

## 정수면 아래 최적 유공부 길이 산정 : 유공 1실 조건

### Estimation of Optimal Slit Length of Perforated Wall below Still Water Level: Single Chamber Condition

김 영 택\* / 이 종 인\*\*

Kim, Young Taek / Lee, Jong In

#### Abstract

In this study, the optimal slit length of perforated wall with single chamber below the still water level (SWL) is studied through the two dimensional test. The relationship between the reflection coefficient and the shape of structures such as chamber width( $B$ ) and slit length( $S$ ) are investigated by applying the various wave conditions. The random waves were used for the test by using Bretschneider-Mitsuyasu frequency spectrum. Minimum reflection coefficient is obtained at  $B/L_s \approx 0.15$  condition, this result is different from the regular wave condition. Also the minimum reflection coefficients are measured at  $S/H_s \approx 2.5$ . This means that the optimal slit length below the still water level is 2.5 times of the incident wave height.

**Keywords** : laboratory experiment, perforated wall, chamber, slit length, random waves

#### 요 지

본 연구에서는 단면수리실험으로 다양한 실험과 조건과 유수실 폭( $B$ )을 변화시키면서 유공부 길이( $S$ )와 반사율의 관계를 검토하여 유공 1실인 유공구조물의 정수면 아래 최적 유공부 길이를 제시하였다. 입사파로 불규칙파를 적용함에 따라 최저 반사계수는 상대 유수실 폭( $B/L_s$ )이  $B/L_s \approx 0.15$ 에서 발생하였다. 유공부 길이와 입사파고와의 관계를 고려한 상대 유공부 길이( $S/H_s$ )는  $S/H_s \approx 2.5$ 에서 최저 반사계수를 보였으며, 이는 정수면 아래 유공부 길이가 입사파고의 약 2.5배일 때 최적임을 의미하는 것이다.

**핵심용어** : 수리실험, 유공벽, 유수실, 유공부 길이, 불규칙파

#### 1. 서 론

최근 국내에서는 외곽시설 및 안벽 등과 같은 항만구조물의 경우에는 케이슨을 적용한 설계 및 시공이 주를 이루고 있다. 특히 대형 항만구조물의 경우에 케이슨 벽체에 유공부가 설치되는 유공케이슨(perforated-wall caisson)

으로의 설계가 대부분이다. 유공케이슨은 일반적인 직립식구조물과는 달리 전면부가 개방되어 있고, 내부를 골재 등으로 채우지 않아 빈 공간이 존재하므로 해수가 드나들 수 있도록 되어 있는 구조이다.

유공케이슨은 Jarlan (1961)이 음파의 반사이론을 방파제 설계에 적용하여 개발하였으며, 그 후 현재까지도 유

\* 한국건설기술연구원 하천해안연구실 연구위원 (e-mail: ytkim@kict.re.kr)

Research Fellow, River and Coastal Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea

\*\* 교신저자, 전남대학교 공학대학 해양토목공학과 부교수 (e-mail: jilee@chonnam.ac.kr)

Corresponding Author, Associate professor, Department of Marine and Civil Engineering, Chonnam National University, Yeosu 500-712, Korea

공케이슨에 대한 이론적·실험적 연구가 활발히 진행되어 왔다. 2000년대 이후에 수행된 유공케이슨과 관련된 연구를 분석해보면 수치해석 및 수리실험에 의한 반사율 검토와 유공부에서의 에너지감쇠 검토 등과 같은 다양한 연구가 진행되었다(KICT, 2011; Li et al., 2006; Suh et al., 2011).

국내에서는 유공케이슨을 설계함에 있어 적정 유공률 및 유수실 폭 등과 같은 일부 제원은 KICT (2000)에서 수행한 실험자료를 이용하거나 수리모형실험을 통해 결정하고 있다. 기존의 유공케이슨에 대한 대부분의 검토는 유공률 및 유수실 폭의 변화에 따른 최적 반사계수의 제시에 대한 것이며, 유공부의 제원(특히 유공부의 길이)에 대한 검토는 상대적으로 미미한 실정이다. 유공케이슨에 대한 단면 계획시 국내 설계기준서인 항만 및 어항설계기준(MMAF, 2005)에는 일반적인 내용만 수록되어 있을 뿐 실질적인 소파부 제원(개구율, 유수실 폭, slit 상·하단고 등) 결정에 필요한 지침은 없어 일본의 Port and Harbor Structure Design Samples (Coastal Development Institute of Technology (CDIT), 1999)을 참조하거나, 기존의 설계 사례 또는 수리모형실험을 통해 결정하는 것이 일반적이다.

항만 및 어항설계기준(MMAF, 2005)에는 직립소파 블록식 안벽의 소파공에 대해 소파공의 상단고는 삭망평균 고조위 조건에서 유의파고( $H_s$ )의 0.5배 이상, 소파공의 하단고는 삭망평균간조위 조건에서 유의파고의 2배 이상으로 하는 것이 바람직하다고 제시되어 있다. CDIT (1999)에는 유수실 폭( $B$ )  $B=0.33$  m, 유공률 30%, 수심( $h_0$ ) 0.59 m 조건에서 단일 파랑( $H_s=0.067$  m,  $T_s=1.03$  sec)을 대상으로 유공부의 하단고를 변경시키며 실험을 실시한 후, 정수면 아래 유공부 하단고( $S$ )는 유의파고의 4배( $S/H_s=4$ )를 적용할 것을 제안하고 있다(Fig. 1). 여기서 유의주기( $T_s$ )에 대한 유의파장( $L_s$ )과 유수실 폭( $B$ )의 비인 상대 유수실 폭( $B/L_s$ )은  $B/L_s \approx 0.2$ 에 해당된다. Fig. 1에

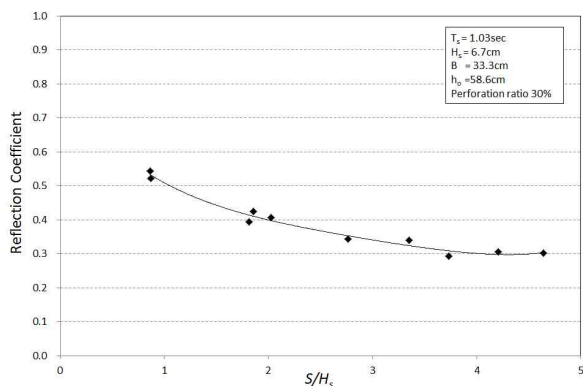


Fig. 1. Result of Optimal Slit Length (CDIT, 1999)

서 알 수 있는 바와 같이  $S/H_s \approx 4$ 에서 최소 반사계수가 예측됨에 따라 상기와 같이 제안한 것으로 판단된다. 그러나 CDIT (1999)의 결과는 단일 파랑 조건에 대한 실험 결과로서 다양한 파랑조건, 유수실 폭 및 유공부 길이의 변화에 따른 추가적인 검토를 수행하여 그 특성을 확인할 필요가 있다.

본 연구에서는 유공구조물을 설계함에 있어 정수면 이하 유공부의 최적 길이 제시를 위하여 단면수리실험을 수행하였다. 이를 위하여 다양한 실험파 조건을 적용하였고, 유수실 폭( $B$ )과 유공부 하단고( $S$ )를 변화시켰으며, 유공부 하단고, 유수실 폭 및 이에 대한 반사계수의 관계를 검토하여 정수면 아래 최적 유공부 길이(하단고)를 제시하고자 한다.

## 2. 수리실험

### 2.1 실험시설 및 장비

유공부 제원, 즉 유공부 길이에 따른 반사특성 분석을 위해 2차원 수리실험을 실시하였으며, 실험은 한국건설기술연구원의 단면수로에서 수행되었다. 실험에 사용된 단면수로는 폭 1.0 m, 높이 2.0 m, 길이 56 m이며, 단면수로에는 전기서보 피스톤식 조파기가 설치되어 있고, 규칙파 및 불규칙파를 조파할 수 있다. 수로 내에서 구조물 설치로 인한 반사와 조파관에서 발생하는 재반사를 효과적으로 제어하기 위해 수로 폭 1.0 m를 폭 0.6 m와 폭 0.4 m로 분할하였다. 분할된 수로에서 실험모형은 폭 0.6 m의 수로에 설치하여 제반 자료를 취득하고, 폭 0.4 m의 수로에서는 입사파의 설정 및 보정을 수행하였다(Fig. 2).

본 연구에서는 불규칙파를 적용하여 실험을 수행하였으며, 불규칙파는 Bretschneider-Mitsuyasu 주파수 스펙트럼을 이용하였다. 실험파의 파고 및 주기는 영점상향교차법(zero-upcrossing method)으로 분석하였으며, 실험파는 구조물이 설치되지 않은 조건인 진행파 개념으로 설정하였다.

### 2.2 실험 모형 및 조건

수리실험에 적용된 실험모형은 유공 1실의 유공케이슨 단면으로서 유공부 제원에 따른 반사특성을 분석하기 위하여 유수실 폭과 유공부 길이를 변경할 수 있도록 제작하였다. Figs. 3 and 4는 각각 유공부 형상 및 실험모형을 도시한 것으로서 유공부 상단고는 정수면으로부터 0.4 m로 설정하였다. 이는 구조물 전면에서 반사파로 인해 중복파가 형성되더라도 중복파가 유공부 상단의 직립면에

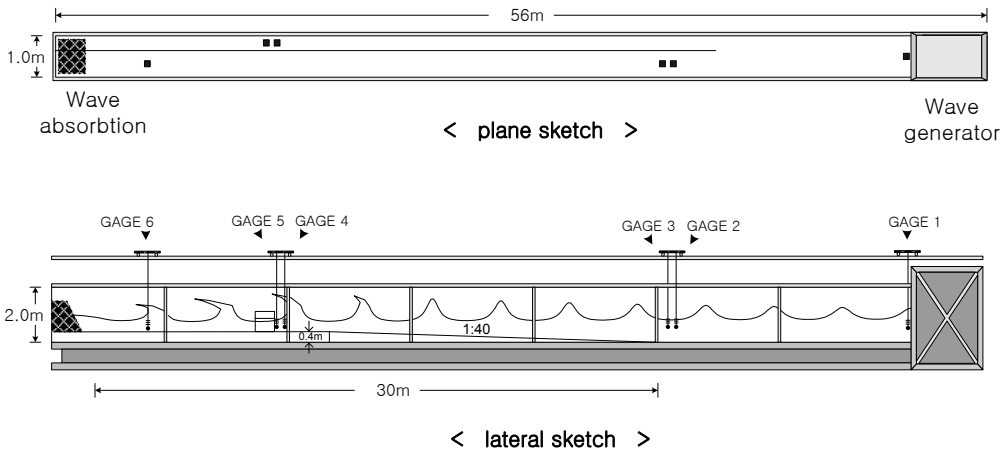


Fig. 2. Schematic Sketch of Wave Flume

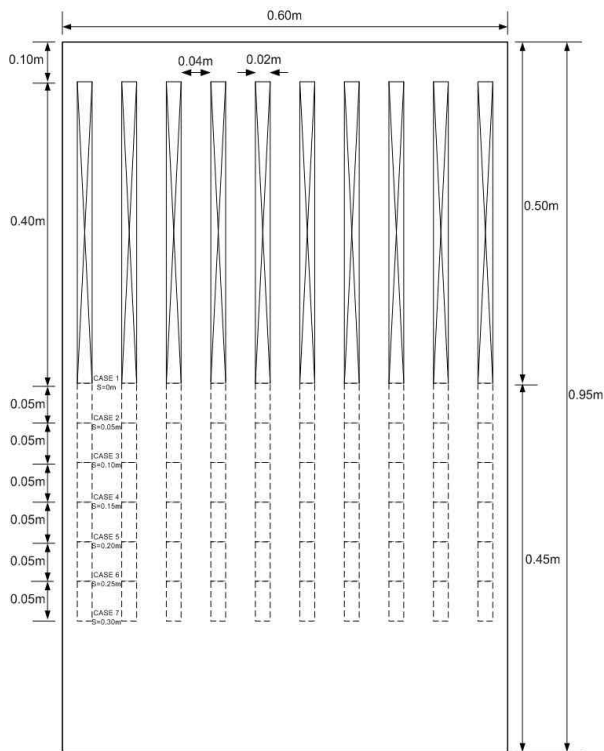


Fig. 3. Schematic Sketch of Perforated Wall (front view)

접하지 않고 유공부에서 소파되도록 유도하기 위함이다. 즉, 본 실험의 목적이 정수면 아래 유공부 길이(하단고)의 적정 제원결정이기 때문에 반사계수의 변화에 정수면 상부에 존재하는 유공부 이외의 구조형식이 영향을 미치지 않게 하기 위한 것이다.

유공부의 길이는 정수면과 유공부 하단고가 동일한 조건(CASE 1)에서 정수면 아래로 유공부 길이가 0.05m씩 증가하는 조건(CASE 2~CASE 7)으로 설정하였으며,

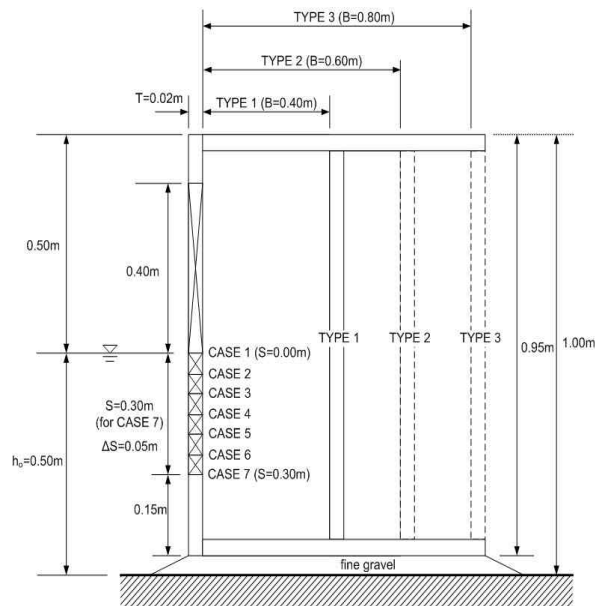


Fig. 4. Schematic Sketch of Model Setup (side view)

CASE 7의 유공부 길이는 정수면 아래 0.3m에 해당된다. 그리고 유수실 폭( $B$ )의 변화에 따른 반사계수의 영향을 검토하기 위하여 유수실 폭을 0.4m (Type 1), 0.6m (Type 2) 및 0.8m (Type 3)로 변경시키며 실험을 실시하였다 (Fig. 4). 그리고 구조물 전면수심( $h_0$ )은 0.5m로 고정하였다. 기존 연구(KICT, 2000)에 의하면 유공률이 약 30% 내외일 때 최적의 반사계수가 나타나는 것으로 제시되어 있기 때문에 본 연구에서는 유공률 33%인 유공케이스를 대상으로 실험을 수행하였다. 그리고 전면 유공벽의 두께는 입사파랑에 의한 흔들림을 방지하기 위해 모형상 0.02m를 적용하였으며, 모형 재료는 아크릴을 이용하였다.

본 실험에 적용된 실험파는 입사파 유의주기 기준으로  $T_s=1.0\text{ sec}\sim 3.0\text{ sec}$  범위에서 0.2 sec 간격으로 설정하였으며, 유의파고는  $H_s=0.05\text{ m}\sim 0.15\text{ m}$  범위에서 0.025 m 간격으로 설정하였다(Table 1). 유수실 폭에 따른 영향 검토를 위하여 상대적으로 다양한 입사파 주기 조건을 적용하였으며, 반사계수는 Goda and Suzuki (1976)의 2점법을 적용하여 분석하였다. 실험파 설정 및 반사계수 산정에 적용된 파고계는 용량식파고계로서 계측범위는  $\pm 0.3\text{ m}$ 이다.

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 상대 유수실 폭( $B/L_s$ )에 따른 반사계수 비교

본 절에서는 Table 1에 제시된 실험조건에 대해 유수실 폭의 변화에 따른 반사계수를 각각 도시하고 분석하였다(Figs. 5~7). 실험결과에서 상대 유수실 폭( $B/L_s$ )에

대하여 각각의 실험조건(CASE 1~CASE 7)에 따라 반사계수가 변하는 것을 알 수 있다. 각각의 유수실 폭( $B$ )별로 각 CASE에 따라 추세선을 도시함으로써 반사계수의 변화 추이를 분석하기 용이하도록 하였다. 조건에 따라 추세선과의 분산이 작은 경우도 있는 반면, 반대의 경우도 발생하였다. 이는 동일 주기에서 다양한 입사파고를 적용함에 따라 입사파고에 따라 서로 다른 반사계수가 계측되기 때문이다. 전반적인 반사계수의 분포경향은  $B/L_s \approx 0.15$  조건에서 최소 반사계수가 나타남을 알 수 있다. 또한 유공부 길이 즉, 각각의 CASE에 따른 반사계수를 분석해보면 전반적으로 정수면 아래 유공부 길이가 증가할수록 반사계수는 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 CASE 1~CASE 3은 각 실험안(CASE)에 따라 반사계수의 차이가 명확하게 구분되지만, CASE 4~CASE 7의 경우에는 상대적으로 그 차이가 크지 않다. 이에 대해서는

Table 1. Test Wave Conditions

$T_s$ (sec)	$H_s$ (m)	wave length (m, $L_s$ )	relative water depth ( $kh_0$ )
1.0		1.51	2.081
1.2		2.04	1.540
1.4		2.57	1.222
1.6	0.050	3.07	1.023
1.8	0.075	3.57	0.880
2.0	0.100	4.05	0.776
2.2	0.125	4.53	0.694
2.4	0.150	5.00	0.628
2.6		5.47	0.574
2.8		5.93	0.530
3.0		6.39	0.492

$B=0.4\text{ m}, 0.6\text{ m}, 0.8\text{ m}; h_0=0.5\text{ m}$   
Slit length( $S$ ): CASE 1( $S=0.0\text{ m}$ ) ~ CASE 7( $S=0.3\text{ m}$ ) :  $\Delta S=0.05\text{ m}$

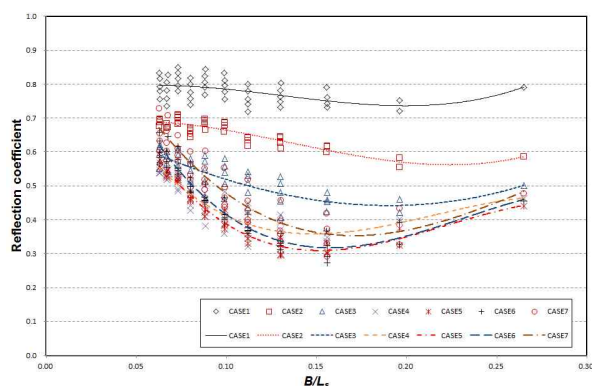


Fig. 5. Test Results for Type 1 ( $B=0.4\text{ m}$ )

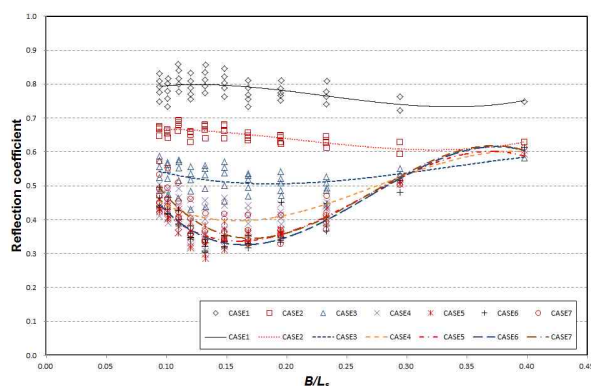


Fig. 6. Test results for Type 2 ( $B=0.6\text{ m}$ )

입사파고와 유공부 길이에 대한 관계를 분석하여 검토하고자 한다.

### 3.2 동일한 상대 유공부 길이( $S/H_s$ ) 조건에 대한 반사계수 분석

3.1절에서는 본 실험에서 수행한 실험결과 전체를 각각의 실험안(CASE)별로 도시하여 비교하였으며, 본 절에서는 입사파고( $H_s$ )와 정수면 아래 유공부 길이( $S$ )의 관

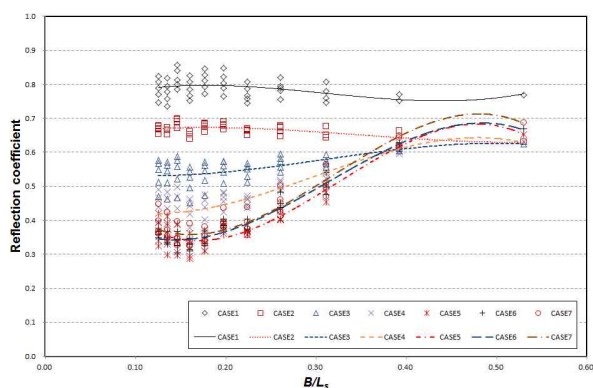


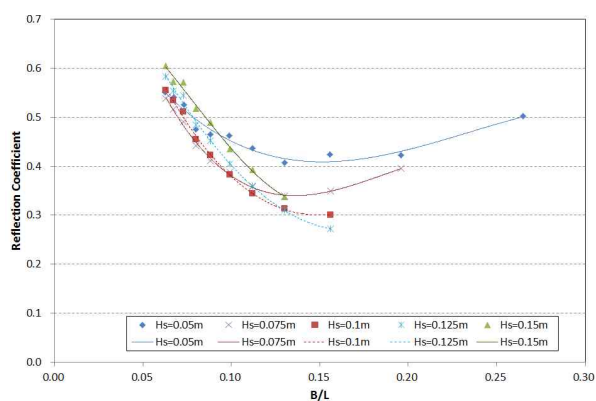
Fig. 7. Test Results for Type 3 ( $B=0.8\text{m}$ )

계를 분석하고자 한다. Fig. 8은 여러 가지 실험조건 중에서  $S/H_s=2$ 인 조건, 즉 정수면 아래 유공부 길이가 입사파고의 2배인 조건에 대하여 유수실 폭별로 결과를 도시한 것이다. 결과에서 나타난 바와 같이 반사계수는 전반적으로 입사파고가 작을수록 크며, 입사파고가 증가함에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 동일한 상대 유공부 길이( $S/H_s$ )조건에서 입사파고가 클수록 유공부를 통과하는 유속의 증대 등으로 인한 에너지감쇠가 증가하여 이와 같은 경향이 나타나는 것으로 판단된다. 그러나 전반적으로 입사파고가 0.1m 이상인 조건에서는 파고가 증가하더라도 반사계수의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

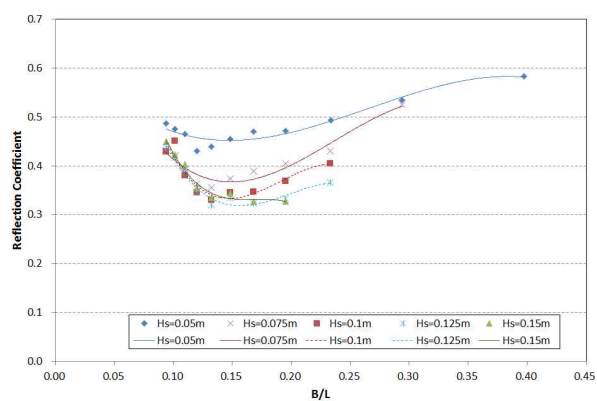
### 3.3 상대 유공부 길이( $S/H_s$ )에 따른 반사계수

3.2절에서는 입사파고가 증가함에 따라 반사계수가 감소하는 경향을 알 수 있었으며, 전반적으로 입사파고가 0.1m 이상의 경우에는 유사한 반사계수가 나타났다. 본 절에서는 동일한 입사파고 조건( $H_s=0.075\text{m}$  및  $H_s=0.1\text{m}$ )에서 각각의 유수실 폭( $B$ )에 따른 상대 유공부 길이( $S/H_s$ )별로 반사계수를 비교하였다.

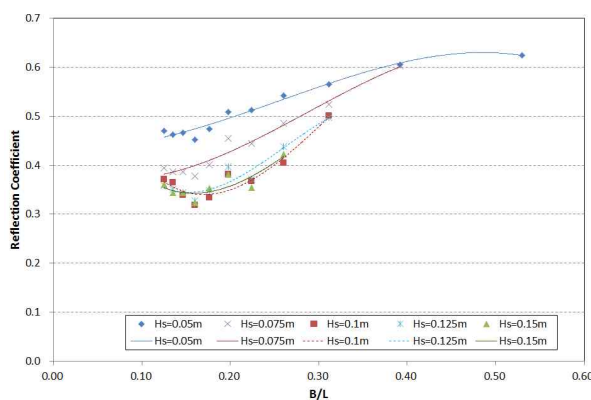
Type 1 ( $B=0.4\text{m}$ ) 조건에서  $H_s=0.075\text{m}$ 와  $H_s=0.1\text{m}$ 에



(a)  $B=0.4\text{m}$



(b)  $B=0.6\text{m}$



(c)  $B=0.8\text{m}$

Fig. 8. Comparison of Reflection Coefficients by Chamber Width under  $S/H_s=2$

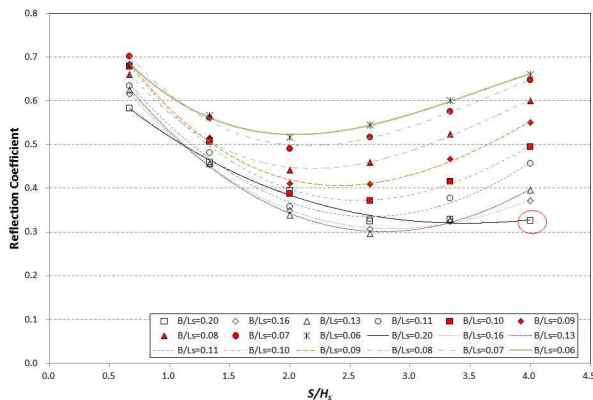
대한 반사계수를 비교한 Fig. 9를 살펴보면,  $S/H_s$ 와 반사계수는 U자형 분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉,  $S/H_s$ 가 증가함에 따라  $S/H_s=2.0\sim 2.5$ 까지는 반사계수가 감소하는 경향을 보이지만, 그 이후에는 다시 증가하는 경향을 보인다. 이는  $S/H_s\approx 2.0\sim 2.5$ 에서 최소 반사계수가 측정됨을 의미한다. 그리고 3.1절에서 기술한 바와 같이  $B/L_s$ 와 반사계수의 관계를 분석해 보면,  $B/L_s=0.13\sim 0.16$  범위에서 최소 반사계수가 측정됨을 알 수 있다. CDIT (1999)에서 수행한 파랑조건( $H_s=0.067$  m,  $B=0.33$  m,  $B/L_s=0.2$ )과 본 연구의 실험조건 중 가장 근사한 조건( $H_s=0.075$  m,  $B=0.4$  m,  $B/L_s=0.2$ )에 대한 결과를 비교해 보면, Fig. 9 (a)에 원으로 표시한 값에 해당하며, CDIT (1999)의 결과와 본 연구의 결과가 유사하게 나타남을 알 수 있다. 그러나 전술한 바와 같이 단일 실험과 조건을 적용한 경우(CDIT, 1999)에 대해 제시된 반사계수 분포경향은 다양한 조건을 적용할 경우와 서로 다른 분포경향이 나타남을 알 수 있다. 이는 동일 파고조건에서 입사파의 주기 및 우수실의

폭( $B$ )을 변경할 경우에 반사계수는 다르게 나타나며, 이에 따라 최적 유공부 길이는 변경될 수 있기 때문이다.

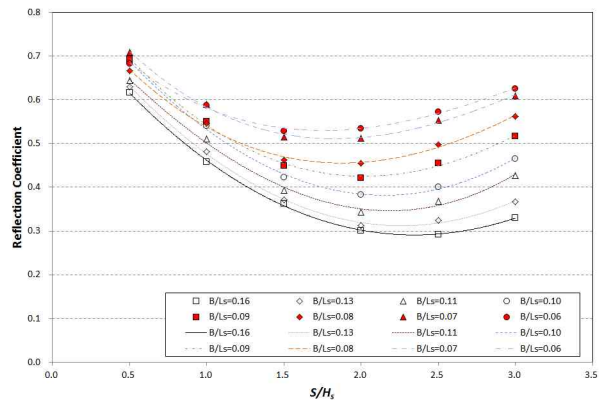
Type 2 ( $B=0.6$  m) 조건에 대한 결과로서  $H_s=0.075$  m와  $H_s=0.1$  m에 대한 반사계수를 분석해 보면, Fig. 9의 Type 1 ( $B=0.4$  m)과 마찬가지로 U자형 반사계수 분포가 나타남을 볼 수 있으며, 최소 반사계수가 발생하는 조건은  $S/H_s\approx 2.5$ 임을 알 수 있다(Fig. 10). 그리고 Type 3 ( $B=0.8$  m) 조건에 대한 결과인 Fig. 11에서도 Type 1 및 Type 2와 마찬가지로 반사계수는 전체적으로 U자형 분포를 보이며, 최소 반사계수는  $S/H_s\approx 2.5$ 에서 나타남을 알 수 있다.

### 3.4 최적 유공부 제원 산정

3.3절에서는  $H_s=0.075$  m와  $H_s=0.1$  m 조건을 대상으로 정수면 아래 상대 유공부 길이( $S/H_s$ )에 대한 반사계수의 변화를 우수실 폭을 변화시키면서 분석하였다. 본 절에서는 실험에 적용한 전체 입사파고 조건을 대상으로 각각의 우수실 폭에 대한 상대 유공부 길이와 반사계수의 관계를

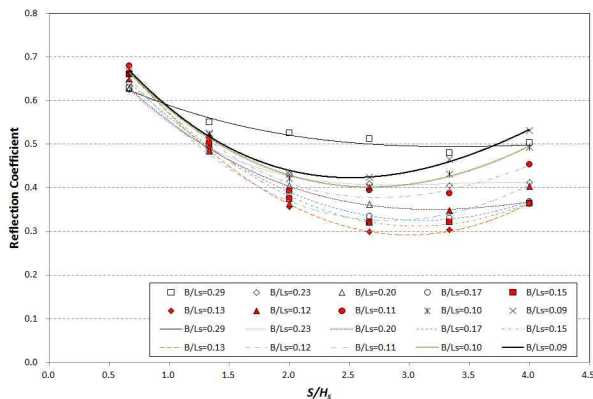


(a)  $H_s=0.075$  m

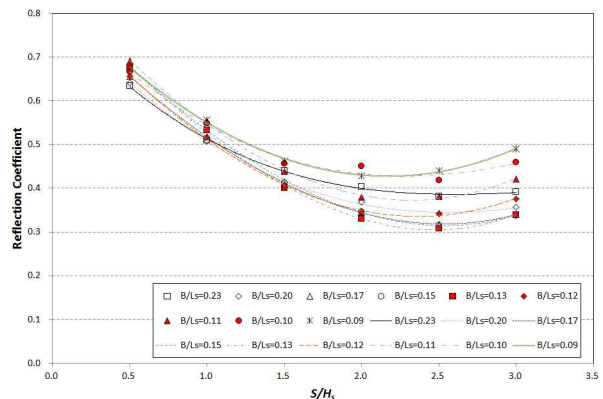


(b)  $H_s=0.1$  m

Fig. 9. Test Results by  $S/H_s$  for Type 1 ( $B=0.4$  m)



(a)  $H_s=0.075$  m



(b)  $H_s=0.1$  m

Fig. 10. Test Results by  $S/H_s$  for Type 2 ( $B=0.6$  m)

검토하였다.

Fig. 12는 전체 입사파고를 대상으로 상대 유공부 길이 ( $S/H_s$ )에 따른 반사계수를 우수실 폭 별로 비교 도시한 것이다. Type 1 ( $B=0.4$  m), Type 2 ( $B=0.6$  m) 및 Type 3 ( $B=0.8$  m) 모두 전체적으로  $S/H_s$ 에 따른 반사계수는 완

만한 U자형 또는 L자형 분포를 보이며, 3가지 조건 모두  $S/H_s \approx 2.5$ 에서 최소 반사계수가 나타났다.  $S/H_s > 2.5$ 인 경우에 일부 조건에서 작은 반사계수가 나타났지만 그 차이는 크지 않았다. Fig. 13은 Fig. 12에 도시된 각각의 우수실 폭에 대한 결과를 종합하여 비교 도시한 것이다. Fig.

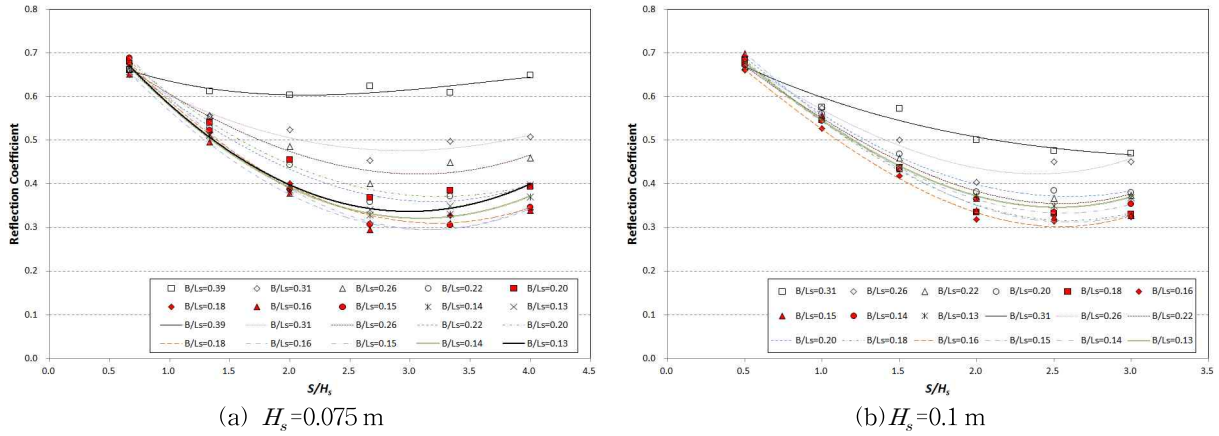


Fig. 11. Test Results by  $S/H_s$  for Type 3 ( $B=0.8$  m)

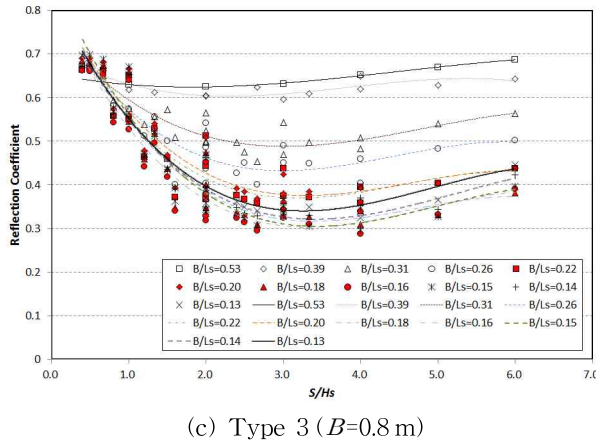
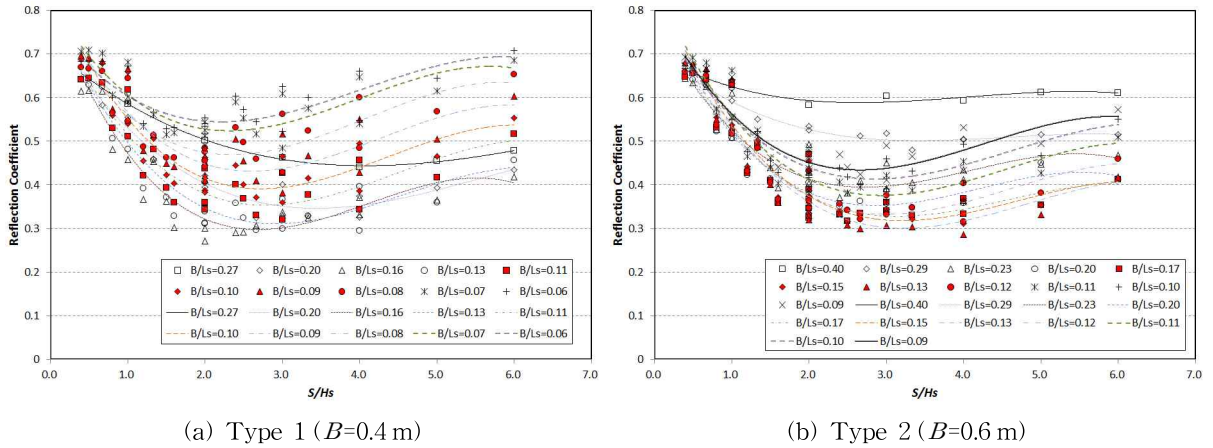


Fig. 12. Distribution of Reflection Coefficients by  $S/H_s$

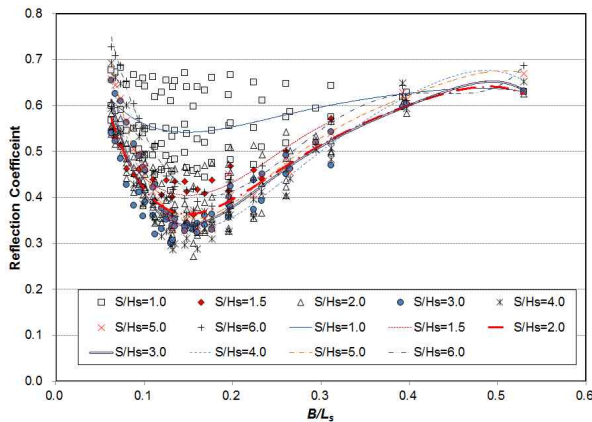


Fig. 13. Reflection Coefficients of  $B/L_s$  and  $S/H_s$

13에서 최소 반사계수는  $B/L \approx 0.15$  및  $S/H_s = 2 \sim 3$  범위에서 나타남을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

최근 항만구조물을 설계함에 있어 대수심 및 고파랑 조건으로 인해 유공케이슨을 적용하는 사례가 증가하고 있다. 그렇지만 유공구조물에 대한 체계적인 검토는 국내에서 많이 이루어지지 않았으며, 대부분 구조물을 설계함에 있어 해당 구조물에 대한 단편적인 검토가 대부분이었다.

특히 유공구조물과 관련하여 유공률 및 유수실 폭에 대한 검토는 있었으나, 유공부 자체에 대한 검토는 없었다. 이에 본 연구에서는 단면수리실험으로 다양한 실험과 조건과 유수실 폭( $B$ ) 및 정수면 아래 유공부 길이( $S$ )를 변화시키면서 유공부 길이와 최소 반사계수의 관계를 검토하여 최적 유공부 길이에 대한 실험을 실시하였으며, 실험결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 유공 1실에 대하여 불규칙과 내습시 상대 유수실 폭 ( $B/L_s$ )에 따른 최소 반사계수는  $B/L_s \approx 0.15$ 인 조건에서 나타났다.
- 2) CDIT (1999)의 경우, 1개의 실험파랑 조건을 대상으로 정수면 아래 최적 유공부 길이를  $S/H_s = 4$ 로 제시하였으며, 본 연구에서 수행한 근사한 실험조건에서도 유사한 결과를 보였다. 최저 반사계수에 해당하는  $S/H_s$ 는 입사파 조건 및 구조물 형상에 의하여 변경될 수 있으나, CDIT (1999)에서는 1개의 파랑을 대상으로 결과를 제시함에 따라 다양한 파랑 조건 및 형상(유수실 폭)에 대한 검토가 필요하다. 이에 따라 본 연구에서는 다양한 입사파 조건 및 유수실 폭의 변화 등에 따른 반사계수를 검토하였다.

3) 본 연구에서 수행한 다양한 실험조건의 결과로부터 최소 반사계수가 나타나는 상대 유공부 길이( $S/H_s$ )는 CDIT (1999)의 결과와는 달리  $S/H_s \approx 2.5$ 인 것으로 나타났다. 따라서 정수면 아래 유공부 길이는 입사 파고의 약 2.5배가 적절한 것으로 제안한다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국해양과학기술진흥원 지원과제인 “기후변화대응 항만설계기준 개선 방안연구(1단계)” 과제의 성과임을 밝히며, 국토해양부 및 한국해양과학기술진흥원의 지원에 감사드립니다.

#### REFERENCES

- Coastal Development Institute of Technology (CDIT) (1999). Port and Harbor Structure Design Samples. (in Japanese)
- Goda, Y., and Suzuki, Y. (1976). Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments. *Proceedings of 15th Coastal Engineering Conference*, Chapter 48, pp. 828-845.
- Jarlan, G.E. (1961). *A perforated vertical wall breakwater. The Dock Harbour Authority XII, Vol. 486, pp. 394-398.*
- Korea Institute of Construction Technology (KICT) (2000). Wave Reflection of Perforated-Wall Caisson Breakwaters. (in Korean)
- Korea Institute of Construction Technology (KICT) (2011). Development of Damage Reduction and Design Technology for Coastal Structure (Breakwaters). (in Korean)
- Li, Y., Liu, Y., and Teng, B. (2006). “Porous effect parameter of thin permeable plates.” *Coastal Engineering Journal*, Vol. 48, pp. 309-336.
- Ministry of Maritime Affairs and Fisheries (MMAF) (2005). Design standards for Harbour and Fishery Port. (in Korean)
- 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*, Vol. 58, pp. 85-93.

논문번호: 12-103	접수: 2012.09.05
수정일자: 2012.11.28	심사완료: 2012.11.28