Article

경기만 남부지역 사퇴 위에 발달된 dune의 이동

금병철* · 신동혁

한국해양과학기술원 해양방위센터
(426-744) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

Dune Migration on an Offshore Sand Ridge in the Southern Gyeonggi Bay, Korea

Byung-Cheol Kum* and Dong-Hyeok Shin

Maritime Security Research Center, KIOST
Ansan 426-744, Korea

Abstract : Two surveys were conducted in January 2006 and September 2007 with multibeam echosounder to investigate the dune shape, migration rate, and bedload transport rate using dune-tracking method on an offshore sand ridge at southern Gyeonggi Bay. The migration rates of dunes range from 1.8 myr^{-1} to 56.0 myr^{-1} , at the upper northwestern side of sand ridge towards the southwest direction and from the center of the sand ridge towards the northeast direction respectively. Large (i.e. length 10-100 m) dunes show faster migration ($0.3\text{-}23.4 \text{ myr}^{-1}$) than very large (i.e. length $> 100 \text{ m}$) dunes because larger dunes have required a larger volume of sediments to be displaced. The decreases in dimensions and migration rates of dunes from the center of sand ridge to the lower part of southeastern side on the sand ridge can be ascribed to the decrease of sandy sediments availability, tidal currents with depth, and the coarsening of surface sediments from the crest of the sand ridge to the trough. Bedload transport rates on the basis of migration rates and dune dimensions decrease from $74.5 \text{ m}^2\text{yr}^{-1}$ at C transect to $35.6 \text{ m}^2\text{yr}^{-1}$ at R-02 transect.

Key words : multibeam echosounder, dune, migration rate, bedload transport rate

1. 서 론

해저면에 발달되어 있는 베드폼(bedform)의 형태, 크기 그리고 이동은 지역적으로 복잡한 수역학적 조건(조석, 파랑, 해류 등)하에서 발생된 퇴적물 이동에 의한 결과를 나타내며(Ernstsen et al. 2005; Buijsman and Ridderinkhof 2008; Van Landeghem et al. 2012), 최근 고정밀 위치정보 시스템과 함께 고해상도 다중빔음향측심기를 이용해 정부선이 조류방향의 직각으로 형성되어 있는 dune(또는 sand

wave)에 대한 연구가 전세계적으로 많이 이루어 졌다(Ernstsen et al. 2005, 2006; Van Dijk and Kleinhans 2005; Kubicki 2008; Van Landeghem et al. 2009, 2012). 그러나 현재까지도 dune의 발달, 변화 그리고 소멸에 영향을 미치는 주요 작용들과 이들의 상호작용에 대해서는 정확히 밝혀지지 않은 상태이다. 또한 Stride (1963) 이후 dune의 파장, 파고, 첨도(steeptness), 비대칭 등과 같은 형태적 특징을 이용하여 퇴적물 이동을 유추하는 연구가 계속적으로 이루어지고 있으며(McCave and Langhorne 1982; Lobo et al. 2000), 더 최근에는 dune의 형태변수를 이용해서 dune의 이동률을 예측하였다(Knaapen 2005;

*Corresponding author. E-mail : bckum@kiost.ac

Xu et al. 2008). 그러나 dune의 형태변수와 이동에 관한 기존의 연구들(Baas 1994, 1999; Besio et al. 2004; Wienberg and Hebbeln 2005)은 대부분 하천, 연안환경 그리고 수조실험을 통해서 얻어진 결과인 반면, 더 깊은 외해지역에 대한 연구는 접근성, 시간적 제약에 의해 제한적으로 이루어지고 있다(Kubicki 2008; Van Landeghem et al. 2012).

황해 경기만 지역은 해침성 모래퇴적물(Chough 1983; Lee and Yoon 1997) 위에 다양한 형태와 크기의 베드폼(사퇴, dune(또는 모래파) 등)이 발달되어 있어 이와 관련된 연구들(최 등 1992; 방 등 1994a, b; Jung et al. 1998; Chu 2000; Chang et al. 2010)이 진행되어 왔지만, 다중빔 음향측심기로 획득한 고해상도 지형자료를 이용한 dune의 대한 연구는 최근 들어 이루어지고 있다(금 등 2010a, b; 장 등 2012). 외해지역의 퇴적물 이동은 지역적으로 연안 퇴적물 공급과 관련되어 있기 때문에 장기간의 연안 변화를 이해하기 위해서는 외해지역의 퇴적물 공급을 파악하는 것이 중요하다. 특히, 경기만 외해지역은 해양생태계를 훼손

하고 수산자원을 감소시키며 모래퇴적물의 감소와 해안 침식 등 연안환경에 큰 변화를 야기시키는 모래채취 활동이 진행되고 있어 외해지역의 퇴적물 이동에 대한 연구가 시급한 실정이다. 해저면에 발달된 dune의 이동은 실질적으로 퇴적물의 이동에 의한 결과로서 조석우세환경인 경기만 내에 발달된 사퇴에 대해서 반복적인 지형조사를 통해 사퇴 위에 발달된 dune의 형태적 특성과 dune의 이동 특성(이동방향과 이동률)을 알아보고 사퇴 정부에서 양 측면 하부까지 분포하는 dune의 형태 및 이동률의 변화요인을 파악하고자 하였으며 dune-tracking 방법을 이용해서 조사기간 내의 밑짐이동률을 계산하였다.

2. 연구지역 개관

조석우세환경인 황해 경기만의 표층퇴적물은 자갈에서 펄까지 다양한 퇴적상을 나타내지만 외해지역은 주로 모래가 우세한 퇴적상(모래, 약자갈질 모래, 자갈질 모래)이 나타나고 있다(금 등 2010a). 이 모래 퇴적물 위에는 다양

Fig. 1. Study area (diagonal area) between Seongap Island and Jangan Sandbank in the southern Gyeonggi Bay. The sand ridge is located in the center of study area elongated in the northeast-southwest direction. The black star is the location of the estimated tidal current (Chu 2000; C5)

Fig. 2. Distribution of sedimentary facies (a) of surface sediments sampled in January and February 2006 (modified from Kum et al. (2010b)). (b) is Mosaic image of study area which is shown by back-scattering strength of side scan sonar. Locations of transects (L-02, L-01, C, R-01, R-02) on the sand ridge are shown (modified from Kum et al. (2010b)). Geographical datum is WGS-84 and the projection is UTM (zone 52)

한 크기와 형태의 베드폼(dune 또는 sand wave; 이하 dune으로 통일)이 존재하며 활발하게 이동하고 있다(최 등 1992; Chu 2000; 금 등 2010b). 그러나 최근 수십 년 동안 급격한 굴저채취와 연안개발을 통해 경기만 내 환경적 변화(오와 방 2003; 박 2008), 생태학적 변화(유 등 2006; 손과 한 2007), 그리고 지형적 변화(금 등 2010a, b)가 발생되고 있다.

연구지역은 경기 남부 중앙, 선갑도와 장안사퇴 중간에 위치하며 연구지역과 장안사퇴 사이에는 골(trough)이 존재하고 있다(Fig. 1). 연구지역 중앙에는 북동-남서방향의 폭 약 2 km, 길이 3~4 km 그리고 높이가 약 20 m인 사퇴가 존재하며 같은 방향의 골이 북서쪽과 남동쪽에 존재하고 있다(금 등 2010b). 사퇴의 북서측면은 해사채취에 의해 형성된 많은 웅덩이(sand pit)들이 존재하는 반면, 남동측면은 대형~초대형 dune이 뚜렷한 형태로 발달되어 있다. 연구지역의 퇴적물 분포는 사퇴 정부에서 모래 퇴적상을 보이고 양쪽 골로 갈수록 자갈이 포함된 자갈질 모래

및 모래질 자갈을 나타내고 있고 사퇴를 중심으로 북서, 남동방향으로 갈수록 조립해지고 분급이 불량해지는 양상을 보이고 있다(Fig. 2a). 해저면 음향영상(Fig. 2b)에서 사퇴 지역은 상대적으로 약한 후방산란 음향강도를 나타내는 반면, 양쪽 골에서는 자갈함량 증가에 따라 상대적으로 높은 후방산란 음향강도를 보이고 있다.

울도와 풍도 사이에 위치한 연구지역의 조석은 반일주 조형을 보이고 있다(Fig. 1; 국립해양조사원 2006). 울도와 풍도의 최대조차는 각각 6.14 m와 7.15 m으로 대조차 환경이며 울도에서 동쪽으로 갈수록 조차가 증가하는 양상을 보이고 있다. 해수면 표층 하 5 m에서 측정된 창조류는 북동류(34~61°)하며 평균대조기 최강유속이 1.03~1.54 ms^{-1} 을 나타내고 낙조류는 남서류(221~244°)하며 1.18~1.6 ms^{-1} 의 범위로 낙조류 우세를 보이고 있다(국립해양조사원 2006). 조사지역 근처(정점 C5; Chu 2000; Fig. 1 별 기호)에서 1998년 7월에서 11월까지 측정된 해저면 1 m 위의 조류는 사리시 최대창조류와 낙조류는 각

각 0.98 ms^{-1} 와 0.74 ms^{-1} 이고 잔차류는 54.8° 로 0.18 ms^{-1} 을 나타내고 있다. 조금시 최대창조류와 낙조류는 각각 0.52 ms^{-1} 와 0.26 ms^{-1} 을 보이고 잔차류는 42.4° 의 방향과 0.09 ms^{-1} 을 보이고 있다. 즉 표층에서는 낙조류가 우세하고 저층으로 갈수록 창조류가 우세하게 나타나고 있다.

연구지역은 몬순계절풍의 영향으로 여름철에는 남풍 또는 남서풍이 우세하고 겨울철에는 북풍 또는 북서풍이 우세하다. 북풍은 평균 $8\sim 9 \text{ ms}^{-1}$ 의 바람이 지속되며 여름에는 지속적이지 않은 약한 남풍이 분다(김 등 2004). 경기만 주변 해역에서 파고를 발생시킬 수 있는 주된 바람 성분은 충분한 취주거리가 유지되는 서풍계열이지만 주변의 많은 섬들과 연안역을 접하고 있어 유의파고가 외해에서 연안으로 갈수록 3 m에서 1 m로 감소하고 있다(김 등 2004). 또한 조사해역 근처해역에서 외해 개방경계에서 북서(NW) 심해입사파(파고: 3 m, 주기: 8초)와 남서(SW) 심해입사파(파고: 3 m, 주기: 8초)를 입력조건으로 SWAN 모델을 운영한 결과(해양수산부 2007), 겨울철 파랑에 의한 영향보다는 여름철 파랑의 영향이 매우 크게 작용함을 나타내었다. 그리고 파랑과 해류의 상호작용에 의한 바닥 마찰계수를 계산하여 퇴적물 이동양상을 분석하는데 사용하는 Grant-Madsen-Glenn(GMG 모델; Glenn and Grant 1987) 해석모델을 통해 수심이 깊어질수록 파랑 효과를 고려한 바닥 마찰속도 역시 감소하고 있는데, 이는 파랑효과가 수심이 깊어질수록 감소하는 결과를 나타내며 수심 $30\sim 50 \text{ m}$ 의 깊은 수심에서는 파랑 효과가 크게 감소함을 보였다(박 2007). 그러므로 연구지역은 겨울철 보다는 여름철에 더 많은 파랑작용을 받지만 지속적이지 않은 약한 남풍이 불고 수심이 깊어질수록 파랑작용이 크게 감소하고 있어 연구지역 해저면에 미치는 파랑의 영향은 크게 고려할 부분이 아님을 나타낸다.

3. 재료 및 방법

해저지형 조사

고해상도 해저지형자료는 2006년 1월(중조기; 겨울철)과 2007년 9월(대조기; 여름철)에 다중빔음향측심기를 이용해서 획득되었다. 조사에 이용된 다중빔음향측심기는 200 kHz 의 주파수, 총 120° 각도의 SeaBat 8124(Reson사)로서 조사시 조사선의 선속은 $4\sim 5$ 노트를 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 ISIS(Triton Imaging Inc.)을 이용해서 XTF 파일형

Fig. 3. Schematic representation and definitions of the dune characteristics used in the study

식으로 저장하였다. 이 파일들은 Caris Hips를 이용해서 자료 처리하였으며 지형자료 결과는 Fledermaus 프로그램을 이용해서 나타내었다.

조사지역에 발달된 사퇴 위 dune의 형태변화와 이동을 알아보기 위해 중앙에 존재하는 사퇴와 평행하게 총 5개의 단면을 설정하였고 각 단면에 존재하는 dune의 정부(crest)를 선택하였다(Fig. 2b). 각 dune의 형태학적 특징인 형태변수는 파장(wavelength), 파고(height), 남서방향의 골과 정부 사이의 길이($L1$) 및 경사각(α), 북동(NE) 방향의 골과 정부사이의 길이($L2$) 및 경사각(β)를 측정하였다(Fig. 3). 파고와 파장의 비(H/L)를 통해서 첨도(steeptness)를 계산하였으며 dune의 비대칭 지수(asymmetry index)인 경사비(slope ratio)는 남서방향의 경사각과 북동방향의 경사각의 비(α/β)로 계산하였다. 경사비가 1보다 크다면 남서방향으로 기울어진 비대칭 형태를 나타내고 1보다 작다면 북동방향으로 기울어진 비대칭 형태를 보인다. 이동률은 5개 단면에서 선택된 정부의 조사 기간(606 일)에 대한 이동거리를 이용해서 계산하였고 이것을 연평균이동률(myr^{-1})로 환산하여 나타내었다. dune은 파장에 따라서 소형(small; $0.6\sim 5.0 \text{ m}$), 중형(medium; $5.0\sim 10.0 \text{ m}$), 대형(large; $10.0\sim 100.0 \text{ m}$) 그리고 초대형(very large; $>100.0 \text{ m}$)으로 구분하였다(Ashley 1990).

dune-tracking 방법을 이용한 밑집이동률

밑집이동률 Q (bedload transport rate; m^2yr^{-1})는 각 단면에서 선택된 dune의 형태 변수와 이동률을 이용해서 계산할 수 있다(Van den Berg 1987; Hoekstra et al. 2004; Ernsten et al. 2005; Buijsman and Ridderinkhof 2008).

$$Q = \frac{D_m}{L} V = \frac{D_m}{L} \beta H L = \beta D_m H \quad (1)$$

D_m : 이동률(myr^{-1} 또는 mday^{-1})

L : 파장(m)

H : 파고(m)

V : 단위 폭당 dune 내 모래 부피(volume of sand in the dune per unit width)

β : dimensionless form 또는 shape factor = $V/(HL)$

본 논문에서는 dune-tracking 과정에서 연속적으로 shape factor를 계산, 대입하여 밑짐이동률을 계산하였다 (Hoekstra et al. 2004).

4. 결 과

단면별 dune의 형태변수

2006년 1월과 2007년 9월, 2번의 다중빔음향측심기를 이용해 실시한 지형조사 결과(Fig. 4a, b)를 통해 사퇴 위에 설정된 각 단면에서 선택된 dune의 형태 변수를 Table 1에 나타내었다. L-01과 L-02 단면의 파장과 파고는 2006년 1월과 2007년 9월 모두 C, R-01과 R-02 단면 위에 발달된 dune의 파장과 파고보다 상대적으로 낮은 값을 보이고 L-01 단면의 파장과 파고는 L-02 단면보다 짧은 파장과 낮은 파고를 보이고 있다. 이런 결과는 L-01 단면이 위치한 북서측면의 서쪽지역은 2006년 1월 이전부터, 동쪽 지역은 2006년 1월과 2007년 9월 사이에 해사채취가 이루어져 기존의 dune이 파괴되고 많은 양의 퇴적물이 제거되면서 나타난 것이다(Fig. 4a, b 하얀 화살; 금 등 2010b).

2006년 1월과 2007년 9월의 형태변수 결과에서 dune의

파장은 L-01 단면을 제외하고 사퇴 정부(C 단면)를 중심으로 L-02 단면(북서방향)과 R-02 단면(남동방향)으로 갈수록 감소하고 파고는 R-01 단면을 중심으로 양쪽 골 방향으로 갈수록 감소하는 양상을 보이고 있다. L-02 단면에 발달된 dune의 남서방향의 길이(L1), 각도(α), 북동방향의 길이(L2), 각도(β)는 남서방향의 길이가 북동방향의 길이보다 짧고 남서방향의 각도가 북동방향의 각도보다 커서 남서방향으로 기울어진 형태를 보이는 반면, 나머지 단면들의 결과는 북동방향으로 기울어진 형태를 나타내고 있다. 이런 양상은 각 단면 dune의 비대칭성을 나타내는 경사비에서도 나타나고 있다. L-02 단면은 2006년 1월과 2007년 9월, L-01 단면은 2006년 1월 결과에서 1 보다 큰 경사비를 보이고 있는데 이는 남서방향으로 기울어진 비대칭 형태를 의미한다. 반면 C, R-01 그리고 R-02 단면에서는 두 번의 조사결과 모두 1 보다 작아 북동방향으로 기울어진 비대칭 형태를 나타내고 있다.

dune의 이동 및 방향

2006년 1월(Fig. 4a)과 2007년 9월(Fig. 4b)에 얻어진 고해상도 지형자료를 통해서 연구지역 내 발달되어 있는

Fig. 4. High-resolution bathymetries of study area in (a) January 2006 and (b) September 2007 (modified from Kum et al. (2010b)). The white arrows indicate sand pits due to sand mining. The differences in sediment wave crest configuration between January 2006 and September 2007 are indicated with small arrows; break-up in red and amalgamation in yellow. (c) shows difference of dune crests and blue arrow indicate migration of crests. Geographical datum is WGS-84 and the projection is UTM (zone 52)

Fig. 5. Bed profiles of transects L-02 to R-02 extracted from bathymetric grids with cell sizes of 1×1 m from both January 2006 and September 2007 (for locations, see Fig. 2b). Dune dimensions and migration rates were determined from the identified (numbered from 1 to 11) large to very large dunes (modified from Kum et al. (2010b))

dune의 정부선(crest line) 위치를 비교함으로써 dune의 이동방향을 유추하였다(Fig. 4c). 사퇴 남동측면에 발달된 dune의 정부선은 북동방향의 뚜렷한 이동을 나타내고 있지만 남동쪽 골지역으로 갈수록 정부선의 이동방향이 뚜렷하게 나타나지 않고 있다. 동일한 dune의 정부선임에도 불구하고 정부선은 남동쪽 골방향으로 갈수록 복잡하게 나타나고 반시계방향으로 돌아가고 있으며 정부선의 분리(break-up; 빨간색 화살) 또는 합쳐짐(amalgamation; 노란색 화살)을 보이고 있다(Fig. 4a, b). 반면, 사퇴의 북동지역은 중대형 dune이 장기간의 변화(606일)여서 2006년 1월과 2007년 9월 사이를 비교할 수 있는 같은 정부선임을

확인하기가 어렵다. 또한 사퇴 북서측면은 조사기간 동안 인위적 작용인 해사채취에 의해 최대 8.8 m(평균 3.1 m)가 깊어지면서 퇴적물이 제거되었고 기존의 초대형과 대형 dune들이 파괴되면서 소형과 중형 크기의 dune으로 바뀌면서 정부선이 변형되어 파악하기가 더 힘들어져 뚜렷한 이동방향을 보이지 않고 있다(Fig. 5 L-01과 L-02 단면; 금 등 2010b).

dune의 이동률 및 밑집이동률

각 단면에 존재하는 dune 정부를 선택하였고(Fig. 5), 각 선택된 정부의 2006년 1월과 2007년 9월 사이의 위치

Table 2. Migration rate of dunes on the transect (L-02 to R-02). Signs ‘-’ and ‘+’ mean northeastward migration and southwestward migration, respectively

Transect	Total No. Dune crest	Dune migration (myr ⁻¹)	
		Range	Avg.
L-02	2	+3.7~+7.3	+5.0
L-01	2	-1.8~+7.3	+3.2
C	9	+15.7~+56.0	+28.3
R-01	11	+15.7~+53.6	+30.3
R-02	9	+1.5~+30.4	+15.4

변화를 통해서 dune 정부의 이동률을 계산하였다(Table 2). 이동률을 계산할 때, 낙조류 방향인 남서방향으로의 이동은 음(-)으로, 창조류 방향인 북동방향의 이동은 양(+)으로 표시하였다.

북동-남서방향의 사퇴 정부에 위치한 C 단면에서 선택된 9개의 dune 정부의 이동률은 +15.7~+56.0 myr⁻¹의 범위로 모두 북동방향의 이동을 보이고 있다. R-01 단면에서 선택된 11개 dune 정부의 이동률은 +15.7~+53.6 myr⁻¹의 범위로 C 단면과 같이 모두 북동방향을 나타내며 뚜렷한 변화를 보이고 있다. R-02 단면의 9개 dune 정부의 이동률은 +1.5~+30.4 myr⁻¹의 범위로 북동방향의 이동을 나타내고 있어 사퇴 남동측면에 존재하는 dune 정부는 조사기간 동안 북동방향의 이동을 나타내고 있다. 그러나 해사채취에 의해 기존 지형이 파괴된 북서측면의 L-01과 L-02 단면은 2개씩의 dune 정부가 선택되었다. 먼저 L-01 단면에 존재하는 dune 정부의 이동률은 남서방향의 -1.8 myr⁻¹와 북동방향의 +7.3 myr⁻¹로 두 개의 정부 사이가 좁아지고 있다(Fig. 5A). L-02 단면의 선택된 dune 정부의 이동률은 각각 +3.7 myr⁻¹와 +7.3 myr⁻¹로 북동방향으로 이동하고 있다. 조사지역 내 사퇴의 C와 R-01 단면에 존재하는 dune 정부의 이동률이 상대적으로 높게 나타나고 남동쪽 골지역으로 갈수록 정부의 이동률은 감소하는 양상을 보이고 있다.

각 단면에서 선택된 dune 정부의 이동률과 형태변수인 파장과 파고를 식 (1)에 대입하여 계산된 밀집이동률(Table 3)을 보면, C 단면에서 밀집이동률은 13.3~164.6 m²y⁻¹의 범위로 평균 74.5 m²y⁻¹를 나타내고 있다. 그리고 R-01 그리고 R-02 단면의 밀집이동률은 각각 33.2~111.3 m²y⁻¹와 6.1~99.7 m²y⁻¹의 범위를 보이고 평균 밀집이동률은 72.8 m²y⁻¹와 35.6 m²y⁻¹을 나타내고 있다. 같은 단면에 위치해도 넓은 범위의 밀집이동률을 보이고 있지만 사퇴 중앙인 C 단면에서 남동쪽 측면 하부 갈수록 밀집이동률이 감소하는 양상을 보이고 있다. L-01과 L-02 단면의 밀집이동률은 해사채취의 영향을 감안하여 계산하지 않았다.

Table 3. Bedload transport rates from transects on the southeastern side of sand ridge

Transect	No. of dunes	Bedload transport rate (Q (m ² yr ⁻¹))	
		Range	Avg.
C	9	13.3~164.6	74.5
R-01	12	33.2~111.3	72.8
R-02	9	6.1~99.7	35.6

5. 토 의

본 연구에서 제시한 dune의 이동률은 2006년 1월(겨울철)과 2007년 9월(여름철)에 각각 조사된 지형자료를 이용하여 총 606일 동안 dune 정부가 이동된 거리를 연으로 환산한 연 평균이동률이다. 여기서 두 번의 조사가 다른 계절에 이루어져 dune 이동이 계절적 요인의 영향을 받아 본 연구에서 제시한 dune의 이동률이 실제 이동률과 차이를 보일 수가 있다. 경기만에 발달된 dune 이동의 계절적 변화에 영향을 미칠 수 있는 요인은 몬순계절풍 이다. 한반도 서해안은 몬순기후로 여름철에는 해양성 저기압의 영향으로 남 또는 남서풍이 주로 불고 겨울철에 대륙성 고기압에 영향으로 강한 북 또는 북서계절풍이 우세하게 불고 있다. 이런 몬순계절풍이 경기만 해역에 미치는 효과를 고려한 모델(SWAN 파랑모델) 결과(박 2007; 해양수산부 2007)를 보면, 여름철에는 우세한 남서풍에 의해서 창조시 유속이 강화되었고 반대로 낙조시는 약화되었으며 겨울철 바람 효과로 인하여 경기만 해역의 표층창조류는 세기가 10~20% 감소하고 낙조류는 다소 증가하는 경향성을 나타내고 있다. 이는 조석과 함께 작용하여 퇴적물 이동을 증가시킬 수가 있는데 Lee and Lee (2011)는 새만금 방조제 외해지역에서 겨울철 몬순계절풍에 의한 잔차류와 조류의 상호작용으로 인한 표층퇴적물 이동의 증가를 나타내었다. 또한 다른 요인으로서 동적점성도(kinematic viscosity)에 의존하는 침강속도(fall velocity)의 감소에 의한 영향이다. 조석우세환경에서 dune 이동률의 계절적 변화에 대한 연구(Buijsman and Ridderinkhof 2008)는 Wadden Sea 서쪽, 네덜란드 Marsdiep tidal inlet의 북부에 존재하는 모래파에 대해서 이루어졌다. 이 모래파의 파고와 이동률은 겨울철에 가장 빠른 이동률을 보이고 여름철에 가장 느린 이동률을 나타내며 가을철에 가장 높은 파고를 보이는 반면, 봄철에 가장 낮은 파고를 보이는 뚜렷한 계절적 변화를 보이고 있다. 이런 계절적 변화는 조석과 동적점성도(kinematic viscosity)에 의존하는 침강속도(fall velocity)의 감소에 의한 영향일 가능성을 제시하였다. 즉, 겨울철의 낮은 수온이 동적점성도를 증가시키고 침강속도를 감소시켜 부유퇴적물의 농도를 증가, 부유퇴적물

이동을 증가시켜 모래파의 파고가 감소하여 이동률이 더 빨라짐을 보였다(Ernstsen et al. 2005). 이런 계절적 요인들이 경기만 지역에 발달된 dune 이동에 영향을 미쳐 겨울철에는 낙조류 방향인 남동방향이 우세하고 여름철에는 창조류인 북동방향이 우세하여 실제 연평균 이동률은 본 논문에서 제시한 연평균 이동률과는 차이를 보일 것으로 보이며 이에 대한 자세한 연구가 필요할 것으로 보인다.

사퇴방향과 평행하게 설정된 각 단면의 대형 dune(파장 10-100 m)과 초대형 dune(파장 >100 m)의 이동을 보면, C 단면의 대형 dune은 28.5 myr^{-1} , 초대형 dune은 28.2 myr^{-1} 을 나타내고 있다. R-01 단면과 R-02 단면의 대형과 초대형 dune의 이동률은 각각 49.4 myr^{-1} , 26.0 myr^{-1} 와 23.8 myr^{-1} , 14.4 myr^{-1} 을 나타내고 있어 상대적으로 크기가 작은 대형 dune의 이동률이 초대형 dune의 이동률보다 크게 나타나고 있다. 또한 C, R-01 그리고 R-02 단면에서 대형 dune과 초대형 dune의 파고는 각각 2.5 m와 5.2 m, 2.3 m와 6.34 m 그리고 3.3 m와 6.23 m를 나타내고 있어 상대적으로 낮은 파고를 가진 dune이 상대적으로 높은 이동을 보이고 있다. 따라서 파장과 파고가 상대적으로 짧고 낮은 dune이 파장이 더 길고 파고가 높은 dune보다 상대적으로 더 빠른 이동을 나타내고 있다. 일반적으로 dune의 크기(파장과 파고)와 이동률의 관계는 수조실험에서 상대적으로 작은 dune이 더 빠른 이동을 나타낸다(Bass 1999; Venditti et al. 2005). Ernstsen et al. (2005)은 같은 단면에서 단위 시간당 운반되는 퇴적물량이 같아지기 위해서 크기가 작은 dune이 더 많이 이동해야 하기 때문에 dune의 파고가 작을수록 이동률이 증가함을 나타내었다. 그러므로 dune의 크기는 이동하는데 필요한 퇴적물량과 관련되어 dune의 크기가 클수록 더 많은 퇴적물이 필요하기 때문에 상대적으로 낮은 이동을 나타내고 있다.

연구지역 중앙 사퇴 정부에 위치한 C와 R-01 단면에서 R-02 단면으로 갈수록 dune의 파장, 파고 그리고 정부의 이동률이 모두 감소하는 양상을 보이고 있다. 연구지역에 발달되어 있는 dune의 파장과 파고를 제어하는 주요 요인은 조류와 퇴적물 유속도로서 사퇴 정부에서 남동쪽 골로 갈수록 파고와 파장의 감소는 주로 조류와 퇴적물 유속도의 감소에 의해 제어되고 있다(금 등 2010b). 연구지역의 조류는 표층에서 저층으로 갈수록 낙조우세에서 창조우세로 바뀌면서 속도는 감소하고 있다(환경부 1999; Chu 2000). 사퇴 정부와 골의 수심은 각각 31 m와 43 m로서 조류는 사퇴 정부보다 골에서 더 낮은 조류 속도를 나타낼 것으로 보이며 사퇴 정부에서 골로 갈수록 모래퇴적층 두께가 감소하여 퇴적물 유속도 또한, 감소하고 있다. 그리고 dune 파장과 파고에 영향을 미칠 수 있는 다른 요인인 수심과 퇴적물 특성은 직접적인 영향을 미치지 않지만

조류와 관련해서 간접적인 영향을 미침을 나타내었다(금 등 2010b). 사퇴 정부에서 남동쪽 골로 갈수록 표층퇴적물의 입도는 상대적으로 조립해지는 양상을 보이는데, 표층퇴적물의 입도가 조립할수록 dune의 파장과 파고는 증가하고, 반대로 입도가 세립해질수록 파고와 파장은 감소하는 기존 결과들(Flemming 2000; Batholdy et al. 2002; Ernstsen et al. 2005)과 다른 양상을 보이고 있다. 그러나 dune의 파고, 파장과 입도 사이의 관계는 퇴적물 크기가 0.2~0.6 mm 범위에서 양의 관계를 나타내며 퇴적물 크기가 0.5 mm보다 큰 퇴적물에서는 상대적으로 낮은 양의 기울기를 보인다(Flemming 2000). 또한 Bartholdy et al. (2002)은 입도가 0.5 mm보다 세립한 퇴적물에 대해서 파고와 퇴적물 크기 사이에 양의 관계가 존재함을 나타내었다. 그러나 연구지역 사퇴 정부의 표층퇴적물 중앙값(D_{50})은 0.51 mm, 남동방향의 골지역 퇴적물의 평균 중앙값은 0.95 mm로 골지역에 존재하는 표층퇴적물은 극조립사 이상의 퇴적물로서 이 입도와 파장, 파고 사이에 양의 관계의 존재여부는 정확하지 않아 입도가 파장과 파고의 감소에 대해 영향을 미치고 있는지에 대해서 판단이 어렵다. 그러나 조사된 사퇴 정부와 남동측면 골지역의 표층퇴적물이 움직이기 시작하는 임계속도를 Van Rijn (1984)이 제시한 수식을 통해서 계산한 결과, 각각 0.55 ms^{-1} 와 0.69 ms^{-1} 을 나타내고 있는데, 이런 결과는 상대적으로 골보다는 사퇴 정부에 있는 퇴적물이 더 쉽게 이동할 수 있고 더 많은 퇴적물이 이동될 수 있음을 보이고 있다. 따라서 사퇴 정부에서 골로 갈수록 모래 퇴적물의 감소, 수심에 따른 조류의 감소 및 퇴적물 입도의 증가에 의해서 이동될 수 있는 퇴적물 양의 감소는 사퇴의 정부에서 남동쪽 골로 갈수록 dune의 파장, 파고와 이동률의 감소를 야기시키고 있음을 나타내고 있다. 이것은 dune-tracking 방법을 통해 dune 크기와 이동률로 계산된 밀집이동을 또한 사퇴정부에서 남동쪽 측면 하부로 갈수록 감소하고 있다. dune의 파장, 파고 그리고 이동을 통해서 계산된 밀집이동률은 여러 가지 경험식을 통해서 계산된 밀집이동률보다 낮은 값을 보이고 있다(Hoekstra et al. 2004; Ernstsen et al. 2005; Buijsman and Ridderinkhof 2008). 이런 경험식에 의한 밀집이동률과 dune-tracking을 이용한 밀집이동률이 다르게 나타나는 것은 충분하지 않는 해상도의 해저 지형 자료, 수역학적 자료 그리고 표층퇴적물 입도 자료 등의 부족에 의한 결과이다. 따라서 더 정확한 밀집이동을 계산을 위해서는 더 정확하고 풍부한 자료 축적이 필요할 것이다.

6. 결 론

2006년 1월과 2007년 9월에 다중빔음향측심기를 이용

하여 조석우세환경인 경기만 남부에 발달된 사퇴를 대상으로 사퇴 위에 발달되어있는 dune의 형태, 이동방향 및 이동률 그리고 밀집이동률을 알아보았다. 사퇴 위에 발달된 dune의 이동방향은 사퇴 남동측면에서 뚜렷한 북동방향의 이동이 나타나는 반면, 사퇴 북서측면은 인위적 작용인 해사채취에 의해 기존 dune이 파괴됨으로 해서 정확한 형태 및 이동이 파악되지 않는다. 사퇴 남동측면 각 단면 위에 발달되어 있는 dune의 파장과 파고가 짧고 낮을수록 이동률이 빠르게 나타나고 있는데 이는 dune이 이동하는데 필요한 퇴적물량과 관련되어 dune의 크기가 클수록 많은 퇴적물량이 필요하기 때문에 상대적으로 낮은 이동률을 보인다. 그리고 사퇴 정부에서 남동방향의 골로 갈수록 dune의 파장, 파고 그리고 이동률이 감소하는데 이는 사퇴 정부에서 남동방향으로 갈수록 모래 퇴적물이 감소하고 수심에 따른 조류의 감소와 퇴적물 입도의 증가에 의해 dune 성장에 필요한 퇴적물과 퇴적물 이동을 감소시켜 나타난 결과로 보인다. 그러므로 dune의 크기와 이동률을 이용해서 계산된 밀집이동률 또한 정부에서 남동쪽 측면 하부로 갈수록 감소하고 있다.

사 사

세심한 심사와 교정을 봐주신 두 분 심사위원과 바쁘신 중에도 자세한 교정을 해주신 편집위원님께 감사드립니다.

참고문헌

국립해양조사원 (2006) 선감도분근 연안해역 해저정보조사 결과보고서. 123 p

금병철, 신동혁, 정섬규, 이용국, 오재경 (2010a) 황해 경기만 남부해역에 발달된 층면구조의 형태적 특징과 제어요인. 한국지구과학회지 **31**(6):608-624

금병철, 신동혁, 정섬규, 장석, 장남도, 오재경 (2010b) 경기만 남부에 발달된 해저지형의 형태적 특징 및 해사채취에 의한 변화. Ocean and Polar Res **32**(4):337-350

김태희, 오희진, 윤용훈 (2004) 경기만 주변 해역의 국지파랑 관측자료 비교. 한국기상학회지 **40**(4):485-495

박문진 (2008) 화옹(남양만) 방조제에 따른 아산만의 조석변화. 한국해양학회지 「바다」 **13**(4):320-324

박준석 (2007) HEM-3D 수치모델을 이용한 경기만 남부지역의 지형변화 양상. 이학석사 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):222-236

유육환, 이형곤, 이재학, 김동성 (2006) 경기만에서 해사채취가 대형저서동물 군집구조에 미치는 영향. Ocean and Polar Res **28**(2):129-144

장태수, 민건홍, 서영교, 하헌준, 백건하 (2012) 다중빔 음향측심기를 이용한 해저수중사구의 층면구조 분석: 어청도 서부해역. 한국수로학회지 **1**(1):57-65

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, BSPN96338-00-1000-5, 359 p

해양수산부 (2007) 해사채취의 친환경적 관리방안 연구 (III). 한국해양수산개발원, GOVP1200810214, 1174 p

Ashley GM (1990) Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem. J Sediment Petrol **60**(1):160-172

Baas JH (1994) A flume study on the development and equilibrium morphology of current ripples in very fine sand. Sedimentology **41**(2):185-209

Baas JH (1999) An empirical model for the development and equilibrium morphology of current ripples in fine sand. Sedimentology **46**(1):123-138

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**(3-4):391-413

Besio G, Blondeaux P, Brocchini M, Vittori G (2004) On the modeling of sand wave migration. J Geophys Res **109**(C4):C04018. doi:10.1029/2002JC001622

Buijsman MC, Ridderinkhof HO (2008) Long-term evolution of sand waves in the marsdiep inlet. II: Relation to hydrodynamics. Continental Shelf Res **28**(9):1202-1215

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. International Human Resources Development Cooperation, Boston, 157 p

Chu YS (2000) Sediment dynamics and maintenance processes of linear tidal sand body; Jangsan sandbank in the central west coast of Korea. Ph.D. Thesis, Seoul National University, 240 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 Geophys Res* **110**(F4): F04S08. doi:10.1029/2004JF000180
- Ernstsen VB, Noormets R, Winter C, Hebbeln D, Bartholomew A, Flemming BW, Barholdy J (2006) Quantification of dune dynamics during a tidal cycle in an inlet channel of the Danish Wadden Sea. *Geo-Mar Lett* **26**(3):151-163.
- Flemming BW (2000) The role of grain size, water depth and flow velocity as scaling factors controlling the size of subaqueous dunes. In: *Marine Sandwave Dynamics, Proceeding of an International Workshop, Lille, France, 23 and 24 March 2000*, pp 240
- Glenn SM, Grant WD (1987) A suspended sediment stratification correction for combined wave and current flows. *J Geophys Res* **92**(C8):8244-8264
- Hoekstra P, Bell P, Van Santen P, Roode N, Levoy F, Whitehouse R (2004) Bedform migration and bedload transport on an intertidal shoal. *Cont Shelf Res* **24**(11): 1249-1269
- Jung WY, Suk BC, Min GH, Lee YK (1998) Sedimentary structure and origin of a mud-cored pseudo-tidal sand ridge, eastern Yellow Sea, Korea. *Mar Geol* **151**(1-4):73-88
- Knappen MAF (2005) Sandwave migration predictor based on shape information. *J Geophys Res* **110**(F4):F04S11. doi:10.1029/2004JF000195
- Knappen MAF, Van Bergen Henegouw CN, Hu YY (2005) Quantifying bedform migration using multi-beam sonar. *Geo-Mar Lett* **25**(5):306-314
- Kubicki A (2008) Large and very large subaqueous dunes on the continental shelf off southern Vietnam, South China Sea. *Geo-Mar Lett* **28**(4):229-238
- Lee HJ, Yoon SH (1997) Development of stratigraphy and sediment distribution in the northeastern Yellow Sea during Holocene sea-level rise. *J Sediment Res* **67**(2): 341-349
- Lee HJ, Lee S (2011) Sand Transport offshore the Saemangeum Dike, Midwest Coast of Korea. *J Coastal Res* **27**(1):153-165
- Lobo FJ, Hernandez-Molina FJ, Somoza L, Rodero J, Maldonado A, Barnolas A (2000) Patterns of bottom current flow deduced from dune asymmetries over the Gulf of Cadiz shelf (southwest Spain). *Mar Geol* **164**(3): 91-117
- McCave IN, Langhorne DN (1982) Sand waves and sediment transport around the end of a tidal sand bank. *Sedimentology* **29**(1):95-110
- Stride AH (1963) Current swept sea floors near the southern half of Great Britain. *Q J Geol Soc Lond* **119**(1-4):175-197
- Van den Berg JH (1987) Bedform migration and bed-load transport in some rivers and tidal environments. *Sedimentology* **34**(4):681-698
- Van Dijk TAGP, Kleinhans MG (2005) Processes controlling the dynamics of compound sand waves in the North Sea, Netherlands. *J Geophys Res* **110**(F4):F04S10. doi:10.1029/2004JF000173
- 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**(1-4):108-119
- Van Landeghem KJJ, Baas JH, Mitchell NC, Wilcockson D, Wheeler AJ (2012) Reversed sediment wave migration in the Irish Sea, NW Europe: A reappraisal of the validity of geometry-based predictive modelling and assumptions. *Mar Geol* **295-298**:95-112
- Van Rijn LC (1984) Sediment transport, Part I: bedload transport. *J Hydraul Eng* **110**(10):1431-1456
- Venditti JG, Church M, Bennet SJ (2005) On the transition between 2D and 3D dunes. *Sedimentology* **52**(6):1343-1359
- Wienberg C, Hebbeln D (2005) Impact of dumped sediments on subaqueous dunes, outer Weser Estuary, German Bight, southeastern North Sea. *Geo-Mar Lett* **25**(1):43-53
- Xu JP, Wong FL, Kvitdk R, Smith DP, Paull CK (2008) Sandwave migration in Monterey Submarine Canyon, Central California. *Mar Geol* **248**(3-4):193-212

Received Oct. 4, 2012

Revised Jan. 18, 2013

Accepted Mar. 25, 2013