

## 파랑중 전진하는 선박의 유탄성 응답

이호영<sup>†\*</sup>, 임춘규<sup>\*\*</sup>, 정형배<sup>\*</sup>

목포대학교 선박해양시스템전공<sup>\*</sup>, 현대미포조선(주) 사업기획부<sup>\*\*</sup>

### Hydroelastic Responses for a Ship Advancing in Waves

Ho-Young Lee<sup>\*</sup>, Choon-Gyu Lim<sup>\*\*</sup> and Hyung-Bae Jung<sup>\*</sup>

Major in Naval Architectue and Marine Engineering, Mokpo National University<sup>\*</sup>  
Dep't of Project & Production Planning, Hyundai Mipo Dock Yard Co., Ltd<sup>\*\*</sup>

#### Abstract

The very large container ships have been built recently and those ships have very small structural rigidity compared with the other conventional ships. As a result, the destruction of ship hull is occurred by the springing including to warping phenomena due to encounter waves. In this study, the solutions of hydrodynamic coefficients are obtained by solving the three dimensional source distribution method and the forward speed Green function representing a translating and pulsating source potential for infinite water depth is used to calculating the integral equation. The vessel is longitudinally divided into various sections and the added mass, wave damping and wave exciting forces of each section is calculated by integrating the dynamic pressures over the mean wetted section surface. The equations for six degree freedom of motions is obtained for each section in the frequency domain and stiffness matrix is calculated by Euler beam theory. The computations are carried out for very large ship and effects of bending and torsional rigidity on the wave frequency and angle are investigated.

※Keywords: source distribution method(쏘오스 분포법), translating and pulsating Green function(전진하면서 동요하는 그린함수), springing(스프링잉), warping(휘틀림), hydroelastic response(유탄성 응답), bending moment(굽힘 모멘트)

#### 1. 서론

접수일: 2003년 6월 18일, 승인일: 2003년 7월 26일

† 주저자, E-mail : [ocean-ship@hanmail.net](mailto:ocean-ship@hanmail.net)

Tel : 011-9539-9930

최근에 10,000 TEU급 초대형 컨테이너선, 대형 쌍축 광폭 전흘수선 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이런 연구의 대부분은 선형개발에

집중되어 있고 이에 반해 파랑하중에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 이런 초대형선의 특성은 폭이 커지므로 GM 또한 커지고 횡운동의 고유주기가 짧아진다. 이런 특성 때문에 일반해상 상태에서 횡운동이 커진다. 또한 이런 선박은 다른 선박에 비해 상대적으로 굽힘 강성과 비틀림 강성이 작기 때문에 파랑 중에서 유탄성 운동을 하게 되고 결과적으로 워핑을 포함한 스프링잉에 대한 검증이 필요하다. 또한 기존의 선박에 사용된 선급규칙에 의한 구조설계가 이런 초대형선에 적용해서 과연 안전한가를 판단해야 하고, 안전하지 않으면 파랑하중 계산을 통해 구조설계를 수행하여야 한다. 특히 높은 주파수에서는 입사파고의 작더라도 굽힘 모멘트는 작아지지 않으며 결과적으로 선체의 갑판 등이 피로 파괴되는 경우가 종종 발생하는 것으로 알려져 있다. 이런 현상들은 선박을 강체로 취급한 기존의 이론을 사용하여 파랑중 하중을 계산하면 선박의 작은 강성에 의한 유탄성 운동 때문에 계산 정도가 떨어진다. 이전의 연구로 Chan(1993)은 3차원 패널법에 의한 동요하는 그린함수를 사용하고 선박을 강체로 취급하여 파랑하중을 계산하였다. 파랑하중에 대한 대부분의 계산은 스트립(strip) 방법을 사용하였는데 대표적인 연구자로 Troesch(1984)가 있다. 그는 스프링잉 현상을 해석하기 위해 스트립 방법과 실험을 통하여 연구하였다. 3차원 이론을 사용하여 전진속도가 없는 선박이나 해양구조물에 대한 유탄성 응답해석을 수행한 경우는 있으나 (Sief/Inoue 1998, 이호영 등, 2000), 전진속도가 있는 경우에 대하여 유탄성응답 해석을 수행한 논문은 찾아보기 힘든 실정이다. 이호영 등(2001)은 3차원 패널법과 전진하면서 동요하는 그린함수를 사용하여 스프링잉 현상을 해석하여 2절 진동이 일어나는 것을 보여주었다. 본 논문은 선박의 유탄성 응답 현상을 해석하기 위해 3차원 소오스 분포법을 사용하였고 그린함수는 전진하면서 동요하는 형태를 이용하였다. 방사문제는 선박을 여러 개의 물체로 나누어 물체간의 간섭효과를 고려하여 6자유도 강제동요와 관련된 부가질량 및 조파 감쇠계수를 계산하였고, 산란문제는 각 물체 별로 1차 파강제력을 구하였다. 운동 방정식은

선박의 각각의 물체 별로 6자유도 운동방정식을 구성하고 강성행렬은 보에 대한 6자유도 행렬식을 사용하였다. 계산 결과 파랑 중에 전진하는 선박의 각 단면에 대한 워핑을 포함한 스프링잉 현상을 해석하였고 향후 초대형 컨테이너선등의 굽힘 강성 및 비틀림 강성 결정 등의 기초자료로 활용될 것이다.

### 2. 문제의 정식화

선박은 입사파와 전진속도에 의해  $\omega$  주파수로 동요하고, 이상 유체 중에서  $U$  속도로 전진한다. 자유표면은 미소 진폭이므로 선형화되고 선박의 응답은 미소진폭의 조화 운동을 한다고 하자. Fig.1은 선박과 같이  $U$  속도로 전진하는 좌표계를 나타낸다. 좌표계의 원점은 선박의 중심위의 자유표면에 놓이며, 좌표계는  $z$ 축을 연직 상방으로 하는 우수좌표계이다.  $x$  축은 선수방향으로 향하며 파랑의 입사각( $\beta$ )이  $180^\circ$ 가 선수파이다.

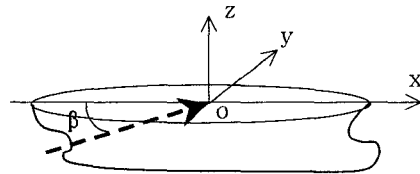


Fig. 1 Coordinate system

입사파, 산란파와 선박의 강제동요와 관련된 총 포텐셜  $\Phi(x,t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\Phi(x,t) = -Ux + [\zeta \sum_{l=1}^N (\phi_l^i + \phi_l^d) + \sum_{l=1}^N \sum_{j=1}^6 \xi_{lj}^i \phi_{lj}^i] e^{-i\omega t} \quad (1)$$

여기서  $\omega$ 는 만남 주파수이며, 선박을 총  $N$ 개의 여러 물체로 구성하였다. 물체  $l$ 에서  $\phi_l^i$ 는 입사파 포텐셜이며,  $\phi_l^d$ 는 산란포텐셜이며,  $\phi_{lj}^i$ 는 물체  $l$ 의  $j$ 번째 운동 모드의 방사포텐셜이다.  $\zeta$ 는 입사파의 진폭이며,  $\xi_{lj}^i$ 는 물체  $l$ 의  $j$ 번째 운동 모드의 진폭이다. 식(1)에서 방사포텐셜과 산란포텐셜은 다음과 같은 경계조건을 만족한다.

$$[(-i\omega - U \frac{\partial}{\partial x})^2 + g \frac{\partial}{\partial z}] \phi^l_j = 0 \quad \text{at } z=0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi^l_j}{\partial n} = -i\omega n^l_j + U m^l_j \quad \text{on } S^l \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi^l_d}{\partial n} = - \frac{\partial \phi^l_l}{\partial n} \quad \text{on } S^l \quad (4)$$

$$\frac{\partial \phi^l_j}{\partial n} = 0. \quad \text{at } z=-\infty \quad (5)$$

식(2),(5)에서 아래첨자  $j=1,2,\dots,6,d$ 이며, 식(3)에서  $j=1,2,\dots,6$ 이다.  $n^l_j$ 은  $\vec{n} = (n^l_1, n^l_2, n^l_3)$ 과  $(n^l_4, n^l_5, n^l_6) = \vec{r} \times \vec{n}$ 이다.  $\vec{n}$ 은 선체 표면에서 바깥으로 향하고  $\vec{r}$ 은 선체 표면의 위치벡터이다.  $m^l_j$ 는  $j$ 가 1,2,3,4일 경우 0이고,  $m^l_5 = n^l_3$ ,  $m^l_6 = -n^l_2$ 이다. 위의 경계치 문제를 풀기 위하여 라플라스 방정식, 식(2), 식(5) 및 방사조건을 만족하는 전진하면서 동요하는 그린(Green)함수를 도입하여 적분방정식을 구성하면 다음과 같다.

$$4\pi \phi^l_j(x) = \sum_{l=1}^N \iint_{S^l} \sigma(\xi) G(x, \xi) ds_\xi + \sum_{l=1}^N \frac{U^2}{g} \oint_C \sigma(\xi) G(x, \xi) n^l_j dy_\xi \quad (6)$$

$x$ 는 관측점이고  $\xi$ 는 소오스점이며,  $C^l$ 은 물체  $l$ 에서 수선을 나타낸다. 식(6)의 양변을 단위 법선 벡터  $n$ 으로 미분하여 식(3)과 (4)를 적용하면 소오스 세기  $\sigma(\xi)$ 가 구해지고 식(6)에다 다시 대입하면 각 물체에서 방사 및 산란 포텐셜을 구할 수 있다. 그린함수의 수치계산 방법은 이호영/영덕준(1994)을 참고하였다. 방사문제는 각각의 물체가 강제동요할 경우에 대하여 다른 물체의 영향 항수를 식(6)을 이용하여 계산하였다. 6자유도 강제동요와 관련된 부가질량, 조파 감쇠계수 및 파 강제력은 다음과 같다.

$$a^l_{jk} = - \frac{\rho}{\omega^2} Re \int \int_{S^l} (i\omega n^l_j + U m^l_j) \phi^l_k ds \quad (7)$$

$$b^l_{jk} = - \frac{\rho}{\omega} Im \int \int_{S^l} (i\omega n^l_j + U m^l_j) \phi^l_k ds \quad (8)$$

$$F^l_j = - \rho Re \int \int_{S^l} (i\omega n^l_j + U m^l_j) (\phi^l_j + \phi^l_d) ds \quad (9)$$

여기서,  $j, k=1,2,\dots,6$   
 $l, r=1,2,\dots,N$

선박의 파랑 중에서 선체를 탄성체로 고려한 운동 모드에 대한 응답을 해석하기 위해서 강성행렬은 오일러 보 이론을 사용하였고, 전단 변형의 효과는 무시하였다. 물체 사이의 거리를  $L$ 이라 할 때 다음과 같이 표현된다.

$$[K] = \begin{bmatrix} [K_{11}] & [K_{12}] \\ [K_{21}] & [K_{22}] \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서,

$$[K_{11}] = \begin{bmatrix} AE/L & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 12EI_y/L^3 & 0 & 0 & 0 & -6EI_z/L^2 \\ 0 & 0 & 12EI_z/L^3 & 0 & -6EI_y/L^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & GJ/L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -6EI_z/L^2 & 0 & 4EI_y/L & 0 \\ 0 & -6EI_y/L^2 & 0 & 0 & 0 & 4EI_z/L \end{bmatrix}$$

$$[K_{12}] = \begin{bmatrix} -AE/L & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -12EI_y/L^3 & 0 & 0 & 0 & -3EI_z/L \\ 0 & 0 & -12EI_z/L^3 & 0 & -6EI_y/L^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -GJ/L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6EI_z/L^2 & 0 & 2EI_y/L & 0 \\ 0 & 6EI_y/L^2 & 0 & 0 & 0 & 2EI_z/L \end{bmatrix}$$

$$[K_{21}] = \begin{bmatrix} -AE/L & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -12EI_y/L^3 & 0 & 0 & 0 & 6EI_z/L \\ 0 & 0 & -12EI_z/L^3 & 0 & 6EI_y/L^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -GJ/L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -6EI_z/L^2 & 0 & 2EI_y/L & 0 \\ 0 & -6EI_y/L^2 & 0 & 0 & 0 & 2EI_z/L \end{bmatrix}$$

$$[K_{22}] = \begin{bmatrix} AE/L & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 12EI_y/L^3 & 0 & 0 & 0 & 6EI_z/L^2 \\ 0 & 0 & 12EI_z/L^3 & 0 & 6EI_y/L^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & GJ/L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6EI_z/L^2 & 0 & 4EI_y/L & 0 \\ 0 & 6EI_y/L^2 & 0 & 0 & 0 & 4EI_z/L \end{bmatrix}$$

식(10)에서  $E, G$ 는 각각 보요소의 탄성계수, 비틀림 탄성계수이며,  $I_y, I_z$ 는 각각  $y$ 축 및  $z$ 축에 대한 단면 2차 모멘트이며,  $J$ 는 비틀림 모멘트이며,  $A$ 는 보요소의 단면적이다. 각 요소의 질량행렬은 각 요소의 부력으로부터 계산되며 각 물체의 관성 모멘트는 선박과 같은 방법으로 근사했다. 식(7)-(10)으로부터 각 물체에 대해 운동방정식을

구성하면 다음과 같다.

$$\sum_{r=1}^N \sum_{j=1}^6 [-\omega^2 (m_{jk}^{ln} + a_{jk}^{ln}) - i\omega b_{jk}^{ln} + (C_{jk}^{ln} + K_{jk}^{ln})] \xi_k^l = [F_j^l] \quad (11)$$

여기서  $j=1,2,\dots,6$ 이며,  $r=1,2,\dots,N$ 이다.  $m_{jk}^{ln}$ 은 질량행렬이며,  $a_{jk}^{ln}$ 은 부가질량 행렬이며,  $b_{jk}^{ln}$ 은 조파감쇠 행렬이며,  $C_{jk}^{ln}$ 은 정복원력 행렬이며,  $K_{jk}^{ln}$ 은 강성행렬이며,  $F_j^l$ 는 파강제력 행렬이다.

### 3. 계산결과 및 고찰

본 논문에서 계산을 수행한 선박은 쌍축 광폭천후수선이며, 길이 320m, 폭 70m, 흘수 8.5m, 깊이 25.6m인 선박이다. 본 연구에서 선박을 총 23개의 단면(station)으로 나누고 총 패널 수는 210개로 분할하였다. 기본적인 계산조건은 선속 22kts에서 발라스트상태일 때 파입사각과 만남 주파수를 변화시키면서 계산을 수행하였다. 굽힘모멘트는  $\rho L^2 B \xi$ 로 무차원화 하였으며, 운동 응답은 입사파 진폭  $\zeta$ 로 나누었다. steel의 탄성 계수(E)는  $2.1 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$ 이며, 비틀림 계수(G)는  $8.1 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$ 이다. 중앙단면에서 물체의 EA값은  $5.09 \times 10^{10} \text{kg}$ 이며,  $EI_y$ 는  $3.8 \times 10^{13} \text{kgm}^2$ ,  $EI_z$ 는  $4.27 \times 10^{12} \text{kgm}^2$ , GJ는  $2.6 \times 10^6 \text{kgm}^2$ 이다. 이는 두께 2cm 인 외판에 대해 윗부분이 열려 있는 개구부를 갖는 선박에 대한 계산 값이며, 선박의 시어(shear) 중심은 무게중심에서 4.6m 아래에 위치한다. Fig.2는 길이에 따른 각 물체별로 EA,  $EI_y$ ,  $EI_z$ , GJ값을 중앙단면의 물체의 값으로 무차원화한 값을 보여주고 있다. Fig.3-6은 파 입사각에 따른 선박의 각 요소의 전후운동, 좌우운동, 상하운동 및 횡운동을 도시하였다. 상하운동은 2절 진동이 보이거나 좌우운동은 2절 진동현상이 보이지 않는다. Fig.7-10은 선박의 중앙으로부터 선수쪽으로 8m 위치에서 주파수와 파 입사각에 따른 전후운동, 좌우운동, 상하운동 및 횡운동을 보여주고 있다. 특이한 점은 상하운동과 횡운동에서 강성이 작기 때문에 상하운동은 고주파수에서도 스프링잉에 의해 운동이 크고 상당히 저주파수에서 스프링잉이 일어나며 저주파수에서 운동이 1로 접근

하지 않는다. 이는 강성이 커지면 응답이 1로 접근하는 것을 Fig.11의 계산에서 확인하였다. 횡운동은 공진 주파수에서 파입사각 90deg의 경우에 0.25rad 정도의 큰 값이 계산된다. 이는 비틀림 강성이 아주 작는데 기인하며, 횡운동에 대한 점성 감쇠계수와 구조감쇠계수를 무시한 영향도 횡운동을 크게 한다.

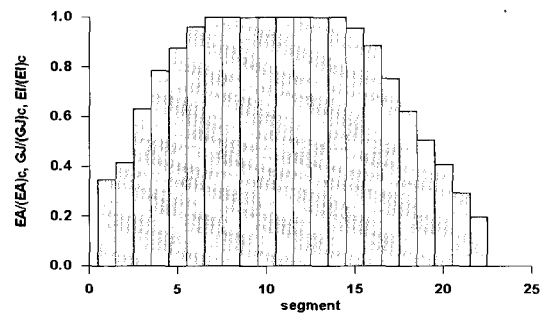


Fig. 2 Rigidities along segments of ship

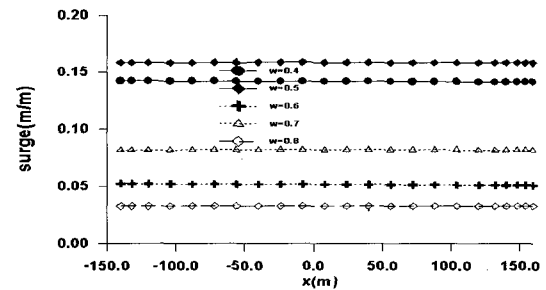


Fig. 3 Surge responses along segments of ship( $\beta=150\text{deg}$ )

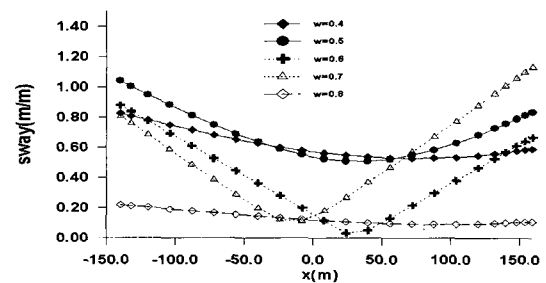


Fig. 4 Sway responses along segments of ship( $\beta=120\text{deg}$ )

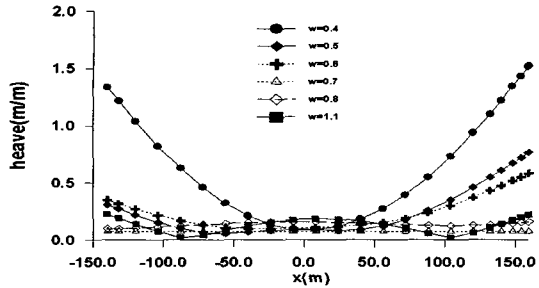


Fig. 5 Heave responses along segments of ship( $\beta=180\text{deg}$ )

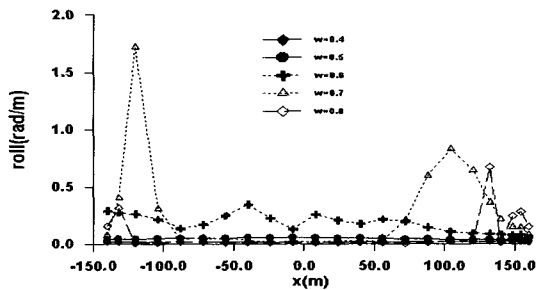


Fig. 6 Roll responses along segments of ship( $\beta=90\text{deg}$ )

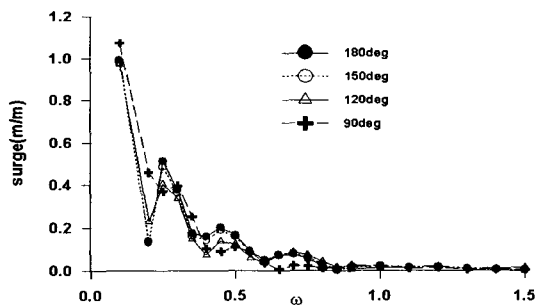


Fig. 7 Surge responses( $x=8\text{m}$ )

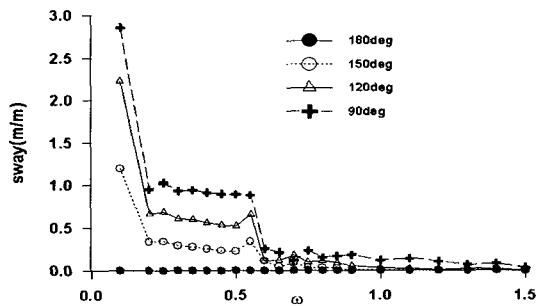


Fig. 8 Sway responses( $x=8\text{m}$ )

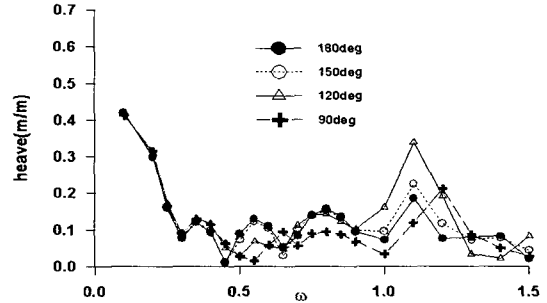


Fig. 9 Heave responses( $x=8\text{m}$ )

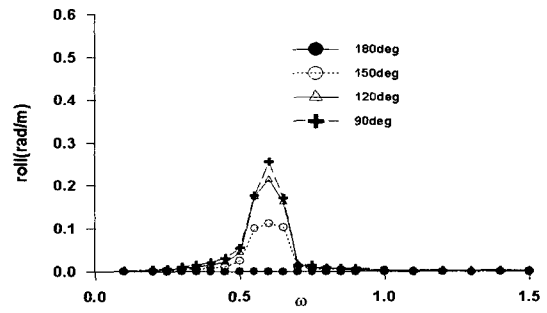


Fig. 10 Roll responses( $x=8\text{m}$ )

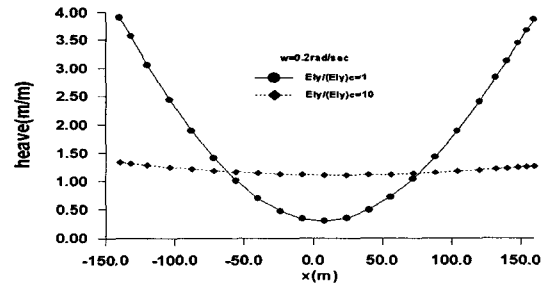


Fig. 11 Heave responses along segments of ship( $\beta=180\text{deg}$ )

Fig.12-14는 y, z축에 대한 굽힘 모멘트와 비틀림 모멘트를 도시하였다. My값이 Mz값보다 10배 정도 크고 Mz 값은  $\omega=0.6\text{rad/sec}$ 에서 값이 가장 크며, My값은 가장 작은 주파수에서 굽힘모멘트가 가장 크다. 비틀림 모멘트는 공진 주파수에서 값이 가장 큰 것으로 나타났다. My값은  $\omega=1.1\text{rad/sec}$ 에서 가장 큰 스프링잉이 일어나는데 그 때의 값은  $\omega=0.6\text{rad/sec}$ 에서 My값보다 크다.

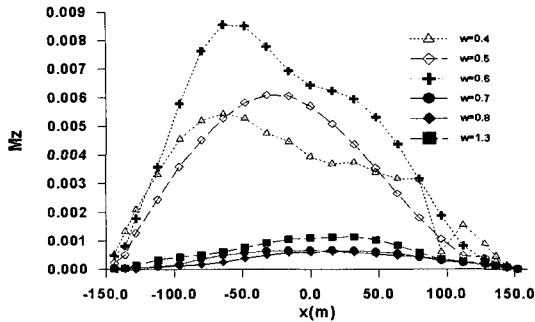


Fig. 12 Bending moment for z-axis ( $\beta=90\text{deg}$ )

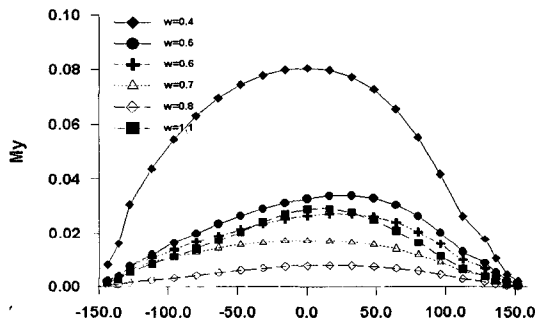


Fig. 13 Bending moment for y-axis ( $\beta=180\text{deg}$ )

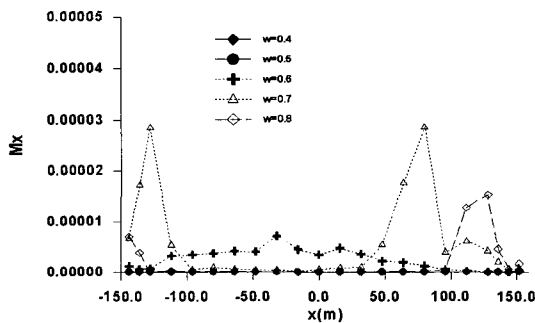


Fig. 14 Torsional moment for x-axis ( $\beta=90\text{deg}$ )

4. 결론

본 논문은 초대형 컨테이너운반선과 같은 선박이 파랑 중에서 전진하며 운동하는 경우에 선박의 전진속도, 선박의 유탄성 및 3차원 효과를 포함하여

파랑하중을 계산하였다.

(1) 본 방법은 선박의 각 요소에서 6자유도 운동을 해석하는 유탄성 해석법이므로 스프링잉과 워핑 등의 계산에서 구조설계시 기초자료로 활용될 것이라 생각된다.

(2) 유탄성 응답 해석결과 y축에 대한 굽힘 모멘트는 값이 크며 상대적으로 z축에 대한 굽힘 모멘트 값은 이에 비해 훨씬 작게 계산되었다.

(3) 비틀림 강성이 작은 경우 선박의 선수 및 선미 쪽 부근의 요소에서 공진점 부근의 횡운동이 상당히 크게 계산되었다.

(4) 앞으로 파랑제력의 계산시 2차항 파랑제력을 포함시켜야 하며, 구조감쇠계수에 관한 연구도 좀 더 체계적으로 수행되어야 할 것 같다.

참 고 문 헌

- 이호영, 염덕준 1994 “파랑 중에 전진동요하는 선박의 특이파수 억제에 관한 연구,” 대한조선학회 논문집, 제31권 제4호, pp. 73-81
- 이호영 등 2000 “압력분포법에 의한 초대형 부유식 해양구조물의 유탄성 해석,” 대한조선학회 논문집, 제37권 제4호, pp. 66-74
- 이호영 등 2001 “파랑 중에 전진하는 선박에 대한 스프링잉 현상 해석,” 대한조선학회 논문집, 제38권 제3호, pp. 41-46
- Troesch, A.W. 1984 “Wave-Induced Hull Vibration : An Experimental and Theoretical Study,” J. of Ship Research, Vol. 28, No.2
- Chan, H.S 1993 “Prediction of Motion and Wave Loads of Twin-Hull Ships,” J. of Marine Structures, Vol.6, pp. 75-102.
- Sief, M.S and Inoue, Y. 1998 “Dynamic Analysis of Floating Bridges,” J. of Marine Structures, Vol.6, pp. 29-46.



< 이 호 영 >



< 임 준 규 >



< 정 형 배 >