

규칙파 중 선수갑판 Green Water에 대한 수치계산 및 실험

김용직*, 신기석^{†**}

부경대학교*, 한진중공업(주)**

Numerical Calculation and Experiment of Green Water on the Bow Deck in Regular Waves

Yong Jig Kim* and Ki-Seok Shin^{†**}

Pukyong National University*, Hanjin Heavy Industries & Construction Co., LTD.**

Abstract

Prediction of green water loads acting on the bow deck is an essential part for the design of bow structures against the green water impact. Proper technique of the green water simulation is highly required for the prediction of green water loads.

In this paper, the green water flow on bow deck is simulated by FDM(finite difference method). Using the results of green water simulation, impact load on bow deck is calculated. Also, experiments are carried out to compare with the numerical calculation. Through the comparisons between experimental results and numerical results, it is verified that the present numerical tool is adequate as a practical calculation tool for the green water problem.

※Keywords: Green water (갑판침입수), Bow deck(선수갑판), Water breaker(물결막이), FDM(유한차분법), Experimental measurement(실험계측)

1. 서론

거친 해상에서 갑판상으로 덮치는 green water는 선수갑판의 구조적 손상뿐만 아니라 선박 자체의 상실까지도 초래한다(배광준 등 1992). 그 일 예가 바로 1980년 Derbyshire호의 침몰사고

(Faulkner 2002)이다. 이러한 green water 충격에 대비한 구조설계를 위해서는 green water 시뮬레이션 기법의 개발과 green water 하중의 예측이 요구된다(김용직과 김인철 1996, Mizoguchi 1988, Ogawa et al. 1997, Fekken et al. 1999).

본 논문에서는 선수갑판 green water 시뮬레이션을 위한 수치계산법(유한차분법 이용)을 제시한다. 제시된 수치계산법에 의한 선수갑판상 수위 및 선수갑판에 작용하는 압력과 하중 등의 계산결과를 부경대학교 예인수조에서 실시된 실험결과와

접수일: 2005년 2월 23일, 승인일: 2005년 4월 18일

† 주저자, E-mail: seoksk@hanjinSC.com

Tel: 051)410-3357

비교하였다. 그 비교를 통해 본 수치계산법이 green water 문제에 충분히 적용 가능함을 확인하였다.

2. 기본 방정식

선체 고정 좌표계 $o-xyz$ 는 원점이 선체중량의 수선면에 있고, 선수방향으로 양의 x 축, 상방향으로 양의 z 축을 갖는 우수좌표계이다. 갑판이 수평 상태이고 움직이지 않는다고 가정할 때, 질량보존 법칙과 운동량보존법칙으로부터 유도되는 천수파 방정식은 다음과 같다(Stoker 1957).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial h}{\partial x} \tag{2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial h}{\partial y} \tag{3}$$

여기에서 h 는 갑판위 수심, u 와 v 는 각각 x 방향과 y 방향 유속, t 는 시간, g 는 중력가속도이다. 식(2)와 식(3)을 갑판의 x , y 방향 미소경사각 α_x , α_y 와 종운동에 의한 상방향 가속도 a_v , 수평방향 가속도 a_h 를 고려하여 확장하고 보존형으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(u \cdot uh)}{\partial x} + \frac{\partial(v \cdot uh)}{\partial y} \\ &= -\frac{1}{2}(g+a_v) \frac{\partial h^2}{\partial x} + h(g+a_v)\alpha_x + ha_h \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(u \cdot vh)}{\partial x} + \frac{\partial(v \cdot vh)}{\partial y} \\ &= -\frac{1}{2}(g+a_v) \frac{\partial h^2}{\partial y} + h(g+a_v)\alpha_y \end{aligned} \tag{5}$$

여기에서 가속도 a_v 와 a_h 는 선체 종운동으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$a_v = \ddot{\xi} - (x-x_G)\ddot{\theta} - (z-z_G)\ddot{\theta}^2 \tag{6}$$

$$a_h = (x-x_G)\ddot{\theta}^2 - (z-z_G)\ddot{\theta} \tag{7}$$

여기에서 ξ 는 상하동요(heave) 변위이고, θ 는 종동요(pitch) 각이다. 도트(·)는 시간에 대한 미분을 나타내며, x_G 와 z_G 는 각각 선박 무게중심의 x 좌표와 z 좌표이다.

x 방향 갑판기울기 α_x 는 초기 경사각에 각 순간의 종동요각을 더하여 계산하며, y 방향 갑판기울기 α_y 는 camber에 의한 각 위치에서의 경사각을 적용하였다.

3. 수치계산법

선체운동은 시간영역 대진폭 운동에 의한 유체 역학적 힘들의 비선형적 변화를 근사적으로 고려할 수 있는 비선형 스트림리본(황종홍 등 1985)을 이용하여 계산하였다. Green water 시뮬레이션을 위한 기본방정식으로는 앞장의 식(1)과 식(4), 식(5)를 사용하였다.

3.1 수면상승 계산법

수면상승(swell-up)은 선수갑판 경계에서의 green water의 수심 추정에 아주 중요한 인자이며, 정적 수면상승과 동적 수면상승으로 구분할 수 있다. 이들은 Tasaki(1961)의 실험식에 본 실험을 통한 수장보완값을 사용하였으며, 정적수면상승 h_s 와 동적 수면상승 h_d 는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} h_s &= 0.5f_s \cos[2\pi(1-\xi)]e^{0.35(\xi-1)} \\ &- (0.0025F_n + 0.005)L \cos\left(\frac{\pi\xi}{2}\right) \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} h_d &= \frac{1}{6}(C_B - 0.45)\sqrt{\omega_e^2 \cdot L/g} \\ &[-\zeta + (x-x_G)\theta + \eta] \end{aligned} \tag{9}$$

여기서,

$$f_s = 0.75 \frac{BL}{L_E} \left(2.1 \frac{B}{L_E} - 0.2\right) F_n^2 \tag{10}$$

$$\xi = 2x/L \quad (11)$$

3.2 Green water 유동 시뮬레이션법

2차원 green water 유동을 시뮬레이션할 수 있는 predictor-corrector 2중 상류차분법의 개발은 김용직과 김인철(1996)에 의해 이루어졌으며, 본 연구에서 이 수치해석법을 3차원 green water 유동을 시뮬레이션할 수 있도록 확장하였다.

Predictor 단계에서 식(1)의 유한차분 계산은 다음과 같다.

$$h_{i,j}^{n+1} = h_{i,j}^n + \Delta t \left[\frac{\partial h}{\partial t} \right]_{i,j}^n \quad (12)$$

여기에서

$$\left[\frac{\partial h}{\partial t} \right]_{i,j}^n = \left[-\frac{\partial(uh)}{\partial x} \right]_{i,j}^n + \left[-\frac{\partial(vh)}{\partial y} \right]_{i,j}^n \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \left[-\frac{\partial(uh)}{\partial x} \right]_{i,j}^n &= -\frac{1}{2\Delta x} [(u_f^n - |u_f^n|)h_{i+1,j}^n \\ &\quad + (u_f^n + |u_f^n| - u_b^n + |u_b^n|)h_{i,j}^n \\ &\quad - (u_b^n + |u_b^n|)h_{i-1,j}^n] \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \left[-\frac{\partial(vh)}{\partial y} \right]_{i,j}^n &= -\frac{1}{2\Delta y} [(v_f^n - |v_f^n|)h_{i,j+1}^n \\ &\quad + (v_f^n + |v_f^n| - v_b^n + |v_b^n|)h_{i,j}^n \\ &\quad - (v_b^n + |v_b^n|)h_{i,j-1}^n] \end{aligned} \quad (15)$$

$$u_f^n = \frac{1}{2} (u_{i,j}^n + u_{i+1,j}^n) \quad (16)$$

$$u_b^n = \frac{1}{2} (u_{i-1,j}^n + u_{i,j}^n) \quad (17)$$

$$v_f^n = \frac{1}{2} (v_{i,j}^n + v_{i,j+1}^n) \quad (18)$$

$$v_b^n = \frac{1}{2} (v_{i,j-1}^n + v_{i,j}^n) \quad (19)$$

여기에서 아래첨자 i 와 j 는 x 방향으로 i 번째, y 방향으로 j 번째 절점을 나타내며, Δx 와 Δy 는 각각 x 방향과 y 방향으로의 절점간 거리이다. Δt 는 시간증분이고, 위첨자 n 은 n 번째 시간스텝을 나타낸다. 시간스텝 바()는 predictor 단계의 값을 뜻한다.

식(4)와 식(5)의 predictor 단계에서 유한차분 계산은 식(1)에서의 방법과 유사하며, 식(4)와 식(5)의 우변 첫째항에 대해서는 중앙차분법을 사용한다.

Corrector 단계에서 식(1)의 유한차분 계산은 반복계산 없이 아래와 같이 한다.

$$h_{i,j}^{n+1} = h_{i,j}^n + \frac{\Delta t}{2} \left\{ \left[\frac{\partial h}{\partial t} \right]_{i,j}^n + \left[\frac{\partial h}{\partial t} \right]_{i,j}^{n+1} \right\} \quad (20)$$

여기에서 우변의 마지막항은 $(n+1)$ 스텝에서 predictor 값에 의한 변화율을 뜻한다. Corrector 단계에서 식(4)와 식(5)의 계산법은 식(20)의 방법과 유사하다.

경계조건으로는 상황에 따라 여러 조건들이 적용되었다. 갑판 외곽의 수면높이가 갑판보다 높아 해수가 유입되는 경우에는 갑판에서 수면까지의 높이를 갑판경계에서의 수심 h 로 주었고, 유속 u 는 선속으로, v 는 0으로 주었다. 외부 수면이 갑판 아래에 있을 때, 내부 유동이 배수방향이면 낙하 경계조건이 갑판 둘레에서의 경계조건으로 이용되고, 내부 유동이 입수방향이면 h 와 u , v 를 0으로 주었다. 갑판 후단에서는 유체가 자연스럽게 통과하도록 개방 경계조건을 주었다(김용직과 김인철 1996).

3.3 갑판상 충격압력 계산법

Green water 시뮬레이션에서 얻어진 유속과 수위에 대한 정보로부터 갑판에 작용하는 갑판상 수직압력을 산출할 수 있다. Green water에 의한 갑판상 수직 압력은 정수압과 연직방향 운동량 변화로부터 다음과 같이 계산된다(Buchner 1995).

$$P = \rho(g + a_v)h + \rho \frac{\partial h}{\partial t} V_v \quad (21)$$

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

4. 실험과 수치계산 결과 및 분석

S175 컨테이너선을 대상으로 실험과 수치계산을 수행하였다. Fig. 1은 대상선의 선도이고, Table 1은 대상선박에 대한 주요제원이다. Fig. 2에 각 대상선박에 대한 갑판상 힘의 계산 및 계측을 위한 패널과 갑판상 수위와 압력의 계산 및 계측을 위한 위치를 보인다. 여기서 H1, H2, H3은 파고계를 구분하기 위한 기호이다. 실험은 1.75m 모형선을 이용하여 부경대학교 예인수조에서 실시되었으며, 갑판상 불옥(bulwarks)은 실험과 계산에서 모두 무시하였다.

수치계산 결과들은 초기 과도과정이 충분히 소멸된 후인 조우주기(T_e) 3배 이후의 결과들이다. 수치계산결과와 유사한 실험결과를 얻기 위해 물결막이(water breaker)를 계측에 필요한 최소의 폭으로 제한하였다. 이 경우의 계측결과를 'w/o reflection'으로 표시하였다. 일부 실험들은 물결막이에 의해 green water가 전폭에 걸쳐 반사되는 경우에 대해서도 수행되었고, 그 결과는 'w/ reflection'으로 표시하였다. 계산 및 실험 결과들은 모두 실선에 대한 값들로 나타내었다.

Fig. 3에 계산된 갑판상 green water 수위분포를 이용하여 8개의 시간스텝에 대한 green water 거동을 보인다. x_{dk} 는 선수갑판 후단(water breaker 위치)로부터의 거리이며, $x_{dk} - y_{dk}$ 평면은 갑판표면상에 놓여 있다. 이 경우 입사파의 파고(H_w)는 9.545m, F_n 는 0.2, 선수각(μ)은 180°(선수파), 파장과 선장의 비(λ/L)는 1:2였다. x 와 y 방향으로의 격자간격은 모두 0.5m이고, 시간증분 Δt 는 $T_e/300$ (T_e 는 조우주기)이다. 이 그림들로부터 유입된 green water가 가운데로 몰리면서 선체중앙선을 따라 'green water tongue'이라 불리는 유량 집중부가 형성되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4에 계산된 상하동요(heave)와 종동요(pitch)를 실험결과와 비교한 것을 보인다. k 는 입사파의 파수이다. 계산과 실험의 선체운동응답이 대체적으로 잘 일치함을 알 수 있다.

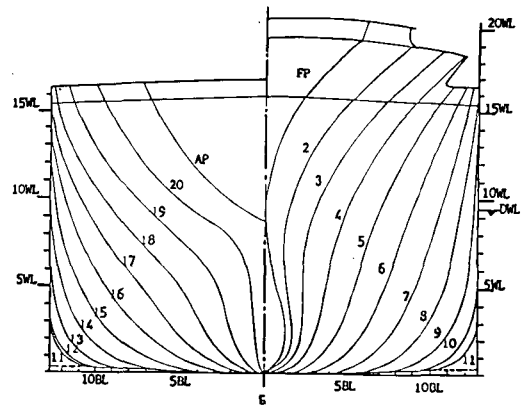


Fig. 1 Body plan of S175 container ship

Table 1 Principal particulars of S175 container ship

Principal particulars	Values
Length between perpendiculars (L)	175.0 m
Breadth (B)	25.4 m
Depth (D)	15.4 m
Full load draft (T)	9.5 m
Full load displacement (Δ)	24,742 ton
Design Froude no. (F_n)	0.275
Block coefficient (C_B)	0.572
LCG/L (Aft -)	-0.01417
Pitch gyradius/L	0.24*

* Assumed Value

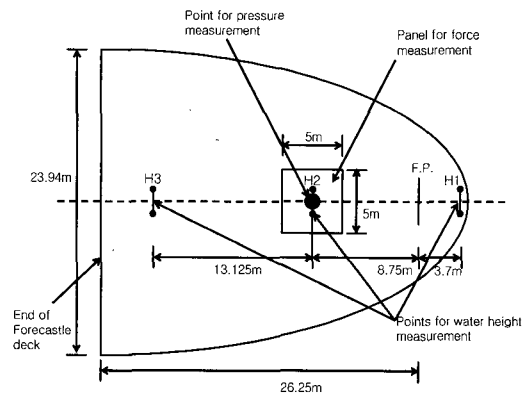
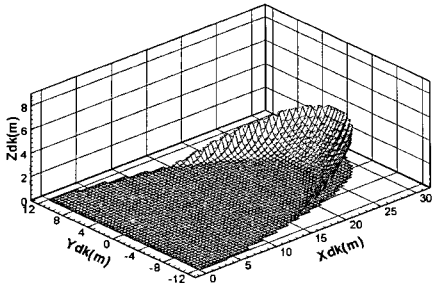
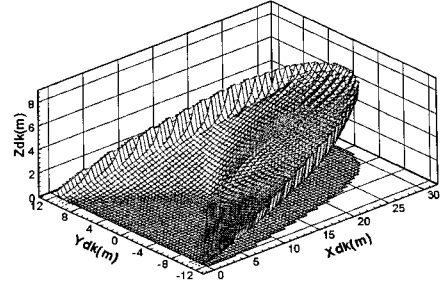


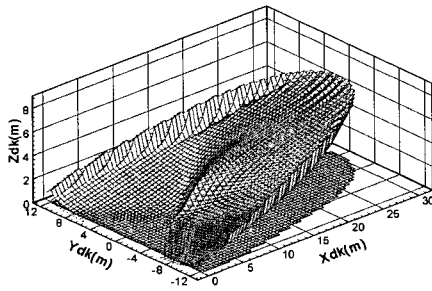
Fig. 2 Measurement and calculation points of S175 container ship



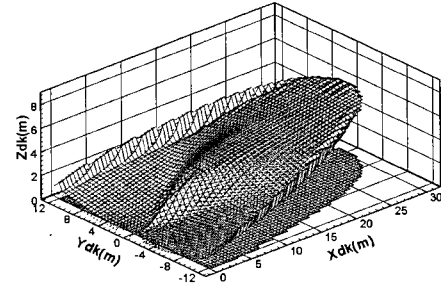
(1) $t/T_e = 4.36$



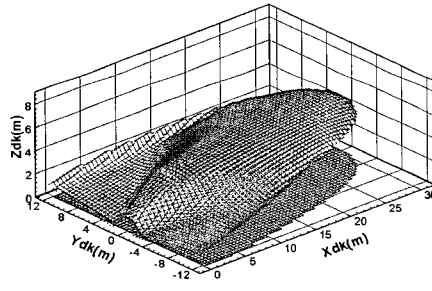
(2) $t/T_e = 4.46$



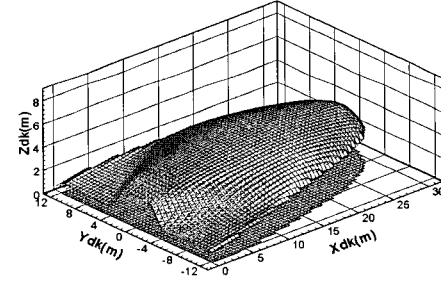
(3) $t/T_e = 4.49$



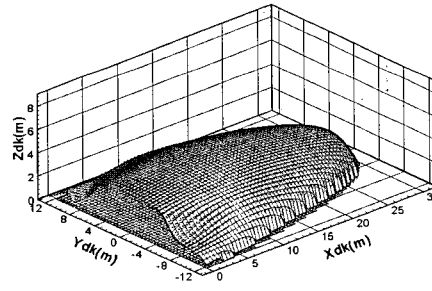
(4) $t/T_e = 4.52$



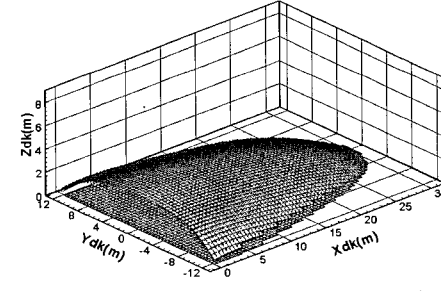
(5) $t/T_e = 4.55$



(6) $t/T_e = 4.58$



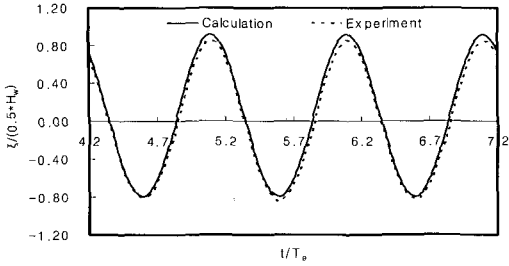
(7) $t/T_e = 4.62$



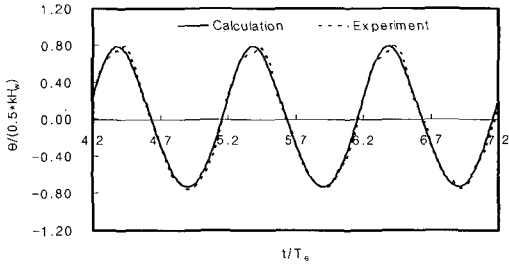
(8) $t/T_e = 4.68$

Fig. 3 Simulated green water

($F_n=0.2$, $\mu=180^\circ$, $H_w=9.545$ m, $\lambda/L=1.2$, $\Delta x=0.5$ m, $\Delta y=0.5$ m, $\Delta t= T_e/300$)



(a) Heave



(b) Pitch

Fig. 4 Comparison of motion response($F_n=0.2$, $\mu=180^\circ$, $H_w=9.545$ m, $\lambda/L=1.2$)

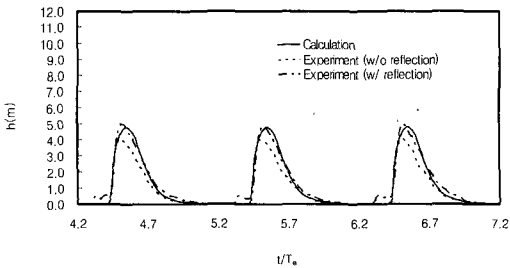


Fig. 5 Comparison of green water height at $H2(F_n=0.2$, $\mu=180^\circ$, $H_w=9.545$ m, $\lambda/L=1.2$)

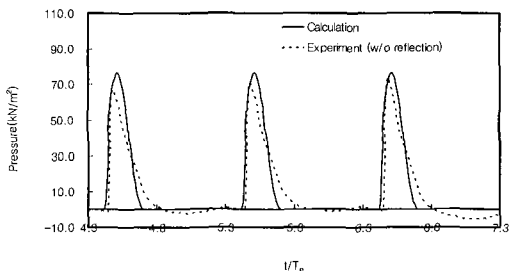


Fig. 6 Comparison of pressure on deck($F_n=0.2$, $\mu=180^\circ$, $H_w=9.545$ m, $\lambda/L=1.2$)

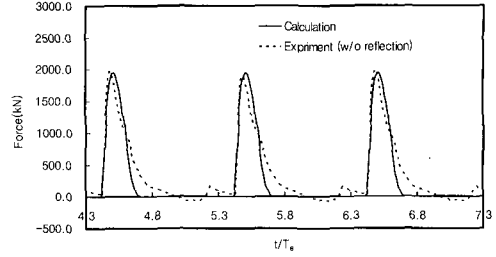


Fig. 7 Comparison of force on deck panel ($F_n=0.2$, $\mu=180^\circ$, $H_w=9.545$ m, $\lambda/L=1.2$)

Fig. 5~Fig. 7에 계산된 green water 수위와 갑판상 압력, 갑판 패널상 힘을 실험결과와 비교한 것을 보인다. 계측과 계산의 위치는 Fig. 2에서와 같다. 수위와 압력, 힘은 각각 별도의 실험을 통해 얻어졌으며, 실험 장비 및 방법에 대한 자세한 내용은 김용직 등(2004)에 수록되어 있다. 계산결과가 실험결과와 대체로 잘 일치함을 알 수 있다.

본 수치계산 프로그램은 IBM 800MHz 컴퓨터를 이용하여 5주기까지 계산하는 데 보통 1분정도 밖에 걸리지 않아 실용적이라 하겠다.

5. 결론

갑판상 green water 시뮬레이션을 위한 predictor-corrector 2중 상류차분법을 이용한 새로운 수치계산법을 제시하였다. S175 콘테이너선의 선체운동 및 선수갑판상의 green water 수위와 압력, 힘에 대한 수치계산 결과를 부경대학교 예인수조에서 수행되었던 실험결과와 비교하였다.

수치계산결과는 실험결과와 대체로 잘 일치하고, 하나의 경우에 대해 선체운동 계산을 포함한 green water 시뮬레이션을 수행하는 데 대략 1분 정도가 소요됨에 따라 green water 문제를 해석하는 데 충분히 실용적이라고 생각된다.

후 기

본 연구는 대우조선해양(주), 삼성중공업(주), 현대중공업(주), (사)한국선급의 지원으로 수행된

연구결과 중 일부임을 밝히며, 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김용직, 김인철, 1996, "단순화 모델에 의한 2차원 갑판 침입수의 수치 시뮬레이션," 대한조선학회 논문집, 제 33권, 제 2호, pp. 1-12.
- 김용직, 신기석, 허주호, 서용석, 김화수, 하태범, 하영록, 추교덕, 박경원, 김대웅, 권승민, 이춘기, 김문성, 한용연, 이현호, 문중수, 김대현, 도형민, 2004, Green Water에 의한 선수부 충격하중 평가법의 개발, 부경대학교, 대우조선해양(주), 삼성중공업(주), 현대중공업(주), (사)한국선급 공동연구보고서.
- 배광준, 홍도천, 홍석원, 홍사영, 염덕준, 박인규, 1992, "S-175 컨테이너 모형선의 갑판침수현상에 대한 공동 조사연구," 대한조선학회 논문집, 제 29권, 제 1호, pp. 71-80.
- 황종흠, 김용직, 김진영, 오일근, 1985, "비선형성을 고려한 규칙파중 선체응답에 관한 연구," 대한조선학회지, 제 22권, 제 3호, pp. 1-8.
- Buchner, B., 1995, "On the Impact of Green Water Loading on Ship and Offshore Unit Design," PRADS'95, Seoul, pp. 430-443.
- Faulkner, D., 2002, "An Analytical assessment of the Sinking of M. V. Derbyshire," SOTECH, Vol. 6, No. 4, pp. 12-76.
- Fekken, G., Veldman, A.E.P. and Buchner, B., 1999, "Simulation of Green Water Loading Using the Navier-Stokes Equations," 7th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Nantes, pp. 6.3-1--6.3-12.
- Mizoguchi, S., 1988, "Analysis of Shipping Water with the Experiments and the Numerical Calculations," J.SNAJ, Vol. 163, pp. 150-159.
- Ogawa, Y., Taguchi, H. and Ishida, S., 1997, "Experimental Study on Shipping Water Volume and its Load on Deck," J.SNAJ, Vol. 182, pp. 177-185.
- Stoker, J. J., 1957, Water Waves, Interscience Publishers INC., New York.
- Tasaki, R., 1961, "On Shipping Water," Monthly Report of Transportation Technical Research Institute, Vol. 11, No. 8, pp. 1-32.



< 김 용 직 >



< 신 기 석 >