

수중구조물의 파고전달계수 산정식의 현장 적용성 분석

(1. 이안제와 잠제로 구성된 경우)

Field Applicability Analysis of Wave Transmission Coefficient Formulas for Submerged Structures (1. A System Composed of Detached Breakwaters and Submerged Breakwaters)

류경호* · 정예찬** · 이동호*** · 정원무****

Kyong-Ho Ryu*, Ye-Chan Jeong**, Dong-Ho Lee*** and Weon-Mu Jeong****

요지 : 본 연구에서는 국내 최초로 대규모 연안정비사업이 시행된 속초시 영랑 지구와 울진군 봉평 지구에 설치된 잠제의 성능평가를 위해 잠제 전면과 후면에서 파랑연속관측을 수행하고 파고전달계수를 산정하였으며, Takayama et al.(1985)의 산정식과 이의 적용성을 확장한 Lee and Bae(2020)의 산정식의 현장 적용성도 검토하였다. 영랑과 봉평 지구의 외해 측의 자료들의 회귀식을 이용하여 주기와 파고에 따라 그룹화하였으며 산정식들의 적용 범위와 유사한 그룹에 대해 관측치와 산정식 적용 결과들을 비교하였다. 영랑 잠제의 경우 입사파고가 3 m를 초과할 때는 관측치보다 Takayama et al.(1985)의 산정식에 의한 파고전달계수가 크고 3 m보다 작을 때는 반대로 나타났다. 봉평 잠제의 경우 입사파고에 무관하게 관측치보다 Takayama et al.(1985)의 산정식에 의한 파고전달계수가 크게 나타나며 파고가 작을수록 파고전달계수가 증가되었다. 상대여유고가 0.2~1.0, 파형경사가 0.01~0.06에 속하는 자료들만 포함한 결과에서 Lee and Bae(2020)의 산정식에 의한 파고전달계수들은 상대상단폭이 줄어들며 따라 증가하며 수리실험 결과와 같은 경향성을 나타냈다.

핵심용어 : 파고전달계수, 산정식, 수중구조물, 마루높이, 현장관측, 수리실험

Abstract : In this study, to evaluate the performance of submerged breakwaters installed in the Yeongrang district in Sokcho and the Bongpyeong district in Uljin, where large-scale coastal maintenance projects were implemented for the first time in Korea, continuous wave observations were conducted in front and behind the submerged breakwaters to calculate the wave transmission coefficient. Furthermore, the field applicability of the empirical formulas by Takayama et al. (1985) and Lee and Bae (2020), which extended the applicability of the former, was reviewed. Using the regression equations of the offshore data in the Yeongrang and Bongpyeong districts, the data were grouped according to wave period and wave height, and the observed values were compared with the results of the formulas for groups similar to the applicable ranges of the formulas. For the Yeongrang submerged breakwater, when the incident wave height exceeded 3 m, the wave transmission coefficient by the Takayama et al. (1985) formula was greater than the observed value, and the opposite was true when it was less than 3 m. For the Bongpyeong submerged breakwater, regardless of the incident wave height, the wave transmission coefficient from the Takayama et al. (1985) formula was consistently larger than the observed values, and the transmission coefficient increased as the wave height decreased. In the results including only data with a relative freeboard of 0.2 to 1.0 and a wave steepness of 0.01 to 0.06, the wave transmission coefficients from the Lee and Bae (2020) formula increased as the relative crest width decreased, exhibiting the same tendency as the hydraulic experiment results.

Keywords : formula for wave transmission coefficient, submerged structure, crest height, field measurement, hydraulic experiment

*한국해양과학기술원 연구원(Research Scientist, Maritime ICT & Mobility Research Department, Korea Institute of Ocean Science and Technology)

** (주)해안해양기술 사원(Engineer, Coast and Ocean Technology Research Institute)

*** (주)해안해양기술 차장(Senior Manager, Coast and Ocean Technology Research Institute)

**** (주)해안해양기술 고문(Corresponding author: Weon-Mu Jeong, Advisor, Coast and Ocean Technology Research Institute, #2407, A-dong, Hyundai Knowledge Industrial Center, 70 Dusan-ro, Geumcheon-gu, Seoul 08584, Korea, Tel: +82-2-2104-6606, wmj1960@cotri.co.kr)

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 있다. 그러나 실패역에서 효과를 검증하는 성능평가 사례는 최근에 강릉 남해 해수욕장(Kim and Shin, 2014), 강릉 남항진(Ryu and Jeong, 2015), 속초 영랑(Jeong et al., 2018)에 설치된 잠제에 대해서 잠제 전면과 후면의 파랑관측 자료를 이용해서 단주기파 제어 효과를 검토한 정도에 그치고 있다. Kim and Shin(2014)은 양양군 남해 지역에 설치된 중앙 잠제(길이 160 m, 폭 40 m)의 외측(수심 16.5 m)과 잠제 후면(수심 3.7 m)에서 약 1개월간 실시한 파랑관측을 통하여 파고전달계수를 분석하고 유의파주기 4초 이하에서는 약 0.40, 4~5초에서는 약 0.55, 5~6초에서는 약 0.57, 6초 이상에서는 약 0.58로 나타났다고 제시하였다. Ryu and Jeong(2015)은 강릉 남항진 3번 잠제 전후의 약 4개월 간의 파랑관측을 통하여 유의파고 2 m 이상인 입사파에 대해 파고전달계수가 약 0.43으로 나타났다고 제시하였다. 한편, Jeong et al.(2018)은 속초시 영랑 지구에 설치된 잠제의 전면과 후면에서 파랑관측을 수행하고 단주기파와 중력외파에 대해서 각각 파고전달계수를 산정하였으며, 설계 시에 계획한 파고저감 효과와도 비교, 분석하였다. 이들에 따르면 남측 2번 잠제의 경우 전체 자료에 대해서는 파고전달계수가 약 0.52, 2 m 이상의 유의파고에 대해서는 약 0.41로 나타났다. 또한 이들은 Takayama et al.(1985)의 파고전달계수 산정식을 관측치와 개략적으로 비교하였으며 그 결과 유의파고 2 m 이상 및 유의파주기 8초 이상의 파에 대해서는 산정식에 의해 구해진 파고전달계수가 관측치보다 큰 것으로 제시하였다. 해외의 경우 파고전달계수의 산정에 관해서는 많은 수리모형실험 연구 사례가 있으며, 일례를 들어 Takayama et al.(1985), Takayama and Ikeda(1988), Van der Meer et al.(2005)은 수리실험 데이터를 바탕으로 잠제의 마루폭과 상대 여유수심을 변수로 하는 파고전달계수 산정식을 제안하였다. 그리고 Johnson et al.(2011)은 실패역 현장 모니터링을 통해 잠제에 의한 파랑 에너지 감쇠 효과를 실증적으로 분석하였다.

Lee and Bae(2020)에 따르면 국내에서 일반적으로 적용하고 있는 투과형 수중구조물에 대한 파고전달계수 산정은 Takayama et al.(1985)의 연구가 대표적이며, 국내 항만 및 어항설계기준(Ministry of Oceans and Fisheries, 2014)에도 이들의 연구 성과가 수록되어 있다. 이 연구 성과는 설계과

랑 조건을 대상으로 한 투과형 수중구조물의 파고전달계수 산정에 있어서는 적용성이 충분하지만, 수중구조물의 상대상단폭(수중구조물의 상단폭/입사파의 파장)이 0.7보다 크게 되면 음(-)의 전달계수가 산정되는 문제점이 있다(Lee and Bae, 2020). 또한 기존 연구 성과의 대부분이 상대상단폭이 증가함에 따라 파고전달계수가 지수적인 감소를 보이는데 반해 Takayama et al.(1985)의 산정식은 선형적인 감소를 보인다(Lee and Bae, 2020). 단, 파고전달계수 산정식을 도출한 수리모형실험들은 2차원 수조에서 실시된 반면 실제 현장에 설치된 수중구조물들은 헤드랜드 등과 같은 이안제와 같이 축조된 경우도 상당수에 달하는 것에 유의할 필요가 있다.

본 연구에서는 먼저 2장에서 국내의 침식방지시설 설계에서 사용되는 Takayama et al.(1985)의 파고전달계수 산정식 및 이를 개선한 Lee and Bae(2020)의 산정식을 소개한다. 3장에서는 속초시 영랑 지구와 울진군 봉평 지구의 침식방지시설 소개, 해당지역 주변에서 수집된 파랑관측자료 분석 등을 수행한다. 4장에서는 관측자료 분석에 의한 파고전달계수와 산정식들에 의한 값들을 비교 분석하고 이들의 현장 적용성을 평가한다. 마지막으로 결론에서는 본 연구의 주요 결론을 기술한다.

2. 파고전달계수 산정식

2.1 Takayama et al.(1985)의 산정식

Takayama et al.(1985), Takayama and Ikeda(1988)는 테트라포드로 피복된 소파 블록 형식의 체체를 대상으로 불규칙하고 실험을 실시하여 아래와 같이 파고전달계수(K_t) 관계식을 제시하였다(아래의 식은 상대상단폭이 작은 경우($W/L_o < 0.4$)에 대한 결과임에 유의할 필요가 있다).

$$K_t = -0.92\left(\frac{W}{L_o}\right) + 0.42\left(\frac{R_c}{H_o}\right) + 3.80\left(\frac{H_o'}{L_o}\right) + 0.51 \quad (1)$$

$$H_o' = K_d K_r (H_{1/3})_o \quad (2)$$

여기서, W 는 잠제 마루폭(m), L_o 는 심해파장(m), H_o' 는 환산 심해파고(m), R_c 는 수면에서 마루까지의 수심(m), K_d 는 회절계수, K_r 은 굴절계수, $(H_{1/3})_o = H_o$ 는 심해 유의파고를 각각 의미한다(이 식에서 파고는 유의파고, 주기는 유의파주기를 각각 나타낸다). 한편, 환산심해파고의 정의에 대한 설명은 Ministry of Oceans and Fisheries(2024)를 참조하였다.

2.2 Lee and Bae(2020)의 산정식

Lee and Bae(2020)는 Takayama et al.(1985)의 실험이 전술한 것처럼 상대상단폭이 작은 경우에 대한 결과여서 주기가 상대적으로 짧은 파랑에 대한 영향을 검토하기에는 부적절한 것으로 평가하였다. 이들은 2가지 규격의 테트라포드를 적용한 잠제의 전달파고 산정을 위한 2차원 수리모형실험을

실시하고 그 결과를 통합하여 다음과 같은 투과형 수중구조물의 파고전달계수 산정식을 제안하였다.

$$K_t = 0.380 \exp\left(\frac{R_c}{d}\right) + 0.095 \exp\left(\frac{R_c}{H_s}\right) + 0.072 \ln\left(\frac{H_s}{L_s}\right) - 0.188 \ln\left(\frac{W}{L_s}\right) + 0.013 \quad (3)$$

여기서, d 는 수중구조물의 설치수심(m), H_s 는 입사파고(m), L_s 는 수중구조물 설치(잠제 전면)수심에서의 유의파주기(T_s)에 해당되는 파장(m)을 각각 나타낸다(위의 산정식의 도출에 사용된 무차원변수들의 적용 범위가 $0.1 \leq R_c/d \leq 0.2$, $0.2 \leq R_c/H_s \leq 1.0$, $0.01 \leq H_s/L_s \leq 0.06$, $0.04 \leq W/L_s \leq 1.5$ 로 제시되는 것에 유의해야 한다).

Takayama et al.(1985)과 Lee and Bae(2020)의 산정식들은 사용하는 파랑 조건에서 차이를 보인다. 실제 해역의 경우 전자는 잠제로부터 상당한 거리에 있는 외해 쪽의 입사파

조건을 사용할 수도 있으나 후자에서는 잠제 전면의 파를 관측하거나 아니면 적절한 수치실험을 통한 후측으로 잠제 전면에서의 파랑 조건을 구해야 한다.

3. 관측자료 수집·분석

3.1 대상 지역 및 구조물

본 연구에서 대상으로 한 지역은 속초시 영랑 지구와 울진군 봉평 지구이며 대상으로 한 수중구조물은 헤드랜드와 잠제로 구성된 침식방지시설들이다. 먼저 속초시 영랑동 해안에서는 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 건설(Table 1, Fig. 1 참조)하였고, 2013년에 연금정과 남측 잠제 1구간 사이에 약 30 m 잠제를 추가 설치하였다. 울진군 죽변면의 봉평 지구 해안에 설치된 해

Table 1. Informations of submerged structure with wave monitoring systems installed

Region	Submerged structure	Width (m)	Length (m)	Designed freeboard (m)	Investigated freeboard (m)
Yeongrang, Sokcho	South submerged breakwater2	40	100	D.L.(-)0.5	D.L.(-)0.72~1.22
Bongpyeong, Uljin	South submerged breakwater	50	100	D.L.(-)1.5	D.L.(-)0.82~1.12

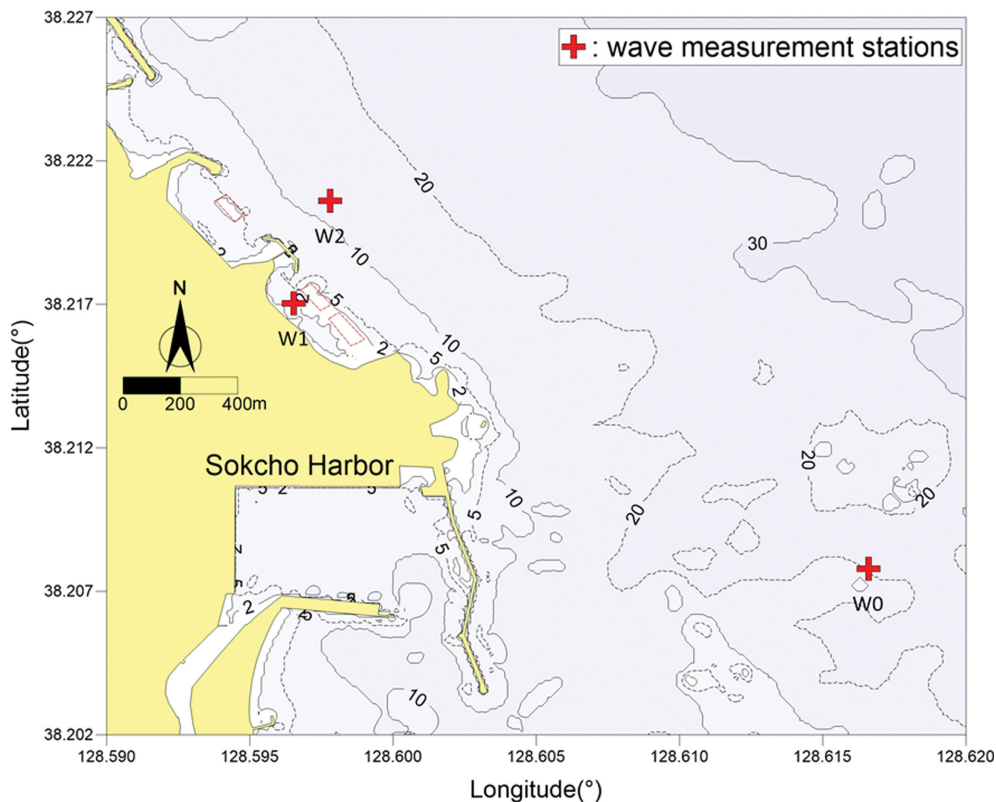


Fig. 1. Location map of wave measurement stations around Yeongrang, Sokcho (Red dotted rectangles indicate the location of submerged breakwaters).

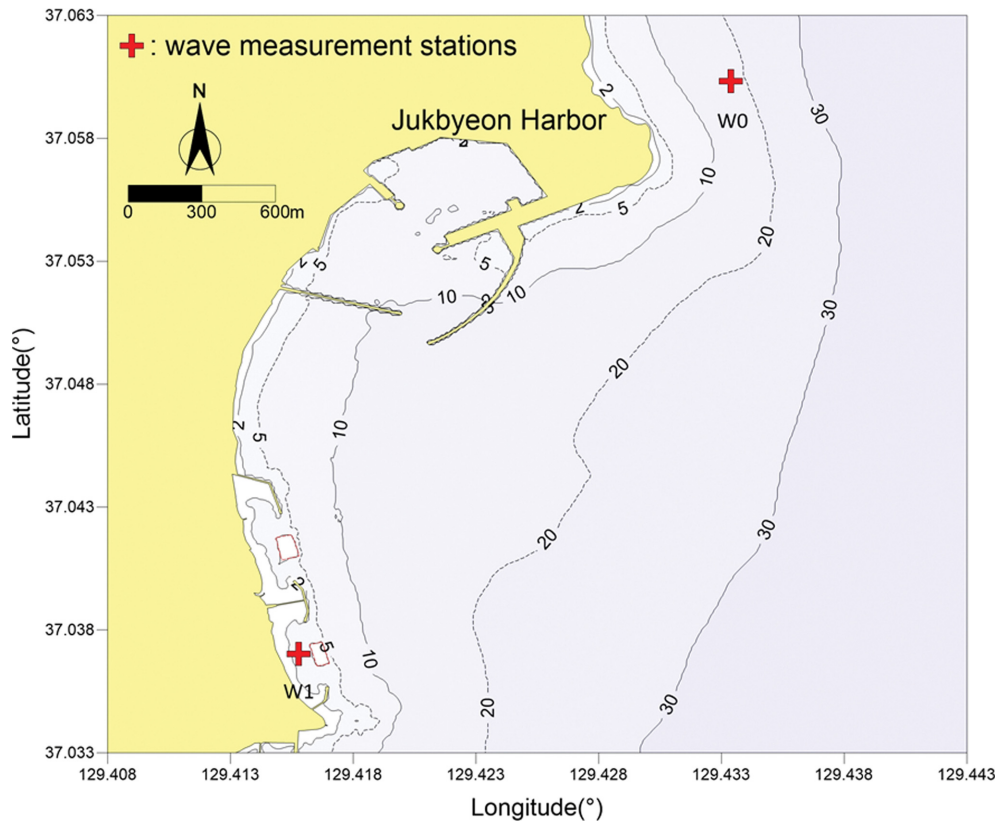


Fig. 2. Location map of wave measurement stations around Bongpyeong, Uljin (Red dotted rectangles indicate the location of submerged breakwaters).

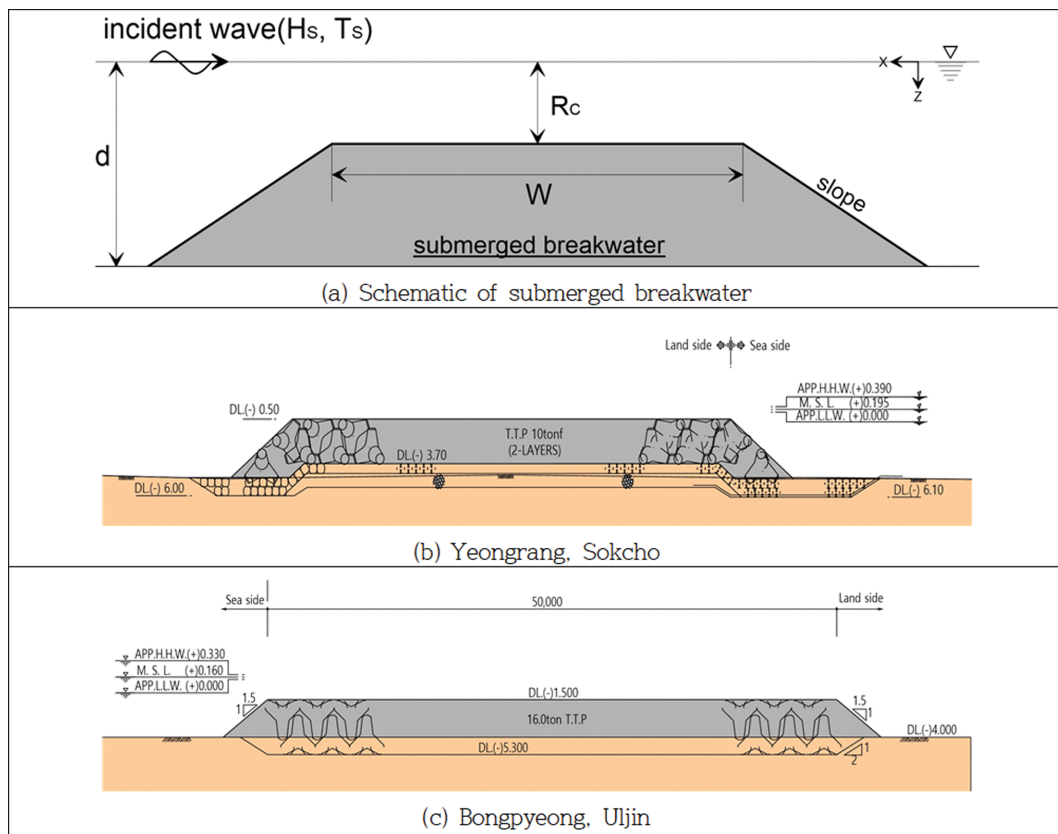


Fig. 3. Cross-section diagrams of submerged breakwaters, (a) Schematic of submerged breakwater, (b) Yeongrang, Sokcho, (c) Bongpyeong, Uljin.

Table 2. Basic information of the wave observations at Yeongrang, Sokcho and Bongpyeong, Uljin

Area	Station	Observation periods	Location		Water depth (m)
			Latitude	Longitude	
Yeongrang, Sokcho	W0	2015.7.1.~2016.4.30	38°12'28.02"N	128°36'59.73"E	18.5
	W1	2015.8.18.~2016.1.27	38°13'01.30"N	128°35'47.50"E	3.7
	W2	2015.7.1.~2016.4.6	38°13'14.04"N	128°35'55.38"E	14.5
Bongpyeong, Uljin	W0	2015.7.1.~2016.4.30	37°03'37.20"N	129°26'00.20"E	18.0
	W1	2015.7.29~2016.4.5	37°02'13.30"N	129°24'56.80"E	3.5

드랜드와 잠제를 포함한 침식방지시설은 남측 잠제 1기(100 m)와 남측 헤드랜드가 축조(Uljin County, 2003)되었으며, 이후의 주변 환경의 변화 등을 고려하여 북측 잠제(100 m)와 T형 및 북측 헤드랜드들이 추가로 축조(Pohang Regional Office of Oceans and Fisheries, 2008)되었다(Table 1, Fig. 2 참조). Fig. 3에는 식(1)과 (3)에 사용된 잠제의 제원에 관련된 변수들을 표시한 모식도, 영랑 지구의 남측 잠제2와 봉평 지구의 남측 잠제의 단면도를 각각 제시하였다. 영랑 지구의 남측 잠제2는 10톤 테트라포드를 2층으로 적재하여 체체를 구성하였으며 설계 마루높이는 D.L.(-)0.50 m였다. 봉평 지구의 남측 잠제는 16톤 테트라포드를 단층으로 적재하여 체체를 구성하였으며 설계 마루높이는 D.L.(-)1.50 m였다. 참고로 평균해수면(M.S.L)은 전자는 (+)0.195 m, 후자는 (+)0.160 m였다. 영랑 지구의 St. W0에서 남측 잠제2의 전면까지의 직선 거리는 약 2 km, St. W2에서 잠제2의 전면까지는 약 370 m이며, 봉평 지구의 St. W0에서 남측 잠제의 전면까지의 직선 거리는 약 3 km이다.

한편, 영랑 지구 남측 잠제2의 설계파 조건은 유의파고 4.0 m, 주기 11.07초였으며 이 때의 파고전달계수는 0.17로 설정되었다. 추가로 평상파 조건으로 유의파고 1.5 m, 주기 6.5초 조건을 도입하였으며 이 때의 파고전달계수는 0.20으로 설정되었다. 봉평 지구 남측 잠제의 설계파 조건은 유의파고 4.8 m, 주기 12.0초였다. 참고로, KAIA(Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, 2014)에서는 동해안의 주요 잠제에 대해 변위조사를 실시하였으며 영랑의 남측 잠제2와 봉평의 남측 잠제에 대해서는 각각 6개 정점에서 잠수부를 이용한 잠제의 마루높이를 조사하여 D.L.(-)0.95 m와 D.L.(-)0.97 m의 평균값을 제시하였으며, 설계 당시의 마루높이가 현재 마루높이와 차이가 있다고 기술하였다(Table 1 참조). 6개 지점에서의 마루높이 조사 결과로 폭 40 m, 길이 100 m의 테트라포드로 피복된 잠제의 마루높이를 정확하게 평가하는 것은 쉽지 않다고 생각된다. 그러나 Table 1에 제시된 것처럼 조사된 6개소의 마루높이가 모두 설계값인 D.L.(-)0.50 m보다 큰 0.72 m 이상인 점은 체체가 변형되었을 가능성이 큰 것을 나타냈다.

3.2 파랑관측자료

본 연구에서는 속초시 영랑 지구와 울진군 봉평 지구의 침

식방지시설 전후에서 한국해양과학기술원에서 수행한 파랑관측자료들을 수집하여 분석하였다. 이 자료들은 두 해역에 내습하는 파랑 특성을 파악하고 잠제와 헤드랜드로 구성된 침식방지시설에 의한 파랑저감 효과를 분석하기 위해서 실시한 실험해역 파랑 모니터링에서 구해진 것들이다(Figs. 1 and 2, Table 2 참조).

속초 영랑과 울진 봉평의 Sts. W0와 W1에서는 수압식 파고계 WTG(Wave and Tide Gauge), 그리고 속초 영랑의 St. W2에서는 노르웨이 Nortek 사의 초음파식 파향·파고계 AWAC(Acoustic Wave And Current meter) 장비를 각각 사용하여 자료를 취득하였다. AWAC으로 관측된 파향·파고 자료는 Nortek사에서 제공하는 파랑자료 분석 프로그램 Storm64를 사용하여 분석하였고, 스펙트럼법과 파별분석법을 모두 적용하여 분석하였다. 그리고 수압식 파고계로 취득된 수압 자료에는 수심과 주기별로 미리 구해진 수압-해수면 변위 간의 전달함수를 수압 스펙트럼에 곱하여 해수면 변위에 대한 스펙트럼을 구하게 된다. 본 연구에서는 전체 자료에서 30분마다 2,048개의 0.5초 간격의 연속된 자료를 선택한 후 다음의 식(4)을 이용하여 유의파고와 평균주기를 산정하였다.

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

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(5)로 표현된다.

$$m_n = \int_{f_1}^{f_2} f^n \cdot S(f) df \quad (5)$$

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)이다. 일반적으로 약 95% 이상의 파 에너지가 포함되도록 상한 및 하한 절단 주파수(cutoff frequency)로 각각 $0.6f_p$, $3.0f_p$ (f_p = 첨두주파수)가 제안되고 있으나, 첨두주파수가 시간에 따라 변하는 파랑 특성으로 가변적인 적분 영역을 가지게 되는 단점이 있다. 본 연구에서는 Cho et al.(2012)의 연구 결과를 참조하여 고정 주파수 영역설정 방법을 사용하였으며 f_1 을 5/128 Hz(25.6초), f_2 를 64/128 Hz(2초)로 설정하였다. 한편 동일한 자료에 대해 영점상향교차법을 사용하여 유의과주기($T_{1/3}$)도 구하였다.

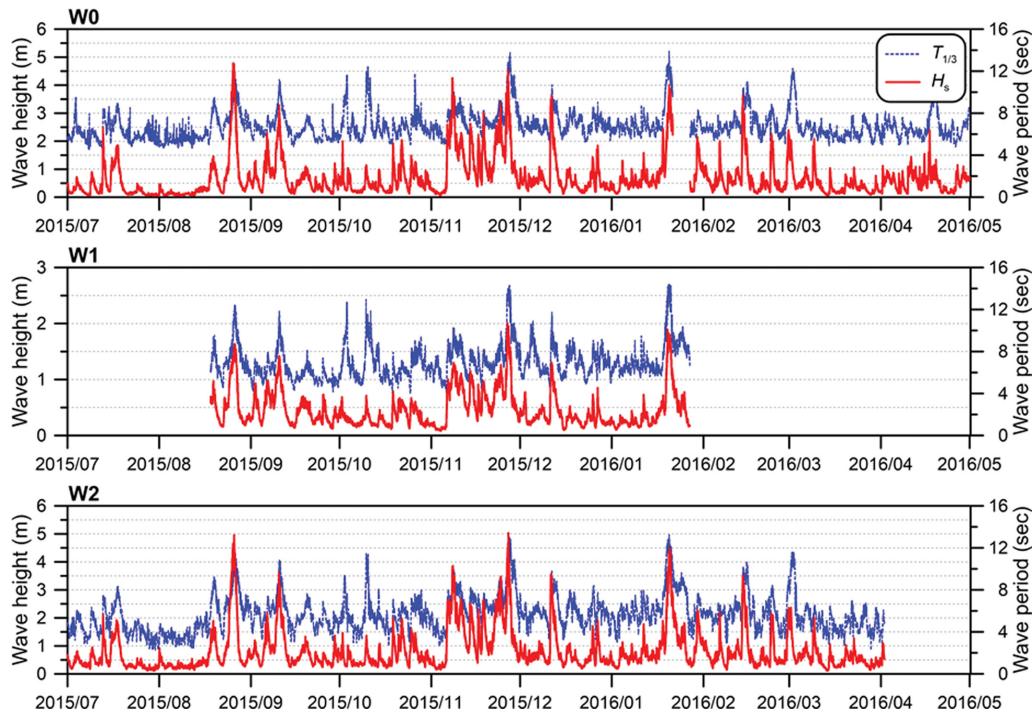


Fig. 4. Wave time-series data observed at the Sts. W0~W2 at Yeongrang, Sokcho.

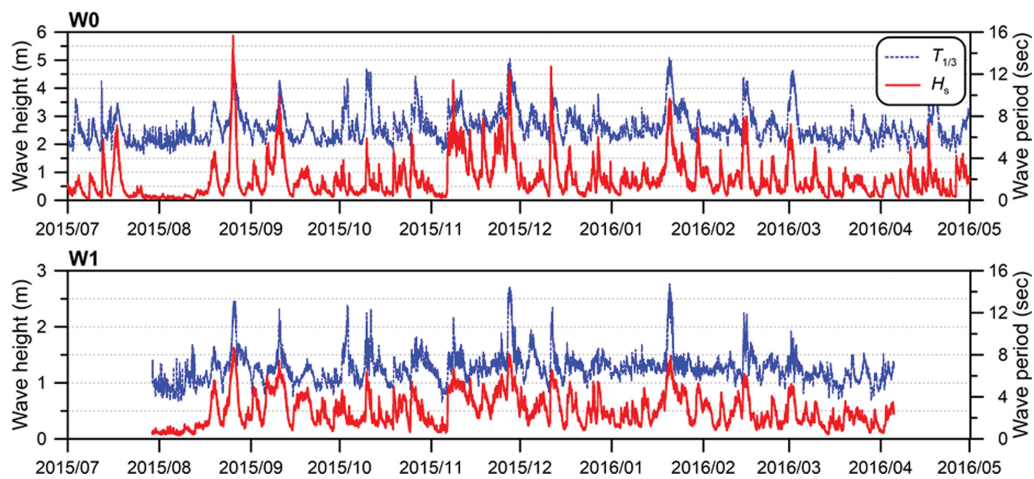


Fig. 5. Wave time-series data observed at the Sts. W0 and W1 at Bongpyeong, Uljin.

Fig. 4에는 속초 영랑 지구의 St. W0와 잠제 후면(St. W1), 헤드랜드 전면(St. W2), 그리고 Fig. 5에는 울진 봉평 지구의 St. W0와 잠제 후면(St. W1)에서 관측된 유의파고와 유의파주기의 시간적 변화를 도시하였다. 정점들 W0와 W1에서의 관측 시기에는 태풍 GONI(제1515호)에 의한 고파가 내습하였으며 속초 영랑의 St. W0에서는 8월 26일 1시에 4.78 m, 울진 봉평의 St. W0에서 8월 25일 23시에 5.88 m의 최대 유의파고를 각각 기록하였다. 속초의 St. W0에서는 그 외에 2015년 11월 8일 3시 30분에 4.25 m, 26일 23시에 4.55 m, 2016년 1월 20일 9시 30분에 4.01 m, 그리고 울진의 St. W0에서는 2015년 11월 8일 8시분에 4.29 m, 27일 4시 30분에 4.65 m, 12월 11일 12시 30분에 4.77 m의 유의파고가 4 m를 넘는 고파 이벤트들이 발생하였다.

Table 3에는 속초 영랑 지구의 St. W0(St. W1에서의 자료와 동기화하기 위해서 2015/08/18~2016/01/27의 자료를 사용)에서의 유의파고에 대해 0.5 m 간격, 그리고 유의파주기에 대해 2초 간격으로 구간을 설정하고 각 구간별 출현빈도와 출현율을 제시하였다. 유의파고의 경우 0.5 m 이하 구간(41.8%), 0.5~1.0 m 구간(32.6%), 1.0~1.5 m 구간(9.6%)으로 나타나서 파고 1.5 m 이하의 출현율이 84.0%에 달하였으며, 유의파주기의 경우 4~6초 구간(17.7%)과 6~8초 구간(64.0%)의 합이 81.7%로 크게 우세하게 나타났다. 단, 정점 W0들과 잠제 후면의 파랑관측자료들은 이격 거리가 2 또는 3 km 정도여서 엄밀하게는 동기화 조건에 전파시간의 반영이 필요하지만 이의 정확한 고려가 어려운 점을 감안하여 각 자료들의 시작 시각을 동기화의 기준으로 적용하였다.

Table 3. Distribution of significant wave height and significant wave period measured at St. W0 in Sokcho area from 2015/08/18 to 2016/01/27

H_s (m) \ $T_{1/3}$ (sec)	0.0 ~0.5	0.5 ~1.0	1.0 ~1.5	1.5 ~2.0	2.0 ~2.5	2.5 ~3.0	3.0 ~3.5	3.5 ~4.0	4.0 ~4.5	4.5 ~	Sum	Ratio (%)
≤ 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0.0
4~6	1,043	262	21	4	-	-	-	-	-	-	1,330	17.7
6~8	1,913	1,972	475	254	134	35	11	1	-	-	4,795	64.0
8~10	144	164	172	167	161	76	46	31	19	3	983	13.1
10~12	32	45	52	17	40	41	44	25	10	2	308	4.1
12 $\leq$	-	2	1	-	14	24	12	22	6	1	82	1.1
Sum	3,132	2,445	721	442	349	176	113	79	35	6	7,498	100.0
Ratio (%)	41.8	32.6	9.6	5.9	4.7	2.3	1.5	1.1	0.5	0.1	100.0	-

Table 4. Distribution of significant wave height and significant wave period measured at St. W0 in Uljin area from 2015/07/29 to 2016/04/05

H_s (m) \ $T_{1/3}$ (sec)	0.0 ~0.5	0.5 ~1.0	1.0 ~1.5	1.5 ~2.0	2.0 ~2.5	2.5 ~3.0	3.0 ~3.5	3.5 ~4.0	4.0 ~4.5	4.5 ~	Sum	Ratio (%)
≤ 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0.0
4~6	2,139	604	46	4	-	-	-	-	-	-	2,793	23.2
6~8	2,597	3,019	809	234	61	2	2	-	-	-	6,724	55.9
8~10	209	356	402	369	343	92	16	24	7	5	1,823	15.1
10~12	19	77	60	112	110	90	36	25	13	32	574	4.8
12 $\leq$	-	2	1	10	12	28	31	19	14	6	123	1.0
Sum	4,964	4,058	1,318	729	526	212	85	68	34	43	12,037	100.0
Ratio (%)	41.2	33.7	10.9	6.1	4.4	1.8	0.7	0.6	0.3	0.4	100.0	-

Table 4에는 울진 봉평 지구의 St. W0(St. W1에서의 자료와 동기화하기 위해 2015/07/29~2016/04/05의 자료를 사용)에서의 유의파고에 대해 0.5 m 간격, 그리고 유의파주기에 대해 2초 간격으로 구간을 설정하고 각 구간별 출현빈도와 출현율을 제시하였다. 유의파고의 경우 0.5 m 이하 구간(41.2%), 0.5~1.0 m 구간(33.7%), 1.0~1.5 m 구간(10.9%)으로 나타나서 파고 1.5 m 이하의 출현율이 85.9%에 달하였으며, 유의파주기의 경우 4~6초 구간(23.2%)과 6~8초 구간(55.9%)의 합이 79.1%로 크게 우세하게 나타났다. 한편, 해안침식을 유발하는 주요 대상파랑은 예를 들면 유의파고 2.0 m 이상의 폭풍파라고 볼 수 있으며, 내습파의 주기가 길수록 백사장 안쪽까지 run up이 발생하여 영랑과 봉평 지구와 같이 헤드랜드가 설치되고 해안에 호안도 설치된 경우 중복파를 유발시켜 국소 세굴과 침식을 발생시킬 가능성이 크다고 할 수 있다(Mark et al., 2013). Table 3과 4를 살펴보면 영랑과 봉평의 잠제 외측의 St. W0에서는 유의파고 2.0 m 이상의 파랑이 관측기간 동안 각각 10.1%와 8.0% 내습하였다. 동일한 관측기간에서 나타난 이러한 차이는 두 장소 사이의 거리가 상당히 떨어진 점과 관측기간의 차이가 상당히 큰 점(2015/08/18~2016/01/27과 2015/07/29~2016/04/05)에 기인된 것으로 생각된다.

3.3 파고-주기의 회귀분석

Fig. 6에는 속초 영랑의 St. W0(Fig. 6(a))와 울진 봉평의 St. W0(Fig. 6(b))에서 관측된 유의파고와 유의파주기의 산포도들을 도시하였다. 통상적으로 관측된 파랑 자료의 산포도

(scatterplot)는 분산이 커서 데이터의 규칙성을 직관적으로 파악하기 힘들다. 이를 보완하기 위해 주변 데이터의 부분적 흐름을 반영하여 부드러운 곡선을 그려주는 LOESS 기법(Cleveland, 1979; Cleveland, 1981; Becker, et al., 1988; Cleveland et al., 1992)을 적용하여 전반적인 데이터의 추세를 먼저 탐색하였다. 이때 분석에는 R 패키지 {stats}의 loess() 함수를 사용하였다(Fig. 6의 초록색 선). 특히 데이터가 부족한 주기와 파고 구간 끝부분에서 추세선이 비정상적으로 솟구치는 과적합 현상을 방지하기 위하여, 국소 회귀에 사용되는 다항식 차수를 1차로 제한하고(degree = 1), 평활도 파라미터를 최대로 설정(span = 1)하여 전체적인 흐름이 완만하고 안정적으로 반영되도록 조정하였다. 더 나아가 탐색된 비선형적 추세를 바탕으로 유의파주기와 유의파고의 상관관계를 수학적으로 정의하기 위하여 멱법칙(power law) 모델을 적용하였다(Fig. 6의 빨간색 선). 비선형 회귀분석 과정에서는 R 패키지 {minpack.lm}에서 제공하는 nlsLM() 함수를 사용하였다. 이 함수는 Levenberg-Marquardt 알고리즘을 기반으로 하여, 일반적인 비선형 최소제곱법(nls)보다 초기값 설정에 덜 민감하고 노이즈가 많은 데이터에서도 수렴성이 뛰어나 강건한(robust) 모델 피팅이 가능하다. 이러한 분석 결과를 바탕으로 본 연구에서 제안하는 유의파주기($T_{1/3}$)와 유의파고(H_s) 간의 관계식은 다음과 같다.

$$H_s = a_1 + a_2 (T_{1/3})^{a_3} \quad (6)$$

여기서 a_1 , a_2 , a_3 는 정점별 파랑 변환 특성을 반영하기 위해

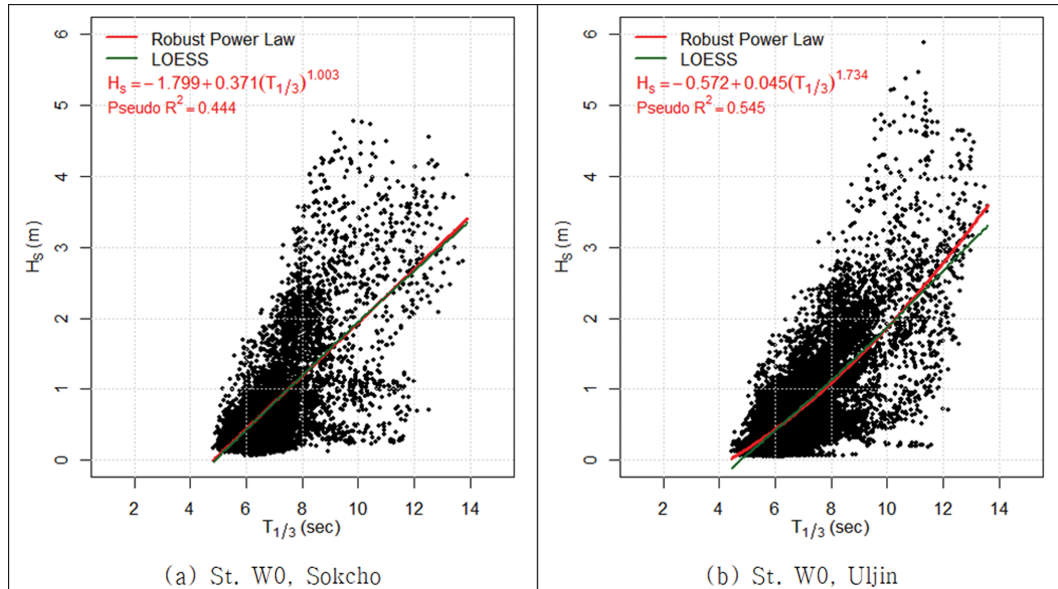


Fig. 6. Scatterplots of significant wave heights versus significant wave periods at Sts. W0 (—: non-parametric LOESS trends, —: fitted robust power law models).

자료로부터 추정된 경험적 회귀 계수(empirical coefficients)이며, 산정된 구체적인 계수값들은 Fig. 6의 좌상단에 각각 회귀식과 함께 제시하였다.

4. 파고전달계수 산정식의 적용성 분석

4.1 잠제의 파고전달계수 관측 결과

실측 자료 분석으로 잠제의 파고전달계수를 산출하려는 경우 해빈 변형에 미치는 영향이 적은 파랑 자료들(예를 들면 파고가 작거나 주기가 짧은 파)이 포함되면 파고전달계수가 매우 큰 값을 보이는 경우가 많으므로 적절하게 자료를 분리하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 위의 회귀식들에 유의파 주기 10.5초를 시작으로 6.5초까지 1초씩 줄이면서 대응되는 파고들을 산출하였다. Table 5에는 지역 별로 명명된 Group Y1~Y5, B1~B5의 분류 기준(유의파 주기 및 대응되는 유의파 고) 및 출현율들을 정리하였다. 참고로 Takayama et al.(1985)의 파고전달계수 산정식의 수리실험에 사용된 파랑조건은 $H_s = 1.8 \sim 8.0$ m, $T_{1/3} = 9.5 \sim 17.0$ 초의 범위였다. 이는 간단히

말하면 유의파고 1.8 m, 유의파주기 9.5초 이상인 파랑 자료로 볼 수 있으며, 따라서 속초 영랑의 Y4 그룹과 울진 봉평의 B4 그룹과 상당히 유사하였다. 한편, 영랑과 봉평 자료의 5개 그룹에 속하는 자료들의 상대상단폭(W/L_o)을 구하여 Table 5에 같이 표시하였으며 2.1절에 제시된 Takayama et al.(1985)의 파고전달계수 산정식의 적용 범위인 $W/L_o < 0.4$ 를 만족하는 그룹으로는 속초 영랑의 경우 그룹 Y3~Y5, 울진 봉평의 경우 그룹 B4~B5로 제시되었다.

Fig. 7에는 Table 5의 Group Y1과 B1에 각각 속하는 자료들을 사용하여 구한 잠제들의 외해(St. W0) 입사파고에 대응되는 파고전달계수들을 도시하였다. 설계 마루높이가 D.L.(-)0.5 m인 영랑 잠제의 경우 관측된 파고전달계수의 평균값이 외해 입사파고 4.5 m에서 0.3~0.4, 파고 2 m에서 0.35~0.55로, 그리고 설계 마루높이가 D.L.(-)1.5 m인 봉평 잠제의 경우 외해 입사파고 4.5 m에서 0.3~0.35, 파고 2 m에서 0.4~0.6으로 완만한 지수 형태로 증가하였다. Fig. 8에는 Table 5의 Group Y1과 B1에 각각 속하는 자료들을 사용하여 구한 Sts. W0에서의 파형 경사(wave steepness)에

Table 5. Clustering of observed wave data at Sts. W0 in Sokcho and Uljin

Area	Group	Classification criteria	Relative crest width	Ratio (%)
Yeongrang, Sokcho	Y1	$H_s \geq 0.63$ m and $T_{1/3} \geq 6.5$ sec	0.13~0.61	39.3
	Y2	$H_s \geq 1.00$ m and $T_{1/3} \geq 7.5$ sec	0.13~0.46	17.8
	Y3	$H_s \geq 1.38$ m and $T_{1/3} \geq 8.5$ sec	0.13~0.35	7.9
	Y4	$H_s \geq 1.75$ m and $T_{1/3} \geq 9.5$ sec	0.13~0.28	4.2
	Y5	$H_s \geq 2.13$ m and $T_{1/3} \geq 10.5$ sec	0.13~0.23	2.4
Bongpyeong, Uljin	B1	$H_s \geq 0.59$ m and $T_{1/3} \geq 6.5$ sec	0.17~0.76	41.3
	B2	$H_s \geq 0.91$ m and $T_{1/3} \geq 7.5$ sec	0.17~0.57	19.8
	B3	$H_s \geq 1.27$ m and $T_{1/3} \geq 8.5$ sec	0.17~0.44	10.8
	B4	$H_s \geq 1.66$ m and $T_{1/3} \geq 9.5$ sec	0.17~0.35	5.3
	B5	$H_s \geq 2.08$ m and $T_{1/3} \geq 10.5$ sec	0.17~0.29	2.5

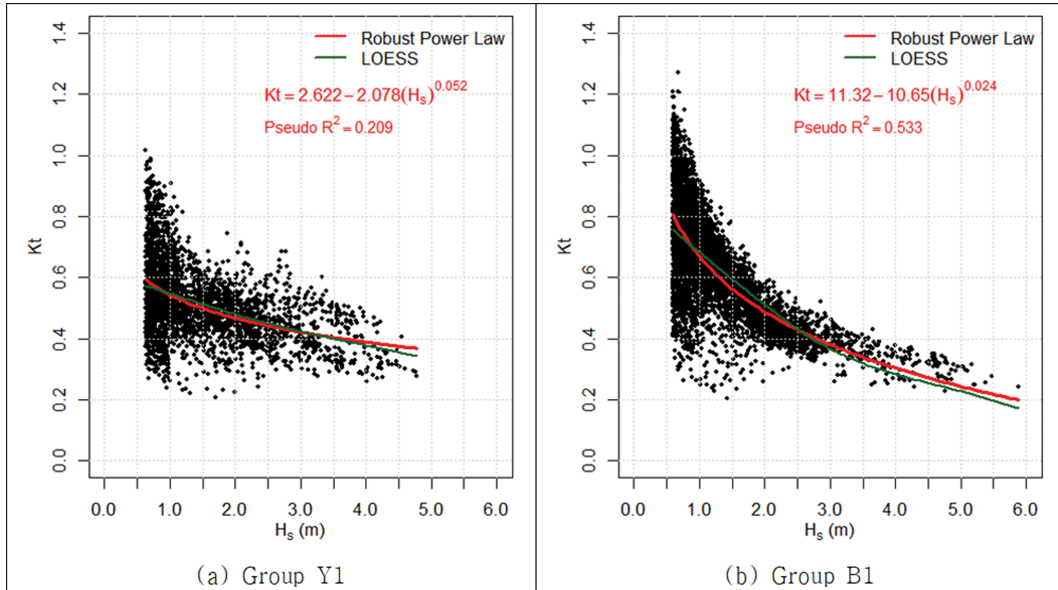


Fig. 7. Scatterplots of wave transmission coefficients versus significant wave heights at St. W0 of group Y1 and B1.

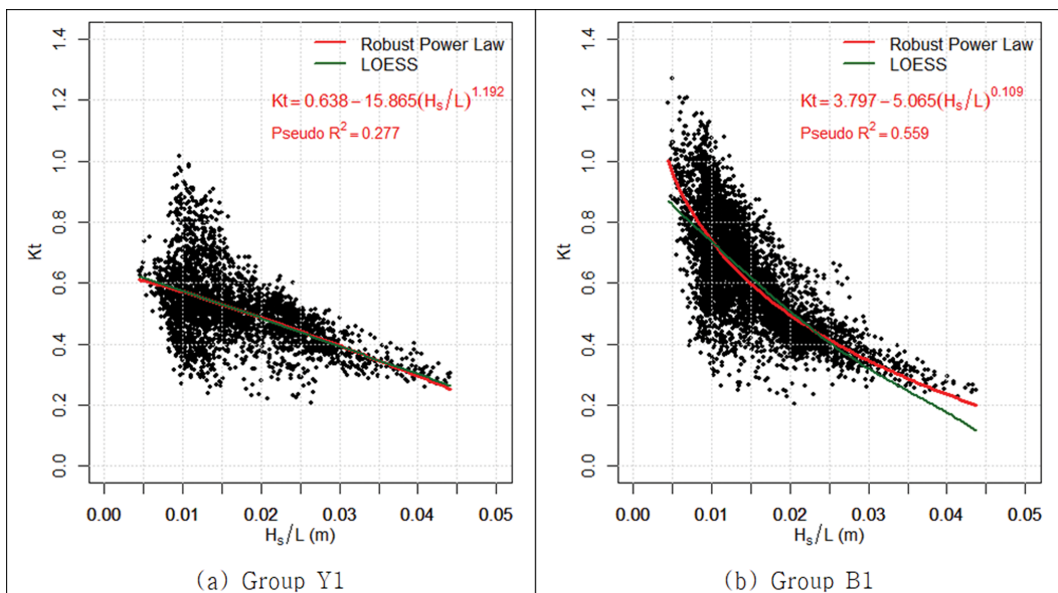


Fig. 8. Scatterplots of wave transmission coefficients versus wave steepness at St. W0 of group Y1 and B1.

대응되는 파고전달계수들을 도식하였다. 이들을 살펴보면 파고가 1 m 이상이거나 파형 경사가 0.015 이상일 때는 영랑과 봉평 잠제의 파고전달계수들이 상당히 유사한 경향을 나타내고 있다.

4.2 잠제의 파고전달계수 산정식 적용 결과

4.2.1 Takayama et al.(1985)의 산정식

여기서는 속초 영랑 지구와 울진 봉평 지구의 침식방지시설 주변의 St. W0에서의 유의파고, 유의파주기, 실시설계 시에 계획된 마루높이(단, 실효역에서의 장기관측자료임을 감안하여 평균해수면(M.S.L.)을 설계 마루높이에 추가하였음), 마루폭 등을 Takayama et al.(1985)의 산정식에 적용하여 파고

전달계수를 산정하였다.

Fig. 9에는 속초와 울진의 잠제 전면에서 관측된 파랑자료 중에서 입사파가 $W/L_o < 0.4$ 를 만족하는 Group Y3와 Group B4에 속하는 자료들에 대해 구해진 입사파고에 대한 잠제 후면에서의 파고전달계수들을 도식하였다. 이 그림에서 + 기호는 관측치, × 기호는 Takayama et al.(1985)의 산정식을 사용한 결과들을 각각 나타내며, (a)는 Table 5의 Group Y3, (b)는 Group B4에 속하는 자료들을 각각 사용한 결과들이다. 그림의 파란색 실선들은 식(6)에 기반한 회귀식들을 참고로 표시한 것이다. 영랑 잠제에 대한 Fig. 9(a)를 살펴보면 입사 파고가 3 m를 초과할 때는 관측치보다 산정식에 의한 파고 전달계수가 크고 3 m보다 작을 때는 산정식에 의한 결과가

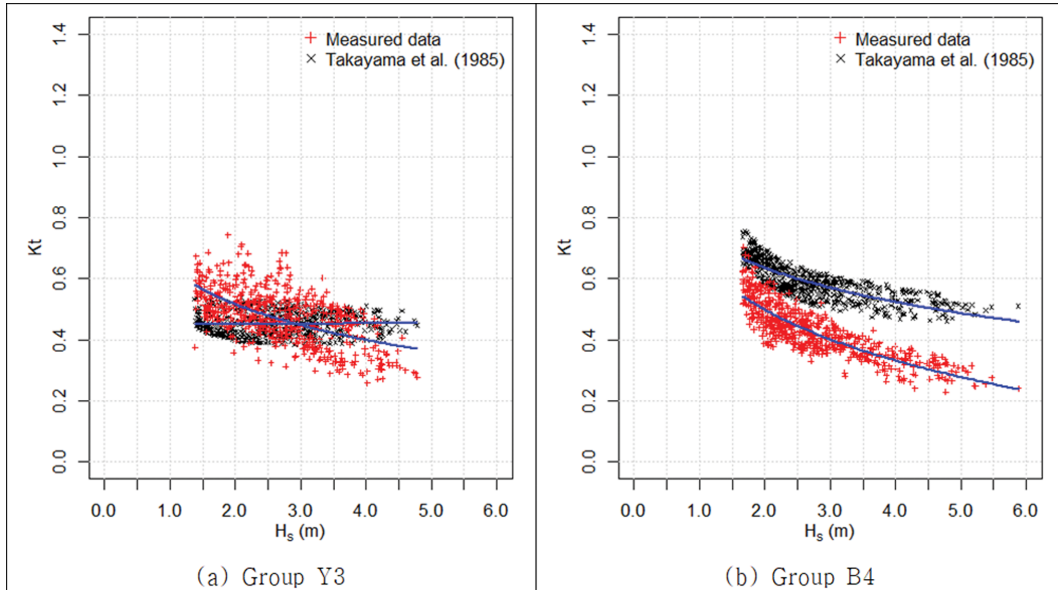


Fig. 9. Scatterplots of wave transmission coefficients versus significant wave heights at Sts. W1 of Sokcho and Uljin, (a) Group Y3, (b) Group B4.

작은 것을 알 수 있다. 봉평 잠제에 대한 Fig. 9(b)를 살펴보면 입사파고에 무관하게 관측치보다 산정식에 의한 파고전달계수가 크게 나타나며 파고가 작을수록 파고전달계수가 증가되었다. 한편, 영랑 지구 남측 잠제2의 설계파고인 유의파고 4 m에서는 관측치의 파고전달계수가 0.25~0.5의 범위였으며 설계 시의 0.17과는 상당한 차이를 보였다. 평상과 조건인 유의파고 1.5 m에서는 파고전달계수가 0.45~0.65의 범위였으며 역시 설계 시의 0.20과는 큰 차이를 나타냈다.

한편, 영랑과 봉평 지구의 잠제들에 대한 Takayama et al. (1985)의 산정식을 적용한 결과에서는 파고 변화에 따른 기울기와 파고전달계수의 두 가지 측면에서 모두 상당한 차이가 나타났다. 그 이유로는 먼저 두 지역의 잠제 전면에서 내습하는 파랑 특성이 영랑과 봉평의 Sts. W0에서 각각의 잠제 전면으로 전파한다고 가정할 때와는 다를 수 있다는 점이다. 영랑의 경우에는 남측 잠제2와 St. W0가 모두 주된 파향인 NE 방향으로 열려있으나 봉평의 경우에는 St. W0는 주된 파향으로 열려있는 반면 남측 잠제는 측면향에 의해 회절되거나 남북 방향으로 형성된 등수심선에 의해 굴절된 파가 내습하는 차이를 보인다. 이러한 점을 확인하기 위하여 SWAN (Simulation WAVes Nearshore) 모형(version 41.45)과 일본 기상청(JMA: Japan Meteorological Agency)에서 제공하는 JMA-MSM(Japan Meteorological Agency-Meso Scale Model) 바람장을 사용한 후측 실험으로 정점 W0와 잠제 전면에서의 파고를 재현하고 그 결과를 분석하였다. SWAN 모형에 대한 자세한 내용은 SWAN 매뉴얼(The SWAN team, 2019)에서 확인할 수 있다. 본 연구에서 설정한 SWAN 모형의 기본적인 실험조건들을 정리하였다. 수치실험 영역을 전해역과 상해역으로 구분하고 전해역은 경도 117.0~147.0°E, 위도 20.0~50.0°N의 범위에 대해 1/20°(약 5 km 해상도)의 크기로

구성된 601 × 601개의 격자망으로 구성하였다. 상해역은 영랑 지구의 경우 경도 128.58~128.63°E, 위도 38.19~38.24°N의 범위에 대해 1/10,000°(약 10 m 해상도)의 크기로 구성된 501 × 501개의 격자망도, 그리고 봉평 지구의 경우 경도 129.40~129.45°E, 위도 37.01~37.10°N의 범위에 대해 1/10,000°(약 10 m 해상도)의 크기로 구성된 501 × 901개의 격자망으로 각각 구성하였다. JMA-MSM 바람장은 2006년 3월부터는 매 3시간마다 위도 22.4°~50.4°N, 경도 120°~150°E의 범위에 대해 위도 방향 0.05°, 경도 방향 0.0625°의 해상도로 제공되고 있다. 기타의 실험조건에서는 파향 분할은 0~360°에 대해 50분할, 주파수 분할은 0.04~1.0 Hz의 범위에서 40분할을 적용하였으며 JONSWAP 스펙트럼을 가정하였다. 2015년 7월 1일부터 2016년 4월 30일까지 속초 영랑과 울진 봉평 지구의 W0 및 각 지구의 잠제 전면에서 후측된 유의파고들의 산포도와 결정계수 R^2 를 Fig. 10에 제시하였으며 이를 살펴보면 모두 양호한 재현성을 나타내었다($R^2 = 0.98, 0.96$). 한편, 영랑 지구의 선형회귀식의 기울기는 0.91, 봉평 지구의 경우는 0.73으로 제시되어 전술한 바와 같이 후자에서 회절 및 굴절의 영향이 더 크게 나타났으며 현장관측 파고를 파고전달계수 산정식에 사용할 때는 이러한 점을 충분히 고려해야 함을 알 수 있다. 두 번째는 Table 1에 나타난 것처럼 영랑의 남측 잠제2가 봉평 남측 잠제에 비해 폭이 10 m 좁고 설계 마루높이가 훨씬 낮은 점(D.L.(-)0.5 m와 D.L.(-)1.5 m)을 들 수 있다. 관측치에서 큰 차이가 나타나지 않은 이유로는 전술한 바와 같이 KAIA(2014)의 변위 조사 결과로 제시된 영랑의 남측 잠제2의 마루높이 평균값이 D.L.(-)0.95 m로 설계 시의 D.L.(-)0.50 m로 비슷했던 점을 고려하면 영랑의 남측 잠제2의 체제가 시공된 이후에 크게 변형되었을 것으로 추정할 수 있다. Fig. 3에 제시된 잠제의 단

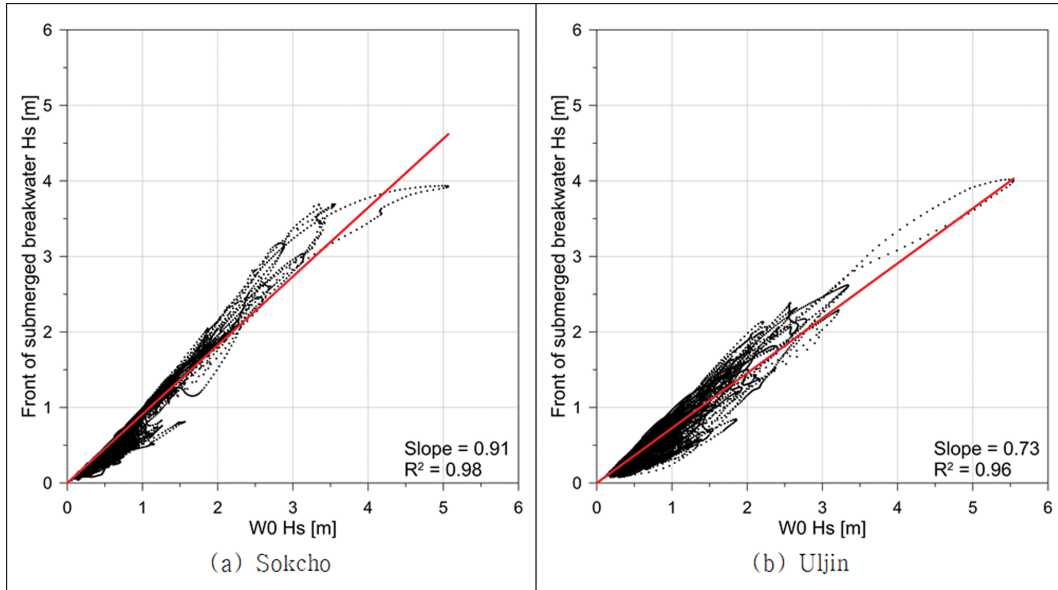


Fig. 10. A scatter plot of significant wave heights at stations W0 in Figs. 1 and 2 and in front of the submerged breakwater, hindcast using the SWAN model with JMA-MSM wind fields, (a) Sokcho area, (b) Uljin area.

면도들을 살펴보면 영양 잠제는 지반 개량이 포함된 반면 봉평 잠제는 테트라포드를 바로 설치(저면이 암반)하는 형식임을 알 수 있다.

4.2.2 Lee and Bae(2020)의 산정식

Takayama et al.(1985)의 산정식에는 환산심해파고, 그리고 Lee and Bae(2020)의 산정식에서는 잠제 전면의 파고가 사용되므로 외해와 잠제 전면에서의 동시관측자료가 확보되지 않는 한 현장관측을 통해서 양자의 적용성을 상호 비교하는 것은 쉽지 않다. 본 연구에서는 Lee and Bae(2020)의 산정식에 대해서는 속초 영양 지구의 St. W2의 자료를 잠제 전면의 파랑 조건(단, L_s 의 산정에는 St. W2의 유의파주기와 잠제 전면의 수심을 적용)으로 사용하여 관측치와 비교하였다.

Fig. 11에는 속초 영양 지구의 잠제 전면에 위치한 St. W2에서 관측된 유의파고와 유의파주기의 산포도들을 도시하였다. 여기서도 식(6)으로 제시되는 유의파주기($T_{1/3}$)와 유의파고(H_s) 간의 관계식을 구하여 그림에 각각 표시하였다. Lee and Bae(2020)의 산정식은 Takayama et al.(1985)의 산정식보다 짧은 주기의 파에도 적용이 가능한 것으로 제시되었다. Fig. 10의 회귀식에 유의파주기 4.5초를 적용하면 유의파고 0.43 m가 구해진다. 본 연구에서는 시험적으로 St. W2의 자료들에서 유의파주기가 4.5초 이상이고 유의파고는 0.43 m를 초과하는 범위에 속하는 약 73%의 자료를 Lee and Bae(2020)의 산정식에 적용하였다.

Fig. 12는 이 자료들을 Lee and Bae(2020)의 산정식에 적용하여 구한 파고전달계수(그림의 $\times$)를 관측치의 파고전달계수(그림의 $+$)와 같이 상대상단폭(W/L_s)의 변화에 따른 값으로 도시하였다. Fig. 12(a)는 약 73%의 모든 자료들에 대한

결과들이고 Fig. 12(b)는 상대여유고(R_c/H_s)가 0.2~1.0, 파형경사(H_s/L_s)가 0.01~0.06에 속하는 자료들만 포함하여 도시하였다. 먼저 관측치에 의한 파고전달계수는 사용된 자료에 파고가 작고 주기가 짧은 자료들이 많이 포함되어 있어서 그 값들이 0.25~1.1에 걸쳐 매우 넓게 분포되어 있다. Lee and Bae(2020)의 산정식에 의한 파고전달계수들은 그림의 (a)와 (b)를 비교해볼 때 W/L_s 가 0.7~1.4인 구간에서 파고전달계수가 0.4~0.45를 초과하는 자료들이 제거되었다. 그리고 Lee and Bae(2020)의 산정식에 의한 파고전달계수들은 상대상단폭이 줄어들에 따라 증가하며 이는 이들의 실험 결과와 같은 경향성을 나타냈다.

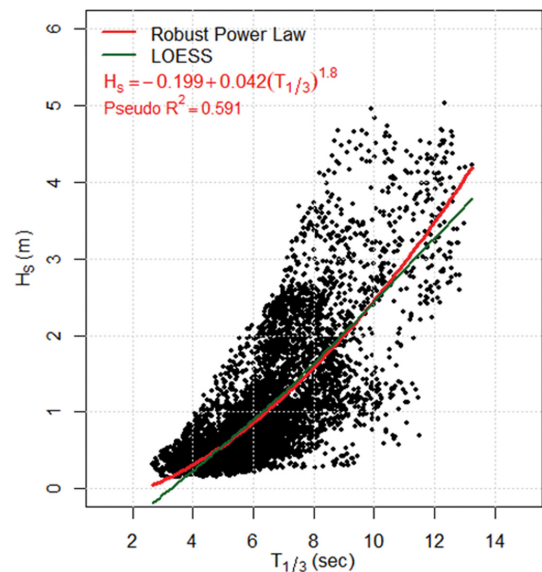


Fig. 11. Scatterplots of significant wave heights versus significant wave periods at St. W2 at Sokcho.

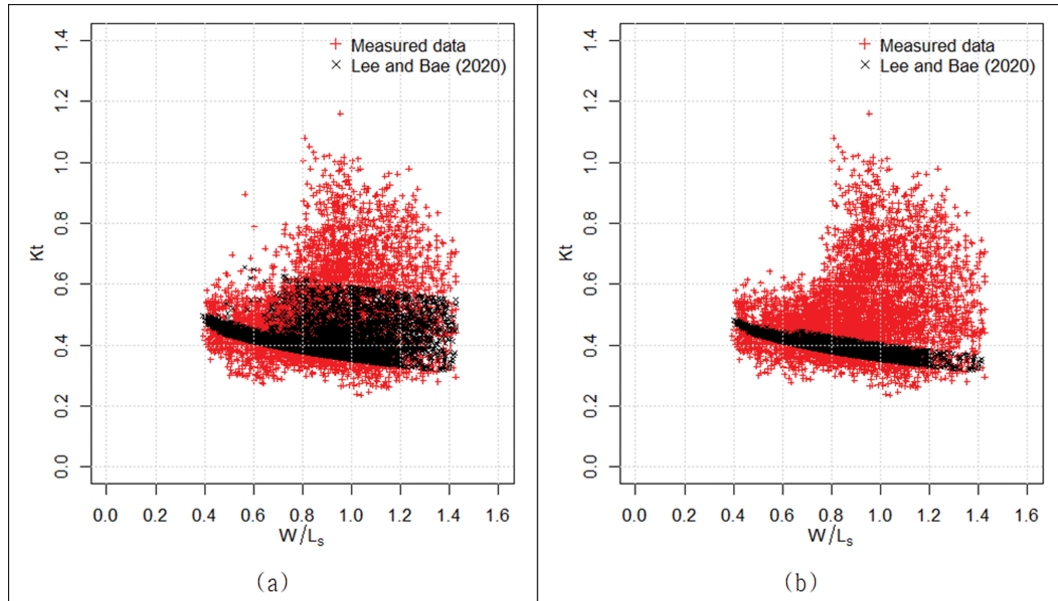


Fig. 12. Scatterplots of wave transmission coefficients versus relative crest width of south submerged breakwater 2 at Sokcho for wave data Group A1, (a) Total data, (b) Data satisfying $R_c/H_s = 0.2 \sim 1.0$ and $H_s/L_s = 0.01 \sim 0.06$.

5. 결 론

동해안 해수욕장의 해안침식피해 대책으로 수중에 설치되어 경관을 훼손하지 않고 파랑을 저감시킬 수 있는 잠제 공법이 많이 적용되고 있으나, 파랑저감 효과에 대한 실험적 평가사례가 부족한 실정이다. 본 연구에서는 국내 최초로 대규모 연안정비사업이 시행된 속초시 영랑 지구와 울진군 봉평 지구에 설치된 잠제의 성능평가를 위해 잠제 전면과 후면에서 파랑연속관측을 수행하고 파고전달계수(K_t)를 산정하였으며, Takayama et al.(1985)의 산정식과 이의 적용성을 확장한 Lee and Bae(2020)의 산정식의 현장 적용성도 검토하였다. 다만 본 연구의 대상인 속초 영랑과 울진 봉평 지구는 헤드랜드가 포함된 수중구조물로 구성되어 수리실험에 의한 산정식과는 평면 배치에 차이를 보이는 점에 유의할 필요가 있다. 본 연구에서 구해진 주요 토의사항 및 결론을 아래에 정리하였다.

- 관측된 파고 자료의 산점도(scatterplot)가 분산이 큰 단점을 보완하기 위해 LOESS 기법을 적용하고 멱법칙(power law) 모델을 사용하여 유의파고(H_s)와 유의파주기($T_{1/3}$) 간의 관계식을 $H_s = a_1 + a_2(T_{1/3})^{a_3}$ 의 회귀식으로 제시하였다.
- 영랑과 봉평 지구의 외해 측의 자료들의 회귀식을 이용하여 주기와 파고에 따라 5개 그룹으로 구분하였으며 Takayama et al.(1985)의 파고전달계수 산정식의 수리실험에 사용된 파랑조건은 각각의 4 그룹과 상당히 유사하였다. 그리고 상대상단폭 $W/L_o < 0.4$ 를 만족하는 것은 그룹 Y3~Y5 및 B4~B5로 제시되었다.
- 영랑 잠제(마루높이 D.L.(-)0.5 m)의 경우 입사파고가 3 m를 초과할 때는 관측치보다 Takayama et al.(1985)의 산정식에 의한 파고전달계수가 크고 3 m보다 작을 때는 반대

로 나타났다. 봉평 잠제(마루높이 D.L.(-)1.5 m)의 경우 입사파고에 무관하게 관측치보다 Takayama et al.(1985)의 산정식에 의한 파고전달계수가 크게 나타나며 파고가 작을수록 파고전달계수가 증가되었다.

- 영랑 지구 남측 잠제2의 설계파고인 유의파고 4 m에서는 관측치의 파고전달계수가 0.25~0.5의 범위였으며 설계치의 0.17과는 상당한 차이를 보였다.
- 속초 영랑 지구의 헤드랜드 외측의 St. W2의 자료들에서 유의파주기가 4.5초 이상이고 유의파고는 0.43 m를 초과하는 범위에 속하는 약 73%의 자료를 Lee and Bae(2020)의 산정식에 적용하였다. 상대여유고(R_c/H_s)가 0.2~1.0, 파형경사(H_s/L_s)가 0.01~0.06에 속하는 자료들만 포함한 결과에서 산정식에 의한 파고전달계수들은 상대상단폭이 줄어들며 따라 증가하며 수리실험 결과와 같은 경향성을 나타냈다.

References

- Becker, R.A., Chambers, J.M. and Wilks, A.R. (1988). The New S Language. Wadsworth & Brooks/Cole.
- 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).
- Cleveland, W.S. (1979). Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. J. of the American Statistical Association, 74, 829-836.
- Cleveland, W.S. (1981). LOWESS: A program for smoothing scatterplots by robust locally weighted regression. The American Statistician, 35, 54.

- Cleveland, W.S., Grosse, E. and Shyu, W.M. (1992). Local regression models. Chapter 8 of *Statistical Models in S* eds J.M. Chambers and T.J. Hastie, Wadsworth & Brooks/Cole.
- Jeong, W.-M., Baek, J.-D., Choi, H. and Kim, S.-I. (2018). Analysis on the reduction effects of the gravity waves and infra-gravity waves of detached submerged breakwater by field monitoring. *J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 30(2), 51-60 (in Korean).
- Johnson, D., Kench, P., Stephenson, W. and Brander, R. (2011). Field and laboratory insights into the wave-sheltering effects of submerged artificial reefs. *J. of Coastal Research*, 27(6), 1147-1156.
- 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).
- Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (2014). Development of Multi-functional Submerged Artificial Reef and Eco-friendly Materials for Abnormal High Wave Control.
- Lee, J.I. and Bae, I.R. (2020). Experimental study for wave transmission coefficients of submerged structure: I. Permeable type structure. *J. of the Korean Society of Civil Engineers, KSCE*, 40(5), 485-496 (in Korean).
- Davidson, M.A., Turner, I.L., and Splinter, K.D. (2013). Predicting shoreline response to cross-shore processes in a changing wave climate. *Coastal Dynamics*, Arcachon, France, 2013, 431-442.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010). Coastal Maintenance Project Design Guidebook.
- Ministry of Oceans and Fisheries (2014). Research on the Establishment of the Second Amended Coastal Improvement Basic Plan.
- Ministry of Oceans and Fisheries (2024). KC CODE KDS 64 10 10.
- Pohang Regional Office of Oceans and Fisheries (2008). Re-evaluation of the Detailed Design for the Coastal Improvement Plan in Bongpyeong District. Jukbyeon-myeon.
- Ryu, K.H. and Jeong, W.M. (2015). Analysis of the wave control effects of submerged breakwater by wave field monitoring in Namhangjin. *Proceedings of the Korean Society of Coastal and Ocean Engineers* (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).
- Takayama, T., Nagai, K. and Sekiguchi, T. (1985). Irregular wave experiments on wave dissipation function of submerged breakwater with wide crown. *Proceedings of 32nd Japanese Conf. on Coastal Engineering, JSCE*, 32, 545-549 (in Japanese).
- The SWAN team (2019). SWAN User Manual.
- Ulsan County (2003). Engineering Services for the Basic Plan and Detailed Design of the Bongpyeong District Erosion Control Project.
- Van der Meer, J.W., Briganti, R., Zanuttigh, B. and Wang, B. (2005). Structural response and monitoring of low crested structures. *Coastal Engineering*, 52(10-11), 1077-1096.

Received 11 June, 2026

Revised 20 July, 2026

Accepted 27 July, 2026