대한조선학회논문집
Journal of the Society of Naval Architects of Korea
Vol. 49, No. 2, pp. 109-115, April 2012
http://dx.doi.org/10.3744/SNAK.2012.49.2.109

# 모멘텀 슬래밍을 고려한 선체 운동 및 파랑하중 해석

황지희[1] · 박인규[1] · 구원철[1,†]
울산대학교 조선해양공학부[1]

# Numerical Analysis of Ship Motions and Wave Loads Including Momentum Slamming

Ji-Hee Hwang[1] · In-Kyu Park[1] · Weon-Cheol Koo[1,†]
School of Naval Architecture and Ocean Engineering University of Ulsan, Korea[1]

## Abstract

Slamming phenomenon may occur when a ship navigates a high sea region, where the response of ship can be expected as elastic behaviour and the resultant wave loads may increase. In this paper, numerical analysis of ship motions and wave loads including momentum slamming was performed using the strip theory with regular waves. In order to analyze the effect of slamming force on the global ship motions, time histories of each mode of displacement and forces were simulated by using Newmark-beta time integration scheme. The added mass and damping coefficients calculated by Lewis form method were compared with the results of given references. For verification of numerical results, the motion RAOs of a S175 containership were calculated as an example of application and time histories of respective displacement and vertical bending moment were compared with the results of ITTC workshop benchmark test.

**Keywords :** Momentum slamming(모멘텀 슬래밍), Vertical bending moment(수직 굽힘 모멘트), Equation of vibration(진동방정식), Elastic body(탄성체), S175 containership(S175 컨테이너선), Strip theory(스트립 이론)

## 1. 서 론

높은 파도가 발생하는 해역을 항해하는 선박은 여러 위험한 상황에 노출되는데 그중에는 입사파와 선체간의 극심한 상대 운동으로 인한 선체 하부의 수면 밖 노출과 재입수의 반복현상인 슬래밍(slamming)이 있다. 이는 선체의 재 입수시에 선체 하부(bottom) 또는 플래어(flare)에서 받는 충격하중으로, 선체 구조에 무시할 수 없는 영향을 준다. 최근 들어 선박의 크기가 대형화되어 post-panamax 형 컨테이너선이 출현함에 따라 대파고시의 sagging 모멘트가 현저히 증가하게 되었다. 또한 컨테이너가 12,000 TEU 를 넘어 18,000 TEU 까지 대형화됨에 따라 선수부 플래어 각이 50~60도에 이르게 되어 심각한 선수부 플래어 슬래밍(bow flare slamming)현상을 예상할 수 있다. 따라서 이러한 현상들을 고려한 대형선의 최적 설계는 매우 중요한 과제가 되었다.

본 논문에서는 선박이 높은 파도 중을 항해할 때 선체의 선수부 혹은 선미부에 작용하는 파랑 충격 하중을 모멘텀 슬래밍(momentum slamming) 기법으로 고려하여 선박의 강체(rigid body) 운동과 탄성체(elastic body)운동을 계산하고 기존 결과들과 비교하여 해석의 정확성과 차후 대형 선박 최적설계에 반영할 수 있는 기초적인 연구를 수행하였다.

모멘텀 슬래밍을 고려한 선체운동에 관한 연구는 Yamamoto, et al. (1979)에 의해 처음으로 시도되었는데, S-175 컨테이너선을 탄성체로 간주하여 비선형 파랑하중을 계산하고 이를 강체의 경우와 비교하여 그 차이가 큼을 확인하였다. 또한 이와 같은 결과를 탄성모형(formed vinyl chloride)을 사용하여 자항시험을 통해 검증하였다. Yoon (1989)도 위와 동일한 조건으로 유한요소법을 적용한 수치 계산을 수행하였다. 최근에 Kim (2005)은 슬래밍 현상을 사례별로 분류하고 이를 실선 설계에 반영하기 위한 일련의 산학공동연구를 수행하여 그 결과를 한국선급(KR) 규칙에 반영하였다. 또한, Cho, et al. (2005)은 선체를 비균일 Timoshenko 보로 가정하여 수직방향의 강체운동과 탄성운동을 모두 포함하는 유탄성 방정식을 풀어 시간영역에서 선체의 비선형 운동응답과 하중을 구하였다. Park (2006)은 선체에 미치는 비선형 힘을 성분별로 나누어 각 성분이 선체 응답에 기여하는 영향을 비교하여 대파고의 규칙파 중에서 선체응답과 하중을 계산하였다.

본 논문에서는 선체를 Bernoulli-Euler 탄성보로 간주하고 스트립 이론(strip theory)을 적용한 모멘텀 슬래밍 이론에 의한 충격력과 비선형 Froude-Krilov 힘을 포함한 진동방정식을 시간 영역에서 계산함으로써 선체의 비선형 파랑하중을 구하였다. 시간 영역계산을 위한 시간 적분은 Newmark-beta 법을 이용하였다. 각

접수일 : 2011년 9월 22일 | 1차 수정일 : 2011년 12월 19일 | 게재확정일 : 2012년 1월 19일
† 교신저자 : wckoo@ulsan.ac.kr, 052-259-2767

입사 주파수에 따른 동유체력 계수들의 계산을 위해, 매 시간 변화하는 선체 단면 형상에 따라 계산이 매우 간편한 Lewis form method를 이용하였다. 부가질량과 감쇠계수의 검증을 위해 반원형 단면 및 직사각형 단면에 대한 계산 결과를 Ursell (1948) 및 Frank (1968)의 결과와 비교하였다. 또한 선박의 상하동요(heave), 종동요(pitch), 수직 굽힘 모멘트(vertical bending moment, VBM)의 시계열 결과 및 RAO를 International Towing Tank Committee (ITTC) (2010) 결과와 비교하여 계산 결과의 정확성을 확인하였다.

## 2. 문제의 정식화

선형이론을 사용하여 선체를 변단면 보로서 간주하였고, 대칭적인 처짐만을 고려하였다. 즉, 좌우현의 대칭성을 보장하는 수직평면에 한정된 상하동요, 종동요, 및 처짐의 물체운동만을 고려하였다. 따라서 선체를 길이방향으로 불균일한 단면을 가진 Bernoulli-Euler보로 간주하였다. 선체 길이방향으로 미소한 길이 $\Delta x$인 단면을 생각하고 이 단면의 수직방향 변위를 $w(x,t)$라고 하면, 힘과 모멘트의 평형식에 따라 다음과 같은 지배방정식인 탄성방정식을 얻을 수 있다 (Hwang, et al., 2010a, b).

$$\mu(x)\ddot{w}(x,t)+[EI(x)w''(x,t)]''+[\eta(x)\dot{w}''(x,t)]'' = f_e(x,t) \quad (1)$$

여기에서 연산자는 각각 도트$(\dot{})=d/dt$ , 프라임$(')=d/dx$ 을 의미한다. 위의 식(1)은 외력(fe) 하에서 단위 길이 당 질량($\mu(x)$), 굽힘강성($EI(x)$) 및 구조감쇠 계수($\eta(x)$)를 갖는 보의 진동방정식이다 (Bishop & Price, 1979).

이 때, 경계조건은 양 끝단에서 free-free한 것으로 양 끝단에서의 굽힘 모멘트(bending moment)와 전단력(shear force)은 0이 된다. 즉,

$$[EI(x)w''(x,t)]'+[\eta(x)\dot{w}''(x,t)]'_{at\ x=o,L}=0 \quad (2\text{-a})$$

$$[EI(x)w''(x,t)]+[\eta(x)\dot{w}''(x,t)]_{at\ x=o,L}=0 \quad (2\text{-b})$$

수직변위는 주 좌표계 $q_j(t)$와 진동 모드 형상 함수를 결합한 모드 중첩법을 사용하여 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$w(x,t)=\sum_{j=0}^{N}X_j(x)\ \cdot\ q_j(t) \quad (3)$$

이때, $X_j(x)$는 강체 모드(j=0,1)와 탄성모드(j=2,3,...,N)를 나타내는 모드 형상함수이다.

식(3)을 식(1)에 대입한 후, 양변에 $X_i(x)$를 곱해 선체 길이방향인 $x=0$부터 $x=L$까지 적분하고 식(2)의 경계조건을 적용하면, 다음과 같은 방정식을 얻을 수 있다.

$$[M]\{\ddot{Q}\}+[C]\{\dot{Q}\}+[K]\{Q\}=\{F\} \quad (4)$$

이 때, $[M]$은 질량 행렬, $[C]$는 감쇠 행렬, $[K]$는 강성 행렬, $\{F\}$는 힘벡터를 나타내며, $\{Q\}$는 위의 $q_j$와 동일하다.

식(1)의 우변에서 수직방향에 대한 동유체력의 계산은 스트립 이론을 적용하여 계산하였다. 스트립 이론은 선체를 길이방향으로 여러 개의 2차원 스트립으로 나누고, 각 스트립에 작용하는 유체력들을 구한 후 길이방향으로 적분함으로써 3차원 선체에 작용하는 힘을 2차원 형상에서 간편하게 계산할 수 있다. 선체와 수면에 대한 상대적인 변위는 다음과 같이 정의한다.

$$z(x,t)=w(x,t)-\zeta(x,t) \quad (5)$$

여기서 $\zeta(x,t)$는 수면 변위를 나타낸다. 선체주위 유체에 의해 선체에 작용하는 단위 길이 당 수직방향 힘은 상대 변위 $z(x,t)$와 이것의 시간에 대한 전미분에 의해 변화하는데 그 힘은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다 (Bishop & Price, 1979)

$$F(x,\omega_e)= -\frac{D}{Dt}\left[\left\{m(x,\omega_e)+\frac{i}{\omega_e}N(x,\omega_e)\right\}\frac{Dz(x,t)}{Dt}\right] -\rho g B(x)z(x,t) \quad (6)$$

여기서 $\omega_e$는 조우 주파수이며, $m(x,\omega_e)$은 단면의 부가질량, $N(x,\omega_e)$은 단면의 유체 감쇠계수, $B(x)$는 수선에서의 단면의 폭, $\rho$는 유체 밀도, $g$는 단면에 작용하는 중력을 나타내며, 연산자 $\frac{D}{Dt}$는 시간에 대한 전미분으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{D}{Dt}=\frac{\partial}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\frac{dx}{dt}=\frac{\partial}{\partial t}-U\frac{\partial}{\partial x} \quad (7)$$

식(6)의 우변의 첫 번째 항은 다음과 같이 확장하여 나타낼 수 있다.

$$-\frac{D}{Dt}(m\frac{Dz}{Dt})=-m\frac{D}{Dt}(\frac{Dw}{Dt}-V_Z)+U\frac{\partial m}{\partial x}(\frac{Dw}{Dt}-V_Z)-\frac{\partial m}{\partial t}(\frac{Dw}{Dt}-V_Z)=f_m+f_{fs} \quad (8)$$

이 때, $V_Z=\frac{D\zeta}{Dt}$이다. 또 (6)식의 우변의 두 번째 항은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N(x,\omega_e)\frac{Dz}{Dt}=f_r \quad (9)$$

마지막으로 식(6)의 세 번째 항은 다음과 같이 분해될 수 있다.

$$\rho g B(x) z(x,t) = \int_s P dy - \mu g = f_s + f_g \tag{10}$$

이론적으로 식(6)은 수직벽으로 둘러싸인 단면에 미소 파고의 입사파가 존재한다는 가정하에 유도된 식이다. 따라서 큰 입사파고에 대한 선체 운동 해석을 위해서는 다음과 같은 부가적인 보완이 필요하다. 즉, 대파고의 규칙 입사파 중에서 전진하는 세장선체의 계산을 위해서는 선체의 순간적인 흘수의 시간적 변화가 고려된 $B(x), m(x,\omega_e), N(x,\omega_e)$을 사용하여 식(6)을 계산함으로써 가능하다.

따라서 식(6)의 수직방향의 외력 $f_e(x,t)$은 앞에서 유도한 5개항을 포함한 다음의 여섯 가지의 성분으로 정리할 수 있다 (Park, 2006)

$$f_e = f_m + f_{fs} + f_r + f_s + f_g + f_{bs} \tag{11}$$

이 때, $f_m$은 선체운동으로 인한 유체 부가관성력을, $f_{fs}$는 모멘텀 슬래밍 힘 또는 플래어 슬래밍 힘을, $f_r$은 유체 방사 감쇠력을, $f_s$는 Froude-Krylov 힘을, $f_g$는 단면의 중력을 나타낸다. 마지막 항 $f_{bs}$는 선저(bottom) 슬래밍 힘으로서 선저 충격력을 나타낸다. 이는 선체가 공기 중에서 입수하는 $\triangle t$동안 선저 접수부는 $\triangle x$만큼 이동한다고 가정하고 $\triangle x$부분의 부가질량($M_H$)이 0부터 어떤 값으로 변화한다고 가정하여 부가질량의 시간 변화율 $\dfrac{M_H|_{z_d=0} \cdot \triangle x}{\triangle t}$ 을 계산한다. 따라서 이것을 스트립 간격 h에 대하여 평균화하게 되면 선저 충격력은 다음과 같이 단위 길이 당 힘으로 나타낼 수 있다.

$$f_{bs} = f_{imp} = \frac{\partial M_H}{\partial t} V = \frac{M_H|_{z_d=0} \cdot \triangle x}{\triangle t \cdot h} V \tag{12}$$

따라서 슬래밍으로 인한 선체 충격력은 수중에서는 $f_{fs}$로 계산되고, 입수시 선저에서는 $f_{bs}$로 계산된다.

## 3. 동유체력계수 및 선체운동 계산

동유체력계수들의 계산을 위하여 2차원 단면에서 각 주파수에 따른 계수들을 conformal mapping(Lewis form) 방법을 이용하여 계산하였다. 이 방법은 매 시간 스텝마다 변화하는 선체 단면 형상에 따라 계수들을 간편하게 계산할 수 있는 매우 유용한 방법으로, 시간 영역 계산을 수행하는데 적합하다.

또한 multi-parameter mapping에 대한 비교 연구를 통해 알 수 있듯이 Lewis form method는 상당히 타당한 결과를 보이고 있으며(Park, 2006), 다음과 같이 부가 질량계수($a_{33}$)와 감쇠계수($b_{33}$)에 대한 무차원화 계수들을 $K_4$와 $\overline{A}$로 정의하여 본 계산에 사용하였다(Ursell, 1948).

$$K_4 = \frac{a_{33}}{\frac{1}{8}\rho\pi B^2} \tag{13}$$

$$\overline{A} = \sqrt{\frac{b_{33}\omega^3}{\rho g^2}} \tag{14}$$

이 때 구형선수(Bulbous bow)와 같이 Lewis form으로 변환이 어려운 단면에 대해서는 프로그램 내에서 형상을 조정하여 근사시켜 계산하였다. 이 경우 예상되는 계산 오차는 상대적으로 매우 작은 값이어서 전체적인 계산결과에는 거의 영향이 미치지 않는 것으로 판단된다.

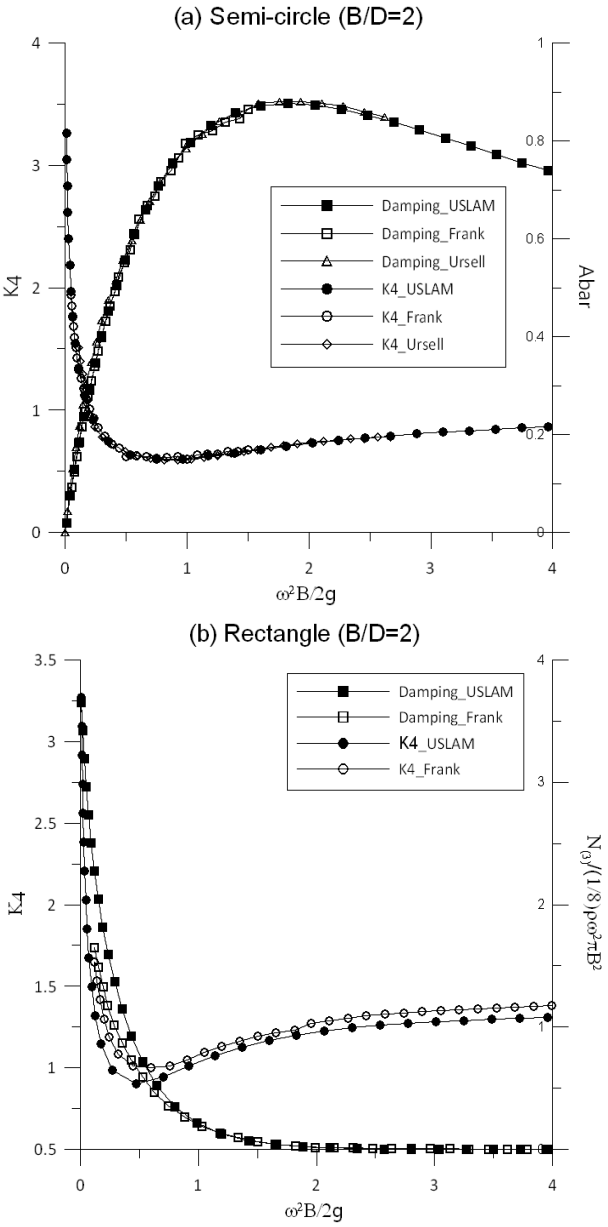



Fig. 1 Comparison of heave added mass and damping coefficients (USLAM=present results)

본 계산 방법의 유효성을 검증하기 위하여 2차원 사각형과 반원(semicircle)단면에 대한 부가질량과 감쇠계수를 계산하고 Ursell (1948)과 Frank (1968)의 결과와 비교하였다. Fig. 1 에서 보는 바와 같이, 계산된 각 계수는 비교 결과들과 잘 일치함을 알 수 있다.

본 연구에서 선체는 강체가 아닌 탄성체로 간주되어 계산되기 때문에 길이 방향으로 서로 다른 수직변위를 가지게 된다. 따라서 상하동요와 종동요는 다음의 식(15), (16)과 같이 정의하였다.

$$Heave, Z = w_{A.P} + (w_{F.P} - w_{A.P})\,(\frac{L}{2} + x_G)/L \tag{15}$$

$$Pitch, \phi = \sin^{-1}(\frac{w_{A.P} - w_{F.P}}{L}) \tag{16}$$

여기서 $w_{AP}$, $w_{FP}$, $x_G$ 및 $L$은 각각 선미, 선수에서의 수직변위, x 축 무게 중심(선체 길이 방향), 그리고 선체 길이이다.

## 4. 수치 계산 과정

선체의 수직방향 변위에 대한 지배방정식인 4계 편미분방정식인 식(1)을 수치적인 방법으로 계산하기 위해 선체를 길이방향으로는 21개의 스테이션으로, 수직방향으로는 16개의 수선으로 분할하였다. 고주파수에서의 진동응답성분에 대한 계산의 정도를 높이기 위해 길이방향으로 스테이션을 101개로 추가분할하였다. 본 연구 결과의 타당성을 검증하기 위해 국제표준선인 S-175컨테이너선에 대해 저파고(파고 1m) 상에서의 선형 계산 결과와 고파고(파고 8m이상) 상에서의 비선형 계산 결과를 구하였다. 선체의 주요 요목은 Table 1 에 나타내었다. 길이 방향의 중량분포는 ITTC (2010)에서 제공한 표준을 따랐으며, 종강도 설계에 주요한 인자인 단면 2차 모멘트($I_y$)의 길이방향 분포는 Square Station 5 와 12 사이(21개의 스테이션 기준)에서는 균일하고 선미와 선수로 갈수록 0 으로 줄어드는 사다리꼴 형상으로 가정하였다. 지배 방정식 식(1)을 풀기 위해 보의 양 끝단에 free-free 조건을 적용한 식(2)의 경계조건을 사용하였고, Newmark-beta method를 사용하여 시간 적분을 수행하였다. 시간간격($\triangle t$)은 조우주기($T_e = 2\pi/\omega_e$)를 대략 250등분하였다. 구조감쇠계수 $\eta$를 계산하기 위해 대수감소 $\delta$는 0.056을 사용하였다. 선형 계산을 위해 선박의 속도는 Froude Number(Fn) 0.275로, 파고는 1m를 사용하여 각 입사주파수에 따른 결과를 계산하였다. 반면에 비선형 계산에서는 Fn=0.25 및 0.275, 파장은 선체길이(L)의 1.2배, 파고는 8m (kA=0.12) 및 12m (kA=0.18)로 사용하여 계산을 수행하였다. 이러한 대파고의 경우에서는 비선형 시간영역 계산을 통해 슬래밍 현상을 재현할 수 있었다. 본 연구에서는 선형 계산 결과를 통해 heave, pitch, 및 VBM의 RAO를 비교하였고, 비선형 계산을 통해 VBM의 시계열 결과를 ITTC (2010) 결과와 비교하였다. 또한 선체 운동의 비선형성을 검토하고자 파고의 증가에 따른 상하동요와 종동요의 변화를 살펴보았다.

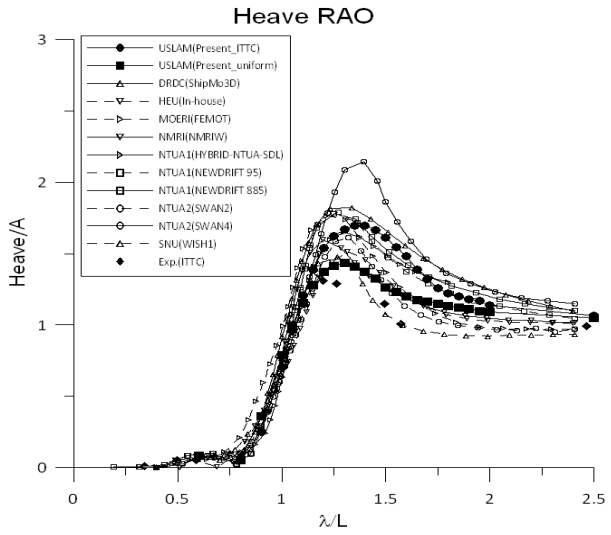
Table 1 Principal dimensions of S175 containership

| | |
|---|---|
| Length B. P. | 175m |
| Breadth | 25.4m |
| Depth | 15.3m |
| Draft | 9.5m |
| Displacement | 24,000ton |
| Modulus of Elasticity, E | 2.1E+10 Kg/m$^2$ |

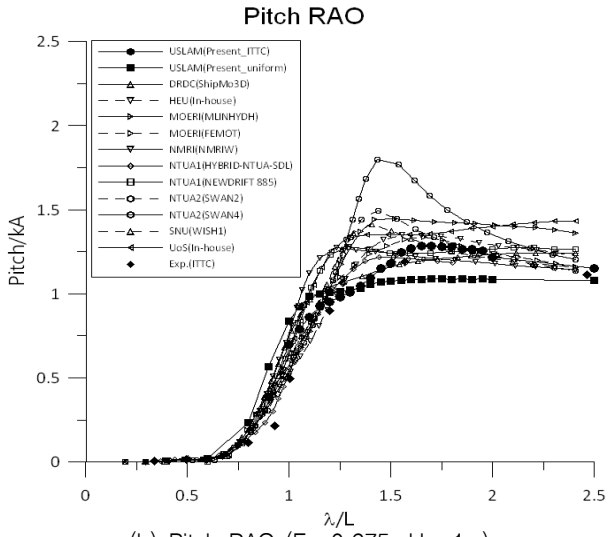
## 5. 계산 결과 및 토의

선형 계산 결과를 얻기 위해 선체를 강체로 가정하고 파고 1m의 규칙파를 대입하여 heave, pitch RAO 및 선체 중앙단면에 작용하는 VBM RAO를 각각 계산하여 ITTC (2010) 결과와 비교하였다(Fig. 2). 선체의 무게분포 방법 차이에 따른 계산 결과의 비교를 위해, 무게분포가 각 단면에 작용하는 부력분포와 일치하는 균일 분포(Uniform distribution)를 사용한 결과(Present_uniform)와 ITTC에서 제공한 무게분포를 사용한 결과(Present_ITTC)로 나누어 비교하였다. Fig. 2 에서, 두 무게분포에 따른 각 계산 결과들은 모두 ITTC의 비교 결과들 내에 위치함을 알 수 있다. 이 때, heave RAO는 파장 대 선체길이의 비가 대략 1.3에서 그리고 pitch RAO 는 1.5에서 최대값을 가짐을 알 수 있고 이는 ITTC 실험 결과와 대체로 일치함을 알 수 있다.

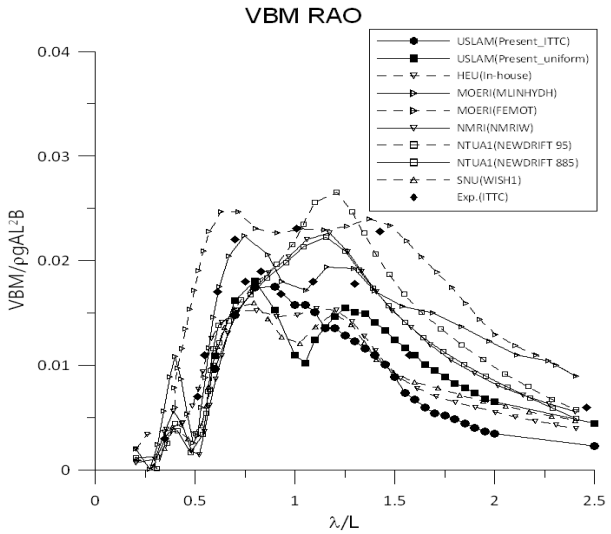
고파고 상에서의 선체 운동응답을 알아보기 위한 비선형 계산 결과로 선체 중앙단면에 작용하는 수직 굽힘 모멘트의 시계열 비교를 Fig. 3(a), (b)에 나타내었다. 이때 무게분포는 각 단면에 작용하는 부력분포와 일치하는 균일 분포일 경우이며, 이를 ITTC (2010)의 여러 결과들과 비교한 Fig. 3(a)의 계산 조건은 Fn=0.25, λ/L=1.2, kA=0.12이다. 대파고시 슬래밍 현상을 알아보기 위해 선체를 강체와 탄성체로 구분하여 선체 중앙 단면에서의 수직 굽힘 모멘트를 비교한 Fig. 3(b)의 계산 조건은 Fn=0.275, λ/L=1.2, kA=0.18 이다. Fig. 3(a)에서, 본 계산 결과(USLAM)는 모멘텀 슬래밍을 선체 외력에 포함시킨 NMRI(일본 해양연구소)의 결과와 가장 비슷한 경향을 가지는 것을 알 수 있다. Fig. 3(b)에서 선체를 탄성체로 가정한 VBM 결과(점선)에는 강체로 계산한 결과(실선)에 나타나지 않는 고주파수의 성분이 관측된다. 이는 입사파 주파수보다 큰 고주파수의 탄성체 진동성분이 포함되어 있기 때문이다. 그림에서 양의 수직축(+)은 Sagging 모멘트를, 음의 수직축(-)은 Hogging 모멘트를 나타낸다. 여기서 Sagging 모멘트가 Hogging 모멘트보다 더 큰 이유는 선저 슬래밍 과 선수부 플래어 슬래밍에 의한 선체의 추가적인 충격하중 때문으로 풀이된다. 선체가 입수할 때, 즉 수직 굽힘 모멘트가 양의 값을 갖는 순간은 선저 슬래밍이 선체에 주는 충격으로 수직 굽힘 모멘트의 Sagging 모멘트의 값이 크게 증가한다. 이는 강체 계산 및 탄성체 계산 결과 모두에 잘 나타나 있다.




(a) Heave RAO (Fn=0.275, Hw=1m)



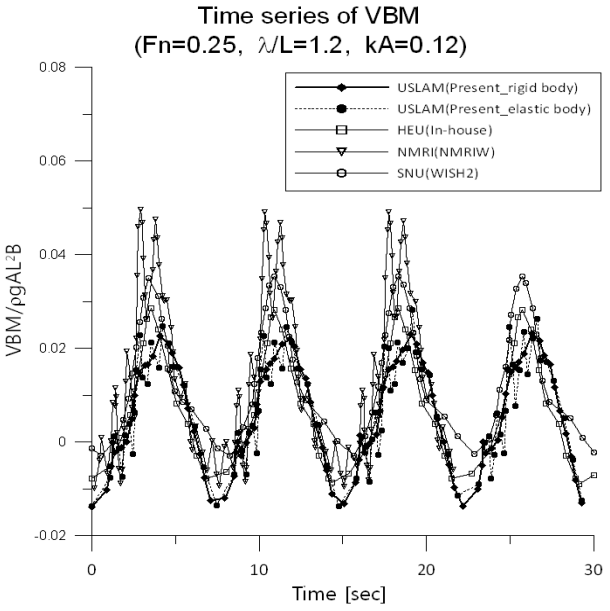

(b) Pitch RAO (Fn=0.275, Hw=1m)



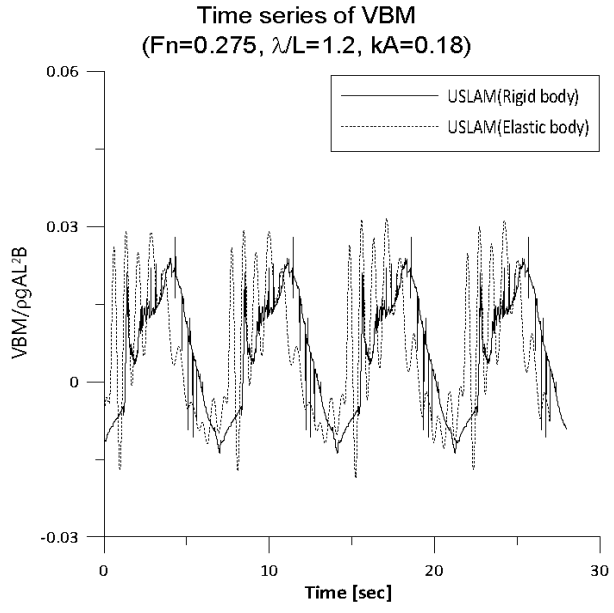

(c) VBM RAO (Fn=0.275, Hw=1m)

Fig. 2 Comparison of heave, pitch, and VBM RAOs of S175 containership

또한 탄성체 계산에서는 선저 슬래밍 직후 발생하는 선수부 플래어 슬래밍의 영향으로 수직 굽힘 모멘트의 값이 좀 더 증가함을 알 수 있다. 따라서 강체 계산에서는 선저 슬래밍의 영향이 지배적이며, 탄성체 계산에서는 선저 슬래밍과 더불어 선수부 플래어 슬래밍의 영향이 증가함을 확인할 수 있다. 따라서, 선저 충격에 의해 유기되는 선체진동이 선수부 플래어 슬래밍에 의해 증가되기 때문에, 만약 두 슬래밍 사이의 시간 간격이 선체 2절진동의 고유주기와 일치한다면 매우 큰 선체 진동을 유발 할 수 있음을 예상할 수 있다.



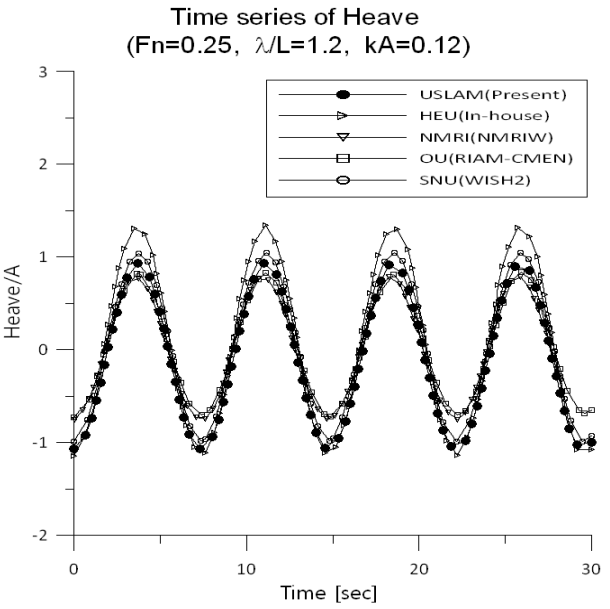

(a) Fn=0.25, λ/L=1.2, kA=0.12



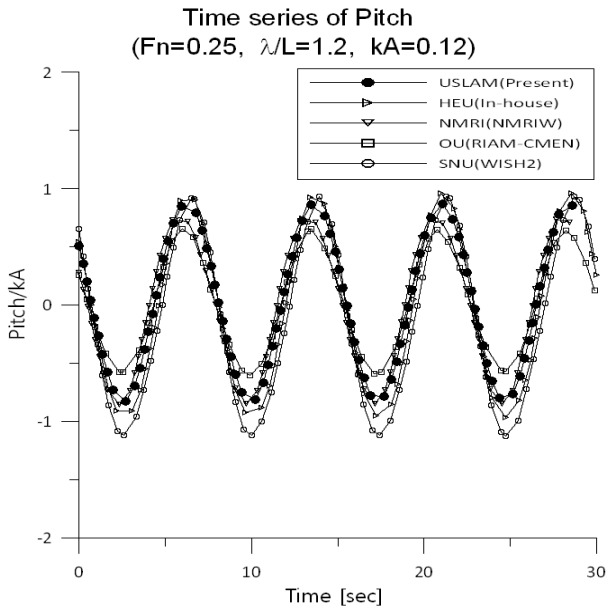

(b) Fn=0.275, λ/L=1.2, kA=0.18

Fig. 3 Time series of midship VBM of S175 containership

Fig. 4에서는 중량분포가 각 단면에 작용하는 부력분포와 동일한 균일 분포일 경우 고파고 중에서 상하동요와 종동요의 시계열을 ITTC (2010)의 결과들과 비교하였다. 본 계산 결과는 여러 기관의 계산 결과들의 범위 안에 위치함을 알 수 있다.



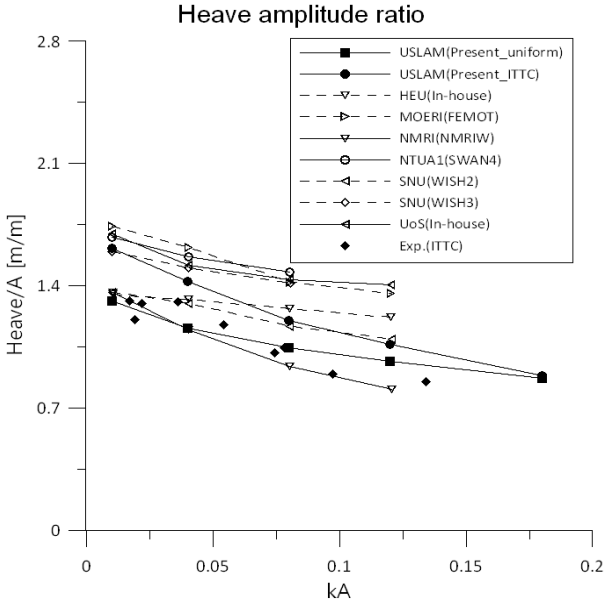

(a) Fn=0.25, λ/L=1.2, kA=0.12



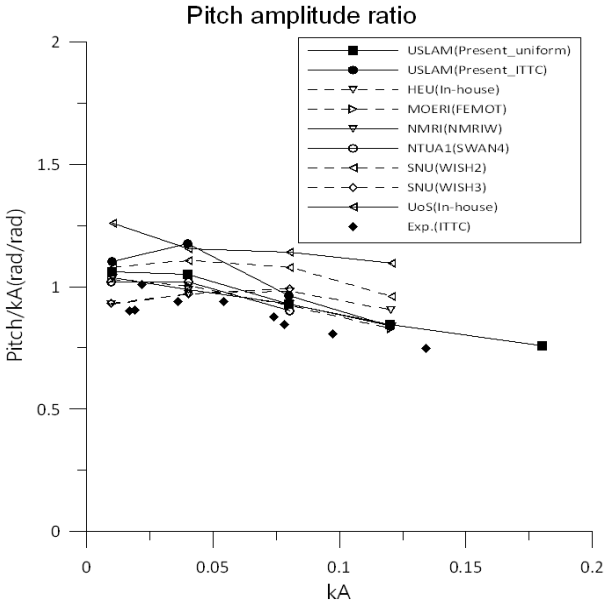

(b) Fn=0.25, λ/L=1.2, kA=0.12

Fig. 4 Time series of heave and pitch of S175 containership

마지막으로 Fig. 5에서 파고 증가에 따른 상하동요와 종동요의 변화를 알아보고자, kA의 값을 0.01(파고 0.67m)에서 0.12(파고 8.02m)까지 변화시켜 계산하고 이를 ITTC (2010) 결과와 비교하였다. 또한 본 계산 조건의 최대 파고인 kA=0.18(파고 12.0m)을 대입하여 계산한 값을 표시하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 파고가 증가함에 따라 상하동요와 종동요 모두 대체로 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 파고 증가에 따라 선체에 작용하는 비선형 하중(예를 들어, Froude-Krylov 힘의 변위 증가)이 증가함으로써 이에 따른 선체의 상대적 운동 변화를 의미한다.




(a) Heave amplitude ratio (Fn=0.275, λ/L=1.2)




(b) Pitch amplitude ratio (Fn=0.275, λ/L=1.2)

Fig. 5 Comparison of heave and pitch amplitude ratios of S175 containership for various wave heights

## 6. 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 고파고중에서 항해하는 선체에 작용하는 파랑충격 하중을 모멘텀 슬래밍 법을 이용하여 추정하고 선박의 강체 운동과 탄성체 운동 응답을 스트립 이론을 적용하여 계산하고,

그 결과를 ITTC (2010)의 여러 계산 결과들과 비교하여 해석의 정확성을 확인하였다. 시간 영역 계산을 위한 시간 적분은 Newmark-beta 법을 이용하였으며, 주파수에 따른 동 유체력 계수들의 계산을 위해 매 시간 변화하는 선체 단면 형상에 따라 계산이 매우 간편한 Lewis form method를 이용하였다. 계산된 부가질량과 감쇠계수의 검증을 위해 반원형과 직사각형 단면에 대한 계산 결과를 다른 계산 결과들과 비교하여 해의 정확성을 검증하였다.

저파고 중에서 선체의 운동 RAO를 두가지 무게 분포법에 따라 계산하고 이를 ITTC (2010) 결과와 비교하여 잘 일치하는 것을 확인하였다. 또한 고파고중에서 선체 중앙부가 받는 수직 굽힘 모멘트를 시계열로 나타내어 슬래밍 현상이 일어나는 시점(sagging 모멘트 시작점)을 확인하였고, 강체 계산에서는 선저 슬래밍의 영향이 지배적이며, 탄성체 계산에서는 선저 슬래밍과 더불어 선수부 플래어 슬래밍의 영향이 선체 진동에 미치는 영향을 확인하였다.

파고 증가에 따른 상하동요와 종동요의 변화에 대한 비교를 통해 파고가 증가할수록 값은 대체로 감소하는 경향을 알 수 있었고, 이는 파고의 증가에 따라서 선체에 작용하는 비선형 하중이 증가하여 이에 따른 선체의 상대적인 운동 변화를 의미한다.

본 연구를 통해 개발된 수치 해석 툴은, 고파고중에서 선체에 작용하는 슬래밍 현상에 대해 보다 정확한 물리적 해석을 제공하고, 슬래밍이 선체 종강도에 미치는 영향을 파악하는데 유용한 도구로 사용될 수 있다. 또한 이 같은 비교 분석 연구를 통해 고파고중을 운항하는 대형 선박의 최적화 구조 설계에도 이용될 수 있을 것이다.

본 연구는 슬래밍이 포함된 복잡한 비선형 선체 진동 해석을 비교적 간편한 수치 해석 방법을 사용하여 짧은 시간에 계산할 수 있고 그 해석의 정확성과 일관성이 타 연구기관에 뒤지지 않는 수치 해석 방법을 제시하였다는 점에서 의의를 찾을 수 있다. 또한 계산 시간이 적게 걸리는 점을 이용하여 새로운 이론식이나 실험식을 손쉽게 테스트해 볼 수 있는 실용적인 이점이 있다고 할 수 있다.

차후 본 연구를 확장하여 모멘트 슬래밍 이론이 아닌 충격 슬래밍(Impact slamming) 이론에 기초한 경험식을 사용하여 파랑 충격 하중을 계산하고 각 충격 하중 이론에 따른 선체 운동 응답의 차이를 비교해보고자 한다. 또한 파 스펙트럼을 입사파에 대입하여 불규칙파 중에서의 선체 운동 응답을 계산하고자 한다. 이를 통해 실제 해상과 같은 동일한 조건에서 슬래밍에 의한 선체 운동 응답의 특성을 파악할 예정이다.

## 후 기

본 논문은 일본선급(NK)의 지원에 의한 연구 프로젝트 성과 중 일부임을 밝혀 둡니다.

## 참 고 문 헌

Bishop, R.E.D. & Price, W., 1979. *Hydro-elasticity of Ships.* Cambridge University Press: Cambridge.

Cho, I.H. Han, S.K. & Kwon, S.M., 2005. Nonlinear hydroelastic analysis using a time-domain strip theory in regular waves. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 19(4), pp.1-8.

Frank. W., 1968. Oscillation of cylinders in or below the free surface of deep fluids. *Hydromechanics laboratory research and development technical report 2375,* Washington: Naval Ship Research and Development Centre.

Hwang, J.H. Park, I.K. & Koo, W.C., 2010. Wave impact load and dynamic response of ship due to slamming. *Proceedings of the conference of the Korean Association of Ocean Science and Technology Societies*, Jeju, June 2010, pp.24-27.

Hwang, J.H. Park, I.K. & Koo, W.C., 2010. Time-domain calculation of elastic behaviors for the large container hull. *Proceedings of the Annual Autumn Meeting, the Society of Naval Architects of Korea*, Changwon, October 2010, pp.24-27.

ITTC., 2010. Comparative study on Linear and Nonlinear Ship Motion and Loads. *ITTC workshop on seakeeping*, pp.283-347.

Kim, Y.J., 2005. Estimation of bow impact load due to slamming and green water and application to design. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 42(2), pp.26-40.

Park, J.H., 2006. *Time domain simulation of hydroelastic response of ships in large amplitude waves.* Ph.D.: University of Southhampton.

Ursell. F., 1948. *On the heaving motion of a circular cylinder on the surface of a fluid*. The University of Manchester.

Yamamoto, Y. Fujino, M. & Fukasawa, T., 1979. Motion and longitudinal strength of a ship in head sea and the effects of non-linearities. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 143, 144 and 145, pp.63-70.

Yoon, B.S., 1989. Study on method for predicting wave impact loadings of a ship in waves. *University of Ulsan Report,* 20(2), pp.49-66.

황 지 희

박 인 규

구 원 철