Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety
Research Paper
Vol. 26, No. 5, pp. 551-560, August 31, 2020, ISSN 1229-3431(Print) / ISSN 2287-3341(Online) https://doi.org/10.7837/kosomes.2020.26.5.551

대형 해상풍력발전기 설치 선박(WTIV) Leg구조의 충돌 강도평가

박주신* · 마국열** · 서정관***,****†

* 삼성중공업 조선해양연구소 프로, ** 부산대학교 조선해양공학과 박사과정,
*** 부산대학교 조선해양공학과 교수, **** 부산대학교 선박해양플랜트기술연구원 교수

Estimation of Leg Collision Strength for Large Wind Turbine Installation Vessel (WTIV)

Joo-Shin Park* · Kuk-Yeol Ma** · Jung-Kwan Seo***,****†

* Pro, Ship and Offshore Research Institute, Samsung Heavy Industries Co., Ltd, Geoje 53261, Korea
** Ph.D Student, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University Busan, 46241, Korea
*** Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University Busan, 46241, Korea
**** Professor, The Korea Ship and Offshore Research Institute, Pusan National University, Busan 46241, Korea

요 약 : 최근 해상풍력발전기 시장은 에너지 수요 증가, 화석 연료 기반 발전에 대한 의존도 감소와 환경 규제로 인해 향후 5년 내에 빠른 성장이 예상된다. 이러한 상황에 따라서 전 세계적으로 풍력 발전을 가속화하고 있으며, 해상풍력으로 진입하려는 시도가 많아지고 있다. 노르웨이 해상 안전 관리처(PSA: Petroleum Safety Authority)는 운영하는 동안 충돌사고에 대한 충돌에너지가 35 MJ을 견딜 수 있는 안전설계 기준을 요구하고 있다. 따라서 본 연구에서는 북해 해상풍력발전기 설치 단지에 투입되는 해상풍력발전기 설치 선박(WTIV)의 레그 (Leg)와 선박충돌 사고에 대하여 발생 가능한 충돌시나리오에 대해서 비선형 소성붕괴 거동 결과를 바탕으로 레그의 충돌강도평가법을 분석하였다. 분석된 결과로 현재 설계된 기존 선박을 기준으로 요구치인 35 MJ을 만족을 위해서는 200 % 이상의 단면계수 증가가 필요하고, 이는 현실적인 레그 설계에서는 불가능한 조건으로 판단됐다. 또한, 합리적인 충돌시나리오를 기반으로 한 충돌에너지 기준의 제정이 필요하다.

핵심용어 : 해양풍력에너지, 충돌, 해상풍력발전기 설치 선박, 레그, 좌굴, 잔류강도, 충돌에너지

Abstract : *Recently, the offshore wind power generator market is expected to grow significantly because of increased energy demand, reduced dependence on fossil fuel-based power generation, and environmental regulations. Consequently, wind power generation is increasing worldwide, and several attempts have been made to utilize offshore wind power. Norway's Petroleum Safety Authority (PSA) requires a leg-structure design with a collision energy of 35 MJ owing to the event of a collision under operation conditions. In this study, the results of the numerical analysis of a wind turbine installation vessel subjected to ship collision were set such that the maximum collision energy that the leg could sustain was calculated and compared with the PSA requirements. The current leg design plan does not satisfy the required value of 35 MJ, and it is necessary to increase the section modulus by more than 200 % to satisfy the regulations, which is unfeasible in realistic leg design. Therefore, a collision energy standard based on a reasonable collision scenario should be established.*

Key Words : *Offshore wind energy, Collision, Wind turbine installation vessel (WTIV), Leg, Buckling, Residual strength, Collision energy*

1. 서 론

재생에너지는 무한정 공급이 가능하고 대기오염이나 온실효과가 없는 청정에너지 자원으로서, 기후변화에 대응하기 위해 전 세계 국가에서 정책적으로 지원하는 미래에너지이다. 그중에서도 풍력에너지는 발전단가와 효율성 측면에서 가장 경쟁력 있는 에너지원으로 평가받고 있다. 지금까지 풍력 발전 시장은 내륙 지역에 터빈을 설치하는 육상풍력발전 중심으로 성장하였으나, 소음, 효율 저하, 대형화등의 제약으로 인해 해상으로 관심이 집중되고 있는 상황이

* First Author : scv7076@nate.com, 055-630-9613
† Corresponding Author : seojk@pusan.ac.kr, 051-510-2415

다. 최근 해상풍력발전은 터빈과 풍력단지의 대형화, 설치 및 물류 효율성 증가 등에 힘입어 발전단가가 빠르게 내림세에 있어 경제성이 개선되고 있는 추세이다. 유럽에서의 경제성 증명(AMR, 2017)이 이루어졌고 최근 아시아 시장으로 확대되고 있다 .

이러한 장점에도 해양풍력발전은 해상환경에 따른 설치 운영 시 다양한 극한환경, 사고환경, 해상환경을 고려한 설계가 필요하다. 특히 해상풍력발전기는 고정식 구조물로 인근 항행 선박 및 작업 선박과의 충돌사고에 항시 노출되어 있다. Fig. 1은 전 세계의 해양사고 중 충돌사고가 높음을 알 수 있고(DNV-GL, 2018), 따라서 충돌 사고 환경을 반영한 안전 설계가 필요하다.

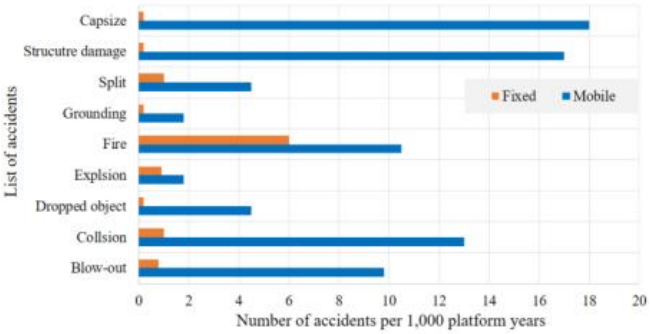


Fig. 1. Accident experiences for offshore platforms.

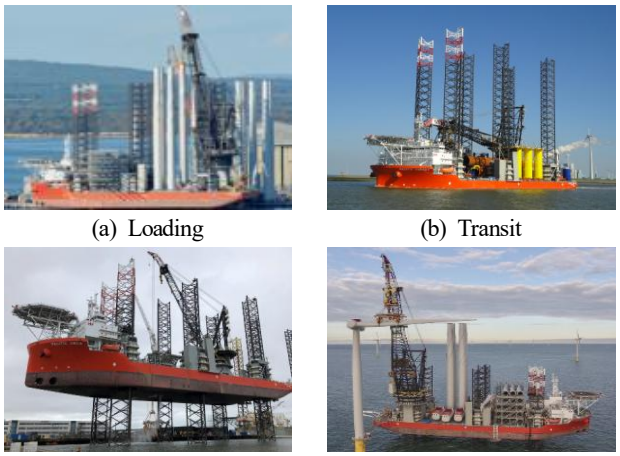
고정식(Fixed) 및 부유식(Mobile) 해양구조물에 대한 북해(North Sea)지역의 경우는 구조물의 저장 용기에 직접적인 충격을 주지 않도록 요구하고 있으며, 손상으로 인하여 구조물이 점진적으로 붕괴하거나 안전한 대피를 방해하지 않는 한, 구조물에 대한 국부적 손상을 허용하는 지침을 적용하고 있다. 구체적으로 구조물과 선박 충돌에 대한 사고 설계하중(DAL: Design Accidental Load)은, 배수량 5,000톤의 선박이 충돌속도 2.0 m/sec 조건에서 구조강도에 문제가 되지 않도록 요구하고 있다(NORSOK, 2004).

그러나 최근 몇 년 동안 북해에서 운항하고 있는 접안 선박의 크기가 증가하고 있으며, 북해지역의 경우 설치된 해양구조물을 취급하는 선박의 배수량은 7,500 ~ 10,000톤으로 증가하고 있다(Storheim and Amdahl, 2014; Kim et al., 2020). 일반적으로 한 개의 해상풍력발전 단지는 발전기 150 ~ 200기를 포함하고 있으며, 설치 해역에는 풍력발전기 전용 설치 선박(WTIV: Wind Turbine Installation Vessel) 및 각종 항행 선박 및 접안 선박과의 충돌에 대한 위험성이 크게 존재한다(Kim et al., 2020). Fig. 1과 같이 고정식 구조물은 설치 시 최소 20년 이상 고정된 위치에서 운영함으로 주변 항행 선박 운항 정보에 반영이 되어 부유식 구조물보다 상대적으로 충돌사고가 현저하게 적은 경향을 보여주고 있다.

현재 해상풍력발전기 설치는 대부분 WTIV를 활용하고 있다. WTIV의 단계별 운용 과정을 Fig. 2에서와 같이 크게 4가지로 구분되어진다.

해상풍력발전기를 항구에서 적재한 후(Fig 2(a)), 설치 해상으로 항해(Fig. 2(b)) 한다. 설치 해역 도착 후, 레그(Leg)와 스퍼드캔(Spudcan)을 해저면으로 하강시키고 고정을 위한 프리로딩(Pre-loading)을 수행한다(Fig. 2(c)). 이 작업이 완료되면, 크레인을 이용하여 해상풍력발전기를 설치(Fig. 2(d)) 단계로 이동한다.

따라서 선박형 부유식과 고정식 구조물 특성을 동시에 가지고 있고, 특히 프리로딩과 설치단계는 고정식 잭업리그 형태로 충돌사고에 취약한 구조물의 형태로 안정성 및 레그의 구조붕괴 특성을 반영한 안전설계가 요구된다.



(a) Loading (b) Transit

(c) Pre-loading (d) Installation

Fig. 2. WTIV operating process (https://www.google.com, key word: SPO WTIV).

해상풍력발전단지가 상용화가 된 북해 해상은 노르웨이 해상 안전 관리처(Petroleum Safety Authority)에서는 충돌사고의 안전설계기준을 마련하기 위하여 고정식 구조물에 대해서 충돌에너지를 35 MJ의 수준을 만족하는 레그 구조설계기준으로 제시하였다. 이러한 설계기준에 대한 신개념선박에 해당에 해당하는 전용설치선인 WTIV의 설치단계(Fig. 2 (c)-(d))에 검토가 필요하다. 따라서 제안된 충돌에너지에 대한 명확한 분석 및 충돌 강도평가에 대한 레그구조 검토가 필요할 것이다.

이에 관련한 기존의 선박 충돌과의 잭업리그 및 WTIV 관련 최근 연구 동향을 분석하였다.

Storheim et al.(2014)는 해양구조물의 손상특성 분석을 위하여 7,500톤의 보급 선박을 대상으로 해양구조물과의 상호 작용

효과를 분석하였다. 선박으로부터의 충돌력은 NORSOK(2004) 코드에서 제안된 힘-변형 곡선과 화물창 탱크 구역의 구조 변형, 레그의 브레이스(Brace)의 소성 및 국부적인 덴트(Dent)에 대하여 면밀한 구조 응답 특성과 충돌 선박의 선수와 선미 모서리의 변형에 대한 압력-면적 관계식을 도출하여 보강판의 설계기준을 제시하였다.

Moulas et al.(2017)는 4,000톤급 항해 선박과 해상풍력발전기 기초 구조물과의 충돌에 대한 구조 손상을 충돌 각도, 충돌 방향, 선박 종류, 충돌속도를 고려한 총 44가지 시나리오를 작성하여 구조부재별 소성 거동 및 파단을 비선형 유한요소해석을 통하여 분석하였다.

Hao and Liu(2017)은 배수량 6,273톤 산적화물선과 해상풍력발전기 하부 구조 3가지(Monopile, Tripod, Jacket)에 대해서 선수충돌 시, 하부구조형상에 따른 충돌 거동특성을 분석하였다. 특히, 하부의 토양 강성조건을 반영의 필요성으로 제안하였다.

Bela et al.(2017)은 근해 풍력발전단지는 상선과 여객선의 왕래가 빈번하여 충돌 가능성을 기반으로 항행 선박과 단일파일(Mono-pile)형 해양 풍력발전기(OWT: Offshore Wind Turbine)의 충돌 구조적 거동특성에 대하여 분석하였다. 선박의 충돌속도와 위치, 풍향, 설치 해역의 토양 성분 및 충돌 선박의 변형 가능성과 같은 다양한 매개 변수의 영향을 조사하였다.

Poonaya et al.(2009)은 충돌 하중에 대한 원형 튜브의 구조붕괴 거동에 대하여 에너지 흡수 기준으로 다양한 지름(D)/두께(t) 비를 갖는 튜브를 가지고 변형에너지에 대한 비교를 통하여 관련 실험값과 이론식을 비교를 통하여 간이 해석모델을 제안하였다.

Yu and Amdahl(2018)은 비선형 유한요소해석을 이용하여 선박의 선수 및 선미 충격에 의한 파이프구조의 구조 응답을 분석하였다. 파이프의 길이, 지름 및 두께를 변수로 기존 연구를 비교 분석하였으며, 파이프 크기가 서로 다른 모양의 변형 패턴에 대해서 전이압괴비율(Transient indentation ratio)법을 이용하여 선급 지침(DNV-GL RP C204, 2013)의 파이프구조의 하중 적용에 대한 이론적 근거를 설명하였다.

관련 유사 연구에서는 충돌 에너지양 기준으로 잭업리그 혹은 원형 파일에 대한 내용으로 WTIV 레그 설계에 대한 충돌구조 거동특성은 매우 부족한 현실이다. 레그와 접근 선박이 충돌할 경우, 좌굴 및 소성 거동을 포함한 구조붕괴에 관한 검토가 필요할 것이다.

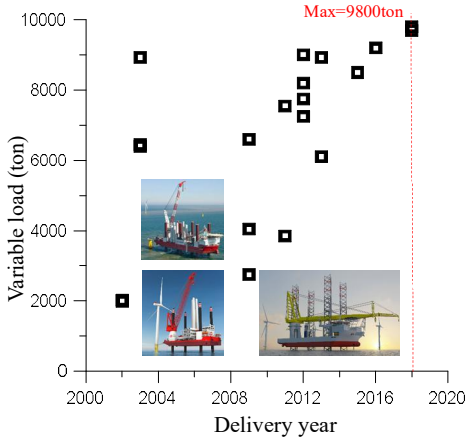
따라서 본 연구에서는 다양한 충돌시나리오 기반으로 구조물의 잔류강도가 최소화되는 조건과 정밀한 비선형해석을 통한 레그 소성붕괴 거동, 흡수에너지를 기반으로 기존 허용기준(DNV-GL, 2013)과 비교 분석하여 충돌 설계하중의 적절성을 분석하고자 한다.

2. WTIV 설계 분석

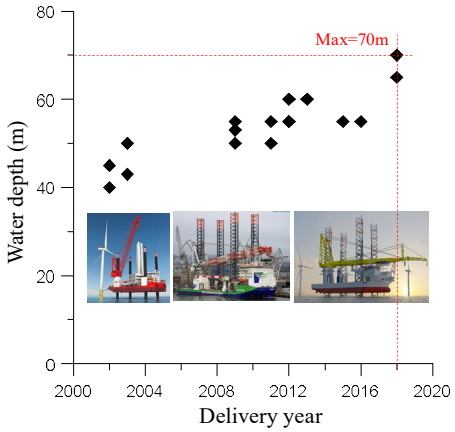
2.1 해상풍력발전기 설치 선박 기술 동향

해상풍력발전기 시장이 급성장하면서, 발전기의 용량과 함께 대형화 추세이고, 전용 설치 선박의 수요도 증가하고 있다.

2000~2020년까지 실적으로 등록된 설치 선박 분석을 수행하여 갑판에 적재할 수 있는 중량(Variable load) 변화와 설치 수심 변화(Koogle, 2015)에 대해서 다양한 문헌조사 및 실적선사 향을 조사 분석하였다. Fig. 3에서와 같이 2010년 전용 설치 선박이 발주가 활발해지면서 7,000톤 이상으로 증가하고 있으며, 최대 9,800톤까지 되었다. 투입 해역의 수심은 40 m에서 60 m까지 점진적인 증가세를 보이다가 최근 북해 수요 증가로 최대 70 m 운용 수심으로 대형화가 이루어짐을 알 수 있다.



(a) Change of variable load



(b) Change of water depth

Fig. 3. Investigation of variable load and water depth varying delivery years (Koogle, 2015 and https://www.google.com, key word: Innovative WTIV design).

2.2 기본 설계 및 특징

대형 WTIV의 충돌 강도평가를 위하여 설계 모델은 최근 실적선을 기반으로 대표적인 WTIV를 결정하였다. 일반배치도(Fig. 4) 및 주요 제원 및 장비의 특징(Table 1)을 나타내고 있다.

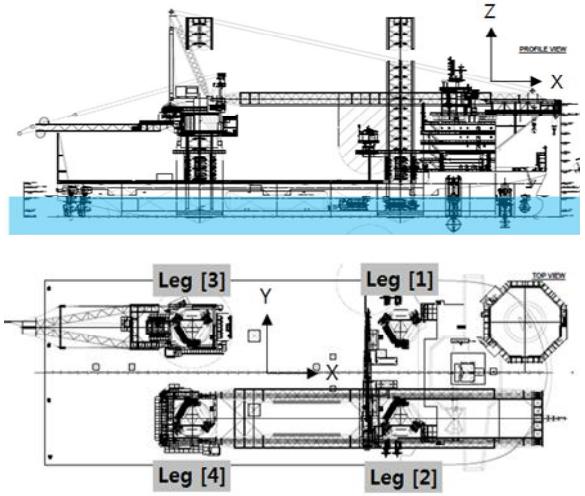


Fig. 4. General arrangement of the WTIV.

대상 모델은 WTIV 중 가장 높은 사양인 대형급에 해당하고 작업 수심은 최대 70 m까지 투입 가능한 수준이다. 기능적인 특징은 발전기 및 하부 고정지지 구조물까지 설치 및 해체를 할 수 있도록, 초대형 20,000톤 용량 크레인을 Fig. 4에서 4번 레그 위치에 설치되고, 추진동력은 아즈머스 쓰러스터(Azimuth thruster) 6기를 사용한다. Fig. 2와 같이 설치 해역에 도착하면, 레그를 해저 면으로 하강시키고, 고정을 위한 프리로딩을 한다. 이 과정에서 한 개의 레그에는 최대 19,000톤을 조정하여 고정하는 작업을 완료한다. 이 작업이 완료되면, 스퍼드캔(Spudcan)은 해저 면에 진흙(Clay)과 모래(Sand)등의 토양에 최대 5 m 침투하여 설치된다.

Table 1. Main dimensions of the analysis model

Parameter	Value
Length over all	158 m
Breadth over all	58 m
Depth moulded	11.5 m
Scantling draught	7.8 m
Leg length	105.0 m
Penetration depth	5 m
Leg footing area	163 m^2
Maximum pre-loading	19,000 ton
Number of legs	4
Maximum main crane capacity	20,000 ton
Elevated weight	38,000 ton
Vessel speed	13 knots

2.3 레그(Leg) 구조

레그 주요물성값(Table 2)와 레그 핵심 구성 부재 형상은 Fig. 5와 같다. 레그는 잭케이스(Jack case)에 위치한 랙-기어(Rack-Gear) 전기구동 시스템에 의하여 승/하강하며, 3각형 트러스 구조형식을 갖고 있다. 코드 간 수평거리는 8 m이고, 브레이스 연결구조는 "X" 형상으로 구성된다. 코드와 랙은 항복강도 690 MPa이며 브레이스와 스팬 브레이커(Span breaker)의 항복강도는 350 MPa이다.

Table 2. Detailed leg data and material properties

Type of leg	3-chorded truss type
Chord distance	Approximately 8.0 m
Type of chords	Split pipe with opposed teeth rack
Thickness of rack in chord	177 mm thick and 995 mm wide
Bracing type	Fully-crossed X-type bracing
Chord, Rack min. yielding stress	690 MPa
Brace, span breaker min. yielding stress	355 MPa
Penetration depth	Min. 3 m / Max. 15 m

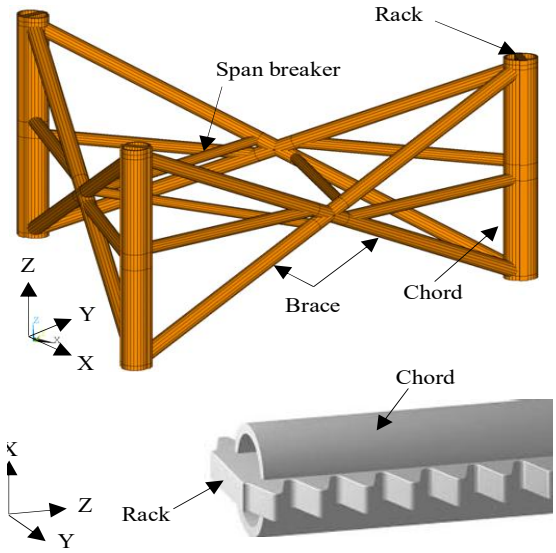


Fig. 5. Member name of the detailed 1-bay leg model.

3. 유한요소해석 및 결과

3.1 평가 절차 및 방법

항해 선박 혹은 접안 선박이 WTIV에 접근하는 도중에, 선박과 레그의 충돌이 발생하는 조건에 대한 구조 안전성 평가하기 위하여, 아래 Fig. 6과 같이 해석 절차 및 방법을 사용하였다.

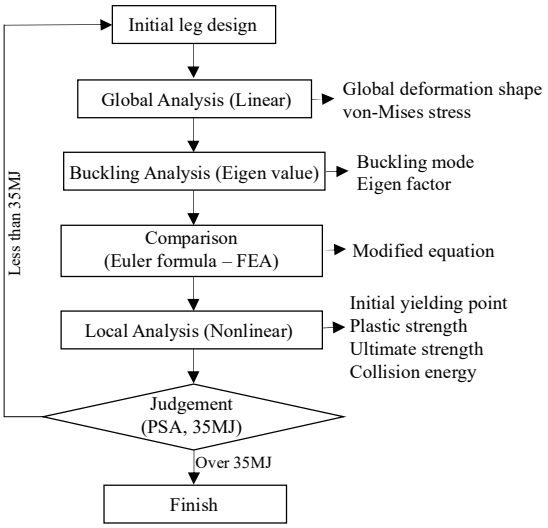


Fig. 6. Analysis procedure and detailed contents.

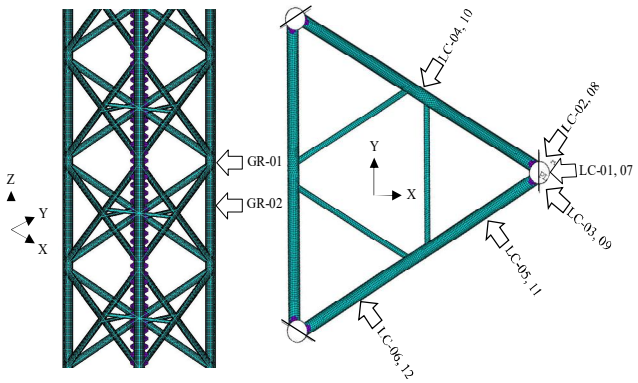


Fig. 7. Collision scenario cases.

첫 번째로, 충돌에 의한 WTIV의 전체거동을 확인하는 과정으로 WTIV 전선 모델을 활용하며, 충돌구조 응답이 발생하는 영역을 정의하고, 정의된 영역을 상세 구조 모델링 한다. 전체 WTIV 구조물 입장에서는 충돌에 의한 구조 거동 영향은 국부적인 문제로 가정하여 비선형해석 시 소요되는 계산시간의 효율과 국부 응답 거동의 정확도를 항상 할 수 있다.

두 번째로 Fig. 7에서 보이는 것과 같이 대표적인 발생 가능한 충돌시나리오를 가정하였다. WTIV에 자주 접안 하는 작업지원선(배수량 5,000톤)의 선수를 고려하였다. 충돌에 의한 압축 좌굴 강도 검토 시에는 압축력이 지배적인 충돌하중(LC: Load case)와 높이방향 충돌위치(GR: Group) 대해서 각각 조합된 LC-01, 02, 03 (GR-01), 07, 08, 09 (GR-02) 조건에 대해서 검토하였다(Fig. 7). 충돌의 높이 방향 위치를 두가지 (GR-01, GR-02)로 구성하고, 각 충돌은 충돌각도 6가지를 구성하여 GR-01은 LC-01부터 LC-06까지 관여되며, GR-02는 LC-07부터 LC-12까지 조합되는 시나리오를 결정하였다.

세 번째로 기하학적, 재료적인 비선형성을 고려한 충돌하중에 의한 레그의 최종강도 해석을 수행한다. 이 단계에서도 사전에 7-bay 유한요소 모델링을 활용하며, 하중증가에 따른 변위 결과를 이용하여 전달된 충돌에너지를 계산한다. 이 값과 선급(DNV-GL, 2013)에서 제시하고 있는 35 MJ과의 상관관계를 비교하는 절차로 수행하였다.

3.2 모델링 및 경계, 하중 조건

도출된 시나리오에 따라 레그 구조 강도를 검증하기 위해 상용 유한요소해석 코드(ANSYS, 2016; MSC Nastran, 2012)를 이용하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 유한요소 개수는 크기에 따른 수렴도 평가를 통하여 약 243,384개로 결정하였다.

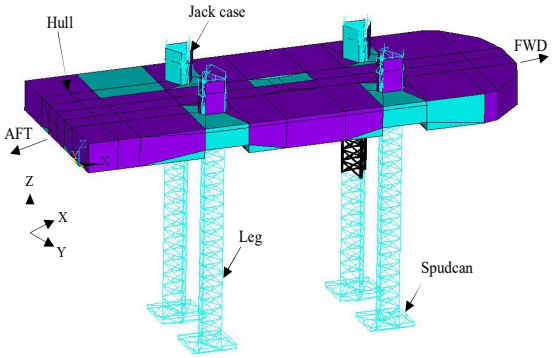


Fig. 8. Whole ship model.

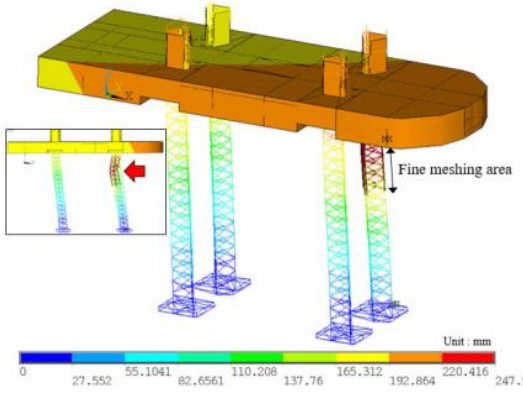


Fig. 9. Results of global deformation under collision load (LC-01).

Fig. 8은 유한요소해석모델로 충돌 영역에 대한 두 가지 종류의 요소로 사용하여 모델링 수행하였다. 선각(Hull) 등의

판형 구조부재 및 세부적인 거동이 필요한 국부 레그 구조는 3차원 쉘(shell) 요소와 1차원 형태 구조부재인 레그 구조는 1차원 보(beam) 요소를 적용하여 효율적인 전선해석 및 국부 상세 해석모델을 구현하였다.

Fig. 9와 같이 전선해석모델에 대하여 선형해석을 통해 충돌 조건(LC-01)에 대하여 해석 결과를 기반으로 충돌에 의한 횡 처짐이 발생하는 구간(7-bay)을 결정하였다. 1-bay는 Fig. 5에서 나타내는 바와 같이 한 개의 레그 마디를 나타낸다.

국부 충돌해석용 상세모델은 최대 수심 조건인 70 m를 산정하였고, 이 부위를 포함한 총 7개의 bay로 구성된 모델을 사용하여 선형 좌굴 해석과 비선형 붕괴 거동 해석을 수행하였다. 이 분석을 통해 충돌 하중과 관련하여 각 부재의 붕괴 모드 및 위치를 파악하였다.

WTIV 레그에 충돌 하중이 작용하는 조건에서의 주요 하중은 최대 승강 하중(헐 자중+화물 하중+잉여하중) 이 압축력으로 작용하는 조건 내에서 구현하였다. 헐 자중은 24,000톤이고, 잉여하중은 각종 의장 장비, 기름, 밸러스트를 포함하여 약 15 %인 3,600톤, 그리고 최대 적재할 수 있는 하중은 6,400톤으로 구성하였다.

3.3 레그 좌굴 강도평가

레그 구조에 충돌에 의한 압축 하중 작용 시, 좌굴에 대한 안전성 검토는 필수적이다. 사용된 레그 모델은 세장비가 100 이상인 파이프 연속구조의 특성이 있다.

본 연구에서는 압축 하중이 지배적인 하중 조건에 대해, 좌굴 해석의 결과와 오일러 좌굴 계산식에 따른 결과를 비교하였다. 일반적으로 좌굴 평가는 이상적인 탄성 구조의 이론식을 이용하여 계산한다. 그러나 용접작업에 의해 필연적으로 발생하게 되는 초기 처짐과 재료적인 비선형성으로 인해 이론적인 접근 방법과 실제 구조 응답과는 다를 수 있으므로 수치해석 결과와 비교가 필수적이다.

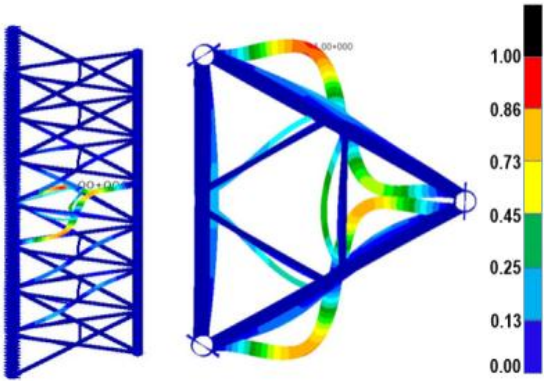


Fig. 10. Deformed buckling shape under collision load-01.

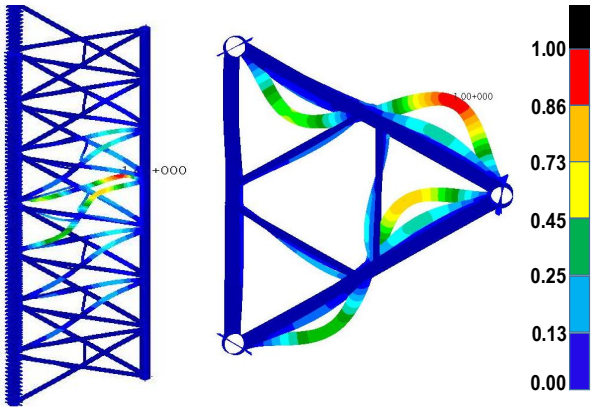


Fig. 11. Deformed buckling shape under collision load-03.

충돌 하중 조건 LC-01과 03의 선형 탄성 해석의 결과는 좌굴모드 차이를 Fig. 10과 11에서 각각 나타내고 있다.

Chord 중심에 충돌에 의한 압축 하중이 작용하는 LC-01조건에서는 수평 Brace가 하중을 대칭적으로 분산해주고 있으며, 측면 30도에서 압축 하중이 전달될 경우 하중 방향과 일치되는 부재에서 대부분의 압축 하중을 받고 있다. 따라서 좌굴 모드만 보더라도 LC-01조건이 보다 큰 좌굴 강도를 나타낼 수 있음을 확인할 수 있다.

먼저 초기설계 시 간이해석 법으로 널리 활용되는 기둥의 좌굴하중(P_{cr}) 계산식은 주요 단면정보(I = 21300 cm^4, L = 4.0 m), 재료 물성값(E = 206.0 GPa), 유효길이 계수(K = Hinged (1.0), Clamped (0.7))를 이용하여 좌굴하중을 추정하였다.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \tag{1}$$

Fig. 12는 충돌시나리오에 따른 모드해석을 통하여 주요 고유치모드 5개를 도출하고, 고유치 좌굴하중과 이론식에 의한 값을 비교하였다. 1 모드는 진동수가 가장 낮은 값이고, 5 모드는 가장 높은 값으로서 고차 모드로 갈수록 모드 형상은 복잡하게 나타난다. 저차 고유치가 해당 구조물의 지배적인 변형 및 붕괴 모드에 해당한다.

좌굴하중의 분포는 좌굴모드가 증가함에 따라 상당히 유사한 패턴을 보여주고 있다. 레그는 단면계수가 다른 부재의 조합으로 구성되어서, 충돌 위치 및 충돌 각도에 따라 좌굴하중은 크게 변화한다. LC-01의 충돌 각도는 코드와 수평방향으로 적용됨에 따라 뒷면 두 개의 브레이스가 지지하면서 하중 분산이 잘 되는 것을 설명할 수 있다. 또한, 충돌 각도 30도 조건인 LC-02, LC-03보다 좌굴하중이 더 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 12는 충돌시나리오(LC-01, 02, 03, 07, 08, 09)에서의 수치해석을 통한 임계 좌굴하중 값과 오일러식에 의한 값을 비교하고 있다. 구조해석에 따른 분석 결과 “K” 유효길이 계수가 0.7인 클램프 조건이 가장 유사한 패턴을 보이며, “K”가 1.0인 힌지 조건일 때는 상당히 낮은 임계 좌굴하중 값을 보인다. 이 계수는 경계조건에 따른 지지조건을 구분하는 값으로 분류된다. 즉, 유한요소해석 결과보다는 약 180 %~210 % 정도의 상당히 보수적인 결과를 보인다. 힌지 조인트의 양단 조건은 실제 해석 결과와 달랐지만, 클램프 조인트는 실제 해석 결과와 약 2 %~8 % 차이가 있다. 이 차이는 코드의 큰 단면계수로 인하여 유효길이를 줄여주는 효과에서 기인하는 것으로 설명할 수 있다.

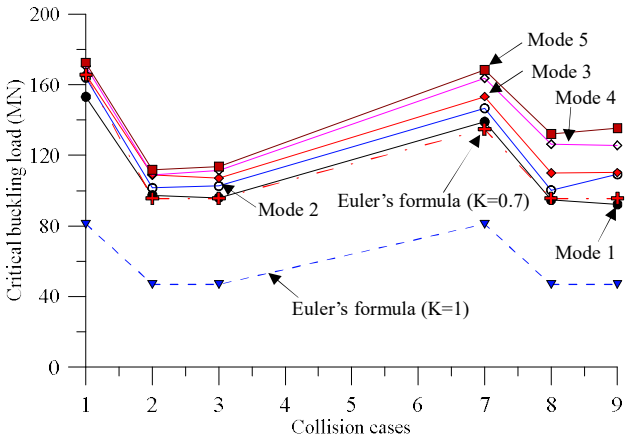


Fig. 12. A relationships of between critical buckling load by FEA and Euler's formula according to collision cases.

앞서 유한요소해석 결과와 식(1) 좌굴식과의 결과를 분석한 결과, 향후 삼각형 형태의 Leg 설계 시에서 Leg의 좌굴하중을 산정할 때는, 보수적인 힌지 조건보다 20 % 정도의 안전도를 포함한 클램프 조건으로 가정하여, 유효길이 계수 값인 “K = 0.7”을 사용하는 것이 유한요소 해석 결과 유사함을 확인할 수 있었다.

따라서 해석 결과와 비교분석을 통하여 적합한 경계조건 계수인 K값을 클램프 조건에 대하여 1.2의 보정 계수를 도출하였다. 따라서 삼각형 형태의 레그에 대한 좌굴하중은 다음과 같은 경험식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$P_{cr,\,Trianlge} = 1.2 \times P_{cr} \tag{2}$$

향후 초기설계 시 삼각형 형태의 Leg의 좌굴 강도($P_{cr,Trianlge}$) 계산에 활용 가능할 것으로 판단된다.

3.4 레그 비선형 붕괴 거동

충돌조건에 따른 Leg 구조 부재의 소성을 동반한 붕괴 거동을 예측하기 위해 전체 조합된 12개의 하중 조건에 대해 비선형 시리즈해석을 수행하였다.

해석에 사용된 비선형 모델은 재료의 비선형은 완전탄소성체 가정하여, 등방성 경화(Bilinear isotropic hardening) 모델을 사용하였다. 해석모델은 탄성 해석 결과를 기반으로 충돌 하중으로 인해 전체거동 영향이 충분히 적었기 때문에 국부적인 7-bay 모델만을 사용하였다.

기하학적 및 재료 비선형성을 고려하고, 해석제어 기법으로는 복잡한 비선형 경로를 정확하게 추적하기 위하여 뉴튼랍슨법(Newton-raphson)을 이용한 근삿값을 구하는 반복해법에 해의 탐색은 호장증분법(Arc-length method)를 적용하였다. 호장증분법은 하중과 변위를 동시에 조절하는 변위법에 기초한 하중증분법으로 최근 비선형해석에서 해의 수렴률이 우수성으로 관련된 수치해석법으로 널리 사용되고 있다.

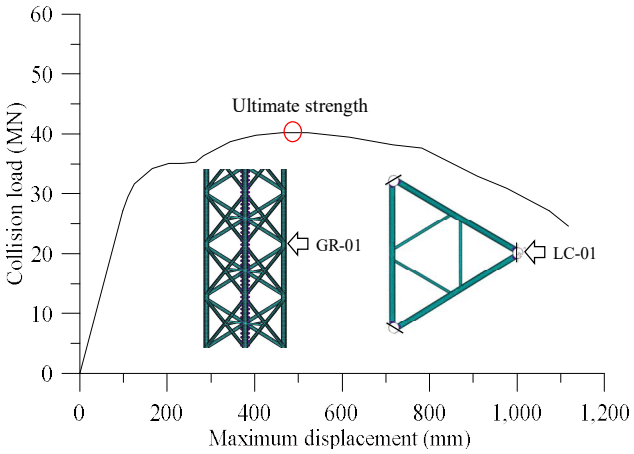
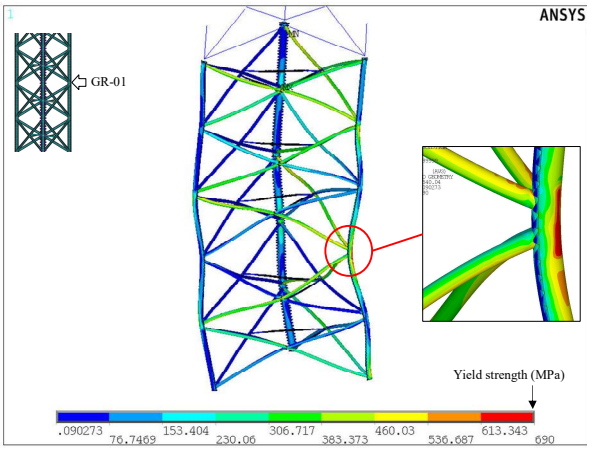


Fig. 13. A relationships of between collision load and displacement under collision case 01.

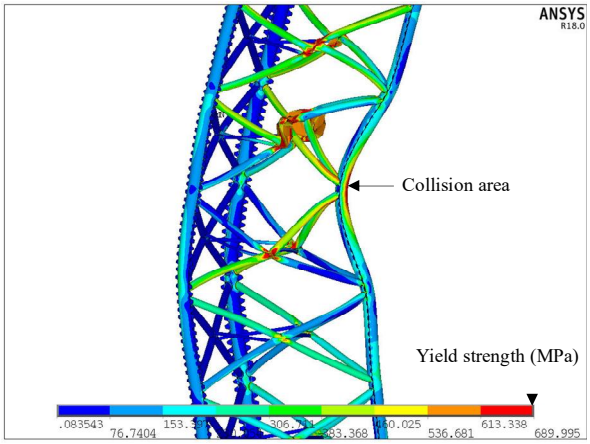
Fig. 13은 LC-01 하중 조건에서 충돌 하중증가에 따른 최대변위 관계를 나타내고 있다. 충돌 하중 30MN이상부터 소성 영역이 발생하며, 최종강도 이후 완만한 기울기를 나타낸다. 이러한 원인은 코드와 랙을 지지하고 있는 브레이스에서 안정적으로 하중 분담을 해주기 때문이다.

Fig. 14는 LC-01 조건에서 Leg 흡수에너지 13.1 MJ과 27.0 MJ에서의 등가 응력과 변형 형상이다. 최종강도까지의 흡수에너지는 13.1 MJ이고, 최대변위(1,100 mm)까지는 흡수에너지는 23.7 MJ로 계산됐다.

초기항복은 충돌 위치에서 발생하고, 코드의 전 범위에서 재료의 항복 응력에 상응하는 응력이 발생하였다. 이후 하중증가에 따라 브레이스의 하중 분담이 커지게 되면서, 항복영역이 전파됨을 확인할 수 있다.



(a) Absorbed energy 13.10 MJ



(b) Absorbed energy 27.30 MJ

Fig. 14. Von-mises stress distribution and deformed shape according to increase of the collision load under collision case 01.

코드와 랙에 충돌하는 조건(LC 01-03)에서의 비선형 구조 거동은 거의 유사하게 발생하고 있으며 LC-04에서 가장 낮은 최종강도 및 흡수에너지를 Fig. 15에 나타내고 있다. 충돌되는 브레이스 이면에는 스팬 브레이커(span breaker)가 지지가 되어 있으며, 이 부재의 단면계수는 브레이스 보다 작아서, 스팬 브레이커에서 가장 먼저 붕괴한다. 이는 향후 구조 설계 시 단면계수 증가가 반영되어야 하는 중요한 사항으로 판단되어야 할 것이다.

Fig. 16에서는 충돌 조건(LC 07-12)에 따른 충돌 하중 및 변위 결과이다. 코드/랙 방향에 충돌한 경우에는 탄성 영역을 지속해서 유지하다가 곧바로 초기항복이 발생하고, 이 시점 이후로 완전 소성 거동을 나타내고 있다. 브레이스 충돌의 경우, 작용 하중 대비 발생 변위가 크게 발생하고 있으며, 이는 구조 부재의 배치 및 거동이 충돌 위치에 따라 다르기 때문이다.

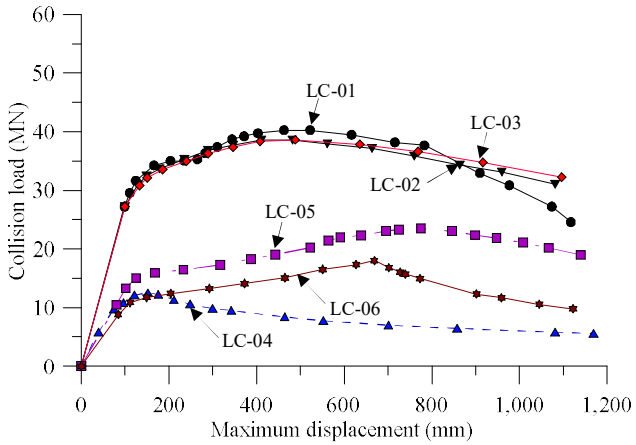


Fig. 15. A relationships of between collision load and displacement under collision LC 01-06.

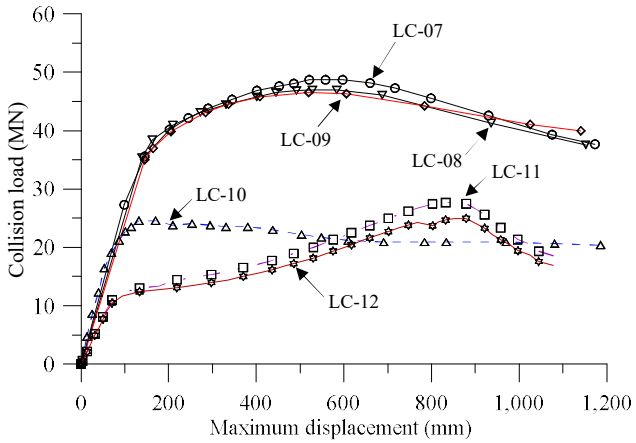


Fig. 16. A relationships of between collision load and displacement under collision LC 07-12.

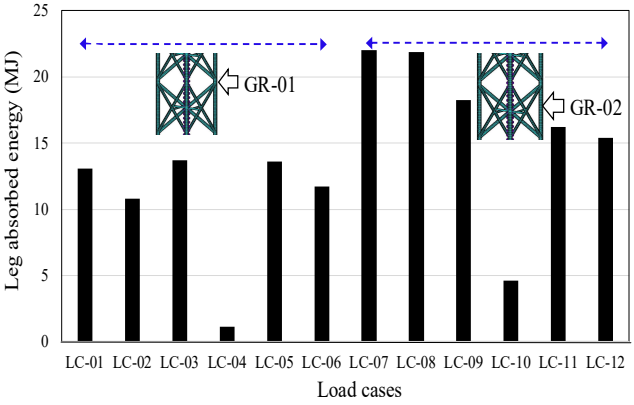


Fig. 17. A relationships of between leg absorbed energy and load cases at the ultimate strength.

각 하중 조건의 최종강도 시점에서의 하중 증가량에 따른 하중 값과 이때 발생한 변위 값이 구성하는 면적을 적분하여, 흡수에너지를 Fig. 17에 나타내고 있다. 코드와 랙 위치에 충돌이 되는 경우는 브레이스 부재에 충돌한 경우에 비해 큰 흡수에너지를 나타내며, 수직 방향 충돌 위치는 지지점의 중앙부에 충돌하는 GR-02 조건에서 더 큰 흡수에너지를 나타낸다. 지지점에 직접 충돌하는 경우, 이면 구조에서 좌굴에 의한 면내 강성 감소가 먼저 발생하기 때문이다. 분석된 해석 결과를 바탕으로 충돌 강도 설계 시 충돌조건의 변화에 따라 흡수에너지는 크게 변화하며, 선급(DNV-GL, 2013)의 요구 기준이 과다한 설계를 요구하고 있는 것을 확인할 수 있다.

브레이스(Brace)의 구조설계 시 충돌조건을 기준으로 내충돌 설계기준인 선급(DNV-GL, 2013)에서 언급하는 35 MJ을 만족할 수 없는 결과가 확인되었다. 따라서 레그 구조 보강을 통한 잔류 충돌에너지 증가 방안에 대해서 설계와 생산단계 대응은 크게 4가지로 분석할 수 있다.

1) 브레이스 단면계수를 증가시키기 위해서는 지름의 크기와 두께를 조정해야 하며, 지름이 변경되면, 코드 지름도 커져야 하는 문제가 발생되어진다.

2) 코드 지름이 변경되면, 랙 크기 및 두께도 변경되어야 한다. 현존하는 기술로는 랙 두께가 210 mm가 최대이지만, 그 이상의 두께를 갖는 강재 개발단계로 적용에 어려움이 있다.

3) 레그 크기가 변경되면, 헐에 위치한 레그 웰(well) 크기도 변경해야 하며, 이는 WTIV 주요 제원(L, B, D)까지 변경해야 한다.

4) 레그 치수변경에 따른 중량증가로 인하여, 기존 설계된 잭킹 시스템(jacking system)의 과부하가 발생하며, 충분한 제원을 갖는 장비로 교체가 필요하다. 이는 선가 상승을 불러일으키는 핵심 인자가 된다.

따라서 현재의 충돌에너지 기준을 만족하기 위해서는 WTIV 전체에 대한 설계 변경, 이로 인한 장비 규격 제한 및 생산적 한계점을 극복해야하는 새로운 문제점이 발생하는 것으로 분석된다.

4. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 최신 사양을 갖춘 WTIV의 레그에 접안 선박이 충돌하는 경우에 대한 좌굴 및 비선형 최종강도 해석을 통한 레그 구조 안전성 검토를 다루고 있다. 레그 브레이스 좌굴 강도를 추정하기 위하여, 고유치 좌굴 해석을 수행하였으며, 기존 오일러 좌굴식에 보정 계수를 도입하여 간략하게 좌굴하중을 예측할 수 있도록 제안하였다.

또한, 충돌조건별로 비선형 최종강도 시리즈해석을 수행하여 PSA의 설계 요구치인 충돌에너지 35 MJ의 구조설계 기준의 타당성을 다음과 같이 분석하였다.

- 코드의 수직 방향 충돌조건(LC-01)에서는 압축 하중 작용시, 두 개의 브레이스가 균일하게 하중 분담이 되기 때문에, 가장 높은 잔류강도가 계산됐다.
- 브레이스 중앙부에 충돌하는 경우, 단면계수가 가장 작은 조건이기 때문에, 잔류 구조 강도가 가장 작게 나타나며, PSA 요구사항을 만족하지 못한다.
- PSA 충돌에너지 기준은 부재의 강성차이가 크게 발생하는 레그 구조에 일괄적 적용이 어렵다. 기존 NORSOK 기준인 15MJ 적용이 합리적이다.
- 레그 트러스 구조는 서로 연속된 구조배치 특성으로 인하여, 브레이스가 하중 분담 역할을 하지 못하는 경우, 시스템 전체의 붕괴로 전개될 가능성이 매우 크다. 따라서, 충돌 위치별 해당 부재의 강성을 고려한 합리적인 충돌에너지 기준이 필요하다.

향후 연구과제로서는 부재별로 소성을 고려한 붕괴 거동 평가식을 정식화하고, 이를 프로그래밍하여, 별도의 전문적인 유한요소해석을 수행하지 않고도 설계안에 대한 구조 강도 검토가 가능한 사용자 편의 프로그램을 개발하는 것이며, 따라서 향후 연구에 본연구의 결과는 기초자료로 활용이 될 것이다.

사 사

이 논문은 2020년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(수소선박 누출 예방 및 피해경감 기준개발).

References

[1] AMR(2017), Allied Market Research, Wind Turbine Market by Type of Wind Farm (onshore and offshore) and Application (industrial, commercial and residential), Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, pp. 15-40.

[2] ANSYS Multiphysics User's manual(2016), Introduction of nonlinear analysis and it's application of plate buckling and ultimate strength, Vol. 3, pp. 85-110.

[3] Bela, A., H. Sourne, L. Buldgen, and P. Rigo(2017), Ship collision analysis on offshore wind turbine monopile foundations, Marine Structures 51, pp. 220-241.

[4] DNV-GL(2018), World Offshore Accident Database (WORD), Offshore accident data for oil and gas facilities, DNV-GL, Oslo.

[5] DNV-GL OSS-201(2013), Offshore Service Specification DNV-GL OSS-201, 2.2 Additional Technical Requirements Stipulated by PSA. Det Norske Veritas, Oslo.

[6] Hao, E. and C. Liu(2017), Evaluation and comparison of anti-impact performance to offshore wind turbine foundations: Monopile, tripod, and jacket, Ocean Engineering, Vol. 130, pp. 218-227.

[7] Kim, S. J., J. K. Seo, K. Y. Ma, and J. S. Park(2020), Methodology for collision-frequency analysis of wind-turbine installation vessels, Ships and Offshore Structures, DOI: 10.1080/17445302.2020.1735835.

[8] Koogle, T.(2015), Modern Jack-ups and their Dynamic Behaviour, Investigating the trends and limits of moving into deeper waters, Master of Science in offshore Engineering at Delft University of Technology, pp. 7-22.

[9] Moulas, D., M. Shafiee, and A. Mehmanparast(2017), Damage analysis of ship collisions with offshore wind turbine foundations, Ocean Engineering, Vol. 143, pp. 149-162.

[10] MSC Nastran User's manual(2012), Introduction of linear and nonlinear analysis and it's application of shell modeling Vol. 2, pp. 50-65.

[11] NORSOK STANDARD(2004), Design of steel structures N-004, Rev. 2, pp. 86-97.

[12] Poonaya, S., Y. Teeboonma, and C. Thinvongpituk(2009), Plastic collapse analysis of thin-walled circular tubes subjected to bending, Journal of Thin-Walled Structure 47, pp. 637-645.

[13] Storheim, M. and J. Amdahl(2014), Design of offshore structures against accidental ship collisions, Marine Structures, Vol. 37, pp. 135-172.

[14] Yu, Z. and J. Amdahl(2018), Analysis and design of offshore tubular members against ship impacts. Marine Structures. 58, pp. 109-135.

Received : 2020. 06. 01.
Revised : 2020. 07. 20. (1st)
: 2020. 07. 28. (2nd)
Accepted : 2020. 08. 28.