

계류된 사각형 부유식 방파제의 파랑제어성능

조일형⁽¹⁾

Wave Control Performance of Moored Pontoon-Type Floating Breakwater

by
I. H. Cho⁽¹⁾

요 약

계류된 사각형 부유식 방파제의 파랑제어성능에 대한 해석적인 연구를 수행하였다. 고유함수 전개법을 사용하여 사각형 부유식 방파제의 운동특성과 투과율을 살펴보았다. 계류선의 강성계수는 선형 탄성스프링으로 가정하였다. 고유함수전개법을 사용한 해석결과는 유한요소법을 사용한 수치계산결과와 전 주파수에 걸쳐 잘 일치함을 보여주었다. 사각형 부유식 방파제의 단면형상과 계류선의 특성 등과 같은 중요한 설계변수들과 입사파의 파장을 바꿔가면서 파랑제어성능을 살펴보았다. 그 결과 적절히 설계된 부유식 방파제는 효과적인 파랑제어구조물로 활용이 가능하다는 결론을 얻을 수 있었다.

Abstract

In this paper, the analytic studies on the wave control performance of moored pontoon-type floating breakwater are presented. A two-dimensional eigenfunction expansion method is adopted to study the motion responses and the transmission coefficients of pontoon-type floating breakwater in beam waves. The stiffness coefficients of mooring line are idealized as linear elastic spring. Comparison of the analytical results with a numerical results (FEM) shows good agreement over a wide range of frequencies. The performance of moored pontoon-type floating breakwater is tested with various design parameters such as sectional geometry, mooring line characteristics and wave frequencies. It is found that the properly designed floating breakwater can be an effective wave control structure.

Keywords: floating breakwater 부유식 방파제, eigenfunction expansion method 고유함수전개법, motion response 운동응답, transmission coefficient 투과율.

1. 서 론

해안 및 해상에 설치되는 시설물들은 파도로부

터 보호하고 기능성과 안전성을 효율적으로 극대화하기 위해서는 파랑제어구조물의 설치가 필요하다. 이러한 파랑제어구조물은 지역적 특성,

(1) 정희원, 제주대학교 해양산업공학부, cho0904@cheju.ac.kr

작업의 종류 그리고 경제적 요인이 고려되어, 해양시설물이 위치한 해역에서 원하는 정온도를 확보하도록 설계된다. 일반적으로 사석방파제, 케이슨방파제와 같은 고정식 방파제가 지금까지 많이 사용되고 있다. 그러나 고정식 방파제는 파차단효과는 우수하지만 설치에 많은 시간과 경비가 소요되고 환경 및 생태계에 원치 않는 변화를 줄 수 있으며 설치 예정지의 수심, 지질 그리고 육지로부터의 거리등에 의하여 많은 제약을 받는 단점이 있다. 이에 대한 대안으로 부유식 방파제 개발이 일본을 중심으로 여러 나라에서 적극적으로 검토되고 있다. 부유식 방파제는 고정식 방파제가 지닌 문제점들을 상당히 해소할 수 있지만 아직까지 해결되지 못한 부정적인 측면도 가지고 있다. 즉, 방파제의 성능을 방파 능력과 안전성으로 평가한다고 볼 때 부유식 방파제는 파의 부분적인 투과를 허용할 수밖에 없으며 입사파의 파장에 따라 방파성능이 달라진다. 또한 계류계의 손상 발생시 부유체의 표류 및 돌발적인 거동으로 예측하기 어려운 피해가 야기될 수 있다. 이런 측면에서 부유식 방파제가 해양시설물의 작업능률과 안전성을 극대화하는데 결정적인 도움을 줄 수 있는 시설물로 자리잡을 수 있기 위해서는 해양환경에 따른 부유식 방파제의 파랑제어성능과 계류계의 손상시 예측되는 운동학적 문제에 대한 충분한 이해가 필요하다.

Adee[1975]는 깊은 수심에 떠 있는 카타마란(catamaran) 형태의 2차원 부유식 방파제를 해석할 수 있는 이론모델을 개발하고 해석결과를 모형실험과 비교하였다. Adee and Martin[1974]는 부유식 방파제의 횡운동은 투과율에 거의 영향을 주지 못하며 이론에서의 계류력은 모형실험에서 측정된 계류력보다 작게 나옴을 확인하였다. Sutko and Haden[1974]은 단면이 사각형인 부유식 방파제의 성능이 삼각형, 원형, 사다리꼴의 단면을 갖는 부유식 방파제보다 우수한 방파성능을 보임을 보고하였다. Carver[1979]는 투과율은 방파제의 폭에 따라 크게 달라지며 파의 기울기에 따른 변화는 작다는 사실을 발견하였다. Hales[1981]는 이상적인 부유식 방파제는 우수한 파랑제어성능을 가짐과 동시에 형태가 단순하고, 안정성이 우수하고, 유지비가 적게 들어야 한다는 설계관점을 제시하였다. Yamamoto[1980]는 탄성로프로 계류된 부유식 방파제의 운

동과 투과율을 2차원 Green 함수법을 사용하여 구하였다. 그는 적절히 설계된 계류시스템은 부유식 방파제의 성능을 크게 향상시킬 수 있다고 하였다. Isaacson and Byres[1988]은 입사의 경사각도를 갖는 입사파에 대하여 부유식 방파제의 파랑제어성능을 해석할 수 있는 수치모델을 개발하였다. Johansson[1989]는 부유식 방파제 바닥면에 돌출된 수평판을 설치하면 파랑제어효과가 크게 향상된다는 사실을 밝혔다. Drimer[1992] 등은 고유함수전개법을 사용하여 2차원 사각형 부유식 방파제에 의한 파랑제어 효과를 살펴보았다. Sannasiraj[1998] 등은 유한요소법을 사용하여 사각형 단면을 갖는 2차원 부유식 방파제의 운동과 계류력을 해석하였고 모형실험결과와 비교하였다. 이때 계류선의 강성계수를 현수선이론(catenary theory)으로부터 유도하였다.

본 논문에서는 사각형 부유식 방파제의 기본 설계에 사용될 수 있는 기초적인 정보를 얻고자 규칙파중 사각형 부유식 방파제에 의한 반사율과 투과율을 해석하였다. 해석방법으로 Drimer[1992] 등이 사용한 고유함수전개법을 사용하였는데 좀더 간단한 해석결과를 얻고자 사각형 부유식 방파제 하부의 파동장에서 국부파(local waves)의 영향을 무시하였다. 이러한 가정은 구조물 하부의 높이가 파장과 구조물의 폭에 비하여 작을 때 가능하다. 계류선은 Yamamoto[1980] 등이 도입한 선형 탄성 스프링으로 가정하였다. 이러한 가정하에서 얻은 해석결과와 타당성을 검증하기 위하여 유한요소법을 사용하여 얻은 수치해석의 결과와 비교하였다. 또한 전후방향, 수직방향, 횡방향의 부유식 방파제의 운동특성과 계류시스템이 파랑제어성능에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 문제의 정식화

z 축 방향으로 무한히 긴 사각형 부유식 방파제가 수심이 h 인 해역에 떠 있는 2차원 모델을 해석모델로 잡았다. $x-y$ 평면은 정수면을 나타내고 y 축의 윗 방향을 양의 방향으로 잡았다. 사각형 방파제의 흘수는 d 이며, 폭은 $2a$ 이다. 유체를 비압축성, 비점성 그리고 비회전성이라 가정하면 속도포텐셜을 도입할 수 있다. 입사파

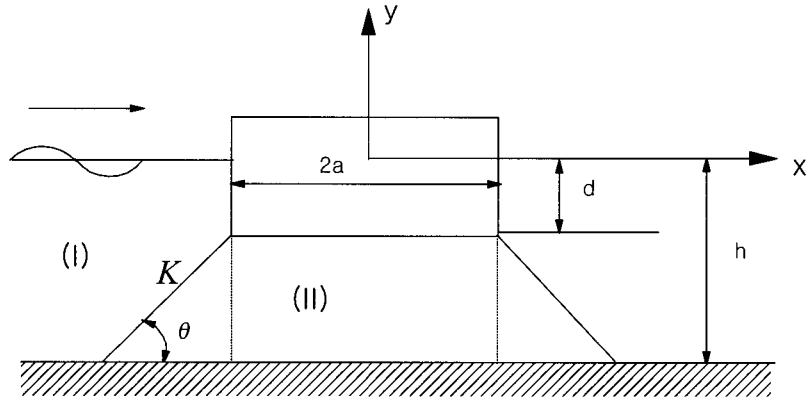


Fig. 1 Definition sketch of floating rectangular breakwater.

가 주파수 ω 을 갖고 x 축의 양의 방향으로 진행한다. 이때 속도포텐셜과 부유체의 운동변위는 주파수 ω 갖고 조화운동을 한다.

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

$$\xi_{2,3,4}(t) = \text{Re}\{\xi_{2,3,4}e^{-i\omega t}\}$$

여기서 밑첨자 2, 3, 4는 각각 전후방향(surge), 수직방향(heave), 횡방향(roll)의 운동모드를 나타낸다. $\phi(x, y)$ 는 전체포텐셜을 나타내며, 전체포텐셜은 회절포텐셜과 방사포텐셜의 합으로 표현된다.

$$\phi(x, y) = \phi_T(x, y) + \sum_{i=2}^4 \xi_i \phi_i(x, y) \quad (2)$$

여기서 회절포텐셜(ϕ_T)은 입사파의 포텐셜과 산란포텐셜의 합으로 다음과 같다.

$$\phi_T(x, y) = \phi_I(x, y) + \phi_S(x, y) \quad (3)$$

입사파의 속도포텐셜은

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

이다. 여기서 g 는 중력가속도를 k 는 파수(wavenumber)이다. 파수 k 는 선형분산식($\omega^2 = gk \tanh kh$)을 만족한다.

2.1 회절문제

고정된 사각형 방파제에 의한 파의 변형을 해석하기 위하여 회절문제를 풀어야 한다. 고유함수 전개법에 따라 유체영역을 Fig. 1과 같이 두개의 영역(I, II)으로 분리한다. 영역 I에서의 속도포텐셜은 Laplace방정식과 자유표면경계조건, 바닥경계조건을 만족하고, 영역 II에서의 속도포텐셜은 Laplace방정식과 바닥경계조건 그리고 물체경계조건식을 만족하여야 한다. 해석모델로 잡은 방파제가 y 축에 대하여 대칭이므로 방파제에 의하여 산란된 파동장을 y 축에 대하여 대칭성분과 비대칭성분으로 나눌 수 있다.

$$\phi_T(x, y) = \begin{cases} \phi_S^S(x, y) + \phi_A^A(x, y) & \text{for } x < 0, \end{cases} \quad (5)$$

$$\phi_T(x, y) = \begin{cases} \phi_S^S(-x, y) - \phi_A^A(-x, y) & \text{for } x > 0, \end{cases}$$

여기서 윗첨자 S, A는 각각 대칭성분과 비대칭성분을 뜻한다.

영역 I에서의 속도포텐셜은 변수분리법을 적용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\phi_T^{(I)S,A}(x, y) = a_{70}^{S,A} f_o(y) [e^{ik(x+a)} + R^{S,A} e^{-ik(x+a)}] + \sum_{n=1}^{\infty} a_{7n}^{S,A} f_n(y) e^{k_n(x+a)} \quad (6)$$

여기서 고유치는

$$\begin{cases} k \tanh kh = \frac{\omega^2}{g} & n=0 \\ k_n \tan k_n h = -\frac{\omega^2}{g} & n \geq 1 \end{cases}$$

이며, 고유함수는

$$f_n(y) = \begin{cases} \frac{\sqrt{2} \cosh k(y+h)}{[h + \sigma^{-1} \sinh^2 kh]^{1/2}} & n=0 \\ \frac{\sqrt{2} \cos k_n(y+h)}{[h - \sigma^{-1} \sin^2 k_n h]^{1/2}} & n \geq 1 \end{cases}$$

이다. $a_{70}^{S,A}$ 와 σ 는 다음과 같이 정의된다.

$$a_{70}^{S,A} = -\frac{igA}{2\omega f_o(0)}, \sigma = \frac{\omega^2}{g} \quad (7)$$

고정된 구조물에 의한 반사율과 투과율은

$$\begin{aligned} R_f &= \frac{1}{2}(R^S + R^A) \\ T_r &= \frac{1}{2}(R^S - R^A) \end{aligned} \quad (8)$$

이다. 유체영역 II에서 속도포텐셜은 국부항들을 무시하면

$$\phi_7^{(m)} = \phi_o + vx \quad -a < x < 0 \quad (9)$$

이다. 각 영역에서의 미지수 $R^{S,A}$, $a_{7n}^{S,A}$, ϕ_o , v 을 얻기 위하여 영역 I의 해와 영역 II해를 정합시켜야 한다. 먼저 $x = -a$ 에서 두 영역의 수평속도는 서로 같아야 한다.

$$\frac{\partial \phi_7^{(DS)}}{\partial x} = 0 \quad -h < y < -d, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \phi_7^{(DA)}}{\partial x} = \begin{cases} 0 & -d < y < 0 \\ v & -h < y < -d. \end{cases}$$

고유함수 $f_n(y)$ 의 직교성($\int_{-h}^0 f_n(y)f_m(y)dy = \delta_{nm}$)을 이용하여 식(6)을 위식에 대입하여 정리하면 미지수 $R^{S,A}$, $a_{7n}^{S,A}$ 를 v 로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} R^S &= 1, a_{7n}^S = 0 \quad (n=1, 2, \dots), \\ R^A &= 1 + \frac{iU_o v}{ka_{70}^A}, a_{7n}^A = \frac{U_n v}{k_n} \quad (n=1, 2, \dots), \end{aligned} \quad (11)$$

여기서

$$U_n = \int_{-h}^{-d} f_n(y) dy \quad (n=0, 1, 2, \dots) \text{이다.}$$

미지수 v 를 구하기 위하여 다음과 같은 모우멘텀 보존식을 이용하자.

$$F = \int_{-h}^{-d} [P(-a, y) - P(a, y)] dy = M \frac{dV}{dt}, \quad (12)$$

여기서 $M = 2\rho a(h-d)$ 이며, $V = ve^{-i\omega t}$ 이다. P 는 동압력으로 베르누이 방정식으로부터 얻어진다($P = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t}$). 식(5), (6), (11)를 식(12)에 대입하여 v 를 구하면 다음과 같다.

$$P = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (13)$$

$$v = -\frac{2a_{70}^A U_o}{(h-d)a + \frac{iU_o^2}{k} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{U_n^2}{k_n}}$$

각 영역에서의 완전한 해를 구하기 위해서는 미지수 ϕ_o 을 알아야 한다. 이를 위하여 $x = -a$, $-h < y < -d$ 에서 두 영역에서의 속도포텐셜은 서로 같아야 한다는 정합조건식을 적용하여야 한다.

$$\int_{-h}^{-d} \phi_7^{(n)} dy = \int_{-h}^{-d} \phi_7^{(m)} dy \quad (14)$$

식(6)과 식(9)를 위식에 대입하여 정리하면 ϕ_o 를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\phi_o = \frac{2a_{70}^S U_o}{(h-d)} \quad (15)$$

식(8), 식(11), 식(13)을 이용하여 고정된 사각형 방파제에 의한 투과율과 반사율을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} T_r &= \frac{iU_o^2/k}{(h-d)a + \frac{iU_o^2}{k} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{U_n^2}{k_n}}, \\ R_f &= 1 - T_r \end{aligned} \quad (16)$$

부유식 방파제에 작용하는 파기진력은 파압을 적분하여 구할 수 있다. 전후방향, 수직방향, 횡방향의 파기진력은

$$F_2 = \text{Re}(f_{72} e^{-i\omega t})$$

$$f_{72} = 4 a \int_0^S i\omega \rho [W_o - T_r (W_o - \frac{ik}{U_o} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{U_n W_n}{k_n})]$$

$$F_4 = \text{Re}(f_{74} e^{-i\omega t})$$

$$f_{74} = 4 a \int_0^S i\omega \rho \{ -\mathcal{W}_o + T_r [\mathcal{W}_o - \frac{ik}{U_o} (\sum_{n=1}^{\infty} \frac{U_n W_n}{k_n} - \frac{a^3}{3})] \} \quad (17)$$

이다. 여기서 $W_n = \int_{-d}^0 f_n dy$, $\mathcal{W}_n = \int_{-d}^0 y f_n dy$ 이다.

2.2 방사문제

부유체의 수직운동에 의하여 야기되는 유동은 y축에 대칭이며, 전후방향과 횡방향 운동에 의해 야기된 유동은 y축에 비대칭이다. 전후방향 운동에 의한 영역 I에서의 속도포텐셜은 다음과 같다.

$$\phi_2^{(I)} = a_{20} f_o e^{-ik(x+a)} + \sum_{n=1}^{\infty} a_{2n} f_n e^{k_n(x+a)}, \quad x < -a \quad (18)$$

영역 II에서의 속도포텐셜 $\phi_2^{(II)} = vx$ 이다. $x = -a$ 에서 두 영역에서의 수평속도가 같다는 정합조건식으로부터 a_{20} , a_{2n} 을 v 로 표현할 수 있다.

$$a_{20} = \frac{i}{k} v U_o + \frac{\omega}{k} W_o, \quad a_{2n} = \frac{1}{k_n} (v U_n - i\omega W_n) \quad (19)$$

위식에서 v 을 구하기 위하여 식(14)에 주어진 속도포텐셜이 서로 같다는 정합조건식을 적용한다. 이로부터 얻어진 미지수 v 는 다음과 같다.

$$v = \omega (i \sum_{n=1}^{\infty} \frac{U_n W_n}{k_n} - \frac{U_o W_o}{k}) / (a(h-d) + \frac{iU_o^2}{k} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{U_n^2}{k_n}) \quad (20)$$

횡운동에 의한 유동은 전후방향 운동과 같이 y축에 비대칭이다. 앞선 방법과 같이 영역 I에서의 속도포텐셜은 변수분리법을 사용하여 아래와 같이 표현된다.

$$\phi_4^{(I)} = a_{40} f_o e^{-ik(x+a)} + \sum_{n=1}^{\infty} a_{4n} f_n e^{k_n(x+a)}, \quad x < -a \quad (21)$$

영역 II에서 횡운동에 대한 물체 경계조건식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi_4^{(II)}}{\partial y} = -i\omega x, \quad y = -d \quad (22)$$

영역 II에서의 속도포텐셜은 제차해(homogeneous solution)와 특별해(particular solution)의 합으로 표현된다. 제차해는 전후 방향 운동에서와 같이 y축에 비대칭 함수로 Cx 로 표현할 수 있으며 물체 경계조건식으로부터 생기는 특별해는 경계치문제를 풀어 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\phi_4^{(II)} = \frac{i\omega x}{6(h-d)} [x^2 + 3h^2 - 3(h+y)^2] + Cx \quad (23)$$

먼저 $x = -a$ 에서 수평속도가 서로 같다는 정합조건식을 적용하면 a_{4n} ($n=0, 1, 2, \dots$)을 C 로 표현할 수가 있다.

$$a_{40} = A_o + \frac{iU_o C}{k}, \quad a_{4n} = A_n + \frac{U_n C}{k_n}, \quad (24)$$

여기서

$$A_o = -\frac{\omega}{k} \left\{ \frac{1}{2(h-d)} [(a^2 + h^2)U_o - \mathcal{T}_o] + W_o \right\}$$

$$A_n = \frac{i\omega}{k_n} \left\{ \frac{1}{2(h-d)} [(a^2 + h^2)U_n - \mathcal{T}_n] + W_n \right\}$$

이며, 새로운 변수 $\mathcal{T}_n = \int_{-h}^{-d} (y+h)^2 f_n(y) dy$

이다.

미지수 C 을 구하기 위하여 남아 있는 정합조건 식(14)을 적용한다. 이로부터 얻어진 미지수 C 는 다음과 같다.

$$C = - \left[\frac{i\omega a}{6} (a^2 + 3h^2 - (h-d)^2) + A_o U_o + \sum_{n=1}^{\infty} A_n U_n \right] / \left[\frac{iU_o^2}{k} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{U_n^2}{k_n} + a(h-d) \right] \quad (25)$$

부유체의 수직운동에 의하여 야기된 유동은 y 축에 대칭이다. 먼저 영역 I에서의 속도포텐셜은 앞에서와 같이 변수분리법을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\phi_3^{(j)} = a_{30} f_o e^{-ik(x+a)} + \sum_{n=1}^{\infty} a_{3n} f_n e^{k_n(x+a)}, \quad x < -a \quad (26)$$

영역 II에서의 해는 제차해(ϕ_o)와 Laplace방정식과 해지면 경계조건 그리고 부유체바닥에서의 경계조건($\frac{\partial \phi_3^{(m)}}{\partial y} = -i\omega$)을 만족하는 특별해의 합으로 표현된다.

$$\phi_3^{(m)} = - \frac{i\omega}{2(h-d)} (y^2 + 2hy - x^2) + \phi_o, \quad -a < x < 0 \quad (27)$$

식(26)과 식(27)로부터 수평속도를 구한 뒤 $x = -a$ 에서 정합하면 영역 I에서의 미지수 a_{3n} ($n = 0, 1, \dots$)을 구할 수 있다.

$$a_{30} = \frac{\omega a U_o}{k(h-d)}, \quad a_{3n} = - \frac{i\omega a}{k_n(h-d)} U_n \quad (28)$$

영역 II에서의 미지수 ϕ_o 를 구하기 위하여 앞에서와 같이 영역 I과 II에서 속도포텐셜을 $x = -a$ 에서 정합한다. 정합을 통하여 구한 ϕ_o 는 다음과 같다.

$$\phi_o = \frac{\omega a}{k(h-d)^2} U_o^2 - \frac{i\omega a}{(h-d)^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{U_n^2}{k_n} + \frac{i\omega}{2(h-d)} \left[\frac{(h-d)^2}{3} - h^2 - a^2 \right] \quad (29)$$

각 영역에서의 완전한 해로부터 전후방향, 수직방향, 횡방향의 동유체력은 동압력을 구조물에 대하여 적분하여 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{22} &= Re(f_{22} e^{-i\omega t}) \\ f_{22} &= 2i\omega\rho (a_{20} W_o + \sum_{n=1}^{\infty} a_{2n} W_n) \\ F_{24} &= Re(f_{24} e^{-i\omega t}) \\ f_{24} &= 2i\omega\rho \left[-(a_{20} \mathcal{W}_o + \sum_{n=1}^{\infty} a_{2n} \mathcal{W}_n) + \frac{a^3}{3} \right] \\ F_{24} &= Re(f_{24} e^{-i\omega t}) \\ f_{24} &= 2i\omega\rho (a_{40} W_o + \sum_{n=1}^{\infty} a_{4n} W_n) \\ F_{33} &= Re(f_{33} e^{-i\omega t}) \\ f_{33} &= \omega^2 \left[\rho \frac{2a}{h-d} \left(\frac{a}{h-d} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{U_n^2}{k_n} + \frac{a^2 + (h-d)^2}{3} \right) \right] + i\omega \left(\rho \frac{2\omega a^2}{k(h-d)^2} U_o^2 \right) \\ F_{44} &= Re(f_{44} e^{-i\omega t}) \\ f_{44} &= 2i\omega\rho \left[-(a_{40} \mathcal{W}_o + \sum_{n=1}^{\infty} a_{4n} \mathcal{W}_n) + \frac{i\omega a^3}{6(h-d)} \left(\frac{a^2}{5} + 2hd - d^2 \right) + C \frac{a^3}{3} \right] \end{aligned} \quad (30)$$

동유체력으로부터 부가질량과 감쇠력을 구할 수 있다. 동유체력의 실수부는 부가질량이며 허수부는 감쇠력이다.

$$f_{ij} = \omega^2 a_{ij} + i\omega b_{ij} \quad (31)$$

2.3 운동방정식

앞절에서 회절문제와 방사문제를 풀어 파기진력과 동유체력(부가질량, 감쇠계수)을 구하였다. 이 값들을 이용하여 부유식 방파제의 운동변위를 구하기 위해서는 다음과 같은 운동방정식을 풀어야 한다.

$$\begin{aligned} [-\omega^2(m + a_{22}) - i\omega b_{22}] \xi_2 - (\omega^2 a_{24} - i\omega b_{24}) \xi_4 + X_2 &= Af_{72}, \\ [-\omega^2(m + a_{33}) - i\omega b_{33} + 2\rho ga] \xi_3 + X_3 &= Af_{73}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &[-\omega^2 a_{42} - i\omega b_{42} + (KG - d)m\omega^2]\xi_2 \\
 &+ [-\omega^2(I + a_{44}) - i\omega b_{44} + mgGM]\xi_4 + X_4 \\
 &= Af_{74},
 \end{aligned}
 \tag{32}$$

여기서 (X_2, X_3, X_4) 는 각각 전후, 수직, 횡방향의 계류력을 나타내며, KG 는 부유체의 바닥에서 무게중심까지의 수직거리 그리고 GM 는 메타센터 높이이다. m 은 부유식 방파제의 무게로 $2\rho ad$ 이며, $I(=mx^2)$ 는 횡방향의 관성모멘트로 질량과 관성반경(x) 제곱의 곱으로 표시된다.

횡방향의 운동이 투과율에 큰 영향을 미치지 않으므로 횡방향의 계류력(X_4)을 무시하면(X_2, X_3)는 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 X_2 &= 2[(K - X_o)\cos^2\theta + X_o]\xi_2 + \\
 &2(K - X_o)\cos\theta\sin\theta\xi_3, \\
 X_3 &= 2(K - X_o)\cos\theta\sin\theta\xi_2 + \\
 &2[(K - X_o)\sin^2\theta + X_o]\xi_3,
 \end{aligned}
 \tag{33}$$

여기서 K 는 스프링의 강성계수, X_o 는 초기

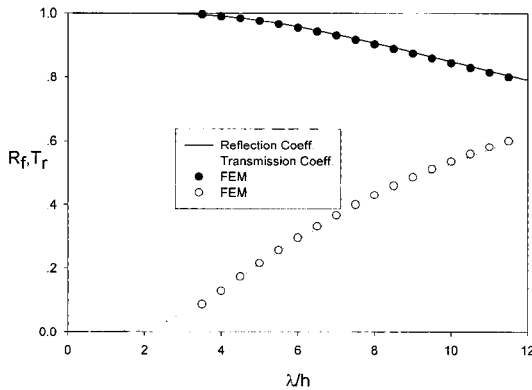


Fig. 2 Reflection and transmission coefficient for fixed rectangular breakwater. ($2a/h = 2, d/h = 0.5$)

장력을, θ 는 계류삭과 해저면이 이루는 각도를 의미한다.

부유식 방파제의 운동을 고려한 투과율과 반사율은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 T_B &= \frac{i\omega}{g}(2a_{70}^S T - \xi_2 a_{20} + \\
 &\xi_3 a_{30} - \xi_4 a_{40})f_o(0)e^{-2ikB}, \\
 R_B &= \frac{i\omega}{g}(2a_{70}^S T + \xi_2 a_{20} + \\
 &\xi_3 a_{30} + \xi_4 a_{40})f_o(0).
 \end{aligned}
 \tag{34}$$

3. 계산결과 및 고찰

Fig. 2는 $2a/h = 2.0, d/h = 0.5$ 인 고정된 사각형 방파제에 의한 반사율과 투과율을 보여주고 있다. x 축은 수심으로 무차원시킨 파장으로 잡았다. 여기서 실선은 해석해를 나타내며, 동그라미는 유한요소법을 사용한 수치계산의 결과이다. 부유체 하부의 영역 II에서 국부파의 영향을 무시했음에도 불구하고 해석해와 수치해는 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 파장이 커질수록 투과율이 점점 증가하며 반사율은 감소하고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 3은 사각형 부유식 방파제 운동에 따른 동유체력(부가질량, 감쇠력)을 그려보았다. 여기서 실선은 부가질량이며, 점선은 감쇠력이다. 전후방향의 동유체력을 살펴볼 때 해석해와 수치해가 잘 일치함을 볼 수 있다. 그러나 수직방향의 부가질량에서 두 결과의 차이를 볼 수 있다. 이는 부유체 하부의 파동장에서 국부항들을 무시한 결과로 판단된다. Fig. 4는 같은 계산조건에서 전후방향과 수직방향의 파기진력에 대한 결과를 보여주고 있다. 실선은 해석해이며, 동그라미는 수치해이다. 두 결과는 전 주파수에 걸쳐서 잘 일치하고 있음을 확인하였다.

계류로프가 없이 자유롭게 떠 있는 사각형 방파제의 전후, 수직, 횡방향의 운동변위를 Fig. 5에 그렸다. 사각형의 형상은 앞선 그림과 동일하며, 무차원된 GM 과 KG 는 각각 $GM/h = 0.1, KG/h = 0.48$ 이다. 관성반경은 $x = 0.35 \times (2a)$ 로 방파제의 폭의 0.35배로 하였다. 파장이 길어

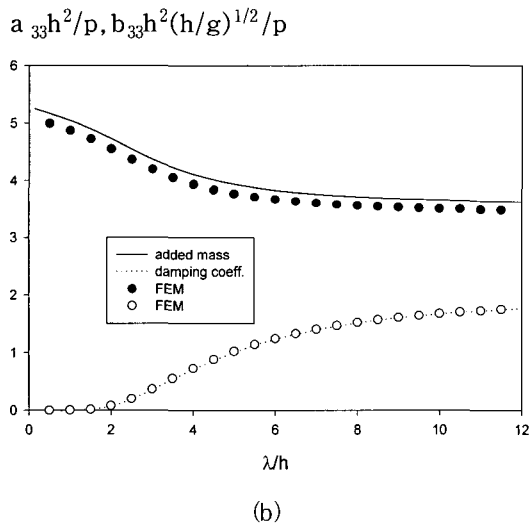
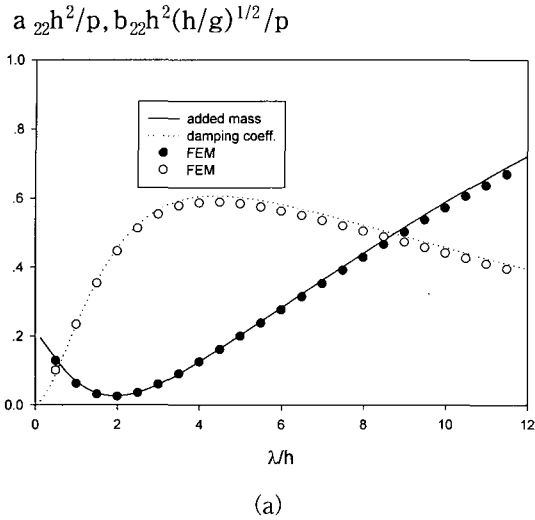


Fig. 3 Comparison of sway and heave hydrodynamic coefficients between analytic and numerical results ($2a/h=2, d/h=0.5$).

짐에 따라 전후방향과 횡방향의 운동변위는 증가하고 있음을 볼 수 있다. 그러나 수직운동의 변위는 $\lambda/h=8$ 까지 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보여주고 있다.

Fig. 6은 고정된 방파제와 구속없이 자유롭게 떠 있는 방파제 그리고 계류된 방파제에 의한 투과율을 비교하였다. 실선은 방파제가 운동없이

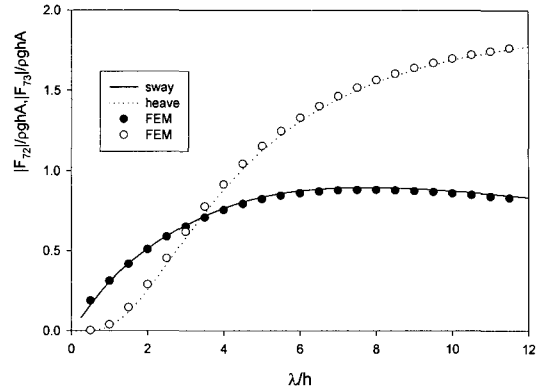


Fig. 4 Comparison of wave exciting forces between analytic and numerical results. ($2a/h=2, d/h=0.5$)

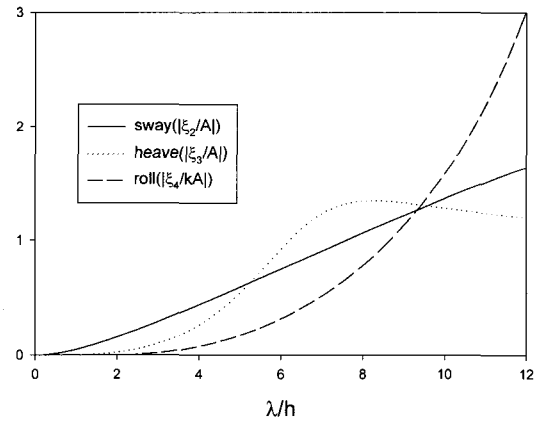


Fig. 5 Motion amplitude of freely floating rectangular breakwater ($2a/h=2, d/h=0.5, GM/h=0.1, KG/h=0.48$).

고정된 경우이며, 점선은 방파제가 자유롭게 떠 있는 경우를 그리고 굵은 점선은 방파제가 계류되었을 때의 투과율을 나타낸다. 계류로프는 해저면과 45도의 각도로 양쪽 2개 설치되었다. 계류로프의 강성계수는 $K/\rho gh=0.5$ 이며 초기장력은 없다고 가정하였다. 전반적으로 고정된 방파제에 의한 투과율이 더 작은 것을 알 수 있다. 그러나 방파제의 운동을 허용한 경우 방파제의 운동에 의하여 발생한 파의 영향으로 특정한 주

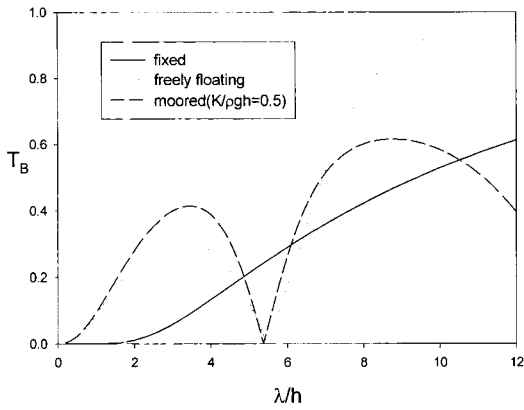


Fig. 6 Comparison of transmission coefficient between fixed and freely floating breakwater. ($2a/h = 2, d/h = 0.5, GM/h = 0.1, KG/h = 0.48$)

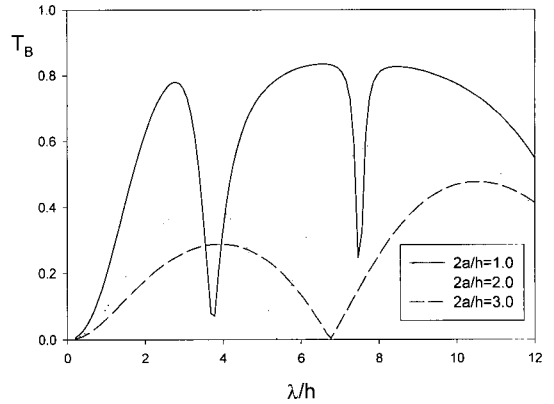


Fig. 7 Transmission coefficients due to moored breakwater for various breadths. ($d/h = 0.5, GM/h = 0.1, KG/h = 0.48, K/\rho gh = 0.5$)

파수 $\lambda/h = 5.5$ 주위에서는 투과율이 0에 가까운 값을 보이고 있다. 계류로프의 설치는 계류로프를 설치하지 않았을 때와 비교하면 장파영역에서 투과율을 줄여주는 효과가 있다.

Fig. 7은 계류된 방파제의 폭을 변화시켰을 때 투과율의 변화를 보여주고 있다. 예상대로 방파제의 폭이 커질수록 투과율이 줄어들며, 투과율이 0이 되는 부차원된 파장값이 장파영역으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 그림에서 수십의 3배 정도의 폭을 갖는 방파제를 설치하면 계산된 파장영역내에서 투과율이 0.5이하가 됨을 알 수 있다. Fig. 8은 방파제의 흘수를 변화시키면서 계산된 투과율을 보여주고 있다. 흥미로운 사실은 방파제의 흘수가 가장 작은 $d/h = 0.2$ 인 경우가 $\lambda/h < 7$ 인 단파영역에서는 가장 우수한 방파 성능을 보이지만 $\lambda/h > 7$ 인 장파영역으로 넘어가면 흘수가 가장 큰 $d/h = 0.8$ 인 방파제가 가장 우수한 파 차단성능을 보이고 있다.

4. 결 론

지금까지 부방파제의 기본설계에 사용할 수 있는 기초정보를 제공하고자 사각형 부유식 방파제의 파랑제어성능을 살펴보았다. 이로부터 아래와 같은 결론을 도출할 수 있었다.

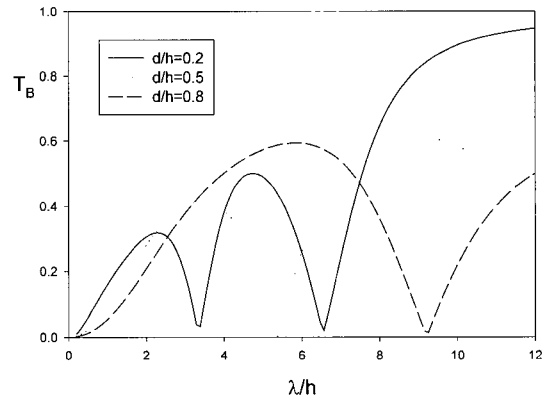


Fig. 8 Transmission coefficients due to moored breakwater for various drafts. ($2a/h = 2.0, GM/h = 0.1, KG/h = 0.48, K/\rho gh = 0.5$)

- 1) 사각형 방파제 하부의 유체영역에서 국부파의 영향을 무시한 고유함수진개법의 해석결과는 유한요소법을 사용한 수치계산결과와 잘 일치함을 확인하였다.
- 2) 부유식 방파제의 운동은 방사파를 만들어 고정된 방파제와는 다른 반사율과 투과율을 보임을 확인하였다. 방파제의 운동을 허용한 경우 특정주파수에서 입사파는 방파제를 투과

되지 못하고 모두 반사되는 사실을 계산결과를 통하여 발견하였다.

- 3) 파랑제어성능에 지표가 되는 투과율은 방파제의 폭과 흘수 변화에 따라 크게 달라지는 것을 확인하였다. 방파제의 폭이 길수록 전주파수영역내에서 파랑제어성능은 우수하다. 그러나 흘수가 작을 때는 단파영역에서 효과적이나 장파영역에서는 흘수가 클수록 투과율이 작아진다.
- 4) 계류시스템은 부유식 방파제의 운동변위뿐만 아니라 투과율에 큰 영향을 미침을 발견하였다. 즉, 방파제의 단면형상과 함께 계류로프의 강성계수, 초기장력, 설치지점 등이 부유식 방파제의 파랑제어성능을 결정하는 중요한 설계변수이다.

참고문헌

- [1] 한국기계연구원, 1998, "해역정온화 구조물 설계기술 개발" 한국기계연구원 보고서 UCN 6760-664M.
- [2] Adee, B. H., 1975, "Analysis of floating breakwater performance", Pro. of Symposium on Modelling Techniques. ASCE. 1585~1602.
- [3] Adee, B. H. and Martin, W., 1974, "Theoretical analysis of floating breakwater performance", Floating Breakwater Conference Papers, University of Rhode Island, Marine Technical Report Series, No. 24, 21~39.
- [4] Carver, R. D., 1979, "Floating breakwater wave-attenuation tests for east bay marina olympia harbor", Washington Technical Report HL-79-13, US Army Engineer Waterway Experiment Station.
- [5] Drimer, N., Agnon, Y. and Stiassnie, M., 1992, "A simplified analytical model for a floating breakwater in water of finite depth", Applied Ocean Research. Vol. 14, 33~41.
- [6] Hale, L. Z., 1981, "Floating breakwaters-State of the art", CERC, Technical report 81-1.
- [7] Issacson, M. and Byres, R., 1988, "Floating breakwater response to wave action", Pro. of the 21st Coastal Engineering Conference, Vol. 3, 2189~2200.
- [8] Johansson, M., 1989, "Barrier-type breakwater: Transmission, Reflection and Forces", Ph. D. dissertation, School of Civil Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden.
- [9] Sannasiraj, S. A., Sundar, V. and Sundaravadivelu, R., 1998, "Mooring forces and motion response of pontoon-type floating breakwaters", Ocean Engineering, Vol. 25, No. 1, 27~48.
- [10] Sutko, A. A. and Haden, E. L., 1974, "The effect of surge, heave and pitch on the performance of a floating breakwater", Floating Breakwaters Conference Papers, University of Rhode Island, Marine Technical Report Series No. 24, 21~39.
- [11] Yamamoto, T., Yoshida, A. and Ijima, T., 1980, "Dynamics of elastically moored floating objects", Applied Ocean Research, Vol. 2, 85~92.