

FPSO 선수부 갑판침수 현상에 대한 실험 및 수치적 검증

임호정¹·이현호²·박선호^{3,†}·이신형⁴
대우조선해양(주) 종합설계운영팀¹
현대중공업(주) 운동조종연구실²
서울대학교 조선해양공학과^{3,†}
서울대학교 조선해양공학과 해양시스템 공학연구소⁴

Experiments and Numerical Validation for FPSO Bow Water Shipping

Ho-Jeong Lim¹·Hyun-Ho Lee²·Sunho Park^{3,†}·Shin Hyung Rhee⁴
Integrated Design & Engineering Administration Team, Daewoo Shipbuilding Marine Engineering Co., Ltd., Geo-je, Korea¹
Ship Motion and Maneuverability Research Department, Hyundai Heavy Industries, Co., Ltd., Ulsan, Korea²
Department of Naval Architecture, Seoul National University, Seoul, Korea^{3,†}
Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Research Institute of Marine System Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea⁴

Abstract

As ocean resources in shallow water areas are being exhausted, deep sea development is becoming common these days. Therefore floating type offshore structures are more competitive than fixed type structures, and FPSO is the most popular one these days. FPSO's are generally operated in a specific region and positioned to meet mostly head or bow waves in order to reduce roll motions. However this makes these vessels more vulnerable to green water around the bow region, and therefore the bow shape must be properly designed to mitigate green water damage. In the present study, experimental results for three different FPSO bow shapes in regular head waves were analyzed and compared to each other. Also CFD computations were carried out as a sample validation case for the database built for CFD code validation.

Keywords : Green Water(갑판침수현상), FPSO(부유식 원유생산 저장 하역장치), Bow Shape(선수부 형상), Regular Head Wave(선수 규칙 파), CFD(전산유체역학)

1. 서론

국제유가의 인상으로 인하여 각 석유 소비국들은 안정적인 석유 공급을 위해 그 동안 비효율적이라 생각되어 왔던 한계유전개발을 시도하게 되었으며, 그 결과 유전개발은 육상에서 해상으로, 천해에서 심해로 옮겨지게 되었다. 상당량의 해저자원이 매장되어 있는 북해 역시 활발한 유전개발이 이루어지고 있으며, 기존의 고정식 구조물과 더불어 더 깊은 지역의 채굴이 가능한 부유식 해양구조물 또한 널리 사용되고 있다. 그러나 북해는 해상상태가 상당히 거친 해역으로 알려져 있으며, 이 지역에서 빈번하게 발생하는 높은 파고는 선박의 건판(freeboard)보다 높아 갑판이 상당량의 물에 의해 침수되는 현상이 발생되는데, 이러한 현상을 갑판침수(Green Water) 현상이라 한다. Floating Production Storage and Offloading vessel(FPSO)는 해저 유전개발에 사용

되는 부유식 해양구조물로, Drill ship 혹은 Drilling rig가 석유가 매장된 지역을 발견한 후 투입되어 석유를 채굴 및 저장하는 장비이다. FPSO는 일반적으로 자항능력이 없으며, 예인선을 이용하여 특정해역으로 이동시킨 후 장기간 계류되어 사용되기 때문에 갑판침수 현상에 노출되기 쉽다. 특히 북해와 같이 거친 해상 조건에 설치되는 FPSO의 경우 높은 파도에 의해 유발되는 갑판침수 현상으로 인한 작업 제한과 구조적인 손상 등 많은 피해들이 보고되고 있다(Ersdal & Kvitrud, 2000). 갑판침수 현상에 관한 연구는 주로 선체와 파도의 상대운동을 추정하여 그 발생 빈도를 예측하는 기술, 갑판 위로 유입된 유동의 전파 양상을 추정하고 그 결과를 토대로 갑판 상부의 구조물에 작용하는 하중을 예측하는 기술 등으로 진행되어 오고 있다. 갑판침수 현상의 발생 빈도를 예측하는 기술은 파랑 중 선체의 운동 해석에 관한 부분으로 그 기술이 상당히 정립되어 있다고 볼 수 있다(Soares & Pascoal, 2005; Ogawa, 2003). 유입된 유동으로 인한 하중의

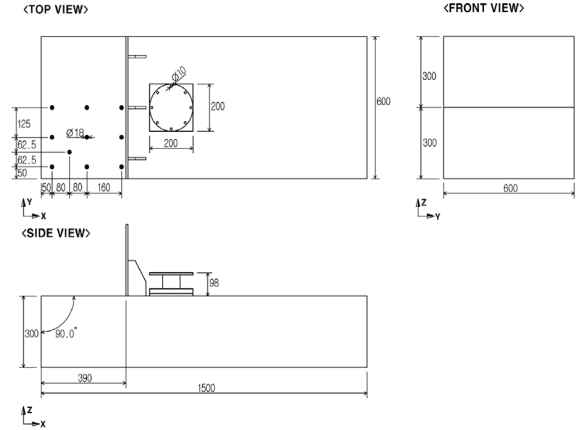
추정에는 아직도 많은 어려움이 있는데 최근에는 전산유체역학 (Computational Fluid Dynamics, CFD)의 발달로 인하여 유입 유동의 거동과 하중 추정의 수치 계산에도 어느 정도 진전이 있다. Fekken, et al. (1999)은 N-S 방정식 기반 VOF 방법을 사용하여 갑판침수 유입거동 및 하중 추정을 시도하였다. Nielsen (2003)은 2차원과 3차원 형상의 FPSO에서 발생하는 갑판침수 현상에 대한 수치해석 수행 및 방법을 제시하였다. Zhang, et al. (2005)는 갑판침수 현상에 대하여 3차원 수치해석 방법을 제시하였다. 그러나 아직까지 믿을 만한 하중의 추정 결과는 모형시험에 의존하고 있는 것이 현실이며, 수치계산은 모형시험과 병행하여 수행되는 경우가 많다. Buchner (2002)는 다양한 형상의 FPSO에 대한 모형시험 및 수치해석을 실시하여 설계에 도움을 주고자 하였다. Greco, et al. (2005)는 2차원 모형시험 및 수치해석을 실시하여 갑판 침수 유동의 양상을 파악하였다. Barcellona, et al. (2003)은 FPSO를 예인전차에 고정시킨 상태로 3차원 갑판 침수 시험을 하여 갑판 침수 유동 양상을 관찰하고 압력을 계측하였다. 국내에서는 Bai, et al. (1992)이 한국해양연구원과 현대중공업의 모형시험방법 및 결과를 비교하여, 갑판침수 현상과 선수 상대운동의 상관관계 및 통계적 특성을 분석하였으며, Kim and Shin (2005)은 모형시험과 수치해석을 통하여 설계에 적용할 수 있는 방법을 제시하였다. 본 연구에서는 세 가지 종류의 선수형상을 가지는 FPSO를 대상으로 갑판침수 현상을 재현하여 갑판위에 작용하는 압력을 계측하였고 계측된 압력을 사용하여 선수부 형상 변화에 따른 갑판침수 현상의 변화를 비교하고 물리적 특성을 파악하였다. 갑판침수 실험은 CFD 해석을 위한 모형시험 검증 자료를 만들기 위함이 목적이므로, 모형시험에 사용한 모형선은 CFD 해석을 용이하게 하기 위하여 FPSO를 단순화 시킨 모형을 사용하였다. 갑판침수 실험에서 얻은 결과를 토대로 예시용 CFD 해석을 하였으며, 갑판침수 실험결과와 CFD 해석 결과를 비교분석하였다.

2. 모형 시험

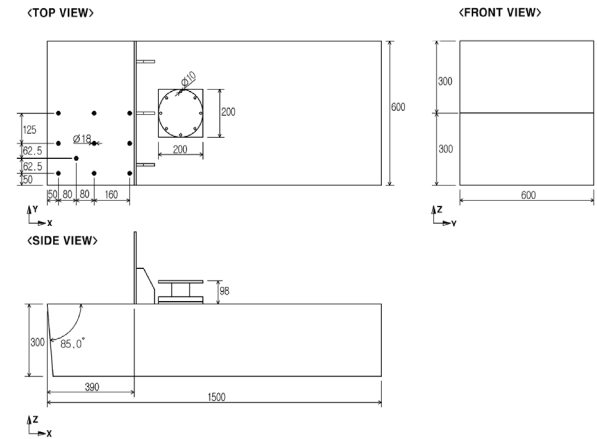
2.1 모형선

모형선의 제원은 Wang and Spong (2003)을 참고하여 현재 가장 널리 사용되고 있는 FPSO의 제원을 추정하였는데 길이/폭 비 = 5.0, 길이/깊이 비 = 10.0 정도로 확인되었다. 모형선 실선 비율은 예인수조와 조파기 구동능력을 고려하여 1/100 비율로 선정하였다. 따라서 모형선 길이를 3,000mm, 폭 600mm, 깊이 300mm로 선정하였으며 모형선을 예인전차에 고정시켰기 때문에 모형은 1,500mm 까지만 제작하였다. 모형선의 형상은 Fig.1 과 같으며, Rect0로 표기한 사각형 바지형상(a), Rect 5로 표기한 사각형 바지에 5도의 선수각을 부여한 형상(b), Round로 표기한 선수 갑판 양 끝단을 라운드 처리한 형상(c)이다. 모형선을 실제 사용되는 FPSO를 단순화 시켜 제작한 이유는 CFD 해석의 효율성을 높이기 위함이다. 모형선의 건현은 Ersdal and Kvitrud

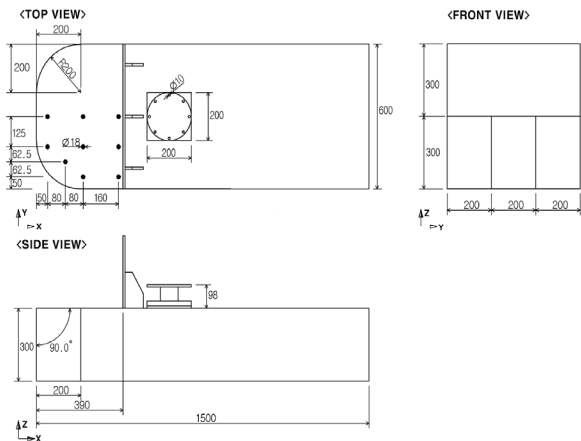
(2000)을 참고하여 갑판침수현상으로 인하여 FPSO가 사고가 발생하기 쉬운 건현인 4.5 cm로 택하여 주었다. FPSO의 상부구조물의 경우 모형선 선수로부터 39 cm 떨어진 지점에 설치하여 주었다. 모형선의 좌현에는 9개 또는 10개의 계측지점을 만들어 주고 압력센서를 설치하여 갑판위로 올라오는 유동의 압력을 계측하였다.



(a) Rectangular deck model without stem angle (Rect0)



(b) Rectangular deck model with stem angle of 5° (Rect5)



(c) Rounded deck without stem angle (Round)

Fig. 1 FPSO bow models (unit: mm)

2.2 입사파조건

Buchner (2002), Greco, et al. (2005)을 토대로 입사파의 파고 (H_w)와 파장 (λ)의 비의 범위가 0.04~0.08 정도일 경우 FPSO의 갑판 침입수로 인한 피해가 많은 것으로 나타났다. 이 중에서 모형시험 당시 서울대학교 예인수조에서 재현할 수 있었던 파고를 고려하여 H_w/λ 의 값을 0.06으로 선정하였다. 본 연구에서 모형시험을 위하여 선정된 입사파의 파장(λ)과 진폭 (A_w)을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Regular wave conditions

H_w/λ	0.06
λ	375 cm
A_w	11.25 cm

2.3 모형시험 방법

예인수조에서 Table 1의 입사파를 발생시키고 어느 정도 시간이 지나면 수조의 뒷벽을 맞고 생성되는 반사파로 인해 입사파가 교란되는데, 반사파의 영향을 최소화하기 위하여 예인수조의 중앙에서 조파기 쪽으로 더 가까운 부위에 모형선을 움직이지 않도록 고정시켰다. 갑판 침수 현상은 선체의 상대운동에 많은 영향을 받기 때문에 파랑 중 선체 운동을 고려한 모형시험을 실시하는 것이 일반적이다. 그러나 본 연구에서는 입사파와 선체의 선수부 형상에 따라 갑판으로 유입되는 유동의 특성을 살펴보기 위하여 모형선을 고정된 상태로 실험을 실시하기로 하였다. 압력 데이터의 계측은 갑판위의 물이 없는 상태에서 계측하였으며 5kHz 까지 계측이 가능한 Watex WT-P020을 사용하였다. 입사파의 경우 모형선에 부딪치고 반사되어 나오는 반사파의 영향을 피하기 위해 모형선 선수 끝단으로부터 10m 떨어진 지점에 용량식 파고계를 설치하여 입사파의 파고를 계측하였다. 입사파의 경우 입사파가 없는 시점부터 반사파가 모형에 도달하는 시점까지 데이터를 계측하였다. 시험 동영상은 모형선을 고정시킨 예인전차에 Video Camera를 설치하여 계측하였다.

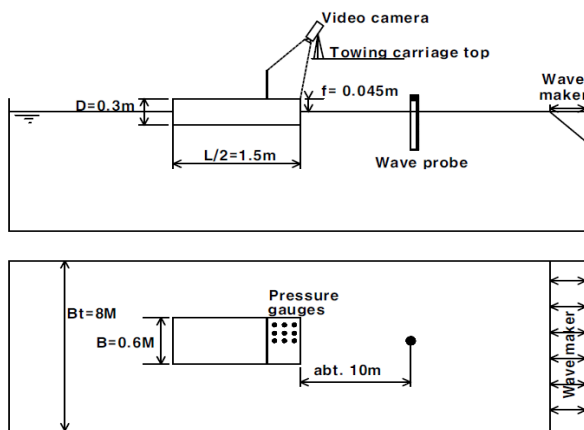


Fig. 2 Schematic view of instrumentation

모든 시험은 시험의 재현성을 확인하기 위해 동일한 조건에 대하여 세 번의 반복실험을 하였다. 모형시험 방법을 Fig.2에 그림으로 나타내었다. 갑판 위 압력계측지점이 9개 또는 10개이므로 시험의 혼선을 방지하기 위해 압력계측 지점에 행렬조합과 유사한 방식으로 Fig.3과 같이 기호를 부여하였다. 즉, 선체 중심선과 상부구조물이 만나는 지점을 기준으로 모형선의 길이방향으로 i 열, 폭방향으로 j열로 설정하여 Pij형태로 나타내었다. i열은 모형선의 길이 방향, j열 폭 방향이라 할 수 있다. 따라서 모형선 중앙부와 상부구조물이 만나는 지점의 압력계측 위치는 P11이 되고, 선수 끝단의 압력계측 위치는 P31이 된다. P4는 Round 형상에서 P33를 대체하는 압력계측 위치로 위의 기준을 따르지 않았다.

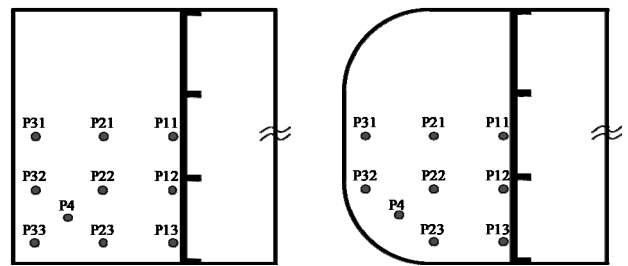


Fig. 3 Locations of pressure measurement (left: Rect0 & Rect5 models, right: round model)

2.4 재현성

2.3절에서 언급했듯이 동일한 조건에 대한 재현성에 대하여 Fig. 4의 그래프에 나타내었다. Fig. 4는 Rect 0 모형에 대하여 입사파와 P21 지점에서 계측한 압력을 세 번 계측한 각각의 결과를 비교하여 나타낸 것인데, 비슷한 값의 진폭을 나타내는 것을 알 수 있다. Fig. 4의 incident wave elevation에 표기한 점선은 모형선의 건현을 나타낸다.

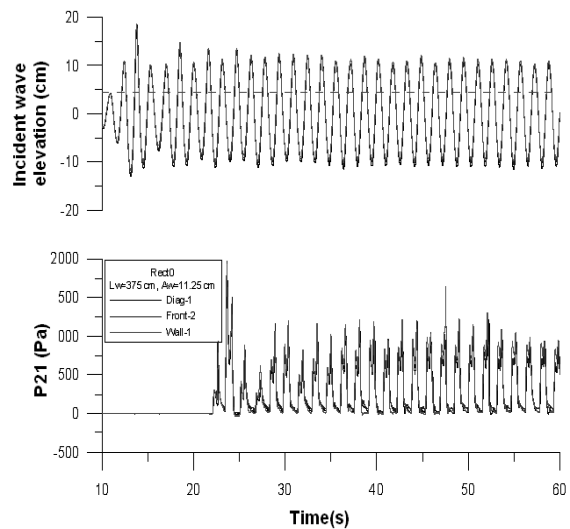


Fig. 4 Example of repeatability check for Rect0 (upper: incident wave elevation, lower: pressure at P21)

2.5 동영상 분석

모형시험에서 계측한 동영상 자료를 이용하여 갑판 침입수의 진행양상을 분석하였다. 분석에는 갑판좌현에 설치한 격자판을 이용하였으며, 격자 한 개의 크기는 2cm X 2cm 이다. 분석 방법은 격자판을 이용하여 침입수의 최전방에 선(water front line)을 그려봄으로써 갑판침수 현상의 진행과정을 관찰하였다. 갑판침수 현상이 시작되면 Fig. 5와 같이 침입수가 유입된다. Fig. 5는 갑판 침입수 시간에 따른 침입수의 최전방 선을 나타낸다. Fig. 6은 갑판침수 현상 시작 (0초) 부터 0.03초 간격으로 상부구조물 (0.24초)에 다다르기까지의 과정 전체를 나타낸다. 유속의 경우 최전방 선을 사용하여 판정 하였는데, 0초부터 0.06초 까지 각각의 최전방 선 간격에 비해 0.09초부터 상부구조물에 도달할 때까지의 각각의 최전방 선의 간격이 넓기 때문에 유속이 증가한 것을 확인할 수 있다. 갑판침수 시작 시점으로부터 약 0.24초 이후에 갑판침수가 상부구조물에 부딪치게 되며 모형선의 높이방향으로 물기둥을 형성한다. 형성된 물기둥은 시간이 지남에 따라 점점 더 높아지다가, 중력의 영향으로 인해 붕괴된다.

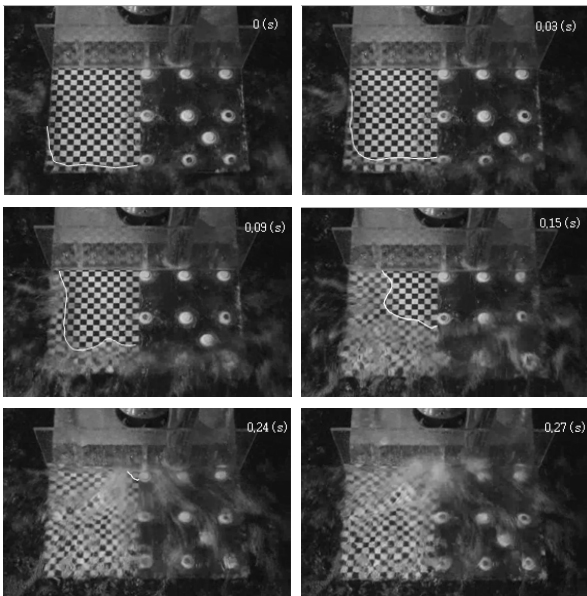


Fig. 5 Green water behavior on deck for Rect0

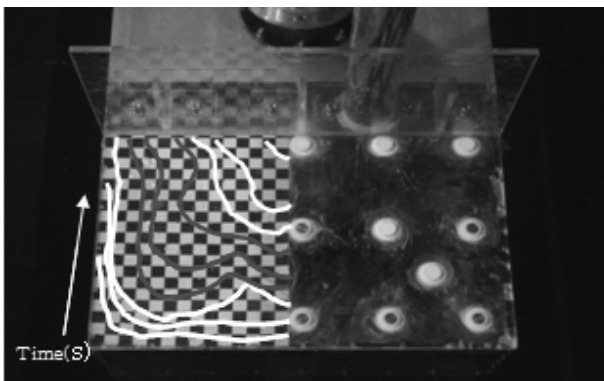
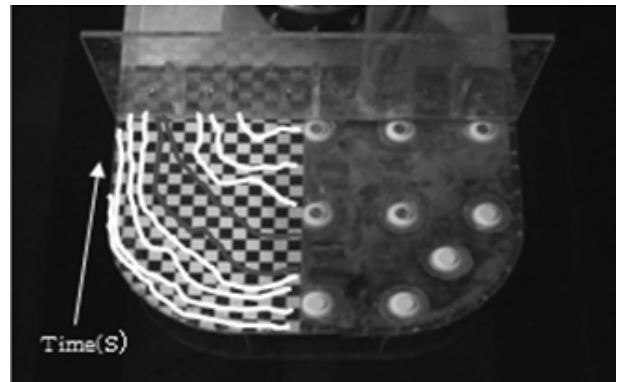
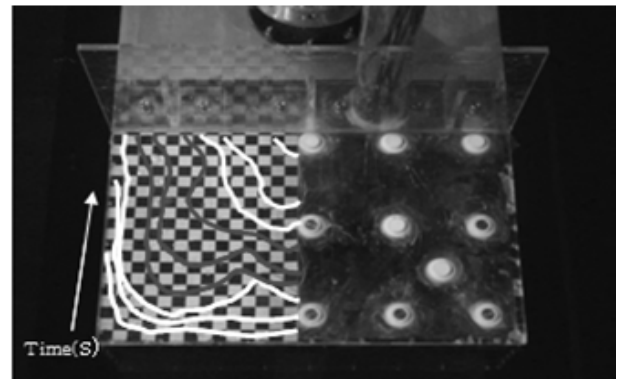


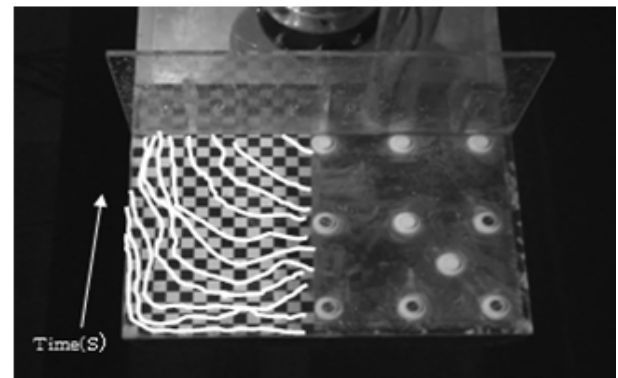
Fig. 6 Summary of green water behavior on deck for Rect0



(a) Round



(b) Rect0



(c) Rect5

Fig. 7 Comparison of green water behavior according to bow shape

Fig. 7을 토대로 선수 형상에 따른 갑판침수 현상 진행 과정을 비교해 보았다. Fig. 7 (a)의 Round 형상의 모형은 갑판침수 현상이 시작되고 5번째 최전방 선과 6번째 최전방 선의 간격이 급격히 넓어지는 것을 볼 수 있다. 6번째 이후에 나타나는 최전방 선의 경우 5번째의 최전방 선과 6번째 최전방 선의 간격보다 선과 선 사이의 간격이 좁지만 첫 번째부터 4번째 최전방 선간의 간격보다 넓은 것을 볼 수 있다. Fig. 7 (b) Rect0 모형의 경우 Round 형상의 모형과 비슷한 경향을 나타내며 Round 형상은 4번째 최전방 선부터 선과 선의 간격이 급격하게 넓어졌다가 다시 좁아지는데 이 때 좁아진 선 간격 역시 갑판침수 초기, 즉 첫 번째부터 세 번째 최전방 선의 간격보다 넓은 것을 볼 수 있다. 침

입수의 최전방 선간의 간격이 넓어진 것은 갑판침입수의 유속이 증가되었기 때문이며, 증가된 유속으로 인하여 갑판에 작용하는 동압이 증가 되리라 생각된다. 반면 Fig.7 (c) Rect5 모형의 경우 Rect0 모형과 Round 모형에 비하여 거의 일정한 간격의 최전방 선을 유지하는데 이러한 이유는 5도 선수각의 영향으로 인해 갑판침입수가 갑판위로 올라오는데 제한이 있었기 때문이라고 생각된다. 침입수의 최전방 선의 개수를 세어 보면 5도 선수각이 두 개의 최전방 선을 더 생성 시키는 것 또한 5도 선수각의 특징이다.

2.6 압력 그래프 분석

동영상 분석에서 관찰한 내용을 확인하기 위해 계측된 압력 그래프의 1주기 시계열에 대하여 관찰 하여 Fig.8에 나타내었다. 압력의 초기값이 0 이고, 갑판으로 유입된 갑판침입수가 압력계 위치를 지나가게 되면 수두증가 등에 의해서 압력이 증가하게 된다. 따라서 각 압력 계측위치에서 초기에 압력이 증가하는 시간을 관찰하면 유입된 갑판침입수의 이동 양상을 파악할 수 있다. 유입된 갑판침입수는 갑판 선수 및 모서리 부분에서 시작하여 점차 중앙부로 이동하는 것을 확인 할 수 있다. 모든 계측위치에서 두 개의 봉우리를 나타내며, 동영상 분석을 통해 확인한 바와 같이 첫 번째 봉우리는 갑판침입수가 갑판 상부구조물로 돌진하면서 발생하는 수두 증가에 의한 것이고, 두 번째 봉우리는 상부구조물에 부딪친 갑판침입수가 배수가 되면서 발생한 수두증가에 의한 것이다. 압력 값의 경우 P11 위치에서 다른 계측 지점에 비해 크게 계측이 되는데, 유입된 갑판침입수가 갑판중앙부로 밀집되어 상부구조물에 부딪치기 때문인 것으로 보인다.

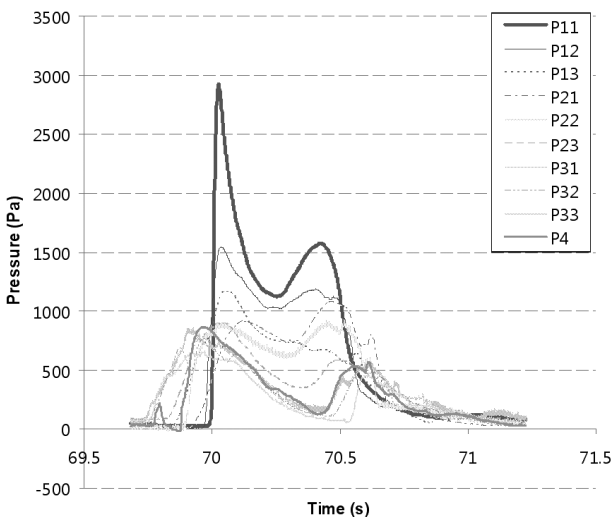


Fig. 8 Comparison of the pressure time histories at different location (Rect0, $\lambda=375$ cm, $A_w=11.25$ cm)

2.7 모형에 따른 최대 압력 분석

여러 조건에서의 갑판침수 양상을 정량적으로 비교하기 위해 식(1)과 같은 무차원화 공식을 사용하여 무차원화된 압력을 비교

하였다. 여기서 P_{ave} 는 규칙파 구간에서 계측된 압력의 평균 진폭, ρ 는 물의 밀도 ($=998.199 \text{ kg/m}^3$), g 는 중력 가속도 ($=9.81 \text{ m/s}^2$), $A_{w,ave}^+$ 는 규칙파 구간에서 계측된 입사파의 양의 진폭 평균값, f 는 건현을 각각 나타낸다.

$$P' = \frac{P_{ave}}{\rho g (A_{w,ave}^+ - f)} \quad (1)$$

각 압력 계측 위치에서 두 번 이상 계측한 결과들을 평균하여 하나의 값으로 나타낸 후 식(1)의 무차원 공식을 사용하여 평균 압력값을 무차원 압력으로 표시하여 Fig. 9와 같이 나타내었다. 나타낸 그래프를 이용하여 선수형상에 따른 무차원 압력값을 비교하였고, 상대적으로 압력이 작게 작용하는 선수부 형상을 조사 하였다. 조사결과 5도 선수각의 영향으로 인하여 대부분의 계측 지점에서 Rect5가 가장 작게 나타난 것을 확인 할 수 있었다. P11, P12의 무차원 압력이 Round 형상의 모형에서 크게 나타나는데 이는 Round 형상이 Rect0, Rect5 형상과 다른 모서리 형상을 가지고 있기 때문으로 판단된다. P11, P12의 중앙부분에서의 압력이 높은 것은 Round 형상의 모형에서는 둥근 형상의 모서리 로 인해 갑판침입수가 더 빠르게 유입되는 것으로도 판단된다.

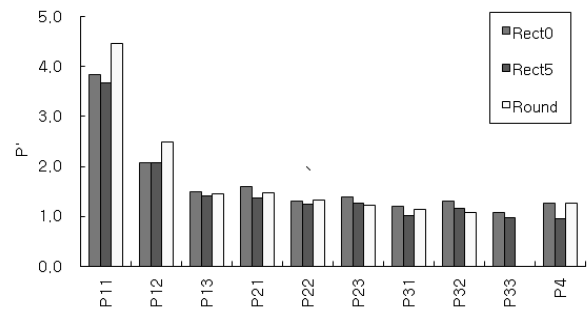


Fig. 9 Comparison of average pressure peaks ($\lambda=375$ cm, $A_w=11.25$ cm)

3. CFD 해석 방법

모형시험 결과를 바탕으로 Rect0 모형선에 대하여 검증용 CFD 해석을 수행 하였으며, Table 1에 언급된 입사파 조건을 사용하였다.

3.1 지배방정식

갑판침수 현상의 CFD 수치해석에 사용된 질량보존 및 운동량 보존 방정식은 각각 식 (2), (3)과 같다.

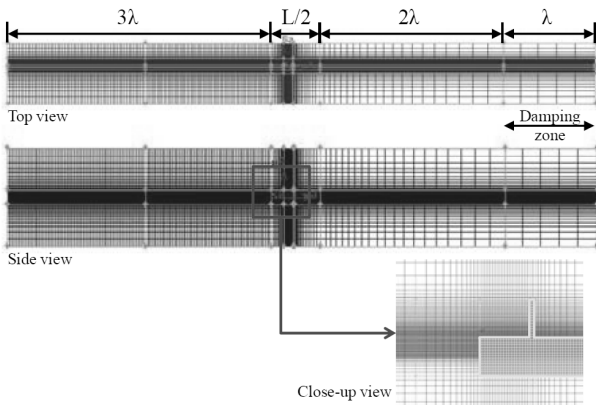
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3)$$

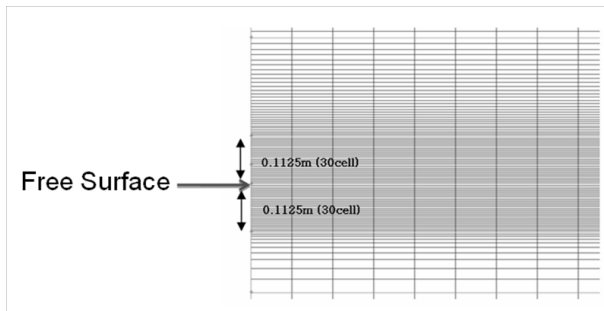
$$\frac{\partial(\alpha_p \rho_p)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_{dr,p}) + \sum_{q=1}^m (m_{qp} - m_{pq}) \quad (4)$$

위 식에서 t 는 시간, \vec{v} 는 속도, ρ 는 유체의 밀도, P 는 검사체에 작용하는 압력, $\vec{\tau}$ 는 응력텐서, \vec{F} 는 체적력(body force), \vec{g} 는 중력을 의미한다. 갑판침수 현상과 같이 두 가지 유체가 포함되는 자유수면의 움직임은 일반적으로 volume of fluid(VOF)방법을 사용한다. VOF방법을 사용하면 α 라는 체적비율을 사용하여 cell 내부 유체의 상태를 결정하게 되는데, α 가 0 이면 기체 영역, α 가 1 이면 액체 영역, 두 유체의 경계면에서는 α 가 0과 1 사이의 값을 가진다. 운동량 보존 수식(3)에 체적비율 α 가 삽입되면 수식(4)와 같이 변환 된다.

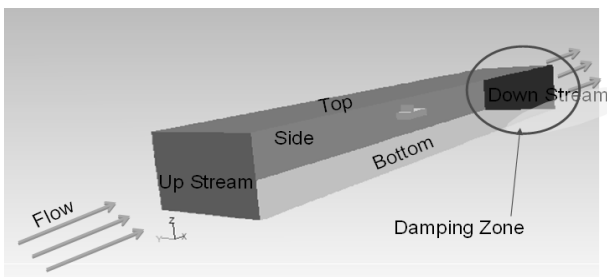
3.2 격자 생성 및 경계조건



(a) Computational domain and meshes



(b) Meshes around the free surface



(c) Boundary conditions

Fig. 10 Computational domain and meshes

격자생성은 상용 격자생성 프로그램인 Gambit을 사용하여 Fig. 10 (a)와 같이 생성시켜 주었다. 모형선 선수방향 도메인은 입사파가 생성되는 구간으로 동일한 길이의 파장을 생성시키기 위하여 길이방향으로 등 간격의 격자를 생성시켜 주었고, 모형선 선미방향은 생성된 유동이 빠져나가는 구간이므로 선수 방향에 비하여 격자를 성기게 생성시켜 주었다. 모형시험에서 입사파의 진폭이 11.25cm인 점을 고려하여 Fig. 10 (b)와 같이 자유수면을 기준으로 위아래 방향으로 각각 11.25cm 크기의 서브-도메인을 만들어 주었으며, 정확한 진폭을 모사하기 위해 높이방향으로 등 간격의 격자를 사용하였다. 파의 한 파장 길이 구간에 40개의 격자, 진폭은 높이구간에 30개의 격자를 사용하였고, 전체 해석 도메인의 폭 방향으로 60개의 격자를 사용하였다. 한편 압력을 계측하는 모형선의 선수부 갑판에는 길이 x 폭 기준으로 11x30개, 상부구조물에는 폭 x 높이 기준으로 30 x 40개를 사용하여 총1,305,840개로 격자를 구성하였다. 모형 시험에서 사용한 파장 기준으로 해석영역의 크기를 만들어 주었으며, 모형선 선수방향으로 3파장, 모형선 선미방향 2파장, 그리고 유동이 빠져나가는 부분에 1파장 크기의 감쇠구간(damping zone)을 설정하여 출구에서의 반사파 발생을 방지하였다. 모형시험에서 모형선 선수방향으로 10m 떨어진 지점에서 입사파의 파고를 계측하였으므로 CFD 해석 역시 모형선 선수방향으로 10m 떨어진 지점에서 입사파의 파고를 계측하였다. 해석영역의 경계조건은 Fig. 10(c)와 같으며 유동이 유입되고 나가는 유입경계조건(upstream), 유출경계조건(downstream) 부분을 각각 Dirichlet경계조건과 Neumann경계조건으로 설정하였다. 모형시험에서 조파기가 모형선 선수 방향에 설치되어 있기 때문에 유입경계조건에는 파고와 파장에 해당하는 속도를 Dirichlet 조건으로 적용하여 입사파를 생성하였고, 출구경계조건에서 정수압 조건을 적용하여 자유수면을 정의하였다. 출구 경계조건인 경우 생성된 입사파가 자연스럽게 빠져나가게 하기 위하여 Neumann경계조건을 사용하였는데, 출구 경계조건에서의 반사파를 없애주기 위하여 유출경계조건 앞에 Fig. 10(c)의 붉은 원으로 표시한 감쇠구간을 설정하여 주었다. 감쇠구간에서는 강제로 파의 진폭을 0으로 감소시키기 위해 감쇠구간 앞의 파와 부드럽게 연결하는 영역을 정의하였다. 계산에 사용된 파수(wave number)와 파장으로부터 $kh = 5.9$ 로 3보다 크기 때문에 바닥을 무한수심으로 가정하여 대칭경계조건을 적용하였다.

4. CFD 해석 결과

4.1 갑판침수 진행해석

갑판침수 시험의 압력값 분석에 사용된 시간대에서 선택된 한 개의 주기를 8개로 나누어 비교하였다. Fig. 11과 같이 모형시험과 CFD해석 동영상 사진자료의 비교 결과 동일한 시간대에서 유사한 형태의 수면 형상을 생성시키는 것을 확인 할 수 있었다.

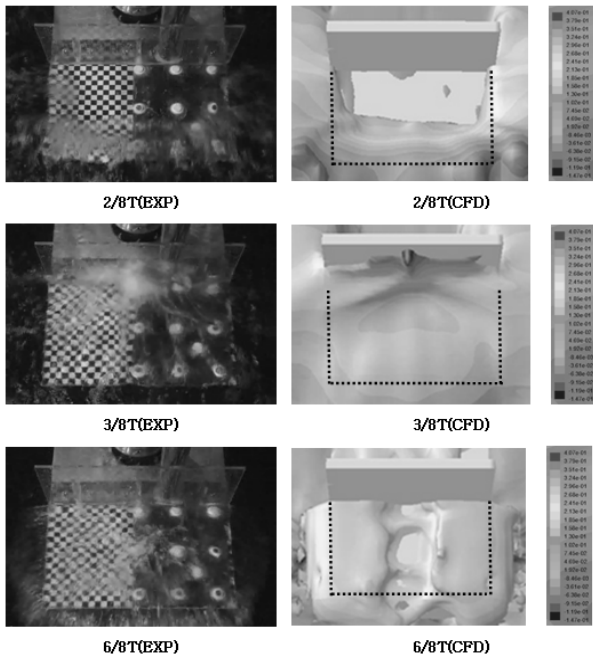


Fig. 11 Comparison of green water behavior on deck

4.2 한주기 시계열 비교

CFD 해석도 시험과 동일하게 한주기의 시계열에 대하여 나타내었다. CFD 해석 역시 모형시험과 마찬가지로 물이 없는 상태를 0으로 나타내 주었다. CFD 해석결과 모형시험과 유사한 형태의 압력 시계열 형태를 나타냈지만 값은 다소 차이를 보였다. 그러나 벽면 근처인 P11 위치에서 가장 큰 압력이 작용하는 경향은 모형시험과 일치 하였다. 한주기 시계열 비교결과를 Fig. 12에 나타내었다.

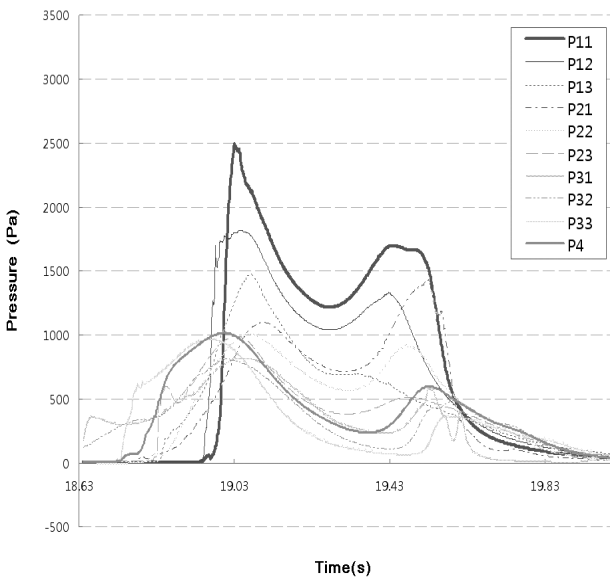


Fig. 12 Comparison of pressure time histories at different location

4.3 무차원 압력 비교

CFD 해석에서 모사된 입사파의 파고와 모형시험에 사용된 입사파의 파고가 다르기 때문에 식(1)의 무차원화 식을 이용하여 무차원 압력을 비교하였다. Fig. 13은 모형시험과 CFD 해석의 무차원 압력의 비교결과를 나타낸 것으로 P12, P13, P21 계측지점을 제외한 모든 계측지점이 모형시험과 유사한 크기의 무차원 압력을 나타내는 것을 볼 수 있었다. P12, P13, P21의 경우 상부구조물 중앙에 생성된 물기둥이 불규칙적으로 붕괴되는 지점으로 CFD 해석결과와 모형시험 결과가 다소 차이가 나타나는 것을 볼 수 있다. 물기둥이 불규칙하기 때문에 이를 CFD에서 모사하기 위해서는 시간 간격, 격자, 고차의 수치기법에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 본 논문의 CFD 해석은 예시용 결과로 다양한 파라미터에 대한 연구를 수행하지 않았다.

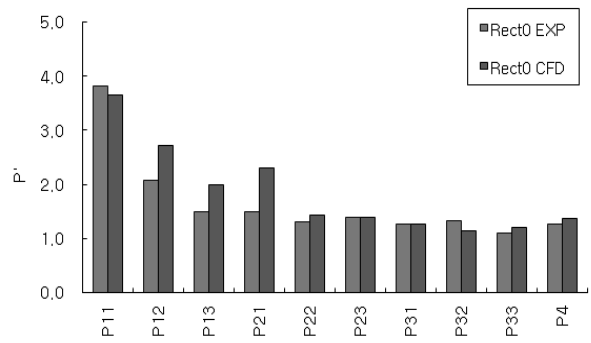


Fig. 13 Comparison of non-dimensional pressure($\lambda=375$ cm, $A_w=11.25$ cm)

5. 결론

본 논문에서는 FPSO를 단순화 시킨 세 가지 형태의 선수 모양을 가지는 모형을 사용하여 규칙파 중에서 갑판침수 현상에 대한 모형시험을 수행하였고 동영상 분석과 갑판 위 압력값 계측을 통해 어떠한 형태의 모형선이 갑판침수 현상에 유리한지 비교 분석하였다. 또한 모형시험을 바탕으로 Rect0모형에 대하여 예시용 CFD 해석을 수행하였고 모형시험 결과와 비교함으로써 해석의 정확성을 파악하였다. 모형시험에서 얻은 압력 그래프의 분석을 통해 갑판침수 현상이 발생하면 유입, 배수 되는 갑판침수입수의 수두증가의 영향으로 인하여 두 개의 봉우리가 생성되는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 갑판위로 유입된 유동이 상부구조물 중앙부로 물리면서 비교적 큰 압력이 계측되었고, 선수 끝단에서는 중앙부와 비교해 약 60% 이상 감소된 압력이 계측되었다. 세 가지 선수형상의 갑판에 작용하는 무차원 압력을 비교한 결과 Rect5가 가장 작은 무차원 압력을 나타내었고, 이러한 점을 통해 적절한 선수각을 부여하면 갑판침수 현상 발생시 선수각이 없는 경우에 비해 피해를 줄일 수 있다고 생각된다. CFD 해석결과 압력그래프의 경우 모형시험과 동일한 형태의 그래프를 잘 나타내

것을 확인 할 수 있었고, 무차원 압력의 경우 대부분의 계측지점에서 모형시험 무차원 압력과 일치하였다. 모형선의 형상 및 모형시험 조건이 상대적으로 용이하고, Rect0 모형에 대한 CFD 해석 결과 모형시험에서 계측된 무차원 압력과 비슷한 결과를 얻었기 때문에 본 연구의 모형시험 결과는 향후 갑판침수 현상관련 CFD해석의 검증자료로 적절히 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부 (KRF-2007-313-D00932, 2009-0093129, 2010-0022835)의 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

Bai, K-J. et al., 1992. Cooperative Experimental Study on Deck Wettings for the S-175 Container Ship Model. *Transactions of the Society of Naval Architect of Korea*, 29(1), pp 71-80.

Buchner, B., 2002. *Green Water on Ship-Type Offshore Structures*. Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Netherlands.

Barcellona, M. Landrini, M. Greco, M. & Faltinsen, O.M., 2003. An experimental investigation on bow water shipping, *Journal of Ship Research*, 47(4), pp 327-346.

Ersdal, G. & Kvitrud, A., 2000. Green Water Incidents on Norwegian Production Ships. *10th International Conference on Offshore and Polar Engineering*, Seattle, USA, 28 May - 2 June 2000.

Fekken, G. Veldman, A.E.P. & Buchner, B., 1999. Simulation of Green-water Loading Using the Navier-Stokes Equations. *7th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics*, Nantes, France, 19-22 July 1999.

Greco, M. Faltinsen, O.M. & Landrini, M., 2005. Shipping of Water on a Two-dimensional Structure. *Journal of Fluid Mechanics*, 525, pp 309-332.

Kim, Y.J. & Shin, K.S., 2005. Numerical Calculation and Experiment of Green Water on the Bow Deck in Regular Waves. 2005. *Journal of the Society of Naval Architect of Korea*, 42(4), pp 350-356.

Nielsen, K.B., 2003. *Numerical Prediction of Green Water Load on Ships*. Ph.D. thesis, Technical University of Denmark.

Ogawa, Y., 2003. Long-term Prediction Method for the Green Water Load and Volume for an Assessment of the Load Line. *Journal of Marine Science and Technology*, 7, pp 137-144.

Soares, C.G. & Pascoal, A., 2005. Experimental Study of the Probability Distributions of Green Water on the Bow of Floating Production Platforms, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 127, pp 234-242.

Wang, G. & Spong, R., 2003. Experience based data for FPSO's structural design. *Offshore Technology Conference*, Houston Texas, USA, 5-8 May 2003.

Zhang, S. Liut, D. Weems, K. & Lin, W-M., 2005. A 3-D Finite Volume Method for Green Water Calculation. *24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Halkidiki, Greece, 12-17 June 2005.



임 호 정

이 현 호

박 선 호

이 신 형