

규칙파종을 항행하는 선박의 파랑하중해석 Analysis of Wave Loads of Ships with Advancing Speed in Regular Waves

이승철 · 도덕희 · 구자삼
S. C. Lee, D. H. Doh and J. S. Goo

(접수일 : 2010년 1월 18일, 수정일 : 2010년 1월 26일, 채택확정 : 2010년 2월 2일)

Key Words : Three-Dimensional Source Distribution Method(3차원 특이점분포법), Vertical Bending Moment(수직굽힘 모멘트), Motion Response(운동응답), Wave Load(파랑하중)

Abstract : A three-dimensional source distribution method is presented for the prediction of motions and vertical bending moments of ships travelling with forward speed in regular waves. Comparisons between theoretical and experimental results are shown for the motion responses and vertical bending moment of the S175 container ship model by Watanabe et al. The model ship was made of synthetic resins so as to simulate bending rigidity of a full scale ship. 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

선박이 파랑 중을 항해할 때, 초대형선의 경우 탄성응답을 유발하게 되지만, 초대형선박이 아닌 경우에는 탄성응답보다는 강제응답을 유발하게 될 것이다.

본 연구에서는 미소진폭파종에서 전진하고 있는 선박을 대상으로 하여, 고주파수 가정을 도입한 3차원 특이점 분포법¹⁾³⁾을 적용하여, 운동 및 파랑하중을 구하는 이론적 해석법을 임의의 운동기준점에 대한 표현식으로 일반화했다. 또한, 탄성응답과의 비교를 위해 선박을 분할모델⁴⁾⁶⁾로 하여 파랑하중은 선체의 각 station에 대해 계산이 되도록 하였다. 본 강제응답해석법을 검증하기 위해 유연한 구조의 모델을 가지고 실험 및 계산을 한 Watanabe⁷⁾의 결과와 비교·검토하여, 본 계산기법의 타당성을 확인한다.

2. 이론 해석

2.1 기본가정 및 좌표계

기본가정으로서 유체는 이상유체이고 유체의 운

동은 비회전인 것으로 한다. 또, 선체의 운동과 입사파의 유체운동은 미소진폭의 주기운동을 하는 것으로 하고, 각각의 정상상태를 논하기로 한다. 또한 자유표면은 모든 방향으로 무한히 펼쳐져 있는 것으로 하고, 수심이 유한인 경우에는 수심을 일정으로 한다.

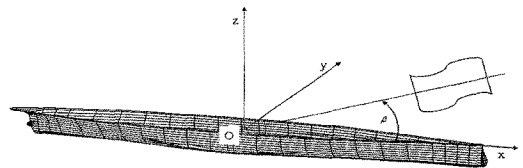


Fig. 1 Coordinate system

선체는 자유표면에서 조우주파수 ω 로 운동하면서 평균 수평속도 U 로 이동하는 것으로 하며, 좌표계로서는 Fig. 1에 보는 바와 같이 선체와 같은 방향과 속도로 이동하는 우수계의 기준좌표계 $o-xyz$ 를 취하고, xy 평면은 평균수면에 두고, z 축은 연직상방으로 향하고 있는 것으로 한다.

입사파는 x 축의 음의 방향에서 양의 방향으로, x 축과 β 의 각을 이루며 진행하는 것으로 한다.

이승철(교신저자) : 한국해양대학교 국가지정연구실
E-mail : chongwha@paran.com, Tel : 010-8538-3466
도덕희 : 한국해양대학교 기계정보공학부
구자삼 : 부경대학교 조선해양시스템공학과

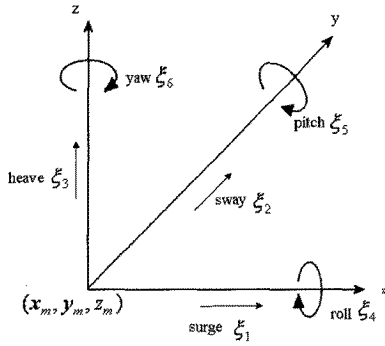


Fig. 2 Definition of motions

임의의 운동기준점 (x_m, y_m, z_m) 의 각 축방향 변진운동 및 각 축돌레의 회전운동을 Fig. 2와 같이 정의한다.

또한, Fig. 3과 같이 유체 영역의 경계를 다음과 같이 나타낸다.

$$S = S_H + S_F + S_B + S_R$$

여기서, S_H 는 선체의 침수표면, S_F 는 자유표면, S_B 는 해저면, S_R 는 무한원방의 경계면, Ω 는 유장이다.

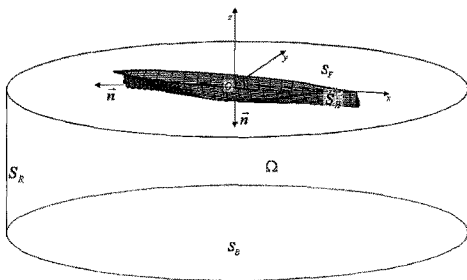


Fig. 3 Boundary surface and fluid region

2.2 기초방정식과 경계조건

비회전 완전유체의 유체운동은 다음 식으로 정의되는 속도포텐셜 Φ 에 의해 기술할 수 있다.

$$V = \nabla \Phi(x, y, z, t) \quad (1)$$

단, V 는 유체의 속도 벡터이다.

그런데 이 속도포텐셜은 정상포텐셜과 비정상 포텐셜로 나눌 수 있고, 비정상 포텐셜은 입사파의 속도포텐셜과 구속된 선체에 의한 입사파의 산란을 나타내는 산란 포텐셜 및 정수 중에서 선체의 운동에 의해 발생하는 방사파를 나타내는 방사 포텐셜

의 합으로서 생각할 수 있다.

또한, 방사 포텐셜은 운동자유도에 따라 6개의 성분으로 나눌 수 있다. 따라서 유장 전체의 속도포텐셜은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi(x, y, z, t) = -Ux + \phi_s(x, y, z) + \tilde{\Phi}(x, y, z, t) \quad (2)$$

$$\tilde{\Phi} = [\phi_I + \phi_D + \sum_{k=1}^6 -i\omega \eta_k \phi_k] e^{-i\omega t} \quad (3)$$

여기서, ϕ_s 는 선체의 전진운동에 기인하는 정상 교란 속도포텐셜로서 본 연구에서는 정상 교란 포텐셜을 무시할 수 있는 선체형상인 것으로 가정한다. 또, $\tilde{\Phi}$ 는 파에 의한 비정상 속도포텐셜, ϕ_I 는 입사파의 포텐셜, ϕ_D 는 산란 포텐셜, ϕ_k 는 운동기준점에서 선체가 단위 속도 진폭으로 k 방향의 운동에 의해 발생하는 방사 포텐셜이다. 또, i 는 허수 단위, ω 는 선체와 파의 조우 각주파수, η_k 는 k 방향의 복소 변위 진폭이다.

산란 포텐셜 ϕ_D 및 방사 포텐셜 ϕ_k ($k=1 \sim 6$)은 각각 다음과 같은 경계치 문제의 해로서 구할 수 있다.

$$\nabla^2 \phi_{D,k} = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (4)$$

$$[(i\omega + U \frac{\partial}{\partial x})^2 + g \frac{\partial}{\partial z}](\phi_{D,k}) = 0 \quad \text{on } S_F \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi_{D,k}}{\partial z} = 0 \quad \text{on } S_B \quad (6a)$$

$$\lim_{z \rightarrow -\infty} \nabla \phi_{D,k} = 0 \quad \text{on } S_B \quad (6b)$$

$$\frac{\partial \phi_D}{\partial n} = -\frac{\partial \phi_I}{\partial n} \quad \text{on } S_H \quad (7)$$

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \sqrt{R} (\frac{\partial \phi_{D,k}}{\partial R} - ik\phi_{D,k}) = 0 \quad \text{on } S_R \quad (8)$$

여기서, 식(6a)는 유한수심의 경우이고, 식(6b)는 무한수심의 경우이다. 또, 식(8)은 무한 원방에 있어서의 방사조건이며, 무한 원방에 있어서는 산란파, 방사파 둘 다 방사상으로 펼쳐져 가는 진행파 성분만으로 된다고 하는 물리적인 조건을 나타내고 있다. 단, R 은 source 점과 field 점의 수평거리이며, k 는 조우 파수이다.

n_k 는 다음 식에 있듯이, 각 축에 평행한 단위 속

도운동에 의한 선체 표면에서의 운동 속도의 법선 방향성분($k = 1 \sim 3$) 및 각 축돌레의 단위 각속도 운동에 의한 선체표면에서의 운동속도의 법선방향 성분($k = 4 \sim 6$)이다.

$$\begin{aligned} n_1 &= n_x, \quad n_2 = n_y, \quad n_3 = n_z \\ n_4 &= (y - y_m)n_z - (z - z_m)n_y \\ n_5 &= (z - z_m)n_x - (x - x_m)n_z \\ n_6 &= (x - x_m)n_y - (y - y_m)n_x \end{aligned} \quad (9)$$

단, n_x, n_y, n_z 는 각각 선체 표면상의 단위 법선 벡터의 x, y, z 성분이며, m_k 는 ϕ_s 를 무시한다고 가정하고 있으므로 다음의 관계를 만족한다.

$$\begin{aligned} m_k &= 0 \quad (k = 1 \sim 4) \\ m_5 &= n_3, \quad m_6 = -n_2 \end{aligned} \quad (10)$$

또, 선체의 운동(조우)주파수 ω 가 미분 연산자 $U\partial/\partial x$ 보다 훨씬 큰 고주파수로 가정하면 ($\omega \gg U\frac{\partial}{\partial x}$), 자유표면 경계조건은 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial \phi_D}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \phi_D = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \phi_k = 0 \quad (k = 1 \sim 6) \quad (12)$$

그러므로, $\phi_D, \phi_k (k = 1 \sim 6)$ 은 통상적인 3차원 특이점 분포법에 의해 구할 수 있다.

2.3 유체력 및 파강제력

일정 속도 U 로 파중을 전진하는 선체에 작용하는 유체력과 모멘트는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_j = - \int \int_{S_H} p \cdot n_j ds = F_j^W + F_j^R + F_j^\delta \quad (13)$$

여기서, F_j^W 는 파강제력과 모멘트, F_j^R 은 등유체력과 모멘트, F_j^δ 는 복원력과 모멘트이고 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_j^W = -\rho \int \int_{S_H} (i\omega + U\frac{\partial}{\partial x}) [\phi_I + \phi_D] e^{-i\omega t} n_j ds \quad (14)$$

$$\begin{aligned} F_j^R &= -\rho \int \int_{S_H} (i\omega + U\frac{\partial}{\partial x}) \left[\sum_{k=1}^6 -i\omega \eta_k \phi_k \right] e^{-i\omega t} n_j ds \\ &= \sum_{k=1}^6 \eta_k e^{-i\omega t} (\omega^2 \mu_{jk} + i\omega \nu_{jk}) \end{aligned} \quad (15)$$

$$F_j^\delta = \rho g \int \int_{S_H} z n_j ds \quad (16)$$

여기서,

$$\mu_{jk} = -\frac{\rho}{\omega} Re \int \int_{S_H} n_j (\omega - iU\frac{\partial}{\partial x}) \phi_k ds \quad (17)$$

$$\nu_{jk} = -\rho Im \int \int_{S_H} n_j (\omega - iU\frac{\partial}{\partial x}) \phi_k ds \quad (18)$$

식(17)과 식(18)은 각각 k 방향의 운동에 의한 j 방향에의 부가질량 및 감쇠계수이다. K_{ij} 는 k 방향의 운동에 의한 j 방향에의 복원력 계수이다.

$$K_{33} = \rho g \int \int_{S_b} dA$$

$$K_{34} = \rho g \int \int_{S_b} (y - y_g) dA - \rho g (y_m - y_g) \int \int_{S_b} dA$$

$$\begin{aligned} K_{35} &= -\rho g \int \int_{S_b} (x - x_g) dA \\ &\quad + \rho g (x_m - x_g) \int \int_{S_b} dA \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_{44} &= \rho g (y_m - y_g)^2 \int \int_{S_b} dA \\ &\quad - 2\rho g (y_m - y_g) \int \int_{S_b} (y - y_g) dA \\ &\quad + \rho g \int \int_{S_b} (y - y_g)^2 dA + \rho g V_0 (z_b - z_g) \end{aligned}$$

$$K_{45} = -\rho g (x_m - x_g) (y_m - y_g) \int \int_{S_b} dA$$

$$+ \rho g (x_m - x_g) \int \int_{S_b} (y - y_g) dA$$

$$+ \rho g (y_m - y_g) \int \int_{S_b} (x - x_g) dA$$

$$- \rho g \int \int_{S_b} (x - x_g) (y - y_g) dA$$

$$K_{46} = -\rho g V_0 (x_b - x_g)$$

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

$$K_{55} = \rho g (x_m - x_g)^2 \int \int_{S_b} dA$$

$$- 2\rho g (x_m - x_g) \int \int_{S_b} (x - x_g) dA$$

$$+ \rho g \int \int_{S_b} (x - x_g)^2 dA + \rho g V_0 (z_b - z_g)$$

$$K_{56} = -\rho g V_0 (y_b - y_g)$$

$$\text{상기 이외의 성분의 } K_{ij} = 0 \quad (19)$$

여기서, V_0 는 배수용적, (x_b, y_b, z_b) 는 선체의 부력중심, $S_0 = \int \int_S dA$ 는 수선면적이다.

2.4 운동응답

선체의 운동이 입사파의 주파수와 미소진폭의 주기운동을 하는 것으로 가정하고 있으므로, 어떤 임의의 운동 기준점의 좌표 (x_m, y_m, z_m) 주위의 선형 운동 방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\sum_{k=1}^6 [-\omega^2(M_{jk} + \mu_{jk}) - i\omega(\nu_{jk} + \nu_{jk}^V \delta_{j4} \delta_{k4}) + K_{jk}] \eta_k e^{-i\omega t} = F_j^W, (j=1 \sim 6) \quad (20)$$

여기서, M_{jk} 는 선체의 관성력 계수, ν_{jk}^V 는 roll 점성감쇠의 등가선형계수이다. K_{jk} 는 정수압에 의한 복원력 계수이다. 선체의 관성력 계수를 구체적으로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M_{kk} &= m, (k=1 \sim 3) \\ M_{15} &= -m(z_m - z_g), M_{16} = m(y_m - y_g) \\ M_{24} &= m(z_m - z_g), M_{26} = -m(x_m - x_g) \\ M_{34} &= -m(y_m - y_g), M_{35} = m(x_m - x_g) \\ M_{42} &= M_{24}, M_{43} = M_{34} \\ M_{44} &= I_{xx} + m(y_m - y_g)^2 + m(z_m - z_g)^2 \\ M_{45} &= -I_{xy} - m(x_m - x_g)(y_m - y_g) \\ M_{46} &= -I_{xz} - m(x_m - x_g)(z_m - z_g) \\ M_{51} &= M_{15}, M_{53} = M_{35}, M_{54} = M_{45} \\ M_{55} &= I_{yy} + m(x_m - x_g)^2 + m(z_m - z_g)^2 \\ M_{56} &= -I_{yz} - m(y_m - y_g)(z_m - z_g) \\ M_{61} &= M_{16}, M_{62} = M_{26} \\ M_{64} &= M_{46}, M_{65} = M_{56} \\ M_{66} &= I_{zz} + m(x_m - x_g)^2 + m(y_m - y_g)^2 \end{aligned} \quad (21)$$

상기 이외의 성분의 $M_{jk} = 0$

여기서, (x_g, y_g, z_g) 는 선체의 무게중심, m 는 선체의 질량이고,

$$\begin{aligned} I_{xx} &= \sum [(y - y_g)^2 + (z - z_g)^2] \delta m \\ I_{yy} &= \sum [(x - x_g)^2 + (z - z_g)^2] \delta m \\ I_{zz} &= \sum [(x - x_g)^2 + (y - y_g)^2] \delta m \\ I_{xz} &= \sum (x - x_g)(z - z_g) \delta m \\ I_{yz} &= \sum (y - y_g)(z - z_g) \delta m \\ I_{xy} &= \sum (x - x_g)(y - y_g) \delta m \\ m &= \sum \delta m \end{aligned} \quad (22)$$

이다.

2.5 파랑하중

배에 대한 주요 내력은 배의 각 station에서의 횡단면에 작용하는 파랑하중이다. 이 파랑하중은 Fig.4 에서와 같이 선수측 선각의 횡단면에서의 내력으로 정의되며, 압축력 F_1 , 수평전단력 F_2 , 수직전단력 F_3 , 비틀림 모멘트 F_4 , 수직굽힘모멘트 F_5 와 수평굽힘모멘트 F_6 이다.

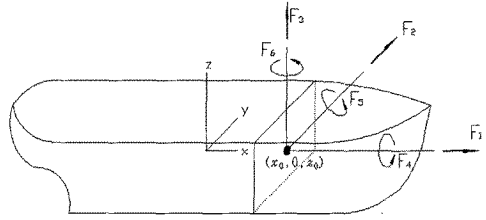


Fig. 4 Definition of Global Wave Loads

$$F_1 = m_1 \ddot{\xi}_1 - m_1(z_0 - z_{1g}) - F_{1FH} \quad (23)$$

$$F_2 = m_1 \ddot{\xi}_2 + m_1(z_0 - z_{1g}) \ddot{\xi}_4 - m_1(x_0 - x_{1g}) \ddot{\xi}_6 - F_{2FH} \quad (24)$$

$$F_3 = m_1 \ddot{\xi}_3 + m_1(x_0 - x_{1g}) \ddot{\xi}_5 - F_{3FH} \quad (25)$$

$$F_4 = m_1(z_0 - z_{1g}) \ddot{\xi}_2 + \{I_{xx} + m_1(z_0 - z_{1g})^2\} \ddot{\xi}_4 + \int_L b_{44}^V dx \ddot{\xi}_4 - \{I_{xz} + m_1(x_0 - x_{1g})(z_0 - z_{1g})\} \ddot{\xi}_6 - F_{4FH} - y_m F_{3FH} + (z_m - z_0) F_{2FH} \quad (26)$$

$$F_5 = -m_1(z_0 - z_{1g}) \ddot{\xi}_1 + m_1(x_0 - x_{1g}) \ddot{\xi}_3 + \{I_{yy} + m_1(x_0 - x_{1g})^2 + m_1(z_0 - z_{1g})^2\} \ddot{\xi}_5 - F_{5FH} - (z_m - z_0) F_{1FH} + (x_m - x_0) F_{3FH} \quad (27)$$

$$F_6 = -m_1(x_0 - x_{1g}) \ddot{\xi}_2 - \{I_{xz} + m_1(x_0 - x_{1g})(z_0 - z_{1g})\} \ddot{\xi}_4 + \{I_{zz} + m_1(x_0 - x_{1g})^2\} \ddot{\xi}_6 - F_{6FH} - y_m F_{1FH} + (x_m - x_0) F_{2FH} \quad (28)$$

이고, b_{44}^V 는 선체의 단위길이당의 등가선형화된 roll 점성감쇠계수이고, L^* 는 선수측 선각의 길이이다. $\ddot{\xi}_j$ 와 운동기준점 (x_m, y_m, z_m) 에서의 가속도 $\ddot{\eta}_j$ 는 다음의 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned}
 \ddot{\xi}_1 &= \ddot{\eta}_1 - (z_m - z_0)\ddot{\eta}_5 + y_m\ddot{\eta}_6 \\
 \ddot{\xi}_2 &= \ddot{\eta}_2 + (z_m - z_0)\ddot{\eta}_4 - (x_m - x_0)\ddot{\eta}_6 \\
 \ddot{\xi}_3 &= \ddot{\eta}_3 - y_m\ddot{\eta}_4 + (x_m - x_0)\ddot{\eta}_5 \\
 \ddot{\xi}_4 &= \ddot{\eta}_4, \quad \ddot{\xi}_5 = \ddot{\eta}_5, \quad \ddot{\xi}_6 = \ddot{\eta}_6
 \end{aligned}
 \tag{29}$$

3. 수치계산 결과 및 고찰

3.1 Watanabe의 실험모델

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

Watanabe는 S175 컨테이너선을 대상으로 선수 플래어의 영향을 알아보기 위해, 우레탄과 에폭시 레진으로 유연한 구조의 모델을 제작하였다. 모델에 대한 주요목적은 Table 1과 같다. 실험방법은 Table 2와 같은 조건에서 탄성 응답을 계측 및 계산하였다.

Table 2 Wave conditions(regular wave)

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

Fig. 3은 S175선박에 작용하는 동유체력을 계산하기 위해 S175선박의 침수표면을 2544개의 패널로 분할한 것이다.

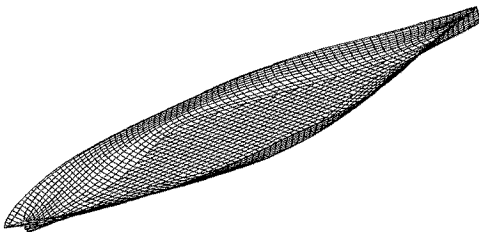


Fig. 3 Submerged surface of a S175 container ship represented 2544 panels

Fig. 4는 $k\zeta_a$ 로 무차원화한 pitch 운동을 보이고 있다. Watanabe의 계산치와 다소 차이를 보이나, 실험값을 잘 따라가고 있다. 전체적으로 실험치와는 다소 차이를 보이고 있으나, Watanabe의 경우와 같이 $\lambda/L=1$ 인 곳에서 경향의 차이를 보이고 있다.

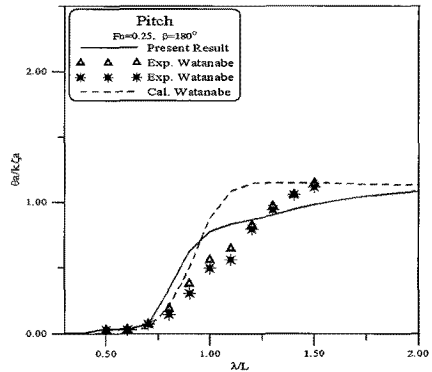


Fig. 4 Pitch motion

Fig. 5~7은 $\rho g L^2 B \zeta_a$ 로 무차원화한 수직굽힘모멘트를 보이고 있다. Watanabe의 계산값은 λ/L 이 1.0 근처에서 떨어지는 실험값과 차이를 보이는 반면 본 계산결과는 실험값과 잘 일치하고 있다.

Fig. 5는 선미쪽 Station No. 6에서의 수직굽힘모멘트를 보이고 있다. 실험값보다 큰 값을 보이지만, Watanabe의 계산값과 비교할 때 실험값의 경향을 잘 따르고 있음을 알 수 있다. Fig. 6은 Midship에서의 수직굽힘모멘트를 보이고 있다. Watanabe의 계산값에 비해 실험값과 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 7은 선수쪽 Station No. 15에서의 수직굽힘모멘트인데, Watanabe의 계산값과 본 계산결과들이 실험값보다 작게 나타남을 알 수 있다.

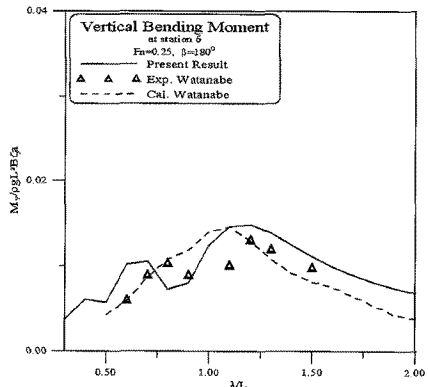


Fig. 5 Vertical bending moment at station No. 6

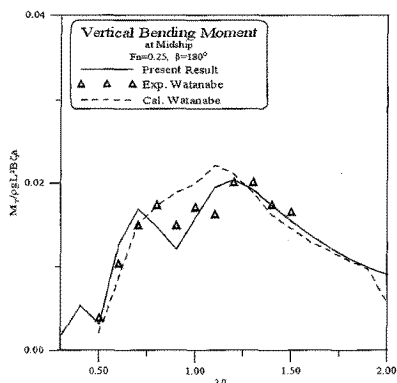


Fig. 6 Vertical bending moment at Midship

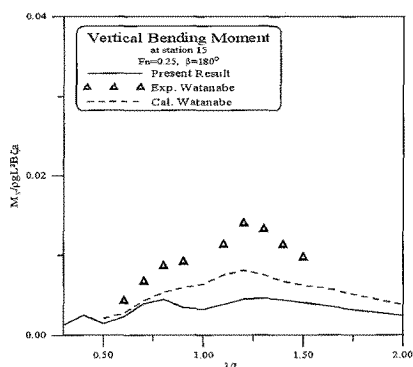


Fig. 7 Vertical bending moment at station No. 15

Watanabe의 모델은 강체에 가까운 강성을 가지므로 본 해석결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

4. 결론

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

- 1) Watanabe의 S175 컨테이너선 모델에 대한 실험치 및 계산치와 본 계산법에 의한 계산치를 서로 비교·검토한 결과 본 계산기법의 타당성이 검증되었다.
- 2) 본 계산결과는 실험값에서 보이는 이중 피크의 경향을 잘 추정함을 알 수 있다.
- 3) 통상의 선박은 강체에 가까운 강성을 가지므로 본 계산법에 의해 정도 좋게 추정할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 국가지정연구실사업

(ROA-2008-000-20069-0)의 지원으로 수행된 연구 결과임.

참 고 문 헌

1. Newman J. N., 1985, "Algorithms for the Free-Surface Green Function", Journal of Engineering Mathematics. Vol. 19, pp. 57~67.
2. Telste J. G. and Noblesse F., 1986, "Numerical Evaluation of the Green Function of Water-Wave Radiation and Diffraction", Journal of Ship Research, Vol. 30, No. 2, pp. 69~84.
3. Chan H. S., 1993, "Prediction of Motion and Wave Loads of Twin-hull Ships", Marine Structures, Vol. 6, pp. 75~102.
4. Fonseca C. and Guedes Soares C., 2004, "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.
5. Fonseca, C. and Guedes Soares, C., 2004, "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.
6. 이호영, 임춘규, 정형배, 2003, "파랑중 전진하는 선박의 유탄성 응답", 대한조선학회 논문집 제40권, 제4호, pp. 16~21.
7. Watanabe I., Ueno M. and Sawada H., 1989, "Effects of Bow Flare Shape to the Wave Loads of a container shp", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 166, pp. 259~266.