

다방향 불규칙파중의 초대형 해양구조물의 동적응답해석

구자삼* · 조효제** · 김경태***

A Dynamic Response Analysis of Very Large Offshore Structures in Multi-Directional Irregular Waves

J. S. Goo* · H. J. Jo** and K. T. Kim***

요 약

본 논문에서는 3차원 특이점분포법, 파의 상호간섭이론 및 유한요소법을 결합한 Goo등[29]이 개발한 초대형 해양구조물의 동적응답 해석법과 스펙트럴 해석법을 이용하여 다수의 임의형상 지지부체간의 유체역학적 상호간섭을 고려한 다방향 불규칙파중의 초대형 해양구조물의 운동응답 및 구조응답의 유의치를 동시에 계산할 수 있는 동적응답 해석법을 개발하였으며, 반잠수식 Ring 형상의 초대형 해양구조물을 수치계산 모델로 하여 구조물의 동적응답에 미치는 상호간섭과 다방향파의 영향을 평가하였다.

Abstract

A numerical procedure is described for predicting the motion and structural responses of the very large floating offshore structures supported by multiple 3-D floating bodies of arbitrary shape in multi-directional irregular waves. The developed numerical approach taking into account of the hydrodynamic interactions among the multiple floating bodies is based on a combination of the 3-D source distribution method, the wave interaction theory, the finite element method and the spectral analy-

발 표 : 해양공학연구회 제38차 워크샵 논문집 (1996. 12. 12)

접수일자 : 1997년 2월 10일. 재접수일자 : 1997년 4월 3일

* 정회원, 부경대학교 선박공학과

** 정회원, 한국해양대학교 조선해양공학부

*** 부경대학교 대학원 선박공학과

sis method to get the significant values of the dynamic responses in the multi-directional irregular waves. The effects of wave interactions and directionality on the dynamic responses of a very large offshore structure, which is semisubmersible ring type, are numerically examined.

1. 서론

최근 해양공간을 유효하게 이용하기 위해 제안되고 있는 해양구조물은 대형화·대수심화를 지향하고 있으며 대표적인 초대형 해양구조물로서는 해양정보도시[1], 부채인공도시[2], 해상공항도시[3]~[7], 중수심역 공간이용 구조체[8],[9]등을 들 수 있으며, 현재 일본에서는 關西 신공항의 제 2 터미널을 부유식으로 검토하기 위해, 이에 대한 이론 및 실험을 병행한 다양한 연구[10]~[12]가 활발히 진행되고 있다. 또한 미국에서는 군사식 이용을 위한 이동식 해양기지[13],[14]에 대한 연구가 진행되고 있다. 이와같은 초대형 해양구조물은 바이지식(Barge Type) 과 반잠수식(Semisubmersible Type)으로 나눌 수 있다. 반잠수식의 일반적인 구조는 대형 상부구조와 다수의 지지부체 및 지지기초 혹은 계류부체 등으로 이루어져 있다. 다수의 요소부체로 지지된 대형 해양구조물의 거동 해석을 정확히 평가하기 위해서는 먼저 파의 유체역학적인 상호간섭에 의한 영향을 정확히 평가할 필요가 있다. Goo등[15]은 3차원 특이점분포법과 Kagemoto & Yue[16]의 상호간섭 이론을 결합하여 다수의 3차원 임의형상 부체의 상호간섭 효과를 고려한 파장제력 및 운동응답을 계산하는 수법을 개발하여 발표한 바가 있다.

그러나 이와같은 대형 해양구조물의 파랑응답에 대한 대부분의 연구는 한방향파(One-Directional Waves)를 환경외력의 하나로 취급하고 있으나, 실제 이들 구조물이 부유되거나 계류된 실해역의 파는 한방향파가 아닌 서로 다른 방향을 갖는 다양한 성분파들로 구성된 다방향파(Multi-Directional Waves)이다. 그럼에도 불구하고 계측이나 해석의 어려움때문에 한방향파를 환경외력의 하나로 흔히 가정하여 왔다. 따라서 보다 더 현실성 있는 결과를 얻기 위해서는 다방향파를 고려할 필요가 있다. 지금까지 행해진 다방향파중의 해양구조물에 대한 연구로서는 요소물체 혹은 부체에

대한 파력[17],[18], 선형응답[19]~[22], 비선형응답[23]~[25] 및 다수부체에 대한 응답[26]~[28] 등을 들 수 있다. 그러나, 다방향 불규칙파중의 초대형 해양구조물의 구조응답을 해석함에 있어, 지지부체간의 유체역학적 상호간섭을 고려하여 구조응답을 해석한 예는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 3차원 특이점분포법, 파의 상호간섭이론 및 유한요소법을 결합한 Goo등[29]이 개발한 동적응답 해석법과 스펙트럴 해석법을 이용하여 지지부체간의 유체역학적 상호간섭을 고려한 다방향 불규칙파중의 초대형 해양구조물의 동적응답 해석법을 개발하였다.

2. 이론 해석

2.1 상호간섭을 고려한 초대형 해양구조물의 동적응답 해석

초대형 해양구조물의 동적응답을 해석하기 위한 이론의 기본가정으로서, 상부구조는 3차원 선형탄성 골조구조로 하고, 유체는 비압축성, 비점성으로 하며, 유체의 운동은 비회전성인 것으로 한다. 탄성응답과 입사파의 유체운동은 미소진폭 주기운동을 하는 것으로 하고, 각각 그 정상상태를 논하기로 한다. 그리고, 자유표면은 모든방향으로 무한히 펼쳐져 있는 것으로 하고, 유한수심인 경우에는 수심일정으로 한다. 또한, 다수의 지지부체가 존재하는 경우에 있어서, 어떤 지지부체를 둘러싸는 최소반경의, 해저에 닿는 가상연직원주의 내측에는 다른 지지부체가 존재하지 않는 것으로 한다. 마지막으로 지지부체는 강체인 것으로 한다.

Fig.1과 같이 평균수면상에 공간고정된 국소 직각 좌표계 $o_i - x_i, y_i, z_i$, ($i=1 \sim N$)를 갖는 N 개의 3차원 임의형상의 지지부체로 지지된 대형 해양구조물의 정상상태의 유탄성문제를 생각한다.

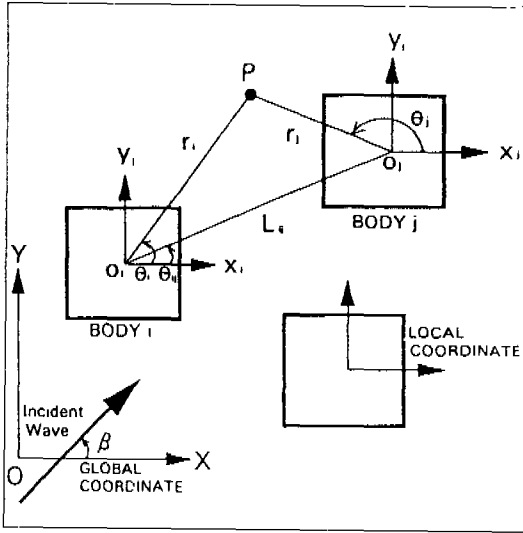


Fig. 1 Definition sketch

그리고 국소 좌표계의 원점 o_i ($i=1 \sim N$)는 부체 i ($i=1 \sim N$)를 둘러싸는 최소반경의 가상 연직원주의 중심으로 하고, z 축은 연직상방향을 양으로 한다. 다수의 지지부체가 미소 진폭 주기운동을 하고 있는 경우의 지지부체 j ($j=1 \sim N$)의 전체 입사포텐셜은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_j^I(r_j, \theta_j, z) &= (\{a_j\}^T + \sum_{i \neq j}^N \{A_{ij}\}^T [T_{ij}]) \{\phi_j^I\} \\ &+ \sum_{i \neq j}^N \sum_{l=1}^6 (-i\omega\eta_{il} \{R_{il}\}^T [T_{ij}]) \{\phi_j^I\} \\ &, (j=1 \sim N) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, (r_j, θ_j, z) 는 지지부체 j 의 국소 원주 좌표계이고, $\{a_j\}^T$ 는 지지부체 j 의 국소 원주 좌표계로 표현된 평면입사파의 포텐셜의 계수 벡터의 전치이며, $[T_{ij}]$ 는 지지부체 i 의 국소 원주 좌표계로 표시된 지지부체 i 의 산란성분파와 지지부체 j 의 국소 원주 좌표계로 표시된 지

지부체 j 의 입사성분파를 관계지우는 좌표변환 행렬이다. 또한, $\{\phi_j^I\}$ 는 지지부체 j 에 입사하는 성분파를 요소로 하는 벡터이고, 지지부체 j 의 국소 원주 좌표계로 나타낸 것으로서 제1종 n 차 Bessel함수 J_n 및 제1종 n 차 변형 Bessel함수 I_n 으로 표시된다. i 는 허수단위이고, ω 는 평면 입사파의 각주파수이고, η_{il} 는 지지부체 i 의 l 방향의 복소변위 진폭이고, $\{A_{ij}\}^T$ 는 다음 식으로 표현되는 지지부체 i 에 외접하는 가상의 해저까지 연결된 연직 원주의 외측 산란포텐셜 ϕ_i^D 의 계수벡터의 전치이다.

$$\phi_i^D(r_i, \theta_i, z) = \{A_i\}^T \{\phi_i^D\} \quad (2)$$

여기서, $\{\phi_i^D\}$ 는 지지부체 i 의 산란성분파를 요소로 하는 벡터이며, 이 산란성분파는 제1종 n 차 Hankel함수 $H_n^{(1)}$ 및 제2종 n 차 변형 Bessel함수 K_n 으로 표시된다.

또한 지지부체 i 가 단독으로 존재하고 l 방향으로 단위 속도진폭으로 운동하고 있을 때의 지지부체 i 를 둘러싸는 최소 반경의 해저에 닿는 가상 연직 원주의 외측의 방사포텐셜 ϕ_{ii}^R 은 다음과 같이 표시되어진 것으로 한다.

$$\begin{aligned} \phi_{ii}^R(r_i, \theta_i, z) &= \{R_{ii}\}^T \{\phi_i^D\} \\ &= \{R_{ii}\}^T [T_{ii}] \{\phi_j^I\} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, 전치벡터 $\{R_{ii}\}^T$ 의 성분은 지지부체 i 가 단독으로 존재하고 있는 경우의 l 방향의 운동에 의한 방사문제를 풀어 얻어지는 계수이다.

지지부체 j 의 모든 입사 포텐셜에 대한 산란포텐셜은 산란전달행렬 $[B_j]$ 에 의해 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\phi_j^D(r_j, \theta_j, z)$$

$$= (\{a_j\}^T + \sum_{i \neq j}^N \{A_i\}^T [T_{ij}]) + \sum_{i \neq j}^N \sum_{k=1}^6 (-i\omega \eta_k \{R_k\}^T [T_{ij}]) \times [B_j]^T \{\phi_j^D\}, \quad (j=1 \sim N) \quad (4)$$

따라서, 식(2)의 지지부체 j 에 대한 표시식과 식(4)에서 다음의 식이 얻어진다.

$$\{A_j\} = [B_j] (\{a_j\} + \sum_{i \neq j}^N [T_{ij}]^T \{A_i\} + \sum_{i \neq j}^N \sum_{k=1}^6 (-i\omega \eta_k [T_{ij}]^T \{R_k\})) \quad (j=1 \sim N) \quad (5)$$

윗식에 있어서, 미지수는 $\{A_i\}$, ($i=1 \sim N$) 및 η_k ($k=1 \sim 6$; $i=1 \sim N$)이며, N 개의 3차원 지지부체를 갖는 구조물의 정상상태의 유탄성문제의 경우, 지지부체간의 유체역학적 상호간섭을 고려한 상부구조물의 구조응답을 구하기 위해서는 윗식을 푸는 것만이 아니라 N 개의 지지부체의 취부절점을 포함하는 전체 운동방정식이 필요하다. 따라서, 그 전체 운동방정식은 보요소를 이용하는 유한요소법에 의해 다음과 같이 구해진다.

$$([K] - \omega^2[M] - i\omega[C])\{\eta\} = \{F\} \quad (6)$$

여기서, $[K]$, $[M]$ 및 $[C]$ 는 각각 상부구조의 강성행렬, 질량행렬 및 감쇠행렬이다. 상부구조의 강성행렬 및 질량행렬은 상부구조를 골조구조(보요소)로 근사하는 것에 의해 구한다. 상부구조의 감쇠행렬은 정확한 추정이 곤란한 관계로 *Rayleigh* 감쇠를 이용하기로 한다. $\{\eta\}$ 는 총자유도의 복소변위 진폭벡터이고, $\{F\}$ 는 복소외력 진폭벡터이며, 지지부체의 취부절점에서는 식(7)를 사용하며, 그 이외의 절점에서는 0이다. 그러므로 지지부체 j ($j=1 \sim N$)가 상부구조물에 결합되는 취부절점에서 평가되어질 복소외력진폭은 *D'Alambert*의 원리에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$\sum_{k=1}^6 [\omega^2 (M_{kj} + \mu_{kj}) + i\omega \nu_{kj} - K_{kj}] \eta_j - i\rho\omega \left[\{a_j\}^T + \sum_{i \neq j}^N \{A_i\}^T [T_{ij}] + \sum_{i \neq j}^N \sum_{k=1}^6 (-i\omega \eta_k \{R_k\}^T [T_{ij}]) \right] \times \int \int_{S_{k_j}} [\{\phi_j^l\} + \int \int_{S_{k_j}} \{\sigma_j\} G_i dS] n_{kj} dS, \quad (k=1 \sim 6; j=1 \sim N) \quad (7)$$

여기서, M_{kj} 는 지지부체 j 의 취부절점에서 평가한 관성력계수, μ_{kj} 및 ν_{kj} 는 지지부체 j 가 단독으로 존재하는 경우의 취부절점에서 평가한 부가질량 및 감쇠계수이며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu_{kj} = -\rho Re \left\{ \int \int_{S_{k_j}} \phi_{ij}^R n_{kj} dS \right\}, \quad \nu_{kj} = -\rho \omega Im \left\{ \int \int_{S_{k_j}} \phi_{ij}^R n_{kj} dS \right\}, \quad (k, l=1 \sim 6; j=1 \sim N) \quad (8)$$

ϕ_{ij}^R 은 지지부체 j 가 단독으로 존재하는 경우에 있어서, l 방향의 단위속도 진폭으로 운동하고 있는 지지부체 j 의 침수 표면상의 방사포텐셜이고, 다음과 같이 구해진다.

$$\phi_{ij}^R = \int \int_{S_{k_j}} \sigma_{ij}^R G_i dS, \quad (l=1 \sim 6) \quad (9)$$

σ_{ij}^R 은 지지부체 j 가 단독으로 존재하고 l 방향으로 단위속도 진폭으로 운동하고 있을 때의 방사포텐셜 ϕ_{ij}^R 의 소오스 면밀도를 나타낸다.

K_{kj} 는 지지부체 j 의 취부절점에서 평가한 정수압에 의한 복원력계수이고, 이 복원력계수를 구할 때는 지지부체 j 가 받는 중량의 중심의 좌표가 필요하다. 또, ρ 는 유체의 밀도이고, G_i 는 지지부체 j 의 침수표면상의 Green 함수이다. 또한 벡터 $\{\sigma_j\}$ 의 P 번째의 성분은 $\{\phi_j^l\}$ 의 P 번째

체의 성분의 입사 성분파가 단독의 지지부체 j 에 입사한 경우의 산란문제의 적분방정식을 푸는 것에 의해 구해지는 지지부체 j 의 침수표면상의 쓰오스의 면밀도이고, 산란전달행렬의 전치행렬 $[B_j]^T$ 의 P 행의 요소를 구할 때 이미 구해진 것이다. 그리고, n_{kj} 는 지지부체 j 의 k 방향의 인반화 방향여현이고, S_{H_j} 는 지지부체 j 의 침수표면이다. 계의 전체 운동방정식인 식(6)과 식(5)의 연립방정식을 푸는 것에 의해, 계수벡터 $\{A_i\}$ ($i = 1 \sim N$) 및 총자유도의 복소변위 진폭벡터 $\{\eta\}$ 가 구해진다. 복소변위진폭벡터 $\{\eta\}$ 가 구해지면 상부구조물의 구조응답은 요소강성행렬을 이용하여 구해진다.

2.2 다방향 불규칙파중의 초대형 해양구조물의 동적응답 해석

방향성을 갖는 불규칙파의 특성을 나타내는 다방향파의 스펙트럼 $S_{\zeta}(\omega, \chi)$ 는

$$S_{\zeta}(\omega, \chi) = D(\omega, \chi) S_{\zeta}(\omega) \quad (10)$$

와 같이 각 주파수 성분파의 방향 χ 에 따른 분포를 나타내는 방향분포함수(Directional Distribution Function) $D(\omega, \chi)$ 와 주파수 ω 에 따른 파에너지 분포를 나타내는 1차원 파 스펙트럼 $S_{\zeta}(\omega)$ 를 이용하여 표현할 수 있다. 방향분포함수 $D(\omega, \chi)$ 의 일반적인 모델은 주파수에 대해 독립인 여현분포함수로서 다음과 같이 표현된다[30].

$$D(\chi) = \frac{\Gamma(S+1)}{\sqrt{\pi} \Gamma(S+\frac{1}{2})} \cos^{2S}(\chi - \theta_0) \quad (11)$$

$$\chi = \theta + \theta_0$$

단, θ_0 는 입사파의 주방향, θ 는 주방향과 성분파의 진행방향이 이루는 각을 표시하고, S 는 파에너지의 방향에 따른 분포의 분산 정도를 나타내는 파라메타로서, $S \rightarrow \infty$ 일 때, 한방향파 즉, 장파정파가 된다. 그리고 방향분포 파라메타 S 를

변화시켜도 에너지가 일정하게 되도록 방향분포함수 $D(\chi)$ 의 θ 에 대한 적분값을 다음과 같이 정규화시킬 필요가 있다.

$$\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} D(\theta) d\theta = 1 \quad (12)$$

본 연구에서 사용된 1차원 파 스펙트럼은 ISSC 스펙트럼으로 다음과 같이 표현된다[31].

$$S_{\zeta}(\omega) = \frac{1}{2\pi} 0.11 H_{1/3}^2 T_1 \left(\frac{T_1}{2\pi} \omega\right)^{-5} \times \text{EXP} \left[-0.44 \left(\frac{T_1}{2\pi} \omega\right)^{-4} \right] \quad (13)$$

여기서, $H_{1/3}$ 는 유의 파고(Significant Wave Height), T_1 은 평균 파주기(Mean Wave Period)이다.

주방향 θ_0 인 다방향파에 대한 주파수응답 스펙트럼 $S_{rr}(\omega, \theta_0)$ 는 다음과 같이 주어진다[22].

$$S_{rr}(\omega, \theta_0) = \int_{-\pi}^{\pi} |H_{r\zeta}(\omega, \theta_0 + \theta)|^2 \times S_{\zeta}(\omega, \theta_0 + \theta) d\theta \quad (14)$$

단, $H_{r\zeta}(\omega, \theta_0 + \theta)$ 는 초대형 해양구조물의 주파수응답 함수(단위진폭의 규칙파에 대한 응답)로서, 진절에서 기술한 바와 같이 구성부재간의 유체역학적 상호간섭효과를 고려하여 내력응답 및 운동응답을 동시에 구할 수 있는 동적응답 해석법을 이용하여 구해진다. $S_{\zeta}(\omega, \theta_0 + \theta)$ 는 다방향파 스펙트럼이다. 이와같은 방법으로 동적응답 스펙트럼이 구해지면 다방향 불규칙파중에서의 동적응답진폭의 유의치(significant value)는 다음과 같이 주어진다[32].

$$R_{1/3}(\theta_0) = 2.0 \sqrt{m_0(\theta_0)} \quad (15)$$

$m_0(\theta_0)$ 는 스펙트럼의 0차 모우멘트로서 분산을 나타내고 다음식에 의해 구해진다.

$$m_0(\theta_0) = \int_0^{\infty} S_{rr}(\omega, \theta_0) d\omega \quad (16)$$

3. 수치계산 결과 및 고찰

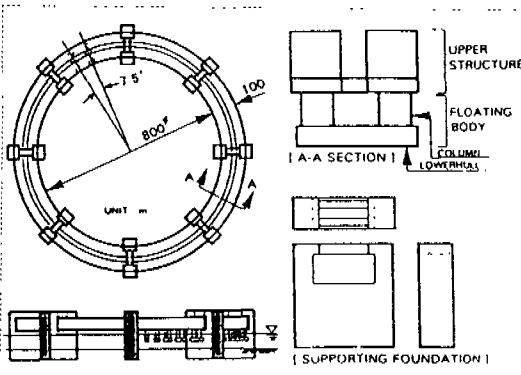
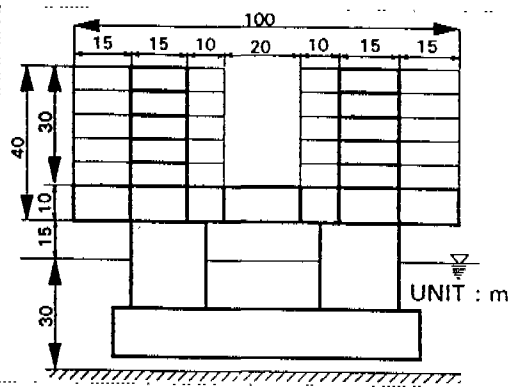
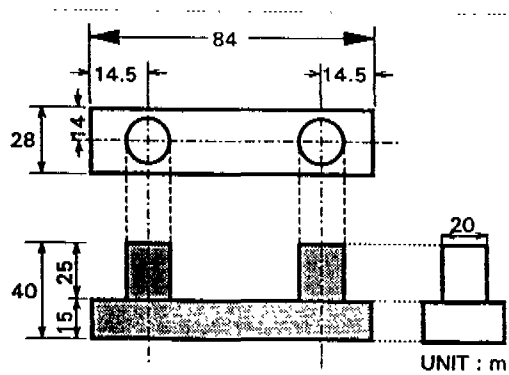


Fig. 2 Sketch of a new semisubmersible type structure



(a) Cross section of the upper structure



(b) Lowerhull type floating body

Fig. 3 Configuration of the upper structure and the lowerhull type floating body

Fig.2와 같은 반잠수식 Ring 형상 구조물을 대상으로, 본 논문에서 정식화한 동적응답해석법을 적용하여 구조물의 동적응답에 미치는 상호간섭 및 다방향파의 영향을 고찰한다. 이와같은 Ring 형상 초대형 해양도시의 인구 3만명, 수심 30~70m의 중수심해역의 공간이용을 위해 Yoshida 등 [8],[9]이 구상하

고 구조공학적인 검토를 통하여 그 가능성을 확인한 것이다. 이 해양도시의 기본개념은 Ring 형상의 상부구조, 반잠수식 지지부체, 중력식 지지기초 구조의 세가지로 요약된다. Ring 형상 상부구조는 외경 1000m, 내경 800m이고, 단면의 치수는 Fig.3(a)에 나타나 있다. 지지부체는 Fig.3(b)와 같이 lower hull형 지지부체로 한다. 지지기초는 길이 160m, 폭 80m, 높이 140m인 강과 콘크리트의 복합구조물이다. 지지부체는 중심각 7.5° 간격으로 배치하면 48개 필요하나 지지기초의 수를 8개로 하고 지지기초가 위치하는 부분의 부체를 배제하여 Fig.4와 같이 40개가 된다.

Fig.5,6과 같이 상부구조는 직선 보요소로 근사하였으며, 보요소의 총 절점수와 총 요소수는 각각 48개로 하였다. 그림에서 흑점은 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°에서 5°씩 변화하여 270°까지로 한다. 또한, 좌표계 X, Y, Z는 전체좌표계이고 지지부체의 위치, 상부구조의 절점좌표 및 지지부체의 취부절점 이외의 절점의 경계조건, 절점변위 및 절점반력은 이 좌표계를 이용한다. 좌표계 x, y, z는 3차원 특이점분포법을 이용하는 경우의 기준좌표계이며 지지부체의 침수표면의 요소좌표, 지지부체의 무게중심, 지지부체의 관성모멘트, 지지부체의 운동기준점(지지부체의 취부절점의 좌표)은 이 좌표계를 이용한다. 좌표계 x', y', z'는 유한요소법을 이용하는 경우의 요소좌표계이며 상부구조의 요소의 단면 2차 모멘트, 요소의 비틀림계수, 요소 내력은

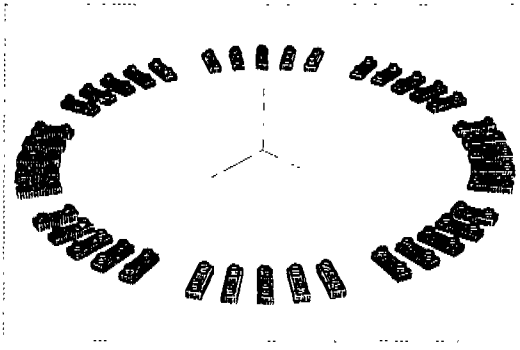


Fig. 4 Sketch of arrays of 40 lowerhull type floating body

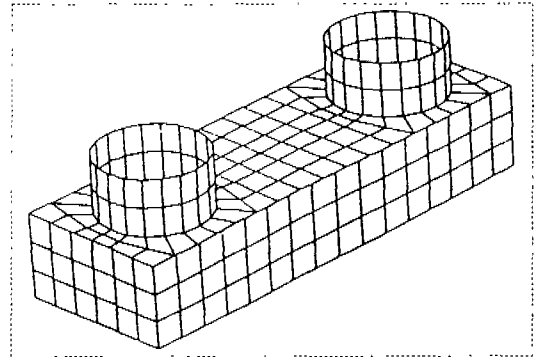


Fig. 7 Lowerhull type floating body represented by 402 panels

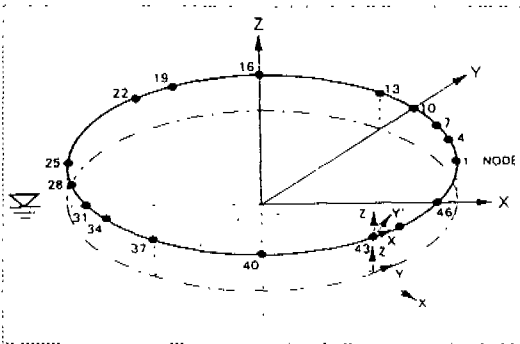


Fig. 5 Coordinate system and discretization of the upper structure

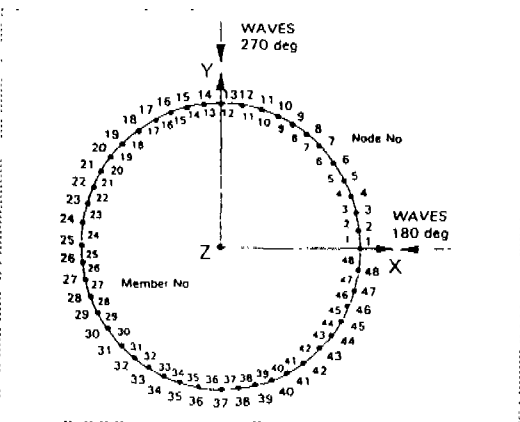


Fig. 6 Node and member number of the upper structure

이 좌표계를 이용한다. 계산상의 lowerhull 침수 표면의 요소분할수는 Fig.7과 같이 402개로 요소분할하였다. 또, 산란포텐셜의 급수항은 진동항을 5개, 단조감소항을 5개로 하여 계산했다.

보요소의 종탄성계수는 $2.1 \times 10^7 \text{ tonf}/\text{m}^2$, 포아손비는 0.3으로 했다. 보요소의 밀도는 $2.226 \text{ tonf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ 이고, 상부구조의 구조 감쇠계수는 0.01로 했다. 상부구조의 단면적은 27.52 m^2 , y'축에 관한 단면 2차 모멘트는 4590 m^4 , z'축에 관한 단면 2차 모멘트는 23770 m^4 , 비틀림계수는 2820 m^4 이다.

단독의 지지부체의 질량은 $610.7 \text{ tonf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$, 지지부체만의 무게중심은 평균수면하 14m, 상부구조를 포함하는 경우의 지지부체의 무게중심은 평균수면상 22.5m이다. 상부구조의 단면의 도심은 평균수면상 28m이다. 이 도심의 좌표를 절점좌표로 했다. 지지부체만의 무게중심에서의 x, y, z축에 관한 지지부체의 관성모멘트는 각각 108500, 476300, 468600 $\text{tonf} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}$ 이다. 또한 사용된 1차원 스펙트럼은 유의파고 3m, 평균주기 6sec인 ISSC 스펙트럼을 사용하였고, 한방향파와 다방향파의 전체 에너지는 일치하도록 하였다.

수치계산 고찰은 한방향파($S = \infty$)중에서와 다방향파($S=2$)파중에서의 수직방향(Heave)의 절점변위, 절점가속도 및 수직 굽힘모멘트의 유의치를 서로 비교하여 구조물의 동적응답에 미치는 상호간섭 및 다방향파의 영향을 함께 고찰하였다.

3.1 절점변위

상부구조의 수직방향 절점변위 응답에 미치는 상호간섭 및 다방향파의 영향을 고찰한다. Fig.8은 절점 1, 7, 19, 25, 31, 43의 절점변위의 유의치로서 횡축은 입사파의 주방향을 나타내고 있으며, 종축은 절점변위의 유의치를 나타내고 있다.

Fig.8(a)와 (d)는 각각 1, 25 절점의 절점변위 유의치로서 한방향파에서 파가 정면(180°)으로 입사될 때 그 값이 가장 크게 나타나고 있다. 각각 7, 31 절점의 절점변위 유의치를 나타내는 Fig.8(b)와 (e)의 경우, 사파부근(225°)에서 최대의 peak치를 나타내고 있다. 한방향파의 경우, 파상층의 절점변위는 상호간섭 영향으로 약간 크게 나타나는 반면, 파하층의 절점변위는 상당히 작게 나타나고 있다. 또한 Fig.8(a)에서 다방향파로 됨에 따라 향파쪽의 유의치가 크게(30%) 감소하였고, Fig.8(d)의 경우도 비슷한 경향을 보이고 있지만, 한방향파 및 다방향파에서의 상호간섭의 영향이 Fig.8(a)에 비해 훨씬 크게 나타나고 있다. 이와같은 영향으로 인해 다방향파에서는 입사각 전체에 걸쳐 유사한 크기의 유의치를 보이고 있다. 또한, Fig.8(e)에서도 사파 부근의 큰 peak치가 상호간섭 및 다방향파의 영향으로 인해서 25%이상 감소된 결과를 볼 수 있다. Fig.8(c)와 (f)는 각각 19, 43 절점의 절점변위 유의치로써 다방향파중에서 상호간섭을 고려함에 따라 사파 부근을 기점으로 유의치의 반전을 보여준다. 각 절점의 유의치에 대한 대칭성의 문제에 있어서도 Fig.8 (c)와 (f)의 유의치를 서로 비교해 볼 때 응답의 대칭성이 뚜렷이 나타나고 있다. 전반적으로 모든 절점에서 입사각의 변화에 따라 한방향파와 다방향파중에서의 응답의 유의치에 미치는 상호간섭의 영향을 뚜렷이 볼 수 있다. 한방향파중에서, 상호간섭의 영향이 크게 나타났던 입사각의 유의치는 다방향파중에서도 상호간섭의 영향이 크게 나타나 그 값의 증감이 다른 입사각에 비해 큰 것을 볼 수 있다. 다방향파중에서는 한방향파에서의 달리 입사각 전체에 걸쳐 비슷한 값의 유의치를 나타나며, 한방향파중에서의 큰 유의치는 감소시키고 작은 유의치는 증가시키는 다방향파의 특성이 잘 나타나고 있다.

3.2 절점가속도

상부구조의 수직방향 절점 가속도 응답에 미치는 상호간섭 및 다방향파의 영향을 고찰한다. Fig.9는 절점 1, 7, 19, 25, 31, 43의 절점 가속도의 유의치로서 횡축은 입사파의 주방향을 나타내고 있으며, 종축은 절점 가속도의 유의치를 나타내고 있다. Fig.9 (a), (b)는 각각 1, 7 절점의 유의치로써 한방향파의 경우, 상호간섭 영향으로 유의치가 다소 증가하고 있으며, 다방향파에서도 그 경향이 그대로 나타나고 있다. 입사각의 변화에 따라 한방향파와 다방향파중에서의 응답에 미치는 상호간섭과 다방향파의 영향을 뚜렷이 볼 수 있다. 또한, 전반적으로 모든 절점에서 앞서 고찰한 절점 변위의 경우와 유사한 경향을 보이고 있다.

3.3 수직굽힘모멘트

상부구조의 수직 굽힘모멘트 응답에 미치는 상호간섭 및 다방향파의 영향을 고찰한다. 수치계산 결과의 검토를 위한 대상 부재는 Fig.6에서 나타낸 것과 같이 1, 7, 19, 25, 31, 43 요소 부재로 하였다. 따라서, Fig.10은 각 부재의 좌측 절점 즉, 1, 7, 19, 25, 31, 43 절점의 수직 굽힘모멘트의 유의치이며, Fig. 11은 각 부재의 우측 절점 즉, 2, 8, 20, 26, 32, 44 절점의 수직 굽힘모멘트의 유의치를 나타내고 있다. 각 부재의 좌우 절점에서의 응답의 경향은 대체로 절점 변위응답의 경향을 따르고 있음을 알 수 있다.

먼저, 상호간섭의 영향을 보면, 전체적으로 한방향파중에서는 모든 절점에서 상호간섭의 영향이 크게 나타나고 있으며, 특히, Fig.10 (d), (e)와 Fig.11 (d), (e)의 경우엔 그 영향으로 인하여 최대 peak치를 50% 정도 감소시키고 있다. 반면, 다방향파중에서는 상호간섭을 다소 완화시키는 효과를 가져와 대부분의 절점에서 유의치의 차이가 그렇게 크게 나타나고 있지는 않다. 그러나 Fig.10 (d), (e)와 Fig.11 (d), (e)의 경우, 한방향파에서 상호간섭의 영향이 크게 나타났던 입사각의 경우에는 다방향파중에서도 상호간섭의 영향이 상당히 크게 나타남을 볼 수 있고, 이로 인하여 최대 peak치를 나타냈던 입사각에서 최소의 유의치를 나타내고 있음을 볼 수 있다.

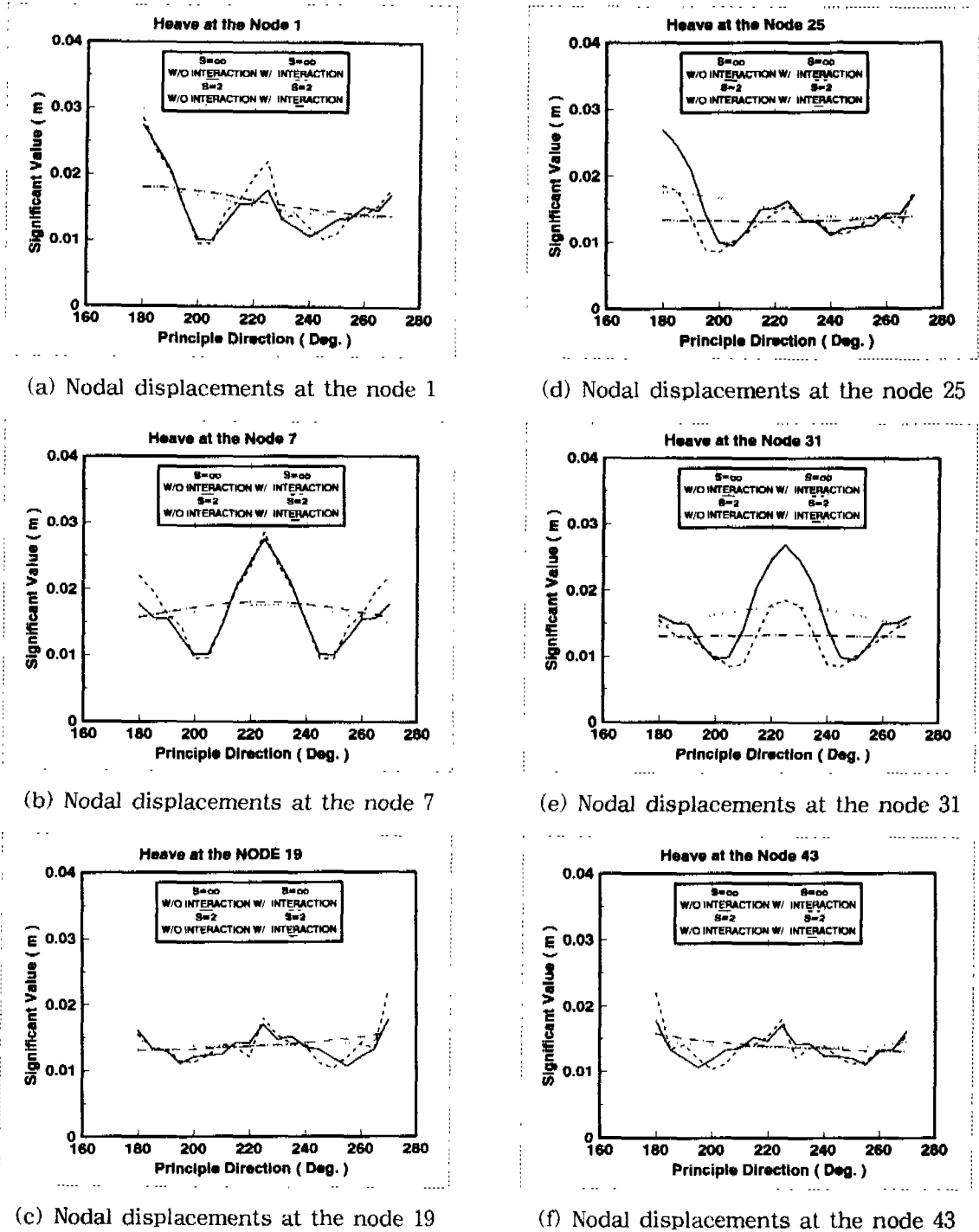
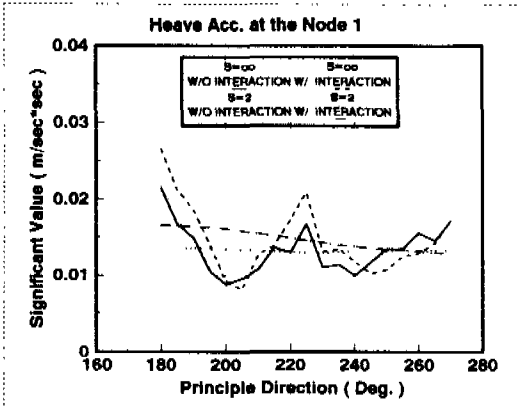
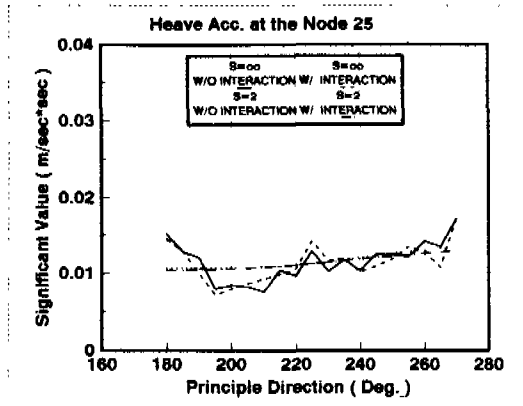


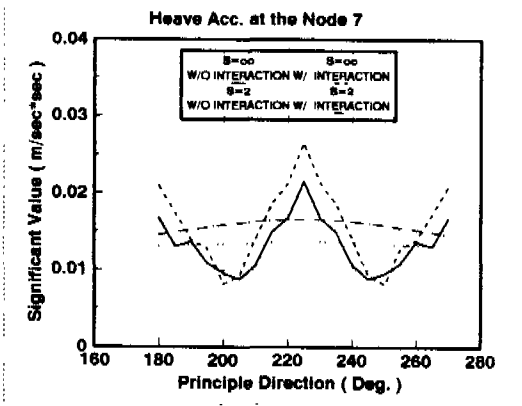
Fig 8 Significant value of vertical displacement responses of the upper structure for various principal directions



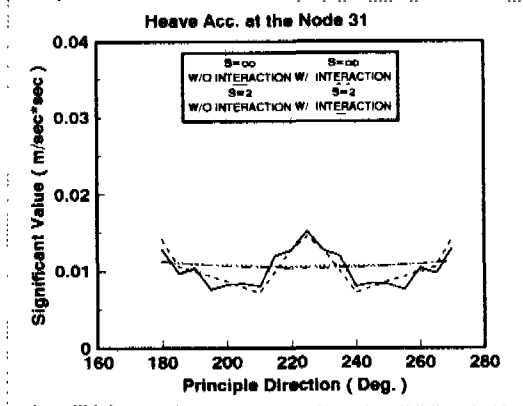
(a) Nodal accelerations at the node 1



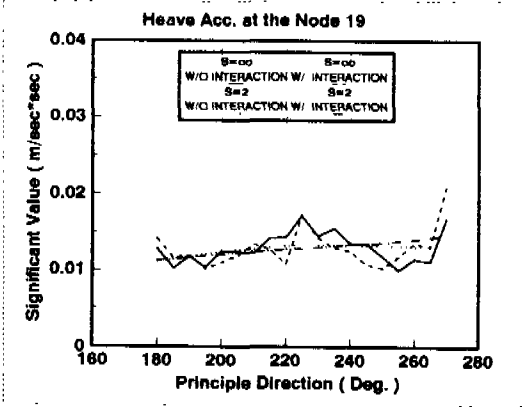
(d) Nodal accelerations at the node 25



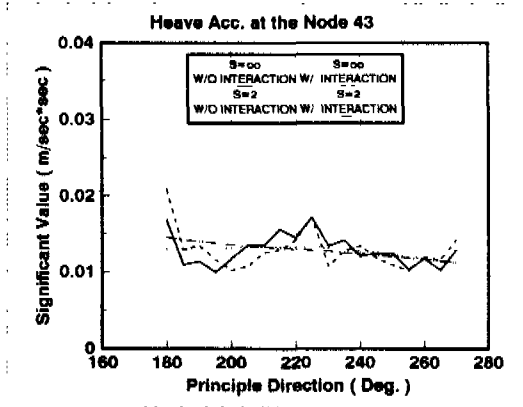
(b) Nodal accelerations at the node 7



(e) Nodal accelerations at the node 31

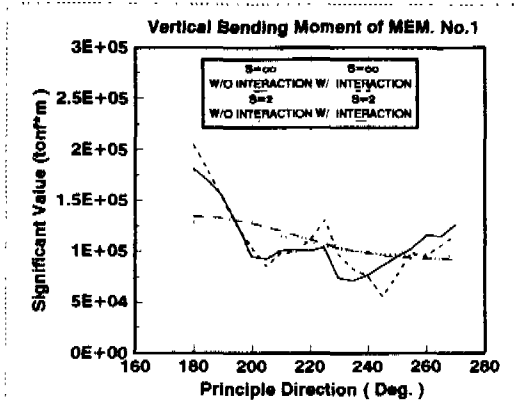


(c) Nodal accelerations at the node 19

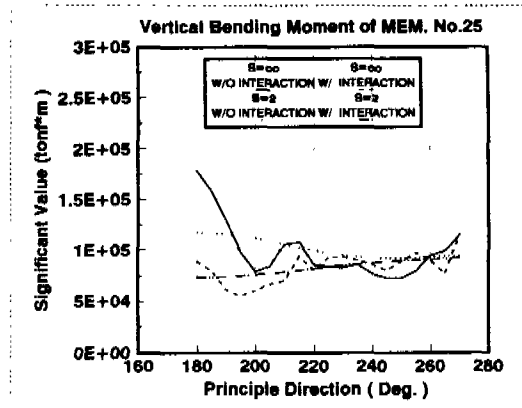


(f) Nodal accelerations at the node 43

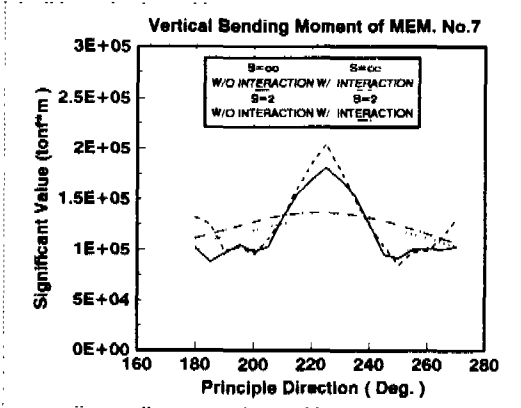
Fig. 9 Significant value of vertical acceleration responses of the upper structure for various principal directions



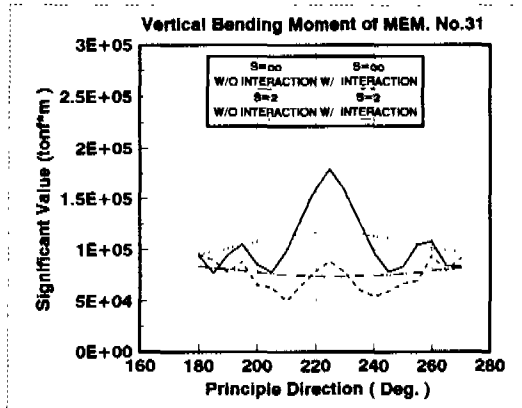
(a) Vertical bending moments at the node 1



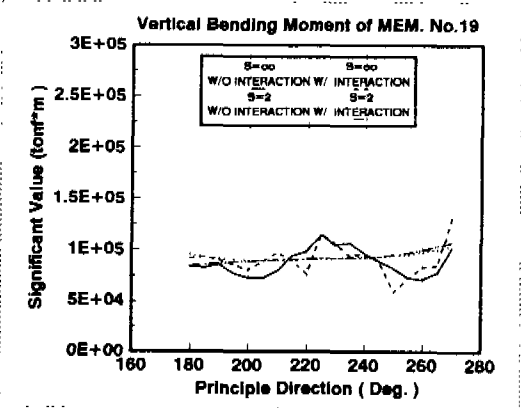
(d) Vertical bending moments at the node 25



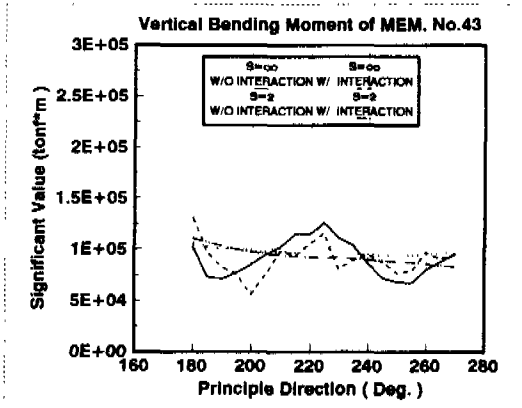
(b) Vertical bending moments at the node 7



(e) Vertical bending moments at the node 31

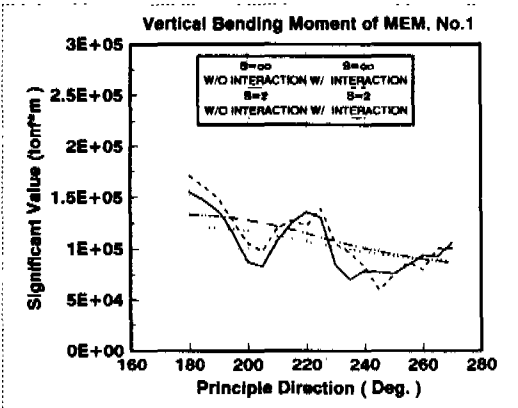


(c) Vertical bending moments at the node 19

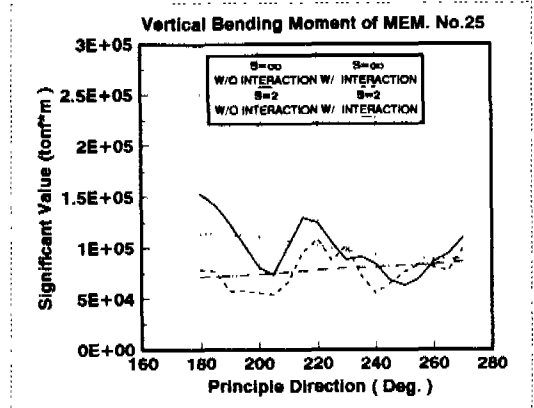


(f) Vertical bending moments at the node 43

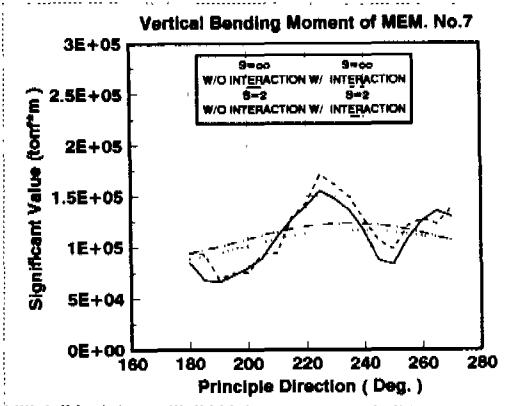
Fig.10 Significant value of vertical bending moment responses of the upper structure for various principal directions (Left member forces)



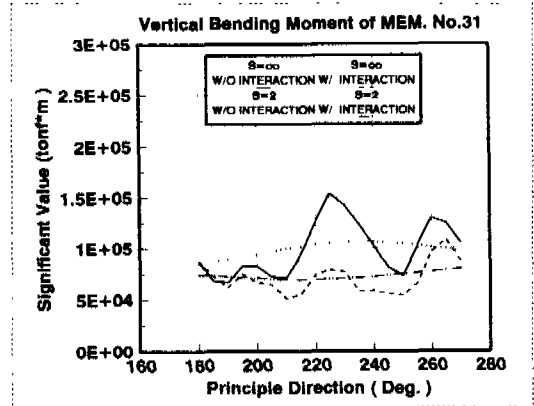
(a) Vertical bending moments at the node 2



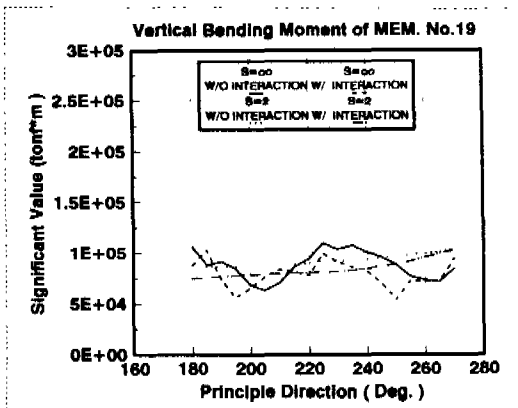
(d) Vertical bending moments at the node 26



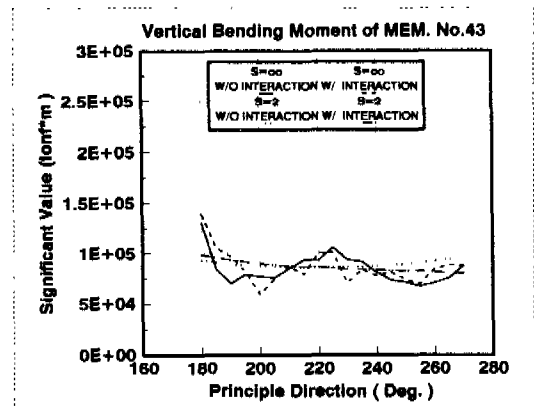
(b) Vertical bending moments at the node 8



(e) Vertical bending moments at the node 32



(c) Vertical bending moments at the node 20



(f) Vertical bending moments at the node 44

Fig.11 Significant value of vertical bending moment responses of the upper structure for various principal directions (Right member forces)

또한, 다방향파의 특성이 수직 굽힘모멘트의 유의치에서도 나타나고 있으며, Fig.10 (a)와 Fig.11 (a), 의 경우엔 다방향파로 인하여 향파쪽에서 유의치가 20% 이상 감소되고 있다. Fig.10 (d)와 Fig.11 (d), 의 경우에도 다방향파로 인하여 향파쪽에서 유의치가 30% 이상 감소하였으며, 그 결과 전 입사각중에서 최소의 유의치를 나타나고 있다. 그리고, Fig.10 (b)와 Fig.11 (b), Fig.10 (e)와 Fig.11 (e)에서도 한방향파의 경우, 사파부근에서의 큰 유의치가 다방향파의 영향에 의해 감소하고 있다.

4. 결 론

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

(1) 다방향 불규칙파중에서 초대형 해양구조물을 탄성체로서 동적으로 취급할 수 있고, 지지부체간의 유체역학적 상호간섭을 고려하여 운동응답 및 구조응답의 유의치를 동시에 구할 수 있는 동적응답 해석법을 개발하였다.

(2) 한방향파 및 다방향파중에서의 구조물의 각 응답에 미치는 상호간섭의 영향이 무시할 수 없을 정도로 크게 나타나고 있다. 따라서 초대형 해양구조물의 동적응답을 평가할 경우, 상호간섭 및 다방향파의 영향을 고려할 필요가 있다.

(3) 한방향파중에서의 큰 유의치는 작게 하고 작은 유의치는 크게 하는 다방향파의 특성이 각 응답에서 나타나고 있다. 그러므로, 다방향파의 영향은 대체로 한방향파에서 편차가 크게 나타났던 응답의 유의치를 평준화시키는 방향으로 나타나고 있다.

참 고 문 헌

- [1] 寺井精英, "해양정보도시", TBSブリタニカ, 1986
- [2] 日本産業機械工業會, "浮體人工都市實現化의調査研究報告書", 1990
- [3] 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
- [4] 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
- [5] 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
- [6] Baschieri, M. and Bellincioni, P., "Prestressed Concrete Floating Airport", Proceedings of the First International Workshop on Very Large Floating Structures, pp.421-436, 1991
- [7] 井上義行, ほか, "浮體式空港の設計と環境外力の推定に関する検討", 日本造船學會論文集, 第179號, pp.165-171, 1996
- [8] 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検討, 日本造船學會論文集, 第165號, pp.203-213, 1989
- [9] 吉田宏一郎ほか, "中水深域空間利用構造體の開發(その2)", 礎着, 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
- [10] 平山次清, ほか, "長壽命浮體海上空港の波浪中應答特性", 日本造船學會論文集, 第177, 178, 179號, 1995, 1996
- [11] Maeda, H., et al., "Hydroelastic Responses of Pontoon Type Very Large Floating Offshore Structure", Journal of the society of naval architects of Japan, Vol.178, pp. 203-212, 1995
- [12] Murai, M., Kagamoto, H. and Fujino, M., "On the Predictions of Hydroelastic Behaviours of a Huge Floating Structure in Waves - A Pontoon-type Floating Structure -", Journal of the society of naval architects of Japan, Vol.178, pp.213-224, 1995
- [13] Hickey, E.I. et al., "Mobile Offshore Bases", Proceedings of the First International Workshop on Very Large Floating Structure, pp.133-148, 1991
- [14] 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 Structure" pp.333-

- 354, 1991
- [15] 具滋三, 吉田宏一郎, “多數の三次元任意形状物體間の相互干涉”, 日本造船學會論文集, 第165號, pp.193-202, 1989
- [16] 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
- [17] Isaacson, M. and Nwogu, O., “Short-crested Wave Forces on a Vertical Pile”, OMAE, pp.47-54, 1988
- [18] Aage, C. et al., “Wave Loads on a Cylinder in 2-D and 3-D Deep Water Waves”, OMAE, pp.175-181, 1989
- [19] Jo, H.J., Maeda, H. and Miyajima, S., “Effects of Directional Waves on the Behaviour of Semisubmersible Rigs”, PRADS, pp.116-129, 1992
- [20] Sand, S.E., Romeling, J. and Kirkegaard, J., “Influence of Wave Directionality on Response of Semisubmersible”, OMAE, pp.239-245, 1987
- [21] 竹澤誠二, 小林顯太郎, “方向スペクトル波中における海洋構造物の応答-その1線形一次応答-”, 日本造船學會論文集, 第165號, pp.141-152, 1989
- [22] 구자삼, 조효제, 이창호, “다방향 불규칙파중의 TLP의 동적응답해석”, 한국해양공학회지, 제8권, 제1호, pp.23-32, 1994
- [23] Maeda, H., Jo, H.J. and Miyajima, S., “Effects of Directional Waves on the Low-frequency Motions of Moored Floating Structures”, ISOPE, pp.489-495, 1992
- [24] Pinkster, J.A., “The Influence of Directional Spreading of Waves on Mooring Forces”, OTC5629, pp.129-140, 1988
- [25] 竹澤誠二, 小林顯太郎, “方向スペクトル波中における海洋構造物の応答-その2非線形応答-”, 日本造船學會論文集, 第166號, pp.139-150, 1989
- [26] Takezawa, S. et al. “Experiments on Responses of Very Large Floating Offshore Structures in Directional Spectrum Waves”, Journal of the society of naval architects of Japan, Vol.171, pp.511-523, 1992
- [27] Takezawa, S. et al. “Experiments on Responses of Very Large Floating Offshore Structures in Directional Spectrum Waves (2nd report)”, Journal of the society of naval architects of Japan, Vol.172, pp.57-68, 1992
- [28] Takezawa, S. et al. “Experiments on Responses of Very Large Floating Offshore Structures in Directional Spectrum Waves (3rd report)”, Journal of the society of naval architects of Japan, Vol.173, pp.147-159, 1993
- [29] 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
- [30] 高石敬史, 其他, “海洋波の方向波スペクトルについて”, 日本造船學會誌, 第740號, pp.94-113, 1991
- [31] 山内保文, “不規則現象論”, 海文堂, pp.138-149, 1986
- [32] Price, W.G. and Bishop, R.E.D., “Probabilistic Theory of Ship Dynamics”, John Wiley & Sons, pp.180, 1974