

규칙파중 상자형 부유식 방파제 특성에 대한 연구

김도영*, 송무석**, 김용섭**, 김현주***

A Study on the Characteristics of Pontoon Type Floating Breakwaters in Regular Waves.

D.Y. Kim*, M. Song**, Y.S. Kim** and H.J. Kim***

요 약

규칙파중 상자형 부유식 방파제의 특성을 살펴보기 위하여 실험과 이론 연구를 수행하였다. 선형포텐셜이론으로 부유식방파제의 특성을 잘 해석할 수 있음을 확인하였다. 투과계수는 파장/부체폭과 부체폭/부체흘수의 비의 함수이며 최소 투과계수가 나타나는 점이 있음을 확인하였다. 부체폭/부체흘수 비가 클수록 최소 투과계수를 가지는 파장/부체폭의 값이 커지며, 과도한 계류력은 부유식방파제의 성능을 저하시킬 수 있다.

Abstract

An experimental and numerical investigation was made to examine the characteristics of pontoon type floating breakwaters(FBW) in regular waves. Motion responses of FBW and wave transmission coefficients are observed and compared with the results based on the linear potential theory. The linear potential theory is found to be a successful tool to investigate the characteristics of the floating breakwaters. We confirm that there exists a minimum wave transmission coefficient which is a function of wave-length/beam and beam/draft ratio. As beam/draft ratio increases the value of wave-length/beam ratio where the minimum wave transmission coefficient occurs increases. Excessive mooring stiffness can deteriorate the performance of the floating breakwaters.

접수일자: 2000년 2월 17일, 승인일자: 2000년 6월 14일

*정회원, 홍익대학교 조선해양공학과 교수(E-mail: dykim@hongik.ac.kr)

**정회원, 홍익대학교 조선해양공학과 교수

***정회원, 한국해양연구소 해양개발시스템 연구본부

1. 서 언

육지 면적의 부족과 육상자원의 고갈문제가 심각하게 대두되고 있는 현 시점에서, 해양개발을 이를 해결할 수 있는 방법의 하나이다.

최근 생산 및 산업공간으로서의 해양공간 이용이 활발해지고 있다. 공업용지로는 임해부 매립 조성이 행해져 왔으며, 특히 최근에는 그 규모가 비약적으로 증가하여 항만 내 공유수면의 매립을 통하여 고도의 경제성장에 기여한 반면, 해양의 오염 및 자연 해안의 상실 등이 사회 문제를 야기하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 하나의 방법으로서, 인근 주민의 반대로 육상에 입지하기가 점점 곤란해진 폐기물처리장, 발전소 등과 같은 시설을 부유식 해양 구조물 등의 인공섬 위에 설치하는 일이 검토되고 있다(대한조선학회 [1996]). 또한 요트, 윈드서핑, 모터보트 등 해양 레저도 점차 보급될 것이며 이에 따라 마리나(marina)와 해양레저 공원 시설의 설치가 늘어 나게 될 것으로 보인다. 그리고 현재는 해양공간의 이용이 대부분 연안에 집중되어 있지만 멀지 않은 미래에는 보다 먼바다로 진출이 늘어날 것으로 예상된다.

해양에 설치되는 시설의 기능성과 안전성을 극대화하기 위하여 주위에 방파제를 설치하는 것이 일반적이다. 하지만 기존에 많이 사용되어오던 고정식 방파제는 방파 효율은 우수하지만, 설치에 많은 시간과 경비가 소요되고 환경 및 생태계에 원치 않는 변화를 줄 수 있으며 설치 예정지의 수심, 지질 그리고 육지로부터의 거리등의 여건에 제약을 받는 단점이 있다(Tsinker [1995]). 특히 주위 환경에 미치는 부정적인 영향 때문에 기존의 고정식 방파제의 단점을 보완하는 해수교환형이나 투수성 방파제에 대한 연구가 진행되고 있으며 일부 설치되고 있으나, 고정식 방파제는 구조상 큰 효과를 보기 힘든 실정이다. 또한 구조물이 먼 바다에 설치될 경우 고정식 방파제의 설치 불가능하게 된다.

이에 반해 부유식 방파제는 환경에 미치는 영향을 최소화 할 수 있으며, 수심에 영향을 많이 받

지 않고, 설치 기간이 짧으며, 설치 비용이 고정식 보다 저렴한 이유로 해서 최근 부유식 방파제에 대한 연구와 도입이 여러 나라에서 고려되고 있다(Grinyer[1995], Mani[1991], Nekado et al.[1980], Sugawara et al.[1984]).

부유식 방파제는 고정식의 문제점을 상당히 해소할 수 있는 반면 부유식 방파제는 파장에 따라 달라지긴 하지만 파의 부분적인 투과를 허용할 수밖에 없기 때문에 방파 성능과 안전성이 다소 떨어지는 단점이 있다. 따라서 부유식 방파제를 사용하기 위해서는 부유식 방파제의 특성을 파악하여 주어진 조건에서 방파 효율을 극대화하는 것이 가장 중요한 문제가 된다.

본 연구는 안전성과 방파 성능의 극대화가 보장되는 부유식 소파장치의 기본설계에 사용될 수 있는 기초적인 정보를 얻고자, 상자형 부유식 방파제를 중심으로 규칙파 중의 방파 성능에 대하여 살펴보았다. 송무석 등[1998]은 규칙파 중 수면 근처에 고정된 상자형 방파제의 특성에 대한 연구를 수행하였으며, 이 논문은 이에 연속되는 연구로서 2차원 조파수조에서 3자유도 운동을 허용하는 조건하에서 방파 성능을 실험하였고 수치해석의 결과와 비교하여 수치모사 가능성을 검토하였다.

2. 부유식 방파제의 특성 실험

본 연구에 사용된 조파수조는 길이 20m, 폭 0.5m 그리고 수심을 0.45m 내외로 조정하여 사용할 수 있는 장비이며 플랩 형식의 조파기와 비치 형식의 소파장치를 이용하고 있다. 실험에 사용된 파의 파장은 0.8m - 1.7m, 파고는 2.0cm - 3.8cm, 파경사도(wave steepness)는 0.01 - 0.05 정도의 규칙파이다. 조파수조의 구조와 실험에 사용된 장비의 배열은 송무석 등[1998]에 자세히 표시되어 있다. 이 번 실험에서는 수직, 수평 및 회전운동을 자유롭게 허용하도록 제작된 가이드에 모델을 설치하고 계류계를 대신하는 선형 스프링을 연결하였고, 스프링계수는 10N/m와 160N/m의 두 가지 종류를 사용하였다. 각각은

느슨한 상태와 팽팽한 상태의 계류상태를 대표한다. 계류모델의 폭은 40cm인 것을 사용하였다. 부유체의 흘수는 10cm, 15cm 그리고 20cm 세 가지를 사용하였다. 모델의 거동은 비디오 카메라를 이용하여 녹화하고 동시에 3개의 Kyowa사 5G 가속도계를 이용하여 가속도를 측정하였다. 입사 및 투과파의 계측은 Churchill사의 용량식 파고계와 증폭장치를 사용하였고 신호는 Keithley 1082HR/DA 보드를 사용하여 60 - 80초 동안 50Hz로 저장하였다. 파고계는 모델 전방에 2개, 후방에 투과파용으로 1개를 사용하였다.

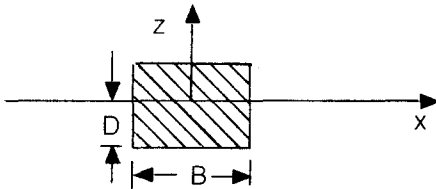


Fig. 1 Coordinate system and definition sketch

3. 부유식 방파제의 이론 계산

Fig. 1에 좌표계와 부유체의 기본 치수를 보여 주고 있다. 유체가 비점성 비압축성이라 가정을 하고, 유동을 비회전성이라 가정을 하면 속도포텐셜을 사용할 수 있다. 입사파의 크기가 작다고 가정을 하여 선형이론을 사용하기로 한다. 속도포텐셜은 다음 식을 만족해야 한다.

$$\nabla^2 \Phi(x, z, t) = 0 \text{ in } D \quad (1)$$

$$\Phi_H + g\Phi_z = 0 \text{ on } z = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \text{ on the bottom} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = V_n \text{ on the body} \quad (4)$$

여기서 D 는 유체영역을 나타내며, V_n 은 부유체 표면에서 법선 방향의 속도이며, 법선 방향은 유체영역 밖으로 향하는 방향을 양의 방향으로 정한다.

선형성을 이용하여 속도포텐셜을 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\Phi = \Phi_I + \Phi_D + \Phi_R \quad (5)$$

여기서 Φ_I 는 입사파포텐셜(incident wave potential)이고, Φ_D 는 산란(diffraction)포텐셜, Φ_R 은 발산(radiation)포텐셜을 나타낸다. 각 포텐셜은 라플라스방정식과 자유표면 경계조건, 바닥 경계조건을 만족하고, 물체의 경계면에서 다음과 같은 조건을 만족한다.

$$\frac{\partial \Phi_I}{\partial n} + \frac{\partial \Phi_D}{\partial n} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \Phi_R}{\partial n} = V_n \quad (7)$$

또한 산란포텐셜과 발산포텐셜은 무한 원방에서 방사조건을(radiation condition)을 만족해야 한다.

따라서 산란문제(diffraction problem)는 라플라스방정식, 자유표면, 바닥, 방사 경계조건들과 식(6)으로 주어진 물체경계조건으로 구성된 경계치문제로 정의된다. 발산문제도 산란문제와 거의 비슷한 형태의 경계치문제로 구성되는 데 물체의 경계조건이 식(7)로 주어지는 것만 다르다.

시간에 대해서 조화함수(time harmonic function)인 것을 가정하면, 속도포텐셜을 다음과 같이 복소 형태로 표시할 수 있다.

$$\Phi(x, z, t) = \text{Re}[\phi(x, z)e^{-i\omega t}] \quad (8)$$

$$\phi(x, z) = \phi_I + \phi_D + \phi_R \quad (9)$$

여기서 ω 는 파도의 주파수이고 ϕ , ϕ_I , ϕ_D , ϕ_R 은 복소포텐셜로서 각각 전체, 입사파, 산란파, 발산파 포텐셜을 나타낸다.

입사파포텐셜은 선형이론에 의하면 다음과 같이 표현된다.

$$\phi_I = -\frac{igA}{\omega} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} e^{ikx} \quad (10)$$

$$\omega^2 = gk \tanh kh \quad (11)$$

여기서 k 는 파수(wave number), h 는 수심, A 는 입사파의 진폭을, g 는 중력가속도를 나타낸다.

산란경계치 문제는 송무석 등 [1998]에 잘 정의 되어있다. 이제 2차원 평면에서의 부유체의 3 자유도 운동을 다음과 같이 표시하기로 한다.

$$x_j(t) = Re\{\xi_j e^{-i\omega t}\} \text{ for } j=1, 2, 3 \quad (12)$$

여기서 x_j 는 $j=1, 2, 3$ 일 때 각각 스웨이(sway) 변위 x , 히브(heave) 변위 z , 롤(roll) 변위 θ 를 나타낸다. ξ_j 는 복소변위가 된다.

발산포텐셜을 다음과 같이 나타내기로 한다.

$$\phi_R = Re\{\xi_j \phi_j e^{-i\omega t}\} \quad j=1, 2, 3 \quad (13)$$

여기서 ϕ_j 는 각 운동 모드별 복소포텐셜을 나타낸다.

식(12)과 식(13)을 이용하면 물체의 경계면에서의 조건을 표시하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = -i\omega n_j, \text{ for } j=1, 2, 3 \quad (14)$$

발산포텐셜에 의해서 발생하는 동압은 다음과 같이 된다.

$$p_R = -\rho \frac{\partial \phi_R}{\partial t} \quad (15)$$

따라서 부유체에 작용하는 파력은 다음과 같이 표시된다.

$$F_R^{(i)} = Re\left\{\rho \int_{S_c} p_R n_i ds\right\} \quad (16)$$

$$= Re\left\{i\omega \xi_j e^{-i\omega t} \rho \int_{S_c} \phi_j n_i ds\right\}$$

ϕ_j 를 실수부와 허수부로 나누면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\phi_j = \varphi_1^{(j)} + i \varphi_2^{(j)} \quad (17)$$

여기서 $\varphi_1^{(j)}$ 와 $\varphi_2^{(j)}$ 는 물체의 경계면에서 다음과 같은 조건을 만족한다.

$$\frac{\partial \varphi_1^{(j)}}{\partial n} = 0$$

$$\frac{\partial \varphi_2^{(j)}}{\partial n} = -\omega n_j, \text{ on the body} \quad (18)$$

한편 $F_R^{(i)}$ 를 다음과 같이 속도와 가속도에 비례하는 항으로 표시할 수 있다.

$$F_R^{(i)} = -\mu_{ij} \frac{\partial^2 x_j}{\partial t^2} - \lambda_{ij} \frac{\partial x_j}{\partial t} = Re\left\{(\mu_{ij} \omega^2 + i\omega \lambda_{ij}) \xi_j e^{-i\omega t}\right\} \quad (19)$$

식(17)을 식(16)에 대입하여 식(19)을 비교하면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} \mu_{ij} &= -\frac{\rho}{\omega} \int_{S_c} \varphi_2^{(j)} n_i ds \\ &= -\frac{\rho}{\omega} \int_{S_c} Im[\phi_j] n_i ds \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{ij} &= \rho \int_s \varphi_1^{(j)} n_i ds \\ &= \rho \int_s Re[\phi_j] n_i ds \end{aligned} \quad (21)$$

여기서 μ_{ij} 와 λ_{ij} 는 동유체력계수로 각각 부가 질량계수와 조파감쇠계수를 나타낸다.

전체포텐셜은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi = Re \left[\phi_I + \phi_D + \sum_{j=1}^3 \xi_j \phi_j \right] \quad (22)$$

따라서 자유표면의 형상은 다음식 에서 얻을 수 있다.

$$\eta(x, t) = - \frac{1}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Big|_{z=0} \quad (23)$$

투과계수는 다음과 같이 정의된다.

$$C_T = \frac{\eta_o^+}{A} \quad (24)$$

여기서 η_o^+ 는 물체에서 오른쪽으로 멀리 떨어진 지점에서의 파형의 진폭을 의미한다.

따라서 투과계수를 구하기 위해서는 식(22)에 포함되어 있는 ξ_j 를 계산해야 한다. 이것은 운동방정식을 풀어서 구할 수 있다. 운동방정식의 계산에서 필요한 파강제력(wave exciting force)은 산란문제의 해로부터 얻은 산란포텐셜을 사용하여 구할 수 있다. 운동방정식에 포함된 동유체력계수들은 발산포텐셜을 이용하여 구할 수 있다. 부유체의 3자유도 운동방정식의 해를 얻은 후, 각 운동모드의 응답과 각 운동모드의 발산포텐셜을 곱하면 전체 발산포텐셜을 얻을 수 있고, 입사포텐셜, 산란포텐셜, 그리고 발산포텐셜을 더하면 전체 포텐셜을 구할 수 있다. 산란포텐셜과 발산포텐셜의 수치계산 방법은 Liu 등[1982]과 Song 등[1996]의 방법을 따라 경계요소법과 정합조건을 사용하였다.

부유체의 3자유도 운동방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^3 [(m_{ij} + \mu_{ij}) \ddot{x}_j + \lambda_{ij} \dot{x}_j \\ + (B_{ij} + K_{ij}) x_j] = F_i^e \end{aligned} \quad (25)$$

여기서 x_i 는 각 방향의 변위, m_{ij} 는 질량계수(mass matrix), μ_{ij} 는 부가질량계수(added mass matrix), λ_{ij} 는 조파감쇠계수(wave damping coefficient matrix), B_{ij} 는 정복원력계수(hydrostatic stiffness matrix), K_{ij} 는 계류계에 의한 강성계수(mooring stiffness matrix)이고 F_i^e 는 파강제력(wave exciting force)을 나타낸다.

입사파를 규칙파로 가정을 하면 주파수영역에서 부유체의 운동방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^3 [(B_{ij} + K_{ij}) - \omega^2 (m_{ij} + \mu_{ij}) \\ - i\omega \lambda_{ij}] \xi_j = f_i \end{aligned} \quad (26)$$

여기서 ξ_i 와 f_i 는 각각 복소 변위와 힘을 나타낸다.

4. 결과 및 해석

4.1 파강제력과 동유체력계수

폭이 0.4m이고 $B/D=4$ 인 부유체에 걸리는 2차원 유체력을 이론과 실험을 비교하여 그 결과를 Fig. 2에 표시하였다 유체력의 계측방법은 송무석 등[1998]에 설명되어 있다. 실험 범위 내에서 이론과 계산이 서로 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 각 힘의 무차원화는 다음과 같이 하였다.

$$F_{x,z}' = \frac{F_{x,z}}{\frac{1}{2} \rho g B A} \quad (27)$$

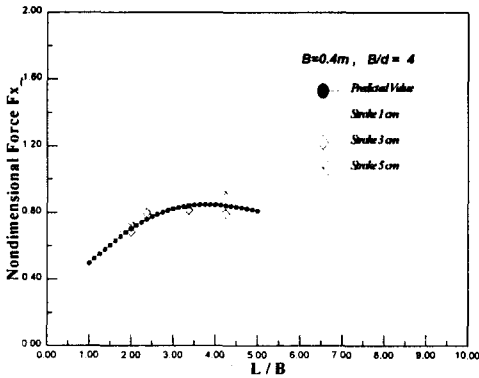


Fig. 2a Predicted and measured x-direction wave force in dimensionless form. B=0.4m, B/d=4.

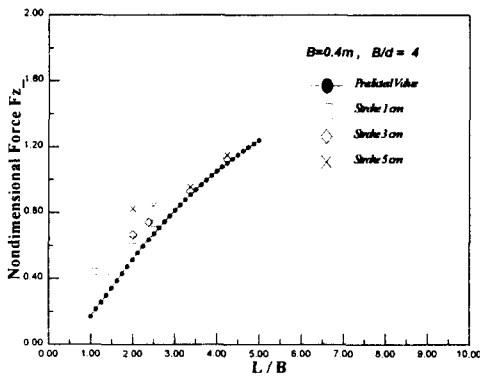


Fig. 2b Predicted and measured z-direction wave force in dimensionless form. B=0.4m, B/d=4.

동유체력계수의 계산을 검증하기 위하여 폭 0.4m 홀수 0.2m인 직사각형 2차원 단면 (모서리는 약간 둥근 모양임)에 대한 Vugut [1968]의 실험 결과와 비교하였다. 각 계수들의 무차원화는 다음과 같이 하였다.

$$\mu_{11}' = \frac{\mu_{11}}{\rho BD} \cdot \mu_{22}' = \frac{\mu_{22}}{\rho BD} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \mu_{31}' &= \frac{\mu_{31}}{\rho B^2 D} \cdot \mu_{31}' = \frac{\mu_{31}}{\rho B^2 D} \\ \mu_{33}' &= \frac{\mu_{33}}{\rho B^3 D} \\ \mu_{12}' &= \mu_{21}' = 0, \quad \mu_{23}' = \mu_{32}' = 0 \\ \lambda_{11}' &= \frac{\lambda_{11}}{\rho D \sqrt{2gB}} \cdot \lambda_{22}' = \frac{\lambda_{22}}{\rho D \sqrt{2gB}} \\ \lambda_{13}' &= \frac{\lambda_{13}}{\rho B D \sqrt{2gB}} \cdot \lambda_{31}' = \frac{\lambda_{31}}{\rho B D \sqrt{2gB}} \\ \lambda_{33}' &= \frac{\lambda_{33}}{\rho B^2 D \sqrt{2gB}} \\ \lambda_{12}' &= \lambda_{21}' = 0, \quad \lambda_{23}' = \lambda_{32}' = 0 \end{aligned}$$

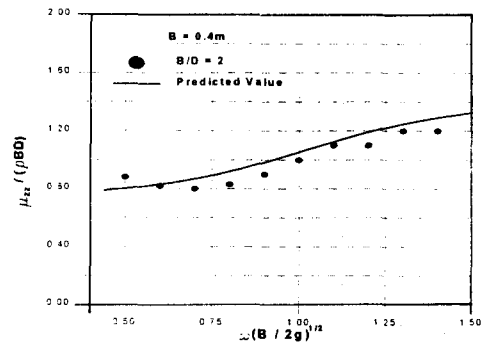


Fig. 3a Non-dimensional heave added mass coefficient μ'_{22} (μ'_{zz})

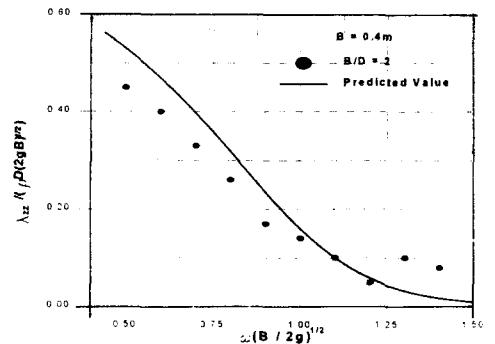


Fig. 3b Non-dimensional heave damping coefficient λ'_{22} (λ'_{zz}).

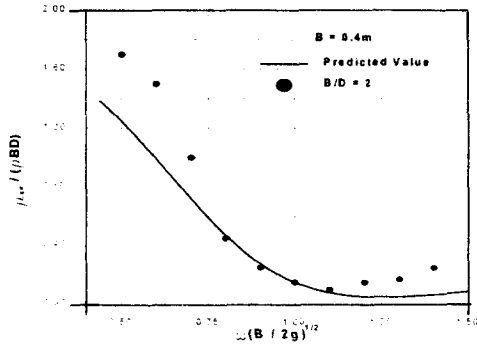


Fig. 3c Non-dimensional sway added mass coefficient $\mu'_{11} (\mu'_{xx})$

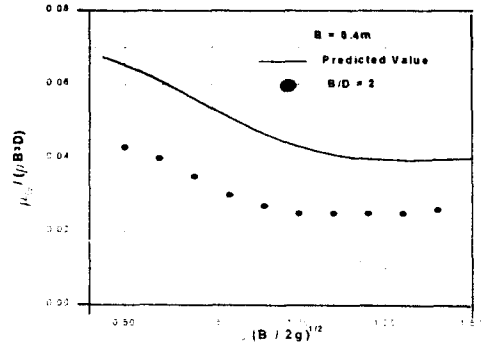


Fig. 3f Non-dimensional roll added moment of inertia coefficient $\mu'_{33} (\mu'_{\theta\theta})$

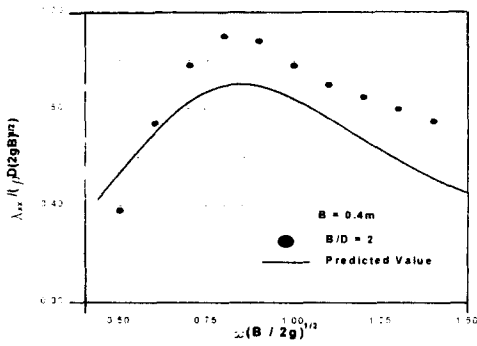


Fig. 3d Non-dimensional sway damping coefficient $\lambda'_{11} (\lambda'_{xx})$

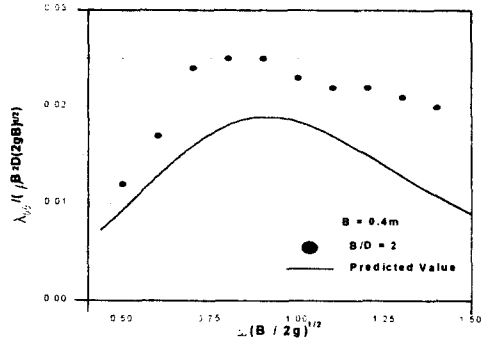


Fig. 3g Non-dimensional roll damping coefficient $\lambda'_{33} (\lambda'_{\theta\theta})$

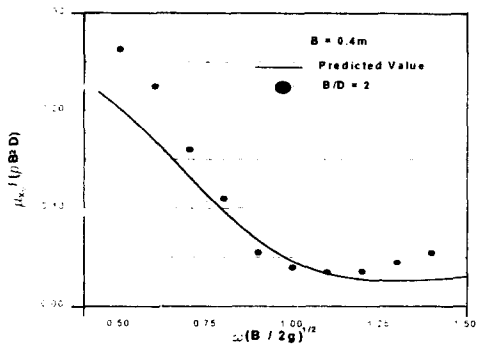


Fig. 3e Non-dimensional sway-roll added mass coefficient $\mu'_{13} (\mu'_{x\theta})$

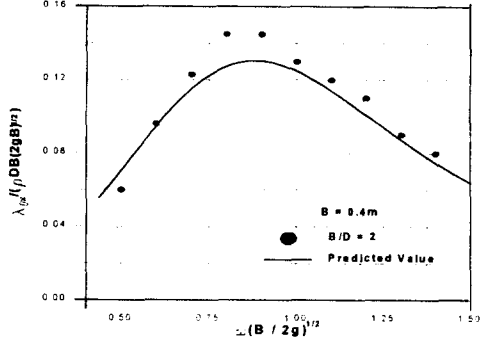


Fig. 3h Non-dimensional roll-sway damping coefficient $\lambda'_{31} (\lambda'_{\theta x})$

Fig. 3에서 각 계수들을 보여주고 있으며, 전반적으로 스웨이와 히브에 관련된 계수는 이론과 실험이 일치함을 보이고 있으나 룰에 관련된 계수는 다소 차이를 보이고 있다. 2차원 문제에서는 히브는 다른 운동과 연성되지 않으며 스웨이와 룰은 서로 연성이 된다.

4.2 무게중심변화에 따른 파강제력과 동유체력계수 변화

이론 계산을 수행할 때에 동유체력계수와 힘의 계산은 정수면에 원점을 잡아 계산을 수행하였다. 그러나 실제로는 무게중심의 수직 방향의 위치가 정수면과 일치함을 하지 않게 된다. 무게중심의 수직 방향의 위치가 원점으로부터 Δz 만큼 아래로 이동했을 경우에, 정수면을 원점으로 계산한 동유체력계수들과 파강제력이 어떠한 변화를 하는가를 살펴보기로 한다. 여기서 각 변수 위에 물결은 무게중심이 이동한 경우를 표시한 것이다. 먼저 μ_{33} 에 대해서 살펴보기로 한다.

$$\begin{aligned}\tilde{\mu}_{33} &= -\frac{\rho}{\omega} \int_{s_c} \varphi_3^{(2)} \tilde{n}_3' ds & (29) \\ &= -\frac{\rho}{\omega} \int_{s_c} \varphi_3^{(2)} (x n_2 - z' n_1) ds \\ &= -\frac{\rho}{\omega} \int_{s_c} \varphi_3^{(2)} (x n_2 - z n_1) ds \\ &\quad + \frac{\rho}{\omega} \int_{s_c} \varphi_3^{(2)} n_1 ds \Delta z \\ &= \mu_{33} - \mu_{13} \Delta z\end{aligned}$$

비슷하게 식을 전개하면 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}\tilde{\mu}_{31} &= \mu_{31} - \mu_{11} \Delta z, \\ \tilde{\mu}_{32} &= \mu_{32} - \mu_{12} \Delta z = \mu_{32} & (30) \\ \tilde{\lambda}_{31} &= \lambda_{31} - \lambda_{11} \Delta z,\end{aligned}$$

$$\lambda_{32} = \lambda_{32} - \lambda_{12} \Delta z = \lambda_{32}$$

$$\lambda_{33} = \lambda_{33} - \lambda_{13} \Delta z$$

그러나 $\tilde{\mu}_{32}$, λ_{32} 는 μ_{12} , λ_{12} 가 영이기 때문에 변화가 없으며 μ_{11} , μ_{12} , μ_{13} , μ_{21} , μ_{22} , μ_{23} 는 무게 중심의 위치가 바뀌어도 변하지 않는다.

파강제력은 무게 중심의 위치가 바뀌어도 변함이 없으나, 파랑모멘트도 무게중심의 위치가 변함에 따라서 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\begin{aligned}\tilde{F}_3 &= i\omega\rho \int_{s_c} \{\phi_I + \phi_D\} \tilde{n}_3' ds \\ &= i\omega\rho \int_{s_c} \{\phi_I + \phi_D\} (x n_z - z n_x) ds \\ &\quad - i\omega\rho \int_{s_c} \{\phi_I + \phi_D\} n_x \Delta z ds \\ &= F_3 - F_1 \Delta z & (31)\end{aligned}$$

4.3 운동응답

본 연구에서는 부유식방파제의 운동응답을 주파수 영역에서 해석하였다. 운동방정식은 3절에서 설명하였다. 실험에서 계류삭 대신 스프링을 사용하였으며, 이 스프링이 강성계수에 미치는 영향은 다음과 같다.

$$K_{11} = 2k \cos \alpha, \quad K_{22} = 2k \sin \alpha \quad (32)$$

$$K_{33} = 2k \left[\overline{KG^2} \cos \alpha + \left(\frac{B}{2} \right)^2 \sin \alpha \right]$$

$$K_{ij} = 0, \quad i \neq j$$

여기서 k 는 계류스프링의 스프링상수이며, α 는 계류스프링과 바닥이 이루는 각도이고, KG 는 바닥에서 무게 중심까지의 거리이다.

정복원력계수는 다음과 같이 주어진다.

$$B_{11} = B_{12} = B_{21} = 0$$

$$B_{32} = B_{23} = B_{13} = B_{31} = 0$$

$$B_{22} = \rho g B \quad (33)$$

$$B_{33} = \rho B D g \overline{GM}$$

여기서 \overline{GM} 은 메타센터를 나타낸다.

Fig. 4는 스웨이, 히브, 롤의 운동응답을 보여 준다. 가로축을 Fig. 3과 같은 무차원 변수를 사용하지 않고 파장/부체폭(L/B)로 표시하였다. 실선은 이론계산을 나타낸다. 히브와 스웨이는 전반적으로 이론계산과 실험이 잘 일치하나 롤은 차이를 보이고 있다.

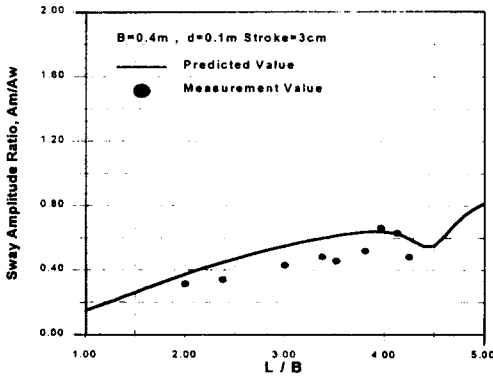


Fig. 4a Comparison of predicted and measured sway amplitude ratios with L/B variation (spring $K=10N/m$)

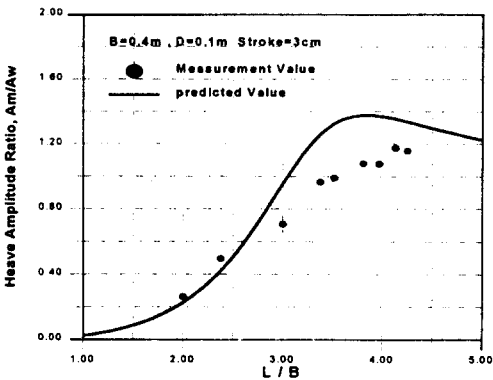


Fig. 4b Comparison of predicted and measured heave amplitude ratios with L/B variation (spring $K=10N/m$)

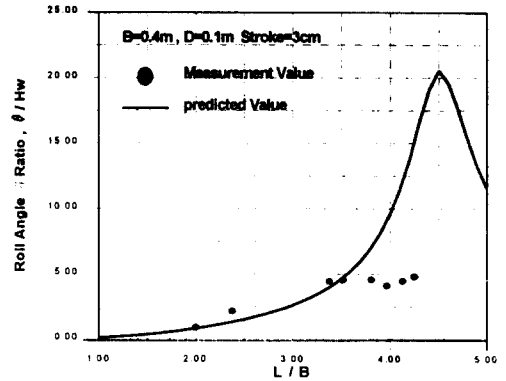


Fig. 4c Comparison of predicted and measured roll angle ratios with L/B variation (Spring $K=10N/m$)

4.4 투과계수

투과계수에 미치는 가장 큰 영향은 스웨이와 히브에 의해서 발생된 파도의 간섭이며, 이로 인해서 투과계수가 극부 최소 값을 가지게 된다. 부유체의 운동에서 히브는 다른 운동과는 연성되지 않고 스웨이와 롤은 서로 연성이 된다.

특히 이론계산에서 얻은 조파감쇠계수 만을 감쇠계수로 사용하는 경우에는 공진점 근처에서 큰 응답을 보일 수 있다.

롤에 의해서 발생된 파도 자체는 투과계수에 큰 영향을 주지 않는다. 그러나 롤은 스웨이와 연성이 되므로 롤 공진이 투과계수에 영향을 미친다.

Fig. 5에서는 폭 0.4m인 방파제를 사용하여 흘수가 0.10m, 0.15m, 0.20m인 3가지 경우에 대한 투과계수의 실험과 이론 결과를 보여준다. 먼저 투과계수 C_T 는 $B/D=4.0$ 인 경우에 실험은 파장-부체폭 비 L/B 가 2.8에서, 이론은 2.9에서 최소 값을 보이고 L/B 가 증가하면서 투과계수도 증가하는 것을 볼 수 있다. B/D 가 2.67인 경우도 비슷한 경향을 보이고 있다.

이 그림에서 B/D 가 증가함에 따라서 투과계수의 최소값을 나타내는 L/B 의 값이 커지는 경향을 볼 수 있다. 이론과 실험 결과가 전반적으로 잘 일치하고 있다. 그러나 흘수가 작은 $B/D=4.0$ 인 경우에는 다른 흘수가 큰 경우에 비해서 이론

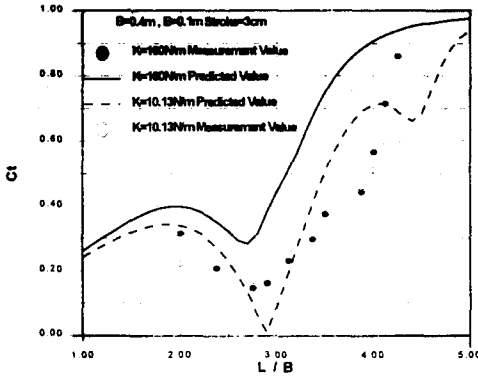


Fig. 5a Comparison of predicted and measurement C_t 's

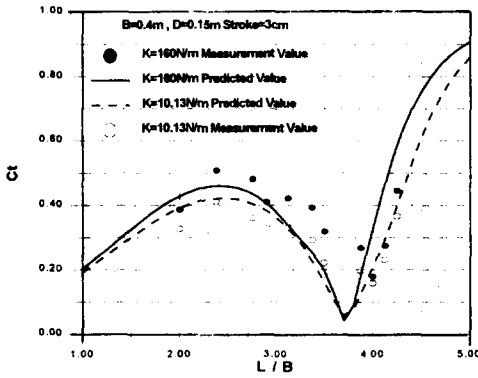


Fig. 5b Comparison of predicted and measurement C_t 's.

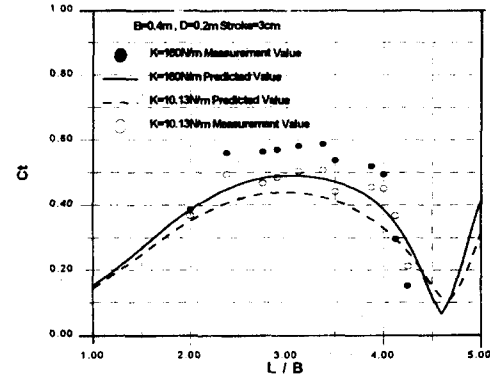


Fig. 5c Comparison of predicted and measurement C_t 's.

과 실험이 다소 많은 차이를 보이고 있다. 이론계산이 투과계수의 최저점 근처에서는 실험보다 더 작은 투과계수 값을 보이고 있다.

Fig. 6에서 스프링계수의 값을 변화시켜 가면서 스프링계수가 투과계수에 미치는 영향을 살펴볼 수 있다. 여기서 세가지의 폭홀수비의 경우 모두에서 스프링상수가 작은 경우가 투과계수의 값이 전반적으로 작은 것을 볼 수 있다. 그러나 홀수가 작은 경우 상대적으로 계류스프링의 영향을 많이 받는 것을 볼 수 있다.

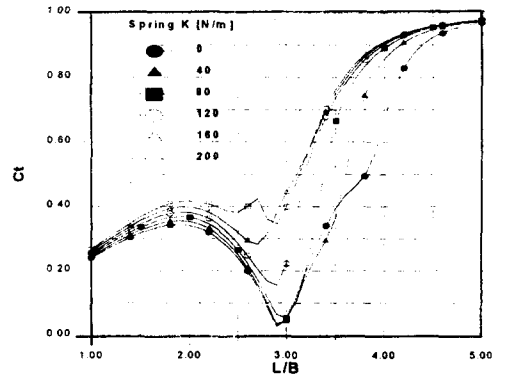


Fig. 6a Comparison of C_T with Spring Constant Variation ($B=0.4m$, $B/D=4$)

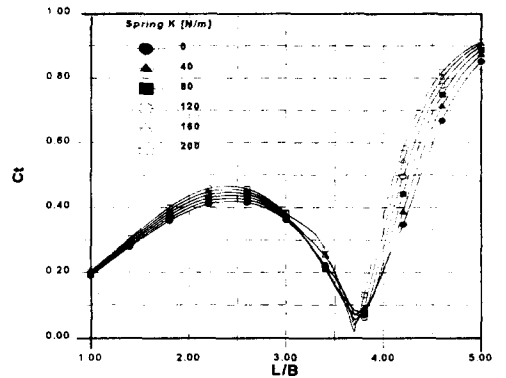


Fig. 6b Comparison of C_T with Spring Constant Variation ($B=0.4m$, $B/D=2.67$)

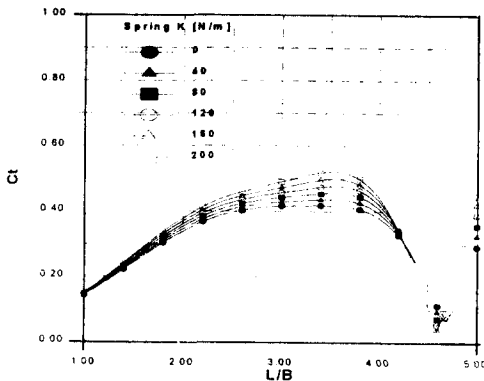


Fig. 6c Comparison of C_T with Spring Constant Variation ($B=0.4m$, $B/D=2$)

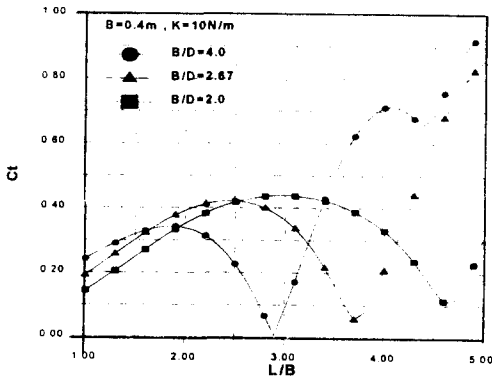


Fig. 7a Comparison of predicted C_T with B/D variation

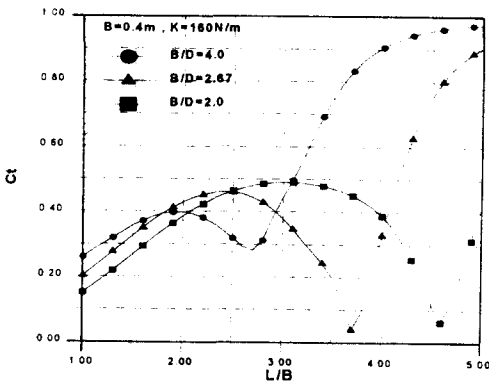


Fig. 7b Comparison of predicted C_T with B/D variation

Fig. 7에서는 폭-홀수비(B/D)가 변화에 따른 투과계수의 이론 계산값을 보여주고 있다. Fig. 5에서 언급한 B/D 가 증가함에 따라 최소 투과계수 값을 가지는 L/B 의 값이 커지는 경향을 명확하게 볼 수 있다. 그리고 전반적으로 투과계수의 값이 작아지는 것을 볼 수 있다.

L/B 가 큰 쪽에서 최소 투과계수를 가질수록 파장에 비해 상대적으로 작은 폭의 구조물로 원하는 소파성능을 달성할 수 있으며, 다른 관점에서 본다면 주어진 폭의 구조물이 파장이 긴 즉 주기가 긴 파도에 대한 방파 성능이 향상된다는 것을 의미한다. 따라서 최소 투과계수를 가지는 L/B 가 클수록 경제적인 방파 구조물을 제작하는데 유리하다. 그러나 투과계수가 최소가 되는 L/B 값 이전 범위에서는 B/D 가 작은 경우보다는 투과계수의 값이 약간 증가하는 경향을 보인다.

5. 결론

부유식 방파제의 설계를 위해 실험과 이론 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 선형이론에 의한 계산은 전반적으로 실험결과와 잘 일치한다. 따라서 선형이론에 의한 설계가 가능하다.
2. 투과계수는 파장, 부체 폭, 홀수의 함수이며 주어진 홀수에서 따라 최소값을 가지는 L/B 가 존재한다.
3. 폭홀수비(B/D)를 증가하면 투과계수가 0.5 이하가 되는 영역이 늘어나게 되며 최대 방파효율을 가지는 L/B 의 값이 증가하게 된다.
4. 계류스프링의 스프링계수가 큰 경우 방파 성능이 저하될 수 있다.

후 기

본 연구 결과는 한국기계연구원의 지원을 받아

수행된 위탁과제의 결과의 일부이며 동 기관의 지원에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Grinyer, A.W., "Fixed and Floating Breakwaters for Small Craft Harbours: Experience at Town Quay Southampton, Haslar Marina, Portsmouth and Parkstone Yacht Haven, Poole," *3rd Int. Conf. Planning Design and Operation Marina III*, 1995.
- [2] Liu, P. & Abbaspour, M., "An Integral Equation Method for the Diffraction of Oblique Waves by an Infinite Cylinder," *Int. J. for Numerical Methods in Engineering*, Vol.18, 1982.
- [3] Mani, J.S., "Design of Y-frame Floating Breakwater," *J. Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, Vol.117, No.2, pp.105-119, 1991.
- [4] Nekado, Yukiharu and Kokumai, Akihisa, "A Study on Air Controlled Floating Breakwater," *J. KSNJ*, 177, pp.1-9, 1980.
- [5] Song, M., Kim, D., Kim, Y. & Lee, H., "A study of the Characteristics of Floating Breakwaters," *Proc. Hull Form '96*, Inchon, Korea, 1996.
- [6] Sugawara, Tadao and Yoshimura, Tadashi, "Development of PC Hybrid Floating Breakwater," *Mitsui Technical Review*, Tokyo, Mitsui Heavy Industries, Ltd., No. 124, Feb. 1984.
- [7] Tsinker, G.P., *Maine Structures Engineering: Specialized Applications*, Chapman & Hall, NY, 1995.
- [8] Vuguts, J.H., "The Hydrodynamics Coefficients for Swaying, Heaving and Rolling Cylinders in a Free Surface," *Int. Shipbuilding Prog.*, vol. 15, pp. 251-276, 1968
- [9] 대한조선학회편, 해양공학개론, 1996, 동명사
- [10] 송무석, 김도영, 이현엽, 조일형, "규칙파중 수면 근처에 고정된 상자형 방파제 특성에 대한 연구," 대한조선학회 논문집, 제35권 제2호, 1998.