

이안방파제와 잠제 건설에 따른 염전해변의 해빈변화 및 묘사 분석 Analysis of Beach Changes and Sediment Transport Due to Construction of a Detached Breakwater and a Submerged Breakwater at Yeomjeon Beach

홍명주* · 정승명** · 박일흠*** · 김종훈****

Myeong-Ju Hong*, Seung-Myong Jung**, Il-Heum Park*** and Jong-Hoon Kim****

요지 : 강원중부 해안에 위치한 염전해변에서 이안방파제와 잠제 건설에 따른 묘사 메커니즘을 분석하기 위해 2021년 2월부터 구조물이 완공된 2022년 12월까지 해빈변화를 주기적으로 조사하였다. 현장조사에서는 표층퇴적물 채취와 해안선 측량을 병행하고 인근 경포대해수욕장 관측부이자료 등을 종합 분석하였다. 본 해변은 NE 계열 고파랑과 계절별 해류 영향에 의한 북서-남동으로 반전되는 흐름 잔차류의 영향을 받으며, 두 외력 모두 대체로 동계에 가장 강하게 나타났다. 해안선은 최대 94.0 m 전진하고 -49.4 m 후퇴하였으며, 구조물 배후는 전진한 반면 그 외 영역은 후퇴하였다. 표층퇴적물은 대부분 정점에서 모래로 분포했으며, GSTA 분석 결과 구조물 건설 중에는 이동벡터 방향이 구역별로 혼재된 반면 완공 후에는 구조물 배치와 관련된 공간적 재편 경향이 나타났다. 일부 정점의 수심 및 평균입경 변화는 인위적 요소에 좌우되는 경향이 있었으나 대체로 침식역은 조립화, 퇴적역은 세립화되었다. 해안선 변화량(RMS)과 외력 분석 결과 해빈변화는 주로 동계 고파랑과 상대적 장주기파에 기인하였고, 에너지플럭스 분석에서는 해안선 연안방향(longshore)보다 해안선 횡단방향(cross-shore)의 영향이 큰 것으로 나타났다. 결론적으로 구조물 완공 이후 묘사 경향은 구조물 배치에 따라 공간적으로 재편되고 평균해안선은 전진하였으나, 구조물이 없는 구간의 지속적 침식으로 해변 전체에 묘사 불균형이 발생하였다. 따라서 향후 해안구조물 건설 시 구간별 묘사량과 재분배 양상을 함께 고려해야 할 것이다.

핵심용어 : 해안구조물 건설, 염전해변, 해안선조사, 표층퇴적물, GSTA 기법

Abstract : To investigate sediment-transport mechanisms associated with the construction of a detached breakwater and a submerged breakwater at Yeomjeon Beach on the central coast of Gangwon Province, Korea, beach changes were periodically monitored from February 2021 to December 2022, encompassing the construction and completion of the structures. Surface sediment sampling and shoreline surveys were conducted, and the results were analyzed with wave data from a buoy at nearby Gyeongpodae Beach. The study area is influenced by high northeasterly (NE) waves and seasonally reversing NW-SE residual currents, both generally strongest in winter. The shoreline advanced by up to 94.0 m in the lee of the structures but retreated by up to 49.4 m elsewhere. Surface sediments were sandy at most stations, and Grain Size Trend Analysis (GSTA) showed that transport directions varied among zones during construction but became spatially reorganized in response to the structural configuration after completion. Although changes in water depth and mean grain size at some stations appeared to be affected by anthropogenic disturbances, sediments generally became coarser in erosional zones and finer in depositional zones. Shoreline-change magnitude (RMS) was primarily associated with high winter waves and relatively long-period waves, and the cross-shore component of wave energy flux had a stronger influence on shoreline change than the longshore component. After completion, the mean shoreline advanced, but continued erosion along unprotected sections resulted in a sediment imbalance across the beach. These findings suggest that spatial variations in sediment transport and redistribution should be considered in the planning and design of coastal structures.

Keywords : coastal structure construction, Yeomjeon beach, shoreline survey, surface sediment, GSTA

*전남대학교 조선해양공학과 박사과정(PhD Candidate, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chonnam National University)

** (주)지오시스템리서치 선임연구원(Senior Researcher, GeoSystem Research Corporation)

***전남대학교 조선해양공학과 교수(Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chonnam National University)

**** (주)오서닉 전무(Corresponding author: Jong Hoon Kim, Executive Managing Director, OCEANIC C&T Co., Ltd, #1104, 55 Digital-ro, Seoul 08376, Korea, Tel: +82-2-6956-4211, jhkim@oceanicent.com)

1. 서 론

자연해빈은 고파랑 내습 시 파랑에너지를 흡수하여 배후지를 보호하는 자연적 방재 기능을 수행함과 동시에, 수려한 경관과 넓은 해변폭을 바탕으로 우수한 레저 환경을 제공하는 보존 가치가 높은 자산이다(Shin and Kim, 2012). 그러나 지구온난화로 인한 해수면 상승은 해안에서 수심을 증가시켜 해빈에 도달하는 파랑 에너지를 증대시키며, 이는 표사의 외해 방향 이동을 촉진한다. 그 결과 해빈 소실은 해빈의 평형상태를 무너뜨려 자연적 회복을 어렵게 만든다(Zhang et al., 2004). 해빈은 파랑, 표사 및 수심 변화가 상호작용하는 동적 시스템이므로, 변화가 급격할수록 그 원인을 규명하기 어렵다(Cooper and Pilkey, 2004).

국내 사빈해안에서 나타나는 침식의 주요 원인으로는 항만 및 어항 건설, 해안도로와 호안의 축조, 하구 및 항내 준설토의 무분별한 유용 등 인위적 요인이 지목되고 있다(KMI, 2017; MLTMA, 2010a). 이러한 침식에 대응하는 대표적 공법으로 양빈이 적용되나, 장기간 침식에 대응하기 위해서는 충분한 해변폭을 확보해야 하는 반면 국내에서는 대규모 양빈사의 채취 가능성과 예산 문제로 인해 현실적인 제약이 따른다(MLTMA, 2010b). 이에 따라 실제 현장에서는 돌제, 이안제, 잠제 등의 해안구조물이 함께 적용되고 있으나, 구조물의 설치에 기존의 표사 수치를 교란하여 인접 해역에 새로운 침식을 유발할 수 있다.

해안구조물의 건설은 기존 해안선 변화 특성에 대한 정확한 분석과 미래 해빈변화에 대한 충분한 이해를 기반으로 계획되어야 한다(Vaidya et al., 2015). 대상 해역이 위치한 동해안에서 수행된 기존 연구에 따르면, 해안구조물 건설을 포함한 각종 개발 행위는 해안의 자연적 평형을 깨뜨려 지속적인 침식을 유발하는 것으로 나타났다(Park et al., 2021). Kang et al.(2010)은 해안구조물 건설 시 파랑변형과 표사 수급의 불균형으로 인해 기존과 다른 침식 및 퇴적 양상이 발생할 수 있음을 지적하며 이에 대한 정확한 파악이 필요하다

고 제안하였다. Oh et al.(2019)은 동해안 해빈을 대상으로 해변폭과 파랑 특성의 상관성을 분석하여 고파랑 내습 시 해변폭이 감소하는 음의 상관관계를 제시하였다. 그러나 기존 연구는 대체로 구조물 준공 전후 두 시점을 비교하는 정적 분석에 머물러 있어 구조물이 단계적으로 건설되는 과정 중에 표사 메커니즘이 어떻게 변화하는지 파악하는데 어려움이 있다. 일반적으로 해안구조물 배후의 정온역은 공사 진행과 함께 점진적으로 형성되므로 표사 양상 또한 이에 대응하여 연속적으로 재편될 것으로 예상된다. 그러나 이를 규명하기 위해서는 공사 전기간에 걸친 연속적·격자형 관측이 필수적인데, 인력과 비용의 제한과 시·공간적인 한계로 인해 실제 진행된 연구는 제한적으로만 수행되었다.

동해안 염전해변(Fig. 1)은 이러한 현상이 뚜렷하게 나타난 대표적인 사례로 이안방파제(총 연장 1,500 m) 공사가 진행됨에 따라 추·동계시 해안을 따라 남향하는 표사가 이안방파제 전면에서 약 1 km에 위치한 도류제 전면에서 고립되어 해당 구간 해안선이 급격히 전진하였다. 반면 동해안의 계절적 특성에 따라 춘·하계시 북향하여 순환 공급되던 표사가 차단되어 하시동 사구 전면 해빈에서는 급격한 침식이 발생하였다. 이는 구조물 축조 과정에서 표사 체계가 어떻게 재편되는지에 대한 사전 이해가 부족함을 시사한다.

따라서, 본 연구에서는 잠제가 단계적으로 건설되고 이안방파제 연장공사가 수행된 염전해변을 대상으로 공사 전체 기간에 걸친 표사 변화를 추적하여 메커니즘을 규명하고자 하였다. 이를 위해 2021년 2월부터 2022년 12월까지 2개월 간격으로 총 12회에 걸쳐 해안선과 표층퇴적물을 동기간에 조사하였다. 또한 해양외력 파악을 위해 인근 경포대해수욕장 해양관측부이의 자료를 분석하였다. 조사된 결과를 바탕으로 각 시기별 해안선 변화, 표층퇴적물 분석과 표사경향 벡터(GSTA) 분석을 수행하였고, 최종적으로 심층적인 분석을 위해 각 조사 시기의 입경과 수심변화 및 해안선 변화량(RMS)과 해양외력 간의 상관성을 고찰하였다. 기존 연구에서는 구조물 건설 전후의 정적 비교에 집중되었지만, 본 연구는 약

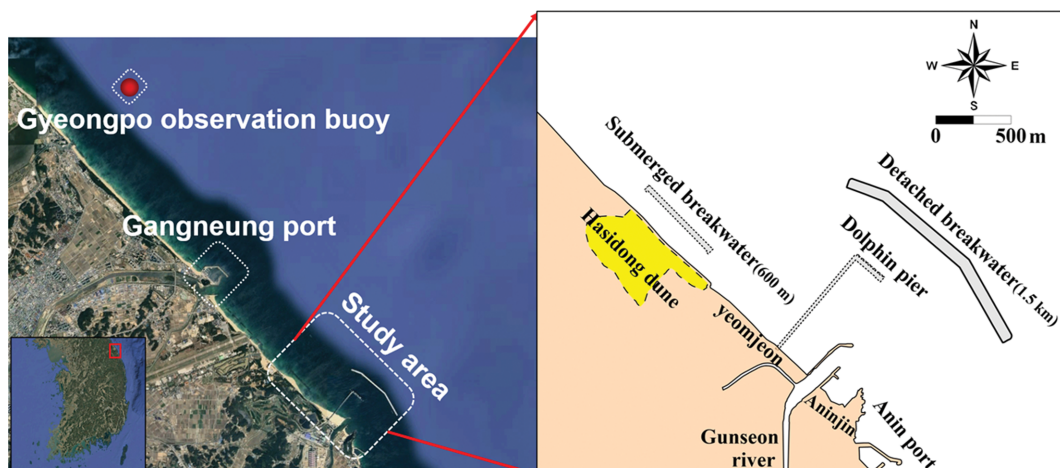


Fig. 1. Location and coastal structures of the study area.

2년간 71개 격자 정점에서 동일한 조사 방식으로 구조물 건설 과정에서 나타나는 표사의 시·공간적 재편 과정을 정량적으로 제시하였다. 이는 향후 유사한 해양환경에서 해안구조물 건설에 의한 지형변화 예측의 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 대상해안과 외력특성

2.1 대상해안

염전해안은 강원특별자치도 강릉시 강동면 안인리에 위치하며, 북서쪽으로는 하시동 사구와 강릉항이, 남동쪽으로는 군선천 하구와 안인항이 인접해 있다(Fig. 1). 연구대상 해빈은 약 2.0 km의 북서-남동 방향으로 발달한 직선형 해안선을 갖춘 사빈해안으로 북동쪽 외해를 향해 개방되어 있고 인근에 섬이 없어 외해에서 파랑이 직접 내습하는 조건을 갖는다. 대표적인 표사 공급원으로는 해빈 남측에 위치한 군선천이 있다. 국립해양조사원의 강릉항 기본수준점 기준으로 조차는 약 0.3 m 내외인 해역으로 Davies(1964)의 분류 기준에 따라 조차가 2 m 이하로 미소조차 해안에 해당되므로 지형변화는 조석보다 파랑의 영향이 우세할 것으로 예상된다. 염전해변 배후에는 석탄화력발전소가 위치하며, 대형 선박의 석탄 하역을 위한 돌핀부두와 정온역 확보를 위한 이안방파제가 건설되었다. 이안방파제는 조사 착수 이전(2020년 12월)에 총 연장 1,500 m 중 730 m가 시공된 상태였으며, 2021년 9월에 완공되었다. 그러나 이안방파제 건설 과정에서 하시동 사구 전면 해빈에서 예측을 초과하는 침식이 발생하였으며, 톤백(ton-bag)을 이용한 응급 대책에도 불구하고 배후 해안도로가 유실되는 등 침식이 지속되었다(Kim, 2023; Hwang et al., 2024). 이에 침식 저감 대책으로 하시동 사구 전면해상 수심 약 4 m 지점에 잠제(총 연장 600 m)가 계획되어 2021년 5

월에 착공, 2022년 10월에 총 600 m로 완공되었다. 조사 시기별 구조물 건설 현황(Construction phase)은 Table 1에 정리하였으며, 분석 기간은 방파제와 잠제 복합 건설기(2021년 2월~2021년 10월), 방파제 완공기(2021년 12월~2022년 4월), 잠제 건설기(2022년 6월~2022년 10월) 그리고 완공 후(2022년 12월)로 구분하여 해빈변화를 분석하였다.

2.2 외력특성

연구대상 해역에 내습하는 파랑 정보를 취득하는 방법 중 대표지점을 선정하여 관측장비를 설치하는 것이 가장 정확한 외력 특성을 파악하는 방법이 일반적이다. 하지만 조사기간 중 해상공사를 위한 소형선박을 포함하는 해상공사 장비 등의 주기적인 항행 등에 의해 관측이 제한된 상황으로 인근에 위치한 내습하는 파랑이 섬이나 구조물 등에 영향을 받지 않고, 적절한 수심에 설치된 부이를 선택하였다. 해당 부이는 Fig. 1에 도시한 것과 같이 육상에서 약 9 km 떨어진 수심 20 m에 설치된 국립해양조사원의 경포대해수욕장 해양관측 부이 관측자료를 수집·분석하였다. 외력특성 분석을 위해 2020년 12월부터 2022년 12월까지 관측된 파랑(유의파고, 유의주기 및 평균파향)과 흐름(유속과 유향) 자료를 이용하였으며, 5분 간격의 원자료를 1시간 간격으로 재구성한 후 결측치와 이상치를 제거하여 분석하였다. 월별 통계는 Table 2, Table 3 및 Fig. 2에 제시하였다. 다만, 관측부이는 대상 해빈과 공간적으로 이격되어 있으므로, 본 연구에서는 해당 자료를 염전해변의 국지적인 천해 외력을 직접적으로 대표하는 자료గా 아닌 외해 입사 외력을 대표하는 자료로 활용하였다.

조사 기간 월평균 유의파고는 0.4~1.4 m 범위로 전체 기간 평균은 0.8 m였으며, 월평균 유의주기는 4.5~7.6 s 범위였다(Table 2). 계절별로는 동계에 평균 1.0 m로 가장 크고, 추계 0.9 m, 춘계 0.8 m, 하계 0.6 m 순으로 나타났다. 파향

Table 1. Construction history of coastal structures by survey period

Month	Construction during interval	Detached breakwater (m)	Submerged breakwater (m)	Construction phase
Feb. 2021	BW 730 (Dec. 2020)	730	-	BW (Breakwater) and SB (Submerged breakwater) construction
Apr. 2021	BW+140	870	-	
Jun. 2021	BW+245(May 105, Jun. 140), SB+140(May 20, Jun. 120)	1,115	140	
Aug. 2021	BW+280(Jul. 140, Aug. 140), SB+110(Jul.)	1,395	250	
Oct. 2021	BW+105(Sep., completed)	1,500	250	
Dec. 2021	-	1,500	250	BW completed
Feb. 2022	-	1,500	250	
Apr. 2022	-	1,500	250	
Jun. 2022	SB+130(May 100, Jun. 30)	1,500	380	SB construction
Aug. 2022	SB+150(Jul. 40, Aug. 110)	1,500	530	
Oct. 2022	SB+70(Sep. 40, Oct. 30, completed)	1,500	600	
Dec. 2022	-	1,500	600	Post-completion

Table 2. Monthly statistics of wave parameters at the study site (Dec. 2020~Dec. 2022)

Month	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	θ_{mean}	Month	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	θ_{mean}
Dec. 2020	0.9	6.2	NNE	Jan. 2022	1.4	7.6	NNE
Jan. 2021	1.0	6.7	NE	Feb. 2022	1.1	6.8	NNE
Feb. 2021	0.8	6.4	NE	Mar. 2022	0.9	5.9	NE
Mar. 2021	1.0	6.2	ENE	Apr. 2022	0.7	4.9	ENE
Apr. 2021	0.8	5.5	ENE	May. 2022	0.5	4.5	NE
May. 2021	0.7	5.7	NE	Jun. 2022	0.7	5.3	ENE
Jun. 2021	0.5	4.8	NE	Jul. 2022	0.6	5.4	NE
Jul. 2021	0.4	4.6	ENE	Aug. 2022	0.5	5.1	ENE
Aug. 2021	0.8	6.0	NE	Sep. 2022	0.8	5.6	ENE
Sep. 2021	0.8	6.0	ENE	Oct. 2022	1.0	6.0	NE
Oct. 2021	1.0	6.3	NE	Nov. 2022	0.8	6.0	NE
Nov. 2021	0.8	6.2	NE	Dec. 2022	0.9	6.2	N
Dec. 2021	1.1	7.2	NE				

Table 3. Monthly statistics of current parameters at the study site (Dec. 2020~Dec. 2022)

Month	Max. speed (cm/s)	Avg. speed (cm/s)	Direction (deg.)	Residual speed (cm/s)	Residual direction (deg.)	Month	Max. speed (cm/s)	Avg. speed (cm/s)	Direction (deg.)	Residual speed (cm/s)	Residual direction (deg.)
Dec. 2020	76.8	13.3	346.0	8.8	319.3	Jan. 2022	57.1	14.0	325.0	9.3	326.3
Jan. 2021	58.8	11.2	340.0	7.3	323.3	Feb. 2022	89.7	22.6	323.0	16.3	327.4
Feb. 2021	46.2	11.6	94.0	3.4	324.3	Mar. 2022	53.3	13.9	344.0	4.1	339.7
Mar. 2021	49.1	10.5	310.0	0.8	294.5	Apr. 2022	69.7	20.7	327.0	17.6	331.9
Apr. 2021	50.0	7.5	67.0	0.3	67.2	May. 2022	59.0	13.6	326.0	2.7	344.0
May. 2021	49.3	11.1	137.0	1.3	12.0	Jun. 2022	39.4	12.2	119.0	3.0	136.7
Jun. 2021	46.0	13.5	337.0	3.2	147.1	Jul. 2022	66.2	14.2	149.0	5.1	154.2
Jul. 2021	57.8	13.7	143.0	0.5	166.7	Aug. 2022	56.4	13.5	157.0	3.4	148.6
Aug. 2021	58.0	18.9	157.0	12.4	150.1	Sep. 2022	49.7	15.5	143.0	3.2	325.6
Sep. 2021	37.8	10.3	336.0	3.9	157.7	Oct. 2022	48.9	14.2	335.0	1.3	339.5
Oct. 2021	46.7	11.7	321.0	3.6	310.1	Nov. 2022	45.8	10.6	326.0	2.2	323.2
Nov. 2021	51.3	12.2	323.0	1.7	331.6	Dec. 2022	57.9	14.7	305.0	10.6	322.0
Dec. 2021	66.6	14.4	345.0	7.2	324.3						

은 NE 계열이 23%로 가장 우세하였고 ENE 16%, NNE 14%, N 9% 순이었다. 추계와 동계에는 NE, 춘계와 하계에는 ENE의 출현 빈도가 높게 나타났다. 이러한 계절별 파랑 특성은 동계에 유의파고가 크고 주파향이 NE 계열로 좁게 나타난 반면, 하계에 주파향이 ENE로 집중되고 출현폭이 넓어진다고 분석한 Jeong et al.(2019)의 결과와 유사하며, 동계와 추계에 파랑 에너지가 집중되는 전형적인 동해안의 계절 특성을 보였다. 이러한 계절적 특성은 동계 고파랑이 북동쪽으로 개방되어 있는 해안선 직각방향에 가깝게 입사함을 의미한다. 연안침식 실태조사(MOF, 2025)에서 급격한 침식을 유발하는 고파랑 기준으로 제시한 3 m 이상의 파랑은 전 기간의 1.0%로 출현 빈도는 낮았으며, 파향별 출현율은 NE 64%, NNE 24%, ENE 12%로 주로 N-NE계열 파가 내습한 것으로 분석되었다.

동기간 관측된 유속은 최강 유속이 37.8~89.7 cm/s 범위이며, 전 기간 평균 유속이 13.6 cm/s로 나타났다(Table 3). 관측결과를 살펴보면, 유향은 전 기간에 걸쳐 북서~남동 축을 따르는 왕복성 흐름 특성을 보였으며, 동계와 춘계에는 북서류, 하계에는 남동류가 우세하였다. 조석 성분을 제거한 잔차

류의 방향 또한 동계·춘계에 북서향(약 320~340°), 하계에 남동향(약 140~170°)으로 나타나, 해안선 방향(북서-남동)을 따라 계절적으로 반전되는 연안흐름 체계가 형성됨을 확인하였다. 잔차류 크기는 2022년 2월(16.3 cm/s)과 2022년 4월(17.6 cm/s)에 가장 강하게 나타났다.

이상의 분석 결과, 대상 해빈에는 동계와 추계에 NE 계열의 고파랑이 개방된 북동 방향으로 직접 내습하며, 이에 수반된 연안흐름이 계절적으로 전환되는 외력 조건이 형성되어 있다. 이러한 조건에서 해안구조물이 건설될 경우 파랑 변형과 흐름 재편이 복합적으로 작용하여 묘사 양상이 크게 변화할 것으로 예상된다.

3. 해빈변화 분석

동해안을 중심으로 효과적인 해안보호 및 장기관리를 위한 해안침식 관리시스템 필요성이 요구되었다(Kim et al., 2008). 따라서, 해안구조물이 건설 중인 연구대상 해빈에 대해 해빈변화를 분석하기 위해 해안선 및 표층퇴적물 조사를 수행하였다(Fig. 3). 해안선 조사는 Fig. 3(a)에 도시한 것과

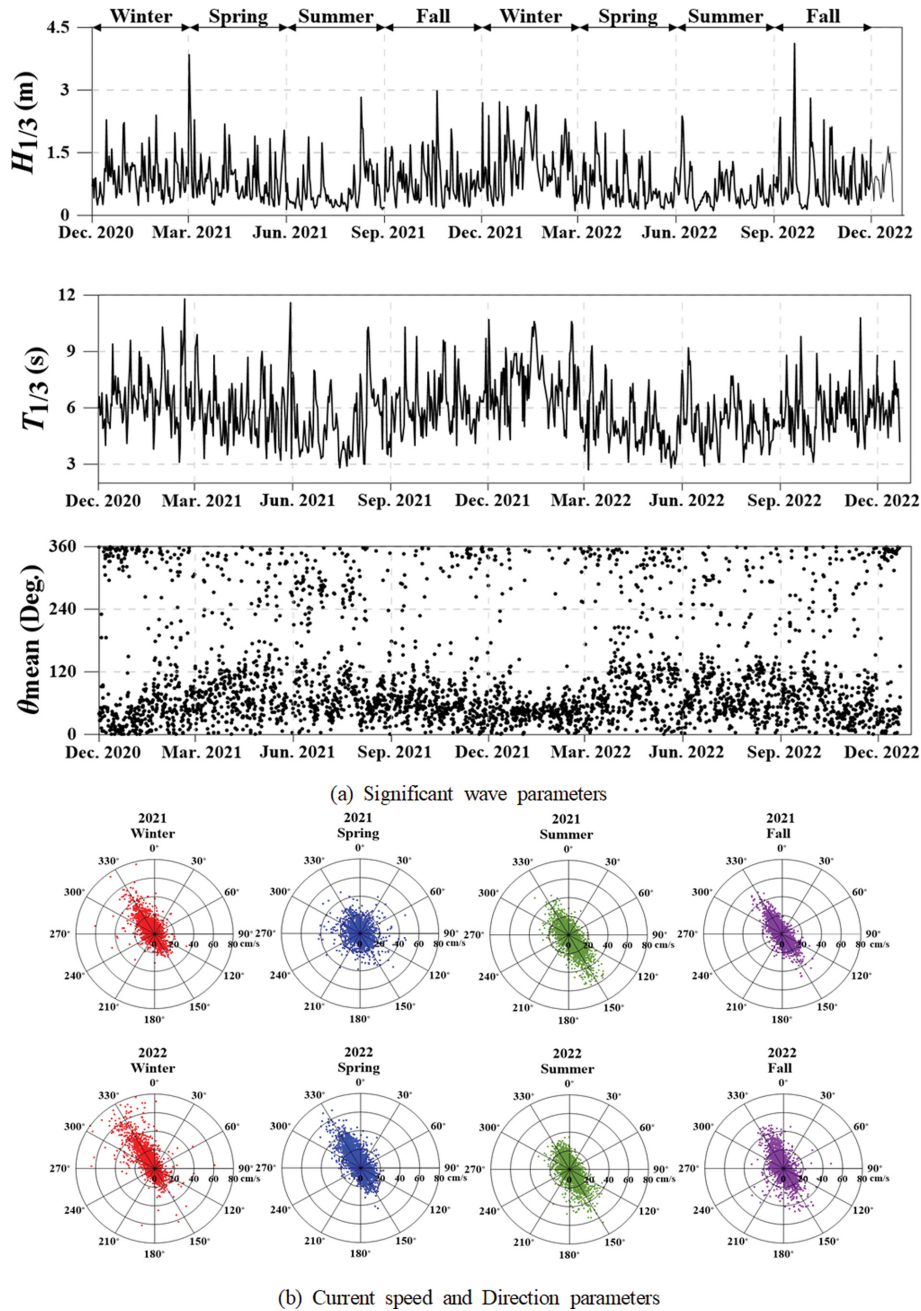


Fig. 2. Observed wave and current at Gyeongpodae Buoy.

같이 군선천 도류제 전면에서 시작하여 잠제 전면까지 해안선을 따라서 측량하였고, 잠제가 위치한 영역(Area 1), 잠제와 이안방파제 사이(Area 2) 그리고 이안방파제 배후(Area 3)으로 구분하여 분석하였다. 표층퇴적물 조사는 Fig. 3(b)에 표시한 격자화된 71개 정점(해상 60 및 육상 11 정점)에서 수행하였다.

3.1 조사방법

해안구조물이 건설되는 동안 염전해변에서 해안선 변화를 파악하기 위해 2021년 2월부터 2022년 12월까지 두 달 간격으로 총 12회를 수행하였다. 해안구조물 건설 기간 중 시간적 연속성과 자료의 균일성을 확보한 해안선 자료는 고정밀

VRS-GPS(South Inc., China)를 이용하여 사전에 해안구조물 공사 구간에서 안전을 확보한 뒤 측량하였다. 매 조사 시 기준과 정확도 유지를 위해 사전에 정밀 측량된 육상기준점(EL +3.984 m)을 기준으로 높이 기준을 고정하였고, EL +0.0 m의 표고선을 따라 도보로 이동하면서 그 위치를 매 1초 간격마다 연속적으로 VRS-GPS로 추적하였으므로, 조사 시 조위 변화에 따른 수평 위치 차이가 반영되지 않도록 하였다. 조사 범위는 대상해안 잠제 전면에서 시작하여 군선천 도류제 끝단까지 약 2.0 km를 대상으로 해안구조물 설치 과정에서 변동된 지형을 따라 연속 측량하였다. 해안선 조사에서 취득된 자료는 모든 조사 시기에 대해 동일한 범위로 통일되게 분석하였으며, 해안구조물 건설에 의한 해안선 변화는 2021

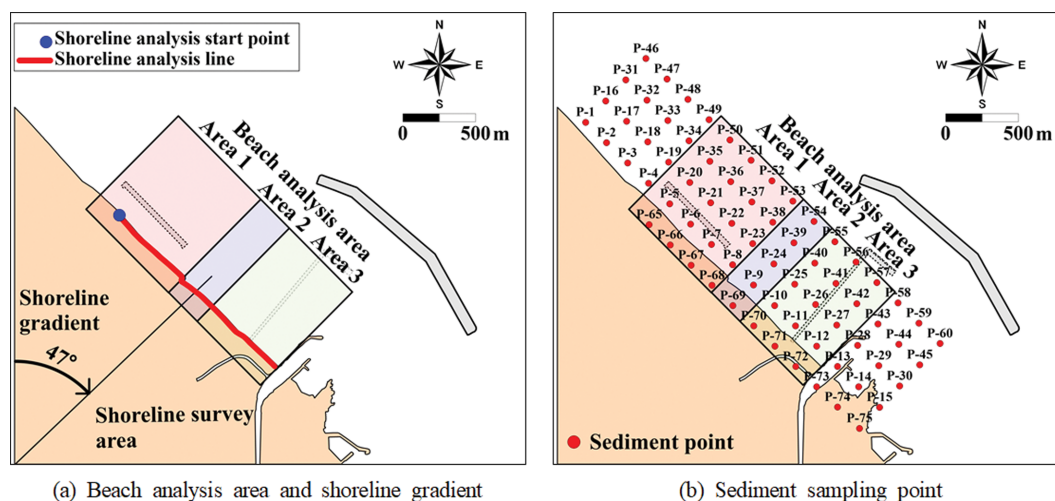


Fig. 3. Beach analysis and sediment sampling points in the study area.

Table 4. Monthly maximum, minimum and average of shoreline change relative to the Feb. 2021 shoreline

Year		2021					2022					
Month	Apr	Jun	Aug	Oct	Dec	Feb	Apr	Jun	Aug	Oct	Dec	
Max.	4.7	7.0	3.6	39.2	49.9	82.1	86.2	78.4	75.3	84.5	94.0	
Min.	−15.2	−15.2	−37.8	−41.1	−45.3	−34.7	−35.2	−44.4	−45.7	−39.3	−49.4	
Avg.	−5.0	−6.5	−7.2	−1.7	−8.0	−3.6	−0.2	−0.9	−1.8	0.3	2.5	

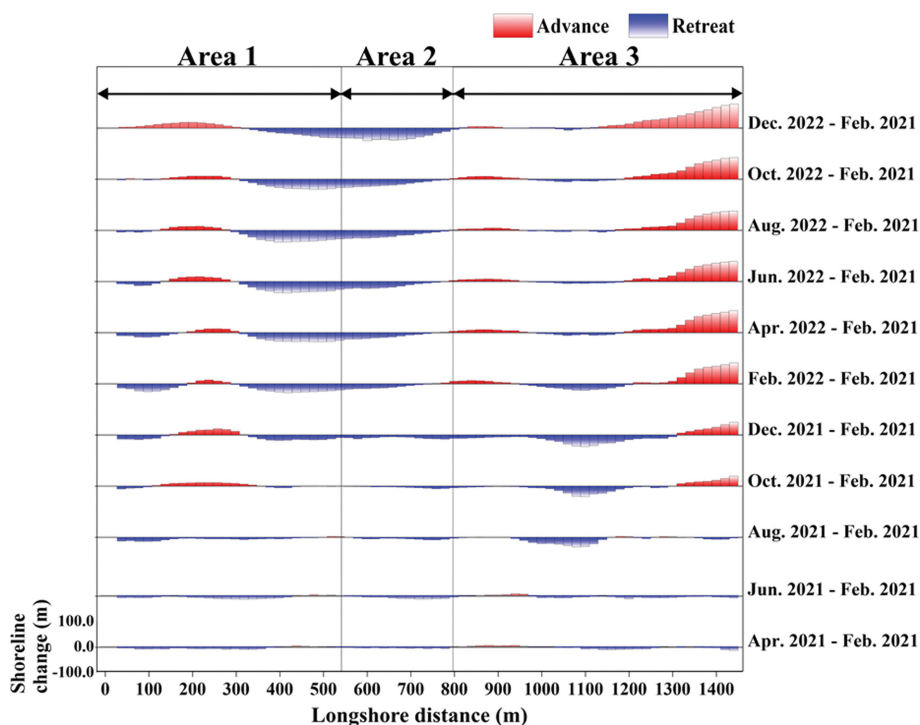


Fig. 4. Shoreline changes relative to February 2021 along Yeomjeon beach.

년 2월 해안선을 기준으로 설정한 후, 20 m 간격으로 등분하여 전진 및 후퇴량을 산정한 뒤 시·공간적 변화를 파악하였다. 염전해변은 이안방파제와 잠제 두 가지 구조물이 시차를 두고 상호보완의 관계로 설치된 구조물에 의한 해안선 변화를 살펴보는 것이 가능하였고, 조사 시기별 해안선 변화 결

과는 Table 4와 Fig. 4에 제시하였고, Fig. 4의 x축은 Fig. 3(a)에서 제시한 Area 1의 북서측 해안선 분석 시작점을 기준으로 남동측 중점까지 약 1.4 km 구간으로 설정하여 모든 조사 시기에 공통으로 측량된 구간에 한하여 분석하였다(Fig. 3(a)).

3.2 조사결과

이안방파제가 축조되던 2021년 4월부터 8월까지의 전 구간에서 해안선 변화가 미미하였다(Fig. 4). 이 시기 최대 전진량은 3.6~7.0 m에 그쳤고 평균 변화량도 -5.0~7.2 m 수준의 완만한 후퇴에 머물렀다(Table 4). 그러나 이안방파제가 완공된 2021년 9월 직후인 2021년 10월 조사부터 해안선 변화가 급격히 증가하였는데 최대 전진량은 8월의 3.6 m에서 10월 39.2 m, 12월 49.9 m로 급증하였으며, 전진은 이안방파제 배후 구간(Area 3)에 집중되었다. 이는 방파제 완공에 따라 배후에 정온역이 형성되면서 표사가 해당 구간에서 퇴적 경향이 우세해진 것으로 분석된다. 방파제 배후 구간(Area 3) 해안선 전진은 조사 기간 내내 지속적으로 증가하여 2022년 12월에 최대 94.0 m에 이르렀다(Table 4, Fig. 4). 반면 잠제와 이안방파제 사이의 중앙부(Area 2)에서는 지속적인 후퇴가 나타났는데, 2022년 12월 최대 -49.4 m를 기록하였다. 두 구간의 상반된 거동은 외력의 내습을 직접적으로 받는 중앙부에서 침식된 표사가 남동향 흐름을 따라 방파제 배후의 정온역으로 이동·퇴적되었을 가능성이 있다. Area 2는 파랑이 직접 내습하는 구간인 동시에 Area 1의 잠제와 Area 3의 이안방파제에 의해 인접 구간으로부터의 표사 공급이 차단되어 지속적인 후퇴 양상을 보였다.

잠제 설치 구간(Area 1)에서는 잠제 중앙부 배후에 설상사주(salient)가 형성되어 점차 확대되는 양상이 관측되었으며, 잠제 양 끝단에서는 후퇴가 나타났다. 이는 잠제 배후의 파랑 차폐와 양단부의 흐름 집중이라는 잠제의 전형적인 지형 반응을 관찰할 수 있었다.

전 구간을 종합한 평균 해안선 변화는 2021년 12월 -8.0 m로 최대 후퇴를 보인 후 점차 회복되어, 2022년 10월(+0.3 m)부터 전진 우세로 전환되었고 2022년 12월에는 +2.5 m로 나타났다(Table 4). 즉 대상 해빈 전체로는 해안구조물 건설 초기에 후퇴가 우세하였으나, 구조물 완공 이후 표사의 공간적 재분배를 통해 점차 전진 우세로 전환되었다. 다만 이는 시기별 평균값의 변화이며, 조사 전 기간을 평균하면 전체 해안선은 여전히 -2.9 m 후퇴로 나타난다. 실제로는 방파제 배후의 대규모 퇴적이 중앙부의 침식을 상쇄한 결과로, 구간별 침식·퇴적의 불균형은 오히려 심화된 결과가 나타났다.

4. 표층퇴적물과 표사경향 분석

4.1 표층퇴적물 분석

4.1.1 조사방법

염전해변의 표층퇴적물 입도 특성과 표사 경향을 분석하기 위해 2021년 2월부터 2022년 12월까지 2개월 간격으로 총 12회에 걸쳐 표층퇴적물 조사를 수행하였다. 정점은 공간적 균일성을 확보하기 위해 약 200 m 간격의 격자 형태로 배치하였다. 당초 75개 정점을 계획하였으나 P-61~64 정점은 군부대 전면부에 위치하여 접근이 불가하였으므로, 최종적으

로 해상 60개 정점과 육상 11개 정점, 총 71개 정점에서 조사를 수행하였다(Fig. 3(b)). 해당 정점에서는 그랩 채니기(grab sampler)를 이용하여 시료를 채취하였으며, 표층퇴적물의 특성을 반영하기 위해 표층으로부터 2 cm 깊이의 시료만을 분석에 사용하였다. 채취된 시료는 현장에서 밀봉하여 실험실로 운반한 후 해양환경공정시험기준에 따라 입도분석을 수행하였고, Folk and Ward(1957)의 방법으로 평균입경, 분급도 및 편왜도를 산출하였다. 산출된 세 가지 입도 변수는 표사 경향벡터(GSTA, Grain Size Trend Analysis)의 입력자료로 사용하였다.

4.1.2 분석결과

조사 기간 중 대상 해역의 퇴적상은 모래(S), 역질사(gS), 약역질사((g)S), 실트질사(zS) 및 약역니질사((g)mS)로 구분되었으며, 대부분의 정점에서 모래(S)가 우세하였다. 연도별로 퇴적상 분포를 살펴보면 약역질사((g)S)가 2021년 대비 2022년에 32% 감소한 반면, 실트질사(zS)는 6배 이상 증가 및 모래(S) 출현 빈도도 다소 증가하여 세립화와 조립화가 동시에 진행되었다. 평균입경은 2021년에 해상 0.153~0.653 mm, 육상 0.680~3.515 mm 범위로 나타났으며, 2022년에는 해상 0.129~1.048 mm, 육상 0.557~1.054 mm 범위로 나타났다. 변화가 가장 크게 나타난 정점은 P-75로, 2021년 평균 3.515 mm에서 2022년 0.889 mm로 2.63 mm 감소(세립화)하였다. 분급도는 2021년 0.4~0.8 범위로 전 정점에서 1.0보다 양호하였으나, 2022년에는 0.4~1.4 범위로 확대되었으며, 특히 이안방파제 배후에서 1.0~1.4 범위의 불량한 분급이 나타났다. 편왜도는 2021년 -0.4~0.2 범위, 2022년 -0.4~0.4 범위로 분포하였다.

4.2 표사경향 분석(GSTA)

4.2.1 모형개요

McLaren(1981)은 평균입경(μ), 분급도(σ)와 편왜도(Sk)를 퇴적물 운반양상과 관련하여 입도의 세립화나 조립화와 관계없이 운반경로에서 퇴적물은 분급도가 양호하고 편왜도는 양의 값으로 증가하는 것을 밝혔다. McLaren and Bowles(1985)는 평균입경, 분급도와 편왜도 3가지 통계변수의 조합 8가지 가운데 두 가지 조건이 퇴적물 순운반방향과 결부된다고 제시하였다. Gao(1996)는 이 결과에 근거하여 입도경향해석 프로그램(GSTA)을 작성하여 공개하였으며, 이러한 방법은 하천, 하구, 만, 항구 및 대륙붕 환경에 적용된 바 있다(Poizot et al., 2006; Jung and Park, 2021; Yoon and Park, 2021). 본 연구에서는 Gao(1996) 모형을 사용하여 염전해변의 표사 경향을 분석하였는데, 실험과정은 첫째, 특성거리와 경향벡터를 정의하고, 둘째, 합경향벡터를 산정하고 셋째, 운반벡터를 결정하는 순서로 수행되었다.

한편, 연안에서 침식·퇴적현상은 조류, 파랑, 폭풍, 하천유입 등 다양한 흐름과 이에 의해 퇴적물이 운반되고 채집된 시

료는 채집지점에 작용하는 모든 운반기구들이 미치는 영향의 최종결과라고 할 수 있다. 서로 다른 시료는 서로 다른 운반 사건 때문에 발생할 가능성도 존재한다. 퇴적을 일으키는 단일 물리기구의 시간적 간격은 조석, 폭풍에서 년 단위에 이르기까지 다양하다. 본 모형으로는 다양한 퇴적기구와 관련된 시간을 분리하여 해석할 수 없으므로 순침식 혹은 순퇴적만을 나타낼 뿐 시간에 관련한 침식퇴적속도는 결정할 수 없으며, 두 개의 퇴적물 타입 간에 퇴적물 운반관계가 있는지에 대해서만 결정할 수 있다(Yeosu City, 2012).

4.2.2 분석결과

특성거리는 정점 간 배치 간격(약 200 m)의 두 배 이상으로 인접 정점과 대각선에 있는 모든 정점이 포함되도록 420 m로 설정하였으며, 각 조사 시기별로 산출된 평균입경, 분급도

및 편향도를 입력자료로 사용하였다. 분석 결과는 조사 시기별 구조물 시공 현황(Table 1) 및 동일 시기에 측량된 해안선과 함께 Fig. 5에 제시하였다. 이동경향의 공간적 특성에 따라 대상 해역을 세 구역으로 구분하였다. (1) 잠제 전면부(Fig. 3, Area 1), (2) 잠제와 이안방파제 사이의 중앙부(Fig. 3, Area 2), (3) 이안방파제 배후역(Fig. 3, Area 3)이며, 이는 3장의 해안선 변화 구분과 동일하다. 시간적으로는 Table 1의 구분에 따라 방파제와 잠제 복합 건설기(2021년 2월~2021년 10월), 방파제 완공기(2021년 12월~2022년 4월), 잠제 건설기(2022년 6월~2022년 10월) 및 완공 후(2022년 12월)로 나누어 기술한다.

방파제 건설 기간에 따라 살펴보면, 방파제와 잠제 복합 건설기(2021년 2월~2021년 10월)의 첫 조사인 2021년 2월(Fig. 5(a))에는 방파제 연장이 730 m였으며 외해에서 해안

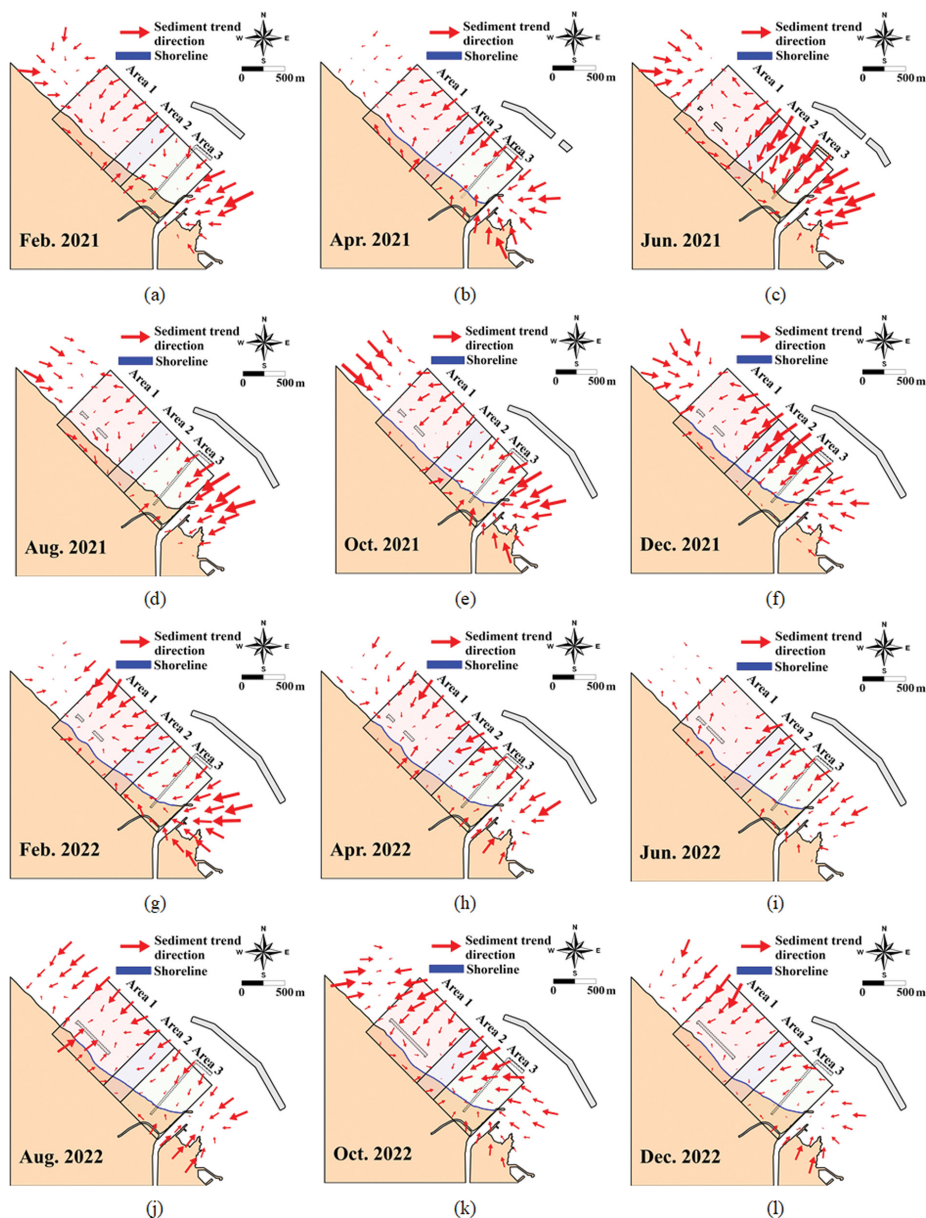


Fig. 5. Result of GSTA at Yeomjeon beach.

방향으로 향하는 벡터가 우세한 가운데, Area 3에서는 군선 천 도류제 전면으로 수렴하는 경향이 나타났다. 2021년 4월(Fig. 5(b))에는 방파제가 870 m로 연장되었으나 기존 구간과 신설 구간 사이에 개구부가 존재하였고, 이로 인하여 배후역의 이동경향이 복잡하게 나타났다. Area 1에서 해안 방향으로 수렴한 반면, 신설 구간 배후에서는 이전 조사와 마찬가지로 군선천 도류제 방향으로 수렴하였는데, 이러한 복잡한 표사 경향은 시공 중인 구조물 형상과 개구부의 존재와 관련되었을 가능성이 있다. 2021년 6월(Fig. 5(c))에는 방파제가 1,115 m로 연장되었고 벡터는 Area 3로 집중되었다. 한편 하시동 사구 전면의 침식 저감을 위한 잠제는 이 시점까지 총 140 m가 시공되었으나 각 구간이 연결되지 않아 파랑 저감효과가 미미하였고, Area 1에서는 개구부를 통한 외해 방향의 이동경향이 나타났다. 2021년 8월(Fig. 5(d))에는 방파제가 1,395 m로 연장되어 배후역이 사실상 차폐되었으며, Area 3에서 해안 방향 수렴이 가장 뚜렷하게 나타났다. 이 시기 Area 2에서는 해빈순환류와 유사한 벡터가 형성되었다. 방파제가 완공(1,500 m)된 직후인 2021년 10월(Fig. 5(e)) Area 3에서는 해빈 남측을 향한 수렴이 지속되었으며, 육상 측 정점에서도 전빈부를 향하는 벡터가 나타나 해당 구간을 중심으로 이동경향이 집중되는 양상을 보였다. 벡터의 크기가 이동량을 정량적으로 나타내지는 않으나, 동기간 해당 구간에서 해안선 전진이 관측되었으므로(Table 4, Fig. 4) 이러한 수렴은 실제 퇴적으로 이어졌을 가능성이 높다. 3장에서 확인한 바와 같이 2021년 8월까지 3.6~7.0 m에 그쳤던 최대 전진량은 10월 조사에서 39.2 m로 급증하였으며(Table 4), 그 전진 구간은 GSTA가 수렴을 나타내고 있는 방파제 배후역(Area 3)과 일치한다. 서로 독립적으로 취득된 두 자료가 동일한 경향을 나타낸다는 점은 본 GSTA 결과의 신뢰성을 뒷받침한다. 한편 같은 시기 Area 1에서는 잠제 연장이 250 m에 불과하여 파랑 제어 기능이 제한적이었으며, 육상 정점에서 외해로 향하는 경향이 지속되었다.

방파제 완공기(2021년 12월~2022년 4월)의 3회 조사 시기는 추가 시공이 이루어지지 않은 기간으로(Table 1), 구조물 형상이 고정된 상태에서 계절적 외력에 따른 이동경향을 상대적으로 비교할 수 있는 기간이다. 이 기간 동안 Area 3에서는 해안 방향 수렴이 일관되게 유지되어(Fig. 5(f)~5(h)), 구조물에 의해 형성된 경향이 계절 변화에도 지속됨을 확인할 수 있었다. 2021년 12월 Area 1에서는 Area 2로 향하는 벡터가 나타났지만, 2022년 2월 및 4월에는 외해 방향으로 향하는 등 시기별 변동이 나타났다. 즉 Area 3에서는 비교적 일관된 수렴 특성이 유지된 반면, Area 1에서는 외력 조건에 따른 변동성이 상대적으로 크게 나타나 두 구역의 반응이 뚜렷하게 구분되었다.

잠제 건설기 및 완공 후(2022년 6월~12월) 잠제 연장은 2022년 6월 380 m, 8월 530 m 및 10월 600 m로 증가하여 완공되었다(Table 1). 2022년 6월(Fig. 5(i))에는 Area 3에서

Area 2 방향으로 향하는 경향이 나타났고, Area 1에서는 외해 방향의 경향이 발생했다. 2022년 8월(Fig. 5(j))에도 Area 1 육상에서는 외해 방향의 경향이 지속되었으며, Area 3에서는 남측으로 수렴하는 벡터가 나타났다. 잠제가 계획 연장 600 m로 완공된 2022년 10월(Fig. 5(k))에는 Area 1에서 이전 조사와 달리 해안 방향 경향이 뚜렷하게 나타나 잠제 주변의 표사 경향이 재편되었을 가능성을 시사하였다. 동시에 Area 2에서는 잠제와 방파제 사이 영역으로 수렴이 전 조사 기간 중 가장 뚜렷하게 나타났다. 모든 구조물이 완공된 후인 2022년 12월(Fig. 5(l))에는 Area 3에서 Area 2로 향하는 경향이 주를 이루었으며, Area 1에서는 벡터가 잠제 북서측, 즉 하시동 사구 방향으로 향하는 경향이 나타났다. 이는 사구 전면의 침식 저감이라는 잠제의 설치 목적에 부합하는 표사 경향으로, 구조물 완공 이후 해당 구역의 표사 경향이 해안 및 사구 전면 방향으로 재편되었음을 보여준다.

구조물 시공에 따른 변화와 계절적 외력에 따른 변동을 상대적으로 비교하기 위해, 계절 조건이 유사한 시기 간의 이동경향을 비교하였다. 가장 뚜렷한 대비는 2021년 6월과 2022년 6월에서 나타난다(Fig. 5(c) 및 5(i)). 두 시기는 하계로 계절 조건이 유사하나(월평균 유의파고 0.5 m 및 0.7 m, Table 2), 구조물 현황은 방파제와 잠제 연장이 각각 1,115 m 및 140 m 그리고 1,500 m 및 380 m로 상이하다. 2021년 6월에 나타났던 Area 3로 향한 수렴 벡터는 2022년 6월에 완화되었으며, 이는 구조물 시공 단계에 따라 표사 경향의 공간적 분포가 변화하였음을 보여준다.

공간적으로는 세 구역에서 구조물 위치와 시공 단계에 따라 서로 다른 표사 경향이 나타났다. Area 3에서는 전 조사 기간에 걸쳐 수렴 특성이 비교적 일관되게 나타났으며, 세부적인 방향은 시기에 따라 해안 또는 Area 2 방향으로 변화하였다. Area 2에서는 2021년 해안 및 외해 방향의 경향이 혼재하였으나, 2022년에는 두 구조물 사이를 중심으로 수렴하는 특성이 보다 크게 나타났다. 반면 Area 1은 외해에 직접 노출된 위치적 특성으로 인해 조사 시기별 방향의 변동성이 상대적으로 크게 나타났으며, 잠제가 계획 연장에 도달한 2022년 10월 이후에는 해안 및 사구 전면 방향의 경향이 뚜렷해졌다. 따라서 Area 3에서는 방파제 시공 초기부터 비교적 일정한 수렴 특성이 나타난 반면, Area 1에서는 잠제의 시공이 진행됨에 따라 표사 경향이 점진적으로 재편되는 공간적 차이가 확인되었다.

계절에 따른 표사 경향의 변화는 외해 파랑에 직접 노출된 Area 1에서 상대적으로 크게 나타났다. Area 2와 Area 3에서는 조사 시기에 따른 세부적인 방향 변화에도 불구하고 구조물 주변 또는 해안 방향으로 수렴하는 특성이 비교적 지속적으로 나타났다. 그러나 본 조사기간에는 계절 변화와 구조물 시공이 동시에 진행되었으므로 각 계절에 고유한 방향을 명확하게 구분하여 일반화하기에는 한계가 있다. 그럼에도 구조물 형상이 일정하게 유지된 2021년 12월~2022년 4월에도

Area 3에서 수렴 경향이 지속되었으며, 유사한 하계 조건에서도 2021년과 2022년의 표사 경향이 서로 다르게 나타났다. 이는 대상 해역의 표사 경향에 계절적 외력의 변화와 함께 구조물 시공에 따른 공간적 재편 효과가 중첩되어 작용하였음을 시사한다.

이러한 결과를 종합하면, 방파제와 잠제 시공에 따른 표사 경향의 변화는 대상 해역 전역에서 동일하게 나타난 것이 아니라 구조물과의 상대적 위치에 따라 공간적으로 다르게 나타났다. 방파제 배후(Area 3)에서는 방파제 연장과 함께 수렴이 지속적으로 나타났으며, 방파제 완공 직후에는 해안 방향 수렴 구간과 최대 전진 구간이 공간적으로 일치하였다. 반면 잠제 전면의 Area 1에서는 잠제 시공기간 동안 외해 및 연안 방향의 경향이 반복적으로 나타났으나, 잠제가 계획 연장에 도달한 이후에는 해안 및 사구 전면 방향으로 변화하였다. 또한 Area 2에서는 두 구조물의 시공이 진행됨에 따라 잠제와 방파제 사이로 표사 경향이 집중되는 특성이 뚜렷해졌다.

따라서 대상 해역에서는 계절적 외력에 따른 표사 변동성이 지속되는 가운데, 방파제와 잠제 시공이 진행됨에 따라 구조물 주변의 표사 경향이 단계적으로 재편된 양상이 확인된다. 특히 방파제 배후(Area 3)에서 나타난 지속적인 수렴과 해안선 전진의 공간적 일치, 그리고 잠제 완공 이후 Area 1에서 나타난 해안 방향의 변화는 구조물 시공이 대상 해역의 표사 체계 변화에 영향을 미쳤음을 뒷받침한다.

5. 외력, 퇴적물과 지형변화에 관한 고찰

해양수산부에서는 2003년부터 연안침식 실태조사를 실시하고 있으며, 그 결과를 바탕으로 해빈을 A(양호), B(보통), C(우려), D(심각)의 4개 등급으로 평가하고 있다. 연구대상 해역에서는 해안구조물 건설로 해빈의 표사 평형이 교란되어 시·공간적으로 뚜렷한 지형변화가 발생하였다. 최근 5년(2020~2024년) 동안 염전해빈은 2020년 D 등급을 시작으로 2021년 C, 2022년 B, 2023년 C, 2024년 D 등급으로 평가되었다. 2022년의 B 등급을 제외하면 모두 우려(C) 또는 심각(D) 등급에 해당하여 침식이 지속적으로 발생하는 해빈으로 평가되었다. 조사기간 중 2021년에는 구조물의 영향으로 구역별 침식·퇴적 양상이 상이하게 나타난 반면, 2022년에는 해안구조물 완공과 함께 이러한 불균형이 고착되는 양상을 보였다. 현장조사에 대한 내용을 요약하면 Table 5와 같다.

이에 본 장에서는 현장조사에서 취득한 표층퇴적물의 평균 입경 변화와 2021~2022년 수심변화 간의 위치적 상관성을 분석하고, 해안선 변화와 해양외력의 관계를 함께 검토하여 종합적으로 고찰하였다.

5.1 평균입경 변화

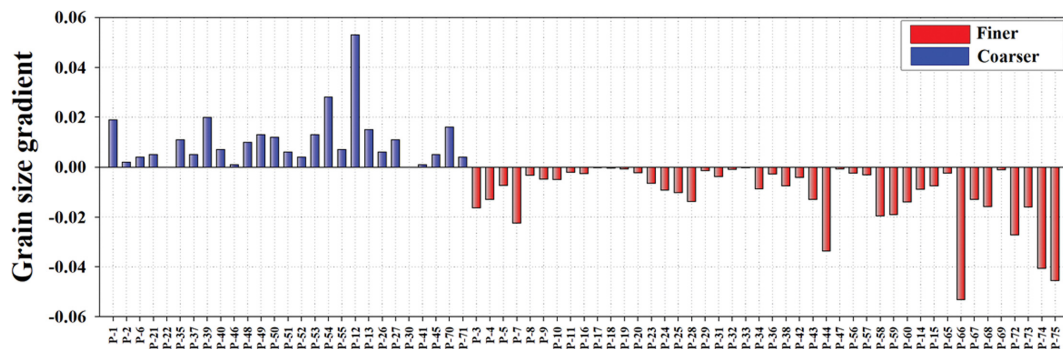
일반적으로 침식이 우세한 구역에서는 과량과 흐름에 의해 세립질 입자가 선택적으로 유실되어 조립질 성분이 잔류하므로 평균입경이 증가하며, 반대로 퇴적이 우세한 구역에서는

Table 5. Summary of results

Contents	Result	Value
Ocean forcing	NE waves directly attack the northeast-facing beach; residual currents reverse seasonally between NW and SE	Waves ≥ 3 m: 1.0%; monthly mean significant wave height 0.4~1.4 m, NE waves most frequent (23%); residual currents reverse seasonally between NW and SE
Shoreline change	Rapid shoreline advance landward of the detached breakwater, formation of a salient behind the submerged breakwater, and continuous erosion in the central section	Maximum advance 94.0 m, maximum retreat 49.4 m, whole-period mean retreat 2.9 m, maximum whole-section mean retreat 8.0 m
Surface sediment	Sand dominant across the entire area; fining progressed during structure construction	Slightly gravelly sand decreased by 32% and silty sand increased more than sixfold from 2021 to 2022
Grain-size trend analysis (GSTA)	Onshore-directed transport trend dominant in the offshore zone; transport trends were spatially reorganized according to the structure layout and construction stage	Accretion landward of the breakwater in 2021 (coinciding with the onset of shoreline advance) and onshore-directed migration in front of the submerged breakwater after its completion in October 2022
Mean grain-size change and bathymetric change	Fining (deposition) occurred in the sheltered zone and landward of the submerged breakwater, while coarsening (erosion) occurred in the central section.	At P-12 near the Gunseoncheon groyne, shoreline advance coincided with coarsening, possibly reflecting relatively coarse sediment supply and/or construction-related disturbance.
Correlation between shoreline change and marine forcing	Cross-shore wave forcing showed a stronger relationship with shoreline change than the longshore component; seasonal cycle of autumn-winter erosion and spring-summer recovery	Correlation coefficient (r): significant wave height 0.68, significant wave period 0.69, wave direction 0.63; cross-shore energy flux 0.76 and longshore 0.53

Table 6. Mean grain size gradient at each station

Section	Area	Count	Point
1	Coarser area	2	P-1(0.019), P-2(0.002)
	Finer area	26	P-3(-0.016), P-4(-0.013), P-5(-0.007), P-7(-0.022) P-8(-0.003), P-9(-0.005), P-10(-0.005), P-11(-0.002) P-16(-0.003), P-17(0.000), P-18(0.000), P-19(-0.001), P-20(-0.002), P-23(-0.006), P-24(-0.009), P-25(-0.010), P-31(-0.004), P-32(-0.001), P-33(0.000), P-34(-0.009), P-38(-0.007), P-65(-0.003), P-66(-0.053), P-67(-0.013), P-68(-0.016), P-69(-0.001)
2	Coarser area	16	P-6(0.004), P-21(0.005), P-22(0.000), P-35(0.011) P-37(0.005), P-39(0.020), P-40(0.007), P-46(0.001) P-48(0.010), P-49(0.013), P-50(0.012), P-51(0.006) P-52(0.004), P-53(0.013), P-54(0.028), P-55(0.007)
	Finer area	10	P-28(-0.014), P-29(-0.001), P-42(-0.004), P-43(-0.013) P-44(-0.034), P-56(-0.002), P-57(-0.003), P-58(-0.020) P-59(-0.019), P-60(-0.014)
3	Coarser area	7	P-12(0.053), P-13(0.015), P-26(0.006), P-27(0.011), P-30(0.000), P-70(0.016), P-71(0.004)
	Finer area	6	P-14(-0.009), P-15(-0.008), P-72(-0.027), P-73(-0.016), P-74(-0.040), P-75(-0.406)

**Fig. 6.** Distribution of grain size gradient d_{mean} (mm) at each station for 2 years (Feb. 2021 to Dec. 2022).

이동해 온 세립질 입자가 침강·집적되어 평균입경이 감소한다(Self, 1977; Hallin et al., 2019). 본 연구에서는 이러한 원리를 바탕으로 평균입경 변화를 지형변화 보조 지표로 활용하였다. 다만, 이 관계는 동일 지점에서 이상적으로 작용할 때 성립하며, 외부로부터 특정 입경의 표사가 공급되는 구역에서는 성립하지 않을 수 있다. 즉 조립질 퇴적물이 다량 공급되는 구역에서는 퇴적이 진행되더라도 평균입경이 오히려 증가할 수 있다. 따라서 본 절에서는 평균입경 변화를 단독으로 해석하지 않고, 동일 기간의 수심 변화 및 해안선 변화(3장)와 교차 검토하였다.

평균입경의 변화는 2021년 2월을 기준으로 각 조사 시기의 평균입경에 대한 추세선(trend line)을 산정하여 조사 기간 전체의 경향(gradient)으로 나타내었으며, 그 결과를 정점별로 Table 6 및 Fig. 6에 제시하였다. 정점별 평균입경 경향은 조립화 구역과 세립화 구역으로 뚜렷이 구분되었으며, 그 공간 분포는 구조물의 배치와 밀접한 관련을 보였다(Fig. 6).

세립화 구역은 이안방파제 배후의 정온역(P-56~P-60), 방파제 전면부(P-42~P-44), 잠제 배후 및 북서측 해빈(P-3~P-5, P-7~P-11, P-16~P-20, P-23~P-25, P-31~P-34, P-65~P-69) 그리고 육상 정점의 남측 말단부(P-72~P-75)에서 나타났다. 이 중 변화가 가장 큰 정점은 P-75(-0.406 mm), P-66(-0.053 mm), P-74(-0.040 mm)이다. 조립화 구역은 잠제와 이안방파제 사이의 중앙부(P-46~P-55)와 군선천 도류제 전면부(P-12, P-13, P-26, P-27) 그리고 잠제 북서측 일부(P-1, P-2, P-6, P-21)에서 나타났다. 변화가 가장 큰 정점은 P-12(0.053 mm)와 P-54(0.028 mm)였는데, 이러한 공간 분포는 3장에서 확인한 해안선 변화 및 4.2절의 표사 경향과 대체로 정합적이다. 즉 해안선의 뚜렷한 전진과 GSTA 벡터의 강한 수렴이 관측된 이안방파제 배후 정온역에서는 세립화가, 지속적인 해안선 후퇴가 관측된 잠제와 이안방파제 사이 구간에서는 조립화가 진행되었다.

이안방파제 배후 정온역에서는 방파제에 의한 파랑 감쇠로 저층 유속이 저하되면서 세립질 입자가 부유 상태를 유지하

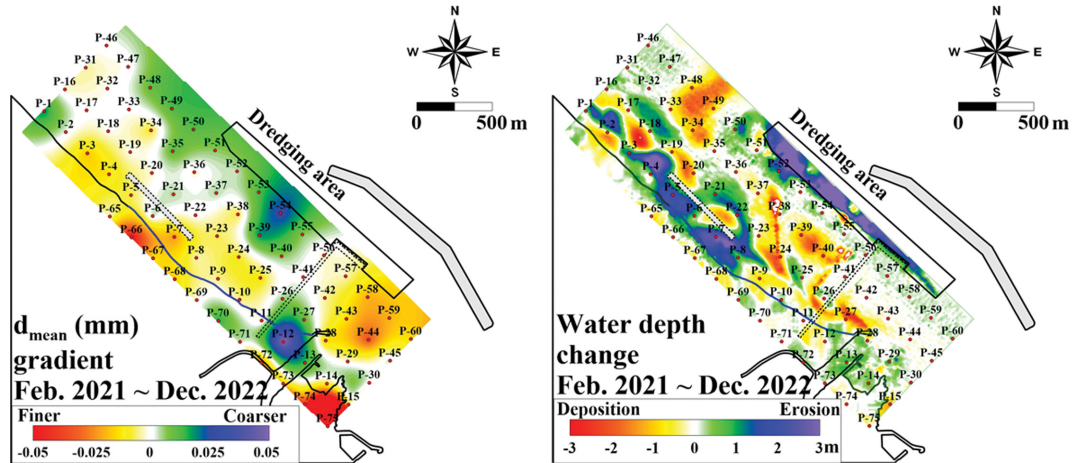


Fig. 7. Comparison between mean grain size and water depth changes (Feb. 2021 to Dec. 2022).

지 못하고 선택적으로 침강한 것으로 보인다. 이 구역은 해안선이 최대 94.0 m까지 전진하고(Table 4) 수심이 감소한 구간과 일치하여(Fig. 7), 3개의 독립적인 관측자료가 모두 동일 구역의 퇴적 경향을 상호 보완적으로 뒷받침한다. 잠제와 이안방파제 사이의 중앙부는 N 계열 파랑 내습 시 직접적인 파랑 작용과 구조물에 의한 회절파의 영향을 함께 받을 수 있는 위치로, 이러한 복합적인 외력 조건이 세립질 입자의 부유 및 유실과 관련되었을 가능성이 있다. 이 구역은 조사 기간 동안 해안선 후퇴가 지속되어 2022년 12월 최대 -49.4 m를 기록한 구간과 일치한다(Table 4, Fig. 4).

잠제 배후 일부 정점에서는 평균입경의 세립화가 나타났으며, 이러한 변화는 잠제 배후에서 관측된 설상사주(salient)의 형성 및 확대와 공간적으로 부합하였다. 세립화 및 조립화 구역에서 구역별 특성을 대표하는 2개 정점을 선정하여 평균입경의 시계열 변화를 Fig. 8에 제시하였다. 정점 P-44(-0.034 mm, 세립화)는 이안방파제 전면부에 위치하며, 조사 초기 0.3 mm 내외였던 평균입경이 지속적으로 감소하여 2022년 말에는 0.1 mm 이하로 나타났다. 방파제 축조가 진행되는 동안 해당 정점에서 지속적인 세립화가 나타났으며, 이는 구조물 시공에 따른 국지적인 파랑 및 흐름조건의 변화와 관련된 것으로 해석된다. 정점 P-75(-0.406 mm, 세립화)는 전체 정점 중 변화가 가장 큰 정점으로, 조사 초기에는 자갈(gravel)이 우세한 구역이었으나(평균입경 약 5 mm) 2022년 12월에는 0.6 mm의 모래가 우세하였다. 이는 기존 표층의 자갈이 이동하면서 하부에 존재하던 모래층이 노출되었거나 주변으로부터 유입된 모래가 피복하였을 가능성이 있다. 입도 변화만으로 직접적인 결과를 단정하기는 어렵지만 구조물 시공 이후 해당 구역의 표층 퇴적환경이 크게 변화하였음을 보여준다.

정점 P-54(0.028 mm, 조립화)는 잠제와 이안방파제 사이의 중앙부에 위치하며, 평균입경이 0.2 mm에서 0.5 mm 수준으로 증가하였다. 이 구역은 파랑이 직접 내습하는 동시에 이안방파제에 의해 회절된 파랑의 영향도 함께 받는 복합적 조건에 놓여 있어 시기별 변동 폭이 크게 나타났으나, 전체

적으로는 조립화 경향이 뚜렷하였다. 정점 P-12(0.053 mm, 조립화)는 전체 정점 중 조립화가 가장 뚜렷한 정점이나, 동시에 해안선이 가장 크게 전진한 구역(군선천 도류제 전면)에 위치한다. 즉 퇴적이 진행되었음에도 평균입경이 증가하여, 앞서 설명한 침식 시 조립화 및 퇴적 시 세립화의 일반적인 관계와 상반된 특성을 나타냈다. 이러한 예외적 양상에는 다음 두 가지 요인이 복합적으로 작용했을 가능성이 있다. 첫째, 해당 정점은 군선천 하구에 인접하여 하천을 통해 상대적으로 조립된 퇴적물이 공급될 수 있는 위치이며, GSTA 분석 결과(Fig. 5) 전 조사 기간에 걸쳐 이 구역으로의 표사 수렴이 발생하였다. 따라서 해당 구역의 조립화는 외부로부터 상대적으로 조립한 표사가 공급 및 집적된 결과일 가능성이 있다. 둘째, 정점 P-12는 해상공사의 진출입 구역에 인접하여 자재 운반 등 인위적 교란이 작용하였을 가능성이 있으나, 시공 과정의 상세 기록을 확보할 수 없어 그 영향의 정도는 정량적으로 평가하지 못하였다.

5.2 수심측량

구조물이 건설되는 동안 수심변화를 파악하기 위해 천해용 정밀음향측심기(Odom Hydrotrac II, U.S.A)를 이용하여 수심측량을 수행하였다. 수심측량은 2021년 2월부터 2022년 12월까지 월 1회를 원칙으로 총 17회 수행하였으나, 해상공사가 진행된 일부 시기에는 측량선박의 접근이 제한되어 측량을 수행하지 못하였다. 위치오차는 해상위치 결정을 위한 DGPS 측량을 병행하여 최소화하여 실시하였다. 수심자료는 흘수보정 및 작업과 동시에 10분 간격으로 측정된 조위를 이용하여 조위보정을 수행하였다. 이후 이상치 제거 및 보완 등을 통해 최종자료를 산출하였으며, 모든 과정은 수로측량 업무규정에 근거하여 수행하였다. 다만 수심측량은 측량선박의 접근이 가능한 수역에서만 수행되어 해안선이 지속적으로 변화하는 전반부에서는 자료가 확보되지 않았다. 따라서 해당 구간의 지형변화는 수심 자료 대신 해안선 측량 자료(3장)를 이용하여 해석하였으며, 수심 자료와 입경 자료의 직접 대조

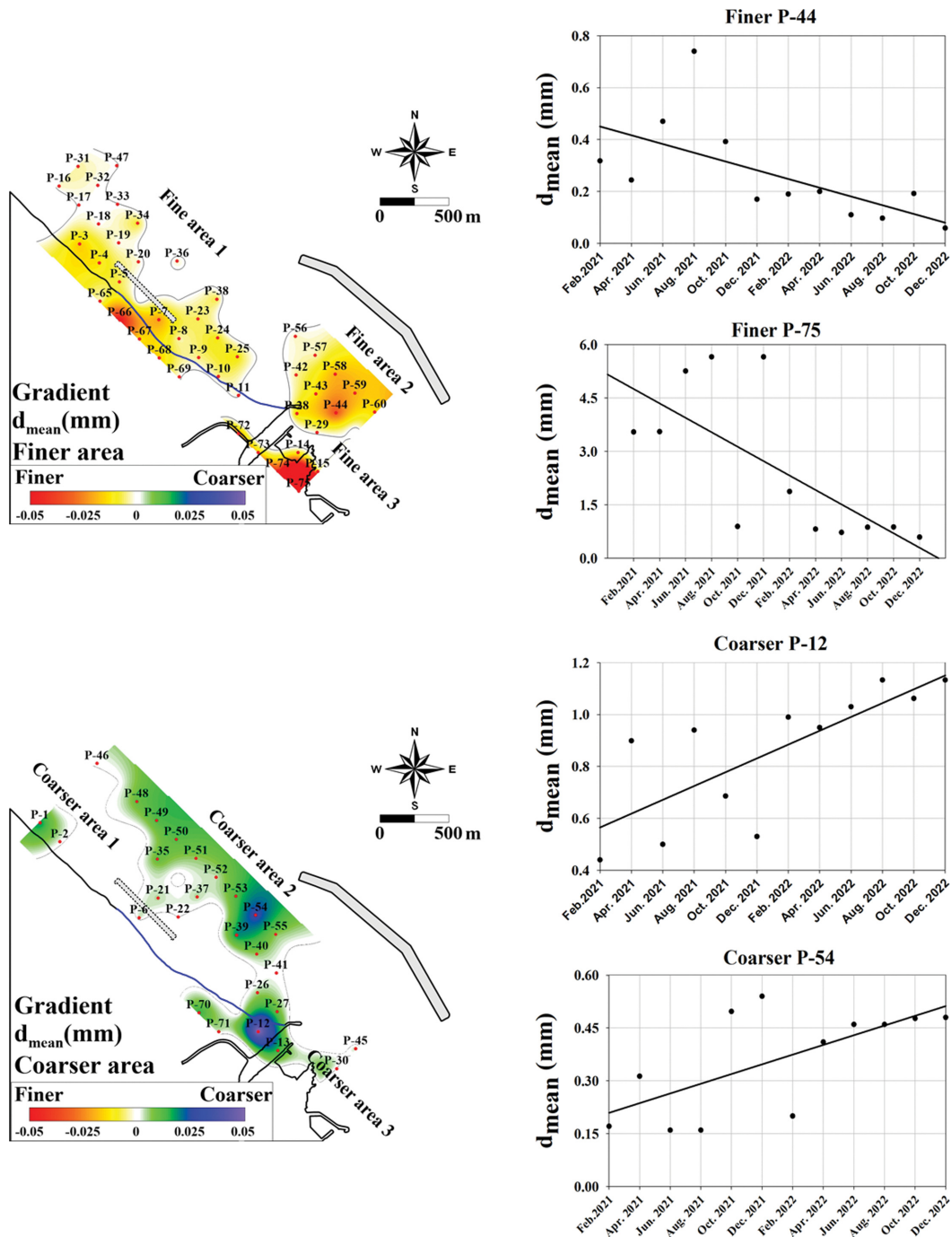


Fig. 8. Comparison of fine and coarser areas based on mean grain size gradient with representative station time series.

는 측량이 이루어진 해상 구역에 국한하여 수행하였다.

5.3 평균입경과 수심변화 결과

수심변화는 2021년 2월 수심을 기준으로 2022년 12월 수심과의 차이를 도시하였다(Fig. 7). 수심변화와 입경변화의 관계를 살펴보면, 첫 번째 영역은 Coarser area 2(Fig. 8)로, 이 구역에서는 항로 수심 확보를 위한 준설이 수행되었다. 이 구역에서는 2021년 2월 대비 수심이 최대 3 m 이상 침식된 것으로 나타났는데, 이는 준설이라는 인위적 요인이 지속적으로 작용하여 세립 입자는 유실되고 조립 입자만 잔류한 결과

로 해석된다. 두 번째는 이안방파제 전면 해역으로, 정점 P-44 지점을 포함해 주변이 전반적으로 세립화된 특징을 보인다. 이 구역의 수심변화를 보면 방파제에 가까운 곳에서는 침식이, 정점 P-44가 위치한 곳에서는 경미한 퇴적이 나타났으며, 방파제 건설로 회절된 파랑이 전면에 퇴적되어 있던 세립 입자를 이동시킨 결과로 해석된다. Fig. 8의 정점 P-44 입경 분포에서도 0.7 mm까지 조립화되었던 입자가 방파제가 완공된 2021년 9월을 기점으로 세립화되는 경향이 확인되어, 이러한 해석을 뒷받침한다. 세 번째 영역은 잠제가 위치한 구역이다. Shim et al.(2026)은 염전해변을 대상으로 수리모형

실험을 통해 잠제 양 끝단에서는 회절과가 집중되어 침식이, 중앙부에서는 파랑에너지가 감소한 두 회절과가 만나 퇴적이 발생함을 제시하였다. 대상 해역에서도 이 구역의 해안선이 설상사주(salient) 형태로 전진하였으며, 이 구간에서 급격한 세립화가 나타났다. 잠제 배후의 퇴적은 회절과의 영향뿐만 아니라, 잠제 북측 해빈에서 남측으로 이동하는 연안표사와 구조물 설치에 따른 파랑 및 흐름 변화가 복합적으로 작용한 결과일 가능성이 있다. 또한, 수심변화에서도 잠제 양 끝단에서는 침식이, 중앙부에서는 퇴적이 나타나 선행연구와 부합하였다. 따라서 잠제 배후의 지형변화는 구조물에 의한 파랑 및 흐름 변화와 연안표사의 재분배가 복합적으로 작용한 결과로 해석된다. 유사하게 Shim and Kim(2024)도 동해안 해변에서 방파제-잠제 설치 이후 겨울철에 형성되어야 할 북향류가 구조물에 의해 차단되어 N계열 파랑의 영향이 연중 우세하게 나타났다고 보고한 바 있어, 대상 해빈에서도 구조물 배치에 따라 배후 해역의 흐름과 표사 경로가 변화하였을 가능성이 있다. 본 연구는 여기에 추가하여 입경변화와 수심변화의 관계를 함께 분석함으로써 선행연구의 결과를 확장하고자 하였다.

5.4 해안선 변화와 해양 외력의 상관성

염전해빈의 해안선 변화와 해양 외력 특성 간의 관계를 정량적으로 파악하기 위해, 경포대해수욕장 해양관측부이에서 관측된 유의과고, 유의주기, 파향, 파에너지플릭스의 해안선 연안 및 횡단방향 성분과 잔차류 크기를 이용하여 해안선 변

화와 상관성을 분석하였다. 해안선 변화는 각 조사 시기의 해안선 변화량이 전진과 후퇴로 함께 나타나므로, 변화의 절대적 크기를 대표하는 지표로서 변화량의 제곱평균제곱근(RMS, Root Mean Square)을 산정하여 사용하였다. 파랑 자료는 각 조사 구간의 평균값으로 산정하였으며, 대상해역의 해안선은 외해에 대해 약 47° 기울어져 있으므로(Fig. 3(a)) 이를 차감하여 해안선 법선에 대한 상대 입사각을 산정하였다. 상관분석은 2021년과 2022년의 조사 자료를 동계(12월~2월), 춘계(3월~5월), 하계(6월~8월), 추계(9월~11월) 기준에 따라 계절별로 구분하였으며, 그 결과를 Fig. 9에 제시하였다.

유의과고와 해안선 변화량 RMS 간의 상관계수는 0.68로 나타나 비교적 높은 양의 상관을 보였다(Fig. 9(a)). 계절별로는 고파랑이 집중되는 동계에 해안선 변화가 가장 크게 나타난 반면, 고파랑 출현 빈도가 낮은 춘계와 하계에는 변화가 작았다. 유의주기 역시 0.69의 상관계수를 보여(Fig. 9(b)) 유의과고와 유사한 경향을 나타내었으며, 주기가 긴 동계 파랑이 해안선 변화를 크게 유발하는 것으로 분석되었다. 이는 과고와 주기가 증가할수록 해빈에 전달되는 파랑에너지가 증가하여 해안선 변동 규모가 커지는 경향과 관련된 것으로 판단된다.

파향과 해안선 변화량 RMS 간의 상관계수는 0.63으로 나타났다(Fig. 9(c)). 파향이 해안선 법선방향에 가까울수록 해안선 변화 규모도 증가하는 경향이 나타났다. 추계와 동계에는 NE 계열의 파가 우세하여 해안선 변화가 크게 나타난 반면, ENE 계열의 파가 주로 입사하는 춘계와 하계에는 상대

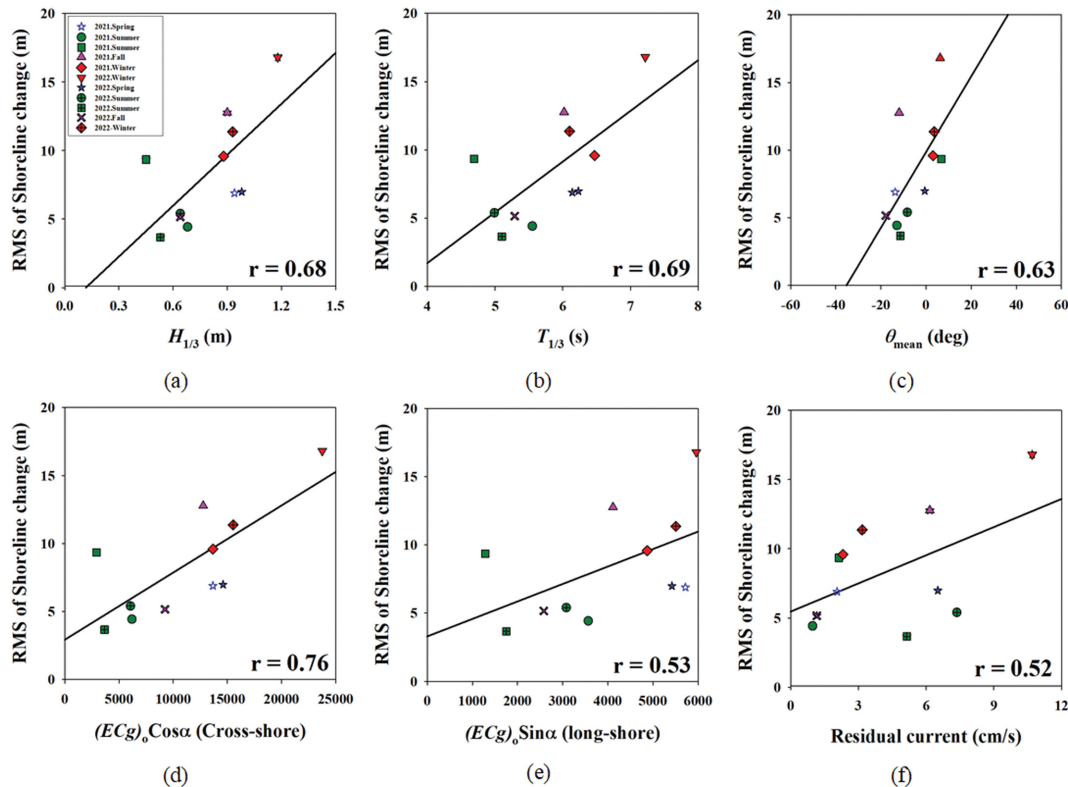


Fig. 9. Correlation between changes in coastline RMS and ocean force parameters.

적으로 변화가 작았다.

파에너지플럭스는 선형과 이론에 따라 EC_g 로 정의하였으며, 여기서 E는 파랑 에너지밀도($E = \rho g H_{1/3}^2 / 8$), C_g 는 군속도이다. 산정된 파에너지플럭스를 해안선 횡단방향(cross-shore)과 연안방향(longshore) 성분으로 분해하기 위해, N 방향 기준 파향에서 해안선 법선 방향인 47° 를 차감하여 해안선 법선에 대한 상대 입사각 α 를 산정하였다. 이때 횡단방향 성분은 $(EC_g)_o \cos \alpha$, 연안방향 성분은 $(EC_g)_o \sin \alpha$ 로 산정하였으며, 각 성분과 해안선 변화량 RMS 간의 상관성을 분석하였다. 그 결과 횡단방향 성분 $(EC_g)_o \cos \alpha$ 는 0.76의 상관계수를 보여 분석한 모든 파랑 요소 중 가장 높은 상관성(Fig. 9(d))을 나타낸 반면, 연안방향 성분 $(EC_g)_o \sin \alpha$ 는 0.53으로 횡단방향 성분기준 약 30% 낮은 상관성을 보였다(Fig. 9(e)). 이는 횡단방향 파랑 작용이 연안방향 성분에 비해 해안선 변화와 보다 밀접한 관련을 갖는 것으로 해석할 수 있다. 3장의 해안선 변화 결과와 함께 고려하면, 고파랑 시 해안선 후퇴가 증가하고 파랑이 약화되는 시기에 회복되는 양상은 계절적인 횡단방향 표사 순환과 관련된 것으로 해석된다. 이러한 해석은 4장의 표사 경향 분석 결과와도 정합적이다. GSTA 분석에서 잠제 전면부의 벡터가 반복적으로 외해 방향을 나타내고 외해역에서는 해안 방향의 수렴이 우세하게 나타난 것은(Fig. 5), 횡단방향 표사 교환이 활발하게 이루어졌을 가능성을 시사한다.

한편 잔차류와 해안선 변화의 상관계수는 0.52로(Fig. 9(f)), 파랑 관련 요소에 비해 상대적으로 낮은 상관성을 보였다. 이는 조차가 약 0.3 m인 미소조차 환경에서 해빈 지형변화가 잔차류보다 파랑 조건과 상대적으로 밀접하게 관련되어 있음을 시사한다. 다만 미소조차 조건에서도 잔차류와의 상관성이 나타난 점은 주목할 만하다. 동해 연안 해류를 분석한 Kim and Lee(2013)는 강원도 해역에서 남류와 북류 성분이 계절에 따라 번갈아 우세해지는 특성을 보고한 바 있으며, 본 연구의 Table 3에서도 잔차류 방향이 계절적으로 반전하는 경향이 확인되었다. 이는 계절적 해류 변동이 잔차류에 반영되어 해안선 변화에 일정 부분 영향을 미쳤을 가능성을 보여주며, 미소조차 해역에서도 해안선 변화 해석 시 흐름 성분을 함께 고려할 필요가 있음을 시사한다.

이상의 결과를 종합하면, 염전해변의 해안선 변화는 파랑 작용과 밀접하게 연동되어 있으며, 고파랑 내습 빈도가 높은 추계와 동계에 변화가 집중된 후 파랑이 약화되는 춘계와 하계에 점진적으로 회복되는 계절적 순환을 보인다. 이는 동해안 해빈을 대상으로 고파랑 내습 시 해빈폭이 감소하는 경향을 보고한 Oh et al.(2019)의 결과와 부합한다. 다만 본 연구에서 파에너지플럭스를 해안선 연안 및 횡단방향 성분으로 분해한 결과, 횡단방향 성분이 해안선 변화와 가장 높은 상관성을 보였으며, 미소조차 해역에서도 해안선 변화 분석 시 흐름의 영향을 함께 고려할 필요가 있는 것으로 판단된다.

6. 요약 및 결론

강원 중부에 위치한 염전해변에서 해안구조물 건설에 따른 해빈변화 및 표사 경향을 분석하기 위해, 2021년 2월부터 2022년 12월까지 2개월 간격으로 총 12회에 걸쳐 71개 격자 정점의 표층퇴적물을 조사하고 해안선을 동시에 측량하였다. 대상 해역은 이동경향의 특성에 따라 잠제 전면부(북서측), 잠제와 이안방파제 사이의 중앙부, 이안방파제 배후의 정온역(남동측)으로 구분하여 분석하였으며, 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 대상해역 인근 경포대해수욕장 해양관측부이의 관측자료를 분석한 결과, 조사 기간 중 3 m 이상의 고파랑은 전체의 1.0%로 출현 빈도가 낮았다. 월평균 유의파고는 0.4~1.4 m 범위로 동계(1.0 m)와 추계(0.9 m)에 크고 하계(0.6 m)에 작았으며, 파향은 NE 계열이 23%로 우세하였다. 대상 해빈이 북동쪽으로 개방되어 있고 N~NE 계열 동계 고파랑이 해빈에 직접 내습하는 외력 조건이 형성되어 있다. 최강유속은 37.8~89.7 cm/s 범위로 분포하였고 동계와 춘계에는 북서류, 하계에는 남동류가 우세한 흐름이 나타났다.

(2) 2021년 2월을 기준으로 20 m 간격으로 산정한 해안선 변화는 최대 94.0 m 전진, 최대 -49.4 m 후퇴, 전 구간 평균 -2.9 m 후퇴로 나타났다. 구조물 축조 초기(2021년 4~8월)에는 전 구간에서 변화가 미미하였으나(최대 전진 3.6~7.0 m), 이안방파제 완공 이후 방파제 배후 정온역에서 해안선의 전진이 급격히 증가하여 조사 기간 말까지 전반적으로 확대되었다. 반면 잠제와 이안방파제 사이 중앙부에서는 후퇴가 지속되었고, 잠제 중앙부 배후에서는 설상사주(salient)가 형성·확대되었다. 전 구간 평균 해안선 변화는 2021년 12월 -8.0 m로 최대 후퇴를 보인 후 2022년 10월부터 전진 우세로 전환되었으나, 이는 방파제 배후의 대규모 퇴적이 중앙부의 침식을 상쇄한 결과로서 구간별 침식·퇴적의 불균형은 오히려 심화되었다.

(3) 퇴적상은 모래(S)가 우세한 가운데 역질사(gS), 약역질사((g)S), 실트질사(zS), 약역니질사((g)mS)가 분포하였다. 평균입경은 2021년 해상 0.153~0.653 mm, 육상 0.680~3.515 mm 범위, 2022년 해상 0.129~1.048 mm, 육상 0.557~1.054 mm 범위로 분포하였으며, 약역질사는 2021년 대비 2022년에 32% 감소한 반면, 실트질사는 6배 이상 증가하여 대상 해역에 세립질 퇴적상의 출현이 증가하였다. 분급도는 2021년 전 정점에서 양호하였으나 2022년 이안방파제 배후에서 불량해졌다.

(4) 표사 경향벡터(GSTA) 분석 결과, 방파제 배후에서는 전 조사기간에 걸쳐 비교적 일관된 수렴 특성이 나타난 반면, 잠제 전면부에서는 조사 시기에 따른 변동성이 상대적으로 크게 나타났다. 2021년에는 벡터의 방향이 구역별로 혼재하였으나, 구조물 시공과 함께 각 구역의 표사 경향이 공간적으로 재편되었다. 특히 이안방파제가 완공된 직후인 2021년 10월에 방파제 배후 정온역에서 강한 해안 방향 수렴이 나타났으며, 이러한 수렴은 해안선의 급격한 전진이 시작된 시점 및

구간과 일치하였다. 또한 잠제가 600 m로 완공된 2022년 10 월에는 잠제 전면부에서 이전 조사와 달리 해안 방향의 표사 경향이 뚜렷하게 나타나, 잠제 완공과 함께 해당 구역의 표사 경향이 재편되었을 가능성을 보여주었다. 한편 구조물의 추가 시공이 없었던 2021년 12월~2022년 4월에도 Area 3의 수렴 특성이 지속된 반면 Area 1에서는 시기별 변동성이 크게 나타나, 구조물의 위치와 시공 단계에 따라 서로 다른 공간적 반응이 나타났다.

(5) 평균입경 변화를 공간적으로 구분한 결과, 이안방파제 배후의 정온역과 잠제 배후에서는 세립화가, 잠제와 이안방파제 사이의 중앙부에서는 조립화가 우세하였다. 세립화 구역은 해안선 전진 및 수심 감소가 동반된 퇴적 환경에, 조립화 구역은 해안선 후퇴와 수심 증가가 동반된 침식 환경에 각각 대응하였다. 이는 구조물에 의한 파랑 감소로 유속이 저하된 구역에서 세립질이 선택적으로 침강하고, 쇄파가 직접 작용하는 구역에서는 세립질이 유실되어 조립질이 잔류하기 때문으로 해석된다. 다만 군선천 도류제 전면부(P-12)에서는 해안선이 크게 전진하였음에도 조립화가 나타났는데, 이는 하천을 통한 조립질 퇴적물의 공급과 해상공사에 따른 인위적 교란의 영향을 받았을 가능성이 있다. 따라서 평균입경을 지형변화의 지표로 활용할 때에는 표사 공급원의 입도 특성을 함께 고려할 필요가 있다.

(6) 해안선 변화 RMS와 파랑 요소 간 상관분석 결과, 유의파고 0.68, 유의주기 0.69, 파향 0.63의 상관계수를 보였다. 파에너지플렉스를 해안선 횡단 및 연안방향 성분으로 분해한 결과, 횡단방향 성분은 0.76으로 가장 높은 상관관을 보인 반면 연안방향 성분은 0.53으로 나타나, 횡단방향 파랑 작용이 해안선 변화와 상대적으로 밀접한 관련을 갖는 것으로 나타났다. 이는 GSTA에서 나타난 잠제 전면부의 외해 방향 경향과 외해역의 해안 방향 수렴 특성파도 대체로 정합적이다. 한편 잔차류와 해안선 변화의 상관계수는 0.52로 나타나, 미소조차 해역에서도 해안선 변화 분석 시 계절적 흐름 성분을 함께 고려할 필요가 있음을 시사한다. 계절적으로는 고파랑이 집중되는 추계와 동계에 변화가 크고 춘계·하계에 회복되는 순환이 나타났다.

본 연구는 구조물 시공과 함께 표사 경향이 공간적으로 재편되는 과정을 주기적인 현장조사를 통해 제시하였다. 방파제 배후에서는 해안선 전진과 표사 수렴이 나타난 반면, 잠제와 방파제 사이의 중앙부에서는 지속적인 후퇴가 나타나 구조물 완공 이후에도 구간별 침·퇴적 불균형이 지속되었다. 이러한 결과는 해안구조물 건설의 설계 및 유지관리 시 전체 해빈의 평균적인 변화뿐만 아니라 구조물 주변에서 발생하는 구간별 표사 재분배를 함께 고려할 필요가 있음을 시사한다.

감사의 글

본 논문 작성에 필요한 자료를 제공해 주신 삼성물산(주)

건설부문 김한성 프로를 비롯한 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- Cooper, J.A.G. and Pilkey, O.H. (2004). Sea-level rise and shoreline retreat: time to abandon the Bruun Rule. *Global and Planetary Change*, 43, 3-26.
- Davies, J.L. (1964). A morphogenic approach to world shorelines. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 8, 27-42.
- Folk, R.L. and Ward, W.C. (1957). Study in the significance of grain-size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3-26.
- Gao, S. (1996). A FORTRAN programming for grain-size trend analysis to define net sediment transport pathways. *Computers & Geosciences*, 22(4), 449-452.
- Hallin, C., Almström, B., Larson, M. and Hanson, H. (2019). Long-shore transport variability of beach face grain size: implications for dune evolution. *Journal of Coastal Research*, 35(4), 751-764.
- Hwang, J.H., Kang, J. and Choi, K.H. (2024). Changes in the coastline after the construction of submerged breakwaters: a case study of the Hasidong area in Gangneung, South Korea. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 31(4), 1-13 (in Korean).
- Jeong, W., Oh, S.H., Cho, H.Y. and Baek, W.D. (2019). Characteristics of waves continuously observed over six years at off-shore central east coast of Korea. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 31(2), 88-99 (in Korean).
- Jung, S.M. and Park, I.H. (2021). Characteristics of beach change and sediment transport by field survey in Sinji-Myeongsasimni Beach. *Journal of Korean Society of Marine Environment & Safety*, 27, 594-604 (in Korean).
- Kang, Y.K., Park, H.B. and Yoon, H.S. (2010). Shoreline changes caused by the construction of coastal erosion control structures at the Youngrang Coast in Sokcho, East Korea. *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, 13(4), 296-304 (in Korean).
- Kim, D.S. and Lee, G.R. (2013). Long-term changes of shoreline at the East Coast in South Korea 1 - Central East Coast. *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 20(2), 1-13 (in Korean).
- Kim, K.H., Yoo, H.S. and Joung, E.J. (2008). Disaster overall prevention system for beach erosion and its applications. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 20(6), 602-610 (in Korean).
- Kim, S.S. (2023). Analysis on beach profile change due to construction of coastal structure and prediction. Master's thesis, Catholic Kwandong University (in Korean).
- Korea Maritime Institute (KMI) (2017). A study on improvement measures for coastal erosion management policy (in Korean).
- McLaren, P. (1981). An interpretation of trends in grain size measures. *Journal of Sedimentary Petrology*, 51(2), 611-624.
- McLaren, P. and Bowles, D. (1985). The effects of sediment trans-

- port on grain-size distributions. *Journal of Sedimentary Petrology*, 55(4), 457-470.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA) (2010a). Design guidebook of the coastal improvement project. Government Publications Registration Number: 11-1611000-001596-01 (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA) (2010b). Guidebook of the management of coastal erosion of the coastal improvement project. Government Publications Registration Number: 11-1611000-001595-01 (in Korean).
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) (2025). Coastal erosion monitoring, 74 (in Korean).
- Oh, J., Jeong, W., Kim, K. and Kang, T. (2019). Correlation analysis between beach width and wave data on the East Coast of South Korea. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 31(2), 73-87 (in Korean).
- Park, S.J., Seo, H.J., Park, S.M., Park, S.H., Ahn, I.J. and Seo, K.S. (2021). The analysis of coastal erosion and erosion impact assessment in the East Coast. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 33(6), 246-256 (in Korean).
- Poizot, E., Mear, Y., Thomas, M. and Garnaud, S. (2006). The application of geostatistics in defining the characteristic distance for grain-size trend analysis. *Computers & Geosciences*, 32(3), 360-370.
- Self, R.P. (1977). Longshore variation in beach sands, Nautla Area, Veracruz, Mexico. *Journal of Sedimentary Research*, 47(4), 1437-1443.
- Shim, K.T. and Kim, K.H. (2024). A study on the effects of morphological changes due to the construction of multiple coastal structures. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(12), 2174.
- Shim, K.T., Shin, B.S. and Kim, K.H. (2026). Analysis of shoreline response to large-scale breakwaters based on physical and field studies. *Applied Ocean Research*, 166, 104860.
- Shin, B.S. and Kim, K.H. (2012). A basic study on the valuation of sandy beaches using amenity factors. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 24(6), 373-380 (in Korean).
- Vaidya, A.M., Kori, S.K. and Kudale, M.D. (2015). Shoreline response to coastal structures. *Aquatic Procedia*, 4, 333-340.
- Yeosu City (2012). Report for simulation investigation of the black sand in Manseongri Beach (in Korean).
- Yoon, E.C. and Park, I.H. (2021). STA (Sediment Trend Analysis) analysis and coastal engineering application cases. *Coastal and Ocean*, 11(1), 73-79 (in Korean).
- Zhang, K., Douglas, B.C. and Leatherman, S.P. (2004). Global warming and coastal erosion. *Climatic Change*, 64, 41-58.

Received 18 August, 2026

1st Revised 29 September, 2026

2nd Revised 19 October, 2026

Accepted 20 October, 2026