



한반도 서해안의 대조차 파랑-우세 신두리 만에서 관찰되는 급격한 표층퇴적상 변화와 퇴적학적 특성

윤현호^{1,2} · 전승수^{1,*}

¹전남대학교 지구환경과학부

²한국지질자원연구원 석유해저연구본부

요 약

한반도 서해안 태안반도의 서측에 위치하는 신두리만은 외측의 파랑우세 사질 조간대와 조수해빈이 발달하며 이들은 직선형의 해안선과 표층퇴적물의 대부분이 분급이 매우 좋은 중립-세립의 모래로 구성되어 있다. 해안선과 수평한 방향으로 연속적으로 발달하는 3-4줄의 스위시바(swash bar)가 사질 조간대의 형성에 가장 중요한 역할을 한다. 평행한 층리와 파랑 연흔 사층리가 교호하는 수직퇴적상이 우세하다. 신두리만 남측 만입지역의 표층퇴적물은 입구로부터 모래함량이 점차 감소하여 혼성 조간대에서 니질 조간대 퇴적상으로 전이하는 전형적인 만입형 조간대 퇴적층의 형태를 보인다. 니질 조간대의 경사는 매우 완만하고 오목한 형태이며, 생교란이 심한 니퇴적상이 우세하다. 신두리 만은 한반도 서해안에 발달하는 대표적인 대조차 파랑우세 해빈으로 인식되어 왔지만 하나의 좁은 지형단위 내에서 파랑우세 연안퇴적환경(사질 조간대와 조수해빈)과 조류우세 연안퇴적환경(니질 조간대)이 인접하여 나타나는 퇴적학적 특성을 가진다. 단일한 지형단위 내에서 표층퇴적상, 수직퇴적상과 지질특성이 매우 상이한 소퇴적환경이 동시에 존재하는 원인은 지형적 특성 및 부유퇴적물 공급과 퇴적역학적 특성이 복합적으로 작용한 결과이다.

주요어: 태안반도, 신두리 만, 대조차 파랑우세 조간대, 퇴적상 해석

HyunHo Yoon and SeungSoo Chun, 2019, Rapid shift of surface sedimentary facies and its depositional mechanism in the macrotidal wave-dominated Sinduri Bay, west coast of Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 55, no. 3, p. 257-276

ABSTRACT: Wave-dominated sandflat and tidal beach formed in the north of Sinduri Bay, Taean Peninsula of Korea have a nearly straight shoreline, which consist of very well sorted medium to fine sand in surface sediment. Three to four lines of swash bar, which are parallel to the coastline and continuously migrating landward and, play the most important role in the formation of the sandflat. Parallel lamination and wave-ripple cross lamination are predominantly preserved sedimentary structures in short cores. The embayed area of the south of the bay consists mostly of mud in surface sediment, showing a gradual decrease in sand content from the entrance to the bay-head area. A typical transition from mixed-flat to mud-flat facies occurs in this embayed intertidal flat area. The mud flat is very gentle in slope with slight concave-up profile and shows a dominant bioturbated mud facies (Facies Mb) in its vertical facies. The coastal environment of Sinduri Bay has been recognized as one of the macrotidal wave-dominated beach in the west coast of the Korea. However, it has the sedimentological characteristics which both wave-dominated (sand flat and tidal beach) and tide-dominated (mud flat) coasts occur very closely within a small single geomorphological unit. The co-occurrence of sub-environments having different surface and vertical facies and geologic character in such a single geomorphological unit can be indicative of one of characteristics in the macrotidal open-coast depositional environment. This may be the combined result of geomorphologic characteristic, supply of suspended sediment and hydrodynamic condition.

Key words: Taean Peninsula, Sinduri Bay, macrotidal wave-dominated tidal flat, facies analysis

(HyunHo Yoon and SeungSoo Chun, Faculty of Earth Systems and Environmental Sciences, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea; HyunHo Yoon, Petroleum and Marine Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea)

* Corresponding author: +82-62-530-3456, E-mail: tidalflat@gmail.com

1. 서론

쇄설성 연안퇴적환경은 파랑과 조류의 영향을 강하게 받으며 지형적인 요인과 퇴적물 공급량의 변화가 얽히어 다양한 분지작용(basinal processes)을 받는 지구상에서 수리학적으로 가장 복잡한 퇴적환경이라고 할 수 있다(Reineck and Singh, 1980; Davies, 1985; Reading and Collinson, 1996). 이런 복잡한 연안환경을 쉽게 분류하기 위해 퇴적역학적으로 중요한 요소인 파랑, 조석과 퇴적물 공급량을 기준으로 삼각 다이어그램으로 표시한 연안퇴적환경의 분류가 제시되어 활용되고 있다(Boyd *et al.*, 1992, 2006; Harris *et al.*, 2002). 그러나 연안사주섬이 없는 개방형 연안의 조간대에서는 지형의 특성, 계절적 요인과 폭풍의 영향에 의해 파랑과 조류에너지의 비율에 따르는 다양한 연안퇴적환경의 특성을 보인다(Yang and Chun, 2001; Chun and Yang, 2004; Yang *et al.*, 2005; Fan, 2013).

한반도 서해안에서 기존에 알려진 연안퇴적환경에 관한 연구들은 주로 만입지형이나 강하구에 발달한 조간대 환경에서 퇴적작용과 수력학적 특성에 관한 연구가 주로 진행되었다(Chun *et al.*, 1992; Lee *et al.*, 1994; Chang and Choi, 1998; Chang *et al.*, 1999). 최근 연구에 따르면 조간대의 퇴적작용에서 파랑의 역할이 보고되면서 문순기후대에 위치한 서해안의 특성상 계절풍의 세기 및 풍향의 변화에 따라 나타나는 퇴적상과 퇴적작용의 계절변화가 보고되었으며(Ryu *et al.*, 1997, 2004b; Yang and Chun, 2001; Ryu, 2003; Baek and Chun, 2004; Yang *et al.*, 2005, 2007; Hong *et al.*, 2017), 고창 동호와 영광 백수 조간대 등 외해로 개방된 특성을 보이는 연안지역에서 조석과 파랑의 상대적인 에너지 크기의 변화에 의해 나타나는 퇴적학적 특성들에 관한 연구가 진행된 바 있다(Yang and Chun, 2001; Yang *et al.*, 2005, 2006). 서해안의 파랑우세 환경에 관한 연구들은 주로 표층퇴적물 입도분석 및 지형단면의 변화 분석을 통하여 퇴적기구, 계절변화, 퇴적물 이동 등을 연구하였다(Chu *et al.*, 1996; Oh and Kum, 1998; Ryu *et al.*, 2004a; So *et al.*, 2009; Kang *et al.*, 2015).

태안반도는 한반도 중부에 위치하며 경기만의 최남단에서 서쪽으로 돌출되어있는 형태이며 한강에서

공급되는 니질의 퇴적물 유입이 매우 제한되는 특성을 보인다. 태안반도의 연안은 해안선이 서해로 직접 열려있어 대조차 환경임에도 불구하고 파랑우세의 퇴적환경과 해안사구가 곳곳에 발달한다. 신두리 만은 전체적으로 만입환경에 속하며 전형적인 대조차 연안이지만 만의 일부가 북서쪽 외해로 개방되어 있어 파랑우세 모래조간대-조수해빈-사구 시스템의 연안환경과 니질의 조간대가 하나의 퇴적단위 내에 발달하여 나타나는 특성을 보인다. 이 지역에 관한 기존의 연구들은 주로 해빈 또는 배후에 존재하는 풍성 사구에 초점을 맞추어 연구가 진행되었으며(Hong *et al.*, 2010; Shin and Seo, 2014), 해빈 전면의 조간대 지역의 표층퇴적물 분포의 연구도 수행된 바 있다(Oh and Kim, 1999; Kim *et al.*, 2002). 그러나 공간적으로 하나의 퇴적단위인 신두리 만 전체에서 퇴적물의 이동과 퇴적작용을 관련지어 함께 설명하는 시도가 부족하였으며, 계절적 변화에 따른 퇴적물의 분포 양상을 파악하고자 하는 연구가 없었다. 따라서 이 연구는 신두리 만을 하나의 퇴적단위로서 퇴적작용을 이해하고 대조차 환경에 발달하는 파랑우세 연안퇴적 환경에 대하여 토론하고자 한다.

2. 연구지역

태안반도의 서쪽 연안에 위치하는 신두리 만은 입구의 폭이 약 4 km이고 길이가 7 km의 북서 방향으로 입구를 가진 긴 깔대기 형태의 만입지형이다. 해안선은 북북서-남남동 방향으로 반월 형태의 해안선이 나타나며 남쪽에서 곧바로 연결되어 안쪽으로 향아리 형태의 만입형 해안선을 가진 지형이 발달한다(그림 1). 만 입구의 기반암으로 노출된 섬이 존재하며 내측의 남쪽 만입부의 중앙부에 최대 수심이 약 6 m에 이르는 주조수로가 내부로 유입되어 중간지점부터 여러 갈래로 분기한다. 반월 형태의 해안선을 가진 신두리 사구 남쪽 해안과 만입형 해안의 최상부에는 해안선을 따라 침식과 해수침입 방지를 위한 방조제가 건설되어 있으며, 방조제가 없는 북쪽 사구해안의 뒤 쪽으로 최대 수 km의 폭을 가지는 해안사구가 형성되어 있다. 여러 갈래의 조수로가 발달하는 향아리 형태의 남쪽 만입부에는 작은 하천의 하구에 해당되었던 조수로를 포함한 해안선에 방조제가 건설되어 지속적으로 유입되는 하천은 존재하지

않는다. 연구지역의 지질은 원생대 서산누층군의 서산층군에 해당하며 편암류와 대리암류로 구성되어 있고 부분적으로 중생대의 화성암류 및 암맥류가 관입하고 있으며, 기반암의 지형이 매우 불규칙하다(Kim and Hwang, 1982).

신두리 해안의 조석은 반일주조이고 뚜렷한 일조부등 현상이 나타나며, 평균대조차가 613.3 cm로 Flemming의 분류기준(Flemming, 2005, 2012)에 의하면 고대조차(upper macrotidal) 환경에 해당한다(그림 2c). 퇴적도에서 실측한 자료를 분석한 결과, 유의파고는 대체로 0~3 m까지 관찰되며, 여름에는 대부분이 1 m 미만에서 때때로 2 m에 이르는 반면에 겨울에는 대체적으로 1~3 m로 높은 파고를 보인다. 일반적으로 겨울철이 여름보다 더 높은 유의파

고를 보이며(그림 2b) 여름철에는 간헐적으로 태풍에 의한 영향을 받는다.

3. 시료채취 및 분석

신두리 만의 특성을 잘 반영할 수 있는 주요 관찰 지점을 선정하여 지형 측량, 표층 퇴적물 채취, 주상 시료 채취 등을 실시하였다. 설치된 측선에서 측량은 수준의(SOKKIA B21)를 사용하였으며 해당 장비는 1 km 왕복 측정 시 ±1 cm의 오차범위를 갖는다. 일반적으로 100 m 간격으로 고도를 측정하였으나 지형 특성을 반영할 수 있는 위치에서 연속 측정방법으로 측정하였다(그림 1, 3).

시료 채취는 표층으로부터 1 cm 이내의 퇴적물을

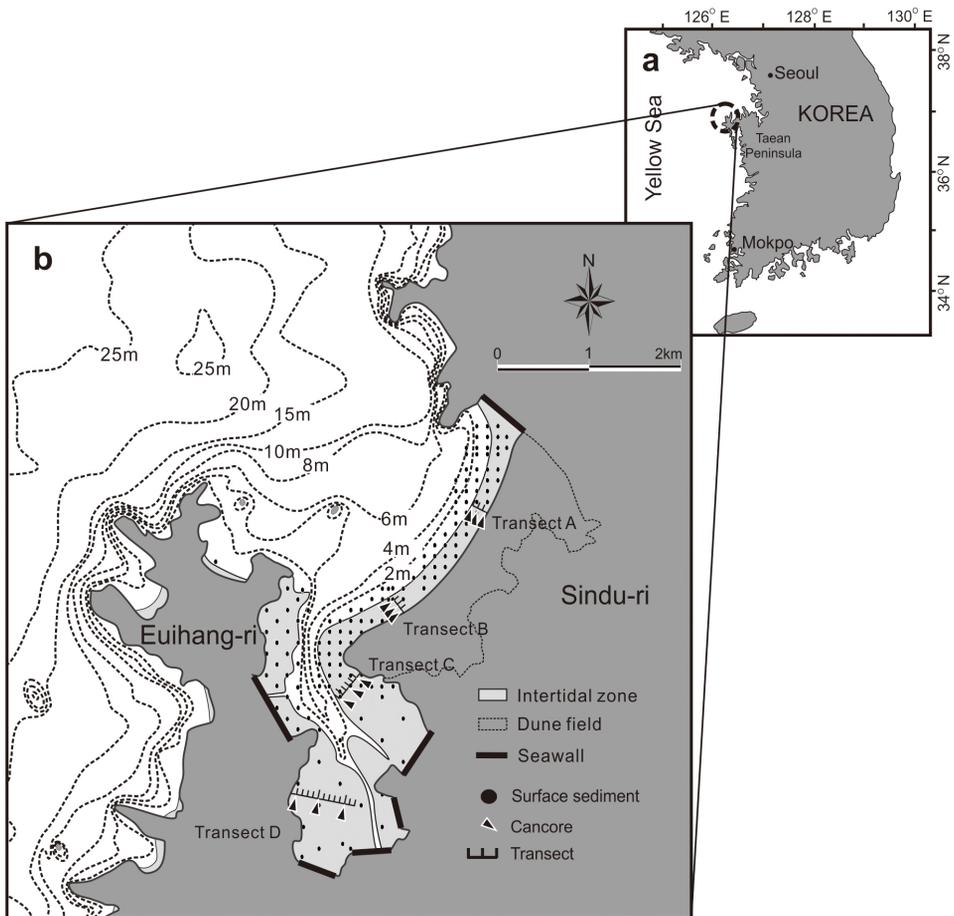


Fig. 1. Location map of sampling positions and survey lines for the sedimentological research in Sinduri Bay which locates on the west coast of the Taean Peninsula, Korea. The bay shows characteristically a wide NW-SE entrance and the narrow funnel shape of small embayment area.

직접 채취하는 방식으로, 표층퇴적물의 분포특성을 파악하기 위해 공간을 격자망으로 나누어 채취하였다. 만의 북측인 사질 조간대에서는 75 m 간격, 남측 만입부에서는 300 m 간격, 만 왼쪽의 의항리 인근에서 150 m 간격으로 채취하였다(그림 1). 퇴적물의 채취지점은 오차범위 ± 5 m의 GPS (GARMIN eTrex Vista, USA)를 사용하였으며 Tokyo 좌표계를 사용하였다. 채취한 표층퇴적물은 증류수로 염분을 제거한 후 과산화수소와 염산을 차례로 가하여 유기물과 탄산염 입자를 제거하였다. 전처리가 완료된 시료는 4 ϕ 체에 습식 체질하여 모래와 펄 퇴적물로 분리하였다. 모래 퇴적물은 로탭-진탕기(ro-tap sieve shaker)를 이용해 0.25 ϕ 간격으로 입도중량을 구하였다. 펄 퇴적물은 Sedigraph 5100을 이용하여 입도별 함량비를 구하고 전체 시료 중 10%를 추출하여 모래 퇴적물과 비교하였다.

퇴적역학상 분석을 통해 단기적인 퇴적 양상을 알아보기 위하여 4개 측선의 각각 총 연장에서 상부, 중부, 하부에서 3점씩의 주상시료를 채취하였다(그림 1).

주상시료는 수직 길이 30 cm의 천부 주상퇴적물 채취기(can corer)를 이용하여 해안선과 주조수로에 수직한 방향으로 채취한 후 퇴적구조 관찰을 위하여 에폭시 필(epoxy peel)을 제작하였다.

신두리 만의 북측 사질 조간대에서의 밀집 퇴적물의 이동 경향을 분석하기 위하여 채취한 표층퇴적물 중 모래 함량이 90% 이상인 시료만을 이용하여 이동 경향 분석을 수행하였다(Gao and Collins, 1992). 시료채취는 퇴적물 이동방향을 산출하기 위하여 각 시료 채취 지점간의 거리는 하나의 열에서 최소 4개로 75 m 간격으로 채취하였다. 시료의 채취시기는 조석의 영향을 받는 해양환경의 특성을 고려하여 1회의 조석과정에서 퇴적된 시료를 채취하였다. 표본망은 격자망으로 설계하여 각 시료 간의 간격이 일정하도록 계획하였다. 퇴적물 이동방향을 산출하기 위한 퇴적물 이동벡터는 하나의 정점에서 주변에 위치하는 지점을 근린표본점으로 설정하여 일차적으로 경향벡터를 계산하며, 근린표본점의 범위를 정하는 거리를 임계범위로 설정한다. 근린표본점의 범위는

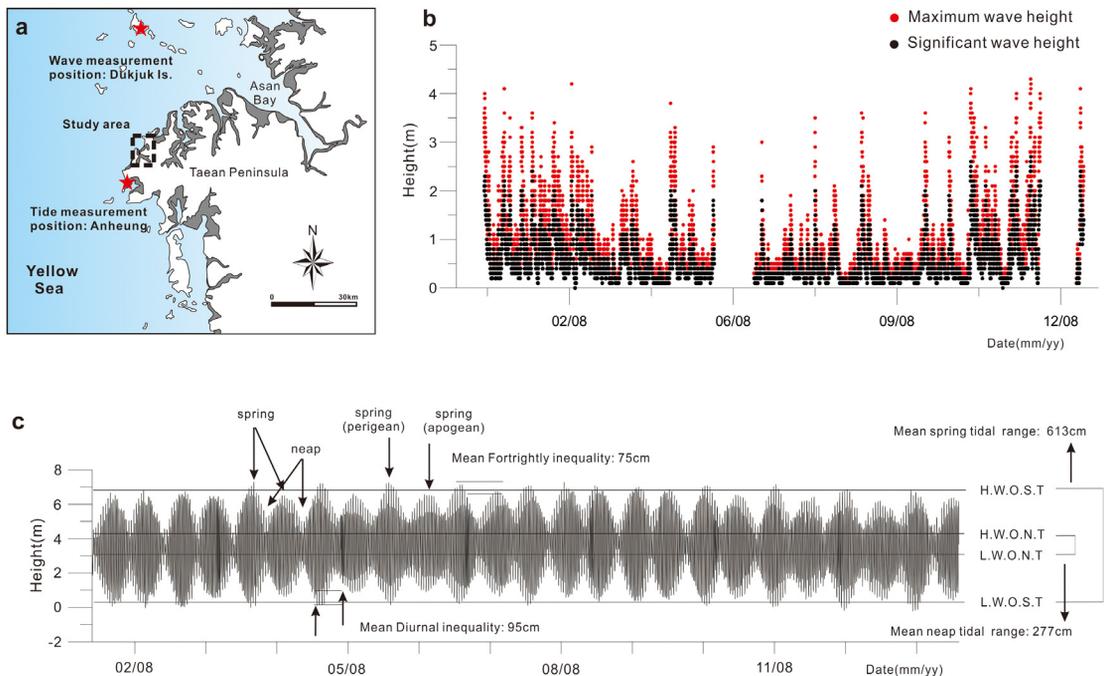


Fig. 2. a) Location map of the study area with measurement positions of wave and tide data. b) Time series of wave height at Dukjuk Island in 2008 (black dots, significant wave height; red dots, maximum wave height). c) Tidal elevation at Anheung during the 2008~2009: H.W.O.S.T, high water of spring tide; H.W.O.N.T, high water of neap tide; L.W.O.N.T, low water of neap tide; L.W.O.S.T, low water of spring tide.

220 m 이내로 두어 이동벡터 계산에 포함되도록 설정하였다. 퇴적물 이동벡터 산출을 위한 시료채취에서 발생하는 가장자리 효과(edge effect)는 고려하지 않았다.

4. 신두리만의 지형특성

만 입구의 반월형 연안은 길이가 약 3.6 km이고 저조(low tide)시에 드러나는 폭이 최대 500 m 미만이다. 연안의 북동 방향 끝은 방조제로 가로막혀 있으며 기반암이 돌출되어 있다. 남서 방향의 끝은 만

내부로 연결된 주조수로에 의해 단절되며 조수로 방향으로 급격한 경사를 보이다가 300 m 지점부터 점차 완만해진다. 입구와 평행하게 발달한 조간대의 표면에는 언덕(mound)형태의 지형기복들이 해안선을 따라 길게 발달한다. 이 지형기복들은 정부(crest)를 중심으로 바다방향의 사면이 길고 완만하며 육지방향의 사면은 짧고 경사가 급하며 적어도 3개 이상이 관찰된다(그림 3a). 조간대(intertidal zone)와 접하여 배후에는 풍성사구가 발달하며 조간대 영역은 경사의 차이에 따라 비교적 급경사를 가진 조수해빈(tidal beach)과 완경사의 파랑-우세 사질 조간대(wave-do-

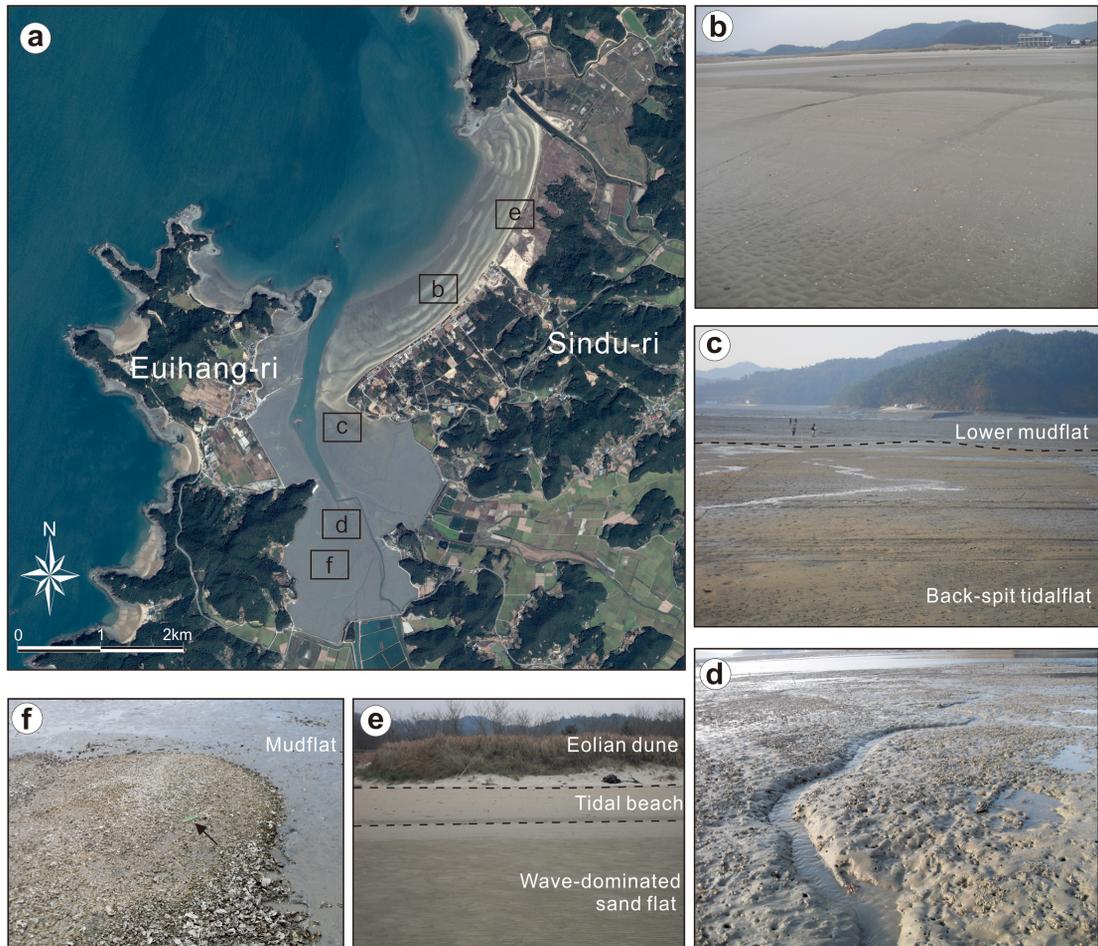


Fig. 3. General views of coast and sedimentary facies on the Sinduri Bay. a) Satellite image of the Sinduri Bay. b) Swash bars formed on the open coast wave-dominated sand flat. c) Upper back-spit tidal flat and lower mud flat surface feature separated by transition area formed on the western corner (spit) of sand flat. d) Highly bioturbated mud flat developed on inner part of the bay. e) Representative features of the wave-dominated sand flat, tidal beach and sand dune occurred in the northern part of the bay. f) Angular and very coarse gravels, sands and shell fragments occurred in the uppermost part of mud flat located in the southern inner bay. 15 cm ruler (black arrow) for scale.

minated sandflat)으로 구분된다(그림 3e).

만 안쪽의 항아리 형태의 지형은 입구 부분인 의항 인근은 폭이 약 900 m이며, 조수로가 분기되는 지점인 중간지점의 폭은 약 1.5 km로 가장 넓다. 전체 길이는 2.5 km이다. 저조 시에 조간대가 양안에서 최대폭이 1 km까지 드러난다(그림 3b). 주조수로(main tidal channel)는 입구에서 저조 시에 약 300 m의 폭으로 가장 넓으며 안쪽으로 갈수록 좁아진다. 주조수를 중심으로 동쪽 연안은 방조제로 막혀있는 반면에 주조수의 서쪽 연안은 기반암이 드러난 해안 절벽 아래 곧바로 조간대가 발달한다. 조간대의 표층은 거의 기복이 없이 편평한 형태를 보이며 주조수로 부근으로 접근함에 따라 표층에 작은 조류세곡(tidal creek)들이 발달한다(그림 3c). 편평한 지형을 보이는 니질 조간대에는 다양한 크기와 모양의 역과 조개껍질 등이 혼합된 언덕 형태의 퇴

적체가 관찰된다(그림 3f).

만 입구의 반월 형태를 보이는 연안에 설치된 2개의 측선(Transects A, B)에서 조간대 단면(profile)의 특성과 변화를 관찰하였다. 하나의 측선은 해안선의 중심 부분에 위치(Transect A)하며 나머지 하나의 측선은 그보다 남쪽(Transect B)에 설치하였다(그림 1). 측선의 길이는 최대 500 m이며 해안선에서 20 m 떨어진 지점까지 고도가 거의 90 cm가량 감소하여 약 2.8~3.2°의 급격한 경사를 보이다 그 이후로 약 1.0~1.2°로 비교적 완만한 경사를 보인다. 경사가 급한 단면을 가진 부분은 조수해빈(tidal beach)에 해당되며, 매우 완만한 경사를 보이는 넓은 부분은 파랑우세의 사질 조간대(wave-dominated sandflat)에 해당된다. 이 곳에서는 남쪽의 조간대에 비해 북쪽 조간대의 폭이 좁고 경사가 급한 특징을 보인다(그림 4). 사질 조간대의 표층에 나타나는 2-D 사구

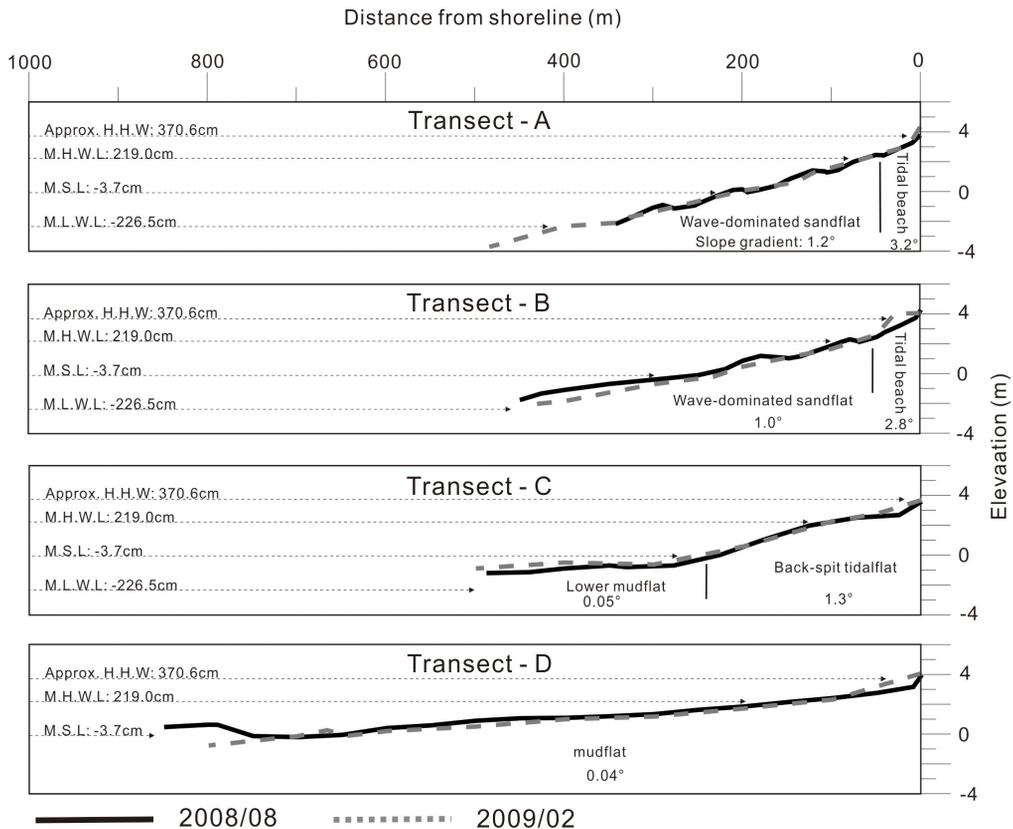


Fig. 4. Cross profiles along the survey lines measured in August 2008 and February 2009. For the location of transect lines, see Fig. 1. Approx. H.H.W., approximate highest high water; M.H.W.L., mean high water level; M.S.L., mean sea level; M.L.W.L., mean low water level.

(dune)는 폭이 50~70 cm이며 높이는 10~15 cm를 가진다. 육지방향 사면(lee side)의 경사가 바다방향 사면(stoss side)의 경사보다 급하여 사구가 조류와 파랑에 의해 해안방향을 향하여 이동하고 있는 스위시바(swash bar)로 추정된다. 북쪽에 위치한 측선에서는 2~3개, 남쪽에 위치한 측선에서는 3~4개의 스위시바가 관찰된다(그림 4). 동계기간에는 조수해빈의 경사가 더 급해지며, 평균 경사도에서는 변화가 미약하나 표층에 나타나는 뚜렷한 특징이었던 스위시바의 발달이 미약하여 지형기복이 현저하게 줄어들며 대신에 간조시에 표층이 파랑연흔(wave ripple)으로 덮힌다.

남측 만입부의 주조수로로 중심으로 동측 연안에 하나의 측선(Transect C)과 조금 더 내측으로 서쪽 연안에 다른 하나의 측선(Transect D)을 설치하였다(그림 1). 측선 C는 연장거리가 약 500 m이며 해안선에서 300 m까지의 경사도가 약 1.3°로 완만하며 300~500 m까지는 약 0.05°의 경사로 거의 편평하다(그림 4). 상부의 경사면은 약간 불룩한 형태를 보인다. 상부의 급한 경사를 보이는 지형은 사취(spit)의 측면으로 해안의 풍성사구에 이어지며, 하부의 완만한 경사는 만 내부에 발달하는 니질 조간대의 일부이다(그림 4). 측선 D는 주조수로까지의 거리가 850 m이며, 전체의 평균경사는 0.04°로 거의 편평하며 급격한 경사의 변화를 보이는 구간이나 지형기복은 관찰되지 않는다. 해안선으로부터 500 m 떨어진 지점부터 작은 조류세곡들이 발달하며 주조수로에서 분기된 조수로가 관찰된다. 조수로 근처에는 패각 및 역질 모래로 구성된 퇴적체가 니질 조간대 상부에 얹혀있으며 이들은 조수로에서 해안선 방향으로 발달 형태를 보인다.

5. 표층퇴적물의 특성 및 분포

5.1 표층퇴적물의 특성

만 북측의 사질 조간대는 95% 이상의 중립-세립 모래로 구성되며 약간의 조립 모래가 포함되는 구간이 있다. 조립 모래가 나타나는 부분은 주로 여름시기에 사구의 골(trough)과 관련된다. 평균입도는 북쪽에 위치한 측선에서 2~2.5 ϕ , 남쪽에서 2.3~2.9 ϕ 로 북측(Transect A)보다 남측(Transect B)이 더 세립하며, 측선 A에서는 외해방향을 매우 미약한 세

립화경향이 나타난다. 또한 전체적으로 겨울보다 여름에 세립해지는 특징을 보인다. 분포곡선을 확인하기 위한 히스토그램은 2.5 ϕ 에서 최빈값을 보이는 단모드(unimodal)의 분산형태를 보인다(그림 5).

분급은 0.3~0.6 ϕ 로 매우 양호하며 북측보다 남측이 약간 더 양호한 분급을 보인다. 해안선과 수직방향으로는 특별한 경향성을 보이지 않으며 계절적으로도 큰 변화는 관찰되지 않는다. 왜도는 전체적으로 -3.6~0.3 ϕ 까지 다양하게 나타나며 여름철이 보다 음의 왜도에 가까운 것이 특징이다. 북측보다는 남측에서 음의 왜도로 치우친 정도가 강하게 나타났다. 해안선과 외해방향을의 경향성은 불분명하다.

측선 C에서 만의 입구부분에서는 사질 퇴적물이 우세하며 만의 내측일수록 니질 퇴적물이 우세해지는 경향을 보인다. 또한 해안선에서 조수로 방향으로 니질 퇴적물이 우세하다. 히스토그램에 나타난 입도의 분포곡선은 250 m 지점까지는 2.5 ϕ 에서 최빈값을 보이는 단모드의 경향이 나타나지만 250 m 지점부터는 조립 실트의 함량이 점차 증가하는 경향이 나타나며 9 ϕ 미만의 점토도 함량이 증가했음을 보여준다. 서쪽의 조간대(Transect D)는 대부분 니질 퇴적물이 우세하지만 조수로 방향으로 사질 퇴적물의 함량이 증가하는 경향을 보인다. 육지 부근에는 각이 진 형태의 거력 및 조립모래 등이 니질 퇴적물에 섞여서 나타난다(그림 5).

만 남측의 만입부 동측(Transect C)은 평균입도의 범위가 2.1~5.0 ϕ 의 범위로 나타나며 서측(Transect D)은 2.5~7.5 ϕ 의 범위로 나타난다. 동측 연안의 여름철 표층퇴적물의 평균입도는 조수로 방향으로 2.1 ϕ 에서 5.0 ϕ 로 세립화하는 경향을 보인다. 서측 연안에서는 해안선에서 조수로 방향으로 모래 퇴적물의 함량이 증가함에 따라 평균입도가 증가하는 경향을 보인다.

동측 연안에서의 분급은 동계에 0.5~2.3 ϕ 의 범위로 나타나며 하계에는 0.5~3.4 ϕ 의 범위를 보인다. 분급의 정도는 해안선 부근에서 0.5~1.0 ϕ 로 비교적 양호한 분급을 보이며 350 m 지점에서 3.4 ϕ 로 분급이 불량하다. 이후 조수로 방향으로 점차 양호한 분급(2.0 ϕ)으로 변한다. 하계에도 분급은 육지부근에서 가장 양호하며 중간부분에서 가장 불량해지며 다시 조수로 방향으로 양호해지는 경향을 보이는

데, 겨울에 비해 전체적으로 분급도가 양호한 특징을 보인다. 서측 연안에서 분급은 동계에는 1.7~3.6 Ø 까지 다양하게 나타난다. 조수로 방향에 비해 해안선 방향에서의 분급이 더 불량한 편이며 그 원인은 해안 절벽에서 공급된 다양한 크기의 역들이 섞여서 나타나기 때문으로 판단된다. 겨울과 비교하여 여름에는 분급에 차이가 거의 없으며 계절변화가 인지되지 않는다(그림 5).

동측 연안에서 하계의 왜도는 0 m를 제외하고는 양의 값을 보인다. 0 m에서의 왜도는 -1.1 Ø이며 100 m 지점에서 3.5 Ø로 높은 양의 왜도를 보이며 조수로 방향인 500 m에서 0.8 Ø로 세립 꼬리(fine tail)의 입자분포형태를 보인다. 동계에는 하계와 비교하여 전체적으로 음의 왜도가 우세한 방향으로 변화한다. 0 m 부근에서 -3.4 Ø로 가장 낮은 음의 값을 보

이며 200 m에서 2.9 Ø로 가장 높은 양의 값을 나타낸다. 500 m에서는 -0.5 Ø로 다시 조립꼬리(coarse tail)를 가지는 입자분포형태로 변한다. 서측 연안에서 왜도는 육지방향에서 음의 왜도를 보이며 조수로 방향으로 양의 왜도를 보이는 경향이 나타난다(그림 5). 하계와 동계 사이의 큰 변화는 관찰되지 않으나 비교적 하계에 음의 왜도가 나타나는 경향이 강한 것으로 나타난다. 육지방향일수록 음의 왜도의 경향을 보이는 이유는 해안 침식에 의한 조립한 역들이 조건대에 직접 공급되기 때문으로 판단된다.

5.2 표층퇴적물의 공간적 분포

모래 퇴적물은 바다방향에서 만 내부방향으로 함량이 감소하는 특징을 보이며 반대로 니질 퇴적물은 바다방향에서 만 내부방향으로, 하부 조건대에서 상

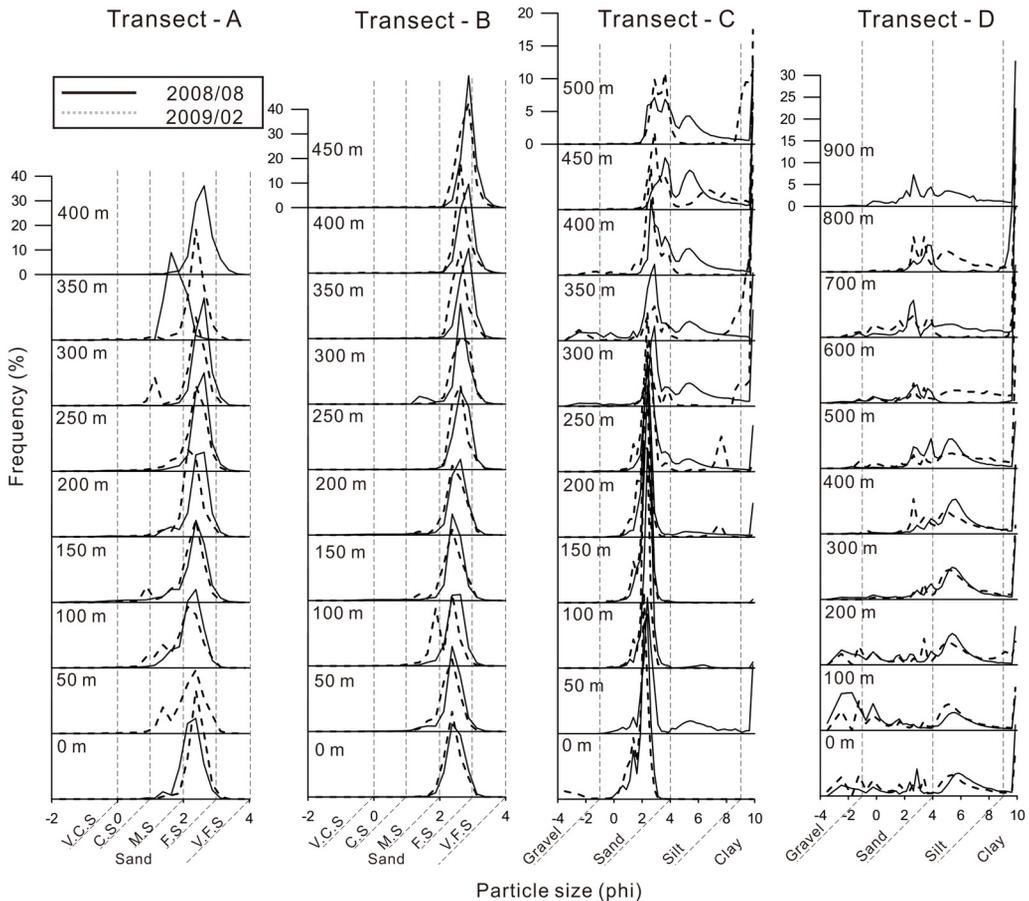


Fig. 5. Grain size frequency curves in the surface sediments obtained along the survey lines in August 2008 and February 2009. V.C.S., very coarse sand; C.S., coarse sand; M.S., medium sand; F.S., fine sand; V.F.S., very fine sand.

부 조건대 방향으로 함량이 증가하는 특징을 보인다.

표층퇴적물은 모래의 함량을 기준으로 90% 이상을 사 퇴적상(Sand facies), 90~50%를 니질사 퇴적상(muddy Sand facies), 50~10%를 사질니 퇴적상(sandy Mud facies), 10% 미만은 니 퇴적상(Mud

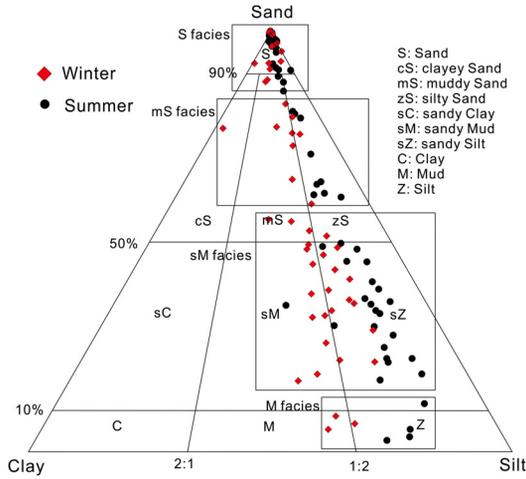


Fig. 6. Triangle diagrams for the facies classification of surface sediments based on grain size composition. The surface sediments were classified into S facies (Sand facies; sand >90%), mS facies (muddy Sand facies; sand 90~50%), sM facies (sandy Mud facies; sand 50~10%), M facies (Mud facies; sand <10%) according to the content of sand.

facies)으로 분류하였다. 또한 역(gravel)을 5% 이상 포함하는 시료는 역질니 퇴적상(gravely Mud facies)으로 분류하였다(그림 6).

사 퇴적상은 만의 입구로부터 3 km 안쪽에 북동-남서 방향으로 입구와 평행하게 발달하며 만 중앙의 주조수로(main channel)에 의해 분포가 제한되는 특징을 보인다. 니질 사 퇴적상은 만 내측의 주조수로의 오른쪽과 조수로 북쪽의 돌출된 암석해안 인근에 분포하며 주조수로가 분기되는 부분에서 분포범위가 더 이상 관찰되지 않는다. 사질 니 퇴적상은 주조수로의 왼쪽과 니질 사 퇴적상의 내측에 분포하는 특징을 보인다. 니 퇴적상은 만의 가장 안쪽에 해안선과 방조제에 가로막힌 지형 바로 앞에 발달한다. 대체로 만의 내측에서 니질 사, 사질 니, 니 퇴적상은 니 퇴적물의 함량이 높을수록 더 높은 고도에 분포한다. 퇴적물의 분포는 주조수를 중심으로 동쪽 연안에는 주로 사질 퇴적물의 함량이 더 높으며 서쪽 연안에는 니질 퇴적물의 함량이 높은 특징을 보인다. 역질 니 퇴적상은 만 내측의 서쪽 해안선 주변에 한정적으로 나타나고 있다(그림 7).

5.3 표층퇴적상 분포의 계절변화

여름에는 니 퇴적상이 방조제 주변을 중심으로 점차 확장되는 양상을 보이는 반면 겨울에는 만 입

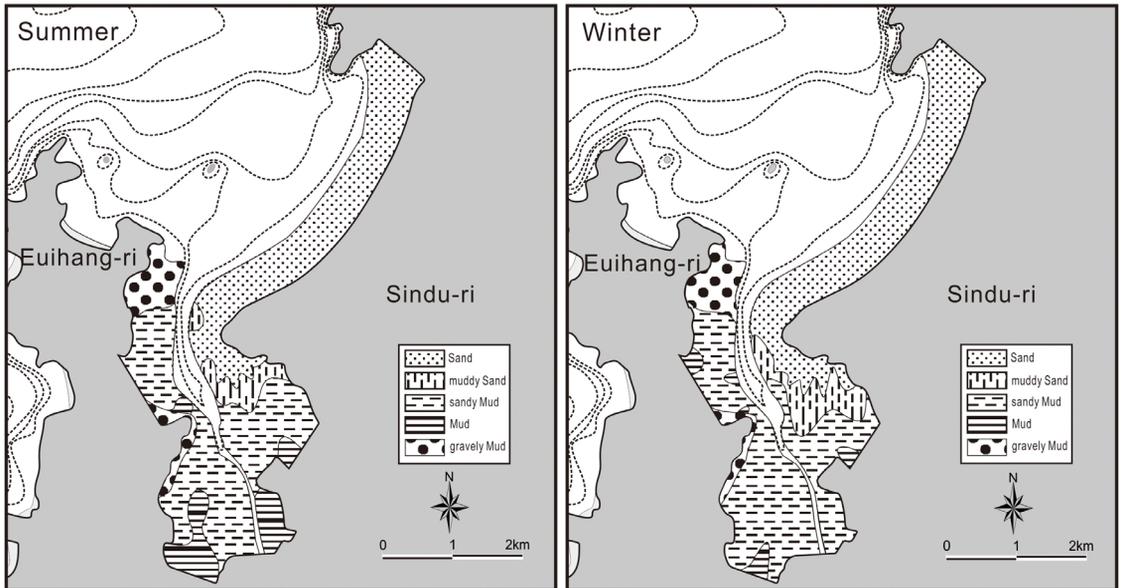


Fig. 7. Spatial distributional pattern during the summer of 2008 (left) and winter of 2009 (right) in the Sinduri intertidal zone.

구의 사 퇴적상이 내부로 확장되는 패턴이 관찰된다. 또한 겨울에 사질 니 퇴적상이 조수로를 따라 썩기형태로 전진하는 형태가 나타난다. 서쪽 만입구 연안에 제한되어 나타나는 역질 니 퇴적상에서는 계절변화가 관찰되지 않는다. 표층퇴적상의 계절변화에서 가장 뚜렷한 특징은 동계에 사 퇴적상이 만 내부로 확장되는 현상이다. 이러한 사 퇴적상의 동계 확장은 파랑에너지의 증가로 인해 조하대와 하부 조간대에서 모래 퇴적물들의 재동이 활발해지며 고조 시기에 조수에 의해 연안을 따라 만 내부로 유입되는 것으로 해석될 수 있다(그림 7).

6. 밀집퇴적물의 순이동 경향 분석(Grain Size Trend Analysis)

만 입구의 모래퇴적물을 대상으로 표층퇴적물의 순이동경향 분석 결과, 다섯 개의 경로가 확인되었다. 1) 남서쪽 조수로에서 연안을 따라 만 내로 이동하는 경로, 2) 조수로에서 해안으로 이동하는 경로, 3) 외해에서 해안선에 수직방향으로 이동하는 경로, 4) 조간대와 조수해빈에서 해안선의 수평방향인 북동방향으로 이동하는 경로와 5) 육지에서 바다방향으로 향하는 경로. 이러한 이동경로는 조수로에서 해안선으로 접근하는 경향과 해안선을 따라 측면으로

이동하여 사질 조간대의 북동쪽 끝에서 조하대 방향으로 이동하는 경향으로 크게 나누어진다(그림 8). 해안선과 평행한 방향의 측면이동은 조류를 따라 유입되는 파랑에너지에 의한 해빈이동과 유사한 퇴적물 이동으로 해석되며, 만의 북동쪽 조간대 끝에서 이동경로가 가로막히면서 지형상 낮은 지역인 조하대로 이동하는 것으로 해석된다. 조하대로 공급된 사질 퇴적물은 파랑과 조수에 의해 재동되어 만 내부로 다시 유입되거나 깊은 조하대의 수로를 따라 이동하는 것으로 판단된다. 조수로에서 해안선으로 접근하는 경향을 보이는 이동벡터는 하계에 더 강하게 나타난다. 이와 같은 사실은 해당 위치에서의 밀집 퇴적물 이동이 파랑보다는 조수에 의한 영향이 더 크다는 것을 의미한다.

7. 퇴적상 분석

7.1 퇴적상 기술 및 해석

조사측선에서 채취한 캔코어로 에폭시 필을 제작하여 퇴적구조, 입도함량비, 생교란의 정도 등을 관찰하여 총 11개의 퇴적상을 구분하였다. 퇴적상은 모래의 함량을 기준으로 70% 이상을 사(S, Sand)퇴적상, 70~30%를 사/니(S/M, Sand/Mud)퇴적상, 30% 미만은 니(M, Mud)퇴적상으로 분류하고 퇴적구조

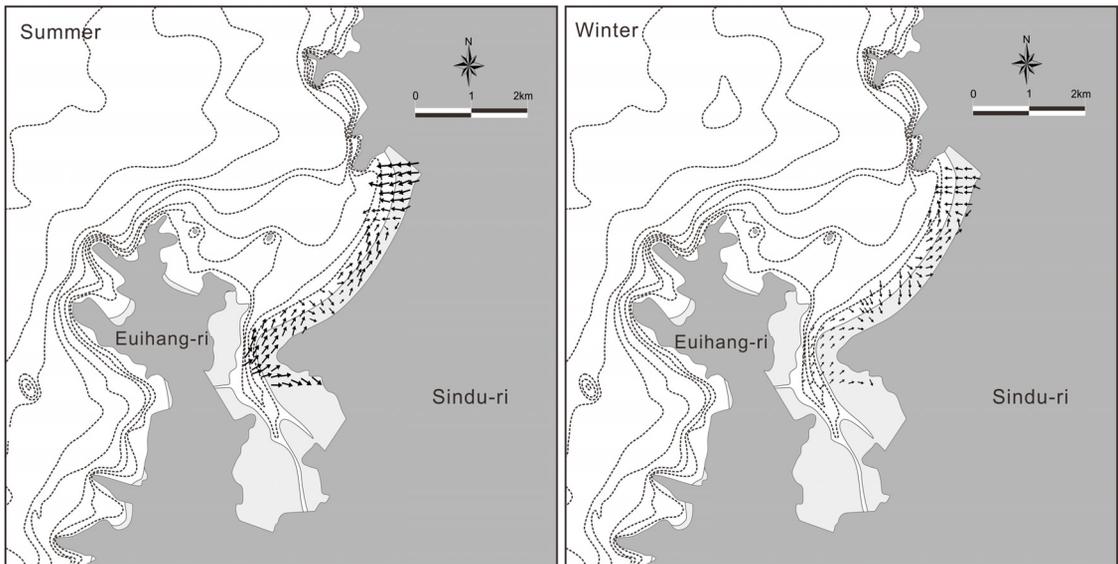


Fig. 8. Grain size trend analysis on the wave-dominated sand flat based on the surface sediments sampled in summer (left) and winter (right).

의 특성을 기준으로 세분하여 해석을 수행하였다(표 1; 그림 9).

7.1.1 파랑연흔 사층리 사 퇴적상(Facies Sw: Wave-ripple cross-laminated sand)

파랑 연흔에 의해 형성되는 사층리는 연흔의 방향과 비대칭성의 정도가 다양하며, 인접한 연흔 모양도 내부 엽층리가 매우 다양하게 나타나기 때문에 에폭시 필의 단면상에서 인지하기가 매우 어렵다. Boersma (1970)는 파동 연흔의 대표적인 특징을 다음과 같이 몇 가지를 제안한 바 있다: 반대방향으로 경사진 사엽층리(opposed unidirectional cross lamination),

세브론 형태로 맞물린 정부(chvron up-building), 분기하거나 피복하는 형태의 전면층(offshoting and draping foreset), 묶음으로 나타나는 수직퇴적 양상(bundle-wise up-building). 파랑연흔 사층리 퇴적상은 이와 같은 특징을 기준으로 주로 강한 조류에 의해 형성되는 곡형 사층리와 구분되었다. 곡형 사층리는 오목하고 비대칭인 하부 경계면과 한방향으로 off-lap 형태를 보이는 내부구조가 특징적이다. 이 지역에서는 반대방향으로 경사진 층리, 세브론 형태로 맞물린 정부 등이 잘 관찰된다(그림 9; Transect-A, B). 이 퇴적상을 보이는 퇴적층은 주로 중립-세립의 모래로 구성되며 분급이 양호하다.

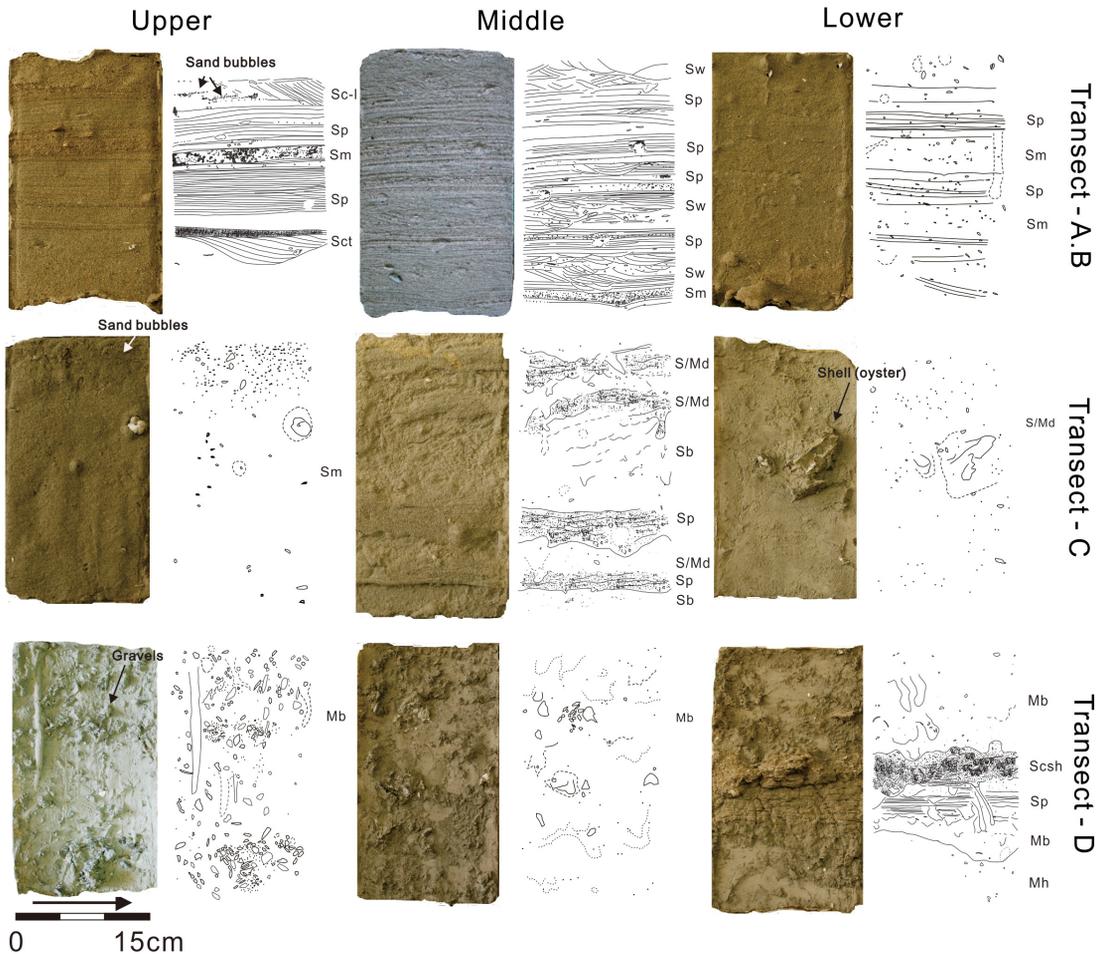


Fig. 9. Representative can-core epoxy peels and sketches of lower, middle and upper intertidal flats along the survey line A and, B, C, D. Sw, wave-ripple cross laminated sand; Scl, landward cross-laminated sand; Sp, parallel laminated sand; Sm, massive sand; Sct, trough cross-laminated sand; Sb, bioturbated sand; S/Md, disorganized sand/mud; Mb, bioturbated mud; Mh, homogeneous mud; and Scsh, shell-rich cross laminated sand.

Table 1. Classification of sedimentary facies based on the observation of can-core peels.

Facies code	Facies	Descriptions	Interpretations
Sw	wave ripple cross-laminated Sand	medium to fine sand, a longitudinal compounded ripple mark, undulated lower boundary, irregular bounding surface, bundle-wise up-building, chevron structure	oscillation motion by wave
Sm	massive Sand	medium to fine sand, poorly sorted, massive (15 ~ 25 mm thickness), burrow, parallel lamina in lower part with curved lower boundary, upper boundary is generally transitional	rapid settling due to strong wave action, strong tidal current or slumping of lower part of tidal channel
Sp	parallel-laminated Sand	coarse to fine sand, parallel lamina (> 0.5 mm) undulatory lamina of lower angle and inside erosion surface. alternating layer of slightly different grain size,	upper-flow regime, plane bed formed by storm surges
Sct	trough cross-laminated Sand	medium to fine sand, thickness > 30 mm, cross laminated beds with concave downlap on asymmetric curved bounding surfaces,	migration of 3D current ripple
Sb	bioturbated Sand	fine sand, lack of primary sedimentary structures, deformed or laminae are curved and shifted by biogenic activities, thickness is very variable (20 ~ 250 mm)	low energy condition on the sand flat
Sc-l	landward cross-bedded Sand	cross-bedded coarse to medium sand, size-sorted, normal graded, thickness > 50 mm	migration of swash bar
Sesh	shell-rich cross bedded Sand	low angle cross-stratified medium to fine sand, size-sorted, consist of granule to sandy size shell fragments, imbricated and concave-up	storm bed
S/Mb	bioturbated Sand/Mud	poorly sorted, muddy sand and sandy mud, rarely with shell fragments, burrows and biogenic escape structures are abundant. primary structures are deformed	intense bioturbation on the mixed flat after deposition or on distal back-barrier deposit by overwash
S/Md	disorganized Sand/Mud	disorganized, poorly sorted sand and muddy sediment, irregular bounding surface, absence of visible unit contacts	rapid deposition on proximal back-barrier area by overwash process (very high tide or weak storms)
Mb	bioturbated Mud	mud layer including abundant burrows. very fine and thin parallel lamination	suspension settling under low suspended sediment supply or in the very calm inner upper tidal flat
Mh	homogeneous Mud	diffused mixture of unsorted mud, including abundant burrow without developed primary structure	rapid settling of suspended mud or intense bioturbation under low suspended sediment supply

7.1.2 괴상의 사 퇴적상(Facies Sm: Massive sand)

괴상의 사 퇴적상은 주로 중립-세립의 모래로 구성되어 있으며 분급이 불량하고 1차 퇴적구조의 발달이 미약하거나 뚜렷한 퇴적구조가 관찰되지 않는 퇴적상이다. 모래의 함량은 90% 이상이며 니질은 매우 함량이 낮다. 부분적으로 파쇄된 조개 껍질 및 생교란 구조를 포함하고 있다. 조간대나 조하대에서 괴

상의 모래 퇴적층은 주로 강한 파랑이나 폭풍 또는 강한 조류나 조수로 하부층이 붕괴되어 모래퇴적물이 급격히 퇴적되어 형성된다(Reineck and Singh, 1980). 이 퇴적상의 하부와 상부에는 주로 평행엽층리 사 퇴적상이 관찰되며 경계면이 뚜렷한 특징을 보인다. 불규칙하거나 파형을 보이는 경계면이나 붕괴에 의한 퇴적체가 관찰되지 않기 때문에, 이 지역

에서는 강한 파랑에너지에 의해 급격하게 퇴적되어 형성된 것으로 해석된다(그림 9).

7.1.3 평행엽층리 사 퇴적상(Facies Sp: Parallel-laminated sand)

이 퇴적상은 주로 조립-중립의 모래로 구성되어 있으며 층리면과 평행하거나 매우 낮은 각도의 경사를 보이는 것이 특징적이다. 층리면의 두께는 점진적으로 두꺼워지거나 얇아지는 경향성을 보이기도 하나 뚜렷한 묶음형태(bundle)는 관찰되지 않는다. 평행한 층리는 일반적으로 상부유권(upper-flow regime)에 해당하는 흐름의 조건에서 형성되는 것으로 알려져 있다(Allen and Friend, 1976). 조간대 환경에서 이런 조건은 사질 조간대와 규모가 큰 사구(sand bar), 수로(channel) 등에서 조류 또는 강한 폭풍 등에 기인한 난류에 의해 만들어질 수 있다(Dalrymple *et al.*, 1978). 연구지역처럼 파랑이 우세한 연안에서는 강한 폭풍에 의한 파랑의 작용에 의해 쉽게 형성될 수 있다. 특히 동계에 자주 발생하는 강한 폭풍에 기인한 것으로 해석된다.

7.1.4 곡형 사엽층리 사 퇴적상(Facies Sct: Trough cross-laminated sand)

이 퇴적상은 중립-세립의 모래로 구성되어 있으며, 분급이 양호하고 모래의 함량이 90% 이상이다. 주로 오목하고 비대칭인 하부 경계면과 내부구조는 Off-lap의 형태를 보이며 불규칙하게 중첩되어 나타난다. 곡형 사층리는 일반적으로 3-D 연흔의 이동에 의해 형성되는 것으로 알려져 있다. 연구지역에서는 육지방향으로 경사진 2-D사구의 골(trough) 부분에 3-D 연흔이 주로 발달한다. 사구의 골에 퇴적되어 있는 퇴적층은 파랑우세 퇴적환경임에도 비교적 보존이 잘 되므로 대부분의 이 퇴적상은 사구의 이동과 관련되어 해석될 수 있다.

7.1.5 생교란 사 퇴적상(Facies Sb: Bioturbated sand)

이 퇴적상은 세립 모래로 구성되어 있으며 분급이 매우 양호하다. 대부분의 1차 퇴적구조는 생물활동에 의해 휘어지거나 변형되어 있다. 저서 생물의 활동에 의한 작은 구멍들과 생물학적 도피 구조가 풍부하다. 작은 구멍은 동질의 퇴적물로 충전되어 있으나 주변 퇴적물과의 색과 질감이 다르다. 강한 생물

학적인 교란은 저에너지 상태의 모래 조간대(sand-flat) 또는 해변에서 저서 생물에 의해 유발된 것으로 해석된다. 작은 구멍들과 도피구조 등은 주거와 섭식 활동을 통해 만들어진 것이다(Frey *et al.*, 1989).

7.1.6 육진 사층리 사 퇴적상(Facies Scl: Landward cross-bedded sand)

이 퇴적상은 조립-중립 모래로 구성되어 있으며 분급이 양호하다. 내부구조는 상향세립의 점이적인 변화가 인지되며 층리면과 경사진 형태를 보인다. 층의 최하부에는 조립 모래와 패각이 집중되어 분포하며 생교란의 흔적은 거의 관찰되지 않는다. 조간대에서 사층리는 주로 사구의 이동에 의해 형성되는 것으로 알려져 있다. 이 퇴적상은 육지방향으로 이동하는 사층리를 보이므로 표층퇴적층에서 자주 관찰되는 스위시바(swash bar)의 후면부(lee side)에서 만들어진 퇴적상으로 해석된다.

7.1.7 패각편이 풍부한 사층리 사 퇴적상(Facies Scsh: Shell-rich cross bedded sand)

이 퇴적상은 조립-세립의 모래와 역, 그리고 다량의 패각을 포함하고 있으며 분급이 매우 불량하다. 패각은 모두 파편화되어 있으며 종류가 다양하다. 패각 및 역의 방향성이 존재하며 상향 세립화의 경향을 보인다. 패각과 기질의 모래들은 치밀하게 쌓여있다. 하부의 니 퇴적상과 뚜렷한 경계를 보이며 경계면은 편평한 경향을 보인다. 이와 같은 특징은 사건(event) 퇴적작용에 의해 빠르게 퇴적되었음을 지시한다.

7.1.8 생교란 사/니 퇴적상(Facies S/Mb: Bioturbated sand/mud)

이 퇴적상은 1차 퇴적구조의 발달이 미약하며 분급이 불량한 사질 니 또는 니질 사 퇴적상을 포함한다. 이 퇴적상은 부분적으로 패각 및 머드볼(mud ball) 등을 포함하기도 하며 생물교란의 흔적이 풍부하다. 대부분의 1차 퇴적구조는 저서생물의 활동에 의해 구부러지거나 변형되어 있으며 때때로 이질의 퇴적물로 충전되어 있다. 이 퇴적상은 부유상태로 이동된 니질 퇴적물이 퇴적된 후, 강한 생물활동에 의해 만들어지는 것으로 해석된다. 빈번한 생물활동의 흔적과 구조의 보존은 매우 낮은 퇴적물의 공급과 비교적 안정적인 환경이 지속되어야 가능하다.

7.1.9 무질서 사/니 퇴적상(Facies S/Mt: Disorganized sand/mud)

이 퇴적상은 조립-세립의 모래와 실트, 점토 등을 다양하게 포함하고 있으며, 6:4 정도로 모래의 함량이 우세하다. 다양한 입도의 퇴적물들은 조적이 파괴되어 있으며 분급이 불량하고 내부구조의 발달이 미약하다. 하부의 경계는 불규칙하거나 물결형태를 보이며 머드볼(mudball)을 포함하기도 한다. 측선 C의 250 m 지점에서 채취한 코어에서 주로 관찰되는 퇴적상으로 하부에는 교호하는 층리를 보이는 모래/니 퇴적상과 생교란된 니 퇴적상이 주로 발달한다. 이 퇴적상은 고조 시기에 파랑과 조류에 의해 전면의 파랑우세 사질 조간대에서 모래 퇴적물이 만의 내부 니질 조간대로 간헐적으로 쓸어넘김(washover)에 의해 이동되어 퇴적된 것으로 해석된다. 이와 같은 퇴적상은 표층퇴적물에서는 사질 조간대와 니질 조간대가 서로 계절적으로 분포양상을 바꾸는 전이대에서 관찰된다.

7.1.10 생교란 니 퇴적상(Facies Mb: Bioturbated mud)

이 퇴적상은 풍부한 굴진구조(burrow)와 1차 퇴적구조의 발달이 미약한 니질 퇴적층으로 구성되어 있다. 니질의 퇴적층은 저서 생물의 생물학적 활동들에 의한 생흔구조로 교란되어 있으며, 생흔구조는 층리를 가로지르며 발달한다. 생물활동에 의해 만들어진 굴진구조들은 모래, 패각 등의 다른 퇴적물에 의해 충전되어 나타나기도 한다. 이 퇴적상은 부유 상태로 이동된 니질 퇴적물이 퇴적된 후, 활발한 생물활동에 의해 만들어지는 것으로 해석된다. 활발한 생물활동의 흔적과 구조의 보존은 퇴적물 비교적 안정적인 환경이 지속되면서 나타나는 것으로 해석된다.

7.1.11 균질한 니 퇴적상(Facies Mh: Homogeneous mud)

이 퇴적상은 1차 퇴적구조의 발달이 미약하며 풍부한 생물교란의 흔적과 입도의 점이적 또는 역점이적 변화가 인지되지 않는 혼합물과 같은 형태를 보인다. 육안으로 구별이 가능한 입자는 10% 미만으로 거의 관찰되지 않는다. 이 퇴적상은 매우 강한 생물활동에 의해 만들어지거나 급격한 퇴적 또는 인위적인 변형 등에 의해 만들어진다.

7.2 대표적인 퇴적상의 공간적 분포

조수해빈에서 관찰되는 주요 수직퇴적상은 평행한 엽층리(parallel lamination)를 보이는 사질 퇴적상(Sp)이 가장 우세하며, 육지방향으로 이동하고 있는 육진 사층리(Scl)와 괴상구조를 가지는 사 퇴적상(Sm)이 함께 분포한다. 북측의 신두리 조간대 상부에 분포하는 조수해빈은 하계에는 완만한 경사를 이루면서 육지방향으로 후퇴하고 동계에는 급한 경사를 보이면서 바다방향으로 전진하는 양상을 보였다. 퇴적물의 해빈 표류 이동과 스위시바의 이동에 의해 형성되는 평행한 엽층리(Sp)와 강한 폭풍파랑에 의해 형성된 괴상(Sm) 퇴적상이 조수해빈의 대표적인 퇴적상의 분포양상이라고 할 수 있다(그림 9, 10).

조수해빈 하부의 사질 조간대에는 평행한 엽층리(parallel lamination)를 보이는 사질 퇴적상(Sp)이 가장 우세하며 부분적으로 파랑연흔 사층리(Sw), 육진 사층리(Scl), 곡형 사엽층리(Sct) 구조를 가지는 사 퇴적상이 부분적으로 나타난다(그림 9). 이들은 스위시바의 이동과 중첩에 의해 각각 바의 전면부(stoss side), 정부(crest), 후면부(lee side, trough)에서 형성되는 퇴적구조들이 수직적으로 누적되는 것으로 해석된다. 사질 조간대에서는 저조선(low tide level)에 가까워질수록 구성하는 모래의 입도는 약간 세립해지며, 조간대 생물활동에 의한 생교란이 심해지면서 1차 퇴적구조가 파괴되어 관찰되지 않는 특성을 보인다.

조수로 동쪽의 상부는 급한 경사를 보이며 대부분이 사질 퇴적물로 구성되어 있고 하부는 거의 평탄한 경사를 보이며 니질 퇴적물이 우세함으로써 두 지형 단위가 확연한 차이를 보이고 있다. 모래 퇴적물이 우세한 상부에는 고조선(high tide level) 근처에서 소규모의 연흔이 표층에서 관찰되지만 수직퇴적구조에서는 사층리나 연흔 등의 퇴적 구조는 관찰되지 않는다. 모래 퇴적상들은 구조가 분명치 않으며 괴상의 구조를 보인다. 모래 퇴적상과 니질 퇴적상은 경계가 분명하게 나타나며 니질 퇴적상 위의 모래 퇴적상은 파형의 경계를 보인다(그림 9). 파형의 경계 위의 모래 퇴적상은 니질과 모래의 혼합된 상태로 관찰되는데, 폭풍이나 고조 시에 강한 파랑에 의해 전면의 사취 또는 조수해빈을 넘어 쓸어넘김(overwash)으로 공급되는 사질 퇴적물이 조수에 의해 이동되면서 만들어진 퇴적구조로 해석된다.

만 내측은 주로 패각을 포함하는 생교란된 니퇴적

상(Mb)이 우세하게 관찰되며 육지 부근에서는 생교란된 니 퇴적상에 각진 거력 크기의 역들이 포함된 퇴적상이 특징적으로 관찰된다. 생교란과 패각의 함량은 조간대의 상부(upper intertidal flat)로 갈수록 매우 높게 나타나며 하부 조간대(lower intertidal flat)에서는 생교란과 패각이 적어 균질한 니(homogeneous mud)가 관찰된다. 생교란이 심하나 원형의 형태가 보존된 상태의 패각들이 포함되는 것은 만 내부의 조간대가 비교적 안정된 환경이었음을 시사한다. 가장 하부인 900 m 지점의 인근에서는 균질한 니 퇴적상(Mh)

사이로 평행한 엽층리 모래 퇴적상(Sp)과 사층리 퇴적상 상부에 패각을 포함하는 사 퇴적상(Scsh)이 부분적으로 관찰된다(그림 9). 이들 조립질 입자를 포함하는 퇴적상은 주조수로에서 분기된 조수로들의 이동 및 유기로 인해 조수로의 끝에서는 조립된 퇴적상이 그 이후 니 퇴적물의 집적이 이루어짐에 따라 형성되었을 것이다. 조간대의 상부에 비하여 조수로 인근에는 비교적 조립질 퇴적물의 공급이 이루어지나 조수로가 이동한 이후에는 세립질 퇴적물이 공급되면서 균질한 니 퇴적상(Mh)이 누적되었을 것

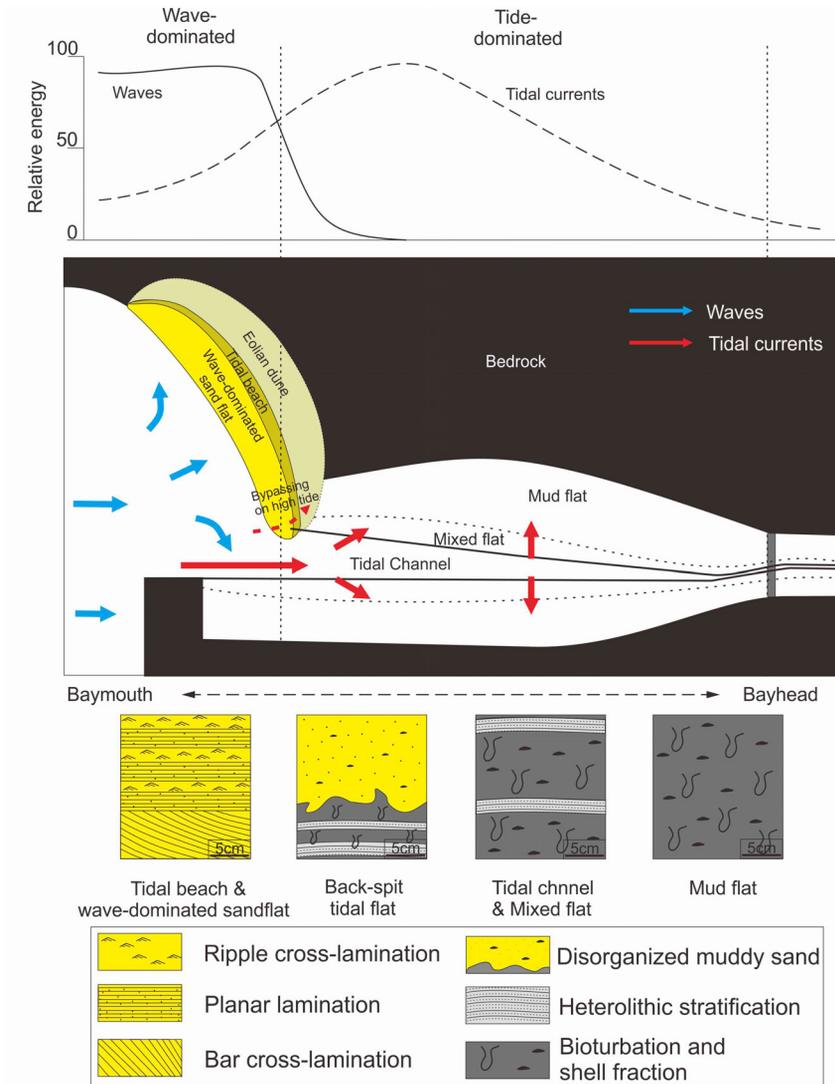


Fig. 10. Conceptual and schematic diagrams showing the distribution of sedimentary facies and environments, dominant depositional processes, and occurrence and preservation of sedimentary structures formed in the Sinduri Bay.

으로 해석된다.

8. 토 의

신두리 만의 지형은 현재 북서방향으로 개방된 입구와 육지방향으로 갈수록 좁아지는 깔대기 형태의 지형을 가지고 있다. 이 지형은 홀로세 이전 형성된 하곡(river valley)들이 여러 갈래로 뺏어와 하나로 합쳐지는 형태로 발달하였을 것으로 판단된다. 현재 다수의 방조제로 인한 해안선의 단순화는 만 내에서의 조류순환에도 영향을 미쳤을 것으로 생각된다. 현재 신두리 만은 개방된 입구와 해안선에 평행한 방향으로 형성되어 있는 조수해빈, 파랑우세 사질조간대와 다수의 방조제와 암석해안으로 이루어져 있다. 만 내측의 만입형 조간대는 조수해빈이 전면을 막고 있어 좁은 입구를 가진 항아리 형태의 니질 조간대 환경이 형성되어 있으므로 이 두 개의 환경이 매우 상이한 퇴적작용을 경험하고 있다. 퇴적환경 내에서의 다양한 퇴적물 집단의 구성은 퇴적물의 이동 양상 및 퇴적작용과 관련되기 때문에 이들 집단의 구분을 통해 퇴적작용에 관한 정보를 유추할 수 있다(Bartholoma and Flemming, 2007). 신두리 만의 표층퇴적물 분포 양상은 두 개의 상이한 퇴적물 집단이 존재함을 명확히 보여준다. 주로 조립-중립 모래(1.0~2.0 Ø)의 집단과 중립 실트(5~6 Ø)의 집단이 관찰되며 이들 집단의 분포가 공간적으로 분리되어 나타남을 볼 수 있다(그림 5). 조립-중립 모래의 집단은 주로 사질 조간대에서 나타나며 분급이 매우 양호하고 분산되지 않은 형태를 보인다. 이런 분포 특징은 파랑의 지속적인 씻김작용의 결과로 해석된다. 반면에 중립 실트의 집단은 사질 조간대에서는 나타나지 않으며 만 내부에서만 관찰된다. 중립 실트의 집단은 하부 조간대에서 상부 조간대 방향으로 함량이 점차 줄어드는 특성이 뚜렷한데 이것은 퇴적물의 공급 및 이동이 조류의 승강운동에 의해 발생하고 있음을 의미한다.

해빈(beach)환경은 주로 파랑에 의해 형성되는 환경으로 알려져 있으나 최근 연구에 따르면 파랑과 조석의 상대적 에너지 크기에 따라 다양한 형태의 해빈 환경이 발달할 수 있음이 시사된 바 있다(Masselink and Short, 1993). 한반도의 서해안은 대부분의 연안이 대조차 환경임에도 해빈이 다수 발달하고 있으며 계절적인 파랑에너지의 변화가 퇴적작용의 변화

에도 큰 영향을 주고 있다. 이 연구지역의 개방형 연안의 퇴적물은 주로 중립-세립사로 구성되어 있으며 분급이 매우 양호하고 바다방향으로 약간 세립해지는 경향을 보인다. 계절에 따른 입도와 분급의 변화는 뚜렷하지 않다. 이와 같은 특징은 태안 만리포 해빈(Chu *et al.*, 1996)에서 조사한 결과와 유사한 특징을 보인다. 몽산포 해빈(Oh and Kum, 1998), 인천을왕리 해빈(Oh and Kum, 2001)에서는 겨울에 비해 파랑의 세기가 약해지는 여름철에 평균 입도가 세립화되고 분급도가 불량해지는 경향이 나타난다고 하였으며 해빈에서의 공간적 입도 분포가 변화하는 특성을 제시한 바 있다. 만 입구의 표층에는 육지 방향으로 급한 경사를 보이는 3~4개의 2-D사구(스위시바)가 중첩되어 발달하며 겨울철에는 기복이 줄어들면서 전체적으로 표면에 파랑 연흔이 발달하는 변화를 보인다. 다수의 사구가 중첩되어 나타나는 지형은 파랑에너지에 비해 조류에너지가 큰 해빈에서 특징적으로 나타난다고 알려져 있으며(Masselink and short, 1993), 겨울철에 고에너지 환경으로 변화하면서 나타나는 현상으로 볼 수 있다. 결과적으로 여름철에 형성되었던 조간대 지형과 표층퇴적물의 특성에서 인지될 수 있는 조류의 영향이 퇴적구조 및 퇴적물에 보존되지 않으므로 이러한 환경은 조류의 영향이 크더라도 파랑의 영향을 크게 받는 조건의 기록만을 보존하게 될 것이다(그림 10).

만 내부의 환경은 중앙의 주조수로를 중심으로 만조선 방향으로 세립해지는 특징을 보이며 완만한 경사와 사행하는 조류 세곡으로 특징지어지는 전형적인 니질 조간대에 해당된다. 표층퇴적물은 모래와 역의 함량이 40% 미만이며 니의 함량이 높은 곳은 80% 이상이다. 조수로의 주변에서 겨울에 조립질 퇴적물의 함량이 증가하는 경향을 제외하면 전체 조간대의 특징은 큰 변화가 없어 계절에 따른 에너지 변화가 미치는 영향은 미미한 것으로 보인다. 한반도 서해안에는 지리적 위치와 기반암의 특성 등에 의해 다양한 지형적 특성을 보이는 만입환경들이 발달한다. 기존 연구에 따르면 한반도 서해안에 발달하는 만입환경에서의 계절에 따른 표층퇴적물의 변화양상을 보고한 바 있다. 남양만(Wells *et al.*, 1990)과 गो소만(Chang and Choi, 1998)은 만입지형에 형성된 조간대이지만 입구가 넓고 개방되어 있으며 전면에 보호섬(barrier island)이 존재하지 않아 겨울철 입구 부분의 조립화

가 두드러진다. 두우리 조간대(Baek and Chun, 2004), 백수 조간대(Chun and Yang, 2004; Yang *et al.*, 2005) 등 개방형 조간대(open-coast tidal flat)로 알려진 환경들도 겨울철 표층퇴적물의 조립화 현상이 뚜렷하다. 함평만에서 보고된 표층퇴적물의 계절 변화는 입구 근처의 조수로 측면에서의 변화보다는 조수로의 끝 부분인 만의 가장 내측에서 겨울 시기에 침식 작용이 우세해지며 표층퇴적물은 조립해지는 특성을 보였다(Ryu, 2003). 이와 반대로 가로림만의 표층퇴적물은 겨울 시기에 입구부분에서만 조립해지는 경향이 나타날 뿐 만 내부에서는 계절 변화가 인지되지 않는 것으로 보고되었다(Song *et al.*, 1983). 서해안에 발달하는 만입환경들은 개방된 입구의 위치와 형태, 내부의 만의 형태에 따라 다양한 퇴적 현상을 보이고 있으며 연구 지역의 만 내부의 니질 조간대는 퇴적물의 유출입이 원활하지 않은 반 폐쇄형 조간대와 유사한 특성을 보인다. 넓은 입구에 비해 만 내부가 좁은 특성을 보이지만 입구와 평행하게 발달하는 사질 조간대 및 조수해빈과 배후의 풍성 사구가 상대적으로 높은 고도를 형성하면서 만의 중앙 부분으로의 파랑의 유입을 가로막고 있다. 따라서 배후의 조간대는 계절에 관계없이 파랑이나 태풍과 같은 고에너지 환경에 노출되는 빈도가 매우 낮으며 대부분의 퇴적작용이 조류작용에 의해 발생하는 것으로 해석된다(그림 10). 이와 같은 특성에 더하여 높은 생물 활동량과 그 흔적이 내부 구조에 그대로 반영되어 나타나는 것은 퇴적물이 매우 낮은 환경이 상당 기간 지속되어온 안정된 환경임을 지시한다.

신두리 만에서의 밀집 퇴적물의 이동 경향을 파악하기 위하여 퇴적물의 입도조직변수(평균입도, 분급, 왜도 등)를 이용하여 퇴적물의 이동 경향을 추정하는 방법(Gao and Collins, 1992)을 이용하였다. 이 방법은 퇴적물의 이동과 공급 기작이 다양하고 복잡한 지역에 적용하기에는 무리가 있지만 퇴적물의 입도가 조립하고 해수의 운동이 비교적 단순한 지역에서 이동방향을 추정하는데 유용한 방법으로 알려져 있다. 또한 사질과 니질 퇴적물의 운반 양상이 상이하므로 뜬짐으로 이동하는 니질 퇴적물의 경우 입도조직변수의 공간적 분포양상으로 이동을 파악하기에는 무리가 있다. 신두리 만의 사질 조간대와 조수해빈의 퇴적환경은 구성하고 있는 퇴적물의 입도가 조립하고 퇴적물 유입원과 해수 운동이 비교적 단순하여 이

방법을 적용하기에 적합하다. 분석 결과는 지형 특성과 퇴적 역학상 분석에서 확인된 결과와 비교적 일치하는 것으로 생각된다. 만 입구의 호상의 해안선은 파랑의 작용이 우세한 것으로 해석되는데, 퇴적물이 해안선과 평행한 방향으로 이동하고 있음을 보여주며 호상의 중심부근에서 육지방향으로의 이동성이 강하게 나타나 지형 특성과의 일치한다. 조수로 인근에서는 조수로에서 해안선 방향으로의 이동성이 큰 것으로 나타나 퇴적물의 이동이 조수의 승강 운동에 의해 발생하고 있음을 뒷받침한다. 그러나, 겨울철에 퇴적물의 재동이 활발해지면서 만 내부로의 이동성이 강화될 것으로 예상된 결과와 달리 여름철과의 차이점이 나타나지 않으며 오히려 이동 벡터의 크기가 줄어든 결과를 보여준다. 이 결과는 겨울철에 강한 파랑에너지에 의해 침식이 우세한 환경으로 변화하면서 입도조직변수의 입력 값은 잔류퇴적물의 특성이 반영된 것으로 판단되며, 이와 같이 침식우세 환경에서는 퇴적물 이동 경향분석 결과를 활용함에 있어 기타 자료와의 검증이 필요한 것으로 생각된다.

최근 서해 연안에서의 연구에 따르면 해빈-사구 환경의 전면에 니질 또는 사질 조간대가 발달하는 환경에 대해 보고된 바 있다(Chang *et al.*, 2016). 층서적으로 현생 조간대 퇴적층 위에 해빈-사구 시스템이 놓여있는 것으로 알려져 있으며 상부의 해빈-사구 퇴적층의 형성 시기는 약 4,000년 이전부터 형성된 것으로 보고되었다. 이와 같은 연구결과는 해수면이 상승하는 동안 대조차 환경 하에서 조간대의 발달이 현저했으나 약 4,000년 전 이래로 해안선 부근에 파랑이 우세한 퇴적환경이 발달하기 시작했음을 시사한다. 따라서, 두 개의 소환경(sub-environments) 간의 층서적 관계와 형성 시기에 관한 연구는 한반도 서해안의 현생 퇴적 환경과 퇴적 역사를 이해하는 데 있어서 중요한 자료가 될 것이다.

9. 결 론

한반도 서해안의 태안반도에 위치하는 신두리 만은 황해에 개방되어 있으며 입구가 넓은 깔대기 형태의 만입지형이다. 신두리 만의 표층퇴적물의 분포는 입구에서 만 내부로 점차 세립해지는 특징을 보여 전형적인 서해안 조간대의 분포처럼 보이지만, 지형단면, 표층퇴적물의 특성, 퇴적역학상의 특성에 의

하면 파랑우세와 조석우세의 퇴적환경이 좁은 공간에 공존하며 서로 전혀 다른 퇴적작용을 받고 있다. 만의 입구에는 해안선과 평행한 방향으로 약간 휘어진 호상의 형태를 보이는 지형과 분급이 매우 양호한 중립 모래로 구성된 파랑우세 환경이 발달하며 만의 내부에는 비교적 평탄한 지형과 조류 세곡이 발달하며 니질 퇴적물로 구성된 조간대가 발달한다. 표층퇴적물의 이동 경향은 이들 프로세스에 의한 퇴적작용에 의해 밀집 퇴적물들이 운반되고 있음을 강력히 뒷받침하고 있다. 표층퇴적물의 분포에서 관찰되는 겨울 시기의 모래퇴적물의 만 내부로의 유입은 파랑에너지의 증가에 의해 재동된 퇴적물이 조수에 의해 이동되는 것으로 해석된다.

신두리만은 외측의 개방형 파랑우세 사질 조간대와 내측의 조류우세 니질 조간대의 분포가 급격하게 변하는 양상을 보인다. 또한 계절변화의 전이대가 매우 좁고 제한적인 위치에서만 나타나는 특성을 보인다. 하나의 좁은 지형단위 내에서 파랑우세 연안퇴적환경(사질 조간대와 조수해빈)과 조류우세 연안퇴적환경(니질 조간대)이 인접하여 나타나는 퇴적학적 특성을 가진다. 한 지형단위 내에 표층퇴적상, 지형특성과 수직퇴적상이 매우 상이한 소퇴적환경이 동시에 존재하는 것은 대조차 개방형 연안퇴적환경의 특성에 기인하는 것으로 해석된다. 또한 지형적 특성, 부유퇴적물 공급과 퇴적역학적 특성이 복합적으로 작용한 결과라고 할 수 있다. 이와 같이 표층 및 천부에 발달하는 퇴적상이 수평적으로 급격하게 변하는 퇴적층에 대한 이해는 고기연안퇴적층을 연구하는데 대단히 중요한 자료로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2008년과 2009년에 조사된 1차 조사자료에 2018년 추가적인 연구를 수행한 결과이다. 이 논문은 해양수산부의 지원으로 수행된 “관할해역 해양지질 및 지구조 연구”의 일부인 “남해 제4기 퇴적층서 연구(19-9856)”의 일부 지원을 받았다. 2007년 12월 태안 해안에서 발생한 삼성-허베이스프리트호 기름 유출사고에 의해 조간대 퇴적층에서는 어떤 영향이 있는가에 대한 고민으로부터 출발하였으나 기름유출에 대한 연구가 아닌 순수한 퇴적학적 연구결

과만을 담았다. 현장조사와 실험실 연구에 큰 도움을 준 전남대학교 퇴적환경연구실의 김종관, 장대건, 임재근, 홍석휘와 이은지에게 감사의 마음을 표한다. 논문의 심사를 맡아 유익한 조언을 해주신 익명의 심사위원님들께 진심으로 감사드립니다.

REFERENCES

- Allen, J.R.L. and Friend, P.F., 1976, Changes in intertidal dunes during two spring-neap cycles, Lifeboat Station Bank, Wells next the Sea, Norfolk (England). *Sedimentology*, 23, 329-346.
- Baek, Y.S. and Chun, S.S., 2004, Depositional characteristics and seasonal change of surface sediment and sedimentary structure on the Doowoori tidal flat, Southwestern coast of Korea. *Korean Journal of Petroleum Geology*, 10, 10-17 (in Korean with English abstract).
- Bartholoma, A. and Flemming, B.W., 2007, Progressive grain-size sorting along an intertidal energy gradient. *Sedimentary Geology*, 202, 464-472.
- Boersma, J.R., 1970, Distinguishing features of wave-ripple cross-stratification and morphology. Ph.D. thesis, University of Utrecht, Netherlands, 65 pp.
- Boyd, R., Dalrymple, R.W. and Zaitlin, B.A., 1992, Classification of clastic coastal depositional environment. *Sedimentary Geology*, 80, 139-150.
- Boyd, R., Dalrymple, R.W. and Zaitlin, B.A., 2006, Estuarine and incised-valley facies models. in *Facies models revisited* (eds.) Posamentier, H.W. and Walker, R.G., SEPM Special publication, 84, 171-235.
- Chang, J.H. and Choi, J.Y., 1998, Seasonal accumulation pattern and preservation potential of tidal-flat sediments: Gomsu Bay, west coast of Korea. *The Sea, Journal of the Korean Society of Oceanography*, 3, 149-157 (in Korean with English abstract).
- Chang, J.H., Kim, Y.S. and Cho, Y.G., 1999, Tidal-flat sedimentation in a semi-enclosed bay with erosional shorelines: Hampyung Bay, West Coast of Korea. *The Sea, Journal of the Korean Society of Oceanography*, 4, 117-126 (in Korean with English abstract).
- Chang, T.S., Ha, H.J. and Hong, S.H., 2016, Mud deposition on a macrotidal beach: Dasari coastal dune, west coast of Korea. *Journal of Coastal Research*, 75 (sp1), 1312-1316.
- Chu, Y.S., Kweon, S.J., Bahk, J.J. and Park, Y.A., 1996, Seasonal variations of beach sedimentation in the middle-western coast of Korea. *Ocean Research*, 18, 37-45 (in Korean with English abstract).
- Chun, S.S., Lee, H.J., Shin, D.H., Yoo, H.R. and Han, S.J.,

- 1992, Sedimentological implications of vertical and lateral facies changes in the modern, non-barred macrotidal flats of the west coast of Korea. 3rd international research symposium Tidal Clastics 92, Willhelmshaven, Germany. Cour, Forsch., -Inst. Senckenberg, 151, 16-18.
- Chun, S.S. and Yang, B.C., 2004, Sedimentation and Holocene evolution of wave-dominated, macrotidal-flat depositional system in the southwestern open coasts of Korean Peninsula. *Journal of the Sedimentological Society of Japan*, 58, 65-83.
- Dalrymple, R.W., Knight, R.J. and Lambiase, J.J., 1978, Bedforms and their hydraulic stability relationships in a tidal environment, Bay of Fundy, Canada. *Nature*, 275, 100-104.
- Davies, Jr.R.A., 1985, Coastal Sedimentary Environments, Second Edition. New York, Springer-Verlag, 716 p.
- Fan, D., 2013, Classifications, Sedimentary features and facies associations of tidal flats. *Journal of Palaeogeography*, 2, 66-80.
- Flemming, B.W., 2005, Tidal environments. In: Schwartz, M.L. (eds.) *Encyclopedia of Coastal Science*. Encyclopedias of Earth Science Series. Springer, Dordrecht, 1180-1185.
- Flemming, B.W., 2012, Siliciclastic back-barrier tidal flats. In: Davis, Jr.R., Dalrymple, R.W. (eds.) *Principles of tidal sedimentology*, Springer, Dordrecht, 231-267.
- Frey, R.W., Howard, J.D., Han, S.J. and Park, B.K., 1989, Sediments and sedimentary sequences on a modern macrotidal flat, Inchon, Korea. *Journal of Sedimentary Petrology*, 59, 28-44.
- Gao, S. and Collins, M., 1992, Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors". *Sedimentary Geology*, 81, 47-60.
- Harris, P.T., Heap, A.D., Bryce, S.M., Porter-Smith, R., Ryan, D.A. and Heggie, D.T., 2002, Classification of Australian clastic coastal depositional environments based upon a quantifiable analysis of wave, tidal, and river power. *Journal of Sedimentary Research*, 72, 858-870.
- Hong, S.C., Kim, J.W. and Choi, J.H., 2010, Mid-to Late Holocene progradational pattern of Shinduri dunefield: Implications for sea level and climatic changes in the western coast of Korea. *Journal of the Geomorphological Association*, 17, 87-98 (in Korean with English abstract).
- Hong, S.H., Chun, S.S., Chang, T.S. and Jang, D.G., 2017, Contrasting sedimentation patterns in two semi-enclosed mesotidal bays along the west and south coasts of Korea controlled by their orientation to the regional monsoon climate. *Geo-Marine Letters*, 37, 385-395.
- Kang, S.I., Ryang, W.H. and Chun, S.S., 2015, Characteristics of surface topography variation on the Gochang beach, southwestern coast of Korea. *Journal of the Korean earth science society*, 36, 533-542 (in Korean with English abstract).
- Kim, D.H. and Hwang, J.H., 1982, Explanatory text of the geological map of Daesan-Eigog sheet (1:50,000). Korea Institute of Energy and Resources, 27 p.
- Kim, S.R., Woo, H.J., Lee, Y.K., Jeong, K.S., Je, J.G., Park, G.T., Jung, B.H. and Cho, J.H., 2002, Sea-bottom sediments and seafloor acoustic image by side scan sonar on Sindu-ri offshore. *Journal of the Korean earth science society*, 23, 707-721 (in Korean with English abstract).
- Lee, H.J., Chun, S.S., Chang, J.H. and Han, S.J., 1994, Landward migration of isolated shelly sand ridge (chenier) on the macrotidal flat of Gomso Bay, West coast of Korea: Controls of storms and typhoon. *Journal of Sedimentary Research*, 64, 886-893.
- Masselink, G. and Short, A.D., 1993, The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: A conceptual beach model. *Journal of Coastal Research*, 9, 785-800.
- Oh, J.K. and Kim, S.E., 1999, Depositional processes in transitional zone between coast and offshore area off the Taean peninsula. *Journal of the Korean earth science society*, 20, 476-485 (in Korean with English abstract).
- Oh, J.K. and Kum, B.C., 1998, Sedimentologic characteristics of macrotidal beach in Mongsanpo, west coast of Korea. *Journal of the Korean earth science society*, 19, 310-317 (in Korean with English abstract).
- Oh, J.K. and Kum, B.C., 2001, Depositional environments and characteristics of surface sediments in the near-shore and offshore off the mid-western coast of the Korean peninsula. *Journal of the Korean earth science society*, 22, 377-387 (in Korean with English abstract).
- Reading, H.G. and Collinson, J.D., 1996, *Clastic Coasts*. In: Reading, H.G. (eds.) *Sedimentary Environments: Process, Facies and Stratigraphy*. Blackwells, Cornwall, 154-231.
- Reineck, H.E. and Singh, I.B., 1980, *Depositional Sedimentary Environment*. 2nd (eds.) Springer-Verlag, New York, 430 pp.
- Ryu, S.O., 2003, Seasonal variation of sedimentary processes in a semi-enclosed bay: Hampyong bay, Korea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 56, 481-492.
- Ryu, S.O., Chang, J.H., Cho, J.W. and Moon, B.C., 2004a, Seasonal variations of sedimentary processes on mesotidal beach in Imjado, southwestern coast of Korea. *The Korean society of Oceanography*, 9, 83-92 (in Korean with English abstract).
- Ryu, S.O., Lee, H.J. and Chang, J.H., 2004b, Seasonal cycle of sedimentary process on mesotidal flats in the

- semi-enclosed Muan Bay, southern west coast of Korea: culminating summertime erosion. *Continental Shelf Research*, 24, 137-147.
- Ryu, S.O., Yu, H.S. and Chun, S.S., 1997, Distribution pattern and characteristics of the surface sediments in Hampyong Bay, the southwestern coast of Korea. *Journal of the Korean earth science society*, 18, 367-378 (in Korean with English abstract).
- Shin, Y.H. and Seo, J.C., 2014, Sediment characteristics of the beach and subtidal zone in Shindu marine protected area. *Journal of the Korean geographical society*, 49, 812-832 (in Korean with English abstract).
- So, K.S., Ryang, W.H. and Kwon, Y.K., 2009, Seasonal variation of surface sediments in the Myeongsasipri tidal flat, Gochanggun, SW Korea. *The Sea, The Korean Society of Oceanography*, 14, 181-188 (in Korean with English abstract).
- Song, W., Yoo, D. and Dyer, K.R., 1983, Sediment distribution circulation and provenance in a macrotidal bay: Garolim Bay, Korea. *Marine Geology*, 52, 121-140.
- Wells, J.T., Adams, Jr, C.E., Park, Y.A. and Frankenberg, E.W., 1990, Morphology, sedimentology and tidal channel processes on a high tide range mudflat, west coast of south Korea. *Marine Geology*, 95, 111-130.
- Yang, B.C. and Chun, S.S., 2001, A seasonal model of surface sedimentation on the Baeksu open-coast intertidal flat, southwestern coast of Korea. *Geosciences Journal*, 5, 251-262.
- Yang, B.C., Dalrymple, R.W. and Chun, S.S., 2005, Sedimentation on a wave-dominated, open-coast tidal flat, south-western Korea: summer tidal flat-winter shoreface. *Sedimentology*, 52, 235-252.
- Yang, B.C., Dalrymple, R.W., Chun, S.S. and Lee, H.J., 2006, Transgressive sedimentation and stratigraphic evolution of a wave-dominated macrotidal coast, western Korea. *Marine Geology*, 235, 35-48.
- Yang, B.C., Dalrymple, R.W., Gingras, M.K., Chun, S.S. and Lee, H.J., 2007, Up-Estuary Variation of sedimentary facies and ichnocoenoses in an open-mouthed, macrotidal, mixed-energy estuary, Gomso Bay, Korea. *Journal of Sedimentary Research*, 77, 757-771.

Received : February 22, 2019

Revised : May 9, 2019

Accepted : May 15, 2019