

## 규칙파중의 바지형 선박의 유탄성응답해석

이승철\* · 구자삼\*\* · 하영록\*\* · 도덕희\*\*\*

\*한국해양대학교 조선해양시스템공학과 국가지정연구소실

\*\*부경대학교 조선해양시스템공학과

\*\*\*한국해양대학교 기계·정보공학부

## A Hydroelastic Response Analysis of Barge Type Ships in Regular Waves

Seung-Chul Lee\*, Ja-Sam Goo\*\*, Young-Rok Ha\*\* and Daeog-Hee Doh\*\*\*

\*National Research Laboratory, Dept. Naval Architecture and Ocean System Engineering, Korea Maritime Univ, Busan, Korea

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

\*\*\*Divison of Mechanical and Information Engineering, Korea Maritime Univ., Busan, Korea

**KEY WORDS:** Hydroelastic response 탄성응답, Fluid-structure interaction 유체구조상호간섭, Three-dimensional source distribution method 3차원 특이점 분포법, Finite element method 유한요소법

**ABSTRACT:** When a large ship is advancing in waves, it undergoes hydroelastic response, which affects the structural stability and the fatigue destruction of the ship. Therefore, to predict an accurate hydroelastic response, it is necessary to conduct a thorough analysis of hydroelastic response, including fluid-structure interactions. In this research, the ship is divided into many hull elements, to calculate the fluid forces and wave exciting forces on each element. Using the three-dimensional source distribution method, the calculated fluid forces and wave exciting forces are assigned to nodes of the hull elements. The neighbor nodes are connected with elastic beam elements. We analyzed hydroelastic responses, using the finite elements method.

### 1. 서 론

선박이 파랑 중을 항해할 때, 선박은 탄성응답을 유발하게 되고, 이는 선박의 구조적 안정성과 피로파괴 등에 큰 영향을 미치고 있다. 정확한 탄성응답을 추정하기 위해서는 종래의 파랑 하중을 산정한 다음, 구조해석을 수행하는 2단계적인 방법보다는 유체-구조 상호간섭을 고려하여 일괄적으로 해석할 수 있는 기법개발이 긴요한 실정이다.

통상의 선박에 대한 유탄성 응답에 관해서 스트립이론(신구균 등, 1992; 조대성과 김사수, 1998; 조일영 등, 2005) 및 경계요소법(정기태 등, 1992; Chung, 1987)을 적용한 연구결과가 발표된 바가 있다. 최근 선속의 영향을 합리적으로 도입하기 위해 전진 속도가 있는 경우의 3차원 특이점분포법을 전침수 타원체 및 반침수 타원체에 적용하여 유탄성응답을 구하는 방법이 발표되었으며(Du and Wu, 1998), 고주파수 가정을 도입한 3차원 특이점 분포법에 의한 연구(Chan, 1993), 선속을 가지는 선박을 분할모델로 한 실험(Fonseca and Guedes Soares, 2004a; 2004b; 정병훈과 송기중, 2004) 및 연구(이호영 등, 2003) 등이 행해지고 있다.

파랑 중 항행하는 선박을 대상으로 하여 탄성응답을 정도 좋게 추정하기 위해, 선박을 탄성부유체로 다루어야 하고, 탄성체가 파랑 중 동적거동을 할 때에는 유체-구조 상호간섭을 고려하여 운동과 구조응답을 동시에 구할 필요가 있다. 본 연구에서 유체력 평가는 고주파수 가정을 도입한 3차원 특이점분포법을

적용하고, 선체를 다수의 외각요소로 분할하여 각 요소에 대한 유체력 및 파장제력을 산정한다. 그리고, 각 외각요소의 중앙점을 절점으로 하고 이들 절점을 탄성보 요소로 연결하여 유한요소법에 의해 정식화함으로써 동적구조응답을 추정한다. 그리고, 본 탄성응답 해석법을 검증하기 위해 선속이 없는 Masuda의 길이 2.55m × 폭 0.52m × 흘수 0.05m인 모델의 실험치(Masuda et al., 1985) 및 그 계산치(Ikoma et al., 1995)와 본 계산결과를 비교·검토하여, 본 계산기법의 타당성을 확인한다.

### 2. 탄성응답해석

#### 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) 상부구조는 3차원 골조 선형 탄성구조로 한다.
- (4) 각각의 평형위치에 대해 응답은 미소진폭의 조화진동으로 한다.

위의 가정에도 불구하고, Roll 점성감쇠력은 외력으로 고려한다. 전체구조를 Fig. 1과 같이 요소로 분할하고, 각 요소는 그

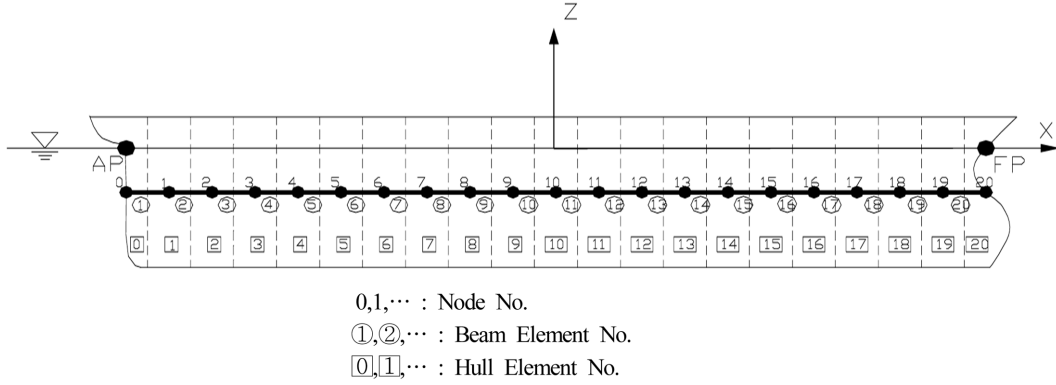


Fig. 1 Element discretization of a ship

역할에 따라 (1) 형상, 크기, 질량을 가지고, 외력을 받으며 강체로서 거동하는 외각요소(Hull element)와 (2) 탄성체로서 외각요소의 절점을 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 구조전체에 대한 다음과 같은 운동 방정식을 얻을 수 있다.

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

여기서,

- $[M_S]$  : 전체 질량행렬
- $[\mu]$  : 유체에 의한 전체 부가질량행렬
- $[C_S]$  : 전체 구조감쇠행렬
- $[v]$  : 전체 조파감쇠행렬
- $[v^V]$  : 전체 Roll 점성감쇠행렬
- $[K_S]$  : 전체 강성행렬
- $[K_P]$  : 정수압에 의한 전체 복원력행렬
- $\{F^{V}\}$  : 파장제력 벡터
- $\{\eta\}$  : 구조전체의 절점 변위 벡터

식 (1)의 연립방정식을 푸는 것에 의해, 절점 변위 벡터  $\{\eta\}$ 가 구해진다.

2.2.1 구조감쇠행렬 및 점성감쇠행렬

전체 구조감쇠행렬은 다음과 같이 Rayleigh 감쇠를 이용하기로 한다.

$$[C_S] = a[M_S] + b[K_S] \tag{2}$$

여기서,  $a, b$ 는 비례상수이다. 보통  $a=0$ 이고,  $b$ 에 대해서는

Catley(1976) 등은  $b=0.0014$ 를 제안하고 있다. 또한, 선체 2절진동의 대수감쇠율  $\delta$ 와 그 고유진동수  $\omega_2$ 가 추정되는 경우에는 다음 식으로 구하기도 한다(Kuroiwa, 1986).

$$b = \frac{\delta}{\pi \omega_2} \tag{3}$$

전체 점성감쇠행렬은 대각행렬이며, 대각요소는 각 절점의 횡동요에 대응하는 자유도에만 값을 갖고, 그 이외의 자유도에 대응하는 요소는 0이다. 각 절점의 횡동요 점성감쇠는 선체 중앙단면의 횡동요값을 이용하여 선체를 강체로 간주한 총 점성감쇠를 평가한 후(Ikeda, 1984), 각 절점에 대응하는 외각요소의 침수표면적에 비례 배분한 것이다.

2.2.2 부가질량행렬 및 조파감쇠행렬

개별의 6자유도 강제운동을 하는 외각요소들로 구성된 구조물에 대하여 각 외각요소  $l(l=1, 2, \dots, N)$ 의 절점  $(x_0^l, y_0^l, z_0^l)$ 를 운동기준점으로 한 외각요소 각각의 6자유도 운동을 고려하면,  $N$ 개의 외각요소로 구성된 구조물의 방사포텐셜  $\phi_k(k=1\sim 6)$ 를 구하기 위한 경계치 문제는 다음과 같다.

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

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

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

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

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial n} = n_k^l + i \frac{U}{\omega} m_k^l (l=1, 2, \dots, N) \quad \text{on } S_H \tag{7}$$

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

여기서, 식 (5)는 선체의 운동(조우)주파수  $\omega$ 를 고주파수로 가

정한 자유표면경계조건이고, 식 (7)의  $n_k^l$ 는 각 축에 평행한 단위 속도운동에 의한 외각요소  $l$ 의 표면에서의 운동 속도의 법선방향 성분( $k=1\sim 3$ ) 및 외각요소  $l$ 의 절점( $x_0^l, y_0^l, z_0^l$ )에 대한 각 축 둘레의 단위각속도 운동에 의한 외각요소 표면에서의 운동속도의 법선방향 성분( $k=4\sim 6$ )으로 다음과 같다.

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

$m_k^l$ 은 다음의 관계를 만족한다.

$$\begin{aligned} m_k^l &= 0 \quad (k=1\sim 4) \\ m_5^l &= n_3^l, \quad m_6^l = -n_2^l \end{aligned}$$

위의 경계치문제(방사문제)를 풀어서  $\phi_k$ 가 구해지면, 외각요소  $l$ 의 방사포텐셜  $\phi_k^l$ 은 다음과 같다.

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

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

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

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

$$[\mu_{jk}^l] = \left[ -\frac{\rho}{\omega} Re \int \int_{S_H^l} n_j^l (\omega - iU \frac{\partial}{\partial x}) \phi_k^l ds \right] \quad (13)$$

$$[\nu_{jk}^l] = \left[ -\rho Im \int \int_{S_H^l} n_j^l (\omega - iU \frac{\partial}{\partial x}) \phi_k^l ds \right] \quad (14)$$

이고,  $\mu_{jk}^l$ 과  $\nu_{jk}^l$ 은 각각 외각요소  $l$ 에 대하여  $k$ 방향의 운동에 의한  $j$ 방향에의 부가질량 및 감쇠계수이고,  $S_H^l$ 는 외각요소  $l$ 의 침수표면적이다.  $[\mu_{jk}^l], [\nu_{jk}^l]$ 는 기준좌표계에 대한 외각요소  $l$ 의 부가질량행렬, 조파감쇠행렬이다.

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.

$$[K_P^l] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{33} & K_{34} & K_{35} & 0 \\ 0 & 0 & K_{43} & K_{44} & K_{45} & K_{46} \\ 0 & 0 & K_{53} & K_{54} & K_{55} & K_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

여기서,

$$K_{33} = \rho g S_0^l, \quad K_{34} = \rho g \int \int_{S_0^l} (y^l - y_0^l) dA$$

$$K_{35} = -\rho g \int \int_{S_0^l} (x^l - x_0^l) dA$$

$$K_{44} = \rho g \int \int_{S_0^l} (y^l - y_0^l)^2 dA + \rho g V_0^l (z_b^l - z_0^l) - m^l g (z_g^l - z_0^l)$$

$$K_{45} = -\rho g \int \int_{S_0^l} (x^l - x_0^l) (y^l - y_0^l) dA$$

$$K_{46} = -\rho g V_0^l (x_b^l - x_0^l) + m^l g (x_g^l - x_0^l)$$

$$K_{43} = K_{34}, \quad K_{53} = K_{35}, \quad K_{54} = K_{45}$$

$$K_{55} = \rho g \int \int_{S_0^l} (x^l - x_0^l)^2 dA + \rho g V_0^l (z_b^l - z_0^l) - m^l g (z_g^l - z_0^l)$$

$$K_{56} = -\rho g V_0^l (y_b^l - y_0^l) + m^l g (y_g^l - y_0^l)$$

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 무게중심,  $(x_b^l, y_b^l, z_b^l)$   $(x_0^l, y_0^l, z_0^l)$ 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. 2와 같은 절점  $i$ 와  $j$  사이의 요소에 대한 국소좌표계( $x, y, z$ ) 및 그 자유도( $u_i, v_i, w_i, \theta_x, \theta_y, \theta_z, u_j, v_j, w_j, \theta_x, \theta_y, \theta_z$ )를 갖는 보의 요소 강성행렬 및 요소 질량행렬은 전단변형 및 회전 관성을 각각 고려하면 다음과 같다.

• 요소 강성행렬

$$[K_S]^e = \begin{bmatrix} [K_{11}] & [K_{12}] \\ [K_{21}] & [K_{22}] \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서,

$$[K_{11}] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_x}{(1+\Phi_x)F} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_x}{(1+\Phi_x)F} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{(1+\Phi_y)F} & 0 & \frac{-6EI_y}{(1+\Phi_y)F} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-6EI_y}{(1+\Phi_y)F} & 0 & \frac{(4+\Phi_x)EI_x}{(1+\Phi_x)l} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_x}{(1+\Phi_x)F} & 0 & 0 & 0 & \frac{(4+\Phi_y)EI_y}{(1+\Phi_y)l} \end{bmatrix}$$

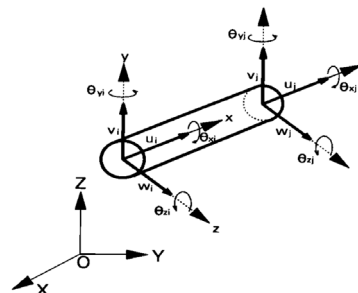


Fig. 2 Local coordinate and Beam element

$$[K_{12}] = \begin{bmatrix} \frac{-EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-12EI_z}{(1+\Phi_y)l^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{(1+\Phi_y)l^2} \\ 0 & 0 & \frac{-12EI_y}{(1+\Phi_z)l^3} & 0 & \frac{-6EI_y}{(1+\Phi_z)l^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-GJ}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{6EI_y}{(1+\Phi_z)l^2} & 0 & \frac{(2-\Phi_z)EI_y}{(1+\Phi_z)l} & 0 \\ 0 & \frac{-EI_z}{(1+\Phi_y)l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{(2-\Phi_y)EI_z}{(1+\Phi_y)l} \end{bmatrix}$$

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

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

요소 질량행렬

$$[M_s]^e = \rho A l \begin{bmatrix} [M_{11}] & [M_{12}] \\ [M_{21}] & [M_{22}] \end{bmatrix}$$

여기서,

$$[M_{11}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{13}{35} + \frac{6I_z}{5A l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{11l}{210} + \frac{I_z}{10Al} \\ 0 & 0 & \frac{13}{35} + \frac{6I_y}{5A l^2} & 0 & -\frac{11l}{210} - \frac{I_y}{10Al} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{J}{3A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{11l}{210} - \frac{I_y}{10Al} & 0 & \frac{l}{105} + \frac{2I_y}{15A} & 0 \\ 0 & \frac{11l}{210} + \frac{I_z}{10Al} & 0 & 0 & 0 & \frac{l}{105} + \frac{2I_z}{15A} \end{bmatrix}$$

$$[M_{12}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{9}{70} - \frac{6I_z}{5A l^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{13l}{420} + \frac{I_z}{10Al} \\ 0 & 0 & \frac{9}{70} - \frac{6I_y}{5A l^2} & 0 & \frac{13l}{420} - \frac{I_z}{10Al} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{J}{6A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{13l}{420} - \frac{I_y}{10Al} & 0 & -\frac{l}{140} + \frac{I_y}{30A} & 0 \\ 0 & \frac{13l}{420} - \frac{I_z}{10Al} & 0 & 0 & 0 & -\frac{l}{140} - \frac{I_z}{30A} \end{bmatrix}$$

$$[M_{21}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{9}{70} - \frac{6I_z}{5A l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{13l}{420} - \frac{I_z}{10Al} \\ 0 & 0 & \frac{9}{70} - \frac{6I_y}{5A l^2} & 0 & -\frac{13l}{420} - \frac{I_z}{10Al} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{J}{6A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{13l}{420} - \frac{I_y}{10Al} & 0 & -\frac{l}{140} + \frac{I_y}{30A} & 0 \\ 0 & -\frac{13l}{420} + \frac{I_z}{10Al} & 0 & 0 & 0 & -\frac{l}{140} - \frac{I_z}{30A} \end{bmatrix}$$

(17)

$$[M_{22}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{13}{35} + \frac{6I_z}{5A l^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{11l}{210} - \frac{I_z}{10Al} \\ 0 & 0 & \frac{13}{35} + \frac{6I_y}{5A l^2} & 0 & \frac{11l}{210} + \frac{I_y}{10Al} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{J}{3A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{11l}{210} + \frac{I_y}{10Al} & 0 & \frac{l}{105} + \frac{2I_y}{15A} & 0 \\ 0 & -\frac{11l}{210} - \frac{I_z}{10Al} & 0 & 0 & 0 & \frac{l}{105} + \frac{2I_z}{15A} \end{bmatrix}$$

식 (16)와 (17)에서, E, G는 각각 보요소의 종탄성계수, 전단탄성계수이고, l은 보요소의 길이이다. 또, I<sub>y</sub>와 I<sub>z</sub>는 각각 y축 및 z축에 관한 단면 2차 모멘트이고, J는 비틀림 계수이다.

A 및 ρ는 각각 보요소의 단면적 및 밀도이고, Φ<sub>y</sub>와 Φ<sub>z</sub>는 각각 다음과 같다.

$$\Phi_y = \frac{12EI_z}{GA_{sy}l^2}, \quad \Phi_z = \frac{12EI_y}{GA_{sz}l^2} \tag{18}$$

여기서, A<sub>sy</sub>와 A<sub>sz</sub>는 각각 y, z방향의 전단력이 작용할 때의 유효단면적이다.

### 2.2.5 파강제력 벡터

외각요소 l의 입사파 속도포텐셜 ϕ<sup>l</sup>은 다음과 같다.

$$\phi^l = \phi \tag{19}$$

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

$$\{F_j^{Il}\} = \left\{ -\rho \int \int_{S_H} (i\omega + U \frac{\partial}{\partial x}) \phi_I^l n_j^l ds \right\} \\ = -i\rho\omega_0 \int \int_{S_H} \phi_I^l n_j^l ds, \quad (j=1\sim6) \tag{20}$$

산란포텐셜 ϕ<sub>b</sub>는 경계치 문제(산란 문제)의 해로서 구해진다. 산란포텐셜 ϕ<sub>b</sub>가 구해지면 외각요소 l의 산란포텐셜 ϕ<sup>l</sup>는 다음과 같다.

$$\phi^l = \phi_b \tag{21}$$

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

$$\{F_j^{Dl}\} = \left\{ -\rho \int \int_{S_H} n_j^l (i\omega + U \frac{\partial}{\partial x}) \phi_D^l ds \right\} \\ = \left\{ -i\rho\omega \int \int_{S_H} n_j^l \phi_D^l ds - \rho U \int \int_{S_H} n_j^l \frac{\partial \phi_D^l}{\partial x} ds \right\}, \quad (j=1\sim6) \tag{22}$$

그러므로, 외각요소 l의 질점에 작용하는 파강제력 벡터는 다음과 같이 구해진다.

$$\{F_j^M\} = \{F_j^I\} + \{F_j^D\}, \quad (j=1\sim6) \tag{23}$$

### 2.3 변동압력

절점 변위 벡터가 구해지면 외각요소 l의 침수표면상의 임의

의 점  $(x^l, y^l, z^l)$ 에 있어서의 변동압력은 다음과 같이 구해진다.

$$p^l = \left[ i\rho\omega_0\phi_I^l + i\rho\omega \left\{ \phi_D^l + \sum_{k=1}^6 -i\omega\eta_k^l\phi_k^l \right\} + \rho U \left\{ \frac{\partial\phi_D^l}{\partial x} + \sum_{k=1}^6 -i\omega\eta_k^l \frac{\partial\phi_k^l}{\partial x} \right\} - \rho g \left\{ \eta_3^l + (y^l - y_0^l)\eta_4^l - (x^l - x_0^l)\eta_5^l \right\} \right] e^{-i\omega t} \quad (24)$$

여기서,  $\phi^l, \phi_k^l, \phi_k^l$ 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,  $\eta_k^l$ 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  $2.1 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$ 이며, 모델의 강성은 2절 진동의 고유주기가 모형에서 0.8초의 전후가 되도록 결정했다. 그 주요목은 Table 1과 같다.

실험방법은 입사파로 과도수파를 사용하고 운동계측장치에 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 압력분포법을 사용하여 친홀수부체에 작용하는 유체력을 산정하고, 이것을 이용해서 탄성응답을 구하였다. 그때, 탄

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

BREADTH	73
HEIGHT	4
LENGTH	2240

성모드의 방사 유체력도 고려하였다. 또한, 계산시의 수심은 무한수심으로 하였다.

#### 3.1.1 수직 변위응답

Fig. 4-Fig. 6은 각각 절점 0, 3, 7에서의 수직 변위응답(cm/cm)을 나타내고 있다. 가로축은  $L/\lambda$ ( $L$ 은 248cm,  $\lambda$ 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 Yago and Endo(1996)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  $\rho$ 는 물의 밀도,  $g$ 는 중력가속도,  $\zeta$ 는 입사파의 진폭,  $B$ 는 모형의 폭으로 52cm이다. 세로축은 실제값을 100배하여 표시한 것이다. 굽힘모멘트 응답에서도 변위 응답과 마찬가지로 전반적으로 본 탄성해석법에 의한 계산 결과가 Ikoma에 의한 계산치보다 실험치와 더욱 잘 일치함을 알 수 있다. 실험모델은 상하 2절 진동이 현저하게 나타나도록

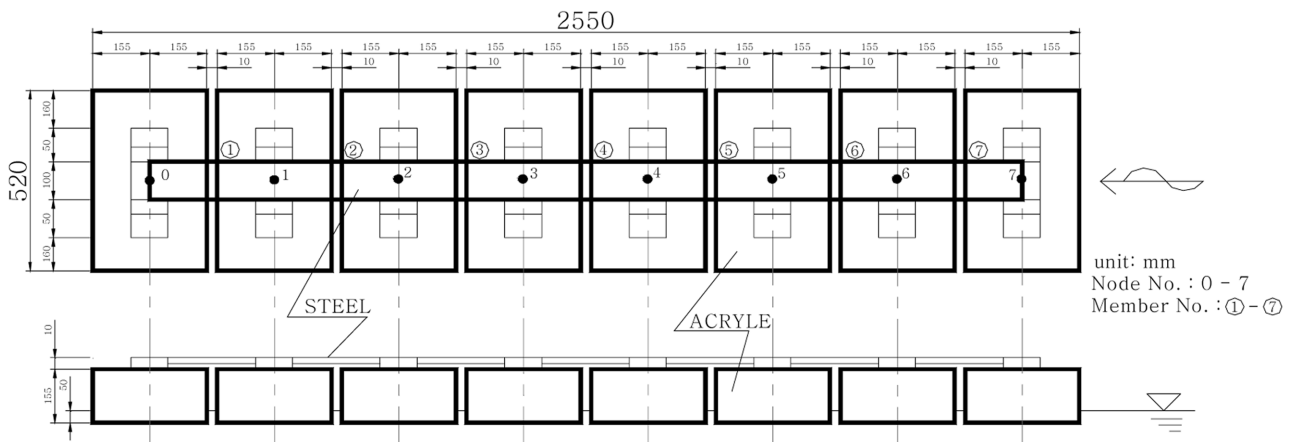


Fig. 3 Sketch of an barge type floating body and the beam elements for the upper structure

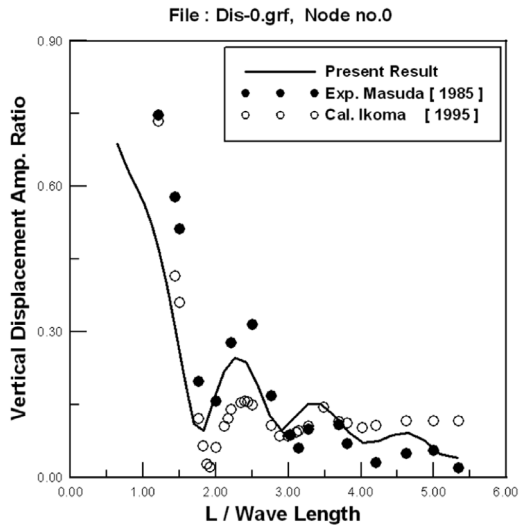


Fig. 4 Vertical displacement at node 0

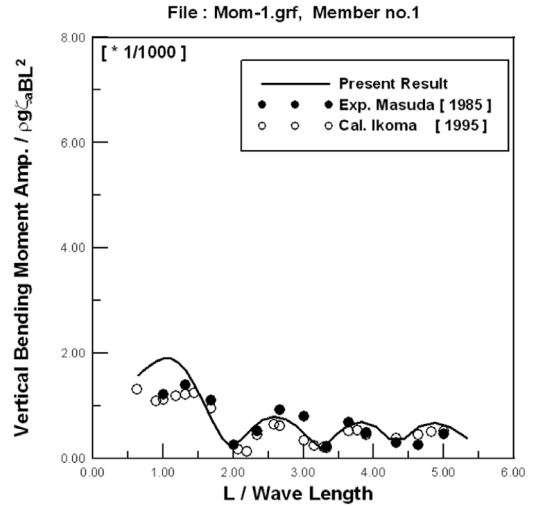


Fig. 7 Vertical bending moment of member 1

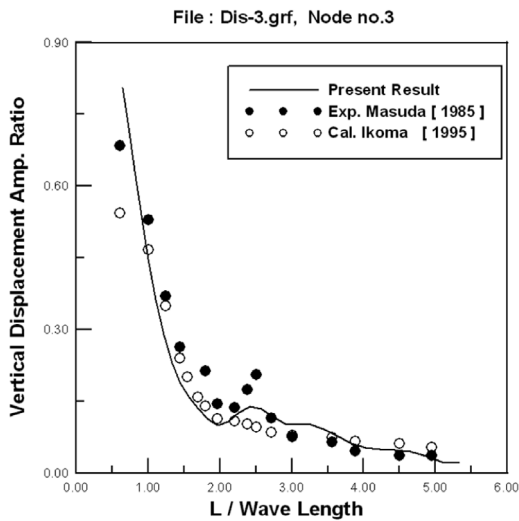


Fig. 5 Vertical displacement at node 3

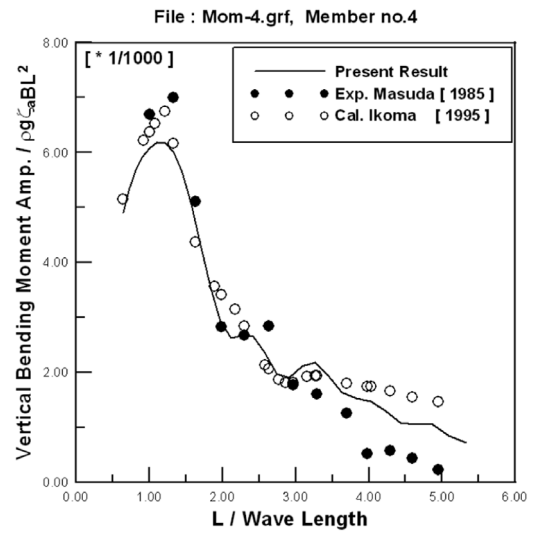


Fig. 8 Vertical bending moment of member 4

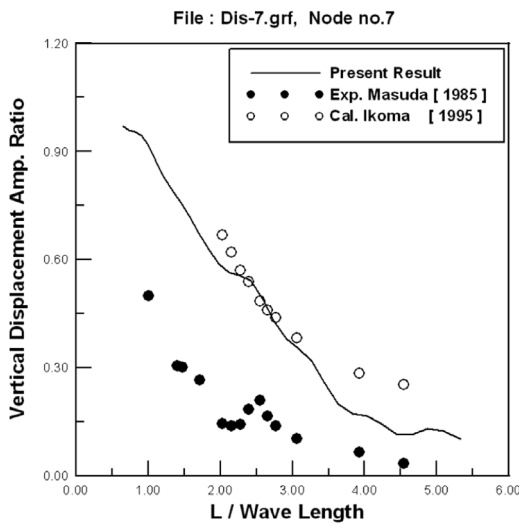


Fig. 6 Vertical displacement at node 7

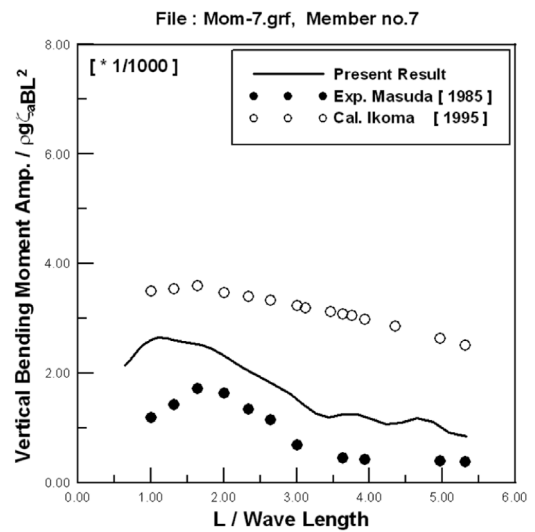


Fig. 9 Vertical bending moment of member 7

설계된 것임에도 불구하고 탄성모드에 의한 유체력도 고려하고 있는 Ikoma의 계산결과가 본 계산결과보다 나쁘게 나타나는 이유로 홀수의 영향을 들 수 있는 것으로 생각된다. 본 계산법은 홀수의 영향을 고려하고 있지만 Ikoma는 천홀수 이론을 사용하고 있으므로 홀수를 0으로 간주해 홀수의 영향을 고려할 수 없기 때문이다. 따라서, 홀수의 영향이 큰 선박의 탄성응답을 생각하면 본 탄성응답 해석법의 유효성을 보여주고 있는 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

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

- (1) Masuda의 바야지식 부유구조물에 대한 실험치 및 Ikoma의 계산치와 본 탄성응답 해석법에 의한 계산치를 서로 비교·검토한 결과 본 계산기법의 타당성이 검증되었다.
- (2) Ikoma의 계산법에 비해 본 계산법은 홀수의 영향이 큰 선박에 대한 탄성응답해석의 유효성을 보여주고 있는 것으로 사료된다.
- (3) 본 탄성응답 해석법은 선박의 정확한 탄성응답을 예측할 수 있어 구조 설계시 피로 강도 설계의 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단 국가지정연구실사업(ROA-2008-000-20069-0)의 지원으로 수행된 연구결과임.

#### 참 고 문 헌

신구균, 김사수, 손성완 (1992). "선박의 비선형 유체력을 고려한 파랑중 동적 강도 해석법에 관한 연구", 대한조선학회 논문집, 제29권, 제4호, pp 152-172.

이호영, 임춘규, 정형배 (2003). "파랑중 전진하는 선박의 유탄성 응답", 대한조선학회 논문집, 제40권, 제4호, pp 16-21.

정기태, 김영복, 강호승, 노종현 (1992). "접수구조물 진동의 유력탄성해석", 대한조선학회 논문집, 제29권, 제1호, pp 135-142.

정병훈, 송기중 (2004). 분할모형을 이용한 선박의 파랑하중 계측에 관한 연구(II), 대한조선학회 춘계학술대회 논문집.

조대성, 김사수 (1998). "선체 저차 상하 고유진동 감도해석", 대한조선학회 논문집, 제35권, 제3호, pp 54-61.

조일영, 한성곤, 권승민 (2005). "규칙파중 시간영역 스트립이론

을 이용한 비선형 유탄성 해석", 한국해양공학회지, 제19권, 제4호, pp 1-8.

- 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.
- Chan, H.S. (1993). "Prediction of Motion and Wave Loads of Twin-hull Ships", Marine Structures, Vol 6, pp 75-102.
- Chung, K.T. (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.
- 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.
- Fonseca, C. and Guedes Soares, C. (2004a). "Experimental Investigation of the Nonlinear Effects on the Vertical Motions and Loads of a Containership in Regular Waves", Journal of Ship Research, Vol 48, No 2, pp 118-147.
- Fonseca, C. and Guedes Soares, C. (2004b). "Experimental Investigation of the Nonlinear Effects on the Vertical Motions and Loads of a Containership in Irregular Waves", Journal of Ship Research, Vol 48, No 2, pp 148-167.
- Ikeda, Y. (1984). "Roll Damping of Ships", 1st Marine Dynamics Symposium, pp 241-250.
- 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.
- Kuroiwa, T. (1986). A Study on Structural Response of Ship in Large Amplitude Waves, Tokyo Univ. PhD Thesis.
- 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", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol 158, pp 506-516.
- Yago, K. and Endo, H. (1996). "On the Hydroelastic Response of Box-Shaped Floating Structure with Shallow Draft", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol 180, pp 341-352.

2009년 6월 5일 원고 접수

2010년 4월 6일 심사 완료

2010년 4월 23일 게재 확정