

규칙파종을 항행하는 선박의 유탄성응답해석 A Hydroelastic Response Analysis of Ships with Forward Speed in Regular Waves

이승철 · 배성용
S. C. Lee and S. Y. Bae

(접수일 : 2010년 9월 17일, 수정일 : 2010년 10월 13일, 채택확정 : 2010년 10월 18일)

Key Words : Hydroelastic Response(유탄성응답), Fluid-structure Interaction(유체-구조 상호간섭), Finite element Method(유한요소법), Three-dimensional Source Distribution Method(3차원 특이점분포법)

Abstract : When a large ship is advancing in waves, ship undergoes the hydroelastic response, which has influences on structural stability and the fatigue destruction etc. of the ship. Therefore, to predict accurate hydroelastic response, it is necessary to analyze hydroelastic response including fluid-structure interaction. In this research, a ship is divided into many hull elements to calculate the fluid forces and wave exciting forces on each elements using three-dimensional source distribution method. The calculated fluid forces and wave exciting forces are assigned to nodes of hull elements. The neighbor nodes are connected with elastic beam elements. We analyzed hydroelastic responses, and those are formulated by using finite element method. Particularly, to estimate the influence of forward speed on the hydroelastic responses, we use two different methods : Full Hull Rotation Method(FHRM) and Sectional Hull Rotation Method(SHRM).

1. 서 론

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

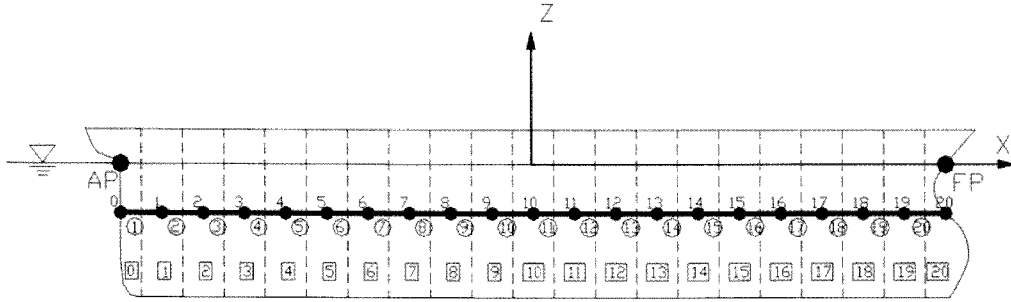
통상의 선박에 대한 유탄성 응답에 관해서 스트립이론^{1),2)} 및 경계요소법^{3),4)}을 적용한 연구결과가 발표된 바가 있다.

최근 선속의 영향을 합리적으로 도입하기 위해 전진속도가 있는 경우의 3차원 특이점분포법을 전침수 타원체 및 반침수 타원체에 적용하여 유탄성 응답을 구하는 방법이 발표되었으며⁵⁾, 고주파수 가정을 도입한 3차원 특이점분포법에 의한 연구⁶⁾ 등

도 발표된 바가 있다. 그러나, 임의 형상의 선체에 3차원 특이점분포법을 적용하여 탄성응답을 정도 좋게 구하고 있는 연구는 거의 없는 실정이다.

파랑 중 항행하는 선박을 대상으로 하여 탄성응답을 정도 좋게 추정하기 위해서는, 선박을 탄성부유체로 다루어야 하고, 탄성체가 파랑 중 동적거동을 할 때에는 유체-구조 상호간섭을 고려하여 운동과 구조응답을 동시에 구할 필요가 있다. 유체력 평가는 고주파수 가정을 도입한 3차원 특이점분포법을 적용하고, 선체를 다수의 외각요소로 분할하여 각 요소에 대한 유체력 및 파강제력을 산정한다. 그리고, 각 외각요소의 중앙점을 절점으로 하고 이들 절점을 탄성요소로 연결하여 유한요소법에 의해 정식화함으로써 동적구조응답을 추정한다. 그리고, 본 탄성응답 해석법을 검증하기 위해 Watanabe의 $F_n=0.25$ 에서 S175 container ship model에 대한 실험값 및 계산값⁷⁾와 본 계산결과를 비교·검토하여, 본 계산기법의 타당성을 확인한다.

배성용(교신저자) : 부경대학교 조선해양시스템공학과
E-mail : sybae@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6616
이승철: 한국해양대학교 국가지정연구실



0,1,... : Node No.
 ①,②,... : Beam Element No.
 ①,②,... : Hull Element No.

Fig. 1 Element discretization of a ship

2. 수치 해석

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 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

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
 - $[K_P]$: 정수압에 의한 전체 복원력행렬
 - $\{F^W\}$: 파강제력 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.

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

여기서, a, b 는 비례상수이다.

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 후⁸⁾, 각 절점에 대응하는 외각요소의 침수표면적에 비례 배분한 것이다.

2.2.2 부가질량행렬 및 조파감쇠행렬

부가질량행렬 및 조파감쇠행렬을 구하기 위해 2가지의 방법을 사용해서 비교·검토했다.

2.2.2.1 Full hull rotation method

배의 기준좌표계의 원점을 운동기준점으로 한 6

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

$$\begin{aligned}\phi_1^l &= \phi_1, \phi_2^l = \phi_2, \phi_3^l = \phi_3 \\ \phi_4^l &= \phi_4 - y_0^l \phi_3 + z_0^l \phi_2 \\ \phi_5^l &= \phi_5 - z_0^l \phi_1 + x_0^l \phi_3 \\ \phi_6^l &= \phi_6 - x_0^l \phi_2 + y_0^l \phi_1\end{aligned}\quad (3)$$

여기서, N 은 외각요소의 총 갯수이다.

2.2.2.2 Sectional hull rotation method

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.

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

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

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

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

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

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

여기서, 식(5)는 선체의 운동(조우)주파수 ω 를 고주파수로 가정한 자유표면경계조건이고, 식(7)의 n_k^l 는 각 축에 평행한 단위속도운동에 의한 외각요소 l 의 표면에서의 운동 속도의 법선방향성분($k=1\sim 3$) 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 법선방향성분($k=4\sim 6$)으로 다음과 같다.

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

m_k^l 은 다음의 관계를 만족한다.

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

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

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

식(3)과 (10)을 통해서 방사포텐셜 ϕ_k^l 이 구해지면, 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.

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

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

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

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

이고, μ_{jk}^l 과 ν_{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,

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

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

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

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

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

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

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

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

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) 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 회전관성을 각각 고려하면 다음과 같다.

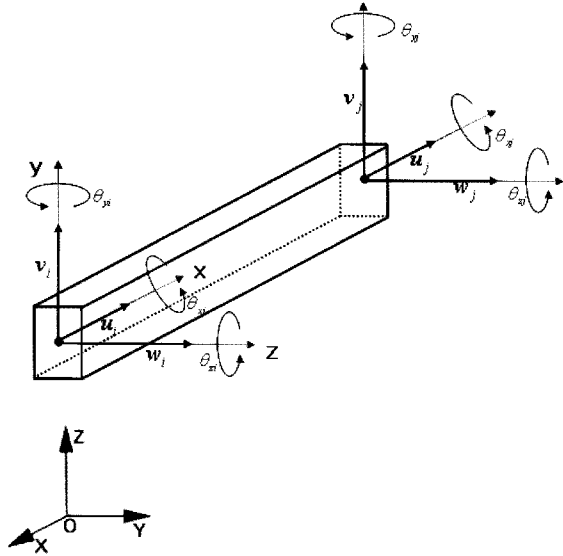


Fig. 2 Local coordinate and beam element

• 요소 강성행렬

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

여기서,

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

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

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

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

• 요소 질량행렬

$$[M_S]^e = \rho A l \begin{bmatrix} [M_{11}] & [M_{12}] \\ [M_{21}] & [M_{22}] \end{bmatrix} \quad (17)$$

여기서,

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

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

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

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

식 (16)와 (17)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.

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

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

2.2.5 파강제력 벡터

외각요소 l 의 입사파 속도포텐셜 ϕ_I^l 은 다음과

같다.

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

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

$$\begin{aligned} \{F_j^{Il}\} &= \left\{ -\rho \iint_{S_H^l} (i\omega + U \frac{\partial}{\partial x}) \phi_I^l n_j^l ds \right\} \\ &= -i\rho\omega_0 \iint_{S_H^l} \phi_I^l n_j^l ds, (j=1 \sim 6) \end{aligned} \quad (20)$$

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.

$$\phi_D^l = \phi_D \quad (21)$$

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

$$\begin{aligned} \{F_j^{Dl}\} &= \left\{ -\rho \iint_{S_H^l} n_j^l (i\omega + U \frac{\partial}{\partial x}) \phi_D^l ds \right\} \\ &= \left\{ -i\rho\omega \iint_{S_H^l} n_j^l \phi_D^l ds \right. \\ &\quad \left. - \rho U \iint_{S_H^l} n_j^l \frac{\partial \phi_D^l}{\partial x} ds \right\}, (j=1 \sim 6) \end{aligned} \quad (22)$$

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

$$\{F_j^{Wl}\} = \{F_j^{Il}\} + \{F_j^{Dl}\}, (j=1 \sim 6) \quad (23)$$

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.

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

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 Watanabe의 실험모델

Watanabe는 S175 container ship을 대상으로 선수 플래어의 영향을 알아보기 위해, 우레탄과 에폭시 레진으로 유연한 구조의 모델을 제작하였다. 모델에 대한 주요목은 Table 1과 같다.

계산방법은 Watababe의 실험조건과 동일하게 Table 2의 조건에서 탄성응답을 계산하였다.

Fig. 3은 S175선박의 침수표면을 2544개의 패널로써 표현한 그림이고, Fig. 4는 방사포텐셜 계산의 2가지 방법에 대해 도식화하고 있다.

Table 1 Principal particulars

	Ship	Model
L (m)	175.0	4.5
B (m)	25.4	0.653
D (m)	15.4	0.396
Draft (m)	9.5	0.244
Disp. (ton)	24742.0	0.412
κ/L	0.236	0.232
EI(midship) (Kgmm ²)	2.28×1018	3.61×1010
2-node freq. (Hz)	1.6	10.0

Table 2 Wave conditions

Fn	0.25
λ/L	0.5 ~ 1.5 (0.1 간격)
h_w	15cm
β	180°

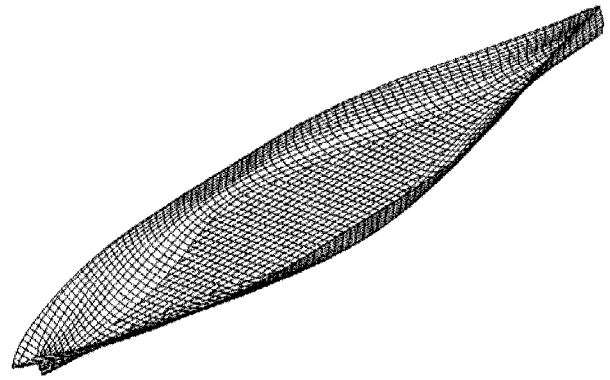


Fig. 3 Submerged surface of a S175 container ship represented 2544 panels

Fig. 5는 $k\zeta_a$ 로 무차원화한 pitch 운동을 보이고 있다. Watanabe의 계산치와 FHRM의 결과와 잘 일치하고 있지만, 전체적으로 실험치와는 다소 차이를 보이고 있으나, Watanabe의 경우와 같이 $\lambda/L=1$ 인 곳에서 경향의 차이를 보이고 있다.

Fig. 6 ~ Fig. 8은 $\rho g L^2 B \zeta_a$ 로 무차원화한 수직굽힘모멘트(Vertical Bending Moment)를 보이고 있다. Watanabe의 계산값은 λ/L 이 1.0 근처에서 떨어지는 실험값을 못 따라가는데 비해 본 계산결과는 실험값과 잘 일치하고 있다. Fig. 8은 Station No. 15(선수부)에서의 수직굽힘모멘트인데, Watanabe의 계산값과 본 계산결과들이 실험값보다 작게 나타남을 알 수 있다. 또한, Watanabe의 모델이 실선의 강성을 가져옴에 따라, FHRM을 고려한 계산결과가 SHRM을 고려한 계산결과보다 실험값에 잘 일치함을 알 수 있다.

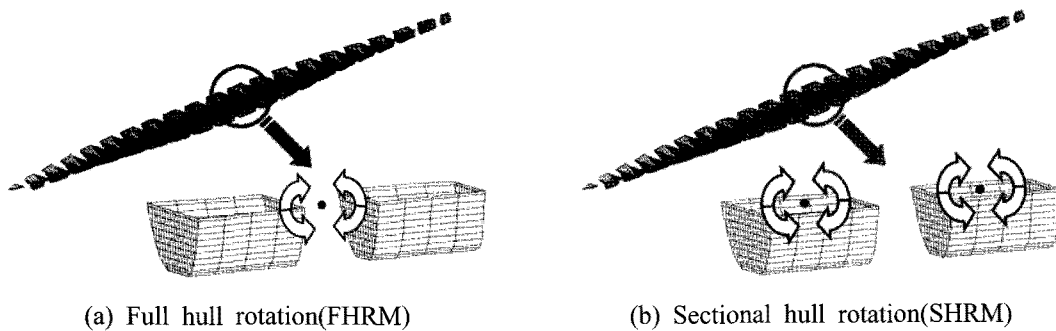


Fig. 4 Mono hull rotation and multi hull rotation

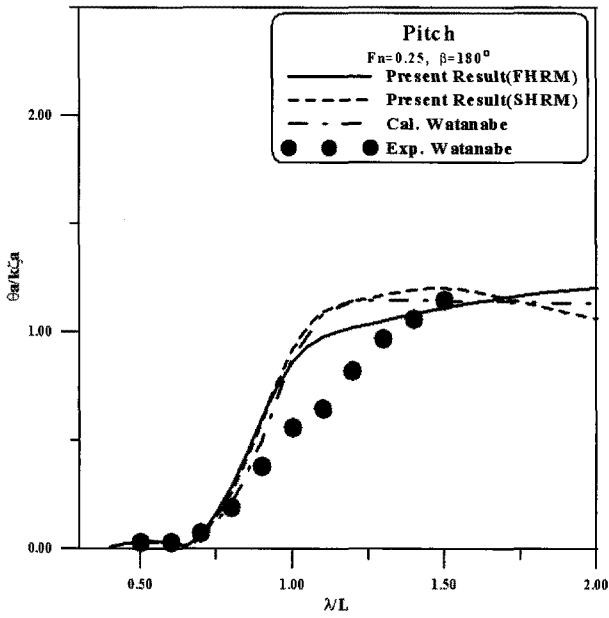


Fig. 5 Response of pitching

전체적으로 FHRM을 고려한 계산결과가 SHRM을 고려한 계산결과보다 실험값에 잘 일치함을 알 수 있었고, λ/L 이 1.0 근처에서 차이가 발생함을 알 수 있었다. 이것은 모델이 강체의 특성을 가지고 있기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 9-Fig. 11은 $\lambda/L=0.6, 1.0, 1.5$ 일 경우의 수직 굽힘모멘트의 길이방향 분포를 보이고 있다. Fig. 9는 $\lambda/L=0.6$ 인 경우를 보이고 있다. $\lambda/L=0.6$ 인 경우에는 FHRM을 고려한 결과와 SHRM을 고려한 결과가 일치함을 알 수 있다. 선수부로 갈수록 실험값과 잘 일치하고 있지만, 선미부로 갈수록 다소 높은 값을 보이고 있다. Fig. 10은 $\lambda/L=1.0$ 인 경우를 보이고 있다. FHRM을 고려한 결과가 실험값과 잘 일치함을 알 수 있다. SHRM을 고려한 결과는 다소 낮은 값을 보이고 있지만, 선수부로 갈수록 FHRM을 고려한 결과와 가까워짐을 알 수 있다. Fig. 11는

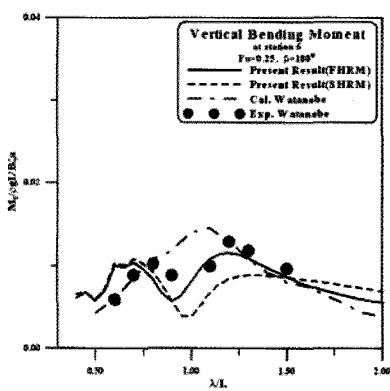


Fig. 6 Vertical bending moment at station No. 6

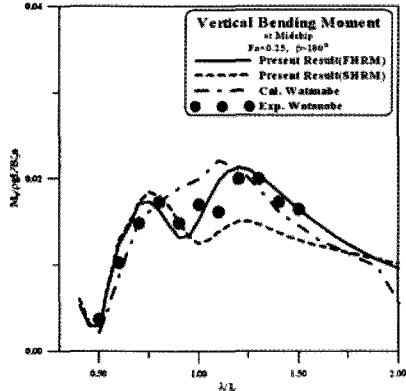


Fig. 7 Vertical bending moment at Midship

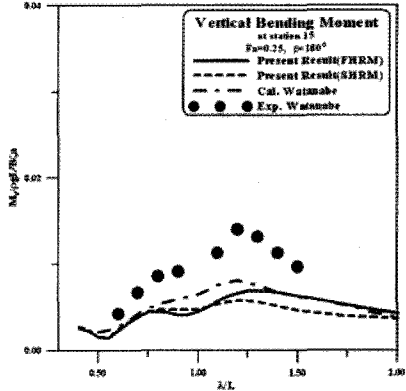


Fig. 8 Vertical bending moment at station No. 15

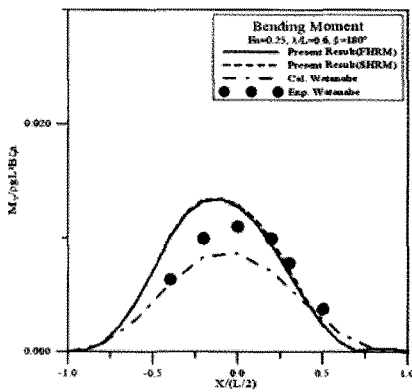


Fig. 9 Longitudinal distribution of vertical bending moment for $\lambda/L=0.6$

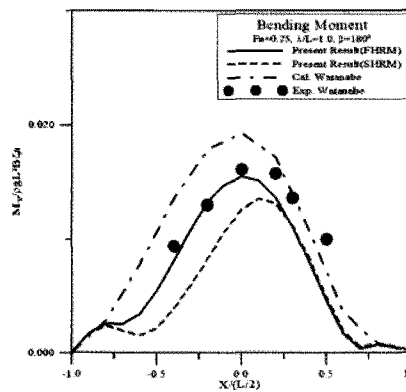


Fig. 10 Longitudinal distribution of vertical bending moment for $\lambda/L=1.0$

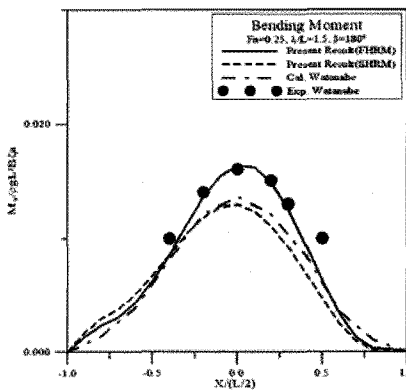


Fig. 11 Longitudinal distribution of vertical bending moment for $\lambda/L=1.5$

$\lambda/L=1.5$ 인 경우를 보이고 있으며, 실험값과 잘 일치함을 알 수 있다. FHRM을 고려한 결과와 SHRM을 고려한 결과보다 높은 값을 가짐을 알 수 있다.

4. 결 론

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

(1) Watanabe의 S175 container ship model에 대한 실험치 및 계산치와 본 탄성응답 해석법에 의한 계산치를 서로 비교·검토한 결과 본 계산기법의 타당성이 검증되었다.

(2) 본 연구에서 대상으로 한 Watanabe의 모델이 강체에 가까운 탄성모델이므로 FHRM을 고려한 계산결과가 SHRM을 고려한 계산결과에 비해 실험값과 잘 일치하고 있음 알 수 있었다.

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

참고문헌

1. 신구균, 김사수, 손성완, 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 외 4인, 1992, "접수구조물 진동의 유력탄성해석", 대한조선학회 논문집 제29권, 제1호, pp. 135~142.
4. 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.
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. Watanabe I., Ueno M. and Sawada H., 1989, "Effects of Bow Flare Shape to the Wave Loads of a container ship", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 166, pp. 259~266.
8. Ikeda Y., 1984, "Roll Damping of Ships", 1st Marine Dynamics Symposium, pp. 241~250.