

부유식 해양도시의 동적응답특성

구 자 삼*·홍 석 원**

(94년 8월 23일 접수)

Dynamic Response Characteristics of a Floating Ocean City in Waves

Ja-Sam Goo* · Seok-Won Hong**

Key Words : Dynamic Response(동적응답), Floating Ocean City(부유식 해양도시), Three Dimensional Source Distribution Method(3차원 특이점분포법), Wave Interaction Theory(파의 상호 간섭 이론), Finite Element Method(유한요소법), Structural Analysis(구조해석)

Abstract

The dynamic response characteristics of a floating ocean city are examined for presenting the basic data for the design of huge offshore structures supported by a large number of floating bodies in waves. The numerical approach which is accurate in linear system is based on combination of a three dimensional source distribution method, wave interaction theory and the finite element method of using the space frame element. The hydrodynamic interactions among the floating bodies are taken into account in their exact form within the context of linear potential theory in the motion and structural analysis. The method is applicable to an arbitrary number of three dimensional bodies having any individual body geometries and geometrical arrangement with the restriction that the circumscribed, bottom-mounted, imaginary vertical cylinder for each body does not contain any part of the other body. The validity of this procedure was verified by comparing with experimental results obtained in the literature.

* 정회원, 부산수산대학교 공과대학 선박공학과

** 정회원, 한국기계연구원 선박해양공학연구센터

1. 서론

최근 해양공간을 유효하게 이용하기 위해 각종 해양도시가 활발하게 제안되고 있고 그 실현을 위하여 사회 경제학적 및 공학적인 가능성 검토가 행해지고 있다. 대표적으로 중수심역 공간이용 구조체^{1), 2)}, 해양정보도시³⁾, 부채인공도시⁴⁾, 해상공항 또는 해상공항도시⁵⁻⁸⁾, 이동식 해양기지⁹⁾,¹⁰⁾ 등을 들 수 있다. 일본에서는 현재 關西 신공항의 제2터미널로 부유식 해상공항을 신중히 검토하고 있다. 이는 수심, 지반 및 자연환경에의 영향 등을 고려해볼 때 매립식에 비해 부유식이 유리한 것으로 판단되고 있기 때문으로 생각된다. 이들 해양도시는 대개 초대형 부유식 해양구조물이고, 다수의 대형부채와 이들에 의해 지지된 대규모 상부구조 및 지지기초 혹은 계류부채로 이루어져 있는 복잡한 초대형 구조물이다. 이들 초대형 해양구조물에 작용하는 유체력 또는 파랑중의 응답에 관해 현재 활발한 연구가 진행되고 있다. Goo 등¹¹⁾은 최근에 유체력평가를 위한 3차원 특이점분포법¹²⁻¹⁴⁾과 Kagemoto & Yue의 상호간섭이론^{15,16)} 및 구조해석을 위한 유한요소법¹⁷⁾을 결합하는 것에 의해 임의형상 지지부채간의 파의 상호간섭을 고려한 해양도시의 동적응답해석법을 개발했다.

본 연구에서는 Goo 등이 개발한 동적응답해석법을 이용하여 Yoshida 등¹⁻²⁾에 의해 제안된 부유식 해양도시를 대상으로 그 지지부채의 형상변화에 따른 구조응답특성을 검토했다.

2. 수치계산법

상세한 이론해석은 Goo 등의 논문¹¹⁾을 참조하기로 하고 간단히 논하기로 한다. 수치계산법에 있어서 다음과 같은 기본 가정을 둔다.

- 1) 유체는 비압축성, 비점성으로 하고 유체의 운동은 비회전으로 한다.
- 2) 부유식 해양도시의 상부구조는 3차원 선형 탄성 골조구조로 하고 동적응답과 입사파의 유체운동은 미소진폭 주기운동을 하는 것으로

로 하며 각각 그 정상상태를 논하기로 한다.

- 3) 자유표면은 모든 방향으로 펼쳐져 있는 것으로 하고 유한수심의 경우에는 수심을 일정으로 한다.
- 4) 부유식 해양도시의 어떤 지지부채를 둘러싸는 최소반경의 가상 연직 원주의 내측에는 다른 지지 부채가 존재하지 않는 것으로 한다.
- 5) 부유식 해양도시의 지지부채는 강체로 한다.

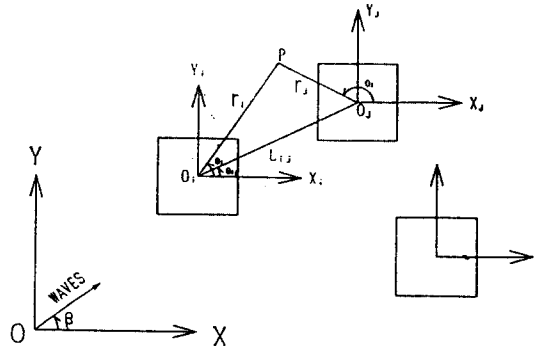


Fig. 1 Definition sketch

Fig. 1과 같이 평균수면상에 공간고정된 국소 직각좌표계 $o_i-x_iy_i z$ ($i=1 \sim M$)을 갖는 N 개의 3차원 임의형상 부채로 지지된 부유식 해양도시의 정상상태의 유력탄성문제를 생각한다. 그리고 국소좌표계의 원점은 지지부채를 둘러싸는 최소 반경의 가상연직원주의 중심으로 하고 z 축은 연직상방을 향하는 것으로 한다. 또 국소원주좌표계를 다음과 같이 도입한다.

$$r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}, \quad \theta_i = \arctan \frac{y_i}{x_i}$$

$$R_i = \sqrt{\xi_i^2 + \eta_i^2}, \quad \Theta_i = \arctan \frac{\eta_i}{\xi_i} \quad (11)$$

여기서 (ξ_i, η_i, ζ) 는 지지부채 i 의 침수표면상의 source점이다. 임의의 field점 (r_i, θ_i, z) 에서의 지지부채 i 에 의한 diffraction potential ϕ_i^D 는 다음과 같이 지지부채 i 의 국소원주좌표계로 나타낼 수 있다.

$$\phi_i^D(r_i, \theta_i, z) = \int \int_{S_n} \sigma_i(R_i, \Theta_i, \zeta) G_i(r_i, \theta_i, z; R_i, \Theta_i, \zeta) dS \quad (2)$$

여기서 S_{H_i} 는 지지부체 i 의 침수표면이고 σ_i 는 다수의 지지부체의 정상상태의 diffraction 문제의 적분방정식을 푸는 것에 의해 구해지는 지지부체 i 의 침수표면상의 source의 면밀도이다. Fenton¹⁸⁾에 의하면 Green함수 G_i 는 John¹⁹⁾의 유한수심의 급수표시를 이용하여 Graf²⁰⁾의 가법정리를 적용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} G_i(r_i, \theta_i, z; R_i, \Theta_i, \zeta) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{i}{2} C_0 \cosh[k_0(z+h)] \\ &\times \cosh[k_0(\zeta+h)] \\ &\times \left\{ \begin{array}{l} H_n^{(1)}(k_0 r_i) J_n(k_0 R_i) \\ H_n^{(1)}(k_0 R_i) J_n(k_0 r_i) \end{array} \right\} e^{in(\theta_i - \Theta_i)} \\ &- \frac{1}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} C_m \cos[k_m(z+h)] \cos[k_m(\zeta+h)] \\ &\times \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \begin{array}{l} K_n(k_m r_i) I_n(k_m R_i) \\ K_n(k_m R_i) I_n(k_m r_i) \end{array} \right\} e^{in(\theta_i - \Theta_i)} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 i 는 허수단위이며 중괄호의 윗항은 $r_i > R_i$ 의 경우이고 아래항은 $r_i < R_i$ 의 경우이다. $H_n^{(1)}$ 는 제1종 n 차 Hankel함수, J_n 는 제1종 n 차 Bessel함수, I_n 는 제1종 n 차 변형 Bessel함수, K_n 는 제2종 n 차 변형 Bessel함수이다. h 는 수심, k_0 는 파수이고 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$k_0 \tanh k_0 h = \frac{\omega^2}{g} = K \quad (4)$$

여기서 g 는 중력가속도이고 ω 는 평면입사파의 각주파수이다. k_m 는 다음 식에서의 양의 실근이다.

$$-k_m \tan k_m h = K, \quad (m - \frac{1}{2})\pi \leq k_m h \leq m\pi \quad (5)$$

또 C_0, C_m 는 각각 다음과 같다.

$$C_0 = \frac{K^2 - k_0^2}{(k_0^2 - K^2)h + K}, \quad C_m = \frac{k_m^2 + K^2}{(k_m^2 + K^2)h - K} \quad (6)$$

(3)식에서 $r_i > R_i$ 의 경우만을 생각하고 이것을 (2)식에 대입해서 얻어지는 diffraction potential을 ϕ_i^D 라 하면 ϕ_i^D 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_i^D(r_i, \theta_i, z) &= \frac{\cosh[k_0(z+h)]}{\cosh k_0 h} \\ &\times \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{0ni} H_n^{(1)}(k_0 r_i) e^{in\theta_i} \\ &+ \sum_{m=1}^{\infty} \cos[k_m(z+h)] \\ &\times \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{mni} K_n(k_m r_i) e^{in\theta_i} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 계수 A_{0ni}, A_{mni} 는 다음과 같다.

$$A_{0ni} = \frac{i}{2} C_0 \cosh k_0 h \int \int_{S_n} \sigma_i(R_i, \Theta_i, \zeta) J_n(k_0 R_i) \cosh[k_0(\zeta+h)] e^{-in\Theta_i} dS \quad (8)$$

$$A_{mni} = -\frac{1}{\pi} C_m \int \int_{S_n} \sigma_i(R_i, \Theta_i, \zeta) I_n(k_m R_i) \cos[k_m(\zeta+h)] e^{-in\Theta_i} dS \quad (9)$$

(7)식은 $r_i > R_i$ 의 경우이므로 다수의 지지부체가 존재할 때의 지지부체 i 를 둘러싸는 최소반경의 가상 연직원주의 외측의 diffraction potential을 나타내고 우변 제1항은 진동하는 성분파의 유장을 표현하고 제2항은 단조감소하는 성분파의 유장을 표현하고 있다. 또 (7)식은 단독의 지지부체 i 가 존재할 때의 지지부체 i 를 둘러싸는 최소반경의 가상 연직원주의 외측의 diffraction potential 혹은 radiation potential을 나타낼 수 있다. 단, 이 경우에 있어서 지지부체 i 의 침수표면상의 source의 면밀도는 단독의 지지부

체 i 의 정상상태의 diffraction문제 혹은 radiation문제의 적분방정식을 푸는 것에 의해 구해진 것으로 한다.(7) 식을 행렬로 나타내면 다음과 같다.

$$\phi_i^D(r_i, \theta_i, z) = \{A_i\}^T \{\phi_i^D\} \quad (10)$$

여기서 $\{A_i\}^T$ 는 계수 벡터의 전치이고 $\{\phi_i^D\}$ 는 지지부체 i 의 산란성분파를 요소로 하는 벡터이다. 또 이 산란성분파는 제1종 n 차 Hankel함수 $H_n^{(1)}$ 및 제2종 n 차 변형 Bessel함수 K_n 의 항으로 나타내어 진다.

그런데 $r_j < L_{ij}$ 의 경우 (지지부체 i 및 지지부체 j 를 둘러싸는 최소반경의 가상 연직원주의 외측에 각각 지지부체 j 및 지지부체 i 의 국소좌표계의 원점이 존재하는 경우)에는 Graf의 가법정리에 의해 $\{\phi_i^D\}$ 를 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\{\phi_i^D\} = [T_{ij}] \{\phi_j^D\} \quad (11)$$

여기서 $\{\phi_j^D\}$ 는 지지부체 j 에 입사하는 성분파를 요소로 하는 벡터이고 지지부체 j 의 국소원주좌표계로 나타낸 것이다. 또 이 입사성분파는 제1종 n 차 Bessel함수 J_n 및 제1종 n 차 변형 Bessel함수 I_n 의 항으로 나타내어 진다. $[T_{ij}]$ 는 지지부체 i 의 국소원주좌표계로 나타낸 지지부체 i 의 산란성분파와 지지부체 j 의 국소원주계로 나타낸 지지부체 j 의 입사성분파를 관계지우는 좌표변환행렬이다.

(11)식을 (10)식에 대입하면 다음 식과 같이 지지부체 i 의 diffraction potential을 지지부체 j 의 입사potential로 나타낼 수 있다.

$$\phi_i^D(r_j, \theta_j, z) = \{A_i\}^T [T_{ij}] \{\phi_j^D\} \quad (12)$$

그러므로 다수의 지지부체가 미소진폭 주기운동 하고 있는 경우의 지지부체 j 의 전체 입사potential은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_j^D(r_j, \theta_j, z) = (\{a_j\}^T + \sum_{i \neq j}^N \{A_i\}^T [T_{ij}]) \{\phi_j^D\}$$

$$+ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^6 (-i\omega\eta_k \{R_{ij}\}^T [T_{ij}]) \{\phi_j^D\}, \quad (j=1 \sim N) \quad (13)$$

여기서 $\{a_j\}^T$ 는 지지부체 j 의 국소원주좌표계로 나타낸 평면입사파의 potential의 계수벡터의 전치이고 η_k 는 지지부체 i 의 취부절점에서의 l 방향의 복소변위진폭이다. 지지부체 i 가 단독으로 존재하고 l 방향으로 단위속도 진폭으로 운동하고 있을 때, 지지부체 i 를 둘러싸는 최소반경의 가상 연직원주의 외측의 radiation potential ϕ_i^R 는 다음과 같이 표시되고 있는 것으로 한다.

$$\phi_i^R(r_j, \theta_j, z) = \{R_{ij}\}^T \{\phi_i^D\} = \{R_{ij}\}^T [T_{ij}] \{\phi_j^D\} \quad (14)$$

여기서 전치 벡터 $\{R_{ij}\}^T$ 의 요소는 지지부체 i 가 단독으로 존재하고 l 방향으로 단위속도 진폭으로 운동할 때의 radiation문제의 적분방정식을 푸는 것에 의해 구해지는 source의 면밀도를 (8)식 및 (9)식에 대입하여 얻어지는 계수이다. 지지부체 j 의 전체 입사 potential에 대한 diffraction potential은 지지부체 j 의 diffraction 특성을 나타내는 diffraction 전달행렬 $[B_j]$ 에 의해 다음과 같이 나타내어진다.

$$\phi_j^D(r_j, \theta_j, z) = (\{a_j\}^T + \sum_{i=1, i \neq j}^N \{A_i\}^T [T_{ij}] + \sum_{i=1, i \neq j}^N \sum_{j=1, j \neq i}^6 (-i\omega\eta_k \{R_{ij}\}^T [T_{ij}]) \times [B_j]^T \{\phi_j^D\}, \quad (j=1 \sim N) \quad (15)$$

여기서 $[B_j]^T$ 의 p 행의 요소는 $\{\phi_j^D\}$ 의 p 번째 요소의 입사성분파가 단독의 지지부체 j 에 입사한 경우의 지지부체 j 의 산란성분파의 계수로 이루어져 있다. 또 이 산란성분파의 계수는 (8)식 및 (9)식의 지지부체 j 에 대한 표시식으로부터 구해진다. 단, 이 경우에서 지지부체 j 의 침수표면상의 source의 면밀도 σ_j 는 $\{\phi_j^D\}$ 의 p 번째

째의 요소의 입사성분파가 단독의 지지부체 j 에 입사한 경우의 diffraction문제의 적분방정식을 푸는 것에 의해 구해진 것으로 한다. (10)식의 지지부체 j 에 대한 표시식과 (15)식으로부터 다음 식이 구해진다.

$$\begin{aligned} \{A_j\} = & [B_j] (\{a_j\} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N [T_{ij}]^T \{A_i\} \\ & + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N \sum_{l=1}^6 (-i\omega\eta_{il} [T_{ij}]^T \{R_{il}\})), \\ & (j=1 \sim N) \end{aligned} \quad (16)$$

윗식을 푸는 것만이 아니라 상부구조물의 구조 응답을 구하기 위하여 N 개의 지지부체의 취부절점을 포함하는 전체운동방정식이 필요하다. 그 전체 운동방정식은 보요소법을 이용하는 유한요소법에 의해 다음과 같이 구하여 진다.

$$([K] - \omega^2 [M] - i\omega [C]) \{\eta\} = \{F\} \quad (17)$$

여기서 $[K]$, $[M]$, $[C]$ 는 각각 상부구조물의 강성행렬, 질량행렬, 감쇠행렬이다. 상부구조물의 강성행렬, 질량행렬은 상부구조물을 보요소로 근사하여 구한다. 상부구조물의 감쇠행렬은 구조감쇠의 정확한 추정이 곤란하기 때문에 Rayleigh감쇠를 이용하기로 한다. $\{\eta\}$ 는 총자유도의 복소변위진폭 벡터이다. 또 $\{F\}$ 는 복소외력진폭 벡터이며 D'Alembert의 원리에 의해 지지부체 j ($j=1 \sim N$)가 상부구조물에 결합되는 취부절점에서 평가한 복소외력진폭은 다음 식과 같이 주어진다. 지지부체의 취부절점이 아닌 절점에서의 복소외력진폭은 0이다.

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^6 [\omega^2 (M_{kij} + \mu_{kij}) + i\omega \nu_{kij} - K_{kij}] \eta_{ij} \\ & - i\rho\omega (\{a_j\})^T \\ & + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N \{A_i\}^T [T_{ij}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N \sum_{l=1}^6 (-i\omega\eta_{il} \{R_{il}\}^T [T_{ij}]) \\ & \times \int \int_{S_{ij}} (\{\psi_j^l\}) + \int \int_{S_{ij}} \{\sigma_j\} G_j dS n_{kj} dS, \\ & (k=1 \sim 6; j=1 \sim N) \end{aligned} \quad (18)$$

여기서 M_{kij} 는 지지부체 j 의 취부절점에서 평가한 관성력계수, μ_{kij} 및 ν_{kij} 는 지지부체 j 가 단독으로 존재하는 경우의 지지부체 j 의 취부절점에서 평가한 부가질량 및 감쇠계수이고 K_{kij} 는 지지부체 j 의 취부절점에서 평가한 정수압에 의한 복원력 계수이다. 이 복원력계수를 구할 때는 지지부체 j 가 받는 중량의 중심이 필요하다. 또 ρ 는 해수의 밀도, n_{kj} 는 지지부체 j 의 k 방향의 일반방향여현이고 벡터 $\{\sigma_j\}$ 의 p 번째의 요소는 $\{\psi_j^l\}$ 의 p 번째의 요소의 입사성분파가 단독의 지지부체 j 에 입사한 경우의 diffraction문제의 적분방정식을 푸는 것에 의해 구해지는 지지부체 j 의 침수표면상의 source의 면밀도이고 $[B_j]^T$ 의 p 행의 요소를 구할 때 이미 얻어진 것이다. G_j 는 지지부체 j 의 침수표면상의 Green함수이다. 계의 전체운동방정식인 (17)식과 (16)식의 연립방정식을 푸는 것에 의해 총자유도의 복소변위진폭 벡터 $\{\eta\}$ 및 계수벡터 $\{A_i\}$ ($i=1 \sim N$)가 구해진다. 복소변위진폭 벡터 $\{\eta\}$ 가 구해지면 상부구조물의 구조응답은 요소강성행렬을 이용하여 구해진다.

3. 수치계산 및 고찰

본 동적응답해석법은 Goo¹¹⁾, Yoshida 등²¹⁾에 의한 실험결과와 계산결과와의 비교에 의해 그 유효성이 입증되었기 때문에 여기서는 Fig.2와 같은 반잠수식 ring형상 해양도시의 지지부체의 형상변화에 따른 동적응답특성에 대하여 검토하기로 한다. 이 해양도시는 인구 3만명, 수심 30~70 m의 중수심 해역의 공간이용을 위해 Yoshida 등¹⁻²⁾이 구상하고 구조공학적인 검토를 가해 그 가능성을 확인한 것이다. 이 해양도시의 기본개념은 ring형상 상부구조, 반잠수식 지지부체, 중력식 지지기초구조의 세가지로 요약된다.

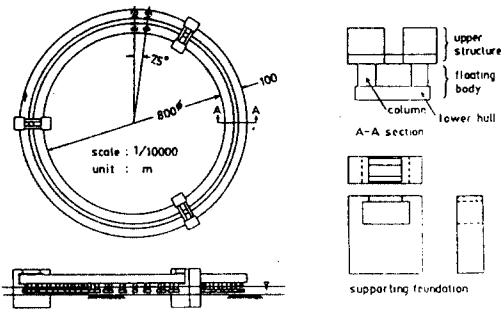


Fig. 2 Conceptual configuration of a ring-like semisubmersible type structure

그 ring형상 상부구조는 외경 1000 m, 내경 800 m 이고 단면의 치수는 Fig.3에 나타나 있다. 지지부체의 형상변화는 배수량을 동일하게 하여 Fig.4와 같이 3종류의 lowerhull형 지지부체로 한다. Fig.4(a)가 Yoshida 등¹⁾이 제안한 지지부체이다. Fig.4(a), (b), (c)의 지지부체를 각각 Lowerhull A, B, C라 부르기로 한다. 지지기초는 길이 160 m, 폭 80 m, 높이 140 m인 강과 콘크리트의 복합구조물이다. 지지기초의 수를 8개로 하고 지지부체는 중심각 7.5° 간격으로 배치하면 48개 필요하나 지지기초가 위치하는 부분의 부체를 배제하여 Fig.5와 같이 40개로 했다.

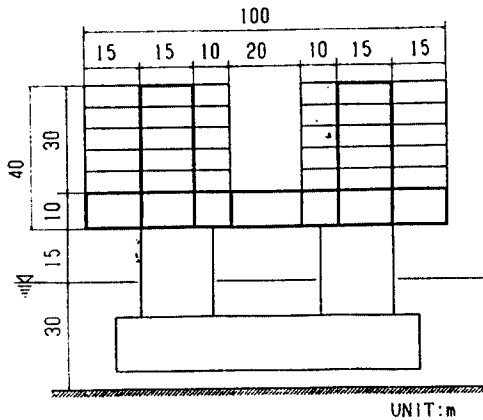
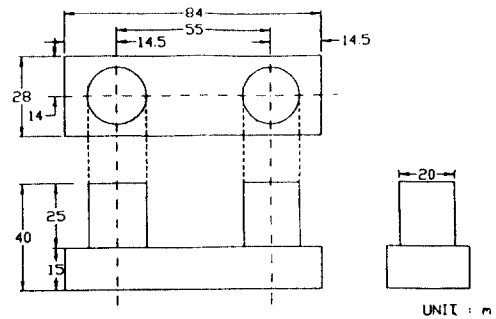
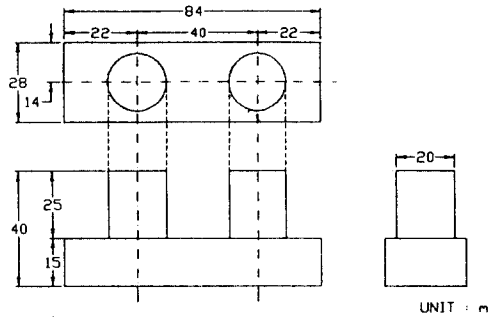


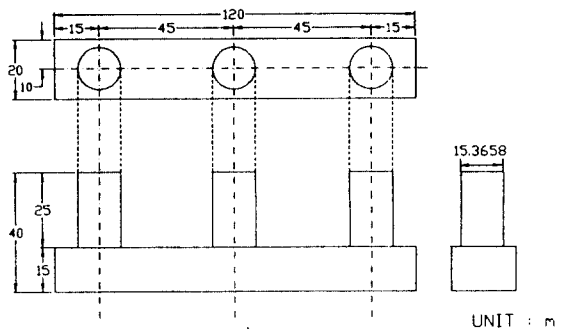
Fig. 3 Configuration of cross section of the upper structure



(a) Lowerhull A



(b) Lowerhull B



(c) Lowerhull C

Fig. 4 Sketch of the floating bodies

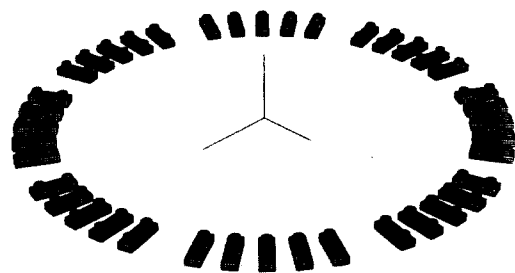


Fig. 5 Sketch of arrays of 40 lowerhull type floating bodies

상부구조는 Fig.6과 같이 직선 보요소로 근사한다. 혹점은 절점을 나타내고 실선은 보요소를 나타낸다. 절점번호 4, 10, 16, 22, 28, 34, 40, 46은 지지기초의 취부절점이다. 지지기초의 취부절점은 X, Y, Z 방향의 병진변위를 고정하고 회전변위를 모두 자유로 했다.수심은 30m로 하고 파입사각은 180° 로 한다. 또 좌표계 X, Y, Z 는 전체좌표계이며 지지부체의 위치, 상부구조의 절점좌표, 지지부체의 취부절점 이외의 절점의 경계조건, 절점변위, 절점반력은 이 좌표계를 이용한다. 좌표계 x, y, z 는 3차원 특이점분포법을 이용하는 경우의 기준좌표계이며 지지부체의 침수표면의 요소좌표, 지지부체의 무게중심, 지지부체의 관성모멘트, 지지부체의 운동기준점 (지지부체의 취부절점의 좌표)는 이 좌표계를 이용한다. 좌표계 x', y', z' 는 유한요소법을 이용하는 경우의 요소좌표계이며 상부구조의 요소의 단면2차모멘트, 요소의 비틀림계수, 요소 내력은 이 좌표계를 이용한다. 계산상의 Lowerhull A, B, C의 침수표면의 요소분할수는 Fig.7과 같이 각각 402, 390, 452 요소이다. 또 (7)식의 diffraction potential의 급수항은 진동항을 9개 ($N=4$), 단조감소항을 7개 ($m=1, n=3$)로 하여 계산했다. 보요소의 종단성계수는 $2.1 \times 10^7 \text{ tonf/m}^2$, 포아손 비는 0.3으로 했다. 보요소의 밀도는 $2.226 \text{ tonf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ 이고 상부구조의 구조감쇠계수는 0.01로 했다. 상부구조의 단면적은 27.52 m^2 , y' 축에 관한 단면2차모멘트는 4590 m^4 , z' 축에 관한 단면2차모멘트는

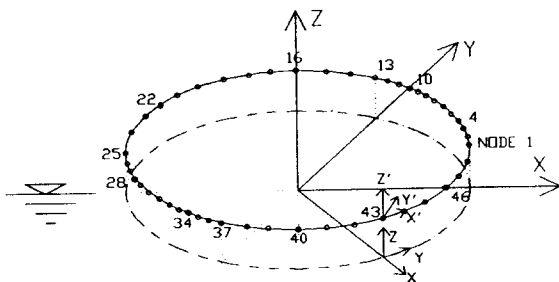
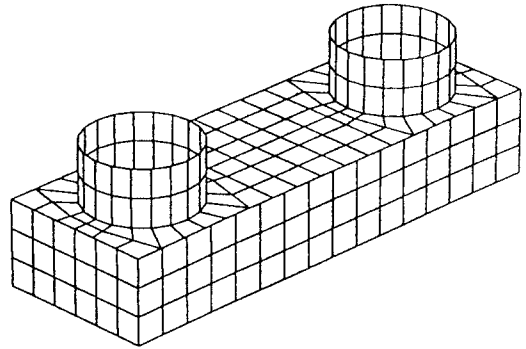
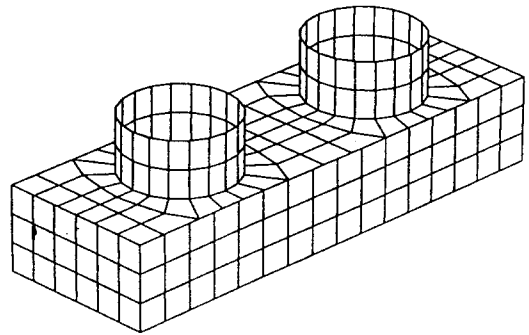


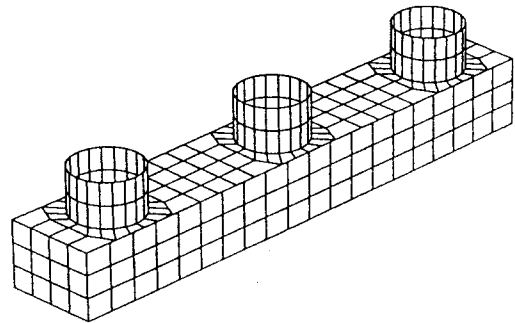
Fig. 6 Coordinate system and discretization of the upper structure



(a) Lowerhull A represented by 402 panels



(b) Lowerhull B represented by 390 panels



(c) Lowerhull C represented by 452 panels

Fig. 7 Submerged surface of the lowerhull type floating bodies

23770 m^4 . 비틀림계수는 2820 m^4 이다. 단독의 지지부체의 질량은 $610.7 \text{ tonf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$, 지지부체만의 무게중심은 평균수면하 14 m , 상부구조를 포함하는 경우의 지지부체의 무게중심은 평균수면

상 22.5m 이다. 상부구조의 단면의 도심은 평균 수면상 28m이다. 이 도심의 좌표를 절점좌표로 했다. 지지부체만의 무게중심에서의 x, y, z 축에 관한 지지부체의 관성모멘트는 각각 108500, 476300, 468600 $\text{tonf} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}$ 이다. 단, 계산의 편의상 Lowerhull A, B, C의 질량, 무게중심, 관성모멘트는 모두 동일한 것으로 했다. 상부구조의 허용응력은 15 kgf/mm^2 로 하고 가속도 기준으로 불쾌한도 0.05 m/sec^2 , 선취중상 발생한계 0.1 m/sec^2 로 한다¹⁾.

Fig. 8의 (a), (b)는 각각 파입사각 180° , 270° 인 경우의 단독의 Lowerhull A, B, C에 작용하는 파의 단위 진폭당의 파강제력의 주파수 응답을 나타내고 있다. 특히 Fig. 8의 (a)인 경우를 보면 지지부체에 따라 파강제력 특성이 상당히 다른 것을 알 수 있다.

Fig. 9의 (a), (b)는 각각 상호간섭을 고려하지 않은 경우와 고려한 경우의 절점번호 1, 13에서의 파의 단위진폭당의 수직 굽힘응력의 주파수 응답 [$(\text{kgf/mm}^2)/\text{m}$] 을 나타내고 있다. 실선 및 점선은 41개의 주파수응답을 직선으로 연결한 것이다. 단, Lowerhull C의 경우에는 상호간섭을 고려한 결과를 나타내지 않고 있다. 이는 기본가정 4)를 만족하지 않기 때문이다. 이 해양도시와 같은 초대형 해양구조물의 경우에는 모든 주파수에 걸쳐 상호간섭의 영향이 나타나고 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 통상의 해양구조물의 경우에는 고주파수 영역에만 상호간섭의 영향이 나타나는 것과 대조적이다. 또 지지부체의 형상에 따라 응답이 상당히 변하고 있는 것을 알 수 있다. 0.9 rad/sec 이상 (주기는 약 7sec 이하)의 고주파수에서는 상호간섭에 의해 응답이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또 0.9 rad/sec 이하의 저주파수에서는 Lowerhull C가 가장 응답이 작고 반면 그 이상의 고주파수에서는 Lowerhull A가 좋은 응답을 나타낼 것으로 예상된다. 따라서 모든 주파수에 있어서 최소응답을 나타내는 지지부체의 형상을 구하는 것이 가장 바람직하나 곤란한 경우에는 해양도시의 설치해역의 탁월주기 근처에서 응답특성이 좋은 지지부체를 설계하는 것이 바람직한 것으로 생각된다. 또

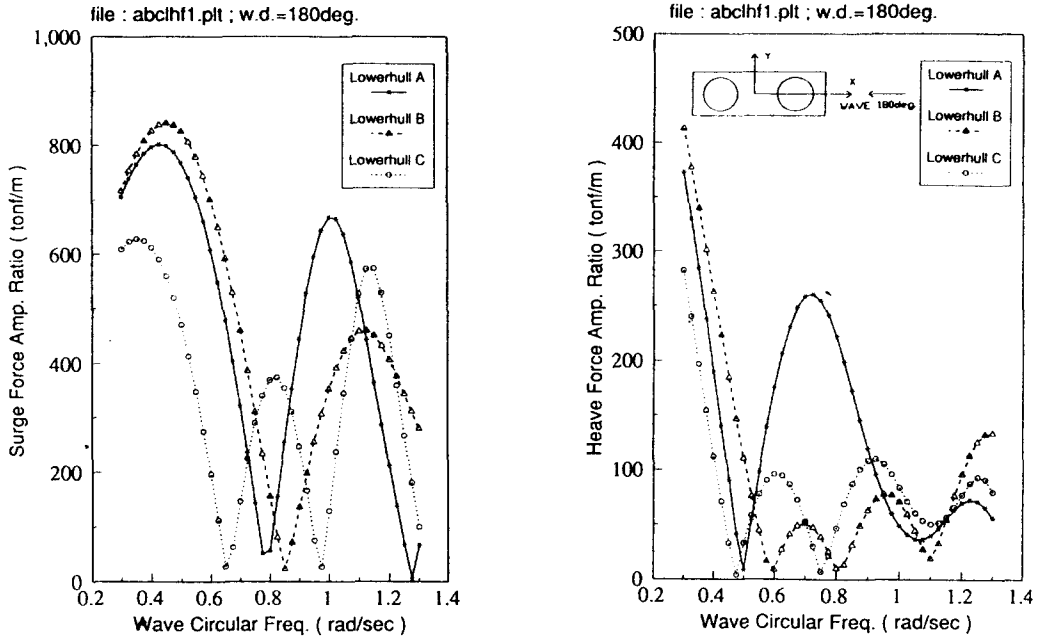
Lowerhull A의 경우를 보면 수직응력이 가장 큰 값은 절점 1의 0.9 rad/sec 에서 일어나며 1.7 kgf/mm^2 이다. 허용응력을 고려하여 파만을 생각하면 파고 17m까지 안전하다.

Fig. 10의 (a), (b)는 각각 상호간섭을 고려하지 않은 경우와 고려한 경우의 절점번호 1, 13에서의 파의 단위진폭당의 수직 가속도응답 [$(\text{m/sec}^2)/\text{m}$] 을 나타내고 있다. 이 결과도 수직 굽힘응력응답과 동일하게 말할 수 있다. 또 Lowerhull A의 경우를 보면 수직 가속도응답이 가장 큰 값은 절점 1의 0.9 rad/sec 에서 일어나며 0.041 m/sec^2 이다. 가속도 기준을 고려하면 불쾌한도, 선취중상 발생한계가 각각 파고 2.4m, 4.8m가 한계이다. 따라서 이 해양도시의 경우에는 구조내력응답보다 가속도응답이 문제로 됨을 알 수 있다.

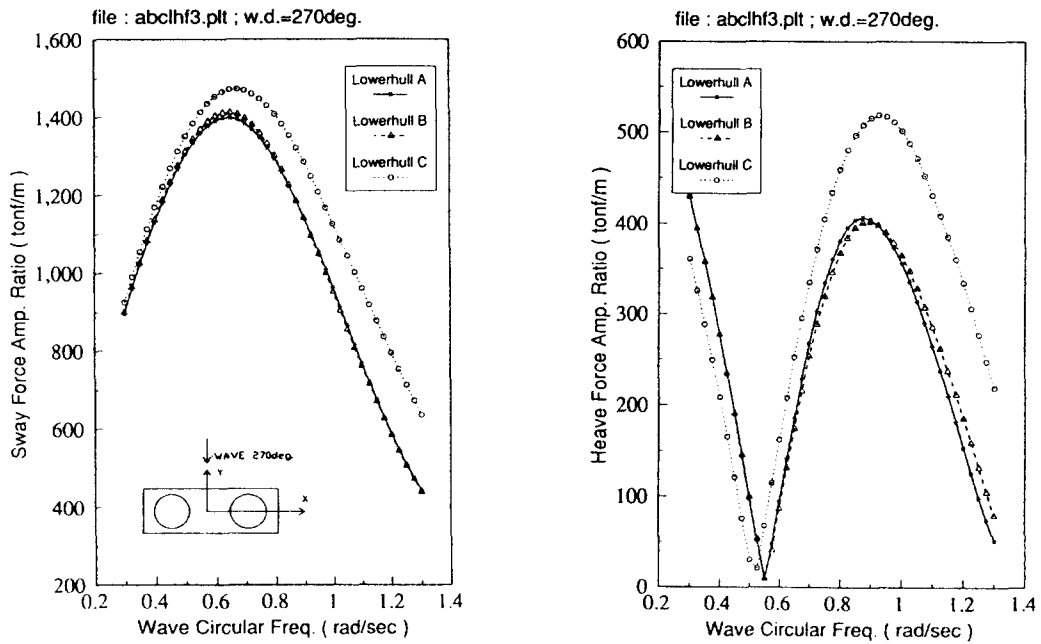
4. 결 론

본 연구에서 취급한 대상물 및 계산조건의 범위내에서 얻어진 주요한 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 해양도시와 같은 초대형 해양구조물인 경우에도 동일한 배수량을 갖는 지지부체의 형상변화에 따라 응답이 민감하게 변하고 있으므로 해양도시의 최적설계를 위해서는 지지부체의 최적형상 설계가 무엇보다 중요하다.
- 2) 모든 주파수에 있어서 최소응답을 나타내는 해양도시 지지부체의 최적형상을 구하는 것이 가장 바람직한 것이나 곤란한 경우에는 해양도시 설치해역의 탁월주기 근처에서 응답특성이 좋은 지지부체를 설계하는 것이 바람직한 것으로 생각된다.
- 3) 본 해양도시와 같은 링 형상 구조물인 경우에는 구조내력응답보다 가속도응답이 중요한 문제로 대두되었고, 또한 통상의 해양구조물과 달리 모든 주파수에서 상호간섭의 영향이 나타났다.

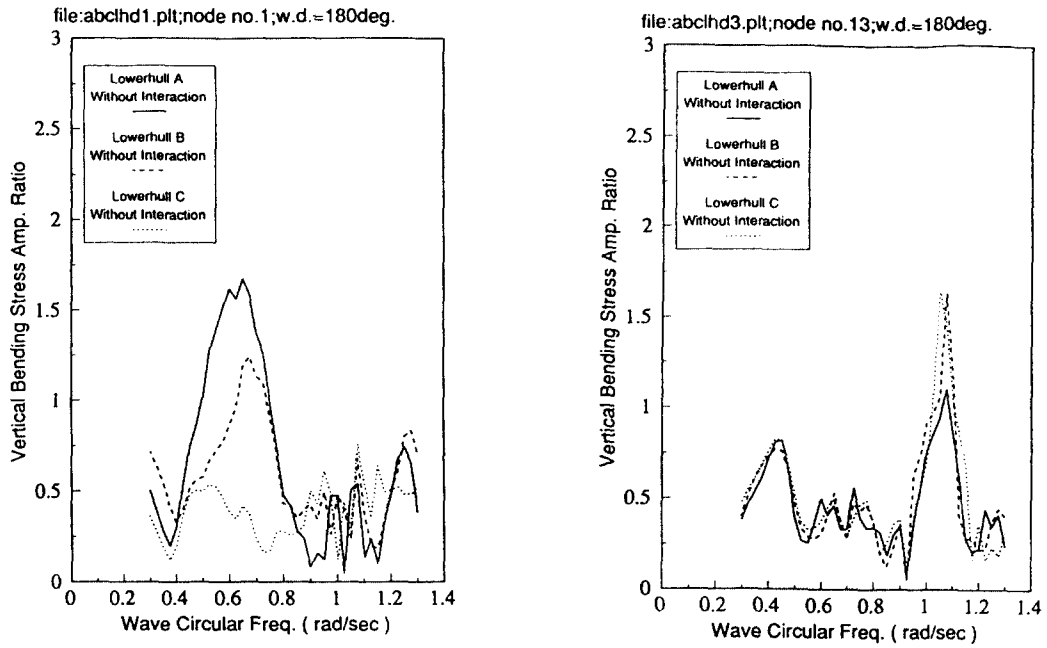


(a) Wave direction 180 deg.

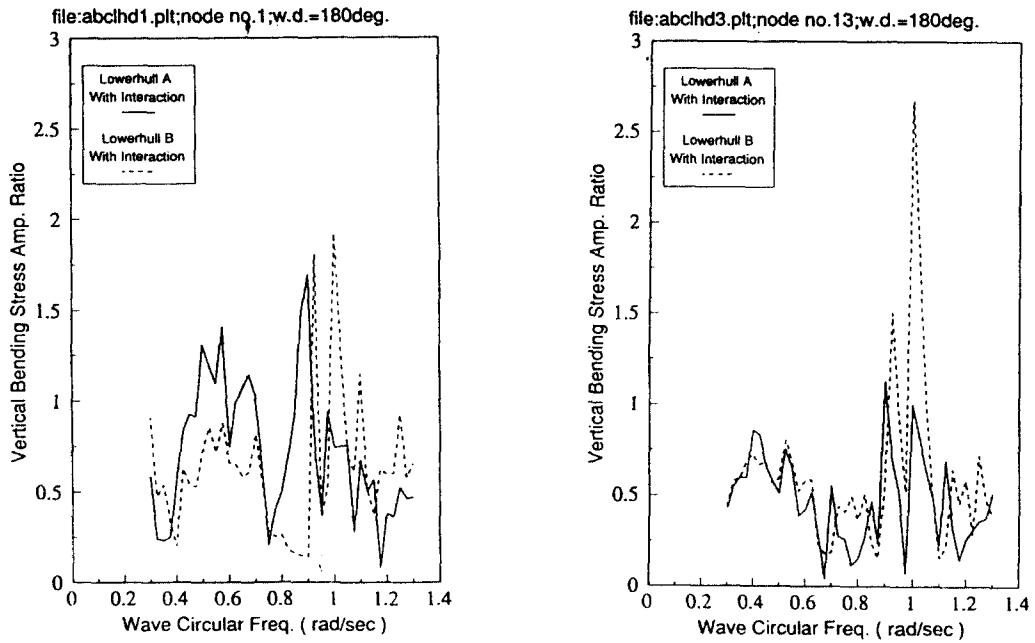


(b) Wave direction 270 deg.

Fig. 8 Wave exciting forces on lowerhull type floating bodies

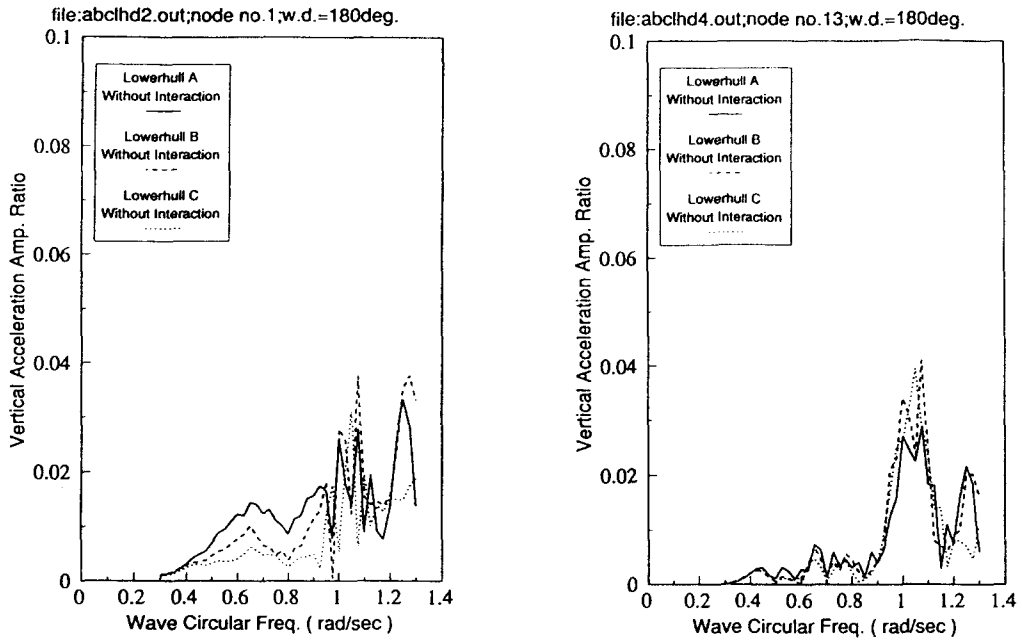


(a) Without interaction

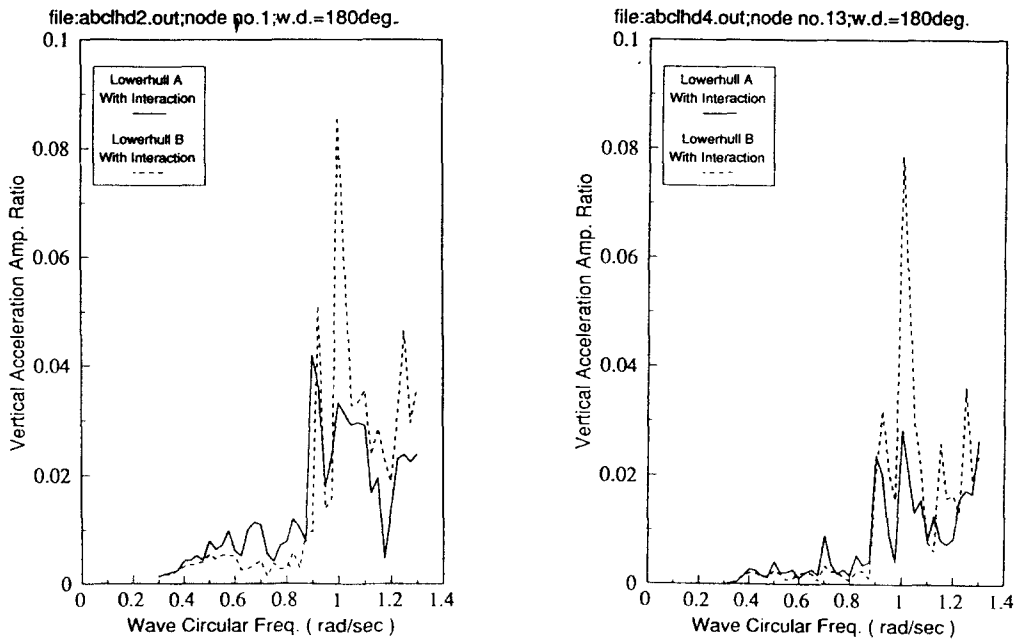


(b) With interaction

Fig. 9 Vertical bending stress responses of the upper structure



(a) Without interaction



(b) With interaction

Fig. 10 Vertical acceleration responses of the upper structure

참 고 문 헌

1. 吉田宏一郎ほか, “中水深域空間利用構造體の開發”, 半潛水式リング狀構造體の檢討, 日本造船學會論文集, 第165號, pp.203-213, 1989
2. 吉田宏一郎ほか, “中水深域空間利用構造體の開發(その2)”, 碇着, 免震システムの開發と構造體の最適化, 日本造船學會論文集, 第170號, pp.619-629, 1991
3. 寺井精英, “海洋情報都市”, TBSブリタニカ, 1986
4. 日本産業機械工業會, “浮體人工都市實現化の調査研究報告書”, 1990
5. 日本海洋開發建設協會, “21世紀に向けてこれからの海洋開發”, 山海堂, pp.26-33, 1988
6. 安藤定雄ほか, “浮體工法による海上空港建設に係わる評價のための技術調査研究”, 船舶技術研究所報告別冊, 第4號, 1983
7. Chow, P.Y. et al., “Engineering Concepts for Design and Construction of Very Large Floating Structures”, Proceedings of the First International Workshop on Very Large Floating Structures, pp.97-106, 1991
8. Baschieri, M. and Bellincioni, P., “Prestressed Concrete Floating Airport”, Proceedings of the First International Workshop on Very Large Floating Structures, pp.421-436, 1991
9. Hickey, E.I. et al., “Mobile Offshore Bases”, Proceedings of the First International Workshop on Very Large Floating Structures, pp.133-148, 1991
10. Riggs, H.R. and Ertekin, R.C., “Approximate Methods for Dynamic Response of Multi-Module Floating Structures”, Proceedings of the First International Workshop on Very Large Floating Structures, pp.333-354, 1991
11. Goo, J.S. and Yoshida K., “A Numerical Method for Huge Semisubmersible Responses in Waves”, Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol.98, pp.365-387, 1990
12. Faltinsen, O.M. and Michelsen, F.C., “Motions of Large Structures in Waves at Zero Froude Number”, International Symposium on the Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves, pp.91-106, 1974
13. Telste, J.G. and Noblesse, F., “Numerical Evaluation of the Green Function of Water-Wave Radiation and Diffraction”, Journal of Ship Research, Vol.30, No.2, pp.69-84, 1986
14. Endo, H., “Shallow-Water Effect on the Motions of Three-Dimensional Bodies in Waves”, Journal of Ship Research, Vol.31, No.1, pp.34-40, 1987
15. Kagemoto, H. and Yue, D.K.P., “Interactions among Multiple Three-Dimensional Bodies in Water Waves, An Exact Algebraic Method”, Journal of Fluid Mechanics, Vol.166, pp.189-209, 1986
16. Kagemoto, H. and Yue, D.K.P., “Wave-induced Motions of Multiple Floating Bodies”, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.161, pp.152-158, 1987
17. Hughes, T.J.R., “The Finite Element Method”, Prentice-Hall International, Inc., 1987
18. Fenton, J.D., “Wave Forces on Vertical Bodies of Revolution”, Journal of Fluid Mechanics, Vol.85, pp.241-255, 1978
19. John, F., “On the Motion of Floating Bodies II”, Communications on Pure and Applied Mathematics, Vol.3, pp.45-101, 1950

20. Watson, G.N., "A Treatise on the Theory of Bessel Functions", Cambridge University Press, pp.358-361, 1966
21. 吉田宏一郎ほか, "複數浮體からなる構造物にはたらく波強制力および波浪應答に関する研究, 日本造船學會論文集, 第172號, pp.69-80, 1992