파랑충격력에 의한 원형실린더구조물의 구조응답평가

이 강 수^{1†} · 하 윤 진² · 남 보 우³ · 김 경 환⁴ · 홍 사 영⁵

^{1,4,5}선박해양플랜트연구소 해양플랜트에너지연구본부 책임연구원, ^{1,4,5}과학기술연합대학원대학교(UST) 선박해양공학전공 교수,
²선박해양플랜트연구소 해양플랜트에너지연구본부 선임연구원, ³서울대학교 조선해양공학과 조교수

Evaluation of Structural Response of Cylindrical Structures Based on 2D Wave-Tank Test Due to Wave Impact

Kangsue Lee^{1†}, Yoon-Jin Ha², Bo Woo Nam³, Kyong-Hwan Kim⁴ and Sa Young Hong⁵

^{1,4,5}Principal Researcher, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon, 34103, Korea

^{1,4,5}Professor, University of Science & Technology, Daejeon, 34113, Korea

²Senior Researcher, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon, 34103, Korea

³Assistant Professor, Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea

Abstract

The wave-impact load on offshore structures can be divided into green-water and wave-slamming impact loads. These wave impact loads are known to have strong nonlinear characteristics. Although the wave impact loads are dealt with in the current classification rules in the shipping industry, their strong nonlinear characteristics are not considered in detail. Therefore, to investigate these characteristics, wave-impact loads induced by a breaking wave on a circular cylinder were analyzed. A model test was carried out to measure the wave-impact loads due to breaking waves in a two-dimensional (2D) wave tank. To generate a breaking wave, the focusing wave method was applied. A series of 2D tank tests under a horizontal wave impact was carried out to investigate the structural responses of the cylindrical structure, which were obtained from the measured model test data. According to the results, we proposed a structural damage-estimation procedure of an offshore tubular member due to a wave impact load. Furthermore, a recommended wave-impact load is suggested that considers the minimum required thickness of each member. From the experimental results, we found that the required minimum thickness is dependent on the impact pressure located in a three-dimensional space on the surface of a tubular member.

Keywords : wave impact, 2D wave tank test, cylindrical structure, structural response, structural damage

1. 서 론

해양구조물의 경우 해상에서 운용되기 때문에 바람, 조류, 파도 등에 의한 환경하중을 견디도록 설계되어야 한다. 특히, 해상에서는 파도에 의한 하중이 해양구조물에 가장 큰 하중을 발생시키기 때문에 설계 시 파랑하중의 적절한 반영이 가장 중요하다. 쇄파와 같은 극한파는 국부적 손상을 야기하고 전체 구조물의 붕괴로 이어진다(Hong and Shin, 2007). 일반적으로 해상에서의 파도들은 쇄파형태로 나타나며, 이 중 Plunging 타입의 파도들은 보다 강한 충격력을 발생시킬 수 있다(Ahn and Kwon, 2017). 따라서 Plunging 타입의 파도에 의한 충격하중

예측이 중요하며, 이를 위해서 파도 생성에 관한 연구가 먼저 수행되어야 한다.

과거에는 Goda 등(1966)에 의하여 해석적인 방법으로 유체 충격하중을 추정하였지만 최근 컴퓨터의 발달로 CFD와 같은 방법에 의하여 유체충격하중을 직접 모사할 수 있다. 영국의 HSE(Health and Safety Executive)는 설계 기준 및 선급 규정들에는 해양구조물의 파랑 충격하중에 대한 잠재적인 위험성 인식과 특별한 사항이 반영되어 있지 않기 때문에 반영구적으로 계류된 해양 구조물에 적합하지 않다는 결론을 내린 바 있다(HSE, 2000). 또한, Park 등(2011)은 청수충격하중과 슬래밍 충격하중에 대하여 파랑충격하중 산정방법을 새롭게 고안하

[†]Corresponding author:

Tel: +82-42-866-3351; E-mail: klee@kriso.re.kr

Received April 22 2020; Revised June 9 2020;

Accepted June 29 2020

© 2020 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

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.

었는데 파랑충격압력분포에 따라 선급규정에 다양한 경험식들을 제시하고 있으며, 파랑충격압력을 계산해 보면 결과치의 편차가 매우 큰 것을 알 수 있다(Lee, 2000). 과거 다수의 연구는 파랑충격력을 정확히 산정하는 방법과 이를 구조물에 적용하여 실제 구조물이 파손이 발생하는 영역을 검증하고자 하였다(Lee *et al.*, 2016). 그러나 대부분 선박의 선수부에 작용하는 슬래밍 하중에 관한 것이며, 구조물의 손상의 형태나 파손의 범위를 평가법에 관한 것은 극히 드문 편이다(Hong *et al.*, 2017). 해양구조물에 적용하고 있는 부재의 단면형상은 원형이 일반적으로 해양자켓구조물이나 부유체 해양구조물의 부가물로 사용되고 있다(Kim, 2015). 최근 해양자켓구조물에 선박의 충돌에 의해 발생하는 구조적 손상에 관하여 노르웨이 표준(NORSOK)을 기반으로 탄소성해석을 통해 부재의 손상도를 평가한 사례가 있으나 현재 원형단면을 갖는 해양구조물에 작용하는 파랑충격력의 산정법과 구조물의 파손기준, 최소요구 두께 등에 관해 선급규정이나 국제규격에 제시되어 있지 않다(Li *et al.*, 2013). 파랑충격력에 의한 구조물의 손상 관련한 국제 해양구조물 표준 및 국제기준(Recognized codes and standards) 등에서 구분되어 있는 ALS(Accidental Limit State), 즉 사고한계상태의 범주에 속해있는 화재, 폭발, 충격, 낙하 등에 의해 발생하는 구조변형, 손상 등에 집중하여 수행되고 있다(Nho *et al.*, 2017). 파랑충격과 같은 경우에는 높은 해상상태가 아님에도 불구하고 이벤트 형태로 발생하는 파랑의 경우 충격이 가해지는 구조물에 발생확률과 빈도수가 낮다. 이와 같이 파랑충격력의 경우 한번 발생할 경우 큰 손상을 발생시키므로 ULS(Ultimate Limit State) 또는 FLS(Fatigue Limit State)의 범주로 아닌 사고한계상태로 구분하고 있다(DNV-GL, 2014). 따라서 본 연구에서는 주로 고주파 진동문제, 충격이후의 진동 또는 감쇠에 관해 다루지 않으므로 양방향 연성해석보다는 단방향해석을 통해 구조물의 손상, 최소두께 등에 관해 연구를 집중하고자 하였다.

2. 본 론

본 연구에서는 2D 조파수조를 통해 수행된 모형시험결과를 기반으로 원형실린더에 분포하는 파랑충격압력을 시간에 따라 예측하고 이를 CFD해석 결과와 비교하였다. 이를 통해 전산유체역학 해석을 통해 파랑충격력에 직접평가법에 관한 효용성을 확인할 수 있었고, 실험으로부터 구한 파랑충격 시계열 데이터를 그대로 원형단면을 갖는 실제 해양구조물의 부재에 적용하였고, 실린더구조물의 길이방향으로 분포하는 하중 크기의 평균치를 시계열로 적용하여 두 결과를 비교하였다. 실린더에 분포하는 변위 및 응력의 특성과 특이점이 바뀌는 것

을 확인하였고 실제 시계열을 적용하는 것이 해양구조물의 강도평가를 보다 정확하게 평가할 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 선수부에 요구되는 외판의 최소선급규정에 따른 두께 경험식들을 분석하여 적용하고자 하였다. 외판에 보강재가 고려된 최소요구두께 관계식으로 구성되어 있어 단일판에서 요구되는 최소한의 강재두께를 산정하기 매우 어렵기 때문에 경험식을 시험을 통해 구한 하중분포를 수치모델에 적용하였다. 동일한 재료 물성치를 갖는 강재에 관해 선수외판에 요구되는 구조물의 최소두께와 원형단면 부재에 요구되는 최소두께를 비교·분석하였고 이를 통해 NORSOK standard에 제시되어 있는 구조물의 손상기준을 활용하여 허용 두께치를 추정하고자 하였다. 특히 해양구조물의 갑판충격력(wave in deck)의 경우 이와 관련된 경험식이나 최소두께 요구사항들이 정립되어 있지 않기 때문에 본 연구를 통해 파랑충격력에 따라 요구되는 판재의 최소두께를 제안하고 그 경향을 고찰하고자 하였다.

2.1 조파수조를 통한 파랑충격력 시험

2.1.1 수치해석 조건

본 연구에서는 최근 수치계산 연구에 많이 이용되어지는 STAR-CCM+11.06을 이용하여 수치계산을 수행하였으며, Table 1은 본 연구 수행을 위하여 사용한 수치계산 기법들에 대한 개략적인 설명을 보여준다. 본 연구에서는 플런징(Plunging) 타입의 쇄파를 생성해야하므로, x-방향과 z-방향의 가로 세로 비를 2로 고정하여 수치계산을 수행하였다. 격자는 약 60만개로 수치계산을 수행하였다. 수치시뮬레이션에서 Focusing wave를 이용한 쇄파생성을 위하여 Fig. 1과 같이 모형시험에서 조파기의 움직임을 예측하고, 이를 시간 미분한 뒤 조파기 속도를 유입경계조건에 대입하였다.

2.1.2 모형시험 조건

본 연구에서 모형시험은 Fig. 2와 같이 KRISO(Korea Research Institute of Ship & Ocean Engineering) 2차원 조파수조에서 수행되었으며, 모델은 실린더구조물이다. 실린더구조물은 쇄파

Table 1 Numerical schemes and setup for CFD analysis

Numerical Tool		STAR-CCM+11.06
Number of grids		0.6 millions
Discretization scheme		FVM(Finite Volume Method)
Pressure and velocity field		SIMPLE
Time step set-up		adjustable time step
Number of sub-iterations		10
Grid type		Trimmer mesh
Numerical schemes	Convection	2nd order Upwind
	Temporal	2nd order Euler implicit

Fig. 1 Wave generation for numerical analysis

Fig. 2 Experimental set up for wave impact test

생성위치에 설치되었으며, 그 위치는 조파기로부터 17.8m에 위치한다. Fig. 3은 모형시험의 대상구조물인 실린더 모델의 제원을 보여주고 있다. 모형시험에서는 Piezoelectric type의 압력센서가 사용되어 졌으며, 압력센서의 고유진동수는 70kHz 이고 직경은 약 1cm 정도이다. 또한 본 모형시험에서 모형주위의 유동을 관찰하기 위하여 고속카메라를 이용하였으며, 5000 frame/s로 촬영하였다. 압력센서의 기준 위치는 최대파고 높이로 결정하였으며, 이는 수조 바닥면에서 16cm에 위치하며, 위아래로 3cm 간격에 따라 총 5개 위치에서 압력센서를 이용하여 쇄파충격압력을 계측하였다. 모형의 외경은 25cm, 높이는 81.5cm, 수심은 50cm이다. 생성된 파랑충격시험을 위해 적용한 파랑은 파고 0.172m, 주기 1초를 갖는 2차원 조파수조를 통해 생성하였으며, 8번의 반복 재현시험을 수행하였다.

Fig. 3 Main dimension of cylinder model

(a) Wave shapes

(b) Generated wave profile

(c) Type of wave shape

Fig. 4 Comparisons of wave shapes and wave elevations

2.2 수치해석 및 모형시험 비교연구

본 연구에서는 모형시험과 수치계산으로부터의 파도생성 결과를 검토해 보았다. Fig. 4는 모형시험 및 수치계산에서의 파도형상과 파고시계열을 비교한 그림이다. 파도의 형상을 보면, 모형시험에서 관찰된 파도의 Curling 현상이 수치계산에

서도 적절히 구현되는 것을 확인할 수 있으며, 파도의 각도를 보면 매우 근접하게 수치계산에서 묘사된 것을 확인할 수 있다. 또한 파고 시계열을 보면, 정성적으로 시간에 따른 파고높이가 모형시험과 수치계산 결과들이 좋은 일치를 보이며, 최대파고는 3.4%정도의 차이로 매우 유사함을 확인할 수 있다.

Fig. 5 Snapshots of wave flows near the model between the model tests and numerical simulations

모형시험을 통해 생성된 파랑충격 시 파도의 형상이 사람의 혀 모양과 유사하여 혀(tongue)로 명명하고 형상특성을 고려해 3개의 카테고리 분류하였다. 각각의 특성에 따라 공간상에 분포하는 충격압력의 특성과 크기의 차이가 발생하게 되는데, 본 연구에서는 비교연구는 수행하지 않았다. 본 연구에서 적용된 파도형상은 조파수조를 통해 충격파 생성 재현 시 가장 빈도수가 높게 발생하는 rising tongue을 채택하여 수행하였다.

Fig. 5는 모형시험과 수치계산에서의 모형 주위의 유동을 보여준다. Fig. 5(a)를 보면, 모형시험에서는 쇠파가 발생되어 Curling 형상을 가진 파도가 모형으로 진행하고, 모형에는 강한 충격이 발생하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5(b)는 $y=0$ 에서의 평면으로 자른 2차원평면에서의 유동현상을 보여준다. Fig. 5(b)를 보면, 모형시험과 같이 수치계산에서도 마찬가지로 Curling 형상을 가진 파도가 모형으로 진행하고 이후에 강력하게 충격이 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 충격이 발생된 후 Curling 형상의 파도로 인하여 모형과 파도 사이에 공기가 갇히는 현상을 확인할 수 있다. Fig. 5(c)는 3차원 도메인 상에서의 전체적인 유동흐름을 보여준다. 앞서 언급한 것과 마찬가지로 수치계산에서 파도의 Curling 형상이 잘 구현되었으며, 이후에 강력하게 충격이 발생됨을 확인할 수 있다.

본 모형시험에서는 파랑충격압력을 측정한 5개의 위치 중 파정이 위치한 센서위치 즉, 기준이 되는 16cm에 있는 센서에서 가장 큰 파랑충격압력이 발생되었으며, 이는 Ha 등(2018)에서 확인할 수 있다. Fig. 6은 파랑충격압력이 가장 크게 발생하는 위치에서의 파랑충격압력 시계열이다. 모형시험결과는 검정색 실선으로 표현하였으며, 수치계산 결과는 붉은색 실선으로 표현하였다. 모형시험은 20번 반복시험이 수행되었으며, Fig. 6을 보면, 파도의 강한 비선형성으로 인하여 충격압력이 발생하는 시간과 크기가 다를 수 있음을 확인할 수 있다. Fig. 6은 모형시험결과들과 수치계산 결과들을 비교한 그림이다. 반복 모형

Fig. 6 Time history of wave impact pressures between the model tests and numerical simulations

시험결과들을 보면, 비선형성이 강한 파도 유입으로 인하여 예측된 충격압력들의 편차가 존재한다. 반복 모형시험을 통한 예측된 충격압력들의 평균은 7.781kPa이며, 표준편차는 3.423kPa이다. 본 연구에서 수행된 수치계산 결과를 보면, 모형시험결과들의 표준편차 내에 포함되어 있어, 구조응답평가를 위한 유체하중으로 적용하기에 적절성을 확보할 수 있음을 확인하였다. Fig. 6은 파랑충격압력이 발생된 순간에서의 실린더 표면 압력분포를 보여주고 있다. 실제로 바닥면으로부터 16cm 정도 높은 위치근처에서 파랑충격압력이 매우 크게 발생되는 것을 확인할 수 있었다. 반복 모형시험결과를 통한 충격압력들의 평균치를 Fig. 6에 표시하였고 그 평균치는 7.761kPa이며, 수치계산 결과는 이와 근접한 7.61kPa였다. Fig. 7에서 압력분포의 최대 크기와 근접한 충격압력 크기를 갖게 된다. 본 연구에서는 Fig. 7과 같이 CFD 해석 격자점들로부터 시간에 따른 파랑충격압력을 추출하였다. 추출된 압력들을 구조해석용 유한요소모델에 적용하여 구조해석을 수행하였다. 유한요소모델에 파랑충격력 맵핑 시 유체격자의 절점과 구조격자의 절점위치가 가장 가까운 거리에 있는 것이 선택되도록 구성하여 구조하중을 적용하였다.

Fig. 7 Impact pressure contour at the impact moment

Fig. 8 Finite element model of cylinder model

Fig. 8은 실린더 모형에 관한 유한요소모델을 보여주고 있으며, 보라색부분은 알루미늄, 나머지 하늘색부분은 플라스틱 재료로써 이종재료로 구성되어 있다. 예측된 시간에 따른 파랑충격압력을 구조하중으로 변환하여 재하하였다. 하중 맵핑 시 파랑충격력이 재하되는 방향인 x(수평방향)로 산정하고 측정값의 합이 반력과 균형이 되도록 하였다.

Fig. 9는 실린더 모델에 분포하는 최대변형 및 응력분포결과를 보여주고 있다. 변위분포의 경우 이종재료의 경계면을 따라 상대적으로 변위가 커진 것을 관찰할 수 있었다. 또한, 응력분포의 경우 최대파랑충격이 발생하는 부위의 응력집중현상과 이종재료에 따른 상대적인 발생응력의 차이를 경계면을 따라 분포하는 것을 확인할 수 있었다. 2D 조파수조 모형시험은 주로 파랑충격압력 분포특성을 파악하는데 있어 아래의 구조적 파손관점에서가 아닌 동특성 파악에 목적을 두고 수행하였다. 구조해석은 상용유한요소해석 프로그램인 ANSYS v19.1을 사용하여 계산을 수행하였다. Fig. 10과 같이 파랑충격력이 작용하는 + 방향의 변위를 관찰하였으며 실린더형 구조물의 특성인 유사한 대칭모드 및 고유치로 진동하는 맥놀이현상과 같은 주기적인 진동모드 관찰되었다. 실제 파랑충격력과 같이 순간적인 유체속도와 고주파의 진동성분이 큰 경우 유체감쇠의 영향이 매우 적어 저주파수의 진동영역에서는 구조감쇠가 지배적으로 영향을 미치게 된다. 푸리에 주파수 변환(Fast Fourier

(a) Displacement distribution(Isometric view)

(b) Stress distribution(Isometric view)

Fig. 9 Displacement and stress distribution on cylinder model

Fig. 10 Structural response of cylinder model

Transform, FFT)를 통한 주파수특성 분석결과 구조감쇠(베타=0.003 고려)만 적용되어 자연적으로 감쇠되는 현상을 관찰할 수 있는데 본 연구에서 대상으로 한 구조물의 특성을 고려하여 볼 때 고주파수의 영향이 적으므로 유체감쇠는 고려하지 않아도 될 것으로 판단된다. 응답결과는 각각 실린더구조물의 바닥으로부터 각각 0.3m, 0.5m, 0.7m 위치에서의 결과를 보여주고 있다.

2.3 원형부재를 갖는 해양구조물의 파손해석

2.3.1 부재특성 및 최소요구두께

파랑충격압력에 따라 필요한 선수부 외판 두께 국제선급코드를 분석하였다. 서론에서 언급한 바와 같이 현재 선박이 전진 속도를 가질 때의 선수파에 의한 선수파랑충격(flare slamming)에 관한 기준만 제시되어 있고 원형단면에 관한 사항은 정립되어 있지 않다. 일반적으로 수평파와 수직파로 구분할 수 있는데 특히 이러한 수평파랑충격과 같은 경우 관련 규정이나 기준치가 제시되어 있지 않기 때문에 현재 제시되어 있는 각 선급기준을 참고하여 최소두께를 비교하였다. 선수부 충격압력치는 내부실험으로부터 구한 자료를 기반(규칙파 $\lambda/L=0.9$, $H=12\text{m}$, head sea조건)으로 계산을 수행하였다. 선수부 충격압력치는 내부실험으로부터 구한 자료를 기반(규칙파 $\lambda/L=0.9$, $H=12\text{m}$, head sea조건)으로 계산을 수행하였다. 판재의 크기는 $0.6\text{m} \times 4\text{m}$, 보강재의 개수는 4개, 간격은 0.6m 를 기준으로 최소두께를 선급별로 상대비교하였다. 충격력의 크기에 따라 작용하는 판재에 요구되는 최소두께는 선급별로 큰 차이를 보이고 있는데, 제시된 식을 살펴보면 보강재 사이 판의 종횡비와 선수부 압력의 함수로 되어 있다. 이는 각 선급 별로 유사한 계산식을 제시하고 있으나 계수값은 다소 차이가 있었다. 각 선급에서 제시하고 있는 최소두께에 관한 식은 식 (1)~(5)까지이며 각각 영국선급(LR, 2016), 노르웨이독일선급(DNV-GL, 2017), 프랑스선급(BV, 2017), 한국선급(KR, 2018), 미국선급(ABS, 2011)이다.

Fig. 11 Relation between minimum required shell thickness and wave impact pressure by classification

$$t \geq 3.2 S_c \sqrt{k h_s} C_R \times 10^{-2} \quad (1)$$

$$t \geq 0.0158 K_a b \sqrt{\frac{P_{pl}}{C_d R_{eH}}} \quad (2)$$

$$t \geq 0.0158 \alpha_p b \sqrt{\frac{P_{fl}}{C_a R_{eH}}} \quad (3)$$

$$t \geq s \sqrt{\frac{\psi P \cdot 10^3}{\sigma_y}} \quad (4)$$

$$t \geq 0.73 s \sqrt{\frac{k P_s}{f}} \quad (5)$$

여기서, t 는 최소요구두께, 식 (1)의 k 는 선체의 형상계수, h_s 는 등가파랑충격거리, C_R 는 패널비이며, 식 (2)의 $K_a b$ 는 패널의 종횡비, b 는 패널의 단변, P_{pl} 은 설계파랑충격압력, C_d 는 소성계수, R_{eH} 는 최소항복응력이다. 식 (3)의 α_p 는 패널 종횡비의 수정계수, b 는 패널의 단변, P_{fl} 은 설계파랑하중, C_a 는 허용굽힘응력계수, R_{eH} 는 최소항복응력이다. 식 (4)의 s 는 늑골 간격과 거더 또는 종방향 외판 보강재의 간격중 작은 값(=b), ψ 는 늑골 간격과 거더 또는 종방향 외판 보강재의 간격중 큰 값을 S 로 나눈 값, σ_y 는 항복응력이며, 식 (5)의 s 는 보강재사이의 거리, k 는 종횡보강재계수, P_s 는 설계파랑하중, f 는 강성저감계수이다. Fig. 11은 각 선급별로 제시된 식에 따라 파랑충격압력의 크기에 따라 요구되는 최소두께를 비교한 그래프이다. 동일한 하중에서는 LR가 가장 보수적인 설계를 요구하고 있고, DNV는 타 선급에 비해 작은 외판 두께를 요구하고 있음을 알 수 있다. 선급규정에서는 등가정하중으로의 치환, 하중 적용 범위에 관한 명확한 근거가 제시되어 있지 않다. 각 선급에

서 제시하는 파랑하중을 등가의 정하중으로 치환하여 적용할 경우 매우 보수적인 설계가 될 수 있어 파랑충격력이 작용할 경우의 하중형태와 속도, 적용영역 등에 따라 실제의 현상이 모사될 수 있도록 직접계산법을 이용하여 적용하고자 하였다.

2.3.2 원형부재의 비선형 구조해석

일반적으로 해양구조물에 사용되고 있는 원형단면을 갖는 실제 부재에 적용하여 원형부재의 변형형상과 응력분포, 영구 변형량, 반력 등을 비교·분석하였다. CFD해석을 통해 계산된 각 위치별 압력크기 및 시간별 이력에 관한 파랑충격력 데이터를 위치별로 추출하여 실제 부재에 구조하중으로 맵핑하여 비선형 구조해석을 수행하였다. 이 때 부재에 작용되는 압력분포와 구조적 변형 및 손상의 형태를 분석하였다. CFD해석을 통해 구해진 시간에 따라 변동하는 파랑충격력의 프로파일을 그대로 적용한 경우와 원형단면을 갖는 부재의 길이방향(수직)에 분포하는 값의 평균치, 단면방향(수평)에 분포하는 값의 평균치를 취하여 시간에 따라 그 크기가 변동되도록 적용하였다. 즉, 실제와 매우 유사한 시계열을 적용한 것과 파랑충격력이 부재에 상수형태로 분포되도록 하는 두 가지 형태의 하중모양에 관해 응답특성, 응력분포, 변위 등을 고찰하였고, 파랑충격력의 3차원 공간상에 분포하는 경향에 따라서 원형단면을 갖는 부재에 요구되는 최소두께를 추정하였다. 본 연구에서 파랑조건은 2차원 조파수조에서 주파수집중법을 이용하여 생성 가능한 쇄파의 최대파고로 설정하였다. 실린더구조물은 수심 70m의 북해에 설치된 Draupner 구조물에 대한 대표형상이라고 가정하였고 이때 최대파고 높이는 22.4m이다. 1995년 1월 1일 북해의 Draupner 구조물에서 관측된 Freak wave인 New year wave 파고 25.6m와 근접한 파고 높이를 갖는 것으로 가정하여 수행하였다. 원형부재에 적용된 재료물성치는 탄성구간과 소성구간으로 구분하여 입력하였으며, 구간별 2개의 기울기를 갖는 Bilinear material model을 채용하여 구조해석을 수행하였다. 탄성계수는 210[GPa], 탄젠트계수(tangent modulus)는 1.45를 적용하였다. Table 2는 본 연구에서 적용된 원형부재모델의 주요제원과 물성치를 보여주고 있다. 원형부재의 제원은 선박해양플랜트연구소에서 수행 중인 내부프로젝트에서 적용된 API RP2A에 따라 스캔틀링을 통해 설계된 해양자켓의 브레이스 중 일부이다. 파랑의 유속은 2.43m/s로써 일정하게 고려하여 속도의존 물성치를 적용하지 않았다.

Fig. 12는 경계조건을 보여주고 있으며 원형부재의 양끝단을 고정경계조건을 적용하였고 원형부재에 작용하는 파랑충격력은 CFD해석결과를 시간에 따라 적용하였다. 수면 아래에 정수압이 작용하는 부분도 시간에 따라 변동하도록 동하중을 적용하였다.

Table 2 Specification of offshore tubular member

Items	Value
Diameter [m]	1.7
Length [m]	21
Thickness [m]	0.02
Elastic modulus [GPa]	210
Poisson's ratio	0.3
Density [kg/m ³]	7,850
Yield strength [GPa]	315
Tangent modulus [GPa]	1.45

Fig. 12 Boundary condition of offshore tubular member

Fig. 13은 전산유체해석 결과를 통해 얻은 실제에 가까운 시간이력 파랑충격하중을 적용한 경우(Case 1)이며, Fig. 14는 수직 및 수평방향의 평균파랑충격하중을 적용하였을 경우(Case 2)에 관한 원형부재의 변위분포와 등가응력분포를 보여주고 있다. 변형형상과 응력분포를 비교해 보면 Case 1의 경우 최대 변위 596mm, Case 2의 경우 794mm가 발생하였다. 최대값이 발생하는 지점은 유사하나 Case 1의 경우 변위와 응력이 하중 작용점의 중심에 집중하는 것으로 관찰되었고, 이와 비교하여 Case 2의 경우 변위는 전체에 고르게 분포하였다. 응력분포의 경우 구조물의 원형단면이 보다 더 타원형으로 찌그러지는 현상과 그 주위에 응력이 넓은 영역으로 발생하며 응력크기가 Case 1보다 큰 것으로 관찰되었다. 이는 경계조건의 영향에 따라 발생된 최대응력을 제외하고 파랑충격력이 직접 작용하는 영역에서의 국부응력은 Case 1의 경우 최대 280Mpa이었고, Case 2의 경우 328Mpa이었다. 이러한 변형형상은 Case 1의 경우 실린더의 원주방향에서의 중심에 가해지는 파랑충격력이 원주방향의 끝단에 작용하는 하중보다 상대적으로 크기 때문으로 분석되며, Case 2의 경우 전체 구조물에 적용된 하중은 평균값을 적용하였으며, 이는 중심에 가해지는 하중은 동일한 크기로 적용되나 끝단의 원형단면의 기하학적 특성상 찌그러짐 형태의 변형이 커지면서 응력발생 크기가 증가함을 알 수 있었다.

(a) Displacement distribution

(b) Stress distribution

Fig. 13 Displacement and stress distribution of offshore tubular member using a 2D wave tank measured test data(CASE I)

(a) Displacement distribution

(b) Stress distribution

Fig. 14 Displacement and stress distribution of offshore tubular member using a 2D wave tank measured test data(CASE II)

2.3.3 원형부재의 최소요구두께 분석

원형부재의 두께는 선수파랑충격에 관한 최소요구두께 20 mm를 기준으로 저항할 수 있는 파랑충격력을 선급기준에서 산출하여 그 결과를 비교하였다. 비선형 구조해석 결과를 통하여 원형부재의 변형형상과 영구변형이 발생하는 크기를 예측하였다. Fig. 15의 평평한 면의 길이(b)의 평가에 따라 저항력이 달라질 수 있는데 NORSOK standard의 N-004는 강구조물에 선박의 충돌 시 변형률에너지와 관련된 세 개의 설계범주로 구분하여 파손기준을 규정하고 있다. 원형단면을 갖는 구조물의 영구변형 손상깊이를 규정하고 이에 관한 저항력을 산정할 수 있도록 관계식을 제안하고 있다. Fig. 15는 NORSOK에서 제안하고 있는 선박의 충돌로 인해 발생하는 원형부재의 손상과의 관계를 항복선 모델(Yield-line model)로 나타내고 있다.

이는 선박충돌 시 원형부재의 평평한 면(Flattened part)이 발생하고, 변형 시 기울기가 발생하는 부분을 항복선으로 가정하여 원형부재의 외경과 두께에 따른 함수로 표현되며 평평한면의 장변(Longitudinal length)가 길어질수록 큰 저항력을 확보할 수 있다. 저항력은 식 (6)에 따라 계산될 수 있으며, 여기서 선박의 거동은 무시하고 원형부재는 일정한 두께를 가지며 충돌영역 외에 부재가 연결되어 있는 부위의 변형은 고려하지 않는 것으로 가정한다.

$$\frac{R}{R_c} = k c_1 \left(\frac{w_d}{D} \right)^{c_2} \quad (6)$$

$$R_c = f_y \frac{t^2}{4} \sqrt{\frac{D}{t}} \quad (7)$$

$$c_1 = 22 + 1.2 \times \frac{b}{D} \quad (8)$$

$$c_2 = \frac{1.925}{3.5 + b/D} \quad (9)$$

여기서, R 은 저항력이며, D 는 부재의 외경, t 는 부재의 두께, b 는 평평한 영역의 부재축방향의 길이, w_d 는 손상깊이, f_y 는 부재의 항복응력이다. k 값은 설계하중과 설계저항력과의 비를

Fig. 15 Yield-line model of dented tube

나타내는데 개념적으로 안전계수의 형식으로 간주될 수 있다. 안전계수를 포함하는 허용응력이 아닌 항복응력을 직접 사용하고 있으며, 본 연구에서는 값을 1.0을 적용하였다. 이 길이는 영구변형이 발생한 면의 기울기가 발생한 점과 항복선이 모이는 꼭지점과의 경사각 발생하는 지점까지의 거리를 기준으로 산정하였다. 본 연구에서는 1mm 이내의 영구변형이 발생하도록 가정하여 해석을 수행하였다. 이는 최소요구두께 20mm를 기준으로 저항할 수 있는 단위면적당 파랑충격력은 $5,000\text{kN/m}^2$ 으로 추정할 수 있었다. 영구변형이 발생하는 시간대를 기준으로 결과를 비교하였고, 반력을 측정한 결과 주방향인 $+x$ 방향의 합력은 약 $77,000\text{kN}$ 으로 계산되었다. 위에서 제시한 식 (6)에서 (9)까지에 따라 구조해석을 통해 얻은 결과치들을 적용하여 최소요구두께에 따른 파랑충격력을 역으로 도출하였다.

Fig. 16은 Case 1과 Case 2 각각의 영구변형이 발생한 영역을 확대하여 보여주고 있으며 평평한 면의 길이는 각각 3m, 3.23m로 산정하였다. 선급규정에 따르면 단위면적당 60톤에서 100톤을 저항할 수 있어야 하는데, 이는 선수외판의 보강재 적용을 이미 전제하고 있어 이에 관한 차이로 판단된다. 따라서 원형부재의 경우 보강재 적용이 되어 있지 않은 상태에서 동일한 파랑충격력이 적용되었다고 가정할 경우 보강재 적용된 부재의 저항력은 최대 약 100톤이며, 보강재 미적용된 부재의 저항력은 약 2톤으로서 보강재가 적용되지 않은 부재의 저항력은 보강된 외판의 최소 1/20, 최대 1/50 수준으로 평가될 수 있다.

(a) Evaluation result of length for flattened part(Case 1)

(b) Evaluation result of length for flattened part(Case 2)

Fig. 16 Result comparison between CASE I and II

즉, 원형부재의 경우 동일한 두께에서 선수외판의 기준에 따라 부재설계하는 것이 적절하지 못한 것으로 판단된다. Case 1의 경우 발생한 영구변형량은 190mm이며, Case 2의 경우 230mm로 측정되었다. 이는 두께 20mm를 기준으로 각각 $3,610\text{kN/m}^2$, $4,500\text{kN/m}^2$ 의 파랑충격압력에 견딜 수 있는 것으로 분석되었다. 동일한 두께조건에서 선수외판재에 비해 파랑충격력에 저항할 수 있는 능력이 약 1/2에서 1/3정도로 저항력이 약한 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 재료의 항복을 기준으로 단위면적당 저항할 수 있는 충격력을 기준으로 저항력의 범위를 나타낸 결과이며, 해양구조물의 경우 선박과는 달리 최종강도평가가 아닌 항복응력을 기준으로 원형부재의 사용성을 설정하게 된다. 또한, 추후 파랑충격발생 후 영구변형이 발생한 영역(dent)에 관해 잔존피로수명 재평가를 위한 결과로 활용될 수 있도록 영구변형량을 산정하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 2차원 조파수조 모형시험을 수행하였고, 이를 통해 얻어진 파랑충격압력 프로파일을 구조모델에 적용하여 비선형 구조해석을 수행하였고 보강된 선수외판의 최소요구두께를 기준으로 원형부재에서 필요한 파랑충격에 관한 저항력을 평가하였다. 이를 통해 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 2차원 조파수조 모형시험을 통해 얻어진 파랑충격력 데이터와 전산유체해석 결과와 비교하여 잘 일치하는 것을 확인하였으며 이를 통해 직접적으로 파랑충격력을 예측할 수 있다.
- 2) 선급기준을 분석한 결과 파랑충격압력에 따라 요구되는 선수외판의 두께는 선형적으로 간주될 수 있으며 각 선급간 파랑충격력에 관해 약 2배 차이까지 발생하는 것으로 평가될 수 있다.
- 3) 원형부재의 경우 보강된 선수외판의 최소요구두께 20mm를 기준으로 비하여 파랑충격력에 관한 저항력이 훨씬 작았다.
- 4) CFD해석을 통해 적용된 파랑충격력 Case 1보다 평균치를 적용한 Case 2가 보다 영구 변형량, 변위, 응력 등의 해석결과 큰 것으로 관찰되었다. 이는 평균치를 적용한 Case 2가 보다 보수적으로 평가될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 선박해양플랜트연구소에서 주요사업으로 수행 중인 “불확실성을 고려한 유탄성 기반 해양구조물 구조손상도 평가 핵심기술 개발(1/5)[PES3490]”의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- ABS (2011) Slamming Loads and Strength Assessment for Vessels.
- Ahn, K.S., Kwon, S.H. (2017) Experimental Study on Wedge Slamming Considering Water Fluid-Structure Interaction, *J. Ocean Eng. & Technol.*, 31(3), pp.22~27.
- BV (2017) Structural Rules for Container Ship.
- DNV-GL (2014) RP C205, Environmental Conditions and Environmental Loads.
- DNV-GL (2017) DNVGL-RU-SHIP Pt.3 Ch.10 Special Requirements.
- Goda, Y., Haranaka, S., Masahat, M., (1966) Study on Impulsive Breaking Wave Forces on Piles Report, Port and Harbour Technical Research Institute.
- Ha, Y.J., Kim, K.H., Nam, B.W., Lee, K.S. (2018) Experimental Study on Wave Impact Loads on a Vertical Cylinder in Breaking Waves, *8th International Conference on Hydroelasticity in Marine Technology*, pp.1~10.
- Hong, K.Y., Shin, S.H. (2007) Instability of Plunging Breaking Wave Impact on Inclined Cylinder, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Eng.*, 10(4), pp.187~192.
- Hong, S.K., Lew, J.M., Jung, D.W., Kim, H.T., Lee, D.Y., Seo, J.S. (2017) A Study on the Impact Load Acting on an FPSO Bow by Steep Waves, *Int. J. Nav. Archi. & Ocean Eng.*, 9, pp.1~10.
- Health & Safety Executive(HSE) (2000) Review of Greenwater & Wave slam Design & Specification Requirements for FPSO/FSU's.
- Kim, U.N. (2015) Bow Structure Design of the FPSO installed in the North Sea under the Flare Slamming Load, *J. Soc. Nav. Archit. Korea*, 52(5), pp.418~424.
- KR (2018) Rules for the Fixed Offshore Structure.
- Lee, D.H., Jeon, M.J., Nguyen, V.M., Yoon, H.K. (2016) An Experimental Analysis of the Impact of Green Water on Offshore Platforms with Green Water Protectors of Various Shapes, *The 26th International Ocean and Polar Engineering Conference*, International Society of Offshore and Polar Engineers, pp.136~149.
- Lee, K.M. (2000) A Study on the Determination of Wave Load Acting on Offshore Structures, *J. Ocean Eng. & Technol.*, 14(1), pp.6~10.
- Lee, S.S., Lee, H.W., Park, C.H., Park, K.T. (2000) The Study of 3-Dimension Dynamic Characteristic of Gantry Crane, *KSPE Autumnal Conference*, Korean Society for Precision Engineering, pp.708~712.
- Li, L., Hu, Z., Jiang, Z. (2013) Plastic and Elastic Responses of a Jacket Platform Subjected to Ship Impacts, *J. Math. Probl. Eng.*, 2013(790586), pp.1~15.
- LR (2016) Rules and Regulations for the Classification of Ship.
- Nho, I.S., Ki, M.S., Kim, S.C., Lee, J.H., Kim, Y.W. (2017) Sloshing Impact Response Analysis for Insulation System of LNG CCS Considering Elastic Support Effects of Hull Structures, *J. Ocean Eng. & Technol.*, 31(5), pp.357~363.
- Park, T.H., Moon, J.S., Lee, I.H., Sim, W.S., Shin, H.S. (2011) Assessment of the Wave Impact Load on Offshore Structures, *KAOST*, pp.1501~1506.

요 지

본 연구에서는 2D 조파수조를 통해 수행된 모형시험결과를 기반으로 원형실린더에 분포하는 파랑충격압력을 시간에 따라 계측하고 이를 CFD해석 결과와 비교하였다. 전산유체역학 해석을 통해 파랑충격력에 직접평가법에 관한 효율성을 확인할 수 있었고, 실험으로부터 구한 파랑충격 시계열 데이터를 그대로 원형단면을 갖는 실제 해양구조물의 부재에 적용하였다. 실린더에 분포하는 변위 및 응력의 특성과 특이점이 바뀌는 것을 확인하였고 실제 시계열을 적용하는 것이 해양구조물의 강도평가를 보다 정확하게 평가할 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 선수부에 요구되는 외판의 최소선급규정에 따른 두께 경험식들을 분석하여 적용하고자 하였다. 동일한 재료 물성치를 갖는 강재에 관해 선수외판에 요구되는 구조물의 최소두께와 원형단면 부재에 요구되는 최소두께를 비교·분석하였고 이를 통해 NORSOK standard에 제시되어 있는 구조물의 손상기준을 활용하여 허용 두께치를 추정하고자 하였다. 특히 해양구조물의 갑판충격력(wave in deck)의 경우 이와 관련된 경험식이나 최소두께 요구사항들이 정립되어 있지 않기 때문에 본 연구를 통해 파랑충격력에 따라 요구되는 판재의 최소두께를 제안하고자 하였다.

핵심용어 : 파랑충격, 2차원 수조시험, 실린더구조물, 구조응답, 구조손상