

유수실을 사석으로 채운 유공 케이슨에 대한 반사계수 실험 Hydraulic Experiments on Reflection Coefficients for Perforated Wall Caisson with Rock Fill

김영택* · 이종인**
Young-Taek Kim* and Jong-In Lee**

요지 : 일반적으로 유공벽을 갖는 케이슨(유공케이슨)은 직립식 구조물 벽면에 유공부를 설치하여 반사파의 저감, 월파량의 저감 등의 목적으로 사용된다. 본 연구에서는 유공케이슨 유수실을 골재(사석)로 채운 형태의 구조물에 대한 수리특성(반사계수)을 수리모형실험을 통해 검토하였다. 유수실을 사석으로 채운 경우가 유수실이 비어있는 일반적인 형상보다는 반사계수가 크게 나타났으나, 속채움재를 유수실에 설치하여 중량을 확보함으로써 구조물의 안정성을 확보하고, 일정 수준에서 수리특성을 만족할 수 있는 것으로 검토되었다.

핵심용어 : 유공케이슨, 유수실, 수리실험, 반사계수, 직립구조물

Abstract : In general, the caisson having the perforated wall is used to for the purpose of reducing the wave reflection and wave overtopping. In this study, the hydraulic characteristics (reflection coefficient) of the perforated wall caisson chamber filled with aggregates (rocks) were investigated with hydraulic model tests. When the perforated wall chambers were filled with aggregates, the reflection coefficients would increase. However, it was confirmed that the rock filling method into the perforated wall chamber could secure the stability of the structures and satisfy the hydraulic characteristics at a certain level.

Keywords : perforated wall caisson, wave chamber, hydraulic test, reflection coefficient, vertical structure

1. 서 론

2000년도 이후 국내에서는 직립제 벽체에 유공부를 갖는 직립식 구조물(이하, 유공케이슨)의 설계 및 시공이 활발하게 진행되고 있다. 유공케이슨은 유공부에서의 에너지 소산을 통하여 반사계수 저감, 월파량 저감, 파압 및 파력 저감 등의 효과가 있다. 이와 같은 유공케이슨은 항내측 접안시설 뿐만 아니라 항외측 방파제에 적용되고 있다.

유공케이슨은 Jarlan(1961)에 의해 최초로 고안되었으며, 1966년 Jarlan 형 방파제가 캐나다에 설치되면서 이후 많은 연구들이 진행되었다(Fugazza and Natale, 1992; Taveia-Pinto et al., 2011; Thecharis et al., 2011; Huang et al., 2011, Suh et al., 2011; Lee and Shin, 2014; Crina-Stefania Ciocan et al., 2017. etc).

국내에서도 수리모형실험을 통하여 유공부의 최적 제원 도출을 위한 연구가 진행되었다. 국내의 경우 유공케이슨을 설계함에 있어 적정 유공률 및 유수실 폭 등의 제원은 KICT (2000)에서 수행한 자료를 이용하거나 수리모형실험을 통해

결정하고 있다. 기존의 유공케이슨에 대한 유공률 및 유수실 폭의 변화에 따른 최적 반사계수는 이미 상기 기존 연구에서 제시되어 있다. Kim and Lee(2013)는 유공부 제원 특히, 유공부의 길이에 따른 반사특성을 제시하여 정수면 이하 최적 유공부 길이를 제안하였다.

최근 국내에서 고파랑 해역에 방파제로 유공케이슨을 설계할 경우에 케이슨의 활동 및 전도에 대한 안정확보를 위하여 케이슨 내부에 제강 부산물 중 하나인 고비중 슬래그를 속채움으로 활용하여 안정중량을 확보하는 사례도 있다. 본 연구에서는 유공부의 유수실 내부를 골재(피복석)로 채운 경우에 대해 수리실험을 수행하여 반사계수를 측정하고, 일반적인 유공케이슨(유공부가 해수로 채워진 경우)과 비교하였다.

2. 수리모형실험

2.1 실험시설

수리실험은 한국건설기술연구원의 폭 1.0 m, 높이 2.0 m, 길이 56 m의 수로에서 수행되었으며, 단면수로에는 전기서보

*한국건설기술연구원 국토보전연구본부(Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

**전남대학교 공학대학 해양토목공학과(Corresponding author: Jong-In Lee, Department of Marine and Civil Engineering, Chonnam National University, 50, Daehak-ro, Yeosu, Jeonnam 59626, Korea, Tel: +82-61-659-7321, Fax: +82-61-659-7329, jilee@chonnam.ac.kr)

피스톤식 조파기가 설치되어 있고, 규칙파 및 불규칙파를 조파할 수 있다(Fig. 1 참조). 그리고 단면수로의 폭 1.0 m는 폭 0.6 m와 폭 0.4 m로 분할되어 있으며, 분할된 수로에서 폭 0.6 m의 수로에 실험모형을 설치하여 제반 자료를 취득하고, 폭 0.4 m의 수로에서는 입사파의 설정 및 보정을 수행하였다. 또한 흡수식 조파를 실시하여 구조물 및 조파기에서 재반사를 최소화하였다.

단면수로는 전면 30 m 구간을 강화유리로 처리하여 실험 장면 관찰이 용이하도록 되어있으며, 수로 양쪽 끝 부분에는 여러 겹의 다공성 구조로 형성된 소파장치가 설치되어 있다.

2.2 실험파 조건 및 실험모형

실험파는 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼을 이용한 불규칙파를 적용하였으며, 목표 유의파고($H_{1/3, target}$)는 $H_{1/3, target} = 5.0 \text{ cm} \sim 12.5 \text{ cm}$ 범위에서 2.5 cm 간격으로 설정하였으며, 목표 유의주기($T_{1/3, target}$)는 $T_{1/3, target} = 1.0 \sim 3.0 \text{ sec}$ 범위에서 0.2 sec 간격으로 설정하였다. 실험파는 구조물 설치위치에서 구조물이 설치되지 않은 상태, 즉 진행파로 설정하였다. 구조물 설치 후, 흡수식 조파를 적용하여 구조물에서의 반사파를 수로내에서 최소화 하더라도 입사파는 변형될 수 있다. 따라서 본 실험에서는 폭 0.4 m 수로의 구조물 toe 위치에서 입사파 ($H_{1/3}$ 및 $T_{1/3}$)를 상시 계측하여 실험자료 분석시 입사파로 활

Table 1. Test wave conditions of experiments

Parameter	Properties
$T_{1/3, target}$ (sec)	1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.4, 2.6, 2.8, 3.0
$H_{1/3, target}$ (m)	0.05, 0.075, 0.10, 0.125, 0.15, 0.175, 0.18, 0.20
h (m)	0.5

용하였다. 즉, 실험자료 분석에 사용된 입사파는 목표 실험파 조건이 아닌 Fig. 1의 Gage 4와 Gage 5에서 입반사 분리에 의해 분석된 파를 입사파 조건으로 이용하였다. 그리고 구조물 설치수심(h)은 $h = 0.5 \text{ m}$ 조건을 적용하였다. 실험파 조건을 정리하면 Table 1과 같다.

실험에 적용된 유공1실과 유공2실의 모형은 Fig. 2와 같다. 유공1실과 유공2실 모두 유공벽의 유공율은 33%를 적용하였다. 그리고 구조물 높이를 높게 하여 초요류 발생시에도 입사파가 유공부에만 접하도록 모형을 설계하였다. 유수실 폭(B)은 유공1실과 유공2실에 대하여 각각 0.2 m와 0.4 m이다. 유수실 내부에 채우는 골재(사석)의 크기는 $D_{n50} = 2.5 \text{ cm}$ (모형상 40 g)와 $D_{n50} = 4.2 \text{ cm}$ (모형상 170 g)인 사석을 이용하였다.

본 실험에 적용된 실험조건은 유공1실과 유공2실 단면을 대상으로 각각의 유수실에 $D_{n50} = 2.5 \text{ cm}$ 와 $D_{n50} = 4.2 \text{ cm}$ 의 사석을 채운 경우를 조합하였으며, 이를 정리하면 Table 2와 같다. CASE1은 유공1실 단면에 대한 실험안으로서 CASE1-0

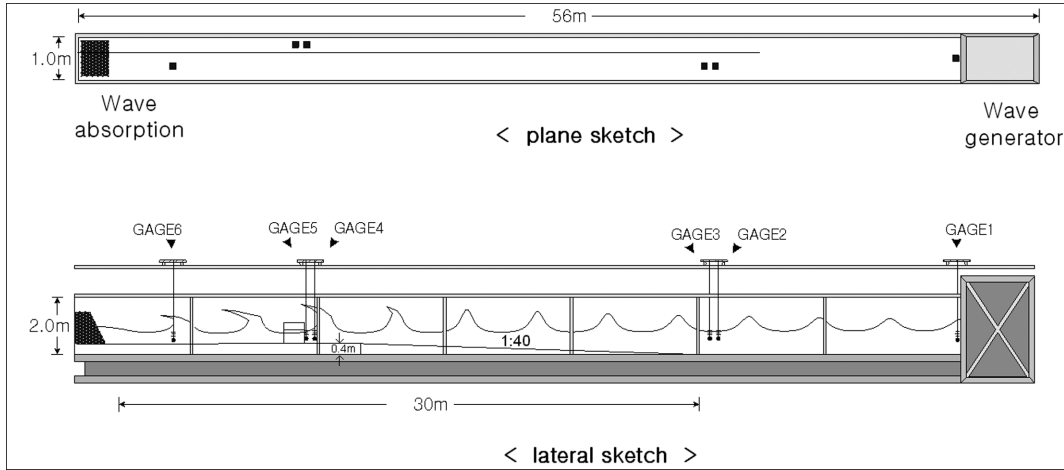
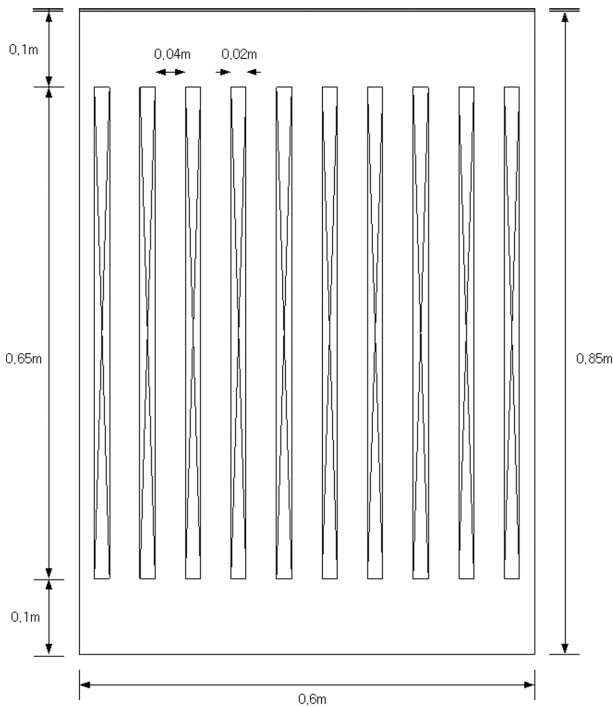


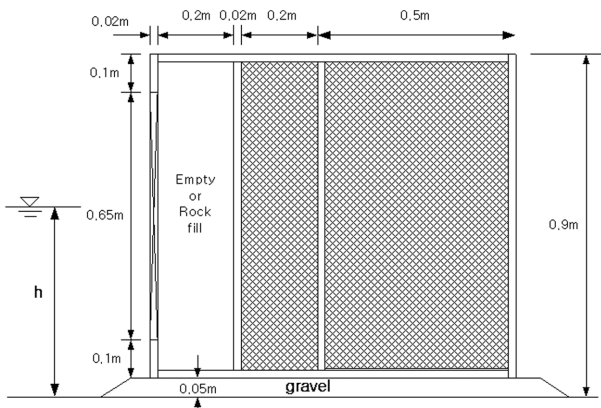
Fig. 1. Schematic sketch of wave flume.

Table 2. Summary of test cases

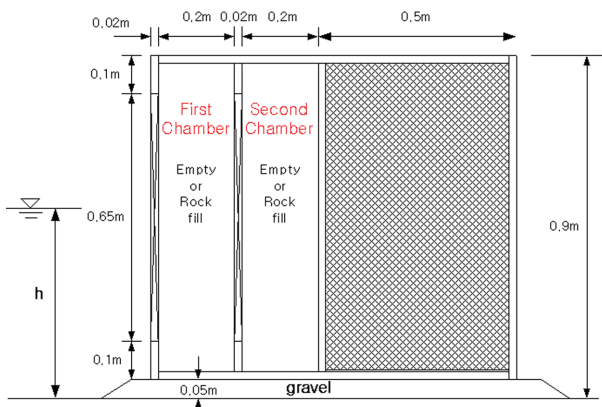
Number of chamber	Case	Rock fill method
Single	CASE1-0	Empty
	CASE1-1	$D_{n50} = 2.5 \text{ cm}$
	CASE1-2	$D_{n50} = 4.2 \text{ cm}$
Double	CASE2-0	(1st chamber) empty + (2nd chamber) empty
	CASE2-1-1	(1st chamber) empty + (2nd chamber) $D_{n50} = 2.5 \text{ cm}$
	CASE2-1-2	(1st chamber) $D_{n50} = 2.5 \text{ cm}$ + (2nd chamber) $D_{n50} = 2.5 \text{ cm}$
	CASE2-2-1	(1st chamber) empty + (2nd chamber) $D_{n50} = 4.2 \text{ cm}$
	CASE2-2-2	(1st chamber) $D_{n50} = 4.2 \text{ cm}$ + (2nd chamber) $D_{n50} = 4.2 \text{ cm}$



(a) front view of perforated wall



(b) side view of perforated wall with single chamber



(c) side view of perforated wall with double chamber

Fig. 2. Schematic sketch of test models.

은 유수실이 비어있는 조건, CASE1-1 및 CASE1-2는 유수실을 각각 $D_{n50} = 2.5\text{ cm}$ 와 $D_{n50} = 4.2\text{ cm}$ 의 사석으로 채운

조건이다. CASE2는 유공2실 단면에 대한 실험안으로서 CASE2-0은 두 개 유수실 모두를 골재채움 없이 해수로 채운 조건이다. CASE2-1-1은 $D_{n50} = 2.5\text{ cm}$ 사석을 두 번째 유수실에만 채운 조건이고, CASE2-1-2는 두 개 유수실 모두를 $D_{n50} = 2.5\text{ cm}$ 사석으로 채운 조건이다. 그리고 CASE2-2-1은 $D_{n50} = 4.2\text{ cm}$ 사석을 두 번째 유수실에만 채운 조건이고, CASE2-2-2는 두 개 유수실 모두를 $D_{n50} = 4.2\text{ cm}$ 사석으로 채운 조건이다. Fig. 3은 각각의 실험 조건에 대한 실험장면이다.

3. 실험결과

3.1 유수실내 사석채움 유무에 따른 반사계수 비교(유공1실 조건)

유공1실 단면을 대상으로 유수실이 비어있는 경우(CASE1-0), 유수실이 $D_{n50} = 2.5\text{ cm}$ 사석으로 채워진 조건(CASE1-1)과 $D_{n50} = 4.2\text{ cm}$ 사석으로 채워진 조건(CASE1-2)에 대하여 반사계수를 비교하였다. 실험결과는 유수실 폭과 입사파 주기조건에 해당하는 유의파장(L)의 비인 B/L 로 분석하였다(Fig. 4 참조).

유공1실 단면의 경우에 유수실이 비어있는 조건(CASE1-0)과 유수실을 사석으로 속채움 한 조건(CASE1-1 및 CASE1-2)의 결과를 비교해 보면, 본 실험조건 내에서 유수실이 비어있는 조건의 반사계수가 근소하게 작게 나타남을 알 수 있지만, 그 차이는 크지 않다. 사석의 크기에 따른 반사계수를 살펴보면, $D_{n50} = 2.5\text{ cm}$ 와 $D_{n50} = 4.2\text{ cm}$ 에 따른 반사계수의 차이는 크지 않으나 상대적으로 큰 사석으로 채워진 경우가 근소하지만 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 큰 사석의 경우가 상대적인 공극이 크기 때문으로 판단된다.

3.2 유수실내 사석채움 유무에 따른 반사계수 비교(유공2실 조건)

유공2실 단면에 대하여 유수실이 모두 비어있는 경우(CASE2-0)와 유수실이 $D_{n50} = 2.5\text{ cm}$ 와 $D_{n50} = 4.2\text{ cm}$ 의 사석으로 각각 채워진 조건(CASE2-1-1, CASE2-1-2, CASE2-2-1 및 CASE2-2-2)에 대하여 반사계수를 비교하였다. 기존의 연구와 유사하게 불규칙파를 실험과로 적용할 경우, $B/L \approx 0.15$ 부근에서 최소 반사계수가 계측됨을 확인 할 수 있다(Fig. 5 참조).

유공2실 단면에 대한 실험결과를 비교해 보면, 유수실이 모두 해수로 채워진 조건(CASE2-0)의 반사계수가 유수실을 사석으로 채운 조건에 비해 작게 나타남을 알 수 있다. $B/L \approx 0.16$ 에서의 평균 반사계수(K_r)를 비교해 보면 CASE2-0은 $K_r = 0.33$, CASE2-1-1은 $K_r = 0.42$, CASE2-1-2는 $K_r = 0.57$, CASE2-2-1은 $K_r = 0.42$, CASE2-2-2는 $K_r = 0.53$ 으로 분석되었다. 유수실에 사석을 채운 조건에 대한 실험결과를 비교해 보면, 첫 번째 유수실은 해수로 채우고 두 번째 유수실을

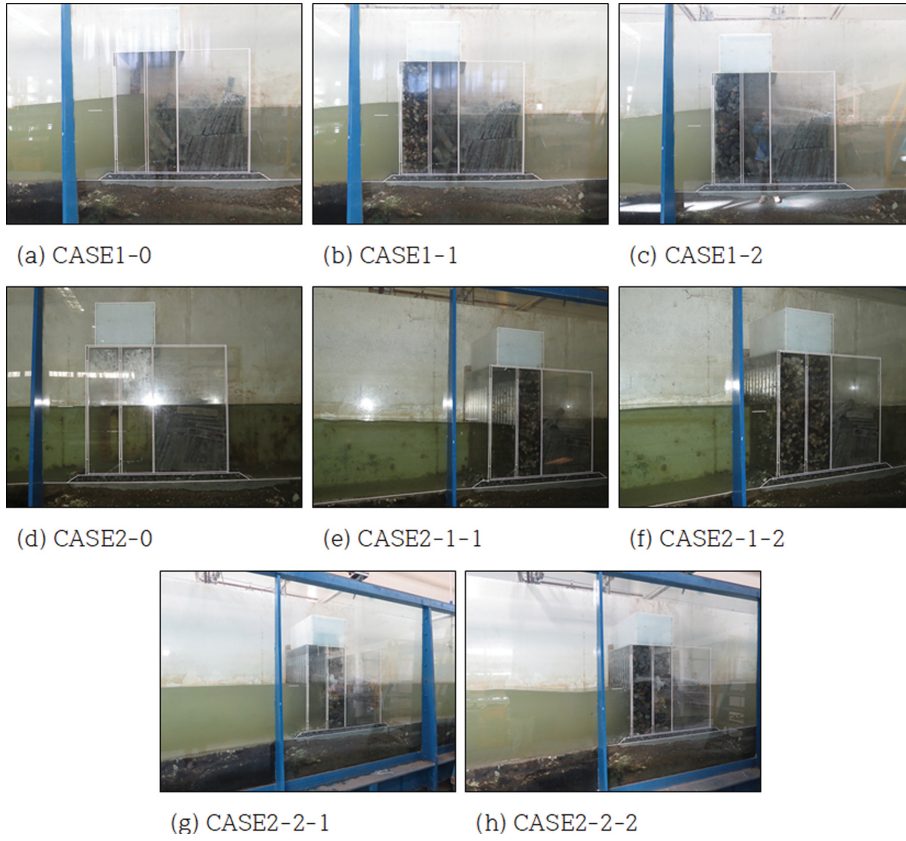


Fig. 3. Snap shots of model test for each cases.

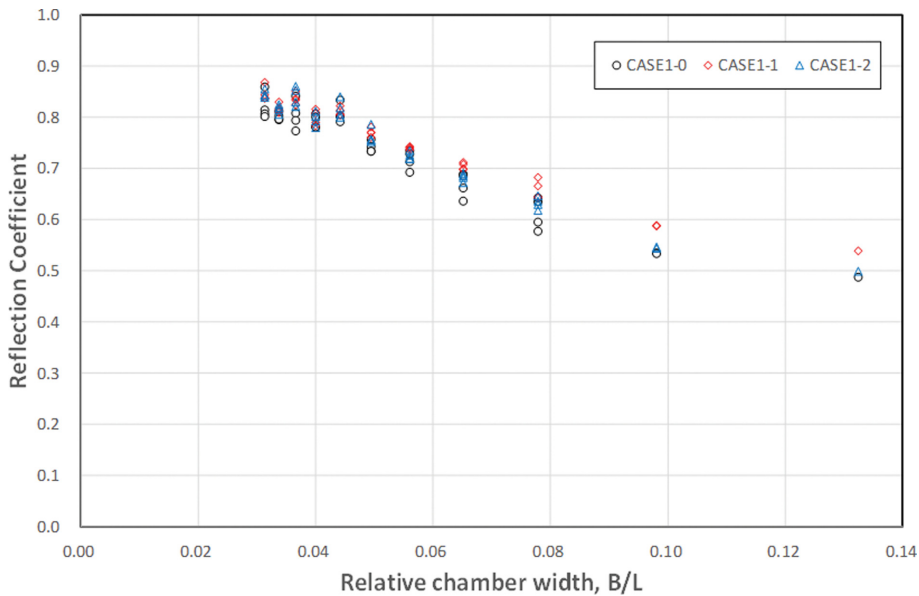


Fig. 4. Reflection coefficients for single chamber conditions.

사석으로 채운 경우(CASE2-1-1 및 CASE2-2-1)의 반사계수가 두 개의 유수실 모두를 사석으로 채운 조건(CASE2-1-2 및 CASE2-2-2)에 비해 작게 측정되었다.

3.3 유공1실과 유공2실(사석채움 조건)의 반사계수 비교
유수실이 1개인 유공1실 CASE1-0과 유공2실 단면에서 첫

번째 유수실은 해수로 채우고 두 번째 유수실을 사석으로 채운 CASE2-1-1($D_{n50} = 2.5 \text{ cm}$)과 CASE2-2-1($D_{n50} = 4.2 \text{ cm}$)의 반사계수를 비교하였다. CASE2-1-1과 CASE2-2-1은 유공 2실 중 두 번째 유수실을 사석으로 채운 조건이지만, 유수실은 1개로 가정하고 반사계수를 비교하였다. 즉, 유공2실 단면이지만 두 번째 유수실을 사석으로 채운 경우(Fig. 2(c))에

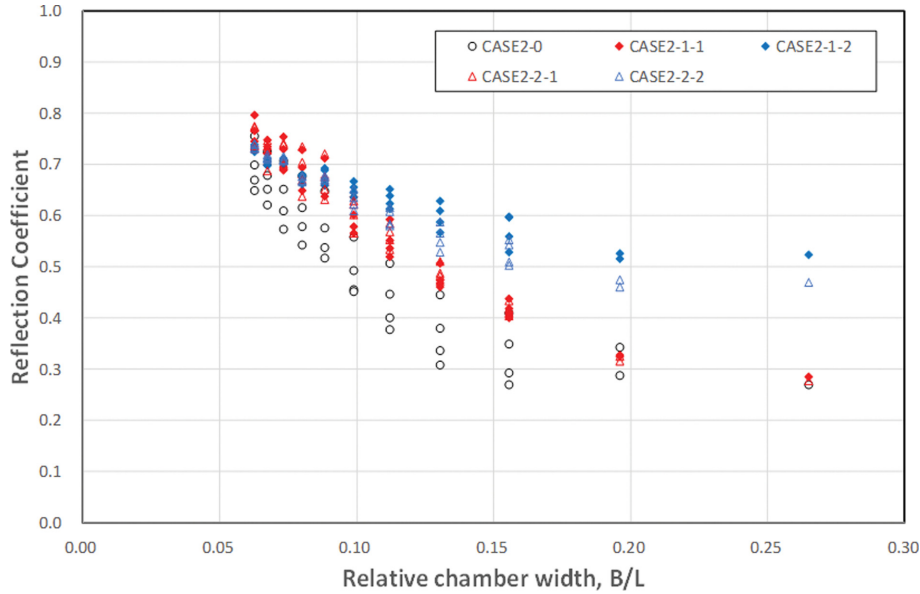


Fig. 5. Reflection coefficients for double chamber conditions.

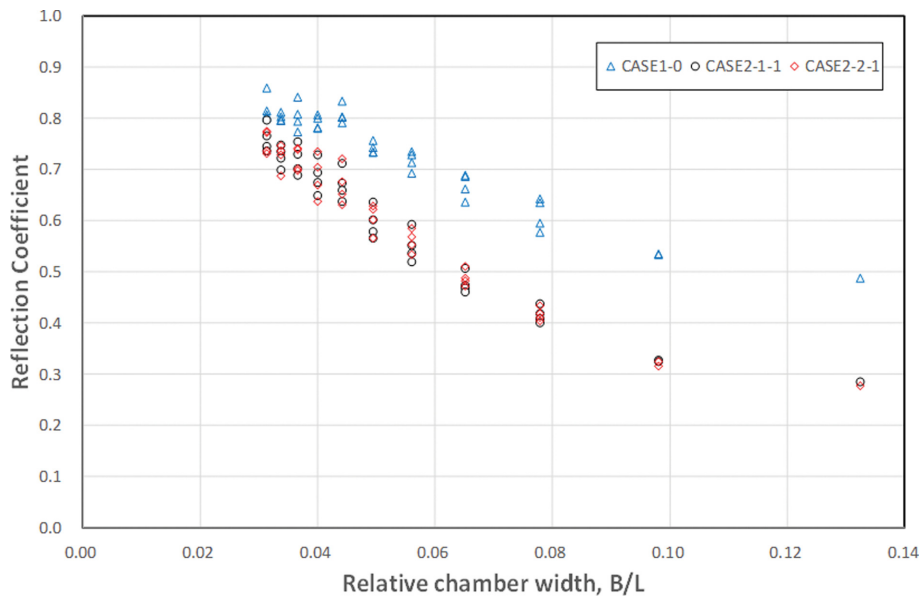


Fig. 6. Comparison of reflection coefficients with single and double chamber conditions. In double chamber conditions, the second chamber is filled with rocks.

서 두 번째 유수실을 사석으로 채운 경우)와 유공1실 단면 (Fig. 2(b)의 경우)의 소파특성을 비교한 것이다. 결과 분석 시 유공2실 단면의 유수실 폭(B)은 유공1실과 동일한 폭($B = 0.2 \text{ m}$)으로 가정하고 B/L 에 따른 반사계수를 비교하였다(Fig. 6 참조). 이는 유공2실로 케이슨을 설계한 후 두 번째 유수실을 사석으로 채움으로서 유공1실 케이슨과 유사한 제원을 유지할 수 있다면, 소파특성 측면에서는 유공1실인 경우보다 우수할 수 있다는 것을 검토한 것이다.

Fig. 6에서 CASE1-0의 반사계수가 CASE2-1-1 및 CASE2-2-1에 비해 크게 나타남을 알 수 있다. 즉, 첫 번째 유수실이 해수로 채워진 것은 동일하지만, 내측벽이 무공인 조건(CASE1-

0)과 내측벽이 유공부이고 두 번째 유수실을 사석으로 채운 조건(CASE2-1-1과 CASE2-2-1)의 비교에서 CASE2-1-1과 CASE2-2-1의 소파효과가 우수하다는 것을 의미한다. CASE2-1-1($D_{n50} = 2.5 \text{ cm}$)과 CASE2-2-1($D_{n50} = 4.2 \text{ cm}$)의 결과를 비교해 보면 사석의 크기에 따른 반사계수의 차이는 크지 않았다. $B/L = 0.13$ 조건에서 실험안별 반사계수를 비교해보면, CASE1-0은 $K_r = 0.49$, CASE2-1-1은 $K_r = 0.29$, CASE2-2-1은 $K_r = 0.28$ 로 나타났다. Fig. 6에서 Case2-1-1과 Case 2-2-1은 사석이 채워지지 않은 첫 번째 유수실 폭(B)을 이용하여 B/L 을 계산한 후 반사계수를 도시한 것이다. 만약 Case2-1-1과 Case 2-2-1의 결과분석 시 유수실 폭(B)을 두개 유수

실의 전체폭으로 한 B/L 로 반사계수를 도시하게 되면, Case1-0과의 차이는 감소하며 동일 B/L 조건에서는 유사한 반사계수를 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 수리실험을 통해 유공부를 갖는 직립계(유공케이슨)에 대한 소파특성을 검토하였다. 일반적으로 유공케이슨은 선박 동요 저감을 위해 항내측 접안시설에 많이 적용하고 있으며, 방파제와 같은 외곽시설의 경우에는 소파효과 및 파력저감 등을 목적으로 사용된다. 그러나 고파랑 해역에 소파효과 증대를 위해 유공2실 케이슨을 건설할 경우에는 체 안정중량 확보를 위해 케이슨의 크기가 커지게 되는 단점이 발생하게 된다. 이와 같은 경우에 본 연구에서 검토한 방법을 적용하면 소파효과는 일정 수준 확보하면서 케이슨의 크기를 상대적으로 작게 할 수 있을 것으로 판단된다. 즉, 다수의 유수실 중 일부를 골재로 채울 경우에 케이슨의 중량을 확보하면서 반사파의 저감효과도 기대할 수 있다. 이는 유공1실 케이슨 단면 보다는 유공2실 케이슨 단면에서 두 번째 유수실을 골재로 채운 단면의 경우가 케이슨 중량을 확보함과 동시에 소파효과 측면에서도 유리함을 의미한다.

감사의 글

이 논문은 2019년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(재해안전항만 구축기술개발, 20180323).

References

Crina-Stefania Ciocan, Francisco Taveira-Pinto, Luciana das Neves

- and Paulo Rosa-Santos (2017). Experimental study of the hydraulic efficiency of a novel perforated-wall caisson concept, the LOWREB. *Coastal Engineering*, 126, 69-80.
- Fugazza, M. and Natale, L. (1992). Hydraulic design of perforated breakwaters. *Journal of Waterway, Port, Coast and Ocean Engineering*, 118, 1-14.
- Huang, Z., Li, Y. and Liu, Y. (2011). Hydraulic performance and wave loadings of perforated/slotted coastal structures: a review. *Ocean Engineering*, 38, 1031-1053.
- Suh, K.D., Kim, Y.W. and Ji, C.H. (2011). An empirical formula for friction coefficient of a perforated wall with vertical slits. *Coastal Engineering*, 58, 85-93.
- Jarlan, G.E. (1961). A perforated vertical breakwater. *The Dock and Harbor Authority, London, UK*, 41(486).
- Kim, Y.T. and Lee, J.I. (2013). Estimation of optimal slit length of perforated wall below Still Water Level: Single Chamber Condition. *Journal of Water Resources Association*, 46(4), 327-334 (in Korean).
- Korea Institute of Construction Technology (KICT) (2000). Wave reflection of perforated-wall caisson breakwaters (in Korean).
- Lee, J.-I. and Shin, S. (2014). Experimental study on the wave reflection of partially perforated wall caissons with single and double chambers. *Ocean Engineering*, 91, 1-10.
- Taveira-Pinto, F., Rosa-Santos, P., Veloso-Gomes, F. and Lopes, H. (2011). Efficiency analysis to reflection of a new quay wall type. *Journal of Hydraulic Research*, 49, 539-546.
- Theocharis, I., Anastasaki, E.N., Moutzouris, C.I. and Giantsi, T. (2011). A new wave absorbing quay-wall for wave height reduction in a harbor basin. *Ocean Engineering*, 38, 1967-1978.

Received 13 November, 2019

Revised 13 December, 2019

Accepted 20 December, 2019