

파랑작용에 의해 부유식 방파제에서 발생하는 응력해석

조원철*

*중앙대학교 공과대학 건설환경공학과

Numerical Analysis of the Stress on Floating Breakwater under Various Wave Conditions

WON CHUL CHO*

*Department of Civil and Environmental Engineering, Chung-Ang University, Seoul, Korea

KEY WORDS: Floating Breakwater 부유식 방파제, Finite Element Method 유한요소법, Wave Pressure 파압, Wave Transmission 파랑 전달, Stress 응력

ABSTRACT: Floating breakwaters have been recently studied to reduce the transmission ratio of wave energy. The numerical study shows how wave pressure and stress act on the rectangular floating breakwater under various regular wave conditions. In order to evaluate hydrodynamic pressure on the floating breakwater, the infinite element is applied to the linear wave diffraction and radiation problems. SAP2000, a structural analysis program, is used to evaluate stress on the floating breakwater.

1. 서 론

육지 공간의 부족, 해양 레저 수요의 증대 등으로 인하여 연안역의 효율적인 개발과 사용의 극대화를 위해서는 다양한 형태의 방파제에 관한 연구는 필수적이라고 할 수 있겠다. 기존에 주로 건설되고 있는 착저 중력식 방파제는 외해로부터의 파랑 차단에는 매우 탁월한 성능을 발휘하지만, 대수심 해역에서 구조물 대형화로 인한 공사비를 증대시키며 원활한 해수 순환을 저해하여 항내 수질 오염을 야기시키고 해저 퇴적물 이동에도 영향을 미쳐 항만 매몰 및 해빈 침식 등과 같은 현상의 원인이 되기도 하는 문제점을 노출하고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 수심, 해저지반조건 및 육지로부터의 거리 등에 제약받지 않는 부유식 방파제가 그 대안으로 평가받고 있으며, 다양한 형태의 부유식 방파제에 관한 연구가 수행되어 왔다(Frederiksen, 1971; Hales, 1981; Vathamony, 1995; 양우석, 2001).

부유식 방파제가 설치된 경우의 파동장 해석은 경계적분방정식법, 고유함수전개법, 유한요소법 등을 이용할 수 있으나, 본 연구에서는 가장 일반적인 해석기법인 유한요소법을 채택 하였고 무한 경계면에서의 방사경계조건은 무한요소로 처리 하였으며, 부유식 방파제의 응력 해석은 SAP2000 구조해석 프로그램을 사용하였다. 그리고 본 연구에서는 폰텐형 부유식 방파제 모형(40 cm × 40 cm)을 사용하였으며, 이에 대하여 입사파, 회절파, 방사파에 의한 부유식 방파제에서 발생하는 파

압의 특성을 해석하고, 이로부터 부유식 방파제에서 발생하는 응력을 해석하였다. 파압을 산정하기 위한 파랑의 조건은 부유식 방파제 폭에 대한 파장의 비 (\bar{B}/L)를 0.01에서 0.5까지 0.005간격으로 변화시켰을 때 최소의 파랑전달이 발생하는 \bar{B}/L 을 사용하였으며, 이 파랑조건에 대하여 시간 간격을 $2\pi(n/10\omega)$ ($n = 1 \sim 10$)로 변화시키면서 10가지 경우에 대한 파압을 산정하여 응력해석에 사용하였다. 수치해석에 있어서는 2차원 4절점 셀 요소로 응력을 해석하였다. 일반적으로 부유식 방파제는 Catenary 계류시스템에 의해 지지되고 있어 부유식 방파제의 거동에 따라 복원력이 비선형적으로 변하는 특성이 있다. 그러나 이러한 해석은 시간이 많이 소요되기 때문에 비경제적인 면을 지니고 있어, 본 연구에서는 비선형 계류시스템의 복원력을 등가의 선형스프링으로 치환하여 주파수 영역에서 해석을 수행하였다.

2. 이론적 배경

2.1 부유식 방파제 운동방정식

일반적으로 계류시스템의 복원력을 선형스프링으로 모형화 하면 파동장에 놓인 부유식 방파제의 운동방정식은 다음과 같이 주파수 영역에서 나타낼 수 있다.

$$\sum_{k=1}^3 [-w^2 (m_{jk} + \mu_{jk}) - iw (b_{jk} + \lambda_{ik}) + (c_{jk}^b + c_{jk}^m)] \xi_k = F_j^e \quad \text{for } j=1, 2, 3 \quad (1)$$

제1저자 조원철 연락처 : 서울특별시 동작구 흑석동 221번지

02-820-5323 chowc@cau.ac.kr

여기서, m_{jk} 는 구조물 자체의 질량, b_{jk} 는 구조물 자체의 감쇠 계수, c_{jk}^b 는 정수압에 의한 부체의 복원력계수, c_{jk}^m 는 선형화된 계류라인의 강성계수를 나타내며, F_j^e , μ_{jk} 및 λ_{jk} 는 파동에 관련된 계수로 각각 파랑강제력, 부가질량계수 및 파랑감쇠계수이다. 또한 아래첨자 j 는 부유식 방파제의 운동방향을 나타내는 것으로 1은 좌우운동(sway), 2는 상하운동(heave), 3은 횡동요(roll)를 나타낸다.

F_j^e , μ_{jk} 및 λ_{jk} 는 파동장에 놓인 부유체에 대한 경계치문제를 풀이함으로써 결정할 수 있다. 본 연구에서는 선형포텐셜 이론을 사용하여 결정하였다.

2.2 파동장 해석

유체를 비압축성, 비점성, 비회전성으로 가정하는 선형화 이론을 사용하면 부유식 구조물이 놓인 파동장은 다음과 같은 Laplace 방정식을 만족하는 속도포텐셜, Φ 로 나타낼 수 있다.

$$\nabla^2 \Phi(x, z; t) = 0 \quad (2)$$

입사파고 및 구조물의 거동이 미소하다고 가정하면, 정수면 (S_f) 및 유동장의 바닥면 (S_d), 부체의 표면 (S_b)에서의 경계조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\omega^2}{g} \Phi \quad \text{on } S_f \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad \text{on } S_d \quad (4)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = V_n = \text{Re} \left[\sum_{j=1}^3 -i\omega n_j \xi_j e^{-i\omega t} \right] \quad \text{on } S_b \quad (5)$$

여기서, V_n 과 n_j 는 각각 물체표면에서 유체영역으로 향하는 수직속도의 법선속도성분과 법선벡터성분을 의미하며, g 는 중력 가속도를 나타낸다. 구조물의 운동은 Fig. 1에 정의된 바와 같이 좌우운동(sway: ξ_1), 상하운동(heave: ξ_2) 및 횡동요(roll: ξ_3) 등 세 방향의 조화운동으로 나타낼 수 있다.

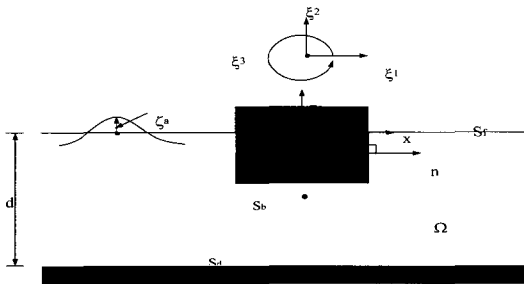


Fig. 1. Floating breakwater for numerical analysis

속도포텐셜, Φ 는 다음과 같이 각 성분별 파랑의 포텐셜의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\Phi = \text{Re} \left[\left(\phi_0 + \phi_4 + \sum_{j=1}^3 \phi_j \xi_j \right) e^{-i\omega t} \right] \quad (6)$$

여기서, ϕ_0 는 입사파에 의한 성분, ϕ_4 는 회절파에 의한 성분, ϕ_j 는 j -방향 운동에 관련된 방사파에 의한 성분을 나타낸다. 이중, 회절파 및 방사파에 의한 포텐셜은 무한경계면 (S_r)에서 다음의 방사경계조건을 만족하여야 한다. (Sommerfeld, 1949)

$$\text{Lim}_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left(\frac{\partial \phi_j}{\partial r} - ik_0 \phi_j \right) = 0 \quad \text{or } j = 1, 2, 3, 4 \quad (7)$$

여기서, k_0 는 입사파의 파수(wave number)를 의미하며, $r=|x|$, $i=\sqrt{-1}$ 이다.

선형회절이론에 의하여 식(2)~식(5) 및 식(7)로 주어진 경계치문제를 ϕ_0 와 ϕ_4 가 관련된 회절문제(diffraction problem)와 $\phi_j(j=1, 2, 3)$ 가 관련된 방사문제(radiation problem)로 분리하면 물체 표면에서의 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \Phi_j}{\partial n} = -i\omega n_j \quad \text{for } j = 1, 2, 3 \quad (8)$$

$$\frac{\partial \Phi_j}{\partial n} = -\frac{\partial \phi_0}{\partial x} n_x - \frac{\partial \phi_0}{\partial z} n_z \quad \text{for } j = 4$$

여기서, ϕ_0 는 입사파의 포텐셜로 다음과 같다.

$$\phi_0 = i \frac{g \xi_a}{w} \frac{\cosh[k_0(z+d)]}{\cosh(k_0 d)} e^{ik_0 x} \quad (9)$$

2.3 파랑강제력(F_j^e), 부가질량계수(μ_{jk}) 및 파랑감쇠계수(λ_{jk})

물체 표면 및 유동장 임의의 위치에서의 동압력 $p(x, z; t)$ 는 선형화된 Bernoulli 방정식으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} p(x, z, t) &= -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \\ &= \text{Re} \left[i\omega \rho \left(\phi_0 + \phi_4 + \sum_{j=1}^3 \phi_j \xi_j \right) e^{-i\omega t} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

구조물에 작용하는 파력은 물체 표면에서의 압력을 적분함으로써 구할 수 있고 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_j &= - \int_{S_b} p(x, z, t) n_j S_b = \text{Re} \left[\left(F_j^e + \sum_{k=1}^3 F_{jk}^r \right) e^{-i\omega t} \right] \\ &\quad \text{for } j = 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (11)$$

여기서, F_j^e 는 $\phi_0 + \phi_4$ 에 관련된 파랑강제력이며, F_{jk}^r 은 방사포텐셜 ϕ_k 에 관련된 항으로 부가질량계수, μ_{jk} 와 파랑감쇠계수, λ_{jk} 로 나타낼 수 있다.

$$F_j^e = i\omega\rho \int_{S_b} (\phi_0 + \phi_4) n_j dS_b \quad (12a)$$

$$F_{jk}^r = -i\omega\rho \int_{S_b} \phi_k n_j dS_b = -\omega^2 \mu_{jk} - i\omega\lambda_{jk} \quad (12b)$$

여기서, μ_{jk} 와 λ_{jk} 는 다음과 같으며,

$$\mu_{jk} = -\frac{1}{\omega^2} \text{Re}[F_{jk}^r] \quad (13a)$$

$$\lambda_{jk} = -\frac{1}{\omega} \text{Im}[F_{jk}^r] \quad (13b)$$

Re 와 Im 은 각각 괄호 안 값의 실수부와 허수부를 의미한다.

2.4 요소에서의 응력해석

부유식 방파제의 응력해석은 SAP2000 구조해석 프로그램을 사용하였으며, 여기서, S_{11} , S_{22} 는 요소의 x , z 방향의 수직 응력이고, S_{12} 는 요소의 전단응력, S_{\max} , S_{\min} 은 요소의 최대 및 최소 응력을 의미한다.

부유식 방파제의 각 방향의 요소를 Fig. 2와 같이 나타내었다. 내부 응력은 2×2 Gauss 적분에 의해 산출되며, 산출식은 다음과 같다.

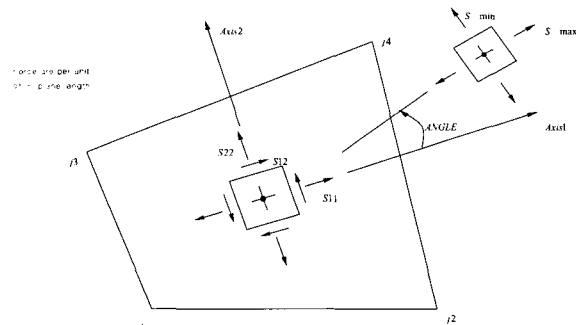


Fig. 2 Stress acting on element

$$S_{11} = \frac{F_{11}}{th} - \frac{12M_{11}}{thb^3} x^3, \quad S_{22} = \frac{F_{22}}{th} - \frac{12M_{22}}{thb^3} x^3, \quad (14)$$

$$S_{12} = \frac{F_{12}}{th} - \frac{12M_{12}}{thb^3} x^3$$

여기서, F 는 수직응력 및 전단응력에 의한 외력을 의미하며, M 은 모멘트를, th 는 thickness, b 는 bending thickness를 의미한다.

3. 수치모델의 검증

본 연구에서 사용된 폰툰형 부유식 방파제의 거동에 대한 수치모형을 검증하기 위해 한국해양연구원(KORDI ; Korea Ocean Research and Development Institute, 1992)에서 수행한 폰툰형 부유식 방파제 수치실험 결과와 비교하여 보았다.

수리실험에서 사용된 부유식 방파제의 모형은 수심, $h = 0.5m$, 부유식 방파제의 길이, $L_f = 0.98m$, 폭, $B = 0.5m$, 높이, $D_f = 0.2m$, 홀수, $d_f = 0.1m$, 중량, $M = 49kgf$, 질량관성 모멘트, $M_i = 1.684kg - m$, 계류라인의 길이, $L_m = 4.0m$ 가 적용되었으며, 파랑의 조건은 Table 1과 같다.

수치해석에서는 수리실험에서 사용된 모형과 동일한 조건을 적용시켰으며, 파랑의 조건은 수심 대 파장의 비, h/L 를 0.005에서부터 0.5까지 0.005 간격으로 100개를 사용하였다.

Table 1 Wave conditions using in the experiment of the floating breakwater performed by KORDI(1992)

$T(\text{sec})$	0.8	0.85	0.9	0.97	1.06	1.18	1.37	1.70	2.40
$H(\text{cm})$	3.0	4.0	4.0	5.0	6.0	8.0	8.0	8.0	8.0
h/L	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3	0.25	0.2	0.15	0.1

Fig. 3과 Fig. 4는 파랑의 반사율과 전달율을 각각 나타내고 있으며 실선은 수치해석 결과를 나타내고 \circ 는 수리실험 결과를 나타낸다. Fig. 3에서 파랑의 반사율은 수치해석 결과가 수리실험 결과보다 부분적으로 조금 큰 값을 보이고 있으나, 수치해석 결과와 수리실험 결과가 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. Fig. 4에서 파랑의 전달율 또한 수치해석 결과와 수리실험 결과가 부분적으로 조금 차이는 있으나 수치해석 결과와 수리실험 결과가 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

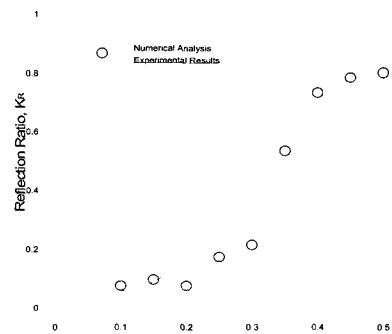


Fig. 3 Comparison of the wave reflection ratio of the numerical result of the floating breakwater with that of the experimental result

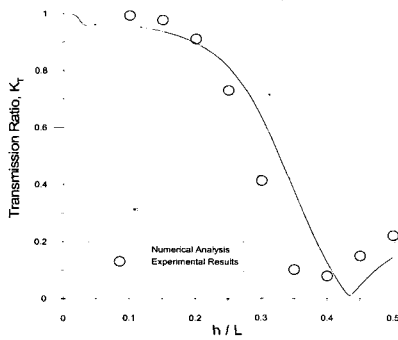


Fig. 4. Comparison of the wave transmission ratio of the numerical result of the floating breakwater with that of the experimental result

4. 수치해석 결과 분석

4.1 파압의 산정

Fig. 5는 부유식 방파제의 폭을 40cm, 흘수를 20cm, 폭 대 입사파장의 비(\bar{B}/L)를 0.01에서 0.5까지 0.005 간격으로 변화시킨 경우에 대한 파랑전달율을 나타내는 그림으로, $\bar{B}/L=0.2$ 근처에서 최소 값을 보인 후 다시 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 입사파의 파장이 방파제 폭의 5배 정도가 될 때 가장 큰 파랑차단 효과를 보이는 파장대로, 부유식 방파제 내부로 파랑에너지가 많이 흡수되는 것으로 의미한다.

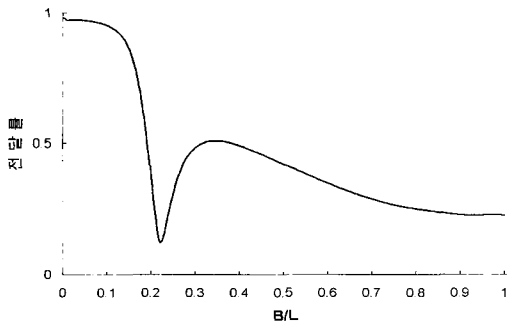


Fig. 5 Wave transmission ratio of the floating breakwater

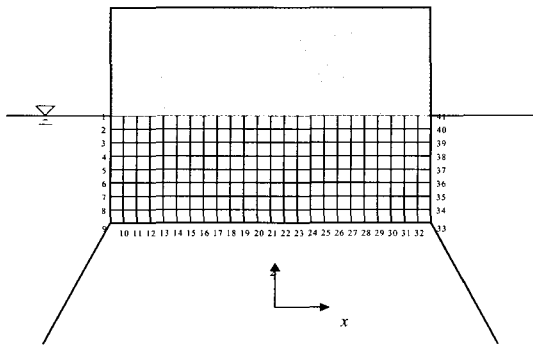


Fig. 6 Nodal points of the floating breakwater for calculation of wave pressure

Fig. 6은 부유식 방파제의 파압산정에 사용된 절점을 나타낸 것으로 z 축으로 9개의 절점을 사용하였고 x 축으로는 25개의 절점을 사용하였으며, z 축 간격은 파압의 특성에 따라 셀 간격을 변화시키면서 응력해석에 적용하였다.

본 연구에서는 파고를 방파제 흘수의 1/4인 0.05m로 하고 파랑전달율이 최소가 되는 $\bar{B}/L=0.2$ 인 조건에서 시간 간격을 $t=2\pi(n/10\omega)$ ($n=1\sim 10$)로 하여 시간에 따른 10가지 경우에 대한 부유식 방파제 전·후면의 수면고 및 위상 변위를 산출하였으며 Table 2에 제시하였다. Table 2에서 η_i 는 방파제 전면의 수면고, η_0 은 방파제 후면의 수면고, ξ 는 방파제의 z 방향 위상변위를 나타낸다. 또한 부유식 방파제의 측면에서는 동수압과 정수압을 고려하여 수치해석을 하였으며, 부유식 방파제 저면에서는 정수압이 부유식 방파제 자중과 상쇄되는 것으로 가정하여 동수압만으로 수치해석 하였다. 본 논문에서는 인해 시간간격 $t=2\pi(n/10\omega)$ 에 대해 $n=1,3,5,7,9$ 에 대한 결과만을 언급하기로 하겠다.

Table 2 Surface water elevation and phase displacement for $\bar{B}/L=0.2$ (cm)

	$2\pi \frac{1}{10\omega}$	$2\pi \frac{2}{10\omega}$	$2\pi \frac{3}{10\omega}$	$2\pi \frac{4}{10\omega}$	$2\pi \frac{5}{10\omega}$
η_i	-3.6	-5.2	-4.9	-2.6	+0.6
η_0	-0.06	+0.2	+0.38	+0.42	+0.3
ξ	+7.26	+7.67	+5.15	+0.6	-4.0
	$2\pi \frac{6}{10\omega}$	$2\pi \frac{7}{10\omega}$	$2\pi \frac{8}{10\omega}$	$2\pi \frac{9}{10\omega}$	$2\pi \frac{10}{10\omega}$
η_i	+3.6	+5.2	+4.9	+2.6	-0.6
η_0	+0.06	-0.2	-0.38	-0.42	-0.3
ξ	-7.26	-7.67	-5.15	-0.6	+4.0

4.2 파압 및 응력분포

4.2.1 $t=2\pi(1/10\omega)$ 일 때의 파압 및 응력 분포

Fig. 7은 $t=2\pi(1/10\omega)$ 일 때 부유식 방파제의 위상변위 $\xi=+7.26cm$, 부유식 방파제의 전면 수면고 $\eta_i=-3.6cm$, 후면의 수면고 $\eta_0=-0.06cm$ 일 때의 파압분포를 나타낸다. 그림에서와 같이 부유식 방파제의 전면부에서의 동수압이 후면부의 동수압보다 크게 방파제 외측으로 작용하고 있으며, 저면부에서는 상(+z) 방향으로 동수압이 작용하고 있기 때문에 부유식 방파제는 전면부 상방향으로 거동하게 된다.

Fig. 8은 $t=2\pi(1/10\omega)$ 일 때 절점의 하중 변화를 나타내는 그림으로, 동수압 및 정수압을 합한 전체 파압을 절점별 하중으로 변환하여 나타낸 것이다. 여기서, +는 부유식 방파제 내측으로 작용하는 하중을 나타내며, -는 부유식 방파제

외측으로 작용하는 하중을 의미한다. 그림에서와 같이 부유식 방파제는 저면부와 후면부에서 부유식 방파제 내측으로 파압이 집중되고 있기 때문에 부유식 방파제 전체적으로 인장응력이 발생한다.

Fig. 9는 $t = 2\pi(1/10\omega)$ 일 때 x 방향의 응력을 나타내는 그림으로, 부유식 방파제 전면부에서는 외측으로 작용하는 동수압의 영향이 크기 때문에 인장응력(최대 $37MPa$)이 발생하고 있으며, 저면부에서는 $+z$ 방향으로 작용하는 하중의 영향으로 양쪽 계류라인을 중심으로 인장응력(최대 최대 $37MPa$)이 발생하는 것을 알 수 있다.

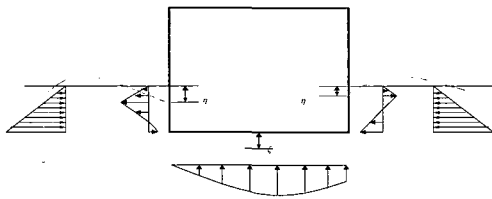


Fig. 7 Distribution of wave pressure at $t = 2\pi \frac{1}{10\omega}$

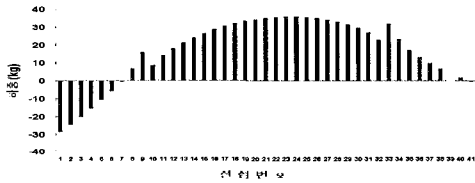


Fig. 8 Distribution of load at $t = 2\pi \frac{1}{10\omega}$

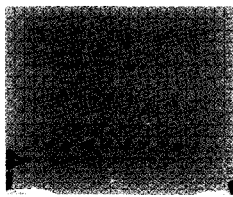


Fig. 9 Stress(MPa) in x direction at $t = 2\pi \frac{1}{10\omega}$

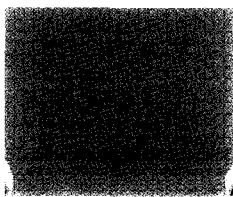


Fig. 10 Stress(MPa) in z direction at $t = 2\pi \frac{1}{10\omega}$

Fig. 10은 $t = 2\pi(1/10\omega)$ 일 때 z 방향의 응력을 나타내는 그림으로, 부유식 방파제 저면부에서 작용하는 하중이 x 방향 하중보다 크기 때문에 양쪽 계류라인을 중심으로 하여 $+z$ 방향으로 인장응력(최대 $192MPa$)이 발생하고 있다.

4.2.2 $t = 2\pi(3/10\omega)$ 일 때의 파압 및 응력 분포

Fig. 11은 $t = 2\pi(3/10\omega)$ 일 때, 부유식 방파제의 위상변위 $\xi = +5.15cm$, 부유식 방파제의 전면 수면고 $\eta_i = -4.9cm$, 후면의 수면고 $\eta_0 = +0.38cm$ 일 때의 파압분포를 나타낸다.

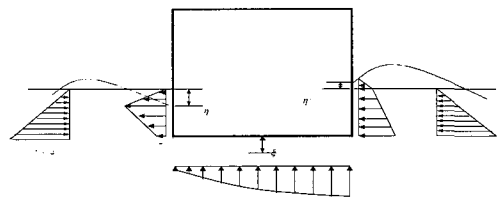


Fig. 11 Distribution of wave pressure at $t = 2\pi \frac{3}{10\omega}$

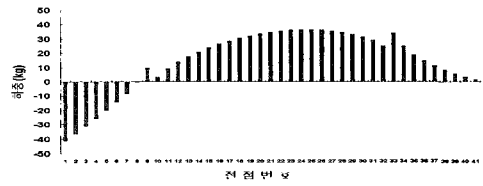


Fig. 12 Distribution of load at $t = 2\pi \frac{3}{10\omega}$

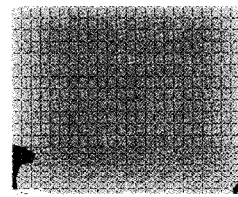


Fig. 13 Stress(MPa) in x direction at $t = 2\pi \frac{3}{10\omega}$

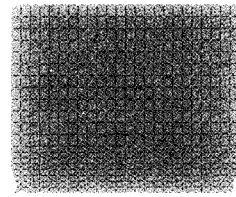


Fig. 14 Stress(MPa) in z direction at $t = 2\pi \frac{3}{10\omega}$

Fig. 12는 $t = 2\pi(3/10\omega)$ 일 때 절점의 하중 변화를 나타내는 그림으로, 방파제 전면부에서는 +하중과 -하중이 동시에 발생하는 지점이 생기며, 저면부와 후면부의 하중의 변화는 $t = 2\pi(1/10\omega)$ 보다 작아진 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 $t = 2\pi(3/10\omega)$ 일 때 x 방향의 응력을 나타내는 그림으로, 부유식 방파제 전면부에서 외측으로 + 와 - 하중이 동시에 발생하고 있다. 따라서 전면부에서는 인장과 압축이 서로 상쇄되어 인장응력 영역이 축소되는 것을 알 수 있다.

Fig. 14는 $t = 2\pi(3/10\omega)$ 일 때 z 방향의 응력을 나타내는 그림으로, 부유식 방파제 전면부에서 + 와 - 하중이 동시에 작용하여 응력이 서로 상쇄됨에 따라 왼쪽 계류라인의 인장응력 영역이 축소되었으며, 오른쪽 계류라인의 인장응력 영역도 축소된 것을 알 수 있다.

4.2.3 $t = 2\pi(5/10\omega)$ 일 때의 파압 및 응력 분포

Fig. 15는 $t = 2\pi(5/10\omega)$ 일 때, 부유식 방파제의 위상변위 $\xi = -4.0cm$, 부유식 방파제의 전면 수면고 $\eta_i = +0.6cm$, 후면의 수면고 $\eta_0 = +0.3cm$ 일 때의 파압분포를 나타낸다. 전면부와 후면부에서는 내·외측으로 동수압이 동시에 발생하고 있으며, 저면부의 동수압은 $-z$ 방향으로 발생하고 있다.

Fig. 16은 $t = 2\pi(5/10\omega)$ 일 때 절점의 하중 변화를 나타내는 그림으로, $t = 2\pi(3/10\omega)$ 와 비교하여 하중의 분포형태가 전면과 후면에서 크게 달라진 것을 알 수 있으며, 저면부에서 더욱 뚜렷하게 나타나고 있다.

Fig. 17은 $t = 2\pi(5/10\omega)$ 일 때 x 방향의 응력을 나타내는 그림으로, 부유식 방파제 전면부에서는 하중이 내측으로 작용하고 있으며, 부유식 방파제 전체적으로는 z 방향으로 $-4cm$ 이동하고 있고 이로 인해 방파제 저면에서는 인장응력(최대 $37MPa$)이 계류라인을 중심으로 바닥부분에서 발생하고 있다.

Fig. 18은 $t = 2\pi(5/10\omega)$ 일 때 z 방향의 응력을 나타내는 그림으로, 전체적으로 압축을 받고있으며, 양쪽 계류라인을 중심으로 압축응력(최대 $-123MPa$)이 크게 발생하는 것을 알 수 있다.

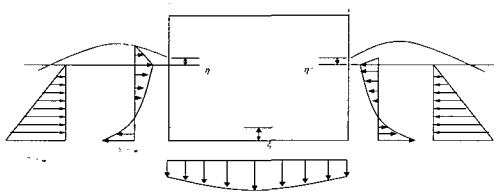


Fig. 15 Distribution of wave pressure at $t = 2\pi \frac{5}{10\omega}$

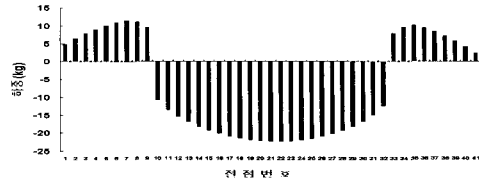


Fig. 16 Distribution of load at $t = 2\pi \frac{5}{10\omega}$

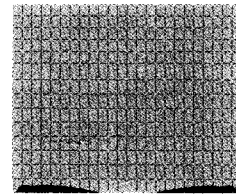


Fig. 17 Stress(MPa) in x direction at $t = 2\pi \frac{5}{10\omega}$

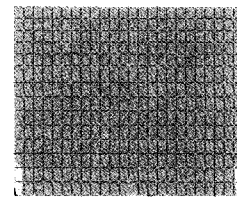


Fig. 18 Stress(MPa) in z direction at $t = 2\pi \frac{5}{10\omega}$

4.2.4 $t = 2\pi(7/10\omega)$ 일 때의 파압 및 응력 분포

Fig. 19는 $t = 2\pi(7/10\omega)$ 일 때, 부유식 방파제의 위상변위 $\xi = -7.67cm$, 부유식 방파제의 전면 수면고 $\eta_i = +5.2cm$, 후면의 수면고 $\eta_0 = -0.2cm$ 일때의 파압분포를 나타낸다. 방파제 전면부의 동수압은 내측으로 향하고 있고, 후면부 및 저면에서의 동수압은 외측으로 향하고 있기 때문에 방파제 전면은 $+z$ 방향으로 거동하게 되고 후면은 $-z$ 방향으로 거동하게 된다.

Fig. 20은 $t = 2\pi(7/10\omega)$ 일 때 절점의 하중 변화를 나타내는 그림으로, 방파제 전면부와 저면부의 하중이 크게 증가된 것을 알 수가 있다.

Fig. 21은 $t = 2\pi(7/10\omega)$ 일 때 x 방향의 응력을 나타내는 그림으로, 부유식방파제 전면부에서의 하중은 $t = 2\pi(5/10\omega)$ 일 때 보다 크게 증가하였고, 후면부의 하중은 $t = 2\pi(5/10\omega)$ 일 때 보다 감소한 것을 알 수 있다. 따라서 부유식 방파제의 거동 또한 뒤쪽으로 기울어지는 형상을 하게 되어 왼쪽 계류라인에서 인장응력이 $t = 2\pi(5/10\omega)$ 일때 보다 커지는 것을 알 수 있다.

Fig. 22는 $t=2\pi(7/10\omega)$ 일 때 z 방향의 응력을 나타내는 그림으로, 전체적으로 압축을 받고 있으며, 양쪽 계류라인을 중심으로 발생하는 압축응력(최대 $-176MPa$)이 $t=2\pi(5/10\omega)$ 일 때 보다 크게 발생하는 것을 알 수 있다.

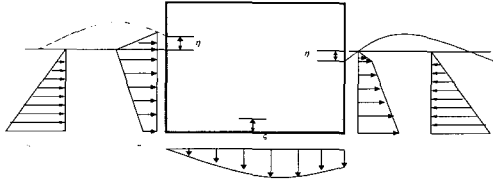


Fig. 19 Distribution of wave pressure at $t=2\pi\frac{7}{10\omega}$

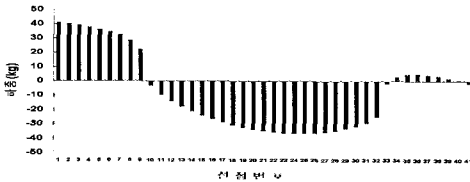


Fig. 20 Distribution of load at $t=2\pi\frac{7}{10\omega}$

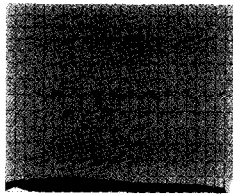


Fig. 21 Stress(MPa) in x direction at $t=2\pi\frac{7}{10\omega}$

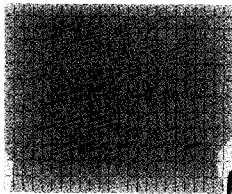


Fig. 22 Stress(MPa) in z direction at $t=2\pi\frac{7}{10\omega}$

4.2.5 $t=2\pi(9/10\omega)$ 일 때의 파압 및 응력 분포

Fig. 23은 $t=2\pi(9/10\omega)$ 일 때, 부유식 방파제의 위상변위 $\xi=-0.6cm$, 부유식 방파제의 전면 수면고 $\eta_1=+2.6cm$, 후면의 수면고 $\eta_0=-0.42cm$ 일 때의 파압분포를 나타낸다. 방파제 전면부와 후면부의 동수압은 모두 내측으로 향하고 있고, 저면부에서의 동수압은 + 와 -가 공존하는 양상을 보인

다. 이로 인해 전체적인 부유식 방파제의 수직변위가 $-0.6cm$ 로 적게 변화됨을 알 수 있다.

Fig. 24는 $t=2\pi(9/10\omega)$ 일 때 절점의 하중 변화를 나타내는 그림으로, 방파제 전면부의 하중이 후면부와 저면부에 비해 상당히 크게 작용하고 있지만, 그 크기는 전체적으로 $t=2\pi(7/10\omega)$ 일 때보다 작은 것을 알 수 있다.

Fig. 25는 $t=2\pi(9/10\omega)$ 일 때 x 방향의 응력을 나타내는 그림으로, 전체적인 하중이 감소했기 때문에 왼쪽 계류라인에서 응력이 크게 감소하고 있다.

Fig. 26은 $t=2\pi(9/10\omega)$ 일 때 z 방향의 응력을 나타내는 그림으로, 전체적으로 압축을 받고 있으며, 위상변위가 적은 관계로 계류라인에 집중되던 인장응력이 사라진 형상을 보여 주고 있다.

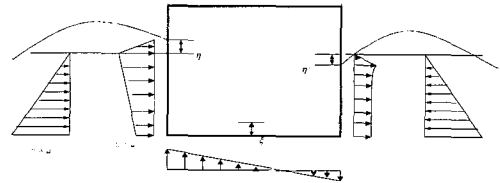


Fig. 23 Distribution of wave pressure at $t=2\pi\frac{9}{10\omega}$

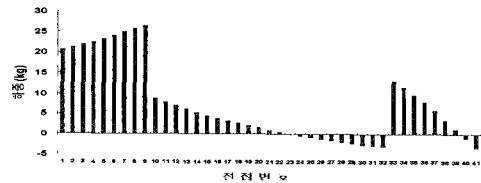


Fig. 24 Distribution of load at $t=2\pi\frac{9}{10\omega}$

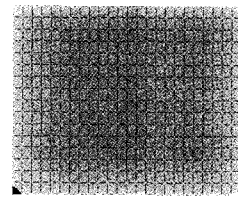


Fig. 25 Stress(MPa) in x direction at $t=2\pi\frac{9}{10\omega}$

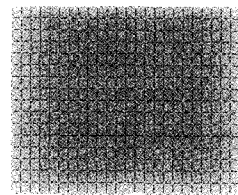


Fig. 26 Stress(MPa) in z direction at $t=2\pi\frac{9}{10\omega}$

5. 결 론

본 연구에서 지배방정식인 Laplace 방정식과 나머지 4개의 경계조건을 변분법을 이용하여 범함수로 변환하고, 유체 내부의 영역은 8개의 절점을 갖는 유한요소로, 외부는 6개의 무한요소로 구분하여 수치해석을 함으로써, 입사파와 회절파에 의해 발생하는 폰툰형 부유식 방파제 외부의 힘을 각 절점별로 산출하여 응력을 해석하였다. 또한 본 연구에서는 외력을 받는 부유식 방파제의 파압특성을 동수압과 정수압으로 분리하여 시간별로 정리하였고 그 결론은 다음과 같다.

- 1) 부유식 방파제의 파압은 파의 주기와 파고에 밀접한 관련을 가지며, 파압에 있어서는 정수압보다 동수압의 크기에 의해 좌우된다.
- 2) 시간에 따른 한 주기 동안의 동수압의 변화를 보면, 부유식 방파제 전면부의 수면고가 정수면보다 낮게 나타나면 방파제 외측으로 힘이 작용하고, 정수면보다 높게 나타나면 방파제 내측으로 동수압이 작용하는 것을 알 수 있다.
- 3) 저면부의 동수압의 작용은 부유식 방파제의 위상변화와 관련이 있다.
- 4) 부유식 방파제의 x 방향 응력변화는 양쪽 계류라인을 중심으로 저면부로 인장응력이 발생하며, 왼쪽 계류라인이 오른쪽 보다 약 $30MPa$ 정도 큰 인장응력이 발생할 수 있다.

5) 부유식 방파제에 미치는 파압의 크기는 방파제의 수직변위에 밀접한 관련이 있으며, 수직변위가 + 거동을 하였을 경우 방파제의 전면부에 파압이 집중되는 현상을 보이며, - 거동을 하였을 경우 방파제 전체적으로 파압이 고르게 작용하는 것을 알 수 있고 응력상태에도 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- 양우석, 조원철, 박우선 (2001). "부유식 방파제의 파랑차단성능 제어", 한국해양해양공학회지, 제13권, 제3호, pp 230-236.
- Frederiksen, H.D. (1971). "Wave Attenuation by Fluid Filled Bags", Journal of the Waterway, Harbors and Coastal Engineering Division, ASCE, pp 73-90.
- Hales, L.Z. (1981). Floating Breakwaters: State of the Art Literature Review, Technical Report No 81-1, Coastal Engineering Research Center, US Army Corps of Engineers, Fort Belvoir, VA.
- Vathamony, P. (1995). "Wave Attenuation Characteristics of a Tethered Float System", Ocean Engineering, Vol 22, pp 111-129.

2004년 10월 25일 원고 접수

2004년 11월 10일 최종 수정본 채택