

다방향불규칙파중의 Pontoon형의 초대형부유식해양구조물에 대한 유탄성응답 특성

김철현* · 구자삼* · 조효제** · 이승철*

*부경대학교 조선해양시스템공학과

**한국해양대학교 해양시스템공학부

Hydroelastic Behavior for a Very Large Floating Structure of Poontoon-Type in Multi-Directional Irregular Waves

CHEL-HYUN KIM*, JA-SAM GOO*, HYO-JAE JO** AND SEUNG-CHUL LEE*

*Dept. of Naval Architecture and Marine Systems Engineering, PuKyong Nat'l Univ., Busan, Korea

**Div. of Ocean Systems Engineering, Busan, Korea

KEY WORDS: Very large floating structure 초대형부유식구조물, Hydroelastic response 유탄성응답, Three dimensional source distribution method 3차원특이점분포법, Multi-directional waves 다방향파, Spectral analysis method 스펙트럴 해석법, Elastic motion 탄성거동

ABSTRACT: Recently, as the technology of utilization for the ocean space is being advanced, floating structures are asked for being more and more huge-scale. A Very large floating structure(VLFS) is considered as a flexible structure, because of a quite large length-to-breadth ratio and its geometrical flexibility. The main object of this study is to develop an accurate and convenient method on the hydroelastic response analysis of very large offshore structures on the real sea states. The numerical approach for the hydroelastic responses is based on the combination of the three dimensional source distribution methods, the dynamic response analysis method and the spectral analysis method. A model is considered as many rigid bodies connected elastic beam elements. The calculated results show good agreement with the experimental and calculated ones by Ohta.

1. 서 론

최근, 육상자원 고갈 및 해상이용의 대안으로 초대형 부유식 구조물(VLFS)의 이용이 부각되고 있다. 이러한 초대형 부유식 구조물은 길이와 폭에 비하여 높이가 매우 작기 때문에 전체적으로 상대적인 굽힘강성이 작고, 파랑 중의 운동은 강제운동보다도 탄성운동이 현저하게 된다. 이러한 초대형 부유식 구조물의 유탄성 응답을 해석하기 위한 방법으로는 구조물의 고유모드를 구하여 이들 모드를 중첩시켜 탄성응답을 해석하는 모드합성법과 구조물의 각 절점의 변위를 운동방정식에서 직접 구하는 이산화법이 있다. 모드 합성법은 탄성응답에 크게 기여하는 고유모드와 고유진동수가 바로 구해지는 장점이 있다. 초대형 부유식구조물은 기하학적 특성 때문에 Toki(1979)는 반잠수식 대형구조물을 탄성기초위의 보로 단순화 시켜 해석하였고, Enolo(1984) 및 Endo and Hoshtno(1986)은 Column-footing형 부체를 Deck에 나란히 연결하고 Deck를 균일보로 가정해서 탄성응답을 해석하였다. 경조현 등(2004), Mamidipudi and Webster(1994) 및 Hamamoto(1994)은 평판모델을 적용하여 모드중첩법으로 해석하였다. 초대형 부유식해양구조물의 파랑응

답 및 구조응답에 대한 대부분의 연구는 계측이나 해석의 어려움 때문에 장파정파를 환경외력의 하나로 취급하고 있다. 하지만 실제 이들 구조물이 사용되는 실해역의 파는 장파정파가 아닌 서로 다른 방향성을 갖는 다양한 성분파들로 구성된 단파정파이므로 보다 현실성 있는 결과를 얻기 위해서는 단파정파를 고려할 필요가 있다. Takezawa et al.(1992a; 1992b; 1993)은 다방향파 중의 다수 Column형 부체로 지지된 초대형 부유식 구조물에 대한 응답을 연구한 바가 있다. 본 논문에서는 부분적 강성변화나 복잡한 기하학적 형상을 가지는 실제의 초대형 부유식 구조물의 수평 및 수직응답을 실용적으로 구할 수 있는 유탄성 응답 해석법의 개발을 목적으로 하였다.

본 논문에서는 구조물을 다수의 외각요소로 분할하고 각 외각요소에 대한 유체력 및 파강제력을 산정하였다. 그리고, 각 외각요소의 대표 절점을 탄성 보요소로 연결하여 유한 요소법에 의해 정식화함으로써 유탄성 응답을 해석하였다. 특히, 탄성거동에 의한 영향을 정도 좋게 평가하기 위하여 각 외각요소의 국소좌표계에 대한 6자유도 운동을 고려하여 Radiation 영향을 평가하였다. 길이 15.0m × 폭 3.0m × 높이 0.056m인 모델에 대한 Ohta et al.(1998)의 실험치 및 계산치와 비교·검토하여 본 해석기법의 타당성을 확인하였다.

2. 이론해석

2.1 기본가정 및 좌표계

교신저자 구자삼 : 부산광역시 남구 대연3동 599-1

051-620-6486 jsgoo@pknu.ac.kr

본 방법에 의해 구조물의 유탄성 응답을 해석하기 위한 기본 가정은 다음과 같다.

- (1) 유체는 비압축성, 비점성으로 하고, 유체의 운동은 비회전인 것으로 한다.
- (2) 자유표면은 모든 방향으로 무한히 펼쳐져 있는 것으로 하고, 수심이 유한인 경우에는 수심을 일정으로 한다.
- (3) 상부구조는 3차원 골조 선형 탄성구조로 한다.
- (4) 각각의 평형위치에 대해 응답은 미소진폭의 조화진동으로 한다.

전체 구조물을 Fig. 1과 같이 21개의 외각요소와 20개의 보요소로 분할하고, 외각요소(Hull element)는 형상, 크기, 질량을 가지고, 외력을 받으며 강체로서 거동하며, 보요소(Beam element)는 탄성체로서 외각요소의 절점을 연결하는 역할을 한다.

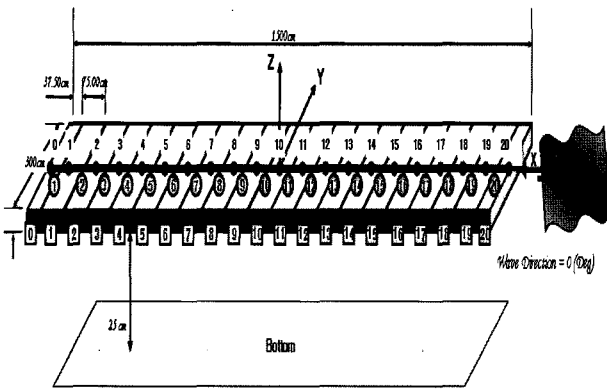


Fig. 1 Sketch of floating bodies and the beam elements for the upper structure

2.2 운동방정식

외각요소에 작용하는 유체압력은 그 외각요소의 절점에서의 힘과 모멘트로 평가한다.

각 절점에서 평가한 힘과 모멘트는 변위, 속도, 가속도의 미지량을 포함하기 때문에, 구조물 전체의 절점 변위벡터를 {n}이라고 하고 각 절점에 작용하는 힘과 모멘트를 결합해줌으로써 구조 전체에 대한 다음과 같은 운동 방정식을 얻을 수 있다.

$$[-\omega^2([M_S] + [\mu]) - i\omega([C_S] + [v]) + ([K_S] + [K_P])] \{n\} = \{F^W\} \quad (1)$$

- 여기서, $[M_S]$: 전체 질량행렬
- $[\mu]$: 유체에 의한 전체 부가질량행렬
- $[C_S]$: 전체 구조감쇠행렬
- $[v]$: 전체 조파감쇠행렬
- $[K_S]$: 전체 강성행렬
- $[K_P]$: 정수압에 의한 전체 복원력행렬
- $\{F^W\}$: 파강제력 벡터
- $\{n\}$: 구조물 전체의 절점 변위 벡터

식 (1)의 연립방정식을 푸는 것에 의해, 절점 변위 벡터 {n}가

구해진다. 절점 변위 벡터가 구해지면 외각요소 l의 침수표면상의 임의의 점 (x', y', z') 에 있어서의 변동압력은 다음과 같이 구해진다.

$$p' = \left[i\rho\omega\phi'_l + i\rho\omega \left\{ \phi'_D + \sum_{k=1}^6 -i\omega n'_k \phi'_k \right\} - \rho g \{ n'_3 + (y' - y'_0)n'_4 - (x' - x'_0)n'_5 \} \right] e^{-i\omega t} \quad (2)$$

여기서, ω, ρ 는 파주파수와 해수밀도이고, $\phi'_l, \phi'_D, \phi'_k$ 은 각각 침수표면상의 임의의 점 (x', y', z') 에서의 입사, 산란, 방사포텐셜이다. (x'_0, y'_0, z'_0) 은 외각요소 l의 절점 좌표이고, n'_k 은 그 절점 변위이다.

전체 구조감쇠행렬은 다음과 같이 Rayleigh감쇠를 이용하기로 한다.

$$[C_S] = a[M_S] + b[K_S] \quad (3)$$

여기서, a, b는 비례상수이다.

2.2.1 부가질량행렬 및 조파감쇠행렬

절점 (x'_0, y'_0, z'_0) 를 운동기준점으로 개별의 6자유도 강제운동을 하는 외각요소 $l(l = 1, 2, \dots, N)$ 들로 구성된 구조물에 대하여 Radiation potential $\phi_k(k = 1 \sim 6)$ 를 구하기 위한 경계치 문제는 다음과 같다.

$$\nabla^2 \phi_k = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (4)$$

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial z} - k\phi_k = 0 \quad \text{on } S_F \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial z} = 0 \quad \text{on } S_B \quad (6a)$$

$$\lim_{z \rightarrow -\infty} \text{grad} \phi_k = 0 \quad \text{on } S_B \quad (6b)$$

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial n} = n'_k \quad (l = 1, 2, \dots, N) \quad \text{on } S_H \quad (7)$$

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \sqrt{R} \left(\frac{\partial \phi_k}{\partial R} - ik\phi_k \right) = 0 \quad \text{on } S_R \quad (8)$$

여기서, 식 (6a)는 유한수심의 경우이고, 식 (6b)는 무한수심의 경우이다. 또한 (4)~(8)는 각각 유체내부 Ω 에서의 유체의 연속성, 자유표면 S_F 에 있어서의 운동학적, 역학적 조건, 해지면 S_B 에 있어서의 불투과조건, 부체 침수표면 S_H 에 있어서의 부체와 유체의 속도의 연속조건, 무한 원방 S_R 에 있어서의 방사조건을 나타내고 있다. 특히 식 (7)의 n'_k 는 각 축에 평행한 단위 속도 운동에 의한 외각요소 l의 표면에서의 운동 속도의 법선방향성분 ($k=1 \sim 3$) 및 외각요소 l의 절점 (x'_0, y'_0, z'_0) 에 대한 각

축 둘레의 단위 각속도 운동에 의한 외각 요소 표면에서의 운동 속도의 법선방향성분 ($k = 4 \sim 6$)으로, 다음과 같다.

$$\begin{aligned} n_1^l &= n_x, & n_2^l &= n_y, & n_3^l &= n_z \\ n_4^l &= (y^l - y_0^l) n_z - (z^l - z_0^l) n_y \\ n_5^l &= (z^l - z_0^l) n_x - (x^l - x_0^l) n_z \\ n_6^l &= (x^l - x_0^l) n_y - (y^l - y_0^l) n_x \end{aligned} \quad (9)$$

위의 경계치문제(방사문제)를 풀어서 ϕ_k 가 구해지면, 외각요소 l 의 Radiation potential ϕ_k^l 은 다음과 같다.

$$\phi_k^l = \phi_k \quad (10)$$

외각요소 l 에 작용하는 동유체력은 속도에 비례하는 힘과 가속도에 비례하는 힘으로 분리할 수 있다. 속도에 비례하는 힘을 $\{F_N^{Rl}\}$ 라 하고, 가속도에 비례하는 힘을 $\{F_A^{Rl}\}$ 라 하면, 다음과 같이 구해진다.

$$\{F_N^{Rl}\} = -[v_{jk}^l] \{\dot{n}^l\}, (j, k = 1 \sim 6) \quad (11)$$

$$\{F_A^{Rl}\} = -[\mu_{jk}^l] \{\ddot{n}^l\}, (j, k = 1 \sim 6) \quad (12)$$

여기서,

$$\phi_k^l = \phi_{kc}^l + i\phi_{ks}^l$$

로 두면, μ_{jk}^l 와 v_{jk}^l 는 다음과 같다.

$$\mu_{jk}^l = -\rho \int \int_{S_H^l} \phi_{kc}^l n_j^l ds \quad (13)$$

$$v_{jk}^l = -\rho\omega \int \int_{S_H^l} \phi_{ks}^l n_j^l ds \quad (14)$$

여기서, μ_{jk}^l 과 v_{jk}^l 은 각각 외각요소 l 에 대하여 k 방향의 운동에 의한 j 방향에의 부가질량 및 감쇠계수이고, S_H^l 는 외각요소 l 의 침수표면적이다. $[\mu_{jk}^l], [v_{jk}^l]$ 는 기준좌표계에 대한 외각요소 l 의 부가질량 행렬, 조파감쇠 행렬이다.

2.2.2 강성행렬 및 질량행렬

전단변형 및 회전관성을 고려한 보요소의 강성행렬 및 질량행렬은 TLP등의 해양구조물에 적용되어온 기존의 연구(구자삼 등, 1998)를 이용하고, 전체구조물에 대한 값으로 좌표변환하여 적용하였다.

2.2.3 파강제력 벡터

외각요소 l 의 입사파 속도포텐셜 ϕ_l^i 은 다음과 같다.

$$\phi_l^i = \phi_l \quad (15)$$

기준좌표계 x 축의 음의 방향에서 양의 방향으로, x 축과 β 의 각을 이루며 입사하는 평면 입사파의 포텐셜은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

유한 수심의 경우에는

$$\phi_l = \frac{g\zeta_a}{i\omega_0} \frac{\cosh k_0(z+h)}{\cosh k_0 h} e^{ik_0(x \cos \beta + y \sin \beta)} \quad (16a)$$

이고, 무한 수심의 경우에는

$$\phi_l = \frac{g\zeta_a}{i\omega_0} e^{k_0 z} e^{ik_0(x \cos \beta + y \sin \beta)} \quad (16b)$$

이다. 여기서, ζ_a 는 평면 입사파의 진폭, k 는 수심, k_0 는 파수이다. 또, 파수 k_0 는, 유한 수심의 경우에는

$$k_0 \tanh k_0 h = \frac{\omega_0^2}{g} \quad (17a)$$

의 양의 실근이고, 무한수심의 경우에는

$$k_0 = \frac{\omega_0^2}{g} \quad (17b)$$

이다.

기준좌표계에 대한 외각요소 l 에 작용하는 입사파에 의한 파강제력 벡터는 다음과 같이 구해진다.

$$\{F_j^l\} = -i\rho\omega \int \int_{S_H^l} \phi_l^i n_j^l ds, (j = 1 \sim 6) \quad (18)$$

산란포텐셜 ϕ_D 는 다음과 같은 경계치 문제(산란 문제)의 해로서 구해진다.

$$\nabla^2 \phi_D = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (19)$$

$$\frac{\partial \phi_D}{\partial z} - k\phi_D = 0 \quad \text{on } S_F \quad (20)$$

$$\frac{\partial \phi_D}{\partial z} = 0 \quad \text{on } S_B \quad (21a)$$

$$\lim_{z \rightarrow -\infty} \text{grad} \phi_D = 0 \quad \text{on } S_B \quad (21b)$$

$$\frac{\partial \phi_D}{\partial n} = -\frac{\partial \phi_I}{\partial n} \quad \text{on } S_H \quad (22)$$

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \sqrt{R} \left(\frac{\partial \phi_D}{\partial R} - ik \phi_D \right) = 0 \quad \text{on } S_R \quad (23)$$

여기서, 식 (21a)는 유한수심의 경우이고, 식 (21b)는 무한수심의 경우이다.

산란포텐셜 ϕ_D 가 구해지면, 외각요소 l 의 산란포텐셜 ϕ_D^l 는 다음과 같다.

$$\phi_D^l = \phi_D \quad (24)$$

기준좌표계에 대한 외각요소 l 에 작용하는 산란파에 의한 파강제력 벡터는 다음과 같이 구해진다.

$$\{F_j^{Dl}\} = \left\{ -ip\omega \iint_{S_H} n_j^l \phi_D^l ds \right\}, \quad (j=1 \sim 6) \quad (25)$$

그러므로, 외각요소 l 의 절점에 작용하는 파강제력 벡터는 다음과 같이 구해진다.

$$\{F_j^{Wl}\} = \{F_j^{Il}\} + \{F_j^{Dl}\}, \quad (j=1 \sim 6) \quad (26)$$

2.3 다방향불규칙파중의 운동응답 해석

방향성을 갖는 불규칙파의 특성을 나타내는 다방향파의 스펙트럼 $S_{\zeta\zeta}(\omega, X)$ 는 각 주파수 성분파의 방향 X 에 따른 분포를 나타내는 방향분포함수 $D(\omega, X)$ 와 주파수 ω 에 따른 파에너지 분포를 나타내는 1차원 파 스펙트럼 $S_{\zeta\zeta}(\omega)$ 에 의해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S_{\zeta\zeta}(\omega, X) = D(\omega, X) S_{\zeta\zeta}(\omega) \quad (27)$$

방향분포함수 $D(\omega, X)$ 의 일반적인 모델은 주파수에 대해 독립인 여현분포함수로서 다음과 같이 표현된다.

$$D(X) = \frac{\Gamma(S+1)}{\sqrt{\pi} \Gamma(S+\frac{1}{2})} \cos^{2S}(X-\theta_0) \quad (28)$$

여기서, $X = \theta + \theta_0$ 이며 θ_0 는 입사파의 주방향, θ 는 주방향과 성분파의 진행방향이 이루는 각을 표시하고, S 는 파에너지의 방향에 따른 분포의 분산 정도를 나타내는 파라미터로써, $S \rightarrow \infty$ 일 때, 한방향파(Uni-directional waves) 즉, 장파정도가 된다. 그리고 방향분포 파라미터 S 를 변화시켜도 에너지가 일정하게 되도록 방향분포함수 $D(X)$ 의 θ 에 대한 적분값을 다음과 같이 정규화시킬 필요가 있다.

$$\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} D(\theta) d\theta = 1 \quad (29)$$

본 연구에서 사용된 1차원 파 스펙트럼은 ISSC 스펙트럼으로 다음과 같이 표현된다.

$$S_{\zeta\zeta}(\omega) = \frac{1}{2\pi} 0.11 H_{1/3}^2 T_1 \left(\frac{T_1}{2\pi} \omega \right)^{-5} \times \text{EXP} \left[-0.44 \left(\frac{T_1}{2\pi} \omega \right)^{-4} \right] \quad (30)$$

여기서, ω 는 파의 원주파수(rad/sec), $H_{1/3}$ 은 유의파고, T_1 은 평균 파주기이다.

선형입출력계에 있어서, 입력에 대한 출력은 단위충격응답함수와 입력의 시간력과의 콘볼루션적분으로 표현되어진다. 여기서는 입력으로서 방향파의 수면상승량 $\zeta(t, X)$ 를 취했을 때, 출력을 초대형 해양구조물의 각 응답 $x(t, X)$ 로 표시한다. 단, t 는 시간, X 는 위치벡터를 나타낸다. 수면 상승량 및 응답의 자기상관함수는 각각 다음과 같이 표기된다.

$$R_{\zeta\zeta}(\tau, \delta) = E[\zeta(t, X) \cdot \zeta(t+\tau, X+\delta)] \quad (31)$$

$$R_{xx}(\tau, \delta) = E[x(t, X) \cdot x(t+\tau, X+\delta)] \quad (32)$$

여기서, τ 는 시간차이고, δ 는 위치벡터의 차를 나타낸다. 응답의 자기상관함수는 단위충격함수를 이용하여 표현하면 아래와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} R_{xx}(\tau, \delta) &= \iiint \iiint \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau_1, \delta_1) h(\tau_2, \delta_2) \\ &\times E[\zeta(t-\tau_1, X-\delta_1) \zeta(t+\tau-\tau_2, X+\delta-\delta_2)] d\tau_2 d\delta_2 d\tau_1 d\delta_1 \\ &= \iiint \iiint \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau_1, \delta_1) h(\tau_2, \delta_2) \\ &\times R_{\zeta\zeta}(\tau+\tau_1-\tau_2, \delta+\delta_1-\delta_2) d\tau_2 d\delta_2 d\tau_1 d\delta_1 \end{aligned}$$

여기서, Wiener-Khintchine 공식,

$$R_{xx}(\tau, \delta) = \iint \int_{-\infty}^{\infty} S_{xx}(\omega, K) e^{i(K\delta - \omega\tau)} dK d\omega \quad (33)$$

을 윗식에 적용하면 응답 스펙트럼이 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} &\iint \int_{-\infty}^{\infty} S_{xx}(\omega, K) e^{i(K\delta - \omega\tau)} dK d\omega \\ &= \iint \int_{-\infty}^{\infty} \left[\iiint \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau_2, \delta_2) e^{-i(K\delta_2 - \omega\tau_2)} d\delta_2 d\tau_2 \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times \int \int \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau_1, \delta_1) e^{i(K\delta_1 - \omega\tau_1)} d\delta_1 d\tau_1 \\ & \times S_{\xi\xi}(\omega, K) e^{i(K\delta - \omega\tau)} dK d\omega \\ = & \int \int \int_{-\infty}^{\infty} H_{\xi\xi}(\omega, K) H_{\xi\xi}^*(\omega, K) \\ & \times S_{\xi\xi}(\omega, K) e^{i(K\delta - \omega\tau)} dK d\omega \end{aligned}$$

위의 식으로부터 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$S_{xx}(\omega, K) = |H_{\xi\xi}(\omega, K)|^2 S_{\xi\xi}(\omega, K) \quad (34)$$

따라서, 주방향 θ_0 인 다방향파에 대한 주파수 응답스펙트럼 $S_{xx}(\omega, \theta_0)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$S_{xx}(\omega, \theta_0) = \int_{-\pi}^{\pi} |H_{\xi\xi}(\omega, \theta_0 + \theta)|^2 S_{\xi\xi}(\omega, \theta_0 + \theta) d\theta \quad (35)$$

단, $H_{\xi\xi}(\omega, \theta_0 + \theta)$ 는 초대형 해양구조물의 주파수응답함수로서 김철현(2005)에 의해 소개된 바 있는 탄성거동해석법에서 구해지는 단위진폭의 규칙파에 대한 응답이고, $S_{\xi\xi}(\omega, \theta_0 + \theta)$ 는 다방향파 스펙트럼을 나타내고 있다.

3. 수치계산결과 및 고찰

다방향 불규칙파 중의 초대형부유식 해양구조물의 유탄성응답에 대한 본 해석법의 타당성을 검증하기 위하여 Fig. 2와 같은 초대형 부유식 구조물에 대한 Ohta등의 실험치와 비교·검토하였다. Ohta의 실험모델에 대한 주요목과 Table 1과 같다. 계산모델은 Fig. 1과 같이 전체모델을 21개(21×1)의 외각요소로 분할하였다. 상부구조는 Fig. 1과 같이 직선보요소로 근사하였고, 모델의 강성의 불균일성을 무시하여 종탄성계수는 $7.20075 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 으로 전 구조물에 대해 균일한 것으로 하고 요소의 비틀림 계수는 18.52103542 cm^4 로 하였다. 포와송비는 0.345로 하고, 구조감쇠는 Rayleigh감쇠로 전체질량행렬에 비례하는 구조감쇠의 비례상수 a는 0.0으로 하였고, 전체강성행렬에 비례하는 구조감쇠의 비례상수 b는 0.01로 하였다. Fig. 1에서 흑점은 절점을 나타내고 굵은 실선은 보요소를 나타낸다. 실험조건은 Table 2 및 Table 3에 나타나 있다. 수심은 다방향파의 영향을 평가하기 위하여 25cm의 천수심에 대한 Ohta의 실험과 비교하였고, 규칙파와 장파정 및 단파정 불규칙파에 대한 실험결과와 각각 비교하였다. 단파정 불규칙파의 방향분포는 Ohta의 실험조건과 동일한 분포를 가지는 것으로 한다.

불규칙파를 고려하기 위하여 본 계산에 사용된 1차원 스펙트럼은 ISSC스펙트럼을 사용하였다.

Fig. 3은 규칙파에 대한 구조물의 중심선상의 상하변위의 응

답진폭의 길이방향분포를 나타내고 있다. 흑점(●)은 Ohta의 실험치를 나타내고, 원표(○)는 본 계산방법에 의한 결과이다. 규칙파에 대하여 입사파의 파장이 길수록, 구조물의 응답진폭이 크게 되는 경향을 볼 수 있다. 특히, 입사각 $\theta=0^\circ$ 인 경우에 있어서는 파상측 단부의 응답진폭이 가장 크고, 파하측으로 갈수록 작아지고, 파하측 단부에서 다시 약간 증가하는 유탄성 거동 특성을 확인할 수 있다.

Fig. 4~Fig. 6은 $\lambda/L=0.06, 0.18$ 인 장파정불규칙파와 단파정 불규칙파에 대하여 주입사각이 $0^\circ, 45^\circ$ 그리고 90° 으로 한 Ohta의 실험에 대하여 본 계산은 수행하였다. 원표(○)는 장파정불규칙파에 대한 Ohta의 실험치이고, 십자표(+)는 단파정불규칙파에 대한 Ohta의 실험치를 나타내고 있다. 흑점(●)과 별표(*)는 각각 장파정불규칙파와 단파정불규칙파 중에 있어서 본 계산법의 결과이다.

Table 1 Principal particulars of the Ohta model

	VL15[Test model]	Prototype
Scale ratio	1/80	1/1
Length, L	15	1200.0m
Breadth, B	3.0m	240.0m
Depth, D	56.0mm	4.5m
Draft, d	12.5mm	1.0m
Stiffness	334	1.09×10^{12}
$EI_{Longi.}(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$		(7.86×10^{11})
Water depth	0.25m	20m

() : Target

Table 2 Test condition

Water depth	0.25m (Shallow) 3.10m (Deep)
Waves	Regular wave Long crested irregular wave Short crested irregular wave
Wave direction	$0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$

Table 3 Wave condition

λ/L	Period Tw(s)	Wave height Hw(mm)	Irregular waves
0.06	0.78	20	○
0.10	1.11	20	
0.12	1.28	20	○
0.18	1.82	20	○
0.20	2.00	20	

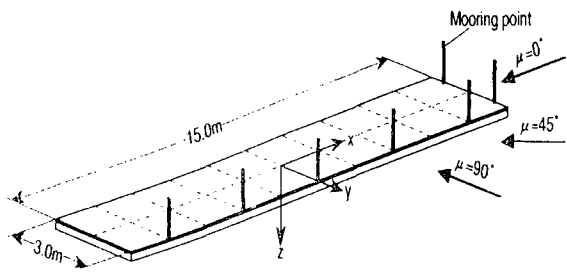


Fig. 2 Coordinate system and experimental setup by Ohta

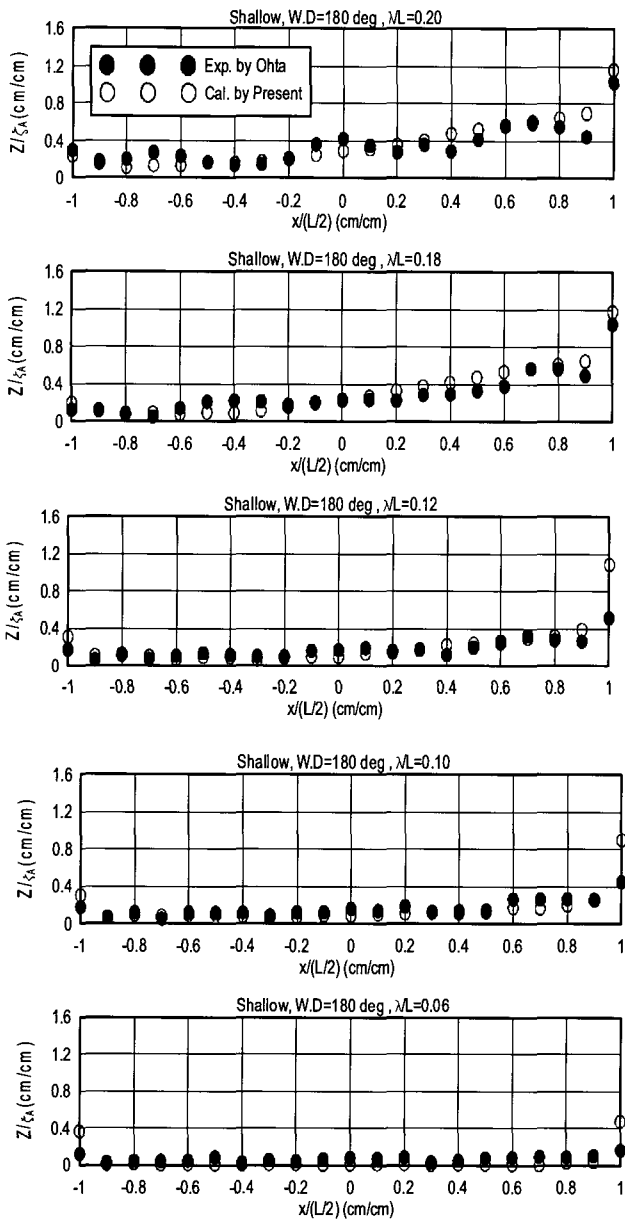


Fig. 3 Distributions of vertical displacements amplitudes (shallow, $\theta=0^\circ$)

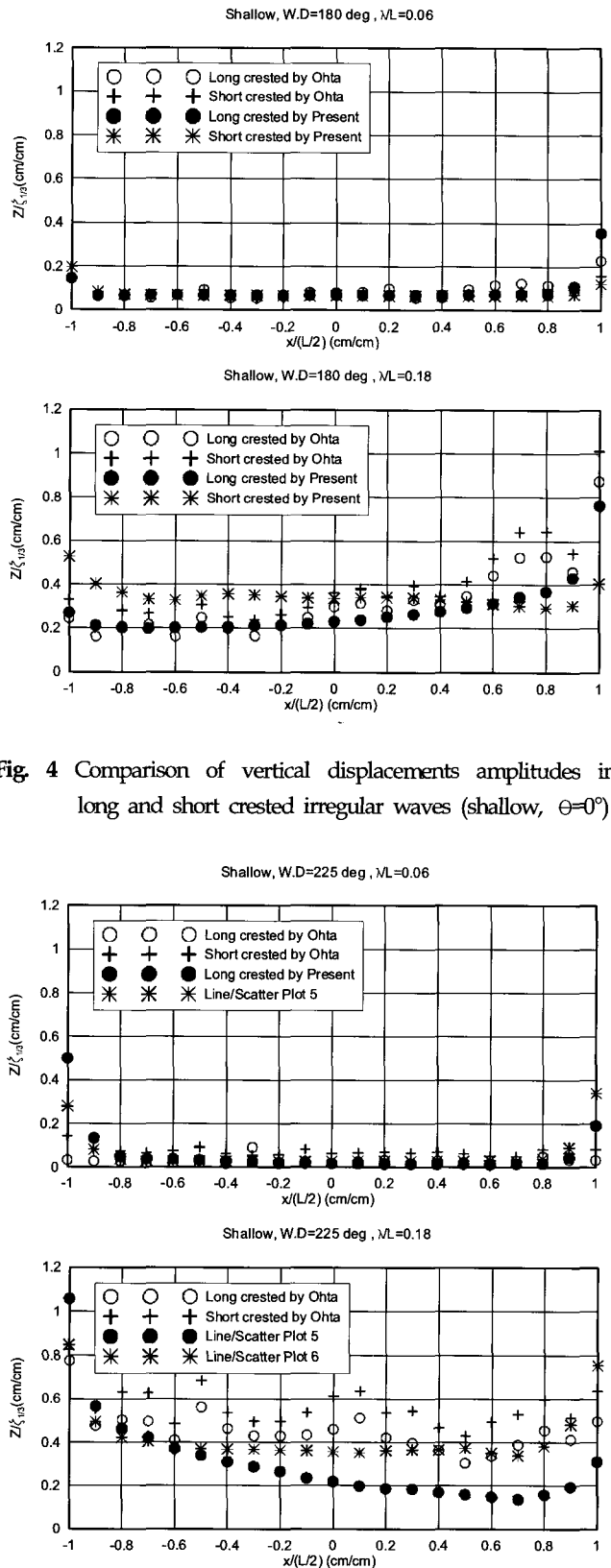


Fig. 4 Comparison of vertical displacements amplitudes in long and short crested irregular waves (shallow, $\theta=0^\circ$)

Fig. 5 Comparison of vertical displacements amplitudes in long and short crested irregular waves (shallow, $\theta=45^\circ$)

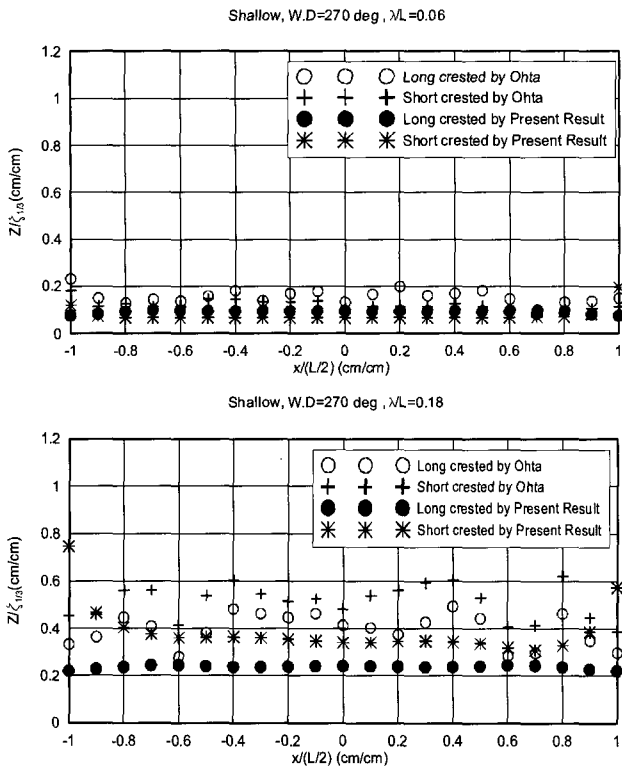


Fig. 6 Comparison of vertical displacements amplitudes in long and short crested irregular waves (shallow, $\theta=90^\circ$)

파주기가 같은 경우, 장파정불규칙파중의 응답과 단파정불규칙파중의 응답은 대체로 유사하지만 단파정불규칙파 중의 응답이 약간 크게 나타난다.

Fig. 4의 경우, 파상측에서는 장파정불규칙파의 경우가 응답이 크게 나타나지만, 파하측에서는 오히려 단파정불규칙파의 경우가 응답이 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 장파정불규칙파의 경우 파에너지의 방향분산성이 없기 때문에 구조물의 길이방향에 따른 에너지손실이 크게 나타나지만, 단파정불규칙파의 경우 파에너지의 방향분산성으로 인하여 파하측까지 파에너지가 전달되기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 5와 Fig. 6의 입사각 $\theta = 45^\circ, 90^\circ$ 에 대하여 $\lambda/L=0.06$ 의 단파장인 경우 장파정불규칙파중과 단파정불규칙파중의 응답이 그다지 차이가 나타나지 않지만, $\lambda/L=0.18$ 의 장파장인 경우 전반적으로 단파정불규칙파 중의 응답이 크게 나타난다. 이는 한방향으로만 입사하는 파의 경우 입사각에 대하여 파에너지의 대부분이 구조물을 통과하지만, 다방향파로 입사하는 파의 경우는 입사각의 분포성에 의해 외각요소 서로간에 파에너지의 발산 및 방사의 영향을 크게 미치기 때문인 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서 취급한 계산모델 및 계산조건하에서 얻어진 주요한 결론은 다음과 같다.

(1) 다방향 불규칙 파 중 초대형 부유식 구조물의 탄성응답을 실용적으로 정도 좋게 추정할 수 있는 탄성응답 해석법을 개발하였다.

(2) Ohta의 바이지식 부유구조물에 대한 실험치와 본 탄성응답 해석법에 의한 계산치를 서로 비교·검토한 결과 본 계산기법의 타당성이 검증되었다.

(3) 파랑 중 초대형 부유식 구조물은 입사파의 입사각에 따라 에너지 분산 효과로 인하여 장파정불규칙파보다도 단파정불규칙파에서 더 큰 응답이 나타나는 것을 알 수 있었다.

(4) 본 탄성응답 해석법은 실제 파랑 중의 초대형 부유식 구조물의 유탄성응답을 예측할 수 있어 구조설계시 피로강도설계의 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

구자삼, 조효제, 김병현, 이창호 (1998). “바이지식 초대형 부유구조물의 유탄성응답해석”, 한국해양공학회지, 제12권, 제2호, pp 43-56.

경조현, 김병완, 조석규, 홍사영 (2004). “해저지형을 고려한 초대형 부유체의 유탄성 거동해석”, 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp 783-792.

김철현, 구자삼, 조효제, 이창호 (2005). “탄성거동에 의한 유체력을 고려한 초대형 부유식 구조물의 유탄성응답해석 기법”, 한국해양공학회 추계학술대회논문집, pp 97-103.

Endo, H. (1984). “Wave-Forced Vibration of floating Compliant Platforms”, Journal of society of naval architects of Japan, Vol 155, pp 284-292.

Endo, H and Hoshino, K. (1986). “Parametric study on the dynamic response of floating complaint structures in regular waves”, Proc. of the 5thOMAE, Vol III, pp 194-199.

Hamamoto, T. (1994). “Dynamic Response of flexible circular floating islands subjected to stochastic waves and seaquakes”, Hydroelasticity in Marine Technology, pp 433-445.

Ohta, M, Ikegami, K and Yamaguchi, Y. (1998). “Experimental Study on Elastic Behavior of a Huge Floating Structure in Waves”, Vol 95, pp 99-108.

Mamidipudi and Webster, W.C. (1994). “The motions performance of a mat-like floating airport”, Proc.Int, Conf. on Hydroelasticity in Marine Technology, pp 363-375.

Takezawa, S., Hirayama, T., Ueno, S. and Kajiwara, H. (1992a). “Experiments on Responses of Very Large Floating Offshore Structures in Directional Spectrum Waves”, Journal of society of naval architects of Japan, Vol 171, pp 511-523.

Takezawa, S., Hirayama, T., Ueno, S., Tuzcuoglu, S. A. and Kajiwara, H. (1992b). “Experiments on Responses of Very

- Large Floating Offshore Structures in Directional Spectrum Waves (2nd report)", Jorunal of society of naval architects of Japan, Vol 172, pp 57-68.
- Takezawa, S., Hirayama, T., Ueno, S., Tuzcuoglu, S. A. and Kajiwara, H. (1993c). "Experiments on Responses of Very Large Floating Offshore Structures in Directional Spectrum Waves (3rd report)", Jorunal of society of naval architects of Japan, Vol 173, pp 147-159.
- Toki (1979). "A Study on the Behavior of Huge Floating Structure in Regular waves", Journal of Society of Naval Architects of Japan, Vol 146, pp 185-194.
-
- 2006년 5월 10일 원고 접수
2006년 8월 8일 최종 수정본 채택