

방파제를 고려한 초대형 부유식 해양구조물의 응답

이호영*, 신현경**, 임춘규***, 김외현****, 강점문*****, 윤명철*****

Hydroelastic Responses for a Very Large Floating Structure with a Breakwater

H.Y. Lee*, H. Shin**, C.G. Lim***, O.H. Kim****, J.M. Kang***** and
M.C. Yoon*****

요 약

본 논문은 고정식 방파제를 포함한 초대형 부유식 해상공항의 파도 중에서 유탄성 응답을 계산하는 방법을 제시하였다.

방파제 효과를 고려한 방사문제와 산란문제를 해석하기 위하여 소오스-다이폴 분포법을 사용하였고, 구조물의 응답은 자유-자유 보의 고유 모드함수에 의한 모드 해석법을 사용하여 계산하였다. 계산 모델로 길이가 1000m의 해상공항 구조물을 도입하였고, 방파제의 효과를 살펴보기 위해 입사파의 주기, 강성, 방파제와 해상공항 사이의 간격을 변화시키면서 수직 응답 및 모우멘트 등을 계산하였다.

Abstract

In this paper, elastic responses of a floating structure in waves with a breakwater are presented. The method of source-dipole distribution is used to analyze the velocity potentials for the fluid region. The deflections of structure are expanded approximately in terms of natural mode functions of free-free beam. The model for present calculation is a floating plate with an length of 1000m and the hydroelastic responses for a floating structure with a straight breakwater are shown. The effects of distance between breakwater and structure, bending rigidity and relative length of regular waves are examined

접수일자: 2000년 11월 14일, 승인일자: 2001년 4월 26일

* 정회원, 울산대학교 수송시스템공학부 연구교수(E-mail: hy19930@yahoo.co.kr)

** 정회원, 울산대학교 수송시스템공학부 교수(E-mail: hkshin@uou.ulsan.ac.kr)

*** 학생회원, 울산대학교 수송시스템공학부 대학원

**** 정회원, 현대중공업(주) 조선사업본부 구조설계부 이사

***** 정회원, 현대중공업(주) 조선사업본부 구조설계부 부장

1. 서 언

폰툰(Pontoon)형태의 부유식 해상 공항에 대한 기술연구가 일본을 비롯하여 한국에서도 왕성하게 이뤄지고 있다. 이런 형태의 구조물은 건조하기 쉬우나 파도에 의한 외력을 크게 받아서 운동이 과대하게 되므로, 해상공항의 주위로 고정식 방파제를 설치함으로써 운동을 줄일 수 있다. 이와같은 연구에서는 방파제 효과를 포함하여 동유체력을 계산하고 동시에 구조물의 유탄성 효과도 고려해야 된다.

지금까지 한국에서 방파제를 제외한 초대형 부유식 해양구조물의 연구가 주로 수행되어 왔다(구자삼 등(1998), 심인환 등(1999), 이호영/신현경(2000), 신현경 등(2000), 이호영등(2000)). 현재 일본에서는 방파제 효과를 고려하여 유탄성 해석을 일부 수행하고 있고, 해석 방법은 주로 속도 포텐셜 접속법을 사용하였다(Nagata et. al. 1999, Ohmatsu 1999).

본 연구에서는 동유체력을 구하기 위해 방파제 효과를 고려한 소오스-다이폴 분포법을 사용하였다. 방파제의 산란효과를 해석하기 위해 유체영역을 두 부분으로 나누어 수치 정합하는 방법을 사용하였고, 구조물의 응답은 고유 모드를 이용한 판 방정식을 도입하여 계산하였다(이호영 등(2000)).

본 연구의 검증을 위해 Nagata et. al.(1999)의 계산 결과와 비교하여 정성적으로 일치하는 결과를 얻었다. 계산 예로 길이가 1000m인 부유식 해상 공항을 사용하여 구조물의 강성, 주기 및 방파제와 구조물사이의 간격을 바꾸어 가며 계산을 수행하고 위의 변수가 구조물의 유탄성 운동에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다.

2. 문제의 정식화

Fig.1에서 일자형 방파제로 둘러싸인 사각형 모양의 구조물을 본 계산의 모델로 생각한다. 좌표계의 원점 o는 정수면 위의 구조물 중심에 놓이

고 x 축과 y 축은 수평면에 놓이고 z 축은 상방으로 향한다. 구조물은 길이 L, 폭 B인 사각형 형태이고, 흘수 d는 아주 작아서 무시한다. 유체는 이상유체라는 가정하에 속도 포텐셜 $\phi = \text{Re}[\varphi e^{-i\omega t}]$ 은 시간에 조화함수이며 다음과 같이 표현된다.

$$\phi = i\omega a\phi_s + \sum_{j=1}^{\infty} i\omega X_j\phi_j; \quad (1)$$

where $\phi_s = \phi_I + \phi_D$

하첨자 I는 입사파와 관련된 성분을 표시하고, D는 산란성분을 나타내며 j는 복소진폭 X_j 와 운동의 j번째 모우드의 방사성분을 표시한다.

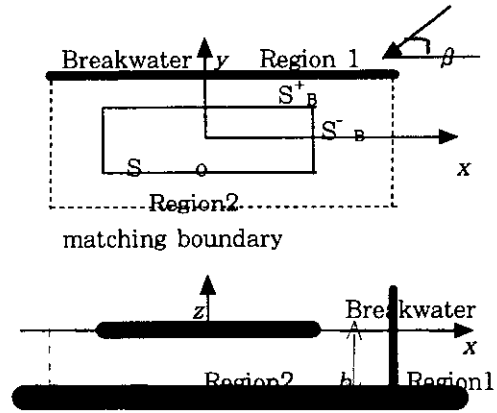


Fig.1 Definition of coordinate and problem

수직 변위는 자유-자유 보의 모드 형상을 사용하여 표현되며 x 방향의 모드(u_m)는 다음과 같다.

$$w = \sum_j X_j \xi_j(x, y) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} X_{mn} u_m(x) v_n(y) \quad (2)$$

$$u_0(x) = 1, u_1(x) = \frac{x}{L/2} \quad (3)$$

$$u_{2m}(x) = \frac{1}{2} \left[\frac{\cos \kappa_{2m} \frac{x}{L/2}}{\cos \kappa_{2m}} + \frac{\cosh \kappa_{2m} \frac{x}{L/2}}{\cosh \kappa_{2m}} \right] \quad (4)$$

$$u_{2m+1}(x) = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin \kappa_{2m+1} \frac{x}{L/2}}{\sin \kappa_{2m+1}} + \frac{\sinh \kappa_{2m+1} \frac{x}{L/2}}{\sinh \kappa_{2m+1}} \right] \quad (5)$$

$$(-1)^m \tan \kappa_m + \tanh \kappa_m = 0 \quad (6)$$

(6)에서 κ_m 은 양단이 자유인 보의 고유치를 나타낸다. Fig.1에서 유체영역은 두 영역으로 분리하고 영역1은 방파제 바깥쪽 영역을 둘러싸며 영역2는 구조물이 놓이는 방파제 안쪽 면을 둘러싸는 것을 나타낸다.

방사 문제를 해석하기 위해 영역 2에서 다음과 같은 적분방정식을 이용하여 방사 포텐셜을 구하였다.

$$2\pi\phi_s(x) + \int \int_{S^+} \phi_s(\xi) \frac{\partial G(\xi, x)}{\partial n_\xi} dS(\xi) = \int \int_{S^-} \zeta_s G(\xi, x) dS(\xi) \quad (7)$$

where S : surface of a floating structure
 S^- : breakwater surface of region 2

$G(\xi, x)$ 는 유한수심에서 동요하는 그린함수이다.

산란문제를 해석하기 위해 영역을 2부분으로 나누어서 수치 정합함으로서 구조물의 경계조건을 계산할 수 있다. 우선 영역 1에서 산란 문제를 해석하면 다음과 같은 적분 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$2\pi\widehat{\phi}_D(x_j) + \int \int_{S^+} \widehat{\phi}_D(x_i) \frac{\partial G(x_i, x_j)}{\partial n_i} dS_i = - \int \int_{S^+} \frac{\partial \phi_s(x_i)}{\partial n_i} G(x_i, x_j) dS_i \quad (8)$$

$$\phi_i = \frac{g}{\omega^2} \frac{\cosh \nu(z+h)}{\cosh \nu h} \exp[-i\nu(x\cos\beta + y\sin\beta)] \quad (9)$$

where $\omega^2/g = \nu \tanh \nu h$

β : incident wave angle

S^+ : breakwater surface of region 2

Fig.1에서 점선은 영역 1과 영역2의 정합면을 나타내며 정합면에서 포텐셜과 포텐셜에 대한 법선 미분은 영역 1에서 다음과 같다.

$$\widehat{\phi}_S(x_j) = -\frac{1}{2\pi} \int \int_{S^+} \widehat{\phi}_S(x_i) \frac{\partial G(x_i, x_j)}{\partial n_i} dS_i \quad (10)$$

$$\frac{\partial \widehat{\phi}_S(x_j)}{\partial n_x} = -\frac{1}{2\pi} \int \int_{S^+} \widehat{\phi}_S(x_i) \frac{\partial^2 G(x_i, x_j)}{\partial n_i \partial n_j} dS_i \quad (11)$$

where $\widehat{\phi}_S = \widehat{\phi}_D + \phi_i$

영역 1과 영역2의 겹치는 부분의 경계에서 수치 정합조건은 다음과 같다.

$$\phi_s = \widehat{\phi}_S \quad \text{on matching surface}$$

$$\frac{\partial \phi_s}{\partial n} = \frac{\partial \widehat{\phi}_S}{\partial n} \quad (12)$$

영역 2에서 산란문제에 대한 적분방정식과 경계조건은 다음과 같다.

$$2\pi\phi_s(x_i) + \int \int_{S^+} \phi_s(x_j) \frac{\partial G(x_i, x_j)}{\partial n_j} dS_j = \frac{1}{2\pi} [- \int \int_{S^+} G(x_i, x_j) dS_j \widehat{\phi}_S(x_i) \int \int_{S^+} \frac{\partial^2 G(x_i, x_j)}{\partial n_i \partial n_j} dS_i + \int \int_{S^+} \frac{\partial G(x_i, x_j)}{\partial n_j} dS_j \widehat{\phi}_S(x_i) \int \int_{S^+} \frac{\partial G(x_i, x_j)}{\partial n_i} dS_i]$$

where i : panels on S^- (13)

$$\frac{\partial \phi_s}{\partial n} = 0 \quad \text{on } S^- \quad (14)$$

산란문제에서 구조물에 작용하는 경계조건을 구하기 위해 (13)에서 계산된 산란 포텐셜을 이용하여 유도하면 다음과 같다.

$$\phi_s(x_k) = -\frac{1}{2\pi} \int \int_{S^+} \phi_s(x_j) \frac{\partial G(x_k, x_j)}{\partial n_j} dS_j \quad (15)$$

$$\frac{\partial \phi_s(x_k)}{\partial n} = -\frac{1}{2\pi} \int \int_{S^+} \phi_s(x_j) \frac{\partial^2 G(x_k, x_j)}{\partial n_j \partial n_i} dS_j \quad (16)$$

where x_k : field point on a structure

(15)와 (16)으로부터 산란 문제의 경계조건을 구하여 구조물에 대한 산란문제의 적분방정식을 다음과 같이 계산한다.

$$2\pi\phi_D(x) + \int \int_S \phi_D(\xi) \frac{\partial G(\xi, x)}{\partial n_\xi} dS(\xi) = \int \int_S \frac{\partial \phi_s}{\partial n_\xi} G(\xi, x) dS(\xi) \quad (17)$$

사각형 판의 운동방정식은 아래와 같이 범함수 형태로 나타낼 수 있다.

$$\Pi = \frac{D}{2} \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-B/2}^{B/2} (\nabla^2 w)^2 dx dy + \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-B/2}^{B/2} (-p + \rho gw - \omega^2 mw) dx dy = 0 \quad (18)$$

where $D=Et^3/12(1-\nu^2)$: flexural rigidity
 E : Young's modulus
 ν : Poisson's ratio
 $m(=M/LB)$: 질량분포
 $p(x,y)$: 판에서 동 유체 압력

(18)에 변분을 취하면 다음과 같은 식이 도출된다.

$$\int_{-L/2}^{L/2} \int_{-B/2}^{B/2} [\delta w (-\omega^2 mw - p + \rho gw) + \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-B/2}^{B/2} (\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \delta w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \delta w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \delta w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \frac{\partial^2 \delta w}{\partial y^2})] dx dy = 0 \quad (19)$$

(19)를 이용하면 수직변위를 계산할 수 있고 굽힘 모멘트는 이호영등(2000)의 문헌을 참고하여 계산하였다.

3. 해석 및 검토

Table 1 Numerical data for computation

$L \times B \times \text{draft}$: 1000m × 200m × 1.5m
h : 60m
$EI(=EI/B)$: 7.5×10^9 kgf/m
LB (length of breakwater) : 1400m
C (the distance between structure and breakwater) : 50m, 100m, 200m

본 논문의 계산 모델은 Table 1에 나타내었다. 수직변위, 굽힘 모멘트등의 무차원화는 이호영등(2000)에서 사용한 것과 같게 하였다.

Fig.2는 T (입사파의 주기)=10sec, $C=200m$, $\beta=90deg$ 인 경우에 구조물의 수직 변위를 방파제가 없는 경우와 비교하여 도시하였다. Nagata등(1999)의 계산결과와 비교하면

비교적 일치하는 것으로 보아 본 계산이 유효함을 알 수 있다.

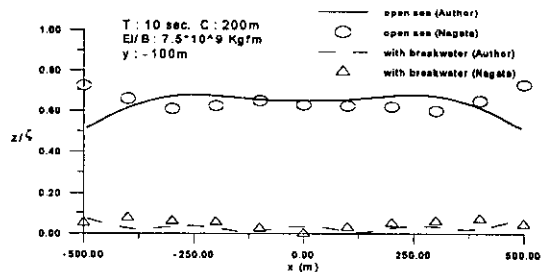
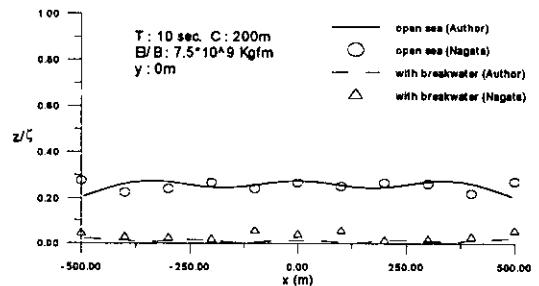
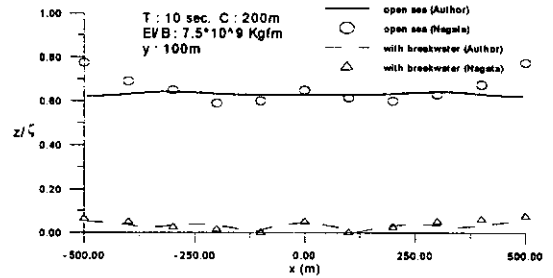


Fig.2 Distribution of vertical displacement of the structure along the length direction

Fig.3은 $C=200m$, $\beta=90deg$ 인 경우에 주기를 8, 10, 12, 14sec로 변화시키면서 계산한 수직 응답을 보여주고 있다. 전반적으로 주기가 커지면 운동응답도 커지는 것을 알 수 있다. 그러나 $y=-100m$ 위치에서 $T=14sec$ 인 경우에 구조물의 중간 부근에서 수직 운동이 작게 되는 것

을 볼 수 있는데, 이는 방파제와 구조물간의 상호 간섭 효과에 기인한 듯하다.

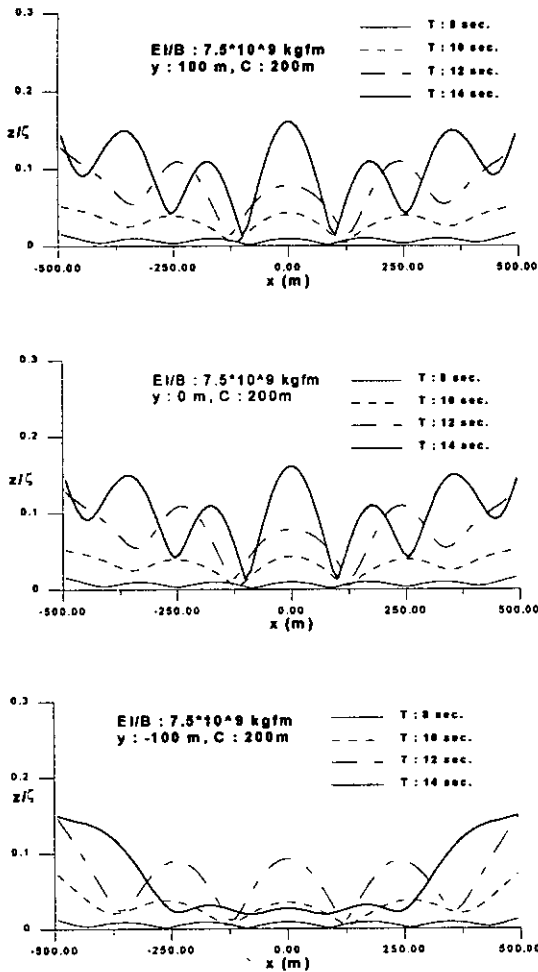


Fig.3 Distribution of vertical displacement of the structure along the length direction

Fig.4는 $T=10\text{sec}$, $C=200\text{m}$, $\beta=90\text{deg}$ 인 경우에 강성을 $0.25E1, 0.5E1, E1, 2E1, 3E1$ 으로 바꾸어 가면서 계산을 수행한 결과를 도시하였다. 강성이 커지면 운동응답은 줄어드는 것을 알 수 있다.

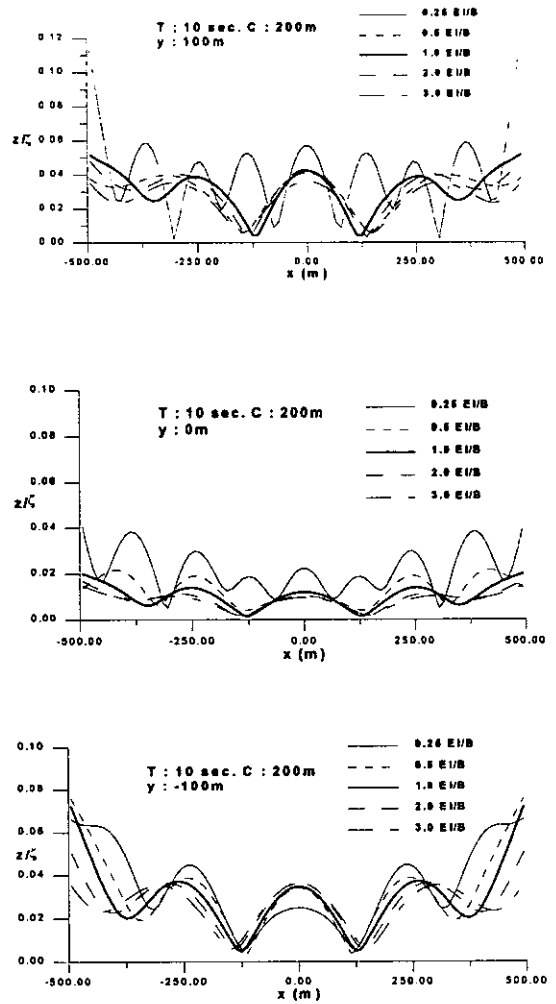


Fig.4 Distribution of vertical displacement of the structure along the length direction

Fig.5는 $T=10\text{sec}$, $C=200\text{m}$, $\beta=90\text{deg}$ 인 경우에 방파제와 구조물사이의 간격 $C=50, 100, 200\text{m}$ 로 바꾸어 가면서 수행한 결과를 도시하였다. 그럼으로부터 $C=50\text{m}$ 의 경우에서 응답이 가장 큰 것으로 보아 구조물과 방파제 사이를 너무 가깝게 하는 것은 좋지 않는 것으로 보인다.

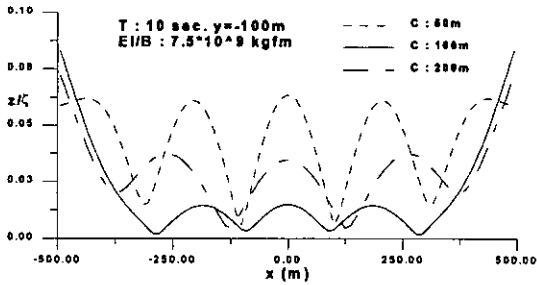
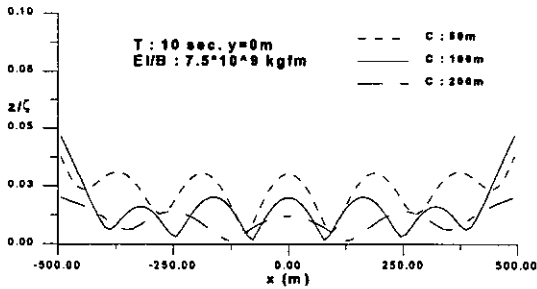
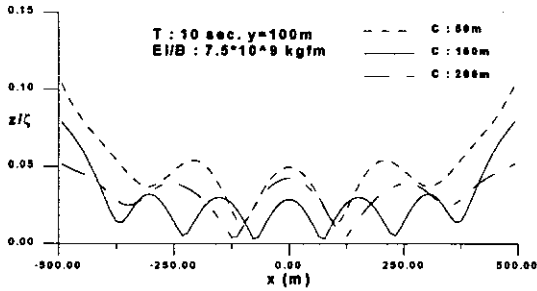


Fig.5 Distribution of vertical displacement of the structure along the length direction

Fig.6은 $T=10\text{sec}$, $C=200\text{m}$, $\beta=90\text{deg}$ 인 경우에 모드에 따른 절대운동 진폭을 도시하였다. 그림으로부터 수직 절대 변위는 x 축 방향으로 2절 진동($m=2$, $n=0$)이 가장 큰 응답을 발생시키는 것을 알 수 있다.

Fig.7은 $T=10\text{sec}$, $C=200\text{m}$, $\beta=90\text{deg}$ 인 경우에 절대 수직 응답을 3차원적으로 도시하였고, 4절 진동의 형태로 구조물이 운동하는 것을 알 수 있다.

Fig.8은 $T=10\text{sec}$, $C=200\text{m}$, $\beta=90\text{deg}$ 인 경우에 무차원화된 수직 굽힘 모멘트(M'_{xx})를 3차원적으로 도시하였다. 그림으로부터 알 수 있듯이 방파제와 인접한 곳($y=100\text{m}$)은 7개의 모드를 보여 주며 방파제와 떨어진 곳($y=-100\text{m}$)은 3개의 모드를 보여준다. 이는 방파제 앞면에서 구조물과 방파제의 간섭 효과가 큰 것에 기인한다.

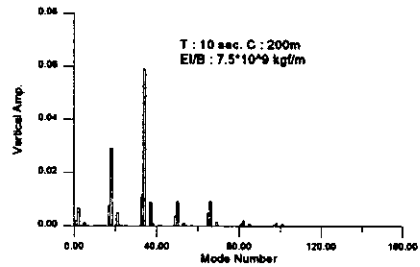


Fig.6 Complex absolute amplitudes of mode numbers

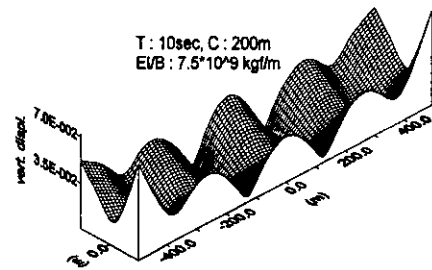


Fig.7 Vertical displacement amplitudes.

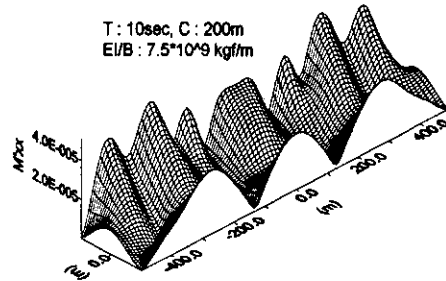


Fig.8 Bending moment distributions

4. 결론

본 논문에서 방파제를 고려한 소오스-다이폴 분포법을 사용하여 유체압력을 계산하고 모드해석법을 사용하여 구조물의 변위를 계산하여 다음 결론을 도출하였다.

- 1) 본 해석 방법은 부유식 해상공항과 방파제 시설계시에 직접 이용될 수 있다.
- 2) 설계파에 따라 방파제를 적절히 설치하면 해상공항의 응답을 상당히 줄일 수 있다.
- 3) 주기가 커지고 강성이 작은 경우는 유탄성 응답이 커지는 것을 확인하였다.
- 4) 앞으로 본 방법의 더 정확한 검증을 위해 실험이 수행되어야 하고 계산치와 실험치의 비교가 반드시 필요하다.

참 고 문 헌

- 구자삼, 조효제, 김병현, 이창호 1998 "바이지식 초대형 부유식 구조물의 유탄성 응답 해석," 한국해양공학회지, 제12권 제2 호, pp.43-56.
- 신현경, 이호영, 신현수, 박인규 2000 "초대형 부유식 해양구조물에 대한 유탄성 응답에 대한 해석 방법," 한국해양공학회지, 제14권 제2호.
- 신현경, 이호영, 임춘규, 신현수, 박인규 2000 "불규칙파 중 초대형 부유식 해양 구조물에 대한 운동," 대한조선학회 논문집, 제37권 제4호.
- 심인환, 윤재돈, 최항순 1999 "사파중에 놓인 거대 부유체의 응답에 대한 유탄성 해석," 대한조선학회논문집, 제36권 제3 호, pp.83-92.
- 이호영, 신현경 2000 "천홀수 초대형 부유식 해양구조물에 관한 연구," 한국해양공학회지, 제14권 제2호.
- 이호영, 신현경, 신현수, 박인규 2000 "압력분포법에 의한 초대형 부유식 해양 구조물의 유탄성 해석," 대한조선학회논문집, 제37권 제4 호.
- 이호영, 신현경 2000 "시간영역에서 초대형 부유식 해양구조물에 대한 유탄성 응답 해석," 한국해양공학회지, 제14권 제3호.
- Nagata, S. et al. 1999 "Wave-Induced Motion of an Elastic Floating Plate in a Sea with a Breakwater", Pro. of the 3rd VLFS, Hawaii, Vol. I, pp114-122.
- Ohmatsu, S. 1999 "Numerical Calculation Method of Hydroelastic Response of Pontoon -type VLFS close to a Breakwater" Pro. of the 3rd VLFS, Hawaii, Vol. II, pp805-811.



〈 이 호 영 〉



〈 신 현 경 〉



〈 임 춘 규 〉