

한반도 서해남부 임자도 해빈 퇴적작용의 계절적 변화

류상옥* · 장진호¹ · 조주환² · 문병찬³

전남대학교 지구환경과학부, ¹목포대학교 해양자원학과

²조선대학교 지구과학교육과, ³전남대학교 과학교육학부

Seasonal Variations of Sedimentary Processes on Mesotidal Beach in Imjado, Southwestern Coast of Korea

SANG OCK RYU*, JIN HO CHANG¹, JU WHAN CHO² AND BYOUNG CHAN MOON³

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

¹Department of Marine Resources, Mokpo National University, Muan 534-729, Korea

²Department of Earth Sciences, Chosun University, Kwang 501-759, Korea

³Department of Science Education, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

한반도 서해남부 임자도 해빈에서 퇴적작용의 계절적 변화를 규명하기 위하여 2년 동안 지형 단면과 표층퇴적물, 침적률에 대한 모니터링을 실시하였다. 해빈 단면은 경사가 급한 해빈면과 비교적 경사가 완만한 중·저조해빈으로 이루어져 있다. 해빈면의 경사는 여름에 증가하고 겨울에 감소하여 일반적인 해빈의 계절순환 양상과 잘 일치된다. 또한 중·저조해빈은 여름에는 파봉과 유흔구조가 잘 발달하는데 반해, 겨울에는 폐가 연흔이 잘 발달하는 계절적 변화를 보인다. 해빈 퇴적물은 해빈의 북측에서 남측으로, 그리고 저조선에서 고조선 방향으로 세립해지는 경향을 보인다. 퇴적물의 평균입도는 북측 해빈에서는 가을과 겨울에 조립해지는데 반해, 남측 해빈에서는 겨울과 봄에 조립해지는 경향을 보인다. 또한 침적률 조사 결과, 북측 해빈은 전체적으로 침식되고 남측 해빈은 퇴적되는 양상을 보인다. 이와 같은 현상은 해빈 퇴적물이 해안선 방향(북동-남서)으로 발달하는 연안류에 의해 해빈을 따라 남쪽으로 이동하기 때문으로 생각된다. 그러나 침적률의 계절적 변화는 매우 복잡할 뿐 아니라 뚜렷한 규칙성을 보이지 않는다. 이는 아마도 인위적 요인에 의한 연안 및 해저지형 변화와 지구온난화에 따른 해수면 상승 등 다양한 요인들에 의해 임자도 해빈의 에너지 수준이 평행상태에 도달하지 못하고 불안정한 상태에 있음을 의미하는 것으로 생각된다.

A continuous monitoring of textural characteristics of surface sediments, sedimentation rates and beach profile was carried out to investigate the seasonal variations of sedimentary processes in the Imjado beach, southwestern coast of Korea for two years. The beach profiles consist of steep beach face and relatively flat middle and low tide beaches. The slope of the beach face increases in summer and decreases in winter, in good accordance with the standard beach cycle. Ridge and runnel systems are well developed in the middle and low tide beaches during the summer, but these structures are replaced by mega-ripples during the winter. The sediments are fining southward as well as landward. The mean grain-size tends to be increasingly coarser during seasons of autumn and winter on the north beach and during seasons of winter and spring on the south one. In addition, the sediments are eroded on the north beach and accumulated on the south one as a whole. These are probably due to southward transportation of the sediments as long-shore current (NE-SW) runs around the coastal line of the beach. However, the seasonal variations in accumulation rates are very complex and irregular. It is considered that the Imjado beach represents in non-equilibrium state, as a result of coastal and submarine topographic changes by artificial agents and sea-level uprising associated with global warming.

Key words: Tidal beach, Sedimentary processes, Seasonal variations, Accumulation rates, Ridge and runnel systems, Beach profile

*Corresponding author: soryu@chonnam.ac.kr

서 론

해빈(beach)은 바다와 육지로부터 동시에 영향을 받는 전이지역으로 파랑 및 조류와 같은 강한 외력에 의해 퇴적작용이 자비된다(Shepard, 1963; Davies, 1985). 해빈 연구의 선진 국가들은 지난 수십 년 동안 해안의 침식과 퇴적물의 유실을 막고 해안과 인간을 보호하기 위해 해빈 퇴적물의 이동에 관한 많은 연구를 수행해 왔다(Short and Hesp, 1982; Wright *et al.*, 1982; Masselink and Short, 1993; Masselink and Hegge, 1995; May and Strapor, 1996; Cooper and Jackson, 1999; Voulgaris and Collins, 2000; Levoy *et al.*, 2000; Masselink and Pattiaratchi, 2001). 이렇듯 인간의 공간 이용에 있어서 중요한 위치를 점하고 있는 해빈은 퇴적물의 이동에 있어서 그 기구(processes)가 대단히 복잡하여 아직까지 정량적인 예측은 어려운 형편이다. 즉, 해빈에서는 파의 작용이 강화되어 퇴적물이 항상 운동하고 있으며, 파랑에 의해 쉽게 부상된 퇴적물은 조류와 연안류에 의해 이류·이동하게 된다. 이러한 퇴적물의 이동 외력 변화는 해빈의 퇴적물을 변화시키고, 그 결과로서 지형 변화를 가져온다. 그리고 지형변화는 다시 파랑과 조류와 같은 퇴적물의 이동 외력을 변화시키는 끊임없는 상호의존적 순환을 반복하게 된다.

연구지역인 임자도 해빈(Fig. 1)은 1990년대 초부터 해수욕장을 개발하고 해안유실을 막기 위해 해빈의 남쪽 해수욕장 주변을 중심으로 계단식 호안을 건설했으며, 지금도 계속해서 해빈의 북측을 따라 호안을 건설하고 있다. 그 결과 호안이 건설된 해수욕장 주변에서는 사구와 해빈의 퇴적물 교환이 차단되고, 해빈의 사질퇴적물이 침식되어 하부의 니질퇴적층이 노출되며, 호안이 건설되지 않는 사구지역에서는 포락이 이루어져 직각에 가까운 해안 절벽을 이루고 있는 등 심각한 연안환경 변화에 직면하고 있다.

본 연구에서는 이와 같은 연안환경 변화를 반영하는 해빈퇴적작용의 계절적 변화양상을 밝히고자, 서해남부의 대표적인 조간대

성 해빈(tidal beach)인 임자도 해빈을 연구지역으로 택하여 해빈의 지형 단면과 표층퇴적물, 집적률 변화에 대한 모니터링을 실시하였다. 연안환경 변화와 연계된 이 지역 퇴적작용의 계절적 변화 연구는 서해 남부의 연안환경 변화에 대한 이해를 증진시킬 뿐만 아니라 자연적 또는 인위적 연안환경 변화에 능동적으로 대처할 수 있는 방안을 강구하는데 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

지역개관

한반도의 서해남부에 위치한 임자도(Fig. 1)는 북동 방향으로 신장된 표주박 모양으로 남고북저의 지형적 특징을 보인다. 이에 따라 임자도의 북서측과 북동측은 해빈과 사구, 조간대가 잘 발달되어 있는 반면 남측은 크고 작은 산들에 의해 암석 해안이 잘 발달되어 있다. 북서측에 잘 발달되어 있는 임자도 해빈은 북서 방향으로 열려 있는 초승달형 모래해빈으로 폭 약 300 m, 길이 약 12 km로 해안 돌출부와 어유미도에 의해 북측과 남측이 분리되어 W-형태를 이루고 있다(Fig. 1). 특히 임자도의 북쪽은 돌출부(headland)가 잘 발달되어 있어 북서측의 바람막기도(Barammagido)와 어유미도(Eyoomido), 고깔도(Goggaldo), 육타리도(Yougtarido) 등의 소규모 섬과 더불어 임자도 해빈의 발달 양상과 퇴적물의 이동 및 공급에 중요한 역할을 하고 있으며, 기반암은 중생대 백악기의 응회암과 안산암으로 주로 구성되어 있다(류, 1993).

연구지역의 조석은 일조부등이 작은 반일주조형이며, 조차는 최대 318 cm, 최소 180 cm, 평균 249 cm(National Geography Institute, 1983)로 Davies(1964)의 분류기준에 의하면 중조차 환경에 속한다. 1991년부터 2000년까지 최근 10년 동안 목포기상대에서 관측된 기상자료에 의하면 연구지역의 연평균기온은 14.1°C이고, 연평균강수량은 1078.6 mm로서 주로 여름(6~8월)에 집중되며, 평균풍속은 4.1 m/sec로 겨울에는 한랭건조한 북서풍이, 여름에는 고온 다습한 남풍 계열의 바람이 우세하다(Fig. 2). 풍속 13.9 m/sec 이

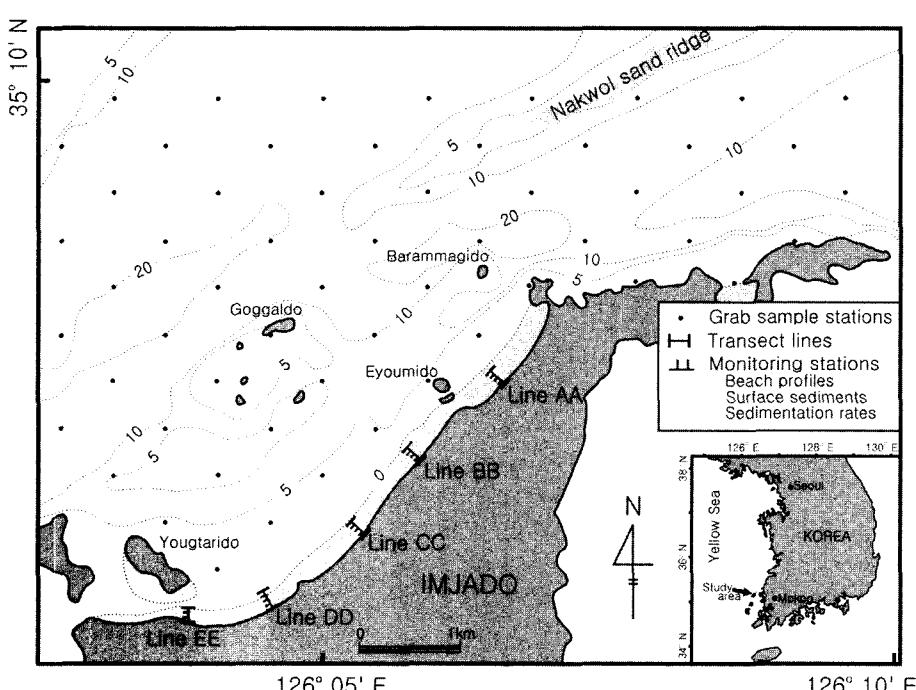


Fig. 1. Location map of Imjado beach showing monitoring lines and stations. Five transects (Line AA, BB, CC, DD, and EE) across the beach were subject to precise levelling at regular intervals of 50 m during the period 2001-2003. Dots indicate sampling positions of surface sediments for spatial distribution. Bathymetry (relative to MSL) is from National Geography Institute (1983): depths in meters.

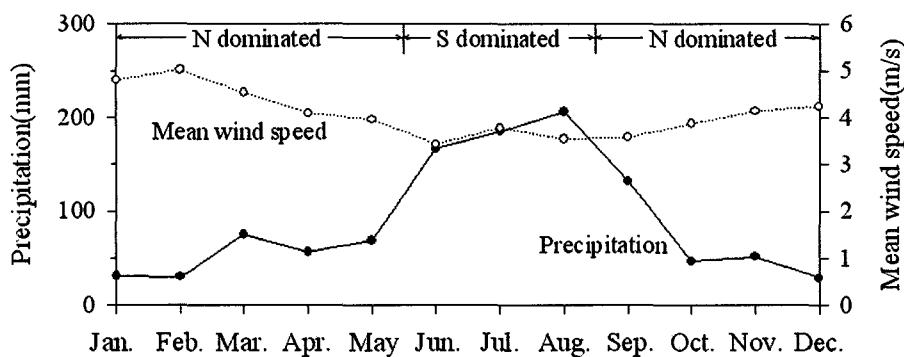


Fig. 2. Weather condition of study area, based on annual reports of Korea Meteorological Administration (1991-2000). Note that precipitation for the three months from June to August is approximately half of the yearly total.

상의 폭풍은 연평균 22.6일로서 발생빈도가 대단히 높고 17 m/sec 이상의 태풍은 주로 여름(6~9월)에 집중되어 연평균 1.9회가 연구 지역을 통과한다(Korea Meteorological Administration, 1991-2000).

재료 및 방법

표층퇴적물 채취 및 분석

해빈 퇴적물의 분포 및 계절적 변화 양상을 조사하기 위하여 북측 해빈에 1개(측선 AA)와 남측 해빈에 4개(측선 BB, CC, DD, EE)의 측선을 설정하고(Fig. 1), 그 측선에서 2001년 11월부터 2003년 11월까지 2년 동안 12회에 걸쳐 표층퇴적물을 채취하였다. 또한 조하대 퇴적물의 분포 및 계절적 변화 양상을 파악하기 위하여 에너지 변화가 극명한 하계(2001년 8월)와 동계(2002년 2월)에 58개의 동일한 정점에서 각각 표층퇴적물을 채취하였다(Fig. 1). 조하대에서는 채니기(Lafond-type grab sampler)를 이용하여 시료를 채취하였으며, 조간대에서는 표층 1 cm 이내에서 플라스틱 스푼으로 시료를 채취하였다. 그리고 시료채취 지점의 위치는 GPS(GARMIN 100 SRVY II, USA)를 사용하여 측정하였다. 퇴적물의 입도분석은 Ingram(1971)의 표준입도분석 방법에 의거하였으며, 0.25φ 간격으로 세밀하게 분석하였다. 퇴적물의 평균입도, 분급도 등의 통계적 입도상수는 Folk and Ward(1957)의 계산식에 의해 구하였다. 또한 10φ보다 세립한 입도의 질량은 외삽법에 의한 균등분배방식에 의해 구하였다.

수준측량

해빈 지형 단면의 계절적 변화 양상을 조사하기 위하여 5개 측선에서 2년 동안 8회에 걸쳐 레벨(Topcon AT-G3)을 이용하여 수

준측량을 실시하였다. 측선의 기준점 및 각 측점의 고도는 조위면에 근거하였으며, 본 조사에 사용된 측량기기는 7 km의 수평거리에 약 6 mm의 고도오차를 갖는다.

집적률

해빈 집적률의 계절적 변화를 조사하기 위하여 4개 측선(측선 AA, BB, CC, DD)에서 수준측량과 동시에 2년 동안 14회에 걸쳐 집적률을 측정하였다. 집적률의 측정은 해저면 아래의 일정한 깊이에 30×30 cm의 아크릴판을 기준점으로 설치하고, 주위환경과 동화될 수 있도록 약 1개월 기다린 다음, 해저면에서 기준면까지의 깊이를 버니어캘리퍼스를 이용하여 측정하였다.

결 과

표층퇴적상

임자도 해빈 주변의 표층퇴적상은 Folk(1968)의 삼각좌표에 도시한 결과 퇴적물의 조직(texture) 특성을 토대로 사(S, sand), 역질사(gS, gravelly sand), 니질사(mS, muddy sand), 실트질사(zS, silty sand), 사질니(sM, sandy mud), 사질실트(sZ, sandy silt), 니(M, mud), 실트(Z, silt)의 8개 퇴적상으로 구분되어 사(S), 니질사(mS), 사질니(sM), 니(M)의 4개 퇴적상으로 조합하였다(Table 1). 이들 퇴적상의 역과 사, 실트, 점토의 함량비는 각각 평균 0.1%, 49.3%, 35.6%, 15.6%로 입도의 분포 범위는 넓으나, 대부분 사와 실트로 구성되어 있다.

하계 퇴적상: 사 퇴적상은 해빈과 북서측 조하대에 분포하고 (Fig. 3), 사의 함량이 평균 95% 이상이며 2~3φ 계층에서 최빈값을 보이는 단모드(unimodal) 퇴적물로(Fig. 4) 평균입도는 2.1φ이고 분급은 0.7φ이다(Table 1). 니질사 퇴적상은 해빈과 조하대 사

Table 1. Sedimentary facies based on the sedimentary textures

Facies	Season	Textural parameters				Statistical parameters			Sedimentary type (Folk, 1968)
		Gravel (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Mean (φ)	Sort. (φ)	Skew.	
Sand	Summer	0.5	96.1	1.4	2.0	2.1	0.7	1.4	S, gS
	Winter	0.5	99.5	0.0	0.0	2.1	0.5	1.3	
Muddy sand	Summer	0.0	70.9	18.9	10.2	3.8	2.3	1.0	mS, zS,
	Winter	0.0	64.6	26.1	9.4	3.5	2.4	0.8	
Sandy mud	Summer	0.0	27.7	48.5	23.8	6.0	3.0	0.8	sM, sZ
	Winter	0.0	27.0	52.3	20.8	5.7	2.8	0.8	
Mud	Summer	0.0	4.8	63.7	31.5	7.2	2.5	1.1	M, Z
	Winter	0.0	3.5	69.3	27.2	6.9	2.3	1.2	

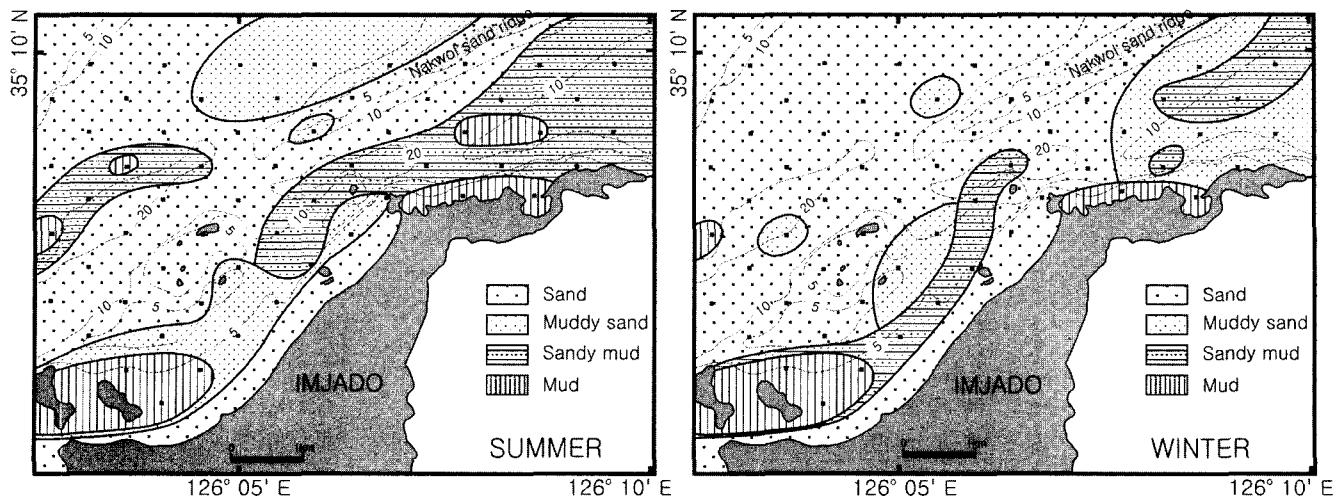


Fig. 3. Spatial distribution of surface sediments in the summer and winter surrounding Imjado beach.

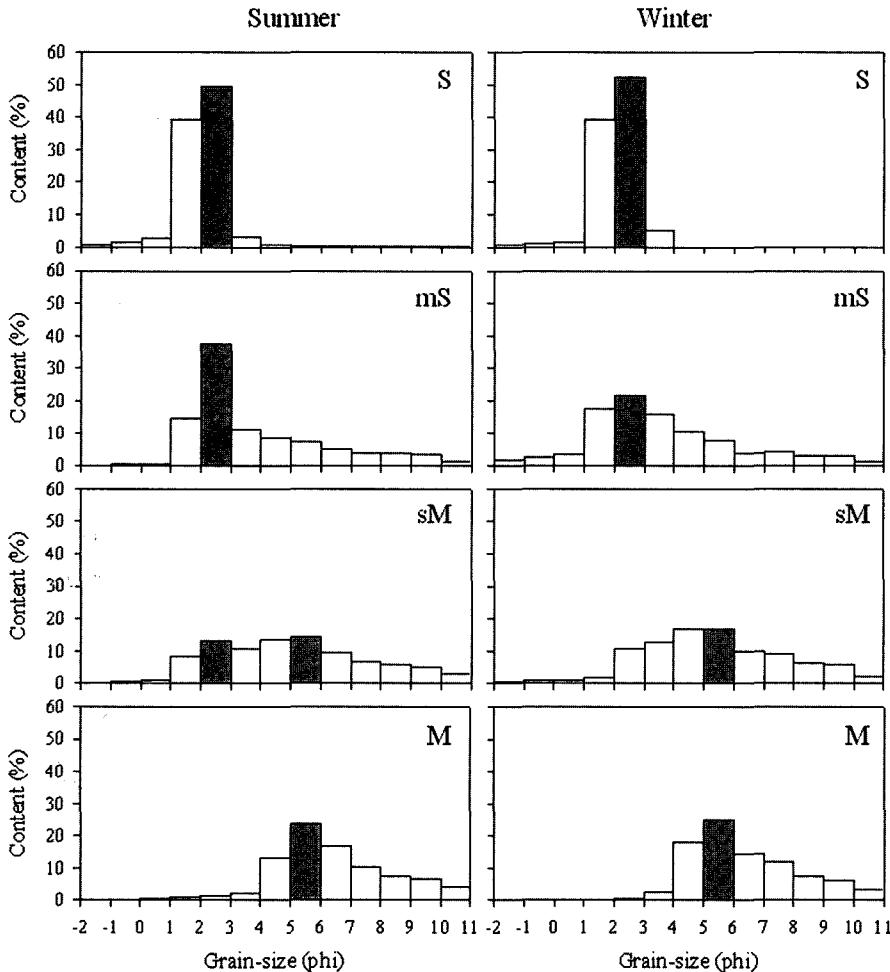


Fig. 4. Average grain size-frequency curves showing drastic seasonal changes of major surface sediment types. Each histogram represents an average of grain size data from all surface samples taken during the corresponding seasons.

퇴적상 사이, 그리고 낙월사퇴(Nakweol sand ridge) 북서측에 대상으로 분포하고, 사와 실트, 점토의 함량은 각각 평균 70.9%, 18.9%, 10.2%이며 2~3φ 계층에서 최빈값을 보이는 단모드 퇴적물로 평균입도는 3.8φ이고 분급은 2.3φ이다. 사질니 퇴적상은 임자도 북측 조하대와 북서측 조하대의 사 퇴적상 사이에 대상으로

분포하고, 사와 실트, 점토의 함량은 각각 평균 27.7%, 48.5%, 23.8%이며 2~3φ와 5~6φ 계층에서 최빈값을 보이는 복모드(bimode) 퇴적물로 평균입도는 6.0φ이고 분급은 3.0φ이다. 니 퇴적상은 북측 조간대와 북서측 육타리도 주변에 협소하게 분포하고, 사의 함량은 평균 5% 미만이며 5~6φ 계층에서 최빈값을 보이는

단모드 퇴적물로 평균입도는 7.2ϕ 이고 분급은 2.5ϕ 이다.

동계 퇴적상: 사 퇴적상은 해빈과 북서측 조하대에 광범위하게 분포하고(Fig. 3), 사의 함량은 평균 95% 이상이며 2~3φ 계층에서 최빈값을 보이는 단모드 퇴적물(Fig. 4)로 평균입도는 2.1ϕ 이고 분급은 0.5ϕ 이다(Table 1). 니질사 퇴적상은 임자도의 북측과 북서측 조하대에 분포하고 사와 실트, 점토의 함량은 각각 평균 64.6%, 26.1%, 9.4%이며 2~3φ 계층에서 최빈값을 보이는 단모드 퇴적물로 평균입도는 3.5ϕ 이고 분급은 2.4ϕ 이다. 사질니 퇴적상은 임자도의 북측과 북서측 조하대에 분포하고 사와 실트, 점토의 함량은 각각 평균 27.0%, 52.3%, 20.8%이며 5~6φ 계층에서 최빈값을 보이는 단모드 퇴적물로 평균입도는 5.7ϕ 이고 분급은 2.8ϕ 이다. 니 퇴적상은 북측 조간대와 북서측 섬 주변에 협소하게 분포하고 사의 함량은 평균 5% 미만이며 5~6φ 계층에서 최빈값을 보이는 단모드 퇴적물로 평균입도는 6.9ϕ 이고 분급은 2.3ϕ 이다.

해빈 단면의 변화

Fig. 5는 임자도 해빈의 5개 측선에서 2년 동안 8회에 걸쳐 모니터링된 해빈 단면을 도시한 것이다. 각 측선의 단면은 해수면의 높이에 따라 해안선으로부터 약 30 m 내외의 고조해빈(high tide beach)과 그 곳으로부터 간조선에 이르는 중·저조해빈(middle and low tide beach)으로 구분된다. 고조해빈은 모든 측선에서 $3.42^\circ\sim6.33^\circ$ 범위로 큰 경사도를 보인 반면, 중·저조해빈은 2.04° 이하로 비교

적 낮은 경사도를 보인다(Fig. 5).

고조해빈의 경우, 여름에는 평균 $4.43^\circ\sim5.15^\circ$ 범위로 급경사를 보이다가 겨울에는 평균 $3.56^\circ\sim3.90^\circ$ 범위로 상대적으로 경사가 완만해지는 경향을 보인다(Fig. 5). 한편, 중·저조해빈은 여름 동안 해안선에 평행한 파형의 기복, 즉 파봉과 유흔(ridge and runnel)이 특징적으로 나타나는데, 이 파형의 기복은 두개의 마루(ridge)와 골(trough)로 첫 번째 마루는 해안선으로부터 100~150 m에, 두 번째 마루는 150~200 m에 위치한다. 마루와 골 사이의 파고는 평균 0.5 m, 골과 골 사이의 파장은 평균 40 m, 마루의 경사는 바다 쪽이 완만하고 육지 쪽이 급한 양상을 보인다. 그러나 겨울에는 여름 동안 형성된 파봉과 유흔이 메가 연흔(mega ripples)으로 바뀌며 전체적으로 매우 평탄한 지형단면을 보인다(Fig. 5).

해빈 퇴적물의 변화

Table 2는 임자도 해빈의 5개 측선에서 2년 동안 12회에 걸쳐 모니터링된 표층퇴적물의 평균입도를 도시한 것이다. 해빈 퇴적물은 북측에 위치하는 측선 AA에서 평균 1.94ϕ 로 조립하고, 남측에 위치하는 측선 BB, CC, DD, EE에서 평균 $2.03\sim2.18\phi$ 범위로 세립한 양상을 보인다. 또한 5개 측선 상의 정점1(만조선 주변)에서는 평균 2.16ϕ , 정점 2에서는 평균 2.08ϕ , 정점 3에서는 평균 2.07ϕ , 정점 4(간조선 주변)에서는 평균 1.98ϕ 로 간조선에서 만조선 방향으로 갈수록 평균입도가 세립해지는 경향을 보인다. 그러나 각각

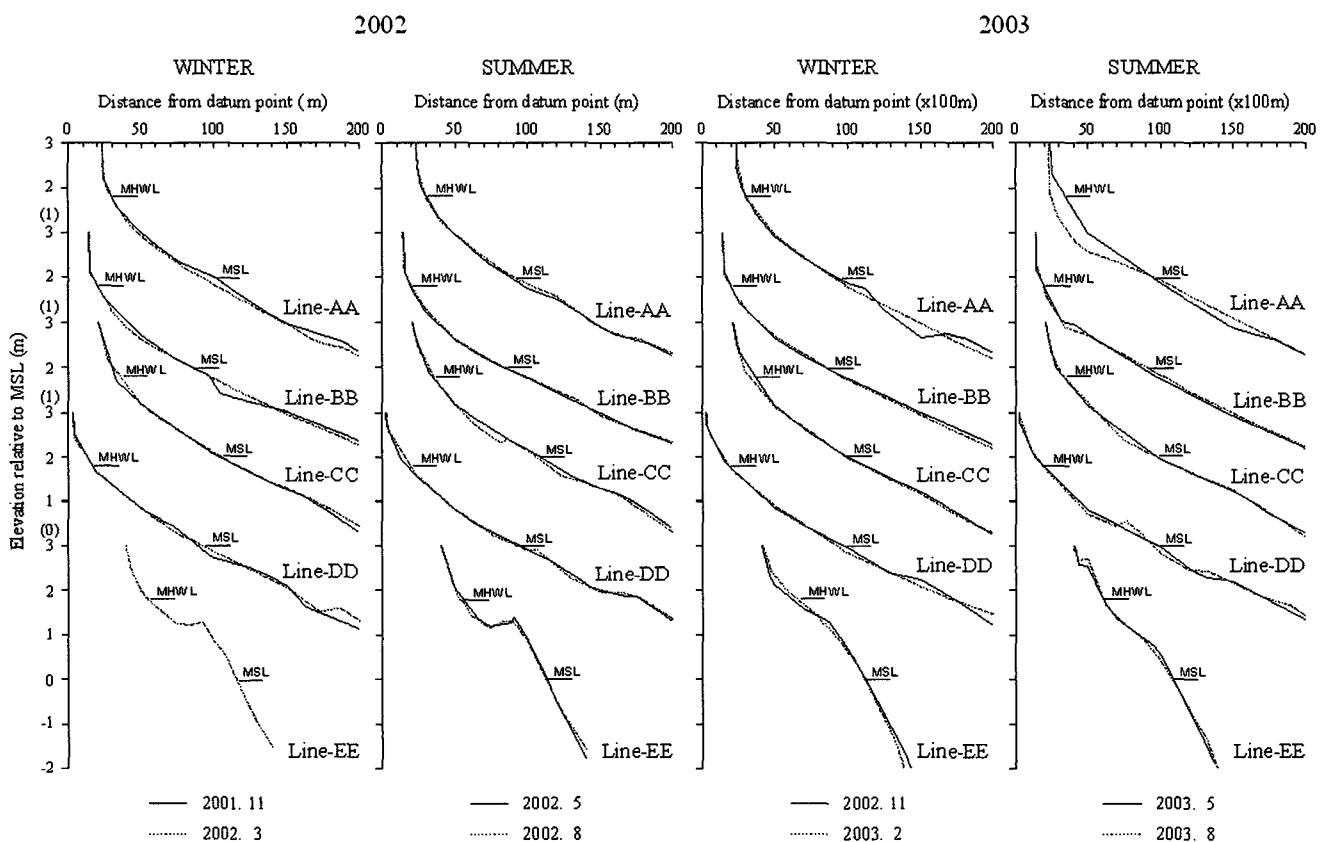


Fig. 5. The beach profiles during the period 2001-2003. The solid line in each of the diagrams indicates the beach profile at the start of the period and the dashed line represents the end of the period. Ridge and runnel systems are well developed in the mid and low tidal zones during the summer, but these structures are replaced by mega ripples during the winter. MHWL: mean high water level, MSL: mean sea level. For location, see Fig. 1.

Table 2. Averaged mean grain-size of surface sediments along transect lines on the Imjado beach during 2001-2003

Station	Mean grain-size(ϕ)					Average
	Line-AA	Line-BB	Line-CC	Line-DD	Line-EE	
1	2.00	2.22	2.21	2.07	2.30	2.16
2	1.88	2.15	2.11	2.06	2.20	2.08
3	1.88	2.18	2.11	2.11	2.07	2.07
4	1.99	2.16	2.11	2.07	1.55	1.98
Average	1.94	2.18	2.14	2.08	2.03	2.07

의 지역과 측선 상에 있어서 평균입도의 편차는 0.2ϕ 내외로 대단히 미미한 경향을 보인다.

Fig. 6은 임자도 해변의 5개 측선에서 2년 동안 모니터링된 표층퇴적물의 평균입도 변화를 도시한 것이다. 해변 퇴적물의 평균입도는 북측에 위치하는 측선 AA와 남측에 위치하는 측선 BB, CC, DD, EE에서 다소 다른 계절적 변화를 보인다. 측선 AA에서는 2001년 겨울에 부분적으로 다소 세립해지기도 하나 전반적으로 가을과 겨울에 조립해지고 봄과 여름에 세립해지는 경향을 보인다. 반면, 측선 BB, CC, DD, EE에서는 2001년 겨울에 부분적으로 다소 세립해지기도 하나 전반적으로 겨울과 봄에 조립해지

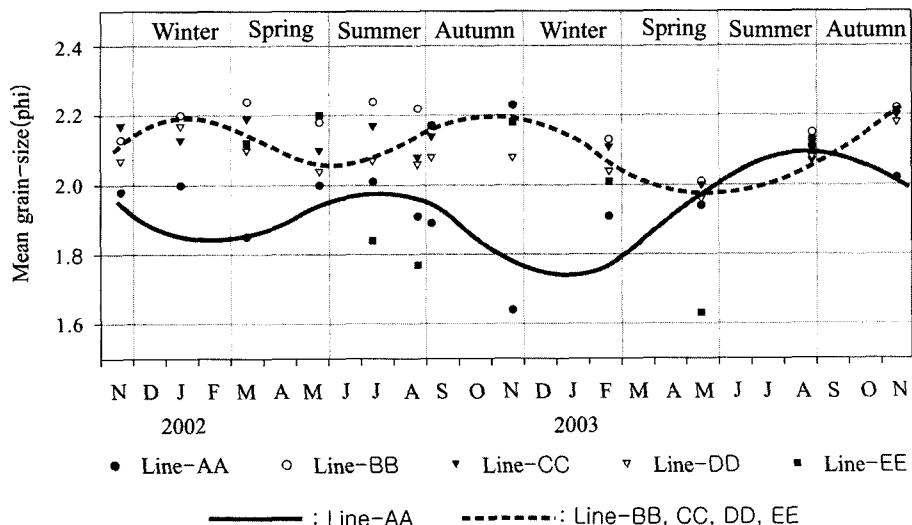


Fig. 6. Mean grain-size variations of surface sediment on the Imjado beach during the 2001 to 2003. Each symbol presents an average of mean grain-size from all surface samples taken during the corresponding survey. For location of measuring sites, see Fig. 1.

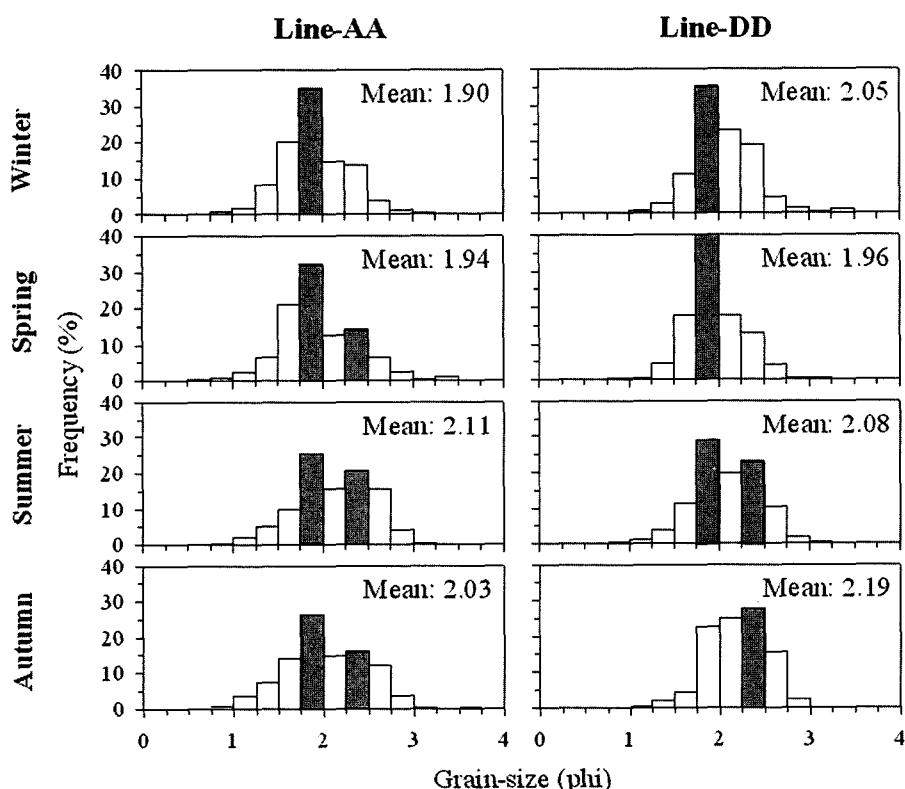


Fig. 7. Average size-frequency curves showing drastic seasonal variations. Each histogram represents an average of size data from all surface samples taken during the corresponding seasons. For location, see Fig. 1.

고 여름과 가을에 세립해져 측선 AA와는 다소 다른 양상을 보인다. Fig. 7은 북측에 위치하는 측선 AA와 남측을 대표하는 측선 DD에서 채취된 퇴적물의 입도분포 양상을 도시한 것으로, 계절에 따른 조립 또는 세립 꼬리의 수직적 증감과 최빈값(mode)의 이동에 의한 입도점이(size grading) 현상을 잘 보여준다. 북측에 위치하는 측선 AA에서는 겨울에 1.75~2.00φ 구간에서 최빈값을 갖는 단모드(uni-mode)퇴적물로 평균입도는 1.90φ로 가장 조립한 경향을 보인다. 그러나 봄, 여름, 가을에는 1.75~2.00φ와 2.25~2.50φ 구간에서 최빈값을 갖는 복모드(bi-mode)퇴적물로 바뀌고 평균입도는 봄과 여름에 각각 1.94φ와 2.11φ로 세립해지다가 가을에 2.03φ로 다시 조립해지는 계절적 변화를 보인다. 반면, 남측에 위치하는 측선 DD에서는 봄에 1.75~2.00φ 구간에서 최빈값을 갖는 단모드퇴적물로 평균입도는 측선 AA와는 다르게 1.96φ로 가장 조립한 경향을 보인다. 그러나 여름에는 1.75~2.00φ와 2.25~2.50φ 구간에서 최빈값을 갖는 복모드퇴적물로 평균입도는 2.08φ로 세립해지고, 가을에는 2.25~2.50φ 구간에서 최빈값을 갖는 단모드퇴적물로 평균입도는 2.19φ로 가장 세립해지며, 겨울에는 1.75~2.00φ 구간에서 최빈값을 갖는 단모드퇴적물로 평균입도는 1.96φ로 다시 조립해져 북측에 위치하는 측선 AA와는 다소 다른 계절적 변화를 보인다.

해빈 침적률의 변화

Fig. 8은 임자도 해빈의 4개 측선에서 2년 동안 14회에 걸쳐 모니터링된 침적률의 계절적 변화를 도시한 것이다. 임자도 해빈의 가장 북측에 위치하는 측선 AA의 경우, 2002년에는 여름에 퇴적되고 그 밖의 계절에는 침식되는데 반해, 2003년에는 여름에만 침식되고 그 밖의 계절에는 퇴적되어 서로 상반된 경향을 보인다.

특히 측선 AA에서 2002~2003년 동안 뚜렷하게 침식되는 현상은 만조선 주변에서 크게 침식된(AA1; -414.6 mm) 결과로(Table 3), 이는 2003년 여름 동안 100 mm/day 이상의 폭우에 의해 측점 AA1에 인접한 사구의 수로 주변이 크게 침식되었기 때문이다. 또한 측선 BB, CC, DD에서의 침식 및 퇴적 양상은 계절에 따라서 다르고 지역에 따라 달라서 시·공간적으로 매우 복잡한 양상을 보인다.

한편 중·저조해빈에서 측선 상의 침적률은 계절에 따라 100 mm 이상으로 비교적 큰 규모로 침식되거나 퇴적되는 결과를 보이는데, 이와 같은 현상은 여름에 형성되고 겨울에 파괴되는 파봉과 유흔구조에 의해 해빈 단면이 계절에 따라 크게 변화되기 때문이다. 따라서 상기 결과를 종합해 볼 때, 임자도 해빈의 침적률은 시·공간적으로 매우 민감한 반응을 보인다고 할 수 있다.

퇴적률

4개 측선에서 2년 동안 침적률을 모니터링한 결과, 임자도 해빈의 퇴적률은 시·공간적으로 서로 다른 양상을 보인다(Table 3). 측선 상의 퇴적률은 측선 AA에서 -7.7 mm yr^{-1} , 측선 BB에서 5.7 mm yr^{-1} , 측선 CC에서 54.8 mm yr^{-1} , 측선 DD에서 78.3 mm yr^{-1} 로 가장 북측에 위치하는 측선 AA에서는 침식되는데 반해, 그 밖의 측선에서는 퇴적되고 남측으로 갈수록 퇴적률이 증가하여 임자도 해빈의 퇴적률은 32.7 mm yr^{-1} 로 전반적으로 퇴적되는 양상을 보인다.

관측 초기인 2001~2002년에는 측선 AA에서 $-108.7 \text{ mm yr}^{-1}$, 측선 BB에서 -33.6 mm yr^{-1} , 측선 CC에서 -14.2 mm yr^{-1} 로 침식되는데 반해, 측선 DD에서는 105.1 mm yr^{-1} 로 퇴적되어 북측 해빈에서 크게 침식되고 남측으로 가면서 침식율이 낮아지다가 남측 해빈에서 퇴적되어 1년 동안의 퇴적률은 -12.9 mm yr^{-1} 로 침

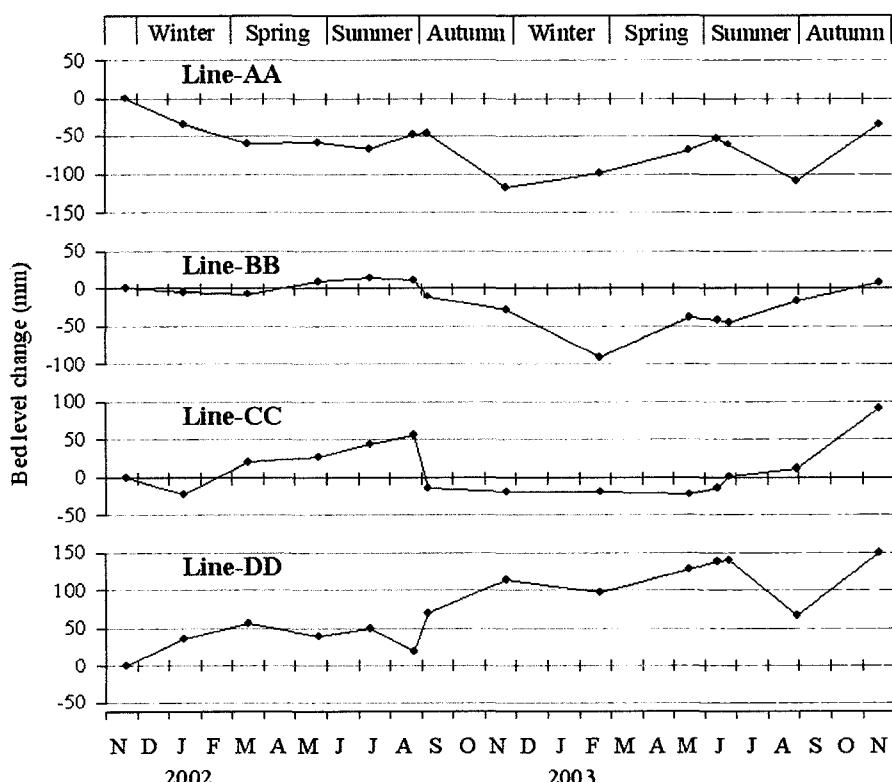


Fig. 8. Seasonal variation in surficial accumulation on the Imjado beach from 2001-2003. For location of measuring sites, see Fig. 1.

식되는 양상을 보인다. 그러나 2002~2003년에는 측선 AA에서 93.4 mm yr^{-1} , 측선 BB에서 44.9 mm yr^{-1} , 측선 CC에서 123.7 mm yr^{-1} , 측선 DD에서 51.4 mm yr^{-1} 로 모든 측선에서 퇴적되어 1년 동안의 퇴적률은 78.3 mm yr^{-1} 로 퇴적되어 관측 초기(2001~2002년)와는 뚜렷하게 다른 양상을 보인다.

토 의

조하대 퇴적물의 계절적 변화

임자도 조하대의 표층퇴적상은 퇴적물의 조직 특성에 따라 사(S), 니질사(mS), 사질니(sM), 니(M)의 4개 퇴적상으로 조합되며, 계절에 따라 그 분포 특징을 달리한다. 여름에는 니질사와 사질니 퇴적상의 발달이 전체적으로 매우 양호하나, 겨울에는 여름 동안 발달한 니질사와 사질니 퇴적상의 많은 부분이 사나 니질사, 사질니 퇴적상으로 바뀌는 뚜렷한 계절적 변화를 보인다(Fig. 3). 즉 니질사 퇴적상은 여름에는 낙월사태(Nakweol sand ridge) 북서측과 해빈의 전면 조하대에 잘 발달하는데, 겨울에는 낙월사태 북서측의 니질사 퇴적상은 사 퇴적상으로 조립화되고 해빈의 전면 조하대의 니질사 퇴적상은 사질니 퇴적상으로 세립화되어 서로 다른 양상을 보인다. 또한 사질니 퇴적상은 여름에는 해빈의 북측과 북서측 조하대에 잘 발달하는데, 겨울에는 여름 동안 발달한 사질니 퇴적상의 대부분이 니질사 또는 사 퇴적상으로 조립화되는 뚜렷한 계절적 변화를 보인다. 이와 같이 겨울 동안 표층퇴적물의 분포가 뚜렷하게 조립화되고 여름 동안 세립화되는 현상은 계절 풍의 영향에 따라 해안에 도달하는 파랑에너지의 상대적 크기가 달라지기 때문으로 서해의 개방형 해안(open coast)인 인근의 백수 조간대(Yang and Chun, 2001)와 천리포 및 만리포 해빈(추 등, 1996)에서 보고된 바 있다. 그러나 이들의 연구 결과는 파랑의 영향을 강하게 받는 조간대와 해빈에서의 연구 결과로 일반적으로 파랑의 영향이 상대적으로 약한 조하대에서 퇴적상이 뚜렷하게 변화된 예는 아직까지 보고된 바 없다. 이는 임자도 해빈 주변 조하대가 파랑의 영향을 강하게 받을 뿐 아니라 계절에 따른 에너지 수준의 변화가 뚜렷함을 의미하는 것이다.

한편, 해빈의 전면 수심이 낮은 조하대에서 여름 동안 발달된 니질사 퇴적상이 겨울에 사질니 퇴적상으로 세립화되는 현상은 겨울 동안 파랑에너지가 상대적으로 강화됨을 고려해 볼 때 독특한 현상으로, 이는 쇄파대의 육지쪽 해빈에 형성되는 해안선에 평행한 방향(북동-남서 방향)의 연안류가 겨울 동안 강화되기 때문으로 쇄파대의 바다쪽에는 상대적으로 저에너지 조건이 조성되어 겨울 동안 고농도의 부유퇴적물이 집적되어 사질니 퇴적상을 형성한 것으로 생각된다.

해빈 지형 및 집적률의 계절적 변화

한반도의 서해 남부에 위치한 임자도 해빈은 중조차의 개방형 해안으로 계절에 따른 에너지 수준의 변화가 뚜렷한 곳이다. 일반적으로 에너지 수준의 변화는 퇴적작용에 민감하게 반영되고 그 결과는 해빈의 지형과 퇴적물의 이동 및 집적에 큰 영향을 미친다. 연구지역의 해빈 단면은 고조해빈의 경우, 여름에는 비교적 급경사($4.43^\circ\sim5.15^\circ$ 범위)를 보이다가 겨울에는 상대적으로 완만($3.56^\circ\sim3.90^\circ$ 범위)해지는 경향을 보인다. 또한 중·저조해빈에서는

여름에는 해안선에 평행한 파봉과 유흔들이 특징적으로 나타나는데 반해, 겨울에는 여름 동안 형성된 파봉과 유흔들이 메가 연흔으로 바뀌고 전체적으로 매우 평坦해지는 지형 단면의 계절적 변화를 보인다(Fig. 5). 이와 같은 현상은 계절에 따라 해빈에 도달하는 파랑과 조류의 상대적 크기가 달라지기 때문으로, 여름에는 파고가 낮고 주기가 긴 너울(swell) 형태의 파랑이 우세하여 퇴적물을 육지쪽(onshore)으로 이동시키면서 육지쪽에 경사가 급하고 바다쪽에 경사가 완만한 파봉들을 형성하고 고조해빈에는 급경사의 해빈면을 형성하게 된다(Inman and Filloux, 1960; King, 1972; Davies *et al.*, 1972; 추 등, 1996). 반면, 겨울에는 폭풍 등에 의해 파고가 높고 주기가 짧은 파랑이 우세하여 여름과는 달리 상대적으로 평탄한 지형단면을 보인다. 이와 같은 지형단면의 계절적 변화는 Shepard(1950)와 Bascom(1950)이 미국 서부해안에서 처음 관찰하여 정립한 'beach cycle'의 개념과 잘 일치된다.

한편, 해빈 퇴적물의 계절적 변화 양상은 북측(측선 AA)과 남측(측선 BB, CC, DD, EE) 해빈에서 다소 다른 양상을 보인다. 북측 해빈에서는 가을과 겨울에 조립하고 봄과 여름에 세립해지는 반면, 남측 해빈에서는 겨울과 봄에 조립해지고 여름과 가을에 세립해지는 양상을 보인다(Fig. 6). 이는 쇄파대의 육지쪽 해빈에 형성되는 해안선에 평행한 방향(북동-남서 방향)의 연안류가 가을과 겨울 동안 강화되어 북측 해빈으로부터 남측 해빈을 따라 퇴적물이 이동되기 때문으로, 북측 해빈에서는 고에너지 조건이 형성되는 가을과 겨울에 직접적으로 조립한 양상을 보이나 남측 해빈에서는 퇴적물의 이동이 이루어진 겨울과 봄에 조립해져 다소의 시간 간격을 갖는 것으로 해석된다. 이와 같은 현상은 2001년부터 2003년까지 2년 동안 모니터링된 임자도 해빈의 퇴적률에서도 잘 나타나고 있다(Table 3). 즉 2년 동안 모니터링된 임자도 해빈의 퇴적률은 측선 AA에서 -7.7 mm yr^{-1} , BB에서 5.7 mm yr^{-1} , CC에서 54.8 mm yr^{-1} , DD에서 78.3 mm yr^{-1} 로 해빈의 북측에서는 침식되고 남측에서는 퇴적되며 남측을 따라 가면서 퇴적률이 증가하여 퇴적물의 이동이 남쪽을 따라 이루어짐을 알 수 있다. 특히 2001~2002년 동안 퇴적률은 측선 AA에서 $-108.7 \text{ mm yr}^{-1}$, BB에서 -33.6 mm yr^{-1} , CC에서 -14.2 mm yr^{-1} , DD에서 105.1 mm yr^{-1} 로 해빈퇴적물이 남쪽을 따라 극명하게 이동되고 있음을 보여주고 있다. 그러나 2002~2003년 동안 퇴적률은 측선 AA에서 93.4 mm yr^{-1} , BB에서 44.9 mm yr^{-1} , CC에서 91.5 mm yr^{-1} , DD에서 95.1 mm yr^{-1} 로 모든 측선에서 비정상적으로 퇴적되어 2001~2002년 동안과는 다른 양상을 보인다. 이와 같은 양상은 아마도 간척과 매립, 골재채취 등에 의한 연안 및 해저지형의 변화와 지구온난화에 따른 해수면 상승 등 인위적 요인과 자연적 요인들에 의해 임자도 해빈의 에너지 수준이 평행상태에 도달하지 못하고 불안정한 상태에 있음을 의미하는 것으로 해석될 수 있다. 특히 2년 동안 모니터링된 집적률의 계절적 변화의 경우, 매우 복잡한 양상을 보일 뿐 아니라 뚜렷한 규칙성을 발견하기도 어려워 이와 같은 현상을 뒷받침한다고 할 수 있다. 일반적으로 개방형 해안에서 집적률은 계절풍의 영향에 따라 고에너지 환경이 조성된 겨울에 침식되고, 상대적으로 저에너지 환경이 조성된 여름에 퇴적되는 경향을 보인다(추 등, 1996; Lee *et al.*, 1999; Yang and Chun, 2001). 따라서 임자도 해빈 퇴적작용의 계절적 변화를 좀 더 명확히 규명하기 위해서는 장기간에 걸친 모니터링이 필요하

Table 3. Sedimentation rates along transect lines on the Imjado beach during 2001-2003

Sites	2001-2002				Annual sedimentation rate (mm/yr)	2002-2003				Sedimentation rate (mm/yr)	
	Winter (12-2)	Spring (3-5)	Summer (6-8)	Autumn (9-11)		Winter (12-2)	Spring (3-5)	Summer (6-8)	Autumn (9-11)		
Line-AA											
AA1	4.1	14.0	-9.3	-49.4	-40.6	39.5	50.7	-414.6	270.7	-53.7	-47.2
AA2	-89.1	-19.8	19.1	8.4	-81.4	-71.9	75.1	51.2	28.8	83.2	0.9
AA3	-20.0	-42.7	-30.0	-180.9	-273.6	224.3	-64.6	176.1	-56.4	279.4	2.9
AA4	-80.5	20.2	72.5	-51.4	-39.2	-112.7	75.2	4.2	97.9	64.6	12.7
Average	-46.4	-7.1	13.1	-68.3	-108.7	19.8	34.1	-45.8	85.2	93.4	-7.7
Line-BB											
BB1	-32.3	-18.4	37.2	-53.4	-66.9	32.5	27.3	-12.7	37.7	84.8	9.0
BB2	85.5	18.8	-0.2	-3.7	100.4	-150.7	127.1	103.3	-27.3	52.4	76.4
BB3	-20.5	20.2	-53.6	4.1	-49.8	-13.1	0.7	12.0	10.4	10.0	-19.9
BB4	-56.2	44.2	-25.8	-80.3	-118.1	-75.7	27.1	-1.8	82.9	32.5	-42.8
Average	-5.9	16.3	-10.6	-33.4	-33.6	-51.8	45.6	25.2	25.9	44.9	5.7
Line-CC											
CC1	-0.7	-20.3	49.8	-28.7	0.1	-31.1	51.6	46.7	59.9	127.1	63.6
CC2	29.3	101.9	-31.7	20.2	119.7	-27.2	-28.2	7.5	110.6	62.7	91.2
CC3	-70.9	23.7	-69.2	-54.2	-170.6	15.9	11.5	95.3	25.3	148.0	-11.3
CC4	92.2	-22.2	7.4	-83.7	-6.3	37.7	-28.7	-22.5	170.4	156.9	75.3
Average	12.5	20.8	-10.9	-36.6	-14.2	-1.2	1.6	31.8	91.5	123.7	54.8
Line-DD											
DD1	0.3	-27.0	9.9	57.6	40.8	13.5	-32.2	-117.9	154.4	17.8	29.3
DD2	128.3	53.2	0.0	34.9	216.4	-92.7	123.9	-153.1	154.4	32.5	124.5
DD3	-17.7	-56.3	-63.5	290.9	153.4	-118.1	112.5	-18.7	56.4	32.1	92.8
DD4	61.7	-7.8	75.2	-119.6	9.5	146.9	-72.6	33.7	15.0	123.0	66.3
Average	43.2	-9.5	5.4	66.0	105.1	-12.6	32.9	-64.0	95.1	51.4	78.3

며, 향후 해빈의 퇴적역학에 관한 연구가 필수적으로 이루어져야 할 것으로 생각된다.

결 론

서해남부 임자도 해빈에서 지형 단면과 표층퇴적물, 집적률의 모니터링을 통해 퇴적작용의 계절적 변화를 조사한 결과, 주요 내용은 다음과 같다.

(1) 임자도 해빈 주변의 표층퇴적상은 퇴적물의 조직 특성을 대로 사(S), 니질사(mS), 사질니(sM), 니(M)의 4개 퇴적상으로 구분된다. 여름에는 니질사와 사질니 퇴적상의 발달이 매우 양호하나 겨울에는 사와 니질사 퇴적상으로 바뀌어 전반적으로 조립해지는 계절적 변화를 보인다. 그러나 해빈의 전면 조하대에서는 다른 지역과는 달리 세립해지는 경향을 보인다.

(2) 해빈 지형은 큰 경사도를 갖는 해빈면과 낮은 경사도를 갖는 중·저조해빈으로 구분된다. 해빈면의 경사는 여름에 증가하고 겨울에 감소하며, 중·저조해빈은 여름에 파봉과 유흔구조가 잘 발달하는데 반해, 겨울에는 파봉과 유흔구조가 파괴되고 메가 연흔이 잘 발달하여 전체적으로 평坦해지는 계절적 변화를 보인다.

(3) 해빈 퇴적물은 해빈의 북측에서 남측 방향으로, 간조선에서 만조선 방향으로 세립해지는 경향을 보이며, 북측과 남측에서 서로 다른 계절적 변화를 보인다. 북측 해빈에서는 해안선에 평행한 방향의 연안류가 강화되는 가을과 겨울에 조립해지는데 반해, 남측해빈에서는 북측으로부터 퇴적물의 이동이 이루어진 겨울과 봄

에 조립해지는 경향을 보인다.

(4) 퇴적률은 북측 해빈에서는 침식되고 남측 해빈에서는 퇴적되며 남측을 따라 가면서 증가하는 경향을 보인다. 이와 같은 현상은 해빈 퇴적물이 해안선 방향으로 발달하는 연안류에 의해 남측 해빈을 따라 이동하기 때문으로 생각되며, 평균입도의 시·공간적 변화와도 잘 일치된다. 그러나 집적률의 계절적 변하는 매우 복잡한 양상을 보일 뿐 아니라 뚜렷한 규칙성을 찾기도 어렵다. 이와 같은 현상은 아마도 인위적 요인에 의한 연안 및 해저지형의 변화와 지구온난화에 따른 해수면 상승 등 다양한 요인들에 의해 임자도 해빈의 에너지 수준이 평행상태에 도달하지 못하고 불안정한 상태에 있음을 의미하는 것으로 해석된다.

사 사

본 연구는 “한국과학재단의 지역대학 우수과학자 지원 연구비(과제번호: R05- 2003-000-10418-0)”에 의해 수행되었습니다. 현장조사에 도움을 준 전남대학교 김석, 김영선, 이수완 교수 및 목포대학교 김영길 교수에게 고마움을 전합니다. 또한 본 논문의 세밀한 심사와 유익한 조언을 주신 윤석훈 교수님과 익명의 심사위원, 그리고 강효진 편집위원님께 심심한 감사를 드립니다.

참고문헌

류상옥, 1993. 임자도 주변 해역의 퇴적환경. 석사학위논문, 전남

- 대학교, 광주, 65 pp.
- 추용식, 권수재, 박장준, 박용안, 1996. 한국 서해중부 해변에서의 퇴적작용의 계절변화. 해양연구, **18**: 37–45.
- Bascom, W.H., 1951. The relationship between sand size and beach face slope. *Trans. Am. Geophysics. Union*, **32**: 866–874.
- Cooper, J.A.G. and D.W.T. Jackson, 1999. Wave spray-induced sand transport and deposition during a coastal storm, Magilligan Point, Northern Ireland. *Mar. Geol.*, **161**: 377–383.
- Davies, J.S., 1964. A morphogenic approach toward shorelines. *Z. Geomorph.*, **8**: 127–142.
- Davies, R.A., 1985. Coastal sedimentary environments. Springer-Verger. New York Berlin Heidelberg, Tokyo, pp. 380–444.
- Davies, R.A., W.T. Fox, M.O. Hayes and J.C. Boothroyd, 1972. Comparison of ridge and runnel systems in tidal and nontidal environments. *J. Sediment. Petrol.*, **42**: 413–421.
- Folk, R.L. and W.C. Ward, 1957. Brazos river bar: A study in the significance of grain size parameters. *J. Sediment. Petrol.*, **27**: 3–26.
- Folk, R.L., 1968. Petrology of sedimentary rocks. Hemphill's, Austin, Texas, 170 pp.
- Ingram, R.L., 1971. Sieve analysis. In: Procedures in sedimentary Petrology, edited by Carver, R.E., Willey-Inter Science, New York, pp. 49–67.
- Inman, D.L. and J. Filloux, 1960. Beach cycles related to tide and local wind wave regime. *Jour. Geol.*, **68**: 225–231.
- King, C.A.M., 1972. Beaches and coasts, 2nd ed. Edward Arnole, London.
- Korea Meteorological Adminstration, 1991-2000. Monthly weather report.
- Lee, H.J., Y.S. Chu and Y.A. Park, 1999. Sedimentary processes of fine-grained material and the effect of seawall construction in the Daeho macrotidal flat-nearshore area, northern west coast of Korea. *Mar. Geol.*, **157**: 171–184.
- Levoy, F., E.J. Anthony, O. Monfort and C. Larsonneur, 2000. The morphodynamics of megatidal beaches in Normandy, France. *Mar. Geol.*, **171**: 39–59.
- Masselink, G. and B. Hegge, 1995. Morphodynamics of meso- and macrotidal beached: Exemples from central Queensland, Australia. *Mar. Geol.*, **129**: 1–23.
- Masselink, G. and C.B. Pattiarchi, 2001. Seasonal changes in beach morphology along the sheltered coastline of Perth, western Australia. *Mar. Geol.*, **172**: 243–263.
- Masselink, G. and A.D. Short, 1993. The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: A conceptual beach model. *Jour. Coastal Res.*, **9**: 785–800.
- May J.P. and F.W. Strapor, 1996. Beach Erosion and Sand Transport at Hunting Island, South Carolina, USA. *Jour. Coastal Res.*, **12**: 714–725.
- National Geography Institute, 1983. Basic research report on near-shore environments of Korea, Seoul, Korea 70 pp.
- Shepard, F.P., 1950. Beach cycles in southern California. U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board Tech. Memo. No. 20.
- Shepard, F.P., 1963. Submarine Geology, 2nd ed. Harper and Row, New York, 557 pp.
- Short, A.D. and P.A. Hesp, 1982. Wave, beach and dune interactions in southeastern Australia. *Mar. Geol.*, **48**: 259–284.
- Voulgaris, G. and M.B. Collins, 2000. Sediment resuspension on beaches: response to breaking waves. *Mar. Geol.*, **167**: 167–187.
- Wright, L.D., P. Nielsen, A.D. Short and M.O. Green, 1982. Morphodynamics of a macrotidal beach. *Mar. Geol.*, **50**: 97–128.
- Yang, B.C. and S.S. Chun, 2001. A seasonal model of surface sedimentation on the Baeksu open-coast intertidal flat, southwestern coast of Korea. *Geosci. Jour.*, **5**: 251–262.

2004년 4월 23일 원고접수

2004년 7월 3일 수정본 채택

담당편집위원: 강효진