

선수부 갑판침입수의 수치시뮬레이션에 대한 기초연구

정광열*, 이영길^{†**}, 김남철^{***}

인하대학교 대학원 조선해양공학과*
인하대학교 기계공학부 조선해양공학전공**
인하대학교 황해권수송시스템연구센터***

A Fundamental Study for the Numerical Simulation Method of Green Water Occurrence on Bow Deck

Kwang-Leol Jeong*, Young-Gill Lee^{†**} and NamChul Kim^{***}

Naval Architecture and Ocean Engineering, Graduate School, Inha University*
Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University**
Regional Research Center for Transportation System of Yellow Sea, Inha University***

Abstract

Green water load is an important parameter to be considered in designing a modern ship or offshore structures like FPSO and FSRU. In this research, a numerical simulation method for green water phenomenon is introduced. The Navier-Stokes equations and the continuity equation are used as governing equations. The equations are calculated using Finite Difference Method(FDM) in rectangular staggered grid system. To increase the numerical accuracy near the body, the Cartesian cut cell method is employed. The nonlinear free-surface during green water incident is defined by Marker-density method. The green waters on a box in regular waves are simulated. The simulation results are compared with other experimental and computational results for verification. To check the applicability to moving ship, the green water of the ship which is towed by uniform force in regular wave, is simulated. The ship is set free to heave and to surge.

※Keywords: Green water(갑판침입수), Non-linear wave(비선형 파도), Marker-density method (밀도함수법), Cartesian cut cell(잘린 직사각형 격자계)

1. 서론

갑판상부에 해수가 침입하는 문제가 발생하기도 한다. 이러한 현상으로 발생하는 갑판상의 물을 갑판침입수(Green Water)라고 한다. 이러한 문제는 건조이 낮은 유조선과 살물선에서 문제가 되며, 해양에 고정되어 이동 및 선수각 제어가 어려운 선박형태의 해양구조물에서 심각한 문제가 될 수 있다. 이러한 이유로 갑판침입수는 선박과 해양구조물의 갑판상부에 대한 위험성 평가에 중요한 고려대상이다(Drake 2001). 실제 멕시코만 일대 다수의 해양구조물이 허리케인 이반(Ivan)에 의하여 생성된 갑판침입수로 손상을 입은 바 있으며(Choi and Ryu 2005), 1980년 Derbyshire호가 갑판침입수로 침몰한 경우도 있다(Kim and Shin, 2005).

갑판침입수와 관련된 연구는 실험을 통한 방법과(Buchner 2002, Drake 2001, Kim and Shin 2005), 문제를 단순화 시켜 제한된 조건만을 계산하는 연구(Han et al. 2004)들이 대부분이었다. 최근에 들어서는 이러한 방법에서 발전하여 Navier-Stokes 방정식을 수치적인 방법으로 직접 계산하는 연구들이 진행되고 있다. 그러나 이러한 방법들도 선박의 운동을 고려하지 않고 고정된 선박의 갑판침입수만을 계산하거나, 댐 붕괴와 같이 단순화 하여 연구를 진행하였다(Pham and Varyani 2005, Ryu et al. 2007). 갑판침입수 문제는 선박의 운동에 의한 파도의 상대 높이가 중요하기 때문에 선박의 운동도 함께 고려하는 방법들이 연구되고 있다. Yamasaki et al.(2005)은 유한차분법으로 고정된 상자와 움직이는 상자에서 발생하는 갑판침입수 현상을 수치시뮬레이션 하였으며, Shibata et al.(2007)은 MPS법으로 VLCC의 운동을 고려한 갑판침입수 현상을 시뮬레이션 하였다. Zhu et al.(2009)는 포텐셜 이론을 통하여 FPSO의 운동을 계산하였으며, 동시에 선박의 움직임을 Fluent 전산프로그램을 이용한 수치계산에 대입하여 파도에 의하여 움직이는 FPSO의 갑판침입수 현상을 시뮬레이션 하였다.

본 연구의 목적은 갑판침입수 현상을 시뮬레이션하기 위한 보다 정도 높은 수치기법을 개발하는 것이다. 개발된 수치기법을 검증하기 위하여 고정된 상자에 작용하는 갑판침입수 압력을 공개된

실험결과와 비교하였으며, 움직이는 물체로의 발전 가능성을 확인하기 위하여 규칙파 중에서 일정한 힘으로 예인되는 모형선에서 발생하는 갑판침입수 현상을 시뮬레이션 하였다.

2. 지배방정식과 이산화방법

유체를 등방성 비압축성 점성 유체로 가정하여 Navier-Stokes 방정식(식 (1))과 연속방정식(식 (2))을 지배방정식으로 사용하였다. 식 (1)의 F_i 는 체적력으로 본 연구에서는 중력과 물체의 이동에 의하여 발생하는 관성력을 의미한다.

$$\frac{D\vec{V}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \nu\nabla^2\vec{V} + \frac{F_i}{\rho} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (2)$$

지배방정식의 대류항을 제외한 나머지 항은, 시간에 대하여는 전진차분법을 공간에 대하여는 중심차분법을 이용하여 이산화 하였다. 대류항에는 삼차상류차분법을 이용하였으며, 물체주위의 격자에서는 일차상류차분법을 이용하여 이산화하였다. 대류항의 차분근사에는 Adams-Bashforth법을 이용하였다. 압력장에 대하여는 식 (3)과 같은 압력의 포아송방정식(Poisson Equation)을 SOR (Successive Over Relaxation)법으로 계산하였다(Ferziger and Peric 2002). 식 (3)의 H_i^n 는 대류항과 확산항, 그리고 체적력의 합을 의미한다. 식 (3)의 아래첨자는 직교좌표계의 방향을 의미하며 위첨자는 시간단계를 의미한다. 물체가 움직이는 경우 물체를 따라 격자를 재작성하지 않고 유동장에 물체의 가속도에 대응하는 체적력을 적용하였다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial p^{n+1}}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial H_i^n}{\partial x_i} \quad (3)$$

3. 격자계 및 물체경계조건

지배방정식은 직사각형 교차격자계에서 계산 되었다. 직사각형 격자계는 물체적합격자계에 비해

여 정도가 낮으나, 격자계 작성에 용이하고 계산 속도가 빠른 장점을 가지고 있다. Fig. 1에 보이는 것과 같이 각 격자의 압력 정의점은 격자의 중심에 위치하고 속도 정의점은 격자의 면상에 존재한다.

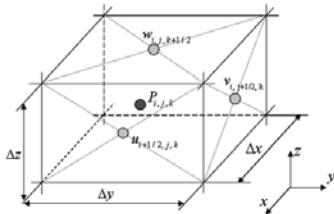


Fig. 1 Schematic drawing of staggered rectangular grid system

직사각형 격자계에서는 물체면과 격자선이 일치하지 않으므로 물체경계격자에서의 차분해법상 특별한 처리가 필요하다. 본 연구에서는 물체면과 격자선이 만나는 점들을 서로 이은 선분으로 3차원 물체를 정의하였다. 하나의 직사각형 격자에서 3차원 물체가 격자선과 만나는 경우는 그 격자선이 3~6개인 경우만 존재한다(Fig. 2). 그러나 격자의 압력 정의점과 속도 정의점의 존재 여부 및 방향을 고려하게 되면 너무 많은 종류로 분류되어 계산에 적용하기 어렵게 된다.

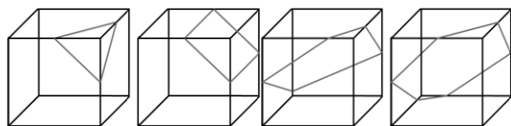


Fig. 2 Classification of cells cut by body surface in three-dimensional space

이러한 문제를 해결하기 위하여 물체경계격자를 격자선에 따라 분류하지 않고 각 격자면에서의 물체면과 격자선이 만나는 점들을 서로 이은 선분의 형상에 따라 분류하여 물체경계격자의 속도와 압력을 계산하였다. 이러한 격자면의 경우 물체표면과 만나는 조건은 속도 정의점의 존재유무와 방향을 함께 고려하여 모두 16가지로 분류할 수 있다(Fig. 3). 압력 정의점은 6개의 면 중 물체로 잘

리지 않은 면이 1개 이상 존재하는 경우 존재한다고 정의하였다. 비압축성 유체의 지배방정식 계산에서는 압력의 구배가 주요하게 계산에 사용되므로 잘려진 물체경계격자의 압력 정의점을 이동시킬 필요는 없다(Kirkpatrick et al 2003).

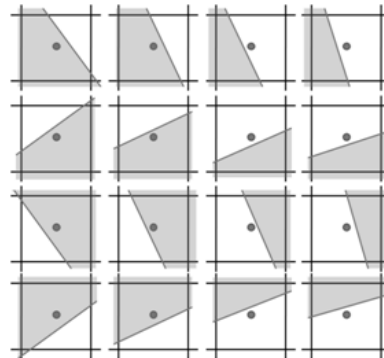


Fig. 3 Classification of the grid faces of body boundary cell

물체경계조건으로는 점착(No-slip)조건과 '0'발산조건을 만족시켰다. 물체경계격자는 격자가 잘려있어 완전 유체격자와 같은 방법으로 속도와 압력을 계산할 수 없으므로 속도-압력 동시반복기법을 이용하여 속도와 압력을 계산하였다. 물체에 인접한 주위의 각 방향 위치에 따른 속도변화는 2차방정식의 형태를 따른다고 가정하였으며, 2차방정식 형태의 속도분포 계산 시 점착조건을 만족시키기 위하여 물체표면에서의 속도를 '0'으로 정의하였다(Fig. 4). 물체표면에서의 압력은 Lee(2009)의 2차원방법을 3차원으로 확장한 식 (4)와 같다.

$$p_{i,j,k}^{l+1} = p_{i,j,k}^l - \rho \frac{\omega}{2\Delta t \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right)} D_{i,j,k}^l \quad (4)$$

위 식의 아래첨자는 격자번호를 의미하고 위첨자는 반복횟수를 의미하며, ω 는 완화계수이다. 완화계수는 해의 안정성을 높이거나 수렴속도를 높이기 위하여 조정하는 값으로 본 연구에서는 1.05를 사용하였다. $D_{i,j,k}^l$ 는 물체경계격자의 발산을 의미하며 '0'에 가깝게 근접될 때까지 반복 계산하여 '0'발산 조건을 만족시켰다. 잘려진 면의 유량

은 속도분포를 추정한 2차방정식을 공간으로 적분하여 계산하였다.

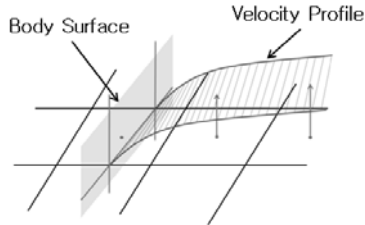


Fig. 4 Velocity profile near body surface

4. 자유수면경계조건

자유수면의 위치는 밀도함수(M_ρ)의 수송방정식 (식 (5))을 계산하여 정의하였다. 밀도함수의 초기 값은 15°C에서 물과 공기의 밀도 M_{water} 와 M_{air} 이며, 자유수면의 위치는 물과 공기밀도의 산술평균값(M_c)을 갖는 위치로 정의하였다. VOF (Volume Of Fluid)의 경우 수송방정식에서 얻은 공기와 물의 비율을 자유수면을 포함하는 격자의 속도와 점성계수를 계산하는데 활용하지만(Hirt and Nichols 1981), 밀도함수법은 자유수면의 정의에만 사용되며, 유동장 계산 시에는 액체와 기체의 실제밀도와 점성계수를 사용한다.

$$\frac{D(M_\rho)}{Dt} = 0 \quad (5)$$

자유수면의 표면장력은 그 크기가 작아 무시하였다. 자유수면에서의 동역학적 경계조건은 식 (6)과 같으며, 운동학적 경계조건은 식 (7)과 같다. 식 (6)은 자유수면에서 기체의 압력과 액체의 압력이 같다는 것을 의미하며, 식 (7)은 자유수면에서 유체입자의 속도가 자유수면의 속도와 같다는 것을 의미한다.

$$p_{water} = p_{air} \quad \text{on free-surface} \quad (6)$$

$$\frac{D(z-h)}{Dt} = 0 \quad \text{on free-surface} \quad (7)$$

위식의 h 는 수면의 수직방향 변위를 나타낸다.

자유수면의 동역학적 경계조건을 만족시키기 위하여 자유수면 주위 격자의 압력계산은 Fig. 5와 같이 irregular leg length법과 irregular star법을 이용하여 계산하였다. 자유수면에서의 압력은 식 (8)과 같이 주위 격자와 자유수면의 거리를 고려하여 계산하였다. Y-방향에 대하여도 같은 방법으로 계산하였다. 자유수면의 운동학적 경계조건을 만족시키기 위하여 자유수면 격자 중 공기의 속도는 Fig. 6과 식 (9)에 나타난 것과 같이 물의 속도로부터 외삽 하였다.

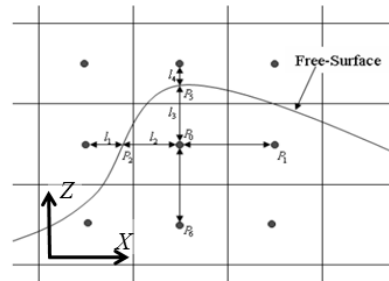


Fig. 5 Schematic drawing of irregular leg length and star for pressure calculation near free-surface

$$\begin{aligned} p_1 &= p_{i-1,j,k} \\ p_2 &= \left(\frac{p_{i-1,j,k} l_2 + p_{i,j,k} l_1}{\rho_{air} l_2 + \rho_{water} l_1} \right) \cdot \frac{\rho_{air}}{l_1 + l_2} \\ p_3 &= \left(\frac{p_{i-1,j,k} - \rho_{air} g l_4}{\rho_{air} l_3} + \frac{p_{i,j,k} - \rho_{water} g l_3}{\rho_{water} l_4} \right) \cdot \frac{\rho_{air}}{l_3 + l_4} \\ p_4 &= p_{i,j,k-1} \end{aligned} \quad (8)$$

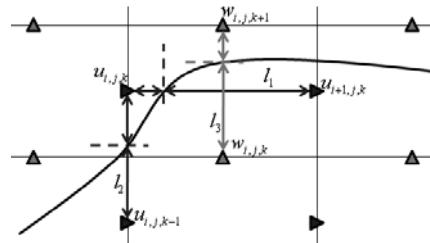


Fig. 6 Schematic drawing for the velocity definition of air flow in the free-surface cell

$$u_{i,j,k} = \frac{u_{i,j,k-1} \times \left(\frac{l_2}{\Delta z}\right) + u_{i+1,j,k} \times \left(\frac{l_1}{\Delta x}\right)}{\left(\frac{l_2}{\Delta z} + \frac{l_1}{\Delta x}\right)} \quad (9)$$

$$w_{i,j,k+1} = \frac{w_{i,j,k} \times \left(\frac{l_3}{\Delta z}\right)}{\frac{l_2}{\Delta z}} = w_{i,j,k}$$

5. 유출입경계조건

Fig. 7은 각 경계면에서의 경계조건을 표현한 것이다. 유입경계면에는 파도에 의한 유동속도를 대입시키고, 물체가 움직이는 경우에는 물체와 유체입자간의 상대속도를 대입하였다. 유출면에는 파도가 반사되는 것을 방지하기 위하여 식 (10)과 같은 좀머펠트 방사조건(Sommerfeld radiation condition)을 대입하였다. 물체가 움직이는 경우에는 식 (10)의 파도 위상 속도를 대신하여 파도의 위상과 물체의 상대속도를 대입하였다. 바닥은 충분히 깊어 물체의 영향을 받지 않는다고 가정하여 물체에 상대적인 반대방향속도를 대입하였다. 위와 좌우 경계면에서의 경계조건은 Neumann조건으로 계산하였다.

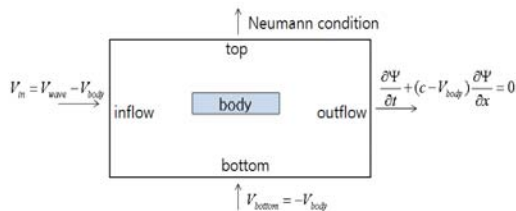


Fig. 7 Boundary conditions for in/out flow

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} + C \frac{\partial \Psi}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

식 (10)의 Ψ 는 속도, 압력 및 파고이며. C 는 파도의 위상속도(celerity)이다.

6. 수치기법 검증

프로그램의 검증을 위하여 파장 2.0m, 파고

0.1m인 규칙파 중에 고정된 직사각형 상자의 상면에 작용하는 압력을 수치계산으로 계측하였다. 계산조건은 Yamasaki et al(2005)의 실험/계산조건과 같도록 설정하였다.

상자의 높이와 길이는 각각 0.4m이고, 폭은 0.52m이다. 상자의 잠긴 깊이는 0.37m로, 건현은 0.03m이다. 계산영역의 크기는 길이 5.0m, 높이 2.0m, 폭3.3m이며, 자유수면에서 바닥까지의 깊이는 1.4m이다. 상자의 위치는 유입면에서 2.5m 떨어진 곳의 중앙에 수면을 관통하여 위치한다. 계산에 사용된 격자의 크기는 X, Y 방향으로는 각각 0.02m, Z방향의 최소 격자크기는 0.005m로, 계산에 사용된 총 격자수는 약 3.9×10^6 개이다. Fig. 8과 같이 상자의 앞쪽 끝에서부터 0.05m, 0.1m 그리고 0.15m 떨어진 위치에서 압력을 측정하였으며, 측정된 압력은 Yamasaki et al(2005)의 연구 결과와 비교하였다.

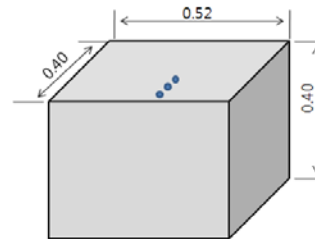


Fig. 8 Geometry of box type model and pressure measuring points

Fig. 9는 상자 윗면의 상부로 물이 침입하는 모습을 나타낸 것이다. 그림에서 물이 유입되기 전에 갑판위에 얇게 물이 깔려 있는 것을 확인 할 수 있다. 이는 한 주기 전에 발생한 갑판 침입수가 일부 남아 있는 것으로 물체의 정착조건에 기인한 것이다. Fig. 9에 보이는 것과 같이 P2점과 P3을 지난 직후 갑판침입수 전체의 두께에 큰 차이가 없는 것을 확인 할 수 있다. 이 경우 물의 두께는 2.5cm 이며, 정압의 크기는 0.25kPa이다. 이는 Fig 10에 나타난 최대 압력(약 0.3kPa)의 70%이상으로 장애물이 없는 갑판의 갑판침입수의 압력에서 정압의 영향이 상대적으로 큰 것을 의미한다.

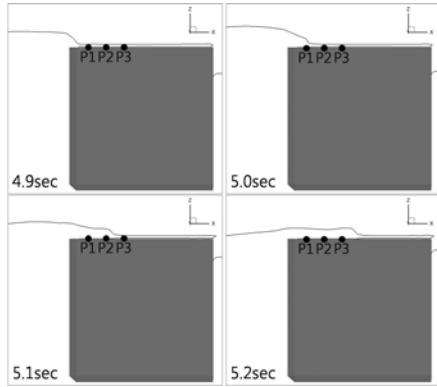


Fig. 9 Wave profiles on the upper side of box type model

Fig. 10은 갑판위의 세 점에서 압력을 기록한 것이며, Fig. 11은 Yamasaki et al.(2005)의 압력 기록을 나타낸 것이다. P1에서의 압력은 큰 차이가 없으나 P3에서는 압력차이가 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 본 연구에서 사용된 격자의 크기가 Yamasaki et al.(2005)의 격자보다 Z-방향으로 2배, X-방향으로 4배정도 크기 때문에 나타나는 현상으로 보인다. P1에서는 상자위의 물이 두껍기 때문에 현재 계산에서 사용된 격자로 충분히 표현이 가능하나, P3에서 물이 얇게 퍼지는 현상은 현재 사용된 격자로 충분히 표현되지 못하기 때문에 판단된다.

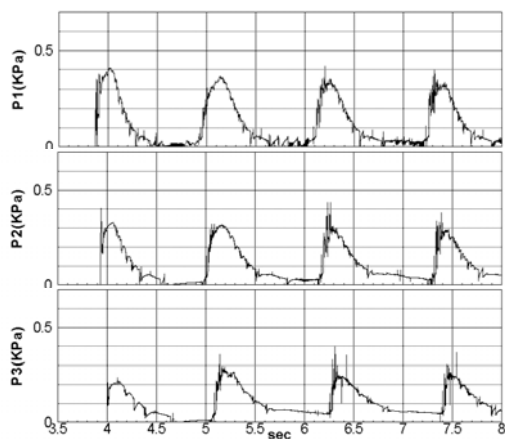


Fig. 10 Pressure histories at the three points on the upper surface of box type model

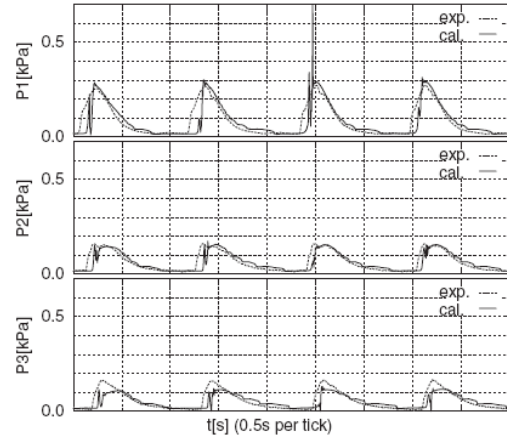


Fig. 11 Calculation and experimental results by Yamasaki et al(2005) at the three points on the upper surface of box type model

Fig. 12는 갑판침입수 앞 끝의 시간에 따른 위치를 나타낸 것이다. 갑판침입수 앞 끝의 위치가 시간에 따라 선형적으로 변화하는 것을 확인할 수 있다. 이는 갑판침입수의 앞 끝의 전진 속도가 일정하다는 Ryu et al(2007)의 연구결과와 일치하는 결과가 된다.

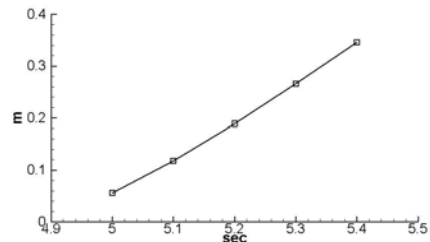


Fig. 12 Location of the front of green water

7. 선박의 Green Water 계산

다음으로는, 실제 선박에 갑판침입수의 수치시뮬레이션에 작성된 전산조직의 적용 가능성을 확인하기 위한 계산을 수행하였다. 대상선박은 선형이 공개된 DDG-51로, 그 주요제원은 Table 1(<http://www.simman2008.dk/5415/combatant.html>)과 같다. 본 계산에서는 선박의 견현을 갑판침입수가 쉽게 발생하도록 0.17m로 조정하였다.

Table 1 Principal dimensions of subject ship

LWL	5.726 m
Breadth	0.726 m
Draft	0.248 m
Displacement volume	0.554 m ³
Scale ratio	24.83

본 연구에서는 대상선박이 100N의 일정한 힘으로 규칙파 중에서 예인되는 경우를 계산하였다. 선체표면의 압력을 적분하여 파도에 의한 외력을 계산하였으며, 마찰에 의한 영향은 고려하지 않았다. 파도에 의한 외력과 예인력을 합하여 선박의 가속도와 속도를 계산하였으며, 계산된 가속도를 이용하여 유체장의 체적력을 고려함으로써 선박의 운동을 대체하였다. 현재의 계산에서는 병진운동인 surge와 heave만을 고려하였으며, 회전운동인 pitch는 고려하지 않았다.

유입된 파도의 파고는 0.25m 이고, 파장은 7.0m이다. 계산영역은 Fig. 13과 같으며, X, Y, Z 방향으로 각각 15m, 8m, 2m이다. X와 Y방향의 격자 크기는 0.058m이고, Z방향의 최소격자 크기는 0.015m이다.

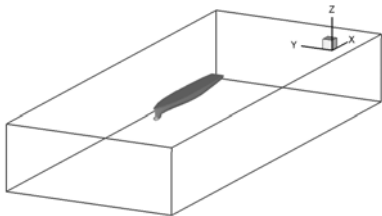


Fig. 13 Computational domain for green water simulation on the subject ship model

Fig. 14는 선수부에서 발생하는 갑판침입수 현상을 나타낸 것이다. 선수부가 잠기어 갑판상부에 물이 침입하고, 선체가 떠오르며 갑판상부에 물이 남아있는 모습을 볼 수 있다. Fig. 15는 선박에 작용하는 가속도를 기록한 그래프이다. 초기에는 선박에 작용하는 파력이 없어 일정한 속도로 예인되나, 파도에 의하여 수직과 수평방향의 가속도가 변하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 갑판침입수 발생 후 Z-방향의 가속도가 불규칙적으로 변하는 것을 확인 할 수 있다.

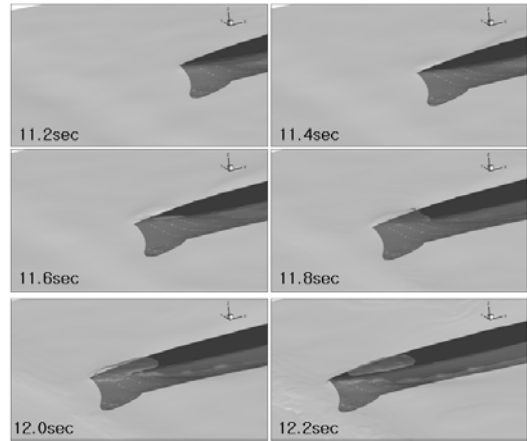


Fig. 14 Appearance of free-surface for the towed model ship in the waves

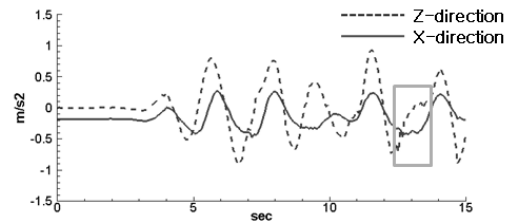


Fig. 15 Acceleration history of the towed model ship in the waves

8. 결론

본 연구에서 개발된 수치 프로그램을 이용하여 갑판침입수 현상을 시물레이션 하였으며, 그 결과를 실험결과와 비교하였다. 격자의 집중에 한계를 갖고 있어 물의 두께가 얇은 경우는 정도가 낮으나, 물이 두꺼운 경우 정성적, 정량적으로 실험과 매우 근접한 결과를 보임을 확인하였다. 이와 더불어, 상부 구조물이 없는 갑판에서의 갑판침입수의 하중은 정압의 영향이 크게 작용하며, 갑판에서 갑판침입수의 전진속도는 일정함을 확인하였다.

또한 규칙파 중 전진하는 선박의 병진운동을 체적력으로 처리하여 갑판침입수 현상을 수치적으로 시물레이션 하였으며, 갑판침입수로 인하여 선박의 가속도가 불규칙적으로 변하는 것을 확인하였다. 본 연구에서 개발된 수치시물레이션기법은 앞으로 격자구성 및 경계조건들에 있어서 좀 더 개

선 및 보완이 진행된다면, 선박의 갑판침입수 예측에 정도 높게 활용 가능할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R01-2008-000-20531-0).

참 고 문 헌

- Buchner, B., 2002, Green Water on Ship-type Offshore Structures, Doctor Theses, T.U. Delft.
- Choi, S. and Ryu, Y., 2005, "Velocity Field Measurement of Impinging Waves on a Structure," Journal Society of Naval Architecture of Korea, Vol. 42 No. 6, pp. 559-565.
- Drake, K.R., 2001, "Wave Profile Characterisation of Green Water Loading Events Form Model Test Data," Applied Ocean Research, Vol. 23 pp.187-193.
- Ferziger, J.H. and Peric, M., 2002, Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer.
- Han, J.C., Lee, S.K. and Lee, G.W., 2004, "Basic Study of Grimm's Algorithm for Green Water Simulation," Int. J. Navigation and Port Research, Vol.28, No.9, pp. 809-813.
- Hirt, C.W. and Nichols, B.D., 1981, "Volume of Fluid(VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries," J. Computational Physics, Vol. 39, pp. 201-225.
- Kim, Y.J. and Shin, K.S., 2005, "Numerical Calculation and Experiment of Green Water on the Bow Deck in Regular Waves," Journal of the Society of Naval Architecture of Korea, Vol. 42, No. 4, pp. 350-356.
- Kirkpatrick, M.P., Armfield, S.W. and Kent, J.H., 2003, "A Representation of Curved Boundaries for the Solution of the Navier-Stokes Equations on a Staggered Three-dimensional Cartesian Grid," J. Computational Physics, Vol. 184 pp. 1-36.
- Lee, Y.G., 1989, A Finite Difference Simulation Method for the Viscous Flow with Free-surface by Using Rectangular Coordinate Systems, Doctor Thesis, The University of Tokyo.
- Lee, Y.G. Jeong, K.L. and Lee, Y.G., 2009, "Numerical Simulation of Two-dimensional Sloshing Phenomena Using Marker-density Method," Journal of the Society of Naval Architecture of Korea, Vol. 46 No. 6, pp. 650-658.
- Pham, X.P. and Varyani, K.S., 2005, "Evaluation of Green Water Loads on High-speed Containership Using CFD," Ocean Engineering Vol. 32, pp. 571-585.
- Ryu, Y., Chang, K.A. and Mercier, R., 2007, "Application of Dam-break Flow to Green Water Prediction," Applied Ocean Research, Vol. 29, pp.128-136.
- Shibata, K., Tanizawa, K. and Koshizuka, S., 2007, "Numerical Analysis of Coupling between Ship Motion and Green Water on Deck Using MPS Method," Proceedings of International Conference on Violent Flows.
- Yamasaki, J., Miyata, H. and Kanai, A., 2005, "Finite-difference Simulation of Green Water Impact on Fixed and Moving Bodies," J. Marine Science and Technology, Vol. 10, pp. 1-10.
- Zhu, R., Miao, G. and Lin, Z., 2009, "Numerical Research on FPSOs with Green Water Occurrence," J. Ship Research, Vol. 53 pp. 7-18.



< 정 광 열 >



< 이 영 길 >



< 김 남 철 >