

# 현장관측을 통한 이안소파잠제의 중력과 및 중력외파 저감효과 검토 Analysis on the Reduction Effects of the Gravity Waves and Infra-Gravity Waves of Detached Submerged Breakwater by Field Monitoring

정원무\* · 백종대\*\* · 최혁진\*\* · 김상익\*\*\*

Weon-Mu Jeong\*, Jong-Dai Back\*\*, Hyukjin Choi\*\* and Sang-Ik Kim\*\*\*

**요 지 :** 본 연구는 속초시 영랑동 해안에 설치된 이안소파잠제의 중력과 및 중력외파 저감효과를 검토하기 위하여 잠제 전면(W0)과 후면(W1, W2)에서 현장관측을 수행하여 연속적인 파랑 자료를 분석하였다. 잠제에 의한 파고전달률( $K_t$ )은 단주기파(중력파)와 중력외파로 구분하여 파랑에너지 저감 효과분석을 수행하였으며, 설계 시 적용된 파고저감률과 비교 · 분석하였다. 잠제 전면(W0)에서 2.0 m 이상의 유의파고가 내습할 경우, 단주기파는 남측 1번 잠제(W1) 배후 파고는 약 65% 저감되고, 2번 잠제 배후(W2) 파고는 약 59% 저감되는 것으로 나타나 잠제가 어느 정도 성능을 유지하고 있는 것으로 평가되었으나, 실효역에 설치된 잠제의 마루수심이 설계와 달라 파고저감 효과는 설계 시 계획에 비해서 다소 떨어지는 것으로 분석되었다. 중력외파는 1번 잠제 배후(W1)와 2번 잠제 배후(W2)에서 파고전달률( $K_t$ )이 2.11과 1.71로 증폭되는 것으로 분석되었으며, 2번 잠제 배후(W2) 파고가 1번 잠제 배후(W1) 파고에 비해서 작은 것으로 나타났다.

**핵심용어 :** 현장관측, 파고전달률, 중력파, 중력외파, 파랑에너지 저감

**Abstract :** This study was conducted to observe the effects of gravity and infra-gravity wave of detached submerged breakwater in the coast of Yeongnang-dong, Sokcho, as analyzing continuous wave data by performing field observations on the front area (W0) and rear area (W1, W2). Wave transmission coefficient ( $K_t$ ) of submerged breakwater was analyzed in two parts, short-period wave (gravity wave) and infra-gravity wave. The wave energy reduction effect was analyzed and compared with the value of the design. In case of above wave height 2.0 m at the front area (W0) of the submerged breakwater, the short-period wave height at point W1 is reduced by about 65% and the short-period wave height at point W2 is reduced by about 59%. The depth of crest of submerged breakwater conducted in a sea area differs from the design, and the wave energy reduction effect is analyzed to be smaller than the design plan. The infra-gravity waves were amplified to 2.11 and 1.71 at the W1 and W2 points, respectively, and the wave height at W2 point was smaller than that at W1 point.

**Keywords :** field observations, wave transmission coefficient, gravity wave, infra-gravity wave, wave energy reduction

## 1. 서 론

동해안 해안침식 방지대책 공법으로 해안경관의 중요성이 높은 해수욕장의 경우 수중에 설치되어 해안경관을 훼손시키지 않고 해안침식을 저감시킬 수 있는 인공리프(artificial reef) 또는 이안소파잠제(detached submerged breakwater, 이하에서는 편의상 잠제로 부르기로 함) 공법을 이용한 연안정비사업의 수요가 갈수록 증가하고 있다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2010; Ministry of Oceans and Fisheries, 2014).

실제로 잠제는 동해안 해안침식 피해지역에 많이 시공되고 있으나 실효역에서 효과를 검증하는 성능평가 사례는 최근에 강릉 남해 해수욕장(Kim and Shin, 2014)과 남항진(Ryu and Jeong, 2015)에 설치된 잠제에 대해서 잠제 전면과 배후면의 파랑관측 자료를 이용해서 단주기파 제어효과를 검토한 정도에 그치고 있다.

우리나라보다 앞서 1950년경부터 해안침식 피해가 발생하기 시작한 일본에서는 1999년 해안법이 새로 개정되어 해안침식 방지대책으로 방호, 환경, 해양이용의 조화를 이루는 면적방호 방식이 채택되어 잠제 공법이 많이 적용되고 있다. 그

\*한국해양과학기술원 연안공학연구본부(Coastal and Environmental Engineering Division, Korea Institute of Ocean Science & Technology)

\*\* (주)해안해양기술(Corresponding author: Jong-Dai Back, Coast and Ocean Technology Research Institute, A-2511 Hyundai Knowledge Industrial Center, 70 Dusan-ro Geumcheon-gu, Seoul 08584, Korea, Tel: +82-2-2104-6602, Fax: +82-2-2104-6601, bjd0409@hanmail.net)

\*\*\*한국해양과학기술원 안전 · 방위연구본부(Maritime Safety and Security Division, Korea Institute of Ocean Science & Technology)

러나 현장관측을 통하여 실효역에 설치된 잠제의 성능을 평가한 사례는 많지 않으며 가나가와현 유가와라 해안(Aono et al., 1995), 후지 해안(Wada et al., 2006) 등에 설치된 잠제에 대해서 파랑관측을 실시하여 단주기파 및 흐름 제어효과 등을 검토한 사례가 있다.

본 연구의 대상지인 영랑동 해안의 해안침식 주요 원인은 장사항 개발에 따른 방파제와 해안도로 건설 및 고파랑 내습 빈도 증가 등으로 자연적인 표사이동 패턴의 변화를 초래하여 영랑동 해안의 연안침식과 장사항의 매몰피해가 발생한 것으로 분석되었다(Sokcho City, 2001). 이와 같은 연안침식을 저감하기 위해서 2007년 헤드랜드 2기(북측 250 m, 중앙 390 m)를 건설하였으며, 2010년 헤드랜드 사이에 잠제 3기(북측 잠제 100 m, 남측 1구간 130 m, 남측 2구간 100 m)를 건설하였고 2013년에 연금정과 남측 잠제 1구간 사이에 약 30 m 잠제를 추가 설치하여 현재 상태의 연안정비사업이 완료되었다(Fig. 1 참조).

유의파고 2.0 m 이상의 폭풍파 및 주기가 약 1~3분인 중력외파(infra-gravity wave, IGW)는 표사이동에 의한 연안지형변화에 직접적인 영향을 미치는 매우 중요한 인자이다(Thiebaud et al., 2013). 따라서 본 연구에서는 잠제 전면과 배후에서 파랑관측을 수행하여 잠제에 의한 단주기파 뿐만 아니라 중력외파의 전파특성을 함께 분석하였다.

본 연구에서는 속초시 영랑동 해안에 연안침식 방지공으로 설치된 남측의 잠제 2기에 대한 실효역 파랑모니터링을 수행하고 단주기파와 중력외파의 파고전달률 등을 산정하여 잠제의 파랑제어 효과를 검토한 후 설계 시에 계획한 잠제의 파랑제어 효과와 비교, 분석하고자 한다.

추가적으로 실효역에 설치된 잠제의 변위 및 마루수심을 국내·외 인공리프 설계기준 및 설계사례 연구(DY Engineering, 2014)에서 조사한 자료를 이용하여 설계 시의 잠제 마루수심과 비교하고 잠제의 기능이 잘 유지되고 있는지에 대해서도 검토하였다.

## 2. 현장관측 및 자료 분석 기법

본 연구에서는 강원도 속초시 영랑동 해역에 내습하는 파랑 특성을 파악하고 잠제와 헤드랜드로 구성된 침식방지시설에 의한 파랑저감 효과를 분석하기 위해서 실효역 파랑 모니터링을 수행하였다(Table 1 및 Fig. 2 참조). 먼저, 속초 영랑동 해역에 입사하는 파랑 특성을 파악하기 위해서는 잠제 전면의 수심 D.L.(-) 14.5 m 위치(Table 1 및 Fig. 2의 정점 W0)에 초음파식 파향·파고계 AWAC(Nortek AS)을 설치하고 약 3년(2013년 6월 19일~2016년 1월 27일)에 걸쳐 파랑 자료를 취득하였다. 그리고 잠제에 의한 파랑저감 효과를 분석하기 위해서 잠제의 남측(Table 1 및 Fig. 2의 정점 W1과 W2)과 북측 배후에 수압식 파고계를 약 6개월(2015년 8월 18일~2016년 1월 27일) 동안 설치하였다. 남측 잠제의 배후에서는 성공적으로 자료를 취득하였으나 북측 잠제의 배후에서는 기기 유실로 자료를 취득하지 못하였다.

정점 W0에서 AWAC을 사용하여 관측한 파랑자료는 전용 해석 소프트웨어인 QuickWave를 사용하여 분석하였으며, 30 분 간격으로 침투파향( $Dir_{Tp}$ ), 유의파고( $H_{m0}$ ), 침투주기( $T_p$ ) 등을 제시하였다.

정점 W1과 W2에서 수압식 파고계를 사용하여 관측한 잠

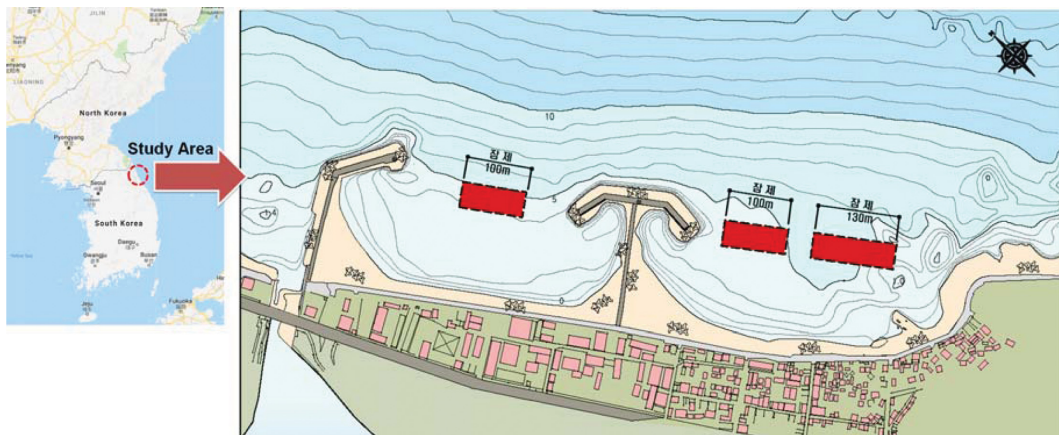


Fig. 1. Landscape of study area (Sokcho City, 2008).

Table 1. Basic information of the wave observation

Station	Observation periods	Location		Water depth
		Latitude	Longitude	
W0	2013.6.19~2016.1.27	38°13'14.0" N	128°35'55.4" E	D.L.(-) 14.5 m
W1	2015.8.18~2016.1.27	38°12'57.3" N	128°35'51.6" E	D.L.(-) 3.5 m
W2		38°13'01.3" N	128°35'47.5" E	D.L.(-) 3.7 m

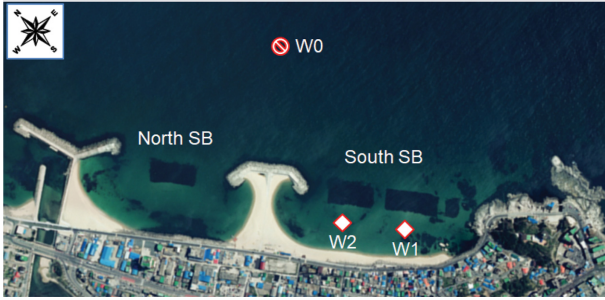


Fig. 2. Location of wave measurement stations.

제 배후의 파랑자료는 스펙트럼법(spectral method)을 사용하여 분석하였다. 수압식 파고계로 취득된 자료의 경우에는 수심과 주기별로 미리 구해진 수압-해수면 변위간의 전달함수를 수압 스펙트럼에 곱하여 해수면 변위에 대한 스펙트럼을 구하게 된다. 본 연구에서는 전체 자료에서 30분마다 2,048개, 또는 90분마다 8,192개의 0.5초 간격의 연속된 자료를 선택한 후 다음의 식 (1)을 이용하여 유의파고와 평균주기를 산정하였다.

$$H_s = 4\sqrt{m_0}, T_z = \sqrt{m_0/m_2} \quad (1)$$

여기서,  $H_s (= H_{m0})$ 는 유의파고(m),  $T_z$ 는 평균주기(초)를 나타내며,  $m_0$ 와  $m_2$ 는 각각 수면 변위 스펙트럼 함수에 대한 0차 및 2차 모멘트이다. 일반적으로  $n$ 차 모멘트  $m_n$ 에 대한 정의는 식 (2)로 표현된다.

$$m_n = \int_{f_1}^{f_2} f^n \cdot S(f) df \quad (2)$$

여기서,  $f$ 는 주파수(Hertz),  $S(f)$ 는 주파수  $f$ 에 대한 수면변동에 대한 스펙트럼 밀도함수,  $f_1$ 과  $f_2$ 는 각각 하한 및 상한 절단주파수(cutoff frequency)이며, 하한 절단주파수  $f_1$ 은 단주기파와 장주기파를 구분하는 주파수이다. 일반적으로 하한 및 상한 절단주파수를 어떻게 설정하느냐에 따라 파랑 특성이 영향을 받게 된다. 특히, 단주기파와 장주기파를 구분하는 주파수를 어떻게 설정하느냐는 중요한 의미를 지닌다.

본 연구에서는 국내·외에서의 다양한 연구 결과(Cho et al., 2012)를 종합하여 이를 1/30 Hz로 설정하였다. 단주기파 특성을 분석할 경우에는  $f_1$ 을 5/128 Hz,  $f_2$ 를 64/128 Hz로 설정하였으며, 장주기파 특성을 분석할 경우에는  $f_1$ 을 1/300 Hz,  $f_2$ 를 1/30 Hz로 설정하였다.

### 3. 잠제 주변의 파랑특성 분석결과

#### 3.1 잠제 전면의 중력파와 중력외파 특성

영랑동 해안에 내습하는 입사파 특성을 파악하기 위해서 잠제 전면(St. W0)에서 2013년 6월부터 2016년 1월까지 약 3년간 관측된 파랑자료를 분석한 결과에 대해 검토하였다. 먼저 중력파에 대해 파향을 16방위별로 구분하여 파랑장미도를 작성하여 Fig. 3에 제시하였다. 연간 파향별 출현율의 경우 NE(27.7%) 및 ENE(26.1%)의 출현율의 합이 53.8%로 다른 파향들에 비해 매우 탁월하게 나타났다. 이러한 경향은 자료를 크게 하계와 동계로 구분하여 작성한 파랑장미도에서도 유사하게 나타났으며, 하계의 경우 ENE, NE 방향이 탁월한 가운데 E, ESE, SE 방향도 우세하게 나타나고 동계의 경우

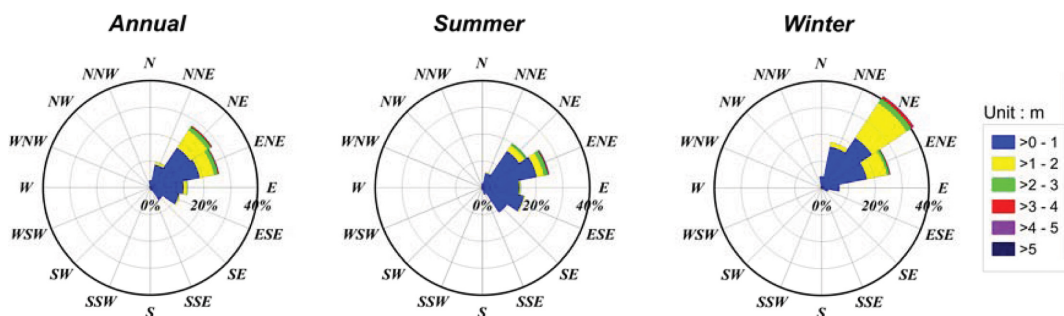


Fig. 3. Directional distributions of significant wave heights at St. W0 (2013/06/19~2016/01/27).

Table 2. Distribution of significant wave height and peak period measured at St. W0 from Jun. 19 2013 to Jan. 27 2016

$H_s$ (m)	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	Sum	Ratio (%)
$T_p$ (sec)	~0.5	~1.0	~1.5	~2.0	~2.5	~3.0	~3.5	~4.0	~4.5	~5.0		
$\leq 2$	61	-	-	-	-	-	-	-	-	-	61	0.1
2~4	4,113	364	5	-	-	-	-	-	-	-	4,482	10.5
4~6	9,559	4,393	501	39	4	-	-	-	-	-	14,496	34.1
6~8	4,039	6,997	2,751	707	260	42	6	2	1	-	14,805	34.8
8~10	1,389	1,925	1,442	784	435	203	74	33	14	7	6,306	14.8
10~12	276	530	426	326	148	111	89	50	37	13	2,006	4.7
12~	28	68	58	51	30	36	32	29	31	10	373	0.9
Sum	19,465	14,277	5,183	1,907	877	392	201	114	83	30	42,529	100.0
Ratio (%)	45.8	33.6	12.2	4.5	2.1	0.9	0.5	0.3	0.2	0.1	100.0	

NE 방향이 상대적으로 출현율이 높게 제시되는 계절적 특성이 나타났다.

Table 2에는 중력파의 침투주기에 대해 2초 간격 및 유의파고에 대해 0.5 m 간격으로 구간을 설정하고 각 구간별 출현빈도와 출현율을 제시하였다. 침투주기의 경우 4~6초 구간(34.1%)과 6~8초 구간(34.8%)의 합이 약 69%로 우세하게 나타났으며, 유의파고의 경우 0.5 m 이하 구간(45.8%), 0.5~1.0 m 구간(33.6%), 1.0~1.5 m 구간(12.2%)으로 나타나서 파고 1.5 m 이하의 출현율이 91.5%에 달하였다.

해안침식을 유발하는 주요 대상파랑은 예를 들면 유의파고 2.0 m 이상의 폭풍파라고 볼 수 있으며, 내습파의 주기가 길수록 백사장 안쪽까지 run up이 발생하여 영랑동 해안과 같이 해안도로나 호안이 설치된 경우 커다란 반사파를 유발시켜 국소세굴과 침식을 발생시킬 가능성이 크다고 할 수 있다 (Mark et al., 2013). Table 2를 살펴보면 정점 W0에서는 유의파고 2.0 m 이상의 파랑이 약 3년의 관측기간 동안 4.0% 내습하였다. 유의파고가 2.0 m 이상인 파랑의 주기 분포를 살펴보면 침투주기 8~10초가 45.1%, 10~12초가 17.7%, 12초 이상이 9.9%로 나타나서 침투주기 8초 이상의 출현율이 약 72.7%에 달하여 전체 자료에서의 침투주기 8초 이상의 출현율인 20.4%와는 큰 차이를 나타냈다.

영랑동 해안에 내습하는 중력외파의 특성을 파악하기 위해서 2015년 8월 18일부터 2016년 1월 21일까지 정점 W0에서 관측된 자료를 전술한 방법으로 분석하여 중력외파의 파고와 주기를 구한 후 이들을 중력파의 경우와 같이 주기 및 파고의 구간별로 구분하고 출현빈도와 출현율을 Table 3에 나타내었다. 표에 따르면 중력외파의 파고( $H_{igw}$ )는 0.05 m 이하의 구간에서 77.7%, 0.05~0.10 m의 구간에서 13.2%로 나타나서 0.10 m 이하의 출현율이 90.9%에 달하였다. 중력외파의 주기( $T_{igw}$ )는 40~45초의 구간에서 31.9%, 45~50초의 구간에서 46.5%, 50~55초의 구간에서는 15.5%로 나타나서 주기 40~55초의 출현율이 93.9%로 제시되었다. 그리고 중력외파 파고의 평균치는 0.041 m, 주기의 평균치는 47.3초로 분석되었다.

중력외파를 관측한 관측기기 AWAC 600 kHz의 Wave measurement에 대한 제작사의 Brochure에 제시된 정확도는

측정된 값의 1% 이하, 분해능은 1 cm로 제시되어 있다. 이를 고려하면 정점 W0(수심 약 14.5 m)에서 측정된 중력외파고 0.05 m 이하의 자료는 정확도가 다소 부족할 수도 있으므로 통계자료의 사용에 주의를 요한다.

### 3.2 잠제의 성능 평가

#### 3.2.1 중력파에 대한 파에너지 저감 효과분석

잠제에 의한 중력파에 대한 파고 저감 효과를 파악하기 위해서 3개 정점(정점 W0~W2)에서 동시관측이 수행된 기간(2015/8/18~2016/1/27)의 자료들을 분석하였다. 남측 잠제의 외측에 위치한 정점 W0과 배후에 위치한 정점 W1과 W2에서 관측한 단주기와 자료의 시계열을 Fig. 4에 도시하였다. 이 그림에서는 위에서부터 정점 W0에서의 침투주기와 침투파향, 정점 W0~W2에서의 유의파고, 정점 W0에 대한 정점 W1에서의 상대 유의파고비( $H_{W1}/H_{W0}$ ), 그리고 정점 W0에 대한 정점 W2에서의 상대 유의파고비( $H_{W2}/H_{W0}$ )의 시계열이 각각 제시되었다. 침투파향은 파랑장미도와 마찬가지로 정점 W0에서의 유의파고가 클 때는 대부분 NE~ENE로 나타났다. 상대 파고비들은 대부분 1.0 이하로 나타났으나 정점 W0에서의 유의파고가 작았던 시기에는 1.0을 초과하는 값을 보이기도 하였다.

Table 4에는 정점 W0에서의 유의파고의 크기로 구분한 구간별로 정점 W1과 W2에서의 상대파고비들의 평균값을 정리하였으며, 이를 살펴보면 전반적으로 잠제에 의한 파고 저감효과는 입사파고의 크기에 비례하는 것으로 나타났다. 입사 유의파고가 2.0 m 이하일 때는 W1 지점보다 W2 지점에서의 파고 저감효과가 양호하게 나타났으나 유의파고가 2.0 m 이상인 경우에는 반대로 W1 지점보다 W2 지점에서의 파고 저감효과가 상당히 작게 제시되었다. 이러한 경향은 정점 W2에서의 수심이 3.7 m로 정점 W1에서의 수심 3.5 m에 비해 약간 더 깊었던 점도 영향을 미쳤을 것으로 사료되나 수치모형실험 등에 의한 추가 검토가 필요한 부분이다.

Table 5에는 정점 W0에서의 침투주기의 크기로 구분한 구간별로 정점 W1과 W2에서의 상대파고비들의 평균값을 정리하였으며 후자가 전자에 비해서 대부분 작은 것으로 분석

**Table 3.** Distribution of infra-gravity wave height and period measured at St. W0 from Aug. 18 2015 to Jan. 21 2016

$H_{igw}$ (m) \ $T_{igw}$ (sec)	$\leq 0.05$	0.05 ~ 0.10	0.10 ~ 0.15	0.15 ~ 0.20	0.20 ~ 0.25	0.25 ~ 0.30	0.30 ~ 0.35	0.35 ~ 0.40	0.40 ~ 0.45	0.45 ≤	Sum	Ratio (%)
$\leq 30$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30~40	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	0.2
40~45	751	43	2	-	-	-	-	-	-	-	796	31.9
45~50	885	211	52	11	3	-	-	-	-	-	1,162	46.5
50~55	213	64	34	29	25	10	7	4	2	-	388	15.5
55~60	65	9	1	7	4	5	9	8	5	-	113	4.5
60 ≤	21	2	-	-	2	1	-	-	4	3	33	1.3
Sum	1,941	329	89	47	34	16	16	12	11	3	2,498	100.0
Ratio (%)	77.7	13.2	3.6	1.9	1.4	0.6	0.6	0.5	0.4	0.1	100.0	



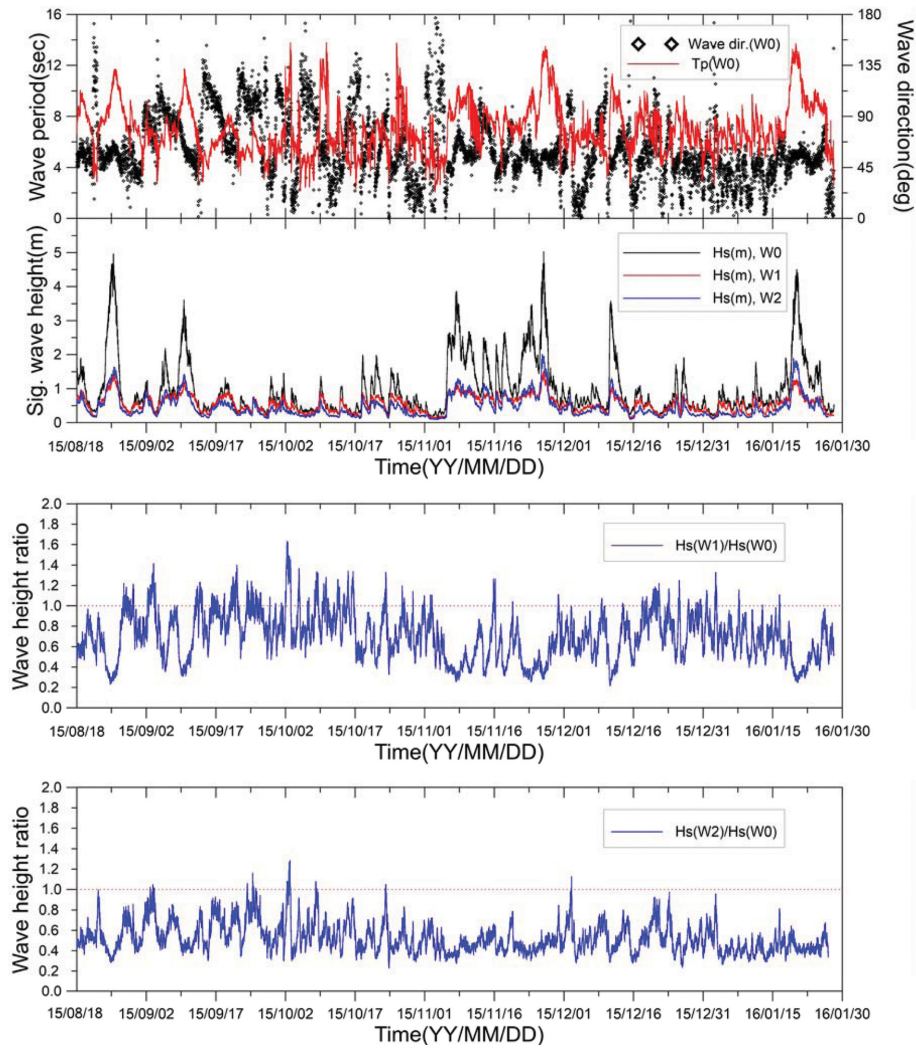


Fig. 4. Time series of observed short-period wave data.

Table 4. Wave transmission coefficient at Sts. W1 and W2 according to incident wave height at St. W0

Level of $H_s$	$K_t$		Number of occurrence
	$W_1/W_0$	$W_2/W_0$	
$H_s < 1.0$ (m)	0.81	0.56	5,433 (69.4%)
$1.0 \leq H_s < 2.0$ (m)	0.54	0.46	1,509 (19.3%)
$2.0 \leq H_s < 3.0$ (m)	0.37	0.42	599 (7.6%)
$3.0 \leq H_s < 4.0$ (m)	0.32	0.40	206 (2.6%)
$H_s \geq 4.0$ (m)	0.29	0.37	86 (1.1%)

Table 5. Wave transmission coefficient at Sts. W1 and W2 according to peak period of incident waves at St. W0

Level of $T_p$	$K_t$		Number of occurrence
	$W_1/W_0$	$W_2/W_0$	
$T_p < 6.0$ (sec)	0.75	0.55	2,444 (31.2%)
$6.0 \leq T_p < 8.0$ (sec)	0.75	0.53	3,236 (41.3%)
$8.0 \leq T_p < 10.0$ (sec)	0.60	0.48	1,473 (18.8%)
$10.0 \leq T_p < 12.0$ (sec)	0.56	0.49	491 (6.3%)
$T_p \geq 12.0$ (sec)	0.49	0.49	189 (2.4%)

되었다. 즉, 정점 W2에서는 상대파고비들이 첨두주기의 크기에 상관없이 0.48~0.55의 상당히 일정한 범위로 제시된 반면, 정점 W1에서는 첨두주기가 8초 이하였을 때는 상대파고비가 0.75로 상당히 컸으나 주기가 길어짐에 따라 0.60에서 0.49까지 감소되는 경향을 나타냈다.

앞에서 설정한 유의파고 2.0 m 이상의 사상들에 대해서만 주기 구간별로 분석하여 Table 6에 정리하였다. 이 경우에는 전체 자료에 대한 결과와는 상당히 달라서 전반적으로 W2 지점보다 W1 지점에서의 파고 저감효과가 양호하게 나타났

다. 그 원인을 분석하기 위하여 이 자료들(정점 W0에서 유의파고가 2.0 m 이상인 자료)의 파랑장미도를 작성하여 Fig. 5에 제시하였다.

유의파고 2.0 m 이상 내습 시의 파랑장미도 분석결과 전년에 걸쳐 NE 및 ENE 파랑이 대부분을 차지하며, 하계에는 ENE 파랑, 동계에는 NE 파랑이 주로 내습하는 것으로 나타났다. 유의파고 2.0 m 이상의 NE 및 ENE 파랑이 내습하는 경우 W2 지점은 북측 인근에 헤드랜드가 위치하여 구조물에 의한 회절과 및 반사파 등에 의한 영향을 W1 지점에 비

**Table 6.** Wave transmission coefficient at Sts. W1 and W2 according to peak period of incident wave height over 2.0 m at St. W0

Level of $T_p$	$K_t$		Number of occurrence
	$W_1/W_0$	$W_2/W_0$	
$6.0 \leq T_p < 8.0$ (sec)	0.36	0.39	128 (14.4%)
$8.0 \leq T_p < 10.0$ (sec)	0.35	0.40	381 (42.8%)
$10.0 \leq T_p < 12.0$ (sec)	0.35	0.41	244 (27.4%)
$T_p \geq 12.0$ (sec)	0.34	0.46	138 (15.5%)

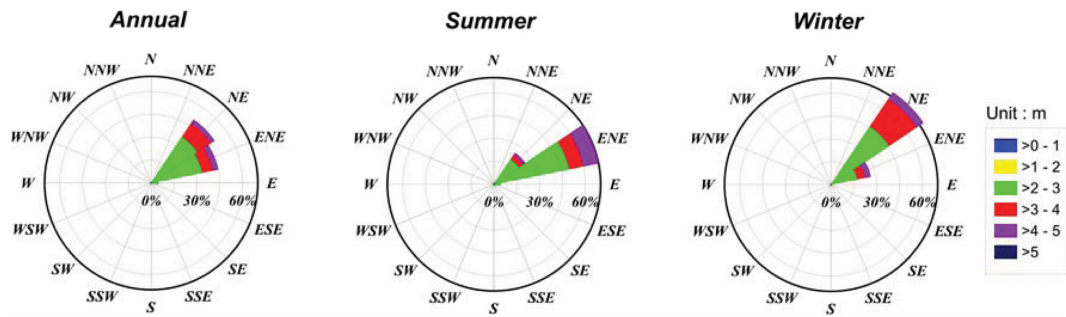
해서 상대적으로 많이 받는 것이 영향을 미쳤을 것으로 사료되며 명확한 원인 분석을 위해서는 향후 수치모형실험 등을 통한 추가 연구를 수행할 필요가 있다.

추가적으로 TTP 소파블록식 제체를 대상으로 하는 경우, 불규칙과 실험에 의한 Takayama et al.(1988)의 파고전달률 관계식(Ministry of Oceans and Fisheries, 2016)에 의한 파고전달률과 관측치에 의한 파고전달률을 비교, 분석하였다.

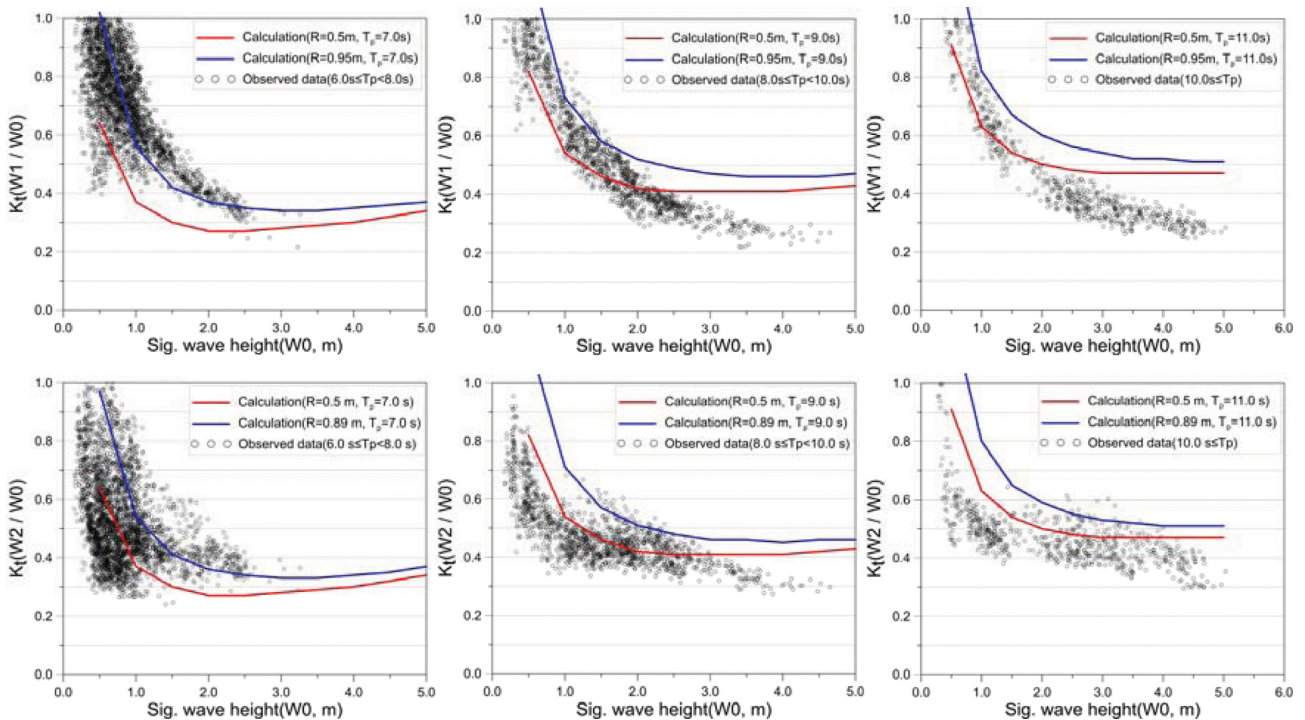
$$K_t = -0.92\left(\frac{B}{L_o}\right) + 0.42\left(\frac{R}{H_o'}\right) + 3.80\left(\frac{H_o'}{L_o}\right) + 0.51 \quad (3)$$

여기서,  $B$ 는 잠제 마루폭(m),  $L_o$ 는 심해파장,  $H_o'$ 는 환산심해파고,  $R$ 은 수면에서 마루까지의 수심을 의미한다. Takayama 제안식에 의한 파고전달률( $K_t$ )을 산정하기 위해서 마루수심은 실시설계 시에 계획된 0.5 m와 실험역에 설치된 잠제의 마루수심 조사결과 0.95 m(남측 1번 잠제), 0.89 m(남측 2번 잠제)를 적용하고 주기는 7초, 9초, 11초로 각각 구분하여 파고전달률( $K_t$ )을 산정한 후 관측치와 함께 Fig. 6에 도시하였다(참조 Table 10, Fig. 9).

분석결과 주기 6초에서 8초 이내, 유의파고 2.0 m 이상의 중력파 내습 시에는 W1 지점과 W2 지점 모두 관측치에 의한 파고전달률( $K_t$ )이 실험역에 설치된 마루수심을 적용한 Takayama의 제안식을 사용한 파고전달률( $K_t$ )에 비해서 다소 크게 나타났다. 주기 8초와 10초 이상, 유의파고 2.0 m 이상



**Fig. 5.** Directional distributions of significant wave heights over 2.0 m at St. W0 (2013/06/19~2016/01/27).



**Fig. 6.** Observed and calculated wave transmission coefficient at Sts. W1 and W2 according to peak period of incident waves at St. W0.

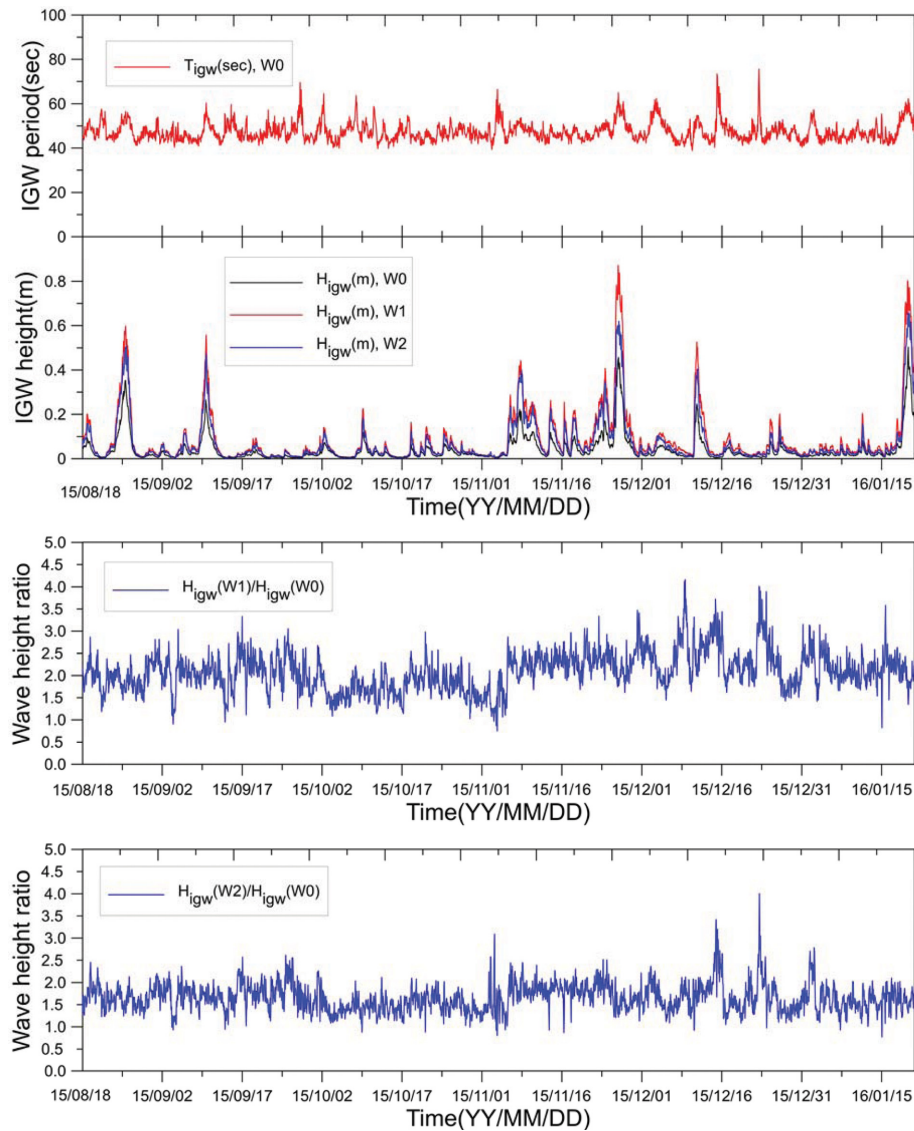


Fig. 7. Time series of observed infra-gravity wave data.

의 중력파 내습 시의 파고전달률( $K_i$ ) 분석결과 W1, W2 지점 모두 실패역에 설치된 마루수심을 적용한 Takayama의 제안식보다 대부분 작게 산정되었다. 따라서 영랑동 해안의 해안침식에 주요 원인으로 파악되는 파고 2.0 m, 주기 8초 이상의 중력파 내습 시의 영랑동 해안 남측 잠제 2기는 최근 연안정비사업 설계 시에 많이 사용하는 Takayama의 제안식에 비해서 파고저감 효과가 좋은 것으로 검토되었다.

### 3.2.2 중력외파에 대한 파에너지 저감 효과분석

중력파의 경우와 동일한 기간(2015/8/18~2016/1/21)에 관측된 원시자료를 분석하여 3개 정점(정점 W0~W2)에서의 중력외파 특성과 잠제 후면에서의 파고전달률을 분석하였다. 남측 잠제의 외측에 위치한 정점 W0과 배후에 위치한 정점 W1과 W2에서 관측한 중력외파 자료의 시계열을 Fig. 7에 도시하였다. 이 그림에서는 위에서부터 정점 W0에서의 중력외파의 주기, 정점 W0~W2에서의 중력외파의 파고, 정점 W0

에 대한 정점 W1에서의 중력외파 파고비( $H_{igwW1}/H_{igwW0}$ ), 그리고 정점 W0에 대한 정점 W2에서의 중력외파 파고비( $H_{igwW2}/H_{igwW0}$ )의 시계열이 각각 제시되었다. 중력외파의 주기는 Table 3에 제시되었던 것처럼 대부분 40~55초의 범위로 나타났다. 중력외파의 파고는 정점 W1에서 가장 크고 W2, W0의 순서로 나타났다. 이는 호형 해안과 헤드랜드 및 잠제로 구성된 수역에서 중력파에 비해 상대적으로 주기가 긴 중력외파의 증폭효과가 강하게 형성된 것이 이유로 보이나 동 수역에서의 부분적인 공진 효과도 포함된 것으로 보여서 수치실험 등에 의한 검토가 추가되어야 할 것이다.

Table 7에는 정점 W0에서의 중력외파의 주기의 크기로 구분한 후 주기 구간별로 정점 W1과 W2에서의 상대파고비들의 평균값을 정리하였다. 이를 살펴보면 주기에 거의 무관하게 일정한 값들을 보였으며 전반적으로 W1 지점보다 W2 지점에서의 중력외파의 파고 저감효과가 양호하게 나타났다. 중력파의 경우에는 유의파고 2.0 m 이상(Table 6. 참조), 중력



**Table 7.** Wave transmission coefficient at Sts. W1 and W2 according to infra-gravity wave period at St. W0

Level of $T_{igw}$	$K_r$		Number of occurrence
	$W_1/W_0$	$W_2/W_0$	
$T_{igw} < 45$ (sec)	2.12	1.62	802 (32.1%)
$45 \leq T_{igw} < 50$ (sec)	2.08	1.66	1,162 (46.5%)
$50 \leq T_{igw} < 55$ (sec)	2.05	1.68	388 (15.5%)
$55 \leq T_{igw} < 60$ (sec)	2.04	1.71	113 (4.5%)
$T_{igw} \geq 60$ (sec)	2.26	1.89	33 (1.3%)

**Table 8.** Wave transmission coefficient at Sts. W1 and W2 according to infra-gravity wave period of incident infra-gravity wave height over 0.1 m at St. W0

Level of $T_{igw}$	$K_r$		Number of occurrence
	$W_1/W_0$	$W_2/W_0$	
$T_{igw} < 45$ (sec)	2.14	1.67	2 (0.9%)
$45 \leq T_{igw} < 50$ (sec)	2.22	1.86	66 (28.9%)
$50 \leq T_{igw} < 55$ (sec)	2.03	1.68	111 (48.7%)
$55 \leq T_{igw} < 60$ (sec)	2.02	1.58	39 (17.1%)
$T_{igw} \geq 60$ (sec)	1.91	1.46	10 (4.4%)

외파의 경우 파고 0.1 m 이상인 사상들에 대해서만 주기 구간별로 분석하여 Table 8에 정리하였으며, 정점 W0에서 중력외파 파고가 0.1 m 이상인 자료의 파랑장미도를 작성하여 Fig. 8에 제시하였다. 단, 중력파와 중력외파의 파향이 상당히 다를 가능성이 있음을 배제할 수는 없다.

중력외파 0.1 m 이상 내습 시의 파랑장미도 분석결과 중력파의 경우와 유사하게 전년에 걸쳐 NE 및 ENE 파랑이 우세하며, 하계에는 ENE 파랑, 동계에는 NE 파랑이 주로 내습하는 것으로 나타났다.

중력외파 파고저감 효과 분석결과 중력파와 달리 전체 자료와 파고 0.1 m 이상 일 때 자료의 파고저감 효과 및 경향이 유사하게 나타나 W1 지점보다 W2 지점이 양호한 것으

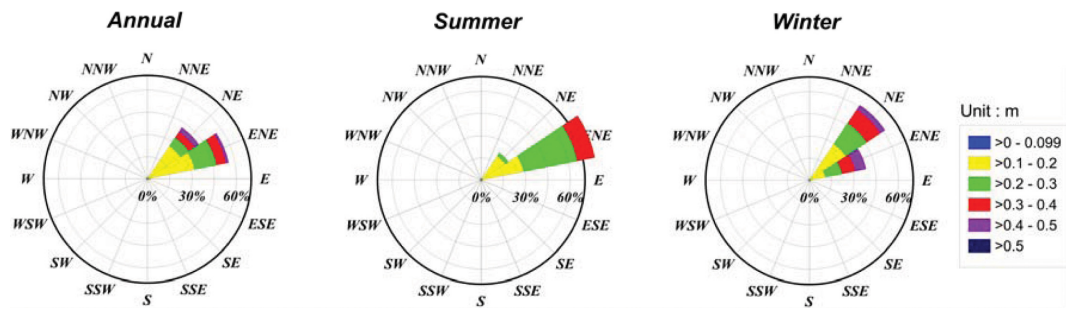
로 검토되었다.

중력외파에 대해서는 파고 감쇠가 별로 이루어지지 않았을 뿐만 아니라 반사파나 공진 등에 의해 오히려 파고가 증대되었다. 단, 잠제가 없는 상황에서 동일한 위치에서의 중력외파의 파고비 검토가 없어서 확실하지는 않다.

### 3.2.3 설계조건과의 비교 분석

영랑동 해안에 설치된 잠제는 영랑호 하구 퇴적방지시설 타당성조사 및 기본·실시설계용역(Sokcho City, 2008)에서 계획하였으며, 설계 시의 파고전달률은 50년 빈도 설계파(파고 4.0 m, 주기 11.07 sec) 조건일 때 0.17, 평상파(파고 1.5 m, 주기 6.5 sec) 조건일 때 0.20으로 설계하였다. 잠제 외측(AWAC) 관측 자료에서 실시설계 시의 대상파랑 조건과 유사한 입사파 조건을 추출하여 분석한 결과 50년 빈도 설계파와 유사한 파랑 내습 시의 파고전달률은 0.32(W1), 0.38(W2)로 산정되었으며, 평상파와 유사한 파랑 내습 시의 경우 0.57(W1), 0.46(W2)으로 분석되어 설계 시에 비해서 잠제의 파고저감 효과가 작은 것으로 분석되었다(Table 9. 참조).

이와 같은 분석결과는 설계 시에 계획된 잠제 제원과 실효역에 설치된 잠제 제원의 차이에서 발생하였을 것으로 사료되며, 국내·외 인공리프 설계기준 및 설계사례 연구(DY Engineering, 2014)에서 조사한 자료에 의하면 영랑동 해안의 남측 잠제들은 설계 시에 계획된 잠제의 마루수심 D.L.(-)0.5 m에 비해서 약 0.4 m 정도 깊은 D.L.(-)0.9 m 정도로 설치되어 있는 것으로 조사되었다(Table 10. 참조). Table 10을 살펴보면 남측 1번 잠제에서는 마루수심이 0.72~1.22 m(평균치 0.95 m), 남측 2번 잠제에서는 마루수심이 0.52~1.62 m(평균치 0.89 m), 그리고 북측 잠제에서는 마루수심이 1.02~2.62 m(평균치 1.79 m)로 나타나서 설계에서 적용된 0.5 m에 비해 0.39~0.45 m 정도 깊게 유지되고 있는 것으로 나타났다. 이러한 마루수심의 차이가 설계 시의 파고전달률( $K_r$ )에 비해 관

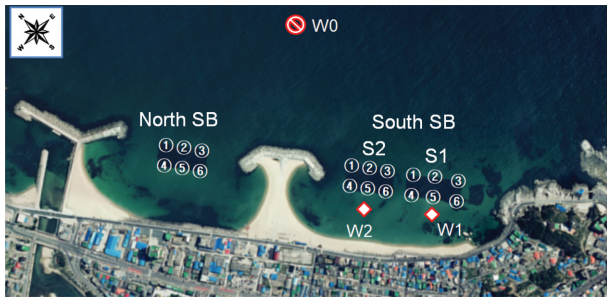
**Fig. 8.** Directional distributions of infra-gravity wave heights over 0.1 m at St. W0 (2015/08/18~2016/01/21).**Table 9.**  $K_r$  results according to incident wave height

Items	Detail design ( $K_r$ )	Wave observation ( $K_r$ )		Wave condition (St. W0)
		St. W1	St. W2	
Design wave ( $H = 4.0$ m, $T = 11.07$ sec)	0.17	0.32	0.38	$3.5 \text{ m} \leq H_s < 4.5 \text{ m}$ , $10 \text{ sec} \leq T_p < 12 \text{ sec}$
Ordinary wave ( $H = 1.5$ m, $T = 6.5$ sec)	0.20	0.57	0.46	$1.0 \text{ m} \leq H_s < 2.0 \text{ m}$ , $6 \text{ sec} \leq T_p < 8 \text{ sec}$



**Table 10.** Depth of crest of submerged breakwater

No. of points	Depth of crest (D.L.(-))			
	Design criteria	S1	S2	N
①	0.50 m	0.92 m	1.62 m	1.82 m
②		1.22 m	0.62 m	2.32 m
③		1.02 m	0.82 m	2.62 m
④		0.82 m	1.02 m	1.02 m
⑤		1.02 m	0.52 m	1.12 m
⑥		0.72 m	0.72 m	1.82 m
Average	0.50 m	0.95 m	0.89 m	1.79 m

**Fig. 9.** Location of crest height measurement points in the submerged breakwaters.

측값이 상당히 크게 제시되는 점을 설명해주는 것으로 생각된다. 이렇게 시공된 잠제의 마루수심이 설계에 비해 상당히 커지는 점은 향후의 유사한 설계 및 시공에 참고되어야 할 것이다. 단, 길이 100 m 또는 130 m, 폭 40 m의 잠제의 마루수심을 단지 6개 지점에서의 측정값으로 대표하는 것은 오차를 유발할 가능성이 존재함에 유의할 필요가 있다.

#### 4. 결 론

동해안 해수욕장의 해안침식피해 대책으로 수중에 설치되어 경관을 훼손하지 않고 파랑을 저감시킬 수 있는 잠제공법이 많이 적용되고 있으나, 파랑저감 효과에 대한 실험적 평가 사례가 부족한 실정이다. 특히, 단주기파의 경우에는 국내 외 실험적 평가 사례가 다소 있으나, 유의파고 2.0 m 이상의 폭풍파와 함께 표사이동에 의한 연안지형에 직접적인 영향을 미치는 중력외파(Infra-gravity wave, IGW)에 대한 연구는 아직까지 수행된 사례가 거의 없다.

본 연구에서는 국내 최초로 대규모 연안정비사업이 시행된 속초시 영랑동 해안에 설치된 잠제의 성능평가를 위해 잠제 전면과 후면에서 파랑연속관측을 수행하고 단주기파와 중력외파에 대해서 각각 파고전달률( $K$ )을 산정하였으며, 설계 시에 계획한 파고저감 효과와도 비교, 분석하였다.

단주기파의 경우 전체적으로 남측 1번 잠제 배후(W1)에서 약 29%의 파고를 저감시키고 남측 2번 잠제 배후(W2)에서 약 48%의 파고를 저감시키는 것으로 나타났으며, 잠제 전면에서 2.0 m 이상의 유의파고가 내습하는 경우 남측 1번 잠

제 배후(W1)에서 약 65%의 파고를 저감시키고 남측 2번 잠제 배후(W2)에서 약 59%의 파고를 저감시키는 것으로 나타나 어느 정도의 잠제 성능을 유지하고 있는 것으로 평가되었다. 하지만 실시설계 시 계획된 파고저감 효과와 관측결과를 비교, 분석해 보면 파고저감 효과는 설계 시 계획에 비해서 다소 떨어지는 것으로 분석되었다. 이와 같은 분석 결과는 설계 시에 계획된 잠제 제원과 실험역에 설치된 잠제 제원의 차이에 의해서 발생하였을 것으로 사료된다.

중력외파의 경우 입사파고에 비해서 남측 1번 잠제 배후(W1)와 2번 잠제 배후(W2)에서 파고전달률( $K$ )이 2.11과 1.71로 증폭되는 것으로 분석되어 2번 잠제 배후(W2)의 파고 증폭이 1번 잠제 배후(W1)에 비해서 작은 것으로 나타났다.

#### 감사의 글

본 논문은 한국해양과학기술원의 주요사업 “연안침식저감원천기술 개발(PE99523)”과 2018년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 사업 “연안재해 방지를 위한 흐름 및 파랑 저감형 2중 월류식 인공리프 개발”의 지원을 받아 수행되었습니다.

#### References

- Aono, T., Cruz, E.C., Onaka, S. and Goto, T. (1995). Field monitoring of waves and currents on artificial reef. Proceedings of Japan Coastal Engineering, JSCE, Vol 42, pp. 761-765 (in Japanese).
- Cho, H., Jeong, W., Baek, W. and Kim, S. (2012). Analysis of the variation pattern of the wave climate in the Sokcho coastal zone. J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 24(2), 120-127 (in Korean).
- DY Engineering (2014). Artificial reef design criteria and design case study at domestic and overseas (in Korean).
- Kim, K.-H. and Shin, B.-S. (2014). Field monitoring examination on wave energy dissipation effects by submerged artificial reefs. J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 26(1), 1-8 (in Korean).
- Mark A. Davidson, Ian L. Turner and Kristen D. Splinter (2013). Predicting shoreline response to cross-shore processes in a changing wave climate. Coastal Dynamics, 2013, pp. 431-442.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010). The Establishment of 10 years Plan for Coastal Management (in Korean).
- Ministry of Oceans and Fisheries (2014). Modification of the 2nd coast rehabilitation plan (in Korean).
- Ministry of Oceans and Fisheries (2016). Design standards and interpretation of coastal facilities (in Korean).
- Ryu, K.-H. and Jeong, W. (2015). Analys of the wave control effects of submerged breakwater by wave field monitoring in Namhangjin. J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 27(4), 274-279 (in Korean).

- Sokcho City (2001). Feasibility study and Basic, Detailed design for Coastal erosion Prevention in Yeongnangdong (in Korean).
- Sokcho City (2008). Feasibility study and Basic, Detailed design for Yeongnangho estuary Prevention of sedimentation (in Korean).
- Takayama, T. and Ikeda, N. (1988). Wave transformation behind a broad submerged breakwater and effects of the breakwater on wave over-topping. Report of the Port and Harbour Research Institute, 27, 63-92 (in Japanese).
- Thiebaut, S., McComb, P. and Vennell, R. (2013). Prediction of coastal far infragravity waves from sea-swell spectra. J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, 139(1), 34-44.
- Wada, K., Fukuhama, M. and Kimura, Y. (2006). A Study on the Evaluation of the Effectiveness of the Artificial Reef Installed in the Numazu District, Fuji Coastal Area. Proceedings of Japan Coastal Engineering, JSCE, 53, 511-515 (in Japanese).
- 
- Received 26 February, 2018
- Accepted 9 March, 2018