

## 천흘수 광폭선의 스프링잉 응답 해석

정종진<sup>\*,</sup>, 박인규<sup>\*</sup>

현대중공업 선박해양연구소<sup>\*</sup>

On the Springing Response of Ships with Shallow Draft and Large Breadth

Jong-Jin Jung<sup>\*</sup> and In-Kyu Park<sup>\*</sup>

Hyundai Heavy Industries Co., Ltd, Maritime Research Institute<sup>\*</sup>

### Abstract

This paper describes the estimation method of hull girder response of ships due to springing. To this aim, nonlinear springing effect on the hull girder is evaluated including vertical, horizontal, and torsional deformation of the hull. The Timoshenko beam model is used to calculate the stress distribution on the hull girder. The quadratic strip method is employed to calculate the hydrodynamic forces and moments on the hull. In order to remove the irregular frequencies, 'rigid lid' is adopted on the hull free surface level and hydrodynamic coefficients are interpolated for asymptotic values. The results of example calculation show a reasonable agreement with previous results for both symmetric and anti-symmetric responses.

※Keywords: Springing(스프링잉), Hydro-elastic Behavior(유탄성 거동), Timoshenko Beam(Timoshenko 보), Quadratic Strip Method(2차 스트립방법), Irregular Frequency(특이파수)

### 1. 서론

최근의 선박은 점점 대형화 되는데 비하여 경하 중량은 상대적으로 가벼워지는 추세에 있으며, 또한 천흘수 광폭의 특징을 가지는 선박들은 좀 더 유연해져서 굽힘 및 비틀 강성은 작아지게 된다.

이러한 선박들은 스프링잉(springing)이나 휘핑

(whipping) 등에 의한 피로 손상 가능성이 높아지므로 파랑에 대한 굽힘 모멘트, 전단력, 그리고 비틀 모멘트 등을 정확히 평가하는 것이 중요해진다(박성환 등 2000, 이호영 등 2001, 2003). 스프링잉은 선체의 고유 주파수와 입사파의 조우 주파수가 서로 일치하여 나타나는 공진 현상으로 입사파가 크지 않아도 커다란 응답이 발생할 수 있다. 스프링잉은 선형뿐 아니라 비선형 파랑 하중에 의해서도 기인될 수 있다. 비선형 선체 응답은 입사파 간의 합주파수 성분으로부터 발생되고 선체가 유연해 질수록 중요하게 된다. 또한 굽힘 응답과

접수일: 2003년 11월 3일, 승인일: 2004년 1월 15일

†주저자, E-mail: jjjung@hhi.co.kr

Tel: 052-230-5545

비틀 응답의 연성 효과는 선체의 피로 손상을 증진시킬 수 있다.

1960 대 이후 스프링잉 현상이 실제 운항 중인 선박에서 발생할 수 있음이 관측되기 시작하였으며 오대호 지방의 Great Lakes 산적 화물선 (Stiansen et al. 1978)에서 그예를 찾아볼 수 있다.

스프링잉 응답에 대한 계산은 대부분 선형 스트립 이론(Hoffman/van Hoof 1976)에 의해 계산 되었으며, 자유 표면 및 물체 경계 조건에서 기인하는 비선형 문제를 고려하는 스프링잉 응답은 Jensen/Pedersen(1981) 등에 의해 연구되었다.

최근까지의 연구들은 선체의 상하 진동에 집중되어 왔으나 굽힘 및 비틀 강성이 약한 광폭 천출 수 선의 경우 여러 가지 진동 형태를 고려해야 한다. 최근의 컨테이너선 또한 대형화 추세가 진행되고 있으며 갑판상의 큰 해치 opening 으로 인하여 비틀림에 대한 강성이 저하될 우려가 있다. 이러한 선박들은 수평 굽힘 및 비틀 모멘트의 연성에 의한 응력과 수직 굽힘 모멘트에 의한 응력이 동시에 발생하는 경우에도 대비할 필요가 있다 (Jung et al. 2003).

본 논문에서는 파랑 중에 전진하는 선박의 스프링잉 응답을 평가하는 방법에 대해 기술하고자 한다. 선체의 비선형 응답과 비틀 진동을 포함하여 정식화 및 계산을 수행하였다. Quadratic strip method 를 적용하여 선체에 작용하는 유체동력학적 하중을 계산하였고, 선체의 구조 응답을 구하기 위해서는 Timoshenko 보 모델을 사용하였다. 특이파수를 제거하기 위해 rigid lid 와 점근 근사 방법을 도입하였다. 계산 예로는 Bishop/Price(1979)의 결과가 있는 컨테이너 선을 택하였으나 개발된 해석 모델은 어떤 선종에도 적용이 가능하다.

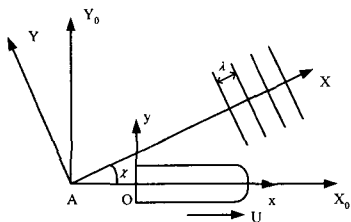


Fig. 1 Global coordinate system

## 2. Quadratic Strip Theory

Fig. 1 과 같이 선박은 파랑 중에서 고정 좌표계  $A-X_0$  를 따라 속도  $U$  로 전진한다.

### 2.1 Froude-Krylov forces

파랑에 대해 미소 진폭 ( $Ak \ll 1$ ) 을 가정하면 섭동법에 의해 다음과 같이 2 차항까지의 파랑 진폭을 얻을 수 있다.

$$\zeta(X, t) = A \cos \theta + \frac{1}{2} A^2 k \cos 2\theta + \dots \quad (1)$$

여기서  $A$  는 파랑 진폭,  $k$  는 파수,  $\theta = kX - \omega_0 t$ ,  $X = x \cos \chi + y \sin \chi + Ut \cos \chi$  이다.

파랑의 2 차항까지의 압력은 다음과 같다.

$$p(X, z, t) = -\rho g z + \rho g A e^{kz} \cos \theta - \frac{1}{2} \rho g A^2 k e^{2kz} + \dots \quad (2)$$

여기서  $\rho$  는 물의 밀도이다.

선체의 각 단면은 Fig. 2 와 같이  $yz$  평면 상에서 상하, 좌우, 그리고 횡 운동을 한다.

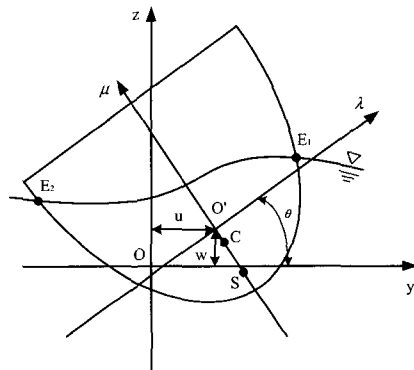


Fig. 2 Local coordinate system of section

식 (1)~(2)에서 국부 좌표계  $O'\lambda\mu$  내에서의 2 차항 유체동력학적 압력 분포를 얻을 수 있다.

$$p = p_0(\lambda, \mu) + p_1(\lambda, \mu) + p_2(\lambda, \mu) + O(\rho g A [Ak]^2) \quad (3)$$

여기서  $p_0(\lambda, \mu) = -\rho g \cos \theta(x, t)$

$$p_1(\lambda, \mu) = -\rho g [w(x, t) + \lambda \sin \theta - Ae^{k\mu} \cos(\Psi + k_s \lambda)]$$

$$p_2(\lambda, \mu) = -\rho g Ak [w(x, t) + \lambda \sin \theta] e^{k\mu} \cos(\Psi + k_s \lambda) - \rho g Ak_s [u(x, t) - \mu \sin \theta] e^{k\mu} \sin(\Psi + k_s \lambda) - \frac{1}{2} \rho g A^2 k e^{2k\mu}$$

$$\Psi = k_c x - \omega_e t$$

$$k_c = k \cos \chi, \quad k_s = k \sin \chi, \quad \omega_e = \omega_o - kU \cos \chi$$

수직 및 수평 그리고 비틀림에 대한 Froude-Krylov 하중은 (3)을 이용하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_z(x, t) = F_\mu(x, t) \cos \theta + F_\lambda(x, t) \sin \theta = F_z^{static}(x) + F_z^{FK}(x, t) \quad (4)$$

$$F_y(x, t) = F_\lambda(x, t) \cos \theta - F_\mu(x, t) \sin \theta = F_y^{FK}(x, t) \quad (5)$$

$$M_x(x, t) = \frac{1}{2} \int_{E_2}^{E_1} p(\lambda, G(\lambda, x), x, t) d(\lambda^2 + \mu^2) = K^{FK}(x, t) + z_c F_y(x, t) \quad (6)$$

여기서

$$F_\mu(x, t) = \int_{E_2}^{E_1} p(\lambda, G(\lambda, x), x, t) d\lambda$$

$$F_\lambda(x, t) = - \int_{E_2}^{E_1} p(\lambda, G(\lambda, x), x, t) d\mu$$

### 2.2 Radiation and Diffraction Forces

방사 및 산란에 대한 2 차항 수직 하중은 다음과 같으며 수평 및 비틀림 하중도 유사한 형태이다.

$$F_z^D(x, t) = -\Re \left\{ \frac{D}{Dt} \left[ \left( \begin{matrix} m_{zz}(x, \bar{z}, \bar{\varphi}, \omega_e) \\ + \frac{i}{\omega_e} N_{zz}(x, \bar{z}, \bar{\varphi}, \omega_e) \end{matrix} \right) \frac{D\bar{z}}{Dt} \right] \right\} - \Re \left\{ \frac{D}{Dt} \left[ \left( \begin{matrix} m_{zy}(x, \bar{z}, \bar{\varphi}, \omega_e) \\ + \frac{i}{\omega_e} N_{zy}(x, \bar{z}, \bar{\varphi}, \omega_e) \end{matrix} \right) \frac{D\bar{y}}{Dt} \right] \right\} - \Re \left\{ \frac{D}{Dt} \left[ \left( \begin{matrix} m_{z\varphi}(x, \bar{z}, \bar{\varphi}, \omega_e) \\ + \frac{i}{\omega_e} N_{z\varphi}(x, \bar{z}, \bar{\varphi}, \omega_e) \end{matrix} \right) \frac{D\bar{\Phi}}{Dt} \right] \right\} \quad (7)$$

### 2.3 Extended Boundary Integral Equation

부가 질량 및 감쇄를 결정하기 위해 다음과 같이 방사 포텐셜을 계산해야 한다.

$$\varphi_j(y, z) = \int_{S_b \cup S_i} \sigma_j(\xi, \eta) G(y, z; \xi, \eta) ds \quad (8)$$

적분 구간은 물체 표면  $S_b$  와 가상적인 경계  $S_i$  이다. 추가적인 적분 구간(rigid lid 요소)은 특이파수를 제거하기 위하여 도입되었고 내부의 자유 표면 위에 위치한다(이호영/염덕준 1994, 홍도천 1987, Lee et al. 1996). 소스의 세기는 다음을 통해 얻을 수 있다.

$$\pi \sigma_j(y, z) - \int_{S_b} \sigma_j(\xi, \eta) \frac{\partial G}{\partial n} ds - \int_{S_i} \sigma_j(\xi, \eta) \frac{\partial G}{\partial n} ds = n_j \quad (y, z) \in S_b \quad (9)$$

$$-2\pi \sigma_j(y, z) - \int_{S_b} \sigma_j(\xi, \eta) \frac{\partial G}{\partial n} ds - \int_{S_i} \sigma_j(\xi, \eta) \frac{\partial G}{\partial n} ds = n_j \quad (y, z) \in S_i \quad (10)$$

여기서 사용된 그린 함수는 다음과 같다 (Eatock /Hu 1991).

$$G(y, z; \xi, \eta) = \ln \frac{r}{\eta} - 2\Re [e^z E_1(Z)] - 2i\pi \exp[\nu(z + \eta + i|y - \xi|)] \quad (11)$$

선체의 구조 응답을 구하기 위해서 Timoshenko 보를 도입하였다. 경계 조건에 대한 보의 미분 방정식은 superposition 기법과 4 차 Runge-Kutta 방법을 도입하여 풀었다.

### 3. 수치 계산

개발된 해석 모델의 비교 및 검증을 위해서 컨테이너 선(Bishop/Price 1979)에 대해 계산을 수행하였다. 주요 치수는 Table 1 과 같다.

Table 1 Main dimensions

Length overall	287.75 m
Length at waterline(approx.)	281.00 m
Breadth moulded	32.26 m
Draught loaded	12.20 m
Displacement loaded	67,150 ton
Advancing speed	13.38 m/s

3.1 부가 질량과 감쇄 계수

부가 질량과 감쇄 계수의 계산에 대해 Fig. 3 과 같이 비교 검증하였으며 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다(Nestgard/Sclavounos 1984).

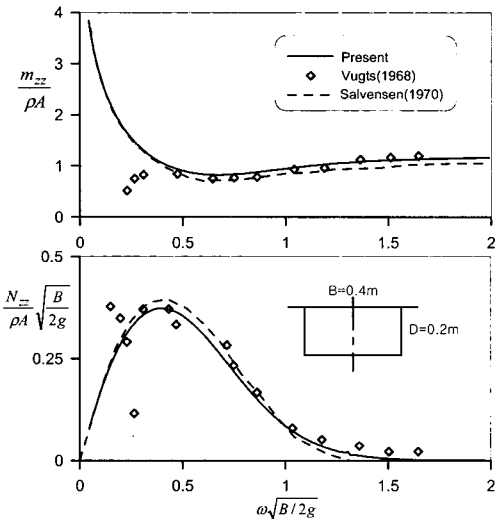


Fig. 3 Comparison of added mass( $m_{zz}$ ) and damping coefficients( $N_{zz}$ )

실선에 적용할 경우에는 특이파수를 제거하기 위해서 2.3 절에서 언급한 바와 같이 확장된 경계 적분 방정식을 사용하였다. Fig. 4는 rigid lid 요소 (내부의 자유 표면 위에 존재하는 패널)를 사용하지 않을 때와 3 및 7 개를 사용하였을 때의 좌우-횡 연성된 운동의 부가 질량을 보여준다. 저주파수 영역에서 발생하는 특이파수를 제거하기 위해서는 적은 수의 rigid lid 로도 가능하지만 고주파수 영역에서까지 발생하는 특이파수를 제거하기 위해

서는 좀 더 많은 수의 rigid lid 를 사용하여야 한다. 그러나 rigid lid 의 갯수가 어느 이상이 되면 계산 시간 및 제거의 한계 등으로 비효율적이 되므로 least square 방식에 의한 점근 전개를 통해서 부가 질량 및 감쇄 계수의 계산을 고주파수 영역에서 추가로 개선하였다(Fig. 4 하단 그림 참조).

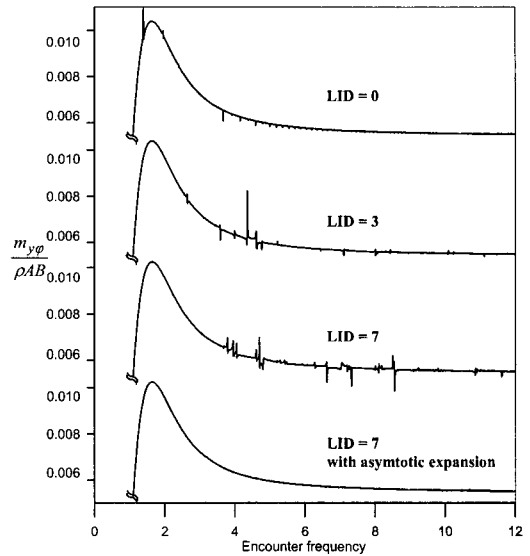


Fig. 4 Added mass ( $m_{y\phi}$ )

3.2 응답 결과

Fig. 5~7 은 입사각 135°에 대한 수직 굽힘, 수평 굽힘, 그리고 비틀림 모멘트의 선형 결과값을, 그리고 Fig. 8~9 는 2 차항만의 결과값을 보여준다.

Fig. 5 에서는 수직 굽힘 모멘트에 대해서 SOST 프로그램(Jensen/Pedersen 1981)의 계산값과 비교하였다. 첫 번째 피크값은 입사파에 의한 것이고, 두 번째 피크값은 스프링잉에 의한 것이다. 피크의 위치 및 크기는 어느 정도 일치하고 있으나 두 번째 피크의 폭에서 차이를 보이고 있다.

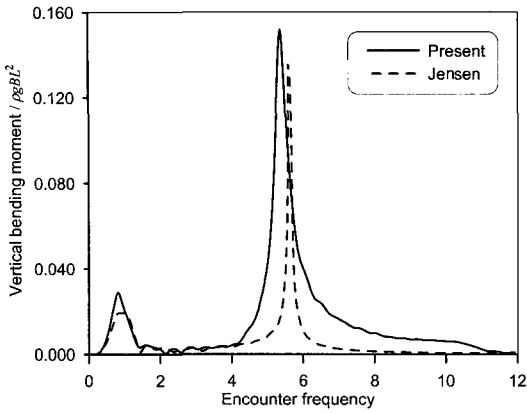


Fig. 5 Vertical bending moment (heading angle 135)

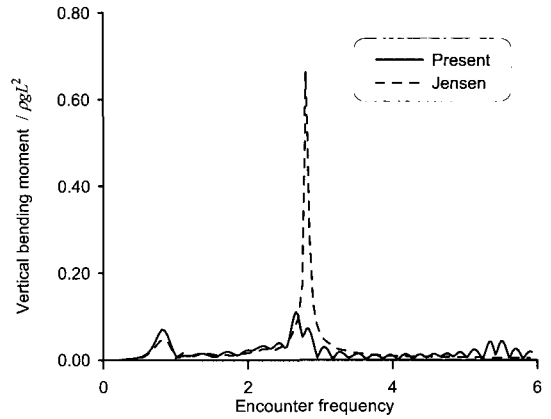


Fig. 8 Quadratic vertical bending moment (heading angle 135)

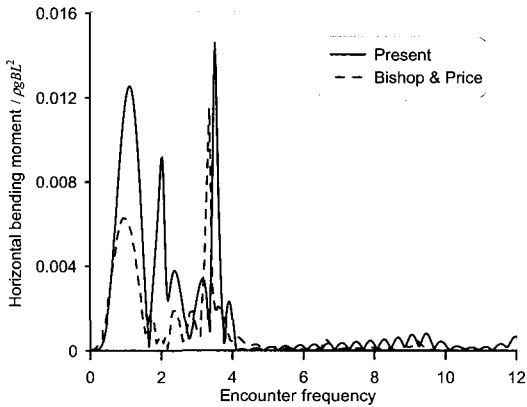


Fig. 6 Horizontal bending moment (heading angle 135)

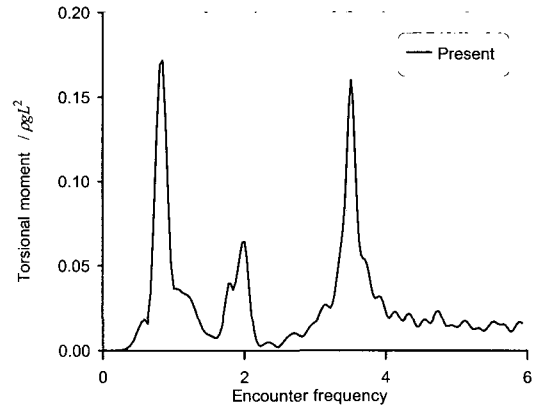


Fig. 9 Quadratic torsional moment (heading angle 135)

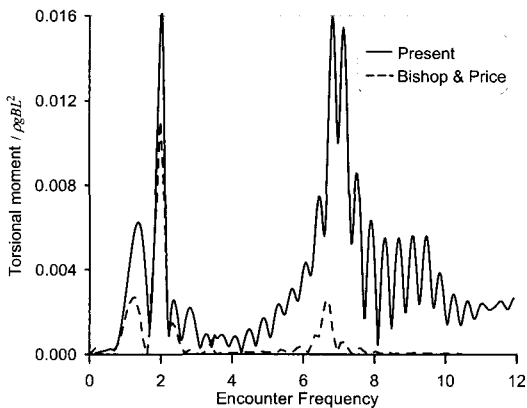


Fig. 7 Torsional moment (heading angle 135)

Fig. 6~7 에서는 수평 굽힘 및 비틀 모멘트에 대해서 Bishop/Price(1979)의 계산값과 비교하였다. 피크의 위치는 비교적 일치하나 크기에서 차이를 보이고 있다. 이러한 차이는 채용된 수치 해석 기법이 서로 다른 것에 따른 것으로 보인다.

Fig. 8 에서는 2 차항만의 굽힘 모멘트 결과값을 SOST 와 비교하였고, 피크의 주파수 위치가 선형 응답의 주파수에서 1/2 줄어든 곳에 위치함을 알 수 있다. 첫번째 피크값은 잘 일치하나 두번째 피크값은 차이를 보이고 있어 문헌조사 등을 통한 추가적인 검증작업이 요구된다.

Fig. 9 은 2 차항만의 비틀 모멘트 결과값을 보여준다. 2 차항 비틀 모멘트와 관련한 비교 자료가

없어 역시 추가적인 검증 작업이 요구된다.

계산 결과를 통해서 스프링잉에 대한 2 차항의 영향도 중요함을 알 수 있다.

#### 4. 결론

지금까지의 연구를 통하여 스프링잉 해석법을 개발하였으며 그 특징은 다음과 같다.

1) 계산 시간에서 효율적인 2-D 스트립방법을 도입하여 초기 설계 단계에서 선체에 대한 스프링잉 응답을 예측할 수 있는 도구를 마련하였다.

2) 'Rigid lid' 와 점근 근사 기법을 통해 12rad/sec 까지의 높은 주파수 영역에서도 특이파수를 제거할 수 있었다.

3) 2 차항 스트립 방법을 수평 및 비틀 응답에 까지 확장하였다.

4) 수치 계산의 비교를 통하여 개발된 해석모델의 유용성을 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

- 박성환, 이근배, 임채환, 2000, " 슬래밍 충격 하중을 고려한 선체 휘핑 해석," 대한조선학회 논문집, 제 37 권, 제 3 호, pp. 99-109.
- 이호영, 신현경, 박홍식, 박종환, 2001, " 파랑중에 전진하는 선박에 대한 스프링잉 현상 해석," 대한조선학회 논문집, 제 38 권, 제 3 호, pp. 41-46.
- 이호영, 임춘규, 정형배, 2003, " 파랑중 전진하는 선박의 유탄성 응답," 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 426-431.
- 이호영, 염덕준, 1994, " 파랑중에서 전진동요하는 선박의 특이파수 억제에 관한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 31 권, 제 4 호, pp. 73-81.
- 홍도천, 1987, " On the Improved Green Integral Equation applied to the Water-wave Radiation-Diffraction Problem," 대한조선학회 지 제 24 권, 제 1 호, pp. 1-8.
- Bishop, R. and Price, W.G., 1979, Hydroelasticity of Ships, Cambridge University Press, Cambridge.

- Eatock, T. and Hu, C.S., 1991, " Multipole Expansions for wave diffraction and radiation in deep water," Ocean Engng., Vol. 18, No. 3, pp. 191-224.
- Hoffman, D. and Van Hoof, R., 1976, Experimental and Theoretical Evaluation of Springing on a Great Lakes Bulk Carrier, U.S. Coast Guard Report CG-D-74.
- Jensen, J.J. and Pedersen, P.T., 1981, " Bending Moments and Shear Forces in Ships Sailing in Irregular Waves," J. Ship Research, Vol. 25, No. 4, pp. 543-251.
- Jung, J.J., Park, Y.,K.,Shin, H.S., Park, I.K., and Korobkin, A., 2003, " An Estimation of Hull Girder Response due to Wave Excitation," Proc. ISOPE-2003 Honolulu.
- Lee, C.H., Newman, J. N. and Zhu, X., 1996, " An extended boundary integral equation method for the removal of irregular frequency effects," Int J for Numerical Methods in Fluids, Vol. 23, pp. 637-660.
- Nestergard, A. and Sclavounos, P.D., 1984, " A Numerical solution of two-dimensional deep water wave-body problems," J. Ship Research, Vol. 28, No. 1, pp. 48-54.
- Stiansen, A. E., Mansour, A. and Chen, Y.N., 1978, " Dynamic Response of Large Great Lakes Bulk Carriers to Wave-Excited Loads," Trans. SNAME, Vol. 85, pp. 174-208.



< 정 종 진 >



< 박 인 규 >