

## 직립 슬릿판에 의한 반사율과 투과율 해석

조일형\* · 김남형\*\*

\*제주대학교 해양산업공학부

\*\*제주대학교 지구환경시스템공학부

# On an Analysis of Reflection and Transmission Coefficients by a Vertical Slit Plate

IL-HYOUNG CHO\* AND NAM-HYEONG KIM\*\*

\*Department of Marine Industrial Engineering, Cheju National University, Jeju, Korea

\*\*Department of Civil and Environmental Engineering, Cheju National University, Jeju, Korea

**KEY WORDS:** Slit Plate 슬릿판, Reflection Coefficient 반사율, Transmission Coefficient 투과율, Energy Loss Coefficient 에너지 손실율, Linear Potential Theory 선형포텐셜 이론, Model Test 모형실험, Wave Absorber 소파제

**ABSTRACT:** In this paper, a numerical model to analyze the performance of a vertical slit-type wave absorber is developed under the assumption of inviscid water waves. The formulation combines the linear potential theory with a semi-empirical description of the eddy-shedding at a slit-type wave absorber. We investigated the reflection coefficients over a wide frequency range for a vertical slit-type wave absorber both with and without a solid rear wall. Model test was conducted at KRISO's two dimensional wave tank to validate the theoretical results. It is found that the agreement between theoretical results and experimental data is surprisingly good. We found that the wave absorbing system using a vertical slit plate has sufficient potentials for breakwaters for ocean development.

### 1. 서 론

그동안 우리나라의 항만개발 정책은 급증하는 수출입화물 물동량을 따라잡기 위한 화물처리능력을 증대시키는 데 역점을 두고 생태적, 자연적 환경보호에 대해서는 충분한 주의를 기울이지 못하였다. 앞으로 선진국의 국제항만들과 경쟁을 하기 위해서는 국제적으로 요구되는 환경문제를 적극적으로 해결하지 않으면 안될 시점에 와 있다. 따라서 앞으로의 항만개발은 원활한 항만활동을 유지하면서 환경문제가 자동적으로 해결될 수 있도록 하는 환경친화적인 항만을 개발하는 것이 필요하다.

슬릿형 소파제의 기본 구조는 원형과 사각형 실린더를 일정한 간격을 가지고 배열하여 만든 슬릿구조이다. 슬릿형 소파제는 환경친화적인 항만 개발에 필요한 많은 장점들을 가지고 있다. 즉, 항내로 입사하는 파의 에너지를 감소시킬 뿐만 아니라 소파제로부터 반사되는 파의 에너지를 줄이는 효과를 가지고 있어 소파제 주위에서 운항하는 선박의 안정성 측면에서 유리하다. 또한 항만활동에 지장을 주지 않는 범위 내에서 파의 일부와 흐름을 통과시켜 항만내 해수의 순환을 허용하므로 항만내 수질개선에 기여한다.

슬릿형 소파제의 파 에너지 감쇠기구는 다음과 같다. 먼 외해

에서 만들어진 파가 해안으로 진행하면서 슬릿형 소파제를 만나면 갑작스런 형상변화로 뚫린 부분을 통해 강한 제트가 형성된다. 이로 인하여 점성에 의한 박리(separation)현상이 발생하여 파 에너지의 일부분이 슬릿을 통과하면서 소멸된다. 소멸 과정 후 남은 파 에너지의 일부는 소파제를 통과하며 항내로 들어오며, 일부의 에너지는 입사파의 진행방향과 반대방향으로 외해로 반사된다. 이때 슬릿형 소파제에 의한 반사율과 투과율은 공극율과 슬릿의 국부형상 그리고 주파수 등과 밀접한 관계가 있다.

슬릿판을 통과하면서 발생하는 물리적 현상은 음향학 분야에서 많은 연구가 이뤄졌으며, 음향학의 해석방법을 해안공학에 적용한 연구로는 Mei(1974) 등의 논문을 들 수 있다. Mei는 슬릿판 전후의 파형의 차이를 물입자의 속도의 제곱에 비례하는 점성항과 물입자의 가속도에 비례하는 관성항의 합으로 표현하였고, 각 항에 포함된 경험계수들을 구하는 방법을 제시하였다. Bennett(1992) 등은 슬릿판의 외부영역에서는 선형포텐셜 이론을 적용하였고, 슬릿판 내부영역에서는 Mei(1974) 등이 제시한 경험식을 사용하였다. 이때 물입자의 속도 제곱에 비례하는 점성항은 비선형항으로 하나의 입력 주파수에 대하여 많은 응답 주파수들이 발생한다. 이를 해결하기 위하여 응답주파수가 입력 주파수와 같다는 등가선형화(equivalent linearization) 기법을 도입하였다. 슬릿판 외부영역의 해와 내부영역의 해를 정합(matching)시켜 비선형 적분방정식을 유도하여 Newton Raphson의 축차법(iteration method)을 사용하여 수치적으로 풀어 슬릿판에 의한 반사율을 계산하였다. Kakuno and Liu(1993)은 정합점근전개법(matched asymptotic expansion

제1저자 조일형 연락처: 제주도 제주시 아라동 1번지

064-754-3482 cho0904@cheju.ac.kr

method)을 사용하여 외부영역의 해를 풀어 수직방향으로 배열된 슬릿판에 의한 반사율을 계산하였다. 이때 가속도에 비례하는 관성항의 계수를 차단계수(blockage coefficient)로 나타냈으며, 차단계수는 슬릿판에 가까운 내부영역의 2차원 수로문제를 풀어 구하였다. 본 연구에서는 Bennett(1992) 등이 사용한 해석 이론을 사용하여 직립형 슬릿판에 의한 반사율과 투과율 그리고 슬릿판에 작용하는 파력을 계산하였다. 슬릿판에 적용할 경계조건식으로 판 전후에서의 속도의 연속방정식과 함께 판 전후의 압력차를 물입자의 속도의 제곱에 비례하는 점성항과 가속도에 비례하는 관성항의 합으로 표현하였다. Kakuno and Liu(1993)가 도입한 차단계수를 이용하여 관성항을 구하였고, 등가선형화 방법을 도입하여 점성항을 표현하였다. 계산모델로 직립형 슬릿판 후면에 벽이 있는 경우와 벽이 없는 경우를 함께 고려하였다. 계산결과와 타당성을 검증하기 위하여 2차원 수조에서 직립 슬릿판에 대하여 모형실험을 수행하였다. 이론 계산 결과와 실험치를 서로 비교하였다.

## 2. 문제의 정식화

### 2.1 외부 영역의 해

Fig. 1과 같이 수심( $h$ )이 일정한 유체영역 내에 직립형 슬릿판이 파랑 중에 놓여 있다고 생각하자. 입사파는  $x$ 축의 양의 방향으로 주파수  $\omega$ 를 갖고 진행한다. 입사파의 파장에 비하여 슬릿판의 두께와 슬릿의 크기가 아주 작다고 가정하였다.

선형포텐셜 이론을 가정하면 속도포텐셜  $\phi$ 을 도입할 수 있다. 슬릿판 외부영역에서의 속도포텐셜과 슬릿판에서의 수평방향 속도는 입사파와 같이 주파수  $\omega$ 를 갖고 조화운동을 한다.

$$\begin{aligned} \phi(x, y, t) &= \text{Re}\left\{-\frac{ig}{\omega} A\phi(x, y)e^{-i\omega t}\right\} \\ U(y, t) &= \text{Re}\left\{-\frac{ig}{\omega} Au(y)e^{-i\omega t}\right\} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $A$ 는 입사파의 진폭이며,  $g$ 는 중력가속도이다.

슬릿판에 의하여 나누어진 유체영역을 각각 영역 1, 영역 2라 하자. 각 영역에서의 속도포텐셜은 2차원 Laplace방정식과 함께 자유표면 경계조건식(free surface condition), 바닥 경계조건식(bottom condition), 무한원방 경계조건식(radiation condition)을 만족한다. 영역 1, 2에서의 속도포텐셜은  $x=L$  위치에 벽의 존재 여부에 따라 아래 식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \phi_1(x, y) &= (e^{ikx} + Re^{-ikx})f(y) \\ \begin{cases} \phi_2(x, y) = Te^{ikx}f(y), & \text{without wall} \\ \phi_2(x, y) = T\cos k(x-L)f(y), & \text{with wall} \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $f(y) = \frac{\cosh k(y+h)}{\cosh kh}$ 이며, 파수  $k$ 는 선형분산식 ( $\omega^2/g = k \tanh kh$ )을 만족한다.  $R, T$ 는 미지수들로서 각각 반사율과 투과율을 뜻한다.

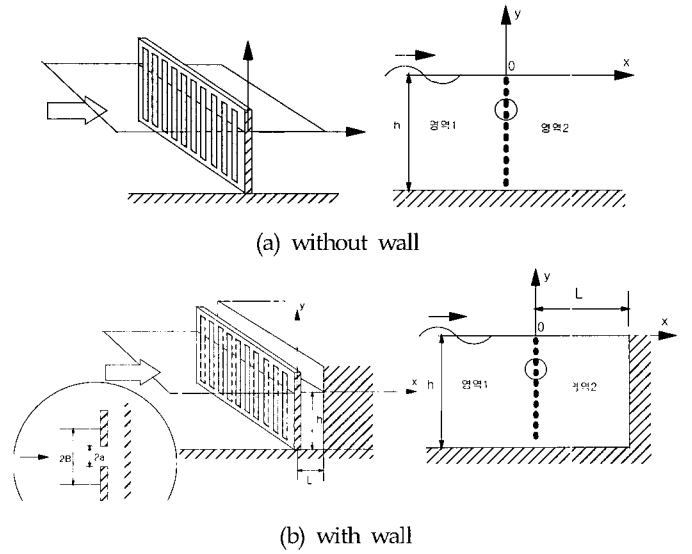


Fig. 1 Far-field sketch of slit-type wave absorber

식 (2)에 나타난 미지수인 반사율과 투과율을 구하기 위하여 두 영역이 만나는 슬릿판( $x=0$ )에서 정합조건식(matching condition)을 적용하여야 한다. 먼저  $x=0$ 에서 영역 1, 2의 수평방향 속도가 서로 같다는 연속방정식을 적용하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial x} = \frac{\partial \phi_2}{\partial x} \equiv u(y) \quad x=0, \quad -h < y < 0 \quad (3)$$

식 (2)을 식 (3)에 대입한 후 양변에  $f(y)$ 를 곱하여  $-h$ 부터 0까지 적분하면 미지수  $R, T$ 를 슬릿판에서의 속도분포 함수로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} R &= 1 + \frac{i}{kN_o} \int_{-h}^0 u(y)f(y)dy \\ \begin{cases} T = -\frac{i}{kN_o} \int_{-h}^0 u(y)f(y)dy, & \text{without wall} \\ T = \frac{1}{kN_o \sin kL} \int_{-h}^0 u(y)f(y)dy, & \text{with wall} \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $N_o = \int_{-h}^0 f(y)^2 dy$ 이다. 식 (4)을 식 (2)에 대입하여 정리하면 영역 1, 2에서의 속도포텐셜은 다음식과 같다.

$$\begin{aligned} \phi_1(x, y) &= (e^{ikx} + e^{-ikx})f(y) + \frac{ie^{-ikx}f(y)}{kN_o} \int_{-h}^0 u(y)f(y)dy \\ \begin{cases} \phi_2(x, y) = -\frac{ie^{ikx}f(y)}{kN_o} \int_{-h}^0 u(y)f(y)dy, & \text{without wall} \\ \phi_2(x, y) = \frac{\cos k(x-L)f(y)}{kN_o \sin kL} \int_{-h}^0 u(y)f(y)dy, & \text{with wall} \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

### 2.2 내부 영역의 해

식 (5)에서 미지수로 남아있는 수평방향의 속도분포를 구하기 위해서는 추가적인 정합조건식이 필요하다. 이를 얻기 위하

여 슬릿판 내부 영역에서의 유동장을 풀어야 한다. 즉, Fig. 2와 같이 흐름이 존재하는 2차원 수로문제(channel flow)에 대한 경계치 문제를 풀어 내부 영역의 해를 구한다. 슬릿이 없는 2차원 수로에서의 속도포텐셜의 일반식은  $\Phi = U(y, t)(x + C)$ 로 표현된다. 이때  $C$ 는 일정한 값을 갖는다. 그러나 슬릿의 존재로 인해 유동의 변화가 생기며 슬릿에서 멀리 떨어진 위치에서의 속도포텐셜은 아래식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \Phi_1 &\sim U(y, t)(x - C) \quad \text{as } x \rightarrow -\infty \\ \Phi_2 &\sim U(y, t)(x + C) \quad \text{as } x \rightarrow \infty \end{aligned} \quad (6)$$

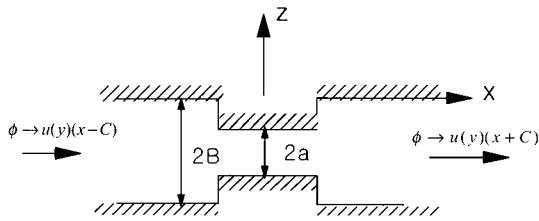


Fig. 2 Near-field sketch of slit-type wave absorber

여기서  $C$ 는 슬릿의 곡부형상과 밀접한 관련이 있는 함수로 차단계수(blockage coefficient)라 부른다. 사각형과 원형 실린더와 같은 단순한 형태의 슬릿에 대한 차단계수의 해석에는 Flagg and Newmann(1971), Kakuno and Liu(1993) 등에 의해 구해졌다. 사각형 실린더가 일정한 간격을 가지고 배열된 경우 (Fig. 2 참조), 공극율  $P (= a/B)$ 가 작을 때 차단계수는 다음과 같다(Flagg and Newmann, 1971).

$$\begin{aligned} \frac{C}{B} = & \frac{1}{2} \frac{b}{B} \left( \frac{B}{a} - 1 \right) + \frac{2}{\pi} \left[ 1 - \log \left( \frac{4a}{B} \right) + \frac{1}{3} \left( \frac{a}{B} \right)^2 \right. \\ & \left. + \frac{281}{180} \left( \frac{a}{B} \right)^4 \right] + O \left( \left( \frac{a}{B} \right)^6 \right) \end{aligned} \quad (7)$$

슬릿판 전후에서의 압력차는 Bernoulli방정식을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_2 - P_1 = \rho \left( \frac{\partial \Phi_1}{\partial t} - \frac{\partial \Phi_2}{\partial t} \right) \quad -h < y < 0 \quad (8)$$

속도포텐셜의 시간 미분값의 차이는 식 (6)을 적용하여 구할 수 있다.

$$\frac{\partial \Phi_2}{\partial t} - \frac{\partial \Phi_1}{\partial t} = 2C \frac{\partial U}{\partial t} \quad (9)$$

식 (9)는 점성의 영향을 포함하지 않은 결과이다. 내부 영역에서 점성의 영향을 포함시키면 갑작스런 형상의 변화로 격자 후면에 박리현상이 발생한다. 이러한 박리현상으로 와류가 형성되어 에너지의 일부분은 소멸된다. 식 (9)에 박리에 의한 에너지 손실을 포함시키면 다음과 같다(Mei, 1974).

$$\frac{\partial \Phi_2}{\partial t} - \frac{\partial \Phi_1}{\partial t} = 2C \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{F}{2} |U|^2 \quad (10)$$

여기서  $F$ 는 에너지 손실 계수(energy loss coefficient)로 유체의 점성, 슬릿의 곡부형상, 거칠기(roughness), 공극율 등의 함수이다. Mei(1974) 등이 제시한 에너지 손실 계수의 경험식은 다음과 같다.

$$F = \left( \frac{B}{ca} - 1 \right)^2 = \left( \frac{1}{cP} - 1 \right)^2 \quad (11)$$

여기서  $c$ 는 배출계수(discharge coefficient)로 일반적으로  $c = 0.6 + 0.4P^2$  을 사용한다.

### 2.3 적분방정식

식 (1)과 (5)를 정합조건식인 식 (10)에 대입하여 정리하면 아래와 같은 비선형 적분방정식을 유도할 수 있다. 이때 비선형항에 등가선형화를 적용하였다.

$$\begin{aligned} \int_{-h}^0 Q(y, y_0) u(y_0) dy_0 + i\alpha |u(y)| u(y) \\ + 2Cu(y) + 2f(y) = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

여기서

$$\begin{cases} Q(y, y_0) = \frac{2i}{kN_0} f(y)f(y_0) & \text{without wall} \\ Q(y, y_0) = \frac{(i - \cot kL)}{kN_0} f(y)f(y_0) & \text{with wall} \end{cases}$$

이며,  $\alpha = \frac{4AFg}{3\pi\omega^2}$  이다.

식 (12)에 주어진 비선형 적분방정식을 수치적으로 풀기 위하여 슬릿판을  $N$ 개의 선분으로 분할하고, 각 선분에서 수평방향 속도가 일정하다고 가정하면, 식 (12)는 아래식과 같이 대수방정식으로 바뀐다.

$$\begin{aligned} X_i(u_i) = \sum_{j=1}^N Q_{ij} u_j + i\alpha |u_i| u_i + 2Cu_i + 2f_i = 0 \\ (i = 1, 2, \dots, N) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서  $Q_{ij} = \int_{\Gamma_j} Q(y_i, y_j) d\Gamma_j$ 이며,  $\Gamma_j$ 는 분할 요소의 길이를 뜻한다. 위식을 행렬식으로 바꿔 정리하면 다음과 같다.

$$[X] = [H] \underline{u} + i\alpha \underline{u}^T |[L] \underline{u} + 2C \underline{u} + 2f = 0 \quad (14)$$

여기서  $\underline{u} = u(y_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ )이며,  $[L]$ 는  $N \times N$  단위 행렬이다. 위에 주어진 대수방정식은 비선형 방정식이므로 해석적으로 풀기가 불가능하다. 본 연구에서는 이러한 비선형 방정식을 푸는 대표적인 수치해법인 Newton-Raphson의 축차법을 사용하였다. 슬릿판에서의 속도분포가 구해지면 식 (5)을 사용하여 슬릿판 전후의 파형을 구할 수 있다.

슬릿판 전후의 압력차를 슬릿판에 따라 적분하면, 슬릿판에 작용하는 파력을 다음식과 같이 구할 수 있다.

$$F_x = -\rho g A \int_{-h}^0 [\phi^{(2)}(0, y) - \phi^{(1)}(0, y)] dy \quad (15)$$

$$= \begin{cases} -\rho g A (T - R - 1) \int_{-h}^0 f(y) dy, & \text{without wall} \\ -\rho g A (T \cos kL - R - 1) \int_{-h}^0 f(y) dy, & \text{with wall} \end{cases}$$

### 3. 모형 시험

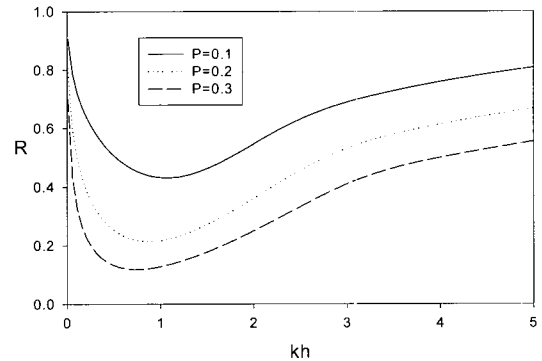
계산결과와 타당성을 검증하기 위하여 길이 20m, 깊이 1m, 폭 0.6m인 2차원 수조에서 모형실험을 수행하였다. 수조 전면 에 설치된 조파기는 피스톤(Piston) 타입이며, 수조 후면에 스텐레스 칩을 채운 비치형태의 소파제를 설치하여 반사파를 제거하였다. 모형실험에 사용한 슬릿판의 재질은 아크릴이며, 슬릿판의 공극율은 0.286이다. 후면에 벽이 있는 경우와 없는 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 모형실험에서 사용된 규칙파의 총 개수는 8개이며, 진동수는 0.5Hz부터 1.2Hz까지 0.1Hz 간격으로 선택되었다. 모형 전면에 3개의 파고계를 설치하여 계측된 신호로부터 입사파와 반사파를 분리하였다. 입사파와 반사파를 분리하는 기법은 계측된 파형과 가정된 파형 사이의 오차의 제곱의 합을 최소화하여 미지수를 구하는 최소자승법 (least square method)을 사용하였다(Mansard and Funke, 1980). 슬릿판 전면에 설치된 파고계의 위치는 조파기로부터 각각 6.82, 7.11, 7.38m이다. 슬릿판 후면에 벽이 없는 경우, 투과된 파를 계측하기 위하여 조파기로부터 15.61m 떨어진 위치에 한 개의 파고계를 설치하였으며, 후면에 벽이 있는 경우는 벽면에서 파형을 측정하였다. 이때 슬릿판과 벽과의 거리는 0.4m로 고정시켰다. 수심은 0.6m이며, 슬릿사이의 거리(2B)는 7cm이며, 뚫린 폭(2a)은 2cm, 판의 두께(b)는 1.9cm이다. 선형파를 유지하기 위하여 후면에 벽이 없는 경우의 실험에서는 진동수 0.8Hz를 기준으로 장파일 때는 파 기울기( $H/\lambda$ )가 0.02가 되도록, 단파일 때는 파 기울기가 0.04가 되도록 입사파의 파고를 정하였다. 또한 후면에 벽이 있는 경우의 실험에서는 진동수 0.8Hz를 기준으로 장파일 때는 파 기울기( $H/\lambda$ )가 0.01이 되도록, 단파일 때는 파 기울기가 0.02가 되도록 입사파의 파고를 정하였다. 이론계산 결과와 실험결과를 비교하여 두 결과가 서로 잘 일치되도록 배출계수(c)를 결정하였는데, 배출계수가 0.75일 때 비교적 두 결과는 서로 잘 일치하였다.

### 4. 계산결과 및 고찰

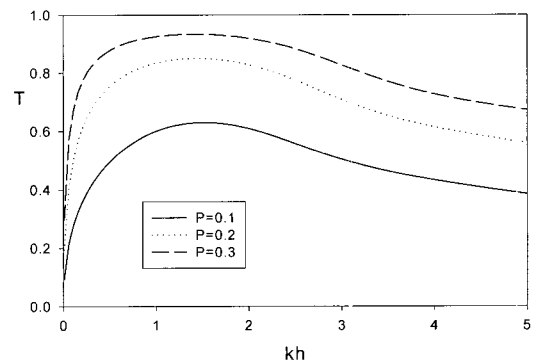
Fig. 3a,b는 후면에 벽이 없을 때 3가지 공극율에 대하여 투과율과 반사율을 계산하였다. 여기서  $x$ 축은 수심과 파장의 비인  $kh$ 로 잡았다. 수심과 슬릿사이의 거리의 비( $h/B$ )는 10.0이며, 파의 기울기( $H/\lambda$ )는 0.01이다. 슬릿판의 두께와 수심의 비( $b/h$ )는 0.05이다. 여기서 배출계수  $c$ 는 0.75로 고정시켰다. 예상했던 바와 같이 공극율이 작을수록 투과율은 감소되고 반사율이 커지는 것을 알 수 있다. 아주 장파일 때 반사율은 1.0으로, 투과율은 0으로 수렴하는 것을 알 수 있다. 즉, 슬릿판에

의한 전반사(total reflection)가 일어나는 것을 의미한다. 공극율이 0.1일 때 투과율은 전주파수에 걸쳐서 0.6보다 작은 값을 준다. 즉, 1개의 슬릿판만 설치하여도 방파제로서의 역할을 충분히 하는 것을 알 수 있다. Fig. 3c는 슬릿판에서의 에너지 손실율( $EL = 1 - R^2 - T^2$ )을 계산하였다. 에너지 손실율이 1이면 입사파의 모든 에너지가 슬릿판에서 소멸되었다는 것을 의미하며, 손실율이 0이면 에너지 손실이 없다는 것을 의미한다. 3개의 공극율을 비교한 결과 공극율이 작은 경우가 저주파수와 고주파수의 일부 영역을 제외하곤 에너지 손실이 가장 큰 것을 알 수 있다. 공극율이 0.1일 때 에너지 손실이 가장 큰 주파수 영역은  $kh = 0.5$  근처이다. 또한 공극율이 커질수록 가장 큰 에너지 손실을 나타내는 주파수가 저주파수 영역으로 이동하는 것을 볼 수 있다.

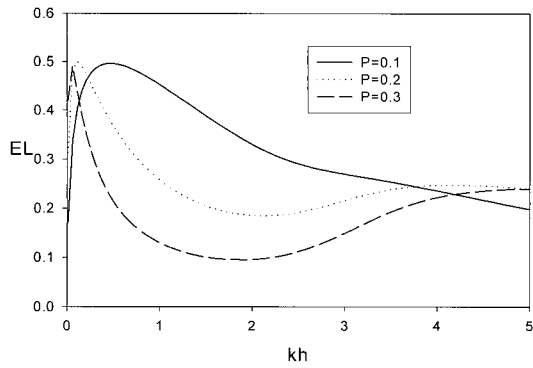
슬릿판 대신에 막혀있는 수직판을 설치하였을 때, 완전반사로 평판 앞에 정지파(standing waves)가 형성된다. 이러한 경우 단위 폭 당 판에 작용하는 파력은  $F_o = 2\rho g A \frac{\tanh kh}{k}$ 이다. 슬릿판에 작용하는 단위 폭 당 수평방향 파력의 절대값을  $F_s$ 로 무차원시킨 값을 입사파의 주파수에 따라 나타낸 것이 Fig. 3d이다. 입사파가 장파일 때 슬릿판에 의하여 대부분 에너지는 반사된다. 따라서  $|F_s|/F_o$ 는 1.0에 수렴한다. Fig. 3d는 이러한 현상을 잘 보여주고 있다. 또한 주파수가 커질수록 슬릿판에 작용하는 파력이 막혀있는 수직판에 작용하는 파력에 비하여 작아지는 것을 알 수 있다. 3가지 공극율에 대하여 비교하면 예상대로 공극율이 클수록 파력은 상대적으로 작아



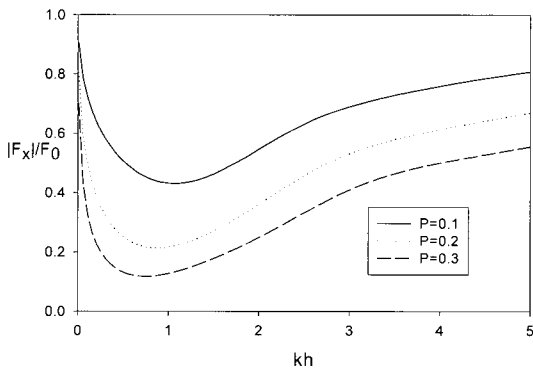
(a) reflection coefficient



(b) transmission coefficient



(c) energy loss coefficient



(d) horizontal wave force

Fig. 3 Reflection, transmission, energy loss coefficients and horizontal force of vertical slit-type wave absorber without rear wall as function of non-dimensional wavelength and porosity for  $h/B=10$ ,  $H/\lambda=0.01$ ,  $b/h=0.05$

지는 것을 알 수 있다. Fig. 3d의 수평방향 파력 곡선은 Fig. 3a의 반사율 곡선과 같은 경향을 보여주고 있으며 반사율이 최소가 되는 주파수와 파력이 최소가 되는 주파수는 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 이러한 사실로 슬릿판에 작용하는 파력은 슬릿판에 의한 반사율과 밀접한 관계가 있음을 유추할 수 있다.

Fig. 4는 공극율은 0.2로 고정시키고 수심과 슬릿간격의 비 ( $h/B=5, 10, 15$ )를 바꿔가면서 투과율과 반사율을 계산하였다. 다시 말하여 공극율은 고정시키고 슬릿의 형상을 바꿔가면서 주파수에 따른 투과율과 반사율의 변화를 살펴보았다. 여기서 파 기울기와 두께와 수심의 비( $b/h$ )는 Fig. 3과 동일하다.  $kh$ 가 0.5보다 작을 때 슬릿판의 국부형상 변화는 투과율과 반사율에 거의 영향을 주지 않는 것을 알 수 있다. 그러나 입사 파의 파장이 짧아질수록 슬릿 형상의 영향이 점점 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5는 후면에 벽이 설치되었을 때 반사율을 슬릿판과 벽면사이의 거리를 파장으로 나눈 값( $L/\lambda$ )에 대하여 나타내었다. 계산은 3가지 공극율( $P=0.1, 0.2, 0.3$ )에 대하여 수행되

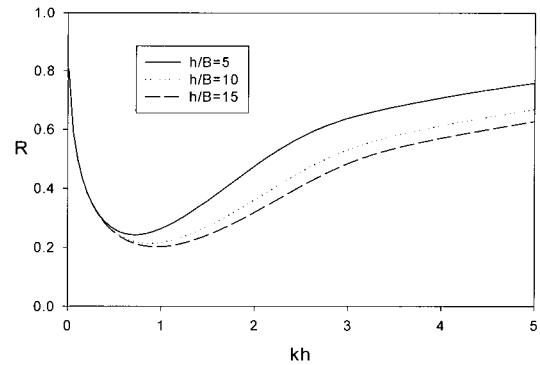


Fig. 4 Reflection coefficient of vertical slit-type wave absorber without rear wall as function of non-dimensional wavelength and porosity for  $P=0.2$ ,  $H/\lambda=0.01$ ,  $b/h=0.05$

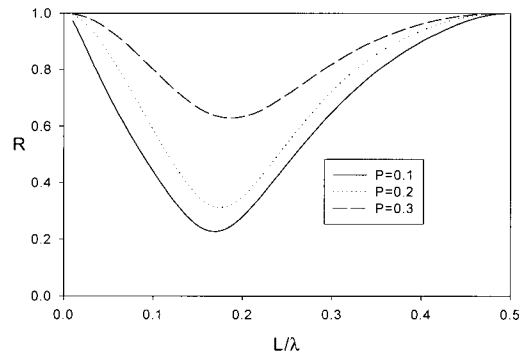


Fig. 5 Reflection coefficient of vertical slit-type wave absorber with rear wall as function of non-dimensional wavelength and porosity for  $B/L=0.1$ ,  $h/B=10$ ,  $H/\lambda=0.01$

었고, 슬릿간격과 슬릿판과 벽면사이의 거리의 비( $B/L$ )는 0.1이며, 나머지 무차원된 값들은 Fig. 3과 동일하다. 계산결과는  $L/\lambda=0.18$ 에서 반사율이 가장 작은 것을 알 수 있다. 이러한  $L/\lambda$ 의 특정수치는 슬릿판과 벽면사이에서 발생하는 공진현상과 밀접한 관련이 있다. Fig. 6은 공극율을 0.2로 고정시키고 국부형상에 밀접한 관계가 있는 계수인  $B/L$ 을 변화시키면서 반사율을 계산하였다.  $B/L$ 이 가장 작은 경우가 전 주파수에 걸쳐서 반사율이 상대적으로 작음을 볼 수 있다. Fig. 5와 유사하게 공진 주파수에서 반사율이 최소값을 갖는 것을 볼 수 있으며,  $B/L$ 이 커질수록 최소 반사계수를 주는 공진 주파수가 저주파수 영역으로 이동한다. Fig. 7은 파의 기울기를 변화시키면서 반사율을 살펴보았다. 파 기울기가 크다는 것은 비선형 효과가 크게 작용한다는 것을 의미한다. 이러한 비선형 효과는 박리현상을 나타내는 점성항에서 발생한다. 다시 말하여 파 기울기가 클수록 박리현상이 더 크게 일어나 에너지 손실로 반사에너지가 감소된다. Fig. 7은 이러한 경향을 뚜렷이 보여주고 있다.

Fig. 8은 후면에 벽이 없을 때 이론계산 결과와 실험결과를 비교하였다. 여기서  $x$ 축은 파의 진동수를 뜻하며, 사각형 기호

는 투과율을, 원형 기호는 반사율을 각각 나타낸다. 대상 슬릿판의 공극율은 0.286이고,  $h/B$ 는 17.14,  $b/h$ 는 0.0317이다. 이론계산 결과는 실험결과를 정성적으로 잘 따라가고 있음을 알 수 있다. 반사율에 비하여 투과율이 정량적인 값 차이가 상대적으로 크게 보이는데 이는 수조 후면에서 발생하는 반사파의 영향이라고 사료된다.

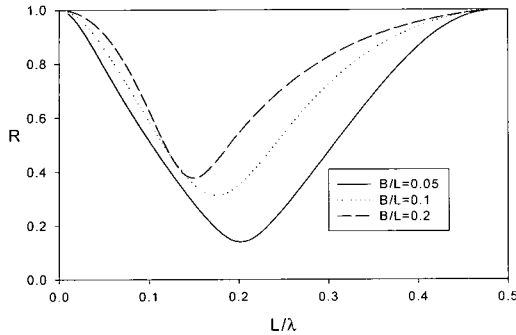


Fig. 6 Reflection coefficient of vertical slit-type wave absorber with rear wall as function of non-dimensional wavelength and wall separation  $P=0.2$ ,  $h/B=10$ ,  $H/\lambda=0.01$

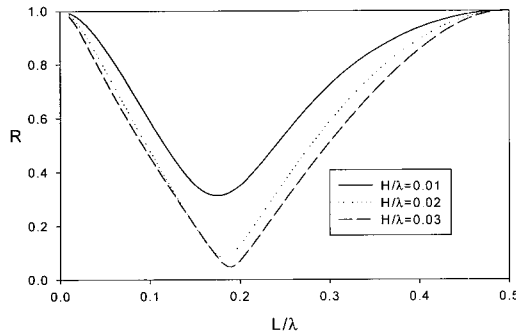


Fig. 7 Reflection coefficient of vertical slit-type wave absorber with rear wall as function of non-dimensional wavelength and wave steepness  $P=0.2$ ,  $B/L=0.1$ ,  $h/B=10$

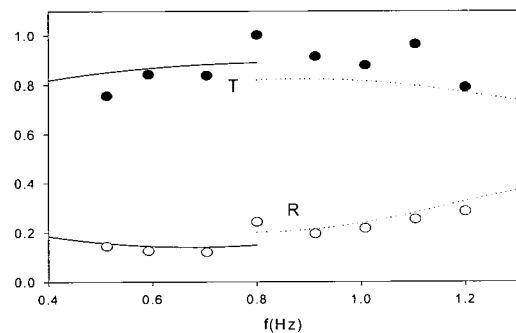


Fig. 8 Comparison of theoretical and experimental results for vertical slit-type wave absorber without rear wall  
 $P=0.286$ ,  $h/B=17.14$ ,  $t/h=0.0317$   
theory: solid line ( $H/\lambda=0.02$ ), dotted line ( $H/\lambda=0.04$ )  
experiment: ○ reflection coefficient, ● transmission coefficient

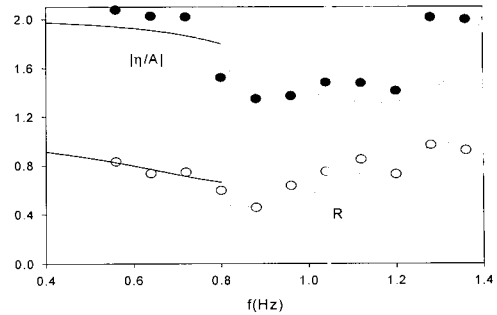


Fig. 9 Comparison of theoretical and experimental results for vertical slit-type wave absorber with rear wall  
( $P=0.286$ ,  $B/L=0.088$ ,  $h/B=17.14$ ,  $t/h=0.0317$ )  
theory : solid line ( $H/\lambda=0.01$ ), dotted line ( $H/\lambda=0.02$ )  
experiment : ○ reflection coefficient, ●  $|\eta|/A$  at wall

Fig. 9는 후면에 벽이 있을 때 반사율과 벽면에서 파형의 절대값을 입사파의 진폭으로 무차원화 시킨 값을 보여주고 있다 ( $|\eta|/A$ ).  $B/L$ 은 0.0875이며 나머지 무차원 값들은 Fig. 8과 같다. 이론계산 결과와 실험결과는 전 주파수 범위에 걸쳐 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 모형실험으로부터 이론계산 결과의 타당성을 어느 정도 입증할 수 있었다.

## 5. 결 론

이상의 이론계산과 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- 1) 후면에 벽이 없는 경우 공극율이 작을수록 투과율은 감소되고, 반사율이 커짐을 알 수 있었다. 공극율이 같을 때 곡부형상 변화의 영향은 저주파수 영역에서는 크게 나타나지 않았으나 고주파수 영역에서는 크게 나타났다. 공극율이 작을수록 에너지 손실율은 상대적으로 커지며, 특정 주파수 범위에서 가장 큰 손실율을 보이고 있었다. 슬릿판에 작용하는 파력은 슬릿판에 의한 반사율과 밀접한 관계가 있음을 확인하였다.
- 2) 후면에 벽이 있는 경우 공극율이 작을수록 반사율이 작아지는 경향이 나타나며, 이는 벽이 없는 경우와 정반대 현상이다. 이러한 현상은 공극율이 작으면 슬릿을 통과하여 벽에서 반사된 파가 슬릿을 쉽게 통과하지 못하기 때문이다.
- 3) 파 기울기가 클수록 박리에 의한 에너지 손실이 커져 반사율이 감소된다.
- 4) 이론계산 결과와 실험결과는 서로 잘 일치하고 있음을 보여주고 있으며, 이로부터 해석방법의 타당성을 검증할 수 있었다. 그러나 다소간의 정량적인 값 차이는 슬릿판과 벽면에서 반사된 파의 위상차로 슬릿판 전면에서 설치한 3개의 파고계로부터 나오는 신호를 가지고 정확히 입사파와 반사파를 분리하지 못했기 때문이라 사료된다.
- 5) 슬릿 소파제는 통과된 파 에너지를 줄이면서 해수의 교환을 허용하므로 항만내 수질개선에 큰 효과가 있을 것으로 생각되며, 반사파 에너지를 크게 줄일 수 있어 소파제 주위에서 운항하는 선박의 안정성 측면을 고려할 때 큰 장점을 가지고 있다.

또한 슬릿판을 여러 개 배열하면 투과율과 반사율을 더욱 줄일 수 있으므로 차세대 방파제로 활용가치가 높다고 판단된다.

## 후 기

본 연구는 2001년에 한국건설기술연구원이 지원하여 수행한 "친수성 항만공간 확보를 위한 해수교환형 방파제 설계기술 개발" 사업의 결과 중 일부를 발췌하여 수록한 것임을 밝히며 연구비의 지원에 심심한 감사를 표합니다.

## 참 고 문 헌

- Bennett, G.S., McIver, P. and Smallman, J.V. (1992). "A mathematical model of a slotted wavescreeen breakwater", *Coastal Eng.*, Vol 18, pp 231-249.
- Flagg, C.N. and Newman, J.N. (1971). "Sway added-mass coefficients for rectangular profiles in shallow water", *J. Ship Research*, Vol 15, pp 257-265.
- Kakuno, S. and Liu, Philip L-F. (1993). "Scattering of water waves by vertical cylinders", *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng.* ASCE, Vol 119, pp 302-322.
- Kakuno, S. and Oda, K. (1986). "Boundary-value analysis on the interaction of cylinder arrays of arbitrary cross-section with train of uniform waves", *J. Japanese Soc. Civ. Eng.*, Tokyo, Japan, Vol 369, pp 213-222.
- Madsen, P.A. (1983). "Wave reflection from a vertical permeable wave absorber", *Coastal Eng.*, Vol 7, pp 381-396.
- Mansard, E.P.D. and Funke, E.R. (1980). "The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method", *Proc. 17th Coastal Engrg. Conf.*, pp 154-172.
- Mei, C.C., Liu, Philip L-F., Ippen, A.T. (1974). "Quadratic loss and scattering of long waves", *J. Waterways, Harbors and Coastal Eng.*, Vol 100, pp 217-239.
- Mei, C.C. (1985). *The applied dynamics of ocean surface waves*, John Wiley and Sons.

---

2002년 3월 11일 원고 접수

2002년 5월 4일 최종 수정본 채택