원님과 두 분의 심사 위원님께 감사드립니다.

참고문헌

- 건설교통부 (2005) 금년 수도권 모래수급은 원활할 전망, 2005년 골재수급계획 확정. 건설교통부 보도자료 4 p
- 국립해양조사원 (2008) 황해 아산만 중앙천퇴 거동연구. 110 p
- 김백운, 이상호, 양재삼 (2005) 서해 배타적경제수역(EEZ)내 해사채취구역의 지형변화. 한국해양학회지 26(8):836-843
- 김승우, 이윤오, 장정해 (1977) 아산만 일대 해저퇴적물 조사. 자원개발연구소 조사연구보고 2:163-244
- 김승우, 장정해, 박용안 (1978) 아산만 일대 해저퇴적물에 대하여. 광산지질 11(2):81-88
- 박문진 (2008) 화옹(남양만) 방조제에 따른 아산만의 조석변화. 한국해양학회지 「바다」 13(4):320-324
- 박정기 (1990) 한강하구역에서의 점토광물에 대한 연구. 이

- 학석사 학위논문, 인하대학교, 59 p
- 방효기, 이치원, 오재경 (1994a) 한반도 서부대륙붕에 발달한 사퇴의 발생기원과 특성. 한국해양학회지 **29**(3):217-227
- 방효기, 이호영, 장정해, 이치원, 오재경 (1994b). 경기만에 발달한 조류성사퇴의 역사 및 특성. 한국해양학회지 **29**(3):278-286
- 손규희, 한경남 (2007) 경기만의 해사채취에 의한 생물군집 구조변경. Ocean and Polar Res **29**(3):205-216
- 오재경, 방기영 (2003) 한강 유역과 경기만 퇴적환경의 연계성. 한국해양학회지 「바다」 **8**(3):22-236
- 유옥환, 이형곤, 이재학, 김동성 (2006) 경기만에서 해사채취가 대형저서동물 군집구조에 미치는 영향. Ocean and Polar Res **28**(2):129-144
- 장학봉 (2005) 해사자원의 지속가능한 이용방안. 월간 해양수산 **249**:83-97
- 최동립, 김성렬, 석봉출, 한상준 (1992) 한반도 황해 중부 태안반도 근해 사질퇴적물의 이동. 한국해양학회지 **27**(1):66-77
- 환경부 (1999) 해양 환경감시 및 평가기술 - 해저층 퇴적물 이동 관측 및 예측기술. 한국해양연구원, 359 p
- 해양수산부 (2005) 해사채취의 친환경적 관리방안 연구(I). 861 p
- 해양수산부 (2006) 해사채취의 친환경적 관리방안 연구(II). 950 p
- 해양수산부 (2007) 해사채취의 친환경적 관리방안 연구(III). 1174 p
- Allen JRL (1968) The nature and origin of bed-form hierarchies. Sedimentology **10**(3):161-182
- Amos CL, King EL (1984) Bedforms of the Canadian eastern seaboard: a comparison with global occurrences. Mar Geol **57**:167-208
- Ashley GM (1990) Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem. J Sediment Petrol **60**(1):160-172
- Bartholdy J, Bartholomae A, Flemming BW (2002) Grain-size control of large compound flow-transverse bedforms in a tidal inlet of the Danish Wadden Sea. Mar Geol **188**:391-413
- Berné S, Castaing P, Le Drezen E, Lericolais G (1993) Morphology, internal structure and reversal of asymmetry of large subtidal dunes in the entrance to Gironde Estuary (France). J Sediment Res **63**(5):780-793
- Chang TS, Kim SP, Yoo DG, Lee SJ, Lee EI (2010) A large mid-channel sand bar in the macrotidal seaway of Asan Bay, Korea; 30 years of morphologic response to anthropogenic impacts. Geo-Mar Lett **30**:15-22
- Chough SK (1983) Marine geology of Korean Seas. IHRDC, Boston, 157 p
- Chu YS (2000) Sediment dynamics and maintenance processes of linear tidal sand body; Jangan sandbank in the central west coast of Korea. Ph.D. Thesis, Seoul National University, 240 p
- Dyer KR (1986) Coastal and Estuarine Sediment Dynamics. Wiley & Sons, Chichester, England. 342 p
- Ernstsen VB, Noormets R, Winter C, Hebbeln D (2005) Development of subaqueous barchanoid-shaped dunes due to lateral grain size variability in a tidal inlet channel of the Danish Wadden Sea. J Geophy Res **110**:F04S08, doi:10.1029/2004JF000180
- Ernstsen VB, Noormets R, Hebbeln D, Bartholomae A, Flemming BW (2006) Precision of high-resolution multibeam echo sounding coupled with high-accuracy positioning in a shallow water coastal environment. Geo-Mar Lett **26**:141-149
- Flemming BW (1988) Zur Klassifikation Subaquatischer, Strömungstransversaler Transportkörper. Boch Geol Geotech Arb **29**:44-47
- Flemming BW (2000a) The role of grain size, water depth and flow velocity as scaling factors controlling the size of subaqueous dunes, in Marine Sandwave Dynamics. In: Proceeding of an International Workshop Held in Lille, France, 23-24 March 2000
- Flemming BW (2000b). On the dimensional adjustment of subaqueous dunes in response to changing flow conditions: a conceptual process model. In: Trentesaux, A., Garlan, T. (Eds.), Marine Sandwave Dynamics. International Workshop, University of Lille, France, 23 and 24 March 2000
- Folk RL (1968) Petrology of the sedimentary Rocks. Hemphill, New York, 170 p
- Heaps W (2004) Standards for the calibration of multibeam echosounders, are new standards required? Hydrogr J **111**:26-27
- IHO (1998) IHO Standards for hydrographic Surveys. International Hydrographic Bureau, Monaco, 26 p
- Jin JH (2001) A sedimentological study of long sediment cores in the eastern Yellow Sea. Ph.D Thesis, Seoul National University, 179 p
- Jackson RG (1976) Large scale ripples of the lower Wabash River. Sedimentology **23**:593-623
- Kim CS, Lim HS (2009) Sediment dispersal and deposition due to sand mining in the coastal waters of Korea. Continental Shelf Res **29**:194-204
- Klein G DeV, Park YA, Chang JH, Kim CS (1982) Sedimentology of a subtidal, tide-dominated sandy body in the Yellow Sea, southwest Korea. Mar Geol **50**:221-240
- Kubicki A, Manso F, Diesing M (2007) Morphological

- evolution of gravel and sand extraction pits, Tromper Wiek, Baltic Sea. *Estuarine Coastal and Shelf Science* **71**:647-656
- Kubo YS, Soh W, Machiyama H, Tokuyama H (2004) Bedforms produced by the Kuroshio Current passing over the northern Izu Ridge. *Geo-Mar Lett* **24**(1):1-7
- Li MZ, King EL (2007) Multibeam bathymetric investigations of the morphology of sand ridges and associated bedforms and their relation to storm processes, Sable Island Bank, Scotian Shelf. *Mar Geol* **243**:200-228
- McCave IN (1971) Sand waves in the North Sea off the coast of Holland. *Mar Geol* **10**(3):199-225
- Off R (1963) Rhythmic linear sand bodies caused by tidal currents. *Bull Am Assoc Pet Geol* **47**:324-341
- Park K, Oh JH, Kim HS, Im HH (2002) Case Study: Mass transport mechanism in Kyunggi Bay around Han river mouth, Korea. *J Hydraulic Eng* **128**:257-267
- Park SC, Lee SD (1994) Depositional patterns of sand ridges in tide-dominated shallow water environments: Yellow Sea coast and South Sea of Korea. *Mar Geol* **120**:59-103
- Park SC, Lee BH, Han HS, Yoo DG, Lee CW (2006) Late quaternary stratigraphy and development of tidal sand ridges in the eastern Yellow Sea. *J Sedi Res* **76**:1093-1105
- Park SC, Han HS, Yoo DG (2003) Transgressive sand ridges on the mid-shelf of the southern sea of Korea (Korea Strait): formation and development in high-energy environment. *Marine Geology* **193**:1-18
- Park SC, Yoo DG (1997) Bedform distribution and sand transport trend on a subtidal sand ridge in a macrotidal bay, west coast of Korea. *J Kor Soc Oce* **32**(4):181-190
- Swift DJP, Parker G, Lanfredi NW, Perillo G, Figge K (1978) Shoreface-connected sand ridges on American and European shelves-a comparison. *Est Coast Mar Sci* **7**:257-273
- Thornton EB, Sallenger A, Conforto Sesto J, Egley L, McGee T, Parsons R (2006) Sand mining impacts on long-term dune erosion in southern Monterey Bay. *Mar Geol* **229**:45-58
- Van der Veen HH, Hulscher SJMH, Knaapen MAF (2006) Grain size dependency in the occurrence of sand waves. *Ocean Dynamics* **56**:228-234
- Van Landeghem KJJ, Wheeler AJ, Mitchell N, Sutton G (2009) Variations in sediment wave dimensions across the tidally dominated Irish Sea, NW Europe. *Mar Geol* **263**:108-119
- Van Lijn LC, Walstra DJR (2002) Morphology of mining areas and effect on coast; literature review. Report Z3079.01 Delft Hydraulics, Delft, Netherlands
- Wells DE, Monahan D (2002) IHO S44 standards for hydrographic surveys and the variety of requirements for bathymetric data. *Hydrogr J* **104**:9-16
- Wienberg C, Hebbeln D (2005) Impact of dumped sediments on subaqueous dunes, outer Weser Estuary, German Bight, southeastern North Sea. *Geo-Mar Lett* **25**:43-53

Received Jul. 21, 2010

Revised Sep. 1, 2010

Accepted Sep. 16, 2010