Journal of the Korean Society of Civil Engineers
Vol. 33, No. 4: 1455~1462, July 2013
DOI: http://dx.doi.org/10.12652/Ksce.2013.33.4.1455

ISSN 1015-6348 (Print)
ISSN 2287-934X (Online)
www.kscejournal.or.kr

Coastal and Harbour Engineering **해안 및 항만공학**

부분 유공케이슨의 Slit 형상에 따른 반사특성 실험

이종인*
Lee, Jong-In*

Experimental Study for Wave Reflection of Partially Perforated Caisson by Slit Shape of Front Wall

ABSTRACT

This study examines the reflection of a partially perforated wall with single chamber by 2D and 3D hydraulic experiments. The effects of slit shape on the front wall, relative chamber width and wave steepness were discussed. For the normal incident wave condition, the reflections of horizontal slit case were lower than that of the vertical slit with the similar porosity, but the differences are not significant. When the wave steepness is relatively small, the reflection coefficients are large. In the oblique incidence, the normalized wave heights along a perforated wall with similar porosity are almost same for the vertical and horizontal slit walls and therefore the difference by slit shape can be ignored.

Key words : Hydraulic experiment, Partially perforated caisson, Slit shape, Relative chamber width, Porosity

초 록

본 연구에서는 유공부 형상, 상대유수실 폭, 파형경사 등에 따른 유공케이슨의 소파특성을 2차원 및 3차원 실험을 통해 고찰하였다. 파랑이 직각으로 입사하는 경우, 유사한 유공율 조건에서 횡 slit이 종 slit에 비해 반사계수가 약간 작게 계측되었으나 그 차이는 크지 않았다. 그리고 파형경사가 큰 경우가 작은 경우에 비해 약간 낮은 반사계수를 보였다. 경사 입사파 조건에서도 유공율이 유사할 경우, 유공부 형상에 따른 제체 전면의 파고 차이는 거의 발생하지 않았다.

검색어 : 수리실험, 부분 유공케이슨, 유공부 형상, 상대유수실 폭, 유공율

1. 서 론

선박의 대형화 등으로 인해 항만구조물의 건설 수심이 깊어지고 설계파고가 증대됨에 따라 경제성 및 안정성 등의 확보 측면에서 경사식구조물 보다는 직립식구조물이 선호되는 경향이다. 직립식구조물 형식 중 유공부를 설치한 유공케이슨은 경제성 측면에서는 무공케이슨에 비해 다소 불리한 측면이 있지만, 효용성 측면에서는 우수하다고 할 수 있다. 따라서 대형 항만구조물인 경우에 외곽시설과 접안시설 등에 유공케이슨(유공 1실 또는 유공 2실)의 적용이 증가하고 있는 추세이다. 유공케이슨은 크게 전면벽의 상단부터 하단까지 전체가 유공부로 구성된 전면 유공케이슨(fully perforated caisson)과 정수면을 기준으로 상·하부 일부구간에만 유공부를 설치하는 부분 유공케이슨(partially perforated caisson)으로 구분할 수 있으며, 실제 설계 · 건설시에는 안정성 및 경제성 측면 등에서 유리한 부분 유공케이슨이 대부분 적용되고 있는 실정이다. 유공케이슨 방파제의 장점중의 하나로는 직립식 형태의 단면이면서 유공부에 의한 소파효과로 인해 상대적으로 낮은 반사계수를 보인 다는 것이며, 이는 파랑이 유공부를 통과하면서 발생하는 수두손실과 유수실 내에서의

* 정회원 · 전남대학교 공학대학 해양토목공학과 부교수 (**Corresponding Author** · Chonnam National University · jilee@chonnam.ac.kr)
Received May 21 2013, **Revised** May 28 2013, **Accepted** May 30 2013

Copyright ⓒ 2013 by the Korean Society of Civil Engineers
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

추가적인 에너지 감쇠 등에 기인한다. 낮은 반사율은 구조물 전면부의 파고를 저감시킴으로 인해 선박의 항행 및 접안, 선단부의 안정성 확보측면 등에서 유리하다 할 수 있다. 기존 연구에 의하면 유공케이슨에 작용하는 파력 및 반사율 등에 영향을 미치는 요소로는 유공율, 유수실 수, 유수실 폭, 유공벽의 두께, 대상 수심, 파랑 제원 등이며, 설계시에는 조차, slit 상·하단고, 유공부 형상 등을 추가로 고려하게 된다.

유공방파제는 Jarlan(1961)에 의해 처음 제안되었으며, Jarlan형 방파제는 유공형 전면벽과 무공형 후면벽으로 구성된다. Jarlan에 의해 제안된 유공방파제는 동역학적 효율 향상, 안정성 확보 및 케이슨 저면부의 세굴 저감 등을 목적으로 다양한 연구가 진행되어 왔다. Fugazza and Natale(1992)은 다중유수실의 유공케이슨 방파제에 대한 반사율 산정식을 유도하고, 규칙파를 적용하여 상대유수실 폭(relative chamber width)이 0.25인 조건에서 최소 반사율이 나타남을 보였다. Suh and Park(1995)은 Galerkin 고유함수법을 이용하여 사석 마운드 위에 위치한 유공케이슨 방파제에 일정 각도로 입사하는 파에 대한 반사특성을 연구하였으며, 해석결과는 수리모형실험 결과와 비교하였다. Williams et al.(2000)은 유공 1실과 유공 2실, 전면벽이 유공형 또는 slit형인 유공케이슨 방파제에 대한 간략 해석해를 선형파이론을 이용하여 유도하였다. 국내연구로서 편종근(1980)은 삼중 유공벽식 케이슨 방파제와 Jarlan형에 대하여 각각의 유공벽에 작용하는 파력에 대한 실험을 수행하였으며, 파력의 크기는 주기보다는 파고의 영향을 많이 받고, 유공간벽 보다는 전면벽과 후면벽에서 파력이 크게 작용함을 보였다. 또한 전면벽의 유공율이 작고, 입사파의 파형경사가 커질수록 전면벽에 작용하는 파력의 크기가 증가함을 밝혔다.

유공케이슨의 소파특성에 관한 기존 연구들은 유공부에 의한 에너지 감쇠, 적정 유공율 및 유수실 폭의 결정에 요구되는 자료의 도출에 중점을 두었다. 불규칙파를 적용한 기존 연구들에 의하면 유공 1실인 경우에 적정 유공율(porosity)은 약 30%이고, 상대유수실 폭은 0.1~0.15가 적정한 것으로 검토되었다. 부분 유공케이슨의 경우에 구조물 상부는 상치콘크리트 설치 등으로 인해 유공부 상단의 높이는 제한이 되기 때문에 연구 등을 통해 적정 상단고를 제시하더라도 실무에 적용하는데 있어서는 제약이 따를 수 있다. 제약이 상대적으로 낮은 적정 유공부 하단고에 대한 연구도 미진한 실정이며, 이에 대한 국내 연구로서 Kim and Lee(2013)를 들 수 있다. Kim and Lee의 연구에서는 수리실험을 통해 부분 유공구조물의 하단고는 입사파고의 2~3배가 적정함을 보였다.

전술한 기존 연구의 대부분은 파랑이 구조물에 직각으로 입사하는 조건에서 유공케이슨의 수리학적 특성을 위주로 검토한 것이며, 경사입사파에 대한 유공케이슨의 소파특성에 대한 연구는 상대적으로 미미한 실정이다. Li et al.(2003)은 2중 유수실 조건에서 입사각에 따른 반사계수를 eigenfunction expansion method를 이용하여 검토하였으며, Liu et al.(2007)은 선형 포텐셜이론(linear potential theory)을 이용하여 유공케이슨에 파랑이 경사지게 입사하는 경우에 대한 유수실 내부와 외부의 파고분포를 규칙파를 적용하여 검토하였으나, 수리실험결과 등과의 비교는 수행하지 않았다. Liu et al.(2009)은 경사입사파에 대한 유공케이슨의 반사계수를 규칙파를 적용하여 해석하였으며, 입사각이 증가(직각 입사의 경우에 0°)할수록 반사계수가 증가함을 보였다.

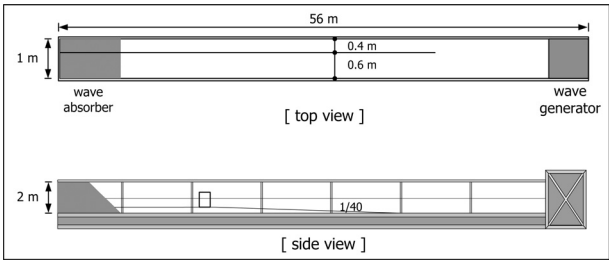
유공케이슨의 소파특성에 대한 다양한 연구가 수행되었지만, 유공부의 형상에 따른 검토는 상대적으로 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 유공부의 형상(종 slit과 횡 slit)에 따른 반사특성을 직각 입사파 및 경사 입사파를 대상으로 실험적으로 검토하였다. 직각 입사파 조건에서는 각 유공부 형상별로 3개의 유공율을 적용하여 유공율, 유공부 형상 및 파형경사에 따른 반사특성을 검토하였다. 그리고 경사 입사파 조건에서 무공케이슨과 유공케이슨을 대상으로 입사각, 유공부의 형상, 상대유수실 폭에 따른 제체 전면의 파고분포를 비교 검토하였다.

2. 수리실험

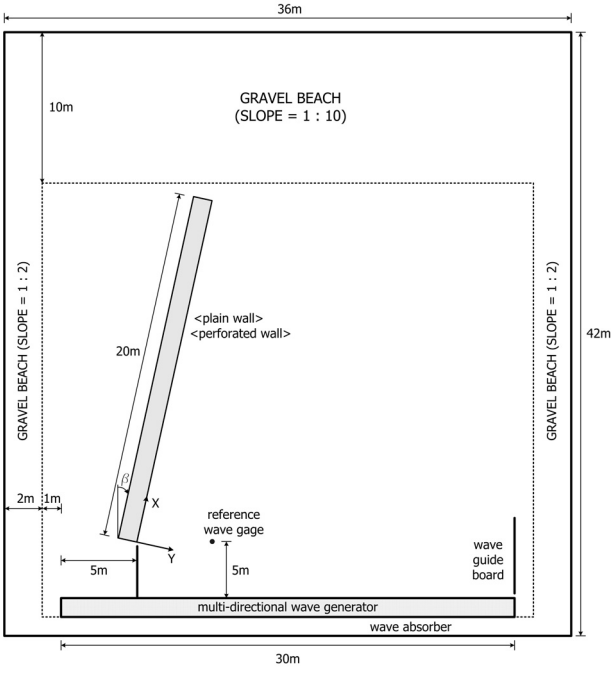
2.1 실험시설 및 실험장비

본 연구에서는 부분 유공케이슨의 유공부 형상, 유공율과 상대유수실 폭에 따른 반사특성을 검토하기 위해 2차원 실험을 수행하였다. 2차원 실험은 Fig. 1(a)에 도시된 수로를 이용하였으며, 실험수로는 길이 56m, 높이 2m, 폭 1m이고, 전기서보 피스톤식 조파기가 설치되어 있다. 본 실험수로는 규칙파 및 불규칙파를 조파할 수 있으며, 수로 내에서 구조물 설치로 인한 반사파와 조파판에서 발생하는 재반사파를 효과적으로 제어하기 위해 수로 폭 1m를 폭 0.6m와 폭 0.4m로 분할하였다. 분할된 수로에서 실험모형은 폭 0.6m의 수로에 설치하여 제반 자료를 취득하고, 폭 0.4m의 수로에서는 입사파의 설정 및 보정을 수행하였다.

또한 경사 입사파에 의한 부분 유공케이슨의 반사특성을 검토하기 위해 3차원 실험을 수행하였다. 3차원 실험에 사용된 조파기는 다방향 불규칙파 조파기로서 규칙파, 일방향 불규칙파 및 다방향 불규칙파의 조파가 가능한 사형(snake-type) 조파기이다. 조파기 각 구동부에 연결된 조파판 하나의 폭은 0.5 m, 높이는 1.1m로서 조파기의 전체 폭은 30m이고, 전기서보 피스톤식이다. 실험에 사용된 평면수조는 길이 42m, 폭 36m, 높이 1.05m이다. Fig. 1(b)는 본 실험에 사용된 평면수조와 모형설치 개념도를 도시한 것이다.



(a) wave flume for 2D test



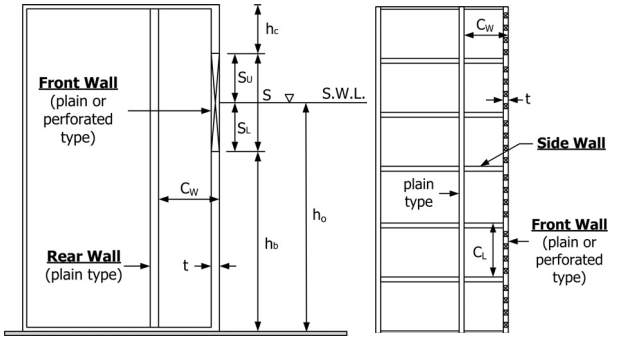
(b) wave basin for 3D test

Fig. 1. Experimental facilities and setup

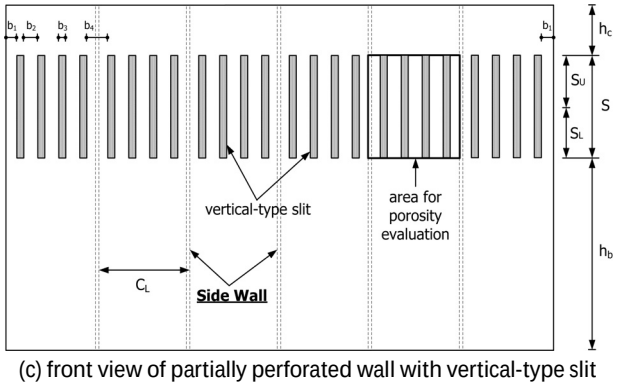
그리고 본 실험에 사용된 분석장비는 컴퓨터, 증폭기 및 A/D converter 등으로 구성되어 있으며, 실험파 제원에 따라 생성된 조파신호를 조파기로 송신하고, 파고계로부터 독취된 자료를 주파수 스펙트럼 및 파고 등으로 분석하는 기능을 하는 장치이다. 실험파 설정 및 파고계측에 사용된 파고계는 용량식 파고계로서 길이는 0.6m이고, 측정범위는 0~±0.3m이며, 독취율은 20Hz이다.

2.2 실험모형

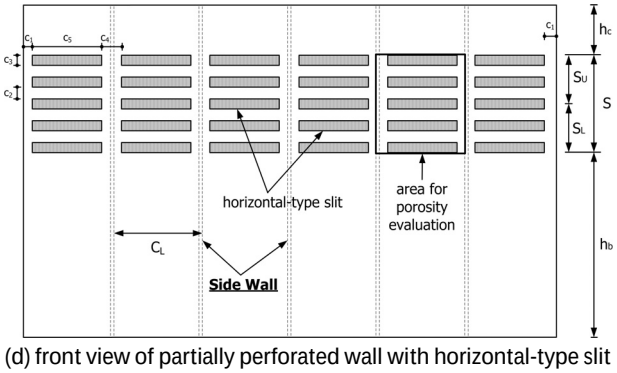
유수실이 1개인 유공케이슨을 대상으로 전면벽의 slit 형상, 유공율(P) 및 상대유수실 폭에 따른 반사특성을 실험적으로 검토하였다. 실험에 사용된 모형구조물의 형상을 도시한 것이 Fig. 2이다. Fig. 2(a, b)는 각각 측면도와 평면도로서 모형의 주요 제원은 Table 1에 제시되어 있다. 본 실험에서는 사용되는 실험시설의 제원을 감안하여 2차원과 3차원 실험에 사용된 모형을 서로 다른



(a) side view (b) top view



(c) front view of partially perforated wall with vertical-type slit



(d) front view of partially perforated wall with horizontal-type slit

Fig. 2. Schematic diagram of model structure

Table 1. Dimensions of model structures (unit : cm)

h_b	h_c	S	t	C_W	C_L	Remarks
64.4	12.0	22.0	1.6	20.6	19.2	2D test
40.3	7.5	13.7	1.0	12.9	12.0	3D test

축척을 적용하여 제작하였다. 즉, 실험결과의 신뢰성 향상을 위해 2차원 모형은 3차원 모형에 비해 보다 크게 제작하였다(Table 1 참조). Fig. 2에서 h_b는 구조물 하단으로부터 slit 하단까지의 높이, h_c는 slit 상단으로부터 구조물 마루까지의 높이, S는 유공부(slit)의 길이, t는 벽의 두께, C_W는 유수실 폭, C_L은 유수실의 길이이다. 그리고 유공부의 길이 S는 S_U와 S_L로 구분하였다. S_U는

Table 2. Dimensions of partially perforated wall (unit : cm)

Case ID	vertical-type slit								porosity, P (%)
	2D test				3D test				
	b_1	b_2	b_3	b_4	b_1	b_2	b_3	b_4	
VP20	2.2	3.6	1.0	4.4	-	-	-	-	20.8
VP30	2.0	3.2	1.4	4.0	1.25	2.0	0.88	2.5	29.2
VP40	2.0	2.4	2.0	4.0	-	-	-	-	41.7

Case ID	Horizontal-type slit										porosity, P (%)
	2D test					3D test					
	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	
HP20	2.4	4.0	1.2	4.8	14.4	-	-	-	-	-	20.5
HP30	3.2	3.0	2.0	6.4	12.8	2.0	1.88	1.25	4.0	8.0	30.3
HP40	3.4	2.0	2.8	6.8	12.4	-	-	-	-	-	41.1

정수면으로부터 slit 상단까지, S_L은 정수면으로부터 slit 하단까지의 길이이다. Fig. 2(c, d)는 전면벽의 형상으로서 각각 종 slit(vertical-type slit)과 횡 slit(horizontal-type slit) 모형을 도시한 것이다. 본 실험에 적용된 유공부 형상 및 유공율에 따른 유공부 제원은 Table 2에 정리하였다. 유공율은 Fig. 2(c, d)에 도시된 바와 같이 유공부 하단과 상단 사이의 전체 면적과 유공부만의 면적의 비로 산정하였다. 종 slit의 경우에는 정수면에 접하는 부분에 대해 유공율을 산정하여도 되지만, 횡 slit의 경우에는 이를 적용할 수 없기 때문이다. 전술한 바와 같이 실험시설 등의 제약으로 인해 2차원 실험과 3차원 실험시 동일한 모형을 사용할 수 없어 원형을 서로 다른 축척을 적용하여 실험모형을 제작하였다.

2.3 실험조건

직각 입사조건에서 유공부의 형상에 따른 반사특성을 검토하기 위해 전면벽이 종 slit과 횡 slit인 유공 1실 케이슨을 대상으로 하였으며, 각각의 slit 형상별로 3가지의 유공율을 적용하였다. 종 slit의 경우에 P=20.8%(case VP20), 29.2%(case VP30), 41.7%(case VP40), 횡 slit인 경우에 P=20.5%(case HP20), 30.3%(case HP30), 41.1% (case HP40)이다. 본 실험에 적용된 유공부의 제원은 Table 2에 제시되어 있으며, slit 형상별로 가능한 한 유사한 유공율이 되도록 모형을 제작하였으나, 약간의 유공율 차이는 존재한다.

경사 입사파조건에서 파랑과 유공케이슨의 상호작용에 의한 파고저감효과를 검토하기 위해 3차원 실험을 수행하였으며, 3차원 실험은 모형제작경비 등의 제약으로 인해 각각의 slit 형상별로 1개의 유공율만을 대상으로 하였다. 본 연구에서는 무공구조물(case PW), 종 slit(case VP30)과 횡 slit(case HP30) 실험안을 대상으로 하였다. 3차원 실험에 적용된 모형의 연장은 모형상 20m이며, 모형의 배치는 Fig. 1(b)를 참조할 수 있다. 실험시 입사파와 구조물이 이루는 각(β)은 모형의 설치각도를 변경하여 조절하였다. 이는 3차원 실험에 사용된 조파기가 다방향조파기이기 때문에 경사 입사파를 재현할 수 있으나, 경사 입사파로 재현할 경우에 각각의 입사각별로 동일한 조건의 파랑을 설정하기 어렵고, 또한 입사각이 커지게 되면 회절이 발생하게 되어 실험결과의 정확도에 영향을 미칠 수 있기 때문이다. Fig. 3~Fig. 5는 실험안별 모형설치 장면이다.

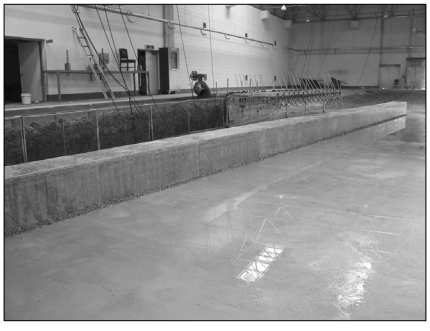


Fig. 3. Model installation for case PW

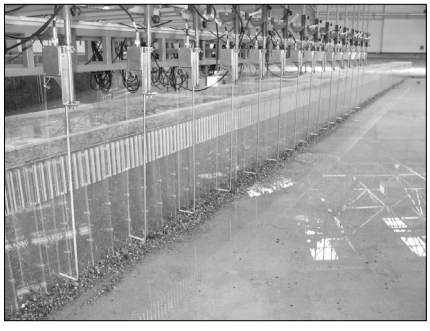


Fig. 4. Model installation for case VP30

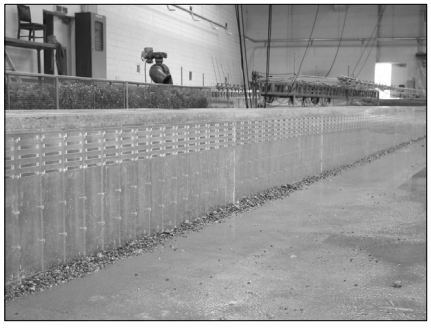


Fig. 5. Model installation for case HP30

Table 3. Wave conditions in experiment

Significant wave period, T_S (s)	Significant wave height, $(H_S)_O$ (cm)	Water depth, h_O (cm)	Remarks
0.8 ~ 2.6 (ΔT_S = 0.2)	2, 4	74.4	2D test
0.79, 1.11, 1.42, 1.74	2.5	46.5	3D test

실험파는 각 실험별(2차원 및 3차원 실험)로 구분하여 적용하였다(Table 3 참조). 2차원 실험은 전면벽의 유공부 형상, 유공율 및 상대유수실 폭 등에 따른 소파특성을 평가하는 것이 주된 목적이기 때문에 입사파의 주기를 다양하게 적용하였다. 적용된 입사파의 유의주기(T_S)는 T_S=0.8s~2.6s이며, 주기 간격(ΔT_S)은 ΔT_S=0.2 s이다. 그리고 구조물이 설치되기 전 구조물 설치위치에서의 유의파고($(H_S)_O$)는 $(H_S)_O$=2cm와 4cm이며, 구조물 설치위치에서의 수심(h_O)은 h_O=74.4cm이다. h_O=74.4cm인 경우, 정수면으로부터 slit 상단까지의 높이(S_U)와 slit 하단까지의 높이(S_L)는 각각 S_U=12cm, S_L=10cm이다. 즉, $(H_S)_O$=2cm인 경우에 $S_U/(H_S)_O$=6과 $S_L/(H_S)_O$ =5이며, $(H_S)_O$=4cm인 경우에는 $S_U/(H_S)_O$=3과 $S_L/(H_S)_O$=2.5이다. 3차원 실험의 경우에 입사파의 유의주기는 T_S=0.79s, 1.11s, 1.42s 및 1.74s이며, 유의파고는 $(H_S)_O$=2.5cm이며, 적용 수심은 h_O=46.5cm이다. h_O=46.5cm인 경우에 S_U=7.5cm, S_L≒6.2cm이므로 $(H_S)_O$=2.5cm 조건에서 $S_U/(H_S)_O$=3.0과 $S_L/(H_S)_O$=2.5이다. 그리고 입사파와 구조물이 이루는 각(β)은 β=10°, 20° 및 30°를 적용하였다.

본 연구에서 제시된 유공케이슨 및 파랑의 제원 등(Table 1, Table 2 및 Table 3)은 모형상의 값으로서 2차원 실험의 경우 1/25, 3차원 실험의 경우 1/40 축척을 적용하여 원형을 축소하였으며, 축척을 적용하면 원형값으로 환산할 수 있다.

모든 실험에 적용된 일방향 불규칙파는 Bretschneider-Mitsuyasu 주파수 스펙트럼을 적용하여 재현하였으며, 입사파는 구조물이 설치되기 전의 조건, 즉 통과파 관점에서 설정하였다. 2차원 실험에서는 모형구조물이 설치되지 않는 협수로에서 구조물 설치 위치, 3차원 실험에서는 Fig. 1(b)에 도시된 기준점(reference point)에서 입사파를 상시 계측하여 과도한 반사파의 발생유무를 확인하였다. 그리고 구조물 등에 의해 발생되는 반사파가 계측영역내로 전파되는 것을 최소화하기 위해 다양한 소파시설을 충분히 배치하였다.

3. 실험결과 분석 및 고찰

본 연구에서는 부분 유공케이슨의 유공부 형상에 따른 소파특성을 검토하기 위해 2차원 및 3차원 실험을 수행하였다. 파랑이 구조물에 직각으로 입사하는 2차원 실험에서는 반사계수 도출을 통한 유공부 형상 및 유공율에 따른 소파특성을 위주로 검토하였고, 3차원 실험에서는 경사입사파에 대한 부분 유공케이슨의 소파특성을 제체 전면의 파고분포를 계측하여 검토하였다.

3.1 유공케이슨의 반사특성

전면벽의 유공부 형상, 유공율 및 상대유수실 폭에 따른 부분 유공케이슨의 반사특성을 2차원 실험을 통해 검토하였다.

Fig. 6은 S_U=12cm와 S_L=10cm 조건에서 유공율 및 유공부 형상에 따른 반사계수 실험결과로서 상대유수실 폭(C_W/L_S)에 대해 도시하였다. 여기서, L_S는 입사파의 유의주기에 대응하는 파장이다. 본 실험조건 내에서 최소 반사계수는 기존 연구결과와 유사한

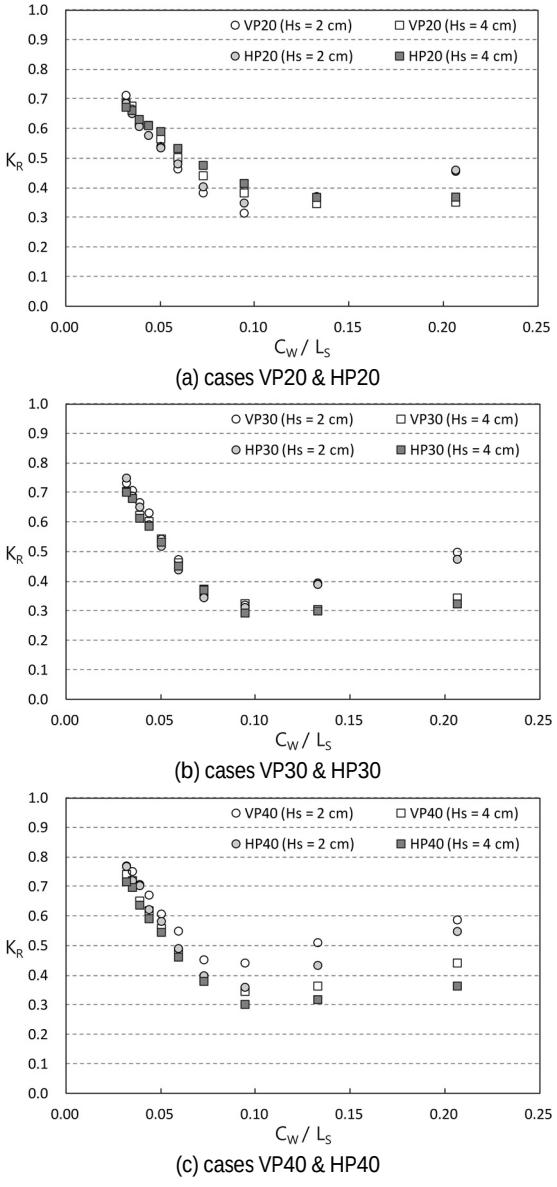


Fig. 6. Reflection coefficients by porosity and slit shapes of front wall for the normal incident condition

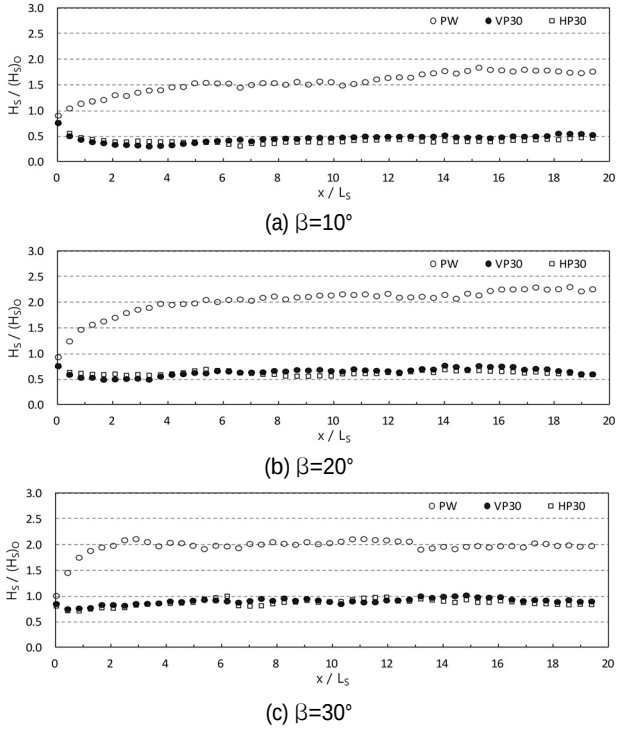
C_W/L_S=0.1~0.15 범위에서 계측되었으며, 유공율에 따른 최소 반사계수 발생 위치의 변화는 거의 나타나지 않았다. 전체적으로 $C_W/L_S \geq 0.1$인 경우에 횡 slit(HP series)의 반사계수가 종 slit(VP series)의 결과보다 약간 작게 계측됨을 알 수 있다. 그리고 전반적으로 입사파의 파고가 큰 경우가 작은 경우에 비해 반사계수가 작음을 알 수 있다. 이는 입사파의 파형경사가 큰 경우가 작은 경우에 비해 에너지감쇠가 크기 때문에 반사계수가 낮게 나타나는 것이다. $(H_S)_O$=4cm 조건에서 타 유공율에 비해 VP40 및 HP40의 경우가 slit 형상에 따른 반사계수의 차이가 크게 나타났으며, HP40의 경우가 VP40의 경우에 비해 15~20% 정도 반사계수가 낮게 계측되었다. $C_W/L_S \leq 0.05$인 경우는 유공율에 따른 반사계수의 차이는 크지 않았으나, $C_W/L_S \geq 0.05$인 조건에서는 본 연구에서 수행한 실험안 중 P≒30%의 소파효과가 가장 우수하게 나타났다. 본 실험에 적용된 slit의 상·하단고는 정수면으로부터 S_U=12cm와 S_L=10cm 조건이고 입사파의 유의파고가 $(H_S)_O$=2cm와 4cm이기 때문에 유공부 상·하단에 위치하는 무공부에 파랑이 직접적으로 부딪치지 않는 조건이다. 따라서 유수실 내에서의 공기포획은 발생하지 않는다.

3.2 경사 입사파조건에서 유공케이슨의 반사특성

Fig. 7~Fig. 10은 β=10°, 20°, 30°인 경사 입사파조건에서 구조물 전면을 따른 상대파고를 직립 무공케이슨, 종 slit 및 횡 slit 유공케이슨을 대상으로 비교 도시한 것이다. 경사 입사파를 대상으로 한 실험에서는 유공율이 약 30%인 VP30과 HP30 실험안을 대상으로 하였으며, 각각의 모형 연장은 20m이다. 구조물 전면을 따른 파고계측은 구조물 전면벽으로부터 0.05m 이격하여 0.4m 간격으로 파고계를 배치한 후 실시하였으며, 구조물 끝단효과(end effect)를 감안하여 계측구간은 모형상 x=0m~18.8m로 설정하였다(Fig. 1b 참조). 본 실험은 전면벽의 유공 형상에 따른 차이점을 검토하는 것이 주된 목적이기 때문에 x방향으로의 계측을 위주로 수행하였다. Table 3에 제시된 바와 같이 유의주기 4가지 조건을 적용하였으며, 동일 조건을 대상으로 3회 이상 반복실험을 수행하여 계측된 결과를 산술평균하여 결과를 도시하였다. 입사각, 유공부 형상, 유의주기 및 유의파고 등을 다양하게 적용하여 실험을 수행하였기 때문에 많은 계측자료가 존재하지만, 본 논문에서는 대표적인 결과를 제시하고 검토하고자 한다.

Fig. 7~Fig. 10은 $S_U/(H_S)_O$=3 및 $S_L/(H_S)_O$=2.5 조건에서 T_S=0.79s (C_W/L_S=0.133), 1.11s(C_W/L_S=0.073), 1.42s(C_W/L_S=0.050) 및 1.74s(C_W/L_S=0.039)를 적용한 구조 형상(무공케이슨, 종 slit 유공케이슨 및 횡 slit 유공케이슨)과 입사각에 따른 구조물 전면에서의 상대파고를 비교 도시한 것이다.

Fig. 7은 C_W/L_S=0.133인 조건의 결과로서 직립 무공케이슨의 경우(case PW)에 입사각이 증가함에 따라 안정파고에 도달하는

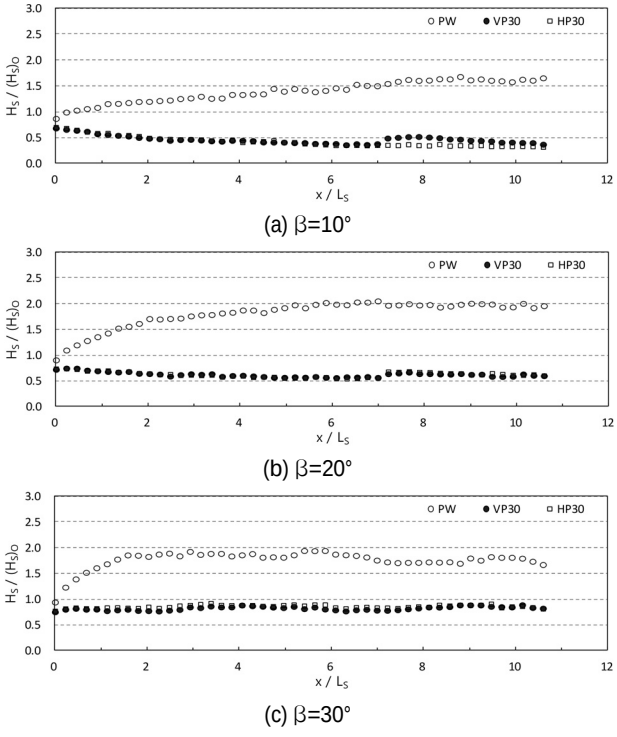


(a) β=10°

(b) β=20°

(c) β=30°

Fig. 7. Normalized wave height along a wall (x-dir.) by front wall shapes for C_W/L_S=0.133

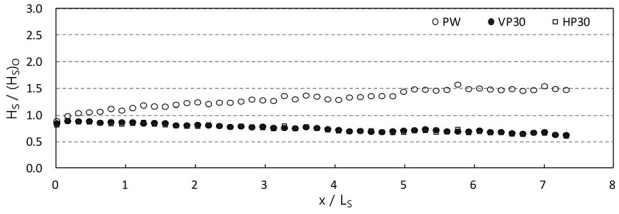


(a) β=10°

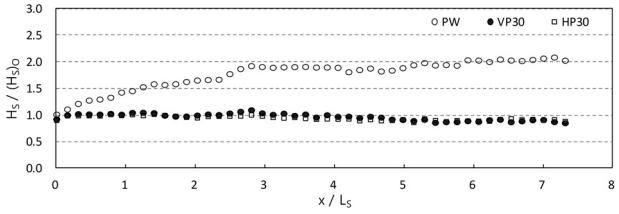
(b) β=20°

(c) β=30°

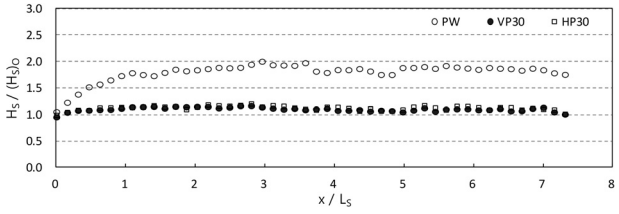
Fig. 8. Normalized wave height along a wall (x-dir.) by front wall shapes for C_W/L_S=0.073



(a) β=10°

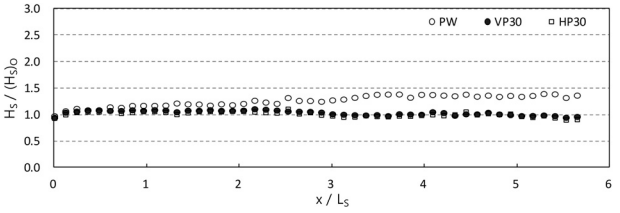


(b) β=20°

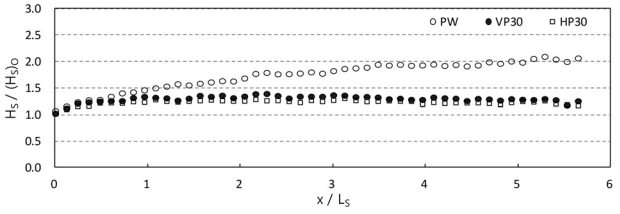


(c) β=30°

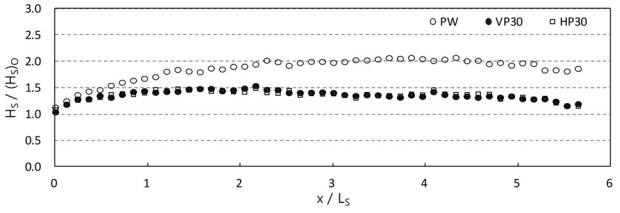
Fig. 9. Normalized wave height along a wall (x-dir.) by front wall shapes for C_W/L_S=0.050



(a) β=10°



(b) β=20°



(c) β=30°

Fig. 10. Normalized wave height along a wall (x-dir.) by front wall shapes for C_W/L_S=0.039

상대거리(x/L_S)가 짧아짐을 알 수 있고 상대파고는 $H_S/(H_S)_O \fallingdotseq 2$에 수렴하는 것으로 나타났으며, 이는 직립 무공케이슨을 대상으로 한 기존 연구결과와 동일한 것이다. 유공케이슨의 경우에 상대파고는 β=10° 조건에서 $H_S/(H_S)_O \fallingdotseq 0.5$, β=20° 조건에서 $H_S/(H_S)_O \fallingdotseq 0.7$, β=30° 조건에서 $H_S/(H_S)_O \fallingdotseq 0.9$로 나타나 무공케이슨에 비해 제체 전면에서 낮은 파고가 분포함을 알 수 있으며, 입사각이 증가할수록 상대파고는 증가하였다. 횡 slit과 종 slit에 대한 차이를 검토해 보기 위해 x/L_S>10인 구간을 대상으로 계측된 상대파고를 산술평균하여 비교해 보면, β=10°인 경우에 HP30이 VP30의 약 88%, β=20°인 경우에 약 92 %, β=30°인 경우에 약 96%의 상대파고가 산정됨으로서 횡 slit에 의한 상대파고가 약간 작게 나타났다. 이는 2차원 실험에서 횡 slit이 종 slit에 비해 반사계수가 약간 작게 나타난 것에 상응하는 결과이다. Fig. 8은 C_W/L_S=0.073인 조건의 결과로서 무공케이슨의 경우에는 Fig. 7과 유사한 파고분포를 보인다. 유공케이슨의 경우에는 상대유수실 폭이 감소함에 따라 유공부 형상에 따른 차이가 거의 나타나지 않았고, 입사각이 상대적으로 큰 조건에서 Fig. 7의 결과와는 달리 횡 slit의 파고가 종 slit에 비해 약간 크게 나타났으나 그 차이는 크지 않았다. Fig. 9는 C_W/L_S=0.050의 결과로서 유공케이슨의 경우에 유공부 형상에 따른 차이는 Fig. 8과 같이 거의 나타나지 않았다. x/L_S>6인 구간에 대해 유공케이슨을 대상으로 계측된 상대파고를 산술평균하면, β=10°인 경우에 $H_S/(H_S)_O \fallingdotseq 0.7$, β=20° 조건에서 $H_S/(H_S)_O \fallingdotseq 0.9$, β=30° 조건에서 $H_S/(H_S)_O \fallingdotseq 1.1$로 나타났으며, 이는 C_W/L_S=0.133 조건에 비해 상대파고가 약 0.2 정도 크게 나타나는 것이다. 즉, 2차원 실험에서 나타난 바와 같이 상대유수실 폭이 감소함에 따라 유공케이슨의 소파효과가 상대적으로 감소하기 때문이다. Fig. 10은 C_W/L_S=0.039의 결과로서 x/L_S>4인 구간에 대해 유공케이슨을 대상으로 계측된 상대파고를 산술평균하면, β=10°인 경우에 $H_S/(H_S)_O \fallingdotseq 1$, β=20° 조건에서 $H_S/(H_S)_O \fallingdotseq 1.25$, β=30° 조건에서 $H_S/(H_S)_O \fallingdotseq 1.3$로 나타났다. 전체적으로 C_W/L_S=0.050인 조건에 비해 상대파고가 증가하였음을 알 수 있다. 또한 상대유수실 폭이 감소함에 따라 입사각의 증가에 따른 상대파고의 증가경향은 감소하는 것으로 분석되었다.

Fig. 11은 HP30 실험안에 대해 동일 상대유수실 폭의 조건에서 입사각에 따른 상대파고의 변화를 비교 도시한 것으로서 입사각이 증가할수록, 상대유수실 폭이 작아질수록 제체 전면의 상대파고는 증가함을 알 수 있다. 연파가 발생하는 입사각 범위내에서 무공케이슨의 경우에는 파랑증폭이 크게 발생하지만, 유공케이슨의 경우에는 비교적 낮은 파고가 분포하며 그 크기는 상대유수실 폭에 따라 다르다. 본 실험조건 범위내에서 C_W/L_S>0.05인 경우에는 제체

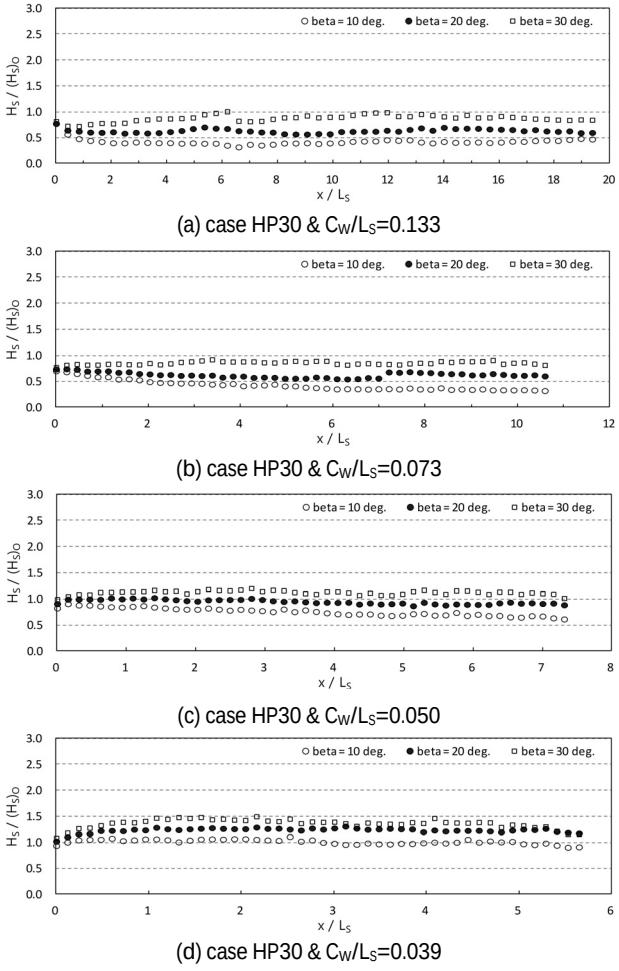


Fig. 11. Normalized wave height along a wall (x-dir.) by incident angles

전면에서 파랑증폭은 발생하지 않았으며, 이러한 현상은 구조물 전면 근고부의 안정성 확보, 선박 접안시의 동요 저감 등의 측면에서 유리하게 작용하게 될 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 유공부 형상, 상대유수실 폭, 파형경사 등에 따른 유공케이슨의 소파특성을 2차원 및 3차원 실험을 통해 고찰하였다. 본 실험으로부터 도출된 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 파랑이 직각으로 입사하는 경우, 유공부 형상에 따른 반사계수는 유사한 유공율에서 횡 slit인 경우가 종 slit인 경우에 비해 약간 작게 계측되었으나 그 차이는 크지 않았으며, 적정 상대유수실 폭은 0.1~0.15인 것으로 분석되었다.

(2) 유공케이슨의 반사특성은 입사파고에 따라 차이가 발생한다. 즉, 파형경사가 큰 경우가 작은 경우에 비해 약간 낮은 반사계수를 보였으며, 구조물 설계시 이를 고려할 필요가 있다.

(3) 경사 입사파조건에서 유공율이 유사할 경우, 유공부 형상(종 slit과 횡 slit)에 따른 제체 전면의 파고 차이는 거의 발생하지 않았다. 전체적으로 무공케이슨에 비해 유공케이슨의 상대파고가 낮게 나타남을 확인하였으며, 이는 구조물 저면부의 안정성 확보 및 운영측면 등에서 유공케이슨이 유리함을 의미한다.

(4) 직각 입사와 같이 경사 입사의 경우에도 상대유수실 폭이 감소하게 되면 제체 전면의 파고는 증폭되었으며, 실제 유공케이슨 설계시 일반적으로 적용되고 있는 유수실 폭을 감안할 때 설계파 조건보다는 평상파 조건에서 유공케이슨의 효용성이 크다고 할 수 있다.

감사의 글

본 논문은 한국해양과학기술진흥원의 연구비 지원(과제번호: 20110131)을 받아 수행된 연구이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

Fugazza, M. and Natale, L. (1992). “Hydraulic design of perforated breakwaters.” *J. of Waterway, Port,* Coastal and Ocean Engineering, Vo. 118, No. 1, pp. 1-14.

Jarlan, G. E. (1961). “A perforated vertical wall breakwater.” *Dock and Harbour Authority XII*, Vol. 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.” *J. of Korea Water Resources Association,* Vol. 46, No. 4. pp. 327-334 (in Korean).

Li, Y. C., Dong, G., Liu, H. and Sun, D. (2003). “The reflection of oblique incident waves by breakwaters with double-layered perforated wall.” *Coastal Engineering,* Vol. 50, pp. 47-60.

Liu, H. J., Liu, Y. and Li, Y. C. (2009). “The theoretical study on diagonal wave interaction with perforated-wall breakwater with rock fill.” *Acta Oceanologica Sinica,* Vol. 28, No. 6, pp. 103-110.

Liu, Y., Li, Y. C. and Teng, B. (2007). “The reflection of oblique waves by an infinite number of partially perforated caissons.” *Ocean Engineering,* Vol. 34, pp. 1965-1976.

Pyun, C. K. (1980). *A study of wave forces acting on the perforated caisson type breakwater,* Ph.D. Thesis, Seoul National University (in Korean).

Suh, K. D. and Park, W. S. (1995). “Wave reflection from perforated-wall caisson breakwaters.” *Coastal Engineering*, Vol. 26, pp. 177-193.

Williams, A. N., Mansour, A. E. M. and Lee, H. S. (2000). “Simplified analytical solutions for wave interaction with absorbing-type caisson breakwaters.” *Ocean Engineering*, Vol. 27, pp. 1231-1248.