유공부 형상에 따른 유공케이슨의 반사계수 비교 실험: 유공1실 오픈슬릿케이슨

Model Test about Reflection Coefficient for Perforated Wall Caisson according to Perforated Wall Shapes: Single Chamber Open Slit Caisson

김영택

한국건설기술연구원 수자원하천연구본부

Young-Taek Kim

Department of Hydro Science and Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology,
Goyang, Korea

Abstract

In this study, the hydraulic model tests for the single chamber perforated wall caisson were performed to investigate the reflection coefficients according to the slit shapes. The perforated wall with vertical and horizontal slits was applied to the tests. The random waves were used for the test by using Bretschneider-Mitsuyasu frequency spectrum. The similar reflection coefficients were measured in the vertical and horizontal slit caisson within a similar perforation ratio and area. The reflection coefficient according to relative slit length(S/H_s) was analyzed and the minimum reflection coefficients were measured in relatively small S/H_s ($=2.7$). The results from horizontal slits showed similar trends with those from the vertical slit perforated wall.

Keywords : Perforated wall, Slit caisson, Wave reflection, Hydraulic model test

1. 서론

항만구조물을 설계함에 있어 다양한 형식의 구조물이 설계에 적용되고 있다. 외곽시설 중 하나인 방파제의 경우 경사식, 직립식 및 혼성식 구조물이 적용되고 있다. 특히 상대적으로 수심이 깊은 곳에 설치되는 외곽시설의 경우 경사식 보다는 직립식 또는 혼성식의 구조물이 많이 적용되고 있다. 이와 같은 직립식 또는 혼성식 구조물의 경우 육상에서 케이슨을 제작하여 설치하는 형태의 구조물 설계 및 시공에 적용되고 있으며, 소파효과, 월파량 저감, 파력 저감 등을 목적으로 유공케이슨 형태가 대부분 적용되고 있다.

유공구조물의 경우 Jarlan(1961)의 연구 이후 다양한 연구가 진행되어 왔다(Fugazza and Natale, 1992; Lee and Cho, 2001; Suh and Ji, 2006; Hur et al. 2010; Kim and Lee, 2013; Kim and Lee, 2019 등). 이중 국내에서 수행된 기존 연구를 보면, 수리실험을 이용하여 Lee and Cho(2001)은 종슬릿 유공벽을 갖는 케이슨을 대상으로 이중 유수실이 유공1실에 비하여 우수하다는 결과를 제시하였고, Kim and Lee(2013)는 종슬릿을 대상으로 유공부의 최적길이, Kim and Lee(2019)는 종슬릿을 대상으로 유공부에 골재를 채운 경우 이에 대한 수리특성(반사계수)을 제시하였다. Hur et al.(2010)은 LES-WASS-3D

수치모델링을 통하여 종슬릿과 횡슬릿에 대한 반사계수를 제시하였다.

2000년대 이후 국내에 설계되는 직립식 형태를 나타내는 방파제 및 안벽의 대부분은 유공케이슨이 적용되었다. 유공케이슨은 슬릿이 설치되지 않는 무공벽 구조물과 비교하여 반사파를 효과적으로 저감함으로써 기능 및 수리특성 측면에서 유리한 것으로 알려져 있다. 유공케이슨은 대부분 철근 부재가 포함된 구조물로 공장형 슬립폼 등을 적용하여 연직으로 상승하면서 제작된다. 2000년대 초반 국내 항만구조물에 본격적으로 유공케이슨이 적용되는 시기에는 시공의 용이성 등을 목적으로 대부분 종슬릿 형태가 설계에 적용되었으며, 이에 대한 연구가 상대적으로 많이 수행되었다. 케이슨 제작 기술이 발전함에 따라 직선 형태의 케이슨이 아닌 상대적으로 복잡한 형태를 갖는 케이슨이 적용중이다. 본 연구에서는 상대적으로 검토가 많지 않았던 횡슬릿 구조물을 대상으로 하였다. 특히 금번 연구에서는 유공부의 형상, 즉 종슬릿과 횡슬릿의 차이에 따른 반사계수, 횡슬릿 설치 높이에 따른 반사계수를 비교하였다. 이를 검토하기 위하여 단면수리모형실험을 수행하였다.

2. 수리모형실험

2.1 실험시설

수리실험은 한국건설기술연구원의 폭 1.2m, 높이 1.5m, 길이 50m의 수로에서 수행되었으며, 단면수로에는 전기서보 피스톤식 조파기가 설치되어 있고, 규칙파 및 불규칙파를 조파할 수 있다(Fig. 1 참조). 단면수로의 폭 1.2m는 폭 0.8m와 폭 0.4m로 분할되어 있으며, 분할된 수로에서 실험 모형은 폭 0.8m의 수로에 설치하여 제반 자료를 취득하고, 폭 0.4m의 수로에서는 입사파의 설정 및 보정을 수행하였다. 또한 흡수식 조파를 실시하여 구조물 및 조파기에서 채반사를 최소화 하였다. 1번 파고계는 흡수식 조파, 2번과 3번 파고계는 반사계수 측정, 4번과 5번 파고계는 협수로에서 입사파의 설정 및 측정에 이용되었다. 단면수로는 전면 30m 구간을 강화유리로 처리하여 실험장면 관찰이 용이하도록 되어있으며, 수로 양쪽 끝 부분에는 여러 겹의 다공성 구조로 형성된 소파장치가 설치되어 있다. 2번과 3번, 4번과 5번의 파고계 간격은 입사파 주기 조건에 따라 적절하게 조절하였다(Goda and Suzuki, 1976).

2.2 실험파 조건

실험파는 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼을 적용한 불규칙파 조건을 적용하였으며, 목표 유의파고($H_{1/3, target}$)는 2cm, 4cm 및 6cm로 설정하였으며, 목표 유의주기($T_{1/3, target}$)는 0.85s, 0.99s, 1.27s 및 1.56s로 설정하였다. 실험파는 구조물 설치위치에서 구조물이 설치되지 않은 상태에서 설정하였다. 구조물 설치 후 흡수식 조파를 적용하여 구조물에서의 반사파를 수로내에서 최소화 하더라도 입사파는 변형될 수 있다. 따라서 본 실험에서는 실험시 폭 0.4m 수로의 구조물 toe 위치에서 입사파($H_{1/3}$ 및 $T_{1/3}$)를 상시 분석하여 입사파로 활용하였다. 실험에 분석된 실험파는 목표 실험파 조건이 아닌 Fig. 1의 Gage 4와 Gage 5에서 입반사 분리에 의하여 측정된 입사파 조건을 이용하였다. 구조물 설치수심(h_s)

은 0.57m 조건을 적용하였다. 실험파 조건을 정리하면 Table 1과 같다. 모형축척 1/50을 적용할 경우 본 실험에 적용된 입사파고 조건은 원형상 $H_{1/3, target}=1m, 2m$ 및 $3m$ 이며, 목표유의주기는 원형상 $T_{1/3, target}=6s, 7s, 9s$ 및 $11s$ 에 해당한다. 본 실험에 적용된 파랑 조건은 구조물 설계파에 해당하는 고파랑 조건이 아닌 평상파 수준이다.

2.3 실험단면 및 실험방법

실험단면은 Fig. 2와 같으며, 유공부 형상에 따른 수리특성(반사계수) 검토를 위하여 설계 실무에 일반적으로 적용되는 구조물을 대상으로 하였다. 구조물은 Fig. 1의 단면수로 모식도에서 1:40의 경사면 상부 수평면에 설치된다. 실험에는 유수실이 1개인 유공케이슨을 대상으로 유공부 형상에 따른 반사계수 비교를 위하여 다양한 형태의 유공벽을 적용하였다. Fig. 2에서 빨간선으로 표시된 외측 유공벽을 변경하였다. 유수실 내부는 유공부(slit) 하단에서 2cm까지 해수가 채워지고, 이하는 골재가 채워져 있다($A=2cm$). 즉 유공부의 설치높이가 변경되더라도 유공부 하단으로부터 2cm 이하에는 골재가 채워진다. 실험에 적용한 유공케이슨은 오픈슬릿형 케이슨으로서 유수실 상부가 개방된 형태이다. 유공벽과 정수면 사이의 여유고는 모형상 5.3cm이며, 유수실 폭(B)은 9.6cm이다.

Fig. 2의 외측 유공벽의 형상은 Fig. 3과 같으며, 총 6개의 유공벽을 적용하였다. CASE1의 경우 종슬릿(vertical slit)이 적용되어 있으며, CASE2~CASE6의 경우 횡슬릿(horizontal slit)이 적용되어 있다.

Table 1. Test wave and freeboard conditions of experiments

parameter	properties
$T_{1/3, target}$ (s)	0.85, 0.99, 1.27, 1.56
$H_{1/3, target}$ (m)	0.02, 0.04, 0.06
h_s (m)	0.57

Fig. 1. Schematic sketch of wave flume

Fig. 2. Test section for perforated wall structures

Fig. 3. Front view of perforated wall structures

CASE1~CASE3의 경우 유공부 설치 구간의 길이가 모형 상 20cm로 동일하지만, 유공의 형상과 크기가 상이하다. 즉, CASE1은 종슬릿이며, CASE2의 경우 5.4×1.2cm 유공이 연직으로 9개, CASE3의 경우 5.4×1.8cm 유공이 연직으로 6개 설치되어 있다. 유공부 1개조의 조합, 즉 Fig. 3(a)의 적색 상자와 같이 가로 10cm×20cm의 면적에 설치된 유공부에 대한 유공율은 실험한 별로 각각 CASE1이 27%, CASE2와 CASE3은 29.2%이다. CASE4~CASE6의 경우 개별 유공의 크기는 5.4×1.8cm로 동일하지만 유공부의 설치 하단고가 상이하다. 즉, 유공부의 상부 높이는 동일하지만 유공부 설치 길이가 CASE4의 경우 28cm, CASE5의 경우 21.5cm, CASE6의 경우 18cm이다.

유공부 형상에 따른 수리특성을 비교하기 위하여 월파 발생하지 않은 조건을 대상으로 반사계수를 측정하였다. 반사계수는 Goda and Suzuki(1976)의 2점법을 적용하였다.

정수면 아래 유공부의 길이(s)는 CASE1, CASE2 및 CASE3이 16cm로 동일하며, CASE4는 22cm, CASE5는 17.5cm, CASE6은 14cm이다. 정수면 아래 유공부 길이(s)는 Fig. 3(d)에 도시되어 있다.

3. 실험결과

3.1 유공부 형상에 따른 반사계수

반사계수의 비교에 있어 결과 그림의 x 축은 유의주기에 대한 입사파장(L) 대비 유수실 폭(B)의 비인 B/L 을 적용하였다. 동일 유공부 면적(10cm×20cm)를 갖는 CASE1~CASE3을 대상으로 종슬릿(CASE1)과 횡슬릿(CASE2 및 CASE3)의 반사계수를 비교하였다(Fig. 4). CASE1과 CASE2를 비교할 경우 종슬릿 조건인 CASE1에 비하여 횡슬릿 조건인 CASE2의 유공율이 2.2% 크다. 이로 인해 횡슬릿인 CASE2의 반사계수가 CASE1에 비하여 작게 측정된 것으로 보이나, 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 동일 유공 조건에서 종슬릿과 횡슬릿의 차이는 크지 않을 것으로 판단된다. 유공벽에 설치된 슬릿에 의한 입사파의 소파효과로 인

하여 반사파가 저감된다. 동일 유공부 길이와 유사한 유공율이 적용될 경우 종슬릿과 횡슬릿에 따른 유공부의 효과는 유사한 것으로 보인다.

CASE2와 CASE3을 비교할 경우 동일 유공을 조건에서 슬릿이 폭이 큰 CASE3이 CASE2에 비하여 반사계수가 작게 측정된 것을 알 있다. 이는 종슬릿을 적용한 Lee and Cho(2001)와 동일한 결과이다.

3.2 횡슬릿 설치 높이에 따른 반사계수 비교

개별 횡슬릿의 크기(5.4×1.8cm) 및 설치간격(1.5cm)이 동일한 조건에서 유공부의 설치 하단고가 상이한 조건을 갖는 CASE4~CASE6을 대상으로 반사계수를 비교하였다(Fig. 5). 실험결과에 의하면 유공부의 설치 하단고가 가장 낮은 CASE4 조건에서 가장 반사계수가 크게 측정되었으며, 상대적으로 유수실 하단고가 높은 CASE6에서 가장 작은 반사계수가 측정되었다.

횡슬릿 하단고의 영향을 정량적으로 비교하기 위하여 정수면으로부터 횡슬릿 설치 수심까지의 거리(s , Fig. 3(d) 참조)에 따른 영향을 입사파고의 비, 즉 상대슬릿하단길이(s/H_s)로 분석하였다(Fig. 6). 실험결과에 의하면 본 실험에서 설

Fig. 5. Comparison of reflection coefficients according to perforated wall area for horizontal slit

Fig. 4. Comparison of reflection coefficients for vertical and horizontal slit with the same perforated wall area

Fig. 6. Comparison of reflection coefficients according to the relative slit length for horizontal perforated wall under still water level

정한 조건 중 $S/H_s=2.7$ 에서 가장 작은 반사계수가 나타난 것을 알 수 있다. 이 결과는 종슬릿을 대상으로 슬릿하단고에 관한 연구결과를 제시한 Kim and Lee(2013)와 유사한 것을 알 수 있다. Kim and Lee(2013)는 종슬릿을 대상으로 $S/H_s=2\sim3$ 범위에서 최소 반사계수가 나타나며, 종슬릿 설치하단고는 $S/H_s=2.5$ 를 제안하였다.

4. 결론

항만 구조물을 설계함에 있어 직립제의 경우 대부분 유공케이슨이 적용되고 있다. 유공케이슨에 대한 연구가 진행되어 왔으나 대부분 종슬릿에 대한 연구가 대부분이었다. 본 연구에서는 불규칙파를 적용한 단면수리모형실험을 통하여 종슬릿 및 횡슬릿을 갖는 유공케이슨의 수리특성(반사계수)을 비교하였다. 실험에 적용한 모형은 실제 설계 업무에 많이 적용되는 설계조건(평상파 수준)과 모형형상(유공1실의 오픈슬릿케이슨)을 대상으로 하였다. 실험결과에 의하면 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

- (1) 유사 유공율 및 유공 면적을 갖는 종슬릿과 횡슬릿 유공벽에 대하여 반사계수는 서로 유사하게 예측되는 것을 알 수 있다. 또한 기존 종슬릿의 연구 결과와 마찬가지로 동일 유공율을 갖는 전체 유공부에서 개별 횡슬릿 유공의 크기가 클수록 반사계수는 작게 예측되었다.
- (2) 횡슬릿의 설치 면적, 즉 상단 설치높이는 동일하고 횡슬릿 설치 하단부의 길이를 변경하면서 입사파에 대한 반사계수를 분석하였다. 상대슬릿하단길이(S/H_s)에 따른 반사계수 특성은 기존의 종슬릿 결과와 유사하게 예측되었다. 횡슬릿을 적용한 유공부 설치하단고는 종슬릿과 유사하게 $S/H_s=2\sim3$ 범위로 나타나는 것을 알 수 있었다.

실제 항만구조물 설계시 많이 적용되는 구조물 형상을 대상으로 평상파 수준의 파랑을 적용하여 구조물의 수리특성을 제시하였습니다. 향후 유수실 폭의 영향, 월파 등 다양한 영향을 고려한 추가 연구가 필요할 것입니다.

감사의 글

본 연구는 2021년도 (주)헤인이앤씨의 ‘방파제 형식에 따른 수리특성 실험 연구’ 용역으로 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Fugazza, M. and Natale, L.(1992). "Hydraulic design of perforated breakwaters." *Journal of Waterway, Port, Coast and Ocean Engineering*, Vol. 118, pp. 1-14.
- Goda, Y. and Suzuki, T. (1976). "Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments." *Coastal Engineering Proceedings*, Vol. 1, No. 15, pp. 47.
- Hur, D.-S., Lee, W.-D., Lee, H.-W. and Kim, I.-C. (2010). "The reflection characteristics of a perforated slit caisson with two chambers." *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 24, No. 1, pp. 60-67 (in Korean).
- Jarlan, G. E. (1961). "A perforated vertical wall breakwater." *Dock Harbour Authority*, Vol. XII, No. 486, pp. 394-398.
- 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*, Vol. 46, No. 4, pp. 327-334 (in Korean).
- Kim, Y. T. and Lee, J. I. (2019). "Hydraulic experiments on reflection coefficients for perforated wall caisson with rock fill." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 31, No. 6, pp. 403-408 (in Korean).
- Lee, J. I. and Cho, J. H. (2001). "Reflection characteristics of vertical slit caisson breakwater." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 13, No. 4, pp. 263-272 (in Korean).
- Suh, K. D., Kim, Y. W. and Ji, C. H. (2011). "An empirical formula for friction coefficient of a perforated wal with vertical slits." *Coastal Engineering*, Vol. 58, pp. 85-93.