

선수갑판 침수의 영향을 고려한 선체운동과 파랑하중의 비선형 해석

김 용 직[†]
부경대학교(교수)

Nonlinear Analysis of Ship Motion and Wave Load by Considering the Effect of Bow Deck Wetness

Yong Jig KIM[†]
Pukyong National University(professor)

Abstract

In rough sea, ships including fishing vessel sometimes suffer a severe bow deck wetness which may cause structural damage on bow deck and equipment. In this paper, a fully coupled method for the nonlinear computation of ship motion and bow deck water flow is developed and validated through example calculations. The interaction effects of ship motion and deck water flow are taken into account in computation by an interactive iteration scheme at each time step. Heave pitch motion computation is performed by the nonlinear strip method in time domain and deck flow computation is performed by the time domain finite difference method based on the shallow water wave theory. The two computations are coupled to take into account the interaction effects between them. Heave, pitch, bow deck water height, deck pressure and wall pressure are calculated and compared with experimental measurements. Good agreements are shown in the comparisons and the present computation method has been validated.

Key words : Bow deck wetness, Nonlinear computation, Time domain, Ship motion, Deck flow

I. 서론

어선을 비롯한 일반 선박들이 파도가 거친 해역에서 운항할 때 선수는 심한 상하운동을 하게 되고, 특히 파가 선수쪽에서 들어 올 때 수면과 선체의 상대운동이 커져 선수갑판에 많은 양의 해수가 유입된다. 이 선수갑판 침입수는 일차적으로 선수갑판 자체에 큰 압력하중을 가하고, 갑판 위를 빠른 속도로 흘러가면서 갑판상 구조물과 의장품들에 부딪혀 큰 압력하중을 유발할 수

있다. 이러한 선수갑판 침입수의 영향이 적절히 선박설계에 반영되지 않았을 경우 구조부재와 장비의 손상, 수리로 인한 손실, 나아가 선박의 침몰사고까지도 초래할 수 있다.

선수갑판 침입수와 관련된 대표적인 사고로 1980년 9월 9일에 발생한 산적화물선 Derbyshire 호의 침몰사고(Faulkner, 2002)를 들 수 있다. 당시 이 선박은 태풍에 의해 거친 풍랑이 일고 있던 일본 남쪽 해상을 지나다 아무 조난신호도 보내지 못한 채 침몰하였는데, 탑승했던 44명 모두

[†] Corresponding author : 051-629-6612, yjkim@pknu.ac.kr

* 이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2019년)에 의해 게재되었음.

가 사망한 것으로 밝혀졌다. 사고 후 장기간에 걸쳐 여러 차례 사고원인 조사가 있었고, 1996년과 1997년에 실시된 사고 잔해에 대한 수중탐사로 사고원인 조사는 큰 진전을 보았다. 수중탐사에서 발견된 증거들을 바탕으로 사고원인이 두세 가지로 압축되었는데, 여러 시나리오 중 선수갑판 침입수에 의한 선수쪽 창구덮개의 1차적인 붕괴와 이어진 급격하고 연속적인 선내 침수가 가장 가능성이 높은 침몰사고의 직접적인 원인으로 추정되었다(Faulkner 2002).

Derbyshire호 사고와 같은 침몰사고까지 초래하지는 않더라도 갑판 침입수에 의해 갑판상의 의장품이 손상을 받거나 갑판 구조물 자체가 손상을 받는 일은 종종 일어나고 있어, 큰 파도 중에서의 선수갑판 침입수 관련 문제들은 계속 관심을 가지고 연구되어야 할 중요한 문제라고 할 수 있다. 이를 위해서는 큰 파도 중에서의 선체운동에 대한 정확한 계산이 필요하고 갑판에 유입된 침입수 유동의 적절한 계산도 필요하다. 그리고 갑판 침입수가 갑판이나 구조물에 가하는 압력하중도 산출되어야 한다.

본 연구에서는 큰 파도 중에서의 대진폭 선체운동은 시간영역 해법인 비선형 스트립법(Hwang et al., 1985)을 갑판 침입수와 연성효과를 고려할 수 있도록 발전시켜 이용하였고, 선수갑판 침입수의 유동 시뮬레이션은 천수와 이론에 기초한 유한차분법(Kim and Shin, 2005)을 개발하여 사용하였다. 갑판 침입수 수위와 유속 등을 이용하여 선수갑판과 갑판위 구조물에 작용하는 압력하중도 산출하였다. 본 계산법은 어선을 포함한 배수량형 선박들에 일반적으로 적용할 수 있으나 결과의 검증에 대해 내항성분야 연구에서 널리 사용되고 있는 S175 컨테이너선(ITTC, 1983)을 계산대상 선박으로 정하였다. 선수 규칙과 중에서의 상하동요(heave)와 종동요(pitch), 선수갑판 침입수의 수위변동과 압력하중을 산출하여 부경대학교 조파예인수조에서 수행된 모형실험 결과와 비교하여 검증하였고, 관련된 역학적 특성도 고

찰하였다.

II. 연구 방법

1. 선체운동의 시간영역 비선형 계산법

선체운동의 계산법은 대진폭 운동에 따른 수면 아래 선체형상의 비선형적 변화 등을 근사적으로 고려하는 시간영역 비선형 스트립이론(Hwang et al., 1985)을 바탕으로 하였으나, 갑판 침입수와의 연성효과(coupled effect)를 고려할 수 있도록 운동 방정식을 수정하여 이용하였다.

선체의 상하동요와 종동요 계산에 필요한 힘의 방정식과 모멘트 방정식은 유체 운동량 변화에 기인하는 힘과 조파 감쇠력, 부력, 자중, 관성력을 고려하여 유도될 수 있다. 우선 힘의 방정식은 식 (1)과 같이 유도된다.

$$A_{33}\ddot{\zeta} + B_{33}\dot{\zeta} + C_{33}\zeta + A_{35}\ddot{\theta} + B_{35}\dot{\theta} + C_{35}\theta = F_c \cos \omega_c t + F_s \sin \omega_c t + F(t) + F_{dk}(t) \quad \dots (1)$$

여기에서 ζ 와 θ 는 각각 상하동요와 종동요 변위를 나타내며, 변수 위의 점은 시간 t 에 대한 미분을 뜻한다. 좌변의 계수들과 우변의 항들은 식 (1.1)~식 (1.10)과 같다.

$$A_{33} = \int_L \frac{w}{g} dx + \int_L M_H dx \quad \dots (1.1)$$

$$B_{33} = \int_L N_H dx + U[M_H]_e + \int_L \frac{\partial M_H}{\partial t} dx \quad \dots (1.2)$$

$$C_{33} = 0 \quad \dots (1.3)$$

$$A_{35} = - \int_L (x - x_G) M_H dx - \int_L (x - x_G) \frac{w}{g} dx \quad \dots (1.4)$$

$$B_{35} = - \int_L (x - x_G) N_H dx - U[(x - x_G) M_H]_e + U \int_L M_H dx - \int_L (x - x_G) \frac{\partial M_H}{\partial t} dx \quad \dots (1.5)$$

$$C_{35} = U \int_L N_H dx + U^2 [M_H]_e + U \int_L \frac{\partial M_H}{\partial t} dx \quad \dots (1.6)$$

$$F_c = -\omega \omega_e \eta_0 \int_L M_H e^{-kT_m} \cos(kx \cos \mu) dx$$

$$- \omega \eta_0 \int_L N_H e^{-kT_m} \sin(kx \cos \mu) dx$$

$$- U \omega \eta_0 [M_H e^{-kT_m} \sin(kx \cos \mu)]_e$$

$$- \omega \eta_0 \int_L \frac{\partial M_H}{\partial t} e^{-kT_m} \sin(kx \cos \mu) dx \quad \dots (1.7)$$

$$F_s = \omega \omega_e \eta_0 \int_L M_H e^{-kT_m} \sin(kx \cos \mu) dx$$

$$- \omega \eta_0 \int_L N_H e^{-kT_m} \cos(kx \cos \mu) dx$$

$$- U \omega \eta_0 [M_H e^{-kT_m} \cos(kx \cos \mu)]_e$$

$$- \omega \eta_0 \int_L \frac{\partial M_H}{\partial t} e^{-kT_m} \cos(kx \cos \mu) dx \quad \dots (1.8)$$

$$F(t) = \rho g \int_L A dx - \int_L w dx \quad \dots (1.9)$$

$$F_{dk}(t) = \iint_{A_x} P_{dk}(x, y, t) dx dy \quad \dots (1.10)$$

여기에서 L 은 선체길이를 나타내며, 좌표계는 원점이 선체중양에 있고, 선수방향으로 양의 x 축, 상방향으로 양의 z 축, 횡방향으로 y 축을 갖는 우수 좌표계이다. 좌표 x_G 는 선체 무게중심의 x 좌표이다. $\int_L dx$ 는 선박 전체길이에 대한 적분을 나타내며, $[]_e$ 는 선미 끝 단면에서의 값을 나타낸다. U 는 선속이고, M_H 와 N_H , A 는 각각 각 순간 흘수에서의 이차원 부가질량과 감쇠계수, 수면아래 단면적이다. w 와 g , ρ 는 각각 단위길이당 선체중량과 중력가속도, 유체밀도이다. ω 는 입사파의 원주파수이고 ω_e 는 조우 원주파수이며, η_0 는 입사파의 진폭이다. k 는 파수이고,

T_m 은 각 단면에서의 평균흘수이다. μ 는 선수가 이고 선수파일 때 180° 이다.

모멘트 방정식은 식 (2)와 같이 유도된다.

$$A_{55}\ddot{\theta} + B_{55}\dot{\theta} + C_{55}\theta + A_{53}\ddot{\zeta} + B_{53}\dot{\zeta} + C_{53}\zeta$$

$$= M_c \cos \omega_e t + M_s \sin \omega_e t + M(t) + M_{dk}(t) \quad \cdot (2)$$

여기에서 좌변의 계수들과 우변의 항들은 식 (2.1)~식 (2.10)과 같다.

$$A_{55} = \int_L (x-x_G)^2 \frac{w}{g} dx + \int_L (x-x_G)^2 M_H dx \quad \dots (2.1)$$

$$B_{55} = \int_L (x-x_G)^2 N_H dx + U [(x-x_G)^2 M_H]_e$$

$$+ \int_L (x-x_G)^2 \frac{\partial M_H}{\partial t} dx \quad \dots (2.2)$$

$$C_{55} = -U \int_L (x-x_G) N_H dx - U^2 \int_L M_H dx$$

$$- U^2 [(x-x_G) M_H]_e$$

$$- U \int_L (x-x_G) \frac{\partial M_H}{\partial t} dx \quad \dots (2.3)$$

$$A_{53} = - \int_L (x-x_G) M_H dx - \int_L (x-x_G) \frac{w}{g} dx \quad \dots (2.4)$$

$$B_{53} = - \int_L (x-x_G) N_H dx - U [(x-x_G) M_H]_e$$

$$- U \int_L M_H dx - \int_L (x-x_G) \frac{\partial M_H}{\partial t} dx \quad \dots (2.5)$$

$$C_{53} = 0 \quad \dots (2.6)$$

$$M_c = \omega \omega_e \eta_0 \int_L (x-x_G) M_H e^{-kT_m} \cos(kx \cos \mu) dx$$

$$+ U \omega \eta_0 \int_L M_H e^{-kT_m} \sin(kx \cos \mu) dx$$

$$+ \omega \eta_0 \int_L (x-x_G) N_H e^{-kT_m} \sin(kx \cos \mu) dx$$

$$+ U \omega \eta_0 [(x-x_G) M_H e^{-kT_m} \sin(kx \cos \mu)]_e$$

$$+ \omega \eta_0 \int_L (x-x_G) \frac{\partial M_H}{\partial t} e^{-kT_m} \sin(kx \cos \mu) dx \quad \cdot (2.7)$$

$$\begin{aligned}
 M_s = & -\omega\omega_c\eta_0 \int_L (x-x_G)M_H e^{-kT_m} \sin(kx \cos\mu) dx \\
 & + U\omega\eta_0 \int_L M_H e^{-kT_m} \cos(kx \cos\mu) dx \\
 & + \omega\eta_0 \int_L (x-x_G)N_H e^{-kT_m} \cos(kx \cos\mu) dx \\
 & + U\omega\eta_0 [(x-x_G)M_H e^{-kT_m} \cos(kx \cos\mu)]_e \\
 & + \omega\eta_0 \int_L (x-x_G) \frac{\partial M_H}{\partial t} e^{-kT_m} \cos(kx \cos\mu) dx \quad \cdot (2.8)
 \end{aligned}$$

$$M(t) = -\rho g \int_L (x-x_G) A dx + \int_L (x-x_G) u dx \quad \dots (2.9)$$

$$M_{dk}(t) = \iint_{A_{dk}} (x-x_G) P_{dk}(x,y,t) dx dy \quad \dots (2.10)$$

식 (1.10)의 힘 $F_{dk}(t)$ 와 식 (2.10)의 모멘트 $M_{dk}(t)$ 는 선수갑판에 작용하는 침입수의 압력 P_{dk} 를 이용하여 선수갑판 면적 A_{dk} 에 걸쳐 적분하여 계산하며, 이 항들을 통해 선체운동 계산이 갑판 침입수 유동 계산에 직접 연성된다. 아울러 위 운동방정식들의 계산에 있어 단위길이당 부가 질량 M_H 와 감쇠계수 N_H 그리고 횡단면적 A 는 각 순간의 수면아래 단면에 대한 값을 사용함으로써 파대운동에 따른 이들의 비선형적 변화를 고려한다.

식 (1)과 식 (2)의 운동방정식들을 적절히 초기 조건을 주고 시간의 진행에 따라 적분하여 시간 영역에서 선체운동의 해를 순차적으로 구해 갈 수 있다. 시간적분법으로는 선형해에서 무조건 안정성이 증명되어 있는 Newmark- β 법($\beta=1/4$)을 이용하였다. 즉, 시간 t_k 에서의 변위, 속도, 가속도를 $D_k, \dot{D}_k, \ddot{D}_k$ 라고 하고 $t_k + \Delta t$ 에서의 가속도를 \ddot{D}_{k+1} 라 가정할 때 \dot{D}_{k+1}, D_{k+1} 은 각각 식 (3)과 식 (4)와 같이 계산된다.

$$\dot{D}_{k+1} = \dot{D}_k + \frac{\Delta t}{2} (\ddot{D}_{k+1} + \ddot{D}_k) \quad \dots (3)$$

$$D_{k+1} = D_k + \Delta t \dot{D}_k + \frac{1}{4} (\Delta t)^2 (\ddot{D}_{k+1} + \ddot{D}_k) \quad \dots (4)$$

계산 시작시 초기조건으로는 선형이론의 해를 이용하였으며 각 계산단계에서의 계산과정은 다음과 같다.

1) 현 계산단계 t_k 에서의 $\ddot{\zeta}_k, \ddot{\theta}_k$ 를 $\ddot{\zeta}_{k+1}, \ddot{\theta}_{k+1}$ 의 초기 가정치로 하여 식 (3), 식 (4)에 의해 $\dot{\zeta}_{k+1}, \dot{\theta}_{k+1}, \zeta_{k+1}, \theta_{k+1}$ 을 계산한다.

2) 구해진 t_{k+1} 에서의 선체 위치와 변화된 파의 위치에 따라 각 단면에서의 흡수를 구하고 갑판 침입수 유동도 계산하며, 이에 의해 운동방정식의 계수들과 식 (1.10)과 식 (2.10)의 항들을 비롯한 외력항들을 계산한다.

3) 운동방정식을 $\ddot{\zeta}_{k+1}, \ddot{\theta}_{k+1}$ 에 관한 연립 방정식으로 사용하여 새로운 $\ddot{\zeta}_{k+1}, \ddot{\theta}_{k+1}$ 를 구한다.

4) 새로 구해진 $\ddot{\zeta}_{k+1}$ 와 $\ddot{\theta}_{k+1}$ 를 이용하여 다시 1)~3)까지의 계산을 반복한다. 반복계산 중 충분히 수렴된 후에는 다음 계산단계 t_{k+2} 로 이동한다.

위 계산과정을 시간진행에 따라 계속하여, 운동응답이 주기적 정상상태에 이르게 한 후에 한 주기 동안의 운동응답을 비선형해로 한다.

2. 갑판 침입수의 시간영역 유동계산법

선수갑판 위 침입수의 유동해석을 위해 침입수 수위가 파장에 비해 작다고 가정하고 천수파 이론에 기초한 유한차분법을 자체개발하여 이용하였다(Kim and Kim, 1996; Kim and Shin, 2005). 질량보존법칙과 운동량 보존법칙, 자유표면 경계조건, 바닥 경계조건으로부터 유도되는 갑판 위 침입수에 대한 보존형 천수파 방정식은 식 (5)~식 (7)과 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad \dots (5)$$

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(u \cdot uh)}{\partial x} + \frac{\partial(v \cdot uh)}{\partial y}$$

$$= -\frac{1}{2}(g+a_v)\frac{\partial h^2}{\partial x} + h(g+a_v)\alpha_x + ha_h \dots (6)$$

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(u \cdot vh)}{\partial x} + \frac{\partial(v \cdot vh)}{\partial y}$$

$$= -\frac{1}{2}(g+a_v)\frac{\partial h^2}{\partial y} + h(g+a_v)\alpha_y \dots (7)$$

여기에서 h 는 갑판 위 수위, u 와 v 는 각각 x 방향과 y 방향 유속(천수파의 가정에 의해 수위에 걸쳐 평균된 유속임)이다. α_x, α_y 는 각각 갑판의 x, y 방향 미소 경사각이고 a_v 와 a_h 는 각각 상하방향과 수평방향 가속도이다. 가속도 a_v 와 a_h 는 함께 시간영역에서 계산되고 있는 선체 상하동요와 종동요로부터 산출되며, x 방향 갑판기울기 α_x 는 초기 경사각에 각 순간의 종동요각을 더하여 산출되므로 침입수 유동 계산은 선체운동 계산에 연성되어 있다. y 방향 갑판기울기 α_y 는 갑판 캠버에 의한 경사각을 사용하였다.

초기조건과 적절한 경계조건이 주어지면 식 (5)~식 (7)의 방정식들로부터 시간영역에서의 해를 구할 수 있다. 이 방정식들의 수치계산에 predictor-corrector 2중 상류차분법(Kim and Kim, 1996; Kim and Shin, 2005)을 개발하여 적용하였으며, 갑판 위 침입수의 수위와 유속 등이 시간의 진행에 따라 시뮬레이션 되었다. 경계조건으로 필요한 갑판둘레의 외부수위의 계산에는 선박의 전진에 의한 정적 수면상승(static swell-up)과 선체와 수면과의 상하방향 상대운동에 의한 동적 수면상승(dynamic swell-up)도 일종의 실험식을 사용하여 고려하였다.

갑판 침입수 시뮬레이션에서 얻어진 침입수 수위와 유속 등으로부터 선수갑판과 갑판위 구조물에 작용하는 압력들을 시간의 진행해 따라 각 위치에서 산출할 수 있다. 침입수에 의해 갑판에 수직하게 작용하는 압력은 정수압과 연직방향 운동량 변화로부터 식 (8)과 같이 계산된다(Buchner,

1995).

$$P_{dk} = \rho gh + \frac{\partial}{\partial t}(\rho h V_v)$$

$$= \rho(g+a_v)h + \rho \frac{\partial h}{\partial t} V_v \dots (8)$$

여기에서, a_v 와 V_v 는 각각 계산위치에서 갑판의 상하방향 가속도와 속도이다.

갑판위에 정면을 보고 횡방향으로 설치된 수직판에 작용하는 압력은 식 (9)로 계산한다.

$$P_{fw} = \rho u^2 \left[1.0 + 1.2 \left(\frac{z_{dk}}{h} \right) \right], \quad 0 \leq z_{dk} \leq \frac{h}{2}$$

$$= \rho u^2 \left[2.13 - 1.05 \left(\frac{z_{dk}}{h} \right) \right], \quad \frac{h}{2} \leq z_{dk} \leq 2.02h$$

$$= 0.0, \quad \text{otherwise} \dots (9)$$

여기에서 z_{dk} 는 갑판으로부터 압력계산 위치까지의 높이이다.

3. 실험방법

실험은 부경대학교의 조파에인수조에서 수행되었다. 이 수조에는 최대 속도가 2m/sec인 예인전차와 최대파고 0.25m의 규칙파 및 불규칙파를 생성할 수 있는 조파기가 설치되어 있다. 실험대상 선박은 내항성능 연구에 대표적으로 사용되어 온 S175 컨테이너선(ITTC, 1983)이며, 이 선박의 주요요목을 <Table 1>에 보인다. 실험에는 축척이 1/100인 길이 1.75m 모형을 사용하였고, 실험 계측값들은 모두 실선 값으로 환산하여 수록하였다.

선수갑판 침수현상이 현저하게 일어나는 대파고 선수규칙파 중에서 선체운동 계측과 갑판위 수위 계측, 갑판과 정면 수직판에 작용하는 압력 계측이 수행되었다. 선체운동 계측은 예인전차로 모형을 예인하며 상하동요 변위와 종동요 변위를 potentiometer로 계측하였으며, 이때 전후동요

(surge)는 구속하였다. 종동요 질량 관성모멘트를 맞추기 위해 스윙벤치를 사용하였으며, 예인점은 무게중심 위치에 두었다. 선수갑판 위 침입수의 수위 계측은 갑판위에 탐지선을 설치한 저항식 수면변위 계측기를 사용하여 계측하였다. 선수갑판과 정면 수직판에 작용하는 압력들은 strain 형식의 압력센서를 사용하여 계측하였다. 압력센서의 직경은 3.81mm, 정격용량은 34.5kN/m², 분해능은 0.0017kN/m², 고유주파수는 45kHz 이었다. 모든 자료의 취득은 취득속도(sampling rate) 100kHz 의 A/D 변환기를 이용하였으며, 각 채널당 취득속도는 300Hz로 고정하였다.

<Table 1> Principal particulars of the S175 container ship

Main particulars	Values
Length between perpendiculars (<i>L</i>)	175.0 m
Breadth (<i>B</i>)	25.4 m
Depth (<i>D</i>)	15.4 m
Draft (<i>T</i>)	9.5 m
Displacement (Δ)	24,742 ton
Design Froude no. (F_n)	0.275
Block coefficient (C_B)	0.572
Freeboard at FP (f_{FP})	6.33 m
KG	9.52 m
LCG/L (Aft -)	-0.01417
Pitch gyradius/L	0.24

Ⅲ. 연구결과의 검증 및 고찰

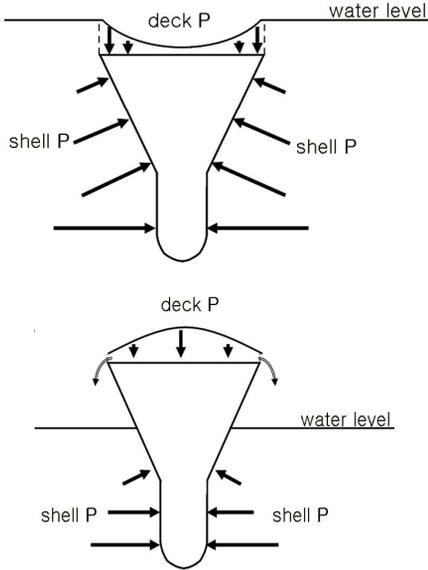
본 연구에서는 대과고 규칙과 중에서 선체와 선수갑판 침입수의 연성효과를 고려하여 선체운동과 침입수 유동 및 압력하중 등을 산출할 수 있는 전산프로그램이 개발되었다. 내항성능 연구에 널리 사용되어 온 S175 컨테이너선(ITTC, 1983)에 대해 계산을 수행하고 얻어진 결과를 부경대학교 조파예인수조에서 수행된 실험결과와 비교하여 검증하였고, 결과들에서의 역학적 특성

도 고찰하였다.

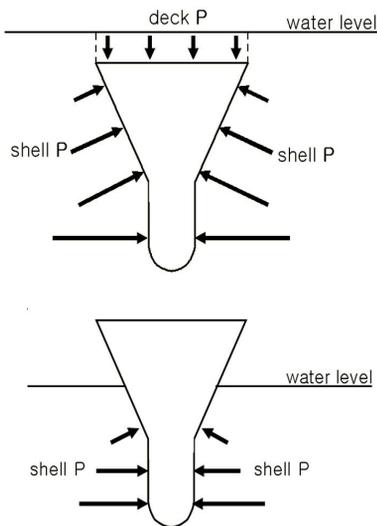
본 논문의 주 계산법은 선체운동과 갑판 침입수 유동을 직접 연성하여 계산하는 비선형 연성 계산법(coupled calculation method)이며, 이 방법은 시간영역 비선형 스트립법 중에서 갑판 침입수의 영향을 가장 엄밀하게 고려하는 계산법이라고 할 수 있다. 이 방법에서는 침입수 유동을 매 시간 스텝에서 선체운동을 반영하여 계산하고, 침입수 유동에 의한 식 (1.10)의 힘과 식 (2.10)의 모멘트를 반영하여 선체운동을 수정 계산하며, 수정된 선체운동을 반영하여 침입수 유동을 다시 계산하는 반복계산 방식으로 매 시간스텝에서 선체와 침입수의 연성운동을 계산한다. 이때 갑판 침입수에 의한 갑판압력은 갑판이 외부수면 아래 잠겼을 때나 외부수면 밖에 드러났을 때나 시물레이션 된 침입수 유동으로부터 직접 계산하여 반영하므로, 외부수면이 갑판보다 높아 갑판으로 해수가 유입되고 있는 동안은 물론이고 갑판이 외부수면 위로 올라와 배수가 진행되는 동안에도 남아있는 침입수가 계속 갑판에 압력을 가한다 ([Fig. 1] 참조). 이 연성계산법에서 선체를 떠받치는 부력은 식 (1.9)와 식 (2.9)의 각 순간 수면 아래 단면적 *A*에 의해 계산되는데, 갑판보다 외부수면이 더 높게 올라가는 경우 선측 선체외판이 갑판위로 수직 연장된 것으로 간주하여 수면 아래 단면적 *A*를 계산한다. 이는 부력의 원인이 되는 선체외판의 압력이 외부수면이 갑판보다 더 높게 올라가는 경우에도 잠긴 깊이에 따라 계속 증가하는 점을 반영하기 위한 것이다.

참고로 비선형 단순계산법(simple calculation method)에 의한 계산결과도 수록하였는데, 이 단순계산법에서는 부력 계산을 위한 식 (1.9)와 식 (2.9)의 수면아래 단면적 *A*를 각 순간 수면아래 잠긴 실제 단면적을 사용하여 계산하며, 식 (1.10)과 식 (2.10)의 갑판 침입수에 의한 힘과 모멘트 항들은 삭제된다. 이 계산법에서 갑판압력은 외부수면과 갑판과의 높이 차에 의한 정수압으로 간주되는 셈이며, 갑판이 수면 위로 올라오

는 즉시 갑판압력은 소멸된다([Fig. 2] 참조).



[Fig. 1] Pressure sketch for coupled calculation method



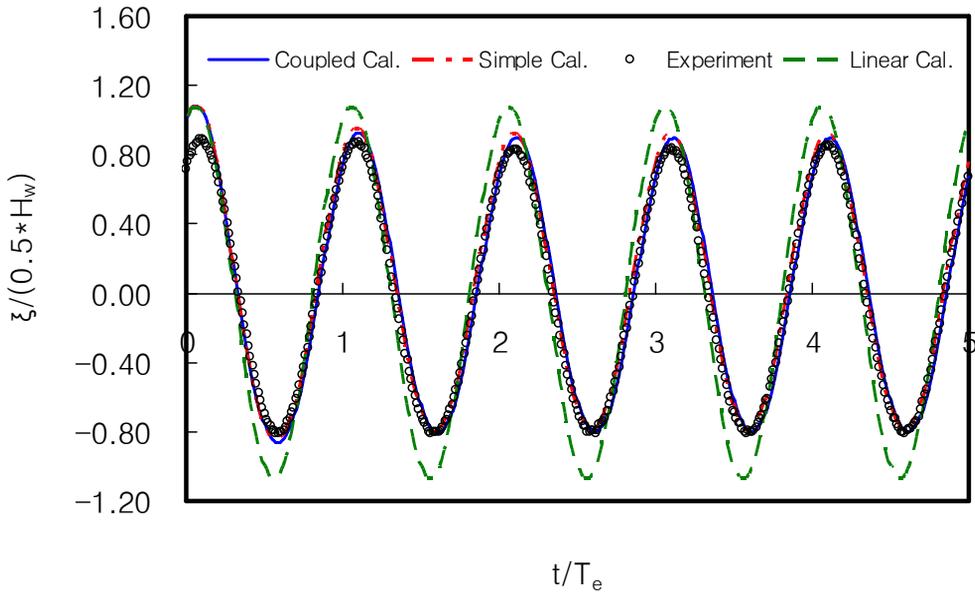
[Fig. 2] Pressure sketch for simple calculation method

이 단순계산법에서 선체운동 계산은 침입수 유동 계산과 직접 연성되지는 않으며, 침입수 유동 계산은 독립적으로 계산된 선체운동을 반영하여 별도로 또는 선체운동 계산과 병행하여 수행된다.

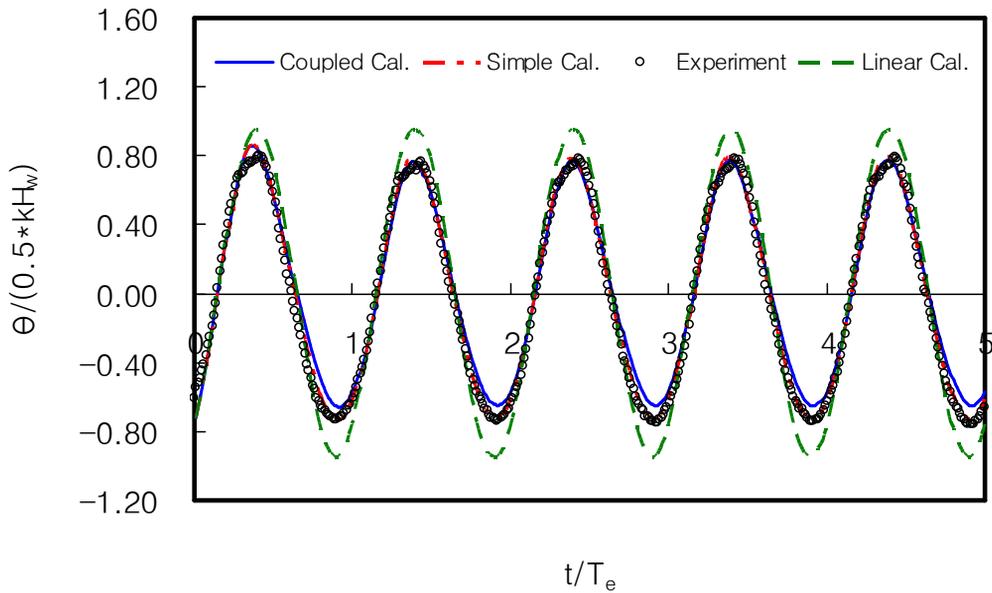
본 논문의 계산법으로 얻어진 주요 계산결과들을 [Fig. 3]~[Fig. 8]에 보인다. 계산조건은 Froude 수 $F_n = U/\sqrt{gL} = 0.2$, 선수각 $\mu = 180^\circ$, 파장과 선장의 비 $\lambda/L = 1.2$, 파고 $H_w = 9.55\text{m}$ 이고, 하중상태는 만재상태이다.

[Fig. 3]과 [Fig. 4]에는 각각 상하동요와 종동요의 시간영역 비선형 계산결과를 실험계측값과 비교하여 보인다. 비선형 연성계산(coupled cal.) 결과와 비선형 단순계산(simple cal.) 결과를 함께 보이고 있고, 주파수영역에서 선형해석법으로 계산된 선형계산(linear cal.)의 결과도 시간영역 해로 변형하여 참고로 보인다. 상하동요 변위 ζ 는 상방향 변위가 양이고, 종동요 변위 θ 는 선수가 내려 갈 때가 양이다. 횡축은 시간 t 를 조우주기 T_e 로 나눈 무차원 시간을 나타낸다. 시간영역에서의 비선형 계산시 계산시간의 단축을 위해 초기 조건으로 선형해를 사용하고 있으며, 조우주기의 약 3배 정도 계산 후 운동응답이 주기적인 반복상태로 수렴함을 볼 수 있다. 본 연구에서의 비선형 해는 초기 과도과정을 지난 후 얻어지는 준 정상상태(주기적인 반복상태)에서의 해를 뜻한다. 두 비선형 계산결과와 실험결과는 대체로 잘 일치하고 있음을 볼 수 있고, 참고로 보여진 선형해는 본 논문의 비선형 계산이나 실험에 비해 상대적으로 과장된 운동이 계산됨을 볼 수 있다. 이로부터 선수갑판 침수가 발생하는 큰 파도 중에서의 대진폭 선체운동을 정확히 계산하기 위해서는 본 논문에서와 같은 시간영역 비선형 계산법들을 이용하여 비선형 효과를 적절히 고려해야 함을 알 수 있다.

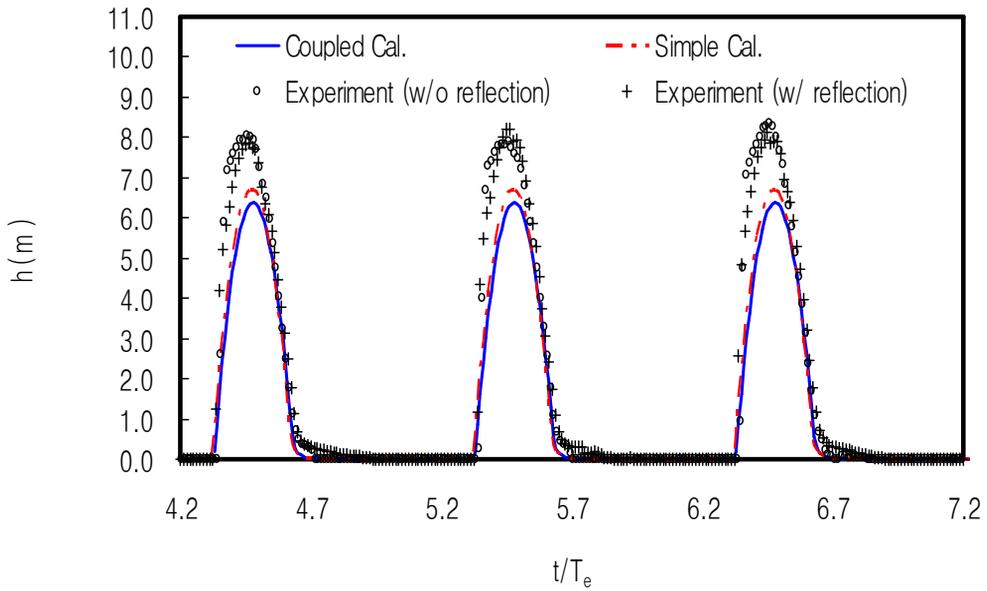
[Fig. 5]와 [Fig. 6]에는 각각 선수 끝($x/L = 0.521, y = 0$)과 스테이션 9.5($x/L = 0.45, y = 0$)



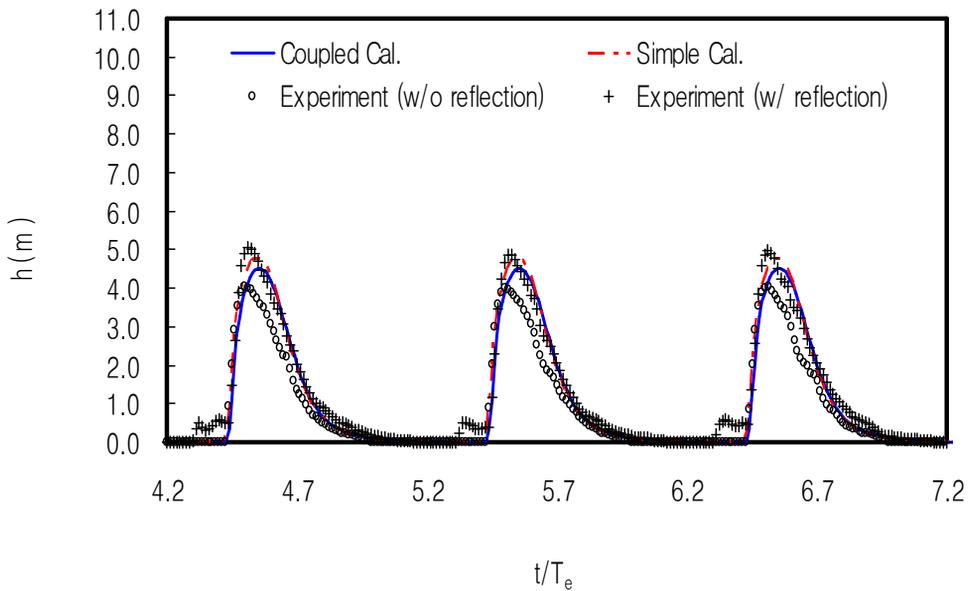
[Fig. 3] Comparison of the calculated heave response with the experimental measurement (S175, $F_n=0.2$, $\mu=180^\circ$, $\lambda/L=1.2$, $H_m=9.55m$).



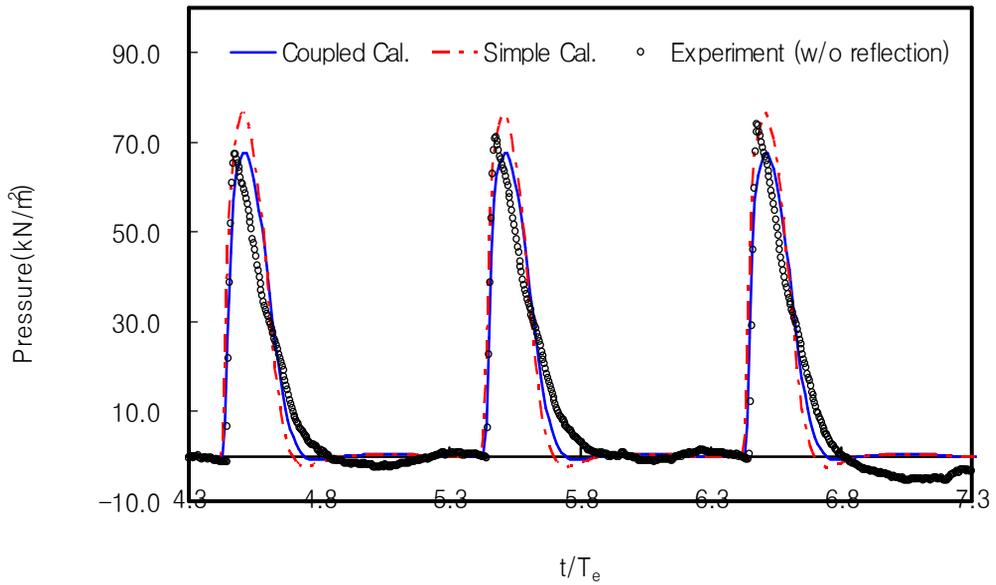
[Fig. 4] Comparison of the calculated pitch response with the experimental measurement (S175, $F_n=0.2$, $\mu=180^\circ$, $\lambda/L=1.2$, $H_m=9.55m$).



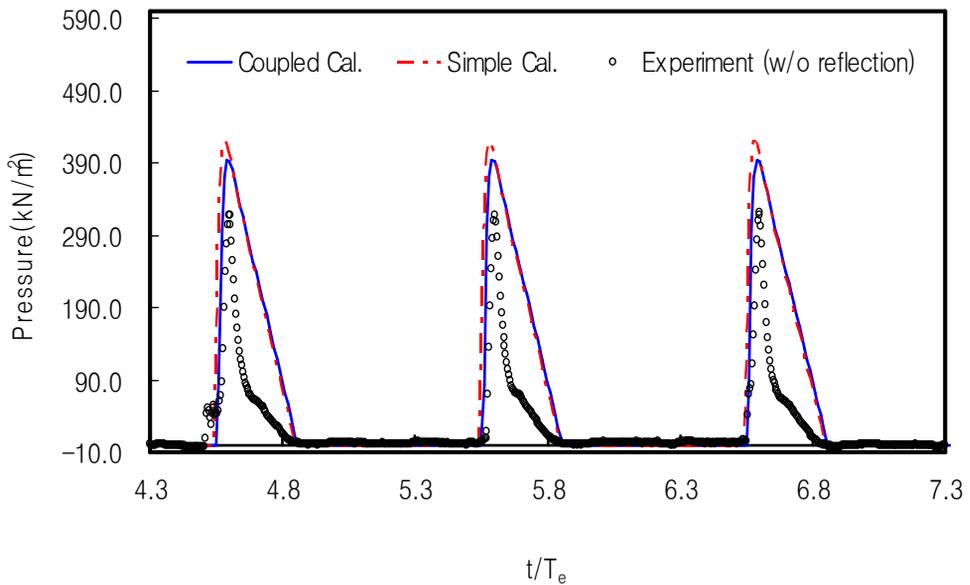
[Fig. 5] Comparison of the deck water height calculated at stem with the experimental measurement (S175, $F_n=0.2$, $\mu=180^\circ$, $\lambda/L=1.2$, $H_m=9.55m$, $x/L=0.521$, $y=0$).



[Fig. 6] Comparison of the deck water height calculated at station 9.5 with the experimental measurement (S175, $F_n=0.2$, $\mu=180^\circ$, $\lambda/L=1.2$, $H_m=9.55m$, $x/L=0.45$, $y=0$).



[Fig. 7] Comparison of the bow deck pressure calculated at station 9.5 with the experimental measurement ($S175, F_n=0.2, \mu=180^\circ, \lambda/L=1.2, H_w=9.55m, x/L=0.45, y=0$).



[Fig. 8] Comparison of the front wall pressure calculated at station 8.5 with the experimental measurement ($S175, F_n=0.2, \mu=180^\circ, \lambda/L=1.2, H_w=9.55m, x/L=0.35, y=0, z_{dk}=2.0m$).

에서의 침입수 수위에 대한 계산결과를 실험결과와 비교하여 보인다. 실험은 선수갑판 후단에서 갑판 침입수가 좌우로 잘 빠져 나가도록 한 무반사(w/o reflection) 상태와 선수갑판 후단에 횡방향으로 수직벽을 전체 선폭에 걸쳐 설치하여 갑판 침입수의 반사가 이 벽에서 크게 일어나도록 한 유반사(w/ reflection) 상태의 두 가지 경우에 대해 수행되었다. 선수 끝에서는 수위 계산값들이 실험값보다 다소 작게 나타나고 있지만, 이보다 후방인 스테이션 9.5에서는 계산과 실험이 무난한 일치를 보인다고 할 수 있다.

[Fig. 7]에는 스테이션 9.5($x/L=0.45, y=0$)에서의 갑판 침입수에 의한 선수갑판에서의 압력 계산결과를 실험결과와 비교하여 보이고, [Fig. 8]에는 스테이션 8.5($x/L=0.35, y=0$)에서 선수정면을 보고 횡방향으로 설치된 수직벽의 높이 $z_{dk} = 2.0m$ 위치에서 계산된 압력 계산결과를 실험결과와 비교하여 보인다. 갑판압력은 선체 운동의 영향이 들어있는 식 (8)에 의해 계산되었으며, 식 (1.10)과 식 (2.10)의 적분에 의해 계산된 힘과 모멘트는 운동응답 계산에 반영된다. 정면벽(front wall)에서의 압력은 계산위치를 통과하는 침입수의 수위와 유속을 이용하여 식 (9)로 계산되었으며, 이 수직벽 압력에 의한 힘은 수평방향으로 작용하므로 상하동요 중동요 운동응답 계산에는 반영하지 않았다. 갑판압력은 계산결과와 실험결과가 서로 잘 일치한다고 할 수 있고, 벽 압력의 경우 계산결과가 실험결과보다 다소 크지만 최대값 관점에서 대체로 무난하다고 할 수 있다. 이러한 갑판압력이나 정면벽 압력의 최대값들이 선체나 의장품들의 구조강도 설계시 필요한 설계하중이므로 이 압력들을 적절히 산출하는데 본 논문의 방법이 타당하게 사용될 수 있다고 사료된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 대파고 규칙파 중에서 선체와 선수갑판 침입수의 연성효과를 고려하여 선체운동과 침입수 유동, 압력하중 등을 산출할 수 있는 계산법이 개발되었다. 내항성능 연구에 널리 사용되어 온 S175 컨테이너선에 대해 계산을 수행하고 얻어진 결과를 부경대학교 조파예인수조에서 수행된 실험결과와 비교하여 검증하였다. 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

본 논문의 비선형 연성계산법은 선체운동과 갑판 침입수 유동을 매 계산스텝에서 직접 연성하여 계산하므로 시간영역 비선형 스트립법 중에서 갑판 침입수의 영향을 가장 엄밀하게 고려하는 계산법이라고 할 수 있다.

본 시간영역 계산법들을 사용하여 얻어진 선체운동과 갑판 침입수 수위, 갑판과 정면벽에 작용하는 압력들의 계산결과가 실험 계측값들과 대체로 잘 일치함을 확인하였으며, 본 논문의 계산법이 관련된 연구들을 위한 타당한 계산법임을 확인하였다.

본 계산법은 어선을 비롯한 일반적인 배수량형 선박들에 적용할 수 있으므로 향후 큰 파도 중에서의 이들 선박의 선수갑판 침수현상에 대비한 설계법 연구에 활용이 기대된다.

References

- Buchner B(1995). On the Impact of Green Water Loading on Ship and Offshore Unit Design. PRADS'95, Seoul, 430~443.
- Faulkner D(2002). An Analytical Assessment of the Sinking of the m.v. Derbyshire. Journal of Ship and Ocean Technology, 6(4), 19~76.
- Hwang JH, Kim YJ, Kim JY and Oh IG(1985). Nonlinear Effects on Ship Motion and Wave Load. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 22(3), 1~8.
- ITTC(International Towing Tank Conference)(1983).

Summary of Results Obtained with Computer Programs to Predict Ship Motions in Six Degree of Freedom and Related Responses. Report of 15th and 16th ITTC Seakeeping Committee.

Kim YJ and Kim IC(1996). Numerical Simulation of Two-Dimensional Shipping Water by Using a Simplified Model. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 33(2), 1~12.

Kim YJ and Shin KS(2005). Numerical Calculation

and Experiment of Green Water on the Bow Deck in Regular Waves. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 42(4), 350~356.

-
- Received : 26 July, 2021
 - Revised : 09 August, 2021
 - Accepted : 12 August, 2021