

제주도 서부 하모와 협재 해빈 퇴적물의 계절 변화

윤정수* · 김태정

제주대학교 지구해양학과, 690-756, 제주도 제주시 아라동 1

Seasonal Variations of Hamo and Hyeopjae Beach Sediments in the Western Part of Jeju Island

Jeungsu Youn* and Tae-Joung Kim

Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

Abstract: The Hamo and Hyeopjae beaches in the western part of Jeju Island were studied in terms of seasonal variations of surface sediment and beach profile. Seasonal drift direction of the beach sands also was investigated. The Hamo beach of 7.3°-10.8° steep is composed of medium sand containing volcanic clasts and shell fragments. The Hyeopjae beach of 2.8°-6.5° steep is composed of coarse shelly sand. Hamo beach deformation is probably caused by the jetties constructed in the western part of the beach. In the Hyeopjae beach, surface sands were drifted into the dune side by the northwestern stormy wind during winter season.

Keywords: beach deformation, surface sediment, seasonal variations, Hamo and Hyeopjae beaches

요약: 제주도 서부의 하모와 협재 해빈에서 표층 퇴적물과 해빈단면의 계절별 변화를 연구하였다. 또한 계절별 해빈사의 이동방향을 조사하였다. 하모해빈은 경사 7.3°-10.8°이며, 화산암 역과 패각편을 포함한 중립질 모래로 구성된다. 협재해빈은 경사 2.8°-6.5°이며, 조립질 패각편 모래로 구성된다. 하모해빈은 해빈 서쪽에 축조된 방사제의 영향으로 해빈 변형이 발생하는 것으로 추정된다. 협재해빈은 동계 동안 북서계절풍에 의해 사구 쪽으로 표사이동이 일어났다.

주요어: 해빈 변형, 표층퇴적물, 계절변화, 하모와 협재해빈

서론

해안은 바다와 육지를 연결하는 전이지역으로 넓게 발달하는 해빈, 해안의 만, 삼각주 등으로 구분된다 (Davis, 1972). 이러한 해안은 외부의 환경변화에 민감하게 반응하여 해안선의 변화를 발생시킨다. 그 중 해빈은 항상 파랑, 조석, 연안표류, 바람 등의 육상과 해양환경의 영향을 복합적으로 받고 있는 유동상태에 있으며 (Shepard, 1973), 현생의 해양환경 중에서 변화가 큰 환경이다. 또한 해빈은 다양한 레저 활동의 활성화로 서핑, 스노클, 비치스포츠, 경관감상, 낚시 등 다양한 해양 레크리에이션 활동이 이루어지는 우리에게 휴식과 위락의 공간으로 제공되는 중요한 해안

공간자원이기도 하다. 그러나 제주도 연안에 분포하고 있는 일부 해빈들은 최근 침식현상으로 인해 암반이 노출되고 해빈 면적이 축소되고 있다.

해빈 변형을 일으키는 주 요인은 특정 계절에 치우친 높은 파고, 일시적 폭풍에 의한 급속한 해빈사 유실, 하천 홍수방지 제방의 축조에 따른 모래의 운반 및 퇴적에 인위적인 변화, 지구온난화에 의한 해수면 상승과 해빈 내에 설치된 방파제, 돌제(groin), 호안벽, 고층건물, 인공어초 등의 인공구조물이 파랑, 조류, 연안류 및 바람 방향의 변화에 의해 해양으로부터 운반·퇴적되는 해빈사의 이동방향 변경이나 차단 등을 들 수 있다 (Shepard, 1973; Lancaster, 1986). 이러한 해빈 침식작용에 의한 해빈 변형은 국내 주요 해수욕장인 해운대 해빈에서도 심각하게 나타나 이에 대한 원인규명 및 대책수립을 위한 조사·연구가 수년간 수행되었으며 (민병형, 1982; 민병형 외, 1984; 1985; 1987), 그 외 한반도 서해 및 남해안에

*Corresponding author: jsyoun@cheju.ac.kr
Tel: +82-64-754-3432
Fax: +82-64-725-2461

분포하는 일부 해빈에 대한 연구가 이루어졌다(류상욱 외, 2004; 류상욱와 장진호, 2005; 최순학와 김영기, 2005, 윤정수 외, 2008; 소광석 외, 2010). 제주도 연안에 분포하는 해빈들의 모래유실에 대한 구체적인 조사·연구는 이루어진 바는 없다. 단지 해수욕장 개장을 앞두고 침식이 심한 해빈지역에 수백 톤에 달하는 많은 양의 모래를 인공 투사하는 정도에 그치고 있어 해빈 변형을 일으키는 주요 원인규명과 방지대책 수립을 위한 조사·연구가 요구되고 있다.

따라서 본 연구는 제주도 서부연안에 분포하는 주요 해수욕장 중 하모와 협재해빈에 대하여 동계와 하계로 구분하여 야외조사와 실내연구를 통해 해빈퇴적물의 계절별 분포상태, 지역별 해빈모래의 퇴적과 침식량 및 부유사의 이동상황 등을 파악하여 해빈변형의 원인을 이해하는 데 중점을 두었다.

주변지질과 기상

제주도는 신생대 제3기 말에서 제4기 중에 일어난 화산활동에 의해 형성된 화산도로서 장축의 길이가 73 km, 단축은 32 km, 해안선의 길이가 263 km인 타원형의 섬이다(원종관 외, 1988). 수계는 한라산체를 발원지로 하여 60여개의 크고 작은 하천들이 해안방향으로 방사상으로 발달되어 있고, 남북의 급사면에 비하여 경사가 완만하고, 용암대지가 발달하는 동서사면에는 수계발달이 빈약한 편이다(최순학 외, 1989). 도내 하천들에 두부침식의 선단포고는 대개 1,400-1,600 m 정도이다. 대부분의 하천은 유로상에 발달된 투수층과 주상절리 구조를 통하여 유수가 쉽게 지하로 침투되어 건천을 이루고 있다. 또한 하천은 강우시에 일시적으로 유출하는 간헐천의 특성을 갖고 있어 하천에 의한 바다로의 모래공급을 기대할 수 없다. 하모해빈의 배후 지질은 장석감암석현무암과 송

악산응회암층으로 구성되며, 협재해빈 주위에는 장석감암석현무암과 해안 사구층으로 구성된다(이문원 외, 1994).

고산지역의 동계(10, 11, 12월)와 하계(6, 7, 8월)의 기온범위는 7.9-27.7°C이며 8월에 27.7°C로 가장 높고 12월에 7.9°C로 가장 낮았다. 강수량은 겨울철에 평균 52.1 mm이며 여름철은 평균 241.1 mm로 겨울철 보다 높았다. 최대풍속은 12월에 29.1 m/sec로 최대치를 보였고, 6월에 12.5 m/sec로 가장 낮았으며 여름철에는 남동계절풍이 우세한 반면 겨울철에는 북서계절풍이 탁월한 편이다. 조차는 139.6-154.1 cm (av. 148.7 cm) 범위로 여름철이 겨울보다 다소 높은 편이다(Table 1, 중앙기상청, 2010).

연구 방법

야외 조사

제주도 서부연안 지역에 분포하는 해빈들 중 해빈 침식이 심한 하모해빈과 해빈 발달 상태가 양호한 협재 해수욕장을 대상으로 여름철(2010년 6-8월)과 겨울철(2010년 11-12월)에 해빈조사를 실시하였다. 현장조사는 간조선, 만조선 및 해빈애도 상부로 구분하여 해빈단면(길이, 폭, 경사도)의 측정과 해빈 표층부에서 분석용 시료채취가 이루어졌으며, Thompson (1973)이 제시한 방법에 의거 높이 2m의 눈금이 매겨진 폴대(pole)를 각 해빈당 9개 지점에 일주일간 고정 설치하여 해빈지형의 변화상을 매일 측정하였다(Fig. 1). 또한 구경 50 mm, 높이 30 cm PVC 파이프를 정방향 앵글가대(사방 2.0m×높이 0.5 m)에 동서남북 방향별로 4개를 고정시킨 포사기를 제작하여 하모와 협재 해빈 중앙부지역의 간조선과 만조선 사이 해저면에 25시간 동안 고정 설치하여 해저면 상부수층(저층수)중의 부유사 이동량을 조사하였다.

Table 1. Monthly meteorological data and tide range in the Kosan region

Region	Month	Av. temp. (°C)	Precipitation (mm)	Wind direction	Max. wind speed (m/s)	Av. wind speed (m/s)	Tidal range (cm)
Kosan	2010. 6	20.9	213.5	NNW	12.5	3.9	147.5
	7	25.2	195.6	SE	15.3	5.2	153.3
	8	227.7	324.1	SW	20.9	5.1	151.6
	Av.	24.6	241.1		16.2	4.7	150.8
	2010. 10	18.0	100.1	NNW	25.7	7.1	139.6
	11	12.8	10.1	NW	24.5	7.5	154.1
	12	7.9	46.1	WNW	29.1	11.4	146.1
	Av.	12.9	52.1		26.4	8.7	146.6

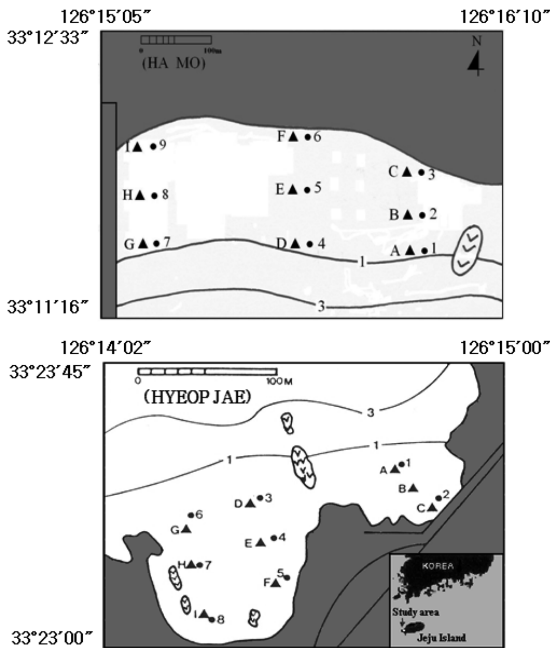


Fig. 1. Sampling and pole sites in the Hamo and Hyeopjae beach areas. 1-8: sampling stations, A-I: pole stations, -: contours (depth in meters).

실내 연구

채취된 시료의 입도분석을 위해 증류수로 염분을 제거하고 건조기에서 완전히 말린 다음 4분법으로 분류하여 그 중 50 g을 미국 표준체 망으로 기준하여 -1Φ +4Φ까지 1Φ 간격으로 나누어 5분간 체질하였다. 이 결과 얻어진 1Φ 간격의 입도별 무게 백분율을 누적분포곡선을 작성하여 Folk and Ward(1957)의 공식에 의거 조직표준치를 계산하였다. 탄산염 함량 분석은 시료 30 g을 분쇄기에서 곱게 부순 후 1N-HCl에 용해시켜 pH 시험지에 강산으로 나타날 때까지 계속 염산을 첨가 시키고, 반응이 끝나면 여과지 (filter paper, No. 6)로 여과시킨 후 증류수로 세척하여 105°C에서 건조시킨 후 함량을 계산하였다.

결과 및 고찰

해빈의 특징

제주도의 해안지형은 주로 화산암초로 이루어져 비교적 단조로운 편이며 크게 암석해안과 사질해안으로 구분할 수 있다. 암석해안은 단애로 된 해안과 현무암초로 이루어진 해안으로 나눌 수 있고, 사질해안은 주로 연안성 패각사로 이루어진 백사해빈과 해안 주

변의 현무암초와 화산쇄설층의 침식물질과 패각편이 혼재된 흑사해빈으로 세분할 수 있다.

하모해빈은 장석감람석현무암초 돌출부와 송악산응회암층 사이의 만입부에 초승달 모양으로 발달하는 만두해빈(bayhead beach)이다. 본 해빈은 총길이가 321 m이고, 해빈 폭은 32.2-76.3 m(av. 58 m), 해빈경사는 7.3°-10.8°(av. 9.4°)로 급한 편이다. 해빈 중앙에는 길이 470 m, 폭이 5-34 m를 갖는 자갈대가 간조선 지역에서 바다 쪽으로 길게 뻗어 있는 형태로 항상 존재하여 사력질 해빈에 해당한다. 이곳 자갈은 최대 51 cm, 최소 0.8 cm의 직경을 보이며 원마도가 다소 불량한 자갈대로 간조선에 노출된다. 해빈 서쪽 끝에는 과거에는 현무암초로 이루어진 해안이었으나, 길이 320 m, 폭 17 m인 방파제가 해안선에 평행하게 해빈 지역까지 축조된 이후로는 해안으로 접근하는 해류와 파도의 변화에 따라 동쪽지역의 해빈 모래가 서쪽의 방파제 안쪽으로 이동 퇴적되어 방파제 축조 이전과는 다른 형태를 보이는 해빈변형이 일어나고 있는 지역이다. 본 해빈의 해빈퇴적물 구성은 현무암 및 응회암편 쇄설성모래가 42.47-88.76%(av. 65.73%), 패각편(CaCO₃)이 11.1-57.53%(av. 34.24%)로 패각사와 주변 화산암류의 침식산물로 이루어진 백사와 흑사가 혼재된 해빈에 해당되며, 평균입도가 1.34Φ로 중립질 모래해빈에 해당한다(Table 2).

협재해빈은 대지상의 장석감람석현무암초 위에 형성된 해빈으로 해빈 배후에는 평균 층후가 6-8 m되는 해안사구가 내륙으로 약 2 km까지 발달되어 있다. 해안사구란 해빈모래가 바람에 날려서 해빈의 후면으로 이동하여 형성된 퇴적지형으로 모래해안의 후면이나 간석지에 접해서 발달되는 것이 일반적이다. 이러한 해안사구는 두 가지의 종류로 분류할 수 있는데 현재에도 계속 생성되고 있는 사구를 현생사구라 하며, 과거에 형성되어 현재에는 주로 파괴되고 있는 것을 고사구라 한다(Short and Hesp, 1982; Klijn, 1990). 그러나 현생사구에서도 하천상류 지역에서의 골재자원 채취나 댐 건설 등으로 모래의 공급이 부족한 상태에서 바람이나 파랑의 침식에 의해 해안사구의 축소현상이 일어나고 있는 경우도 있다(서중철, 2001). 협재해빈의 총길이가 1,050 m이고, 해빈 폭은 52.4-195 m(av. 98.7 m)이며, 해빈경사는 2.8°-6.5°(av. 4.7°)로 해빈경사면으로부터 수심 1 m까지의 바다 쪽 거리가 약 250 m로 전체적으로 완만한 경사의 해저 지형을 이루고 있다. 또한 해빈 중앙부의 간조선상에

Table 2. Calcium carbonate content of beach sediments in the Hamo and Hyeopjae (summer)

Study area	Sample No.	Mz (Φ)	Sand (%)	CaCO ₃ (%)
HAMO	1	-0.05	71.43	28.56
	2	1.65	88.76	11.1
	3	2.08	67.62	32.34
	4	-0.62	85.11	14.89
	5	1.98	71.38	28.59
	6	1.83	42.97	57.01
	7	1.22	69.21	30.74
	8	1.96	52.58	47.4
	9	1.98	42.47	57.53
	Range	-0.62~	42.47~	11.1~
Average	2.08	88.76	57.53	
HYEOPJAE	1	0.66	3.3	96.7
	2	0.72	3.65	96.35
	3	0.81	4.71	95.29
	4	0.89	7.59	92.41
	5	-1.62	16.28	83.72
	6	1.06	2.83	97.17
	7	0.98	14.0	86.0
	8	-0.31	6.35	93.65
	Range	-1.62~	2.83~	83.72~
	Average	1.06	16.28	97.17
Average	0.4	7.34	92.66	

폭에 35 m, 길이 120 m의 원추형 사주가 형성되며 이는 바다쪽 약 75 m까지도 사주가 형성되었다가 겨울철에는 파괴되어 버린다. 본 해변의 퇴적물구성은 현무암편 모래가 2.83-16.28%(av. 7.34%), 패각편(CaCO₃)이 83.72-97.17%(av. 92.66%)로 패각편이 높은 함유량을 보이는데 이는 바다에 쌓인 패각편들이 파도나 연안류에 의해 공급되는 백사해빈이며, 평균 입도는 0.4 Φ 로 조립질 모래해빈에 해당한다(Table 2).

해빈퇴적물의 계절별 분포

해저에 쌓여있던 모래가 해류나 파도의 작용에 의해 연안으로 운반되어 하나의 해변을 형성시키는데 가장 중요한 요인은 연안류이다. 연안류는 쇄파가 재동시킨 물질을 부유 및 운반시키는 연안표류를 진행시킨다. 일반적으로 연안류에 의한 해수 수송량은 진입한 파랑이 특성과 입사각에 관계가 있다. 즉, 파고가 높을수록 또는 입사각이 클수록 연안류는 강해져 큰 파랑은 많은 연안표류와 큰 입자의 표사를 수반하는 것이 일반적이다(Shepard, 1973). 불규칙한 해안

에서 해수의 실제적인 수송은 암석돌출부로부터 만입부로 향하게 된다. 따라서 암석돌출부는 파랑의 에너지가 집중되는 관계로 침식을 많이 받게 되나, 만입부 쪽에는 물질이 이동·집적이 이루어져 해변을 형성하게 된다(Madsen and Grant, 1967). 항만 개설을 위한 해안에 수직으로 축조된 방파제나 돌출벽(projecting wall)의 구축으로 해변들이 파괴되는 것으로 보고되었다(Shepard, 1973). 즉, 해빈지역에 축조된 방파제는 파도의 집중 영향을 감소시키기 때문에 폭풍우 기간에 격변적인 파도는 해빈모래를 침식시키고, 폭풍우가 없는 조용한 시기에는 모래가 보충되지 않고 이안류에 의해 침식만 계속되어 해변이 파괴된다.

하모와 협재해빈 지역에서 동계와 하계에 채취한 34개의 해빈퇴적물 시료에 대한 입도분석 결과는 다음과 같은 특징을 보였다. 하모해빈의 평균입도 분포는 하계 -0.62-2.08 Φ (av. 1.33 Φ)이고 동계 -0.9-2.13 Φ (av. 1.25 Φ)로 중·조립질 모래에 해당하며 정점 1을 제외하고는 유사한 입도조성을 보였다. 저조선, 만조선, 해변에도 지역에 따라 입도분포 경향이 차이를 보이는데 하계에는 해변동쪽 애도지역(3)과 방파제와 인접한 애도지역(9)이 평균입도는 1.98-2.08 Φ 로 가장 세립한 입도분포를 보이고, 해변 동쪽과 중앙부의 간조선지역(정점 1, 4)은 -0.62- -0.05 Φ 로 가장 조립한 퇴적물 분포를 보였다(Fig. 2). 동계에는 하계와 유사하게 해변 서쪽 애도지역(9)이 2.13 Φ 로 가장 세립한 입도조성을 보이고, 중앙부와 동쪽의 간조선, 만조선지역(정점 1, 2, 4)이 -0.9-0.03 Φ 로 극조립 및 조립질의 입도조성을 보이며, 그 외 지역은 1.52-1.88 Φ 로 중립질 모래의 입도조성을 보였다(Fig. 2). 동쪽 애도지역이 하계에 비해 다소 조립한 입도조성을 보이는 것은 겨울철 빈번한 북서계절풍에 의한 애도지역의 모래가 사구 쪽으로 이동되기 때문으로 사료된다. 겨울철 조사기간 중에 해변 애도지역에서 바람에 의해 해빈모래가 날려서 생성된 연흔구조를 관찰할 수가 있었다. 또한 동쪽과 중앙부 간조선 지역이 가장 조립한 입도조성을 보이는 것은 하모해빈 서쪽지역에 해안선에 평행으로 해빈지역까지 축조된 방파제(운진항)가 이곳으로 접근하는 파도와 연안류의 방향을 변화시킴으로써 바다에서 해빈쪽으로 모래공급이 일부 차단되기 때문으로 사료된다.

협재해빈의 평균입도는 하계 -1.62-1.06 Φ (av. 0.4 Φ)이고 동계 -1.16-1.03 Φ (av. 0.43 Φ)로 유사한 입도

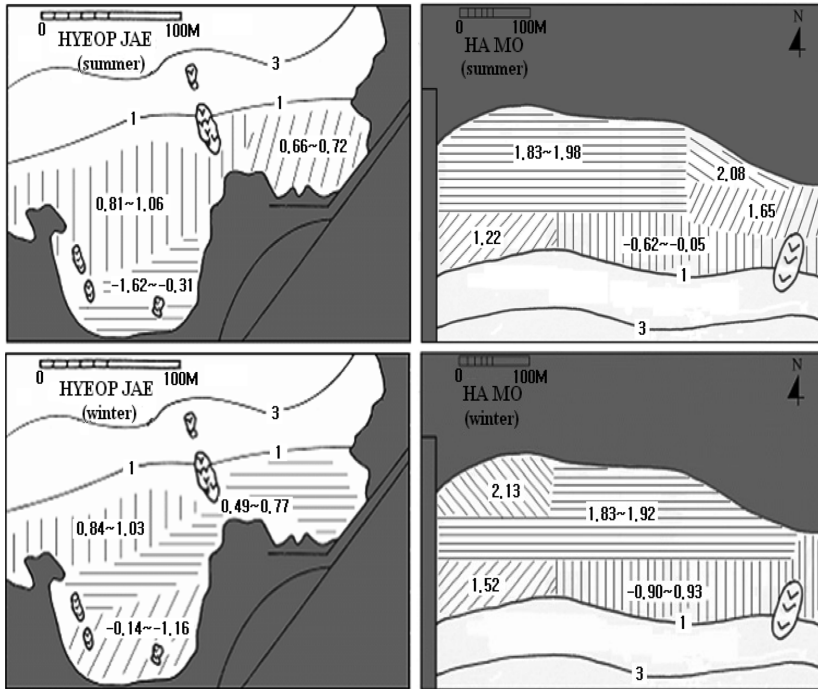


Fig. 2. Distribution of mean grain size in the Hamo and Hyeojae beaches (unit; phi).

조성을 보였다. 협재해빈도 지역에 따라 입도분포가 다른데 하계에는 서쪽 해빈에도지역(정점 5, 8)의 평균입도는 $-1.62 \sim -0.31\Phi$ 로 극조립질 모래가 분포하고 저조선지역(정점 3, 6)은 $0.81 \sim 1.06\Phi$ 로 조립질 모래가 분포한다(Fig. 2). 동계에는 하계와 유사하게 간조선지역(정점 1, 3, 6)은 평균입도가 $0.77 \sim 1.03\Phi$ 중·조립질 모래가 분포하나 해변 서쪽 애도지역(정점 5, 8)은 $-0.14 \sim -1.16\Phi$ 로 더욱 조립한 입도조성을 보였다. 해변애도지역이 간조선이나 만조선 지역보다 더 조립한 입도조성을 보이는 것은 파도의 작용에 의해 해변지역에 쌓였던 모래가 겨울철 강한 해풍에 의해 파도의 영향이 없는 해변애도지역의 세립한 모래들이 사구지역으로 이동되기 때문이며, 협재해빈 배후에는 해안사구가 잘 발달되어 있다.

한편, 입도분석 결과로부터 계산된 분급도는 하모해빈은 하계 $0.35 \sim 1.08\Phi$ (av. 0.64Φ), 동계 $0.38 \sim 1.35\Phi$ (av. 0.8Φ)로 다양한 분급을 보이며 겨울철이 다소 불량하였다. 이는 아마도 겨울철의 강한 해풍에 의해 세립질 모래가 바다와 사구지역으로 이동하는 것으로 보여진다. 지역별 분급도의 분포는 하계에는 동쪽 애도지역(정점 3), 서쪽의 만조선과 애도지역(정점 8, 9)이 $0.35 \sim 0.38\Phi$ 로 가장 양호한 분급을 보였고, 암반

지대가 노출되어 있으며 자갈이 함유되어 있는 동쪽 및 서쪽의 간조선지역(1, 7)에서 $1.0 \sim 1.08\Phi$ 로 가장 불량한 분급을 보였다(Fig. 3). 동계에는 동쪽 애도지역(3)과 방파제와 인접한 서쪽 만조선과 애도지역(정점 8, 9)에서 $0.38 \sim 0.48\Phi$ 로 하계와 유사하게 가장 양호한 분급을 보였고 중앙부와 해변 동쪽 간조선, 만조선지역(정점 1, 2, 4)이 $1.04 \sim 1.35\Phi$ 로 불량한 분급 분포를 보였다. 이는 아마도 하모해빈 서쪽에 축조된 방파제가 이곳의 연안류와 이안류의 방향을 바꾸어 동쪽 해역해빈지역은 침식되는 대신 서쪽의 항구 쪽은 해변모래가 쌓이기 때문인 것으로 해석된다.

협재해빈 지역의 분급도는 하계 $0.45 \sim 1.67\Phi$ (av. 0.79Φ), 동계 $0.52 \sim 1.82\Phi$ (av. 0.9Φ)로 보통의 분급을 보이며, 하모해빈 지역보다 분급이 다소 불량한 특징을 보였다. 지역별 분급도의 분포는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 하계에는 해저에 쌓여있던 모래가 파도작용으로 운반되어 쌓이는 저조선과 만조선지역(정점 3, 4, 6, 7)이 $0.45 \sim 0.57\Phi$ 로 가장 양호한 분급 분포를 보였고, 해변지역에 쌓였던 모래가 강한 해풍에 의해 세립질 모래들이 육지 사구 쪽으로 운반되고 조립질 모래와 자갈이 섞여있는 해변 애도지역(정점 5, 8)에서 $1.15 \sim 1.67\Phi$ 로 불량한 분급분포를 보였다. 동계에

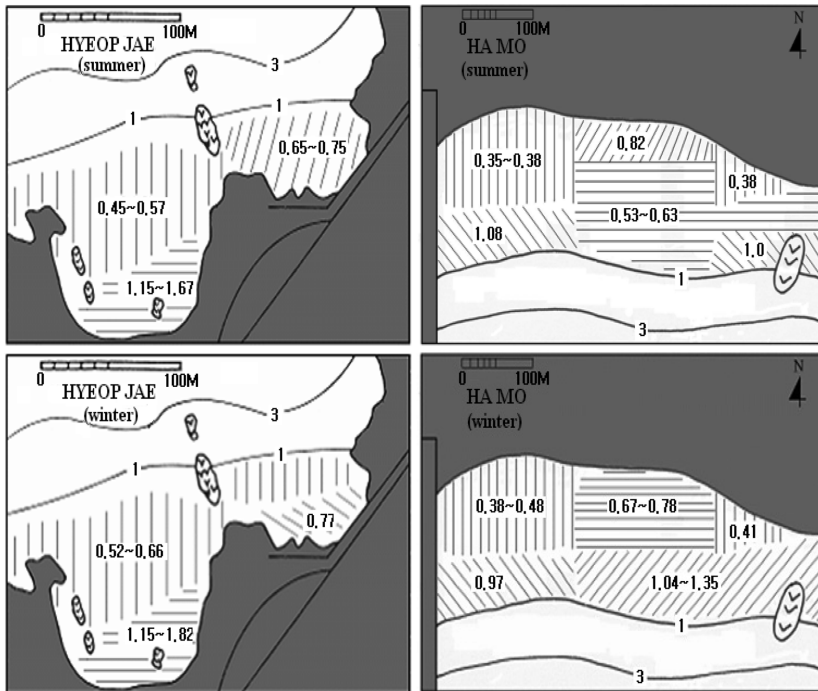


Fig. 3. Distribution of sediment sorting in the Hamo and Hyeojae beaches (unit; phi).

는 간조선과 만조선지역(정점 1, 3, 4, 6, 7)은 0.52-0.66 Φ 로 보통의 분급분포를 보였고 서쪽 애도지역(정점 5, 8)은 1.15-1.82 Φ 로 불량한 분급을 보였다. 이는 겨울철 강한 해풍에 의해 애도지역에 분포하는 세립질 모래들이 사구지역으로 이동하기 때문인 것으로 사료되며, 협재해빈의 만조선과 애도지역에 겨울철 바람에 의한 모래 유실을 방지하기 위해 비닐덮개를 하는 등 대책을 수립하고 있다.

해빈 부유사의 이동

해빈은 항상 파랑, 조석, 연안표류, 바람 등의 작용을 받고 있는 부단한 유동상태에 있으며 여름철 동안은 쇄파가 부유시킨 물질을 연안류에 의해 해안 쪽으로 운반됨으로 해빈지역은 넓게 모래로 덮여지며 해빈단면은 낮은 구배와 해빈 폭은 넓어지지만, 겨울이 되면 빈번한 강한 북서계절풍이 내습으로 인해 해빈은 심한 침식을 받아 모래가 빠져나가 버림으로 해빈 폭은 줄어들고 경사는 더욱 급하게 된다 (Shepard, 1973; Macdonald, 1973; Visher, 1969). 따라서 조사지역 해빈모래의 방향별 이동량을 조사하기 위하여 2010년 하계(6, 7월)와 동계(1, 12월)에 협재와 하모해빈의 간조선 지역에 포사기를 설치하여 부

유사의 방향별 이동량을 조사하였다. 포사기 조사에 의한 부유사 함량의 방향별 이동량은 협재해빈의 경우 하계에는 서(5.15 g)→남(4.19 g)→북(2.08 g)→동(1.26 g) 방향 순으로 부유사 포집량을 보이는데 이는 해저에 쌓여있는 모래들이 남서 방향에서 해빈 쪽으로 접근하는 파랑에 의해 해빈 쪽으로 모래가 이동되고 있음을 의미한다. 즉, 바람에 의해 생성된 쇄파는 해변에 가까워짐에 따라 쇄파에 의해 형성된 연안류는 해안선에 평행한 방향으로 쇄파대와 해안선 사이를 흐르기 때문이다. 이는 제주도 서부지역에 여름철 풍향과도 일치한다. 동계에는 서(3.28 g)→북(2.57 g)→동(2.15 g)→남(1.62 g)방향 순으로 부유사 포집량을 보여 하계보다 현저히 낮은 부유사 포집량을 보였다. 서쪽지역이 다소 높은 포집량을 보이는 것은 아마도 겨울철에 높은 파도에 의해 재부유된 패각편 모래가 북서계절풍의 영향으로 서쪽에서 동남쪽으로 이동하고 있음을 의미한다(Table 3).

하모해빈은 하계에 남(1.56 g)→동(1.18 g)→서(0.52 g)→북(0.1 g) 방향 순으로 부유사 포집량을 보이거나 전술한 협재해빈에 비해 현저히 적은 포집량을 보였다. 이는 방파제가 해빈지역까지 깊숙이 뻗어있어서 바다에서 해빈 쪽으로의 모래공급이 미미함을 의미한

Table 3. Directional contents of suspended load drift sampling in the Hyeopjae and Hamo beaches

Study area	Summe (g/day)				Winter (g/day)				Water depth (m)
	East	West	South	North	East	West	South	North	
HYEOPJAE	1.26	5.15	4.19	2.08	2.15	3.28	1.62	2.57	3.1
HAMO	1.18	0.52	1.56	0.09	3.18	1.1	1.34	0.17	2.7

다. 동계에는 동(3.18 g) → 남(1.34 g) → 서(1.10 g) → 북(0.17 g)방향 순으로 부유사 포집량을 보여 하계와 유사하게 적은 포집량을 보였다. 동쪽지역이 다소 많은 부유사 포집량을 보이는 것은 겨울철 동풍계의 바람에 의해 형성된 파도로 인해 바다의 모래가 해변 쪽으로 다소 공급되고 있음을 의미한다. 해양에서 파도와 해류가 주로 해저의 퇴적물을 이동·분산시킨다. 퇴적물의 운반은 해변과 쇄파대에서 가장 크게 일어나는데 이들 지역은 파도가 깨지면서 해저 바닥에 영향을 주어 퇴적물을 흐트러지게 하여 퇴적물 입자는 수초 동안에 뜨게 된다 이때 연안류와 조류는 퇴적물을 연안에 평행한 방향으로 운반한다 (Davis, 1972). Fig. 4는 조사지역 해변사의 운반형태를 유추하기 위하여 입도분석 결과 얻어진 누적분포 곡선으로 부터 1%(C)값과 50%(M)값을 마이크론 단위로 환산하여 대수 좌표상에 CM 도표로 나타낸 것이다(Passega, 1964). 조사지역 해변퇴적물의 CM 도표 상에 분포경향은 몇 지점(협재 5, 8: 하모 1, 4)을 제외하고는 끌림군집과 저층부유군집에 의해 운반되는 것으로 보여진다.

해빈 지형의 변화

해안선에 연하여 형성되어 있는 해빈은 짧은 기간 내에 외력인 힘 즉, 파랑과 흐름 등의 작용한계 범위 내에서 자유로운 변형을 거듭하고 있으며 해빈의 평행상태도 항시 변화함으로써 해빈의 변화 상태는 동적으로 판단된다. 이와 같이 동적인 해빈의 지형변화는 관계있는 인자들과 상호 밀접한 관계를 유지해 나가면서 인자들이 어느 한 탁월특성에 의해 영향을 많이 받는 경향으로 진행하게 된다(Shepard, 1973; Friedman, 1967). 해빈의 변화를 결정짓는 최소한의 변수는 내적요인으로서 해빈을 구성하고 있는 저질특성과 모래의 공급량 외적요인으로서 해변지역에 작용하고 있는 파랑특성 즉, 파경형사, 파고 및 파랑의 지속기간 및 세기 또한 해빈 발달지역에 직선상으로 구축된 방파제나 돌제, 고층건물과 같은 인공구조물들이 파랑, 조류, 연안류, 바람 등에 의해 운반되는

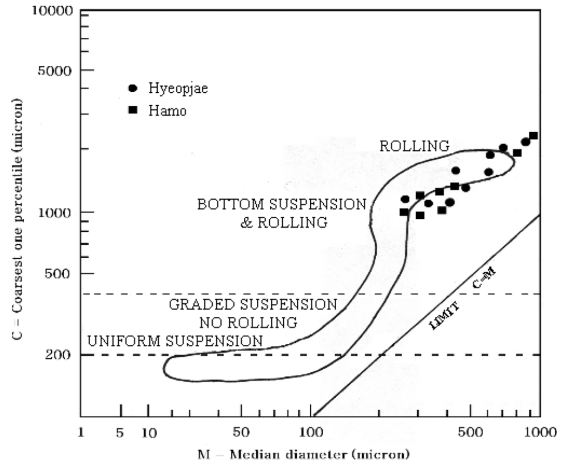


Fig. 4. CM plot of samples of beach sands (after Passega, 1964).

해빈사의 이동방향 변경이나 차단 등을 들 수 있다 (Madsen and Grant, 1967; Shepard, 1973).

조사지역 해변모래의 퇴적과 유실과 같은 해빈지형 변화를 조사하기 위하여 직경 3 cm, 높이 2 m의 눈금이 새겨진 폴대를 각 해변의 간조선, 만조선 및 해변애도지역에 각각 9개 지점에 고정 설치하여(Fig. 1),하계(6, 7월)와 동계(11, 12월)로 구분하여 1일 동안 해변모래의 퇴적량과 유실량을 7일 간에 걸쳐 관측한 결과는 다음과 같다(예: 민변형, 1982; 민변형 외, 1987).

하모해빈은 Table 4에서 보는바와 같이 하계의 순 유실량이 52.9 cm로 순 퇴적량의 44.2 cm 보다 약 1.2배 높은 것으로 나타났고, 동계에는 순 유실량이 57.6 cm로 순 퇴적량의 30.4 cm 보다 약 2배 정도 높게 나타나 계절에 상관없이 모래유실이 심하게 진행되는 해빈임을 의미한다. 하모해빈의 침식이 현저히 일어나고 있는 것은 해변서쪽에 축조되어 있는 방파제의 영향에서 비롯되는 것으로 해석된다. 즉 항만개설을 위한 해안을 따라 직선상으로 구축된 방파제나 돌제는 파도의 집중력을 감소시키기 때문에 폭풍기간엔 해변을 심하게 침식시켜 해변이 축소되고 폭풍이 없는 기간에는 모래가 보충되지 못하고 이안

Table 4. Daily loss and accumulation of sand on the surface of the Hamo beach area (cm/day)

Region	Date Pt	2010 Jun. 24	Jun. 25	Jun. 26	Jun. 27	Jun. 28	Jun. 29	Jun. 30	Total gain	Total loss	Av. gain	Net gain	Net loss
Region	A	0.3	-3.0	1.2	0.8	-5.6	1.9	-6.2	4.2	14.8	1.1	-	10.6
	B	-3.2	-3.5	-4.7	-6.4	2.8	-6.8	1.5	4.3	24.6	2.2	-	20.3
	C	-0.4	1.2	-3.5	-3.2	1.8	2.4	-1.8	5.4	8.9	1.8	-	3.5
	D	0.7	-1.2	3.6	3.1	-1.3	1.9	2.2	11.5	2.5	2.3	9.0	-
	E	-0.8	-3.4	-5.7	-4.1	4.8	-3.5	-2.6	4.8	20.1	4.8	-	15.3
	F	0.7	-3.4	2.8	2.4	-2.6	-4.9	1.8	7.7	10.9	1.9	-	3.2
	G	0.3	2.3	-1.7	2.6	2.1	1.6	1.2	10.1	1.7	1.7	8.4	-
	H	-0.6	3.5	5.4	6.2	-5.2	-4.4	5.8	20.9	10.2	5.2	10.7	-
	I	-0.5	4.6	-1.8	1.5	5.4	5.6	1.3	18.4	2.3	3.7	16.1	-
Total									87.3	96.0	24.7	44.2	52.9
HAMO	Date Pt	2010 Dec. 17	Dec. 18	Dec. 19	Dec. 20	Dec. 21	Dec. 22	Dec. 23	Total gain	Total loss	Av. gain	Net gain	Net loss
HAMO	A	-2.8	-4.0	-2.7	0	-2.2	2.4	2.9	5.3	11.7	2.7	-	6.4
	B	-4.0	-10.5	-5.0	-2.0	-1.3	3.2	3.5	6.7	22.8	3.4	-	16.1
	C	-1.1	-0.8	-0.4	3.7	0	1.1	0.8	5.6	2.3	1.9	3.3	-
	D	-3.8	-7.1	1.8	0.1	-2.8	0	-1.4	1.9	15.1	1.0	-	13.2
	E	-1.4	-4.6	2.4	-5.8	0.6	0.5	0	3.5	11.8	1.7	-	8.3
	F	-0.8	-6.0	-2.9	2.6	3.1	1.7	-4.2	7.4	13.9	2.5	-	6.5
	G	1.0	3.1	2.8	1.7	-1.6	-0.4	1.9	10.5	2.0	2.6	8.5	-
	H	-2.1	1.4	1.0	-4.2	-2.7	-0.2	-0.3	2.4	9.5	1.2	-	7.1
	I	0.3	8.0	7.3	-2.0	-0.3	4.8	0.5	20.9	2.3	4.2	18.6	-
Total									64.2	91.4	21.2	30.4	57.6

류에 의해 침식이 계속되기 때문에 해빈이 파괴되기도 한다(Shepard, 1973).

협재해빈은 하계와 동계기간의 해빈모래의 퇴적과 유실량이 뚜렷이 구분되고 있다. 즉 하계에 있어서 순 퇴적량이 41.8 cm로 순 유실량 22.7 cm 보다 2배가 높은 것으로 나타났고, 동계에는 반대로 순 유실량이 21.5 cm로 순 퇴적량이 15.4 cm에 비해 1.4배나 높아 겨울철에 모래유실이 심하게 진행되는 해빈임을 알 수 있다(Table 5). 여름철 협재해빈 중앙부의 간조선 지역에는 길이 약 120 m, 폭 35 m인 원추형 사주가 형성되었다가 겨울철에는 파괴되어 버는 현상이 관찰되는데 이는 계절에 따라 해빈변형이 일어나는 해빈임을 의미한다. 이처럼 겨울철이 여름보다 해빈 침식이 심한 것은 빈번한 북서계절풍에 의한 폭풍파가 해빈모래를 침식시켜 모래가 배후지의 사구 쪽과 또한 바다 쪽으로 빠져나가 버림으로써 해빈 폭이 줄어들고 전안에 경사가 급한 해빈애(beach scarp)가 형성되기도 한다. 그러나 파도가 잔잔한 여름철에는 연안류 등에 의해 해안 쪽으로 이동하여 안쪽의 골짜기를 메우고 해빈위에 모래가 다시 쌓이므로 해빈 폭이 넓어지고 경사도 완만해진다(Shepard, 1973).

Fig. 5와 6은 하모와 협재해빈 지역의 총 퇴적량과 총 유실량을 하계와 동계에 따라 각 지점별로 나타낸 것이다. 하모해빈의 경우 하계에는 해빈 동쪽지역(A, B)과 중앙부의 만조선지역(E)이 조사기간 동안 총 유실량이 각각 14.8, 24.6, 20.1 cm로 퇴적량 보다 높은 값을 보여 모래가 유실되고 있었고 그 외지역은 여름철에 활발한 퇴적작용이 진행되고 있었다(Fig. 5). 해빈동쪽 지역의 모래유실 현상은 최근 서쪽지역에 축조된 방파제가 남쪽에서 해안 쪽으로 접근하는 해류와 파도가 방파제에 의해 굴절되어 생성되는 와류에 의한 동쪽해빈 지역의 침식되기 때문으로 해석된다. 동계에는 해빈서쪽 항구 부근 간조선과 해빈애도지역(G, I)은 이곳에 축조된 방파제의 영향으로 서쪽에서 해빈 쪽으로 접근하는 파도로 인해 총 퇴적량이 각각 10.5, 20.9 cm로 모래가 축적되고 있으나 그 외 지역은 겨울철의 빈번한 북서계절풍에 의해 해빈 배후의 사구 쪽으로 해빈 모래를 이동시키기 때문에 모래가 유실되는 경향을 보여주었다(Fig. 5). 조사기간에 해빈애도 지역(C, E, T)에서 바람에 의해 생성된 연흔구조가 관찰되는데 이는 이곳에서 모래 유실이 진행되고 있음을 의미한다.

Table 5. Daily loss and accumulation of sand on the surface of the Hyeopjae beach area (cm/day)

Region	Date Pt	2010 Jul. 22	Jul. 23	Jul. 24	Jul. 25	Jul. 26	Jul. 27	Total gain	Total loss	Av. gain	Net gain	Net loss
A		1.1	2.4	0.6	1.0	0	5.2	10.3	-	2.1	10.3	-
B		1.5	2.0	-4.0	-0.8	-1.7	-1.4	3.5	7.9	1.8	-	4.4
C		0	1.3	-2.8	-1.0	1.4	2.6	5.3	3.8	1.8	1.5	-
D		2.9	4.3	1.2	1.8	0.3	4.8	15.3	-	2.6	15.3	-
E		1.8	2.4	-3.1	-1.3	-1.5	-1.0	4.2	6.9	2.1	-	2.7
F		0.6	0.8	-1.8	-1.4	0	2.9	4.3	3.2	1.4	1.1	-
G		2.6	3.4	1.5	2.0	1.7	2.4	13.6	-	2.3	13.6	-
H		0.5	2.0	-3.8	-1.7	-2.8	-1.5	2.5	9.8	1.3	-	7.3
I		0.4	1.3	-4.3	-2.8	-3.5	0.6	2.3	10.6	0.8	-	8.3
Total								61.3	42.2	16.2	41.8	22.7
HYEOP-JAE	Date Pt	2010 Nov. 12	Nov. 13	Nov. 14	Nov. 15	Nov. 16	Nov. 17	Total gain	Total loss	Av. gain	Net gain	Net loss
A		-0.6	3.1	3.2	-1.7	-1.5	2.6	8.9	3.8	3.0	5.1	-
B		-1.1	-1.3	2.3	-4.5	1.0	0.2	3.5	6.9	1.2	-	3.4
C		-2.5	2.9	4.0	-6.0	-4.7	2.5	9.4	13.2	3.1	-	3.8
D		-1.2	1.4	3.7	-0.6	-1.0	2.3	7.4	2.8	2.5	4.6	-
E		0.7	2.6	5.0	-2.6	-3.4	1.4	6.0	9.7	3.0	-	3.7
F		-1.9	1.8	1.2	-4.6	-3.0	1.3	4.3	9.1	1.4	-	5.2
G		0	1.0	3.2	0.8	-2.1	2.8	7.8	2.1	2.0	5.7	-
H		-0.8	3.1	4.1	-5.2	-6.6	3.2	10.4	12.6	5.2	-	2.2
I		-1.2	2.0	-2.3	-2.4	0.7	2.9	5.7	8.9	1.9	-	3.2
Total								63.4	69.1	23.3	15.4	21.5

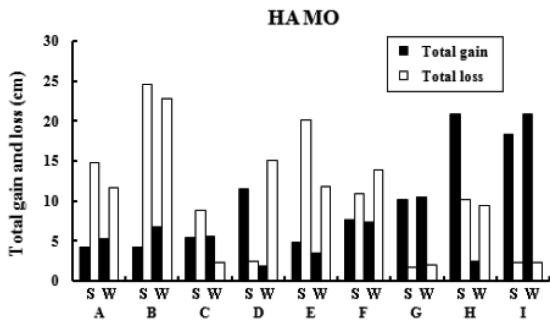


Fig. 5. Positional variation of the Hamo beach with sand loss and accumulation. A-I: pole position, S: Summer, W: Winter.

협재해빈의 경우 하계에는 간조선지역(A, D, G)에서 총 퇴적량은 각각 10.3, 15.3, 13.6 cm이고, 총 유실량은 관측되지 않는데 이는 해저에 쌓여있는 패각편 모래들이 파도와 해류의 작용으로 간조선지역으로 활발하게 운반되고 있음을 의미한다. 조사지역 중 만조선지역(B, E, H)과 파도의 영향이 거의 없는 서쪽 해변 애도지역(I)에서는 총 퇴적량 보다는 침식량이 다소 높은 값을 보여 침식이 진행되는 지역임을 의미한다(Fig. 6). 동계에는 하계와 유사하게 간조선지역(A, D, G)에서 조사기간 동안 총 퇴적량이 각각

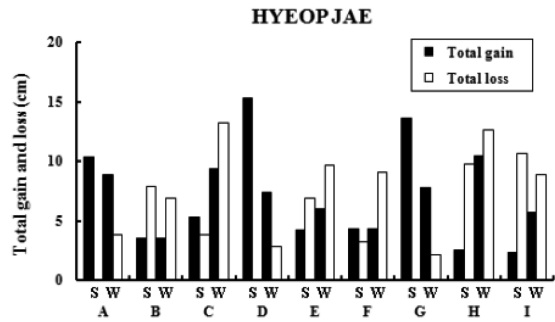


Fig. 6. Positional variation of the Hyeopjae beach with sand loss and accumulation. A-I: pole position, S: Summer, W: Winter.

8.9, 7.4, 7.8 cm로 여름철에 비해 퇴적량이 현저히 적은 편이나 퇴적작용이 진행되고 있었으며 그 외 지역(B, C, E, F, H, I)은 모래유실이 우세한 경향을 보여주고 있었다(Fig. 6). 이는 해빈지역에 분포하고 있는 모래들이 강한 해풍에 의해 해변 배후에 분포하는 사구지역으로 이동되고 있음을 의미한다. 이는 전술한 지역별 퇴적물이 평균입도 분포에서 해변애도 지역에서 해풍에 의해 세립한 모래는 사구지역으로 이동됨에 따라 가장 조립한 입도조성을 보이는 것과 잘 일치하고 있다. 이와 같이 본 연구지역의 해변지

형 변형이 파랑의 계절적 특성 및 일시적 변화와 해안지역에 축조된 인공구조물의 영향으로 인해 해빈모래가 활발한 침식 중인 것으로 해석된다.

결 론

하모해빈은 화산암류의 풍화산물과 폐각편모래(32.4%)가 혼재한 해빈이며, 평균입도는 1.29Φ로 중립질 모래로 구성되며, 해빈경사는 7.3°-10.8°로 다소 급한 특징을 보인다. 간조선 지역에서 바다 쪽으로 길이 약 470 m 폭 5-34 m인 자갈대가 존재하여 사력질 해빈에 해당한다. 협재해빈의 평균입도는 0.4Φ로 조립질인 폐각편모래(92.7%)로 이루어진 해빈이며 해빈경사는 2.8°-6.5°로 완만한 해저지형을 이루며 배후에는 층후가 약 6-8 m되는 해안사구가 내륙 쪽으로 2 km까지 뻗어 있다.

해수중 부유사의 방향별 이동량은 하모해빈은 하계에 남(1.568 g) → 동(1.18 g) → 서(0.52 g) → 북(0.1 g) 방향 순으로 부유사 포집량을 보여 남쪽과 동쪽방향에서 해빈 쪽으로 모래가 이동하는 특징을 보이거나 공급량은 미미하였다. 협재해빈은 서(5.15 g) → 남(4.19 g) → 북(2.08 g) → 동(1.268 g) 방향 순으로 부유사 포집량을 보이는데, 이는 서남방향에서 해빈 쪽으로 모래가 공급되고 있음을 의미한다.

해빈사의 퇴적량과 유실량을 조사한 결과 하모해빈의 동쪽지역은 퇴적량보다 유실량이 높은 값을 보였고, 방파제와 인접한 서쪽지역은 활발한 퇴적작용이 진행되고 있었다. 이는 해빈 서쪽 지역에 방파제가 축조된 이후 해안으로 접근하는 파랑과 해류의 변화에 따라 해빈 동쪽지역의 모래가 서쪽의 방파제 안 쪽으로 이동하는 해빈변형이 일어나고 있음을 의미한다. 협재해빈은 동계에 순 퇴적량 15.4 cm, 순 유실량 21.5 cm로 활발하게 모래이동이 진행되는 해빈이다. 이는 해저에 쌓여있던 모래들이 파도작용에 의해 해빈지역으로 운반된 모래가 겨울철 강한 북서풍에 의해 해빈 배후에 분포하는 사구지역으로 이동하기 때문으로 사료된다.

사 사

본 연구를 수행하는 동안 도움을 준 제주대학교 지구해양과학과 지질해양연구실의 김성현, 안소정 학생과 제주대학교대학원의 이은샘, 김보은, 조상우, 신

지훈 학생들에게도 감사드립니다. 논문의 심사과정에서 세심한 검토와 지적으로 많은 도움을 주신 공주대학교 김여상 교수님과 익명의 심사위원님께 감사드립니다.

참고문헌

- 류상욱, 장진호, 2005, 한반도 서해 천수만의 해안선 변화 및 조석대 해빈 특성. 한국지구과학회지, 26, 584-596.
- 류상욱, 장진호, 조주환, 문병찬, 2004, 한반도 서해남부 임자도 해빈 퇴적작용의 계절적 변화. 한국해양학회지, 9, 83-92.
- 민병형, 1982, 해안제방 설치에 따른 해빈변형에 관한 연구. 부산대학교 박사학위논문, 33 p.
- 민병형, 강용택, 박운용, 김희지, 1985, 해운대 해빈변형에 관한 연구. 동아대학교 한국자원개발연구소 연구보고서, 27 p.
- 민병형, 김희지, 이승휘, 1984, 해운대 해수욕장 침식에 미치는 해안제방의 영향에 대하여. 한국수문학회지, 17, 197-209.
- 민병형, 옥치를, 유상후, 1987, 해운대 해수욕장에 있어서의 해빈공법에 관한 실험적 연구. 한국해양공학회지, 1, 84-93.
- 서종철, 2001, 서해안 신두리 해안사구의 지형변화와 퇴적물 수지. 서울대학교 대학원 박사학위논문, 96 p.
- 소광석, 양우현, 강술인, 권이균, 2010, 고창군 동호 해빈 표층퇴적물의 계절변화. 한국지구과학회지, 31, 708-719.
- 윤정수, 박용성, 김태정, 박상운, 2008, 제주도 이호·함덕 해빈퇴적물의 계절적 변화에 관한 연구. 대한자원환경지질학회지, 41, 243-252.
- 이문원, 원종관, 이동엽, 박계현, 김문섭, 1994, 제주도 남사면 화산암류의 화산 층서 및 암석학적 연구. 대한지질학회지, 30, 521-541.
- 중앙기상청, 2010, 기상연보. 기상청, 서울, 311 p.
- 최순학, 김영기, 1989, 제주도 지하수의 수질특성. 대한지질학회지, 25, 230-238.
- 최정민, 이연규, 우한준, 2005, 한국 남해안 여자만 조간대 퇴적물의 시공간적 변화. 한국지구과학회지, 26, 252-267.
- Davis, R.A., 1972, Principles of Oceanography. Addison-Wesley Publishing Company, USA, 434 p.
- Folk, R.L. and Ward, W.C., 1957, Brazos river bar; A study in significance of grain size parameters. Journal of Sedimentary Petrology, 27, 3-26.
- Friedman, G.M., 1967, Dynamic processes and statistical parameters compared for size frequency distribution of beach and river sands. Journal of Sedimentary Petrology, 37, 327-345.
- Klijin, J.A., 1990, Dune forming factors in a geographical context. In Bakker, Th.W., Jungerius, P.D., and Klijin, J.A. (eds.), Dunes of the European Coasts: Geomor-

- phology-Hydrology-Soils. Catena supplement, 18, 1-13.
- Lancaster, N., 1986, Grain-size characteristics of linear dunes in the southwestern Kalahari. *Journal of Sedimentary Petrology*, 56, 395-400.
- Macdonald, E.H., 1973, Manual of beach mining practice, exploration and evaluation. Australian Government Publishing Service, 1-16.
- Madsen, O.S. and Grant, W.D., 1967, Quantitative description of sediment transport by waves. International Conference on Coastal Engineer Proceeding 15th, 1093-1112.
- Passega, R., 1964, Grain size representaton by CM pattern as a geological tool. *Journal of Sedimentary Petrology*, 34, 830-847.
- Shepard, F.P., 1973, Submarine geology. Harper and Row Publishers, NY, USA, 123-161.
- Short, A.D. and Hesp, P., 1982, Wave, beach and dune interaction in southern Australia. *Marine Geology*, 48, 259-284.
- Thompson, W.O., 1973, Original structures of beaches, bar and dunes. *Bulletin of Geological Society of America*, 46, 723-752.
- Visher, G.S., 1969, Grain-size distribution and depositional processes. *Journal of Sedimentary Petrology*, 39, 1074-1106.

2011년 2월 9일 접수
 2011년 3월 15일 수정원고 접수
 2011년 5월 29일 채택