

조석우세환경인 경기만에 발달된 수중사구의 형태·퇴적학적 변화

금병철[†]

(원고접수일 : 2013년 10월 30일, 원고수정일 : 2014년 3월 11일, 심사완료일 : 2014년 5월 20일)

Morphological and sedimentological changes of subaqueous dunes in the tide-dominated environment, Gyeonggi Bay

Byung-Cheol Kum[†]

요약: 경기만 남부 지역에 발달되어 있는 수중사구의 형태 특성 및 변화를 알아보고 수중사구의 발달 제어요인을 파악하기 위해서 2004년 9월과 2006년 9월에 고해상도 다중빔음향측심기를 이용한 지형조사와 퇴적학적 조사를 실시하였다. 연구지역은 현재의 조류세기와 퇴적물 특성이 대형 수중사구가 충분히 발달, 유지될 수 있는 조건을 나타내고 있다. 시간에 따른 퇴적물 특성 변화, 즉, 입도의 감소는 초대형 수중사구의 파괴를 감소시키고 있어, 입도가 연구지역 내 수중사구 크기 발달에 영향을 미치는 주요 요인임을 나타낸다.

주제어: 다중빔음향측심기, 수중사구, 입도, 제어요인

Abstract: In september 2004 and 2006, topographical and sedimentological survey were carried out using multibeam echosounder, which were to investigate shape characteristics, temporal changes and control factors of the subaqueous dunes in the southern Gyeonggi Bay. The present tidal current and sedimentary characteristics of study area make conditions that the sizes (length and height) of large subaqueous dunes are developed and maintained sufficiently. The change of sedimentary characteristics over time, the decrease in grain size causes reduction in the height of very large subaqueous dunes. Therefore it shows that the grain size of surface sediments is a primary control factor in defining subaqueous dune sizes in the study area.

Keywords: Multibeam echosounder, Subaqueous dunes, Grain size, Control factors

1. 서론

해저면에 발달되어 있는 층면구조(사퇴, 수중사구(또는 모래파) 등)는 지역적으로 복잡한 수리·물리적 작용에 의한 퇴적물 이동 결과로서 연구가 많이 진행되어 왔다[1]-[6]. 특히, 최근 고해상도의 다중빔음향측심기술과 고정밀 위치 측정기술(DGPS)의 발달과 함께 주파수와 수심에 따라서 수십~수백 미터(m)의 파장을 갖는 수중사구의 수평, 수직적인 변화 측정이 가능하며 수중사구의 형태

특성 및 이동 등을 정확하게 파악할 수가 있어 이에 대한 연구가 진행되고 있다[7]-[9].

황해 경기만 지역은 해침성 모래퇴적물[10] 위에 다양한 형태와 크기의 층면구조가 발달되어 있다[7][8][11]-[13]. 그러나 경기만 지역은 연안개발, 준설 그리고 해사채취 등의 직·간접적인 영향으로 수리 환경적 변화가 발생하고 있으며[13][14], 이것은 퇴적물 이동에 영향을 미쳐 해저면에 발달된 수중사구를 변화시킬 수가 있다. 또한 수중사구의 이동

[†] Corresponding Author: Maritime Security Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology, 787 Haeanro, Ansan 426-744 Korea, E-mail: bckum@kiost.ac, Tel: 031-400-6256

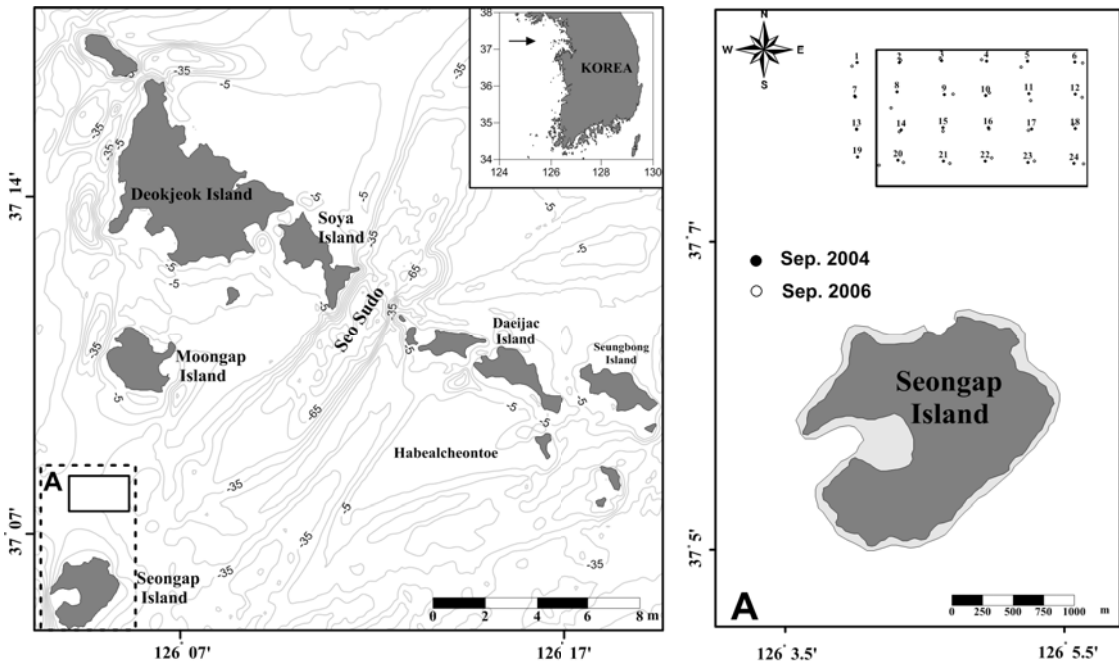


Figure 1: Location map of study area and 24 stations of surface sediments. Study area is located between Moongap Island and Seongap Island.

및 변화는 해저케이블, 파이프 매설 그리고 항해수심유지 등에 영향을 미칠 수가 있지만, 현재 수중사구에 대한 국내 연구는 제한적으로 이뤄지고 있다[7][8][13]. 따라서 본 연구는 경기만 남부 선갑도 북쪽에 위치하는 연구지역을 2004년 9월과 2006년 9월에 고해상도 다중빔음향측심기를 이용한 지형 조사와 퇴적학적 조사를 통해서 2년 동안의 사구의 형태 특성과 변화 그리고 이에 대한 제어요인을 파악하는데 목적이 있다.

2. 연구지역

연구지역은 경기만 남부 문갑도와 선갑도 사이에 위치하며(Figure 1) 수심은 10~40 m 범위로 동쪽으로 갈수록 깊어지며 대이작도와 덕적도 사이의 수로(서수도)와 연결되어 있다. 대이작도 남서쪽에는 저조시에 노출이 되는 하벌천퇴가 존재한다. 조석은 반일주조(semi-diurnal)가 우세하며 대조차, 소조차 그리고 평균조차는 각각 7.2 m, 2.3 m 그리고 4.7 m을 보이고 있다. 해저면 위 2 m에서 2004년 9월(9~25일)에 RCM9 (Aanderaa)를 이용해

측정된 조류는 창조시 북동방향($60^{\circ}\sim 65^{\circ}$), 낙조시 남서방향($225^{\circ}\sim 255^{\circ}$)을 나타내고 창조류와 낙조류의 유속은 거의 대칭성을 보이며 평균유속은 0.4 m/s, 최강유속은 0.8 m/s 이다.

경기만 지역은 문순계절풍의 영향을 받아 여름에는 남풍 또는 남서풍이 우세하고 겨울철에는 북풍 또는 북서풍이 우세하다. 북풍은 평균 8~9 m/s의 바람이 지속되며 여름에는 지속적이지 않은 약한 남풍이 분다. 그러나 경기만 주변 해역에서 파고를 발생 시킬 수 있는 주된 바람 성분은 충분한 취주거리가 유지되는 서풍 계열이지만 주변의 많은 섬들과 연안역을 접하고 있어 파고가 연안으로 갈수록 감소하게 된다[15].

3. 재료 및 방법

고해상도 해저지형자료는 2004년 9월과 2006년 9월에 다중빔음향측심기를 이용해서 획득되었다. 조사에 이용된 다중빔음향측심기는 주파수 200 kHz, 총 120° 각도의 SeaBat 8124 (Reson)로서 조사시 조사선의 선속은 4~5 노트를 유지하도록 했고

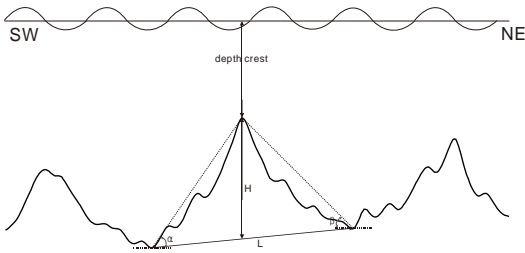


Figure 2: Schematic representation and definitions of the dune characteristics used in the study area.

측선간 조사면적은 10% 이상 겹치도록 하였다. 조위에 따른 수심오차는 조석계(RBR:XT-420-TG)를 이용해서 실측, 보정하였다. 수중음파속도 및 선박의 방향과 움직임에 대한 보정은 각각 수중음파속측정기(Reson, SVP-15)와 자이로-모션센서인 Octan (IXSEA)을 이용하였고, 모든 주변 장비들로부터 들어오는 정보들은 획득 프로그램인 Triton ISIS (Triton Imaging Inc.)을 이용해서 XTF 파일형식으로 저장하였다. 이 파일들은 Caris Hips를 이용해서 자료 처리하였으며 지형자료 결과는 Fledermaus 프로그램을 이용해서 나타내었다. 수심조사에 대한 정밀도는 일반적으로 IHO (International Hydrographic Organization)에서 제시한 수리측량조사 기준에 따라 평가하는데 최신의 고해상도 다중빔음향측심기를 이용한 수심조사는 쉽게 IHO S44 Special Order standards[16]에 만족하지만[17][18], 조사시 시스템 설치 위치와 해양날씨 등에 의해서 차이가 발생할 수 있기 때문에 최대한 오차가 발생하지 않도록 하였다[5].

수중사구의 형태학적 특징을 나타내는 형태변수로서 각각의 수중사구에 대한 파장(length), 파고(height), 남서방향의 경사각(α), 북동(NE)방향의 경사각(β)을 측정하였다(Figure 2). 파고와 파장의 비(H/L)를 통해서 첨도(steeptness)를 계산하였으며 수중사구의 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. 수중사구는 파장에 따라서 소형 (small; 0.6~5.0 m), 중형(medium; 5.0~10.0 m), 대형

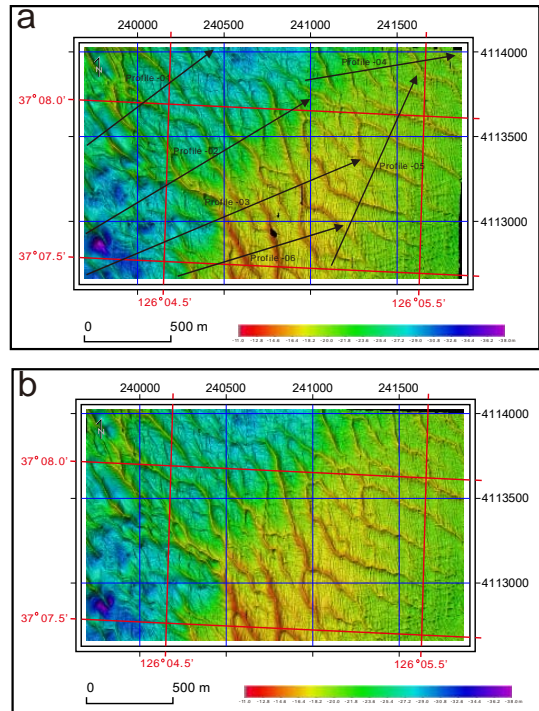


Figure 3: High-resolution bathymetries of study area in (a) September 2004 and (b) September 2006. Geographical datum is WGS-84 and the projection is UTM (zone 52).

(large; 10.0~100.0 m) 그리고 초대형(very large; >100.0 m)으로 구분하였다[19].

연구지역의 표층퇴적물 분포 특성을 알아보기 위해서 2004년 9월과 2006년 9월에 각각 24개 시료, 총 48개 시료를 채취하였고 실험실에서 입도분석을 실시하였다. 퇴적상(sediment type) 분류는 Folk[20] 방법을 따랐으며, 그 외 평균입도(Mz), 분급도(Sorting; Standard Deviation)는 통계처리하여 값을 구하였다.

4. 결과

4.1 지형적 특징

2004년 9월: 수심은 11.4~37.1 m 범위로 평균 20.8 m을 나타내며 조류방향과 평행한 북동-남서 방향의 골과 폭 1 km, 길이 1.2 km, 높이 8~11 m의 사퇴가 발달되어 있다(Figure 3a). 완만한 경사를

나타내는 사퇴의 남동측면은 2차원적이고 직선 또는 약간의 물결 형태의 정부선(crest-line)을 가진 수중사구를 보이고 있다. 상대적으로 긴 파장(150 m 이상)과 낮은 파고(3~4 m)의 초대형 수중사구가 105~120° (240~255°)방향으로 발달되어있고 남서쪽으로 갈수록 대칭 형태가 비대칭 형태로 바뀌고 있다. 사퇴 남동측면의 초대형 수중사구 사이에는 남-북 방향으로 2차원적인 물결 형태의 갈라지는 정부선을 가진 중형과 대형 수중사구가 나타나며 파장이 주로 10~30 m, 파고는 0.2~0.6 m을 보이고 있다. 반면, 급한 경사를 나타내는 사퇴의 북서측면에 발달된 수중사구는 물결형태의 정부선이 갈라지고 합쳐지고 있으며 주로 132~166° (312~346°) 방향으로 발달되어 있다. 그리고 북동쪽으로 갈수록 파고가 7~8 m에서 3~4 m로 낮아지며 대칭형태의 수중사구가 북동방향으로 기울어진 비대칭 형태의 수중사구로 바뀌고 있다. 초대형 수중사구 사이의 지역은 주로 북서-남동 방향의 2차원적인 물결모양과 갈라지는 형태의 중형과 대형 수중사구가 발달되어 있다.

2006년 9월 : 2년 후인 2006년 9월에 조사된 연구지역의 수심은 11.8~36.4 m의 범위로 평균 21.4 m을 나타내고 있다(Figure 3b). 2004년 9월 지형과 크게 변화된 부분은 보이지 않지만 연구지역 서부 지역은 수중사구가 이동하여 합쳐지거나 분리되어 정부선의 위치 및 형태 변화가 나타나고 있다. 특히, 사퇴 북서측면에 위치하고 있는 수중사구의 변화가 뚜렷하게 나타나고 있다. 반면, 완만한 경사를 보이는 사퇴 남동측면의 2차원적인 직선 형태의 수중사구들은 2004년 9월보다 위치 변화는 크게 나타나지 않지만 직선에서 물결형태로 바뀌었다.

4.2 표층퇴적물의 특성

2004년 9월: 표층퇴적물은 모래함량이 대부분 96% 이상으로 모래(S) 퇴적상을 보이며 부분적으로 약자갈질 모래((g)S)와 빨질 모래(mS)를 보이고 있다. 평균입도는 0.3~1.9 Φ 범위로 대부분 조립사와 중립사를 나타내며 연구지역의 동측이 서측보다 상대적으로 세립한 입도를 보인다. 분급도는 0.2~2.3 Φ 의 범위로 대부분 양호한 분급을 보이고

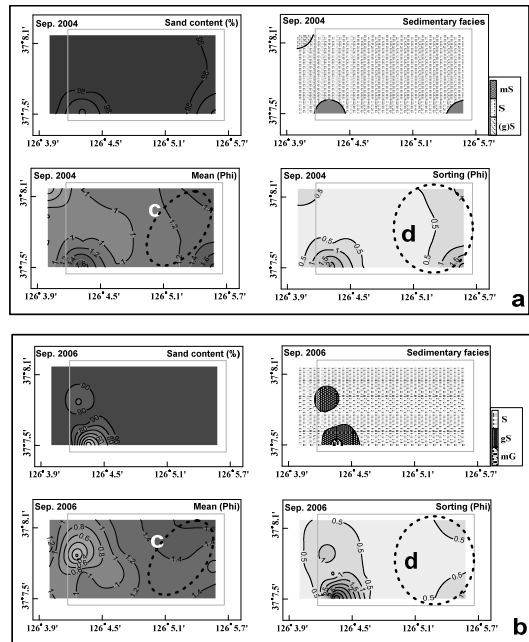


Figure 4: Distributions of sand content, sedimentary types, mean and sorting of surface sediments sampled in September 2004 and September 2006.

연구지역의 서측이 동측보다 상대적으로 양호한 분급을 나타내고 있다(Figure 4a).

2006년 9월: 2004년 9월과 같이 대부분 모래함량이 96% 이상으로 모래 퇴적상을 보이며 부분적으로 자갈함량이 증가하여 자갈질 모래(gS)와 빨질 자갈(mG)을 보인다(Figure 4b). 평균입도는 -0.1~1.8 Φ 로 자갈, 조립사 그리고 중립사를 나타내고 연구지역의 동측이 서측보다 상대적으로 세립한 입도를 보인다. 분급도는 0.4~4.5 Φ 범위를 보이지만 대부분은 1.4 Φ 이하의 양호한 분급을 나타내고 있다(Figure 4b).

평균입도 분포는 전체적으로 서에서 동, 북동으로 갈수록 세립해지는 양상을 보이며 2004년 9월 퇴적물보다 2006년 9월의 퇴적물이 상대적으로 세립해졌다. 특히, 연구지역 북동쪽지역(Figure 4c; 점선 원)에서 뚜렷하게 세립해지는 양상을 보이고 있다. 분급도는 사퇴 부분에서 상대적으로 양호한 분급을 나타내며 사퇴에서 서측과 동측으로 갈수록 분급이 불량해지고 있지만 시간이 갈수록 사퇴의

Table 1: Shape parameters of subaqueous dunes in the survey area on September 2004 and September 2006.

	No.	Minimum	Maximum	Avg.
Sep. 2004	54			
Length (m)		24.5	267.0	122.9
Height (m)		0.8	9.4	3.7
α (°)		0.9	9.4	4.2
β (°)		1.0	11.0	3.7
Steepness		0.012	0.088	0.032
Slope Ratio		0.2	2.9	1.3
Sep. 2006	56			
Length (m)		31.3	252.1	118.9
Height (m)		0.7	8.0	3.4
α (°)		1.2	9.9	3.9
β (°)		0.9	11.1	3.7
Steepness		0.011	0.086	0.030
Slope Ratio		0.3	3.6	1.3

서측지역은 불량해지고 동측지역(Figure 4d; 점선 원)은 상대적으로 양호해지고 있다.

4.3 형태 변수의 특징

연구지역에 발달되어 있는 수중사구의 형태학적 특징 및 변화를 알아보기 위해 총 6개의 단면을 설정하였고(Figure 3a) 각 단면에 존재하는 수중사구의 형태적 특징 결과를 Table 1에 나타내었다.

2004년 9월 : 총 6개 단면에서 정의된 수중사구의 개수는 54개로서, 파장은 24.5~267.0 m 범위로 평균 122.9 m이고 파고는 0.8~9.4 m의 범위로 평균 3.7 m의 대형과 초대형 수중사구를 나타내고 있다. 각 단면에 나타나는 수중사구의 남서방향의 경사각(α)은 0.9~9.4°의 범위로 평균 4.2°을 나타내고 북동방향의 경사각(β)은 1.0~11.0° 범위로 3.7°의 평균값을 보이고 있다. 비대칭 지수(asymmetry index)인 경사비의 범위는 0.2~2.9, 평균 1.3으로 남서방향으로 기울어진 비대칭을 나타내고 있다. 첨도의 범위와 평균은 각각 0.012~0.088, 0.032를 나타내고 있다(Table 1).

2006년 9월 : 정의된 수중사구는 56개로 파장과 파고의 범위와 평균은 각각 31.3~252.1 m, 118.9 m와 0.7~8.0 m, 3.4 m를 보이고 있다. 남서방향과 북동방향의 경사각(α)의 범위와 평균은 각각 1.2~9.9°, 3.9°와 0.9~11.1°, 3.7°을 보이고 있다. 경

사비는 0.3~3.6의 범위로 평균 1.3을 나타낸다. 첨도는 0.011~0.086 범위를 보이고 0.030의 평균값을 나타내며 2004년 9월보다 첨도는 감소하였다. 이는 파고의 감소 또는 파장 증가에 의해 나타난 결과이지만 파장이 2004년 9월보다 감소하였기 때문에 상대적으로 파고의 감소가 더 큰 영향을 미친 것으로 보인다.

연구지역에 발달된 수중사구들은 시간이 지남에 따라서 파장이 짧아지고 파고가 낮아지며 남서방향의 비대칭성이 커지는 양상을 보이고 있다.

4.4 단면별 사구의 이동

연구지역에 발달되어 있는 수중사구의 이동을 파악하기 위해서 수중사구 정부선의 직각방향으로 6개 단면을 선정하였고(Figure 3a), 2004년 9월과 2006년 9월의 조사된 단면을 비교하였다(Figure 5). 단면 1(PROFILE-1)은 연구지역 북서지역에 위치하고 있으며 5개 수중사구의 정부는 일정한 방향을 보이지 않고 있다. 단면 2(PROFILE-2)는 사퇴 북서측면을 대표하는 단면으로 복잡한 정부 이동을 나타내고 있다. 단면 남서쪽과 중앙부분은 수렴되고 있는 반면, 단면 북동쪽 지역은 반대 방향의 정부 이동을 보이고 있다. 단면 3 (PROFILE-3)은 단면남서쪽에서 북동방향의 이동을 보이지만 전체적으로 남서방향의 이동을 보이고 있다. 단면 북동쪽 끝은

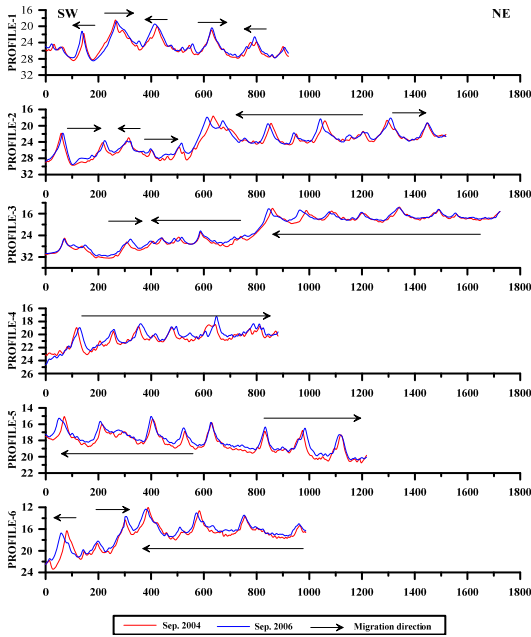


Figure 5: Bed profiles extracted from bathymetric grid with cell sizes of 1×1 m from both September 2004 and September 2006 (for location, see Figure 3).

사퇴 정부로서 뚜렷한 이동을 보이지 않고 있다. 단면 4 (PROFILE-4)는 연구지역 북동지역에 위치하며 단면의 모든 수중사구들은 뚜렷하게 북동방향으로 이동하고 있다. 단면 5 (PROFILE-5)는 사퇴 남동측면에 위치하며 단면 남서쪽에서 뚜렷한 남서방향 이동을 보이는 반면, 단면 북동쪽에서는 북동방향의 이동을 나타내고 있어 단면 중앙부에서 발산되고 있다. 단면 6 (PROFILE-6)에서 사퇴 지역은 뚜렷한 남서방향의 이동을 보이고 있다.

연구지역의 북동지역은 북동 방향의 정부선 이동을 보이는 반면, 중앙과 남부지역에서는 남서방향의 정부선 이동을 나타내 서로 반대 방향의 이동을 보이고 있다. 특히, 사퇴 북서측면은 북동방향, 남동측면은 남서방향의 이동을 보여 전체적으로 사퇴 위에 시계방향의 순환을 나타내고 있다. 그리고 사퇴 위에 겹쳐 존재하는 대형 또는 초대형 수중사구 사이의 골지역은 남-북방향의 소형과 중형 사구가 발달되어 있어 사퇴를 가로지르는 동-

서방향의 이동을 나타내고 있다.

5. 토의

5.1 수중사구의 파장과 파고의 상관관계

흐름의 직각으로 발달된 수중사구의 크기에 대한 연구 중 가장 종합적이고 일반적인 관계식은 Flemming [21]의 관계식이다. Flemming [21]은 전 세계적 자료($n=1491$; 수조실험자료, 조석우세환경의 대륙붕, 해류우세환경의 대륙붕, 하구, 강)를 통해 파장과 파고 사이에 매우 좋은 상관관계($r=0.98$)를 가진 power 관계식인 $H_{mean} = 0.0677L^{0.8098}$ 을 도출하였으며 각 파장에서 나타낼 수 있는 최대 파고식 $H_{max} = 0.16L^{0.84}$ 을 제시하였다. 이 식으로 예측된 파고보다 높은 파고를 보이는 사구는 현재 환경 하에서 활발하게 형성된 수중사구로 해석되어 지고[22][23], 반대로 식에 의해서 예측되는 파고보다 더 낮은 파고를 가진다는 것은 실질적으로 불완전하고 퇴적물 양이 부족한 수중사구가 형성됨을 나타낸다. 따라서 수중사구의 파장과 파고의 전 세계적인 양상과의 차이는 지역적인 환경을 특징짓는 중요한 작용-반응의 결과임을 나타내며 이 Flemming [21]의 평균 관계식은 지역적인 양상을 비교하기 위한 유용한 기준을 제공한다[2].

2004년 9월과 2006년 9월의 연구지역에 발달된 모든 수중사구의 파장과 파고의 관계식 ($H_{mean} = 0.080L^{0.777}$, $r=0.66$)과 Flemming [21]의 평균 관계식을 비교하였다(Figure 6). 대형 수중사구 (파장 < 100 m)의 파고는 Flemming [21]의 예측 파고보다 높은 파고를 나타내고 있는 반면, 파장이 100 m보다 긴 초대형 수중사구는 예측 파고와 유사한 파고를 보이고 있다. 이런 결과는 상대적으로 작은 크기의 수중사구를 발달, 유지시키는데 필요한 조류 세기와 충분한 퇴적물 공급이 가능하여 상대적으로 높은 파고의 활발한 수중사구를 나타내지만 초대형 수중사구는 크기를 유지하기 위해 필요한 조류와 퇴적물의 공급이 원활하지 못하여 상대적으로 낮은 파고를 나타낸 것으로 보인다.

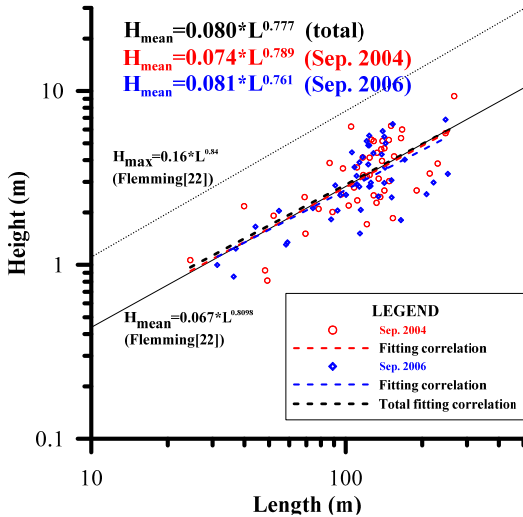


Figure 6: Correlation between length and height of subaqueous dunes in the study area.

5.2 수심, 입도와 수중사구 크기의 상관관계

연구지역에 발달되어 있는 수중사구의 크기(파장과 파고)와 이를 제어하는 요인인 수심과 입도의 상관관계를 알아보았다. 수중사구의 크기와 수심의 관계에서 과거 많은 연구들[1][24]이 수심과 양의 상관관계를 나타냄을 주장하였지만 최근 사구의 파고와 파장은 수심에 영향을 받지 않는다는 연구들[2][3]이 발표되고 있으며 본 연구에서도 파장과 수심 그리고 파고와 수심에 대한 상관관계는 흩어짐이 크게 나타나 독립적으로 분포하고 있다 (Figure 7).

입도, 파고 그리고 파장의 상관관계는 입도가 조립할수록 발달된 수중사구의 파장과 파고는 증가하며 반대로 입도가 세립 할수록 파고와 파장은 감소한다[2]-[4]. 연구지역의 표층퇴적물 입도와 수중사구의 파장과 파고의 상관관계를 보면 파고와 파장 모두 입도가 조립해질수록 증가하고 있다. 이는 연구지역의 경우 입도가 수중사구의 형태 발달에 영향을 미치는 제어요인임을 의미한다.

5.3 수중사구 형태의 변화 및 제어요인

2004년 9월과 2006년 9월 형태자료에 공통적으로 포함된 48개 사구의 파장과 파고의 관계식은 각각

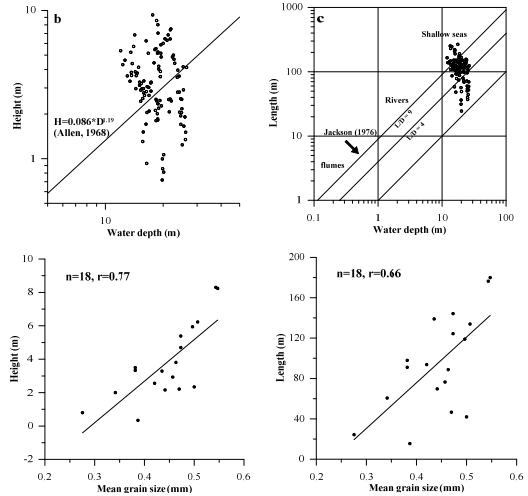


Figure 7: Correlations of size (length and height) of subaqueous dunes, water depth and grain size.

$H_{mean} = 0.074L^{0.789}$ ($r=0.72$) 와 $H_{mean} = 0.081L^{0.761}$ ($r=0.71$)을 나타내고 있다 (Figure 6). 2004년보다 2006년 관계식의 지수가 감소하고 있는데 이는 경사도가 완만해짐을 의미한다. 그러나 상대적으로 파장이 짧은 대형 수중사구는 파고의 차이를 보이지 않는 반면, 초대형 수중사구로 갈수록 파고가 상대적으로 감소하고 있다. 여기서 연구지역 내 대형 수중사구에 영향을 미치지 않으면서 초대형 수중사구에 영향을 미칠 수 있는 요인 중 하나는 표층퇴적물의 특성변화이다. 표층퇴적물은 2004년보다 2006년에 그리고 서측보단 동측에서 상대적으로 세립해지고 양호해지는 양상의 퇴적학적 특성 변화를 보이고 있는데(Figure 4c, d), 이는 퇴적물이 운반되면서 나타나는 퇴적물 조직변수의 변화 양상을 보이고 있고[25][26] 수중사구의 이동방향과 일치하고 있다. 이와 같은 표층퇴적물의 입도 감소는 같은 조류 조건에서 상대적으로 낮은 파고를 발생시킨다[2][4]. 특히 초대형 수중사구가 주로 분포하는 사퇴 동측지역은 상대적으로 긴 파장의 낮은 파고를 보이고 있고 퇴적물 이동에 따른 선별작업(winnowing)으로 상대적으로 세립해지며 분급이 양호해진다. 이렇게 세립해진 퇴적물은 같은 조류 조건에서 더 많은 퇴적물이 부유 이동되고 부유된 퇴

적물은 침강지연효과(settling-lag effect)에 의해 불특정 위치에 퇴적됨으로 상대적으로 사퇴 북동과 남동지역에 존재하는 초대형 수중사구의 파고를 더 감소시킨다[27]. 또한 초대형 수중사구의 파고가 충분히 발달하지 못하는 것은 충분한 퇴적물의 공급이 제한됨으로서 나타날 수 있는데 과거에 비해서 층면구조 발달에 필요한 퇴적물의 감소에 대한 영향은 더 장기적인 조사를 통해서만 파악 할 수 있어 이 연구에서는 가능성만 제기하고자 한다.

따라서 수심이 얇고 주변 섭들에 의해서 보호되는 연구지역의 수중사구는 현재의 조류세기와 퇴적물 특성이 대형 수중사구가 충분히 발달, 유지될 수 있는 조건임을 나타내고 있다. 또한 퇴적물 특성 변화, 즉, 퇴적물 이동에 따른 입도 감소에 의해서 같은 조류 조건에서 더 많은 퇴적물이 부유되고 침강지연효과에 의해 불확실한 위치에 재 퇴적시켜 초대형 수중사구의 파고를 감소시키고 있다.

6. 결론

2004년 9월과 2006년 9월에 고해상도 다중빔음향측심기를 이용한 지형조사와 퇴적학적 조사를 통해서 경기만 남부 선갑도 북쪽 지역에 발달되어 있는 수중사구의 형태 특성 및 변화를 알아보고 수중사구의 발달 제어요인을 파악하고자 하였다. 그 결과, 연구지역의 수중사구는 현재의 조류세기와 퇴적물 특성이 대형 수중사구가 충분히 발달, 유지될 수 있는 조건임을 보이고 있다. 또한 연구지역 동쪽지역에서 시간에 따른 퇴적물의 세립화와 분급이 양호해지는 양상은 퇴적물 이동에 의한 결과로서, 이런 퇴적학적 특성 변화는 같은 조류 조건에서 더 많은 퇴적물이 부유되며 부유퇴적물은 침강지연효과에 의해 불확실한 위치에 재 퇴적되어 초대형 수중사구의 파고를 감소시킨다. 이는 입도가 연구지역 내 수중사구발달에 영향을 미치는 중요한 요인임을 나타낸다.

후기

금병철의 박사학위논문(“황해 경기만 남부지역 베드폼의 형태, 퇴적학적 연구, 인하대학교 대학원”)을 개선한 것이다.

참고문헌

- [1] J. R. L. Allen, “Simple models for the shape and symmetry of tidal sand waves: (1) Statically stable equilibrium forms”. *Marine Geology*, vol. 48, pp. 31-49, 1982.
- [2] B. W. Flemming, “The role of grain size, water depth and flow velocity as scaling factors controlling the size of subaqueous dunes”, *Proceedings of an International Workshop*, no. 55-60, p. 55-60, 2000.
- [3] J. Bartholdy, A. Bartholomae, and B. W. Flemming, “Grain-size control of large compound flow-transverse bedforms in a tidal inlet of the Danish Wadden Sea”. *Marine Geology*, vol. 188, pp. 391-413, 2002.
- [4] V. B. Ernstsen, R. Noormets, C. Winter, and D. Hebbeln, “Development of subaqueous barchanoid-shaped dunes due to lateral grain size variability in a tidal inlet channel of the Danish Wadden Sea”, *Journal of Geophysical Research*, vol. 110, pp. F04S08, 2005.
- [5] V. B. Ernstsen, R. Noormets, D. Hebbeln, A. Bartholoma, and B. W. Flemming, “Precision of high-resolution multibeam echosounding coupled with high-accuracy positioning in a shallow water coastal environment”, *Geo-Marine Letters*, vol. 26, pp. 141-149, 2006.
- [6] K. J. J. Van Landeghem, J. H. Baas, N. C. Mitchell, D. Wilcockson, and A. J. Wheeler, “Reversed sediment wave migration in the Irish Sea, NW Europe: A reappraisal of the validity of geometry-based predictive modelling and assumptions”, *Marine Geology*, vol. 295-298, pp. 95-112, 2012.
- [7] B. C. Kum, D. H. Shin, S. K. Jung, Y. K. Lee, and J. K. Oh, “Morphological characteristics and control factors of bedforms in southern Gyeonggi Bay, Yellow Sea”, *The Journal of the Korea Earth Science Society*,

- vol. 31, no. 6, pp. 608-624, 2010 (in Korean).
- [8] B. C. Kum, D. H. Shin, S. K. Jung, S. Jang, N. D. Jang, and J. K. Oh, "Morphological features of bedforms and their changes due to marine sand mining in southern Gyeonggi Bay", *Ocean and Polar Research*, vol. 32, no. 4, pp. 337-350, 2010 (in Korean).
- [9] G. P. Duffy and J. E. Hughes-Clarke, "Application of spatial cross correlation to detection of migration of submarine sand dune", *Journal of Geophysical Research*, vol. 110, pp. F04S12, 2005.
- [10] H. J. Lee and S. H. Yoon, "Development of stratigraphy and sediment distribution in the northeastern Yellow Sea during Holocene sea-level rise", *Journal of Sedimentary Research*, vol. 67, no. 2, pp. 341-349, 1997.
- [11] H. K. Bang, C. W. Won, and J. K. Oh, "Origin and characteristics of sand ridges in the western continental shelf of Korea Peninsula", *The Journal of the Korea Society of Oceanography*, vol. 29, no. 3, pp. 217-227, 1994 (in Korean).
- [12] Y. S. Chu, *Sediment Dynamics and Maintenance Processes of Linear Tidal Sand Body; Jangan Sandbank in the Central West Coast of Korea*, Ph.D. Dissertations, Department of Oceanography, Seoul National University, Korea, 2000.
- [13] T. S. Chang, S. P. Kim, D. G. Yoo, S. J. Lee, and E. I. Lee, "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*, vol. 30, pp. 15-22, 2010.
- [14] M. J. Park, "Tidal characteristics change in the Asan Bay due to the Hwaong (Namyang Bay) Tidal Barrier", *The Journal of the Korea Society of Oceanography*, vol. 13, no. 4, pp. 320-324, 2008 (in Korean).
- [15] T. H. Kim, H. J. Oh, and Y. H. Youn, "Comparison on local wind waves in Gyeonggi Bay", *Journal of the Korean Meteorological Society*, vol. 40, no. 4, pp. 485-495, 2004 (in Korean).
- [16] IHO, *IHO Standards for Hydrographic Surveys*, 4th edn. International Hydrographic Organization, Monaco, Special Publish no. 44, pp. 1-23, 1998.
- [17] D. E. Wells and D. Monahan, "IHO S44 standards for hydrographic surveys and the variety of requirements for bathymetric data", *Journal of the Hydrographic*, vol. 104, pp. 9-16, 2002.
- [18] W. Heaps, "Standards for the calibration of multibeam echosounders, are new standards required?" *Journal of the Hydrographic*, vol. 111, pp. 26-27, 2004.
- [19] G. M. Ashley, "Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem", *Journal of Sedimentary Petrology*, vol. 60, no. 1, pp. 160-172, 1990.
- [20] R. L. Folk, *Petrology of the Sedimentary Rocks*, New York, American: Hemphill, 1968.
- [21] B. W. Flemming, "Zur Klassifikation Subaquatischer, Strömungstransversaler Transportkörper". *Bochumer Geologische Geotechnische Arbeiten*, vol. 29, pp. 44-47, 1988, (in Germany).
- [22] Y. S. Kubo, W. Soh, H. Machiyama, and H. Tokuyama, "Bedforms produced by the Kuroshio Current passing over the northern Izu Ridge", *Geo-Marine Letters*, vol. 24, pp. 1-7, 2004.
- [23] K. J. J. Van Landeghem, A. J. Wheeler, N. Mitchell, and G. Sutton, "Variations in sediment wave dimensions across the tidally dominated Irish Sea, NW Europe", *Marine*

- Geology, vol. 263, pp. 108-119, 2009.
- [24] R. G. Jackson, "Large scale ripples of the lower Wabash River", *Sedimentology*, vol. 23, pp. 593-623, 1976.
- [25] P. McLaren, "An interpretation of trends in grain-size measurements", *Journal of Sedimentary Petrology*, vol. 51, pp. 611-624, 1981.
- [26] S. Gao and M. Collins, "Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of transport vectors", *Sedimentary Geology*, vol. 80, pp. 47-60, 1992.
- [27] I. N. McCave, "Sand waves in the North Sea off the coast of Holland", *Marine Geology*, vol. 10, no. 3, pp. 199-225, 1971.