

## 원형 파일 방파제에 의한 반사율과 투과율 Reflection and Transmission Coefficients by a Circular Pile Breakwater

조일형\* · 고희준\*

Il-Young Cho\* and Hyeokjun Koh\*

**요 지 :** Bennet 등(1992)이 제안한 수학적 모델을 사용하여 원형 파일 방파제에 의한 반사율과 투과율을 살펴 보았다. 파가 파일 방파제를 통과하면서 갑작스런 단면형상의 변화로 박리현상이 발생하며 이로 인하여 파 에너지의 일부분이 소멸된다. 따라서 수학적 모델의 신뢰성을 높이기 위해서는 에너지 손실계수를 정확히 산정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 FLUENT 상용코드를 사용하여 2차원 난류유동을 해석하고 파일 방파제 전후의 압력차로부터 에너지 손실계수를 구하였다. 에너지 손실계수는 공극률의 함수이며, 둘 사이의 관계식을 제안하였다. 손실계수 산정식의 타당성을 검증하기 위하여 수리모형실험결과와 비교하였다. 4가지 공극률에 대하여 반사율과 투과율을 비교한 결과 해석결과와 모형실험결과는 잘 일치하고 있음을 확인하였다.

**핵심용어 :** 에너지 손실계수, 파일 방파제, 반사율, 박리, 투과율, 난류유동.

**Abstract :** Using the mathematical model suggested by Bennet et al.(1992), the reflection and transmission coefficients by a circular pile breakwater has been investigated in the framework of potential theory. Flow separation due to sudden contraction and expansion is generated and is the main cause of significant energy loss. Therefore, evaluation of exact energy loss coefficient is critical to enhance the reliability of mathematical model. To obtain the energy loss coefficient, 2-dimensional turbulent flow is analyzed using the FLUENT commercial code. The energy loss coefficient can be obtained from the pressure difference between upstream and downstream. Energy loss coefficient is the function of porosity and the relation equation between them is suggested throughout the curve fitting processing. To validated the suggested relation, comparison between the analytical results and the experimental results is made for four different porosities with good agreement.

**Keywords :** energy loss coefficient, pile breakwater, reflection coefficient, separation, transmission coefficient, turbulent flow.

### 1. 서 론

파일 방파제(pile breakwater)의 기본 구조는 원기둥을 일정한 간격을 가지고 수직으로 배열하여 만든 형태이다. 이런 형태의 방파제는 환경 친화적인 항만 개발에 필요한 많은 장점들을 지니고 있다. 즉, 항만활동에 지장을 주지 않는 범위 내에서 파의 일부와 흐름을 허용하므로 항내 수질개선에 기여한다. 또한 중량이 가볍기 때문에 연약지반에서도 설치가 가능하며, 방파제로부터 반사되는 파의 에너지를 줄여 방파제 주변에서 운항하는 선박의 안

정성에 도움을 준다. 먼 외해에서 만들어진 파가 항내로 진입하면서 파일 방파제를 만나면 갑작스런 단면형상의 변화로 뚫린 부분을 통해 강한 제트흐름이 형성된다. 이로 인하여 점성에 의한 박리(separation)현상이 발생하여 파 에너지의 일부분이 소멸된다.

Jarlan(1961)이 음파 에너지를 소멸시키기 위해 무향실의 벽에 설치한 유공판의 소파 개념을 방파제에 적용한 이후 투과성 방파제에 대한 많은 이론연구와 실험연구가 수행되었다. Mei *et al.*(1974)은 유공벽 전후의 압력차이를 물입자의 속도의 제곱에 비례하는 점성항(viscous

\*제주대학교 해양산업공학부(Department of Marine Industrial Engineering, Cheju National University, Ara 1, Jeju 690-756, Korea, cho0904@cheju.ac.kr)

term)과 물입자의 가속도에 비례하는 관성항(inertial term)의 합으로 표현하였고, 각 항에 포함된 계수들을 구하는 방법을 제시하였다. Bennett *et al.*(1992)은 슬릿판의 외부영역에서는 선형포텐셜 이론을 적용하였고, 슬릿판 내부영역에서는 Mei *et al.*(1974)이 제시한 식을 사용하였다. 슬릿판 외부영역의 해와 내부영역의 해를 정합(matching)시켜 비선형 적분방정식을 유도하고 Newton Raphson의 축차법(iteration method)을 사용하여 슬릿판에 의한 반사율을 계산하였다. Fugazza and Natale(1992)와 Kim(1998)은 에너지 손실을 나타내는 점성항을 물입자의 가속도에 선형적으로 비례한다고 가정하여 선형 손실계수를 Lorenz 변환을 통하여 구하였다. Kakuno and Liu(1993)와 Kakuno and Nakata(1998)은 정합점근전개법(matched asymptotic expansion method)을 사용하여 슬릿 방파제에 의한 반사율과 투과율을 구하고 모형실험결과와 비교하였다. Kakuno *et al.*(1993,1998)은 해석결과와 모형실험결과가 잘 맞도록 에너지 손실계수를 사각형 단면일 때는  $\alpha=1.5$ 로 원형 단면일 때는  $\alpha=0.75$ 로 제안하였다. Kakuno and Oda(1986)는 원기둥을 배열하여 만든 유공벽의 차단계수(blockage coefficient)를 비정상 포텐셜이론에 근거하여 급수형태로 표현하였다. 조일형(2002)은 후면에 벽이 있는 경우와 없는 경우에 대하여 슬릿판에 의한 반사율과 투과율을 Bennett *et al.*(1992)이 제안한 비선형 적분방정식을 풀어 구하였다. 조일형(2003)은 벽 앞에 일정깊이 잠긴 사각기둥이 배열된 유공벽에 의한 반사율을 고유함수전개법(eigenfunction expansion method)을 사용하여 해석하였으며, Zhu and Chawang(2001)의 모형실험 결과와 비교하였다. Suh *et al.*(2006)는 상부는 커튼월 방파제 하부는 파일 방파제로 구성된 커튼월-파일 방파제를 제안하였다. 윤 등(2006)은 난류유동수치모형인 FLUENT를 이용하여 두께를 고려한 사각형 단면에 대한 에너지 손실계수 산정식을 구하였다. 손실계수에 대한 공식을 이용하여 반사율을 구하고 모형 실험결과와 비교하였다.

본 연구에서는 원기둥을 배열하여 만든 파일 방파제에 의한 반사율과 투과율의 특성을 Bennett *et al.*(1992)이 제안한 수학적 모델을 이용하여 살펴보았다. 파일 방파제 전후의 압력 차이를 관성항과 점성항의 합으로 표현하고, Kakuno and Oda(1986)의 해석해를 이용하여 관성항 계수인 차단계수를 구하였다. 또한 점성항 계수인 에너지 손실계수를 정확히 구하기 위하여 FLUENT 상용코드에서 난류유동을 계산할 수 있는 Spalart-Allmars모형을 사용하였다(윤 등, 2006). 파일 방파제의 2차원 단면에 흐름

을 주고 박리현상에 의해 유기된 파일 방파제 전후에서의 압력차를 수치적으로 구하여 이로부터 손실계수를 산정하였다. 에너지 손실계수는 공극률의 함수이며 둘 사이의 관계식은 난류유동 해석결과를 곡선맞춤(curve fitting)하여 구하였다. 손실계수 산정식의 타당성을 검증하기 위하여 Kakuno and Liu(1993)의 모형실험 결과와 비교하였다. 해석결과는 수리모형 실험결과를 잘 따라 가고 있음을 확인하였다.

## 2. 문제의 정식화

Fig. 1과 같이 수심( $h$ )이 일정한 유체영역 내에 원기둥을 배열하여 만든 파일 방파제가 놓여 있다고 생각하자. 입사파는  $x$ 축의 양의 방향으로 주파수  $\omega$ 를 갖고 진행한다. 포텐셜이론에 따라 속도포텐셜( $\phi$ )을 도입하고, 유동은 주파수  $\omega$ 를 갖고 조화운동을 한다고 가정하면 속도포텐셜과 유공벽에서의 수평방향 속도는 아래와 같이 쓸 수 있다.

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

여기서  $A$ 는 입사파의 진폭이며  $g$ 는 중력가속도이다.

파일 방파제에 의하여 나누어진 유체영역을 각각 영역 1, 영역 2라 하자. 파일이 수면에서 바닥까지 설치되어 있으므로 비진행파(non-propagating wave)를 무시하면 각 영역에서의 속도포텐셜은 아래 식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \phi_1(x, y) &= (e^{ikx} + R_y e^{-ikx}) f(y) \\ \phi_2(x, y) &= T_y e^{ikx} f(y) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $f(y) = \frac{\cosh k(y+h)}{\cosh kh}$ 이며, 파수  $k$ 는 선형분산식

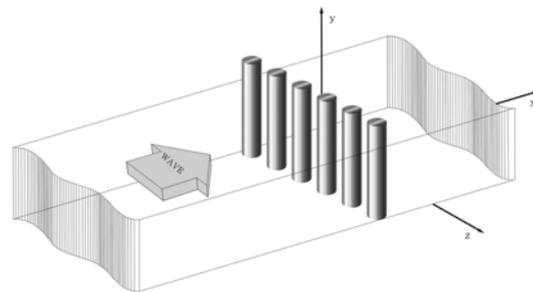


Fig. 1. Definition sketch of a circular pile breakwater.

$(\omega^2/g = k \tanh kh)$  을 만족한다.  $R_f, T_r$  는 미지수들로서 각각 반사율과 투과율을 뜻한다.

두 영역이 만나는 유공벽( $x=0$ )에서 정합조건식 ( $\partial\phi_1/\partial x = \partial\phi_2/\partial x = u(y)$ ) 을 적용하고 양변에  $f(y)$  을 곱한 뒤  $-h$  부터 0까지 적분하면 미지수  $R_f, T_r$  을 유공벽에서의 속도함수로 표현할 수 있다.

$$R_f = 1 + \frac{i}{kN_o} \int_{-h}^0 u(y)f(y)dy \quad (3)$$

$$T_r = -\frac{i}{kN_o} \int_{-h}^0 u(y)f(y)dy$$

여기서  $N_o = \int_{-h}^0 f(y)^2 dy$  이다. 식 (3)을 식 (2)에 대입하여 영역 1,2에서의 속도포텐셜을 다시 쓰면 다음식과 같다.

$$\begin{aligned} \phi_1(x,y) &= (e^{ikx} + e^{-ikx})f(y) + \frac{ie^{-ikx}f(y)}{kN_o} \int_{-h}^0 u(y)f(y)dy \\ \phi_2(x,y) &= \frac{ie^{ikx}f(y)}{kN_o} \int_{-h}^0 u(y)f(y)dy \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에서 미지수인  $u(y)$  을 구하기 위해서는 추가적인 정합조건식이 필요하다. 유공벽이 놓인 경계면에서의 정합조건식은 아래와 같이 표현된다(Mei, 1974).

$$\frac{\partial\phi_2}{\partial x} - \frac{\partial\phi_1}{\partial x} = 2C \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\alpha}{2} |U|U \quad (5)$$

위에 주어진 방정식은 비선형 방정식이다. 따라서 하나의 입력주파수( $\omega$ )에 대하여 많은 응답 주파수들이 발생한다. 만약 응답주파수와 입력주파수가 같다고 가정하면 등가선형화(equivalent linearization)기법을 도입할 수 있다(Mei, 2005).

$$\phi_2(0,y) - \phi_1(0,y) = 2Cu(y) + i\beta|u(y)|u(y) \quad (6)$$

여기서  $\beta = \frac{4A\alpha g}{3\pi\omega^2}$  이다. 식 (6)의 오른쪽의 첫 번째 항은 물입자의 가속도에 비례하는 관성항을 나타낸다. 본 연구에서는 Kakuno and Oda(1986)의 해석해를 이용하여 차단계수( $C$ )를 구하였다. 식 (6)의 오른쪽의 두 번째 항은 박리에 의한 에너지 손실을 나타내는 점성항이다.  $\alpha$ 는 에너지 손실계수로 3절에서 자세히 다루도록 하겠다.

식 (4)을 정합조건식인 식 (6)에 대입하여 정리하면 아래와 같은 비선형 적분방정식을 유도할 수 있다.

$$\int_{-h}^0 Q(y,y_o)u(y_o)dy_o + i\beta|u(y)|u(y) + 2Cu(y) + 2f(y) = 0 \quad (7)$$

여기서  $Q(y,y_o) = \frac{2i}{kN_o} f(y)f(y_o)$  이다. 식 (7)에 주어진 비선형 적분방정식을 수치적으로 풀기 위하여 유공벽을  $y$  방향으로  $N$ 개의 선분으로 분할하고, 각 선분에서 수평방향 속도가 일정하다고 가정하면 식 (7)은 아래식과 같이 대수방정식으로 바뀐다.

$$X_i(u_i) = \sum_{j=1}^N Q_{ij}u_j + i\beta|u_i|u_i + 2Cu_i + 2f_i = 0 \quad (8)$$

$$(i = 1, 2, \dots, N)$$

여기서  $Q_{ij} = \int_{\Gamma_j} Q(y_i, y_j) d\Gamma_j$  이며,  $\Gamma_j$  는 분할 요소의 길이 를 뜻한다. 윗식을 행렬식으로 바꿔 정리하면

$$\underline{X} = [H]\underline{u} + i\beta|\underline{u}|[\underline{I}]\underline{u} + 2C\underline{u} + 2\underline{f} = \underline{0} \quad (9)$$

이다. 여기서  $\underline{u} = u(y_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) 이며,  $[H]$ 는  $N \times N$  단 위 행렬이다. 본 연구에서는 비선형 대수방정식을 푸는 대표적인 수치해법인 Newton Raphson의 축차법(iteration method)을 사용하였다. 이 수치해법을 사용하면 미지수 ( $\underline{u}$ )는 다음식으로 표현된다.

$$\underline{u}_{k+1} = \underline{u}_k - \underline{X}_k \times \left[ \frac{\partial \underline{X}_k}{\partial \underline{u}_k} \right]^{-1} \quad (10)$$

여기서  $k$ 는 축차수(iteration number)를 나타낸다. 식 (10)에서 속도분포에 대한 초기치( $u_1$ )를 주고 허용오차 범위내의 값을 가질 때까지 위의 계산을 반복한다.

유공벽에서의 속도분포가 구해지면 식 (3)을 사용하여 반사율과 투과율을 얻을 수 있다. 또한 유공벽에 작용하는 단위 폭 당 수평방향의 파력은 유공판 전후의 압력의 차를 적분하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} F &= -\rho g A \int_{-h}^0 [\phi_2(0,y) - \phi_1(0,y)] dy \\ &= \rho g A (1 + R_f - T_r) \frac{\tanh kh}{k} \end{aligned} \quad (11)$$

### 3. 손실계수 산정 난류모델

파가 원형 파일 방과제를 통과하면서 갑작스런 단면현상의 변화로 박리현상이 발생하여 에너지가 손실된다. 이러한 박리현상은 유공판의 공극률 그리고 국부형상과 밀접한 관계가 있다. 본 연구에서는 박리에 의한 에너지 손

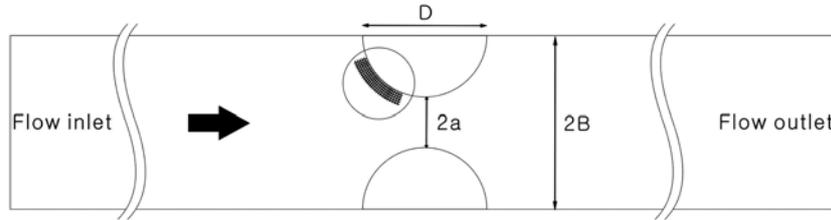


Fig. 2. Computational domain for turbulent flow analysis (FLUENT).

실을 수치적으로 구하기 위하여 FLUENT 상용코드에서 난류유동을 계산할 수 있는 Spalart-Allmars모형을 사용하였다. 계산영역은 FLUENT에서 제공하는 격자생성프로그램인 Gambit을 사용하여 구성하였으며 계산모델은 Fig. 2와 같다. 원기둥 주변에서는 격자를 촘촘히 배열하여 총 격자수는 36,162개로 잡았다. 7개의 공극률(0.03,0.05,0.08,0.13,0.23,0.33,0.43)과  $3.0 \times 10^3 \sim 1.0 \times 10^5$  범위내의 7가지 Reynolds 수를 택하여 수치계산을 수행하였다.

난류유동 해석결과로부터 에너지손실계수  $\alpha$ 를 구하는 식은 다음과 같다(Mei, 2005).

$$\alpha = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (12)$$

여기서  $\Delta p$ 는 유공벽의 상류 정수압과 하류 정수압의 차를 나타내며,  $V$ 는 상류유입부에서의 단면평균유속을 의미한다. Fig. 3은 공극률이 0.13,  $Re = 1.5 \times 10^4$ 에서의 정수압 분포를 나타내고 있다. 그림에서의 압력차이가 박리에 의한 에너지손실이다. 압력이 급격히 떨어지는  $x = 5m$ 가 입구가 가장 좁은 지점으로 유속은 가장 빠르다. Fig. 4는 같은 조건에서 계산된 유공벽 주변의 유선(streamline)을 보여주고 있다. 원기둥을 지나 벽쪽으로 커다란 와류가 대칭으로 형성되어 있음을 볼 수 있다. Fig. 5는 공극률 변화에 따른 난류유동 해석에 의한 에너지 손실계수의 변화를 보여주고 있다. 그림에서

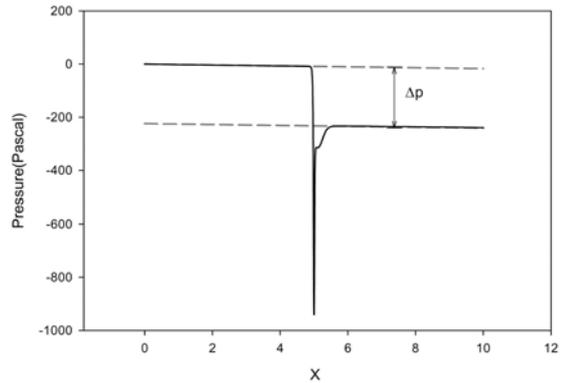


Fig. 3. Pressure distribution along the center line of orifice ( $P = 0.13$ ,  $D = 0.1 m$ ,  $2B = 0.1149 m$ ,  $2a = 0.0149 m$ ,  $Re = 1.5 \times 10^4$ ).

동그라미는 난류유동해석을 통하여 얻은 수치계산결과이며, 실선은 수치계산 결과를 이용하여 곡선 맞춤법을 통하여 얻은 맞춤식(fitted equation)을 그린 그림이다. 점선은 윤 등(2006)이 제안한 사각형 파일에서의 손실계수 산정식을 나타내며 일점쇄선은 Mei(1974)가 제안한 얇은 슬릿판에 대한 손실계수를 보여주고 있다. 3가지 모델을 비교한 결과 곡선의 형태는 유사하나 예상대로 원기둥일 때 손실계수가 가장 적게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 3가지 모델에 대한 손실계수의 산정식을 비교해 보면 더욱 명확해진다. 얇은 슬릿판에 대한 Mei(1974)가 제안한 경험식은  $\alpha = \left(\frac{1}{PC_c} - 1\right)^2$ 이며,

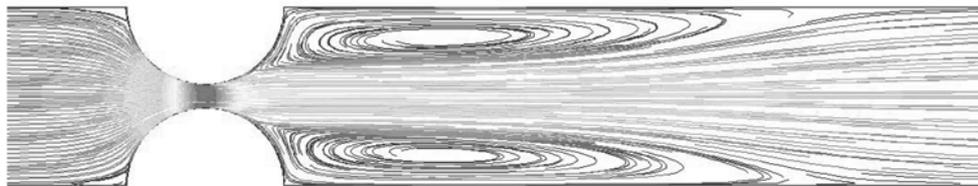


Fig. 4. Streamline pattern around a circular cylinder ( $P = 0.13$ ,  $D = 0.1 m$ ,  $2B = 0.1149 m$ ,  $2a = 0.0149 m$ ,  $Re = 1.5 \times 10^4$ ).

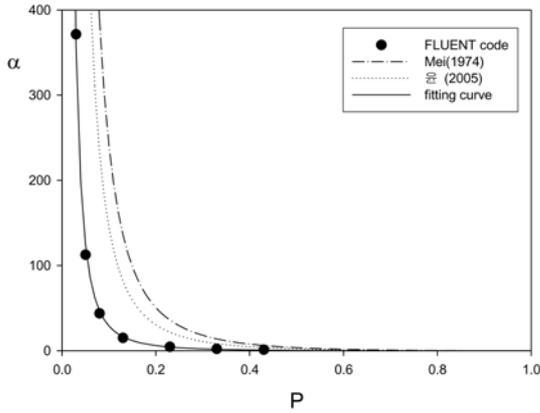


Fig. 5. Comparison of energy loss coefficients.

사각형 파일에서의 윤 등(2006)이 제안한 수정식은  $\alpha = 0.6 \left( \frac{1}{PC_c} - 1 \right)^2$ 이다. 본 연구에서 얻은 손실계수와 공극률 사이의 맞춤식은 다음과 같다.

$$\alpha = 0.12 \left( \frac{1}{PC_c} - 1 \right)^2 \quad (13)$$

여기서  $C_c (= 0.6 + 0.4P^2)$ 는 수축계수이다. 윤 등(2006)이 제안한 손실계수가 Mei(1974)의 손실계수의 60%이며, 본 연구에서 구한 원형 단면의 손실계수가 윤 등(2006)이 제안한 사각형 단면의 손실계수의 20%로 나타났다.

#### 4. 반사율과 투과율

원형 파일 방파제에 의한 반사율과 투과율을 살펴보기에 앞서 Fig. 6은 본 계산에서 사용한 차단계수를 보여주고 있다. Kakuno and Oda(1986)의 비정상 포텐셜이론에 근거한 급수형태의 식에서 19개 항을 취해 차단계수를 구하였다. 단면의 급축소, 급확대를 뜻하는 공극률이 작은 영역에서는 차단계수는 급격한 변화를 보이다가 공극률이 커지면 변화폭이 줄어들면서 작은 값을 갖는다.

계산결과 타당성을 검증하기 위하여 길이 50 m, 깊이 1.75 m, 폭 1 m인 2차원 수조에서 수행한 Kakuno and Liu(1993)의 모형실험결과와 비교하였다. Kakuno and Liu(1993)가 수행한 모형실험 조건은 수심이 50 cm이며, 파의 기울기는 0.01이다. 모형실험에서 사용한 원기둥의 직경은 2종류로 5.1 cm ( $B/\lambda \leq 0.02$ )와 15.3 cm ( $B/\lambda \geq 0.025$ )이다.

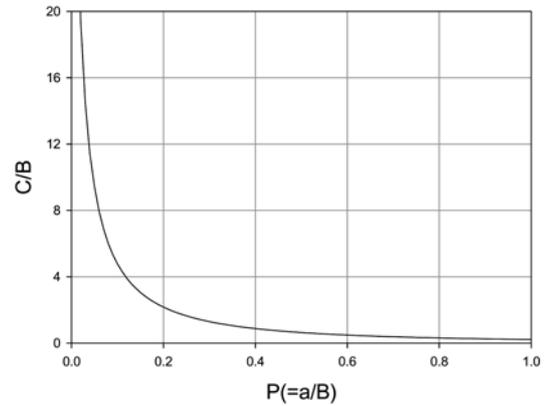


Fig. 6. Blockage coefficients for circular cylinder (Kakuno and Oda, 1986).

4개의 공극률 ( $P = 0.03, 0.08, 0.13, 0.23$ )에 대하여 반사율과 투과율을 비교하였다. Fig. 7a,b,c,d는 계산결과와 Kakuno and Liu(1993)의 모형실험결과를 비교한 그림이다. 여기서  $x$ 축은 원기둥의 간격과 파장의 비인  $B/\lambda$ 이며,  $y$ 축은 투과율과 반사율을 나타낸다. 계산결과는 전주파수에 걸쳐서 실험결과를 잘 따라가고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 8a,b,c,d는 4가지 공극률 ( $P = 0.05, 0.1, 0.2, 0.3$ )에 대하여 투과율, 반사율, 파력 그리고 에너지 손실을 보여주고 있다. 여기서 원기둥의 직경과 수심의 비( $D/h$ )는 0.1이며, 파의 기울기( $H/\lambda$ )는 0.01이다. 예상했던 바와 같이 공극률이 작을수록 투과율은 감소되고 반사율이 커지는 경향을 볼 수 있다. Fig. 8c는 유공벽에 작용하는 단위 폭 당 파력의 절대값을 공극률이 0인 벽면에 작용하는 파력  $F_o (= 2\rho A \tanh kh/k)$ 로 무차원화시킨 값을 보여주고 있다. 입사파가 장파일 때 유공벽에 의하여 대부분 에너지는 반사된다. 따라서  $|r|/F_o$ 는 1.0에 수렴한다. 4가지 공극률에 대하여 비교하면 예상대로 공극률이 클수록 파력은 상대적으로 작아지는 것을 알 수 있다. Fig. 8c의 무차원화된 파력 곡선은 반사율 곡선과 일치함을 보여주고 있다. 즉, 파일 방파제에 의한 반사율이 줄어들면 수평방향의 파력도 줄어든다. Fig. 8d는 원기둥을 통과하면서 발생하는 에너지 손실 ( $= 1 - |R_f|^2 - |T_f|^2$ )를 계산하였다. 이 값이 1이면 입사파의 모든 에너지가 유공판을 통과하면서 완전히 소멸된다는 것을 의미하며, 0이면 에너지 손실이 없다는 것을 뜻한다. 에너지 손실은 원기둥의 간격과 파장의 비인  $B/\lambda$ 와 공극률과 밀접한 관계가 있다. 4개의 공극률을 비교한 결과 저주파수 영역 ( $B/\lambda < 0.025$ )에서는 공극률이 작을수록 에너지 손실이 커지지만 주파수

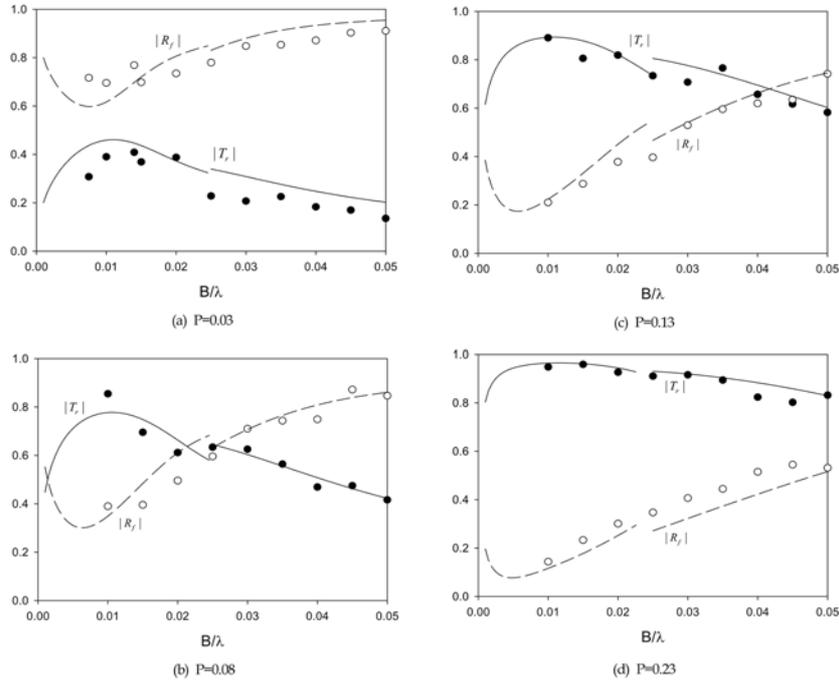


Fig. 7. Comparison between numerical solution and experimental data for circular cylinders. ●●●: measured transmission coefficient, ○○○: measured reflection coefficient.

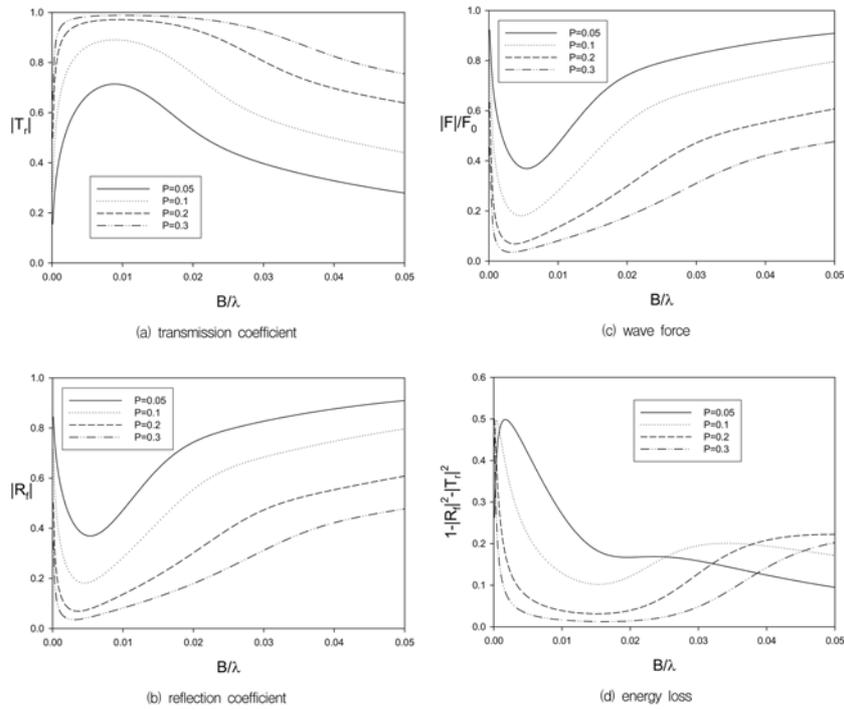


Fig. 8. Transmission, reflection, wave force, and energy loss of a pile breakwater as a function of non-dimensional wavelength and porosity for  $D/h=0.1$ ,  $H/\lambda=0.01$ .

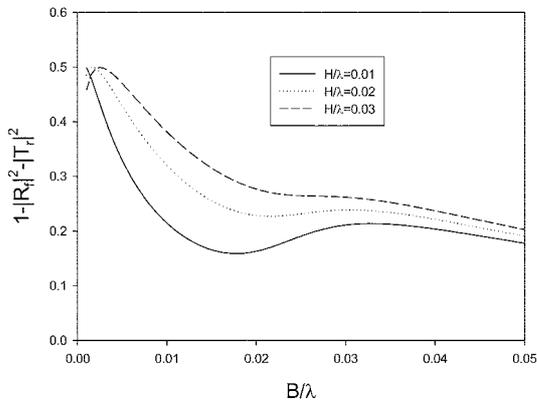


Fig. 9. Energy loss of a pile breakwater as a function of non-dimensional wavelength and wave steepness for  $D/h=0.1$ ,  $P=0.1$

가 큰 단파영역에서는 불규칙적인 경향을 보이고 있다.

Fig. 9는 파의 기울기 변화에 따른 에너지 손실을 살펴 보았다. 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 손실의 증가로 나타난다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 FLUENT 상용코드를 사용하여 원형 단면에 대한 에너지 손실계수 산정식을 구하였다. 손실계수와 차단계수(Kakuno and Oda, 1986)의 값을 이용하여 파일 방파제에 의한 반사율과 투과율을 구하고 Kakuno and Liu(1993)의 모형실험 결과와 비교하였다. 이로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

1) FLUENT 상용코드를 사용하여 구한 원형 파일 방파제에 의한 에너지 손실계수 산정식은  $\alpha = 0.12 \left( \frac{1}{PC_c} - 1 \right)^2$ 이다. 이는 윤 등(2006)이 제안한 사각형 파일에 대한 손실계수의 20%이며, Mei(1974)가 사용한 얇은 슬릿판 손실계수의 12%이다.

2) 해석결과와 Kakuno and Liu(1993)의 모형실험 결과는 대체로 잘 일치하였다. 이는 난류유동해석을 통하여 구한 에너지 손실계수 산정식이 타당하다는 것을 의미한다.

3) 파일 방파제에 의한 반사율과 파력은 서로 밀접한 관련이 있음을 확인하였다. 또한 저주파수 영역( $B/\lambda < 0.025$ )에서는 공극률이 작을수록 에너지 손실이 커지지만 고주파수영역에서는 불규칙적인 경향을 보이고 있다. 파기울

기가 클수록 박리현상이 크게 일어나 에너지 손실의 증가로 나타난다.

4) 개발된 해석모델을 다방향 불규칙파를 고려할 수 있는 해석모델로 확장한다면 환경친화적인 파일 방파제 제작에 필요한 많은 설계정보들을 제공할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- 윤성범, 이중인, 남두현, 김선형 (2006). 유공벽의 두께를 고려한 파의 에너지손실계수. 한국해양공학회지, **18**(4), 321-328.
- 조일형, 김남형 (2002). 직립 슬릿판에 의한 반사율과 투과율 해석, 한국해양공학회지, **16**(3), 1-7.
- 조일형 (2003). 직립벽 앞에 놓인 일정깊이 잠긴 슬릿판에 의한 반사율 해석. 한국해양공학회지, **15**(3), 143-150.
- Bennett, G.S., McIver, P. and Smallman, J.V. (1992). A mathematical model of a slotted wavescreen breakwater. *Coastal Eng.*, **18**, 231-249.
- Fugazza, M., and Natale, L. (1992). Hydraulic design of perforated breakwater. *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng. ASCE*, **118**, 1-14.
- Jarlan, G.E. (1961). A perforated vertical wall breakwater. *Dock Harbour Auth. XII*, **486**, 394-398.
- Kakuno, S. and Liu, Philip L-F. (1993). Scattering of water waves by vertical cylinders. *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng. ASCE*, **119**, 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, **369**, 213-222.
- Kim, B.H. (1998). Interaction waves, seabed and structures, Ph.D. Dissertation, Seoul National University.
- Mei, C. C., Liu, Philip L-F. and Ippen, A.T. (1974). Quadratic loss and scattering of long waves. *J. Waterways Harbors and Coastal Eng. ASCE*, **100**, 217-239.
- Mei, C. C. (2005). Theory and Applications of Ocean Surface Waves. Advanced Series on Ocean Engineering **132**, World Scientific.
- Suh, K.D., Shin, S. and Cox, D.T. (2006). Hydrodynamic characteristics of pile-supported vertical wall breakwaters. *J. Waterways Harbors and Coastal Eng. ASCE*, **132**(2), 83-96.
- Zhu, S. and Chwang, A.T. (2001). Investigations on the reflection behaviour of a slotted seawall. *Coastal Eng.*, **43**, 93-104.

Received December 4, 2006

Accepted February 1, 2007