

한반도 서해 천수만의 해안선 변화 및 조간대 해변 특성

류상옥^{1,*} · 장진호²

¹전남대학교 지구환경과학부, 500-757 광주광역시 북구 용암동 300

²목포대학교 해양자원학과, 534-729 전남 무안군 청계면 노림리

Characteristics of Tidal Beach and Shoreline Changes in Chonsu Bay, West Coast of Korea

Sang-Ock Ryu^{1,*} and Jin-Ho Chang²

¹Faculty of Earth Systems and Environmental Sciences, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

²Department of Marine Resources, Mokpo National University, Chonnam 534-729, Korea

Abstract: Morphology, surface sediments, sedimentation rates and sea-cliff erosion have been monitored, for one year to investigate the shoreline changes and tidal beach characteristics in Chonsu Bay along the west coast of Korea. The sea-cliff of the bay consists of intensively weathered sedimentary rocks and soft soil, showing an erosion range of -58.9 - -73.3 cm/yr by a weak wave forcing. Active sea-cliff erosions are recognized by peculiar geomorphic features, including saw teeth-shaped coastline, gravels, relict weathered basement-rock and "Island Stack" exposed on the high-tide beach surface. The beach sediments show low compositional maturity at the south and north headlands and gradually high towards the central part. This observation seems to be caused by the fact that beach sediments are to originate from the both headlands in the study area and then transported by long-shore current associated with a wave action.

Keywords: shoreline changes, wave forcing, maturity, longshore current, Chonsu Bay

요약: 한반도 서해 천수만에서 해안선 변화 및 조간대 해변 특성을 조사하기 위하여 1년 동안 지형, 표층퇴적물, 퇴적율과 해안침식의 침식률 등을 조사하였다. 천수만의 해안선은 심하게 풍화된 퇴적암과 풍화토층으로 구성되어 있고 관측결과 -58.9 - -73.3 cm/yr 후퇴하였다. 해안침식을 지시하는 톱날 모양의 해안선, 고조선 해변의 잔석, 침식되지 못하고 남아있는 잔류암핵, 그리고 기위설 모양의 "Island Stack" 등의 여러 가지 특징들이 발견되었다. 한편, 해변 퇴적물의 조성 성숙도는 돌출부에서 안입된 중앙으로 갈수록 성숙된 경향을 보인다. 이는 해변을 구성하는 사질퇴적물의 기원이 남측과 북측의 돌출부에 있음을 의미하며, 침식된 퇴적물은 파랑에 의해 이기된 연안류에 의해 안입된 중앙으로 이동되는 것으로 해석된다.

주요어: 해안선 변화, 외력, 성숙도, 연안류, 천수만

서론

해안은 바다와 육지로부터 동시에 영향을 받는 전이지역(transitional zone)으로서 해변과 조간대, 사구, 습지 등 다양한 환경들이 발달되어 있으며, 이들 환경들은 바다와 육지로부터의 충격을 흡수하여 평형상

태를 유지하기 위해 끊임없이 변화한다. 최근에는 지구온난화에 따른 해수면 상승과 같은 자연적인 요인과 간척과 매립, 갯재 채취 등의 시형 변화에 기인한 조류 속과 방향의 변화, 그리고 이에 따른 해수면의 국지적인 상승 등의 인위적 요인들에 의해 평형상태가 깨지면서 진화의 방향이 더욱 다양하고 복잡해지고 있는 경향을 보인다. 특히, 한반도의 서해안은 계절풍의 영향에 의해 동계에는 폭풍이 빈번하게 발생하고 하계에는 태풍이 간헐적으로 발생하는 매우 역동적인 해양환경으로, 이러한 폭풍과 태풍은 해안침식을 유

*Corresponding author: soryu@chonnam.ac.kr

Tel: 82-62-514-5323

Fax: 82-62-514-5324

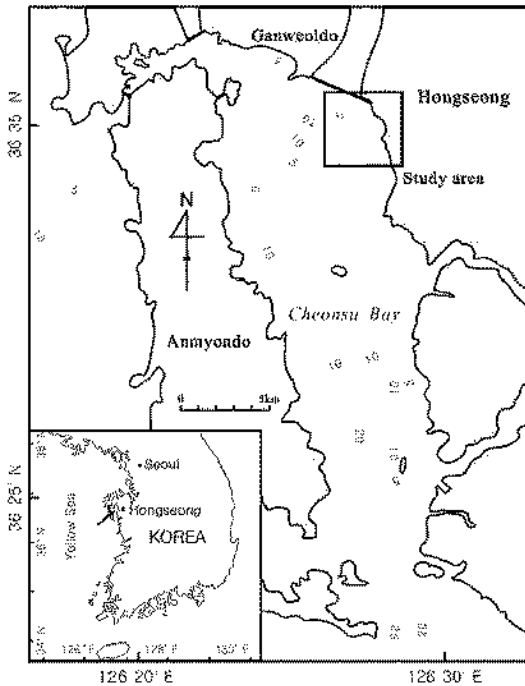


Fig. 1. Location map of Cheonsu Bay showing bathymetry.

발하여 해안선의 후퇴를 야기한다(장 등, 1999; 조 등, 2001, 임 등, 2002; Ryu, 2003).

해안침식은 자연적 또는 인위적 요인에 의해 해안의 토사가 붕괴되어 해안선이 후퇴하는 현상으로, 인명 및 재산의 피해, 농경지 및 백사장 유실, 국민 휴식공간의 상실 등의 공간 및 경제적 자원 손실을 초래한다. 해안침식은 해안 복성에 따른 침식 유형에 따라 백사장 침식과 사구포락, 토사포락, 호안붕괴로 구분된다(해양수산부, 2002; 장 등, 2005). 우리나라의 경우, 동해안은 백사장 침식이 가장 많으며, 남해안은 토사포락 및 호안붕괴가 그리고 서해안은 사구포락 및 토사포락이 주를 이루고 있는 것으로 보고되고 있다(해양수산부, 2002).

연구지역인 천수만은 단입구가 매우 좁고, 남북 방향으로 신장된 반월쇄년 지형 특성을 보인다. 천수만의 해안선은 대부분 해안절벽으로 구성되어 있으며, 해안절벽의 허부 만조선 주변에는 소규모 해빈이 발달되어 있어 토사포락에 의한 해안침식이 활발하게 진행되고 있음을 알 수 있다.

해안침식에 대한 선행 연구는 대부분 해안침식에 의한 해안선 후퇴율과 해안침식의 원인을 규명하는데 중점을 두고 있어(장 등, 1999; 조 등, 2001, 임 등,

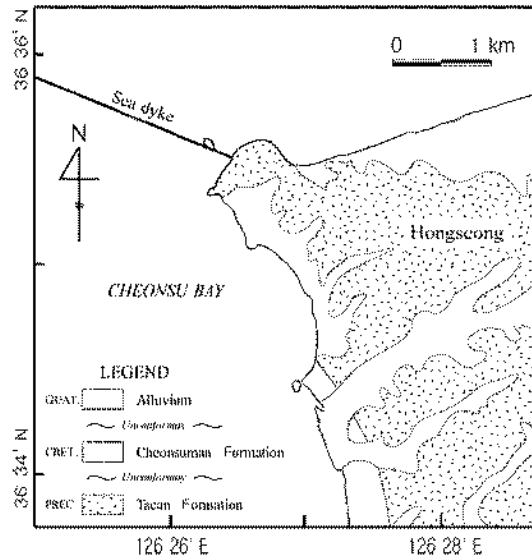


Fig. 2. Map showing geology of Cheonsu Bay area.

2002; Ryu, 2003), 침식된 퇴적물의 이동에 대한 연구는 대단히 미흡하다. 따라서 본 연구에서는 서해안의 천수만을 대상으로 해안침식에 의한 해안선의 후퇴율과 원인을 규명하고, 나아가 침식된 퇴적물의 이동 양상을 밝히려는 연구의 목적이 있다.

지역개관

한반도의 서해안에 위치하는 천수만은 서쪽의 안면도와 동쪽의 육지로 둘러싸인 반월쇄년 만으로서, 폭은 8.0-13.0 km이며 남북의 길이는 37.0 km에 달한다(국립지리원, 1977). 본 조사지역인 궁리(Kung-ri) 해안은 천수만의 북동쪽에 위치하는 초승달(crescent moon) 모양의 해안으로서 서쪽으로 열려 있으며, 북쪽에는 방죽제가 건설되어 간월호(Kanwool Lake)가 존재하고 있다(Fig. 1). 궁리 해안의 서쪽으로는 폭 약 2 km 내외의 조간대가 발달해 있으며, 조간대의 바깥쪽으로는 주조류로(main tidal channel)가 남북 방향으로 발달되어 있고, 주조류로의 수심은 최대 18 m이며 북쪽으로 갈수록 감소하는 경향을 보인다(Fig. 1).

천수만 일대의 지질은 선캠브리아기의 대안층과 쥐라기의 흑운모화강암을 기반암으로 하여, 후기 백악기의 천수만층, 이들 일부를 관입하는 소규모 암맥, 그리고 제4기층으로 구성되어 있다(송무영과 우영균, 1992; 이 등, 1995) (Fig. 2). 연구지역인 궁리 일원은

Table 1. Weather condition of Chonsu Bay, based on annual reports of Korea Meteorological Administration (1993-2002). Note that the averaged wind direction is changed from northwesterly into southerly in the summer season (June to August) with a decrease in wind speed. Precipitation for the three months from June to August comprises approximately half the yearly total

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Averaged temperature (°C)	-1.5	-0.3	4.5	11.1	16.4	21.2	24.8	25.2	20.5	13.9	6.8	0.7
Averaged precipitation (mm/month)	29.7	23.2	41.6	73.0	105.8	158.0	232.6	372.1	129.5	66.4	52.9	25.5
Averaged wind speed (m/s)	2.4	2.4	2.8	2.9	2.7	2.2	2.7	2.3	2.0	1.9	2.1	2.1
Max. wind speed (m/s) and direction (degree)	12.2 NNW	12.1 NW	12.7 NW	13.0 SW	11.5 SW	12.4 SSW	12.3 SW	12.9 SSW	11.8 WSW	10.3 NNW	10.7 NNW	10.5 WNW
Averaged storms (days/month)	0.4	0.5	0.2	0.6	0.0	0.4	0.2	0.4	0.2	0.2	0.1	0.1
Averaged typhoons	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0

천수판층과 태안층이 부정합(unconformity)으로 접하고 있다. 천수판층의 대부분은 천수판의 수면 하에 분포하고, 부분적으로는 천수판의 동측 해안에 침재되어 있으며, 역암과 사암, 화산암으로 주로 구성되어 있다(Fig. 2). 태안층은 천수판의 동측 해안에서 내륙을 따라 분포하며, 주로 사암과 셰일로 구성되어 있다.

간월도와 궁리 사이의 주조류에서 측정된 조석 자료(아세아해양주식회사, 1979)에 의하면 조사지역 주변의 조석은 반일조류(semi-diurnal tide)로 일조부동(diurnal inequality)을 나타내며 소조차는 308 cm, 대조차는 693 cm, 평균조차는 500 cm로서 대조차(macrotidal) 환경에 속한다. 대조시 창조류의 최강유속은 약 110 cm/sec, 낙조류의 최강유속은 약 80 cm/sec로 창조시 최강유속이 낙조시 최강유속보다 강한 창조우세(flood-dominant) 환경이다.

해양환경에 영향을 미치는 하나의 요인으로서 기상 요소별 빈도는 서산기상대에서 1993부터 2002년까지 최근 10년 동안 관측한 자료에 의하면 연평균 기온은 11.0°C이며 강수량은 1310.1 mm로서 주로 여름(6~8월)에 집중된다(Table 1). 바람은 평균 2.4 m/sec로 겨울에는 한랭건조한 북서풍이 여름에는 고온다습한 남풍계열이 우세하다. 풍속 13.9 m/sec 이상의 폭풍일수는 연평균 3.3일로서 주로 겨울에 집중되며 17 m/sec 이상의 태풍은 주로 여름(6~9월)에 집중되어 연평균 1.0회가 조사지역 주변을 통과한다(Table 1).

연구방법

시료 채취 및 분석

연구지역 주변 표층퇴적물의 분포 특성을 조사하기

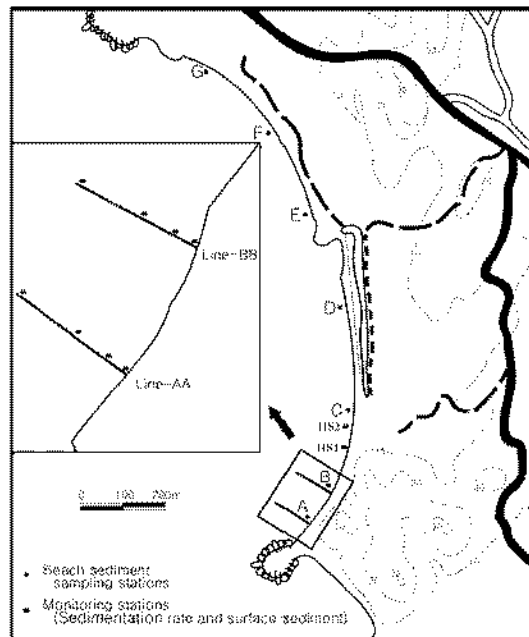


Fig. 3. Map of study area, Cheonsu Bay, showing stations for beach sediment sampling (dots) and the sedimentation rate monitoring along transects AA and BB.

위하여 2003년 8월에 동경 126°26'~126°28'와 북위 36°34'~36°36' 범위 내에서 등 간격으로 34개 정점에서 표층퇴적물을 채취하였다(Fig. 4 참조). 또한 해변 퇴적물의 분포 및 계절적 변화 양상을 조사하기 위하여 육지에서 조간대에 이르는 2개 모니터링 축선(축선-AA, -BB)을 설정하고(Fig. 3), 그 축선 상에서 2003년 5월부터 2004년 5월까지 1년 동안 4회에 걸쳐 표층퇴적물을 채취하였다. 시료채취는 조하대에서 는 채니기(Lafond-type grab sampler)를 이용하였으며,

조간대에서는 표층 1 cm 이내에서 스푼을 사용하여 채취하였다. 그리고 시료채취 지점의 위치는 GPS (GARMIN 100SRVY II, USA)를 사용하여 측정하였다.

퇴적물의 입도분석은 Ingram(1971)의 표준입도분석 방법에 의거하였으며, 퇴적물의 평균입도, 분급도 등의 통계적 입도상수는 Folk and Ward(1957)의 계산식에 의해 구하였다.

한편, 해빈을 구성하는 역과 사의 기원을 추정하기 위해 해안절벽에 노출된 암석과 해빈을 구성하는 역을 채취하여 박편을 제작하고 현미경 관찰을 실시하였다. 또한 해빈 퇴적물의 이동 및 운반에 따른 조성 성숙도(compositional maturity)를 조사하기 위하여 고조선 주변 해빈의 7개 정삼에서(Fig. 3) 표층퇴적물을 채취하여 광물조성을 분석하였다. 표층퇴적물의 광물 조성은 -1-4φ 범위의 사 퇴적물 중 입도에 따라 1φ 간격으로 분리한 후 실체현미경(SV6, Carl Zeiss) 하에서 중요 광물별로 함량비를 구하였다.

수준측량

해빈 및 조간대 지형과 해안선 변화를 파악하기 위하여 해안침식이 활발한 남측 해안절벽 주변에 2개의 모니터링 측선(측선-AA, -BB)을 설정하고(Fig. 3) 4회(2003년 5월, 8월, 그리고 2004년 1월, 5월)에 걸쳐 사진촬영과 함께 수준측량을 실시하였다. 수준측량은 정밀한 광파거리측장기(Topcon GTS-225)를 사용하여 지형적 특징을 달리하는 지점의 고도를 측정하는 방법으로 이루어졌으며, 측선의 출발 기준점 및 각 측점의 고도는 조위면에 근거하여 구하였다. 본 조사에 사용된 측량기기는 3 km의 수평거리에 ± 2 mm의 고도 오차를 갖는다.

퇴적물

해빈 및 조간대의 집적 및 침식양상을 조사하기 위하여 2개 측선(측선-AA, -BB) 상의 8개 정삼과 해안선 주변의 4개 정삼(Fig. 3)에 대해 2003년 5월부터 2004년 5월까지 1년 동안 퇴적물을 측정하였다. 퇴적물의 측정은 해저면 아래의 일정 깊이에 30×30 cm의 아크릴 판을 기준점으로 설치하고, 해저면에서 기준면까지의 깊이를 퍼니아켈리피스를 이용하여 측정하였다. 이때 아크릴판이 물의 침투에 의해 상하로 이동하는 것을 방지하기 위하여 아크릴판 곳곳에 구멍을 뚫었으며, 좌우로 이동되는 것을 방지하기 위해 사 판의 모서리 부분에 구멍을 뚫고 PVC파이프로 고정하였다. 또한 아크릴 판을 설치하기 어려운 곳에는 스테인레스 볼대를 세워 노출된 스테인레스의 길이 변화를 측정하는 방법으로 퇴적물을 측정하였다.

결 과

표층퇴적상

연구지역의 표층퇴적물은 Folk(1968)의 삼각좌표에 도시한 결과 니사질역(msG; muddy sandy gravel), 역니질사(gmS; gravelly muddy sand), 니질사(mS; muddy sand), 사질니(sandy mud), 니(mud)의 5개 퇴적상으로 구분된다(Table 2).

니사질역 퇴적상은 역과 사, 실트, 실트의 함량이 각각 평균 47.6, 29.5, 13.5, 9.4%로 조사지역의 북측과 남측 돌출부(headland) 주변에 제한되어 분포한다(Fig. 4). 역의 대부분 왕자간(cobble)에서 잔자간(pebble) 크기에 해당하며, 판상(oblate)이나 입방체(equan)의 형태로 구형도는 양호하나 원마도는 대단히 불량한

Table 2. Sedimentary facies based on the sedimentary textures

Facies		Textural parameters			Statistical parameters		
		Gravel (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Mean (σ)	Sorting (σ)
msG	Range	30.7-68.1	18.3-38.9	7.5-25.8	6.1-17.3	-0.3-3.2	3.1-4.6
	Aver.	47.6	29.5	13.5	9.4	1.0	3.7
gmS	Range	2.6-28.4	36.9-89.2	5.3-29.4	2.9-11.9	1.8-3.2	1.6-4.2
	Aver.	16.6	58.0	17.0	8.6	2.4	3.3
mS	Range	0	49.7-82.0	10.7-31.7	7.3-20.6	3.0-4.8	2.1-3.8
	Aver.	0	67.9	19.3	12.8	3.7	3.0
sM	Range	0	47.0-59.6	31.1-33.1	7.3-21.9	3.6-5.5	2.6-2.7
	Aver.	0	53.3	32.1	14.6	4.6	2.6
M	Range	0	2.1-5.1	45.4-66.0	31.7-51.3	7.1-8.2	2.0-2.6
	Aver.	0	3.1	53.1	43.8	7.8	2.3

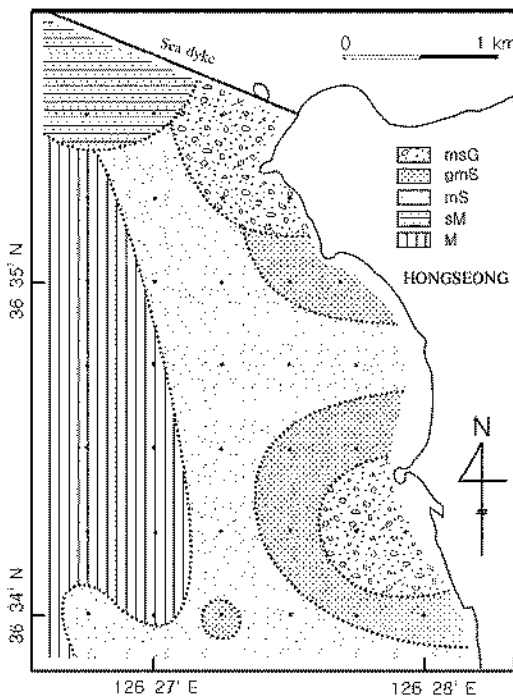


Fig. 4. Spatial distribution of surface sediment in the study area.

경향을 보인다. 퇴적물의 평균입도는 $-0.3\sim 3.2\phi$ 범위를 나타내며, 분급은 $3.1\sim 4.6\phi$ 범위로 조사지역 퇴적물 중 가장 불량한 경향을 보인다(Table 2). 역나질사 퇴적상은 역과 사, 실트, 점토의 함량이 각각 평균 16.6, 58.0, 17.0, 8.6%로 북측 돌출부 남단과 남측 돌출부 나사질역 주변에 분포한다(Fig. 4). 퇴적물의 평균입도는 $1.8\sim 3.2\phi$ 범위, 분급도는 $1.6\sim 4.2\phi$ 범위로 대단히 불량하다(Table 2). 나질사 퇴적상은 사와 실트, 점토의 함량이 각각 평균 67.9, 19.3, 12.8%로 북과 남측 돌출부 사이를 포함한 조간대에 광범위한 분포를 보인다(Fig. 4). 퇴적물의 평균입도는 $3.0\sim 4.8\phi$ 범위, 분급도는 $2.1\sim 3.8\phi$ 범위로 대단히 불량하다(Table 2). 사질나 퇴적상은 사와 실트, 점토의 함량이 각각 평균 53.3, 32.1, 14.6%로 북측 방조제 주변에 협소한 분포를 보인다(Fig. 4). 퇴적물의 평균입도는 $3.6\sim 5.5\phi$ 범위, 분급도는 $2.6\sim 2.7\phi$ 범위로 대단히 불량하다(Table 2). 니 퇴적상은 사, 실트, 점토의 함량이 각각 평균 3.1, 53.1, 43.8%로 조하대를 중심으로 광범위한 분포를 보인다(Fig. 4). 퇴적물의 평균입도는 $7.1\sim 8.2\phi$ 범위, 분급도는 $2.0\sim 2.6\phi$ 범위로 대단히 불량하다(Table 2).

표층퇴적물의 공간분포

Fig. 5는 역과 사 함량의 공간 분포를 도시한 것이다. 역의 함량은 북측과 남측 돌출부 주변에서 50% 이상으로 최대 값을 보이며, 방사상으로 급격히 감소하여 돌출부 주변에 제한되어 분포하는 특징을 보인다. 사는 조간대와 조하대가 접하는 급경사면을 중심으로 조간대에서는 30~90% 범위로 높은 함량을 보인 반면, 조하대에서는 30% 미만으로 낮은 함량 분포를 보인다. 조간대에서는 북측과 남측 돌출부 주변에서 30% 미만으로 최소 값을 보이며, 북측 돌출부에서는 남측을 따라, 그리고 남측 돌출부에서는 북측을 따라 뚜렷하게 증가하는 양상을 보인다(Fig. 5).

한편, 퇴적물의 평균입도는 역과 사의 함량 분포에 의해 좌우되어 북측과 남측 돌출부 주변에서 1ϕ 이내로 가장 조립한 양상을 보이며, 바다 쪽으로 갈수록 세립해지는 경향을 보인다(Fig. 6). 그러나 북측과 남측 돌출부 사이의 만입부에서는 돌출부 주변에 비해 상대적으로 세립한 양상을 보인다. 퇴적물의 분급은 사와 니가 비교적 균질한 분포를 보이는 해변의 만입부와 조하대에서 2ϕ 내외로 비교적 양호한 경향을 보인 반면, 돌출부 주변에서는 4ϕ 내외로 대단히 불량한 경향을 보인다(Fig. 6).

조간대 지형

Fig. 7은 연구지역 조간대의 지형 단면을 도시한 것이다. 연구지역의 조간대는 크게 고조선 주변 해변(high-tide beach)과 그 하부의 니질 조간대(mud flat)로 구분할 수 있다. 측선-AA는 남측 돌출부의 남쪽에 위치하는 측선으로 고조선 주변 해변은 수평거리 20.70m에 고도 2.82m로 7.76°의 급경사의 기울기를 보이며, 위쪽으로 오목한 지형 단면을 보인다. 니질 조간대는 수평거리 79.30m에 고도 0.89m로 0.64°의 완경사의 기울기를 보이며, 평탄한 지형 단면을 보인다(Fig. 7A). 한편, 측선-BB는 남측 돌출부의 북쪽에 위치하는 측선으로 고조선 주변 해변은 수평거리 23.00m에 고도 3.94m로 9.72°의 급경사의 기울기를 보이며, 위쪽으로 오목한 지형 단면을 보인다. 니질 조간대는 수평거리 73.20m에 고도 0.85m로 0.66°의 완경사의 기울기를 보이며, 평탄한 지형 단면을 보인다(Fig. 7B).

해빈 및 조간대 퇴적물의 분포

2003년 5월에 2개의 측선(측선-AA, -BB)에서 채취·

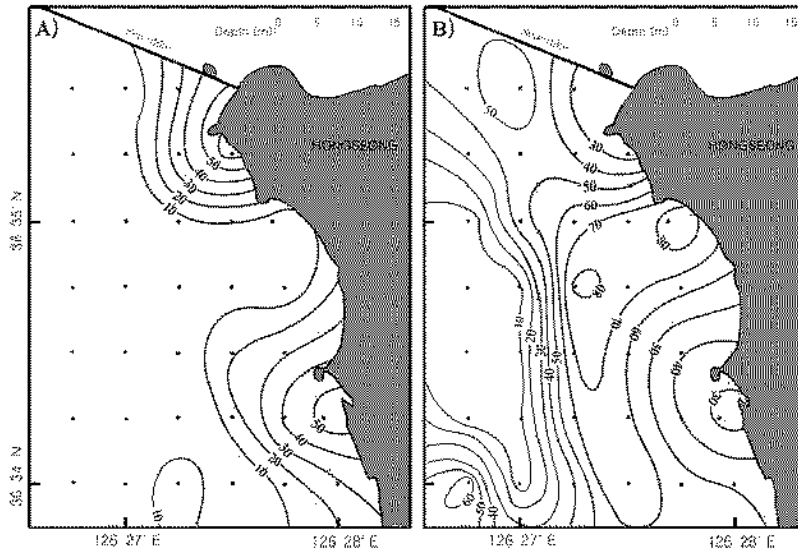


Fig. 5. Contour maps showing gravel (A) and sand (B) content of surface sediment in the study area.

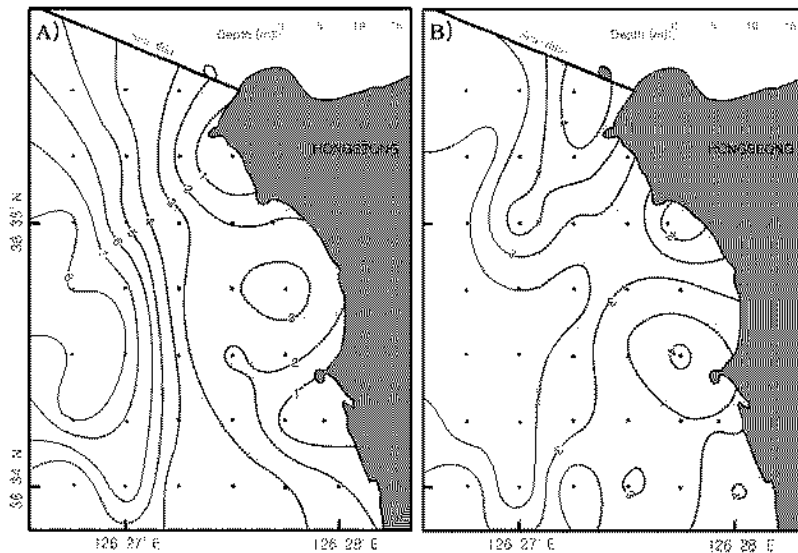


Fig. 6. Contour maps showing mean (A) and sorting (B) content of surface sediment in the study area.

분석된 표준퇴적물에 대한 입도분포 특성을 Fig. 8에 도시하였다. 축선-AA의 경우, 해안선 주변에는 평균 입도 -4φ 내외의 왕자갈들(역: 99.7%, 사: 0.3%)이 분포하며, 해안선에서 약 20 m 주변에는 -1φ 내외의 왕모래들(역: 37.2%, 사: 55.0%, 실트: 4.5%, 점토: 3.3%)이, 그리고 해안선에서 50 m와 100 m 주변에는 평균입도 3-4φ 범위의 세립모래들(역: 2.2%, 사: 47.8%, 실트: 36.5%, 점토: 13.5%)이 분포하여 해안선에서

바다 방향으로 갈수록 뚜렷하게 세립해지는 경향을 보인다(Fig. 8A). 축선-BB의 경우, 해안선 주변에는 평균입도 -4φ 내외의 왕자갈들(역: 98.9%, 사: 1.1%)이 분포하며, 해안선에서 약 20 m 주변에는 -2φ 내외의 잔자갈들(역: 47.6%, 사: 51.2%, 실트: 0.9%, 점토: 0.3%)이, 그리고 해안선에서 50 m와 100 m 주변에는 평균입도 3-4φ 범위의 세립모래들(역: 1.7%, 사: 52.6%, 실트: 32.1%, 점토: 13.6%)이 분포하여 축선

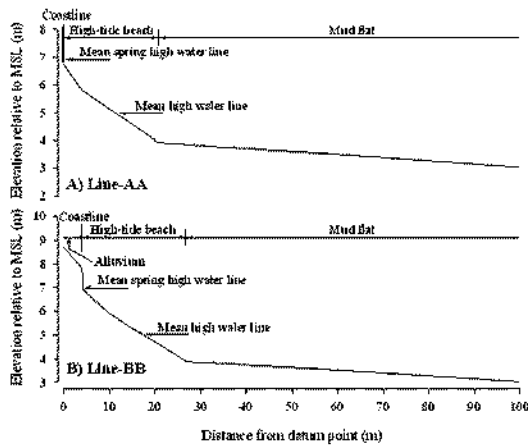


Fig. 7. Elevation feature of lines (Line-AA, -BB) transecting the tidal flat of Cheonsu Bay.

AA와 동일하게 해안선에서 바다 방향으로 갈수록 뚜렷하게 세립해지는 경향을 보인다(Fig. 8B). 한편, 표층퇴적물의 분급은 측선-AA에서 0.6~3.0φ 범위, 측선-BB에서 0.7~3.1φ 범위로 나타났으며, 해안선에서 바다 방향으로 갈수록 분급이 불량해지는 경향을 보였다(Fig. 8).

해안절벽의 침식률

해안절벽의 침식률을 조사하기 위하여 2개 측선(측선-AA, -BB)에서 약 1년 동안(2003년 5월부터 2004

년 5월까지) 4회에 걸쳐 모니터링한 결과, 해안선의 후퇴율은 평균 -66.1 cm/yr의 속도로 이루어지고 있었고, 측선-AA 보다는 측선-BB에서 빠르게 후퇴하는 경향을 보였다(Table 3). 측선 AA의 경우, 2003년 6월부터 8월까지 86일 동안에는 -18.2 cm가 후퇴하여 -2.12 mm/day의 변화율을 보였으며, 2003년 9월부터 2003년 12월까지 138일 동안에는 -25.6 cm가 후퇴하여 -1.86 mm/day의 변화율을, 그리고 2004년 1월부터 5월까지 137일 동안에는 -14.5 cm가 후퇴하여 -1.06 mm/day의 변화율을 보여 6월과 8월 사이에 후퇴속도가 가장 빠른 것으로 나타났다(Fig. 9A). 측선 BB에서는 2003년 6월부터 8월까지는 -21.7 cm가 후퇴하여 -2.52 mm/day의 변화율을 보였으며, 2003년 9월부터 2003년 12월까지는 -32.6 cm가 후퇴하여 -2.36 mm/day의 변화율을, 그리고 2004년 1월부터 5월까지 -18.2 cm가 후퇴하여 -1.33 mm/day의 변화율을 보여 측선-AA와 유사하게 6월과 8월 사이에 후퇴속도가 가장 빠른 것으로 나타났다(Fig. 9B).

해빈 및 조간대 퇴적물의 집적 및 침식 양상

조사지역의 해빈과 조간대에서 약 1년(2003년 5월 30일부터 2004년 5월 26일까지) 동안 모니터링한 결과 퇴적율은 측선-AA에서 +2.0 mm로 퇴적되는 반면, 측선-BB에서는 -12.7 mm로 침식되는 경향을 보였다(Table 4). 해안선 주변에 해당하는 측선 상의 정점

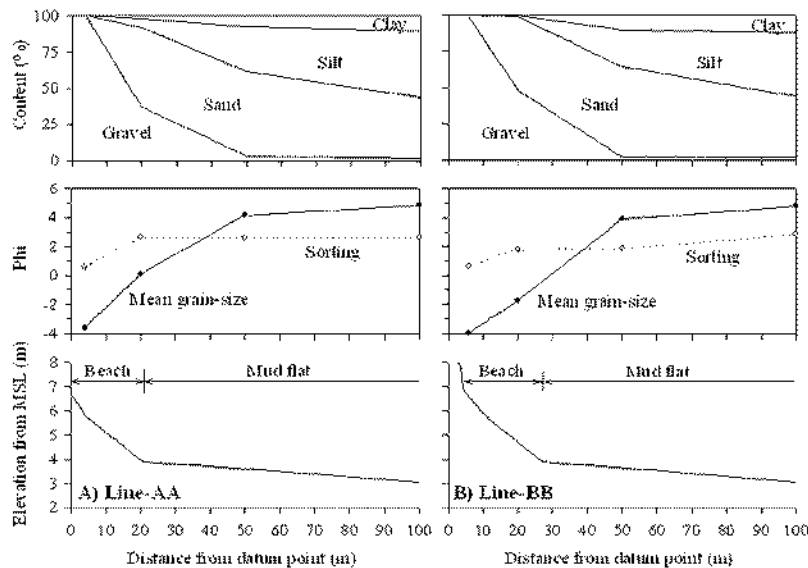


Fig. 8. Surface textural and statistical parameters of lines (Line-AA, -BB) across the tidal flat of Cheonsu Bay in May 2003.

Table 3. Summary of shoreline retreat in each monitored sites during 2003-2004

Station	Retreat distance (cm)			ΔD (cm)	Duration (day)	Retreat rate (cm/yr)
	6/03-8/03	9/03-12/03	1/04-5/04			
Line-AA	-18.2	-25.6	-14.5	-58.3	361	-58.9
Line-BB	-21.7	-32.6	-18.2	-72.5		-73.3
Average	-20.0	-29.1	-16.4	-65.4		-66.1

Negative value indicates shoreline retreat.

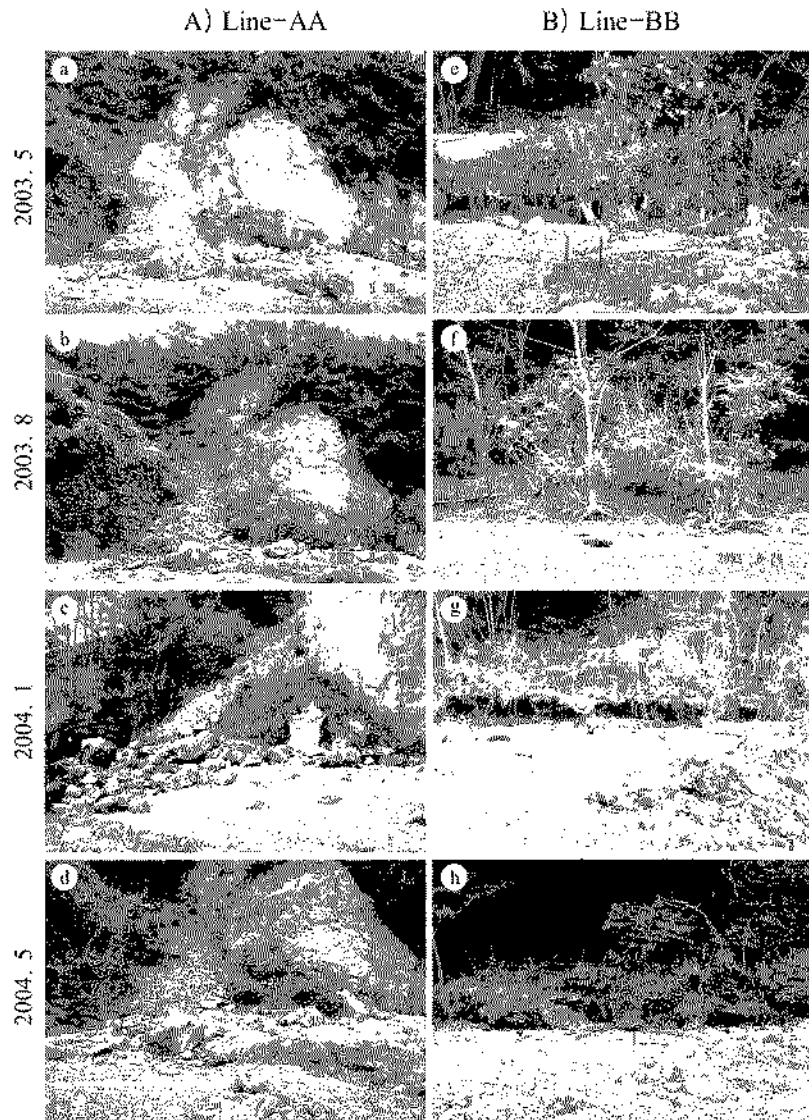


Fig. 9. Field photographs showing seasonal change of sea-cliff face in the monitored sites.

AA1과 BB1에서는 6월부터 12월까지는 퇴적되고 1월부터 5월까지는 침식되어 각각 +44.1 mm와 +24.4 mm로 퇴적되는 경향을 보였다. 그 밖의 정점에서는

계절에 따라 침식과 퇴적이 교호되는 양상을 보였으나 전체적으로는 -57.2~5.1 mm 범위 내에서 침식되는 경향을 보였으며, 침식률은 바다 방향에서 감소

Table 4. Sedimentation rates on the beach and tidal flat of the study area during 2003-2004

Station	Distance (m)	Bed level change (mm)			ΔD (mm)	Duration (day)	Sedimentation rate (mm)
		6/03-8/03	9/03-12/03	1/04-5/04			
AA1	4	-21.9	-45.8	-23.6	-44.1	361	-2.0
AA2	20	-2.3	-1.0	-16.5	-17.8		
AA3	50	-6.5	-9.3	-2.6	-13.2		
AA4	100	-7.2	-4.6	-6.7	-5.1		
BB1	6	-2.2	-163.7	-141.5	-244	361	-12.7
BB2	20	-22.2	-42.0	-77.0	-57.2		
BB3	50	-7.6	-3.1	-1.0	-5.5		
BB4	100	-1.0	-13.5	-0.1	-12.6		
HS1	3	-98.0	-94.0	-64.0	-60.0	361	-38.5
HS2	7	-11.0	-10.7	-16.6	-16.9		

ΔD=cumulative accumulation or erosion between the initial and the last measurements.

Table 5. Mineral composition and maturity of sandy sediments in beach

Station	Mineral Composition (%)					Maturity*
	Quartz	Feldspar	Mica	Rock fragment	Others	
A	72.2	4.7	6.6	10.3	6.2	3.3
B	71.0	7.4	6.5	8.2	6.9	3.2
C	78.6	8.9	3.0	6.1	6.9	4.4
D	85.2	5.8	3.6	3.3	2.1	6.7
E	86.3	4.7	4.0	2.3	2.7	7.9
F	85.6	6.3	3.4	2.7	2.0	6.9
G	79.2	3.8	2.1	10.3	4.6	4.9
Average	79.7	5.9	4.2	6.2	4.0	5.3

*Maturity: quartz/(feldspar + mica + rock fragments)

하는 경향을 보였다(Table 4). 한편, 해안선 주변에 설치된 2개 정점(HS1, HS2)의 퇴적물은 평균 128.5 mm로 퇴적되어 육선 상의 해안선 주변 정점 AA1, BB1과 같은 양상을 보였다. 그러나 계절적으로는 육선 상의 해안선 주변 정점 AA1, BB1과는 다르게 1월에서 5월 사이에 뚜렷하게 퇴적되는 경향을 보였다(Table 4).

해빈 퇴적물의 광물조성 및 성숙도

Table 5는 연구지역 해빈의 7개 정점(정점 A, B, C, D, E, F, G; Fig. 3 참조)에서 채취·분석된 사질 퇴적물의 광물조성 및 성숙도를 나타낸 것이다. 사질 퇴적물의 광물조성은 석영이 평균 79.7%, 장석이 5.9%, 운모가 4.2%, 암편이 6.2%, 기타(대립암 종광물)가 4.0%로 석영의 구성비가 전체적으로 높게 나타났다. 한편, 풍화에 강한 광물로 구분되는 석영(quartz)의 구성비는 해빈의 양 끝 돌출부(headland) 주변에서 72.2%와 79.2%로 낮은 함량을 보이고, 반

입된 중앙으로 갈수록 높아져 최대 86.3%에 이른다. 반면, 풍화에 약한 광물로 구분되는 암편(rock fragment)의 함량은 석영의 구성비와는 반대로 해빈의 양 끝 돌출부 주변에서 각각 10.3%로 높은 함량을 보이고, 반입된 중앙으로 갈수록 낮아져 최소 2.0%에 이른다. 이에 따라 석영/(장석 + 운모 + 암편)의 구성비로 계산되는 퇴적물의 성숙도지수는 남측 돌출부 주변에서 3.3과 3.2로 낮아 미성숙된 경향을 보이고, 북쪽을 따라 가면서 증가하여 반입된 중앙에서 7.9로 과성숙된 경향을 보이며, 다시 북쪽을 따라 가면서 감소하여 4.9로 상대적으로 미성숙된 경향을 보인다(Table 5).

토 의

해안선 변화

해안선의 변화는 일반적으로 해안선을 구성하는 암석의 구조와 암상, 풍화정도, 해수면의 높이, 해안절

벽의 기저부에 도달하는 파랑의 침식력, 그리고 해변의 규모 등에 의해 조절되며, 대체로 파랑의 영향을 직접적으로 받는 해안에서 우세하다(Horikawa and Sunamura, 1967; Bird, 1984; Moon and Healy, 1994; Davidson-Arnott and Ollerhead, 1995). 천수만의 경우, 반폐쇄된 만 입에도 불구하고 해안절벽이 심하게 풍화된 역암과 사암, 화산암, 그리고 연약한 풍화토층으로 구성되어 있어 작은 외력에도 쉽게 침식될 것으로 판단된다. 실제로 연구지역의 해안선은 해안절벽을 구성하고 있는 지질의 특성에 따라 나타나는 차별침식에 기인하여 굴곡이 심하고 울퉁불퉁한 톱날 모양의 지형(saw tooth-shaped geomorphology)을 이루고 있을 뿐 아니라 천수만의 북동측 궁리 해안에서 약 1년 동안의 관측한 결과 해안선 후퇴율이 평균 -66.1 cm/yr 로 비교적 빠르게 후퇴하고 있다 (Table 3), 이와 같은 침식현상을 뒷받침하고 있다.

또한, 해변에서는 평균입도 4ϕ 내외의 전석들과 해안절벽이 후퇴하면서 완전히 침식되지 못하고 남아 있는 풍화에 강한 잔류 암석들(relict weathered rock) (Fig. 10a), 그리고 바위섬 모양의 Island Stack (Fig. 10b) 등이 관찰되는데, 이는 해안절벽의 침식을 지시하는 특징적인 증거가 된다. 해변에서 관찰되는 잔류 풍화기반암들의 흔적은 해변으로부터 해안절벽까지 수 십 m 거리에서 연속적으로 연결되어 나타나며, Island Stack은 해안절벽으로부터 수 십 m 떨어진 곳에 고립되어 존재한다. 이는 해안절벽의 활발한 해안 침식 활동과 과거 해안선의 위치 및 후퇴량을 추정할 수 있는 중요한 지형 특성으로 해안침식이 활발히 진행되어 왔고, 그 결과 해안선이 유지 방향으로 크게 후퇴하고 있음을 보여주는 좋은 잔류흔적(residual fingerprint)들로 제시된다(Pellick, 1984; 임 등, 2002).

한편, 해안선의 후퇴율은 좁은 지역 내에서도 위치와 계절에 따라 차이를 보였다. 남측 돌출부의 남쪽에 위치하는 측선-AA가 횡단하는 해안은 평균 -58.9 cm/yr 의 후퇴율을 보였으나, 남측 돌출부의 북쪽에 위치하는 측선-BB가 횡단하는 해안은 평균 -73.3 cm/yr 로 남측 해안에 비해 후퇴율이 크게 나타났다 (Table 3). 이와 같은 현상은 해안선을 구성하는 암질의 차이에 기인하는 것으로 남쪽은 비교적 풍화가 덜된 옅은 갈색의 풍화토층으로 이루어진 데 반해, 북쪽은 심하게 풍화된 갈색 또는 황갈색의 풍화토층으로 구성되어 있어 (Fig. 9) 상대적인 차이를 나타내

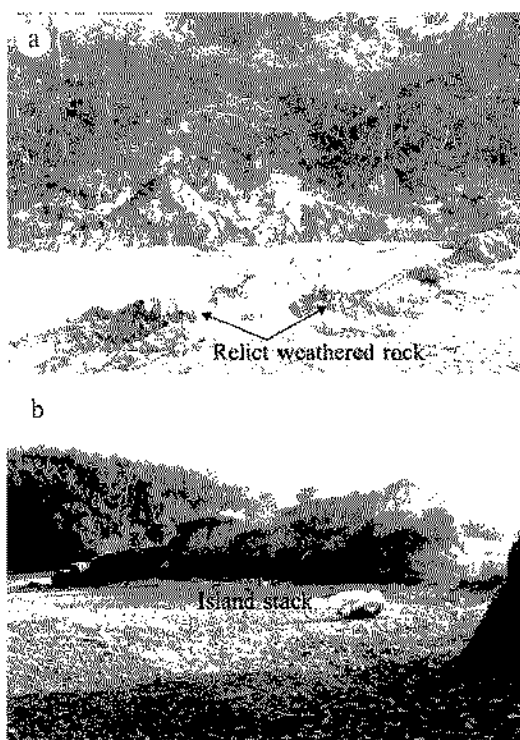


Fig. 10. Field photographs showing various geomorphic features from the Cheonsu Bay coastline.

는 것으로 판단된다. 계절에 따라서는 2개의 측선 모두 6-8월 사이에 가장 빠르게 후퇴하는 경향을 보였다 (Table 3). 이와 같은 현상은 대조평균만조선(MSHWL)에 위치한 풍화토층의 해안절벽 기저부가 여름철에 상대적으로 높아진 해수면 변화 때문에 적은 외력에도 쉽게 침식되는 것으로 판단된다 (Fig. 9). 따라서 조사기간 동안 연구지역에 태풍의 영향이 미치지 않았음을 고려할 때 여름에 간헐적으로 발생하는 태풍이 연구지역에 영향을 미쳤을 때는 관측된 값보다 훨씬 큰 규모로 해안선이 후퇴할 것으로 예측되며 (Bokuniewicz and Tanski, 1980; Sunamura, 1983; Phillips, 1999), 이러한 결과는 함평만에서 장 등 (1999)과 임 등 (2002)에 의해 보고된 바 있다.

조간대 해빈의 특성

한반도의 서해안은 평균조차 4m 이상의 대조차 환경으로 크고 작은 조간대가 잘 발달되어 있다. 일반적으로 조석이 우세한 조간대에서는 간조선 부근에 조립질 퇴적물이, 그리고 만조선 부근에 세립질 퇴적

물이 퇴적되어 퇴적상의 분포가 육지 방향으로 세립해지는 경향을 보인다(Evans, 1965; Reineck, 1967; 정공수와 박용안, 1978; Yeo and Risk, 1981; Kim and Park, 1983; 이일상, 1986). 그러나 서해안의 짧은 조간대는 만조선에서 간조선 방향으로 세립해지는 경향을 보일 뿐 아니라 역과 사의 함량이 높고 분급이 불량하며, 다수의 조간대사주(intertidal sand shoals)와 고조선 해변(high-tide beach)이 발달하는 등 조간대 퇴적물의 일반적인 분포 특징과는 다른 양상을 보인다(장 등, 1999; 류 등, 1999). 이러한 독특한 특징들은 해수면의 높이가 상승하는 여름철이나 태풍, 폭풍 등과 같은 비정상적인 풍파(wind-driven wave)가 발생하는 시기에 해안절벽이 주로 침식되어 조간대로 조립질 퇴적물을 공급하기 때문으로 파악이 해안침식 및 퇴적물의 분포에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Bokuniewicz and Tanski, 1980; Sunamura, 1983; 전동철, 1995; Phillips, 1999; 장 등, 1999; 임 등, 2002; Ryu, 2003). 연구지역의 경우도 실제로 해수면이 높아지는 여름과 폭풍이 자주 발생하는 겨울에 해안절벽의 침식율이 상대적으로 높게 나타났으며(Table 3), 해변 지형 또한 파랑이 우세한 지형 단면의 특징인 위쪽으로 오목한 지형 단면을 보이고 있어(Fig. 7) 파랑이 연구지역의 해변 및 조간대 퇴적작용에 중요한 역할을 하고 있는 것으로 판단된다.

한편, 해변 퇴적물의 광물조성에 따른 퇴적물의 성숙도는 해변의 양 끝단 돌출부(headland) 주변에서 낮아 미성숙된 경향을 보이고, 만입된 중앙으로 가면서 증가하여 과성숙된 특징을 보인다(Table 5). 이와 같은 현상은 연구지역의 해변을 구성하는 사질퇴적물의 기원이 남쪽과 북쪽에 있음을 시사하는 것으로, 연구지역의 해변퇴적물은 남쪽과 북쪽의 돌출부로부터 침식되어 파랑에 의해 야기된 연안류(longshore current)에 의해 만입된 중앙으로 이동되면서 불안정한 광물이 제거되어 성숙도가 증가하는 것으로 판단된다(Fig. 11). 일반적으로 퇴적물의 조성 성숙도는 기원지에서의 풍화작용이나 재동 및 운반의 정도를 반영하는 중요한 지표가 된다. 기원지에서 가까운 곳에 퇴적되거나 풍화작용을 심하게 받지 않고 급격히 운반된 경우에는 미성숙 퇴적물이 생성되며, 이와는 상반되게 극심한 풍화작용과 심한 미모 및 재동에 의해 모든 불안정한 광물이 제거되는 경우에는 과성숙 퇴적물이 생성된다(박 등, 1994; 조 등, 1995; 류

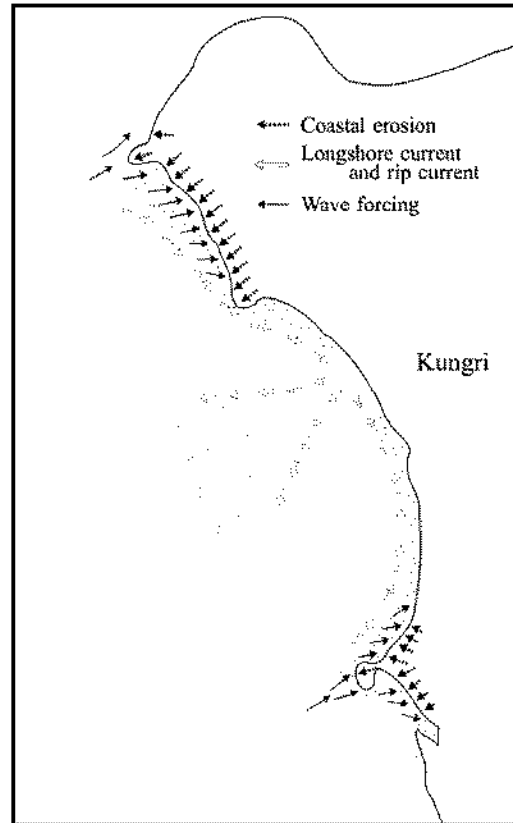


Fig. 11. Schematic diagram illustrating the coastal erosion and sediment transport in tidal beach.

등, 1997).

해변 퇴적물의 이동양상은 표층퇴적물의 공간 분포와 해안선 주변 해변 퇴적물의 계절적 변화와도 잘 일치되어 나타난다. 표층퇴적물의 공간분포는 해변의 양 끝단 돌출부 주변에서 역의 함량이 최대 60% 이상으로 우세하며, 만입된 중앙으로 가면서 역의 함량이 뚜렷하게 감소하고 상대적으로 사의 함량이 증가하는 경향을 보인다(Fig. 5). 특히, 사의 함량은 만입된 해변의 중앙에서 간조선 주변 조간대에 이르기까지 80% 내외로 대단히 우세한 함량분포를 보이는데, 이는 아마도 해변의 중앙으로 이동될 사가 연안류(rip current)에 의해 바다 쪽으로 이동되기 때문으로 생각된다(Fig. 11). 또한 해안선 주변 해변 퇴적물은 돌출부 주변(AA1, BB1)에서는 6월부터 12월 사이에 퇴적되고 1월부터 5월 사이에 침식되는 경향을 보인 반면, 만입된 해변의 중앙에 해당하는 해안선 주변 정점 HSI과 2에서는 1월부터 5월 사이에 퇴적

되는 경향을 보였다(Table 4). 이는 해안침식이 활발한 6월부터 12월 사이에는 해안침식에 의해 공급된 퇴적물에 의해 돌출부 주변 해빈이 퇴적되는데 반해, 해안침식이 활발하지 않는 1월부터 5월 사이에는 돌출부 주변 해빈 퇴적물이 반입된 해빈의 증앙을 따라 이동되어 돌출부 주변 해빈은 침식되고 반입된 해빈의 증앙은 퇴적되기 때문으로 해석된다. 그러나 본 연구의 결과는 퇴적학적 요인을 통해 해석된 것으로 보다 자세한 퇴적기구(sedimentary processes)를 이해하기 위해서는 퇴적 층에 관한 수력학적인 연구가 수반되어야 할 것으로 생각된다.

결 론

1. 연구지역의 조간대는 고조선 해빈과 니질 조간대로 구분되며, 상부 방향으로 오목한 지형 단면을 보인다. 특히, 고조선 해빈의 존재와 상부 방향으로 오목한 지형 단면, 그리고 불량한 분급은 연구지역의 조간대가 조석작용은 물론 파랑에 의해서도 영향 받고 있음을 나타낸다.
2. 돌출부(headland) 주변 고조선 해빈에는 잔자갈에서 왕자갈 크기의 전석들과 침식되지 못하고 남아 있는 잔류암맥들, 그리고 바위섬 모양의 Island Stack 등이 관찰되는데, 이는 해안절벽의 침식을 시사하는 특징적인 증거로서 해안선이 후퇴하였음을 시사한다.
3. 돌출부 주변에서 해안선의 후퇴율은 $-58.9\sim-73.3$ cm/yr 범위로 암질의 특성에 따라 차이를 보였으며, 계절적으로는 해수면의 높이가 상대적으로 상승하는 여름과 폭풍이 빈번하게 발생하는 겨울에 빠르게 후퇴하는 경향을 보인다.
4. 고조선 해빈의 퇴적율은 해안침식이 발생한 돌출부 주변에서는 해안선의 후퇴속도에 따라 후퇴속도가 빠른 여름과 겨울에는 퇴적되는 경향을 보이나, 상대적으로 후퇴속도가 느린 봄에는 침식되는 경향을 보인다. 그러나 반입된 해빈의 증앙에서는 봄에도 퇴적되어 해안침식된 퇴적물이 반입된 해빈의 증앙으로 이동되는 것으로 판단된다.
5. 한편 사질퇴적물의 광물 조성을 분석한 결과, 해빈 퇴적물의 성숙도는 해빈의 양 끝 돌출부 주변에서 미성숙된 경향을 보이고 반입된 증앙으로 갈수록 과성숙된 경향을 보인다. 이와 같은 현상은 해빈을 구성하는 사질퇴적물의 기원이 남쪽과 북쪽의 돌출부에 있음을 시사하는 것으로, 해빈퇴적물은 남쪽

과 북쪽의 돌출부로부터 침식되어 파랑에 의해 야기된 안안류에 의해 반입된 증앙으로 이동하는 것으로 해석된다.

사 사

“이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었습니다(KRF-2004-002-C00191).” 원상조사와 시료분석에 도움을 준 전남대학교 이수환 군과 목포대학교 김영길 군에게 고마움을 전합니다. 또한 논문 심사에 유익한 조언을 주신 김주용 교수님과 익명의 심사위원, 그리고 허식 편집책임위원님께 심심한 감사를 드립니다.

참고문헌

김태순, 최금인, 황준, 정진호, 2005, 서해연안 침식현황과 모니터링 체계구축, 서해 연안관리와 환경 복원에 관한 워크샵, 공산, 1-45.

국립지리원, 1977, 연안애역 지형측량 보고서(천수만 해역), 56 p.

류상욱, 유환수, 이종덕, 1999, 한평만 조간대의 표층퇴적물과 집적물의 계절변화, 한국해양학회지 「바다」, 4, 127-135.

류상욱, 유환수, 신승수, 1997, 한국 서해 남부 한평만 표층퇴적물의 분포 및 특성, 한국지구과학회지, 18, 367-378.

박용안, 최진웅, 이창욱, 김대철, 최강원, 1994, 한국 서해 중부해역 퇴적물 퇴적물의 분포와 퇴적작용, 한국해양학회지, 29, 357-365.

송두영, 우영균, 1992, 한반도 중부권 지각활동의 구조와 특성연구(1): 천수만 주변의 지질, 한국지구과학회지, 13, 53-65.

이세아형입주식회사, 1979, 서산AB 지구 간척지 개발 조사 보고서, 109 p.

이일상, 1986, 서산만 조간대 퇴적상 및 퇴적구조에 관한 연구, 석사학위 논문, 서울대학교, 55 p.

이철우, 백창훈, 이동우, 1995, 천수만중의 형성과 진화, 한국지구과학회지, 16, 222-231.

임동일, 정희수, 추홍식, 박광순, 강시환, S-Y YANG, 2002, 한국 서해 남부 한평만의 해안선 변화 연구 1, 해안절벽의 침식과 후퇴, 한국해양학회지 「바다」, 7, 148-156.

장진호, 김이상, 조영길, 1999, 해안침식이 무제한 반퇴적 조간대의 퇴적작용: 한국 서해안의 한평만, 한국해양학회지 「바다」, 4, 117-126.

신동철, 1995, 해양으로부터 가해지는 힘에 대한 장기적인 해안침식 모델의 고찰, 해양연구, 17, 41-58.

정공수, 박용안, 1978, 남양만 남부 조간대 퇴적환경의 퇴적학적 특성에 관하여, 한국해양학회지, 1, 9-18.

- 조성권, 이철우, 손영관, 황인걸, 1995, 퇴적학, 도서출판 우성, 서울, 512 p.
- 조주환, 임동인, 김백운, 2001, 항공사진을 이용한 서남해 한평만의 해안선 변화 관측. 한국지구과학회지, 22, 217-236.
- 해양수산부, 2002, 연안침식방지 종합대책 수립을 위한 조사 연구 용역(1), 404 p.
- Bird, E.C.F., 1984, *Coasts: An introduction to coastal geomorphology* (3rd edn.). Australian National University Press, Canberra, 372 p.
- Bokuniewicz, H. and Tanski, J., 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 Ollerhead, J., 1995, Near-shore erosion on a cohesive shoreline. *Marine Geology*, 122, 349-456.
- Evans, G., 1965, Tidal flats sediments and their environment of deposition in the Wash. *Quaternary Journal of Society in London*, 121, 209-241.
- Folk, R.L. and Ward W.C., 1957, Brazos river bar: A study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3-26.
- Folk, R.L., 1968, *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill's, Austin, 170 p.
- Horikawa, K. and Sunamura, T., 1967, A study on erosion of coastal cliffs by using aerial photographs. *Coastal Engineering in Japan*, 10, 67-84.
- Ingram, R.L., 1971, Sieve analysis. In: *Procedures in sedimentary Petrology*, edited by Carver, R.L., Wiley-Inter Science, New York, 49-67.
- Kim, J.L. and Park, S.C., 1985, Intertidal flat sediments and characteristic sedimentary structures in the Changgu Bay, west coast of Korea. *The Journal of the Oceanological Society of Korea*, 20, 43-49.
- Moon, V.G. and Healy, T., 1994, Mechanisms of coastal cliff retreat and hazard zone delineation in soft flysch deposits. *Journal of Coastal Research*, 10, 663-680.
- Pethick, J., 1984, *An introduction to coastal geomorphology*. Routledge, Chapman and Hall, INC, 260 p.
- Phillips, J.D., 1999, Event timing and sequence in coastal shoreline erosion: Hurricanes Bertha and Fran and the Neuse Estuary. *Journal of Coastal Research*, 15, 616-623.
- Reineck, H.E., 1967, Layered sediments of tidal flats, beaches, and shelf bottoms of the North Sea. In: Lauff, G.H. (Ed.), *Estuaries*. Amer. Assoc. Adv. Sci. Publ. 83, Washington, D.C., 191-206.
- 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.
- Sunamura, T., 1983, Processes of sea cliff and platform erosion. In: *Handbook of coastal processes*, edited by Momar, P.D., CRC Press, Boca Raton, 233-265.
- Yoo, R.K. and Risk, M.J., 1981, The sedimentology, stratigraphy and preservation of intertidal deposits in the Minas Basin system, Bay of Fundy. *Journal of Sedimentary Petrology*, 51, 245-260.

2005년 6월 13일 원고 접수
 2005년 7월 18일 수정원고 접수
 2005년 7월 18일 원고 채택