

천흡수 초대형 부유식 해양구조물의 유탄성 응답 해석

이호영 · 신현경
울산대학교 수송시스템공학부

Analysis of Hydroelastic Responses for Very Large Floating Structures with a Shallow Draft

HO-YOUNG LEE AND HYUN KYOUNG SHIN

School of Transportation Systems Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

KEY WORDS: Radiation potential 방사포텐셜, Diffraction potential 산란포텐셜, Finite-depth Green function 유한수심 그린함수, Source-dipole distribution method 소오스-다이폴 분포법, Hydroelastic response 유탄성응답, Plate equation 판방정식

ABSTRACT: A numerical method to predict responses of very large floating structures in wave is suggested, using source-dipole distribution method. The deflection of the plate is calculated by the finite element method in terms of rigidity matrix of each node. The calculated results for a plate are compared with the experimental ones.

1. 서 론

현대 사회의 사회적 요구에 의해 해양공간 이용의 필요성이 증대되고 있으며 특히 3면이 바다로 둘러싸인 우리나라에서는 해양공간의 이용은 21세기에 주요한 과제가 될 것이다. 이미 일본에서는 메가플로트(mega-float) 기술연구조합에 의해 길이가 4~5km이고, 흡수는 대략 2~5m인 폰툰(pontoon)형태의 초대형 부유식 해양구조물이 연구되고 있다. 이런 형태의 구조물은 파랑 중에서 응답이 심하기 때문에 방파제를 설치함으로써 구조물의 운동을 줄이는 것이 일반적이다.

초대형 부유식 구조물의 응답을 계산하기 위해 기존 구조물과 같이 강체로 취급하는 것은 부적절하며 그들의 유탄성 변형을 고려하여 파도에 의한 구조물의 응답을 해석하는 것이 필요하다. 현재까지 초대형 부유식 해양구조물의 유탄성 응답을 해석하기 위해 많은 연구가 이루어져 왔다(Yago and Endo, 1996; Shin et al., 1999; 구 등, 1998; 신 등, 1999).

본 연구에서는 유체력을 계산하기 위해 유한 수심의 그린함수를 이용한 소오스-다이폴 분포법이 사용되었다(Shin et al., 1999). 구조물의 응답은 판 방정식에 의해 만족되며, 판 요소를 이용하여 유한 요소법에 의해 정식화되었다.

본 연구의 검증을 위해 실증 실험이 행해진 일본의 메가플로트 1기 모델을 해석모델로 택하였으며, 본 대학의 해양공학관 폭주조에서의 실험결과와 비교하여 좋은 결과를 얻었다(신 등, 1999).

2. 수식의 정식화

좌표계는 Fig. 1과 같이 정의되며, z=0의 위치에 정수면이 놓

이고 사각형 형태의 평판 구조물은 z=-d 에 놓이는 우수 좌표계를 사용하였다.

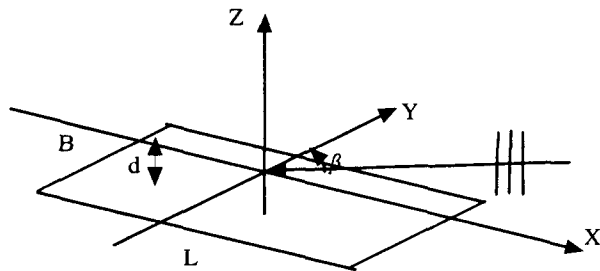


Fig. 1 Coordinate system and notation

구조물의 형상은 길이 L, 폭 B인 사각형 형태이고, 흡수 d는 폭과 길이에 비해서 아주 작다. 선형이론을 도입하기 위해 구조물의 운동은 미소진폭의 시간 조화운동이라 가정하여 물체 및 자유표면 경계조건을 선형화 하였다.

속도 포텐셜 ϕ , 압력 p, 구조물의 수직변위 w 는 다음과 같이 표현된다.

$$\phi = i\omega [a(\phi_I + \phi_S) + \sum_{i=1}^{NX \times NY/4} w_i \phi_i] \quad (1)$$

$$p = \rho g [a(p_I + p_S) + \sum_{i=1}^{NX \times NY/4} w_i p_i] \quad (2)$$

a ; 입사파의 진폭

ρ ; 물의 밀도

g ; 중력가속도

하첨자 I ; 입사파 성분,

S ; 산란성분

w_i ; i 번째 운동의 복소진폭
 NX ; x 축 방향의 요소 수
 NY ; y 축 방향의 요소 수

유한 수심에서 입사파의 포텐셜 ϕ_I 는 선형파 이론을 사용함으로써 주어진다.

$$\phi_I = \frac{g}{\omega^2} \frac{\cosh k_0(z+h)}{\cosh k_0 h} \exp[-ik_0(x \cos \beta + y \sin \beta)] \quad (3)$$

ω ; 입사파의 주파수
 β ; 입사파의 진행방향과 x 축과 이루는 각
 k_0 ; 분산관계를 만족하는 파수

유탄성 응답을 나타내기 위한 일반화된 방사 문제는 4개의 유체 요소가 같이 단위 운동할 경우에 각 유체 요소의 절점에 유기하는 포텐셜을 계산하는 문제로 구성되었다. ϕ_i ($i = 1, \dots, NX \times NY/4$)는 다음과 같은 경계조건을 만족한다.

$$\nabla^2 \phi_i = 0 \quad \text{in the fluid domain} \quad (4)$$

$$\phi_{iz} - \frac{\omega^2}{g} \phi_i = 0 \quad \text{at } z=0 \quad (5)$$

$$\phi_{iz} = 0 \quad \text{at } z = -h \quad (6)$$

속도 포텐셜은 그린(Green) 제 2정리에 의해 소오스와 법선 다이폴에 의해서 각 유체 요소의 절점에서 계산된다.

$$2\pi\phi_i(x) + \int \int_{S_H} \phi_i(\xi) \frac{\partial G(\xi, x)}{\partial n_\xi} dS(\xi) = \int \int_{S_H} \frac{\partial \phi_i(\xi)}{\partial n_\xi} G(\xi, x) dS(\xi) \quad (7)$$

$i=1,2,\dots,NX \times NY/4$

$G(\xi, x)$; 유한수심에 대한 그린 함수
 n ; 단위 법선벡터
 x 와 ξ ; 관측점과 용출점
 S_H ; 구조물의 밑면

(7)에서 i 가 변해도 좌변의 행렬은 변함이 없고 우변의 행렬을 $NX \times NY/4$ 만큼 계산하여 각각에 대한 ϕ_i 을 구할 수 있다. 유탄성 문제를 해석하기 위해 일반화된 방사문제에 대한 물체 표면조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial n} = n_{zi} \quad , \quad i=1,2,\dots,NX \times NY/4 \quad (8)$$

산란 포텐셜에 대한 물체 표면조건은 기존의 강체문제와 동일하게 사용하였다.

$$\frac{\partial \phi_S}{\partial n} = -\frac{\partial \phi_I}{\partial n} \quad (9)$$

(7)에서 사용된 유한수심 그린함수는 다음과 같은 경계치 문제를 만족한다.

$$\nabla^2 G = \delta(x - \xi) \delta(y - \eta) \delta(z - \zeta) \quad (10)$$

in the fluid domain

$$G_z - \frac{\omega^2}{g} G = 0 \quad , \quad \text{at } z=0 \quad (11)$$

$$G_z = 0, \quad z = -h \quad (12)$$

$$(kR)^{1/2} (G_R - ikG) \rightarrow 0, \quad kR \rightarrow \infty \quad (13)$$

유한수심 그린함수는 다음과 같다(Wehausen and Laitone, 1960).

$$G(x, y, z, \xi, \eta, \zeta) = \frac{-2\pi(K^2 - k_0^2)}{k_0^2 h - K^2 h + K} \times \cosh k_0(z+h) \cosh k_0(\zeta+h) H_0^{(2)}(k_0 R) + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_n^2 + K^2}{k_n^2 h + K^2 h - K} \cos[k_n(z+h)] \cos[k_n(\zeta+h)] K_0(k_n R) \quad (14)$$

여기서 K 는 다음과 같이 정의된다.

$$K = \frac{\omega^2}{g} = k_0 \tanh k_0 h \quad (15)$$

k_n 은 다음 식의 해를 의미한다.

$$k_n \tan k_n h + K = 0 \quad (16)$$

$$R^2 = (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 \quad (17)$$

$$r^2 = R^2 + (z - \zeta)^2 \quad (18)$$

$$r'^2 = R^2 + (z + 2h + \zeta)^2 \quad (19)$$

K_0 ; 2종 0차 수정된 Bessel 함수

$H_0^{(2)}$; 2종 0차 수정된 Hankel 함수

(7)에서 방사 문제의 적분방정식을 계산하기 위해 방사문제의 포텐셜은 이웃하는 4개 유체 요소의 단위운동에 의해 표현된다.

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial n} = n_z = [1, 0, 0, \dots, 0]^T$$

$$\frac{\partial \phi_2}{\partial n} = n_z = [0, 1, 0, \dots, 0]^T \quad (20)$$

$$\frac{\partial \phi_{NX \times NY/4}}{\partial n} = n_z = [0, 0, 0, \dots, 1]^T$$

(7)의 적분 방정식은 $NX \times NY$ 개의 요소로 분할하여 각 면적 요소에서 ϕ 및 $\frac{\partial \phi}{\partial n}$ 이 일정하다는 가정을 도입하면 다음과 같다.

$$2\pi(\phi_j)_i + \sum_{j=1}^{NX \times NY} (\phi_j)_i \int \int_{\delta S} \frac{\partial G_{ij}}{\partial n_j} dS_j \quad (21)$$

$$= \sum_{j=1}^{NX \times NY} (n_z)_i \int \int_{\delta S} G_{ij} dS_j$$

$i=1,2,\dots,NX \times NY/4$

(21)에서 도출된 대수 방정식을 풀면 각 면적 요소에서 ϕ_j 가 계산되어 진다.

구조물의 밑면에 작용하는 압력은 선형화된 베르누이 방정식을 적용하면 아래와 같이 계산된다.

$$p = \rho g Re \sum_{i=0}^{NX \times NY/4} [i\omega w_i \phi_i e^{i\omega t}] \quad (22)$$

$$+ \rho g a Re [(\phi_I + \phi_S) e^{i\omega t}]$$

3. 판의 유탄성 운동

판의 두께가 길이와 폭의 차원에 비하여 아주 작으므로 유체력과 관련된 압력에 의한 구조물의 응답은 판으로 모델링될 수 있으므로 다음식에 의해 표현된다.

$$-M\omega^2 w(x,y) + D \left[\frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4} \right] w(x,y) = -\rho i \omega \phi \omega - \rho g w \quad (23)$$

$D = (Et^3/12(1-\nu^2))$; flexural rigidity

E ; Young's modulus, ν ; Poisson's ratio,

t ; 구조물 두께)

M (= total mass/LB); 질량분포

$w(x,y)$; 판의 수직 변위

구조물의 응답을 유한요소법에 의거 이산화 하면 다음과 같은 식을 얻는다(Yago and Endo, 1996).

$$(-\omega^2 ([M] + [m]) + i\omega [N] + [K_r] + [K_s]) [w] = [F] \quad (24)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} M_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & M_{22} & 0 & \dots & 0 \\ & & \vdots & & \\ & & \vdots & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & M_{nn} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$[m] = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & \dots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & \dots & m_{2n} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & \dots & m_{3n} \\ & & \vdots & & \\ & & \vdots & & \\ m_{n1} & m_{n2} & m_{n3} & \dots & m_{nn} \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} & N_{13} & \dots & N_{1n} \\ N_{21} & N_{22} & N_{23} & \dots & N_{2n} \\ N_{31} & N_{32} & N_{33} & \dots & N_{3n} \\ & & \vdots & & \\ & & \vdots & & \\ N_{n1} & N_{n2} & N_{n3} & \dots & N_{nn} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$[K_r] = \rho g \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & w_{13} & \dots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & w_{23} & \dots & w_{2n} \\ & & \vdots & & \\ & & \vdots & & \\ w_{n1} & w_{n2} & w_{n3} & \dots & w_{nn} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$[M]$; 요소부체 질량 행렬

$[m]$; 부가 질량 행렬

$[N]$; 감쇠계수 행렬

$[K_r]$; 복원력 및 복원 모우먼트

$[K_s]$; 강성행렬

수직 응답에 기인한 방사 및 산란 압력은 상하요, 횡동요 및 종동요 성분을 포함하기 위해 유체력 계산으로부터 구조물의 판 방정식을 계산 할 때 각 구조 절점에서 3가지 힘 성분을 다음과 같이 도출하였다(Fig.2).

$$F_{heave} = (p_1 + p_2 + p_3 + p_4)A/4 \quad (29)$$

$$F_{roll} = (p_2 + p_4 - p_1 - p_3)\Delta y A/8 \quad (30)$$

$$F_{pitch} = (p_1 + p_2 - p_3 - p_4)\Delta x A/8 \quad (31)$$

A ; 구조 요소의 면적

Δx ; 구조 요소의 x축 방향의 길이

Δy ; 구조 요소의 y축 방향의 길이

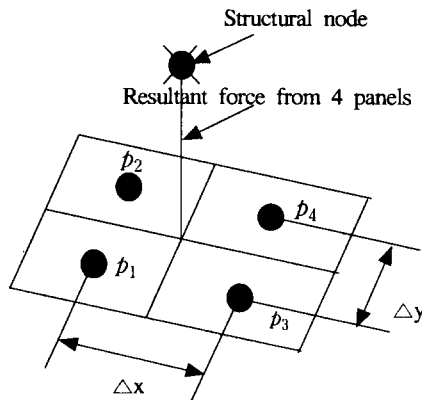


Fig. 2 Panel configurations

(24)에서 구조물의 복소변위를 계산하여, 굽힘 모우먼트의 계산은 다음과 같은 관계식을 이용하였다.

$$[M] = [B][w] \tag{32}$$

[B] ; 굽힘 모우먼트와 변위의 변환 벡터

4. 해석 및 검토

이 논문에서는 일본에서 실증실험을 행한 메가플로트 phase 1 구조물을 택하여 계산을 수행하고 그 결과를 실험치와 비교하였다. 계산에 사용된 구조물의 기본 제원은 Table 1과 같다.

Table 1 Numerical data for computation

<p>$L \times B \times D \times \text{draft}$; 300m \times 60m \times 2m \times 0.5m h ; 8m, 107m E ; $1.2175 \times 10^9 \text{ kg/m}^2$ λ ; wave length of infinite depth</p>
--

Fig. 3은 수심(=107m), $\lambda/L=0.5$, $\beta=0^\circ$ 의 경우에 이웃하는 4개의 유체 요소의 단위 운동에 기인한 방사 압력을 보여주고 있다. Fig. 4, 5, 6은 입사, 산란에 기인한 압력 성분 및 총(입사+산란) 압력 성분을 도시하였다. Fig. 6에서 총 압력은 파도를 받는 전면에서 최대가 되고 후면에서는 최저의 값을 갖는다.

Fig. 7은 수심(=8m, 107m), $\lambda/L=0.1, 0.5, 1.0$, $\beta=0^\circ, 30^\circ$ 인 경우의 구조물의 수직운동을 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 파장이 작은 경우에도 수직운동의 모드가 잘 보이고 있고, 수심이 작아지면 수직운동도 줄어드는 것을 알 수 있다. 그 이유는 수심이 줄어들면 부가질량과 감쇠계수가 커지며, 파강제력은 크기가 비슷하기 때문에 식 (24)에서 좌변의 값이 커지고 우변은 크게 변하지 않으므로 수직 응답이 줄어든다(신 등, 1999).

Fig. 8은 수심(=8m, 107m), $\lambda/L=0.1, 0.5, 1.0$, $\beta=0^\circ, 30^\circ$ 인 경우의 $y=0$ 인 곳의 구조물의 수직운동을 도시하여 실험치와 비교하였다. 전반적으로 Yago 실험치와 아주 잘 일치하고 있다. 그러나 부분적으로 울산대학교 실험과 일치하지 않는 것은 실험에서 계류장치의 구속이 수평운동과 수직 운동에 영향을 준 듯하다(심 등, 1999).

Fig. 9는 수심(=8m, 107m), $\lambda/L=0.1, 0.5, 1.0$, $\beta=0^\circ$ 인 경우의 $y=0$ 인 곳의 구조물의 굽힘 모우먼트를 도시하였다. 수심이 알아짐에 따라 굽힘 모우먼트의 절대값의 변화는 없고, 최대값이 파 상측으로 평행 이동한 모습을 보여 주고 있다.

5. 결 론

이 논문은 소오스-다이폴 분포법과 유한요소법을 사용하여 초대형 부유식 해양구조물에 대한 유탄성 응답을 해석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 모드 해석법에서는 구조물의 형상이 직사각형 모양의 구조

물 밖에 계산 할 수 없으나, 본 논문의 방법은 부분적으로 구조물의 모양 및 강성이 변하고 계류계가 설치된 경우에 대한 계산을 수행하는데 어려움이 없다.

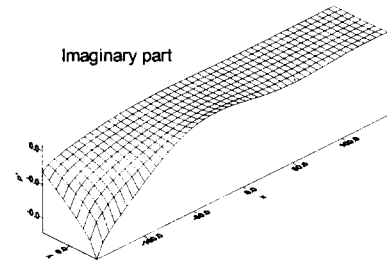
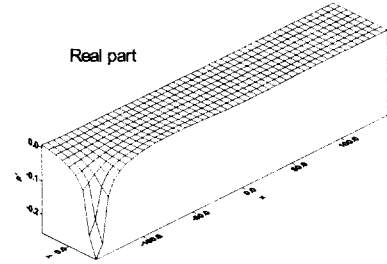


Fig. 3 Calculated radiation pressure distribution ($\lambda/L=0.5$, $h=107m$)

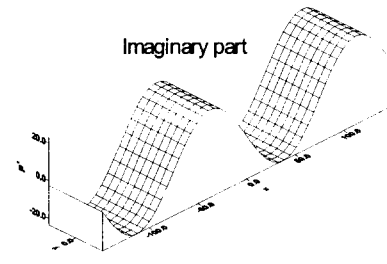
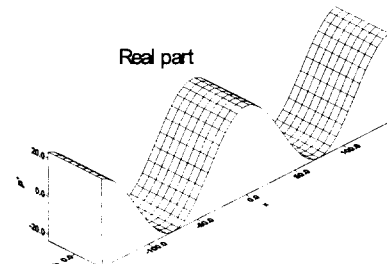


Fig. 4 Calculated incident wave pressure distribution ($\lambda/L=0.5$, $h=107m$)

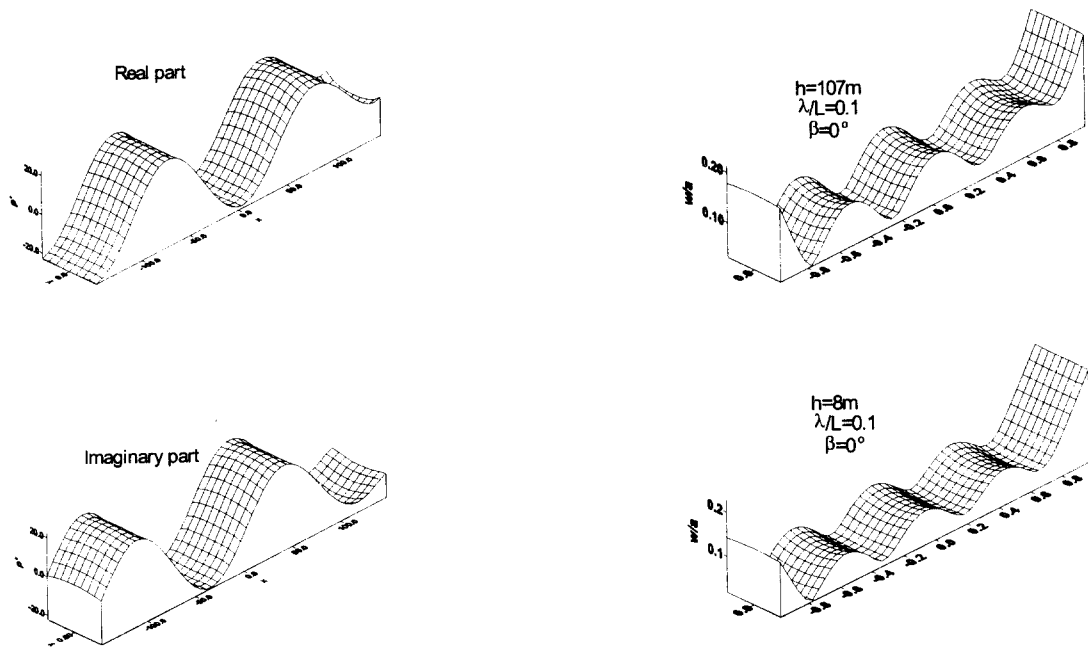


Fig. 5 Calculated diffraction pressure distribution ($\lambda/L=0.5$, $h=107m$)

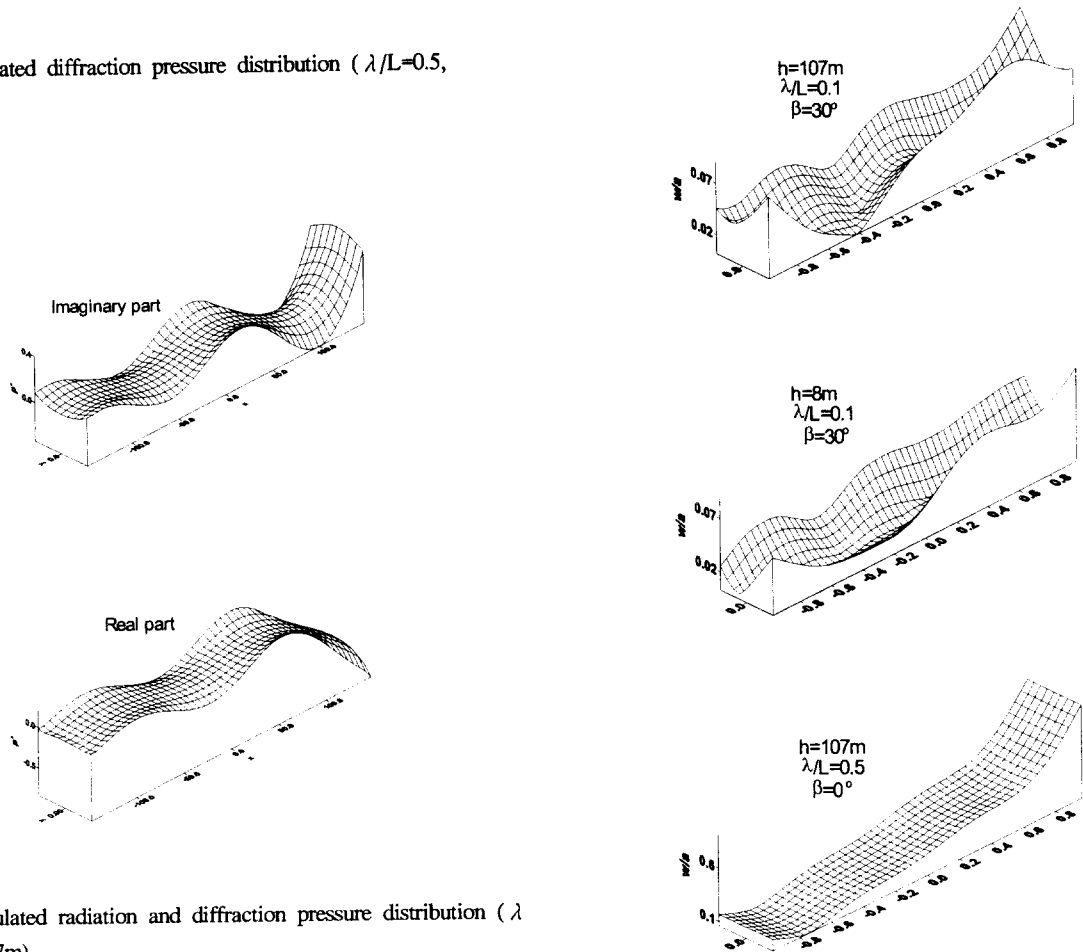


Fig. 6 Calculated radiation and diffraction pressure distribution ($\lambda/L=0.5, h=107m$)

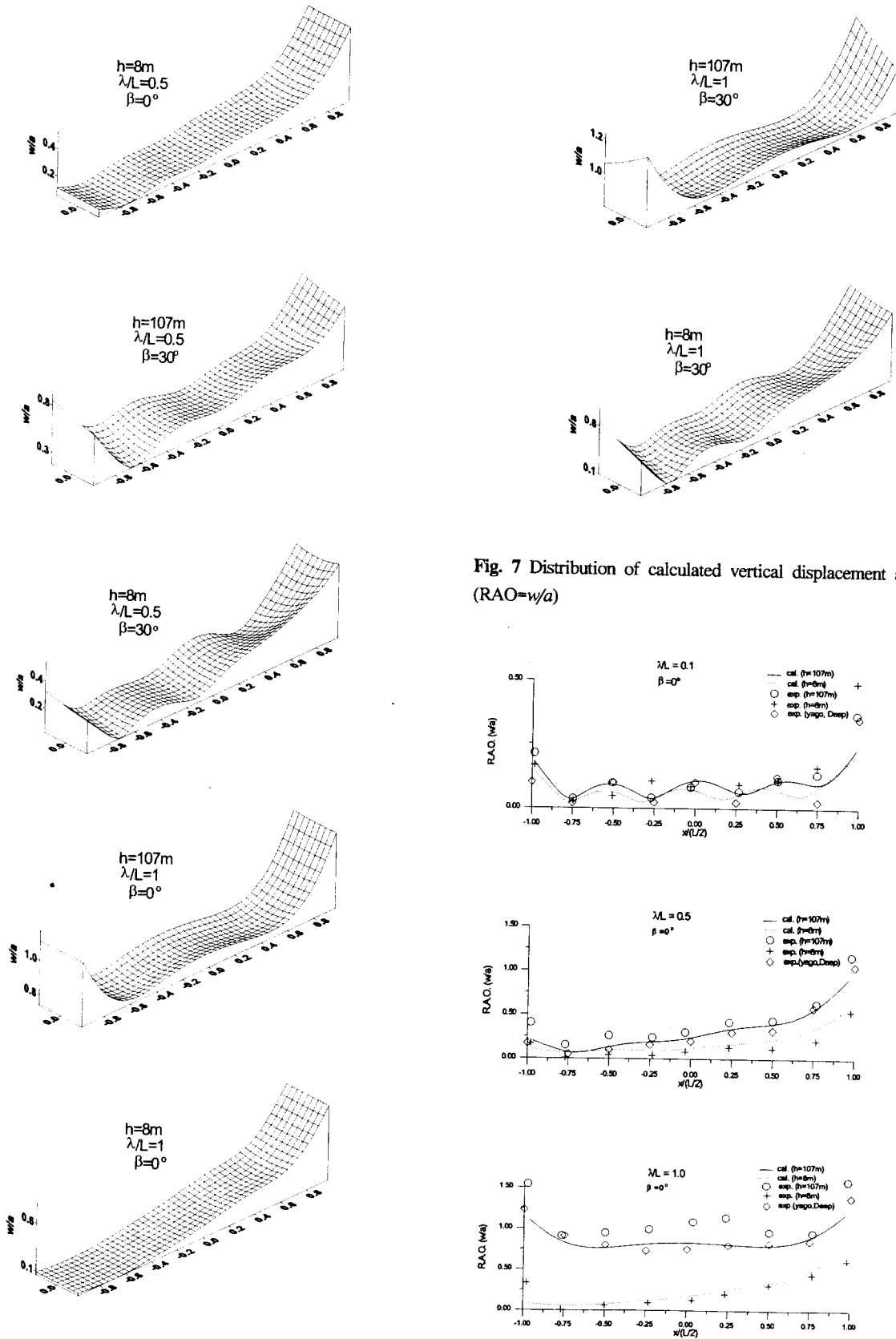


Fig. 7 Distribution of calculated vertical displacement amplitude (RAO= w/a)

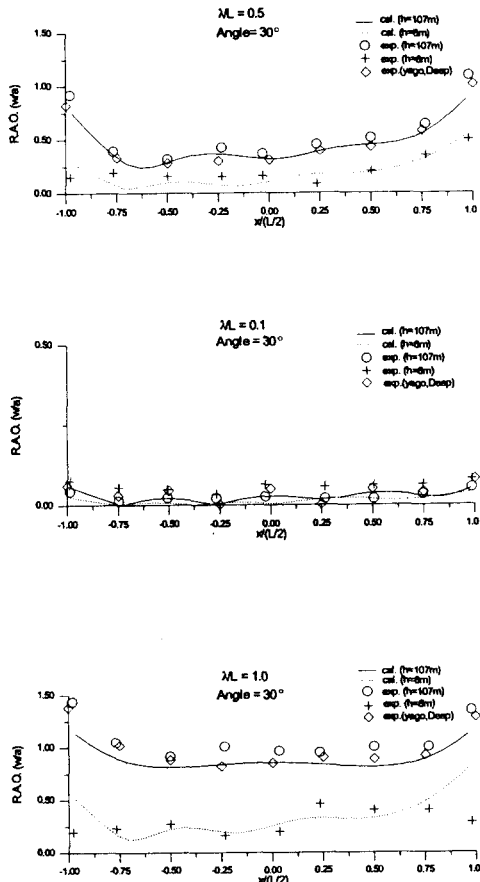


Fig. 8 Longitudinal distribution of vertical displacement amplitude (RAO=w/a)

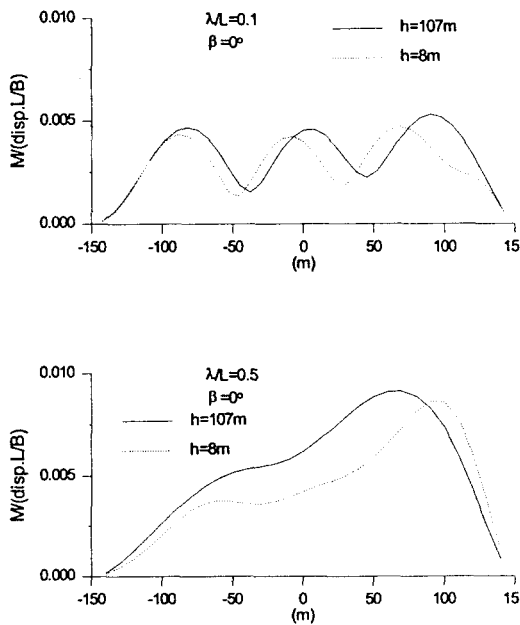


Fig. 9 Distribution of bending moment amplitude on center line

- (2) 수심이 줄어들면 구조물의 길이 방향에 걸쳐진 유탄성 응답의 파장이 줄어들고 동시에 응답의 크기도 줄어든다.
- (3) 유탄성 응답의 진폭은 파 상측에서 최대가 되고 파 하측에서 커지는 경향을 가지며, 특히 사파 중에서는 파 하측의 응답이 파 상측보다 커지는 경우도 간혹 발생한다.
- (4) 굽힘 모우멘트는 무한 수심인 경우에 구조물 길이의 1/4 혹은 3/4 부근에서 최대 값을 갖고, 유한수심인 경우에는 1/4 위치에서 최대 값을 가진다.
- (5) 본 논문의 결과는 실험치와 비교하여 정성적으로 일치하는 결과를 얻었다. 결과적으로 본 논문에서 제안한 방법은 초대형 부유식 해양구조물의 유탄성 응답을 해석하기 위한 실용적인 해석법으로 판단된다.

참고 문헌

구자삼, 조효제, 김병현, 이창호(1998). “바아지식 초대형 부유 구조물의 유탄성 응답 해석”, 한국해양공학회지, 제12권 제 2호.

신현경, 이호영, 신현수, 박인규(1999). “초대형 부유식 해양구조물의 유탄성 해석-압력분포 방법”, 대한조선학회 추계연구발표회 논문집.

신현경 등(1999). “천흡수 부유식 해양 구조물의 유탄성 모형시험”, 대한조선학회 춘계연구 발표회.

심인환, 윤재돈, 최항순(1999). “사파중에 놓인 거대 부유체의 응답에 대한 유탄성 해석”, 대한조선학회 논문집, 제36권 제3호.

Shin, H. et al.(1999). “An Experimental Study on the Hydroelastic Behavior of Very Large Floating Structures”, VLFS'99, Vol. II, Hawaii.

Wehausen, J. V. and Laitone, E. V.(1960). “Handbuch der Physik”, Vol. 9, Springer-Verlag, Berlin.

Yago, K. and Endo, H.(1996). “On the Hydroelastic Response of Box-Shaped Floating Structure with Shallow Draft”, J. of Soc. of Naval Arch. of Japan, Vol. 180.

2000년 4월 10일 원고 접수
 2000년 5월 18일 수정본 채택