

해안침식이 우세한 반폐쇄적 조간대의 퇴적작용 : 한국 서해안의 함평만

장진호 · 김여상¹ · 조영길

목포대학교 해양자원학과, ¹공주대학교 지구과학교육과

Tidal-Flat Sedimentation in a Semienclosed Bay with Erosional Shorelines: Hampyong Bay, West Coast of Korea

JIN HO CHANG, YEO SANG KIM¹ AND YEONG-GIL CHO

Department of Marine Resources, Mokpo National University, Muan 534-729, Korea

¹Department of Earth Science, Kongju National University, Kongju 314-701, Korea

해안침식이 우세한 반폐쇄적 조간대의 퇴적작용을 규명하기 위해 우리 나라 서해안의 함평만 조간대에서 지형, 퇴적물, 집적율, 해안절벽의 침식율 등을 조사하였다. 함평만 조간대는 전반적으로 조류세곡(tidal creek)의 발달이 미약하고, 고조선 해변(high-tide beach), 조간대 사주(intertidal sand shoal) 등에 의해 지형적 기복이 표시되며, 대체로 상부방향으로 오목한 지형단면을 보인다. 조간대 퇴적물은 해안절벽의 침식에 의해 공급된 육상기원의 조립 퇴적물(자갈, 모래)과 조석작용에 의해 바다로부터 공급된 세립 퇴적물(펄)이 다양하게 혼합됨으로써 복모드형 입도분포, 불량한 분급, 양의 왜도 등의 조직적 특성을 보인다. 표층 퇴적물의 퇴적상 분포는 대체로 저조선 방향과 만 입구 방향으로 세립해지는 경향을 보여, 조간대의 일반적 경향과 다르다. 조간대층은 대부분 생물교란에 의해 균질화된 상태이며, 만 입구의 펄질 조간대에서 제한적으로 렌즈상층리(lenticular bedding), 평행엽리(parallel lamination) 등이 관찰된다. 조간대의 침식은 상부 조간대와 하부 조간대를 중심으로 주로 봄철(3~5 월)과 겨울철(10월~3 월)에 우세하며, 침식우세 지역의 경우 연평균 침식율이 5.2 cm/yr에 이른다. 침식에 의한 해안절벽의 후퇴는 내만역의 절벽에서 최고 1.4 m/yr의 속도로 이루어지는데, 대체로 초여름(5~6 월)에 우세하여 조간대의 최대 침식시기(봄철)와 1~2 개월의 시간차를 보인다. 이렇듯 함평만과 같은 전형적인 반폐쇄적 환경 내에서 조간대와 해안절벽이 침식되는 까닭은 풍파와 지역적 해수면 상승의 상호작용 때문인 것으로 판단된다.

Hampyong Bay is a semienclosed and macrotidal bay which opens to the eastern Yellow Sea through a narrow inlet in the southwestern coast of Korea. In order to understand the tidal-flat sedimentation in the semienclosed setting, morphology, sediments, accumulation rate and sea cliff erosion were investigated in the tidal flat of Hampyong Bay. The tidal flat of Hampyong Bay lacks intertidal drainage systems, and generally shows the concave-upward profile whose relief is designated by marked morphological features such as high-tide beaches, intertidal sand shoals and tidal creeks. Surficial sediments of the tidal flat mainly consist of mud, sandy mud, gravelly mud, gravelly sand and muddy gravel, thus showing the textural characteristics of multimodal grain-size distribution, poorly sorting and positive skewness. The sediments generally coarsen landward due to the increase in coarse fraction content. Sedimentary structures are deeply bioturbated, but parallel lamination and lenticular bedding are locally found in the mudflat near mean low water line. Annual accumulation rates across the tidal flat (along Line SM) average -5.2 cm/yr with a range of -45.8~+4.2 cm/yr, indicating that the tidal flat is erosional. In general, erosion rates of upper and lower tidal flat are higher than those of middle tidal flat. Seasonally, the erosion rates are much higher during spring and winter when dominant wind direction corresponds to the long axis of Hampyong Bay. Sea cliffs are eroded at a rate of 1.4 m/yr. The biggest sea cliff erosion generally occurs 1~2 months later after tidal flats were extensively eroded. Such erosions of tidal flats and sea cliffs in the semienclosed bay setting are interpreted to be due to wind waves coupled with local sea-level rise.

서 론

조간대(tidal flat)는 조석작용에 의해 주기적으로 노출과 침수가 반복되는 매우 완만한 경사의 해안지역이다. 따라서 조간대는

퇴적물 공급이 우세한 대조차 해안에 잘 발달하며, 조차, 파랑, 그리고 유입되는 퇴적물의 양과 종류에 따라 지형적 특성을 달리한다(Klein and Sanders, 1964; Hayes, 1975). 한반도 서해안의 조간대는 대부분 대조차 조간대(macrotidal flat)로서 리아

형의 복잡한 해안을 따라 광범위하게 발달하며, 특히 조간대가 사주(sand shoals)나 보호섬(barrier islands)이 없이 직접 외해와 연결되는 매우 독특한 특징을 지닌다(Wells *et al.*, 1990; Alexander *et al.*, 1991).

한반도 서해안의 조간대에 대한 지난 30 년 동안의 연구결과에 의하면, 서해안의 조간대는 대체로 모래질 조간대(sand flat)보다 펄질 조간대(mud flat)가 우세하고(Wells *et al.*, 1990; Alexander *et al.*, 1991), 조류로는 큰 이동이 없이 비교적 안정된 상태를 유지하며(Wells *et al.*, 1990), 퇴적물은 대부분 생물에 의해 심하게 교란되어 있다(Frey *et al.*, 1989; Wells *et al.*, 1990; Alexander *et al.*, 1991; 장, 1995). 또한 서해 조간대의 표층 퇴적물은 전반적으로 저조선에서 고조선 방향으로 세립해지고(정과 박, 1978; Lee *et al.*, 1985; 김, 1988; Wells *et al.*, 1990; Alexander *et al.*, 1991; 장 등, 1996), 현세 조간대층은 최고 30여 m의 두께를 가지며(최, 1987) 상향조립의 해침적 경향을 보이는 것으로 알려져 있다(장 등, 1996).

그런데 이러한 연구 결과들은 한반도를 배수하는 강에 의해 퇴적물이 공급되는 하구역 주변의 조간대, 또는 재부유된 서해의 저층 퇴적물이 조석작용에 의해 만 내로 유입되는 내만역 조간대에서 획득된 것이다. 따라서 조간대 퇴적물의 공급이 주로 해안절벽의 침식에 의해 이루어지는 지역에서는 위에 언급된 결과들이 그대로 적용될 수 없다. 실제로 함평만 조간대는 만 입구가 매우 좁은 반폐쇄적 만임에도 불구하고, 내만역의 해안절벽 침식에 의해 육상기원 퇴적물이 직접 조간대 내로 공급되고 있고, 이 곳의 표층 퇴적물은 대체로 저조선에서 고조선 방향으로 조립해지는 경향을 보여(이, 1990; 김, 1996), 서해 조간대의 일반적인 모습과 큰 차이를 보인다. 더욱이 지금까지 조간대 연구를 통해 남겨진 문제점 중의 하나는 고기 조간대층의 해석에 적용될 수 있는 현세의 모델들이 아직도 매우 부족하다는 점이다(Klein, 1975).

따라서 본 연구는 해안침식이 우세한 반폐쇄적 조간대의 모델을 제시하기 위한 선행 연구로서 (1) 함평만 조간대에 대해 지형, 퇴적물, 퇴적구조, 침식율 등의 특징을 규명하고, 아울러 (2) 반폐쇄적 만에서 이루어지는 해안침식의 원인과 그 중요성에 대해 토의하고자 한다.

연구지역

함평만은 한반도 서해안의 남부에 위치한 반폐쇄적 만으로서 서북서 방향으로 열린 좁은 만 입구를 통해 황해의 동부와 연결된다(Fig. 1). 만의 북서부 해안에는 중생대 유라기의 편마암질 화강암이 분포하고, 만의 남동부에는 풍화에 약한 시대미상의 화강암질 편마암이 분포한다(한국자원연구소, 1971). 그리고 만 안으로는 큰 강의 유입이 없으며, 소규모 하천들만이 만의 남동부 해안으로 유입한다(Fig. 1).

함평만의 수심은 20 m 미만이며, 만의 대부분이 조간대와 주조류로(main tidal channel)로 구성되어 있다(Fig. 1). 조간대는 해안선과 평균 저조선 사이의 지역으로서 만 전체 면적의 반 이상을 차지하며, 조간대의 육지쪽 경계부에는 대체로 방조제와 해안절벽이 위치하여 염습지(salt marsh)의 발달을 제한한다(Fig.

1). 조수의 주요 통로 역할을 하는 주조류로는 만 중앙부의 조하대에서 북서-남동 방향으로 길게 발달하여 만 입구에 이르러서는 20여 m의 수심과 약 1.5 km의 폭을 보인다.

조석은 반일주조(semidiurnal tide)의 특징을 보이는데, 주조류로에서 조류의 유속은 창조류가 1.5~1.7 m/s, 낙조류가 1.8 m/s로서 낙조류가 창조류보다 다소 우세한 편이다(박, 1998). 조차(tidal range)는 평균 315.4 cm이며, 대조차와 소조차는 각각 425.3 cm와 205.3 cm이다(국립지리원, 1983).

바람은 전형적인 계절풍이 우세하다. 따라서 가을과 겨울에는 한냉건조한 북북서풍이 우세하고, 봄에는 서북서풍, 그리고 여름에는 온난다습한 남남동풍이 우세하다(Fig. 2). 그리고 늦여름과 초가을 사이에 간헐적으로 태풍에 의한 강풍이 분다. 연평균 폭풍일수는 28.8 일이며, 대부분의 폭풍이 겨울에 집중되는 특징을 보인다(기상청, 1991).

재료 및 방법

조간대의 지형적 특징을 파악하기 위해 조간대 표면에 대해 수준측량을 실시하였다. 즉 해안선에서 저조선까지 이르는 측선 SM에 대해 100 m 간격으로 말뚝을 설치하고, 말뚝이 설치된 각 지점들에 대해 수준측량을 실시하였다(Fig. 1). 수준측량 및 거리측정에는 수준의(Pentax Pal 2S Level)와 광파거리측정기(Wild T2 universal theodolite and geodimeter)가 사용되었고, 각 측점들의 고도는 기본수준점(TBM)의 고도로부터 수준측량에 의해 유도되었다. 조간대의 퇴적물은 표층 퇴적물과 코어 퇴적물이 채취되었다. 표층 퇴적물은 조간대 전체에 걸쳐 여러 지역에서 채취되었으며(Fig. 1), 물 체질(wet sieving)에 의해 조립질과 세립질로 분리한 후, 조립질은 표준체로, 그리고 세립질은 자동입도분석기(Sedigraoh 5100)로 입도를 분석하였다. 그리고 코어 퇴적물은 만의 동부, 서부, 남동부에 위치한 조간대에서 50 cm 길이의 PVC 파이프를 사용하여 채취하였고(Fig. 1), 채취된 코어에 대해서는 코어의 절개, 퇴적물 슬랩의 제작, X-Ray 촬영 등의 과정을 거쳐 퇴적구조를 분석하였다. 조간대의 집적율은 측선 SM의 15 개 지점과 유월리 및 산남리 해안에 위치한 펄질 조간대의 두 지점(S와 Y)에서 약 1 년 동안(1995. 12 ~ 1997. 2) 2 개월 간격으로 측정하였다(Fig. 1). 즉 해저면 아래의 일정 깊이에 30×30 cm 크기의 기준면(아크릴판)을 묻고, 주위 환경과 평형상태에 도달할 수 있도록 1~2 개월을 기다린 다음, 해저면에서 기준면까지의 깊이를 버니어캘리퍼스로 측정하였다. 그리고 시간에 따른 집적깊이의 변화 값에 기초하여 각 지점의 집적율(계절별, 연평균)을 계산하였다. 해안의 침식율은 측선 SM의 출발 기준점 부근에 위치한 해안절벽(SC)에 대해 측정하였다(Fig. 1). 즉 육상의 고정된 지점에 기준점을 설치하고, 그 기준점으로부터 해안절벽까지의 정해진 직선거리를 2 개월 간격으로 측정하는 방법을 채택하였다.

결 과

지형단면

Fig. 3에는 측선 SM에 대한 지형단면이 제시되어 있다. 이

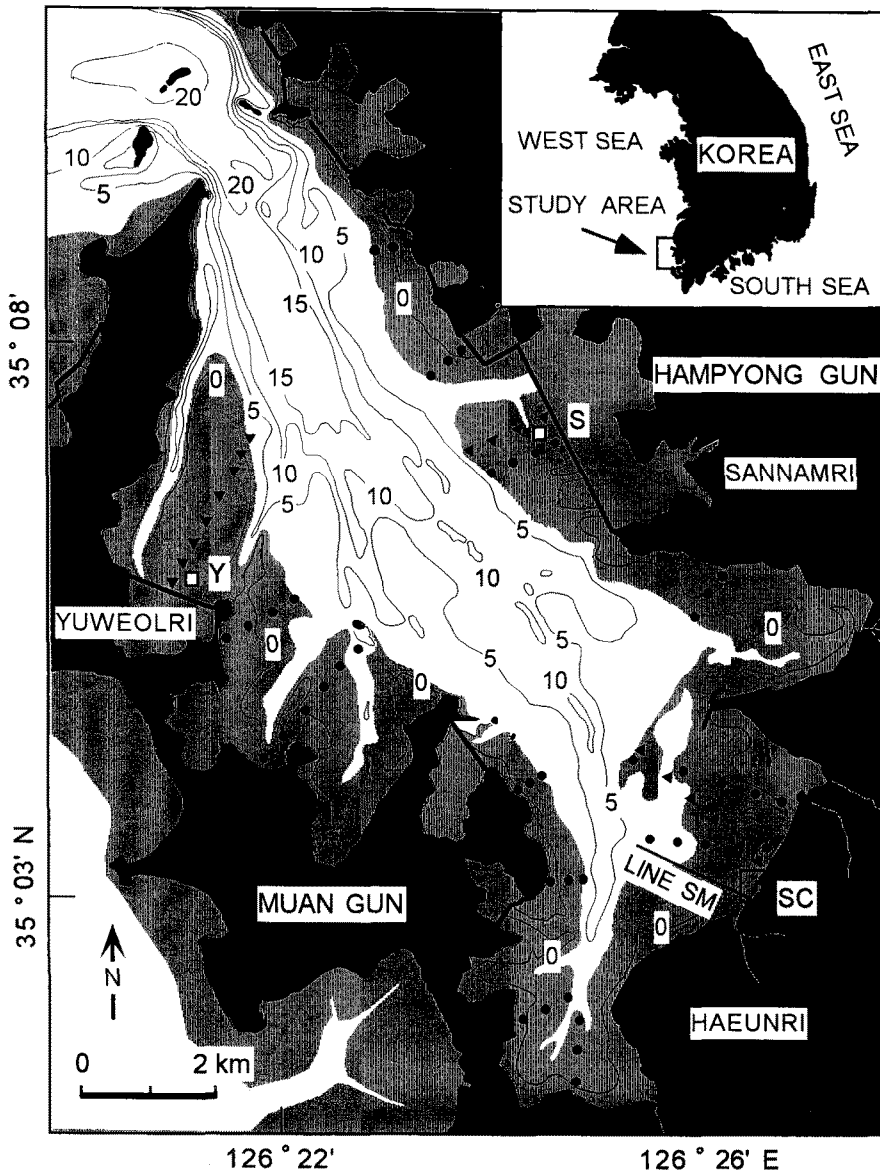


Fig. 1. Location map of Hampyong Bay showing bathymetry (in meters), sampling sites and the intertidal zone defined by 2 m isobath. Thick solid lines without any marks represent dikes. Triangles indicate core stations, and dots represent the sampling sites of surface sediments. The elevation and sedimentation rate were measured along Line SM at 100 m intervals. The sedimentation rate was also measured on the mudflats (squares; stations S and Y) near Sannamri and Yuweolri. SC (Simokdong Cliff) indicates the sea cliff whose retreat rate was measured.

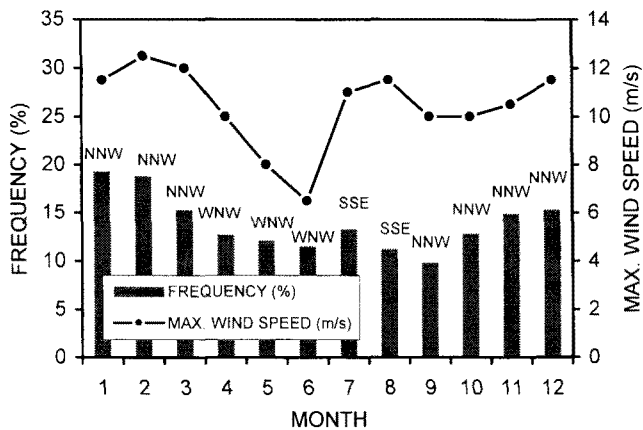


Fig. 2. Average of monthly maximum wind speed and dominant wind direction during the period of 1961-1990 (from Korea Meteorological Administration, 1991).

지형단면은 함평만 조간대가 매우 완만한 경사를 보이며 바다 쪽으로 2 km 이상까지 연장되고, 전체적으로 상부방향으로 오목한 형태이며, 조간대의 지형적 기복이 주로 고조선 해변(high-tide beach), 조간대 사주(intertidal sand shoals), 조류세곡(tidal creek)에 의해 표시됨을 보여준다. 고조선 해변은 대조평균고조선(MSHW) 위에 위치하여 해안선과 조간대의 경계를 이루고, 대체로 50 m 미만의 폭을 가지며, 조간대보다 급한 경사를 보인다(Fig. 3). 조간대 사주는 평균고조선(MHW) 위의 상부 조간대에서 해안선과 비교적 평행하게 발달하며, 주변의 조간대보다 50 cm 정도 더 높고, 바다쪽 사면보다 육지쪽 사면이 더 급한 비대칭적 모습이다(Fig. 3). 조수의 주요 통로가 되는 조류세곡은 전반적으로 잘 발달되어 있지 못한 편이다. 또한 측선 SM의 출발 기준점은 해안절벽의 기저부에 해당되며, 이 기저부는 평균 해수면을 기준으로 +4.4 m의 고도에 위치하여 대조평균고조선(+2.1 m)보다 2 m 이상 더 높음을 볼 수 있다(Fig. 3).

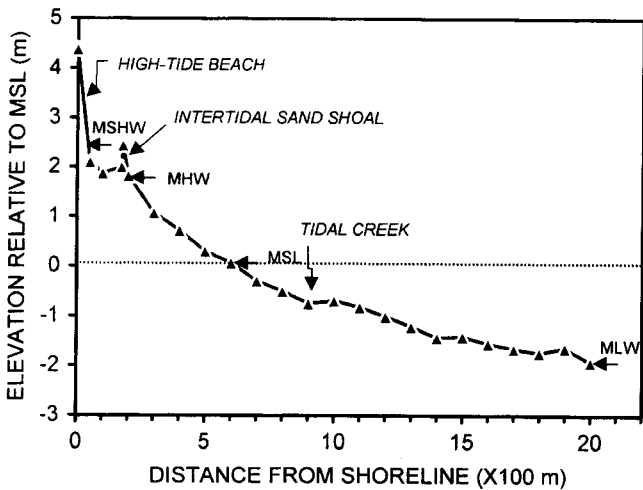


Fig. 3. The Line SM profile. Note the presence of high-tide beach, intertidal sand shoal and shallow tidal creek on the tidal flat. MSHW = mean spring high water, MHW= mean high water, MSL= mean sea level, MLW= mean low water.

표층 퇴적물의 분포 및 입도 특성

Figs. 4a와 4b에는 조간대의 표층 퇴적물에 대한 자갈과 모래의 함량분포가 제시되어 있다. 자갈은 대체로 외만역 조간대(유월리 및 산남리 조간대)보다 내만역 조간대(해운리 조간대)에서 높은 함량을 보인다. 그리고 내만역 조간대의 자갈함량 분포는 사주가 발달하는 일부 지역(해운리 조간대의 저조선 부근)을 제외할 때, 대체로 저조선에서 고조선 방향으로 증가하는

경향을 보이며, 특히 해안절벽이 침식되는 해안에서는 자갈의 함량이 전체 퇴적물의 10% 이상을 차지한다(Fig. 4a). 모래는 대부분의 조간대에서 50% 미만이며, 자갈의 경우와 마찬가지로 주로 내만역 조간대에서 고조선 방향으로 증가하는 경향을 보인다(Fig. 4b). 그러나 대규모의 방조제가 위치하는 외만역 조간대(유월리 및 산남리 조간대)에서는 자갈이 거의 존재하지 않으며, 모래의 함량도 10% 미만이다. 따라서 함평만 조간대의 표층 퇴적물 분포는 전반적으로 외만역에서 내만역 방향으로, 또 저조선에서 고조선 방향으로 조립해지는 경향을 보인다.

Fig. 5에는 표층 퇴적물의 입도에 근거한 퇴적상 분포가 제시되어 있다. 함평만의 조간대 퇴적물은 대체로 5 개의 퇴적상(mud, sandy mud, gravelly mud, gravelly muddy sand, muddy gravel)으로 구분되며, 각각 다음과 같은 특징을 갖는다. (1) 펄질 퇴적상(mud facies): 대규모의 방조제에 의해 해안침식이 제한되는 외만역의 조간대에 광범위하게 분포한다(Fig. 5). 이 퇴적상은 평균 97% 이상의 펄과 3% 미만의 모래로 구성되며, 평균입도는 7.1 Φ , 분급은 2.4 Φ (very poorly sorted)이고, 대체로 양의 값(0.5; strongly fine skewed)의 왜도를 보인다(Table 1). (2) 모래질 펄 퇴적상(sandy mud facies): 주로 내만역의 중·하부 조간대에 분포하며(Fig. 5), 1% 미만의 자갈, 20% 내외의 모래, 79%의 펄로 구성되고, 불량한 분급(3.2 Φ ; very poorly sorted)과 양의 왜도(0.1; fine skewed)가 특징적이다(Table 1). (3) 자갈질 펄 퇴적상(gravelly mud): 내만역의 중·상부 조간대에 넓게 분포한다(Fig. 5). 이 퇴적상은 약 7% 내외의 자갈과 34%의 모래, 그리고 59%의 펄로 구성되며, 불

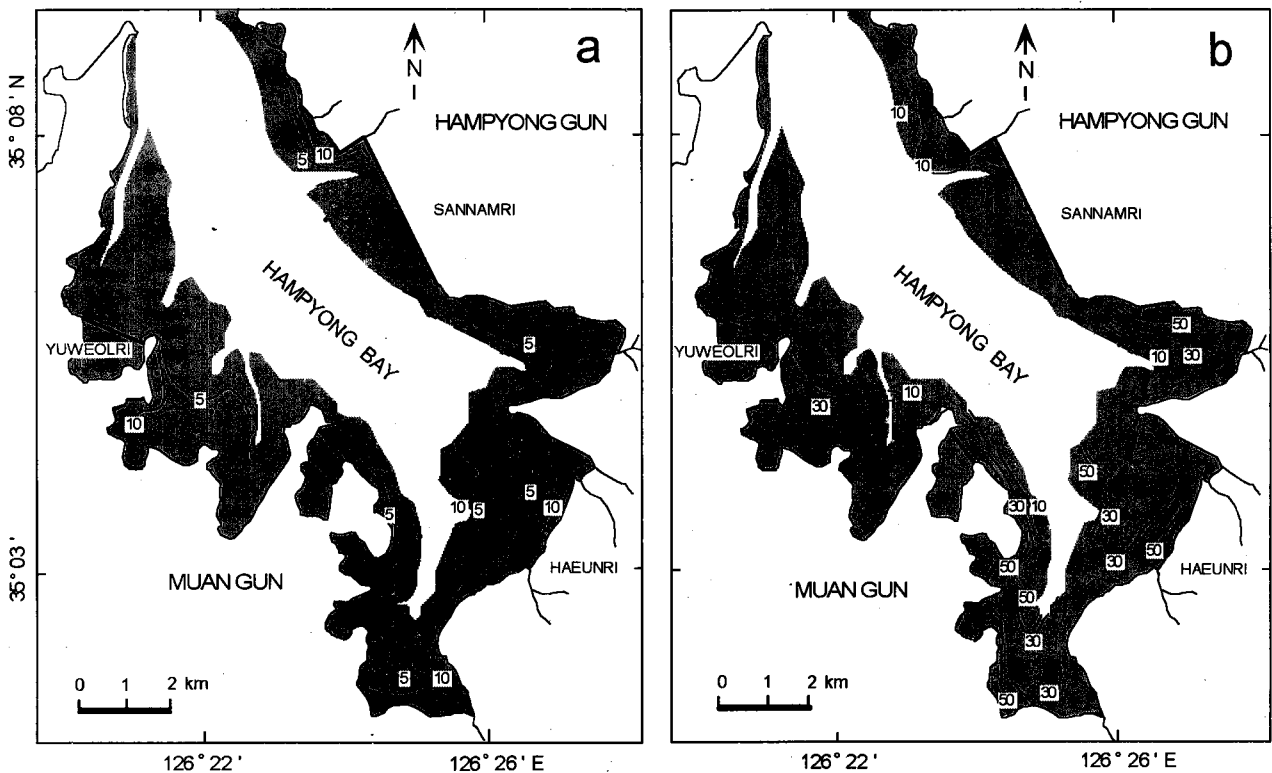


Fig. 4. Distribution of gravel % (a) and sand % (b) in the tidal flat of Hampyong Bay. Note the general increase in gravel and sand contents landward.

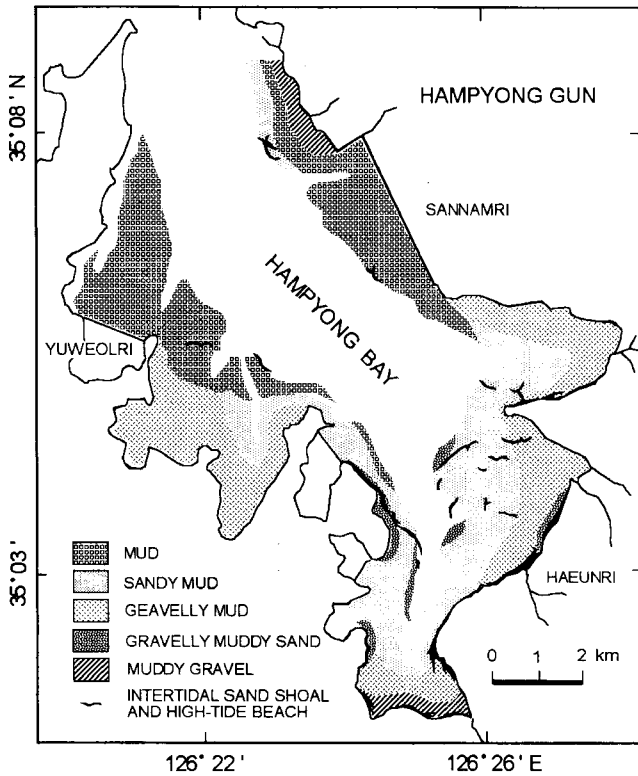


Fig. 5. Distribution of sediment types in the tidal flat of Hampyong Bay.

량한 분급(3.9 Φ ; very poorly sorted)과 양의 왜도(0.1; fine skewed)가 특징적이다(Table 1). (4) 자갈이 포함된 펄질 모래 퇴적상(gravelly muddy sand facies): 해안침식이 우세한 내만역의 상부 조건대와 저조선 부근의 조류로 근처에 주로 분포한다(Fig. 5). 이 퇴적상은 11%의 자갈, 63%의 모래, 26%의 펄로 구성되며, 불량한 분급(3.4 Φ ; very poorly sorted)과 양의 왜도(0.5; strongly fine skewed)가 특징적이다. (5) 펄질 자갈 퇴적상(muddy gravel facies): 해안침식이 우세하고 소규모의 하천이 유입되는 만의 북동부 해안과 남부 해안의 상부 조건대에 제한적으로 분포한다(Fig. 5). 이 퇴적상은 평균 38%의 자갈, 24%의 모래, 38%의 펄로 구성되며, 극히 불량한 분급(4.3 Φ ; extremely poorly sorted)과 양의 왜도(0.5; strongly fine skewed)가 특징적이다(Table 1).

한편, 각 퇴적상에 대한 입도분포를 살펴보면, 펄질 퇴적상에

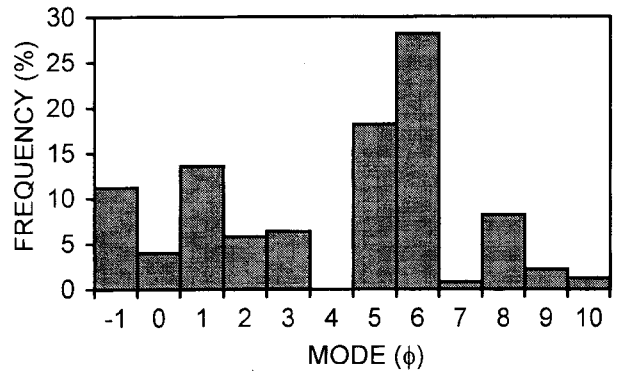


Fig. 6. Histogram showing the modal frequency of each grain-size fraction for the surface sediments of the tidal flat of Hampyong Bay.

서는 대체로 단일모드의 입도분포(68%)가 우세한 반면, 나머지 퇴적상들에서는 모드를 두 개 이상 갖는 복모드형 입도분포가 전체의 80% 이상을 차지한다(Table 1). 그리고 모드는 매우 다양한 입도구간에서 나타나고 있으나, 대체로 펄에서는 6 Φ , 모래에서는 1 Φ , 그리고 자갈에서는 -1 Φ 구간에서 비교적 높은 모드빈도를 보인다(Fig. 6). 따라서 함평만의 조건대 퇴적물은 자갈, 모래, 펄이 매우 다양하게 혼합된 상태에서 퇴적물의 분급이 매우 불량하고(very poorly to extremely poorly sorted), 왜도는 거의 양의 값을 가지며(fine to strongly fine skewed), 퇴적물의 입도분포는 대부분 복모드형으로서 6, 1, -1 Φ 구간에서 특히 높은 모드빈도를 보이는 것으로 요약될 수 있다(Fig. 6).

코어 퇴적물의 수직퇴적상

Fig. 7a는 해안침식이 우세한 내만역 조건대(해운리 조건대)의 지형단면과 코어들을 보여주고 있다. 이 곳의 중·상부 조건대에서는 대체로 자갈이 포함된 펄질 모래층(gravelly muddy sand layer) 위에 모래질 펄층(sandy mud layer)이 얇게 피복되어 있으며(코어 A1, A2, A3; Fig. 7a), 사주와 조류로가 위치하는 하부 조건대에서는 비교적 조립한 자갈질 모래층(gravelly sand layer)이 분포한다(코어 A4, A5; Fig. 7a). 전체적으로 이 곳의 퇴적층에서는 해안침식의 결과로 각진 자갈과 깨각편이 우세하고, 대부분의 퇴적층이 생물에 의해 심하게 교란되어 있어 전 층에 걸쳐 일차퇴적구조가 거의 관찰되지 않는 특징을 보인다(Fig. 7a). 또한 중·상부 조건대의 코어 A2에서는 20 cm 아래에 반고화된 황갈색 펄층이 위치하여, 이 곳의 현세 조건대층이 매우

Table 1. Grain size characteristics of surface sediments in the tidal flat of Hampyong Bay

Sedimentary facies	N	Texture			Statistical parameters				Modal distribution		
		Gravel (%)	Sand (%)	Mud (%)	Mean (Φ)	Sorting (Φ)	Skewness	Kurtosis	Uni- (%)	Bi- (%)	Tri- (%)
Mud	25	0.1	2.5	97.4	7.1	2.4	0.5	0.8	68	32	
Sandy mud	13	0.8	20.7	78.5	6.5	3.2	0.1	0.9	23	54	23
Gravelly mud	7	7.2	33.6	59.1	4.7	3.9	0.1	0.9		71	29
Gravelly muddy sand	7	11.1	62.7	26.2	2.0	3.4	0.5	1.2		71	29
Muddy gravel	3	37.8	24.0	38.2	2.0	4.3	0.5	0.7		67	23
Total average	55	11.4	28.7	59.9	4.5	3.4	0.3	0.9		59	21

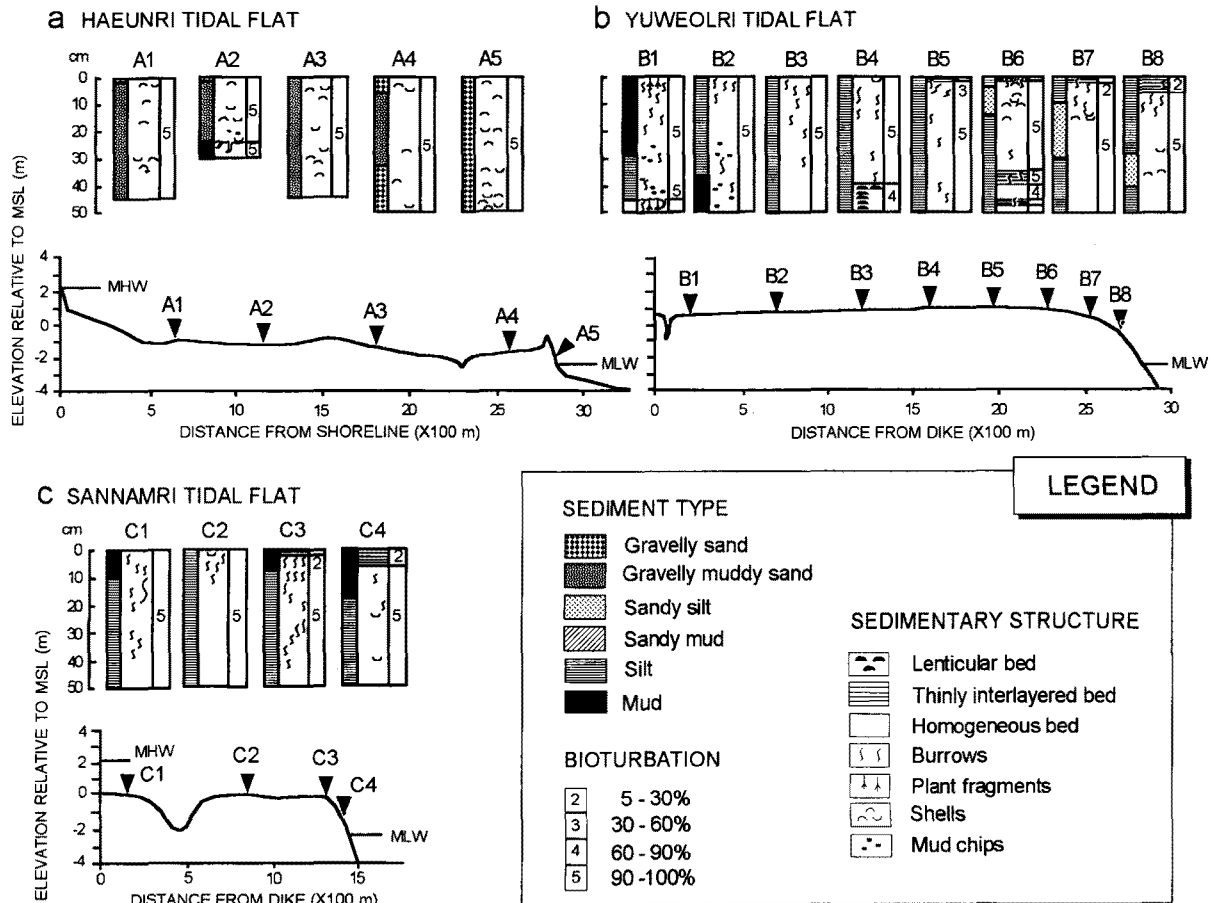


Fig. 7. Graphic summary of PVC cores. (a) Haeunri tidal flat, (b) Yuweolri tidal flat, (c) Sannamri tidal flat.

얇음을 지시한다. 한편 Figs. 7b와 7c는 각각 외만역의 서부(유월리 조간대)와 동부(산남리 조간대)에 위치한 펄질 조간대(mud flat)의 지형단면과 코어들을 보여주고 있다(Fig. 1). 이 곳의 펄질 조간대들은 주로 생물에 의해 심하게 교란된 실트층(silt

Table 2. Summary of accumulation rates in the tidal flat of Hampyong Bay over the one-year period (November 1995-February 1997)

Location	Environment	Station	Distance from shoreline (m)	Elevation from MSL (m)	Annual accumulation rate (mm/yr)
Haeunri tidal flat (Line SM)	upper flat	1	100	1.87	41.9
		2	200	1.82	-457.9
		average			-208.0
	middle flat	3	300	1.07	-7.8
		4	400	0.71	-13.2
		5	500	0.30	-14.7
		6	600	0.06	-19.3
		7	700	-0.30	-29.5
		10	1000	-0.70	-27.2
		11	1100	-0.83	-6.2
	lower flat	12	1200	-1.01	-24.9
		average			-17.9
		14	1400	-1.43	-11.6
		15	1500	-1.41	-11.6
		16	1600	-1.55	-32.6
	total average	18	1800	-1.74	23.0
		19	1900	-1.64	-193.5
		average			-45.3
	Yuweolri mudflat	upper flat	Y	200	1.85
Sannamri mudflat	upper flat	S	50	1.80	-24.9

layer)으로 구성되며, 동시에 하부 조간대의 표층부에서 평행염리 구조가 비교적 잘 발달하는 공통점을 갖는다(Figs. 7a, 7b). 그러나 이들 지역에서는 퇴적상의 수직적 분포, 퇴적구조 등에 있어서 약간의 지역적 차이가 존재한다. 즉, 외만역 서부의 펼질 조간대(유월리 조간대; Fig. 7b)의 경우에는 실트층을 피복하는 펼층의 분포가 상부 조간대에 제한되어 있고, 하부 조간대에서는 실트층 내에 모래질 실트층이 협재하며, 비교적 일차퇴적구조의 발달이 우세한 반면, 동부의 펼질 조간대(산남리 조간대; Fig. 7c)에서는 실트층을 피복하는 펼층의 분포가 상부 조간대에서 하부 조간대까지 비교적 광범위하고, 일차퇴적구조가 거의 발달하지 않는 특징을 보인다(Figs. 7a, 7b).

조간대의 퇴적물

Table 2에는 함평만의 내만역 조간대를 횡단하는 축선 SM과 외만역에 위치한 유월리 및 산남리의 펼질 조간대에 대한 연평균 퇴적율이 제시되어 있다. 축선 SM에서는 상부 조간대의 정점 1(해안에서 100 m 떨어진 지점)과 하부 조간대의 정점 18(해안에서 1,800 m 떨어진 지점)을 제외한 대부분의 정점들이 음의 퇴적을 값을 보여, 축선 SM 지역이 전체적으로 침식이 우세한 지역임을 보여준다(Fig. 3; Table 2). 아울러 축선 SM에서는 중부 조간대에 비해 상부 및 하부 조간대의 침식이 비교적 우세한 편이었고, 특히 상부 조간대의 정점 2(해안에서 200 m 떨어진 지점)와 하부 조간대의 정점 19(해안에서 1,900

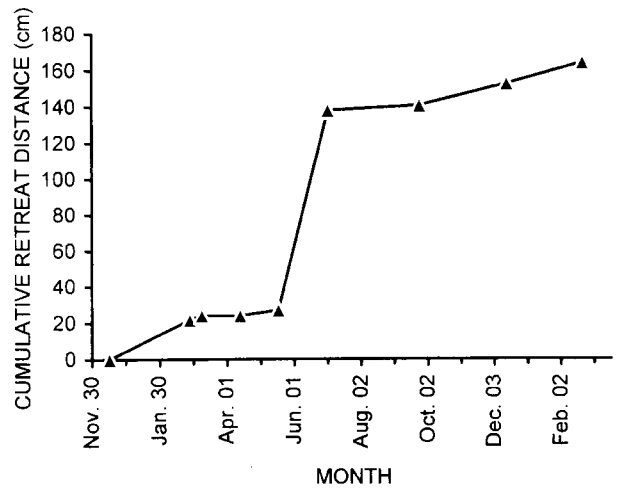


Fig. 9. Cumulative retreat distance of the Simokdong cliff during the period of November 1995-February 1997. Note the highest retreat rate in early summer.

m 떨어진 지점)에서는 조간대 사주의 이동에 의해 매우 높은 침식율을 보였다(Fig. 3; Table 2). 한편 펼질 조간대(mudflat)에서는 지역에 따라 큰 차이를 보였는데, 외만의 서부 해안에 위치한 유월리 조간대에서는 퇴적(75.5 mm/yr)이 우세한 반면, 외만의 동부 해안에 위치한 산남리 조간대에서는 침식(-24.9 mm/yr)이 우세하였다(Fig. 1; Table 2).

Fig. 8은 함평만 조간대 퇴적물의 계절적 퇴적과정을 보여준다. 즉 침식이 우세한 축선 SM과 외만역 동부의 펼질 조간대(산남리 조간대)에서는 주로 봄철(3~5 월)에 크게 침식되었고, 여름에 퇴적되었으며, 겨울에 다시 침식되는 경향을 보였다. 그러나 퇴적이 우세한 외만역 서부의 펼질 조간대(유월리 조간대)에서는 대체로 연중 지속적으로 퇴적되었으며, 퇴적은 특히 봄철(3~5 월)에 우세하였다.

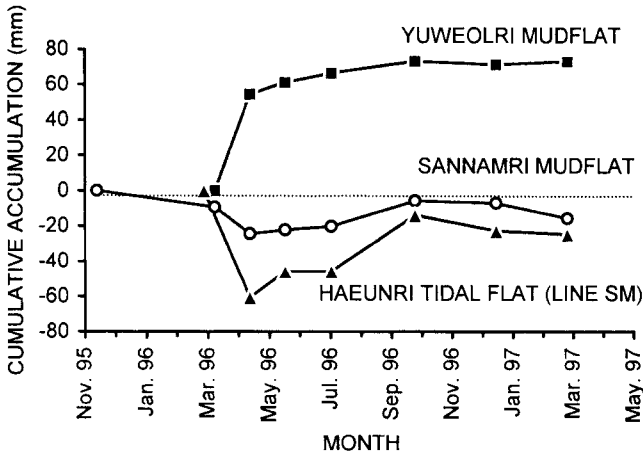


Fig. 8. Temporal variations of sediment accumulation in the study area during the period of November 1995-February 1997. Data of the Haeunri tidal flat (Line SM) represent average values for the 15 stations. Note severe erosion in spring, deposition in summer and slight erosion in winter in the Sannamri and Haeunri tidal flats.

해안절벽의 침식율

심하게 풍화된 화강암질 편마암으로 구성되어 있어 해안침식에 매우 취약한 상태에 있는 함평만의 남동부 해안에는 침식적 해안절벽이 매우 잘 발달되어 있다. 함평만 남동부 해안에 발달된 침식적 해안절벽에 대해 침식율(후퇴율)을 측정된 결과, 해안절벽의 침식이 평균 138 cm/yr의 속도로 이루어지고 있었고, 침식율이 좁은 지역 내에서도 위치에 따라 큰 차이(63~204 mm/yr)를 보였다(Table 3). 아울러 해안절벽이 집중적으로 침식되는 시기는 5~6 월 사이였으며, 여름의 침식율보다는 겨울의 침식율이 다소 높은 것으로 나타났다(Fig. 9).

Table 3. Summary of bimonthly shoreline retreat at Simokdong cliff

Station	Cumulative retreat distance (cm)									Retreat rate (cm/yr)
	95/12/16	96/02/27	96/03/09	96/04/13	96/05/18	96/07/03	96/09/25	96/12/15	97/02/23	
1	0	20	27	27	26	61	61	75	75	63
2	0	41	42	42	42	141	149	158	174	146
3	0	4	4	4	13	211	211	224	243	204
Average	0	22	24	24	27	138	140	152	164	138

토 의

해안침식이 우세한 반폐쇄적 조간대의 퇴적환경 특성

좁은 만 입구에 의해 너울파(swell)의 유입이 차단되는 반폐쇄적 만에서는 퇴적물의 운반과 집적이 주로 조석작용에 의해 조절되는 특징을 보인다. 따라서 반폐쇄적 만에서는 일반적으로 모래질 조간대보다 펄질 조간대의 발달이 우세하고, 조간대 퇴적물은 침식지연(scour lag) 및 퇴적지연(settling lag) 작용에 의해 고조선 방향으로 세립해지는 경향을 보이며(Van Straaten and Kuenen, 1957; Postma, 1961), 전반적으로 사주 퇴적체(beach ridge, swash bar 등)의 발달이 제한되는 특징을 보인다.

그러나 서해안의 함평만 조간대는 만 입구가 매우 좁은 반폐쇄적 만임에도 불구하고 반폐쇄적 조간대의 일반적 특징들이 거의 나타나지 않는다. 즉 함평만 조간대에서는 만 입구의 펄질 조간대를 제외할 때, 대부분의 조간대 지역에서 자갈과 모래의 함량이 높고(Figs. 4a, 4b), 조간대 퇴적물은 불량한 분급, 양의 왜도, 복모드형 입도분포가 특징적이며(Table 1), 퇴적물의 분포 양상은 조간대의 일반적 경향과 반대로 저조선과 만 입구 방향으로 세립해지는 경향을 보인다(Figs. 4, 5). 또한 조간대 내에는 다수의 조간대사주(intertidal sand shoals)가 발달하는 특징을 보인다(Fig. 5). 함평만 조간대의 이러한 독특한 특징들은 주로 해안절벽의 침식에 의해 육상기원의 조립 퇴적물이 직접 조간대 내로 유입되기 때문에 나타난 결과인 것으로 판단된다. 왜냐하면, 함평만에는 1~30 m 높이의 해안절벽들이 해안을 따라 길게 분포하고, 이러한 절벽들은 연평균 63~204 cm/yr 속도로 침식(후퇴)되고 있으며(Table 3), 조간대의 자갈 및 모래는 대부분 각진 상태로서 그 함량이 육지 방향으로 증가하는 경향을 보이기 때문이다(Figs. 4a, 4b). 실제로 함평만 조간대의 주요

퇴적상에 대해 Stewart (1958)의 방법에 의해 퇴적환경을 추정 한 결과, 함평만 조간대의 주요 퇴적상 중 펄질 자갈(mG), 자갈이 포함된 펄질 모래(gmS), 자갈질 모래(gM) 등의 퇴적상들은 현생의 하천, 해변, 저에너지 조간대 등 어떠한 환경영역에도 속하지 않았다(Fig. 10). 따라서 고기의 조간대층에서 이들 퇴적상들이 존재할 경우, 이는 함평만 조간대와 같은 환경적 조건에서 해안절벽이 침식되었음을 반영하는 중요한 단서가 될 수 있다.

한편, 함평만 조간대는 상부방향으로 오목한 지형단면을 보이며, 만조선 부근에는 고조선 해변이, 그리고 조간대 내에는 다수의 조간대 사주가 발달되어 있다(Fig. 3). 그런데 조간대 내에서 고조선 해변과 조간대 사주가 발달하기 위해서는 비교적 가까운 곳으로부터 모래의 공급이 충분해야 하며, 또한 그 곳에는 모래가 이동할 수 있는 적절한 유속이 존재해야 한다. 함평만의 경우, 침식적 해안절벽과 고조선 해변이 조간대 사주를 구성하는 모래의 주요 근원지인 것으로 판단된다. 그런데 고조선 부근의 조류 유속은 거의 0에 가깝기 때문에 고조선 해변의 모래가 이동하기 위해서는 파랑에 의해 야기된 연안류가 존재하여야 한다. 또한 상부방향으로 오목한 조간대의 지형단면은 파랑작용이 우세한 해변의 지형단면과 유사하고, 외해에 대해 직접 열려진 조간대(인천 조간대) 또는 만 입구가 넓어 파랑작용이 상대적으로 우세한 조간대(곰소만 조간대)의 지형단면과도 유사하다(Frey et al., 1989; 장, 1995). 따라서 해안절벽, 만조선 해변, 조간대 사주 등의 존재와 상부방향으로 오목한 조간대의 지형단면은 본 지역이 지역적 풍파(local wind wave)에 의해 크게 영향받고 있음을 시사하며, 이러한 사실들은 조류로 체계의 미발달과도 연계되는 것으로 판단된다. 침식이 우세한 내만역 조간대의 침식을 자료 또한 침식이 주로 봄과 겨울에 진행됨을 보여줌으로써(Table 2; Fig. 8), 조간대의 침식이 대체로 만 입구의 열려진 방향과 일치하는 서북서풍(봄) 또는 북북서풍(겨울)과 관계됨을 나타낸다(Fig. 2).

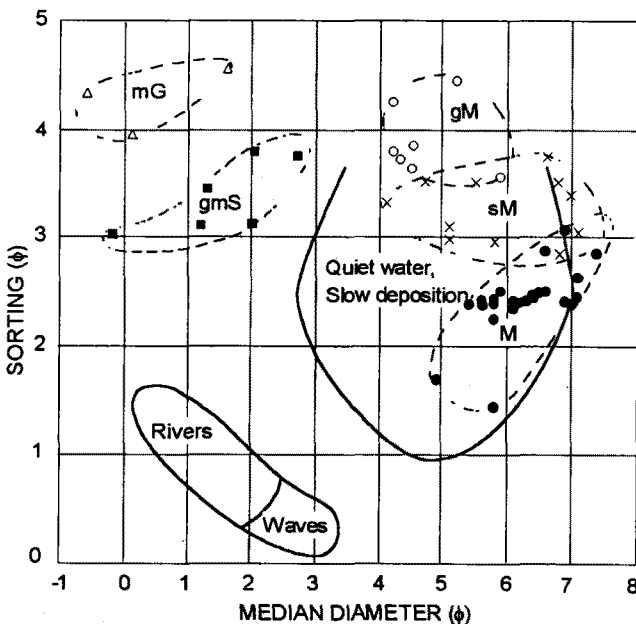


Fig. 10. Median diameter-sorting plots for the surface sediments of the study area (after Stewart, 1958): mG=muddy gravel, gM=gravelly mud, gmS=gravelly muddy sand, sM=sandy mud, M=mud.

반폐쇄적 만의 해안침식 원인

해안침식은 일반적으로 해안절벽을 구성하는 암석의 구조와 암상, 풍화작용 그리고 파랑, 조위 등의 복합적 요인들에 의해 조절되며, 대체로 파랑의 영향을 직접적으로 받는 해안에서 우세하다(Bird, 1984; Davidson-Arnott and Ollerhead, 1995). 함평만의 경우, 반폐쇄적 만임에도 불구하고 해안절벽이 심하게 풍화된 화강암질 편마암으로 구성되어 있고, 만 입구가 만의 장축방향인 서북서 방향으로 열려 서북서풍의 취송거리가 비교적 긴 편이다. 따라서 함평만의 동남동 해안은 해안침식에 비교적 유리한 조건을 갖춘 것으로 판단된다. 그런데 함평만의 해안절벽 기저부는 대부분 평균 해수면으로부터 +3~+4.5 m 높이에 위치하여 대조의 고조선(+2.1 m)보다 높은 고도에 위치하고 있다(Fig. 3). 따라서 해안절벽의 기저부가 침식되고, 이후 중력에 의해 해안절벽이 무너지기 위해서는 적어도 기저부의 고도만큼의 해수면 상승과 파랑작용이 필요하다. 그런데 반폐쇄적 만의 해수면 상승은 기압, 파랑, 조석, 부진동(seiche) 등의 다양한 요인들에 의해 조절되는 것으로 알려지고 있다. Sunamura(1983)는 수학적 접근을 통해 해안절벽의 침식을 야기하는 근본적인 원인이 파랑작용임을 주장하였고, Bokuniewicz and Tanski(1980)는

대부분의 해안침식이 폭풍파와 같은 지역적 격변작용과 해수면 상승의 상호작용에 의해 간헐적으로 이루어진다고 하였다. 따라서 함평만의 해안절벽 침식은 조석, 파랑, 부진동 등의 복합적 요인에 기인한 해수면 상승과 지역적 풍파(wind-driven wave)의 상호작용에 의해 이루어지는 것으로 생각된다.

한편 연구기간 중의 함평만 공간대는 3~5 월에 가장 크게 침식되었고(Fig. 8), 해안절벽은 5~6 월에 가장 크게 후퇴되었다(Fig. 9). 이는 공간대 및 해안절벽의 기저부가 주로 3~5 월에 침식되고, 이후 중력에 의해 해안절벽이 붕괴될 때까지 약 1~2 개월이 소요되기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 주로 3~5 월에 공간대 및 해안절벽 기저부가 크게 침식되는 까닭은 그 시기에 바람의 세기, 우세풍향의 방향(서북서풍), 해수면 상승 등이 종합적으로 중요한 역할을 했기 때문인 것으로 판단된다(Fig. 2).

결 론

1. 함평만 공간대는 상부방향으로 오목한 지형단면을 보이며, 고조선 해빈, 공간대 사주, 조류세곡 등에 의해 소규모의 지형적 기복이 표시된다. 특히 고조선 해빈과 공간대 사주의 존재는 함평만 공간대가 조석작용은 물론 파랑에 의해서도 영향받고 있음을 나타낸다.

2. 공간대 퇴적물은 해안절벽의 침식에 의해 육상으로부터 공급된 조립 퇴적물(자갈, 모래)과 조석작용에 의해 바다로부터 공급된 세립 퇴적물(펄)이 다양하게 혼합됨으로써 불량한 분급, 양의 왜도, 복모드형 입도분포가 특징적이고, 대체로 저조선 방향과 만 입구 방향으로 세립해지는 경향을 보인다.

3. 공간대의 일차퇴적구조는 생물교란작용에 의해 거의 파괴된 상태이며, 퇴적상의 수직적 변화 또한 뚜렷한 경향을 보이지 않는다. 그러나 저조선 부근의 표층에서는 렌즈상층리, 평행엽리 등이 제한적으로 관찰된다.

4. 내만역 공간대는 연평균 52 mm/yr의 속도로 침식되는데, 주로 만 입구의 방향과 우세풍향이 일치하는 3~5 월에 집중적으로 침식된다.

5. 내만역의 해안절벽은 연평균 63~204 cm/yr 속도로 침식(후퇴)되는데, 주로 5~6 월에 가장 크게 후퇴됨으로써 공간대의 최대 침식시기보다 1~2 개월이 지연되는 특징을 보인다.

감사의 글

본 연구는 1998년도 교육부 학술연구조성비(해양과학분야)의 지원으로 수행되었습니다. 시료의 채취 및 분석 과정에서 노력을 아끼지 않은 목포대학교 해양자원학과 학생들과 입도분석에 도움을 주신 광주대학교 양성렬 교수님께 감사드립니다. 아울러 논문의 오류를 지적하신 심사위원, 편집위원장님, 그리고 김승범, 박명숙 편집간사에게도 깊은 감사의 마음을 전합니다.

참고문헌

국립지리원, 1983. 연안해역 기본조사 보고서(범성포 지역). 60 pp. 기상청(Korea Meteorological Administration), 1991. 한국기후포:

제 II권 월별평년값(1961-1990). 418 pp.
 김여상, 1988. 한국 서해 천수만 사장포 해안의 공간대층의 퇴적환경과 진화. 박사학위논문, 서울대학교, 169 pp.
 김진호, 1996. 한국 서해 함평만 현세 조수퇴적층과 선현세 퇴적층의 층서적 연구. 석사학위논문, 서울대학교, 143 pp.
 박용우, 1998. 함평만 조석잔차류와 천해조에 관한 수치실험. 석사학위논문, 전남대학교, 80 pp.
 이진용, 1990. 전남 함평만 공간대 퇴적물의 조직특성에 관한 연구. 석사학위논문, 공주대학교, 27 pp.
 장진호, 1995. 한국 서해안 곰소만 공간대의 퇴적작용. 박사학위논문, 서울대학교, 192 pp.
 장진호, 박용안, 한상준, 1996. 한국 서해안 곰소만 공간대의 제4기 층서와 해수면 변화. 한국해양학회지-바다, 1: 59-72.
 정공수, 박용안, 1978. 남양만 남부 공간대 퇴적환경의 퇴적학적 특성에 관하여. 한국해양학회지, 13: 9-18.
 최강원, 1987. 한국 서해안(경기만, 아산만) 공간대 퇴적층의 층서·퇴적학적 연구. 석사학위논문, 서울대학교, 70 pp.
 한국자원연구소, 1971. 한국지질도(망은도폭), 1:50000. 25 pp.
 Alexander, C.R., C.A. Nittrouer, D.J. Demester, Y.A. Park and S.C. Park, 1991. Macrotidal mudflats of the southwestern Korean coast: a model for interpretation of intertidal deposits. *J. Sediment. Petrol.*, 61: 805-824.
 Bird, E.C.F., 1984. Coasts: An Introduction to Coastal Geomorphology (3rd edn.), Australian National University Press, Canberra, 372 pp.
 Bokuniewicz, H. and J. Tanski, 1980. Managing localized erosion of coastal bluffs. In: Proceedings of Coastal Zone '80, edited by American Society of Coastal Engineering, 3: 1883-1898.
 Davidson-Arnott, R.G.D. and J. Ollerhead, 1995. Nearshore erosion on a cohesive shoreline. *Mar. Geol.*, 122: 349-456.
 Frey R.W., J.D. Howard, S.J. Han and B.K. Park, 1989. Sediments and sedimentary sequences on a modern macro-tidal flat, Incheon, Korea. *J. Sediment. Petrol.*, 59: 28-44.
 Hayes, M.O., 1975. Morphology of sand accumulation in estuaries: an introduction to the symposium. In: Estuarine Research, Vol. II. Geology and Engineering, edited by Cronin, L.E., Academic Press, London, pp. 3-22.
 Klein, G.D., 1975. Tidal sedimentation: some remaining problems. In: Tidal Deposits, edited by Ginsburg, R.N., Springer-Verlag, New York, pp. 407-410.
 Klein, G.D. and J.E. Sanders, 1964. Comparison of sediments from Bay of Fundy and Dutch Wadden Sea tidal flat. *J. Sediment. Petrol.*, 34: 19-24.
 Lee, C.B., Y.A. Park and C.H. Koh, 1985. Sedimentology and geochemical properties of intertidal surface sediments of the Banweol area in the southern part of Kyeonggi Bay. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 20: 20-29.
 Postma, H., 1961. Transport and accumulation of suspended matters in the Dutch Wadden Sea. *Netherlands J. Sea Res.*, 1: 148-196.
 Stewart, H.B.J., 1958. Sedimentary reflections on depositional environments in San Miguel Lagoon, Baja, California, Mexico. *Bull. Ass. Petrol. Geol.*, 42: 2567-2618.
 Sunamura, T., 1983. Processes of sea cliff and platform erosion. In: Handbook of Coastal Processes, edited by Komar, P.D., CRC Press, Boca Raton, pp. 233-265.

- Van Straaten, L.M.J.U. and P.H. Kuenen, 1957. Accumulation of fine grained sediments in the Dutch Wadden Sea. *Geol. Minjnbouw*, **19**: 329–324.
- Wells, J.T., C.E.J. Adams, Y.A. Park and E.W. Frankenberg, 1990. Morphology, sedimentology and tidal channel processes on a high-tide-range mudflat, west coast of South Korea. *Mar. Geol.*, **95**: 111–130.
-
- 1998년 8월 27일 원고 접수
1999년 3월 26일 수정본 채택