

Article

<https://doi.org/10.7850/jkso.2024.29.1.014>
 pISSN : 1226-2978 eISSN : 2671-8820

서해 중부 태안반도 북부 해역의 장안사퇴 표층퇴적물 분포 특성

장태수¹ · 이은일^{2*} · 변도성³ · 이화영⁴ · 백승균⁵¹전남대학교 지구환경과학부 교수, ²포항공과대학교 기후변화및대응기술연구소 연구교수, ³국립해양조사원 연구관,⁴국립해양조사원 연구사, ⁵지마텍(주) 기술연구소장

Distribution Patterns of Surface Sediments of the Jangan Linear Sand Ridge off the Northern Tae'an Peninsula, in the Mid-west Coast of Korea

TAE SOO CHANG¹, EUNIL LEE^{2*}, DO-SEONG BYUN³, HWAYOUNG LEE⁴ AND SEUNG-GYUN BAEK⁵¹Professor, Faculty of Earth and Environmental Sciences, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea²Research Professor, Pohang University of Science and Technology, Pohang 37673, Korea³Senior Researcher, Korea Hydrographic and Oceanographic Agency, Busan 49111, Korea⁴Researcher, Korea Hydrographic and Oceanographic Agency, Busan 49111, Korea⁵Head of Research Center, Gematek Co. Ltd., Busan 48071, Korea*Corresponding author: elee124@postech.ac.kr

Editor Jang-Jun Bahk

Received 30 December 2021; Revised 15 December 2023; Accepted 25 December 2023

ABSTRACT

빈사 상태의 대륙붕 사퇴와는 달리, 연안 사퇴는 활동성이 높으며 주변 해양환경변화에 민감하게 반응하기 때문에 해저지형변화의 관점에서 관심의 대상이다. 대산항에서 불과 5 km 떨어진 장안사퇴는 지난 20여 년 동안 격심한 해저지형변화를 겪어오고 있다. 이러한 해저지형변화의 원인을 밝히기 위해서는 사퇴의 특성을 이해하는 것이 중요하다. 이러한 맥락에서 이 연구는 장안사퇴와 주변해역의 퇴적물 분포 양상을 이해하고자, 그래픽 채니기를 사용하여 총 227점의 퇴적물을 획득하고 체질-피펫방식의 입도분석을 수행하였다. 또한 1997년의 입도자료와 비교를 통해 지난 25년 동안의 퇴적물 입도 변화를 조사하였다. 장안사퇴의 중심부는 평균 입도 2-3φ의 중립사 내지는 세립사로 이루어졌으며, 사퇴의 골은 -2-6φ의 자갈과 니사질역으로 구성된다. 사퇴의 능선 퇴적물은 양호한 분급의 정규분포를 보인 반면에 사퇴의 기저 퇴적물은 불량한 분급과 주로 자갈퇴적물에 소량의 세립 퇴적물이 혼합된 양(+)의 왜도를 나타낸다. 사퇴의 중심부 퇴적물은 소량의 잔자갈의 혼합된 음(-)의 왜도를 보인다. 1997-2021년 동안 장안사퇴의 퇴적물은 전반적으로 0.5φ 정도 조립해진 것으로 보이며, 겨울철 고파랑의 영향으로 세립질 퇴적물이 제거되었거나 해사채취 시 부유사의 제거로 설명할 수 있다. 표층퇴적물의 공간분포 양상을 미루어 볼 때 잔류 자갈 위에 30 m에 달하는 사퇴 본체가 놓인 것으로 추정된다. 사퇴 비대칭성, 기저면의 노출과 재동이 심한 잔류 자갈의 존재는 장안사퇴가 퇴적물 공급이 충분하지 않음을, 따라서 침식 상태에 놓여 있음을 시사한다.

Unlike the shelf sand ridges moribund in motion, nearshore sand ridges are highly mobile, sensitive to changes in ocean environments, thereby becoming of particular interest with respect to morphological changes. About 5 km off the Daesan port, the Jangan Sand Ridge has been undergoing severe subsea morphological change over the past two decades. Understanding the nature of sand ridges is critical to elucidate the causes of morphological changes. In this context, this study aims at understanding the characteristics and distribution patterns of surface sediments of the ridge and its vicinity. For this purpose, 227 sediment samples were acquired using a grab-sampler, the grain sizes being analysed by the sieve-pipette method. In addition, comparison of grain sizes in sediments between 1997 and 2021 was made in order to investigate the 25-years change in sediment composition. Surface sediments along the ridge axis are fine to medium sands with 2-3 phi in mean grain size, whereas, in the trough of ridge, the sediments are composed of gravels and muddy sandy gravels with mean sizes of -2 to -6 phi. Sediments in the crest of the ridge are well-sorted with normal distribution, on the other hand, the basal sediments are poorly-sorted and positively skewed. Along the ridge crest, the sediments are negatively skewed. From 1997 to 2021, the ridge sediments became largely coarser about 0.5 phi. Such coarsening trend in mean grain size can be explained

either by elimination of fine sediments during high waves in winter or elimination of fines suspended during sand mining activities in the past. Spatial distribution pattern of surface sediments shows that ca. 30 m thick of the sand ridge itself overlies the thin relict gravels. The strong asymmetry of sand ridge, the exposure of ridge base, and reworked gravel lags suggest that Jangan sand ridge is probably sediment-deficit and hence erosive in nature at present.

Keywords: Jangan Sand Ridge, Surface sediment, Gravel lag, Northern Taean Peninsula

1. 서론

대륙붕과 연안의 해저에는 대규모의 사질퇴적체(sand body)들이 종종 나타나는데, 이곳은 공통적으로 모래의 공급이 충분하고, 조석 에너지가 강한 해역이다(Stride *et al.*, 1982). 일반적으로 사질퇴적체는 폭이 대략 1-5 km, 길이는 10-50 km, 그리고 약 10-30 m 높이로서 선형의 길쭉한 형태를 갖고 있다(Stride *et al.*, 1982; Dalrymple, 2010). 대부분 잔자갈과 모래로 구성되어 있으며, 주변 해저보다 솟아 있는 지형을 나타내고 있어 모래언덕(sand bank)이라고 부르며(Dyer and Huntley, 1999), 특별히 길이/폭의 비율이 40을 초과하여 길쭉한 형상(elongate ridge)을 보이는 경우, 사주(sand ridge)로 구분한다(AMOS and King, 1984). 이들은 북해(North Sea), 황해(Yellow Sea), 그리고 동중국해(East China Sea) 등 조석이 우세한 대륙붕-연안에서 흔히 산출된다(Caston, 1972; Klein *et al.*, 1982; Stride *et al.*, 1982; Park and Lee, 1994; Berne *et al.*, 2002; Cummings *et al.*, 2016). 우리나라에서는 이들을 통칭하여 사퇴(sand ridge)라고 부른다.

사퇴는 그 규모와 형태가 매우 다양한데, 그렇기 때문에 수리역학적으로 그 생성과정과 유지 기작이 매우 복잡함을 시사한다(Hulscher *et al.*, 1993; Dyer and Huntley, 1999). 그럼에도 이들의 생성과 유지에는 강한 왕복성 조류(평균 $> 1 \text{ ms}^{-1}$)와 해저면의 굴곡 또는 조그만 언덕이 필요조건으로 알려졌다(Huthnance, 1982a, 1982b). 일단 구릉이 만들어지면 조석의 밀물우세 또는 썰물우세에 따라서 사퇴는 측방이동(lateral migration)하게 된다(Caston, 1972). 이와 같이 사퇴의 성장, 이동, 발달에는 조석이 주요한 제어요소로 여겨진다(Stride *et al.*, 1982; Dalrymple, 2010). 사퇴의 유지 기작으로 파랑 또한 어느 정도 역할을 하고 있음이 선행연구로부터 밝혀지고 있다(Robinson and McBride, 2008; Snedden *et al.*, 2011).

우리나라의 경우, 사퇴는 Off(1963)에 의해 처음으로 그 존재가 알려졌으며, 주로 대한해협 내 거제-통영 앞바다의 대륙붕과 대부분의 황해 대륙붕과 연안에 수많은 사퇴가 분포한다(Klein *et al.*, 1982; Bahng *et al.*, 1994; Park and Lee, 1994; Park *et al.*, 2003). Park *et al.*(2006)은 우리해역 황해 동부에 존재하는 사퇴가 산출되는 수심과 형성시기에 따라서 2가지 유형, 즉 대륙붕 사주(shelf sand ridge)와 연안 사주(nearshore sand ridge)로 구분하였다. 전자는 보통 50-90 m 수심에서 산출되며, 길쭉한 형태를 띠며 그 길이는 최대 200 km에 달한다. 이들은 후빙기 해침시기(약 14,000-9,500 yr B.P.)에 발달한 것으로 보고 있으며, 반면에 연안 사주의 경우, 현재의 고해수면 시기인 홀로세 중기 이후(약 <7,000 yr B.P.)부터 생성되었다고 보고하였다. 또한 대륙붕 사주는 현재 수심에서 더 이상 이동하지 않는 빈사 상태(moribund)이며, 연안 사주는 현재의 물리적 조건에서 활발히 이동과 성장을 하는 활동형 사주(active ridge)로 보았다(Park and Lee, 1994). 이와 같이 연안 사주는 그 속성상 활동성이 높아 주변의 물리적 조건과 환경변화에 민감하게 반응하며, 해저지형변화로 나타난다. 이들은 수심이 매우 얇은 수심에 존재하기 때문에 해저지형변화는 때때로 향해 안전에 심각한 장애 요소로 작용하기도 한다(Park and Yoo, 1997; Chang *et al.*, 2010).

태안반도 북부와 대산항의 전면에 존재하는 장안사퇴는 천연 방파제 역할을 하는 대표적인 연안 사주로서 지난 40여 년 동안 주변 해역의 환경변화에 따라 심각한 해저지형변화를 겪어온 것으로 알려졌다(Chu, 2000). 경기만 남부와 장안사퇴 인근 해역에서 지난 20여 년 동안 해사 채취가 이루어졌으며, 이는 해저지형변화를 일으키는 하나의 원인으로 간주되었다(Kum

et al., 2010a, 2010b). 위의 선행연구에도 불구하고, 활동형 장안사퇴의 근본적 속성들에 대한 이해는 여전히 충분하지 않다. 예를 들어, 장기적 관점에서 어느 방향으로 이동하는지, 그리고 약 30 km에 이르는 거대한 장안사퇴가 단일 형태로 이동하는지 또는 서로 다른 영역으로 나뉘어져 있어 다른 이동 양상을 보이는지 등에 대한 연구는 여전히 필요하다. 이러한 관점에서 이 연구는 장안사퇴의 해양지질학적 특성에 대한 이해를 목표로 하는 종합 연구의 일부분으로서, 장안사퇴와 그 주변이 어떠한 퇴적물로 이루어져 있으며, 그 분포 양상은 연안 사퇴로서 어떤 특성을 갖고 있는지를 밝히는데 목적을 두고 있다. 더 나아가 1997년에 장안사퇴 해역에서 퇴적물을 채취·분석한 Chu(2000) 연구 결과와의 비교를 통해 퇴적물 변화 양상을 파악하고, 그 원인에 대해 토의하였다.

2. 연구 지역

충남 서산시와 태안군 사이에 위치한 가로림만의 입구로부터 약 5 km 떨어진 장안사퇴는 선행의 길쭉한 모양을 띤 연안 조석 사주이다. 장안사퇴의 길이는 대략 30 km 이며, 최대 폭은 5.4 km, 그리고 수심 30-40 m에 북동-남서 방향으로 놓여 있다(Fig. 1). 이 배열 방향은 주변의 조류와 거의 일치 한다. 태안반도의 해안선을 따라서 사질 해변이 발달해 있으며, 장안사퇴와 해안선 사이에는 조수호가 발달해 있다. 장안사퇴 남서부는 저조시에 1 km 정도 정상부가 2-3시간 동안 노출되며 고조시에 다시 해수에 잠긴다. 태안반도 북부와 대산항 사이의 좁은 입구를 통과하면 넓은 조간대가 발달한 가로림만이 나타난다.

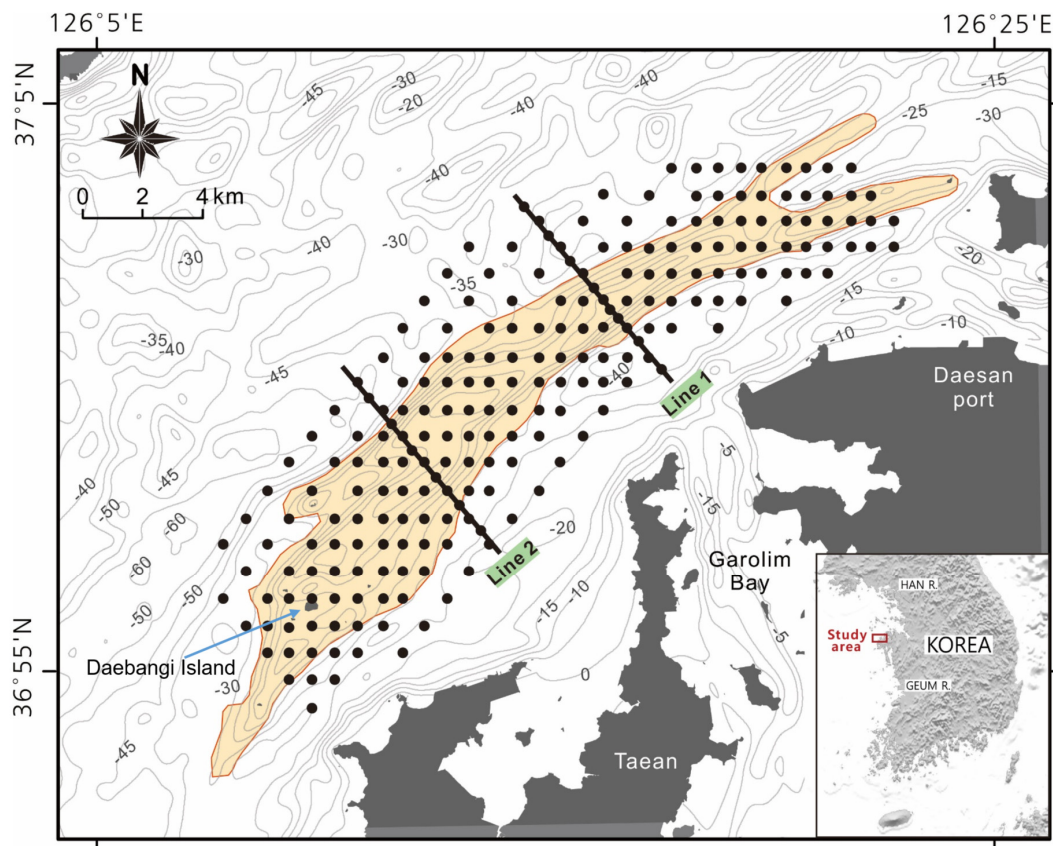


Fig. 1. Location map showing grab-sampling stations marked by black dots and two transect lines across the Jangan Sand Ridge. Contour in meter.

장안사퇴의 북동부에는 대란지도와 소란지도 등 비교적 큰 섬들이 존재하며, 남서부에는 매우 작은 무인도와 유인도 섬들이 산재해 있다. 한국골재협회의 해사채취 현황자료에 따르면, 2000-2009년 동안 장안사퇴 북서 방향의 선갑도 남부에서 집중적으로 해사채취가 이루어졌다. 하지만 정확한 채취량 정보는 알 수 없다. 이와 함께 2006년부터 시작된 대산항 항만기본계획에 따라 2011년부터 현재까지 항로 개발 및 확장 등에 약 5,900,000 m³의 양이 준설되었다(Yoon *et al.*, 2017).

태안반도 북부해역의 조석은 최대조위차가 7.1 m에 이르는 대조차 환경에 속하며(Flemming, 2005), 반일주조형으로 일조부등이 현저하다(Flemming, 2005; Byun and Hart, 2018). 해수면 하 5 m에서 측정된 창조류는 최대 1.54 ms⁻¹를 나타내고, 낙조류는 최대 1.7 ms⁻¹를 보이므로 낙조류가 우세하다. 조위차는 장안사퇴 북쪽에 위치한 아산만으로 갈수록 증가하며, 평택항 조위관측소에서는 최대 7.9 m의 조위차가 관측되었다.

태안 조위관측소에서 관측된 파랑자료에 따르면, 겨울철 유의파고는 평균 0.43 m, 최대파고는 1.6 m를 기록하였다. 여름철의 유의파고는 평균 0.17 m, 최대파고는 0.97 m이다. 이와 같이, 연구 지역의 파랑은 강한 계절성을 보이는데, 대체적으로 여름에는 최대파고가 1 m 이내로서 미약하고, 겨울에는 상대적으로 강한 파랑이 내습한다.

2015년 대산 조위관측소의 수온 자료에 따르면, 이 해역의 수온은 겨울에는 평균 7°C 이하이며, 반면에 여름에는 최대 25°C까지 오른다. 따라서 계절별로 수온의 차가 약 20°C로서 편차가 크다. 같은 위치에서 동일한 기간 관측된 염분도 자료에 의하면 평균염분도는 28.3 psu를 보이며 25-32 psu 범위로서 계절에 따른 변화는 크지 않다. 장안사퇴와 인근 해역은 대규모 하천이 존재하지 않으며, 또한 방조제의 건설로 담수의 영향은 미미하다.

3. 연구 방법 및 재료

서해 중부 태안반도 북부 해역의 장안사퇴와 주변의 표층퇴적물 분포 특성을 알아보기 위하여 2021년 7월 7-12일에 국립해양조사원의 '황해로'호를 이용하여 총 227점의 해저 표층퇴적물 시료를 채취하였다. 시료 채취는 모래 퇴적물 시료에 적합한 Dietz-LaFond 채니기(grab sampler)를 사용하였으며, 채니기의 버켓 크기는 10 cm × 10 cm로서, 보통 300 g 정도의 표층퇴적물을 회수할 수 있다. 시료 정점은 800 m × 800 m 등간격의 격자망을 유지하고, 장안사퇴와 그 주변의 조수로 포함하도록 설계하였다. 또한 Chu(2000)의 퇴적물 자료와 비교·분석을 위해 모든 정점을 동일한 지점으로 설정하였다. 사퇴의 마루(crest)와 골(trough)에서의 퇴적물 특성을 이해하기 위해, 장안사퇴를 가로지르는 2개의 측선(Line 1, 2)을 추가로 설정하여 퇴적물 변화를 알아보았다(Fig. 1).

실험실로 가져온 퇴적물 시료는 입도분석을 위해 자갈이 포함된 시료와 모래/니 시료로 구분하였다. 자갈이 포함된 시료의 경우, 자갈의 크기는 버니어캘리퍼스를 이용하여 장축, 중축, 단축을 직접 측정하고 자갈 각각의 무게를 측정하여 기록하였다. 모래와 니질 퇴적물 시료는 침전법 원리의 체질-피펫(sieve-pipette) 방법으로 입도분석을 수행하였다. 입도분석은 Carver(1971)가 제안한 표준 방식을 따랐다. 체질-피펫 분석 전에 퇴적물 시료의 전처리를 실시하였다. 퇴적물 시료에 포함된 유기물을 제거하기 위해 10% 과산화수소(H₂O₂) 시약을 보충하면서 잘 저어주어 반응이 끝날 때까지 기다린 후 중류수로 따라 붓기를 반복하였다. 탄산염은 염산(HCl) 시약을 가하여 24시간 동안 반응시켜 제거하였다. 시료의 전처리가 끝난 후 4 phi 체(sieve)를 사용하여 모래와 니(mud) 퇴적물을 분리하는 습식체질(wet sieving)을 수행하였다. 체질 이후 모래 시료는 오븐에서 60°C로 건조하여 0.5 phi 간격으로 진동기(ro-tap shaker)를 이용하여 건식체질(dry sieving)하였다. 니 퇴적물은 1,000 mL 메스실린더에서 칼곤(Calgon) 분산제를 투여한 후 피펫팅으로 분석하였다. 이와 같은 과정을 거쳐 얻은 입도분석 자료로부터 Folk(1968)가 제안한 계산식을 이용하여 조직변수들(평균입도, 분급, 왜도 등)을 구하였으며, 수많은 시료의 통계처리를 위해 GRADISTAT 프로그램을 이용하였다(Blott and Pye, 2001).

4. 연구 결과

4.1 퇴적상 분포

입도분석결과, 장안사퇴와 그 주변 해저는 자갈에서 니에 이르기까지 넓은 범위의 다양한 입도의 퇴적물로 구성되어 있다. 총 227점의 퇴적물 입도 자료를 Folk(1968)의 삼각다이아그램에 도시한 결과, 연구해역의 퇴적물은 자갈(G, gravel), 사질역(sG, sandy gravel), 니사질역(msG, muddy sand gravel), 모래(sand), 역질모래(gS, gravelly sand), 니질모래(mS, muddy sand), 역질니모래(gmS, gravelly mud sand), 그리고 니(M, mud)의 8개의 퇴적물 유형으로 구분된다(Fig. 2). 위의 8개의 퇴적물 유형은 퇴적물 특성(입도, 조직 등)에 따라 자갈(sG, G), 니사질역(msG), 모래(S, gS), 니질모래(gmS, mS), 그리고 니(M)의 5개의 퇴적상으로 묶을 수 있다(Fig. 2).

니, 니사질역, 니질모래 퇴적상은 주로 사퇴의 북동부 골짜기(ridge trough)에 제한되어 산출된다. 니사질역 퇴적물은 패각, 모래와 자갈을 포함하고 있어 분급이 불량하다(Fig. 3(a)). 하지만 니 퇴적물은 점토보다는 주로 실트 크기의 입자로 구성된다. 니 퇴적물의 존재는 퇴적 당시 저에너지 환경을 지시하며, 따라서 사퇴의 능선보다는 파랑으로부터 보호되는 골짜기에 분포하는 것으로 해석된다.

모래 퇴적상은 사퇴의 중심부를 축으로 북동-남서 방향으로 길쭉하게 분포하며, 정상부 표면을 덮는다. 그 밖의 지역으로 사퇴의 북동부 일부에서는 기저까지 연장되어 나타나기도 한다. 모래의 함량은 대체적으로 90% 이상이며, 일부 잔자갈이 10% 이내로 포함되어 산출되기도 한다. 드물게 잔 패각이 포함되기도 하나, 거의 순수한 모래로 구성되어 있다(Fig. 3(b)). 사퇴의 주 구성퇴적물로 여겨진다.

자갈 퇴적상은 오로지 사퇴의 동측과 서측의 기저를 따라서 분포한다. 이 퇴적상은 순수한 자갈로 구성된 퇴적상과 사질역 퇴적상으로 다시 세분된다. 사질역 퇴적상의 모래 함량은 보통 50% 정도이며, 패각이 일부분 포함된다(Fig. 3(c)). 세립질의 니질 퇴적물은 존재하지 않으며, 포함된 자갈의 원마도는 보통 내지는 양호하다. 반면 역으로만 구성된 퇴적상은 보통 7-8 cm

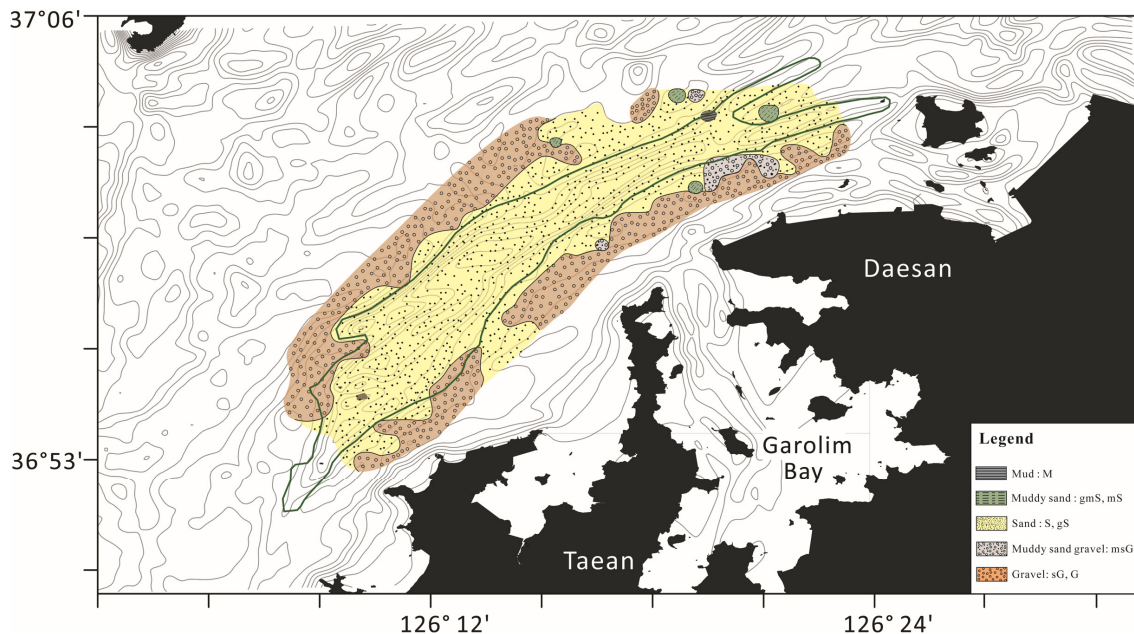


Fig. 2. Distribution map of surface sediment types of the Jangan Sand Ridge in 2021. Sedimentary types are classified by Folk(1968)'s scheme.

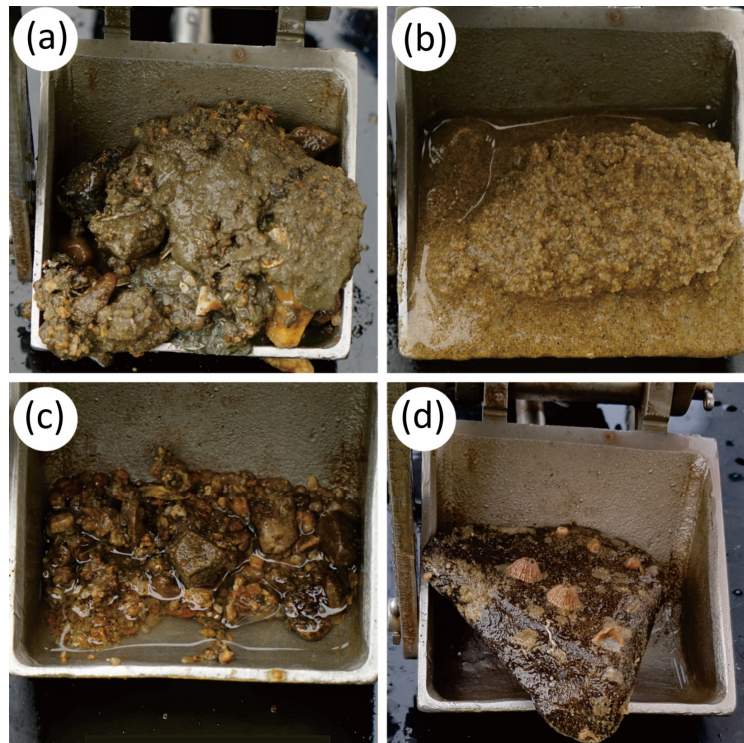


Fig. 3. Grab-sample pictures of major sediment types occurred along the Jangan Sand Ridge. (a) muddy sand gravel, (b) clean sand, (c) sandy gravel, and (d) gravel. Bucket size 10 cm x 10 cm for scale.

크기의 원마도가 불량한 역으로 구성된다. 역의 표면에는 특징적으로 따개비 등이 붙어 있다(Fig. 3(d)). 위의 특징으로 미루어, 자갈은 현재의 물리적 조건에서 이동 및 퇴적되기 보다는 과거의 잔류물(relic or lag)로 해석된다(Emery, 1968; Swift *et al.*, 1971).

4.2 퇴적물 입도의 공간분포

퇴적물 입도의 공간분포는 퇴적 당시의 에너지 차이를 파악하는데 유용하다. Fig. 4는 표층퇴적물 내에 함유되어 있는 자갈, 모래와 니의 상대적인 함량 비를 나타낸다. 자갈만 회수된 지역은 공간적으로 사퇴의 골을 따라서 분포한다. 자갈의 함량이 30-100%에 이르는 지역은 마찬가지로 사퇴의 골을 따라 나타나며, 일부 남서부에서는 사퇴의 측면에서도 산출되는데 이 지역은 작은 무인도가 산재한 곳이다(Fig. 4(a)). 따라서 위의 자갈은 섬으로부터 직접적으로 공급된 것으로 보인다. 사퇴의 중심축을 따라서 <10% 잔자갈(2-4 mm)이 모래 퇴적물과 함께 산출되는데, 겨울철 고파랑시에 모래와 함께 퇴적된 것으로 해석된다.

장안사퇴의 능선부를 이루는 모래 퇴적물은 북동-남서 방향의 중심축을 따라 분포하며, 그 모래 함량은 >90%이다(Fig. 4(b)). 사퇴의 양 측면(flank)으로 갈수록 함량은 80%까지 낮아지다가 사퇴의 일부 기저에서는 50-60%를 보이기도 한다. 니 퇴적물은 주로 사퇴의 골에 분포한다. 북동부의 골에서 군데군데 그 함량이 ~50%에 이른다(Fig. 4(c)). 사퇴의 중심에 부분적으로 1-2%의 니 퇴적물이 존재하지만, 이들은 모두 실트이다. 전반적으로 니는 사퇴의 북동부 골과 동측의 수로를 따라 분포한다.

요컨대, 자갈은 대부분 사퇴의 기저를 이루고, 사퇴의 중심축은 모래로 구성되어 있으며, 일부 사퇴의 골과 동측 수로를 따라서 비교적 높은 함량의 니 퇴적물이 존재한다.

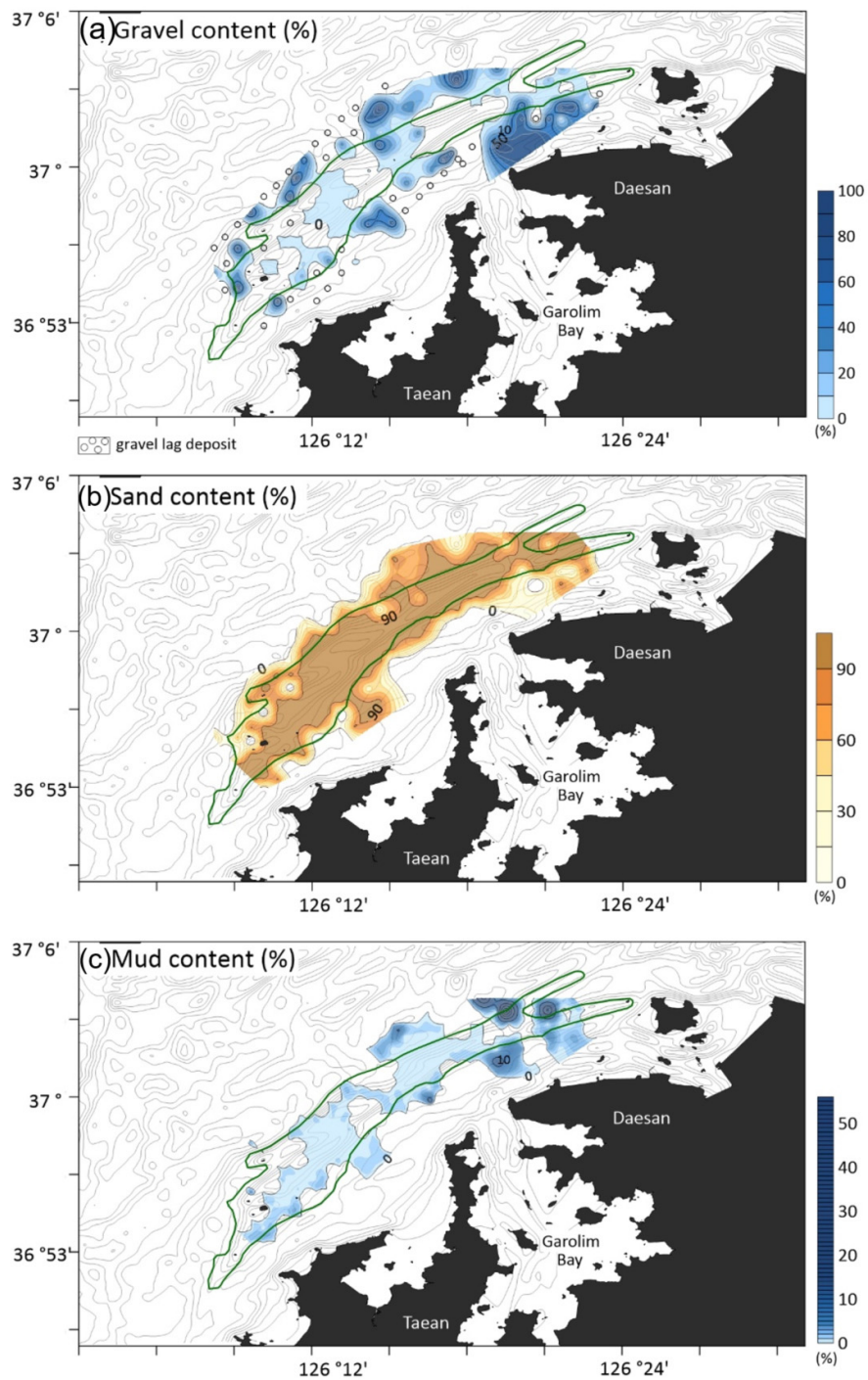


Fig. 4. Distribution map showing each textural components of surface sediments in the vicinity of the Jangan Sand Ridge. Gravel (a), sand (b) and mud (c) contents.

4.3 퇴적물 조직변수의 공간분포 특성

퇴적물의 입도분석 결과를 통계학적 방식으로 나타내는 평균입도(mean grain size), 분급도(sorting), 그리고 왜도(skewness)등의 조직변수들은 퇴적물 이동과정, 혼합, 퇴적양상, 그리고 현재의 퇴적환경을 이해할 수 있는 기초적인 정보를 제공한다(Folk and Ward, 1957; Folk, 1968). Fig. 5에 나타난 것처럼, 사퇴와 인근 퇴적물의 평균입도는 $-7-6\phi$ 범위

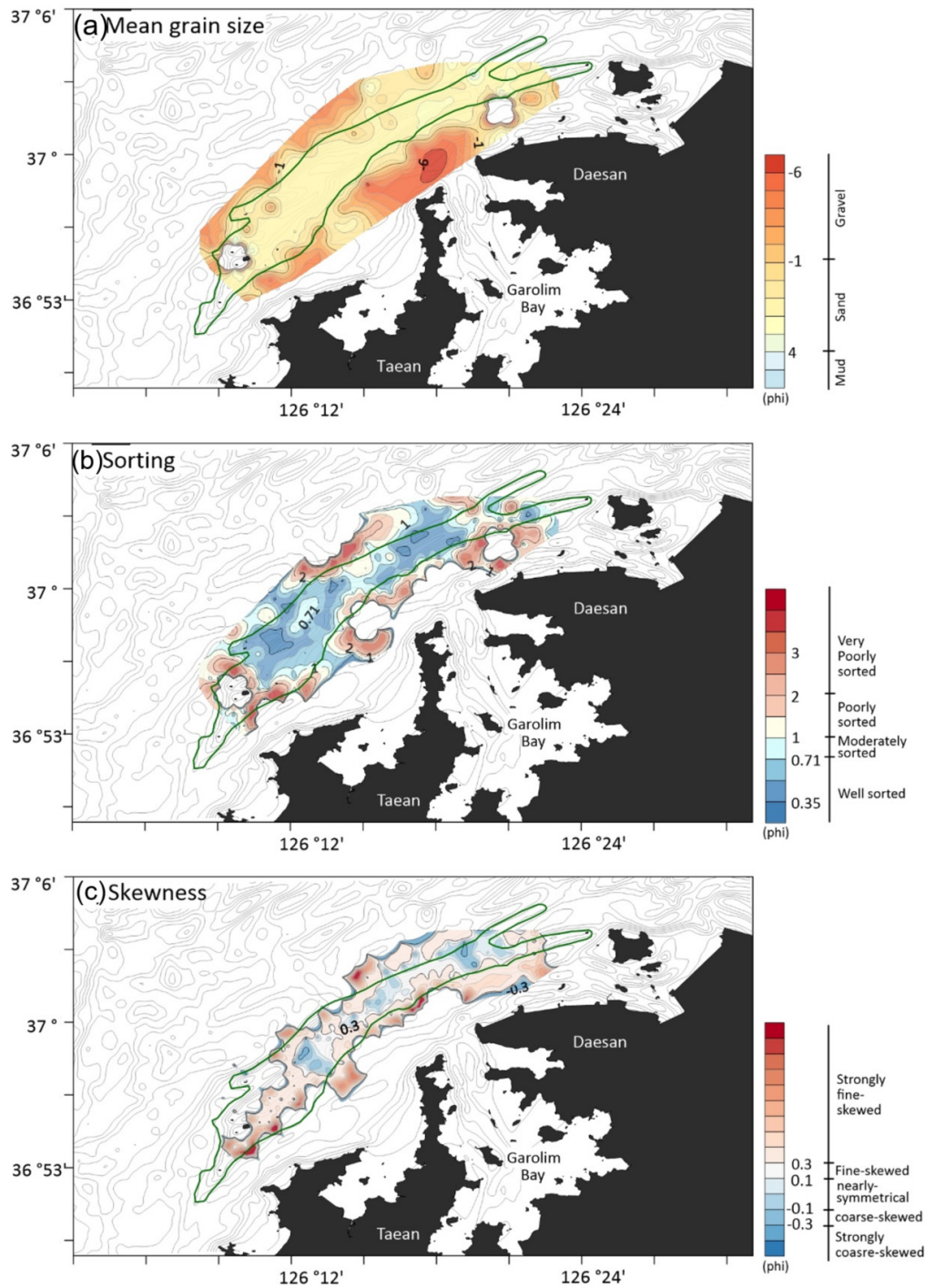


Fig. 5. Distribution map of textural parameters of surface sediments on the Jangan Sand Ridge. (a) mean grain size, (b) sorting, and (c) skewness values.

로 매우 다양한 입도분포를 보인다. 사퇴 중심부는 평균입도 2-3 ϕ 의 중립사 내지는 세립사를, 사퇴의 측면과 골(조수로)로 갈수록 -2-6 ϕ 의 잔자갈(pebble)이 우세해지는 평균입도의 조립화 경향을 보인다(Fig. 5(a)). 사퇴의 남서부는 세립사가 우세한 반면 북동부로 갈수록 중립사로 변한다.

퇴적물의 분급도는 0.2-4.5 ϕ 범위로 양호한 분급(well-sorted)에서 매우 불량한 분급(very poorly sorted)에 이르기까지

매우 다양하게 나타난다(Fig. 5(b)). 사퇴의 중심부 퇴적물은 0.2-0.7 ϕ 범위로써 양호한 분급을 보이며, 사퇴의 골(조수로)의 퇴적물은 대체적으로 3 ϕ 로서 불량한 분급을 보인다. 퇴적물의 왜도는 -0.7-2.0 범위로 세립 꼬리를 갖는 양의 왜도와 조립 꼬리를 갖는 음의 왜도를 보인다. 사퇴 중심부의 일부 퇴적물은 입도의 치우침이 거의 나타나지 않은 정규분포를 나타낸다(Fig. 5(c)). 하지만 사퇴 중심부의 대부분은 세립으로 치우치며 조립 꼬리를 갖는 음(-)의 왜도를 보인다. 사퇴의 골과 주변으로 갈수록 조립 쪽으로 치우쳐 세립 꼬리를 갖는 양(+)의 왜도를 보인다.

일반적으로 퇴적물의 입도, 분급도와 왜도는 밀접한 상관관계를 갖는다(Folk and Ward, 1957; Folk, 1968). 사퇴의 중심부 일부 퇴적물은 세립사의 분급이 양호하며, 대체적으로 치우침이 작은 정규분포를 보인다. 이는 동일한 크기의 모집단으로 이루어졌으며, 유사한 퇴적작용 하에서 퇴적되었음을 반영한다. 사퇴의 중심부의 대부분은 세립사-중립사의 양호한 분급을 보이지만 조립의 꼬리를 갖는 음(-)의 왜도를 나타내는데, 조립질은 대부분 왕모래내지 잔자갈로서 고파랑시에 유입되어 혼합과정을 겪은 것으로 해석된다. 사퇴의 골 퇴적물은 분급이 매우 나쁜 잔자갈 내지 니모래자갈로서 강한 양(+)의 왜도를 나타낸다. 세립의 꼬리, 세립질 퇴적물이 다른 퇴적과정을 거쳐 유입된, 혼합 퇴적물로 보인다.

5. 토 의

5.1 지난 20여 년 동안 표층퇴적물 변화

장안사퇴는 대륙붕 사주와는 달리 활동성이 높고 살아있는 연안 사퇴로 간주된다(Park *et al.*, 2006). 따라서 주변의 해양 환경변화에 민감하며, 이는 해저지형변화로 나타난다(Kum *et al.*, 2010a, 2010b). Kum *et al.* (2010a, 2010b)에 따르면, 연구 지역의 북서쪽에 위치한 선갑도 남부에서 지난 15여 년 전에 해사채취가 이루어졌으며, 이로 인해 장안사퇴의 북서부 해저면에 존재하는 모래파(sand waves) 또는 수중사구(sand dunes)의 이동에 따른 사퇴의 형태 변화가 발생했다고 보고하였다. 이 연구에서는 Chu(2000)의 박사학위논문에서 수록된 입도분석자료를 발췌하여 지난 25년 여 동안의 장안사퇴를 이루는 표층퇴적물의 장기적 변화를 고찰하였다. Chu(2000)의 기록에 따르면 1997년에 그랩 방식으로 장안사퇴의 표층퇴적물을 채취하였으며, 체질-피펫 방식으로 분석되었다. 입도자료의 비교·분석을 위해 이 연구에서는 동일한 시료 정점에서 동일한 입도분석방식을 채택하였다.

1997-2021년 동안의 퇴적물 입도 변화를 파악하기 위해, 사퇴의 북부와 남부의 2개의 대표적인 측선을 설정하고 평균입도를 비교하였다(Fig. 6). 1997년 입도자료에 따르면, 장안사퇴 북부의 양측 골의 퇴적물은 조립사 내지는 잔자갈로 이루어졌으며, 사퇴 중심부는 대체적은 2.0 ϕ 의 중립사/세립사의 경계에 있다. 약 25년 후, 현재의 사퇴 중심부 퇴적물의 평균입도는 1.5 ϕ 의 중립사로서 전반적으로 0.5 ϕ 정도 조립해진 것으로 보인다. 반면, 장안사퇴 남부의 경우, 사퇴 중심부 퇴적물은 모두 1.5 ϕ 내외로서 별다른 변화를 보이지 않는다.

이러한 전반적인 표층퇴적물의 조립화 경향은 Folk(1968)의 삼각다이어그램에 도시한 결과에서 더 뚜렷하다(Fig. 7). 자갈이 포함된 퇴적물의 경우, 25년 전 Chu(2000)의 퇴적물 정점이 좀 더 니질 퇴적물 영역에 도시된 반면, 2021년 시료는 좀 더 조립한 모래와 자갈의 영역에 도시된다. 이와 같이, 현재의 사퇴 퇴적물은 모래와 자갈의 함량이 좀 더 높으며, 이는 세립질 퇴적물이 감소한 결과이다.

장안사퇴 퇴적물의 전반적인 조립화 경향은 북서부에서 행해진 해사채취의 영향일 수 있다. Kum *et al.* (2010a, 2010b)에 따르면, 선갑도 남부의 해사채취 이후의 영향을 조사한 결과 일부 퇴적물의 조립화가 발생하였으며, 이는 해사채취 시 세립질 모래가 부유되어 채취지역에서 사라진 것으로 해석하였다. 또한 겨울철 강화되고 있는 북서계절풍의 영향일 수 있다(Shin

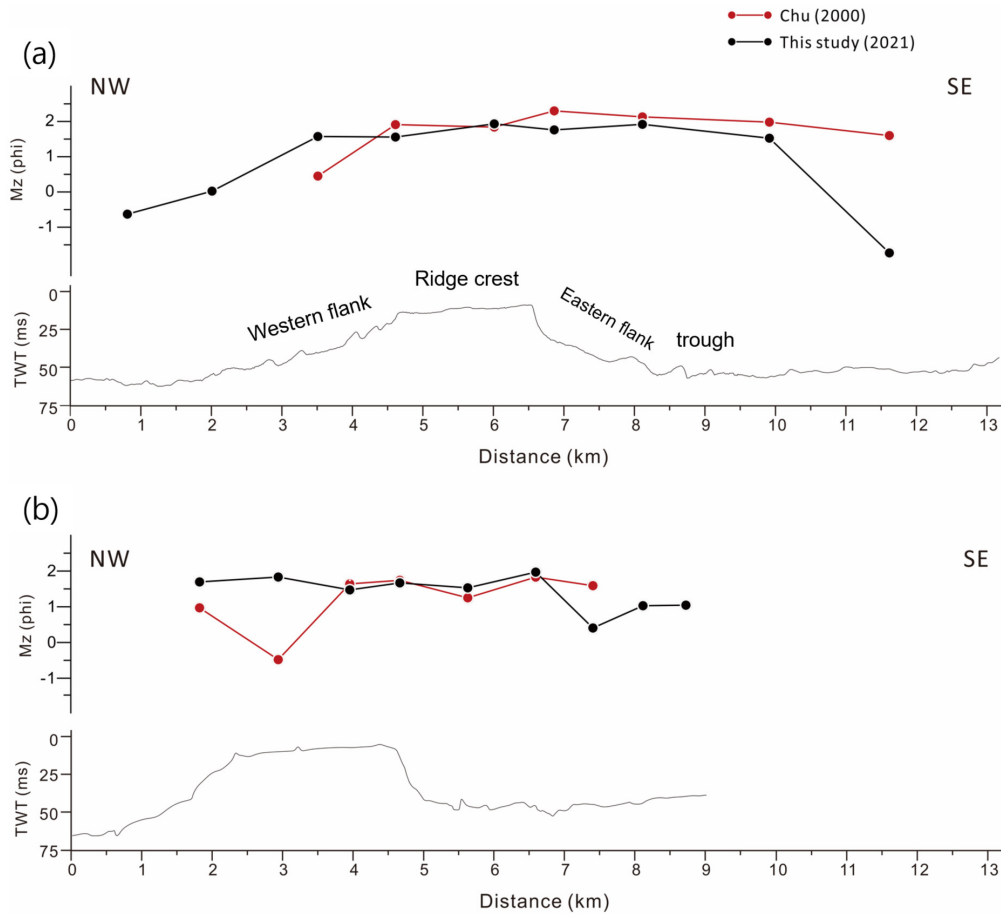


Fig. 6. Comparison of mean grain size of surface sediments samples in 1997 and 2021 along two NW-SE transects. (a) the northern transect-line 1 and (b) the southern transect-line 2. See for the locations in Fig. 1. TWT is the two-way travel time extracted from the chirp profiles.

et al., 2004). 연구지역의 파랑은 강한 계절성을 보인다. 여름철은 최대파고 <1 m 이하로서 퇴적물 이동에 있어 비교적 파랑의 영향이 미미하며, 겨울철에는 강한 북서풍의 영향으로 높은 파랑이 일며, 이때 세립질 퇴적물을 제거하는 것으로 알려졌다. 이와 같이 장안사퇴 퇴적물의 조립화 경향은 일시적인 해사채취의 영향인지, 점진적으로 강화되는 북서계절풍의 영향인지를 밝히기 위해서는 세밀한 추가적인 연구가 필요하다.

5.2 장안사퇴 표층퇴적물 분포 양상

대륙붕과 연안에 존재하는 사퇴(sand ridge) 또는 모래 언덕(sand bank)은 잔자갈에서 모래와 니(mud) 퇴적물까지 다양한 퇴적물로 구성되어 있다(Klein *et al.*, 1982; Bahng *et al.*, 1994; Park and Lee, 1994; Jung *et al.*, 1998; Jin and Chough, 2002; Lee *et al.*, 2006; Robinson and McBride, 2008; Dalrymple, 2010; Snedden *et al.*, 2011; Chang *et al.*, 2012). 파랑이 지배적인 곳에서 산출되는 사퇴는 대부분 잔자갈과 패각으로 구성되며, 조석이 조절하는 사퇴의 중심부는 거의 대부분 깨끗한(clean) 세립사 내지는 중립사로 이루어져 있다. 드물게, 모래로 상부가 덮인 조간대 니로 구성된 사퇴도 존재한다. 경기만의 남부와 아산만 입구에 존재하는 많은 사퇴의 능선은 그러나 대부분 분급이 좋은 세립사-중립사로 구성되어 있으며, 주퇴적 층리면(master bedding plane)이 경사져 산출되어 때때로 사퇴의 장기적 이동 방향을 지시한다(Park and Yoo, 1997;

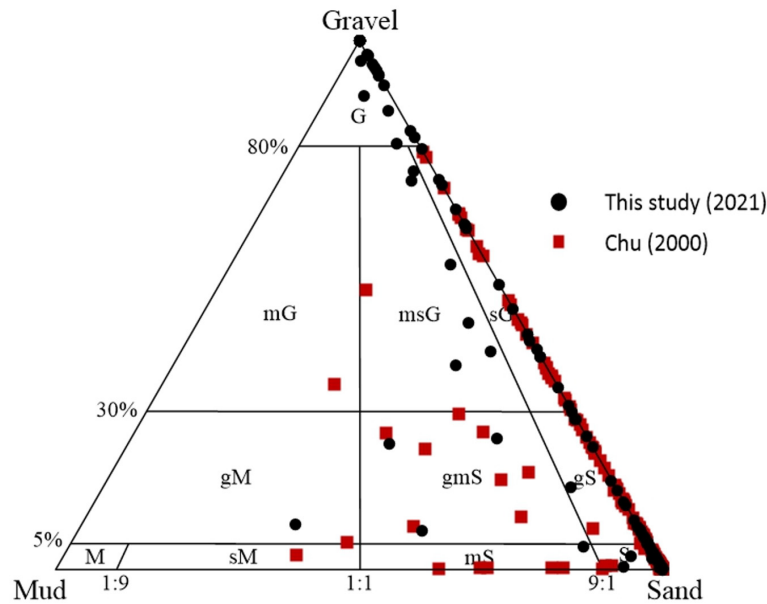


Fig. 7. Ternary diagrams showing the textural classification of Jangan Sand Ridge sediments proposed by Folk(1968). The classification scheme for gravel-bearing sediments based on gravel/sand/mud ratios. In this study, the sampling locations used for the comparison are identical to Chu(2000)'s study.

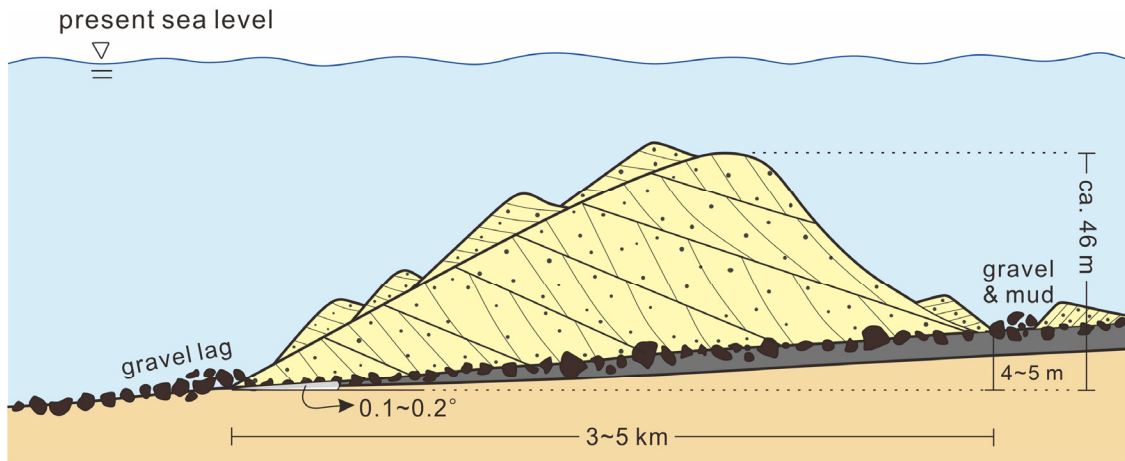


Fig. 8. Hypothetical reconstruction of the Jangan Sand Ridge based on the surface sediment distribution and bathymetry. Note that the pebble lags and muddy gravels are dominantly distributed on the base of sand ridge, whereas the sand ridge itself consists of mobile fine to medium sands.

Berne, 2003; Park *et al.*, 2006; Chang *et al.*, 2010). 사퇴는 다양한 크기(소규모-대규모)의 수중사구로 이루어져 있다(Ashley *et al.*, 1990; Dalrymple, 2010). 층서적으로 사퇴는 최하부의 잔류자갈 위를 세립질의 조건대 니가 덮으며 중심부인 모래가 최상부에 놓인다(Berne *et al.*, 2002; Berne, 2003). 따라서 사퇴는 일반적으로 퇴적물 입도의 상향조립화 경향을 보인다.

장안사퇴의 표층퇴적물의 분포 양상을 살펴 볼 때, 사퇴의 동측과 서측 기저 주변부는 대부분 잔자갈과 니사질역으로 이루어져 있다. 사퇴의 중심부는 깨끗한 세립사-중립사로 구성된다(Fig. 2). 사퇴 서측의 기저에서는 니질 퇴적물이 발견되지 않고, 자갈의 경우 원마도가 비교적 양호하며, 자갈 표면이 매끄럽고 파개비 등이 나타나지 않는다. 반면, 사퇴 동측의 골에서 산출되는 니질 또는 니사질역의 경우, 역은 대부분 원마도가 불량하고 파개비, 식물 등이 표면을 감싸고 있으며 일부 니질 퇴

적물로 둘러싸여 산출된다(Fig. 3). 이러한 차이는 서로 다른 물리적 에너지를 반영하는 것으로 해석된다. 사퇴의 서측은 파랑에 종종 노출되어 재동되기 쉬우며, 동측은 상대적으로 파랑 작용으로부터 제한되고 보호되기 때문에 판단된다(Chang *et al.*, 2010). 위의 분포양상으로부터 장안사퇴는 층서적으로 최하부에 잔류 자갈(gravel lags)이 놓이며, 그 위를 얇은 니질 퇴적물이 덮고, 최상부는 비교적 두꺼운 약 30 m의 깨끗한 모래가 놓이는 상향조립화 경향을 보일 것으로 추정된다(Fig. 8). 수심자료 분석결과 동측과 서측 기저는 4-5 m의 고도 차이를 보이며, 사퇴의 서측 사면이 완만하고, 동측 사면은 상대적으로 급경사를 이룬다. 위의 지형적 특징으로부터 사퇴는 장기적 관점에서 아마도 동측 방향으로 이동할 것으로 추측된다. 또한 잔류 자갈의 노출은 사퇴의 기저면이 드러난 것으로 해석되며, 따라서 장안사퇴는 퇴적물 공급이 충분한 퇴적형 사퇴라고 하기 어려워 보인다. 위의 가설을 검증하기 위해서는 사퇴 중심부와 주변부의 시추를 통한 추가적인 연구가 필요하다.

6. 결 론

2021년 7월에 장안사퇴와 그 주변해역에서 그랩 방식으로 227개 정점의 표층퇴적물을 획득하였다. 표층퇴적물의 분포 특성을 파악하고, 1997년 입도 자료와 비교한 결과, 주요한 결론은 다음과 같다.

- 1) 장안사퇴의 주요 퇴적상은 크게 사퇴 중심부의 깨끗한 모래 퇴적상, 동측과 서측 기저부의 자갈 퇴적상과 니사질역 퇴적상으로 구분된다. 그리고 사퇴의 북동부에 니질모래 퇴적상과 니 퇴적상이 소규모로 산재한다.
- 2) 사퇴 중심부의 평균입도는 2-3 ϕ 의 중립사 내지는 세립사를 나타내며, 기저와 골에서는 -2-6 ϕ 의 잔자갈의 평균입도를 보인다. 분급도의 경우, 중심부 퇴적물은 0.2-0.7 ϕ 로서 양호한 분급을, 골에서 3 ϕ 로서의 분급은 불량하다. 사퇴의 정상부에서 일부의 퇴적물은 치우침이 없는 정규분포를 이룬다. 하지만 중심축 퇴적물의 상당부분은 소량의 조립 퇴적물이 섞인 음(-)의 왜도를, 골에서는 세립 퇴적물이 유입되어 혼합된 양(+)의 왜도를 보인다. 따라서 사퇴의 능선은 비교적 단일 집단의 깨끗한 세립사가, 반면에 사퇴의 양측면과 기저/골에서는 조립질과 세립질 퇴적물이 종종 혼합된다고 할 수 있다.
- 3) 1997년 입도자료의 비교 결과 지난 25여 년 동안 장안사퇴 퇴적물은 전반적으로 0.5 ϕ 조립해졌다. 세립질 퇴적물의 제거는 겨울철 북서풍의 강화로 인한 고파랑의 영향이거나 지난 15여 년 전 해사채취 시 부유사의 제거로 설명된다.
- 4) 사퇴와 주변해역의 표층퇴적물 분포양상으로 미루어 볼 때 잔류자갈 위에 얇은 니질 퇴적물이 놓이고 바로 30m의 두꺼운 모래가 놓일 것으로 추정된다. 사퇴의 비대칭성, 동측과 서측의 고도차이, 그리고 서측 기저의 재동된 잔류자갈의 존재는 장안사퇴가 퇴적물 공급이 부족하고, 침식에 노출되기 쉬우며, 따라서 장기적으로 동측 방향으로 이동할 수 있음을 시사한다.

사 사

이 연구는 국립해양조사원의 2021-2022년 “연안 해저특이지형(태안반도 북부해역) 변화 연구(I, II)”의 지원을 받아 수행되었습니다. 장안사퇴와 주변해역의 시료채취에 도움을 준 국립해양조사원 ‘황해로’ 선장님과 승조원들께 특별히 감사드립니다. 또한 현장조사와 입도분석을 기꺼이 함께해준 전남대 연안지질·퇴적학 실험실 학생들에게 고마움을 전합니다. 특별히 논문에 사용된 그림 작업을 도와주고 정리해준 임세린(박사과정) 학생에게 감사드립니다. 끝으로 저자들이 미처 발견하지 못한 부분을 꼼꼼하게 읽고 건설적인 비평을 해주신 심사위원과 편집위원께 감사드립니다.

참고문헌(References)

- Amos, C.L. and E.L. King, 1984. Sandwaves and sand ridges of the Canadian Eastern Seaboard: a comparison to global occurrences. *Marine Geology*, **57**(1-4): 167-208.
- Ashley, G.M. and Symposium Chairperson, 1990. Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem. *Journal of Sedimentary Petrology*, **60**: 160-172.
- Bahng, H.K., H.Y. Lee, J.H. Chang, C.W. Lee and J.-K. Oh, 1994. History and characteristics of tidal sand ridges in Kyeonggi Bay, Korea. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, **29**(3): 278-286.
- Berne, S., 2003. Offshore sands. In: *Encyclopedia of Sediments and Sedimentary Rocks*, edited by Middleton, V., Springer, Dordrecht, pp. 492-499.
- Berne, S., P. Vagner, F. Guichard, G. Lericolais, Z. Liu, A. Trentesaux, P. Yin and H.I. Yi, 2002. Pleistocene forced regressions and tidal sand ridges in the East China Sea. *Marine Geology*, **188**(3-4): 293-315.
- Blott, S.J. and K. Pye, 2001. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, **26**(11): 1237-1248.
- Byun, D.-S. and D.E. Hart, 2018. Predicting tidal currents using 25-h observations through a complete tidal species modulation with tidal current constant corrections method. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **35**: 2405-2420.
- Carver, R.E., 1971. *Procedures in Sedimentary Petrology*. Wiley-Interscience, New York, 652 pp.
- Caston, V.N.D., 1972. Linear sand banks in the southern North Sea. *Sedimentology*, **18**(1-2): 63-78.
- Chang, T.S., G.-H. Min, Y.K. Seo, H.J. Ha, and K.H. Baik, 2012. Morphology investigations associated bedforms of tidal sand ridges using a multibeam echo sounder: western offshore of Eocheong Island. *Korean Journal of Hydrography*, **1**: 57-65.
- Chang, T.S., S.-P. Kim, D.G. Yoo, S. Lee and E. Lee, 2010. A large mid-channel sand bar in the macrotidal seaway of outer Asan Bay, Korea: 30 years of morphologic response to anthropogenic impacts. *Geo-Marine Letters*, **30**: 15-22.
- Chu, Y.S., 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, Seoul, 240 pp.
- Cummings, D.I., R.W. Dalrymple, K. Choi and J.H. Jin, 2016. *The Tide-dominated Han River Delta, Korea: Geomorphology, Sedimentology, and Stratigraphic Architecture*. Elsevier, Amsterdam, 376 pp.
- Dalrymple, R.W., 2010. Tidal depositional systems. In: *Facies Models 4*, edited by James, N.P. and Dalrymple, R.W., Geological Association of Canada, Newfoundland, pp. 201-231.
- Dyer, K.R. and D.A. Huntley, 1999. The origin, classification and modelling of sand banks and ridges. *Continental Shelf Research*, **19**: 1285-1330.
- Emery, K.O., 1968. Relict sediments on continental shelves of the world. *AAPG Bulletin*, **52**(3): 445-464.
- Flemming, B.W., 2005. Tidal environments. In: *Encyclopedia of Coastal Science*, edited by Schwartz, M., Springer, Berlin, pp. 1180-1185.
- Folk, R.L. and W.C. Ward, 1957. Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, **27**(1): 3-26.
- Folk, R.L., 1968. *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill's, Austin, Texas, 170 pp.
- Hulscher, S.J.M.H., H.E. de Swart and H.J. de Vriend, 1993. The generation of offshore tidal sand banks and sand waves. *Continental Shelf Research*, **13**(11): 1183-1204.
- Huthnance, J.M., 1982a. On mechanism forming linear sand banks. *Estuarine Coastal Shelf Science*, **14**(1): 79-99.
- Huthnance, J.M., 1982b. On formation of sand banks. *Estuarine Coastal Shelf Science*, **15**(3): 277-299.
- Jin, J.H. and S.K. Chough, 2002. Erosional shelf sand ridges in the mid-eastern Yellow Sea. *Geo-Marine Letters*, **21**: 219-225.

- Jung, W.Y., B.C. Suk, G.H. Min and Y.K. Lee, 1998. Sedimentary structure and origin of a mud-cored pseudo-tidal sand ridge, eastern Yellow Sea, Korea. *Marine Geology*, **151**(1-4): 73-88.
- Klein, G.D.V., Y.A. Park, J.H. Chang and C.S. Kim, 1982. Sedimentology of a subtidal, tide-dominated sand body in the Yellow Sea, southwest Korea. *Marine Geology*, **50**(3): 221-240.
- Kum, B.-C., D.-H. Shin, S.-K. Jung, S. Jang, N.-D. Jang and J.-K. Oh, 2010a. Morphological features of bedforms and their changes due to marine sand mining in southern Gyeonggi Bay. *Ocean and Polar Research*, **32**: 337-350.
- Kum, B.-C., D.-H. Shin, S.-K. Jung, Y.K. Lee and J.-K. Oh, 2010b. Morphological characteristics and control factors of bedforms in southern Gyeonggi Bay, Yellow Sea. *Journal of Korean Earth Science Society*, **31**: 608-624.
- Lee, H.J., H.R. Jo and Y.S. Chu, 2006. Dune migration on macrotidal flats under symmetrical tidal flows: Garolim Bay, Korea. *Journal of Sedimentary Research*, **76**(2): 284-291.
- Off, T., 1963. Rhythmic linear sand bodies caused by tidal currents. *Bulletin of American Association of Petroleum Geologists*, **47**(2): 324-341.
- Park, S.C. and D.G. Yoo, 1997. Bedform distribution and sand transport trend on a subtidal sand ridge in a macrotidal bay, west coast of Korea. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, **32**: 181-190.
- Park, S.C. and S.D. Lee, 1994. Depositional patterns of sand ridges in tide-dominated shallow water environments: Yellow Sea coast and South Sea of Korea. *Marine Geology*, **120**(1-2): 89-103.
- Park, S.-C., B.-H. Lee, H.-S. Han, D.-G. Yoo and C.-W. Lee, 2006. Late Quaternary stratigraphy and development of tidal sand ridges in the eastern Yellow Sea. *Journal of Sedimentary Research*, **76**(9): 1093-1105.
- Park, S.-C., H.-S. Han and D.-G. Yoo, 2003. Transgressive sand ridges on the mid-shelf of the southern sea of Korea (Korea Strait): formation and development in high-energy environments. *Marine Geology*, **193**(1-2): 1-18.
- Robinson, M.M. and R.A. McBride, 2008. Anatomy of a shoreface sand ridge revisited using foraminifera: False Cape Shoals, Virginia/North Carolina inner shelf. *Continental Shelf Research*, **28**(17): 2428-2441.
- Shin, D.-H., B.-C. Kum, E.Y. Park, H.-I. Lee and J.-K. Oh, 2004. Seasonal sedimentary characteristics and depositional environments after the construction of seawall on the Iwon macrotidal flat. *Journal of Korean Earth Science Society*, **25**(7): 615-628.
- Snedden, J.W., R.W. Tillman and S.J. Culver, 2011. Genesis and evolution of a mid-shelf, storm-built sand ridge, New Jersey continental shelf, U.S.A. *Journal of Sedimentary Research*, **81**(7): 534-552.
- Stride, A.H., R.H. Belderson, N.H. Kenyon and M.A. Johnson, 1982. Offshore tidal deposits: sand sheet and sand bank facies. In: *Offshore Tidal Sands: Processes and Deposits*, edited by Stride, A.H., Chapman and Hall, London, pp. 95-125.
- Swift, D.J.P., D.J. Stanley and J.R. Curray, 1971. Relict sediments on continental shelves: a reconsideration. *Journal of Geology*, **79**(3): 322-346.
- Yoon, S.S., K.S. Kim, and J.I. Chang, 2017. Utilization of sea sand and improvement of management system. Korea Maritime Institute, Report 2017-20, 116 pp.