

한국 서남해안 두우리 조간대에서 표층 퇴적물 및 퇴적구조의 특성과 계절변화

Depositional Characteristics and Seasonal Change of Surface Sediment and Sedimentary Structure on the Doowoori Tidal Flat, Southwestern Coast of Korea

백영숙 (Young Suk Baek)* · 전승수 (SeungSoo Chun)*

요 약 : 한국 서남해안에 위치한 두우리 조간대는 사주와 보호섬이 존재하지 않고 외해로 열려있는 전형적인 개방형 조간대이다. 이러한 개방형 조간대에서는 바람에 의한 파랑이 퇴적작용에 중요한 요소의 하나이므로, 계절에 따른 파랑에너지의 차이가 조간대 표층퇴적물의 분포와 퇴적구조의 특성에 직접적으로 반영된다. 두우리 조간대는 상부의 조수해빈 (tidal beach), 중부의 전형적인 조간대 (intertidal flat)와 최하부의 니질대 (lowermost mudflat)로 구분된다. 이러한 구분은 표층퇴적물의 구성뿐만 아니라 조간대의 경사도에 의한 구분과도 일치한다. 조간대 내에서의 퇴적물은 1차 퇴적구조와 사/니질 퇴적물의 함량에 따라 다시 사질 조간대, 혼합 조간대와 니질조간대로 나누어진다. 두우리 조간대의 표층퇴적상은 계절에 따라서 퇴적물의 함량과 퇴적구조에 변화를 보이며, 퇴적상의 변화양상은 계절풍의 방향과 세기, 폭풍과 밀접한 관련이 있다. 북서계절풍이 강한 겨울철과 봄철에는 사질 조간대의 퇴적상이 우세하며, 약한 남동풍이 우세한 여름철에는 니질 조간대의 퇴적상이 우세하게 분포한다. 가을철에는 혼합 조간대가 우세하게 나타난다. 표층퇴적물은 여름에는 전 조간대가 약 20 cm 두께의 니질 퇴적물로 뒤덮이고 가을이 지나 겨울로 가면서 니질 퇴적상에서 사질 퇴적상으로 바뀐다. 이러한 표층퇴적상의 변화는 바람도 세어지고 풍향도 바뀌어 조간대를 공격하는 파랑의 에너지가 강해지면서 여름철에 퇴적되었던 니질 퇴적물을 침식시키기 때문이다. 캔코어 주상시료에서 퇴적구조는 여름철에는 조간대 상부 (0~1.3 km)에서는 니질 퇴적물의 평행엽층리와 상승연흔 사엽층리가 하부 (1.7~2.3 km)에서는 괴상의 니질 퇴적층이, 겨울철에는 전체적으로 평행엽층리와 연흔사층리가 우세하게 나타나며, 부분적으로 둔덕사층리 (HCS)가 나타난다.

주요어 : 두우리 조간대, 개방형 사질 조간대, 표층퇴적물, 퇴적상, 계절변화, 둔덕사층리

Abstract : The Doowoo-ri tidal flat in the southwestern Korean coast is a typical open-coast tidal flat which has no barriers in the offshore such as barrier island and sand bars. The difference of induced wave energy with seasons is affected directly on the distribution of surface sediment and the formation of sedimentary structures because the sedimentation by wind wave is relatively much important element in this open-coast tidal flat. This open-coast tidal flat can be classified into tidal beach, intertidal flat and lower mudflat according to the pattern of geomorphology and sediment type. The intertidal flat can be again divided into 3 types: sand flat, mixed flat and mud flat based on the primary sedimentary structure and sand/mud ratio. Doowoori tidal flat shows a seasonal change in the surface sedimentary facies based on sediment composition and primary sedimentary structure. The change is closely related to the direction and magnitude of monsoon wind and also to storm frequency. In winter and spring, when northwesterly wind is most dominant and strong and also storms are common, sand-flat facies is largely distributed on the intertidal flat, whereas mud-flat facies is most dominant during summer when weak southeasterly wind is common. In the fall season, mixed-flat facies is dominant on the flat. The Doowoori intertidal flat is covered by mud sediment which is ca. 20 cm in thickness in summer season. In winter season, surface sediment is changed from mud to sand because the summer mud is mostly eroded by strong wave action. Can-core peels in the intertidal flat show that parallel laminated mud or sand/mud and climbing ripple cross-laminated sandy silt are dominant on the upper intertidal flat (0-1.3 km) during summer season. On the other hand, on lower intertidal flat (1.7-2.3 km), dominant sedimentary facies is homogeneous mud. In winter, it is changed into parallel laminated and ripple cross-laminated sand facies.

Key words : Doowoori tidal flat, open-coast sandy intertidal flat, surface sediment, sedimentary facies, seasonal variation, hummocky cross stratification (HCS)

서 론

조간대는 조수의 변화에 따라 노출과 침수가 반복되는 특징을 가진 공간으로 파랑의 영향이 약하고 완만한 경사와 조수로가 발

달한 지형적 특징을 갖는다. 퇴적물의 분포는 입도의 구성성분비에 의해 흔히 사질 조간대 (sand flat), 혼합 조간대 (mixed flat), 니질 조간대 (mud flat)로 나누어진다. 이러한 표층 퇴적상의 수평적인 변화는 주로 조수로의 이동과 관련되어 보고되었다

*전남대학교 지구환경과학과 (Faculty of Earth Systems and Environmental Sciences, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea); sschun@jnu.ac.kr

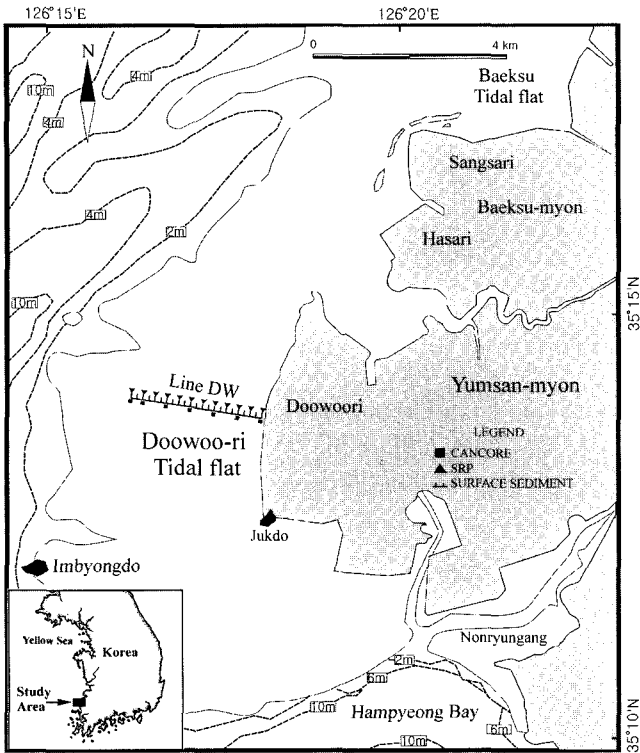


Fig. 1. Location map of study area in the Doowoori open-coast tidal flat, which faces directly to Yellow Sea without seaward barriers. A transect line has been set up for gathering surface-sample, elevation-change and can-core data. Depth contours are based on the MHLWL (mean high low water level = 0 m). SRP is plate for measuring sedimentation rate.

(Reineck and Singh, 1980; Klein, 1985). 외해에서 밀려오는 파도로부터 보호섬 (barrier island)이나 사주 (bar)에 의하여 보호받는 조간대 환경에서는 퇴적작용이 주로 조수에 의해 영향을 받는다 (Reineck and Singh, 1980; Klein, 1985; Dalrymple *et al.*, 1991). 대부분 기존의 연구는 이러한 에너지가 낮은 환경에서 형성된 조간대에 대하여 집중되어졌으므로 과거에는 조간대 퇴적작용에 관한 연구는 주로 조수의 영향을 중심으로 연구되어 왔으나 근래에는 조간대의 퇴적작용에 조류류 (tidal current)와 함께 파도 (wave)의 역할이 중요하게 보고되고 있다 (Anderson, 1983; Ren *et al.*, 1985; Wells, 1988; Amos *et al.*, 1995; Chun and Yang, 1998). 한국 서남해안에 위치한 두우리 조간대는 사주와 보

호섬이 존재하지 않고 외해로 직접 열려있는 전형적인 개방형 조간대로서 (Fig. 1) 파랑의 영향이 퇴적작용의 계절변화에 매우 중요한 역할을 한다. 파랑의 강도에 영향을 주는 것은 바람의 세기로 우리나라는 지형적으로 중위도 편서풍대에 위치하여 있고, 대륙의 남동쪽에 위치하고 삼면이 바다로 둘러 쌓여 있으므로 몬순 계절풍의 영향이 뚜렷한 지역이다. 또한 서해안은 겨울에 북서계절풍에 의한 파랑의 영향을 직접 받는 지형적 특성을 갖고 있으며, 여름철에는 남동계절풍이 우세하여 파랑의 영향이 매우 약해지는 뚜렷한 계절변화를 보이고 있다. 이러한 계절에 따른 파랑 에너지의 차이가 퇴적/침식작용의 변화를 일으키는 주요 요인으로 작용하여 조간대 표층퇴적물의 구성과 퇴적구조의 특성에 직접적으로 반영된다. 이 연구의 목적은 개방형 조간대인 두우리 조간대에서 계절에 따른 표층퇴적물과 퇴적구조의 계절변화를 조석과 파랑의 영향과 관련시켜 살펴보고 이들이 어떻게 퇴적/보존이 되는가를 이해하는데 있다.

연구지역

지형

전라남도 영광군 염산면의 서쪽 바닷가에 위치한 두우리 조간대는 약 4 km의 남북방향으로 발달한 해안선을 갖고 있으며, 북측 해안은 암석으로 이루어진 해안절벽이, 남쪽은 간척사업에 의한 방조제가 조간대/육지의 경계가 되고 있다. 조간대의 폭은 2.5-3.5 km로 북쪽으로는 불갑천이 남쪽은 함평만으로 경계를 이루고 있다. 현재 육지 쪽은 대부분 염전이나 밭으로 이용된다. 전반적으로 굴곡이 없는 해안선을 보인다 (Fig. 1). 두우리 조간대의 북측은 조류로 (tidal channel)와 조류세곡 (tidal creek)이 발달하였고, 남측에는 해안선을 따라 남북 방향으로 띠 상의 사질 퇴적물이 분포하며 외해 쪽으로 조류로 (tidal channel)가 존재한다. 조간대의 상부에 위치한 조수해빈은 급경사 (0.57°)를 보이며 이는 계절에 따른 변화가 미약하다. 측선 DW는 해안 방향의 조수해빈을 제외하고는 0.03°의 완만한 경사를 갖는다 (summer: 0.030°, winter: 0.286°). 조간대 하부에는 니질 퇴적물로 구성된 지역이 나타나며, 여름에는 조간대 상부에 조수로의 오목한 지형이 관찰된다 (Fig. 2). 두우리 조간대와 인접한 해양환경의 지형을 살펴보면 조수의 영향을 받는 조간대는 서북서-동남동 (NWW-SEE) 또는 서북-동남 (NW-SE) 방향으로 조수의 이동이 있고 육상에서 조간대 내부로 연결된 하천은 존재하지 않는다.

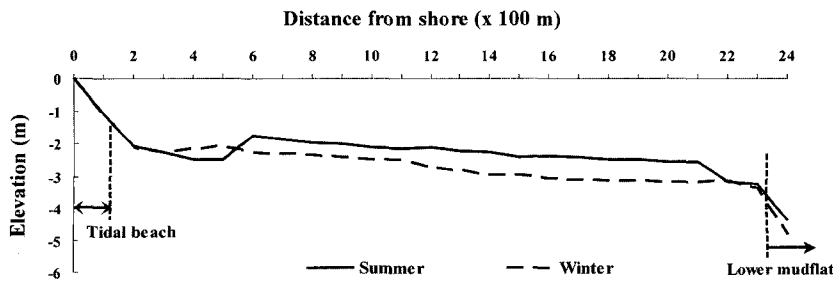


Fig. 2. Cross section along the transect line, DW, which shows the change of flat surface with season. Sampling interval is 100 m in the transect DW.

Table 1. Averaged weather condition near the Doowoori tidal flat (Wido weather station in 1997-1998). Note that the averaged wind direction is changed from northwesterly into southerly at the start of summer season with a decrease in wind speed (Korea Meteorological Administration, 1997 and 1998)

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Average wind speed (m/s)	3.5	3	2.3	2.1	2.6	1.7	1.8	1.8	2.4	2.9	2.6	2.8
Maximum wind speed (m/s) and direction	18.2 NW	17.6 WNW	17.4 NW	16.1 NNW	16.2 SE	15.5 SW	16.4 SW	16.5 SSW	18.9 NNW	20 NW	16.7 NW	18.8 NW
Average storms (days/month)	10	6	6	4	2	2	3	2	6	6	7	9

기상

우리나라는 기온, 풍속, 강수량 등의 계절변화가 심하다. 바람은 여름 (6~8월)에는 남-남동 (S-SE)풍이 우세하고, 겨울 (12~2월)에는 북-북서풍 (N-NW)이 강하게 분다. 또한 풍속 13.9 m/sec 이상의 폭풍일수도 겨울에는 월평균 8회 이상으로 높게 나타나며 봄이 되면서 점차 감소하는 경향을 보인다. 여름의 폭풍일수는 태풍에 의한 것으로 주로 6월과 9월 사이에 나타나며 서해 연안에 큰 영향을 미친다. 17 m/sec 이상의 태풍일수는 8, 9월에 각각 평균 3일, 월평균 1일로 나타난다. 태풍은 많은 강수량과도 양의 상관관계를 갖는다. 우리나라는 태풍이나 장마기가 여름에 나타나므로 강수량은 주로 여름에 집중된다. 연구지역의 2000년 3월부터 2001년 2월까지의 자료를 살펴보면 강수량은 1407.5 mm로서 이중 78.4%가 여름 (6~9월)에 집중되었다. 기온변화를 살펴보면 여름의 평균기온은 24.5°C, 겨울에는 1.03°C로 계절 변화에 따른 기온차도 크다 (Table 1) (광주기상청, 2001). 조석은 반일주조 (semidiurnal tide)로 일조부등 (diurnal inequality)을 나타내며 약 3.9 m의 평균조차 (소조차: 2.6 m, 대조차: 5.3 m)를 갖는다 (국립지리원, 1983).

연구방법

측선 DW에서 100 m 간격으로 매 2개월마다 시료를 채취하였

다. 시료는 표층 1 cm 내외의 퇴적물을 채취하였으며 캔코어는 계절에 따라 측선에서 400 m 간격으로 채취하였다. 표층퇴적물의 입도분석은 Carver (1971)의 방법으로 전처리를 실시하였으며, 전처리 과정이 끝난 후 4 φ 체를 이용한 습식체질에 의해 조립질 시료와 세립질 시료로 분리하였다. 조립질 시료는 오븐에서 건조시킨 후 진탕기를 이용하여 15분 동안 체질하여 0.5 φ 간격으로 무게를 구하였고, 세립질 시료는 피펫 방법에 의하여 1 φ 간격으로 무게를 구하였다.

캔코어는 보다 상세한 상분석을 위해 예폭시를 사용하여 펠 (Peel)을 제작하여 관찰하였으며 니질 퇴적물이 많은 여름의 것 중 일부는 보다 자세한 관찰을 위해 슬랩을 제작하였다. 슬랩은 X-선 촬영기 (Soft X-Ray)로 촬영하였으며 노출조건은 일반적으로 전압 70 kV, 전류 4 mA, 노출시간은 90 sec를 기본으로 하였다.

표층퇴적물의 분포와 특징

표층퇴적물은 사질 퇴적물의 함량비에 따라 사질 퇴적상 (sand facies; 모래 ≥90%), 니사질 퇴적상 (muddy sand facies; 모래 90~50%), 사니질 퇴적상 (sandy mud facies; 모래 50~10%), 니질 퇴적상 (mud facies; 모래 ≤10%)으로 구분하였다. 니질 퇴적물은 여름철에 우세한 분포를 보이며 지형적으로 조수로 (tidal

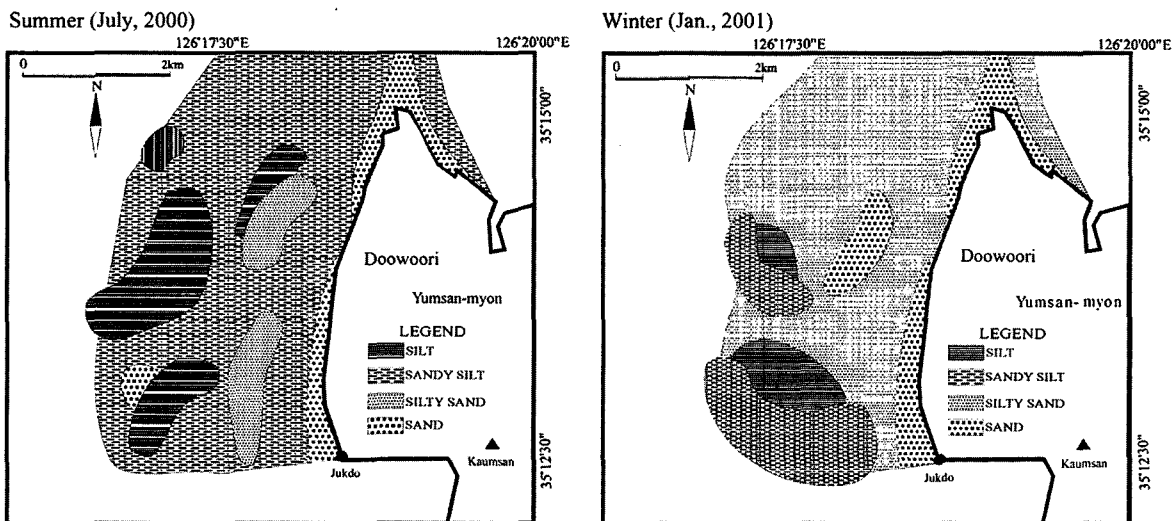


Fig. 3. Spatial distributional pattern in the summer and winter, 2001 in the Doowoori tidal flat, which shows the typical change of surf face sediment with season.

channel) 또는 조류세곡 (tidal creek) 주위에 두드러지게 존재한다.

여름철의 분포

여름철 두우리 조간대의 표층퇴적상은 전반적으로 사니질 퇴적상이 주를 이루었다. 이 퇴적상은 시료의 약 70% 이상에서 실트 함량이 80% 이상을 보여 니질 퇴적상에 근접한 조성비를 갖는다. 사질 퇴적상의 분포는 연안을 따라 길게 발달되어 있으며, 외해 쪽에 부분적으로 존재하기도 한다. 니사질 퇴적상은 사질 퇴적상과 나란한 방향으로 띠상을 보이며 나타나며, 니질 퇴적상은 조간대를 가로지르는 조류세곡 (creek)을 중심으로 발달하였으며 연안의 사질 퇴적상과 인접한 부분에도 니질 퇴적상이 존재한다 (Fig. 3a).

겨울철의 분포

겨울의 표층퇴적상은 주로 니사질 퇴적상이 주를 이룬다. 여름철과 마찬가지로 연안을 따라 사질 퇴적상이 발달되어 있으며, 조간대의 남측으로 갈수록 폭이 증가한다. 니질 퇴적상은 조간대를 가로질러 외해로 이어져 있는 조류세곡을 중심으로 발달해 있으며, 조류세곡의 주변과 남측 외해 쪽으로 사니질 퇴적상이 분포한다 (Fig. 3b).

표층퇴적물의 변화

Fig. 4는 표층 퇴적물을 모래 (사질), 실트, 점토의 세 가지로 구분하여 측선에서의 변화와 계절에 따른 변화를 비교한 것이다. 봄과 겨울에는 점토의 함량이 매우 작으며, 겨울에는 봄보다 사질 퇴적물의 함량이 높게 나타난다. 봄과 가을의 그래프를 비교하여 보면 모래와 실트의 함량은 비슷하게 분포한다. 그러나 가을에는 점토질 함량이 더 높게 나타나서 여름 퇴적물이 완전히 제거되지

않았음을 보여준다. 여름철의 두드러진 특징은 점토의 함량이 증가하였고 이와 동반하여 실트의 함량도 증가하였다. 이러한 퇴적물의 함량을 Folk의 퇴적형 (sediment type)(Folk, 1966)에 적용시키면, 봄과 가을에는 혼합 조간대 (mixed flat)가 주를 이루며 여름에는 니질 조간대 (mud flat)가 겨울에는 사질 조간대 (sand flat)가 우세하게 분포한다.

조수해빈 (tidal beach)의 표층퇴적물을 살펴보면 3월을 제외하고는 99% 이상의 사질 퇴적물로 구성되었고 3 φ에서 최대값을 갖는 단모드를 보인다. 평균입도는 2.5 φ인 세립사 (fine sand)로 계절변화에 영향을 거의 받지 않는 것으로 보인다 (Fig. 5). 일반적으로 해변 퇴적물이 단모드의 입도 특성을 나타내는 경우, 킨질작용에 의해 분급이 양호하고 파랑에너지에 의한 삭박작용 때문에 원마도가 양호한 특징을 보인다 (Davis, 1985).

봄철 표층퇴적상의 평균입도는 4 φ를 사이에 두고 0.5 φ내의 범위에서 변하며 외해로 갈수록 미세한 조립화 현상을 보인다 (Fig. 5). 사질 퇴적물의 범위는 대부분 4 φ가 50% 내외이지만, 극조립 실트(5 φ)의 함량비도 높게 나타난다. 이 기간의 표층 퇴적물은 니질 퇴적물을 약 40% 내외 함유하고 있다.

여름의 두우리 조간대는 평균입도에 의하여 해안에서 외해쪽으로 조수해빈과 니질 조간대, 사질 조간대로 구분되어진다. 표층 퇴적물의 함량비를 살펴보면 조수해빈을 제외한 2 km 지점까지는 니질 퇴적물의 함량이 80% 이상을 차지하며 그 후로 외해로 갈수록 사질 퇴적물의 함량비가 증가한다 (Fig. 4). 최빈값 (mode)의 변화를 살펴보면 니질 조간대에서는 대체로 6 φ에서 정점을 보인다. 또한 실트 뿐 아니라 점토도 10% 내외로 높게 존재한다. 조수해빈에서는 3 φ에서 정점을 보이며 외해 쪽의 하부 조간대에서는 4 φ에서 정점을 보인다 (Fig. 5). 여름의 조간대는 초여름인 6월부터 니질 퇴적층이 쌓이기 시작하여 늦여름인 8월 말까지는 그 두께가 증가한다. 이후 계절풍에 의한 파랑 에너지의 변화로

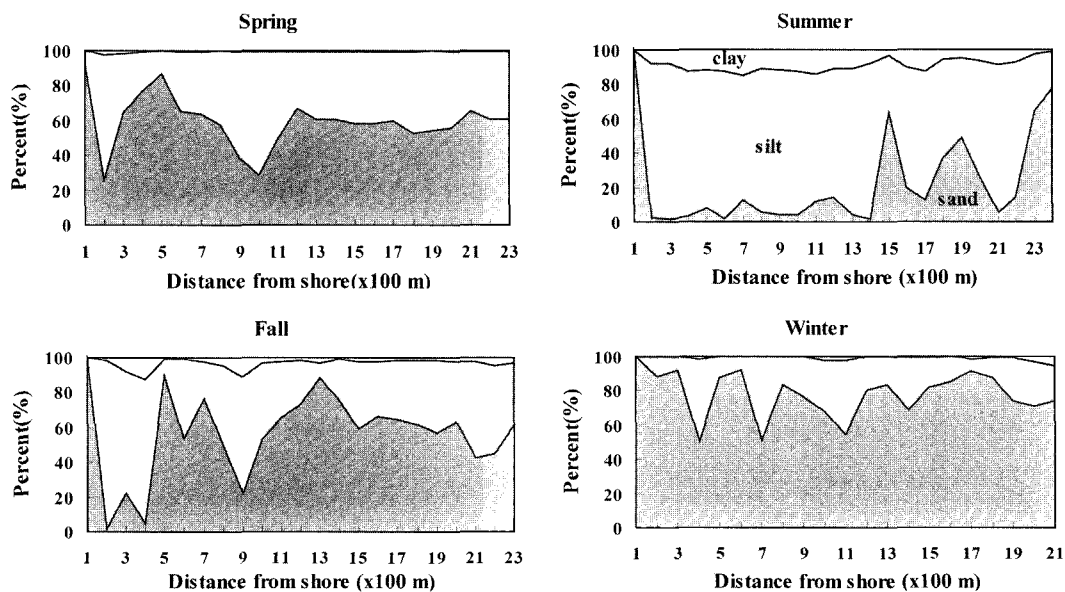


Fig. 4. Seasonal variation of relative grain-fraction ratio in surface sediment along the transect line DW during 2000-2001 (see Fig. 1 for location). The most characteristic feature is nearly no component of clay during winter and spring seasons.

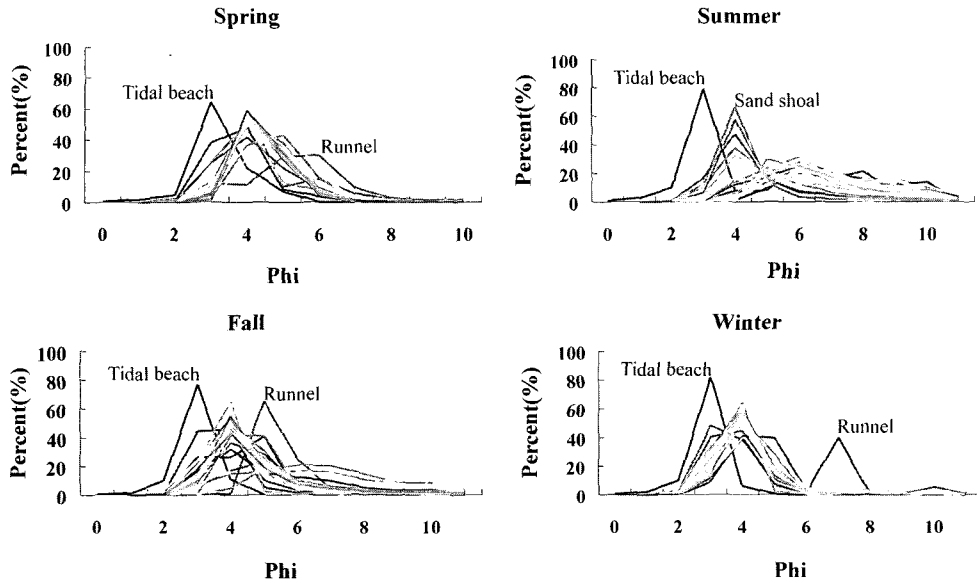


Fig. 5. Variation of grain size mode in the surface sediments. The highest sand content occurs in the spring and winter, whereas the finest mode occurs in the summer and fall.

니질 퇴적물이 침식되기 시작한다.

가을철 표층 퇴적물은 조수로 (tidal channel)의 영향 반경인 200~300 m 지점은 5~6 ϕ 의 평균입도로 여름과 유사한 입도를 보인다. 그 외의 지역에서의 평균값은 4 ϕ 내외로, 여름보다 사질 퇴적물의 함량비가 증가했음을 알 수 있다 (Fig. 4). 또한 4 ϕ 가 주로 정점을 이루지만, 세립사 (fine sand)와 극조립 실트 (coarse silt)의 비가 여름보다 증가함에 따라 4~5 ϕ 의 값이 동시에 두드러지게 나타나는 경우도 많다 (Fig. 5). 이러한 사질퇴적물의 상대적 함량이 증가하는 것은 계절풍의 영향으로 여름보다 강해진 파랑에너지 효과에 의한 것으로 판단된다.

겨울의 표층 퇴적상은 사질로 매우 단순하게 나타난다. 측면구조는 파랑에 의한 연흔이 우세하게 분포한다. 평균입도는 3.5 ϕ 내외를 보인다. 상부에 위치한 조수로의 발달상태는 매우 미약하며, 조수로 퇴적물의 평균입도도 4.2 ϕ 로 연중 가장 조립한 값을 보인다. 조수로에서는 부분적으로 이질 퇴적물의 함량이 증가하기도 하지만, 극조립 실트 (coarse silt)가 주를 이룬다 (Fig. 5). 조수해빈의 퇴적물 입도는 3 ϕ 에서 정점을 나타내고 있으나 모래의 함량이 80%를 넘어서며, 다른 시기와 비교해 조금 더 조립해짐을 알 수 있다 (Fig. 5).

표층 퇴적상

두우리 조간대는 앞장에서 언급된 것과 같이 계절에 따라 특징적인 표층퇴적상이 나타나 예외적으로 여름철 태풍이 지나간 이후 조간대에는 태풍의 흔적이 관찰된다. 즉, 니질 퇴적상 위에는 사질 퇴적물이 부분적인 둔덕형태로 관찰되며, 그 사이로 침식작용에 의해 드러나 있는 생흔작용을 많이 받은 니질 퇴적상의 특징적인 표면이 관찰된다 (Fig. 6a). 이것은 빠르게 퇴적되어 점착력이 낮은 표층의 니질 퇴적물이 쓸려 나가고 하층의 생흔구조가 드러난 것으로 보인다. 겨울의 조간대는 연흔이 두드러지게 나

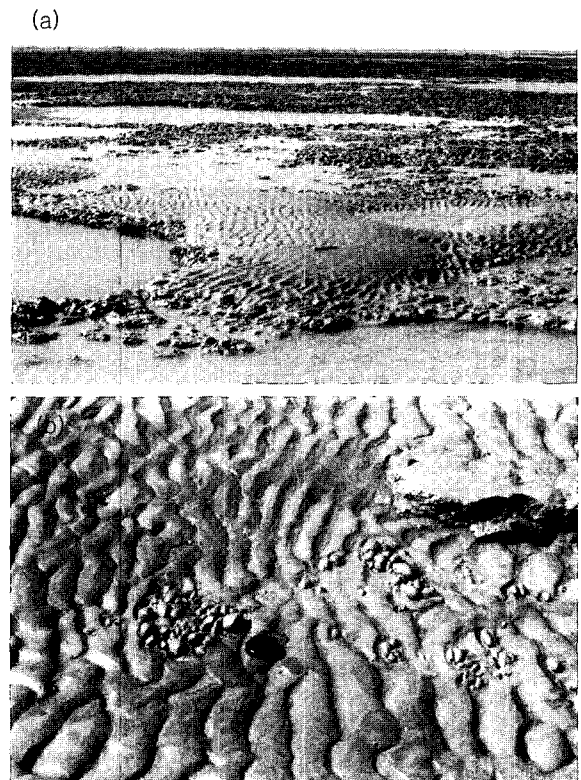


Fig. 6. (a) Doowoori tidal-flat surface after summer storm (typhoon), which shows erosional feature on summer mud-flat cover. (b) mud balls and mud lump.

타리며 봄철과 가을철에는 사질조간대 위에 니질구 (mud ball)가 관찰된다 (Yang et al., 2000)(Fig. 6b). 이러한 구형의 니질구는 주위의 니질 퇴적물에서 파랑에 의한 침식에 의해 뜬겨진 니질 덩어리들이 조수와 파랑에 의한 이동과정에서 구의 형태가 된 것

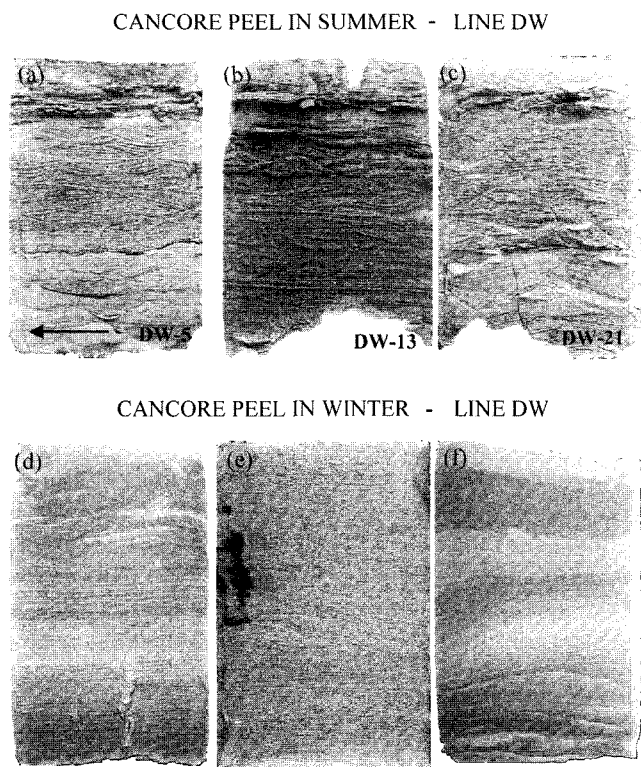


Fig. 7. Can-core peels during the summer (a, b and c) and winter (d, e and f). Dominant sedimentary structures are climbing ripple cross-laminated sand/mud and parallel-laminated mud in summer peels, and ripple cross-laminated and parallel laminated sand in winter peels. Some hummocky cross-stratified sand units occur in the lower sand flat (f).

으로 판단된다. 이들 니질구는 주로 가을에 많이 관찰되어지므로 여름철 빠르게 퇴적되었던 니질 퇴적층이 침식되어 형성되어졌음을 지시한다. 조수해빈의 퇴적상은 계절에 따른 변화보다는 폭풍과 같은 고에너지 환경에 의한 침식면이나 조개껍질에 의한 엽리가 특징적으로 나타난다.

두우리 조간대에서 관찰되는 표층퇴적상은 주요 구성입자에 따라 사질, 사질과 니질의 교호, 니질 퇴적상으로 분류된다. 여름철 상부조간대의 캔코아 필 (peel)의 상부에는 평행엽리를 보이는 니질 퇴적구조가 주로 나타나고, 필의 하부에는 주로 상승연흔층리가 관찰된다 (Figs. 7a, 7b). 상승연흔은 파랑의 영향을 많이 받는 개방형 조간대에서 많이 발견되는 것으로 보고되고 있으며, 세립한 퇴적물의 함량이 높은 경우나 분급이 좋은 사질 퇴적물에서 잘 관찰된다 (Mukherjee, K.K *et al.*, 1987). 상승연흔은 이러한 비교적 세립한 퇴적물들의 혼합체가 고밀도의 부유상태로 이동하면서 유속의 감소로 집적된다. 즉 부유시키려는 힘보다 퇴적작용이 우세한 경우이다 (Lanier, W.P. and Tessier, B., 1998). 두우리 조간대에서는 여름철에 획득된 필에서 주로 관찰이 되고 실트나 세립의 사질 퇴적물로 이루어져있으며 진행방향은 주로 외해에서 해안쪽으로 이동되는 것으로 나타난다. 하부조간대의 캔코아 상부에서는 무구조의 니질 퇴적상이 우세하다 (Fig 7c). 이러한 퇴적상은 부유퇴적물 내에 니질 퇴적물의 함량이 매우 높으며

급속한 퇴적이 일어난 것으로 해석되어진다. 이러한 상부 무구조 니질층은 니질 입자의 함량이 매우 높은 부유물질이 밀물에 의해 외해에서 공급되어 조간대내에서 마찰력의 증가와 함께 점성도가 높아져 빠른 수직퇴적작용에 의해 형성되는 것으로 해석되나, 조간대내에서 이러한 퇴적기구에 대한 보고가 없어 향후 연구가 정밀한 필요한 부분이다. 겨울철 필은 평행엽층리, 사층리와 연흔사층리를 보이는 사질 퇴적상이 주를 이룬다 (Figs. 7d, 7e, 7f). 연흔사층리는 우수연흔 (current ripple)과 파동연흔 (wave ripple)을 모두 포함하며 사층리의 경사방향에 따라 해안 쪽으로 경사진 창조방향의 사층리 (flood-dominated cross-lamination)(Allen, 1973, Dalrymple *et al.*, 1978, Amos and King, 1984), 외해 쪽으로 경사진 낙조방향의 사층리 (ebb-dominated cross-lamination) 퇴적상, 곡사층리 (trough cross-lamination) 퇴적상 등이 포함된다. 그러나 전체적으로 파동연흔 사층리와 창조방향의 사층리가 우세하게 나타난다. 간혹 필의 상부에 괴상의 사질퇴적상이 존재하기도 하는데 이것은 대부분 창조 시에 급속한 침전 (settling)에 의하거나 강한 파랑의 작용에 의한 휩쓸림 (wash-out)에 의해 형성되거나 시료 채취시에 변형된 것으로 판단된다. 조간대 하부의 캔코아에서는 언덕사층리 (hummocky cross stratification, HCS)도 관찰되어지는데 이는 폭풍과 같은 강한 파랑의 영향을 받았음을 지시한다 (Fig. 7f).

토 의

두우리 조간대는 조수해빈 (Davies, 1985, Short, 1991, Masselink and Hegge, 1995)에서 볼 수 있는 지형학적 특징을 보여준다. 연안의 해빈을 따라 나타나는 runnel system 또는 swash bars와 해안 쪽의 급경사 지역을 조수해빈으로 구분하는 것 이외에, 조간대 표층 퇴적물의 구성비에 의한 조간대의 구분이 용이치 않다. 또한 Ridge and runnel system과 관련된 띠 (band) 형태의 퇴적상은 여름보다 겨울에 퇴적물의 입도 차이에 의해 명확히 인식되지만 폭 (width)과 높이 (height)는 감소된다 (Corbau *et al.*, 1999). 조수해빈은 남북 (S-N) 방향으로 길게 발달되어 있는데 이것의 폭은 남으로 갈수록 증가하며 해안선의 남측 부분인 죽도까지는 방파제에 의해 간척지와 경계되어 있다. 여름철 고에너지 환경에서 형성된 모래톱 (sand shoal)이나 swash bar가 남측 해빈에 인접해 발달한 것이 관찰되어지는데 이는 제방이 형성된 곳으로부터 남측으로 갈수록 발달상태가 양호해진다. 이러한 퇴적체가 해빈 쪽으로 이동을 하면서 남쪽의 조수해빈의 규모 및 형성과 이동에 영향을 미치는 것으로 추측된다.

두우리 조간대는 여름철 니질 퇴적물의 집적이 우세하게 일어난다. 이러한 니질 퇴적물의 집적이 충분하기 위해서는 부유퇴적물의 함량이 높아야 하고 부유상태의 퇴적물들이 집적될 수 있는 충분한 조건이 형성되어야 한다. 이 지역과 인접하여 있고 유사한 퇴적학적 특징이 관찰되는 백수 조간대에서 측정된 자료를 살펴보면 바닥 근처에서 부유퇴적물 함량이 겨울철에도 8,000 ppm에 이른다고 보고된 바 있다 (Chun *et al.*, 2000). 현장 관찰에서도 세립의 모래와 니질 퇴적물이 다량 함유되어 높은 탁도를 보인다. 이와 더불어 수온이라는 변수를 통해 여름철에 높은 집

적이 나타날 수 있다는 보고가 있다 (Krogel and Flemming, 1998). 또한 여름에 조간대에 발달하는 조류세곡들이 조간대 내 니질 퇴적물의 공급과 집적에도 영향을 미칠 것으로 사료된다.

여름과 겨울철 퇴적층에서 관찰되는 퇴적구조의 차이는 계절에 따른 파랑에너지의 변화와 연관되어 나타나는 것으로 여름철 니질퇴적물에 의한 구조는 태풍과 같은 고에너지 환경에서 대부분 제거된다. 겨울철의 일반적인 물리적 조건에서 형성된 퇴적구조 또한 겨울폭풍과 같은 환경에 의해 파괴되므로 보존률은 낮다. 여름철 캔코아의 하부에 존재하는 사질 퇴적구조는 겨울철의 퇴적물의 퇴적구조와 유사하므로 이들이 겨울철에 퇴적되었음을 의미한다. 그러므로 보존된 퇴적구조의 퇴적작용과 퇴적기구에 대한 자세한 연구가 앞으로 필요하다.

결론

한반도의 남서해안에 위치한 두우리 조간대는 사주와 보호섬이 없는 개방형 조간대로 퇴적물의 이동, 퇴적작용 및 침식작용에 파

랑의 영향이 우세하게 작용한다. 지형적인 특징에 따라 조간대를 분류하면 연안에서부터 조수해빈 (tidal beach), 조간대 (intertidal flat), 최하부 니질 대 (lowermost mudflat)로 나누어진다. 전체적으로 0.03~0.09° 범위의 매우 완만한 기울기를 갖는다.

조간대의 표층퇴적물과 퇴적상은 계절에 따른 변화를 보인다. 조간대의 표층에는 상대적으로 저에너지 상태인 여름에는 니질 퇴적물이 집적이 되고, 고에너지 상태인 겨울철에는 사질 퇴적물이 주로 분포한다. 개방형 조간대이므로 여름에는 겨울이나 봄에 비해 바람이 약하며, 풍향은 주로 남-남동 (S-SE)을 보이므로 조간대 위에서의 파랑의 영향이 약하므로 니질 조간대가 우세하게 형성된다. 여름에 쌓인 니질 퇴적물의 두께는 약 10-20 cm로 나타나는 데 이들의 집적 정도는 외해로 갈수록 미세한 증가를 보인다. 여름이 지나가면서 파랑의 영향이 점차 증가하면서 조간대를 덮고 있던 니질 퇴적물은 침식되기 시작하며 그 함량비는 점차 낮아진다. 이 과정에서 구형의 니질구 (mud ball)가 생성되기도 하는데 이것은 층의 계절경계면을 지시하게 된다. 이 니질구는 봄철과 가을철의 강한 바람이 부는 시기에 주로 관찰이 된다. 계절이 겨울로

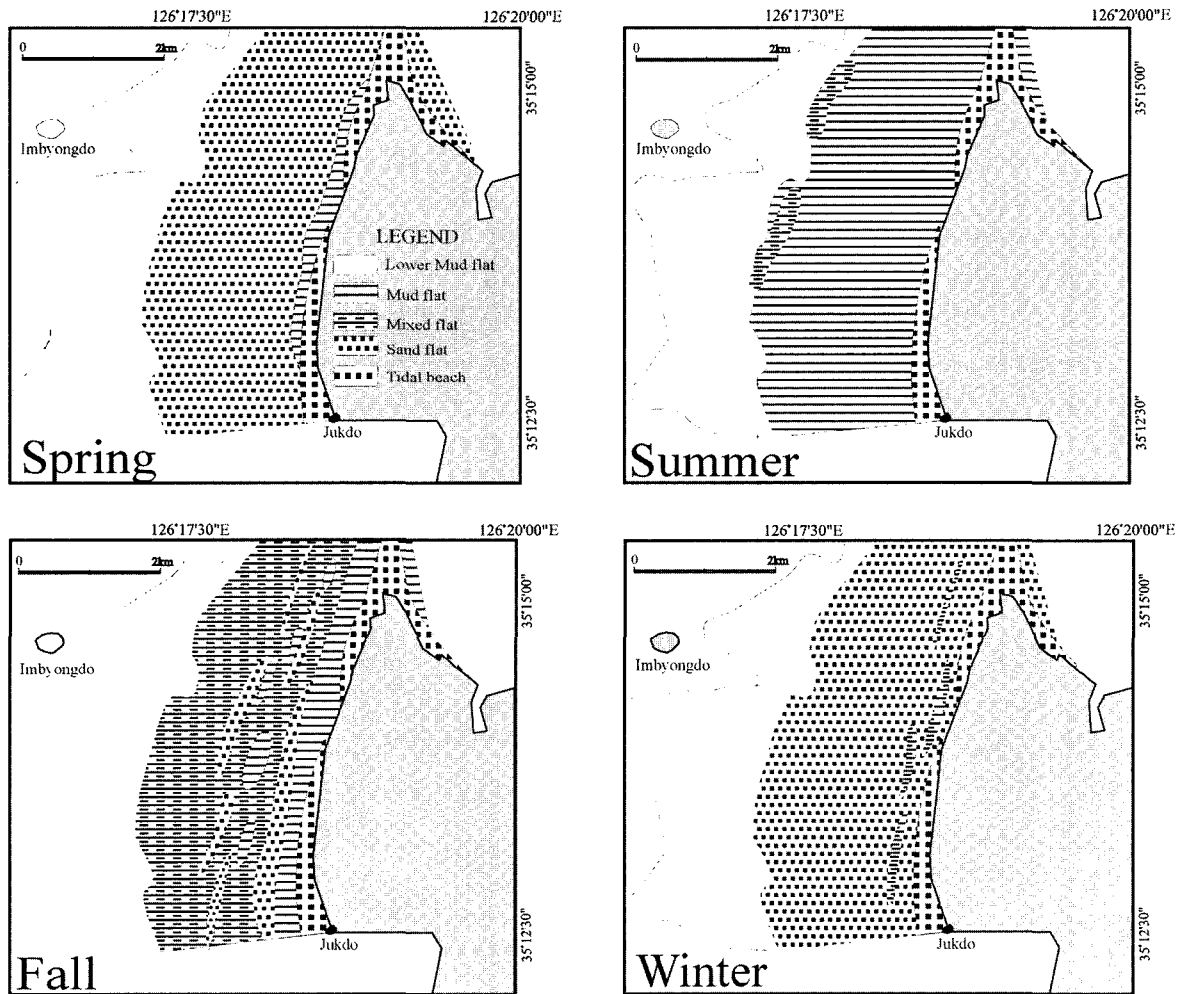


Fig. 8. A suggested seasonal model of surface-sediment distribution (sedimentary facies) in the Doowoori intertidal flat. In winter and spring seasons, sand facies is dominant in the tidal flat due to heavy and strong wave action. In summer, mud flat occupies most intertidal flat. Mud patches and sand shoals occur on the middle flat as remnant bodies of mud-flat erosion and as swash bars due to increasing wave action in fall when wind wave increases again.

변하면서 풍향은 북-북서풍 (N-NW)이 우세해지며 바람의 세기도 증가하여 여름철에 조간대를 구성하고 있던 니질 퇴적물은 거의 사라지고 두우리 조간대는 대부분이 사질 조간대로 바뀐다 (Fig. 8).

계절별로 살펴보면 봄철에는 사질, 여름철에는 니질, 가을에는 사질과 니질이, 겨울철에는 사질퇴적상이 주로 나타난다. 주 구성 퇴적구조를 살펴보면 봄철에는 평행엽층리와 연흔사층리가, 여름철에는 무구조와 평행엽리의 니질 퇴적상과 파형 (wavy) 또는 사질과 니질의 교호층리와 상승연흔층리가, 가을철에는 연흔사층리와 평행엽층리의 사질퇴적상과 파형 (wavy) 또는 평행 (parallel) 사질과 니질의 교호층리와 평행엽층리의 니질 퇴적상이, 겨울철에는 평행엽층리와 연흔사층리구조가 우세하다. 이러한 퇴적구조를 근거로 흐름의 에너지 유권을 살펴보면 봄철에는 상부유권, 여름에는 하부유권, 가을에는 상부/하부 유권, 겨울에는 상부유권의 에너지 환경이 조성된다.

사 사

이 논문은 한국과학재단의 지원 (KOSEF, F01-2001-000-10010)을 받아 수행된 연구결과를 기초로 작성되었습니다. 이 연구를 수행하는 중에 현장조사 및 실내실험에서 많은 토론과 실질적인 도움을 주었던 전남대학교 퇴적환경연구실의 양병천, 손창수, 김중관, 장강석에게 고마움을 표하고 싶다.

참고문헌

광주기상청, 2001, AWS 기상연보.
국립지리원, 1983, 연안 해역 기본조사 보고서(법성포 지구). 60p.
Allen, J.R.L., 1973, Features of cross-stratified units due to random and other changes in bed forms. *Sedimentology*, 20, 189-202.
Amos, C.L., and King, E.L., 1984, Bedforms of the Canadian eastern seaboard: a comparison with global occurrences. *Mar. Geol.*, 57, 167-208.
Amos, C.L., Barrie, J.V., and Judge, J.T., 1995, Storm-enhanced sand transport in a macrotidal setting, Queens charlotte Islands, British Columbia, Canada. In: Flemming, B.W. and Bartholoma, A. (Editors.), Tidal signatures in modern and ancient sediments, International Association of Sedimentologists Special Publication, 24, 53-68.
Anderson, F.E., 1983, The northern muddy intertidal: a seasonally changing source of suspended sediments to estuarine waters a review. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 40, 143-159.
Carver, R.E., 1971, Procedures in sedimentary petrology. Wiley, NewYork, 653p.
Chun, S.S., and Yang, B.C., 1998, Mud-flat sedimentation on the wave-dominated macrotidal flat in the southwestern coast of Korea: Long- and Short-term processes related to both sea-level and monsoon. The 5th International Conference on Cohesive Sediment Transport, IntercoH'98. (Abstract), p.10-11.
Chun, S.S., Yang, B.C., Lee, I.T., and Lee, H.J., 2000, Non-barred, open macrotidal flats strongly influenced by wave action, Gomsu Bay and Baeksu coast, southwestern Korea: depositional processes, seasonal evolution and transgressive stratigraphy, Tidalite 2000-

5th International Conference on Tidal Environments, Seoul Korea (June 12-14), Field Trip B2 (Guide Book), 101p.
Corbou, C., Tessier, B., and Chamley, H., 1999, Seasonal Evolution of Shoreface and Beach System Morphology in a Macrotidal Environment, Dunkerque Area, Northern France, *Jour. Coastal Research*, 15, 97-110.
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.
Dalrymple, R.W., Makino, Y., and Zaitlin, B.A., 1991, Temporal and spatial patterns of rhythmite deposition on mud flats in the macrotidal Cobequid Bay-Salmon River estuary, Bay of Fundy, Canada. In: Smith, D.G., Reinson, G.E., Zaitlin, B.A. and Rahmani, R.A. (Editors), Clastic Tidal Sedimentology, *Can. Soc. Petrol. Geol. Memoir*, 16, 137-160.
Davies, R.A., 1985, Coastal Sedimentary Environments. In: Davies, R.A. (Editors), Beach and Nearshore zone. Springer-Verlag. New York, p379-444.
Folk, R.L., 1966, A review of grain size parameter. *Sedimentology*, 6, 73-93.
Klein, G. deV., 1985, Intertidal flats and intertidal sandbodies. In: Davies, R.A.J. (Editors), Coastal Sedimentary Environments. Springer-Verlag, New York, p.187-224.
Kroel, F., and Flemming, B.W., 1998, Evidence for temperature-adjusted sediment distribution in the back-barrier tidal flats of the East Frisian Wadden Sea(Southern North Sea). In: Alexander, C.R., Davies, R.A. and Henry, V.J.(eds.), Tidalites: Processes and Products. *SEPM Special Publication*, 61, 31-41.
Lanier, W.P., and Tessier, B., 1998, Climbing-ripple bedding in the fluvio-estuarineatransition; A common feature associated with tidal dynamics(modern and ancient analogues), Todalites: Processes and Production, *SEPM Special Publication No. 61*, 109-117.
Masselink, G., and Hegge, B., 1995, Morphodynamics of meso- and macrotidal beach: examples from central Queensland, Australia. *Mar. Geol.*, 129, 1-23.
Mukherjee, K.K., Das, S., and Chakrabarti, A., 1987, Common physical sedimentary structure in a beach-related open-sea siliciclastic tropical tidal flat at Chandipur, Orissa, India and Evaluation of the weather condition through discriminant analysis. *Senckenbergiana Marit.* 19, 261-293.
Reineck, H.E., and Singh, I.B., 1980, Depositional Sedimentary Environments. 2nd Ed. Springer-Verlag, New York, 430p.
Ren, M.E., Zhang, R.S., and Yang, J.H., 1985, Effect of typhoon no. 8114 on coastal morphology and sedimentation of jiangsu Province, Peoples's Republic of China. *J. Coastal Res.*, 1, 21-28.
Short, A.D., 1991, Macro-meso tidal beach morphodynamics an overview. *J. Coastal Res.*, 7, 17-43.
Wells, J.T., 1988, Distribution of suspended sediment in the Korea Strait and southeastern Yellow Sea: onset of winter monsoons. *Mar. Geol.*, 83, 273-284.
Yang, B.C., 2000, Seasonal cycle of surface sediment distribution and evolution of sedimentary facies on the Baeksu tidal flat, Southwestern open coast of Korean Peninsula. MS. thesis, Chonnam National University, 147p.

(2004. 2. 1 원고 접수)

(2004. 9. 5 수정본 채택)