

## 有孔防波堤의 反射特性에 관한 水理實驗 Hydraulic Experiments for the Reflection Characteristics of Perforated Breakwaters

朴佑善\* · 全仁植\* · 李達秀\*

Woo Sun Park\*, In Sik Chun\* and Dal Soo Lee\*

**要旨:** 有孔防波堤의 反射特性을 糾明하기 위하여 波高 및 週期가 다른 여러 規則波를 對象으로 遊水室의 幅과 有孔壁의 형태를 變化시키며 水理實驗을 수행하였다. 實驗結果, 有孔防波堤의 反射特性은 遊水室 幅과 유수실내 波長의 比( $B/L_c$ )에 敏感하게 反應하며,  $B/L_c$ 가 0.2인 부근에서 最小의 反射率을 보임을 알 수 있었다. 이러한 現象은 주로 遊水室內에서의 共振現象에 起因한 것으로 判斷된다. 有孔壁 형태(縱슬릿, 橫슬릿 또는 圓形 구멍)의 變化는 反射率에 있어서 若干의 變化를 招來할 수는 있어도, 全般的인 反射特性 變化에는 影響을 주지 못함을 확인하였다.

**Abstract** □ Hydraulic experiments were carried out to investigate the reflection characteristics of perforated breakwaters in regular wave conditions varying the width of wave chamber and the shape of perforated wall. It was found that the reflection coefficient of the perforated breakwater was very sensitive to the change of wave chamber width, giving its minimal value when the width of the wave chamber is approximately 0.2 times the wave length in the wave chamber. This phenomenon may be resulted from the wave resonance inside the wave chamber. The reflection coefficients slightly varied for all shapes of perforated wall, i.e., vertical slit, horizontal slit or circular hole. However, the reflection trend of the structure was not significantly affected by the shape of the perforated wall.

### 1. 緒 論

最近 國內經濟의 急速成長에 따른 海外 交易量의 增加는 貨物의 신속한 船積 및 荷役作業을 위한 新 港灣 건설 및 既存港灣의 擴張을 계속적으로 要求하고 있다. 따라서, 기존의 不透過性 着底式 防波堤의 一 邊倒에서 벗어나 방파제의 多樣한 要求條件을 充足 시킬 수 있고 同時에 防波堤 設置面에서도 經濟的 잇점을 提供할 수 있는 새로운 형태의 防波堤 開發이 절실한 실정이다. 新型 防波堤에 대한 연구는 日本, 美國, 歐羅巴 등지에서 꽤 오랜 역사를 가지고 추진 되어 왔다(韓國海洋研究所, 1989). 특히, 臨海 樣相이 비교적 우리나라와 비슷한 日本에서 港灣技術研究所 를 중심으로 集中的으로 遂行되고 있다(Tanimoto *et al.*, 1987).

有孔式 防波堤는 Jarlan(1961)에 의해 概念이 導入

된 이래, 新型 방파제 系列中에서 가장 일찍이 본격 施工된 形態로서 既存 케이슨 前面에 有孔壁과 遊水 室을 設置함으로써 波浪이 유공벽을 通過하여 유수 실내로 進入할 때 渦流 等に 의해 接近 波浪에너지를 減少시킬 수 있도록 考案된 構造形式을 갖는다(Fig. 1 參照). 따라서, 港內 靜穩度 및 방파제 周邊의 航路 維持에 있어서 既存 直立 混成防波堤에 비해 優秀한 特性을 지닌 형태이다. 이러한 防波堤 形態는 日本 에서는 多數 施工되어 성공적으로 運營되고 있으나 (日本 港灣技術研究所, 1986; 日本 五洋建設株式會社, 1983), 國內에서는 아직도 이렇다 할 施工實績이 없는 實情이다. 다만, 현재 釜山 人工섬 建設과 關聯하여 外郭防波堤로 有孔防波堤가 構想되고 있는 단계이다 (釜山直轄市, 1992). 最近 國內에서 遂行된 關聯 研究로는 徐等(1992)이 有孔防波堤의 全般的인 水理 特性에 關하여 研究한 바 있으며, 全等(1993)은 模型

\*韓國海洋研究所 海洋工學研究部 (Ocean Engineering Division, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea)

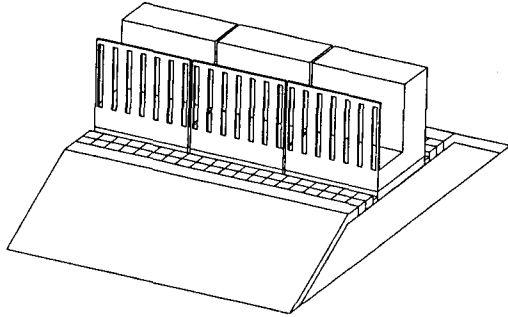


Fig. 1. Schematic diagram of a perforated breakwater.

防波堤의 波壓測定을 통하여 유공방파제의 安定度 및 局部 波壓特性을 導出하는 實驗的 研究을 遂行하였다.

本 研究에서는 Fig.1에 보인 바와 같은 有孔防波堤를 對象으로 水理實驗을 통하여 反射特性을 糾明하였다. 遊水室幅과 有孔壁 形態의 變化에 따른 反射特性의 變化를 살펴보기 위하여 유수실폭을 3가지로 變化시키며 實驗을 遂行하였으며, 有孔壁의 형태도 縱슬리트, 橫슬리트 및 圓形 구멍을 갖는 3가지에 대해 遂行하였다. 또한, 有孔防波堤와 既存의 無孔防波堤를 對比하고 이들간의 特性差異를 導出하기 위하여 無孔防波堤에 대해서도 實驗을 並行하였다.

## 2. 水理實驗

### 2.1 實驗裝置 및 計測機器

實驗에 使用된 水槽는 Fig. 2에 보인 바와 같이 길이 53.15 m, 높이 1.25 m, 폭 1.0 m의 2次元 水槽로 規則 및 不規則 波浪과 흐름을 同時에 發生시킬 수 있도록 설계되었다(韓國海洋研究所, 1991). 이 水槽의 造波機

는 最大 離隔距離가  $\pm 50$  cm인 油壓式 피스톤형으로 컴퓨터를 利用하여 精密制御할 수 있는 特性을 가지고 있다. 附屬施設로서는 實驗場面을 관찰하면서 造波機의 遠隔可動과 實驗資料 讀取시스템을 한 場所에서 할 수 있도록 中央集中式 制御室이 具備되어 있고 防波堤 模型 및 기타 實驗材料들을 水槽內에 安全하게 積載하기 위한 移動式 크레인이 水槽上部에 設置되어 있다. 또한, 水槽內 計測機器의 位置를 수 縱方向, 橫方向, 鉛直方向으로 變化시킬 수 있는 計測機器 운반기 등이 裝着되어 있으며, 實驗장면을 撮影하기 위한 비디오 및 카메라 장치와 비디오 畫面을 印畫할 수 있는 장치 등이 附屬되어 있다.

實驗時 發生하는 水位變動은 길이 80 cm의 電氣 抵抗式 波高計를 使用하여 계측하였다. 이 波高計는 센서의 끝부분을 除外하고는 線形性이 잘 保障되며 實驗誤差 범위는 0.1 mm이다. 이 波高計는 中央制御室에 위치한 增幅器에 連結되어 있으며, 이들은 다시 多채널 Analog-digital 變換機를 통하여 컴퓨터에 連結되어 있다.

### 2.2 防波堤 模型

現在 日本에 施工되어 있는 代表的인 有孔防波堤를 參照하여 實驗에 使用할 防波堤 模型의 諸元을 決定하였다. 水深은 50 cm로 設定하였으며, 模型케이스 前面 마운드 높이와 天端高는 각각 24 cm와 12 cm로 設定하였다. 이들 값은 길이 縮尺比를 1/20으로 設定하였을 때를 기준하여 實驗 設計波高 10 cm에 대하여 越波가 發生하지 않는 限度內에서 決定한 것이다. Fig. 3은 本 水理實驗에서 採擇한 防波堤 模型중 遊水室幅 B가 20 cm인 경우에 대한 것이다.

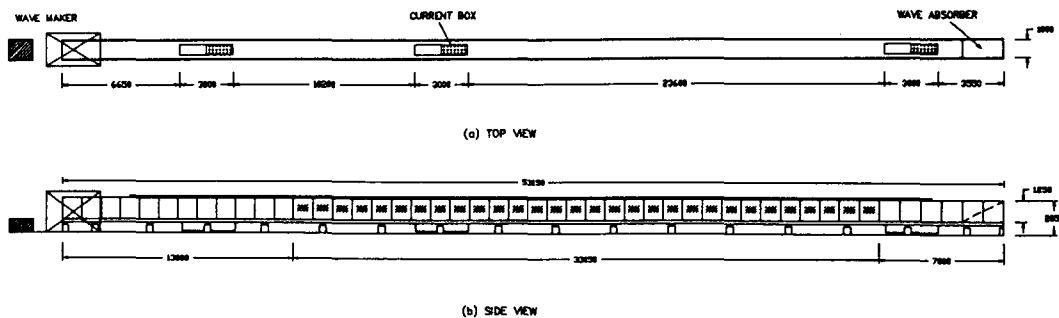


Fig. 2. Two-dimensional wave-current flume.

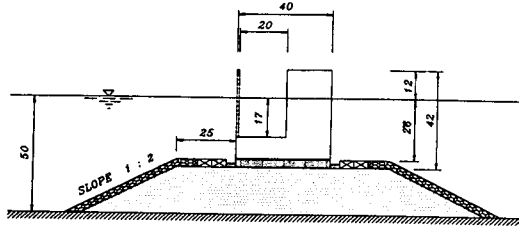


Fig. 3. Configuration of the model structure of perforated breakwater.

케이스 모델은 두께 10 mm의 투명한 아크릴판을 이용하여 폭 40 cm, 높이 38 cm로 제작하였다.水槽內設置의 便易를 위해 세 개의 獨立된 케이스, 즉, 길이가 40 cm인 中央部 케이스와 길이가 각각 29.4 cm인 兩側 케이스으로 제작하였다. 각 케이스는 遊水室幅을 각각 15 cm, 20 cm와 25 cm로 調整할 수 있도록 하였고, 케이스 重量을 追加적으로 確保하기 위한 鉛塊를 遊水室 下部에 插入할 수 있도록 하였다. 또한, 有孔壁의 形態變化에 따른 實驗을 하기 위하여 有孔 前面壁을 交替할 수 있도록 설계하였다. 有孔壁의 開口率은 日本에 設置되어 있는 代表的인 有孔防波堤 有孔壁의 諸元을 参照하여 0.33으로 決定하였다. 谷本과 吉本(1982)의 理論에 의하면, 縱슬리트의 有孔壁인 경우 開口率이 0.33인 경우에 가장 優秀한 反射特性을 보이게 된다. Fig. 4는 實驗에 사용된 3가지의 有孔壁의 형태를 나타낸 것이다.

케이스의 重量을 提供하고 基礎 마운드의 摩擦을 維持하기 위하여 케이스 底面에 두께 3.0 cm인 콘크리트 塊를 附着하였다. 콘크리트 塊와 케이스 사이에는 총 두께 1.0 cm인 鐵板과 고무판을 插入하였는데 鐵판은 케이스의 水槽內 設置時 상부 크레인과 連結하기 위한 것이고, 고무판은 鐵판과 콘크리트 塊 上面 사이에 摩擦力을 提供하는 同時 緩衝效果를 위한 것이다.

基礎 마운드의 높이는 Fig. 3에 보인 바와 같이 24 cm로 하였으며, 케이스 前後面과 마운드 接觸部分에는 길이 6.0 cm, 폭 6.0 cm, 높이 3.0 cm인 根固블럭을 2열로 設置하였다. 一般的인 防波堤의 마운드 형상은 케이스 前後로 非對稱을 이루나 여기에서는 實驗의 便易上 對稱 마운드로 設置하였다. 防波堤의 小段(Berm)은 케이스 前面에서의 局地洗掘을 防止한다는 側面에서는 可及的이면 幅이 넓은 것이 좋으나

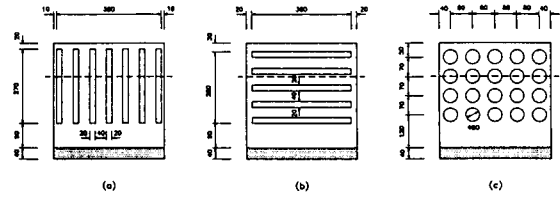


Fig. 4. Shapes of perforated wall of the model structure: (a) vertical slit, (b) horizontal slit, (c) circular hole.

建設費와 衝擊波壓의 可能性 등을 考慮하여 適定 幅을 選擇하는 것이 일반적이다. Goda(1985)에 의하면 日本에서는 正常的인 波浪狀態에서는 最小 5 m, 큰 颶風波가 주로 到來하는 곳에서는 약 10 m 정도의 小段幅이 採擇되고 있다. 따라서, 본 實驗에서는 5 m의 1/20 스케일, 즉, 小段 幅을 25 cm로 하였다. 마운드의 傾斜는 케이스 前後 공히 1:2로 하였다. 마운드는 먼저  $0.12 \text{ cm}^3 \sim 0.24 \text{ cm}^3$  크기의 碎石을 築造한 후 外部 被服材로는  $5.6 \text{ cm}^3$  크기의 碎石을 사용하여 두께 3 cm로 築造하였다.

### 2.3 實驗波浪

設定된 水深條件과 防波堤 모델에 대하여 越波가 發生하지 않는 規則波 條件을 豫備實驗을 통하여 決定하였다. 또한, 入射波浪과 反射波浪의 重疊에 의해서 발생하는 重複波浪의 碎波現象은 入射波 自體의 歪曲을 招來하며, 현재로서는 重複波의 碎波條件이 理論적으로 明確치 않기 때문에 豫備實驗을 통하여 이를 피하였다.

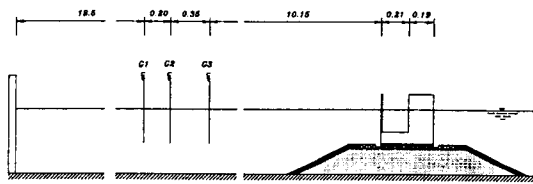
上記와 같은 점들을 考慮하여 본 모델實驗에서는 波高가 5 cm와 10 cm인 두 경우를 選擇하였다. 波高 5 cm에 대해서는 週期가 0.7초에서 1.8초까지를, 波高 10 cm에 대해서는 0.9에서 1.8초까지 0.1초씩 증가시켜 총 21조건의 實驗波浪을 設定하였다. 각 週期에 대한 水深 50 cm에서의 波長( $L$ )과 遊水室內 水深 17 cm에서의 波長( $L_s$ )을 각각 구하여 이들을 정리하면 Table 1과 같다.

### 2.4 케이스 및 波高計의 設置

模型 防波堤는 케이스 前面이 造波板으로부터 35.15 m 離隔된 지점에 위치되도록 設置하였다. 反射特性 分析을 위한 波高計는 Fig. 5에서 보인 바와 같이 散亂波의 영향이 거의 消滅된 위치에 총 3개를 설치하

**Table 1.** Experimental wave conditions employed in the present model testings

$T(\text{sec})$	$L(\text{m})$	$L_c(\text{m})$	$H(\text{cm})$
0.7	0.764	0.697	5
0.8	0.995	0.849	5
0.9	1.248	0.998	5
1.0	1.512	1.143	5/10
1.1	1.781	1.286	5/10
1.2	2.048	1.426	5/10
1.3	2.311	1.565	5/10
1.4	2.570	1.702	5/10
1.5	2.826	1.838	5/10
1.6	3.077	1.973	5/10
1.7	3.326	2.108	5/10
1.8	3.571	2.242	5/10



**Fig. 5.** Installation points of wave gauges for measuring spatial variation of wave displacements.

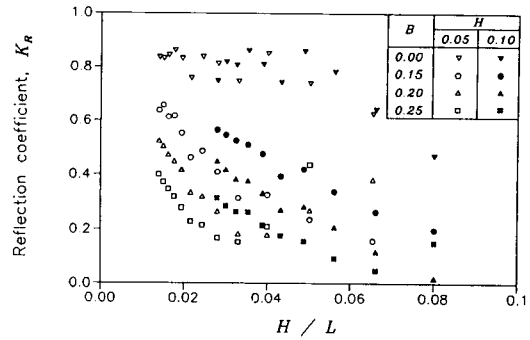
었다. 波高計의 設置間隔은 G1과 G2 사이가 20 cm, G2와 G3 사이가 35 cm 되도록 設定하였다. 이는 最小自乘法에 基礎한 3점 分離法(朴等, 1992)을 利用하여 入·反射波로 分離하여 反射率을 算定할 때 全實驗 波浪條件에 對해 適用이 可能하고 正確度 면에서도 妥當한 結果를 出 수 있도록 設定한 것이다.

### 3. 實驗結果 및 分析

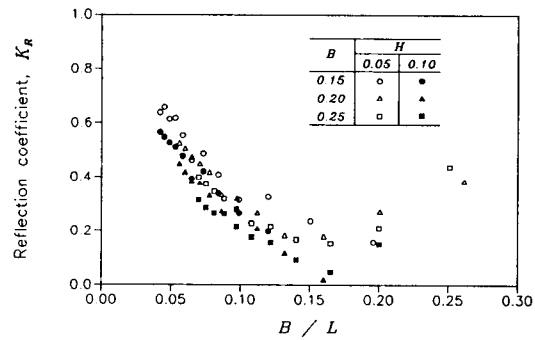
#### 3.1 遊水室 幅의 影響

反射率 變化에 影響을 미치는 因子로는 週期  $T$ , 波高  $H$ , 遊水室의 幅  $B$ , 有孔壁 및 마운드 形象等 여러가지를 생각할 수 있으나, 本 研究에서는 波高와 波長의 比인 波形傾斜  $H/L$ 와 遊水室 幅과 波長과의 比  $B/L$ 로 實驗結果를 分析하였다.

Fig. 6은 波形傾斜  $H/L$ 의 變化에 따른 反射率 變化를 나타낸 것이다. 一般的으로 入射波浪의 波形傾斜가 클수록 防波堤 케이스 前面에서의 碎波 可能性이 높아져 波浪에너지 減減가 增加하고 結果的으로 反射率이 減少하게 된다. 그림에서  $B=0.0$ 인 경우는



**Fig. 6.** Variation of reflection coefficients with respect to wave stiffness  $H/L$  for conventional breakwater and perforated breakwater with vertical slits.



**Fig. 7.** Variation of reflection coefficients with respect to the ratio  $B/L$  for perforated breakwaters with vertical slits.

通常의 無孔防波堤에 對한 것으로 이러한 性向을 잘 보여주고 있다. 反面, 有孔防波堤의 경우는 波形傾斜가 增加함에 따라 反射率이 減少하다가 다시 增加하는 現象이 나타났다. 이는 각 實驗資料가 波形傾斜 뿐만 아니라 遊水室 幅  $B$ 의 變化의 影響을 同時에 반영하고 있기 때문이다. 遊水室 幅을 固定시켜 놓고 波形傾斜만을 變化시켰다면 有孔防波堤에서도 波形傾斜의 增加에 따른 反射率 減少現象이 나타났을 것이다. 한편, 比較한 모든 條件에 있어서 有孔防波堤가 既存의 無孔防波堤에 비해 상당히 有利함을 알 수 있다.

Fig. 7은 有孔防波堤에 對한 上記의 實驗結果를 遊水室 幅,  $B$  對 入射波長,  $L$ 의 比( $B/L$ )로 나타낸 것으로, 波形傾斜로 나타낸 Fig. 6과는 달리 有孔防波堤의 反射特性을 一貫性있게 잘 나타내고 있다. 그림을 살펴보면 反射率은 波高條件 및 遊水室 幅의 變化에

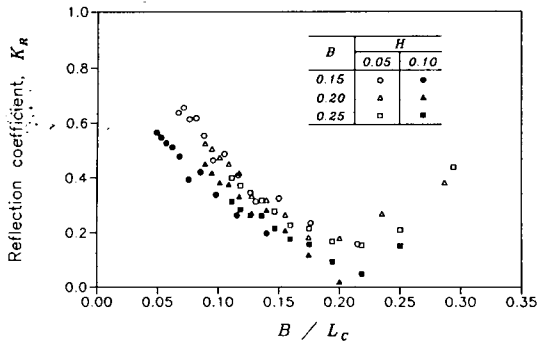


Fig. 8. Variation of reflection coefficients with respect to the ratio  $B/L_c$  for perforated breakwaters with vertical slits.

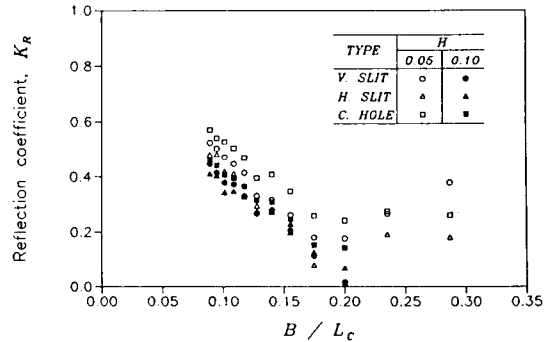


Fig. 9. Variation of reflection coefficients with respect to the ratio  $B/L_c$  for perforated breakwaters with three different perforated walls.

큰 영향없이  $B/L$ 이 0.16인 부근에서 최소가 됨을 알 수 있다. 이러한傾向은 Tanimoto 등(1976), 徐等(1992)의 既存 研究結果에서도 찾아 볼 수 있다.

Fugazza와 Natale(1992)는 마운드가 없고 여러 개의 有孔壁으로 構成된 Jarlan형 防波堤를 對象으로 反射特性을 理論적으로 說明한 바 있다. 즉, 入射波浪 에너지의 損失을 구멍을 通過하면서 發生하는 損失 水頭로 模型化하여 反射率을 算定하였다. 이 理論에 의하면, 遊水室 幅이 入射波長의  $(2n+1)/4$ 배( $n=0, 1, 2, \dots$ )될 때 遊水室內의 共振現象에 의하여 反射率 이 減少하게 된다. 이 共振條件中 實際적으로 關心이 되는 條件은  $n$ 이 0(零)인 경우이므로  $B/L$ 이 0.25가 되는 條件이다. Fig. 7에 도시된 바와 같이  $B/L$ 이 0.16되는 부근에서 最小의 反射率을 나타내는 現象도 이와 같은 脈絡에서 說明이 可能한 것으로 판단된다. 다만, Fugazza와 Natale의 理論的 結果는 마운드가 없고 방파제 前面의 水深과 遊水室內의 水深이 같은 경우에 대한 것임을 勘案해 볼 때, Fig. 7의 結果를 遊水室內의 水深(17 cm)에 대한 波長( $L_c$ )의 比로 나타낸 Fig. 8의 結果와 比較하는 것이 妥當하다. 이 경우  $B/L_c$ 가 0.2 부근에서 反射率 이 最小가 되고 있어 防波堤 前面 水深에 대한 波長의 比로 나타낸 結果보다는 理論值( $B/L=0.25$ )에 보다 近接함을 알 수 있다.

有孔防波堤의 경우, 反射率에 대한 波形傾斜의 效果는 間接적으로나마 Fig. 7과 8에서 觀察할 수 있는데 同一한  $B/L$ (또는  $B/L_c$ )에서 큰  $H$ 값 또는 波形傾斜에서 反射率 이 작게 나타남을 알 수 있다.

### 3.2 有孔壁 形態의 影響

有孔壁의 形態 變化에 따른 實驗結果를 Fig. 9에  $B/L_c$ 에 대해서 나타내었다. 有孔壁의 形態가 變化에 따라 反射率 이 若干 增加하거나 減少하는 현상은 발생하나 全體的인 傾向은 變化가 거의 없음을 볼 수 있다. 이러한 結果는 本 模型과 같은 有孔防波堤의 反射特性에 있어서 波長에 대한 遊水室 幅의 比가 대단히 重要한 因子임을 意味하는 것으로 볼 수 있다. 有孔壁 形態 變化에 따른 結果를 좀 더 자세히 살펴 보면, 微微하지만 反射率을 縱슬리트형이 가장 작고, 圓形 구멍으로 構成된 경우가 가장 큼을 알 수 있다. Fig. 4에 보인 바와 같이 有孔壁의 開口率 이 같음에도 불구하고 이와 같은 差異를 보이는 것은 有孔壁을 通過하며 發生하는 에너지의 損失 機制가 若干씩 다르기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 縱슬리트와 橫 슬리트의 경우는 不透過부분의 幅이 4 cm, 透過부분의 幅이 2 cm로 같기 때문에 거의 같은 程度의 反射率을 보이는 것이며, 圓形 구멍으로 된 경우에는 開口率은 같으나 구멍의 直徑이 5 cm로 比較的 크기 때문에 에너지의 損失이 縱슬리트나 橫슬리트에 比하여 적게 發生되어 反射率 이 약간 크게 나타난 것으로 思料된다. 만약, 같은 開口率을 維持하면서 구멍의 크기를 줄인다면 反射率은 작게 나타날 것이다.

## 4. 結 論

本 論文에서는 有孔防波堤의 反射特性 說明에 대해서 研究한 結果를 논하였다. 波高 및 週期가 다른 여러 規則波를 對象으로 遊水室의 幅과 有孔壁의 형태를 變化시키며 水理實驗을 遂行하였다. 또한, 有孔

防波堤와 既存의 無孔防波堤를 對比하고 이들간의 特性差異를 導出하기 위하여 無孔防波堤에 대해서도 實驗을 並行하였다.

實驗結果, 有孔防波堤의 反射特性은 遊水室 幅과 遊水室內 波長의 比 ( $B/L_c$ )에 敏感하게 反應하며, 특히,  $B/L_c$ 가 0.2인 부근에서는 最小의 反射率(0.2 이하)을 보임을 알 수 있었다. 이러한 現象은 주로 遊水室內에서의 共振現象에 起因한 것으로 判斷된다. 같은 開口率을 갖는 경우 有孔壁형태의 變化는 反射率面에 있어서 若干의 變化를 招來할 수는 있어도, 全般的인 反射特性 變化에는 影響을 주지 못함을 알 수 있었다. 또한, 既存의 無孔防波堤에 대한 反射率 實驗値와 比較해 본 결과, 比較한 모든 波浪條件에서 有孔防波堤가 優秀한 反射特性을 보임을 알 수 있었으며, 無孔의 경우 波形傾斜가 증가할 수록 反射率이 減少하는 傾向을 보이지만 有孔인 경우는 뚜렷한 傾向을 보이지 않았다. 본 실험은 일정한 마운드에서 실험 파랑의 波長만을 變化시켜가며 수행하였으나 遊水室內에서의 共振現象을 좀더 명확하게 파악하기 위해서는 마운드의 높이를 變化시키는 실험을 수행하여야 할 것이다.

### 謝 辭

本 研究는 韓國海洋研究所에서 遂行한 1992年度 基本研究事業 結果의 一部를 拔萃 補完한 것입니다.

### 參考文獻

朴佑善, 吳榮敏, 全仁植, 1992. 最小自乘法에 의한 入, 反射波

- 分離技法, 韓國海岸·海洋工學會誌, 4(3): 139-145.  
 徐慶德, 吳榮敏, 全仁植, 李達秀, 1992. 混成防波堤의 無孔 및 有孔 케이스의 水理特性에 관한 實驗, 韓國海岸·海洋工學會誌, 4(4): 243-249.  
 全仁植, 朴佑善, 李達秀, 1993. 有孔防波堤의 波壓分布特性과 安定度, 韓國海岸·海洋工學會誌, 5(2): 66-75.  
 釜山直轄市, 1992. 海上新都市 外廓防波堤 基本設計用役報告書. 水理模型實驗-II편 (斷面安定性實驗).  
 韓國海洋研究所, 1991. 波浪-흐름 複合水槽 및 計測器機의 性能試驗, BSPE 00199-376-2.  
 韓國海洋研究所, 1989. 波力吸收을 위한 新素材 開發研究 (I), BSPG 00077-224-2.  
 Fugazza, M. and Natale, L. 1992. Hydraulic design of perforated breakwaters, *J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng.*, ASCE, 118(1), pp. 1-14.  
 Goda, Y., 1985. *Random seas and design of maritime structures*, University of Tokyo Press.  
 Jarlan, G.E., 1961. A perforated vertical wall breakwater, *The Dock and Harbor Authority*, 41(488), pp. 394-398.  
 Tanimoto, K., Haranaka, S., Takahashi, S., Todoroki, M. and Osato, M., 1976. An experimental investigation of wave reflection, overtopping and wave forces for several types of breakwaters and sea walls, *Tech. Note of Port and Harbour Res. Inst.*, Ministry of Transport, Japan, No. 246 (in Japanese).  
 Tanimoto, K., Takahashi, S. and Kimura, K., 1987. Structures and Hydraulic Characteristics of Breakwaters-The State of the Art of Breakwater Design in Japan, *Port and Harbor Research Institute*, 26(5).  
 谷本勝利, 吉本晴俊, 1982. 直立消波ケソンの反射率に關する理論及び實驗的研究, 日本 港灣技術研究所報告, 21(3).  
 日本 港灣技術研究所, 1986. 港灣技術資料, 防波堤構造集覽, No. 556.  
 日本 五洋建設株式會社, 1983. 防波堤 護岸形式의 經濟性·安全性に關する調査, 日本 電力中央研究所 委託.