

규칙파 중 해양구조물의 갑판침입수 충격하중에 관한 수치시뮬레이션

강의하¹·이영길^{2,†}·양인준¹·김기용¹·주영석³·박정호¹
인하대학교 대학원 조선해양공학과¹
인하대학교 조선해양공학과²
대우조선해양 중앙연구원³

Numerical Simulation on the Greenwater Impact Load of Offshore Structure in Regular Waves

Ui-Ha Kang¹·Young-Gill Lee^{2,†}·In-Jun Yang¹·Ki-Yong Kim¹·Young-Seok Joo³·Jeong-Ho Park¹
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Graduate School, Inha University, Incheon, Korea¹
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon, Korea²
DSME R&D Institute, Busan, Korea³

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

In the study, numerical simulation on the greenwater impact load of free surface offshore structure in the regular waves using fixed cartesian grid system and Modified Marker-Density (MMD) method were carried out and the results were reviewed. In order to compare numerical simulation and experimental results, the FPSO with the scale ratio of 1/100 model ship with fixed rectangular deck was selected and turbulence characteristic of the flow was considered by applying the Sub-Grid Scale (SGS) in laminar flow. As a result, it is reviewed how the greenwater impact load inflowed from bow in regular headsea wave influence the flow on the deck and the flow characteristic by numerical simulation and the experiment results were compared and reviewed. Based on this study, it would be useful to numerically study the effect of greenwater on offshore structure.

Keywords : Numerical simulation(수치 시뮬레이션), Modified marker-density method(수정된 밀도함수법), Rectangular grid system(직교격자계), Greenwater(갑판침입수), Breakwater(방파제), Impact load(충격하중), Regular waves(규칙파)

1. 서론

거친 해상상태에서 선박 및 해양구조물이 파도와 의 상대운동에 의하여 갑판 상으로 부딪지 않는 물이 유입되는 것을 갑판 침입수(greenwater)라 한다. 이는 선체 및 구조물에 큰 충격하중을 발생시키며, 갑판 상부구조물의 손상을 일으키는 주된 원인이 된다. FPSO (Floating Production Storage and Off-loading)의 경우에는 장기간 특정 해상에서 운용되기 때문에, FPSO 설계 시 갑판침입수에 의한 하중고려는 매우 중요한 요소이다. 더욱이 FPSO에는 터렛(turret)과 같은 고가의 장비가 설치되어 있기 때문에 갑판침입수와 같은 큰 하중에 대한 대비는 매우 필수적이며, 이를 줄이고자 다양한 연구들이 수행되고 있다. 특히, 터렛(turret)에 의하여 해상에 고정되어 있는 FPSO의 경우는 갑판침

입수의 큰 충격하중을 회피하기 어렵고, 갑판상부에 주로 구조적으로 취약한 석유생산시스템 관련 구조물이 설치되어 있어서 그 위험성이 더욱 크다. Ersdal and Kvitrud (2000)에서는 해상에서 높은 파도에 의하여 발생된 갑판침입수로 인한 FPSO의 상부구조물 손상과 작업 제한 등에 관한 사고들에 대한 사례들을 설명하였다.

갑판침입수 현상에 대한 기존 연구는 파도에 의한 선수 주위의 유동과 갑판 상으로 유입되는 갑판침입수의 유동을 추정하여 갑판침입수의 발생 빈도와 갑판침입수에 의한 하중을 확률적으로 예측하는 연구와 선수부 갑판침입수의 수치시뮬레이션에 대한 기초연구가 주로 진행되어지고 있다. Ogawa (2003)은 형상과 충격하중의 평가를 위한 'flooded wave'와 함께 갑판침입수를 연관시켰다. Xuan and Kamlesh (2004)등은 두 가지의 방파제 형상을 이용하여 greenwater의 효과를 비교하였다. Kim and

Shin (2005)은 규칙파 중 선수 갑판상 greenwater에 대한 시뮬레이션을 위한 Predictor-corrector 2종 상류차분법을 이용한 수치계산법을 제시하였고 그 결과를 실험결과와 비교하였다. Greco, et al. (2005)은 고정된 바지형상을 이용하여 수치계산과 실험을 수행하여 각 형상별로 갑판침입수에 대한 연구를 진행하였다. 또한, 갑판침입수가 선수부에 미치는 영향에 대한 수치시뮬레이션의 기초연구들도 수행되었으며 (Jeong, et al., 2010), 선수 플레어 각도에 따른 선수갑판형상이 선수로부터 유입되는 갑판침입수에 미치는 영향에 관한 실험 및 수치적 연구도 수행되었다 (Ha, et al., 2012; Jeong, et al., 2013).

최근에는 Computational Fluid Dynamics(CFD)의 발달로 갑판침입수의 유동특성과 하중 추정에 대한 연구가 활발하게 진전되고 있으며, Navier-stokes 방정식에 기반을 둔 Volume Of Fluid(VOF)법을 사용한 CFD기법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다 (Iwanowski, et al., 2009).

본 연구에서는 고정된 직교격자계와 수정된 밀도함수법을 이용한 규칙파 중 해양구조물의 갑판침입수 충격하중에 관한 수치시뮬레이션을 수행하여 각 지점의 압력의 변화를 고찰하고 아울러 본 수치계산법에 대한 충격하중 계산에 대한 타당성을 검증하였다. 먼저 입사파의 검증을 위한 수치시뮬레이션을 수행하여 그 결과들과 Stokes 2차 파도이론에 따른 파형들을 비교하여 입사파의 정도를 검증하였으며, FPSO의 갑판 상에 유입되는 갑판침입수로 인한 충격하중 계산결과들을 기존의 결과들과 비교하였다.

2. 수치시뮬레이션

2.1 수치기법

본 연구에서 사용된 프로그램은 TUMMAC계열의 프로그램으로 자유수면, 물체, 유출입 경계조건들을 개선한 INHAWAVE-II이다. 지배방정식으로는 연속방정식 식 (1)과 Navier-Stokes방정식 식 (2)를 사용하였다.

지배방정식의 속도와 압력은 two-step projection기법으로 연성시켰다. Navier-stokes방정식의 좌변 첫번째 항인 비정상항을 일차 전진차분법으로 이산화하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 대류항의 공간 이산화에는 Kawamura-Kurahara 법이 사용되었으며, 시간 이산화에는 Adams-Bashforth 법을 이용하였다. 나머지 항들은 공간에 대하여 2차 중심차분법을, 시간에 대해서는 1차 전진차분법을 이용하였다. 격자크기 이하의 유동에 대한 난류 특성을 고려하기 위해 Subgrid-Scale (SGS) 난류모델을 적용하였다. 자세한 수치해석 기법에 대한 내용은 Jeong and Lee (2014)에서 확인 할 수 있다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_i} + \frac{F_i}{\rho} \tag{2}$$

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i}{\Delta t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial r_{ij}}{\partial x_i} + f_i \tag{3}$$

위 식의 t는 시간, \bar{u} 는 공간 평균된 속도, ρ 는 밀도, p는 압력, ν 는 점성계수, F는 체적력, r은 난류응력을 의미한다.

자유수면의 경계조건을 수식으로 표현하면 식 (4)~(6)과 같다. 식 (4)는 자유수면에서 수면에 수직인 방향으로 유체와 자유수면의 속도가 동일하다는 것을 의미한다. 식 (5)는 자유수면에서 물과 공기의 접선방향 힘의 크기와 방향이 같다는 것을 의미하며, 식 (6)은 자유수면에서 물과 공기의 수직방향 힘의 크기가 같고 방향이 반대임을 의미한다.

$$[(\vec{V} - \vec{V}_{fs}) \cdot \vec{n}] = 0 \tag{4}$$

$$(n \cdot T)_{water} \cdot t = (n \cdot T)_{air} \cdot t \tag{5}$$

$$(n \cdot T)_{water} \cdot n + \sigma K = -(n \cdot T)_{air} \cdot n \tag{6}$$

위식에서 n과 t는 자유수면에 수직과 접선 방향의 단위벡터, σ 는 표면장력, T는 응력텐서, K는 자유수면의 곡률을 나타낸다. 자유수면의 운동학적 경계조건인 식 (4)를 쉽게 만족시키기 위하여 밀도함수의 수송방정식을 도입하여 자유수면의 위치를 계산한다. 여기서, 자유수면의 위치는 물과 공기의 평균밀도를 갖는 위치로 정의하였다. 계산 전 영역에 대한 밀도함수의 초기 값으로는 물과 공기의 밀도를 각각 대입하였다.

2.2 수치모델 생성 및 대상파도 선정

본 연구에서는 Lee, et al. (2012)의 모형시험 모델을 이용하여 수치계산을 수행하였다. Fig. 1에서와 같이 수치계산 모델은 자유수면으로부터 갑판까지 45 mm, 길이 1500 mm, 폭 600 mm, 그리고 깊이 300 mm의 제원을 가지는 축척비 1:100인 직사각형 상자 형상이다. 이와 더불어, 갑판 상에는 실선의 상부구조물을 대신하여 수직벽(breakwater)를 세웠으며, 그 제원은 높이 300 mm, 폭 600 mm, 두께 10 mm로 하였다.

갑판에서 압력계측점 위치의 경우 P11부터 P33까지 길이 방향으로 160 mm, 폭 방향으로 125 mm의 등 간격으로 위치시켰으며, 또한 P4의 경우는 모형시험의 반복성을 확인하기 위하여 선수 앞쪽 끝에서 130 mm, 선수중 앙부에서 187.5 mm 떨어진 곳에 위치시켰다. 또한, 수직벽에서 압력계측점 위치의 경우는 폭 방향으로 90 mm, 높이 방향으로 60 mm의 등 간격으로 위치시켰다. 계산 영역의 크기는 Fig. 2와 같이 대상선형의 길이방향 중앙 대칭면에 대칭조건을 주어 선체의 반쪽만 계산을 수행하였다. 또한 유입부에서는 대상선형 선수 앞쪽 끝까지 파장의 1배, 대상선형 선수 앞쪽 끝에서 유출 부까지는 파장의 4배, 폭은 파장의 1배로 설정하였다. 유입부에서부터 대상선형 선수 앞쪽 끝까지 파장의 1배는 파도 생성을 위하여 Fine하게 격자를 생성하였으며, 대상선형 끝에서 유출 부까지인 파장의 4배인 부분은 격자가 점진적으로 커지도록 작성하였다.

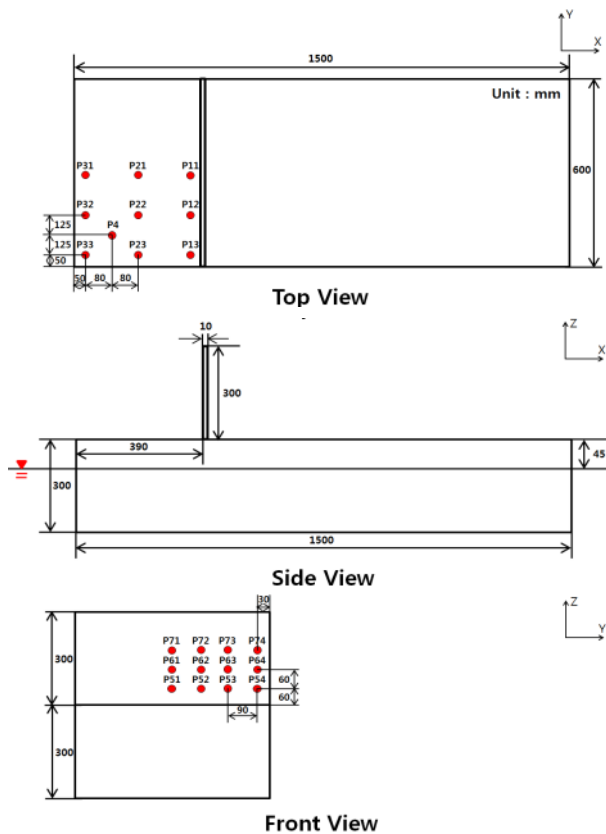


Fig. 1 Geometry of the FPSO model and the points measuring pressure on the deck and breakwater

Fig. 3과 같이 전 계산 영역에서 사용된 격자수는 길이, 폭, 높이 방향으로 각각 170, 70, 150개이며, 선체 주위에 격자를 집중시켰다. 갑판 및 수직벽에서 정도 높은 압력 계산 값을 얻기 위해, 갑판의 경우 길이×폭으로 20×30개, 수직벽의 경우 폭×높이로 30×30개를 사용하여 전 계산영역에서 총 1,785,000개의 격자를 생성하였다. 본 수치계산에서의 수심은 모형시험조건과 동일한 3 m 로 설정하였다.

Lee, et al. (2012)의 연구에서는 선체가 고정되어 있기 때문에 입사파는 대표적으로 파장(λ) 3750 mm, 파고(H_w) 225 mm 에 대하여 수치계산을 수행하였다. 계산시간의 간격은 2/1000초이다.

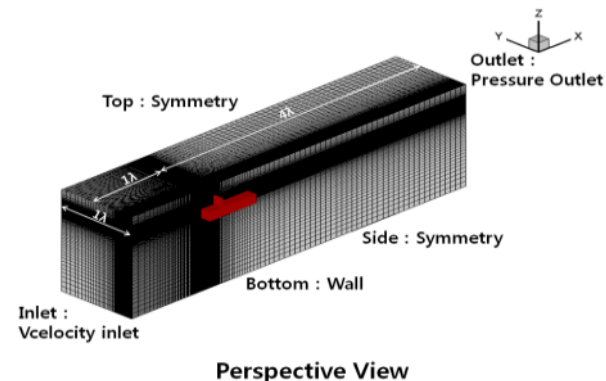


Fig. 2 Computational domain and boundary conditions

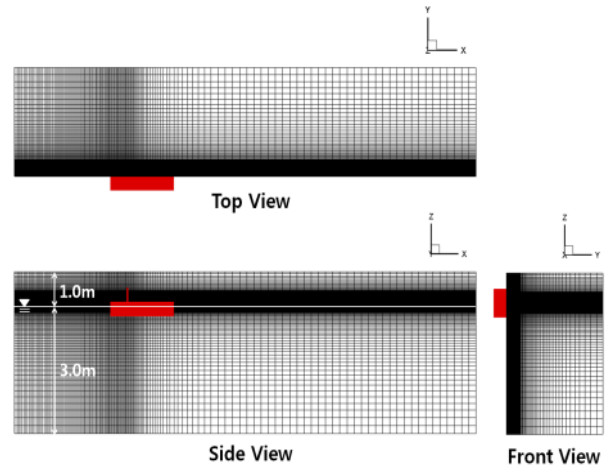


Fig. 3 Computational domain and the grid systems on three-directional projected planes

Table 1 The size of minimum grid and numbers of grids for the numerical computation

	X	Y	Z
Size of minimum grid	0.04	0.04	0.01
Number of grids	170	70	150

2.3 파도 검증

선행 연구들에서는 파도를 생성하는 부분에서 크게 영향을 끼치는 변수로 한 파장 당 격자수와 파고 당 격자수, 즉 파도에 대한 격자조밀도가 전 계산 영역의 크기보다 중요하다고 하였다 (Kristiansen, et al., 2004). 따라서 본 연구에서는 갑판침입수로 인한 갑판 및 수직벽 충격하중 수치시물레이션을 수행하기 전에 입사파에 대한 검증을 실시하였으며, 유입부에서 0.5λ 떨어진 지점에서 입사파의 파고를 계측하였다.

전 계산 영역에 걸쳐 격자수를 최소화하기 위해 사용된 격자수 및 크기는 격자 의존도 시험을 통해 결정하였다. 격자 의존도 시험에서 사용된 격자 계를 격자수에 따라 총 9가지 경우로 나누어 Table 2에 나타내었으며, 격자계의 단위는 계산에 사용된 Table 1과 동일하고 Fig. 4와 같이 한 파장 당 격자수와 파고 당 격자수에 따른 입사파의 파형들과 Stokes 2차 파 이론에 따른 파형을 비교하여 가시화하였다.

격자 의존도 시험을 수행한 결과 파장 및 파고에 따라 경우에 따라 다르지만 4%이내의 오차율이 발생하는 것을 확인하였다. Table 3은 grid dependency 결과들을 Stokes 2차 파 이론과 비교하였을 때, 파고와 파장에 따라 나타난 차이를 비로 나타낸 것이다. 한 파장 당 격자수 60개, 파고 당 격자수 20개 일 경우 Grid 8에 해당하는 최소한의 격자를 사용하여 요구되는 파형을 얻을 수 있었다. 따라서 전 계산 영역에 걸쳐 격자의 수를 최소화 하시기 위해서 계산 시간을 줄이는 효과를 얻었으며, 실제 갑판침입수의 수치시물레이션을 수행하는 과정에서의 입사파는 Fig. 5와 같게 되어 입사파로서의 정도는 만족되는 것으로 확인되었다.

Table 2 Grid systems used for the grid dependency test

Grid types	Number of grids per wave length	Number of grids per wave height
Grid 1	40	15
Grid 2	40	20
Grid 3	40	25
Grid 4	50	15
Grid 5	50	20
Grid 6	50	25
Grid 7	60	15
Grid 8	60	20
Grid 9	60	25

Table 3 Results of grid dependency test by wave height and wave length

Grid types	Comparison by wave height	Comparison by wave length
Grid 1	3.0%	1.0%
Grid 2	2.5%	1.0%
Grid 3	2.0%	1.0%
Grid 4	3.0%	2.0%
Grid 5	2.0%	1.5%
Grid 6	2.0%	1.5%
Grid 7	3.5%	1.0%
Grid 8	1.0%	1.0%
Grid 9	1.5%	1.5%

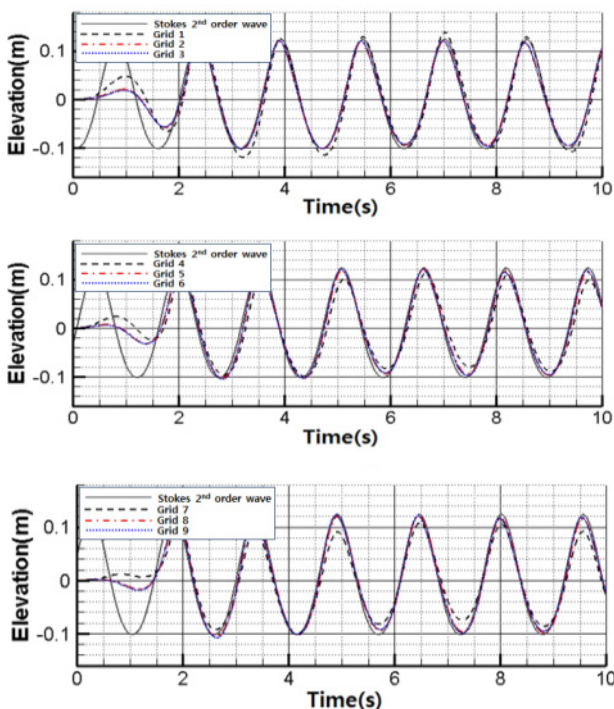


Fig. 4 Results of the grid dependency test

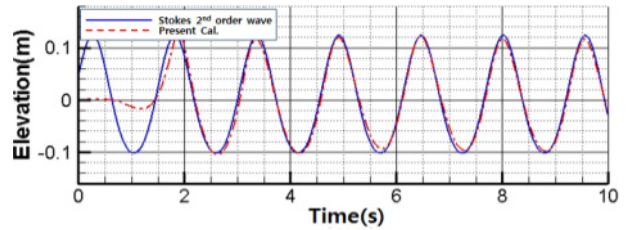


Fig. 5 Comparison of an incident wave in the present computations with that from the stokes 2nd-order wave theory

3. 계산결과 및 고찰

3.1 갑판침입수의 진행과정 고찰

기존의 모형시험결과들 (Lee, et al., 2012)과 계산결과들을 비교하여 갑판 상 및 수직벽 충격하중에 영향을 미치는 갑판침입수의 진행과정을 가시화하였다.

갑판침입수에 대한 기존 연구에서는, 선수부로부터 유입되는 입사파로 인한 선수부 정면과 선수부 측면에서 유입되는 갑판침입수의 속도 차이 발생으로 선체 길이방향 중심선을 따라

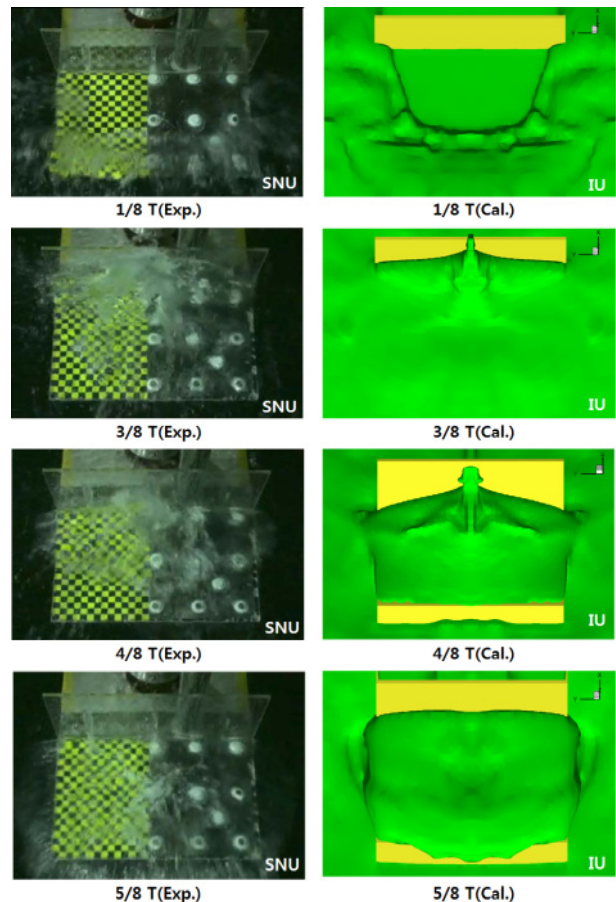


Fig. 6 Comparison of greenwaters on the deck of the FPSO model between the results of experiment (Lee, et al., 2012) and numerical simulation

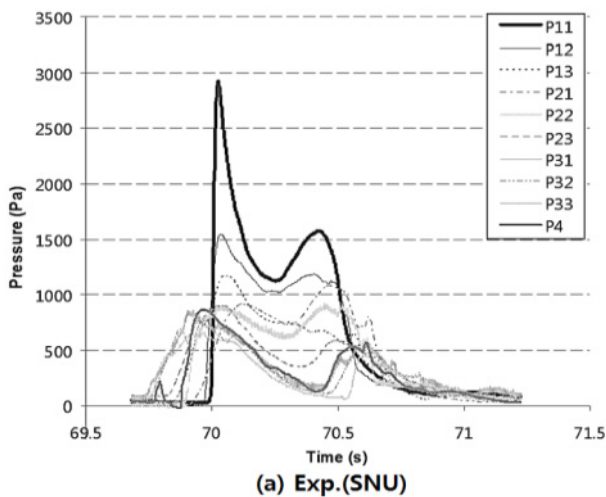
‘greenwater tongue’라는 유량집중부가 형성되어 이것이 수직벽으로 이동되며, 이 유량이 집중되는 부분이 큰 충격하중을 발생시키는 것으로 알려져 있다 (Kim & Shin, 2005).

본 계산에서도 Fig. 6과 같이 갑판 상으로 유입되는 갑판침입수가 수직벽 방향으로 전진하는 과정에서 길이방향 선체 중심으로 집중되는 현상을 확인할 수 있으며, 전반적으로도 수치시물레이션 결과에서 모형시험결과와 유사한 형태의 갑판침입수가 형성되는 것을 볼 수 있다.

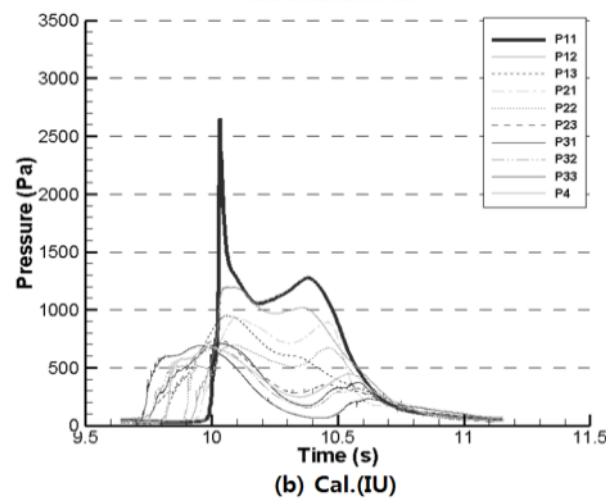
3.2 갑판 상에서 시간에 따른 압력변화 비교

Fig. 7과 같이 선수로부터 유입되는 갑판침입수로 인한 갑판 상의 충격하중에 대한 압력변화를 비교하였다. P11부터 P4까지 총 10개의 계측지점에서 압력을 측정하였으며, 모형시험결과 (Lee, et al., 2012)와 계산결과들을 비교하기 위해 입사파 한 주기 동안의 시간에 따른 압력변화를 나타내었다.

모형시험 및 계산결과에서 시간에 따른 압력변화의 형태는 근사하게 나타났으며, P11부터 P4까지 모든 점에서 두 개의 정점이 형성되었다. 이는 Fig. 9에서도 볼 수 있듯이, 첫 번째 정점은



(a) Exp.(SNU)



(b) Cal.(IU)

Fig. 7 Time histories of pressure values at ten points on the deck of the FPSO model

선수부에서 유입되는 갑판침입수가 갑판 상을 지나며 수직벽을 타고 오르는 과정에서 정점이 형성되며, 두 번째 정점은 수직벽을 타고 오른 갑판침입수가 다시 내려오며 선수갑판 전체로 퍼지면서 정점이 형성된 것으로 판단된다. 또한, 폭 방향의 중앙부 수직벽 근처에 위치하는 P11의 경우 가장 큰 압력이 작용하는 것으로 확인되었다. 그러나 P21, P23, P32의 경우 모형시험과 다소 차이를 보이고 있다. 이는 갑판침입수의 두께에 비하여 격자가 충분히 작지 않음에 의한 결과로 보이며, 이에 대하여는 앞으로 격자의 의존도에 의한 고찰이 더 필요할 것으로 보인다.

3.3 갑판 상 평균 압력의 비교

Table 4에서는 모형시험 및 수치계산 결과들을 정량적으로 비교하기 위해 각 계측 점에서의 두 가지 압력 값과 실험값에 대한 계산 값의 오차율을 나타내었다. P11, P31, P4에서는 6% 이내 오차율을 보이고 있으나, P21, P23, P32에서는 20% 이내 오차율을 보이고 있다. 이 또한 시간에 따른 압력의 변화에서도 언급하였지만, 수치시물레이션에서 격자수 및 격자 크기로 인해 발생하는 오차율로 보이며, 갑판 상에 좀 더 조밀한 격자를 사용한다면 오차율을 줄일 수 있을 것이라 판단된다.

Fig. 8에서는 모형시험 및 수치계산의 평균 압력을 그래프로 나타내었다. P11부터 P4까지 모든 압력계측점에서 수치계산의 평균 압력이 모형시험의 평균 압력 보다 P21점만 제외하고는 전체적으로 약 9% 정도 작음을 알 수 있고, 이 또한 격자조밀도로 인해 발생하는 차이로 판단된다. 또한, Fig. 10과 마찬가지로 P11에서 가장 큰 압력이 발생하였으며, 이는 앞에서도 알 수 있듯이 선수로부터 유입되는 갑판침입수가 뒤로 이동하면서 선체중앙부로 집중되기 때문이다.

기존의 모형시험결과들 (Lee, et al., 2012) 뿐만 아니라, 다른 기관의 실험결과(SNU)와도 비교하여 본 수치시물레이션의 검증을 수행하였다. Fig. 9는 $\lambda=225$ cm, $A_w=5.625$ cm에서 평균압력,

Table 4 Comparison of the percent relative error about average pressures(P_{avg}) between model tests and numerical simulations

	Model test(Pa)	Numerical simulation(Pa)	Percent relative error(%)
P11	2498.00	2388.21	4.39
P12	1357.00	1237.06	8.84
P13	977.00	864.23	11.54
P21	939.00	1087.43	15.81
P22	857.00	801.12	6.52
P23	776.00	642.62	17.19
P31	670.00	630.72	5.86
P32	724.00	601.30	16.95
P33	593.00	553.39	6.68
P4	697.00	662.65	4.93

최대압력, 최소압력에 대해서 실험 결과와 비교한 그래프이다. 각 압력들의 결과 값을 확인해보면 전체적으로 수치적인 값에서는 다소 차이가 있으나, 유사한 경향이 나오는 것을 확인할 수 있다. 그러나 평균압력에서는 P23, P31, P32, P33에서는 실험 결과와는 다르게 압력이 높게 측정되는 것을 확인할 수 있다. 이를 바탕으로 확인해보면, 두 번째 국소 최대압력은 선수부에서 들어온

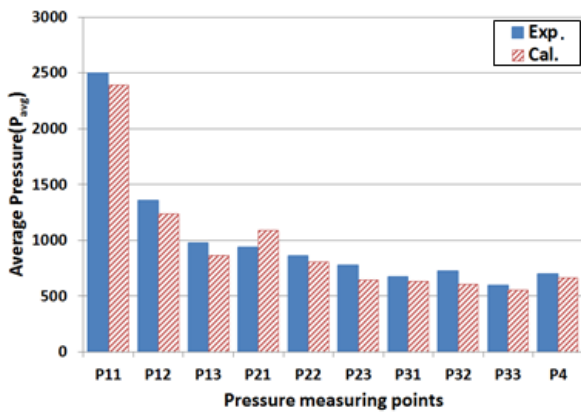


Fig. 8 Comparison of average pressures(P_{avg}) between model tests and numerical simulations

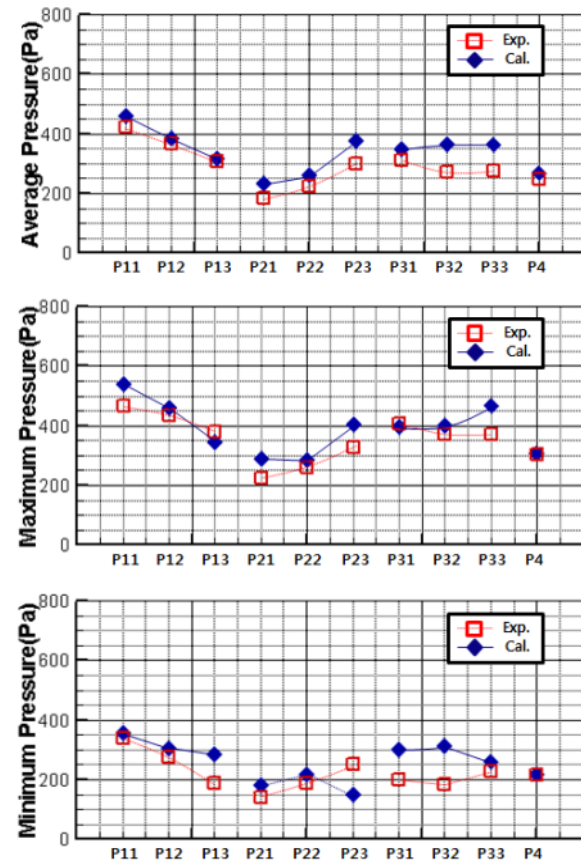


Fig. 9 Comparison of average pressures, maximum pressure, minimum pressure between model test (Lee, et al., 2012) and simulations ($\lambda=225$ cm, $A_w=5.625$ cm)

갑판침입수가 갑판 상을 지나 수직벽을 타고 올라갔다 내려와 배수되는 과정에서 두 번째 충격이 가해질 때 생기는 압력인데, 수직벽을 타고 올라간 물의 높이가 P23점보다 높아 중력에 의해 내려오면서 충격이 비교적 강하게 전달된 것으로 판단된다.

Fig. 10은 $\lambda=300$ cm, $A_w=7.500$ cm에서 평균압력, 최대압력, 최소압력에 대하여 결과 값을 비교한 그래프이다. 실험 결과 값들을 확인해보면 전체적으로 수치적인 값에서는 다소 차이가 있으나, 유사한 경향이 나오는 것을 확인할 수 있다. 그러나 P23, P32, P33 등에서 실험 결과와 달리 값의 정도가 낮게 나오는 것을 확인할 수 있었다. 이는 갑판침입수가 수직벽을 타고 올라갔다 다시 내려오는 과정에서 갑판침입수가 격자의 크기와 물체의 점착조건으로 인하여 전부 없어지지 않고 일부 남아 있어 정확한 값을 찾기가 어려웠던 것으로 보인다.

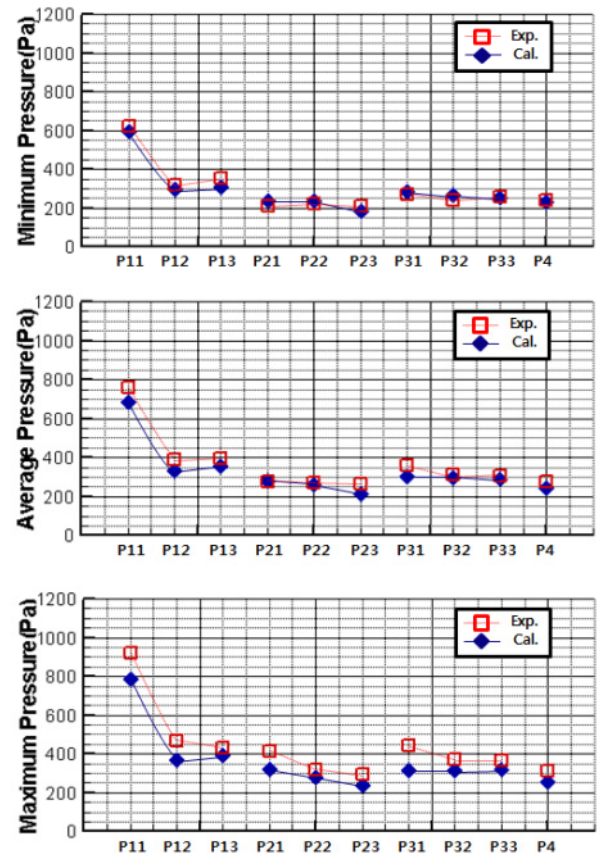


Fig. 10 Comparison of average pressures, maximum pressure, minimum pressure between model test (Lee, et al., 2012) and simulations ($\lambda=300$ cm, $A_w=7.500$ cm)

3.4 수직벽 부근에서의 갑판침입수 형상

Fig. 11은 선수로부터 유입되는 갑판침입수가 갑판 상을 지나 수직벽을 타고 오르며, 또한 중력의 영향으로 다시 내려오면서 갑판 상과 수직벽에 충격하중을 가하는 유동 형상을 나타낸다.

그림에서 1/5 T(입사파 주기)의 경우, 입사파로 인한 갑판침

입수의 생성이 시작되는 순간이며, 갑판 상에 물이 얇게 깔려 있는 것은 한 주기 전에 발생한 갑판침입수가 격자의 크기와 물체의 점착조건에 의해 일부 남아 있는 것으로 판단된다. 2/5 T의 경우는 갑판 상을 지나 수직벽에 도달한 상태이며, 3/5 T의 경우는 갑판침입수가 수직벽으로 타고 올라온 상태이다. 여기서 3/5 T의 경우 각 압력계측점에서 압력이 최대가 될 때의 상태이며, 한 주기 동안 첫 번째 갑판 상과 수직벽에 최대 충격하중을 가하게 된다. 4/5 T 및 5/5 T의 경우 수직벽을 타고 오를 갑판침입수가 충격에 영향으로 다시 내려오면서 갑판 상 및 수직벽에 두 번째 충격하중을 가한 후 배수되는 상태를 나타내었다. 이러한 두 번째의 충격하중은 갑판침입수가 수직벽으로부터 다시 내려오면서 갑판전체로 퍼지는 과정에서, 유동수의 운동량이 많이 감소된 상태로 빠른 배수가 이루어지지 않기 때문으로 생각되며, 이는 Fig. 11에서도 잘 보여주고 있다고 본다. 그림에서 1/5 T(입사파 주기)의 경우, 입사파로 인한 갑판침입수의 생성이 시작되는 순간이며, 갑판 상에 물이 얇게 깔려 있는 것은 한 주기 전에 발생한 갑판침입수가 격자의 크기와 물체의 점착조건에 의해 일부 남아 있는 것으로 판단된다. 2/5 T의 경우는 갑판 상을 지나 수직벽에 도달한 상태이며, 3/5 T의 경우는 갑판침입수가 수직벽으로 타고 올라온 상태이다. 여기서 3/5 T의 경우 각 압력계측점에서 압력이 최대가 될 때의 상태이며, 한 주기 동안 첫 번째 갑판 상과 수직벽에 최대 충격하중을 가하게 된다. 4/5 T 및 5/5 T의 경우 수직벽을 타고 오를 갑판침입수가 충격에 영향으로 다시 내려

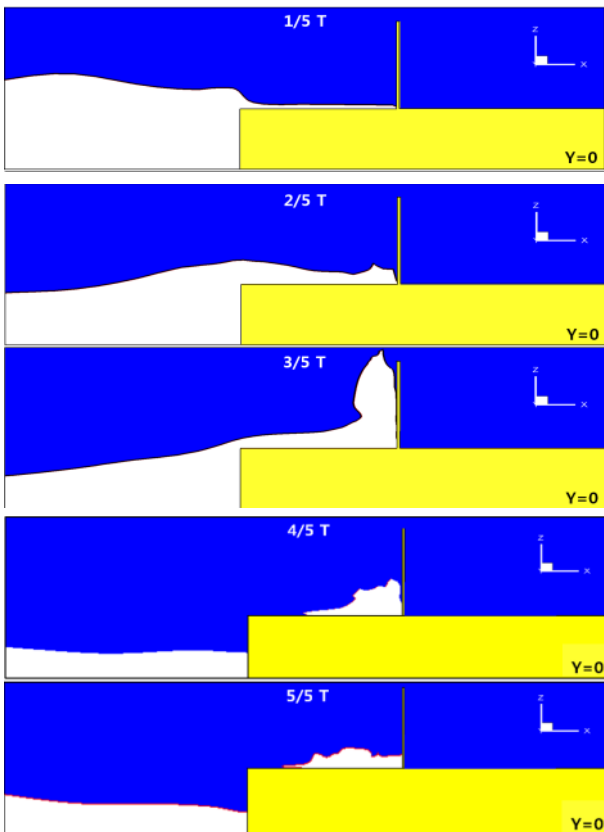


Fig. 11 Free surface profiles on the longitudinal center plane of the FPSO model

오면서 갑판 상 및 수직벽에 두 번째 충격하중을 가한 후 배수되는 상태를 나타내었다. 이러한 두 번째의 충격하중은 갑판침입수가 수직벽으로부터 다시 내려오면서 갑판전체로 퍼지는 과정에서, 유동수의 운동량이 많이 감소된 상태로 빠른 배수가 이루어지지 않기 때문으로 생각되며, 이는 Fig. 11에서도 잘 보여주고 있다고 본다.

3.5 수직벽 상에서 시간에 따른 압력변화

선수로부터 유입되는 갑판침입수로 인 한 수직벽 충격하중에 대한 압력을 Fig. 12와 같이 나타내었다. 수직벽에서 갑판침입수로 인한 충격하중이 발생하는 수직면의 중심부터 측면까지 폭에 따른 압력의 시간에 따른 변화의 경향을 알아보기 위해 일정한 높이에서 P51부터 P54까지 총 4개의 계측지점에서 압력을 비교하여 보았다. Fig. 10과 마찬가지로 갑판 상으로 유입되는 갑판 침입수가 수직벽 방향으로 전진하는 과정에서 선체 중심으로 집중되는 현상으로 인해 P51에서 최대 충격하중이 작용하는 것으로 판단된다. 또한, P51과 P52에서 두 개의 정점이 형성되었으며, P53과 P54에서는 한 개의 정점이 형성되었다. 이는 갑판침입수가 수직벽을 타고 오르는 과정에서 충격하중을 가하여 첫 번째 정점이 형성되며, 두 번째 정점은 수직벽을 타고 오를 갑판침입수가 다시 내려오면서 충격하중을 가하여 정점이 형성되는 P51, P52와 달리 P53, P54에서는 수직벽을 타고 오를 갑판침입수가 수직벽 양쪽 측면으로 배수되어 두 번째 정점이 형성되지 않는 것으로 판단된다. 그리고 P54에서 먼저 압력이 발생하는데 이는 Fig. 6의 1/8T에서도 확인할 수 있듯이 수직벽 바깥쪽부터 물이 들어와 압력이 먼저 발생하는 것을 확인할 수 있다.

수직벽에서 충격하중이 발생하는 수직면의 하단부터 상단까지 높이에 따른 압력의 시간에 대한 변화의 경향을 알아보기 위해 Fig. 13과 같이 P51부터 P71까지 총 3개의 계측지점에서 압력을 비교하여 보았으며, Fig. 12와 마찬가지로 P51, P61에서 수직벽을 타고 오를 갑판침입수가 다시 내려오면서 두 개의 정점을 형성하였다. 또한, 갑판에 가장 가까운 압력계측점인 P51에서 최대 충격하중이 가해졌으며, P61, P71의 경우 P51보다 상대적으로

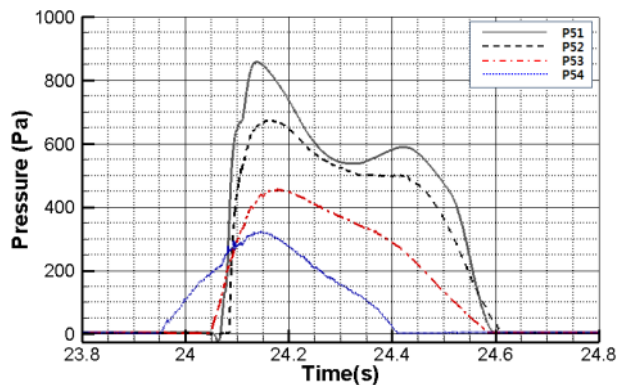


Fig. 12 Time histories of pressure values at points measuring pressure P51, P52, P53 and P54 on the breakwater of the FPSO model

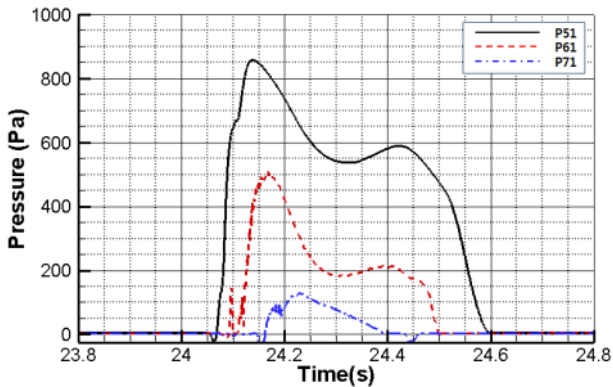


Fig. 13 Time histories of pressure values at points measuring pressure P51, P61 and P71 on the breakwater of the FPSO model

낮은 압력이 계속되었다. 그림에서 각 계측 점에서의 시간에 따른 압력변화의 경향은, 입사파의 파장(λ) 및 파고(H_w) 조건에 따라 갑판침입수의 유량이 달라 본 연구에서 선정된 입사파의 조건으로 인한 갑판침입수의 유량에 따른 결과로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 수정된 밀도함수법을 이용하여 규칙파 중 해양 구조물의 갑판침입수 충격하중에 관한 수치시뮬레이션을 수행하였으며, 연구결과를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 수치계산결과들의 갑판침입수 진행과정 고찰을 통하여, 계산 결과에서도 모형시험결과와 마찬가지로 갑판 상으로 유입되는 갑판침입수가 수직벽 방향으로 전진하는 과정에서 선체 중심으로 집중되는 현상을 확인할 수 있었고, 이로 인하여 갑판 상 선수 중앙부에 위치한 P11에서 평균 압력이 가장 크게 발생하였다.
- 2) 모형시험과 계산결과들의 각 압력 계측 점에서 시간에 따른 압력변화를 비교한 결과, 압력변화의 형태는 유사하며 대부분의 계측 점에서 두 개의 정점이 형성되었다. 이는 선수부에서 유입되는 갑판침입수가 갑판 상을 지나며 수직벽을 타고 오르는 과정에서 첫 번째 정점이 생기며, 두 번째 정점은 수직벽에 부딪힌 갑판침입수가 다시 내려와 갑판 상으로 퍼지면서 유동수의 운동량이 적어 배수가 빠르게 이루어지지 않은 결과로 판단된다.
- 3) 평균 압력을 기준으로 갑판 상 선수 앞쪽 끝 중심과 측면 끝 중심에 위치한 압력계측점 P23, P32에서는 20% 이내 오차를 보이고 있으며, 선수중앙부에 위치한 압력계측점 P11, P31에서는 6% 이내 오차를 보이고 있다. 이는 수치시뮬레이션에서 격자수 및 격자 크기와 입사파에 의한 갑판침입수의 유량 관계로 인해 발생하는 것으로 판단된다.
- 4) 수직벽 상의 폭에 따른 압력변화의 경향에서도 갑판침입수의 선체 중심으로 집중되는 현상으로 인해 선체 중심부에 위치한 계측지점에 최대 충격하중을 가하게 되며, 빠른 배수로 인하여

시간에 따른 압력의 두 번째 정점은 보이지 않게 된다. 또한, 수직벽 상의 높이에 따른 압력 경향에서 갑판에 가장 가까운 압력 계측점에서 최대 충격하중이 가해진 것을 확인할 수 있었다.

- 5) 수정된 밀도함수법을 이용한 해양구조물 갑판침입수 충격하중에 관한 수치시뮬레이션 결과와 모형시험 결과의 정량적인 비교를 통하여, 압력에 대한 오차율이 다소 차이가 있으나 비슷한 경향을 보이는 것을 확인하였다. 향후에 격자구성 및 경계 조건들에 있어 좀 더 보완이 된다면, 해양구조물에 미치는 갑판침입수의 영향에 대한 수치적 해석에 있어서 사용면에서 간편하면서도 정도 높은 활용이 가능할 것으로 사료된다.

후기

본 연구는 인하대학교와 산업자원통상부 그린카 등 수송시스템 산업핵심기술개발사업 '선박의 운항효율 향상을 위한 부가저항이 고려된 선형설계 향상 기술 개발'(과제번호: 10062881)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Ersdal, G. & Kvitrud, A., 2000. Greenwater incident on norwegian production ships. *10th International Society of Offshore and Polar Engineering Conference*, Seattle, United States of America, 28 May–2 June 2000, pp.211–218.
- Greco, M. Faltinsen, O.M. & Landrini, M., 2005. Shipping of water on a two-dimensional structure. *Journal of Fluid Mechanics*, 525, pp.309–332.
- Ha, Y.J. Lee, Y.G. & Jeong, K.L., 2012. An experimental study on the effects of bow flare angle about greenwater in regular waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(1) pp.79–86.
- Iwanowski, B. Lefranc, M. & Wemmenhow, R., 2009. CFD simulation of wave run-up on a semi-submersible and comparison with experiment, *Proceeding of the ASME 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Honolulu USA, 31 May–5 June 2009, OMAE 2009–79052, pp.19–29.
- Jeong, K.L. Lee, Y.G. & Ha, Y.J., 2013. Experimental and numerical study on the effects of bow deck shape on the greenwater. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(5), pp.273–281.
- Jeong, K.L. Lee, Y.G. & Kim, N.C., 2010. A fundamental study for the numerical simulation method of greenwater occurrence on bow deck. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(2), pp.188–195.
- Jeong, K.Y. & Lee, Y.G., 2014. Numerical simulation of the flow around advancing ships in regular waves using a fixed

rectilinear grid system. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(5), pp.419-428.

Kim, Y.J. & Shin, K.S., 2005. Numerical calculation and experiment of greenwater on the bow deck in regular waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 42(4), pp.350-356.

Kristiansen, T. Baarholm, R. & Stansberg C.T., 2004. Validation of second-order analysis in predicting diffracted wave elevation around a vertical circular cylinder. *Proceeding of the 14th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Toulon France, 23-28 May 2004, 14(1), pp.342-349. .

Lee, H.H. Lim, H.J. & Rhee, S.H., 2012. Experimental investigation of greenwater on deck for a CFD validation database. *Ocean Engineering*, 42, pp.47-60.

Ogawa, O., 2003. Long-term prediction method for the greenwater load and volume for an assessment of the load line. *Journal of Marine Science and Technology*, 7(3), pp.137-144.

Xuan, P. Kamlesh V., 2004. Influence of breakwaters in reducing the effects of green water loading onboard high speed container vessels using CFD, *Proceedings of The*

fourteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, Toulon, France, 23-28 May 2004, pp.374-381.

