

잭업드릴링 리그의 레그와 작업 지원선 충돌에 의한 구조붕괴 거동 평가

박주신* · 서정관***

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

Assessment of the Structural Collapse Behavior of Between Offshore Supply Vessel and Leg in the Jack-up Drilling Rig

Joo-Shin Park* · Jung-Kwan Seo***

* Principal engineer, Ship and Offshore Research Institutes, Samsung heavy industries, Geoje 53261, Korea

** Professor, Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering/The Korea Ship and Offshore Research Institute, Pusan National University, Busan 46241, Korea

요 약 : 잭업드릴링 리그는 해양 석유와 가스 탐사 산업에서 널리 사용되는 모바일 해양 플랫폼이다. 그것은 시추 및 생산을 위한 캔틸레버 시추 장치가 있는 독립적인 3개의 다리가 있는 자체 승강식 장치이다. 전형적인 잭업리그는 삼각형 선체, 타워형 데릭, 캔틸레버, 잭 케이스, 거주구와 다리로 구성되며 여기에는 스파드캔 구조, 개방형 트러스, X-교차 구조로 구성된다. 일반적으로 잭업리그는 수심 130m~170m에서만 운용이 되고 있다. 최근 들어 개발 유정이 심해로 이동하면서, 깊은 수심과 가혹한 환경조건을 만족해야 한다. 리그의 작업 상태에서 모든 정적, 동적 하중은 레그(Leg)를 통해서 지탱되는 특징이 있다. 이러한 리그의 중요한 이슈는 순간적으로 큰 충돌에너지를 발생시키는 충돌에 대한 레그의 안전성이다. 본 연구에서는 LS-Dyna 프로그램을 이용하여 DNV 선급에서 규정하고 있는 충돌에너지 35MJ 요구사항에 대한 수치해석 및 검증을 수행하였다. 충돌 선박은 배수량 7,500톤 작업 지원선을 사용하였고, 5가지 충돌조건을 선정하였다. 해석결과로부터 모든 충돌조건은 선급 기준을 만족하지 못한다. 코드 방향 충돌조건은 충돌에너지 15MJ, 브레이스 충돌조건은 6MJ 이 합리적이다. 따라서 충돌시나리오에 따른 합리적인 충돌에너지 기준의 제정이 필요로 하다.

핵심용어 : 잭업 시추 리그, 레그 구조, 충돌, 작업지원선, 충돌조건

Abstract : Jack-up drilling rigs are mobile offshore platforms widely used in the offshore oil and gas exploration industry. These are independent, three-legged, self-elevating units with a cantilevered drilling facility for drilling and production. A typical jack-up rig includes a triangular hull, a tower derrick, a cantilever, a jackcase, living quarters and legs which comprise three-chord, open-truss, X-braced structure with a spudcan. Generally, jack-up rigs can only operate in water depths ranging from 130m to 170m. Recently, there has been an increasing demand for jack-up rigs for operating at deeper water levels and harsher environmental conditions such as waves, currents and wind loads. All static and dynamic loads are supported through legs in the jack-up mode. The most important issue by society is to secure the safety of the leg structure against collision that causes large instantaneous impact energy. In this study, nonlinear FE -analysis and verification of the requirement against collision for 35MJ recommended by DNV was performed using LS-Dyna software. The colliding ship used a 7,500ton offshore supply vessel, and five scenarios of collisions were selected. From the results, all conditions do not satisfy the class requirement of 35MJ. The loading conditions associated with chord collision are reasonable collision energy of 15M and brace collisions are 6MJ. Therefore, it can be confirmed that the identical collision criteria by DNV need to be modified based on collision scenarios and colliding members.

Key Words : Jack-up drilling rig, Leg structure, Collision, Offshore supply Vessel, Collision condition

* First Author : scv7076@nate.com, 055-630-9613

† Corresponding Author : seojk@pusan.ac.kr, 051-510-2415

1. 서론

최근 북해 지역의 연근해 시추 작업과 노후 설비 교체 수요 증가로 잭업리그 시장이 다시 주목받고 있다. 잭업리그는 다리를 해저 면에 고정하고 기름과 가스의 시추공사 및 생산을 하는 해양 설비이다. 극심해에서 운용하는 시추선(drill ship)이나 반잠수식 시추선(semi-rig)과 달리 비교적 낮은 수심의 연근해 지역에 사용되고 있는 특징이 있다. 지금까지는 중소형 크기의 발주가 대부분이었으며, 유전 및 가스전의 개발이 심해로 옮겨가면서 고난도 기술력을 요구하는 심해용 잭업리그 시장이 필요로 하고 있다. 특히, 북해 지역의 연근해 유전개발이 활기를 나타내면서 20~30년 전 설치하였던 노후화 설비들의 교체 수요가 늘어나고 있는 점도 주목할 만하다. 이 지역은 수심이 깊고 환경조건이 가혹하여 주요 하중을 지탱하는 레그 구조설계 시 극복해야 하는 애로사항이 많다.

최근 10년 동안 전 세계적으로 에너지 수요가 크게 증가함에 따라 현재의 에너지자원은 시장 수요에 미치지 못하고 있으며, 최고의 에너지 효율을 지닌 신재생 에너지로 전환을 준비하고 있다. 주요 에너지원은 태양에너지, 풍력에너지, 수소와 연료전지 등이며 친환경적 설계와 환경 보호에 관한 국제기준들의 제정이 진행되고 있다. 이러한 국제적인 에너지 정책변화들은 중/장기적인 계획을 수립하고, 실행에서는 막대한 예산마련과 관련 규정 제정 과정을 거치기 때문에, 당장 에너지 지원 부족에 대한 대안은 명확하지 않다. 따라서 연안 해안에 개발이 확정된 유전 및 가스전의 생산은 진행하면서, 신규 투자를 줄여나가고 다가오는 친환경 신재생 에너지로 변환이 가장 현실적인 정책으로 진행될 것으로 예상된다. 이러한 에너지 정책 상황에서 보면, 비교적 수심이 얇은 해역에 잭업리그를 투입하는 것이 투자 금액 대비 성공할 수 있는 확률이 높은 강점이 있다. 본 연구에서는 잭업리그의 잭업 시, 정적 및 동적 하중에 대해서 가장 중요한 구조물인 레그의 사고한계상태 중 작업 지원선과의 충돌조건에 대한 구조 안전성 평가를 수행하였다. 노르웨이 표준해양규격(NORSOK, 2007)에서는 작업 지원선의 배수량은 5,000톤이고, 충돌속도는 0.5 m/sec와 2.0 m/sec으로 규정하여 선수충돌 11 MJ, 선측충돌 14 MJ을 만족할 것을 규정하고 있다. 노르웨이선급(DNV)은 충돌에너지를 최소 35 MJ(DNV, 2013)을 만족하도록 제시하고 있으며, 충돌선의 배수량과 속도에 대해서는 언급이 없다. 본 연구와 관련된 기존의 선행연구를 아래와 같이 요약하였다.

Storheim and Amdahl(2014)는 해양구조물의 구조 손상 특성을 연구하기 위하여, 배수량 7,500톤 작업 지원선과 자켓구조에서 주로 사용하는 브레이스의 충돌 거동을 평가하였다. 작업 지원선으로부터 전달되는 충돌력은 NORSOK(2004)에서

제안된 하중-변위 곡선 형식과 비교하였다. 브레이스 충돌 위치에서의 국부적인 소성 현상을 수치 해석적 방법을 통하여 경험식을 도출하여 보강판의 설계기준을 제시하였다.

Bela et al.(2017)은 해상풍력발전기 단지에 설치된 mono-pile과 항해 선박과의 충돌에 대한 구조 응답을 수치해석 방법을 통하여 검토하였다. 다양한 설계 변수(충돌속도, 위치, 풍향, mono-pile 토양지지 강성)에 대한 연구를 통하여 충돌에너지 변화에 대해서 분석하였다.

Lee et al.(2017)은 해양사고에 대한 분쟁과 심판 과정 중에 발생하는 부정확성을 보완하기 위하여 MAIAS(Marine Accident Integrate Analysis System)을 이용하여 충돌 모델링 정보를 바탕으로 하는 시뮬레이션의 필요성을 강조하였다. 수치해석 기법은 유체-구조 연성법(FSI)을 적용한 사례(선박 충돌, 접촉, 좌초, 침수, 전복, 선회성능)를 소개하였다. 제안한 평가 시스템을 이용하여 사고의 원인과 과정, 결과에 대한 종합적이고 논리적인 판단 근거를 제시하였음을 입증하였다.

Ma et al.(2020)은 DNV-GL 선급에서 제시하고 있는 충돌에너지 허용 기준 35 MJ에 대한 타당성을 확인하기 위하여, 잭업리그의 레그와 2만 톤 배수량을 갖는 작업선의 충돌을 유한요소해석으로 평가하였다. 선형해석을 통하여 충돌 시 영향을 받는 구역을 선정하고, 좌굴해석을 통하여 압축력에 대한 좌굴응력과 형상을 분석하였다. 충돌이 발생할 수 있는 시나리오를 확정론적인 방법에 따라서 결정하였으며, 비선형해석을 통하여 충돌에너지를 산출하였다. 레그의 브레이스에 충돌이 발생할 경우, 충돌에너지는 9 MJ로서, 선급에서 제안하고 있는 기준에 만족하지 못하며, 충돌 위치에 따라서 차별화된 충돌에너지 허용 기준이 필요함을 주장하였다.

Park et al.(2020)은 북해 해상풍력발전기 설치 단지에 투입되는 설치 선박(WTIV)의 레그와 선박 충돌에 대하여 비선형 소성 붕괴 거동을 수치해석을 통하여 분석하였다. 압축 하중에 대한 브레이스 좌굴하중을 계산하기 위한 경험식을 제안하였고, 기존 오일러(Euler)식에 보정 계수를 도입하였다. 총 12가지의 충돌시나리오를 산정한 후, 비선형 충돌 해석을 수행하였고, DNV-GL 선급에서 요구하는 35 MJ을 만족하기 위해서는 고려한 레그의 강성을 200% 이상 증가시켜야 하는 문제점을 언급하였다. 연구에서 고려한 모델은 대형급 WTIV 레그 모델이고, 레그 치수 변경에 따른 중량증가는 잭킹시스템의 과부하가 연쇄적으로 발생이 예상되어 설계변경에 한계가 있음을 주장하였다. 논문에서는 충돌허용기준으로 NORSOK에서 제시하고 있는 11 MJ이 합리적임을 권고하였다.

최신의 일부 선행연구를 제외하고는 잭업리그나 해상풍력발전기 설치 선에서 사용하는 레그 구조에 충돌 허용 기준과 관련된 직접적인 연구는 제한적이었으며, 국제기준 및 선급의 허용 기준값도 다른 상황이다. 본 연구에서는 실제적인 충돌 붕괴 거동을 예측하기 위하여, 작업지원선 모델

잭업드릴링 리그의 레그와 작업 지원선 충돌에 의한 구조붕괴 거동 평가

을 이용한 동적해석을 수행하였으며, 짧은 시간에 구조 부재의 소성 및 파단이 발생하는 현상을 더 정밀하게 분석할 수 있었다. 주요 결과로 도출된 내용은 해양 레그 구조물을 갖는 충돌 구조 안전성 평가 분야에 관련한 기초적인 자료로 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

2. 잭업리그 엔지니어링

2.1 잭업리그와 작업지원선

해양 원유 및 가스전 개발 분야에 폭넓게 사용되고 있는 잭업리그는 3개의 레그와 삼각형 선체 그리고 시추 및 생산을 위한 캔틸레버 구조로 구성되며, Fig. 1의 형상이며 주요 제원은 Table 1과 같다. 최대 승강 중량은 34,900톤이고, 해저면 고정을 위해서 사용되는 예비하중(Pre-load)은 21,000톤이다. 설비의 특성상 한 개의 유정 혹은 가스전에 투입되면 20년 이상 잭업된 상태로 이동을 하지 않기 때문에 기관 고장에 의한 해상 표류 선박 및 작업지원선 운전 미숙에 의한 레그 충돌에 대한 구조 안전성 검토는 필수사항이다. 잭업리그는 수만 톤(선각 중량+갑판 하중)을 수면 상부로 작업시킨 상태로 환경 하중(파도, 조류, 바람)이 반복적으로 작용하며, 레그를 통해서 상부 선체(hull)에 전달되며, 레그의 구조 안전성 확보가 무엇보다도 중요하다. 일례로 3개의 레그에서 1개의 레그에 충돌에 의한 구조 손상이 발생하여 부재의 유실이 발생하게 될 경우, 잭업리그는 전복될 가능성이 아주 크다.



Fig. 1. A typical jack-up rig (<https://www.drillingformulas.com>).



Fig. 2. A typical supply vessel to carry the drilling pipes (<https://www.shutterstock.com>).

연구에서는 대형 잭업리그의 작업지원선 사양인 배수량 7,500톤을 선정하였으며, Fig. 2와 유사하며, 상세 제원은 Table 2와 같다.

Table 1. Main dimensions of jack-up rig

Item	Value
Length overall (m)	88.8
Breadth overall (m)	105.1
Depth of hull (m)	12.0
Design draft (m)	8.0
Length of leg including spudcan (m)	206.7
Maximum pre-loading (ton)	21,000
Maximum elevated weight (ton)	34,900
Chord to chord center (m)	18
Spudcan area (m ²)	380
Number of legs (EA)	3

Table 2. Main dimension of supply vessel with 7,500ton

Item	Value
Length overall (m)	90.0
Length (water line, m)	78.0
Breadth overall (m)	19.0
Depth of hull (m)	8.0
Max. dead weight (ton)	3,800
Displacement (ton)	7,500
Max. speed (knots)	16

2.2 충돌 메커니즘

잭업리그에 접안하는 선박은 선수 접안이 원칙이며, 안정적인 계류를 위해서 레그에 계류라인을 연결하고, 일정 거리를 유지한 상태로 정박하는 게 일반적이다. 그러나 충돌이 발생하는 경우는 이러한 상황이 아니므로, 선박의 선수가 레그에 충돌한다고 가정하였다. 작업 지원선의 배수량에 따라서 선수 형상이 변경될 가능성이 있지만, 형상의 차이에 대한 충돌 구조 강도 영향은 검토에서 제외하였다. 일반적인 선박의 충돌에너지를 계산할 경우, 식 2.1을 사용하며, 충돌 위치에 따라서 선수는 1.1, 선측은 1.4를 적용하여 추가적인 부가질량 증가 효과를 고려해주고 있다.

$$E = \frac{1}{2} m k v^2 \quad (2.1)$$

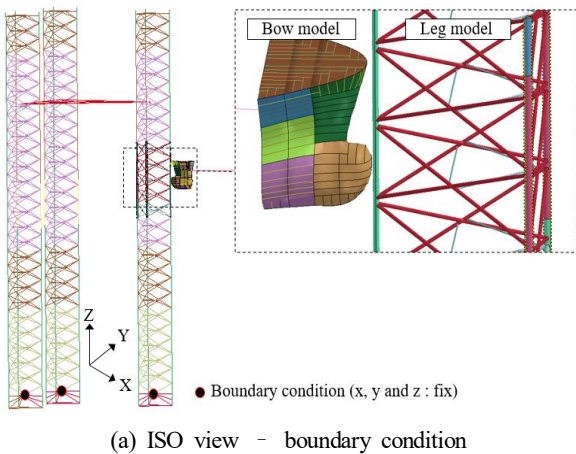
where,

E =total kinetic energy(kJ), m =physical mass of the vessel (tonnes), k =hydro dynamic added mass coefficient (1.1 for head on impact, 1.4 for broadside impact), v =speed of the vessel(m/s)

3. 유한요소해석 및 고찰

3.1 해석 모델링 및 경계조건

본 연구에서는 유한요소법(Finite Element Method)을 근간으로 하여 공학용 해석이 가능한 상용프로그램인 LS-DYNA를 이용하였다. 외연적 시간 적분법(Explicit time integration)을 사용하여 동적 충돌 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 모델링은 4 절점을 갖는 Belytschko-Lin-Tsay 쉘 요소(LSTC, 2009)이다. 충돌 하중에 대한 압축 좌굴 거동 및 국부 파단을 정확하게 묘사하기 위하여, 요소의 분할 크기는 40 mm로 설정하였다. 해석에 사용된 유한요소의 절점 수는 269,059개이고, 요소는 202,568개이다. 해석의 경계조건은 잭업 시 스퍼드캔(spudcan)이 해저면에 관입되어 있는 조건을 고려하여, 해저면과 접촉하는 레그 끝단에 핀 조건(x, y and z : fix)을 적용하였다. 잭업 시 중량 하중(선각+갑판 하중) 효과를 구현하기 위해서 선체는 1차원 빔 요소를 사용하여 모델링 후, 등가 관성모멘트를 적용하였으며, Fig. 3-(b)와 Table 3과 같다.



(a) ISO view - boundary condition
(b) plan view - hull and leg connection
Fig. 3. FE-modeling and boundary condition.

Table 3. Hull stiffness information

Component	Value
Axial area (cm ²)	1.38 × 10 ⁴
Effective torsion moment of inertia (cm ⁴)	1.75 × 10 ¹⁰
Moment of inertia about Y-axis (cm ⁴)	3.51 × 10 ⁹
Moment of inertia about Z-axis (cm ⁴)	9.15 × 10 ¹⁰

충돌 해석에서의 작업 지원선의 재질 모델은 LS-DYNA에서 제공하고 있는 본 미세스 항복기준(von-Mises isotropic yield criterion)에 기반을 둔 MAT24(PIECEWISE Linear Plasticity)를 사용하였다(LSTC, 2009). 충돌이 발생하는 선수부는 상세 모델링하고, 나머지 선체 모델은 배수량을 표현할 수 있도록, 판 두께 14 mm의 강체로 Fig. 4와 같이 표현하였다. 선수 쉘 요소와 강체(rigid body) 요소의 경계면은 절점을 공유하여 선박의 일체화 거동이 구현되도록 하였다. 선박의 강판의 물성값은 SS400(mild steel)이며, 재료의 인장강도는 선급(DNV, 2012)에서 규정하고 있는 400 MPa에 파단변형률을 25 %를 사용하였으며, 레그는 인장강도 840 MPa과 파단변형률 22 %를 고려하였다.

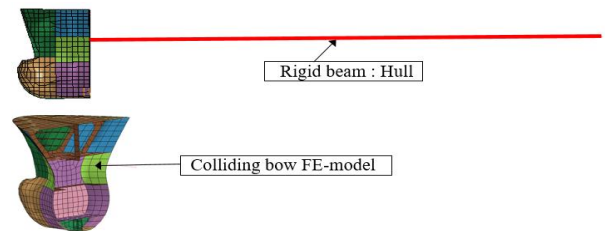


Fig. 4. FE-modeling of the attendant vessel.

3.2 수치해석 검증

본 연구와 가장 유사한 잭업리그 레그의 충돌에 관한 선행연구(Ma et al., 2020)와 비교 결과를 Table 4에 나타내고 있다. 선행연구에서 사용한 동일 요소와 모델링 조건을 사용하였으며, 충돌 시 최종강도에서의 변위와 에너지를 비교 기준으로 선정하였다. 동일 충돌에너지 15 MJ에서 레그의 최대 변위는 선행연구에서 21 % 크게 발생하였으며, 충돌체가 흡수하는 에너지를 고려하지 않기 때문이다.

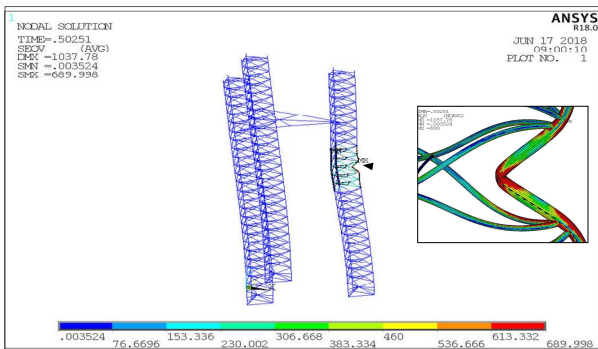
충돌형상과 변위 분포 결과는 Fig. 5에 비교하고 있으며, explicit 평가법에서는 충돌 시 선수부에도 큰 변형이 발생하였으나, 내연적(implicit) 방법은 레그 구조물에만 변위가 성장하는 거동을 나타낸다. 전체 구조물의 충돌 에너지 관점에서는 두가지 방법 모두 유사한 수준의 내충돌 에너지 예

잭업드릴링 리그의 레그와 작업 지원선 충돌에 의한 구조붕괴 거동 평가

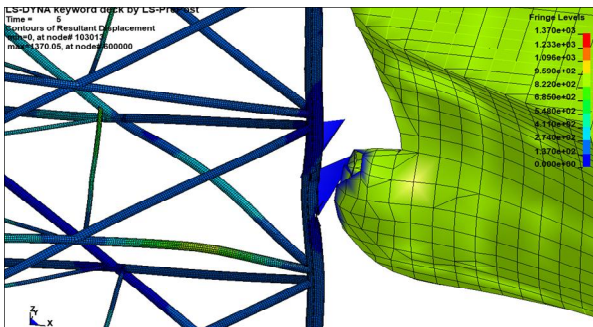
측이 가능하다. 충돌 구조 거동은 연구에서 제안하고 있는 비선형 충돌체를 사용하여 상호 간 에너지 소산까지를 고려하는 방법이 좀 더 실제의 거동에 가깝다고 할 수 있다.

Table 4. Verification of numerical calculation

Item	Comparative results	
	Implicit nonlinear (Ma, 2020)	Explicit nonlinear
Analysis type	Implicit nonlinear (Ma, 2020)	Explicit nonlinear
Collision condition	Chord center-bow center	Chord center-bow center
Modeling condition	4-node shell fine-meshing	4-node shell fine-meshing
Collision energy (MJ)	15	15
Max. displacement (mm)	1,037	822



(a) implicit nonlinear collision (Ma, 2020)



(b) explicit nonlinear collision

Fig. 5. A comparison of the displacement as well as damage area according to analysis types under LC-01.

3.3 충돌시나리오 및 하중 조건

작업 지원선이 선수 방향으로 이동하면서 레그와 충돌하는 조건에서, 충돌이 발생할 수 있는 5가지 조건을 Table 5와 같이 구성하였다. 레그 구조에서 구조 강성이 가장 큰 랙

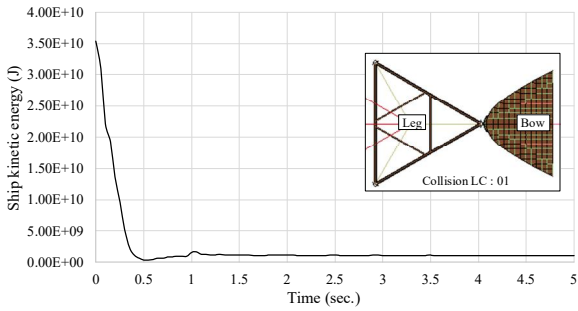
(rack), 코드(chord)와 선수가 정면충돌하는 조건(LC-01), 선수가 30도 떨어지어 코드와 충돌 조건(LC-02), 코드와 코드 사이 브레이스 중앙에 충돌 조건(LC-03), 선수가 레그의 최외곽 브레이스에 충돌하는 조건(LC-04), 마지막으로 레그의 선체 방향 브레이스에 충돌하는 조건(LC-05)으로 분류하였다. 충돌하는 부재별로 구분하면, 코드에 충돌하는 LC-01, 02와 브레이스에 충돌하는 LC-03, 04, 05이다. 충돌 시 선박과 레그의 충돌에너지의 소산 및 흡수에 대한 실제적인 거동을 확인하기 위하여, 충돌 선박은 강체가 아닌 비선형 변형체를 사용하였다. 충돌에너지는 선박의 요구사항인 35 MJ로 설정하고, 선박은 정면 충돌속도(2.9 m/sec)를 유지한다.

Table 5. Collision scenario of between jack-up rig leg and attendant vessel (displacement : 7,500ton)

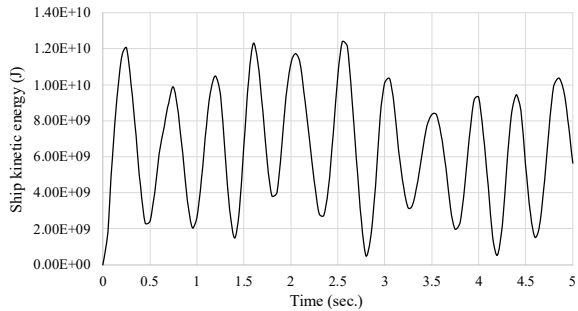
Load condition number	Collision view
LC-01 (Chord center-bow center)	
LC-02 (Chord 30deg.-bow center)	
LC-03 (Brace center.-bow center)	
LC-04 (Outside brace-bow center)	
LC-05 (Inside brace-bow center)	

3.4 유한요소해석 결과 고찰

LC-01 충돌조건에서 선박과 잭업리그의 시간 변화에 따른 흡수에너지 변화를 Fig. 6에 비교하고 있다. 충돌 시작 후 0.5 초 근방에서 선수에서 충돌에너지를 대부분 흡수하고 있으며, 랙-코드의 강성효과로 인하여 선수가 다시 튀어나오는 현상이 발생한다. 잭업리그 관점에서는 0.5초에서는 흡수에너지가 작아졌다가 시간이 지나면서 증가, 다시 감소하는 패턴을 나타내고 있다.



(a) ship kinetic energy



(b) jack-up rig internal energy

Fig. 6. A comparison of the internal energy between ship and jack-up rig according to collision time (LC-01).

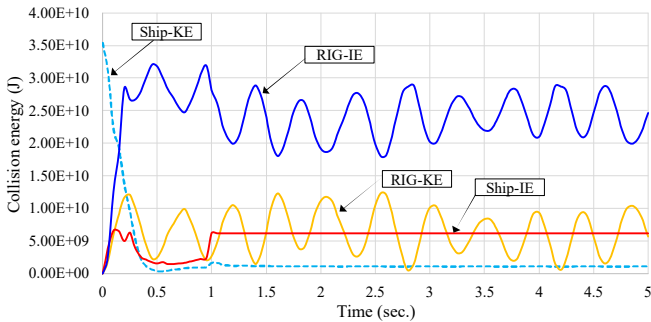


Fig. 7. A comparison of the collision energies between ship and jack-up rig according to collision time (LC-01).

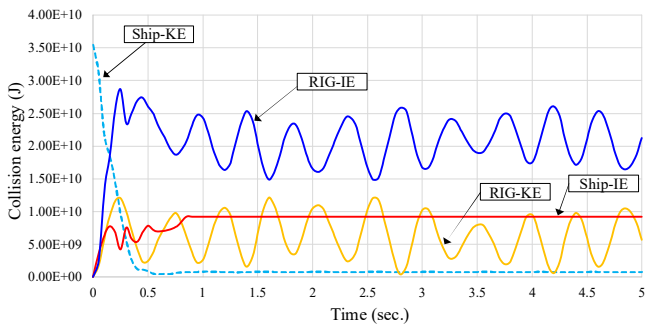
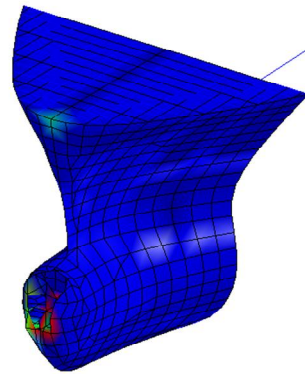


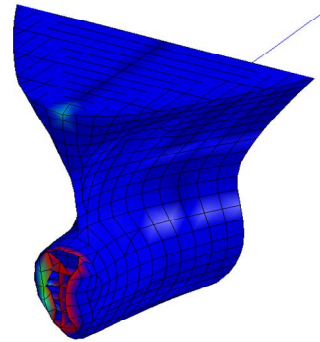
Fig. 8. A comparison of the collision energies between ship and jack-up rig according to collision time (LC-02).

충돌조건 LC-01에서 시간 변화에 따른 충돌 선박과 잭업 리그의 운동에너지와 흡수에너지 변화 패턴을 Fig. 7에 비교하고 있다. 최초 충돌 후, 1초가 지나면서 선박은 레그로부터 떨어지기 때문에, 흡수에너지는 일정하게 수렴하는 경향을 나타낸다. 잭업리그의 운동에너지와 흡수에너지 변화 패턴은 증가와 감소 변화에 따라 잘 표현되고 있다.

30도 충돌 각을 갖는 LC-02에서 선박과 잭업리그의 운동, 흡수에너지 변화를 Fig. 8에서 비교하고 있다. 선수의 흡수에너지는 충돌이 시작된 후, 0.25초 이후부터 차이가 발생하는 경향이 나타나며, 잭업리그의 흡수에너지 변화는 0.2초부터 약 3배가 차이가 나는 경우도 발생하였다.



(a) equivalent plastic strain for collision angle of 0 degree



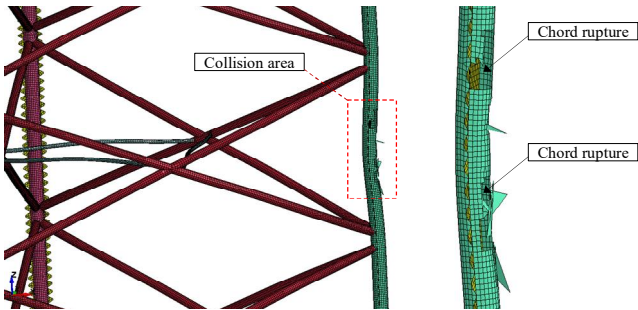
(b) equivalent plastic strain for collision angle of 30 degree

Fig. 9. A comparison of the equivalent plastic strain of between 0 degree and 30 degrees on the 0.5 second.

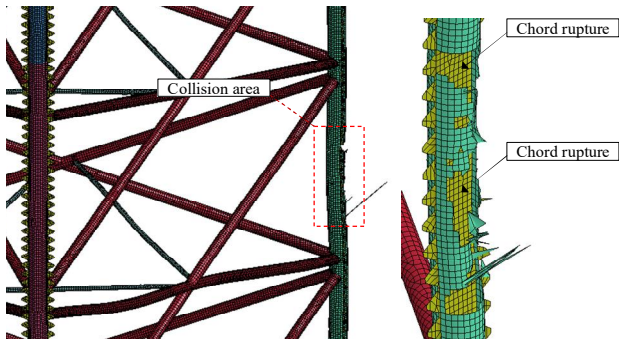
코드-랙에 충돌하는 조건(LC-01, 02)에서는 최초 접촉이 발생하는 구상선수(bulbous bow)에서 파단이 발생하였으며, 30도 충돌조건에서 파단 범위가 증가한 결과를 Fig. 9에 비교하였다. 코드를 중심으로 충돌 각도가 존재하면서, 랙과 선수부가 만나는 구간에서 파단 현상이 빨라지게 되면서 선수부는 비대칭 파단면을 갖는다. 위 조건에서 코드-랙 부위에서의 파단 패턴을 Fig. 10에 비교하고 있다. 랙은 코드에 비해서 두꺼운 후판(210 mm)으로 구성되어 있어서, 정면충돌

잭업드릴링 리그의 레그와 작업 지원선 충돌에 의한 구조붕괴 거동 평가

시 부재의 파단은 발생하지 않으나, 코드에서는 30도 충돌조건에서 파단면이 증가하였다는 결과를 확인할 수 있다. 이 조건에서는 선박의 운동에너지(Ship-KE)와 잭업리그의 흡수 에너지(Rig-IE) 교차 시간(0.15초)에서 잭업리그 레그에서 흡수에너지가 크게 나타났으며, 이 영향이 누적되면서, 코드에 파단 범위가 증가한 것으로 판단된다. 충돌 각도의 차이가 전체 에너지 분포에 미치는 영향은 크지 않지만, 부재별 파단 범위 관점에서는 큰 차이를 나타내고 있다. 충돌한계상태에서의 리그의 안전성 평가 기준은 허용 소성 변형률로서 약 15%를 허용하고 있으며, 이런 조건에서 보자면 충돌에너지 35MJ은 여전히 설계에서 만족하기 어려운 기준임에는 분명하다.



(a) chord rupture contour under collision angle of 0 degree



(b) chord rupture contour under collision angle of 30 degree

Fig. 10. A comparison of the rupture contour of between 0 degree and 30 degrees on the 0.5 second.

작업 지원선이 브레이스 방향 하중 조건(LC-03, 04, 05)에서의 시간에 따른 운동, 흡수에너지 변화를 Fig. 11부터 13까지 나타내고 있다. 코드-랙 구조에 비교하여, 상대적으로 낮은 구조 강성을 갖는 브레이스는 충돌이 발생하는 0.5초 구간에서는 선박이 흡수하는 에너지는 거의 없으며, 주변 부재들로 충돌 범위가 넓어지면서 선박의 충돌에너지는 증가하는 경향을 Fig. 11에 비교하고 있다. 선박의 운동에너지는 잭업리그의 흡수에너지가 커지면서 점점 작아지지만, 2초 이후까지도 수렴하는 거동은 보이지 않았다.

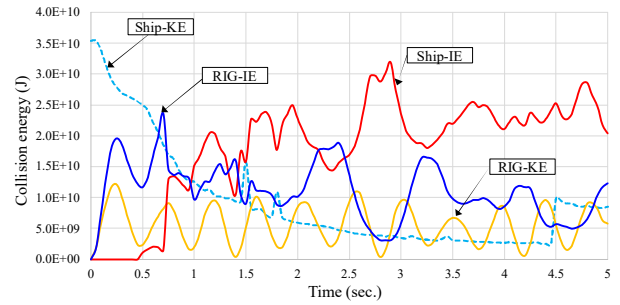


Fig. 11. A comparison of the energy curves of between ship and leg structure (LC-03)

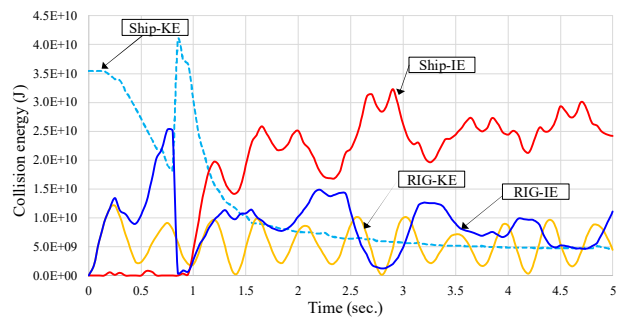


Fig. 12. A comparison of the energy curves of between ship and leg structure (LC-04).

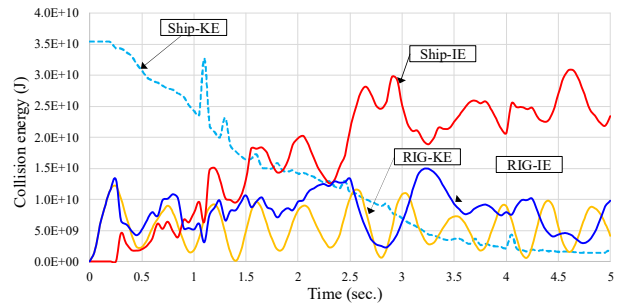


Fig. 13. A comparison of the energy curves of between ship and leg structure (LC-05).

충돌하는 브레이스 위치가 잭업리그 선체와 떨어진 거리가 멀수록 충돌이 발생하는 초기부터 큰 흡수에너지를 나타내고, 선박의 운동에너지는 손실된 양만큼 급격하게 감소하는 경향을 Fig. 12에 비교하고 있다. 충돌 위치가 잭업리그 선체와 가까워지면, 선박의 운동에너지 전달량의 감소는 적지만, 선박의 흡수에너지가 충돌 초기부터 증가하는 변화를 Fig. 13에 나타내고 있다. 이러한 경향은 잭업리그의 선체가 가까울수록 선체가 충돌에너지를 빨리 흡수해주기 때문에 나타나는 분포이다.

해석의 마지막 단계인 4.5초에서의 충돌 선수부와 레그를 구성하고 있는 부재의 파단 형상을 Fig. 14에 비교하고 있다.

잭업리그 선체와 가장 가까운 조건(LC-05)에서 충돌체 선수의 파단 범위가 가장 넓었으며, 최외곽 브레이스에 충돌하는 LC-04조건에서 선박의 파단 범위는 가장 작았다. 선급 요구사항인 충돌에너지 35 MJ 조건에서는 대부분의 브레이스 부재가 파단이 발생하기 때문에, 잭업리그의 레그는 수직 하중을 버티지 못하여 상부 선체 구조가 전도될 가능성이 큰 상황이 된다. 충돌에 의한 구조물 파단은 아주 짧은 시간에 발생하기 때문에, 예방조치가 충분하지 않을 때에는 인명 및 재산, 그리고 환경피해가 막대하게 발생하게 된다.

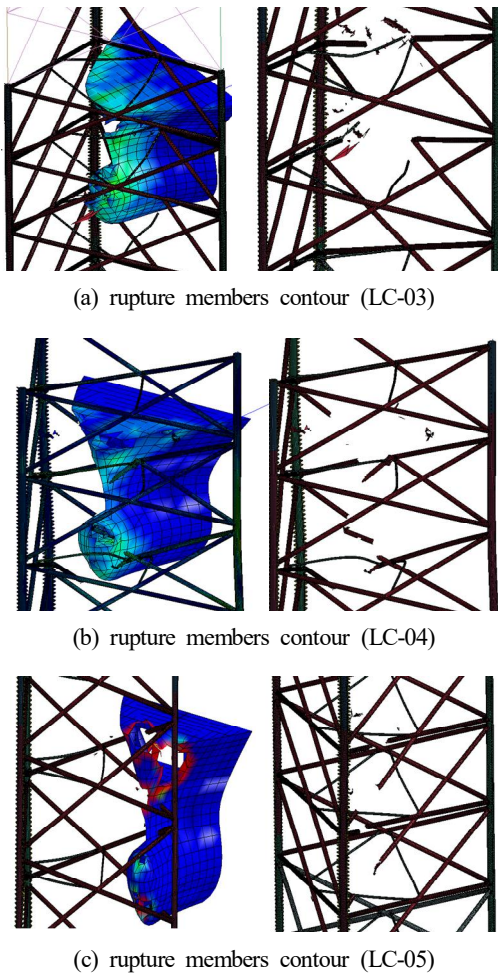


Fig. 14. Rupture members contour according to load conditions.

4. 결론 및 고찰

본 연구논문에서는 연근해 자원개발용 잭업리그의 leg와 접안 선박의 충돌을 고려한 비선형 유한요소해석 계산을 수행하고, 선급에서 제시하고 있는 일관적인 충돌기준의 문제점을 검토하였다. 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- 코드의 정면 수직 방향에서 충돌이 발생할 경우(LC-01), 충돌 발생 후 0.5초가 지나면 충돌 선박의 선수는 레그의 반발력에 의해서 에너지 전달이 증가하지 않는 현상을 나타낸다. 이는 삼각형 레그 구조에 두 개의 브레이스가 균일하게 하중 분담을 하고 있어서이다.
- 브레이스 중앙부 및 측면에 충돌하는 경우, 코드-랙에 비교하여 단면계수가 작으므로, 파단 발생 시점과 범위가 널리 분포된다.
- DNV선급에서 제안하고 있는 충돌에너지 기준은 부재의 강성차이가 크게 발생하는 레그 구조에는 적합하지 않다. 해석결과에 의하면, LC-01, 02 조건은 15 MJ, LC-03, 04, 05 조건에서는 6 MJ이 적합하다. 충돌에너지 조건을 상향하기 위해서는 현재 브레이스 설계를 변경해야 하고, 결국에는 코드 및 랙의 설계를 변경해야 한다. 연구에서 고려한 잭업리그는 상용화된 가장 큰 모델로서, 충돌에너지 35 MJ을 만족시키기 위해서는 잭업리그 전체의 설계변경을 고려해야 하는 위험요인이 있다. 일례로 레그의 구조 단면계수를 변경하기 위해서는 코드 사이의 거리를 늘려야 하고, 이는 잭업리그 플랫폼의 갑판 면적을 감소시키므로, 갑판 면적 보상을 위해서라도 플랫폼은 커져야 한다. 현재 대형급 레그에서 사용하고 있는 코드와 랙의 최대 두께도 변경되어야 하나, 현재의 기술적 한계로 인하여 더 이상의 변화는 쉽지 않은 상황이기도 하다.
- 레그와 같은 연속 트러스 구조는 구조배치 특성으로 인하여 특정 구조가 손상 및 파단이 발생할 경우, 전체 붕괴가 발생할 가능성이 매우 크다. 충돌조건 선정 시, 충돌 부재의 특성을 반영한 차별화된 충돌에너지 기준의 제정이 필요하다.

향후 연구과제로서는 유체-구조 상호 동적 효과를 고려한 평가 기술의 단점을 보완할 수 있는 단순화된 유체-구조 연성 해석 기법에 대한 정식화 모델의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 충돌에 대한 기본적인 구조붕괴 거동과 에너지 소산의 상관관계에 대해서 검토하였다.

References

- [1] Bela, A., H. Sourme, L. Buldgen, and P. Rigo(2017), Ship Collision Analysis on Offshore Wind Turbine Monopile Foundations, *Marine Structures*, Vol. 51, pp. 220-241.
- [2] DNV(2012), *Offshore Standard DNV-OS-C104*, Chapter B. Collision, Det Norske Veritas.
- [3] DNV(2013), *Offshore Service Specification DNV-OSS-201*,

2.2 Additional Technical Requirements Stipulated by PSA,
Det Norske Veritas.

- [4] Lee, S. G., J. S. Lee, J. H. Park, and T. Y. Jung(2017), Marine Accident Integrated Analysis System using Highly Advanced M&S System of FSI Analysis Technique, 11th European LS-DYNA Conference 2017, pp. 1-14.
- [5] LSTC(2009), KEYWORDS USER'S MANUAL, Vol. 1, Version 971, Release 4-beta.
- [6] Ma, K. Y., J. H. Kim, J. S. Park, J. M. Lee, and J. K. Seo(2020), A Study on Collision Strength Assessment of a Jack-up Rig with Attendant Vessel, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol. 12, pp. 241-257.
- [7] NORSOK STANDARD(2004), Design of Steel Structures, N-004, Revision 2, pp. 86-97.
- [8] NORSOK STANDARD(2007), Actions and action effects, N-003, Edition 2, Chapter 8.3 Impact actions, pp. 36-37.
- [9] Park, J. S., K. Y. Ma, and J. K. Seo(2020), Estimation of Leg Collision Strength for Large Wind Turbine Installation Vessel(WTIV), Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 26, No. 5, pp. 551-560.
- [10] Storheim, M. and J. Amdahl(2014), Design of Offshore Structures against Accidental Ship Collisions, Marine Structures, Vol. 37, pp. 135-172.

Received : 2022. 03. 21.

Revised : 2022. 04. 27. (1st)

: 2022. 05. 16. (2nd)

Accepted : 2022. 06. 27.