

## 수면에 고정된 유공식 부방파제에 의한 파랑제어

### Wave Control by Surface-Fixed Floating Breakwater with a Perforated Plate

조일형<sup>1</sup>, 김민정<sup>2</sup>

Il-Hyoung Cho<sup>1</sup> and Min-Jung Kim<sup>2</sup>

#### 1. 서 론

기존의 불투과성 고정식 방파제는 파도뿐만 아니라 해수의 흐름을 완전히 차단하여 항내의 해양생태계 파괴와 연안내의 수질 오염을 가속시켰다. 이러한 문제점들을 인식하여 최근에 항내의 해수교환기능을 갖는 신개념의 방파제에 대한 관심이 높아지고 있다. 해수교환기능을 갖는 투과성 방파제를 구조형식별로 분류한다면 유공식, 부유식, 특수식 등 3가지로 나눌 수 있다. 이들 중에는 해수교환기능이 강조된 형태가 있는 반면, 해수교환기능보다는 설치의 편의 및 경제성 등이 부각된 형태도 있다.

유공식에 속한 대표적인 방파제로는 유공/슬릿 케이스 방파제, 원통 케이스 방파제, 반원 케이스 방파제 등이 있다. 유공식은 구조물내에 유공 또는 슬릿을 설치하여 해수교환이 가능케 하고 파랑이 유공 또는 슬릿을 통과할 때 발생하는 제트류(jet flow)에 의해서 입사파의 에너지를 소멸시키는 형태이다.

부유식은 수면에 떠있는 부유체를 계류라인과 앵커로 지지하는 구조를 갖는다. 부유식은 구조특성상 본체가 제한된 흘수로 수심의 일부만을 차단하기 때문에 장파 또는 천해파 성격을 갖는 파랑에 대해서는 방파효율이 떨어지는 단점이 있지만 심해파의 특징을 가지며 파고가 비교적 작은 파랑에 대하여 효과적인 파랑제어구조물이다. 따라서 주로 내수면 해역에서 양식시설물을 보호하는데 이용되고 있다. 부유식에 속한 대표적인 사각형 부방파제는 불투과성 단면을 사용하는 가장 단순한 형태로서 시공성이 양호하다.

내부는 침수에 대비하여 여러 독립된 격벽으로 나뉘어져 있으며 각 내부를 스티로폼으로 속 채움을 하기도 한다. 이밖에도 이중 사각형 부방파제, 공기제어식 부방파제 등이 있다.

특수식은 특수한 해역조건에 설치되거나 또는 일시적 목적으로 사용된다. 특수식에 속한 대표적인 방파제로는 파일 지지형 방파제(pile-supported breakwater), 유연막 방파제(flexible membrane breakwater), 잠제(submerged breakwater) 등이 있다. 파일 지지형 방파제는 연약지반과 대수심에서 주로 사용되며 방파 구조물을 수 개의 파일로 지지하는 형태로 되어 있다. 파일로 지지되는 방파 구조물은 유공식으로 처리할 수 있으며 여러개의 투과성 판들을 파일에 부착하기도 한다. 이 형식은 부유식과 마찬가지로 장주기 파랑에 대해서 취약하며 파일설치에 많은 경비가 소요되고 시공이 어렵다는 단점을 가진다.

본 연구에서 다룰 유공식 부방파제는 불투과성 사각형 부방파제에 전면에 유공판을 부착한 유공식과 부유식의 장점을 혼합한 형태이다. 유공식 부방파제는 유공/슬릿 케이스 방파제와 마찬가지로 파랑이 유공판을 통과할 때 에너지가 소멸되므로 반사파의 에너지를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 부방파제에 작용하는 파랑하중을 줄일 수 있어 운동의 감소를 기대할 수 있다. 본 연구에서는 해석의 복잡성을 줄이기 위해 유공식 부방파제의 운동을 구속한 상태에서 회절 문제를 수치적으로 풀어 유공식 부방파제에 의한 파랑제어효과를 살펴보았다. 수치계산 방법으로 전 경계면에 특이점을 분포시켜 해를 구하는 경계요소법

1 제주대학교 해양산업공학전공 교수

2 제주대학교 해양계측공학과 석사과정

(BEM)을 사용하였다. 무한원방(far-field)에서의 방사조건식(radiation condition)을 효과적으로 적용하기 위하여 계산영역을 내부영역과 외부영역으로 나누고, 내부영역에서는 경계면에 특이점을 분포시켜 해를 적분방정식의 형태로 나타내었고, 외부영역에서는 해를 고유함수의 전개식으로 표현하였다. 두 영역이 만나는 경계면에서 속도포텐셜과 수평방향의 유속이 서로 같다는 정합조건을 적용하여 완전한 해를 구하였다. 수치계산에서 유공판의 영향을 고려하기 위하여 유공판에서의 유속은 유공판 전후의 압력차에 선형적으로 비례한다는 Darcy의 법칙에 기초한 투과 경계조건식을 부과하였다. 이때 비례상수인 공극율 계수를 구하기 위해 조(2002,2004)가 제시한 공극율 계수와 공극율 사이의 선형함수식을 사용하였다. 본 연구에서는 우수한 파랑제어성을 주는 유공식 부방파제의 형상(폭, 홀수)과 유공판의 공극율 그리고 유수실(chamber)의 폭을 찾기 위하여 여러 가지 설계변수들을 바꿔가면서 투과율과 반사율의 변화를 살펴보았다. 또한 개발된 수치모델을 검증하기 위하여 직립벽 앞에 놓인 수직형 유공판에 대하여 2차원 수조에서 수행한 모형 실험결과와 비교하였다.

## 2. 문제의 정식화

계산모델인 유공식 부방파제는  $z$ 축 방향으로 무한히 길며 폭  $L_2$ 인 불투과성 부방파제 전면에 투과성 유공판이  $L_1$ 만큼 떨어져 설치되어 있다 (Fig. 1. 참조). 따라서 유공식 부방파제의 전체 폭은  $L(=L_1+L_2)$ 이다. 입사파는 규칙파이며 주파수  $\omega$ 를 갖고 대상모델과  $\theta$ 의 입사각도를 갖고 들어온다고 가정하였다. 유체는 비점성, 비압축성이며 유동은 비회전성이라 가정하면 속도포텐셜을 도입할 수 있다. 유동이  $z$ 축을 따라 균일하므로 속도포텐셜은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Phi(x, y, z, t) = \text{Re}\{\phi(x, y)e^{i(\beta z - \omega t)}\}, \quad (1)$$

여기서  $\beta(=k\sin\theta)$ 는 입사파의 파수(wavenumber)의  $z$ 방향 성분이다. 식 (1)에 주어진 속도포텐셜을 3차원 Laplace방정식에 대입하여 정리하면 평면에서 정의된 속도포텐셜  $\phi(x, y)$ 는 아래와 같이 Helmholtz방정식을 만족한다.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} - \beta^2 \phi = 0 \quad \text{in the fluid.} \quad (2)$$

지배방정식 (2)와 함께  $\phi(x, y)$ 는 다음과 같은 경계조건식들을 만족해야 한다.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \phi}{\partial y} - \frac{\omega^2}{g} \phi = 0 \quad \text{at } y=0, \\ \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad \text{on the impermeable surface,} \\ \frac{\partial \phi^-}{\partial n} = -\frac{\partial \phi^+}{\partial n} = i\alpha(\phi^- - \phi^+) \\ \quad \text{on the permeable surface} \\ \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad \text{at } y=-h \end{array} \right. \quad (3)$$

여기서 위첨자  $\pm$ 는  $x=-L_1 \pm 0$ 를 의미하며,

$\alpha(=\frac{\rho b_o \omega}{\mu})$ 는 유공판의 특성을 나타내는 계수로 유공판의 공극율( $P$ )과 국부형상(local shape)에 밀접한 관련이 있다(조, 2002). 실제 계산에서는 공극율 계수(porous coefficient)라 불리는  $b=2\pi\sigma/k_1$ 를 사용하였다. 조(2002)는 공극율 계수와 공극율 사이에는 선형관계( $b=57.63P-0.9717$ )가 성립함을 계산과 일련의 모형실험을 통하여 밝혔다.  $b \rightarrow 0$ 는 불투과성 벽을 의미하며,  $b \rightarrow \infty$ 는 입사파에 전혀 영향을 주지 않는 가상의 벽이 놓여 있는 경우이다.

일정한 수심에서 진폭  $A$ 를 갖고  $x$ 축과  $\theta$ 의 각도를 이루면서 진행하는 입사파에 대한 속도포텐셜은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\phi_I = -\frac{igA}{\omega} \frac{\cosh k(y+h)}{\cosh kh} e^{i\alpha x}, \quad (4)$$

여기서  $\omega^2 = gk \tanh kh$ ,  $k^2 = \alpha^2 + \beta^2$  이다.  $\alpha(=k\cos\theta)$ 는 입사파의 파수의  $x$ 방향 성분이다.  $A$ 는 입사파의 진폭이다.

식 (3)에 주어진 경계조건들뿐만 아니라 유공식 부방파제에 의한 회절파(diffracted waves)는 아래의 방사조건을 만족하여야 한다.

$$\lim_{\alpha \rightarrow \infty} \left( \frac{\partial}{\partial x} \mp i\alpha \right) (\phi - \phi_I) = 0. \quad (5)$$

실제 계산에서는 부방파제로부터 멀리 떨어진 가상의 경계면을 잡아 방사조건식 (5)을 적용하여야 하는데 이때 가상의 경계면은 부방파제에 의한 소멸파(evanescent wave)의 영향권으로부터 벗어나도록 가능한 한 부방파제로부터 멀리 떨어져야 한

다. 그러나 이와 같은 계산영역의 증가는 특이점의 개수의 증가를 초래하여 궁극적으로 수치계산시간의 증가를 가져온다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 피하기 위하여 방사조건을 적용하지 않고 부방과제로부터 일정거리 떨어진 지점 바깥에 외부영역을 도입하였다

## 2.1 외부영역의 해

외부영역에서의 해는 지배방정식과 함께 자유표면과 바닥경계조건 그리고 무한원방에서의 방사조건식을 만족해야 하며 아래와 같이 고유함수의 전개식으로 표현된다.

$$\phi^* = A_0^* W_0^*(x, y) + \sum_{n=1}^{\infty} A_n^* W_n^*(x, y) + \begin{pmatrix} 0 \\ \phi_{,1} \end{pmatrix} \begin{matrix} x > X^+ \\ x < X^- \end{matrix} \quad (6)$$

여기서

$$W_0^*(x, y) = e^{i\alpha x} \frac{\cosh k(y+h)}{\cosh kh}$$

$$W_n^*(x, y) = e^{\pm i\gamma_n x} \frac{\cos k_n(y+h)}{\cos k_n h}$$

윗식에서  $X^*$ 은 외부영역과 내부영역이 만나는 경계면을 나타내며  $A_0^*$ 와  $A_n^*$ 는 미지수로 경계면  $X^*$ 에서 두 영역의 해를 정합하여 구한다.  $k_n$ 와  $\gamma_n$ 는 소멸파의 파수로 아래 식을 만족한다.

$$\omega^2 = -gk_n \tan k_n h, \quad \gamma_n = \sqrt{k_n^2 + \beta^2} \quad (7)$$

## 2.2 내부영역의 해

내부영역에서 정의된 속도포텐셜과 식 (2)에 주어진 Helmholtz방정식을 만족하는 Green함수에 Green정리를 적용하면 다음과 같은 적분방정식을 유도할 수 있다.

$$C_P \phi(P) = \int_S \left[ \phi(Q) \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n} - G(P, Q) \frac{\partial \phi(Q)}{\partial n} \right] dS \quad (8)$$

여기서  $G(P, Q) = -K_0(\beta \sqrt{(x_P - x_S)^2 + (y_P - y_S)^2})$ ,  $P(x_P, y_P)$ 는 경계면을 포함한 내부영역내의 임의의 점이며,  $Q(x_S, y_S)$ 는 경계면상의 점이다.  $C_P$ 는 계수로  $P$ 가 경계면상에 있을 때  $\pi$ , 영역내에 있을 때  $2\pi$ , 영역밖에 있을 때 0의 값을 갖는다.  $K_0(x)$ 는 제 2종 Bessel 함수이다.

경계면을  $N$ 개의 선분으로 분할하여 각 요소내에서 속도포텐셜과 법선방향의 유속값이 일정하다고 가정하면 식 (8)에 주어진 적분방정식은 아래

와 같이 대수방정식으로 바뀐다.

$$C_P \phi_i + \sum_{j=1}^N \left\{ \int_{S_j} \frac{\partial G(P_i, Q_j)}{\partial n} dS_j \right\} \phi_j = \sum_{j=1}^N \left\{ \int_{S_j} G(P_i, Q_j) dS_j \right\} \frac{\partial \phi_j}{\partial n} \quad (9)$$

편의상 Green함수의 적분항을 다음과 같이 정의하자.

$$H^{ij} = \begin{cases} \int_{S_j} \frac{\partial G(P_i, Q_j)}{\partial n} dS_j & \text{when } i \neq j, \\ \int_{S_j} \frac{\partial G(P_i, Q_j)}{\partial n} dS_j + C_P & \text{when } i = j, \end{cases}$$

$$G^{ij} = \int_{S_j} G(P_i, Q_j) dS_j \quad (10)$$

윗식을 식 (9)에 대입하면 아래와 같은 대수방정식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{j=1}^N H^{ij} \phi_j = \sum_{j=1}^N G^{ij} \frac{\partial \phi_j}{\partial n} \quad (11)$$

내부영역을 편의상 영역1과 영역2로 나누고 위첨자 (1),(2)로 구분한다. 영역1에서의 해는 자유표면 경계조건, 물체표면 경계조건(투과면, 불투과면), 외부영역과의 정합조건, 해지면 경계조건을 만족한다. 식 (11)에 영역1에 관련된 경계조건식들을 대입하여 정리하면 아래와 같다.

$$\sum_{j=1}^{F_1} (H^{ij} - \frac{\omega^2}{g} G^{ij}) \phi_j^{(1)} + \sum_{j=1}^{S_1} H^{ij} \phi_j^{(1)} + \sum_{j=1}^{S_2} (H^{ij} - i\sigma G^{ij}) \phi_j^{(1)} + \sum_{j=1}^{X^*} H^{ij} \phi_j^{(1)} + \sum_{j=1}^B H^{ij} \phi_j^{(1)} + \sum_{j=1}^{S_3} i\sigma G^{ij} \phi_j^{(2)} = \sum_{j=1}^{X^*} G^{ij} \frac{\partial \phi_j^{(1)}}{\partial n} \quad (12)$$

여기서  $F_{1,2}(1 \sim N_1, N_1 \sim N_5)$ ,  $S_{1,2}(N_1 \sim N_3, N_3 \sim N_4)$ ,  $X^*(N_5 \sim N_6, N_7 \sim N)$ ,  $B(N_6 \sim N_7)$ 는 각각 자유표면, 물체표면(불투과면, 투과면), 외부영역과의 경계면, 바닥면을 뜻한다.

같은 방법으로 식 (11)에 영역2의 경계조건식인 자유표면 경계조건, 물체표면 경계조건(투과면, 불투과면)을 적용하면 다음과 같다.

$$\sum_{j=1}^{F_3} (H^{ij} - \frac{\omega^2}{g} G^{ij}) \phi_j^{(2)} + \sum_{j=1}^{S_2} (H^{ij} - i\sigma G^{ij}) \phi_j^{(2)} + \sum_{j=1}^{S_1} H^{ij} \phi_j^{(2)} + \sum_{j=1}^{S_3} i\sigma G^{ij} \phi_j^{(1)} = 0 \quad (13)$$

여기서  $F_3(1 \sim M_1)$ ,  $S_{2,3}(M_1 \sim M_2, M_2 \sim M)$ 는 각각 자유표면, 물체표면(투과면, 불투과면)을 뜻한다.

식 (12)와 식 (13)을 행렬식으로 바꾸어 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
& ([H] - \frac{\omega^2}{g}[G])[\phi^{(1)}]_{j=1 \sim N_1} + [H][\phi^{(1)}]_{j=N_1 \sim N_3} \\
& + ([H] - i\sigma[G])[\phi^{(1)}]_{j=N_3 \sim N_4} \\
& + ([H] - \frac{\omega^2}{g}[G])[\phi^{(1)}]_{j=N_4 \sim N_5} \\
& + [H][\phi^{(1)}]_{j=N_5 \sim N} + i\sigma[G][\phi^{(2)}]_{j=M_2 \sim M_1} \\
& = [G][\frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial n}]_{j=N_5 \sim N_6, N_7 \sim N} \quad i=1, \dots, N
\end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned}
& ([H] - \frac{\omega^2}{g}[G])[\phi^{(2)}]_{j=1 \sim M_1} \\
& + ([H] - i\sigma[G])[\phi^{(2)}]_{j=M_1 \sim M_2} \\
& + [H][\phi^{(2)}]_{j=M_2 \sim M} + i\sigma[G][\phi^{(1)}]_{j=N_4 \sim N_5} = 0. \\
& \quad i=1, \dots, M
\end{aligned} \tag{15}$$

영역1의 경계면에 분포된 특이점이 개수는  $N$ 이며, 영역2의 경계면에 분포된 특이점이 개수는  $M$ 이다.

### 2.3 정합조건

두 영역이 만나는 경계면  $x=X^+$ 에서의 속도포텐셜은 식 (6)으로부터 다음과 같은 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
[\phi^+] &= [C^+][a^+], \\
[\frac{\partial \phi^+}{\partial x}] &= [D^+][a^+],
\end{aligned} \tag{16}$$

여기서

$$\begin{aligned}
[a^+] &= \{A_0^+, A_1^+, A_2^+, \dots\}^T, \\
[C^+] &= \{W_0^+, W_1^+, W_2^+, \dots\}, \\
[D^+] &= \{\frac{\partial W_0^+}{\partial x}, \frac{\partial W_1^+}{\partial x}, \frac{\partial W_2^+}{\partial x}, \dots\}
\end{aligned}$$

식 (16)에서  $[a^+]$ 를 소거하면 아래와 같다.

$$[\frac{\partial \phi^+}{\partial x}] = [D^+][C^+]^{-1}[\phi^+]. \tag{17}$$

내부영역과 외부영역이 만나는 경계면  $x=X^+$ 에서 각 영역의 속도포텐셜과 법선방향 유속이 서로 같다는 정합조건식들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
[\phi^{(1)}] &= [\phi^+], \\
[\frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial n}] &= [-\frac{\partial \phi^+}{\partial x}].
\end{aligned} \tag{18}$$

식 (18)로부터  $x=X^+$ 에서 법선방향의 유속과 속도포텐셜사이의 관계식은 다음과 같다.

$$[-\frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial n}] = [D^+][C^+]^{-1}[\phi^{(1)}]. \tag{19}$$

같은 방법으로 경계면  $x=X^-$ 에서의 법선방향의 유속과 속도포텐셜사이의 관계식은 아래와 같다.

$$[\frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial n}] = -[D^-][C^-]^{-1}([\phi^{(1)}] - [\phi_I]) - [-\frac{\partial \phi_I}{\partial x}]. \tag{20}$$

### 2.4 투과율과 반사율

식 (19)과 (20)를 식 (14)에 대입하면 다음과 같은 행렬식을 유도 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
& ([H] - \frac{\omega^2}{g}[G])[\phi^{(1)}]_{j=1 \sim N_1} + [H][\phi^{(1)}]_{j=N_1 \sim N_3} \\
& + ([H] - i\sigma[G])[\phi^{(1)}]_{j=N_3 \sim N_4} \\
& + ([H] - \frac{\omega^2}{g}[G])[\phi^{(1)}]_{j=N_4 \sim N_5} \\
& + ([H] + [G][D^-][C^-]^{-1})[\phi^{(1)}]_{j=N_5 \sim N_6} \\
& + [H][\phi^{(1)}]_{j=N_6 \sim N_7} \\
& + ([H] - [G][D^+][C^+]^{-1})[\phi^{(1)}]_{j=N_7 \sim N} \\
& + i\sigma[G][\phi^{(2)}]_{j=M_2 \sim M_1} \\
& = [G]([D^-][C^-]^{-1}[\phi_I] - [-\frac{\partial \phi_I}{\partial x}])_{j=N_5 \sim N_6}. \\
& \quad \text{for } i=1, \dots, N
\end{aligned} \tag{21}$$

식 (15)와 식 (21)에 주어진  $(N+M) \times (N+M)$ 행렬식을 동시에 풀어 경계면에서의 속도포텐셜를 구한다. 또한 식 (8)을 이용하면 유체영역 내부에서의 속도포텐셜을 구할 수 있다. 외부영역에서의 미지수  $A_0^+, A_n^+$ 는 다음 식으로부터 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
[a^-] &= [C^-]^{-1}([\phi^{(1)}] - [\phi_I])_{X^-}, \\
[a^+] &= [C^+]^{-1}[\phi^{(1)}]_{X^+}.
\end{aligned} \tag{22}$$

투과율과 반사율 그리고 에너지 손실율은 아래와 같이 정의된다.

$$R_r = \frac{|A_0^-| \omega}{gA}, T_r = \frac{|A_0^+| \omega}{gA}, \epsilon = \sqrt{1 - R_r^2 - T_r^2} \tag{23}$$

### 3. 모형실험

계산결과의 타당성을 검증하기 위하여 길이 20m, 폭 0.6m, 수심 0.6m인 2차원 수조내에 설치한 직립벽 앞에 30cm 떨어진 지점에 바닥까지 놓여진 수직형 유공판에 의한 반사율을 측정하였다. 전체적인 실험장치의 구성도는 Fig. 3과 같다. 입사파의 주파수는 0.5Hz에서 1.4Hz까지 범위에서 안정적으로 선형파 특성을 보이는 파기울기(wave steepness)를 사용하였다. 정확도  $\pm 0.1\text{cm}$ 의 저항식 파고계를 통해 파고를 측정하였다. 입사파와 반사파를 분리하기 위하여 Mansard and Funke(1980)가 제안한 최소사승법(least square method)을 사용하였다. 이 방법은 가정된 파형과 계측된 파형의 오차의 제곱의 합이 최소가 되도록 미지수를 구하는 방법으로 최소한 3개의 파고계가 필요하다. 본 실험에서는 유공판 전면에 4개의 파고계를 설치하였다. 설치 위치는 조파기 쪽에 가장 가까운 것을 유공판으로부터 4m, 나머지 파고계들을 첫 번째 파고계로부터 각각 40cm, 69.7cm, 86.4cm 지점에 위치시켰다.

실험에 사용한 유공판은 일정한 직경(2mm)을 갖는 원형 구멍이 일정한 간격을 갖고 배열된 형태로 두께는 1.6mm이다. 유공판의 공극율은 뚫린 부분의 면적을 전체면적으로 나눈 값으로 정의되며, 2개의 공극율( $P=0.1008, 0.2267$ )에 대하여 실험을 수행하였다. 실험에서 사용한 유공판의 공극율  $P=0.1008, 0.2267$ 에 해당하는 수치계산에서의 공극율 계수 ( $b=5, 11$ )를 얻기 위하여 조(2002, 2004)가 제안한  $b=57.63P-0.9717$ 을 사용하였다.

### 4. 계산결과 및 고찰

Fig. 4는 유공판을 부착한 부방파제의 반사율과 투과율을 살펴보기에 앞서 수치모델의 정확성을 검증하기 위하여 수면에 고정된 불투과성 부방파제에 대한 수치계산결과와 모형실험결과를 비교한 그림이다. 모형실험에 사용한 부방파제의 폭은 45cm이며, 잠긴깊이는 8cm이다. 계산결과와 모형실험결과는 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 특히 반사율의 경우 전 주파수에 걸쳐 완벽한 일치를 보이고 있다. 그러나 투과율의 경우 파장이 짧은 고주파수 영역에서 두 결과 사이의 정량적인 값 차이가 나는데 이는 2차원 수조 끝단에 설치된 소파장치의 효율과 밀접한 관련이 있다고 생각된다.

Fig. 5는 직립벽으로부터 30cm 떨어진 지점에 수직형 유공판( $P=0.1008, 0.2267$ )을 바닥까지 설치한 경우의 반사율을 그린 그림이다.  $x$ 축을 유수실의 폭을 입사파 파장으로 나눈 값( $L_1/\lambda$ )으로 잡았다. 계산결과는 모형실험결과를 잘 따라 가고 있다. 특히  $L_1/\lambda=0.25$ 일 때 반사율이 최소가 되는데 이는 유공판으로부터 반사된 파형과 불투과성 부방파제로부터 반사된 파형 사이에  $180^\circ$  위상차가 생기기 때문이다. 같은 이유로 유공판과 불투과성 부방파제로부터 반사된 파형사이의 위상차 없는  $L_1/\lambda=0.5$ 에서 반사율이 1인 완전반사가 일어남을 볼 수 있다. 공극율이 0.1008일 때의 반사율이 공극율이 0.2267일 때 보다 전 주파수에 걸쳐 작음을 알 수 있다. 즉, 공극율이 0.1008일 때 상대적으로 유공판에 의한 에너지 감쇠효과가 더 크다는 것을 보여준다.

Fig. 6은 전면에 유공판을 부착한 부방파제에 의한 반사율과 투과율 그리고 에너지 손실율에 대한 그림을 보여주고 있다. 유공판의 공극율은 0.1이며, 무차원화된 잠긴깊이는  $d/h=0.2, 0.4, 0.6$ 이다. 불투과성 부방파제의 폭( $L_2/h$ )은 0.3이며 유공판과 부방파제 사이의 유수실의 폭( $L_1/h$ )은 0.2이다. 따라서 유공식 부방파제의 전체 폭( $L$ )은 수심의 1/2이다.  $L_1/\lambda$ 가 0.25보다 작은 장파영역에서는 잠긴깊이가 깊을수록 반사율이 커지는 것을 볼 수 있다. 그러나  $L_1/\lambda$ 가 0.25보다 큰 단파영역에서는 반대의 경향이 일어난다. 즉, 입사파의 파장이 짧을 때 불투과성 부방파제의 잠긴깊이가 깊어짐에 따라 증가하는 반사파의 에너지보다 유공판의 길이증가에 따른 에너지 감쇠효과가 더 크다는 것을 의미한다. 그러나 잠긴깊이가 깊어질수록 투과율은 일정한 폭으로 줄어드는 것을 Fig. 6b를 통하여 확인할 수 있다. 전반적으로 파장이 긴 장주기파가 입사할 때에는 파 차단효율이 떨어지지만 단주기파에서는 효과적으로 파를 차단하는 부유식 방파제의 전형적인 특징을 잘 보여주고 있다. Fig. 6c는 에너지 손실율을 그린 그림이다. 부방파제의 잠긴깊이 변화에 따른 에너지 손실율의 차이는 그다지 크지 않음을 알 수 있다. 이러한 결과는 파 에너지의 대부분은 수면근처에 밀집되어 있으므로 유공판의 깊이가 일정값 이상이 되면 소파효율의 차이가 크지 않기 때문이다.

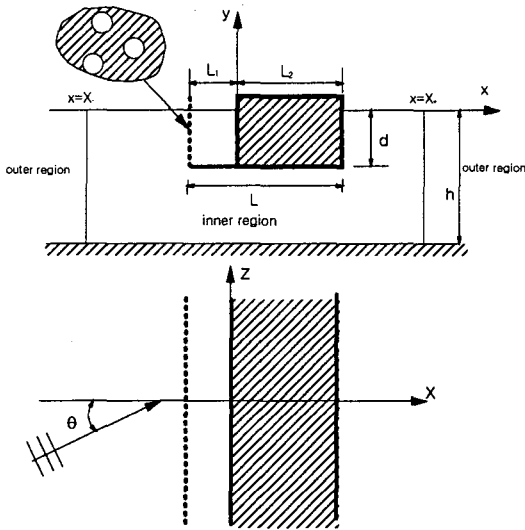


Fig. 1. Definition sketch of a surface-fixed floating breakwater with a perforated wall.

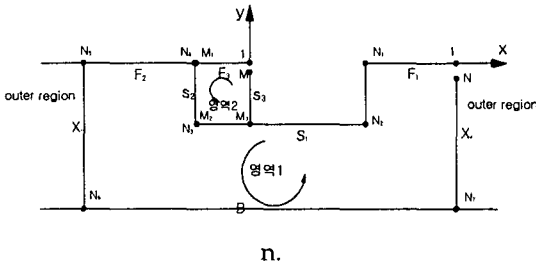


Fig. 2. Integration domain for a numerical solution.

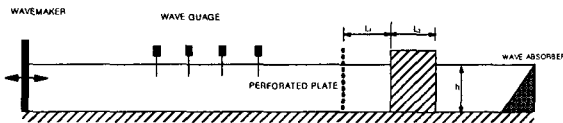


Fig. 3. Experimental set-up of model test.

Fig. 7은 유공판의 공극을 변화에 따른 부방파제의 반사율과 투과율 그리고 에너지 손실율을 보여주고 있다. 실선은 공극율이 0으로 불투과성 부방파제를 의미한다. 공극율 변화에 따라 반사율은 큰 차이를 보이고 있지만 투과율에는 큰 차이가 나타나지 않고 있다.

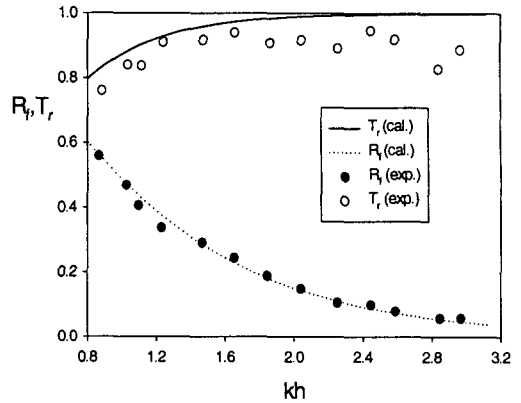


Fig. 4. Comparison of calculated and experimental results of the reflection and the transmitted coefficient for impermeable floating breakwater ( $L=45\text{cm}, d=8\text{cm}$ ).

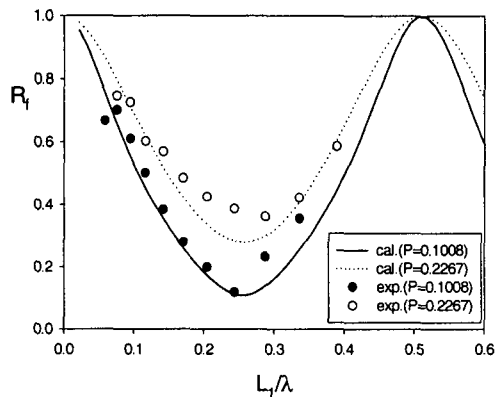


Fig. 5. Comparison of the calculated and experimental results of the reflection coefficients for a perforated plate with a back wall ( $L_1=30\text{cm}, d=h=60\text{cm}$ )

이러한 결과로부터 전면에 부착한 유공판은 반사율을 줄이는데 큰 기여를 하지만 투과율에는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 3개의 서로 다른 공극율을 비교한 결과 공극율이 0.1일 때 반사율이 전 주파수에 걸쳐 가장 작음을 알 수 있다. 이를 뒷받침하는 그림이 Fig. 7c에 주어진 에너지 손실율이다. 3개의 공극율에 대하여 에너지 손실

울을 비교한 결과 공극율이 0.1일 때 에너지 손실  
율이 가장 크다.

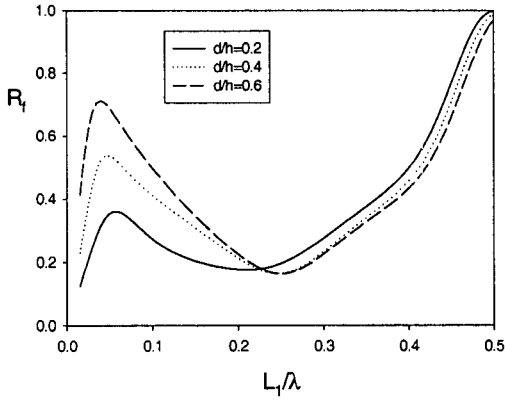


Fig. 6(a) reflection coefficients

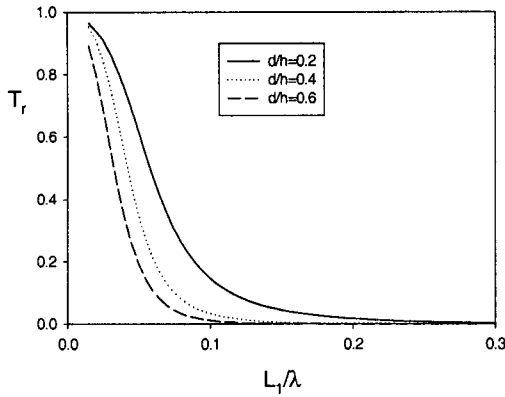


Fig. 6(b) transmission coefficients

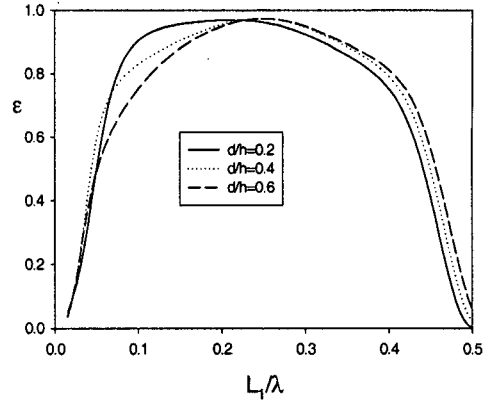


Fig. 6(c) energy loss coefficients

Fig. 6. Reflection, transmission, and energy loss coefficients of surface-fixed floating breakerwater with a perforated wall as function of submerged depth  $d/h$  and wavelength  $L_1/\lambda$  for  $P=0.1, L_1/h=0.2, L_2/h=0.3$

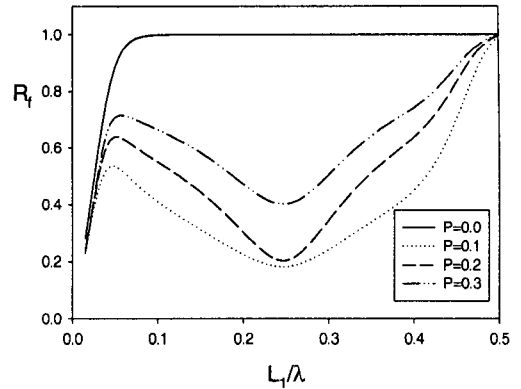


Fig. 7(a) reflection coefficient

Fig. 8은 유수실의 폭변화 ( $L_1/h=0.1, 0.2, 0.3$ )에 따른 반사율과 투과율을 보여주고 있다.  $x$ 축은  $kh$ 로 잡았으며 유공식 부방파제의 전체폭 ( $L/h$ )을 수심의 1/2로 고정시켰다. 유수실의 폭이 커질수록 반사율이 줄어드는데 입사파의 파장이 짧을수록 감소폭이 점점 증가한다. 투과율은 유수실의 폭이 커질수록 다소 감소하나 변화 폭은 작다.

Fig. 9는 입사파의 입사각도를 변화시키면서 구한 반사율과 투과율 곡선을 보여주고 있다. 계산에서 무차원화된 잠긴깊이는  $d/h=0.4$ 이며 공극율은 0.1이다.  $x$ 축을 유수실의 폭을  $x$ 방향의 파장으로 나눈 값( $L_1 \cos \theta/\lambda$ )으로 잡았다. 수직으로 입사하는 경우에서와 같이  $L_1 \cos \theta/\lambda=0.25$ 에서 최소의 반사율을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 경사각도가 증가할수

특 반사율은 증가하는 반면에 투과율은 줄어드는 것을 볼 수 있다.

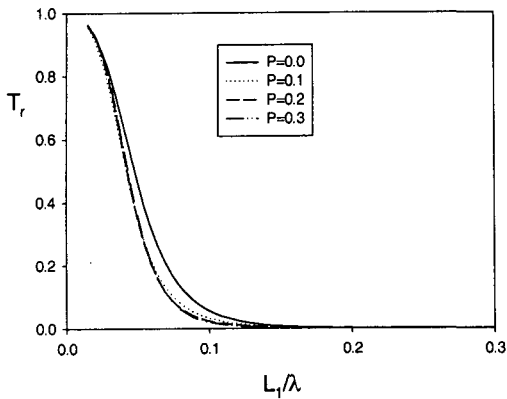


Fig. 7(b) transmission coefficient

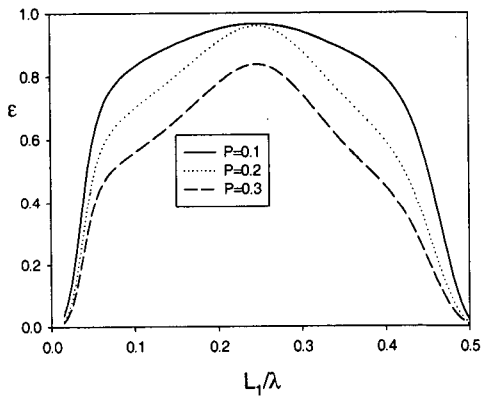


Fig. 7(c) energy loss coefficient

Fig. 7. Reflection, transmission, and energy loss coefficients of surface-fixed floating breakwater with a perforated wall as function of porosity and wavelength  $L_1/\lambda$  for  $d/h=0.4, L_1/h=0.2, L_2/h=0.3$ .

## 5. 결 론

이상의 수치계산과 모형실험의 결과로 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- 1) 조(2002,2004)가 제시한 공극율과 공극율 계수

사이의 선형함수식( $b=57.63P-0.9717$ )을 이용하여 계산된 유공식 부방파제의 반사율과 투과율을 모형실험결과와 비교한 결과, 두 결과는 잘 일치함을 확인하였다. 즉, 조(2002,2004)가 제시한 선형함수식의 타당성을 다시 한번 입증하였다.

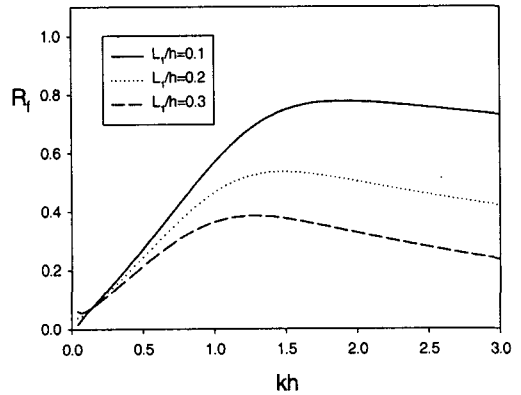


Fig. 8(a) reflection coefficient

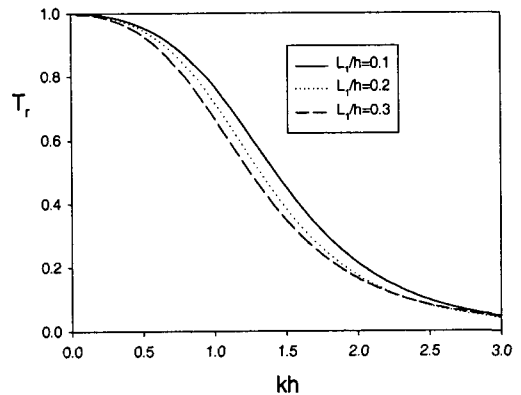


Fig. 8(b) transmission coefficient

Fig. 8. Reflection and transmission coefficients of surface-fixed floating breakwater with a perforated wall as function of chamber width  $L_1/h$  and wavelength  $kh$  for  $P=0.1, d/h=0.4, L/h=0.5$ .

- 2) 유공식 부방파제의 파랑제어 성능은 여러 가지 설계변수들(잠긴깊이, 유공판의 공극율, 유수실의



폭, 입사각도)에 따라 달라짐을 확인하였다. 유수실의 폭이 증가할수록 입사각도가 작을수록 반사율을 감소한다. 또한 최적의 소파효율을 보이는 유공판의 공극율은 0.1임을 밝혔다.

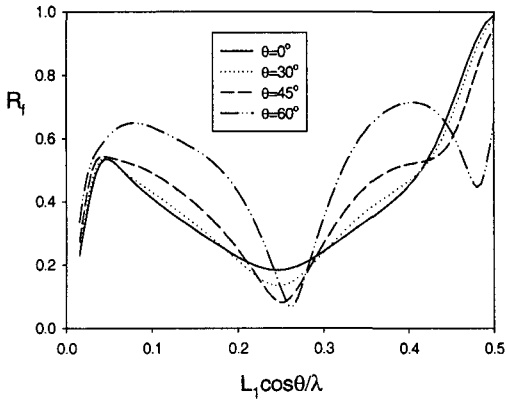


Fig. 9(a) reflection coefficient

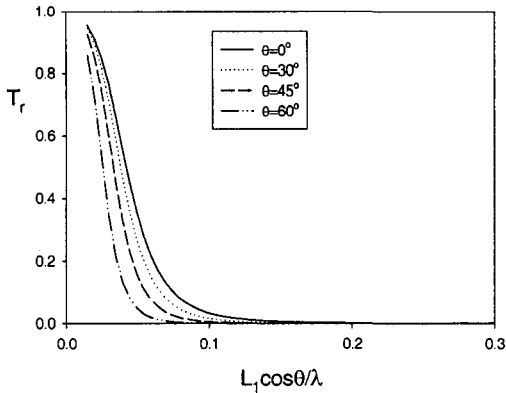


Fig. 9(b) transmission coefficient

Fig. 9. Reflection and transmission coefficients of surface-fixed floating breakwater with a perforated wall as function of incident angle

and wavelength  $L_1 \cos \theta / \lambda$  for

$$P=0.1, d/h=0.4, L_1/h=0.2, L_2/h=0.3$$

3) 유공판의 설치는 부방파제의 반사율을 줄이는데 큰 기여를 하였으나 투과율에는 큰 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

## 참고문헌

- 조일형 (2002). 수평형 타공판의 소파특성, 한국해양공학회지, 14(4), pp. 265-273.
- 조일형 (2003). N개의 투과성 원기둥 배열에 의한 파랑 제어, 한국해양·해양공학회지, 15(4), pp.232-241.
- 조일형,홍석원 (2004). 경사형 타공판을 이용한 소파장치, 한국해양공학회지, 18(1), pp.1-6.
- Bennett, G.S., McIver, P. and Smallman, J.V. (1992). A mathematical model of a slotted wavescreen breakwater, *Coastal Eng.*, 18, pp. 231-249.
- Brossrad, J., Jarno-Druaux, A., Marin, F. and Tabet-Aoul, E.H. (2003). Fixed absorbing semi-immersed breakwater, *Coastal Eng.*, 49, pp. 25-41.
- Cho, I.H. and Kim, M.H. (1998). Interactions of a horizontal flexible membrane with oblique waves, *J. Fluid Mech.*, 367, pp. 139-161.
- Fugazza, M., and Natale, L. (1992). Hydraulic design of perforated breakwater, *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng. ASCE*, 118, pp. 1-14.
- Isaacson, M., Premasiri, S. and Yang, G. (1998). Wave interactions with vertical slotted barrier, *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, 124, pp. 118-126.
- Jarlan, G.E. (1961). A perforated vertical wall breakwater, *Dock Harbour Auth.* XII, 486, pp. 394-398.
- Mansard, E.P.D. and Funke, E.R. (1980). The measurement of incident and reflected spectra using a least squares methods, *Proc. Coastal Eng.*, pp. 154-172.
- Mei, C. C. (1989). *The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves*, John Wiley and Sons.
- Suh, K.D. and Park, W.S. (1995). Wave reflection from perforated-wall caisson breakwaters, *Coastal Eng.*, 26, pp. 177-193.
- Zhu, S. and Chwang, A.T. (2001). Investigations on the reflection behaviour of a slotted seawall, *Coastal Eng.*, 43, pp. 93-104.