

동해안 침식 원인분석 및 침식 영향도 평가

The Analysis of Coastal Erosion and Erosion Impact Assessment in the East Coast

박선중* · 서희정** · 박승민*** · 박설화**** · 안익장***** · 서경식*****

Seon Jung Park*, Heui Jung Seo**, Seung Min Park***, Seol Hwa Park****,

Ike Jang Ahn***** and Gyeong Sik Seo*****

요지 : 연안을 중심으로 시행되는 각종 개발사업은 표사수지 불균형, 연안표사 이동상 및 횡단표사 이동상 변화를 야기하며, 이로 인한 해빈의 완충구간 축소로 연안재해 위험성을 크게 증대시킬 뿐 아니라 회복 불가능한 장기적 해안침식 문제를 초래하게 된다. 연안개발을 위해 건설된 각종 구조물의 영향으로 발생하는 장기적·지속적인 해안침식 현상은 표사수지 및 연안표사와 횡단표사 변화량 평가를 통해 직접적인 원인 규명이 가능하다. 즉, 표사수지 변화, 연안표사 이동, 횡단표사 이동 구분되는 이들 개별적인 원인에 기인한 침식지역과 복합적인 작용에 의한 침식지역의 분류를 통해 연안개발과 해안침식 현상의 인과성 평가가 가능할 것이다. 본 연구에서는 연안개발에 따른 침식 문제가 지속적으로 제기되고 있는 동해안(강원도, 경상북도) 일대 해안을 대상으로 연안 구조물 건설 및 육역 개발 등 주요 개발현황과 연안침식 실태조사 결과를 기반으로 장기적·지속적 침식원인을 분석하였다. 아울러 인공구조물 건설에 따른 침식의 정도를 평가하고자 침식 영향도 개념을 정립하고, 침식 영향도 평가를 위한 세 가지 방법론을 제안하였다. 연안침식 실태조사에서 검토된 해빈 영상분석 자료를 활용하여 하저항을 대상으로 침식 영향도를 평가하였으며, 평가결과 하저항 개발은 93.4%, 호안도로 건설은 6.6%로 침식에 영향을 미친 것으로 평가되었다.

핵심용어 : 연안침식, 연안개발, 표사수지, 연안표사, 횡단표사, 침식 영향도 평가

Abstract : Various development projects occurring on the coast cause an imbalance of surface sediments, causing coastal disasters or irreversible coastal erosion. Coastal erosion caused by the influence of various port structures built through coastal development can be directly identified by evaluating changes in the sediment budget, long-shore sediment, and cross-shore sediment. In other words, it will be possible to evaluate the causality between coastal development and coastal erosion by classifying regions due to single cause and regions due to multiple causes according to the changes in the sediment classified into the three types mentioned above. In this study, the cause of long-term and continuous erosion was analyzed based on the analysis results of the coastal development history and the Coastal Erosion Monitoring targeting the coast of Gangwon-do and Gyeongsangbuk-do on the east coast. In addition, in order to evaluate the degree of erosion caused by the construction of artificial coastal structures, the concept of erosion impact assessment was established, three methods were proposed for the impact assessment. The erosion impact of Hajeo port was assessed using the results of satellite image analysis presented in the Coastal Erosion Monitoring Report, it was assessed that the development of Hajeo port had an impact of 93.4% on erosion, and that of the coastal road construction had an impact of 6.6%.

Keywords : coastal erosion, coastal development, sediment budget, longshore sediment, cross-shore sediment, erosion impact assessment

1. 서 론

우리나라는 삼면이 바다로 둘러 싸여 있는 만큼 국토면적에 비해 긴 해안선을 가지고 있는 편이다. 이러한 해안선은

자연경관으로서 매우 중요한 가치를 지니고 있으며, 국민들에게 친수활동을 즐길 수 있는 기회를 많이 제공해 주고 있다. 하지만 해수면 상승을 비롯한 자연적 영향과 인위적 개발행위로 인한 환경변화 때문에 해안선 침식과 같은 위험성

* (주)헤인이엔씨 기술연구소 이사 (Corresponding author: Seon Jung Park, Director, Hyein E&C Technical Research Institute, WoolimBlue9-BizCenter A-dong 24F, 583 Yangcheon-ro, Gangseo-gu, Seoul 07547, Korea, Tel: +82-2-2093-2342, Fax: +80-2-2093-2209, nayana_sj@hanmail.net)

** (주)헤인이엔씨 기술연구소 이사 (Director, Hyein E&C Technical Research Institute)

*** (주)헤인이엔씨 기술연구소 부장 (General Manager, Hyein E&C Technical Research Institute)

**** (주)헤인이엔씨 기술연구소 차장 (Deputy General Manager, Hyein E&C Technical Research Institute)

***** (주)헤인이엔씨 대표이사 (CEO, Hyein E&C)

***** (주)헤인이엔씨 기술연구소 과장 (Manager, Hyein E&C Technical Research Institute)

은 더욱 심각해지고 있는 실정이다. 특히 해안가를 중심으로 많은 인구가 활동을 하고 토지이용 수요도 다양해지고 집중됨에 따라 해안에서의 자연재해 위험성 증가는 심각한 사회적 문제를 야기할 수 있다(Korea Maritime Institute, 2017).

연안을 중심으로 시행되는 해사채취, 하천정비사업 등은 표사수지의 불균형을 초래하게 되며, 연안해역 이용을 위해 건설되는 항만 및 어항 시설 등은 연안표사 이동상에 변화를 야기한다. 또한 연안육역 이용을 위한 매립(해빈 잠식)과 해안도로 건설 등은 횡단표사 이동상 변화와 함께 완충구간 축소로 인한 월파, 침수 등 연안역의 재해 위험성을 크게 증대시키고 있다.

최근 해안침식은 연안개발사업과 같은 해안환경의 변화를 야기하는 인위적 요인과 함께 해수면 상승과 이상파랑의 증가와 같은 자연적 요인이 더해짐에 따라 더욱 심각한 수준에 이르고 있다. 특히 우리나라 동해안은 표사수지, 연안 및 횡단표사 이동상 변화의 복합적인 영향이 회복 불가능한 장기적 해안침식 문제를 초래하고 있으며, 이러한 해안침식을 야기하는 연안개발 유형과 구조물 유형별에 따른 침식형태와 메커니즘에 관해서는 다수의 용역(Ministry of Ocean and Fisheries, 2003; Korea Environment Institute, 2005; Korea Environment Institute, 2006) 및 연구(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2010; Ministry of Ocean and Fisheries, 2020)을 통해 알려진 바 있다.

연안개발을 위해 건설된 각종 인공 구조물의 영향으로 발생하는 장기적·지속적 해안침식 현상은 표사수지 및 연안표사와 횡단표사 변화량 평가를 통해 직접적인 원인 규명이 가능하다. 즉, 표사수지 변화, 연안표사 이동, 횡단표사 이동으로 구분되는 이들 개별적인 원인에 기인한 침식지역과 개별 원인들의 복합적인 작용에 의한 침식지역을 분류하여 검토함으로써 연안개발과 해안침식 현상의 인과성 평가가 가능해진 다(Ministry of Ocean and Fisheries, 2021).

본 연구에서는 연안개발에 따른 침식 문제가 지속적으로 제기되고 있는 강원도와 경상북도의 동해안 일대 해안을 대상으로, 연안 구조물 건설 및 육역 개발 등 주요 개발현황과 연안침식 실태조사(The Province of Gangwon, 2020; The Province of Gyeongsangbuk-do, 2020) 결과를 기반으로 침

식현황을 분석하였다. 아울러 연안역에서 발생하는 침식현상의 주된 원인으로 지적되고 있는 각종 연안개발 목적의 인공 구조물에 의한 침식 영향도를 평가할 수 있는 방법론을 제안하고 동해안 침식해안 중 영덕군 하저항 일대 해안을 대상으로 적용하여 침식 영향도를 평가하였다.

2. 동해안 연안침식 현황

연안침식 실태조사에서는 해변별로 해안선의 변화, 단면적 변화, 배후지 피해, 인구, 자연보전가치를 기준으로 침식정도에 따라 점수로 환산하여 침식등급을 구분하고 있다. 침식등급은 총점 100점을 기준으로 90점 이상은 A등급(양호), 70~90점 미만은 B등급(보통), 50~70점 미만은 C등급(우려), 50점 미만은 D등급(심각)의 4단계로 구분된다. 본 연구에서는 연안침식 실태조사에 제시된 강원도와 경상북도의 주요 해변을 대상으로 해변의 현황, 개발이력, 침식등급 등을 분석하여 침식현황을 파악하였다.

2.1 강원도

Fig. 1과 Table 1은 강원도 102개 해변(41개 표사계)을 대상으로 모니터링이 확대된 2013년 이후의 침식등급 평가결과를 제시한 것으로, 2013년을 제외하고 침식등급이 B등급 이상으로 나타났다. 침식우심지역으로 분류되는 우려(C) 및 심각(D) 등급 해변은 2016년 최대 98.0%에 이르렀다 점차 감소추세로 돌아섰으며, 2019년 조사에서는 침식우심지역이

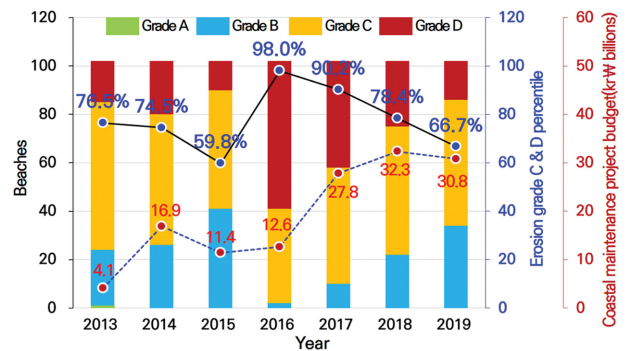


Fig. 1. Annual change of erosion grade in Gangwon-do

Table 1. Status of coastal erosion in Gangwon-do

Year	Number of beaches by erosion grade				Total	Number of beaches where erosion is severe or concerned	
	A (Good)	B (Normal)	C (Concern)	D (Severe)		Number	Percentile (%)
2013	1	23	61	17		78	76.5
2014	-	26	54	22		76	74.5
2015	-	41	49	12		61	59.8
2016	-	2	39	61	102	100	98.0
2017	-	10	48	44		92	90.2
2018	-	22	53	27		80	78.4
2019	-	34	52	16		68	66.7

전체 대상해변의 66.7%인 68개소로 평가되고 있다.

2016년 이후 침식 저지 및 관리를 위한 연안정비사업 시행 등으로 침식(D) 등급으로 분류되는 해변의 등급이 우려(C) 또는 보통(B) 등급으로 완화됨에 따라 양호와 보통 등급에 해당되는 개소수가 점차 증가하고 있다. 이는 침식문제의 근본적인 해결을 위한 모니터링 기반의 침식 원인분석 및 평가, 침식방지를 위한 저감공법 개발 및 설계가이드 마련 등 국내 연안침식 대응기술이 선진화되고 있으며, 이를 기반으로 효율적인 연안관리 정책의 시행 효과가 점차 나타나고 있는 것으로 판단된다.

The Province of Gangwon(2020)의 조사결과를 토대로 정성적인 침식원인을 분석하였다. 침식해안은 초기 관측 대비 단면적 및 해변폭의 감소율이 5% 이상인 해변 중 침식등급이 C 또는 D 등급으로 평가된 해변이며, 선정된 해변의 시설물 현황을 파악하고 주된 침식원인으로 작용하였을 것으로 판단되는 개발유형을 분류하여 Table 2에 제시하였다.

강원도 41개 단위 표사계내 102개소 해변 중 79.4%에 해당하는 81개소 해변은 침식율이 20% 이상으로 지속적인 침식현상이 발생하고 있는 것으로 조사되었다. 81개소 침식해변 중 인공구조물 설치가 직접적인 침식요인으로 작용한 해변은 59.3%인 48개소이며, 고파랑에 의한 사구잠식이 주된 침식요인으로 작용한 해변은 40.7%인 33개소로 분석되었다. 지자체별로 살펴보면 고성군, 속초시, 강릉시는 인공구조물 설치가 침식발생의 직접적인 요인으로 분석되었으며, 동해시의 경우 해안도로, 주차장 건설 등 해변잠식이 주된 요인으로 나타났다. 강원도 지자체 중 강릉시를 제외한 5개 지자체에서는 침식해안 비율이 80% 이상으로 지속적인 침식현상이 발생하고 있는 것으로 분석되었다.

침식원인 분석을 위하여 표사수지 변화를 초래하는 하천개발 현황, 연안표사 변화를 초래하는 근빈해역 개발 및 횡단 표사 변화를 초래하는 배후육역 개발 현황 등을 조사하여 Table 3에 제시하였다. 이를 토대로 강원도 내 102개 해안을

Table 2. Development type in Gwangwon-do coast

Location	Beach erosion status				Development type			
	Beaches	Eroded beaches		Construction of breakwater or seawall, etc.		Natural cause, dune erosion, etc.		
		Number	Percentile (%)	Number	Percentile (%)	Number	Percentile (%)	
Total	102	81	79.4	48	59.3	33	40.7	
Goseong	26	21	80.8	16	76.2	5	23.8	
Sokcho	6	6	100.0	5	83.3	1	16.7	
Yangyang	22	18	81.8	9	50.0	9	50.0	
Gangneung	25	13	52.0	9	69.2	4	30.8	
Donghae	8	8	100.0	2	25.0	6	75.0	
Samcheok	15	15	100.0	7	46.7	8	53.3	

Table 3. Status of coastal development and construction of artificial coastal structures in Gwangwon-do coast

Location	CSB		CLS			CCS		
	Watershed development	Port & Harbor structures	Detached or Submerged Breakwater	Headland	Groin, Dike	Coastal road, Parking lot	Seawall	
Total	41	62	23	7	16	52	64	
Goseong	11	15	4	1	1	12	12	
Sokcho	2	4	4	4	2	3	3	
Yangyang	10	13	3	-	5	5	13	
Gangneung	10	14	7	1	6	21	19	
Donghae	2	4	1	-	1	3	8	
Samcheok	6	9	4	1	1	8	9	

CSB change of sediment budget, CLS change of longshore sediment budget, CCS change of cross-shore sediment budget

Table 4. Analysis of erosion cause in Gwangwon-do coast

Location	Single cause			Compound causes				etc.
	CSB	CLS	CCS	CSB+CLS	CSB+CCS	CLS+CCS	CSB+CLS+CCS	
Gangwon-do (total: 102)	6 (5.9%)	8 (7.8%)	12 (11.8%)	9 (8.8%)	6 (5.9%)	31 (30.4%)	20 (19.6%)	10 (9.8%)
	26 (25.5%)			66 (64.7%)				

CSB change of sediment budget, CLS change of longshore sediment budget, CCS change of cross-shore sediment budget

Table 5. Analysis of erosion cause by coastal development in Gwangwon-do coast

Location	Number (percentile) of eroded beaches due to development			Number of eroded beaches due to CSB, etc., excluding development
	Construction of port structures & hinterland development	Construction of port structures	Hinterland development	
Gangwon-do (total: 102)	51 (50.0%)	17 (16.7%)	24 (23.5%)	10 (9.8%)
	68 (66.7%)			

단독원인(표사수지, 연안표사, 횡단표사)에 기인한 침식해안과 단독원인의 복합적인 작용에 의한 침식 해안을 분류한 결과와 개발연유에 따른 침식원인을 분류하여 Table 4와 5에 제시하고 Fig. 2에 도시하였다.

102개 해변 중 단독 원인에 의한 침식지역은 25.5%인 26개소로 분류되었으며, 64.7%인 66개소 해변은 복합적인 원인에 의한 침식지역으로 분류되었다. 단독 원인에 의한 침식 발생 해변 중 표사수지 변화로 인한 해변은 6개소(5.9%)이며, 연안표사 변화로 인한 해변은 8개소(7.8%), 횡단표사 변화로 인한 해변은 12개소(11.8%)이다. 복합 원인에 의한 침식발생 해변 중 30.4%인 31개소 해변이 연안표사와 횡단표사 변화로 침식이 발생된 것으로 분류되었으며, 표사수지와 연안표사 변화로 침식이 발생한 해변은 8.8%인 9개소, 표사수지와 횡단표사의 복합 원인에 의한 침식발생 해변은 5.9%인 6개소로 분석되었다. 표사수지와 연안 및 횡단표사 등 3개 침식

원인의 복합적 영향으로 침식이 발생된 해변은 19.6%인 20개소로 분류되었다.

침식원인 중 연안 구조물 설치로 인한 침식, 즉 개발연유에 의한 침식 해변을 분석한 결과로 102개 해변 중 68%인 68개소 해변이 개발연유에 의한 침식 해변으로 분류되었다. 이 중 51개소(50.0%) 해변은 항만 및 어항 구조물과 배후구역 개발에 따른 침식에 의해 침식이 발생된 것으로 평가되었으며, 항만 및 어항 구조물로 인한 침식지역은 16.7%인 17개소로 분석되었다.

2.2 경상북도

다음 Fig. 3과 Table 6은 경상북도 41개 해변을 대상으로 모니터링이 확대되어 조사된 2014년 이후의 침식등급 평가 결과를 제시한 것으로 2014년을 제외하고 침식등급이 모두 B등급 이상으로 평가되고 있다. 침식우심지역으로 분류되는 우려(C) 및 심각(D) 등급 해변은 2015년 최대 80.5%까지 증가하였다 점차 감소하여 2019년 조사에서는 침식우심지역이 전체 대상해변의 75.6%인 31개소로 평가되고 있다.

강원도와 동일한 방법으로 경상북도 41개소 해변에 대한 정성적인 침식원인을 분석하여 Table 7에 제시하였다. 41개소 해변 중 51.2%에 해당하는 21개소 해변의 침식율이 20% 이상으로 지속적인 침식현상이 발생하고 있는 것으로 조사되었으며, 이들 침식해변 중 방파제 및 직립호안 등 인공구조물 설치가 직접적인 침식요인으로 작용한 해변은 95.2%인 20개소로 강원도(59.3%)와 비교해 상당히 높은 비율을 차지하고 있다.

이러한 동해안의 침식현상은 어항시설 확충을 위한 방파제 및 방사제 등 인공구조물 설치로 인해 연안표사 이송체계가 변화되며, 이로 인한 평형해안선의 변화가 주된 요인인 것으

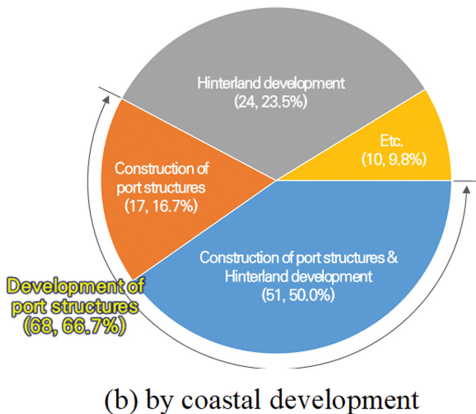
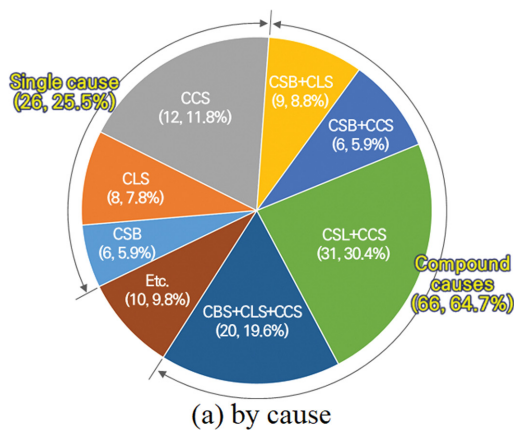


Fig. 2. Analysis of erosion cause in Gwangwon-do coast.

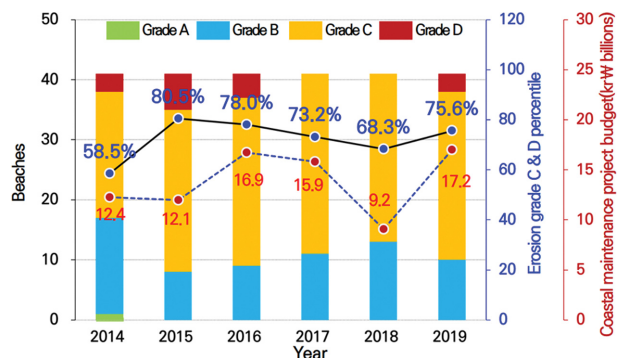


Fig. 3. Annual change of erosion grade in Gyeongsangbuk-do.

Table 6. Status of coastal erosion in Gyeongsangbuk-do

Year	Number of beaches by erosion grade				Total	Number of beaches where erosion is severe or concerned	
	A (Good)	B (Normal)	C (Concern)	D (Severe)		Number	Percentile (%)
2014	1	16	21	3	41	24	58.5
2015	-	8	27	6		33	80.5
2016	-	9	28	4		32	78.0
2017	-	11	30	-		30	73.2
2018	-	13	28	-		28	68.3
2019	-	10	28	3		31	75.6

Table 7. Development type in Gyeongsangbuk-do

Location	Beach erosion status			Development type			
	Beaches	Eroded beaches		Construction of breakwater or seawall, etc.		Natural cause, dune erosion, etc.	
		Number	Percentile (%)	Number	Percentile (%)	Number	Percentile (%)
Total	41	21	51.2	20	95.2	1	4.8
Uljin	11	3	27.3	2	66.7	1	33.3
Yeongdeok	9	6	66.7	6	100.0	-	-
Pohang	8	5	62.5	5	100.0	-	-
Gyeongju	9	6	66.7	6	100.0	-	-
Ulleung	4	1	25.0	1	100.0	-	-

Table 8. Status of coastal development and structure in Gyeongsangbuk-do coast

Location	CSB		CLS			CCS	
	Watershed development	Port & Harbor structures	Detached or Submerged Breakwater	Headland	Groin, Dike	Coastal road, Parking lot	Seawall
Total	17	37	13	2	10	36	41
Uljin	3	8	3	0	3	9	11
Yeongdeok	4	8	3	2	1	8	9
Pohang	4	8	1	0	2	7	8
Gyeongju	5	9	3	0	2	8	9
Ulleung	1	4	3	0	2	4	4

CSB change of sediment budget, CLS change of longshore sediment budget, CCS change of cross-shore sediment budget

Table 9. Analysis of erosion cause in Gyeongsangbuk-do coast

Location	Single cause			Compound causes				etc.
	CSB	CLS	CCS	CSB+CLS	CSB+CCS	CSL+CCS	CSB+CLS+CCS	
Gyeongsangbuk-do (total: 41)	- (-)	- (-)	2 (4.9%)	- (-)	1 (2.4%)	21 (51.2%)	17 (41.5%)	- (-)
	2 (4.9%)			39 (95.1%)				

로 판단된다. 일부 해변에서는 배후지 개발 및 해안도로 건설에 의한 해변침식으로 완충구간 축소와 함께 파랑에너지 증가(반사파 증가)현상을 발생시키며, 이에 따른 횡단표사 유출량 증가로 침식이 가중된 것으로 판단된다. 지자체별로는 영덕군, 포항시, 경주시의 침식해안 비율이 60% 이상으로 타 지역에 비해 상대적으로 높게 나타났으며, 울진군과 울릉군의 경우 전체 해변의 30% 미만의 해변에서 침식문제가 지속되는 것으로 평가되고 있다.

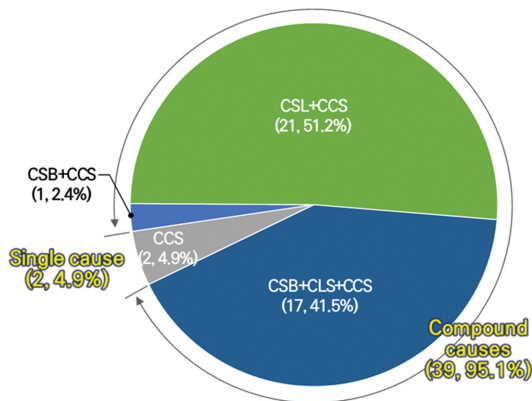
다음 Table 8은 경상북도 41개 대상 해변의 시설현황을 조

사한 결과이며, 이를 토대로 침식원인을 분류하여 다음 Table 9와 10에 제시하고 Fig. 4에 도시하였다.

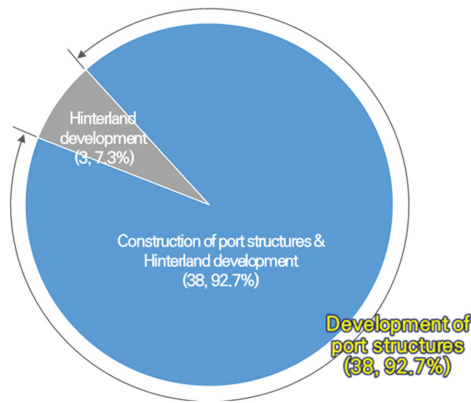
경상북도의 41개소 해변 중 단독 원인에 의한 침식발생 해변은 울진군 오산리 해변과 영덕군의 원척~부흥리 일대 해변 등 2개소(4.9%)만이 분류되었으며, 95.1%인 39개소 해변이 복합적인 원인에 의한 침식발생 해변으로 분류되었다. 복합 원인에 의한 침식발생 해변 중 51.2%인 21개소 해변이 연안표사와 횡단표사 변화에 의한 침식지역으로 분류되었으며, 표사수지와 횡단표사 변화로 인한 침식발생 해변은 1개소

Table 10. Analysis of erosion cause by coastal development in Gyeongsangbuk-do coast

Location	Number (percentile) of eroded beaches due to development			Number of eroded beaches due to CSB, etc., excluding development
	Construction of port structures & hinterland development	Construction of port structures	Hinterland development	
Gyeongsangbuk-do (total: 41)	38 (92.7%)	- (-)	3 (7.3%)	- (-)
	38 (92.7%)			



(a) by cause



(b) by coastal development

Fig. 4. Analysis of erosion cause in Gyeongsangbuk-do coast.

(2.4%), 표시수지와 연안 및 횡단표사 변화로 인한 침식발생 해변은 17개소(41.5%)로 분류되었다.

침식원인 중 인공구조물 설치로 인한 침식, 즉 개발연유에 따른 침식 해변을 분석한 결과, 경상북도 내 41개소 해변 모두가 항만 및 어항구조물과 관련된 개발연유에 의한 침식 해변으로 분류되었다. 이 중 항만 및 어항구조물과 배후육역개발로 인한 침식발생 해변은 38개소(92.7%)이며, 배후육역개발이 주된 침식요인으로 작용한 해변은 3개소(7.3%)로 분류되었다.

3. 동해안 주요 항만 및 어항시설 인근 해빈의 변화 평가

강원도내 위치한 항만 및 어항 20개소(무역항 5개소, 연안

항 1개소, 국가어항 14개소)와 경상북도내 위치한 항만 및 어항 14개소(무역항 1개소, 연안항 3개소, 국가어항 10개소)를 대상으로 연안침식 실태조사(The Province of Gangwon, 2020; The Province of Gyeongsangbuk-do, 2020) 결과에 근거하여 정비사업 시행 전·후의 해빈면적 변화율을 평가하였다. 연안침식 실태조사는 강원도의 경우 2015년 이후 정밀 평가가 실시되고 있으며, 경상북도는 2010년 이후 확대 조사가 실시되고 있다. 조사 보고서에는 일부 해변에 대해 항공 사진 및 정사영상 분석을 통해 과거 현황을 추산하여 해빈의 변화를 함께 수록하고 있으나 항만 및 어항 건설이 해빈변화에 미친 영향을 평가하기에는 자료가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 최초 항만 및 어항 건설 전·후가 아닌 충분한 정보 확인이 가능한 정비사업 시행 전·후 시기를 선정하여 해빈면적 변화율을 평가하였다. 이때 연안침식 실태조사에서 산정한 영상분석결과를 활용하였으며, 준평형상태에 도달했다고 평가되는 기간의 자료를 기반으로 해빈변화를 평가하였다.

다음 Table 11은 강원도와 경상북도 내 주요 항만 및 어항 시설 인근 해변의 정비사업 시행 전·후 해빈면적 변화율을 산정하여 제시한 것이다.

먼저 강원도에 위치한 항만 중 대진항과 거진항의 경우 구조물 건설 전·후 분석이 어려운 해안이며, 대포항 등 5개소는 주변 해안이 암반지대로 해변이 존재하지 않아 연안침식 실태조사시 제외된 지역이다. 이들 7개소와 함께 궁촌항은 수차례 양빈 시행으로 평형상태 파악이 불가하여 분석에서 제외하였다. 금진항과 옥계항의 경우 금진해변과 옥계해변의 변화에 함께 영향을 미치는 것으로 판단되어 동일한 자료를 활용하여 상호 비교하였다. 검토결과, 주문진항을 제외하고 정비사업 시행으로 강원도 내 항만 및 어항시설 주변의 해빈면적은 감소된 것으로 나타났다. 이 중 금진항과 옥계항 인근의 해빈면적은 19.4% 감소하여 가장 변화가 큰 것으로 평가되었으며, 유입과랑의 특성을 변화시키는 외곽시설 확장 등 정비사업 시행의 영향으로 평균 7.8% 가량 해빈면적이 감소된 것으로 평가되었다.

경상북도에 위치한 항만 중 자료가 충분치 않아 분석이 어려운 강구항과 해변이 없는 대진항 등 5개소, 해빈침식의 영향으로 면적이 크게 감소한 후포항 등 3개소 해변은 평가에서 제외하였다. 죽변항은 외곽시설 확장 후 해빈면적이 8.1% 증가하였으며, 오산항과 구산항은 각각 3.6%, 3.1%

Table 11. Analysis of beach area change around Port

Port	Change rate of beach area before and after coastal maintenance project (%)	Long-term change rate presented in coastal erosion monitoring report (2020)			
		Cross-sectional beach area (%)	Beach width (%)		
Gangwon-do	Daejin	lack of observed data	13.7	-20.5	
	Geojin	lack of observed data	2.0	-1.5	
	Gonghyeonjin	-12.4	12.3	-10.6	
	Ayajin	-1.6	-10.8	-28.1	
	Sokcho	-14.0	-0.8	1.3	
	Daepo		No beach		
	Susan	-10.9	-	-20.4	
	Namae	-7.6	-16.8	-6.8	
	Jumunjin	9.2	22.9	19.2	
	Sacheonjin	-1.0	-12.5	-27.5	
	Gangneung	-7.4	-3.2	4.7	
	Geumjin		-7.8	-0.7	
	Okgye	-19.4	12.3	22.9	
	Mukho	-11.8	7.5	-27.2	
	Donghae		No beach		
	Samcheok		No beach		
	Deoksan		No beach		
	Gungchon	Beach nourishment implementation	-27.8	-14.3	
	Jangho	-11.8	-5.2	-26.4	
	Imwon	-4.5	-34.5	-81.2	
	Hosan		No beach		
	Gyeongsangbuk-do	Jukbyeon	8.1	0	0
		Osan	-3.6	-10.9	-22.4
Gusan		-3.1	8	10	
Hupo		Decrease in beach area	4.8	16.5	
Daejin			No beach		
Chuksan			No beach		
Gangu			lack of observed data		
Gugye			No beach		
Pohang			Yeongildae Beach: -33.8% decrease in beach area / Songdo, Dogu Beach: increase in beach area		
Daebo			No beach		
Guryongpo			No beach		
Yangpo			Sedimentation equilibrium is maintained in the long term		
Gampo		Decrease in beach area	-3.2	-8.8	
Eupcheon		Decrease in beach area	2.1	6.6	

해빈면적이 감소된 것으로 평가되었다. 포항항 주변 영일대 해변의 경우 33.8% 가량 해빈면적이 감소한 반면, 인근 송도와 도구해변은 해빈면적이 증가하였다. 그 외 양포항의 경우 수성천 유입으로 해빈면적이 연차별로 변화되고 있으나, 장기적으로 평형상태를 유지하고 있는 해변으로 판단된다.

4. 개발에 따른 침식 원인 분석: 침식 영향도 평가

4.1 침식 영향도 평가방법

침식 영향도란 인공구조물의 건설 단계별로 해당 구조물이 평균해안선 변화, 즉 해빈면적 변화에 영향을 준 정도를 정량적으로 평가한 값으로 정의할 수 있다. 따라서 연안침식 영

Table 12. Assessment method of erosion impact

Assessment methods	Characteristics
Base on analysis coastline survey results (Base on Coastal Erosion Monitoring Report)	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Although detailed analysis is possible, assessment is not possible due to insufficient long-term historical data (available only after 2015)
Base on analysis of aerial photo/ortho-image	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Easily review shoreline changes through image analysis ◦ It is difficult to acquire images for each stage of construction of coastal structures, and the homogeneity and representativeness of data is low ◦ Coordinate matching is difficult due to the difference in resolution between past images
Base on numerical model analysis (2/3 dimensional model)	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Analysis by construction stage and external force condition is possible ◦ The model setup process is complex and the analysis process takes a lot of time ◦ Various external force conditions cannot be considered due to insufficient of data and limitations of the model → Low reliability of model results

향도 평가는 연안역에 건설된 각종 인공구조물 건설 전·후 평형상태에 도달한 해안선 정보의 분석을 통해 가능하며 이를 통해 침식의 원인을 정밀하게 파악할 수 있는 지표로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 침식 영향도 평가 대상지는 인공구조물 설치로 인한 침식현상이 발생한 해변을 대상으로 하고, 인공구조물 건설 전·후의 평가가능한 해안선 정보의 취득이 가능해야 한다.

다음 Table 12는 침식 영향도 평가방법을 제시한 것으로, 침식 영향도 평가는 해안선 조사성과 분석, 항공사진 및 정사영상 분석, 수치모델을 통한 평가 등 3가지 방법으로 가능하다. 침식 영향도 평가를 위해 활용 가능한 자료로는 장기간 조사된 해안선 측량성과, 항공사진 및 정사영상 등이 대표적이며, 이들 자료를 분석하여 건설단계별 평균해안선의 변화를 파악함으로써 평가가 가능하다.

먼저 해안선 측량성과를 활용한 평가방법은 장기간 주기적인 관측을 통해 평균해안선 변화를 명확히 확인할 수 있는 자료가 축적된 경우 정밀한 분석이 가능하다. 그러나 국내의 장기간 누적된 해안선 측량성과를 확보할 수 있는 자료로는 2003년 이후 해양수산부에서 매년 실시하고 있는 “연안침식 실태조사 용역”이 유일하며, 연안개발이 1970년대 전후로 활발히 이루어진 것을 감안할 때 개발 영향을 평가할 수 있는 관측자료 확보는 불가능한 실정이다.

다음으로 항공사진 및 정사영상 분석을 통한 평가방법은 가장 간편한 방법으로 영상분석을 통해 손쉽게 해안선 변화의 검토가 가능하다. 영상분석을 통한 평가시에는 분석자료의 동질성 확보를 위해 동일한 계절별 영상의 확보가 가능해야 하

며, 해안선의 평형상태 도달 여부에 대한 평가 또한 가능해야 한다. 그러나 구조물 건설단계별로 충분한 영상 확보가 어려울 뿐 아니라 과거 항공사진의 경우 낮은 해상도 문제를 갖고 있다. 또한 정사 보정시 발생하는 오차로 인하여 평가 정확도는 세 가지 방법 중 가장 낮다고 볼 수 있다. 영상분석에 활용되는 자료는 국토지리정보원의 국토정보플랫폼을 통해 수집이 가능하다. 국토정보플랫폼에서는 정사영상의 경우 2010년 이후부터의 촬영영상이 제공되고 있으며, 항공사진은 지역별로 차이는 있으나 1950년대 전후부터 최근까지의 자료가 제공되고 있다.

마지막으로 수치모델을 활용한 영향도 평가방법은 해안선 측량성과 및 영상자료가 충분하지 못한 경우에 활용이 가능하다. 수치모델을 적용하는 경우 건설 단계별로 상세 검토가 가능하고 해양 외력변화에 따른 평가가 가능한 장점이 있으나, 모델의 수립 과정이 복잡하고 검토과정에 많은 시간이 소요되는 단점이 있다. 특히, 모델 수립 시 사용되는 외력정보의 대표성이 떨어지는 경우 평가결과의 신뢰도가 낮아질 수 있으며, 모델 사용자에 따라 현상재현 정확도에 차이가 발생할 수 있다.

4.2 영상분석을 통한 영향도 평가

본 연구에서 앞서 제안한 세 가지 평가방법 중 가장 간편하게 평가가 가능한 항공사진 및 정사영상 분석방법을 통해 경상북도 영덕군 강구면 하저리에 위치한 하저항을 대상으로 영향도 평가를 실시하였다. Table 13은 분석시 활용된 항공사진과 정사영상의 기본정보를 제시한 것이다. 분석

Table 13. Information on aerial photograph and ortho image

Year	File identifier	Resolution	Origin of coordinates (GRS80, TM-EAST)		Remarks
			X	Y	
1971	197108000200030004	1270 dpi	233021.0	421926.0	aerial photograph
1995	199500000300220064	1200 dpi	236158.0	419980.0	
2005	200505000200220079	1200 dpi	237165.0	422469.0	
2019	201911000436910047	51 cm	235774.5	422611.3	ortho image

자료 선정시에는 하저항의 방파제 및 방사제 건설전후 해빈면적이 명확히 확인되는 고해상도 영상을 선정하였다. 국토지리정보원은 기본적으로 정사보정이 완료된 영상을 제공하고 있으나, 본 연구에서는 분석시 오차를 최소화하기 위하여 QGIS 프로그램을 활용한 1차 좌표보정과 CAD 프로그램을 활용한 최신 수치지형도의 해안선 및 구조물과 영상자료를 일치시키는 2차 보정과정을 거쳐 영상분석 자료를 생산하였다.


Table 14는 평가 대상지인 하저항의 기본현황을 제시한 것이다. 하저항은 어항 건설로 인한 파랑 차폐역의 형성으로, 연안표사가 북측으로 이동하여 발생한 연안표사 불균형이 주요 침식원인으로 파악된다. 방사제 설치로 인한 새로운 평형해

안선 형성되어 있으며, 유역개발로 인해 하천 모래공급량이 감소된 것으로 파악되고 있다. 또한, 해안도로 건설로 약 5.3 m 가량 해빈이 잠식되었으며, 연안표사 이동에 따라 급격하게 해빈폭이 축소됨에 따라 호안 반사파의 영향으로 모래 유실량 증가 및 고파랑 내습시 배후지 피해가 우려되는 해안으로 평가된다.

다음 Fig. 5와 Table 15는 영상분석을 통해 분석된 하저항 건설 단계별 해안선 및 해빈 변화를 제시한 것이다. 1971~1995년 사이 호안도로 및 하천정비 시행으로 하저항 해변의 전체 해빈면적은 2.2% 감소하였으며, 평균 해빈폭은 0.6 m 가량 축소된 것으로 분석되었다. 2002년 방파제 및 방사제 건설로 2005년 기준 전체 해빈면적이 27.4% 감소하였고 이로

Table 14. Basis present condition at Hajeo-ri

Location	Hajeo-ri, Ganggu-myeon, Yeongdeok-gun, Gyeongsangbuk-do (Hajeo port~Hajeo Beach)	
Beach shape	Bow-shaped	
Beach length	0.94 km	
Beach width	6~42 m	
Status	Representative particle size of beach sediment	Sand
	Adjacent river	Soha Stream
	Erosion grade	Grade D (severe)
	Erosion type	Beach erosion



Development history

- 2002: Construction of breakwater and groyne
- 2011: Extension of breakwater and groyne

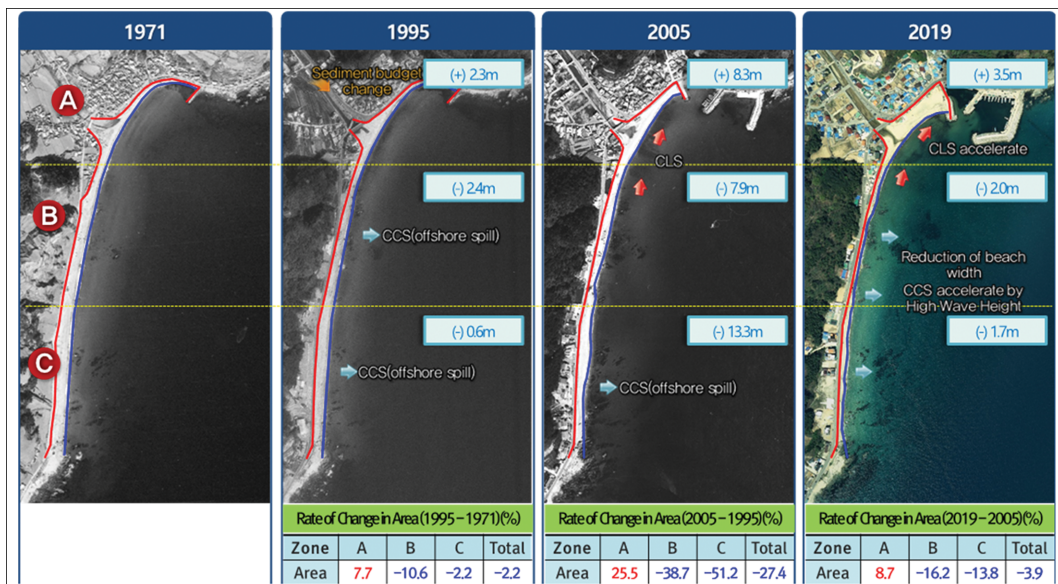


Fig. 5. Changes in the coastline of Hajeo Port by construction stages.

Table 15. Changes in beach area and average beach width for each construction stages of Hajeo Port

Zone	Length (m)	1971		1995 (Encroachment caused by the construction of coast-road & river maintenance project)					2005 (breakwater and groyne construction)					2019 (Present)				
		Area (m ²)	Width (m)	Change in area			Change in average beach width		Change in area			Change in average beach width		Change in area			Change in average beach width	
				Area (m ²)	Amount (m ²)	Rate (%)	Width (m)	Amount (m)	Area (m ²)	Amount (m ²)	Rate (%)	Width (m)	Amount (m)	Area (m ²)	Amount (m ²)	Rate (%)	Width (m)	Amount (m)
A	204.5	6,141.9	30.0	6,617.3	475.4	7.7	32.4	2.3	8,308.0	1,690.7	25.5	40.6	8.3	9,028.8	720.8	8.7	44.1	3.5
B	314.0	7,155.3	22.8	6,397.2	-758.1	-10.6	20.4	-2.4	3,922.9	-2,474.2	-38.7	12.5	-7.9	3,288.1	-634.9	-16.2	10.5	-2.0
C	449.0	11,942.8	26.6	11,680.9	-261.9	-2.2	26.0	-0.6	5,694.7	-5,986.2	-51.2	12.7	-13.3	4,909.1	-785.6	-13.8	10.9	-1.7
Total	967.5	25,240.0	26.1	24,695.4	-544.6	-2.2	25.5	-0.6	17,925.6	-6,769.8	-27.4	18.5	-7.0	17,225.9	-699.7	-3.9	17.8	-0.7

Table 16. Erosion impact assessment cause by construction of Hajeo Port

	Changes in total sediment budget (1971~2019)		Encroachment caused by the construction of coast-road (1971~1995)		After the construction of the breakwater and groyne in Hajeo port (2005~2019)	
	Beach area	Beach width	Beach area	Beach width	Beach area	Beach width
amount of change	-8,250.7 m ²	-8.5 m	-544.6 m ²	-0.5 m	-7,706.1 m ²	-8.0 m
Impact rate	-		6.6%		93.4%	
main cause of erosion (erosion type)	offshore spill		Change due to cross-shore sediment transport and offshore spill		Change due to longshore sediment transport and offshore spill	

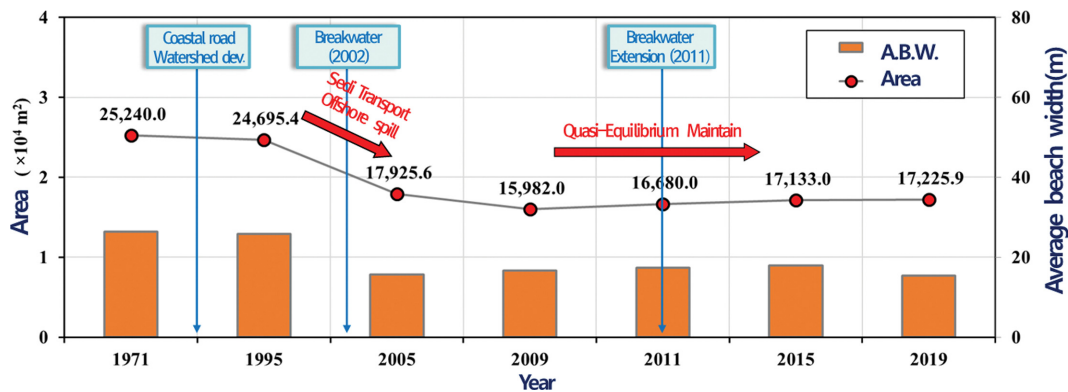


Fig. 6. Changes in beach area and beach width in Hajeo Port.

인해 평균 해빈폭 또한 약 7.0 m 후퇴한 것으로 나타났다. 하저항 건설 이후 현재(2019년 기준)까지 전체 해빈면적은 3.9% 감소하여 평균 해빈폭이 0.7 m 축소된 것으로 평가되고 있으며, 준 평형상태를 유지하고 있는 것으로 판단된다. 구역별로 살펴보면, 하저항 건설로 A구역의 해빈면적은 연안표사 이동으로 크게 증가한데 반하여 B구역과 C구역은 지속적으로 해빈면적이 감소함에 따라 고파랑 시 표사 유출 및 월파 위험성이 증대된 것으로 평가되었다.

영상분석 자료와 연안침식 실태조사 자료를 함께 활용하여 하저항 건설에 따른 영향도를 평가하여 Table 16, Fig. 6에 제시하였다. 하저항 방파제 및 방사제, 과거 호안도로 건설로 인한 표사수지 변화로 2019년 기준 전체 해빈면적은 8,250.7 m²,

평균 해빈폭은 8.5 m가 축소된 것으로 분석되었다. 이 중 호안도로 건설로 인한 영향은 6.6%인 0.5 m 해빈폭 후퇴가 발생하였으며, 하저항 건설의 영향은 93.4%인 8.0 m 해안선 후퇴를 초래한 것으로 평가되었다. 주된 침식원인은 방파제 및 방사제 건설로 인하여 북측으로 연안표사 이동과 함께 외해 유출량이 증가한 것으로 판단되며, 이로 인한 남측 구간의 해빈폭 축소, 즉 완충구간 축소로 인한 지속적인 침식문제 발생이 예상된다.

아울러 고파랑 시 국부적인 횡단표사 유출량 증가와 함께 전체적인 표사수지의 감소가 예상됨에 따라 모래유실 저감 및 배후지 월파 피해 예방을 위한 대책마련이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 동해안의 강원도와 경상북도 일대 143개소 해변을 대상으로 연안침식 실태와 침식원인에 대한 정성적인 평가를 수행하였다. 아울러 인공구조물 설치에 따른 침식 정도 및 원인분석을 위한 침식 영향도 개념을 정립하였으며, 세 가지 방식의 영향도 평가 방법을 제안하고, 이 중 영상분석을 활용한 평가방법을 하저항(경상북도 영덕군)에 적용하였다.

연안침식 실태조사 자료를 통한 정성적인 원인분석과 영향도 평가를 통한 정밀분석 결과, 동해안의 침식현상은 어항시설 확충을 위한 방파제 및 방사제 등 인공구조물 설치로 인해 연안표사 이송체계가 변화되며, 이로 인한 평형해안선의 변화가 주된 요인인 것으로 판단된다. 일부 해변에서는 배후지 개발 및 해안도로 건설에 의한 해빈침식으로 완충구간 축소와 함께 파랑에너지 증가(반사파 증가)현상을 발생시키며, 이에 따른 횡단표사 유출량 증가로 침식이 가중된 것으로 판단된다. 이처럼 가속화되고 있는 연안침식문제에 대응하기 위해서는 다음의 제도적 방안마련을 제안하고자 한다.

(1) 연안 개발 시 미치는 영향을 사전에 평가할 수 있는 연안침식 영향평가 제도 도입과 이를 평가할 수 있는 전문가 평가조직의 구성 및 운영이 필요할 것으로 판단된다.

(2) 원인자 부담의 연안침식 대응사업 추진과 개발사업 시 침식 저감 대책의 동시 추진을 통해 개발의 원인자가 책임의식을 갖도록 하여 개발로 인한 피해가 최소화 되도록 유도할 필요가 있다.

(3) 관리해안선(Park et al., 2019)을 제도적으로 도입함으로써 지속적인 침식관리와 위기 대응 체계의 관리기준을 수립하고 주변 연안의 침식 영향평가와 연성 및 경성 침식 저감공법 적용시 정량적 평가를 위한 기준으로 활용하는 방안의 검토가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2021년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술

진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(20180404 연안침식 관리 및 대응기술 실용화).

References

- Korea Environment Institute (2005). Environmental Problems of Coastal Roads and Improvement Measures (in Korean).
- Korea Environment Institute (2006). Study on the Effective Mitigation Measures of Coastal Erosion due to Coastal Developments (in Korean).
- Korea Maritime Institute (2017). A Study on Improvement Measures for Coastal Erosion Management Policy (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010). Coastal Improved Project Erosion Management Guidebook (in Korean).
- Ministry of Ocean and Fisheries (2003). Research Study for Establishment of Comprehensive Measures to Prevent Coastal Erosion (II) (in Korean).
- Ministry of Ocean and Fisheries (2020). Review of Practicality of Coastal Maintenance Guidebook, Practical Technologies for Coastal Erosion Control and Countermeasure (in Korean).
- Ministry of Ocean and Fisheries (2021). Analysis of the Impact of Coastal Erosion According to the Construction of artificial coastal structures (in Korean).
- Park, S.M., Park, S.H., Lee, J.L. and Kim, T.G. (2019). Erosion Control Line (ECL) Establishment Using Coastal Erosion Width Prediction Model by High Wave Height. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 33(6), 526-534 (in Korean).
- The Province of Gangwon (2020). Coastal Erosion Monitoring of East Sea Report (2017~2018) (in Korean).
- The Province of Gyeongsangbuk-do (2020). Coastal Erosion Monitoring of East Sea Report (2019) (in Korean).

Received 12 November, 2021

Revised 3 December, 2021

Accepted 7 December, 2021