

파일 방파제의 소파성능 해석

조일형* · 고혁준*

*제주대학교 해양산업공학전공

Analysis on Wave Absorbing Performance of a Pile Breakwater

IL-HYOUNG CHO* AND HYEOK-JUN KOH*

*Department of Marine Industrial Engineering, Cheju National University, Ara 1, Jeju, Korea

KEY WORDS: Eigenfunction expansion method 고유함수 전개법, Energy loss coefficient 에너지 손실계수, Pile breakwater 파일 방파제, Reflection coefficient 반사율, Separation 박리, Transmission coefficient 투과율, Turbulent flow 난류

ABSTRACT: Based on the eigenfunction expansion method, the wave-absorbing performance of a square or circular pile breakwater was investigated. Flow separation resulting from sudden contraction and expansion is generated and is the main cause of significant energy loss. Therefore, evaluation of an exact energy loss coefficient is critical to enhancing the reliability of the mathematical model. To obtain the energy loss coefficient, 2-dimensional turbulent flow is analyzed using the FLUENT commercial code, and the energy loss coefficient can be obtained from the pressure difference between upstream and downstream. It was found that energy loss coefficient of circular pile is 20 % that of a square pile. To validate the fitting equation for the energy loss coefficient, comparison between the analytical results and the experimental results (Kakuno and Liu, 1993) was made for square and circular piles with good agreement. The array of square piles also provides better wave-absorbing efficiency than the circular piles, and the optimal porosity value is near $P = 0.1$.

1. 서 론

최근 해양의 이용관점 및 욕구가 다양해지면서 해양개발은 환경과 조화를 이루는 지속 가능한 방법이어야 한다. 해양구조물의 개발개념도 경제성과 안전성에 부가하여 경관성과 환경성(생태환경과의 조화성) 등을 최적화하는 것으로 바뀌고 있다. 방파제는 이러한 요소들을 고려하여야 하는 대상구조물인 동시에, 단위해역에 이를 실현하기 위한 핵심구조물이다. 이런 관점에서 방파제는 대상해역의 해양외력 및 생태환경 특성에 대해 안전하고, 쾌적하며, 생산성 높은 해역이용이 가능할 수 있도록 설계 및 개발하여야 한다. 본 연구에서 다물 파일 방파제(Pile breakwater)는 투과성 방파제의 한 종류로 원기둥과 사각기둥을 일정한 간격을 가지고 수직으로 배열하여 만든 형태이다. 이런 형태의 방파제는 환경 친화적인 항만 개발에 필요한 많은 장점들을 지니고 있다.

Jarlan(1961)이 음파 에너지를 소멸시키기 위해 무향실의 벽에 설치한 유공판의 소파 개념을 방파제에 적용한 이후 투과성 방파제에 대한 많은 이론적인 연구와 실험적인 연구가 수행되었다. Mei et al.(1974)은 유공벽 전후의 압력차이를 물입자의 속도의 제곱에 비례하는 점성항(Viscous term)과 물입자의 가속도에 비례하는 관성항(Inertial term)의 합으로 표현하였고, 각 항에 포함된 계수들을 구하는 방법을 제시하였다. Fugazza and Natale(1992)와 Kim(1998)은 에너지 손실을 나타

내는 점성항을 물입자의 속도에 선형적으로 비례한다고 가정하여 선형 손실계수를 Lorenz 변환을 통하여 구하였다. Kakuno and Liu(1993)는 정합점근전개법(Matched asymptotic expansion method)을 사용하여 슬릿 방파제에 의한 반사율과 투과율을 계산하였다. 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. 윤성범 등(2006)은 FLUENT 상용코드를 사용하여 사각형 단면에 대한 에너지 손실계수를 구하고 Fugazza and Natale(1992)의 해석해에 적용하였고, 조 일형과 고혁준(2007)은 윤성범 등과 같은 FLUENT 상용코드를 사용하여 원형 단면에 대한 에너지 손실계수를 구하고 파일 방파제에 대한 반사율과 투과율을 구하였다.

본 연구에서는 경사파중 수면아래 일정깊이 잠긴 파일 방파제에 의한 반사율과 투과율의 특성을 고유함수전개법을 이용하여 살펴보았다. 파일 방파제 전후의 압력 차이를 관성항과 점성항의 합으로 표현하였다. 이때 단면이 사각형인 경우 Flagg and Newman(1971)의 해석해를, 단면이 원형인 경우 Kakuno and Oda(1986)의 해석해를 이용하여 관성항 계수인 차단계수를 구하였다. 또한 점성항 계수인 에너지 손실계수를 구하기 위하여 FLUENT 상용코드에서 난류유동을 계산할 수 있는 Spalart-Allmars모형을 사용하였다. 손실계수 산정식의 타당성을 검증하기 위하여 Kakuno and Liu(1993)의 모형실험 결과와 비교하였다.

교신저자 조일형: 제주시 아라동 1번지

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

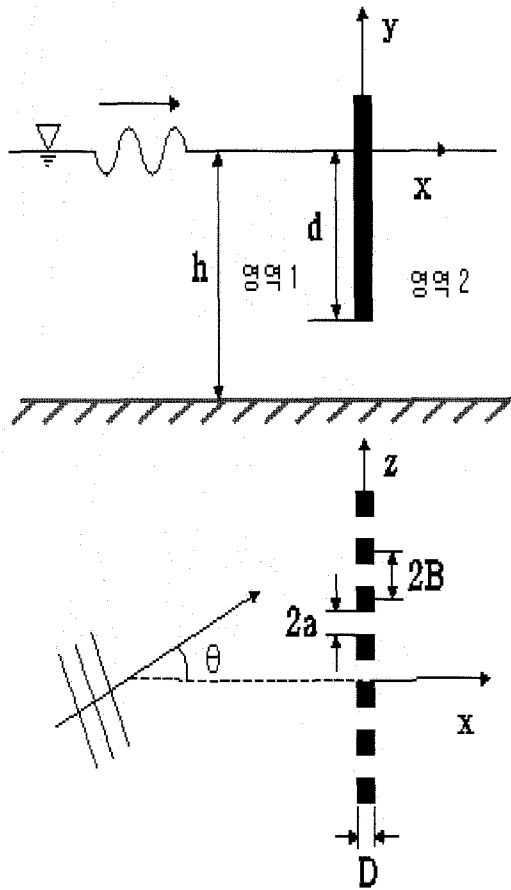


Fig. 1 Definition sketch of a pile breakwater

2. 고유함수 전개법

Fig. 1과 같이 수심(h)이 일정한 유체영역 내에 수면 아래로 d 만큼 잠긴 파일 방파제가 놓여 있다고 생각하자. 입사파는 x축과 θ 의 경사각도를 갖고 파일 방파제에 들어온다. 선형포텐셜이론에 따라 속도포텐셜(Φ)을 도입하고, 유동은 주파수 ω 를 갖고 조화운동을 한다고 가정하면 속도포텐셜과 유공벽에서의 수평방향 속도는 아래와 같이 쓸 수 있다.

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

여기서 A는 입사파의 진폭이며 g는 중력가속도이다. 파일 방파제가 z축 방향으로 일정하고 무한히 길다고 가정하여 $\Psi(x, y, z) = \Phi(x, y) e^{k_z \sin \theta z}$, $\bar{u}(y, z) = u(y) e^{k_z \sin \theta z}$ 로 치환하면 새로 도입된 속도포텐셜 Φ 는 z에 무관한 함수가 된다. 여기서 k_o 는 입사파의 파수(Wave number)를 나타낸다. 속도포텐셜 Φ 는 아래와 같은 2차원 경계치 문제를 만족한다.

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} - k_o^2 \sin^2 \theta \Phi = 0 & (\text{in } \Omega) \\ \frac{\partial \Phi}{\partial y} - \frac{\omega^2}{g} \Phi = 0 & (\text{at } y=0) \\ \frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0 & (\text{at } y=-h) \\ \lim_{|x| \rightarrow \infty} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial |x|} - ik_o |\cos \theta| \Phi \right) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

파일 방파제에 의하여 나누어진 유체영역을 각각 영역 1, 영역 2라 할 때 각 영역에서의 속도포텐셜은 아래 식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \Phi_1(x, y) &= \sum_{n=0}^{\infty} (e^{-a_n x} \delta_{n0} + A_n e^{a_n x}) f_n(y) \\ \Phi_2(x, y) &= \sum_{n=0}^{\infty} B_n e^{-a_n x} f_n(y) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 δ_{n0} 는 $n=0$ 일 때 1이고, $n \neq 0$ 일 때 0의 값을 갖는 Kronecker-Delta 함수이다. a_o 는 진행파(Propagating wave)의 파수로 $a_o = -ik_o |\cos \theta|$ 이며, $a_n (= \sqrt{k_o^2 \sin^2 \theta + k_n^2})$ 는 $n \geq 1$ 인 비진행파(Non-propagating wave)의 파수이다. 고유함수 $f_n(y)$ 은 식 (4)과 같으며 k_n 은 식 (5)의 선형 분산식을 만족한다.

$$f_n(y) = \begin{cases} \frac{\cosh k_o(y+h)}{\cosh k_o h} & (\text{for } n=0) \\ \frac{\cos k_n(y+h)}{\cos k_n h} & (\text{for } n=1, 2, \dots) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} k_o \tanh k_o h = \frac{\omega^2}{g} & (n=0) \\ k_n \tan k_n h = -\frac{\omega^2}{g} & (n=1, 2, \dots) \end{cases} \quad (5)$$

식 (3)에 나타난 미지수인 A_n, B_n 을 구하기 위하여 두 영역이 만나는 경계면($x=0$)에서 정합조건식(Matching condition)을 적용하여야 한다. 먼저 $x=0$ 에서 영역 1, 2의 수평방향 속도가 서로 같다는 연속방정식을 적용하면 다음과 같다. 이때 유공벽에서의 수평방향 속도를 앞에서 같이 고유함수의 전개식으로 표현한다.

$$\frac{\partial \Phi_1}{\partial x} = \frac{\partial \Phi_2}{\partial x} = u(y) = \sum_{n=0}^{\infty} u_n f_n(y) \quad x=0, -h < y < 0 \quad (6)$$

식 (3)을 식 (6)에 대입한 후 정리하면 미지수 A_n, B_n 은 아래와 같이 표현된다.

$$A_n = \delta_{n0} + \frac{u_n}{a_n} \quad (7)$$

$$B_n = -\frac{u_n}{a_n}$$

식 (7)을 식 (3)에 대입하여 영역 1, 2에서의 속도포텐셜을 다시 쓰면 다음식과 같다.

$$\Phi_1(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} (e^{-a_n x} + e^{a_n x}) \delta_{n0} + \frac{u_n}{a_n} e^{a_n x} f_n(y) \quad (8)$$

$$\Phi_2(x, y) = -\sum_{n=0}^{\infty} \frac{u_n}{a_n} e^{-a_n x} f_n(y)$$

식 (8)에서 미지수인 $u_n(n=0, 1, 2, \dots)$ 을 구하기 위해서는 추가적인 정합조건식이 필요하다. 파일 방파제가 놓인 경계면 ($x=0, -d \leq y \leq 0$)에서의 정합조건식은 아래와 같이 표현된다(Mei et al., 1974).

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

식 (9)의 오른쪽의 첫 번째 항은 물입자의 가속도에 비례하는 관성항을 나타내며 C 는 파일 방파제의 국부형상과 밀접한 관련이 있는 차단계수이다. 식 (9)의 오른쪽의 두 번째 항은 박리에 의한 에너지 손실을 나타내는 점성항이다. 에너지 손실계수 α 를 구하기 위하여 윤성범 등(2006)이 제안한 FLUENT 상용코드에서 난류유동을 계산할 수 있는 Spalart-Allmars모형을 사용하였다.

비선형인 점성항을 물입자의 속도에 선형적으로 비례한다고 가정하여 식 (8)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\Phi_2 - \Phi_1 = 2Cu + \frac{i\beta}{\omega} u \quad (-d \leq y \leq 0) \quad (10)$$

여기서 β 는 선형화된 손실계수(Linear loss coefficient)로 Lorentz 변환을 이용하여 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\beta = \frac{16\alpha}{9\pi} A\omega \frac{1}{\sqrt{(R+2)^2 + G^2}} \frac{5 + \cosh(2k_0 d)}{2k_0 d + \sinh(2k_0 d)} \quad (11)$$

여기서 $R = \beta \left(\frac{k_0 \cos \theta}{\omega} \right)$, $G = 2Ck_0 \cos \theta$ 이다. 식 (11)은 β 에 관한 4차 방정식이다. 이 방정식을 풀어 β 를 구한다.

파일 방파제 아래의 경계면에서 만족해야 할 정합조건식은 아래와 같다.

$$\Phi_2 = \Phi_1 \quad (x=0, -h \leq y \leq -d) \quad (12)$$

앞에서 구한 식 (8)을 식 (12)에 대입한 후 양변에 $f_m(y)$ 을

곱한 뒤 $-h$ 부터 $-d$ 까지 적분하면 다음과 같은 대수방정식을 유도할 수 있다.

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{\Gamma_{nm}}{a_n} u_n = -\Gamma_{0m} \quad (13)$$

여기서 $\Gamma_{nm} = \int_{-h}^{-d} f_n(y) f_m(y) dy$ 이다. 같은 방법으로 식 (8)을 식 (10)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{u_n}{a_n} + \left(C + \frac{i\beta}{2\omega} \right) u_n f_n(y) = -f_0(y) \quad (14)$$

양변에 고유함수 $f_m(y)$ 를 곱한 뒤 $-d$ 부터 0까지 적분하면 식 (14)은 아래식으로 바뀐다.

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{\Pi_{nm}}{a_n} u_n + \left(C + \frac{i\beta}{2\omega} \right) \Pi_{nm} u_n = -\Pi_{0m} \quad (15)$$

여기서 $\Pi_{nm} = \int_{-d}^0 f_n(y) f_m(y) dy$ 이다. Π_{nm} 와 앞에서 정의된 Γ_{nm} 와는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\Pi_{nm} = N_n \delta_{nm} - \Gamma_{nm} \quad (16)$$

여기서 $N_n \delta_{nm} = \int_{-h}^0 f_n(y) f_m(y) dy$ 이다.

앞에서 유도한 식 (13)과 식 (15)을 더하고 식 (16)을 이용하면 최종적으로 풀어야 할 대수방정식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{N_n \delta_{nm}}{a_n} + \left(C + \frac{i\beta}{2\omega} \right) \Pi_{nm} u_n = -N_0 \delta_{0m} \quad (17)$$

$(m = 0, 1, 2, \dots)$

식 (17)에 주어진 대수방정식을 수치적으로 풀기 위하여 고유함수의 개수를 유한개(N) 취한다. N 을 증가시키면서 수렴성을 검토한 결과 $N=10$ 이면 충분하다고 판단되어 모든 계산에서 N 을 10으로 하였다. 대수방정식을 풀어 u_n 이 계산되면 파일 방파제에 의한 반사율과 투과율 그리고 단위 폭당 수평방향 파력은 다음과 같다.

$$R_f = \left| 1 + \frac{u_0}{a_0} \right|, T_r = \left| -\frac{u_0}{a_0} \right|$$

$$F = -\rho g A \int_{-d}^0 [\Phi_2(0, y) - \Phi_1(0, y)] dy \quad (18)$$

$$= 2\rho g A \sum_{n=0}^N \left(\frac{u_n}{a_n} + \delta_{n0} \right) \frac{\sin k_n h - \sin k_n (h-d)}{k_n \cos k_n h}$$

3. 손실계수와 차단계수

파가 파일 방파제를 통과하면서 갑작스런 단면현상의 변화로 박리현상이 발생하여 에너지가 손실된다. 이러한 박리현상은 파일 방파제의 공극율과 단면형상에 밀접한 관계가 있다. 본 연구에서는 박리에 의한 에너지 손실을 수치적으로 구하기 위하여 FLUENT 상용코드에서 난류유동을 계산할 수 있는 Spalart-Allmars모형을 사용하였다.

Fig. 2 a, b는 사각형단면과 원형단면 주변에서의 유선(Streamline)을 보여주고 있다. 파일을 지나 벽 쪽으로 커다란 와류가 대칭으로 형성되어 있음을 볼 수 있다. 중앙부에서의 유속과 와류의 크기는 사각형단면이 원형단면보다 큰 것을 알 수 있다. 난류유동 해석으로부터 얻은 압력과 유속을 이용하여 에너지 손실계수를 구하는 식은 $\alpha = \Delta p / \frac{1}{2} \rho V^2$ 이다. 여기서 Δp 는 파일의 상류와 하류 정수압의 차를 나타내며, V 는 상류유입부에서의 단면평균유속이다. Fig. 3에서 동그라미는 난류유동해석을 통하여 얻은 원형단면에 대한 수치계산결과이며, 세모는 사각형단면에 대한 수치계산결과이다. 실선과 점선은 수치계산결과를 곡선 맞춤법을 통하여 얻은 맞춤식(Fitted equation)을 이용한 결과이다. 사각형단면과 원형단면에 대한 에너지 손실계수의 맞춤식은 다음과 같다.

$$\alpha = 0.6 \left(\frac{1}{PC_c} - 1 \right)^2 \text{ for square pile} \quad (19)$$

$$\alpha = 0.12 \left(\frac{1}{PC_c} - 1 \right)^2 \text{ for circular pile}$$

여기서 $C_c (= 0.6 + 0.4P^2)$ 는 수축계수이다. 사각형단면일 때의 산정식은 윤성범 등(2006)이 제안한 식과 같으며 원형단면의 손실계수가 사각형단면의 손실계수의 20%로 적게 나타났다.

Fig. 4는 차단계수 C 를 파일의 간격 B 으로 나눈 값을 보여주고 있다. 실선은 Flagg and Newman(1971)의 근사해로부터 구한 사각형파일의 차단계수를 나타낸다.

$$\frac{C}{B} = \frac{1}{2} \frac{D}{B} \left(\frac{B}{a} - 1 \right) + \frac{2}{\pi} \left[1 - \log \left(\frac{4a}{B} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{a}{B} \right)^2 + \frac{281}{180} \left(\frac{a}{B} \right)^4 \right] + O \left(\left(\frac{a}{B} \right)^6 \right) \quad (20)$$

점선은 Kakuno and Oda(1986)가 유도한 급수형태의 식에서 19개 항을 취해 구한 원형파일의 차단계수이다. 단면의 급축소, 급확대를 뜻하는 공극율이 작은 영역에서는 차단계수는 급격한 변화를 보이다가 공극율이 커지면서 변화폭이 줄어들고 작은 값을 갖는다.

4. 반사율과 투과율

계산결과의 타당성을 검증하기 위하여 길이 50m, 깊이 1.75m, 폭 1m인 2차원 수조에서 수행한 Kakuno and Liu(1993)의 모형실험결과와 비교하였다. Kakuno and Liu(1993)가 수행한 모형실험 조건은 수심이 50cm이며, 파의 기울기 (H/λ)는 0.01이다. 모형실험에서 사용한 사각형파일의

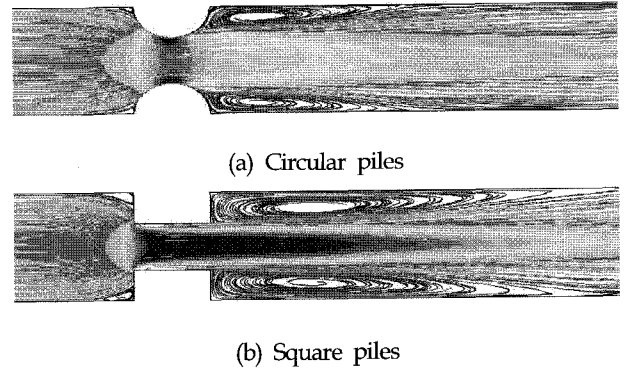


Fig. 2 Streamline pattern around square and circular piles ($P = 0.43$, $D = 0.1$ m, $2B = 0.1754$ m, $2a = 0.0754$ m, $Re = 1.5 \times 10^4$)

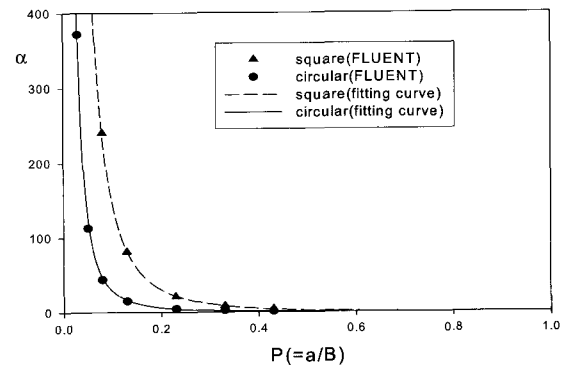


Fig. 3 Comparison of energy loss coefficients between circular and square piles

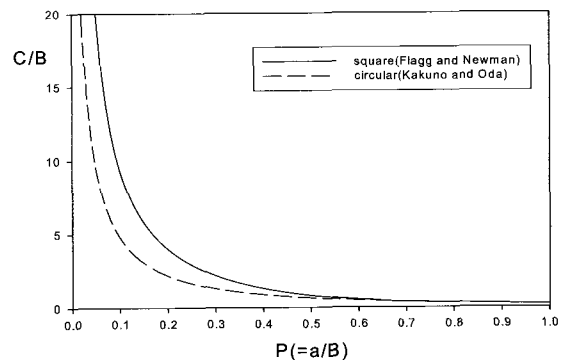
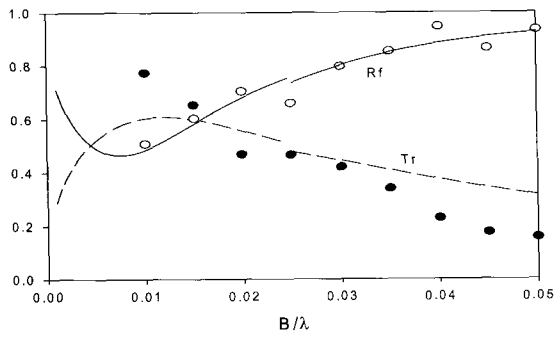
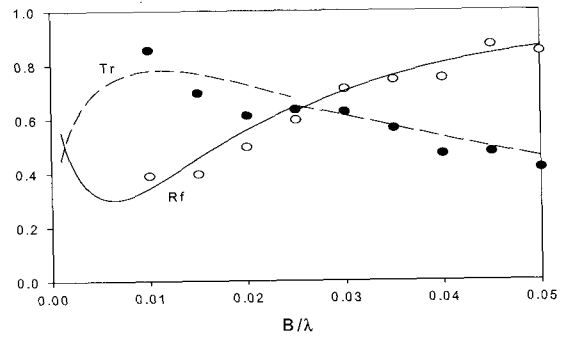


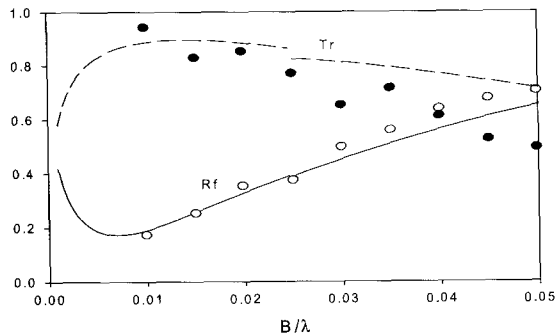
Fig. 4 Blockage coefficients



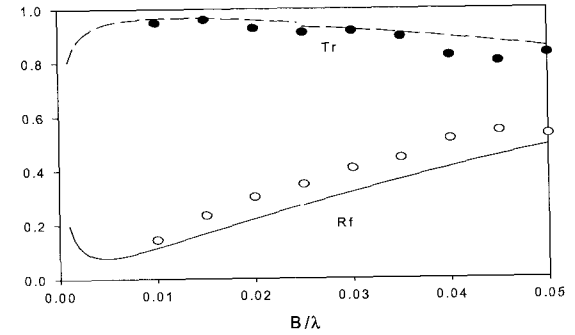
(a) $P = 0.1$



(a) $P = 0.08$



(b) $P = 0.25$



(b) $P = 0.23$

Fig. 5 Comparison between analytic and experimental results for square piles [○: measured reflection coefficient, ●: measured transmission coefficient]

Fig. 6 Comparison between analytic and experimental results for circular piles [○: measured reflection coefficient, ●: measured transmission coefficient]

변의 길이와 원기둥의 직경은 $B/\lambda \leq 0.02$ 범위에서는 5.0cm와 5.1cm이며, $B/\lambda \geq 0.025$ 일 때는 15.0cm와 15.3cm이다. 파일은 바닥에서 수면 위까지 놓여 있다 ($d/h=1.0$). 각각 2개의 공극율(사각형:0.1,0.25, 원형:0.08,0.23)에 대하여 반사율과 투과율을 비교하였다.

Fig. 5는 사각형파일이 배열되었을 때 계산결과와 Kakuno and Liu(1993)의 모형실험결과를 비교한 그림이다. 여기서 x 축은 사각형파일의 간격과 파장의 비인 B/λ 이며, y 축은 투과율 (T_r)과 반사율 (R_f)이다. 투과율에서는 둘 사이에 정량적인 값 차이가 나타나지만 반사율은 전주파수에 걸쳐서 계산결과는 실험결과를 잘 따라가고 있음을 보여주고 있다. 예상대로 공극율이 작을수록 반사율은 커지며 투과율은 줄어드는 경향이 나타난다. Fig. 6은 Fig. 5와 같은 조건에 대하여 원형파일이 일정한 간격을 가지고 배열되었을 때 2가지 공극율($P=0.08, 0.23$)에 대하여 투과율과 반사율을 비교한 그림이다. 계산결과와 실험결과는 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 이는 난류유동해석을 통하여 구한 에너지 손실계수의 산정식이 타당함을 의미한다.

사각형파일과 원형파일의 소파효율을 비교하기 위하여 공극율 0.1에 대하여 에너지 손실($1-R_f^2-T_r^2$)을 비교한 그림이 Fig. 7이다. 원형파일의 직경 또는 사각형파일의 변의 길이와

수심의 비(D/h)는 0.1이며, 파의 기울기(H/λ)는 0.01이다. 사각형파일의 소파효율이 원형파일의 소파효율보다 장파영역에서 우수함을 알 수 있다. 이는 Fig. 3에서 살펴보았듯이 파장이 긴 파는 파속이 빠르고 진행시간이 길어 파일 주변 유체 장에 후류가 충분히 발달하여 박리에 의한 에너지 손실이 두드러지게 나타나기 때문이다. 그러나 파장이 짧은 단파영역에서는 둘 사이의 차이가 거의 나타나지 않는다.

최적의 소파효율을 나타내는 공극율을 얻기 위하여 공극율 변화에 따른 에너지 손실을 Fig. 8a에서 비교하였다. 4개의 공극율($P=0.05, 0.1, 0.2, 0.3$)을 비교한 결과 공극율이 0.1일 때 소파효율이 가장 우수함을 보이고 있다. Fig. 8b는 파일 방파제에 작용하는 단위 폭 당 파력의 절대값을 공극율이 0인 벽면에 작용하는 파력 $F_0(=2\rho g A \tanh k h/k_0)$ 로 무차원화시킨 값을 보여주고 있다. 입사파가 장파일 때 대부분 에너지는 반사된다. 따라서 $|R|/F_0$ 는 1.0에 수렴한다. 4가지 공극률에 대하여 비교하면 예상대로 공극률이 클수록 파력은 상대적으로 작아지는 것을 알 수 있다.

Fig. 9 (a), (b)는 사각형파일의 잠긴깊이 변화에 따른 투과율과 에너지 손실을 비교한 그림이다. 파장이 무한히 길 때 $d/h=1.0$ 인 경우 투과율은 0에 수렴하는 반면에 하부가 뿔려있는 $d/h < 1$ 인 경우에는 1에 수렴하는 것을 볼 수 있다. $B/\lambda \leq 0.02$

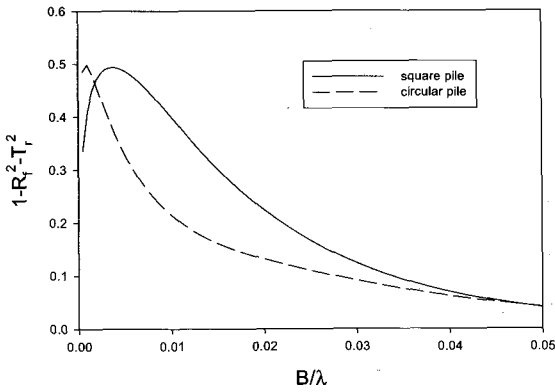
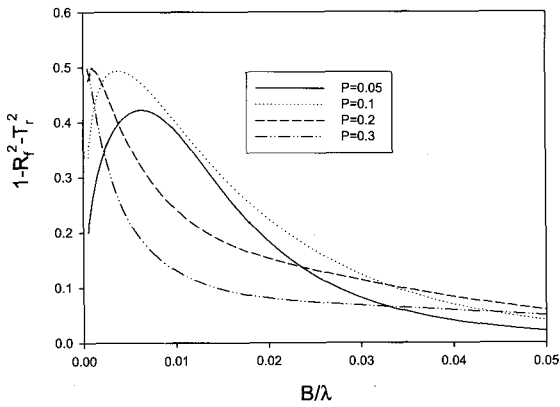
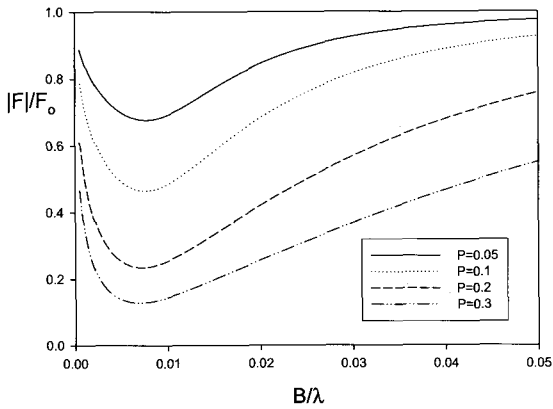


Fig. 7 Comparison of energy loss between square and circular piles as a function of non-dimensional wavelength for $d/h = 1.0, P = 0.1, D/h = 0.1, H/\lambda = 0.01, \theta = 0^\circ$



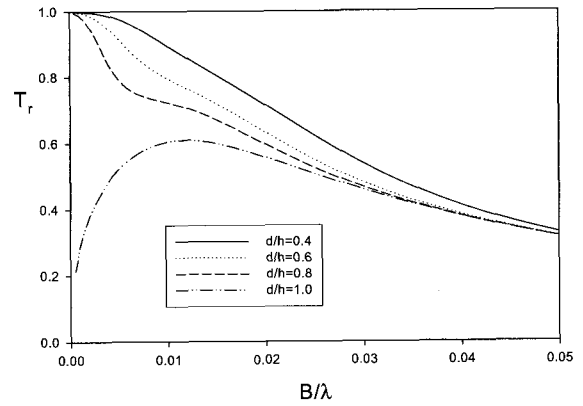
(a) Energy loss



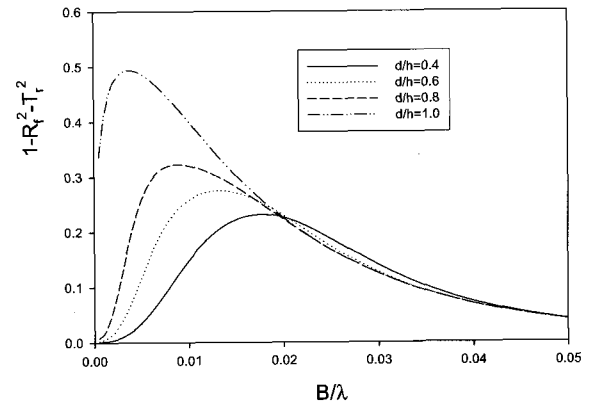
(b) Wave force

Fig. 8 Energy loss and wave force of square piles as a function of non-dimensional wavelength and porosity for $d/h = 1.0, D/h = 0.1, H/\lambda = 0.01, \theta = 0^\circ$

인 장파영역에서는 파일의 잠긴깊이가 깊을수록 에너지 손실이 커진다. 그러나 $B/\lambda \geq 0.02$ 인 단파영역에서는 파의 영향이 수면 아래로 내려감에 따라 급격히 감소하므로 파일의 잠긴



(a) Transmission coefficient



(b) Energy loss

Fig. 9 Transmission coefficient and energy loss of square piles as a function of non-dimensional wavelength and immersed depth for $P = 0.1, D/h = 0.1, H/\lambda = 0.01$

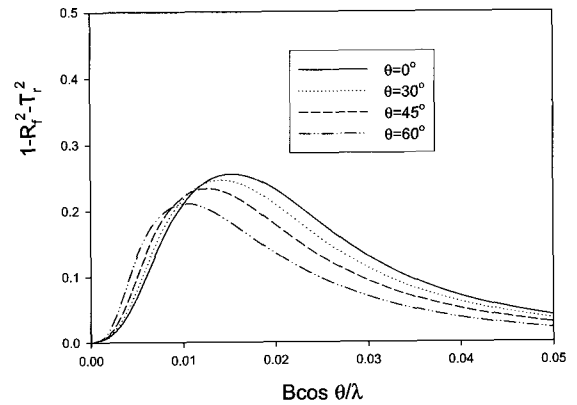


Fig. 10 Energy loss of square piles as a function of non-dimensional wavelength and incident angle for $d/h = 0.5, P = 0.1, D/h = 0.1, H/\lambda = 0.01$

깊이의 영향은 거의 나타나지 않는다. Fig. 10은 입사파의 경사각도를 변화시키면서 구한 에너지 손실곡선을 보여주고 있다. $B \cos \theta / \lambda > 0.01$ 영역에서는 경사각도가 증가할수록 에너지 손

실이 감소하며 $B\cos\theta/\lambda < 0.01$ 영역에서는 변화량은 작지만 에너지 손실이 증가하는 경향을 보여주고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 난류수치모델인 FLUENT 상용코드를 사용하여 사각형과 원형 단면에 대한 에너지 손실계수의 산정식을 이용하여 경사파중 일정깊이 잠긴 파일 방파제의 소파효율을 구하고 Kakuno and Liu(1993)의 모형실험 결과와 비교하였다. 이로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

(1) 사각형파일과 원형파일 모두 해석결과와 Kakuno and Liu(1993)의 모형실험 결과는 대체로 잘 일치하였다. 이는 난류 유동해석을 통하여 구한 에너지 손실계수의 산정식이 타당하다는 것을 의미한다.

(2) 사각형파일의 소파효율이 원형파일의 소파효율보다 우수하게 나타났다. 이는 각진 단면형상으로 박리에 의한 에너지 손실이 증가하였기 때문이다.

(3) 공극율과 잠긴깊이는 에너지 손실에 큰 영향을 미치는 주요변수들이다. 공극율이 0.1일 때 전주파수에 걸쳐 에너지 손실이 최소가 됨을 보여주었다. 장파영역에서는 파의 영향이 깊은 수심까지 나타나므로 파일의 잠긴깊이가 깊어질수록 에너지 손실은 증가한다. 그러나 단파영역에서는 파일의 잠긴깊이가 어느 값 이상($B/\lambda \geq 0.02$)이 되면 잠긴깊이는 에너지 손실에 크게 영향을 주지 않는다.

(4) $B\cos\theta/\lambda \geq 0.01$ 영역에서는 경사각도가 증가함에 따라 에너지 손실이 감소하는 경향을 보여주고 있다.

후 기

본 논문은 2007년도 친환경해양산업뉴프론티어전문인력양성사업에 의하여 지원되었음을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

윤성범, 이종인, 남두현, 김선형 (2006). "유공벽의 두께를 고려

한 파의 에너지손실계수", 한국해양해양공학회지, Vol 18, No 4, pp 321-328.

조일형, 고혁준 (2007). "원형 파일 방파제에 의한 반사율과 투과율", 한국해양해양공학회지, Vol 19, No 1, pp 38-44.

조일형 (2003). "직립벽 앞에 놓인 일정깊이 잠긴 슬릿판에 의한 반사율 해석", 한국해양해양공학회지, Vol 15, No 3, pp 143-150.

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.

Fugazza, M. and Natale, L. (1992). "Hydraulic design of perforated breakwater", J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng. ASCE, Vol 118, pp 1-14.

Jarlan, G.E. (1961). "A perforated vertical wall breakwater", Dock Harbour Auth. XII, Vol 486, pp 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, 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.

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, Vol 100, pp 217-239.

Zhu, S. and Chwang, A.T. (2001). "Investigations on the reflection behaviour of a slotted seawall", Coastal Eng., Vol 43, pp 93-104.

2007년 1월 9일 원고 접수

2007년 8월 14일 최종 수정본 채택