

투수성 블록 2층적으로 구성된 잠제의 기본설계법 연구 Study on the Basic Design Method of Submerged Breakwater Composed of Double-Layer Permeable Blocks

이달수* · 오상호* · 박이동** · 정원무*

Dal Soo Lee*, Sang-Ho Oh*, Yi-Dong Park** and Weon-Mu Jeong*

요 지 : 이 연구의 초점은 실험적 연구결과를 바탕으로 투수성 블록 2층적으로 구성된 잠제에서 목표 전달과 성능을 만족시키는 잠제의 제원을 결정하거나 혹은 잠제 제원이 주어졌을 때 전달파고비를 예측하는 기술을 제시함에 있다. 이를 위해서 테트라포드 및 삼각뿔블록을 이용한 수리모형실험을 수행하고 실험자료의 분석과정에서 파라미터 $K_T h_b/h$ 를 도입·제안하였다. 실험자료의 분석을 통해 얻어진 선형 회귀식을 이용하면 잠제가 전달파고를 크게 감소시키는 여건에서는 잠제의 마루수심 변화에 대응하여 전달파고비를 쉽게 예측하는 것이 가능하였다. 이 방법은 서로 다른 블록을 사용하여 구성된 잠제의 전달과 특성을 비교하고, 블록의 소요수량을 추정함에도 효과적으로 이용될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 잠제, 테트라포드, 삼각뿔블록, 전달파고비, 수리모형실험

Abstract : The focus of this study is to provide a method for determining the dimension of a submerged breakwater satisfying the target transmission performance or predicting the transmission coefficient of a given structure. This method was developed based on data analysis of the physical experiment that was carried out by using the submerged breakwater composed of double-layer permeable blocks. Two different armor blocks of Tetrapod and Triangular Pyramid Block were used in the experiment. The parameter $K_T h_b/h$ was introduced in the analysis of the measurement data. By using the linear regression line deduced from the analysis of the experimental data, it was possible to readily predict the wave transmission coefficient irrespective different water depths at the crest of the submerged breakwater, under the condition of significant decrease in transmitted wave height due to the submerged breakwater. This method can be effectively utilized for estimating the necessary number of blocks used for the submerged breakwater as well as comparing the transmission characteristics of the submerged breakwater according to use of different armor blocks.

Keywords : submerged breakwater, tetrapod, triangular pyramid block, transmission coefficient, physical experiment

1. 서 론

잠제는 제체의 상단부 높이가 수면보다 낮은 방파제로서, 구조물이 물 속에 잠겨 있기 때문에 주변 경관에 영향을 미치지 않는 심미적인 우수성과 해수 교환 측면에서의 장점 등이 높은 평가를 받게 되면서 최근 설계 및 시공 사례가 증가하고 있다. 특히, 잠제는 마루 부근에서의 파랑에너지 소산 작용 뿐만 아니라 이로 인한 유사 이동 억제 효과가 있어서 해안침식 방지를 위한 구조물로도 폭넓게 활용되고 있다. 잠제의 요구 성능으로서는 파랑제어, 유사이동 제어, 안정성 및 주변환경과의 조화 등을 들 수 있으며(日本全國海岸協會, 2004), 이러한 요구 성능을 향상시키기 위한 다양한 연구가 수행되어 왔다. 잠제 마루에서는 쇄파가

발생하며 파랑 비선형성이 크기 때문에 이를 규명하기 위한 실험적 연구가 일찍부터 시도되었으며(Grue, 1992; Hattori and Sakai, 1994; Brossard and Chagdali, 2001), 최근에는 잠제가 설치된 해역의 표사이동과 연계하여 잠제 주변에서의 파 및 흐름 특성을 파악하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다 (Johnson et al., 2005; Johnson, 2006; Zanuttigh, 2007).

국내에서도 연안개발과 생태환경 보전의 조화에 대한 관심이 높아지면서 약 10년 전부터 잠제에 관련된 다수의 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 이(2001)는 유한진폭 천수방정식을 이용하여 서로 다른 파군 특성을 갖는 입사파에 대한 잠제 주변의 파랑장을 해석한 바 있으며, 김 등(2004)은 VOF법에 기초한 2차원 수치파동수로를 이용하여 투과성 잠제 배후에서의

*한국해양과학기술원 연안개발·에너지연구부 (Corresponding author: Sang-Ho Oh, Coastal Development & Ocean Energy Research Department, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Ansan, Kyunggi 426-744, Korea. Tel: 031-400-7802, Fax: 031-408-5823, ohsangho@kiost.ac)

**㈜산바람 (OKEnvironment Co., Ltd., GangNeung, GangWon, 201-503, Korea)

파랑에너지 변화 특성 및 전달율을 검토하였다. 보다 최근에는 투과성 잠제 주변의 3차원 파동장 해석을 위한 수치모형이 수립되어(허 등, 2008; 이 등, 2012), 잠제의 내부 구조를 다르게 할 경우 잠제 배후측 파고 및 흐름 특성 변화에 대한 연구가 이루어졌다(허 등, 2010). 한편, 종래의 전형적인 잠제 형태와 구별되는 새로운 형태의 잠제의 소파효과에 관한 실험적 연구(이·신, 2011) 또는 수리모형실험을 통한 잠제의 피복 사석 거동분석 및 안정 소요중량 정량화에 관한 연구(박 등, 2010)도 최근 수행되었으며, 실제 해안에 해빈침식 대책의 일환으로 건설된 잠제 구조물 건설과정 중의 인근 해안선 변동 과정을 분석한 연구도 소개된 바 있다(강 등, 2010).

대부분의 잠제는 높이에 비해 폭이 넓은 경사제 형태이며, 불투과성 또는 투과성 콘크리트 블록을 이용하여 잠제 경사면을 피복하는 경우가 많다. 투과성 잠제의 경우 기존에 개발된 방파제 소파블록 또는 인공어초용 블록 등을 이용하여 잠제를 피복하게 되는데, 우리나라의 경우 방파제 소파블록으로 적용 사례가 풍부한 테트라포드(T.T.P.)를 대부분 사용하고 있지만, 경우에 따라서는 다른 형태의 블록 적용을 검토하는 경우도 있다. 그러나 아직까지 서로 다른 종류의 소파블록을 사용해서 구성된 잠제의 파랑에너지 감소 효과 등 소파성능을 비교한 연구는 수행된 사례가 거의 없다. 다만 최근에 Lee et al.(2009)이 우리나라에서 광범위하게 사용되는 소파블록인 테트라포드와 최근 개발된 삼각뿔블록(Triangular Pyramid Block, TPB)을 이용하여 잠제 모형을 구성하고 수리모형실험을 실시하여 전달과 특성을 비교한 바 있다. 본 연구에서는 이 선행 연구 결과를 토대로 추가적인 수리모형실험 결과를 포함하여 마루수심에 따라 달라지는 전달과고비를 효과적으로 예측할 수 있는 경험식을 제안하고, 소파블록에 따른 잠제의 전달과 특성을 직접 비교할 수 있는 방법을 제시하였다. 본 연구 결과는 2층적 잠제의

현장설치 시 설계변수를 개략적으로 예측하고 투수성 블록의 소요량을 추산하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 수리모형실험

2.1 실험수조 및 수로 구성

실험이 이루어진 단면 조파수조는 길이 53.15 m, 높이 1.25 m, 폭 1.0 m이며, 조파기는 유압펌프에 의해 작동되는 피스톤형으로 최대 이격 거리는 50 cm이다. 테트라포드 및 삼각뿔블록으로 구성된 잠제의 수리특성을 효과적으로 평가하기 위하여 수조의 종방향으로 연직분할판을 설치하여 수조를 폭 0.4 m의 협수로와 폭 0.6 m의 광수로로 분리하여 모형 잠제는 폭 0.6 m의 광수로에 설치하였다. 협수로에는 후면 소파제 및 수로 중간 부분에 완만한 소파공을 설치하였다. 광수로에는 수조 끝의 소파공 뿐만 아니라 잠제 후면에도 소파공을 설치하여 반사파를 최대한 감소시키도록 하였다. 해저면 경사는 조파기 전면에서는 수평이며 조파기와 잠제 사이에서는 수평구간 및 경사가 완만한 구간이 있으며 잠제 전·후면의 해저면은 수평이다.

2.2 잠제 모형 설치

실험과 및 잠제의 제원을 결정하기 위하여 현장에 설치되는 잠제의 규모를 고려하여 실험 축척을 1/50로 가정하고, 이에 상응하는 조건으로 수리모형실험을 수행하였다. 잠제를 구성하는데 사용된 테트라포드 및 삼각뿔블록의 평균 수중포화중량은 280 g으로 동일하였으며, 실험 축척을 1/50로 가정한 점을 고려하면 실중량 35톤의 테트라포드에 해당한다. 제작된 두 가지 블록의 모형 중량 편차는 모두 기준값인 280 g으로부터 3% 이내였다. 본 논문에서는 실험 방법 및 결과에 대한 직관적인 이해가 더 쉽도록 실험 축척을 고려하여 환산된 현장값을 기준으로 설명하였다.

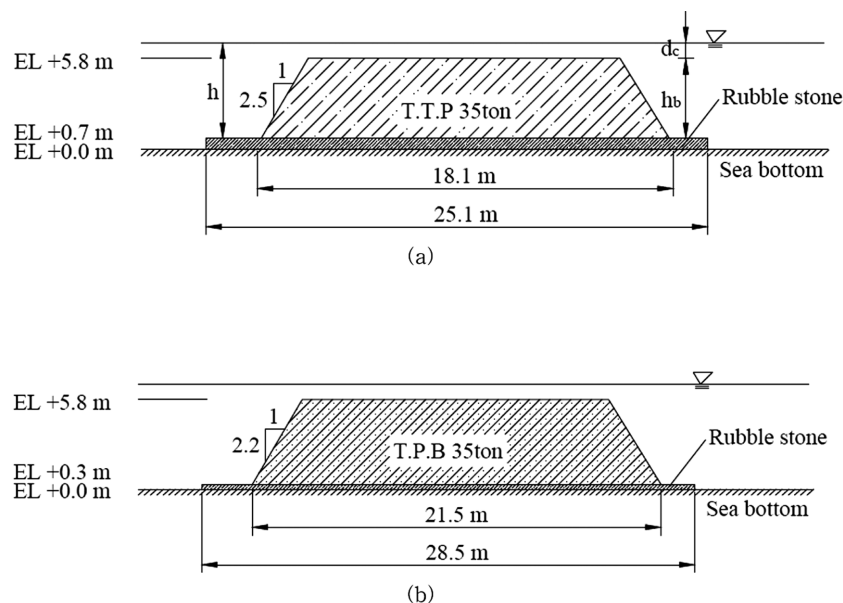


Fig. 1. Experimental setup for the submerged breakwaters by using (a)Tetrapods and (b)TPB, respectively (when $N=5$).

실험을 위한 잠제 모형은 테트라포드 및 삼각뿔블록을 각각 2층으로 쌓아서 구성하였다. 삼각뿔블록은 인공어초 및 잠제 등에 활용할 목적으로 국내에서 개발된 소파블록의 일종으로서 내부에 다수의 공극을 포함하는 정사면체 구조 형태이다. 방파제 사면 피복블록용으로 개발된 것이 아니므로 피해계수(Kd) 값은 알려진 바 없으며 아직까지 현장 적용 사례는 없는 것으로 파악되지만, 우리나라에서 가장 잘 알려진 소파블록인 테트라포드에 비하여 내부 공극이 크며 공극의 형상이 훨씬 복잡하다는 구조적 차이점에 착안하여 잠제의 전달과 특성 비교 목적의 실험에 활용하였다. 개별중량은 동일하더라도 두 종류의 블록간에 높이차가 존재하기 때문에 2층으로 블록을 쌓았을 때의 높이는 테트라포드 및 삼각뿔블록의 경우가 각각 5.1 m 및 5.5 m로 약간 차이가 있었다. 이처럼 두 블록으로 구성된 잠제의 2층적 높이는 서로 다르지만, 마루높이는 동

일하게 유지하기 위해서 잠제 하부에 기초사석을 포설하고 그 두께를 Fig. 1에 보인 것처럼 테트라포드의 경우 0.7 m, 삼각뿔블록의 경우 0.3 m로 서로 다르게 하였다. 이에 따라 해저면으로부터의 잠제 마루까지의 높이(h_b)는 두 경우 모두 5.8 m가 되었다. 기초사석으로는 자연쇄석을 사용하였으며, 잠제 구성 시 블록 간에는 별도의 이격을 두지 않았다. Fig. 1에는 테트라포드 및 삼각뿔블록을 2층 5열로 쌓아서 구성한 잠제의 측면도를 나타내었으며, 마루로부터 정지수면까지의 높이인 마루수심(d_s)은 Table 1에 보인 것처럼 1.0, 1.5 및 2.0 m의 세 가지로 변화시켰다. 이에 따라서 수심(h)은 각각 6.8, 7.3 및 7.8 m가 되었다. 한편, Fig. 2에는 이 경우 수조 내에 설치된 잠제를 수조 측면 및 위에서 촬영한 사진을 각각 제시하였다.

다양한 조건에서 투수성 블록으로 구성된 잠제의 전달과 특성을 검토하기 위하여 잠제의 열 및 마루수심을 다음과 같이 변화시키면서 실험을 수행하였다. 잠제의 열(N)은 테트라포드 잠제의 경우 5~12열의 8가지, 삼각뿔블록 잠제는 5~10열의 6가지로 다르게 하였다. 이 경우 실험 축척을 고려하여 잠제의 마루 폭(B)을 환산하게 되면 테트라포드 잠제는 18.1~42.7 m, 삼각뿔블록 잠제는 21.5~37.9 m로 달라지게 된다.

Table 1. Significant wave periods and heights of the test waves

T_s (sec)	H_s (m)		
	$d_c = 1.0$ m	$d_c = 1.5$ m	$d_c = 2.0$ m
9.0	1.60	1.48	1.46
	2.09	2.00	2.01
	2.56	2.49	2.51
	2.98	3.02	2.95
	3.36	3.46	3.49
13.0	1.47	1.53	1.55
	1.98	1.95	1.94
	2.55	2.41	2.53
	3.01	3.03	2.94
	3.33	3.36	3.50

2.3 실험과 조파 및 평가

실험과는 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼을 따르는 불규칙파를 사용하여 모형의 외해측 수심이 깊고 저면이 수평한 광수로에서 파랑 스펙트럼의 형상이 만족되도록 조파하였으며 잠제에 도달하는 통과입사파의 파고는 잠제의 측면 협수로에서 평가하였다. 실험파의 주기는 1.27 s 및 1.84 s의 두 가지로 실험을 수행하였으며, 이는 1/50 축척을 고려하여 현장값으로 환산할 경우 각각 9 s와 13 s에 해당한다. 한편, 파

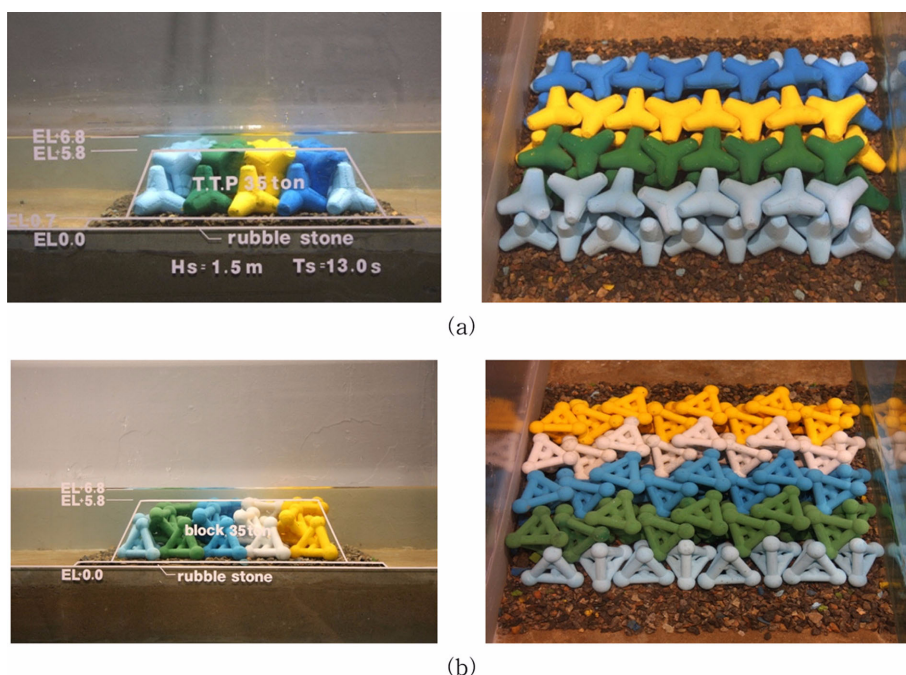


Fig. 2. Photographs of side and top views of the submerged breakwater composed of (a) Tetrapods and (b) TPB, respectively (when $N = 5$).

고는 Table 1에 보인 것처럼 잠제 설치수심에서 발생 가능한 최대파고를 재현한 후 이로부터 파고가 점차 감소하는 파들을 균등한 간격으로 재현하였다. Table 1에서 유의파주기(T_s) 및 유의파고(H_s)는 모두 축척을 고려한 현장 환산값 기준으로 제시되었다. 파의 작용 시간은 모든 실험 조건에서 7분으로 동일하였으며, 이를 현장 조건으로 환산하면 약 50분에 해당한다. 잠제 후면에서의 전달파는 모형이 설치된 광수로에서 계측하였고, 전달파고 계측점은 잠제 후면으로부터 수심의 7 배 떨어진 위치로서 실험 축척을 고려하여 현장 조건으로 환산하면 잠제로부터 약 50 m 배후의 지점에 해당하며 이 위치에서는 전달파가 비교적 안정적으로 계측되었다. 한편, 실험 중 최대 실험파에 의해서도 잠제를 구성하는 소파블록의 이탈 또는 유의할만한 움직임은 관찰되지 않았으므로 본 실험은 해저경사가 완만한 해역에서 잠제 체체의 거동 안정성이 확보된 단면을 대상으로 수행한 것으로 간주될 수 있다.

3. 실험 자료 분석

3.1 마루수심 및 잠제 열 수에 따른 전달파 특성

Fig. 3에는 테트라포드 및 삼각뿔블록을 사용하여 8열 잠

제를 설치하고 주기 9 s의 파를 조파하였을 경우에 대하여 입사파고에 대한 전달파고비의 관계를 도시하였다. 전달파고는 잠제 후면에서 파고계 3개를 이용하는 입·반사파 분리 기법(박 등, 1992)을 적용하여 평가하였다. 전반적으로 입사파고의 증가율에 비해서는 전달파고의 증가율이 작았으며, 마루수심(d_c)이 작을수록 전달파고가 감소하는 경향이 나타났다. 테트라포드로 구성된 잠제에 비해서 삼각뿔블록을 이용하여 설치된 잠제의 전달파고가 다소 작았다. 한편, Fig. 4에는 동일한 실험 데이터를 다른 형태로 표현하였다. Fig. 4에서 x 축은 입사파고를 수심으로 나누어 무차원화한 파라미터인 H_s/h 를 나타내며, y 축은 입사파고에 대한 전달파고의 비인 전달파고비(K_T)를 나타낸다. 마루수심 역시 수심으로 나누어 무차원화한 파라미터인 d_c/h 의 함수로 표현하였다. 이 그림으로부터 파고가 커짐에 따라서 잠제 후면에서의 전달파고비는 대체로 선형적으로 감소함을 알 수 있다.

비록 Figs. 3과 4에는 8열 잠제에 대한 실험 결과만을 제시하였지만, 잠제 열의 개수가 다른 경우에도 위에서 언급한 특성이 동일하게 관측되었으며, 다만 전달파고비의 크기는 잠제 열 수에 따라서 다르게 나타났다. Fig. 5에는 테트라포드 및 삼각뿔블록으로 구성된 잠제의 열 수에 따른 실험 결과를

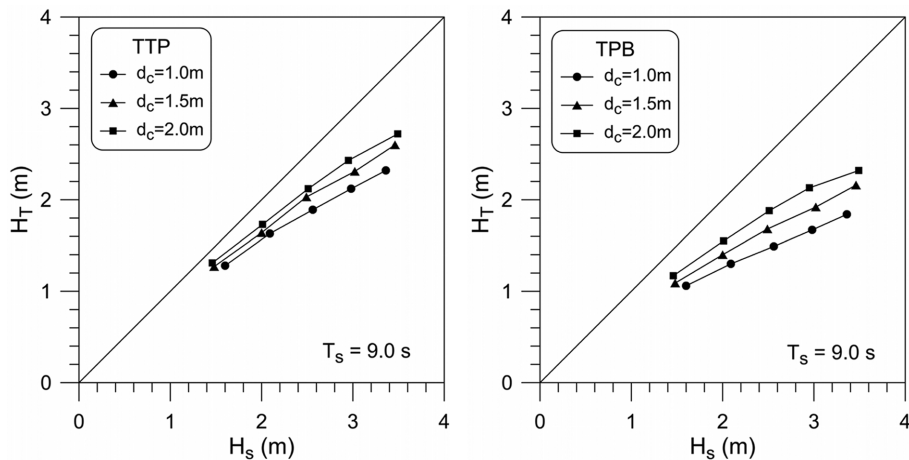


Fig. 3. Comparison of incident and transmitted wave heights (when $N=8$).

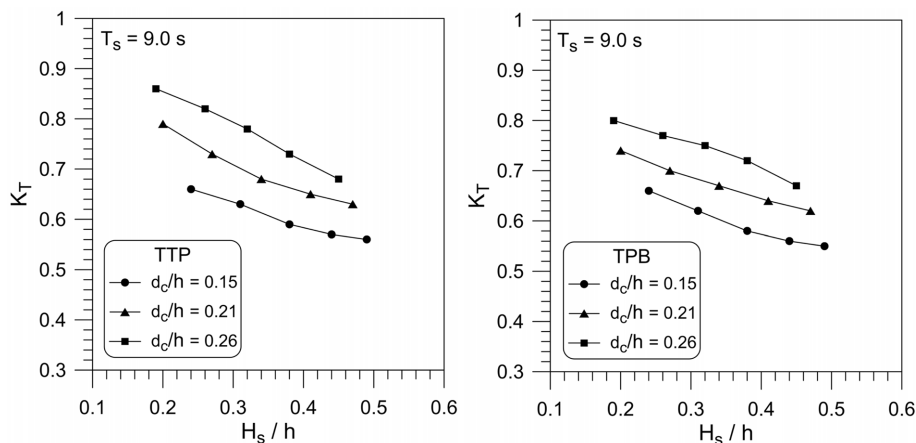


Fig. 4. Comparison of transmission coefficients as a function of H_s/h (when $N=8$).

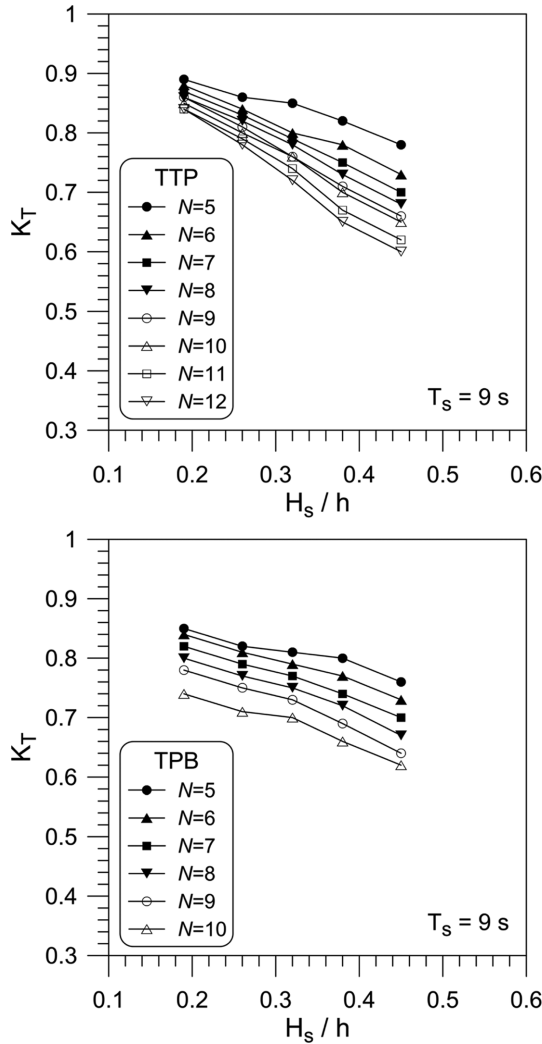


Fig. 5. Comparison of transmission coefficient for different values of N (when $d_c/h = 0.26$).

$d_c/h = 0.26$ 인 조건에 대하여 나타내었다. 잠제 열 수가 증가함에 따라 전달파고비가 감소함을 쉽게 파악할 수 있다. 또한 파고가 작을 때보다는 클 때에 잠제 열 수 증가에 따른 전달파고비 감소 효과가 상대적으로 더 컸다. 한편, 파고 증가에 따른 전달파고비 감소율 자체는 2가지 블록 중 테트라포드로 구성된 잠제의 경우에서 더 크게 나타났다.

Fig. 5에 보인 테트라포드 및 삼각뿔블록 잠제의 열 수에 따른 전달파고비를 잠제의 상대폭, 즉 잠제의 마루 폭(B)을 입사파의 파장(L)으로 나눈 값에 따라서 함께 비교하여 나타낸 결과를 Fig. 6에 제시하였다. 잠제의 열 수가 동일하더라도 삼각뿔블록으로 구성된 잠제의 상대폭이 더 크기 때문에 Fig. 6과 같이 잠제의 상대폭에 따른 전달파고비를 비교함으로써, 잠제의 마루 폭이 동일한 경우의 소파 성능을 비교할 수 있다. 대체로 잠제의 상대폭 증가에 따라서는 삼각뿔블록 잠제, 파고 증가에 따라서는 테트라포드 잠제의 전달파고비 감소 추세가 더 크게 나타났으며, 전반적으로는 $B/L < 0.4$ 이고 $H_s/h > 0.38$ 인 조건을 제외하고는 삼각뿔블록 잠제의 전달파고비가 더 작았다. 한편, Fig. 6으로부터 두 가지 형태의 잠제

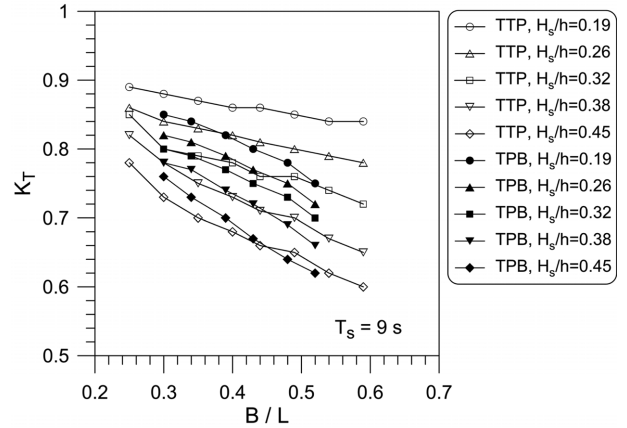


Fig. 6. Transmission coefficient as a function of B/L (when $d_c/h = 0.26$).

모두 잠제의 상대폭 증가에 따라서 전달파고비가 대체로 선형적으로 감소하는 경향이 있음을 확인할 수 있다. 이처럼 잠제 폭 증가에 따른 전달파고비의 선형적 감소 추세는 Seebrook and Hall(1998)의 실험에서도 확인된 바 있으며, van der Meer et al.(2005)의 경우 전달파고비 예측식의 상한선(upper limit)이 잠제의 폭을 입사파의 파고로 나눈 파라메터인 B/H_s 와 선형적인 관계가 있음을 제시하였다.

3.2 파라메터 도입 및 선형 회귀분석

Fig. 7에는 Lee et al.(2009)에 제시된 바 있는 전달파고비(K_T)를 수심(h)으로 나누고 잠제의 높이(h_b)를 곱한 파라메터인 $K_T h_b/h$ 를 이용하여 H_s/h 에 대하여 도시한 결과를 나타내었다. Fig. 7은 Fig. 4에 보인 실험자료와 동일한 자료를 이용하여 그래프로 나타낸 것으로서, $K_T h_b/h$ 의 값이 H_s/h 에 따라 선형적으로 감소하는 경향이 나타났다. 특히 Fig. 4에서는 잠제 후면에서의 전달파고비가 마루수심에 따라서 달라졌지만, Fig. 7에 보인 것처럼 이를 파라메터 $K_T h_b/h$ 에 관해서 도시하면 이러한 차이가 거의 없어져서 하나의 회귀직선으로 표현 가능할 정도로 좁은 범위 내에 모이게 되었다. 실제로 Fig. 7에 보인 것처럼 테트라포드 및 삼각뿔블록 잠제의 경우에 대해서 각각 선형 회귀분석을 수행한 결과 결정계수(R^2)가 각각 0.86 및 0.89로 실험자료로서는 상당히 높은 편으로 나타났다. Fig. 7에는 잠제 열 수가 8개인 경우에 대한 실험결과만 제시하였지만, 잠제의 열 수가 다른 경우에도 유사한 결과가 얻어졌으며 선형 회귀분석의 결정계수 값은 0.79~0.92 범위에 분포하였다.

이처럼 실험자료의 분석 과정에서 파라메터 $K_T h_b/h$ 를 도입하게 된 이유는 다음과 같다. 우선, 전달파고비 K_T 의 값은 Fig. 4에 보인 것처럼 마루수심(d_c)에 따라서 달라지게 되며, 입사파의 조건 및 블록의 종류, 잠제의 열 수(폭)가 주어진 경우에는 설계변수 h 및 h_b (또는 d_c) 값의 상호관계에 따라 결정되게 된다. 이 때 K_T 에 곱하여 의미를 가질 수 있는 무차원량 으로서는 h_b/h 와 h/d_c 를 고려할 수 있는데, 잠제의 극단적인 단

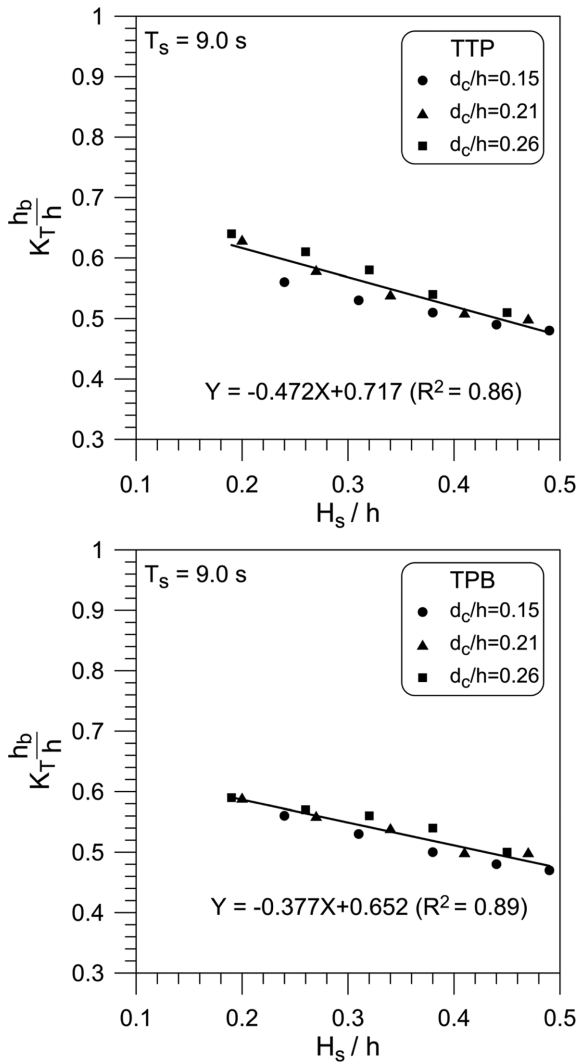


Fig. 7. Normalized transmission coefficient as a function of H_s/h (when $N=8$).

면 형상을 가정할 경우 전자는 극단값이 0과 1로서 제한적인 범위인 반면에 후자는 극단값이 1과 ∞ 로서 한쪽 극단이 구속되지 않아 무차원량으로 적합하지 않기 때문에 h_b/h 를 K_T 에 곱해 주는 무차원량으로 선정하게 되었다.

실제로 이 두 가지 무차원량을 전달과고비에 곱한 $K_T h/d_c$ 및 $K_T h_b/h$ 에 관하여 실험자료를 분석해 본 결과, $K_T h/d_c$ 의 값은 큰 분산을 보였지만 $K_T h_b/h$ 의 값은 Fig. 7과 같이 하나의 회귀직선으로 표현 가능할 정도로 실험자료가 일관된 경향을 나타냄을 확인할 수 있었다. 이렇게 구한 선형 회귀직선을 이용하게 되면 마루수심별로 구분되지 않은 채로 잠제의 전달과고비를 추정하는 것이 가능하게 되어 잠제의 성능 평가 및 설치 규모를 효과적으로 결정할 수 있다. 한편, 비록 그림으로 제시하지는 않았지만 유의과주기 13 s에 대한 실험 데이터도 Fig. 7에 보인 것과 유사한 경향이 나타났으며, 회귀분석을 통해 선형 회귀직선을 구할 수 있었다.

위에서 언급된 것처럼 테트라포드 잠제는 5~12열, 삼각뿔블록 잠제는 5~10열에 대해서 실험이 수행되었으며, 각각의 경

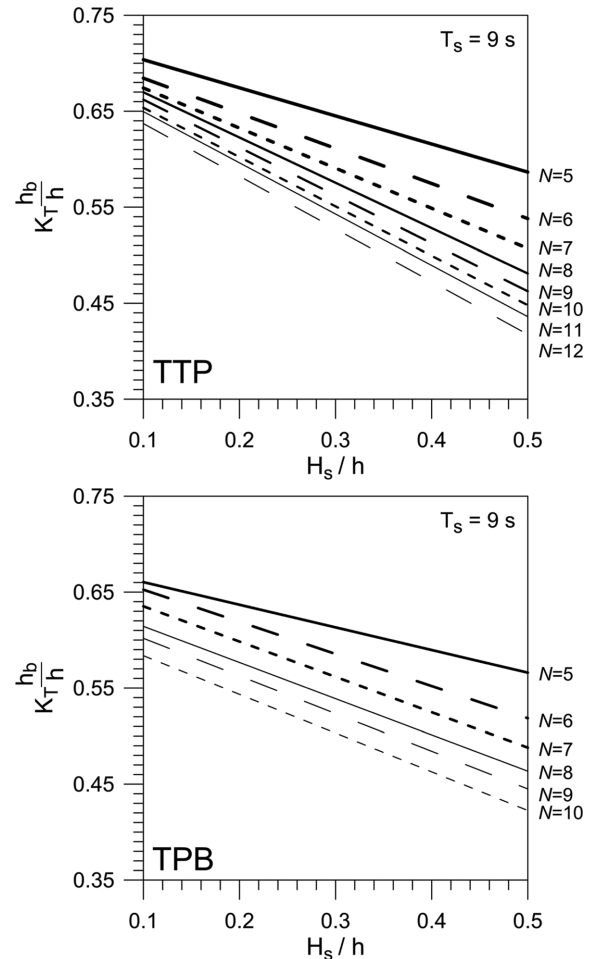


Fig. 8. Linear regression lines of $K_T h_b/h$ as a function of H_s/h for all values of N .

우에 대해서 Fig. 7에 보인 방법으로 선형 회귀분석을 수행하여 그에 해당하는 회귀직선을 Fig. 8과 같이 하나의 그림에 함께 나타내었다. 이 결과로부터 파의 주기가 결정되었을 경우에 잠제의 열(N), 입사파고(H_s), 수심(h), 마루수심(d_c)에 따른 전달과고비(K_T)를 예측하는 것이 가능하다. 다만, 회귀직선을 계산하는데 사용된 실험자료가 $0.15 \leq d_c/h \leq 0.26$ 및 $0.18 \leq H_s/h \leq 0.49$ 인 범위에서 취득되었으므로 본 연구의 결과는 이 범위 내에서만 적용하는 것이 바람직하다.

Fig. 9에는 Fig. 8에 보인 테트라포드 및 삼각뿔블록 잠제에 대한 선형 회귀분석 결과를 하나의 그래프에서 비교하였으며 유의과주기 9 s의 경우 뿐만 아니라 13 s에 대한 실험 결과도 제시하였다. 그림에서 실선은 테트라포드, 점선은 삼각뿔블록에 대한 결과에 해당하며, 각각의 그림에서 가장 위쪽에 위치한 직선이 잠제 열 수가 가장 적은 경우($N=5$), 가장 아래쪽에 위치한 직선이 잠제 열 수가 가장 많은 경우(테트라포드의 경우 $N=12$, 삼각뿔블록의 경우 $N=10$)에 대응되는 결과이다. Fig. 1에서도 알 수 있듯이 비록 테트라포드와 삼각뿔블록으로 구성된 동일 열 수의 잠제 폭은 서로 다르지만, 사용된 블록의 중량(톤수) 및 수량이 같기 때문에 Fig. 9를 통해서 서로 다른 블록으로 구성된 잠제의 전달과 특성을 쉽게 비교할 수 있다. 파고

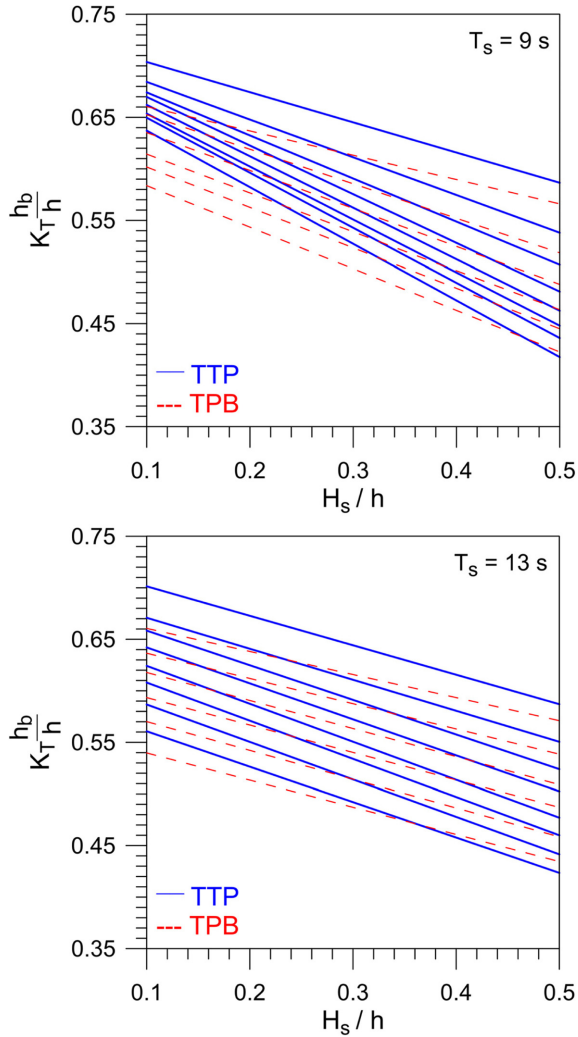


Fig. 9. Comparison of linear regression lines for submerged breakwaters composed of the two different blocks.

가 증가함에 따른 전달파고비의 감소율은 테트라포드 잠제에서 더 큰 경향이 나타났으나 동일한 조건에 대하여 전달파고비의 크기는 테트라포드에 비해서 삼각뿔블록으로 구성된 잠제에서 대체로 낮음을 알 수 있다. 한편 유의파주기 13 s보다는 9 s인 경우에 파고 증가에 따른 전달파고비 감소 추세가 더 크게 나타났으며, 이것은 주기 9 s인 경우가 잠제의 상대 폭이 더 크기 때문에 나타나는 결과로 추정된다. 한편, 이러한 유의파주기에 따른 전달파고비 감소 특성 차이는 테트라포드 잠제의 경우가 더 컸다.

4. 실험 결과의 활용

4.1 잠제의 설계변수 추산법

Fig. 8 및 9로부터 유의파고(H_s), 수심(h), 마루수심(d_c), 전달파고비(K_T) 및 잠제 열 개수(N)의 관계를 파악할 수 있었다. 따라서 이러한 실험 결과를 활용하여 잠제의 요구 성능을 만족시키기 위한 잠제 단면의 설계변수를 결정하거나 또는 선정된 잠제 단면 배후에서의 전달파고를 개략적으로 예

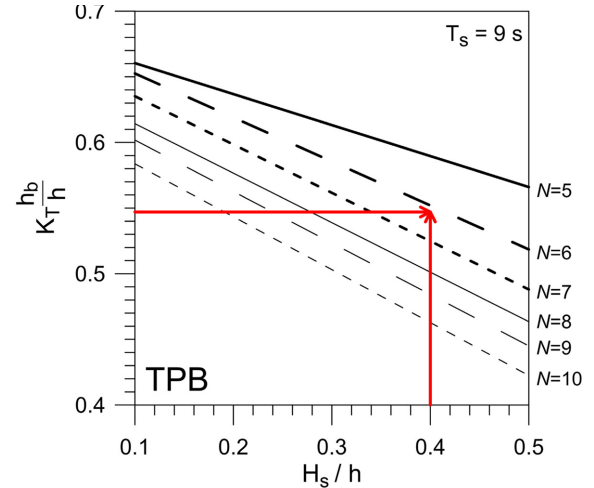


Fig. 10. Determination of optimal row for the submerged breakwater.

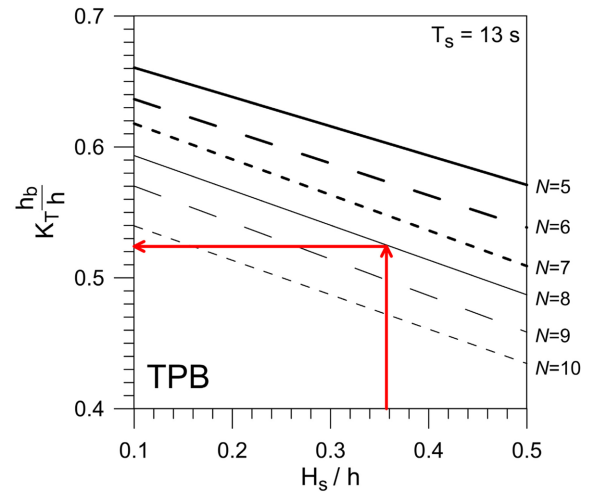


Fig. 11. Prediction of the transmitted wave height behind the submerged breakwater.

측하는 것이 가능하게 되었다. 이를 보다 자세하게 설명하기 위해서 아래에 두 가지 계산 사례를 제시하였다.

첫 번째 사례로서 수심이 8 m이고 마루수심이 1 m가 되도록 삼각뿔블록 2층적 잠제를 설치하여 유의파주기 9 s, 유의파고 3.2 m인 입사파가 잠제를 통과한 후 유의파고 2 m 이하가 되도록 하기 위한 잠제의 열 개수를 결정하는 경우를 가정하였다. 주어진 조건으로부터 $H_s/h = 3.2/8 = 0.4$ 이며, $K_T h_b/h = 2/3.2 \times (8-1)/8 = 0.547$ 이다. Fig. 10에 보인 것처럼 이 조건을 만족시키는 지점은 그래프에서 6열과 7열의 회귀직선 사이에 위치하게 되므로 7열 잠제를 설치하는 것이 필요하다고 추정할 수 있다.

두 번째 사례로서는 수심이 7 m인 현장에 삼각뿔블록 2층적 8열 잠제를 마루수심이 1.5 m가 되도록 설치하였을 때 유의파주기 13초, 유의파고 2.5 m인 입사파의 잠제 배후에서의 전달파고가 어느 정도가 될 것인지를 추산하는 경우를 가정하였다. 주어진 조건으로부터 $H_s/h = 2.5/7 = 0.357$ 이며, Fig. 11에 보인 것처럼 이 때 8열 잠제에 해당하는 회귀직선과 만나는 점으로부터 $K_T h_b/h$ 의 값을 독취하면 대략 $K_T h_b/h = 0.525$ 를 얻게 된다. 따라서, 전달파고비는 $K_T = 0.525 / \{(7-1.5)/7\} = 0.667$ 이

되며, 이로부터 잠제 배후에서의 전달파고는 $H_T = 0.667 \times 2.5 = 1.67 \text{ m}$ 로 예측된다.

4.2 잠제 내 블록의 소요열수 추정

한편, Fig. 9에 보인 결과로부터 어떤 특정한 H_s/h 값에 대하여 테트라포드 및 삼각뿔블록 잠제의 열 개수에 따른 전달파고 특성을 아래와 같이 직접 비교하는 것이 가능하다. 예를 들어 Fig. 9에서 $T_s = 13 \text{ s}$ 이고 $H_s/h = 0.4$ 일 때 테트라포드 및 삼각뿔블록 잠제의 각 열에 해당하는 회귀직선과 만나는 점들을 서로 연결하여 그래프로 나타내면 Fig. 12와 같다. 이 그림으로부터 두 가지 블록으로 구성된 잠제의 열 수에 따른 전달파고비를 쉽게 비교할 수 있다. 또한, 동일한 정도의 소파 성능을 발휘하기 위한 테트라포드 및 삼각뿔블록 2층적 잠제의 열 개수를 비교하는 것도 가능하다. 이를 조금 더 자세히 설명하기 위해서 아래에 한 가지 사례를 제시하였다.

예를 들어 수심 7.5 m인 현장에 유의파주기 13초, 유의파고 3 m인 파에 대응할 목적으로 삼각뿔블록 잠제를 9열로 설치할 것을 고려하고 있는데, 만약 삼각뿔블록 대신 테트라포드를 사용하여 동등 이상의 소파성능을 발휘하려면 테트라포드 잠제를 몇 열로 설치해야 할지 검토하는 경우를 가정하였다. 주어진 조건으로부터 $H_s/h = 3/7.5 = 0.4$ 이며, Fig. 12로부터 삼각뿔블록 9열 잠제를 설치하는 경우의 $K_T h_b/h$ 의 값을 찾는다(A). 그 다음 $K_T h_b/h$ 값이 같게 되는 테트라포드 잠제에 대한 곡선과의 교점을 찾고(B), 이로부터 테트라포드 잠제의 열 개수를 구하면 약 10.6열 정도가 된다(C). 실질적으로는 잠제의 열 수는 정수가 되어야하므로 테트라포드 11열 잠제를 설치해야 동등 이상의 소파성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 또한, 잠제의 열 개수와 잠제의 길이(연장)를 곱한 값에 잠제 1열 단위길이당의 블록 수량을 곱하게 되면 각 경우에 필요한 블록의 총 수량도 계산할 수가 있다.

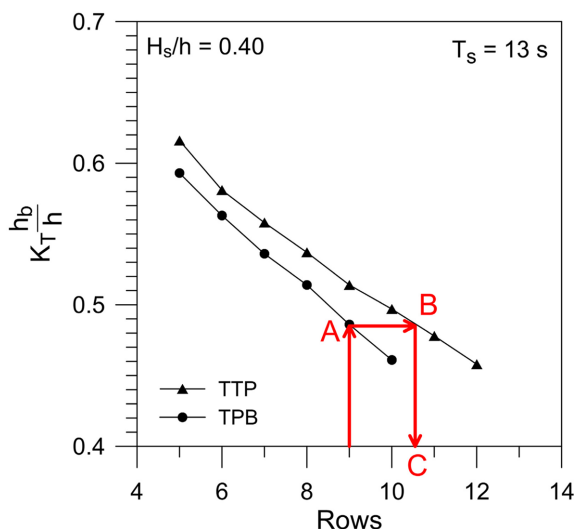


Fig. 12. Comparison of the rows of submerged breakwater composed of the two different blocks.

4.3 활용 제한사항

위의 두 가지 사례에서 보인 것처럼 Fig. 8 및 9는 테트라포드 및 삼각뿔블록으로 구성된 잠제의 수리특성 평가 및 기본적인 설치 여건 추정 목적으로 사용될 수 있다. 그러나 이 그래프들은 기본적으로 수리모형실험을 통해 계측된 전달파고비를 파라미터 $K_T h_b/h$ 를 도입하여 회귀직선으로 표현함으로써 경험적으로 얻어진 것이므로 활용상에 있어서 아래와 같은 제한 조건을 고려해야 한다.

위에서도 언급된 것처럼 회귀직선을 계산하는데 사용된 실험자료가 $0.15 \leq d_r/h \leq 0.26$ 및 $0.18 \leq H_s/h \leq 0.49$ 인 범위에서 취득되었으므로 이 범위 내에서만 실험 결과를 적용하는 것이 바람직하다. 또한, 위의 두 경우를 만족하는 경우라고 하더라도, 수리모형실험에서는 잠제가 평평한 해저면에 설치되었고, 파의 회절 및 굴절의 효과가 고려되지 않는 2차원 단면 실험에 의한 결과이므로 현장의 수심 변화 여건이 실험조건과 크게 다른 경우에는 잠제 설치를 위한 최종적인 설계자료로 활용되기는 어려울 것으로 판단된다. 즉, 잠제의 소파성능을 개략적으로 예측하거나 본격적인 설계를 진행하기 전 예비적인 자료로 활용하는 것이 바람직하며, 잠제 전면에서 해저경사가 급하거나 수심의 공간변화가 큰 입지를 대상으로 잠제를 설계할 경우에는 반드시 구체적인 현장 여건을 최대한 반영한 별도의 평면수리실험을 수행하는 것이 필요할 것이다. 또한, 본 연구에서는 유의파주기 $T_s = 9.0 \text{ s}$ 및 13.0 s 에 대해서만 실험이 수행되었으므로 유의파주기가 이를 크게 벗어나는 경우에는 Fig. 8 및 9의 결과를 예비 참고 이외의 목적으로는 사용하지 않는 것이 바람직하다.

5. 결 론

이 연구에서는 테트라포드 및 삼각뿔블록으로 구성되는 2층적 잠제에 대한 단면수리모형실험을 수행하여 잠제 후면에서의 전달파고 특성을 비교·검토하였다. 2가지 블록으로 구성되는 잠제 모두 공통적으로 입사파고에 대한 전달파고의 비는 마루수심이 작을수록, 입사파고가 클수록, 잠제 열 수가 많을수록 감소하였다. 실험자료 분석 과정에서 전달파고비(K_T)를 수심(h)으로 나누고 잠제의 높이(h_b)를 곱한 파라미터인 $K_T h_b/h$ 를 도입함으로써, 파의 주기, 블록의 설치 열 수, 입사파고, 수심, 마루수심 등에 따른 잠제 후면에서의 파고 감소 효과를 간편하게 예측할 수 있는 방법을 제안하였다. 이 방법은 잠제 설치 시의 요구 성능을 만족시키는 잠제 내 블록의 설치 열 수 또는 관련 설계변수 등을 개략적으로 추정하거나 서로 다른 블록으로 구성되는 잠제의 소파성능을 비교하는데 효과적으로 활용될 수 있다. 마지막으로, 본 연구에서는 주기별로 잠제의 소파성능을 따로 비교하였지만, 향후 다양한 주기 조건에서의 추가적인 실험이 이루어지면 주기의 영향까지 포함하여 잠제의 소파성능을 간편하게 비교하는 방법을 제안할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- 강윤구, 박효봉, 윤한삼 (2010). 속초 영랑해안 해빈침식대책 인공구조물 건설에 기인하는 해안선 변화. 한국해양환경공학회지, 13(4), 296-304.
- 김도삼, 이광호, 유현상, 김창훈, 손병규 (2004). 불규칙과동장에 있어서 VOF법에 의한 투과성잠제의 파랑제어 특성에 관한 연구. 한국해안·해양공학회지, 16(3), 121-129.
- 박상길, 김우생, 이재성, 김성훈 (2010). 난적잠제 상부 사석의 안정에 관한 실험적 연구. 한국해양공학회지, 24(1), 106-115.
- 박우선, 오영민, 전인식 (1992). 최소자승법에 의한 입·반사파의 분리기법, 한국해안·해양공학회지, 4(3), 139-145.
- 이우동, 허동수, 허정원 (2012). 잠제 제원 및 평면배치에 따른 쇄파특성. 한국해양공학회지, 24(1), 116-122.
- 이철웅 (2001). 파군특성에 따른 잠제의 반사와 투과. 한국해안·해양공학회지, 13(1), 61-72.
- 이현진, 신문섭 (2011). 잠제의 소파효과에 관한 실험적 연구. 한국해양공학회지, 25(6), 29-34.
- 허동수, 최동석, 이우동, 염경선 (2008). 투과성잠제 주변의 파동장 해석을 위한 2-D 및 3-D 수치계산의 비교. 한국해안·해양공학회논문집, 20(4), 363-371.
- 허동수, 이우동, 안성욱, 박종배 (2010). 신기능 잠제의 흐름 제어 기능에 관한 수치적 연구. 한국해안·해양공학회논문집, 22(3), 181-190.
- Brossard, J. and Chagdali, M. (2001) Experimental investigation of the harmonic generation by waves over a submerged plate. Coast. Engrg., 42, 277-290.
- Grue, J. (1992). Nonlinear water waves at a submerged obstacle or bottom topography. J. Fluid Mech., 244, 455-476.
- Hattori, M. and Sakai, H. (1994). Wave breaking over permeable submerged breakwaters. Proc. 24th Int. Conf. Coast. Engrg., ASCE, 1101-1114.
- Johnson, H.K., Karambas, T.V., Avgeris, I., Zanuttigh, B., Gonzalez-Maroco, D. and Caceres, I. (2005). Modelling of waves and currents around submerged breakwaters. Coast. Engrg., 52, 949-969.
- Johnson, H.K. (2006). Wave modelling in the vicinity of submerged breakwaters. Coast. Engrg., 53, 39-48.
- Lee, D.S., Oh, S.-H. and Park, Y.-D. (2009). Comparison of wave transmission characteristics of submerged breakwater composed of two different types of armor blocks. 5th Int. Conf. Asian Pac. Coast. (APAC 2009), CD-ROM.
- Seebrook, S.R. and Hall, K.R. (1998). Wave Transmission at submerged rubblemound breakwaters. Proc. 26th Int. Conf. Coast. Engrg., 2000-2013.
- Van der Meer, J.W., Briganti, R., Zanuttigh, B. and Wang, B. (2005). Wave transmission and reflection at low-crested structures: Design formulae, oblique wave attack and spectral change. Coast. Engrg., 52, 915-929.
- Zanuttigh, B. (2007). Numerical modelling of the morphological response induced by low-crested structures in Lido di Dante, Italy. Coast. Engrg., 54, 31-47.
- 日本 全國海岸協會 (2004). 人工リフの設計の手引き (改訂版).

원고접수일: 2013년 3월 8일

수정본채택: 2013년 6월 10일(1차)

2013년 6월 28일(2차)

게재확정일: 2013년 6월 29일