

드릴쉽의 유탄성 응답해석

A Hydroelastic Response Analysis of Drillships in Waves

구자삼 · 조효제

J. S. Goo and H. J. Jo

Key Words : Hydroelastic Response(유탄성응답), Drillships(드릴쉽), fluid-structure interaction(유체구조 상호간섭), Three-dimensional source distribution method(3차원 특이점분포법), finite element method(유한요소법),

Abstract : To design very large ships, such as very large drillships, we have to estimate the hydroelastic responses of the very large ships in waves. A numerical procedure is described for estimating the hydroelastic responses of very large ships advancing with slow speed in waves. The developed numerical approach is based on a combination of the three-dimensional source distribution method and the finite element method, including fluid-structure interaction by regarding a very large ship as many hull elements connected with elastic beam elements. Numerical results are compared with experimental and numerical ones obtained in the literature. The results of comparison confirmed the validity of the proposed approach.

1. 서 론

최근 해양석유자원을 적극적으로 활용하기 위해 해양구조물의 설치해역이 점차 심해역으로 옮겨감에 따라 새로운 개념의 해양구조물에 대한 요구가 높아지고 있다. 심해용 부유식 해양구조물 중에서, 특히 가동 수심이 깊고, 장거리 이동이 용이한 대표적인 구조물로서 초대형 드릴쉽을 들 수 있다. 초대형 드릴쉽은 통상 작업의 편의성 및 안정성을 높이기 위해 대형 문풀(moon pool)을 선체 중앙부에 두고 있다. 문풀이란 시추작업을 수행하기 위해 선체를 상하로 관통한 중앙개구부(center opening)를 말한다. 그런데, 선체 중앙에 대형 문풀을 두면 선체중앙부의 강성저하로 인해 파랑중 유탄성응답이 현저하게 되어 선체 구조강도 및 피로파괴 등에 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 선박에 대한 정확한 유탄성응답을 추정하기 위해서는 종래의 파랑하중을 산정한 다음, 구조해석을 수행하는 2단계적인 방법보다는 유체-구조 상호간섭을 고려하여 일괄적으로 해석할 수 있는 기법개발이 요구되고 있다.

통상의 선박에 대한 유탄성 응답에 관해서 스트립

접수일 : 2004년 8월 2일

구자삼(책임저자) : 부경대학교 조선해양시스템공학과

E-mail : jsgoo@pknu.ac.kr Tel : 051-620-6486

조효제 : 한국해양대학교 해양시스템공학과

이론^{1,2)} 및 경계요소법^{3,4)}을 적용한 연구결과가 발표된 바가 있다.

최근 선속의 영향을 합리적으로 도입하기 위해 전진속도가 있는 경우의 3차원 특이점분포법을 전침수 타원체 및 반침수 타원체에 적용하여 유탄성응답을 구하는 방법이 발표되었으며⁵⁾, 고주파수 가정을 도입한 3차원 특이점분포법에 의한 연구⁶⁾등도 발표된 바가 있다. 그러나, 임의 형상의 선체에 3차원 특이점분포법을 적용하여 탄성응답을 정도 좋게 구하고 있는 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구는 드릴쉽과 같이 파랑 중 유탄성응답이 현저한 선박을 대상으로하여 탄성응답을 정도 좋게 추정할 수 있는 범용 해석기법을 개발하는데 목표를 둔다. 드릴쉽의 경우에는 선박을 탄성부유체로 다루어야 하고, 탄성체가 파랑중 동적거동을 할 때에는 유체-구조 상호간섭을 고려하여 운동과 구조응답을 동시에 구할 필요가 있다. 유체력 평가는 고주파수 가정을 도입한 3차원 특이점분포법을 적용하고, 드릴쉽을 다수의 외각요소로 분할하여 각 요소에 대한 유체력 및 파강제력을 산정한다. 그리고 각 외각요소의 중앙점을 절점으로 하고 이들 절점을 탄성 보요소로 연결하여 유한요소법에 의해 정식화함으로써 동적 구조응답을 추정한다. 그리고 본 탄성응답 해석법을 검증하기 위해 Masuda의 길이 2.55m×폭 0.52m×홀수 0.05m인 모델의 실험치⁷⁾ 및 Ikoma의

계산치⁸⁾와 본 계산결과를 비교·검토하여, 본 계산 기법의 타당성을 확인하였다.

2. 탄성 응답해석

2.1 기본가정 및 좌표계

탄성응답 해석법에 의해 배의 동적 구조응답을 해석하기 위한 기본가정은 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) 방사 유체력은 선체의 강체모드에 대해서만 고려하고 탄성모드에 기인하는 방사 유체력은 무시한다.

(4) 상부구조는 3차원 골조 선형 탄성구조로 한다.

(5) 각각의 평형위치에 대해 응답은 미소진폭의 조화진동으로 한다.

위의 가정에도 불구하고, roll 점성감쇠력은 외력으로 고려한다.

을 연결하는 보요소(Beam element) 등 2종류로 분류한다.

2.2 운동방정식

외각요소에 작용하는 유체압력은 그 외각요소의 절점에서의 힘과 모멘트로 평가한다.

각 절점에서 평가한 힘과 모멘트는 변위, 속도, 가속도의 미지량을 포함하기 때문에, 구조전체의 절점 변위벡터를 $\{\eta\}$ 라 하고 각 절점에 작용하는 힘과 모멘트를 결합해줌으로써 구조 전체에 대한 다음과 같은 운동 방정식을 얻을 수 있다.

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

여기서,

$[M_S]$: 전체 질량행렬

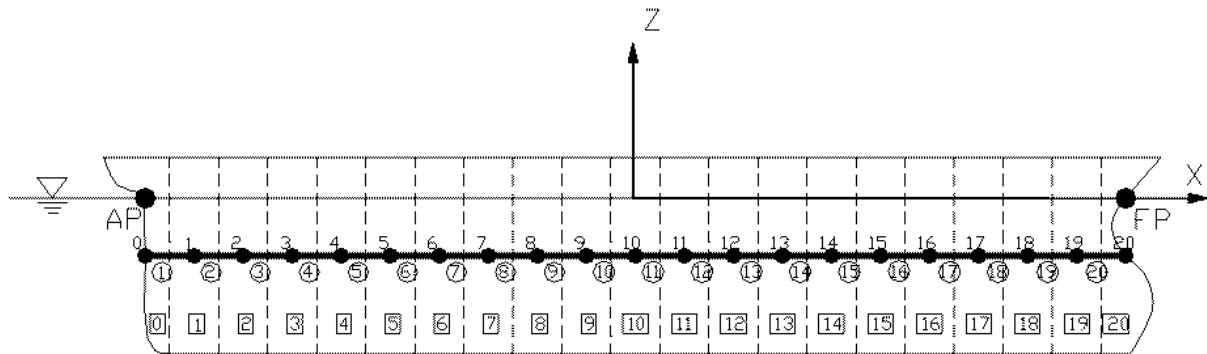
$[\mu]$: 유체에 의한 전체 부가질량행렬

$[C_S]$: 전체 구조감쇠행렬

$[\nu]$: 전체 조파감쇠행렬

$[\nu^V]$: 전체 roll 점성감쇠행렬

$[K_S]$: 전체 강성행렬



0, 1, ... : Node No.

①, ②, ... : Beam Element No.

□1, □2, ... : Hull Element No.

Fig. 1 Element discretization of a Ship

전체구조를 Fig. 1과 같이 요소로 분할하고, 각 요소는 그 역할에 따라 (1) 형상, 크기, 질량을 가지고, 외력을 받으며 강체로서 거동하는 외각요소(hull element)와 (2) 탄성체로서 외각요소의 절점

$[K_P]$: 정수압에 의한 전체 복원력행렬

$\{F^W\}$: 파강제력 벡터

$\{\eta\}$: 구조전체의 절점 변위 벡터

식 (1)의 연립방정식을 푸는 것에 의해, 절점 변

위 벡터 $\{\eta\}$ 가 구해진다.

2.2.1 구조감쇠행렬 및 점성감쇠행렬

전체 구조감쇠행렬은 다음과 같이 Rayleigh 감쇠를 이용하기로 한다.

$$[C_S] = a[M_S] + b[K_S] \quad (2)$$

여기서, a , b 는 비례상수이다. 보통 $a = 0$ 이고, b 에 대해서는 Catley 등⁹⁾은 $b = 0.0014$ 를, Skaar¹⁰⁾은 $b = 0.0009$ 를 제안하고 있다. 또한, 선체 2절 진동의 대수감쇠율 δ 와 그 고유진동수 ω_2 가 추정되는 경우에는 다음 식으로 구하기도 한다¹¹⁾.

$$b = \frac{\delta}{\pi \omega_2} \quad (3)$$

전체 점성감쇠행렬은 대각행렬이며, 대각요소는 각 절점의 roll에 대응하는 자유도에만 값을 갖고, 그 이외의 자유도에 대응하는 요소는 0이다. 각 절점의 roll 점성감쇠는 선체 중앙단면의 roll값을 이용하여 선체를 강체로 간주한 총 점성감쇠를 평가한 후¹²⁾, 각 절점에 대응하는 외각요소의 침수표면적에 비례 배분한 것이다.

2.2.2 부가질량행렬 및 조파감쇠행렬

배의 기준좌표계의 원점을 운동기준점으로 한 6 자유도의 강체모드의 방사포텐셜 ϕ_k ($k = 1 \sim 6$)가 구해지면 외각요소 l 의 절점 (x_0^l, y_0^l, z_0^l) 을 운동기준점으로 한 6자유도의 강체모드의 방사포텐셜 ϕ_k^l 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \phi_1^l &= \phi_1, \quad \phi_2^l = \phi_2, \quad \phi_3^l = \phi_3 \\ \phi_4^l &= \phi_4 - y_0^l \phi_3 + z_0^l \phi_2 \\ \phi_5^l &= \phi_5 + x_0^l \phi_3 - z_0^l \phi_1 \\ \phi_6^l &= \phi_6 - x_0^l \phi_2 + y_0^l \phi_1, \quad (l = 1 \sim N) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, N 은 외각요소의 총 개수이다.

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

$$\{F_N^{Rl}\} = - [\nu_{jk}^l] \{\dot{\eta}^l\}, \quad (j, k=1 \sim 6) \quad (5)$$

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

$$[\mu_{jk}^l] = \left[\frac{1}{\omega^2} \text{Re}\{T_{jk}^l\} \right]$$

$$= \left[-\frac{\rho}{\omega} \text{Re} \int \int_{S_H^l} n_j^l (\omega - iU \frac{\partial}{\partial x}) \phi_k^l ds \right] \quad (7)$$

$$[\nu_{jk}^l] = \left[\frac{1}{\omega} \text{Im}\{T_{jk}^l\} \right]$$

$$= \left[-\rho \text{Im} \int \int_{S_H^l} n_j^l (\omega - iU \frac{\partial}{\partial x}) \phi_k^l ds \right] \quad (8)$$

이고, μ_{jk}^l 과 ν_{jk}^l 은 각각 외각요소 l 에 대하여 k 방향의 운동에 의한 j 방향에의 부가질량 및 감쇠 계수이고, S_H^l 는 외각요소 l 의 침수표면적이다.

$[\mu_{jk}^l]$, $[\nu_{jk}^l]$ 는 기준좌표계에 대한 외각요소 l 의 부가질량행렬, 조파감쇠행렬이다. 식 (7), 식 (8)에서,

$$\begin{aligned} T_{jk}^l &= -\rho \omega \int \int_{S_H^l} n_j^l (\omega - iU \frac{\partial}{\partial x}) \phi_k^l ds \\ &= -\rho \omega \int \int_{S_H^l} n_j^l (\omega - iU \frac{\partial}{\partial x}) \\ &\quad \left[\phi_k^{0l} + i \frac{U}{\omega} \phi_k^{U1} \right] ds \\ &= -\rho \omega \int \int_{S_H^l} n_j^l \left\{ \omega \phi_k^{0l} + U \left(-i \frac{\partial \phi_k^{0l}}{\partial x} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + i \phi_k^{U1} \right) + U^2 \left(\frac{1}{\omega} \frac{\partial \phi_k^{U1}}{\partial x} \right) \right\} ds \\ &= -\rho \omega^2 \int \int_{S_H^l} n_j^l \phi_k^{0l} ds \\ &\quad + i \rho \omega U \int \int_{S_H^l} n_j^l \left(\frac{\partial \phi_k^{0l}}{\partial x} - \phi_k^{U1} \right) ds \\ &\quad - \rho U^2 \int \int_{S_H^l} n_j^l \frac{\partial \phi_k^{U1}}{\partial x} ds \\ &= T_{jk}^{0l} + U T_{jk}^{U1} + U^2 T_{jk}^{U2l} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서,

$$T_{jk}^{0l} = -\rho \omega^2 \int \int_{S_H^l} n_j^l \phi_k^{0l} ds$$

$$T_{jk}^{U1} = i \rho \omega \int \int_{S_H^l} n_j^l \frac{\partial \phi_k^{0l}}{\partial x} ds$$

$$-i\omega \int \int_{S_0^l} n_j^l \phi_k^{U^l} ds$$

$$T_{jk}^{U2l} = -\rho \int \int_{S_0^l} n_j^l \frac{\partial \phi_k^{U^l}}{\partial x} ds \quad (10)$$

또한, $n_j^l (j = 1 \sim 6)$ 은 일반화 방향여현이며, 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} n_1^l &= n_x, & n_2^l &= n_y, & n_3^l &= n_z \\ n_4^l &= (y^l - y_0^l) n_x - (z^l - z_0^l) n_y \\ n_5^l &= (z^l - z_0^l) n_x - (x^l - x_0^l) n_z \\ n_6^l &= (x^l - x_0^l) n_y - (y^l - y_0^l) n_x \end{aligned} \quad (11)$$

2.2.3 복원력행렬

임의의 외각요소 l 의 절점 (x_0^l, y_0^l, z_0^l) 에서의 정적 유체압력과 중력에 기인하는 복원력에 대한 외각요소 l 의 복원력행렬은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$[K_P^l] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{33} & K_{34} & K_{35} & 0 \\ 0 & 0 & K_{43} & K_{44} & K_{45} & K_{46} \\ 0 & 0 & K_{53} & K_{54} & K_{55} & K_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서,

$$\begin{aligned} K_{33} &= \rho g S_0^l \\ K_{34} &= \rho g \int \int_{S_0^l} (y^l - y_0^l) dA \\ K_{35} &= -\rho g \int \int_{S_0^l} (x^l - x_0^l) dA \\ K_{44} &= \rho g \int \int_{S_0^l} (y^l - y_0^l)^2 dA \\ &\quad + \rho g V_0^l (z_b^l - z_0^l) - m^l g (z_g^l - z_0^l) \\ K_{45} &= -\rho g \int \int_{S_0^l} (x^l - x_0^l) (y^l - y_0^l) dA \\ K_{46} &= -\rho g V_0^l (x_b^l - x_0^l) + m^l g (x_g^l - x_0^l) \\ K_{43} &= K_{34}, \quad K_{53} = K_{35}, \quad K_{54} = K_{45} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_{55} &= \rho g \int \int_{S_0^l} (x^l - x_0^l)^2 dA \\ &\quad + \rho g V_0^l (z_b^l - z_0^l) - m^l g (z_g^l - z_0^l) \\ K_{56} &= -\rho g V_0^l (y_b^l - y_0^l) + m^l g (y_g^l - y_0^l) \end{aligned}$$

여기서, m^l 및 V_0^l 은 외각요소 l 의 질량 및 배수용적, (x_g^l, y_g^l, z_g^l) 은 외각요소의 l 의 무게 중심, (x_b^l, y_b^l, z_b^l) 은 외각요소 l 의 부심, $S_0^l = \int \int_{S_0^l} dA$ 는 외각요소 l 의 수선면적이다.

2.2.4 강성행렬 및 질량행렬

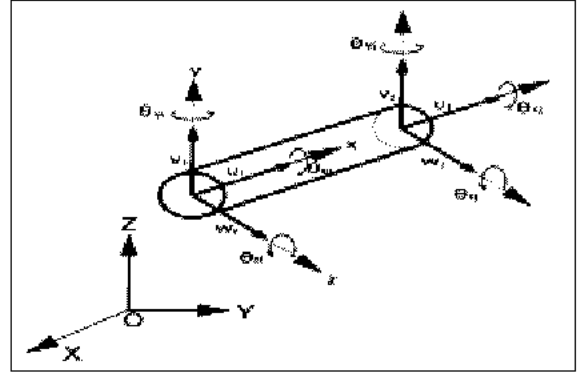


Fig. 2 Local coordinate and Beam element

Fig. 2와 같은 절점 i 와 j 사이의 요소에 대한 국소좌표계 (x, y, z) 및 그 자유도 $\{u_i, v_i, w_i, \theta_{xi}, \theta_{yi}, \theta_{zi}, u_j, v_j, w_j, \theta_{xj}, \theta_{yj}, \theta_{zj}\}$ 를 갖는 보의 요소 강성행렬 및 요소 질량행렬은 전단변형 및 회전관성을 각각 고려하면 다음과 같다

• 요소 강성행렬

$$[K_S]^e = \begin{bmatrix} [K_{11}] & [K_{12}] \\ [K_{21}] & [K_{22}] \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서,

$$[K_{11}] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_x}{(1+\phi_x)l^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_x}{(1+\phi_x)l^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{(1+\phi_y)l^3} & 0 & \frac{-6EI_y}{(1+\phi_y)l^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GI_z}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-6EI_x}{(1+\phi_x)l^2} & 0 & \frac{(4+\phi_x)EI_x}{(1+\phi_x)l} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_x}{(1+\phi_x)l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{(4+\phi_x)EI_x}{(1+\phi_x)l} \end{bmatrix}$$

$$[K_{12}] - \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_y}{(1+\phi_y)l^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{(1+\phi_y)l^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_z}{(1+\phi_z)l^3} & 0 & \frac{6EI_z}{(1+\phi_z)l^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GI}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{6EI_y}{(1+\phi_y)l^2} & 0 & \frac{(2-\phi_y)EI_y}{(1+\phi_y)l} & 0 \\ 0 & \frac{EI_y}{(1+\phi_y)l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{(2-\phi_y)EI_y}{(1+\phi_y)l} \end{bmatrix}$$

$$[K_{21}] - \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_y}{(1+\phi_y)l^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{(1+\phi_y)l^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_z}{(1+\phi_z)l^3} & 0 & \frac{6EI_z}{(1+\phi_z)l^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GI}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{6EI_y}{(1+\phi_y)l^2} & 0 & \frac{(2-\phi_y)EI_y}{(1+\phi_y)l} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_y}{(1+\phi_y)l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{(2-\phi_y)EI_y}{(1+\phi_y)l} \end{bmatrix}$$

$$[K_{22}] - \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_y}{(1+\phi_y)l^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{-6EI_y}{(1+\phi_y)l^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_z}{(1+\phi_z)l^3} & 0 & \frac{6EI_z}{(1+\phi_z)l^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GI}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{6EI_y}{(1+\phi_y)l^2} & 0 & \frac{(4+\phi_y)EI_y}{(1+\phi_y)l} & 0 \\ 0 & \frac{-6EI_y}{(1+\phi_y)l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{(4+\phi_y)EI_y}{(1+\phi_y)l} \end{bmatrix}$$

• 요소 질량행렬

$$[M_S]^e = \rho A l \begin{bmatrix} [M_{11}] & [M_{12}] \\ [M_{21}] & [M_{22}] \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기서,

$$[M_{11}] - \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{13}{35} + \frac{6I_y}{5.4A l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{11l}{210} + \frac{I_y}{10.4Al} \\ 0 & 0 & \frac{13}{35} + \frac{6I_z}{5.4A l^2} & 0 & \frac{11l}{210} & \frac{I_z}{10.4Al} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{J}{3.4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{11l}{210} & \frac{I_y}{10.4Al} & 0 & \frac{\rho}{105} + \frac{2I_y}{15.4} \\ 0 & \frac{11l}{210} + \frac{I_y}{10.4Al} & 0 & 0 & 0 & \frac{\rho}{105} + \frac{2I_y}{15.4} \end{bmatrix}$$

$$[M_{12}] - \begin{bmatrix} \frac{1}{6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{9}{70} - \frac{6I_y}{5.4A l^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{13l}{420} + \frac{I_y}{10.4Al} \\ 0 & 0 & \frac{9}{70} - \frac{6I_z}{5.4A l^2} & 0 & \frac{13l}{420} - \frac{I_z}{10.4Al} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{J}{6.4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{13l}{420} - \frac{I_y}{10.4Al} & 0 & -\frac{\rho}{140} + \frac{I_y}{30.4} & 0 \\ 0 & \frac{13l}{420} - \frac{I_y}{10.4Al} & 0 & 0 & 0 & -\frac{\rho}{140} - \frac{I_y}{30.4} \end{bmatrix}$$

$$[M_{21}] - \begin{bmatrix} \frac{1}{6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{9}{70} - \frac{6I_y}{5.4A l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{13l}{420} - \frac{I_y}{10.4Al} \\ 0 & 0 & \frac{9}{70} - \frac{6I_z}{5.4A l^2} & 0 & -\frac{13l}{420} - \frac{I_z}{10.4Al} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{J}{6.4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{13l}{420} - \frac{I_y}{10.4Al} & 0 & -\frac{\rho}{140} + \frac{I_y}{30.4} & 0 \\ 0 & -\frac{13l}{420} + \frac{I_y}{10.4Al} & 0 & 0 & 0 & -\frac{\rho}{140} - \frac{I_y}{30.4} \end{bmatrix}$$

$$[M_{22}] - \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{13}{35} + \frac{6I_y}{5.4A l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{11l}{210} + \frac{I_y}{10.4Al} \\ 0 & 0 & \frac{13}{35} + \frac{6I_z}{5.4A l^2} & 0 & \frac{11l}{210} + \frac{I_z}{10.4Al} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{J}{3.4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{11l}{210} + \frac{I_y}{10.4Al} & 0 & \frac{\rho}{105} + \frac{2I_y}{15.4} & 0 \\ 0 & \frac{11l}{210} + \frac{I_y}{10.4Al} & 0 & 0 & 0 & \frac{\rho}{105} + \frac{2I_y}{15.4} \end{bmatrix}$$

식 (13)과 식 (14)에서, E , G 는 각각 보요소의 종탄성계수, 전단탄성계수이고, l 은 보요소의 길이이다. 또, I_y 와 I_z 는 각각 y 축 및 z 축에 관한 단면 2차 모멘트이고, J 는 비틀림 계수이다.

A 및 ρ 는 각각 보요소의 단면적 및 밀도이고, ϕ_y 와 ϕ_z 는 각각 다음과 같다.

$$\phi_y = \frac{12EI_z}{GA_{sz}l^2} \quad (15)$$

$$\phi_z = \frac{12EI_y}{GA_{sy}l^2} \quad (16)$$

여기서, A_{sy} 와 A_{sz} 는 각각 y , z 방향의 전단력이 작용할 때의 유효단면적이다.

2.2.5 파강제력 벡터

외각요소 l 의 입사와 속도포텐셜 ϕ_I^l 은 다음과 같다.

$$\phi_I^l = \phi_I \quad (17)$$

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

$$\begin{aligned} \{F_j^{I'l}\} &= \left\{ -\rho \int \int_{S_H^l} (i\omega + U \frac{\partial}{\partial x}) \phi_I^l n_j^l ds \right\} \\ &= -i\rho\omega_0 \int \int_{S_H^l} \phi_I^l n_j^l ds. \quad (j=1\sim 6) \quad (18) \end{aligned}$$

산란포텐셜 ϕ_D 는 경계치 문제(산란 문제)의 해로서 구해진다. 산란포텐셜 ϕ_D 가 구해지면 외각요소 l 의 산란포텐셜 ϕ_D^l 는 다음과 같다.

$$\phi_D^l = \phi_D \quad (19)$$

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

$$\begin{aligned} \{F_j^{Dl}\} &= \left\{ -\rho \int \int_{S_H^l} n_j^l \left(i\omega + U \frac{\partial}{\partial x} \right) \phi_D^l ds \right\} \\ &= \left\{ -i\rho\omega \int \int_{S_H^l} n_j^l \phi_D^l ds \right. \\ &\quad \left. - \rho U \int \int_{S_H^l} n_j^l \frac{\partial \phi_D^l}{\partial x} ds \right\}, \quad (j=1\sim 6) \quad (20) \end{aligned}$$

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

$$\{F_j^M\} = \{F_j^I\} + \{F_j^{Dl}\}, \quad (j=1\sim 6) \quad (21)$$

2.3 변동압력

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

$$\begin{aligned} p^l &= \left[i\rho\omega_0 \phi_I^l + i\rho\omega \left\{ \phi_D^l + \sum_{k=1}^6 -i\omega \eta_k^l \phi_k^l \right\} \right] \\ &+ \rho U \left\{ \frac{\partial \phi_D^l}{\partial x} + \sum_{k=1}^6 -i\omega \eta_k^l \frac{\partial \phi_k^l}{\partial x} \right\} \quad (22) \\ &- \rho g \left\{ \eta_3^l + (y^l - y_0^l) \eta_4^l - (x^l - x_0^l) \eta_5^l \right\} e^{-i\omega t} \end{aligned}$$

여기서, $\phi_I^l, \phi_D^l, \phi_k^l$ 은 각각 침수표면상의 임의의 점 (x^l, y^l, z^l) 에서의 입사, 산란, 방사 포텐셜이다. (x_0^l, y_0^l, z_0^l) 은 외각요소 l 의 절점 좌표이고, η_k^l 은 그 절점 변위이다.

3. 수치계산 결과 및 고찰

3.1 Masuda의 실험모델

Masuda의 모형실험은 일본대학의 평면수조(길이:20m × 폭:7m × 수심:1.2m)에서 행하였다. 실험모델은 Fig. 3과 같이 steel로 탄성보를 만들었고 아크릴로 외각요소인 8개의 부분모형을 만들어 탄성보와 외각요소를 결합한 탄성보 모델을 사용했다. 이 모델은 탄성거동을 steel의 탄성보로 재현하고, 유체력을 외각요소가 받는 형식으로 모델링한 것이다. steel의 탄성계수는 2.1×10^6 kgf/cm²이며, 모델의 강성은 2절 진동의 고유주기가 모형에서 0.8초의 전후가 되도록 결정했다. 그 주요목은 Table 1과 같다.

Table 1 Principle dimension of the steel
(unit : mm)

BREADTH	73
HEIGHT	4
LENGTH	2240

실험방법은 입사파로 파도수파를 사용하고 운동계

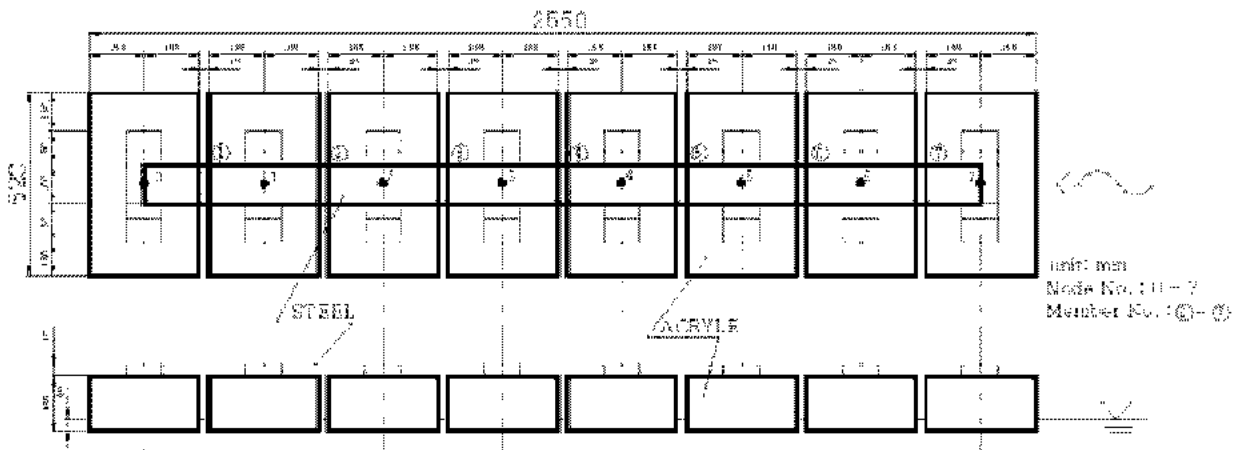


Fig. 3 Sketch of a barge type floating body and the beam elements for the upper structure

측장치에 의해 상하방향의 변위를 측정했다. 스트레인 게이지를 외각요소와 강과의 각 결합점의 중앙에 접착하여 2게이지법에 의해 굽힘 스트레인을 측정해서, 굽힘모멘트로 환산했다. 또한, 과도수파의 파고는 3.5cm로 하였다. 본 계산에서 모델의 침수부에 대한 요소 분할수는 416개로 하였다.

또한, 본 계산법의 타당성을 검증하기 위해 Masuda의 실험치와 Ikoma의 계산치를 본 방법의 계산치와 서로 비교하였다. Ikoma는 Yamashida¹³⁾의 압력분포법을 사용하여 천흡수부체에 작용하는 유체력을 산정하고, 이것을 이용해서 탄성응답을 구하였다. 그때, 탄성모드의 방사 유체력도 고려하였다. 또한, 계산시의 수심은 무한수심으로 하였다.

3.1.1 수직 변위 응답

Fig. 4 ~Fig. 6은 각각 절점 0, 3, 7에서의 수직 변위 응답(cm/cm)을 나타내고 있다. 가로축은 L/λ (L 은 248cm, λ 는 무한 수심의 파장)로 표시하고 있다. 실험모델의 상하 2절 진동 고유 주파수가 $L/\lambda = 2.69$ 이다. 본 탄성응답 해석법에 의한 계산 결과가 Ikoma의 계산치보다 더 실험치에 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 본 계산치가 절점 0에서 2절 진동의 피크치를 잘 추정하고 있음을 알 수 있다. 파상측인 절점 7에서는 본 계산치와 Ikoma의 계산치는 비슷한 값을 나타내고 있지만, 둘다 실험치에 비해서 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 양단 자유보에서 Yago¹⁴⁾의 파상측의 실험치는 모델 중간에서의 실험치보다 항상 크게 나타나고 있음에 반해, Masuda의 실험치는 파상측과 모델 중간에서의 값이 거의 유사하고 저주파수 영역에서는 파하측의 값이 파상측보다 더 크게 나타나고 있다. 이것도 Yago의 경향과 배치되는 결과로 보아, Masuda의 파상측의 실험치가 실제보다 작게 측정된 것으로 판단된다.

3.1.2 수직 굽힘모멘트 응답

Fig. 7~Fig. 9는 각각 보요소 1, 4, 7에서의 수직 굽힘모멘트 응답을 나타내고 있다. 여기서 ρ 는 물의 밀도, g 는 중력가속도, ζ_a 는 입사파의 진폭, B 는 모형의 폭으로 52cm이다. 세로축은 실제값을 1000 배하여 표시한 것이다. 굽힘모멘트 응답에서도 변위 응답과 마찬가지로 전반적으로 본 탄성해석법에 의한 계산결과가 Ikoma에 의한 계산치보다 실험치와

더욱 잘 일치함을 알 수 있다. 실험모델은 상하 2절 진동이 현저하게 나타나도록 설계된 것임에도 불구하고 탄성모드에 의한 유체력도 고려하고 있는 Ikoma의 계산결과가 본 계산결과보다 나쁘게 나타나는 이유로 흡수의 영향을 들 수 있는 것으로 생각된다. 본 계산법은 흡수의 영향을 고려하고 있지만 Ikoma는 천흡수 이론을 사용하고 있으므로 흡수를 0으로 간주해 흡수의 영향을 고려할 수 없기 때문이다. 따라서, 흡수의 영향이 큰 드릴쉽의 탄성응답을 생각하면 본 탄성응답 해석법의 유효성을 보여주고 있는 것으로 사료된다.

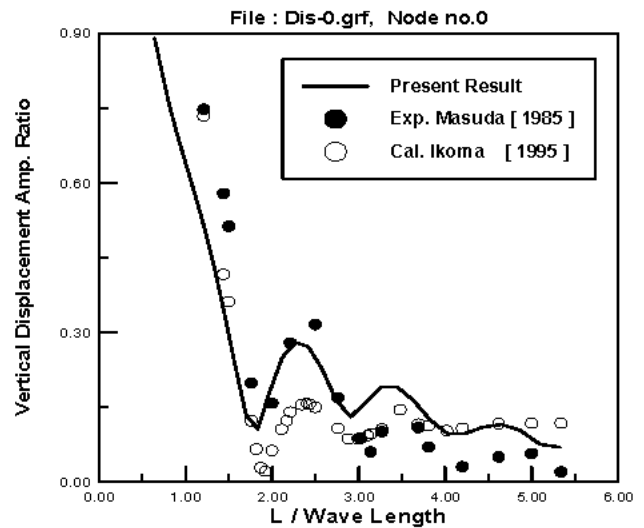


Fig. 4 Vertical Displacement at Node 0

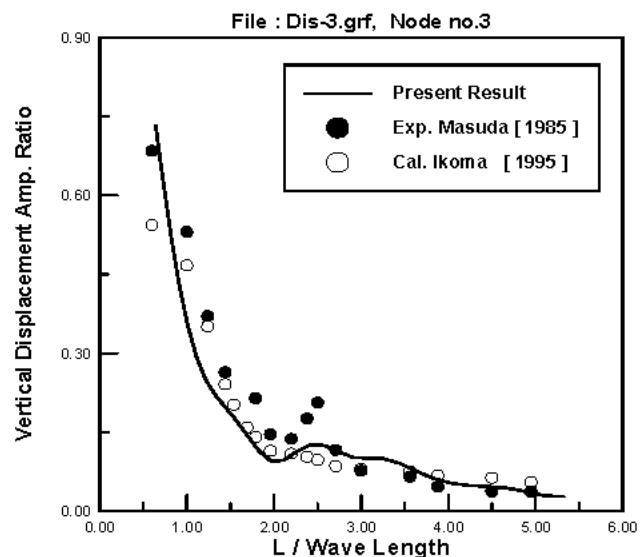


Fig. 5 Vertical Displacement at Node 3

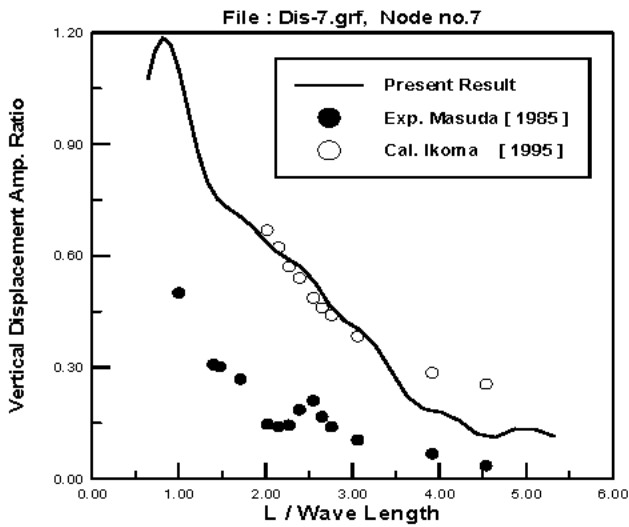


Fig. 6 Vertical Displacement at Node 7

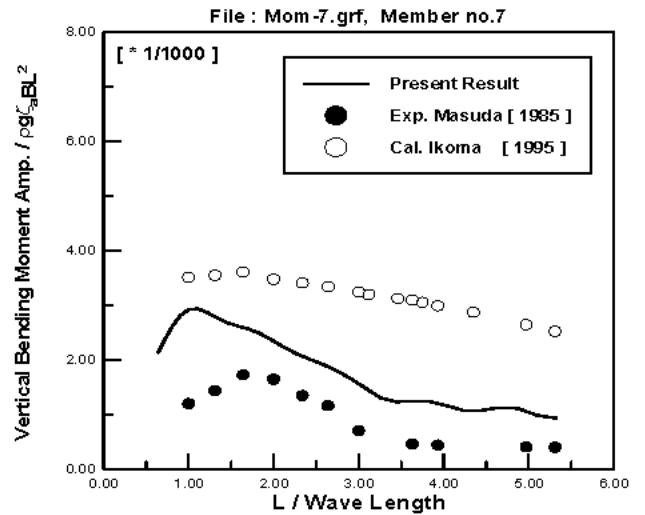


Fig.9 Vertical Bending Moment of Member 7

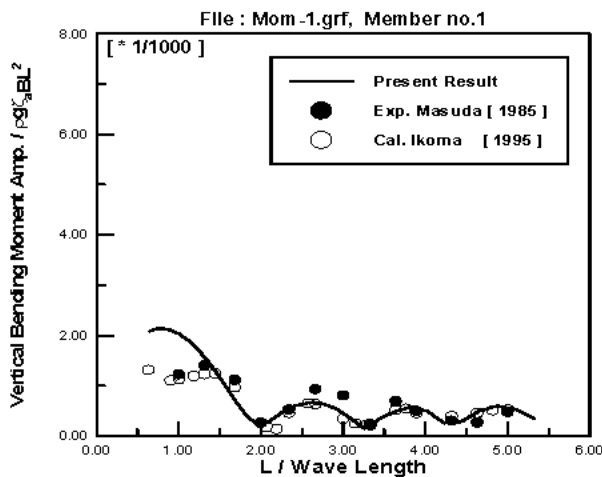


Fig. 7 Vertical Bending Moment of Member 1

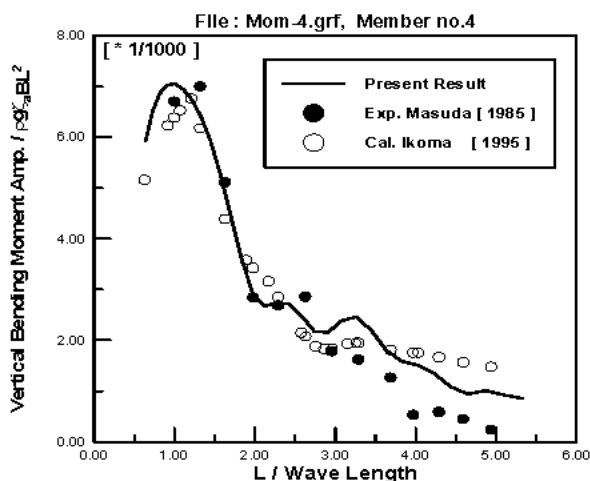


Fig. 8 Vertical Bending Moment of Member 4

4. 결 론

본 연구에서 취급한 계산모델 및 계산조건 하에서 얻어진 주요한 결론은 다음과 같다.

(1) 파랑 중 유탄성응답이 현저한 선박을 대상으로 하여 탄성응답을 실용적으로 정도 좋게 추정할 수 있는 범용 해석기법을 개발하였다.

(2) Masuda의 바이지식 부유구조물에 대한 실험치 및 Ikoma의 계산치와 본 탄성응답 해석법에 의한 계산치를 서로 비교·검토한 결과 본 계산기법의 타당성이 검증되었다.

(3) 본 연구에서 개발된 프로그램은 선체 침수 표면에서의 변동압력도 구해지므로 전선 해석에 의해 경제적이고 합리적인 선박 설계에 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

(4) 본 탄성응답 해석법은 선박의 정확한 탄성응답을 예측할 수 있어 구조 설계시 피로 강도 설계의 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2000년도 부경대학교 연구년 교수지원 사업에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. 신구균, 김사수, 손성환, 1992, "선박의 비선형 유체력을 고려한 파랑중 동적 강도 해석법에 관한 연구", 대한조선학회 논문집 제29권, 제4호, pp. 152~172.
2. 조대성, 김사수, 1998, "선체 저차 상하 고유진동 감도해석", 대한조선학회 논문집 제35권, 제3호, pp. 54~61.
3. 정기태, 김영복, 강호승, 노종현, 1992, "접수구조물 진동의 유력탄성해석", 대한조선학회 논문집 제29권, 제1호, pp. 135~142..
4. K. T. Chung, 1987, "On the Vibration of the Floating Elastic Body Using Boundary Integral Method in Combination with Finite Element Method ", SNAK, Vol 24, No 4, pp. 19~36.
5. Du, S. X. and Wu, Y. S, 1998, "The effect of Forward Speed on Hydroelastic Behaviors of Ship Structures", Practical Design of Ships and Mobile Units, pp. 597~603.
6. Chan, H. S, 1993, "Prediction of Motion and Wave Loads of Twin-hull Ships", Marine Structures, Vol 6, pp. 75~102.
7. Masuda, K., Maeda, H., Kato, W. and Usui, M, 1985, "Study on the Hydroelastic Behavior of Large Scale Barge type Floating Structures in Head Waves", Jour. of the soc. of naval Architects of Japan, Vol 158, pp. 506~516.
8. Ikoma, T., Masuda, K. and Maeda, H, 1995, "Hydroelastic Responses of Very Large and Shallow Draft Floating Structures" 13th Ocean Engineering Symposium, pp. 185~192.
9. Catley, D. and Norris, C, 1976, "Theoretical prediction of the vertical dynamic response of ship structures using finite elements and correlaton with ship mobility measurements" proc. 11th Symp. Naval Hydrodynamics.
10. Skaar, K. T. and Oma, S, "Damping in Ship vibration" Det Norske Veritas Research Division.
11. Kuroiwa, T, 1986, "A Study on Structural Response of Ship in Large Amplitude Waves", Tokyo Univ. PhD Thesis.
12. Ikeda, Y, 1984, "Roll Damping of Ships", 1st Marine Dynamics Symposium, pp. 241~250.
13. 山下誠也, 1979, "淺吃箱形浮体の波浪中動揺と變動壓力-壓力分布を用いる計算と實驗との比較-",日本造船學會論文集, 第146號, pp.164~172.
14. Yago, K. and Endo, H, 1996, "On the Hydroelastic Response of Box-Shaped Floating Structure with Shallow Draft", Jour. of the soc. of naval Architects of Japan, Vol 180, pp. 341~352.