

# 크레인 중량물 낙하사고에 대응한 설계개념과 간이 해석법에 대한 연구

김을년<sup>†</sup>·김한별  
현대중공업 선박연구소

## A Study on the Design Concept and Simplified Analysis Method in Dropped Object Accidents by Lifting Crane

Ul-Nyeon Kim<sup>†</sup>·Han-Byul Kim  
Hyundai Maritime Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.

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.

This paper is about design concept and simplified analysis method against dropped object events. The ships and offshore structures are exposed to various types of dropped object accidents such as laydown area struck by drill collar and topside deck hit by food container during their lifetime. Mitigation can be accomplished by proper facility layout and designing structures to safely absorb energy from accidental loads. It shall be designed to avoid loss of life, environmental pollution and loss of assets. Impact loads can lead to structural global collapse of the main structure or punching of a local barrier type structure with potential to escalate directly or indirectly to a global collapse of the structure. This study provides the background information on the issue of dropped object of the shipyard and also focuses on structural assessment of the local individual component such as deck plate, stiffener and web/girder by using simplified analysis method. The results of the simplified analysis method were compared with numerical results using non-linear finite element simulation.

**Keywords** : Dropped object accidents(낙하사고), Simplified analysis method(간이 해석법), Acceptance criteria(허용기준), Accidental limit state design(사고 한계상태 설계), Design concept(설계개념)

## 1. 서론

본 논문은 선박 및 해양구조물이 낙하물체로부터 충격하중을 받을 때 이에 대응한 설계 개념과 간이 구조 해석법에 관한 것이다.

통상 구조물 설계는 최종 한계상태(Ultimate Limit State), 피로 한계상태(Fatigue Limit State), 사고 한계상태(Accidental Limit State), 서비스 한계상태(Serviceability Limit State)로 수행한다(Paik & Thayamballi, 2003). 이들 중 폭발(explosion), 낙하(dropped object), 충돌(collision) 등 사고 한계상태에 대한 구조 강도 증명은 시험 또는 동적 효과를 고려한 비선형 유한요소 구조 해석으로 수행하고 있으나 해석수행 비용과 시간 문제로 간이 해석법의 필요성이 대두되고 있다. 특히 초기설계 단계에서 구조 부재 치수를 결정할 때, 잦은 설계변경이 발생하거나 공사기간이 촉

박할 때, 구조 부재의 자중이 설계에 미치는 영향이 적을 때 등 경제적인 설계업무 수행 측면에서 간이 해석법 도입이 요구된다.

이를 위하여 본 연구에서는 낙하사고 설계와 해석을 수행한 기존 공사들의 시방서(Spec.)와 보고서 그리고 관련 논문들 등으로부터 재료 물성치, 설계개념, 강도평가 기준 등에 대하여 정리하였으며 낙하물체에 대응하는 구조물의 손상을 이론적으로 평가하는 간이 해석법을 도입하여 계산하고 비선형 유한요소해석 결과와 비교하여 정확도를 검토하였다. 또한 유한요소 해석 수행시 요소의 크기에 따른 변형률과 내부 변형률 에너지의 영향 그리고 충돌체의 형상, 재료 물성치의 영향들에 대하여 분석하였다.

FPSO(Floating Production Storage and Offloading Unit), FLNG(Floating Liquid Natural Gas Plant), 드릴십(drilling rig), 반잠수식 시추선(semi-submersible rig) 등 해양 구조물의 사고 한계상태 설계는 발주처의 FEED(Front & End Engineering &

Design)단계에서 위험도 해석을 통하여 하중의 크기와 형태를 정한 후 기본/상세설계와 건조를 수행하는 조선소에서 FEED 검증을 통하여 공사금액을 책정한 후 엔지니어링을 수행한다.

따라서 조선소에서는 FEED 검증시 낙하물의 중량과 형태, 실적선 공사 자료들로부터 공사의 난이도와 소요 비용을 산정하고자 할 때와 주어진 설계조건들을 만족하도록 초기 부재 치수를 결정하고자 할 때 간이 해석법 도입이 필요하다.

조선소에서 설계와 건조를 수행하면서 겪는 어려움으로는, 중량물 낙하에 대한 설계 경험과 지식이 부족한 설계자가 해석을 수행할 때 기존 수행 공사에 대하여 잘 분석된 자료가 없다는 것이다. 즉, 영업단계에서 발주처와 함께 충돌에너지의 크기와 낙하 위치, 설계개념 등에 대한 시방서 사항들을 분석하고 건조에 필요한 강재물량을 산정하고 설계 변경(change order)이 발생하면 선거에 반영하는 문제들을 발주처와 협의하며 공사를 진행하여야 함으로 설계자는 풍부한 경험과 전문 지식 그리고 기존 수행한 공사의 자료 분석과 적용 능력이 필요하다.

설계와 구조해석 수행에 앞서 조선소는 발주처와 입급한 선급에 강도 평가 절차와 방법론을 먼저 제시하고 승인을 받아야 한다. 한편, 초기 구조 부재 치수를 설계자가 잘 못 선정하여 설계변경이 이루어질 경우, 강재수급의 어려움 발생할 수 있다. 특히, 해양구조물에 사용하는 강재는 공사 시작 전 강재발주를 미리 하여 재료 시험을 수행하고 선급으로부터 인증을 받아 저장해 두어야 하는데 구조 부재의 치수가 변경될 경우, 강재 수급에 어려움이 존재한다.

TLP(tension leg platform), 스파 플랫폼(spar platform) 등은 낙하사고로 인하여 전체 구조물의 붕괴 위험이 있고 구조 중량에 민감하므로 공사 기간 준수를 위하여 적절한 구조 부재의 치수를 초기 설계단계에서 잘 선정할 필요가 있다. 또한, 공사 초기에 낙하사고로 손상이 예상되는 곳을 찾아내고 인명피해와 장비손상을 예방하기 위하여 필요한 추가 비용을 산정하여 발주처 측에 제시하여야 한다.

중량물 낙하사고에 대한 연구로, Jang & Lee(2017)은 크레인 낙하물 사고와 관련하여 정량적 위험해석 기법을 도입하여 최적의 크레인 작업 경로와 낙하물에 의한 인명 손실을 최소화하는 방법을 제시하였으며 구조적 파괴 빈도를 감소시킬 수 있는 방법에 대한 연구도 수행하였다. Cho et al.(2015)은 조선학회에 해양사고 특별위원회를 구성하여 선박 및 해양구조물에서 발생한 사고 요인 별 사고건수와 인명피해를 조사하였으며 중량물의 낙하사고는 충돌, 폭발, 화재사고 등과 함께 주요한 사고로 기술하였다.

## 2. 설계 고려사항

낙하사고로부터 인명손상과 설비 및 구조물 손상 그리고 환경오염을 예방하기 위하여 잘 정리된 안전 절차서가 있어도 사고는 피할 수 없다. 따라서 이를 완화하기 위하여 설계자는 시설과 장비의 배치에 신경을 써야 하며 낙하사고로부터 충격 에너지를 흡수할 수 있도록 구조물을 설계하여야 한다. 높은 곳에서 사용되는 공구나 장비 그리고 고소 작업용 임시 구조물, 크레인

으로 운송되는 물건 등을 낙하물로 정의한다.

### 2.1 크레인의 사용 환경과 하역 장소의 배치

크레인을 사용하여 중량물을 하역하는 장소(layout area)와 크레인의 작업 반경에 있는 모든 구조물들은 낙하물로 인한 충격을 고려하여 설계하여야 한다. 특히 폭발성 고압가스와 관련한 주요장비는 하역장소에 설치할 수 없으며 불가피할 경우, 낙하에 의한 충돌을 막기 위하여 보호 구조물을 추가로 설치하여야 한다. 해양구조물에서 크레인을 사용할 때 해상의 풍속과 파고 등에 따른 기후조건과 운용 환경에 따른 중량제한과 크레인 운용 높이 사항도 설정하여야 한다(NORSOK, 2008).

### 2.2 낙하 시나리오와 설계준비 사항

선박과 해양구조물은 크레인을 이용하여 다양한 형태의 물체를 이동시킨다. 예를 들면, 드릴십은 갑판상에 설치한 크레인으로 심해를 파공하기 위하여 파이프와 장비를 매일 빈번히 이동시키고 보급선(supply vessel)은 주기적으로 컨테이너에 담긴 식료품을 해양구조물에 적재하며 엔진과 각종 기계장비들은 설정된 보수 주기에 따라 수리 또는 교체를 위하여 트롤리(trolley) 또는 크레인으로 해치커버를 통하여 이송된다. 따라서 해양구조물에서 발생 가능한 다양한 시나리오의 낙하사고를 가정하고 이에 대한 자재운반 계획(material handling studies)을 수립하여야 한다. 크레인을 설치하는 위치 근처의 구조 부재 배치와 강재 발주를 위하여 크레인으로부터 인양되는 장비나 컨테이너의 무게, 인양 높이, 충돌체의 형상, 이송 빈도, 이송경로, 크레인 작업반경과 아암 길이(arm length) 등 다양한 설계조건들을 초기 설계 단계에서 빨리 결정하여야 조선소 측면에서는 공기단축과 비용절감을 고려한 공사 계획을 수립할 수 있을 것이다.

### 2.3 충격에 영향을 미치는 인자들

낙하물 사고에 대한 구조해석을 수행할 때 고려해야 하는 설계인자들은 다음과 같다.

- 충돌체의 무게, 충돌 속도 또는 낙하 높이
- 구조물과 접촉하는 충돌체의 형상과 재료물성치
- 피충돌체의 구조 부재(판, 보강재, 웹 등) 배치와 치수
- 피충돌 구조 부재의 재료 물성치와 주변 경계조건
- 기타, 피충돌체의 손상방지용으로 설치된 덮개판 등

상세설계 단계에서는 앞서 언급한 설계 인자들에 의한 영향을 분석하여 발주처와 설계개념과 비용에 대한 검토가 필요하다.

### 2.4 일반적 설계 고려사항

충돌체와 접촉하는 구조 부재는 낙하지점 주변의 국부손상과

전체구조물의 거동이 서로 연성된 반응을 나타낸다. 일반적으로 얇은 판두께와 강성이 작은 보강재가 넓은 간격으로 설치된 구조물의 판부재에 충돌체가 낙하하는 경우, 구조 부재에 관통 없이 접촉부에 국부적으로 소성변형을 동반한 전체 구조물의 과대 처짐 현상이 발생하고 큰 충돌에너지를 흡수한다. 이에 반하여 판두께가 두껍고 강성이 큰 보강재가 좁은 간격으로 설치된 구조물의 판부재에 충돌체가 낙하하는 경우, 국부구조물이 소성변형을 일으키며 접촉부에서 피충돌체 구조 부재가 관통되면서 충돌에너지를 흡수한다. 따라서 충격에너지 흡수 측면과 구조물 파손을 동시에 고려하는, 즉 강도와 강성 사이의 균형을 잘 맞추도록 설계를 수행하여야 한다.

낙하물과 접촉하는 구조 부재 중 해치커버(hatch cover)는 끝단 테두리를 따라 단순지지 되어 있는 형태로 굽힘거동을 하며, 멤브레인(membrane) 방향 구속력이 없어 큰 처짐이 발생하고 이로 인해 충격에너지를 잘 흡수할 수 있다. 또한 대형 웹(web)나 거어더(girder)의 경우, 국부적인 손상은 허용하나 점진적 전체붕괴가 일어나지 않도록 설계하기 위하여 나머지 손상되지 않은 부분은 탄성한계 범위 내에 있도록 설계를 수행한다. 구조부재의 국부적인 좌굴을 막기 위하여 웹과 플랜지(flange) 치수 선택에도 주의를 기울여야 하며 부재의 양끝단에 브라켓(bracket)을 설치하여 구속조건을 조절할 필요가 있다.

## 2.5 위험도 분석 절차

발주처는 통상 개념/기본설계 단계에서 중량물 낙하사고에 대비한 예비 위험도 평가를 수행한다. 즉 상부구조물(topside structure)과 크레인 배치, 크레인 용량에 따른 작업조건, 크레인 운용 반경, 드릴 장비의 이송 빈도수 등을 고려한 위험도 평가를 수행한다. 그리고 허용 기준(acceptance criteria)을 정의하기 위하여 설치해역 국가 및 선급/발주처 규정, 작업자와 장비의 위험 노출 정도, 구조 부재의 파손 기준, 사고시 작동을 멈추는 장비로 인한 추가 위험성, 국부손상 후 점진적 붕괴와 안전하게 손상수리를 수행할 수 있는 여부 등을 선정한다.

장비나 컨테이너의 권상 빈도수(lifting frequency), 충돌체의 형상과 중량, 그리고 낙하위치, 피충돌체인 장비와 구조물의 정의 등을 고려하고, 사고로 인한 환경적 파괴, 인명손상, 장비의 파손 등을 기준으로 위험도 분석을 수행한다. 따라서 손상에 대한 허용 기준은 예비 위험도 평가 단계에서 발주처에서 결정하여야 한다.

이후, 조선소에서는 상세설계 단계에서 발주처로부터 제공되는 예비 위험도 평가 수행 보고서를 접수하고, 이로부터 구조물의 안전도를 증명하기 위하여 구조해석을 수행하여 엔지니어링 비용을 책정한다. 이를 위하여 조선소에서는 설계와 구조해석을 수행하기 전에 허용기준과 해석방법 등을 포함한 절차서를 작성하여 발주처와 함께 협의하고 입급된 선급의 승인을 획득 한다.

일반적인 사고 한계상태 설계시, 설계하중에 환경 하중(environmental loads)은 고려하지 않으나 충돌체에 의하여 손상된 구조물의 수리기간 동안에 구조물의 잔류강도(residual

strength)를 검토할 경우에는 1년 주기의 최대 풍력과 파랑 환경 하중을 설계하중에 추가로 적용하여 강도를 평가한다(DNV, 2010).

## 2.6 크레인 운용 영역과 허용 기준

낙하사고에 대한 위험도 해석을 통하여 크레인을 운용하는 영역은 다음 세가지로 나누어 관리한다. 첫째로, 고위험 영역(high risk zone)은 과도한 처짐이 발생하거나 파공이 발생하여 낙하물이 관통하여 장비의 파손과 인명에 치명적인 위험이 되거나 전체 구조물이 붕괴할 수 있는 매우 위험한 곳을 의미한다. 둘째로, 위험영역(risk zone)은 파단이 발생하면 주요 장비와 선원이 외기에 노출됨으로 이를 방지하기 위하여 관통하지 않을 영역을 의미한다. 셋째로, ALARP(As Low As Reasonably Practicable) 영역은 선박 또는 해양구조물에서 매우 중요한 역할을 수행하는 주요장비들이 위치하고 선원들이 작업공간으로 사용할 수 있는 안전한 곳으로 작은 변형은 허용하나 파단이 발생하지 않는 영역이다.

DNV(2010)에 의하면 낙하사고에 의한 허용기준으로 낙하 충격하중으로 인하여 주요 구조물 전체가 붕괴하거나 국부적 구조물의 찢김과 관통 또는 과도한 변위로 인하여 전체구조물의 건전성을 해치는 점진적 붕괴(progressive collapse)와 인명/장비가 손상되지 않도록 설계하도록 되어 있다. 예를 들어 국부적으로 과도한 처짐으로 인하여 장비의 고장이 발생하고 상부구조물의 프로세스가 가동중단(shut down)하는 사고가 발생하여도 안 된다. 사고의 개별적 발생빈도는  $10^{-4}/\text{year}$ 이고 전체 손상발생 빈도  $5 \times 10^{-4}/\text{year}$  이다.

공사 발주처들 사이에 차이는 있지만 개별 단위 구조 부재에 대하여 아래의 설계 허용기준을 제시하고 있다.

- 판부재 : 전단에 의한 찢김 또는 관통 방지 설계
- 보강재 : 부재의 완전소성에 의한 붕괴 방지 설계
- 거어더/웹 : 전체 구조물의 좌굴/붕괴 방지를 위한 탄성한도 설계
- 사람 또는 장비 : 부재의 과도한 처짐 또는 찢김 발생으로 인한 인명의 손상과 장비 손상 방지 설계

IACS(2013)에서는 갑판의 처짐 제한 값으로 8mm로 선정하고 있으며 DNV (2010)의 파단기준으로 파단 변형률(rupture strain)을 HT36(S355, yield stress 355MPa)에 대하여 0.15, 연강(S235, yield stress 235MPa)에 대하여 0.2를 정의하고 있다.

## 3. 간이 해석법

### 3.1 낙하해석 수행 방법

낙하물에 의한 구조 부재의 손상 평가는 시험과 비선형 유한요소해석, 간이 해석법 등으로 수행할 수 있다. 이들 중, 간이 해석

법은 소성붕괴 이론을 적용한 식(closed form equations)으로 낙하해석을 수행하는데 전단력에 의한 파공 발생 계산법(shear through method), 판부재의 소성힌지 계산법(yield line method), Veritec(1988)에 의한 방법, NORSOK(2004) 규정 등이 있다. 이들 방법은 피충돌체의 단위 구조 부재에 대하여 보 또는 판구조로 이상화하여 붕괴시 발생하는 찢김, 접힘, 파단, 좌굴, 소성힌지 등의 이론을 적용하여 손상발생을 수식으로 계산하는 것으로 모델링과 해석시간이 적게 들어 설계비용 측면에서 경제적이다. 그러나 피충돌체의 초기 처짐과 인접연결 구조물과의 경계 영향, 충돌체의 크기와 접촉면적 등을 고려할 수 없어 충분한 안전률을 부여하여 보수적 설계로 접근하여야 한다.

이에 반하여 비선형 유한요소해석은 충돌체와 피충돌체에 기하학적 형상을 잘 묘사하고 재료의 동적 비선형성과 대변형을 구현할 수 있어 해석결과의 정확도가 우수하다. 상용 소프트웨어로는 USFOS(2014), LSTC(2012)의 LS-DYNA, Simulia(2014)의 ABAQUS 등이 있다.

### 3.2 부재의 파손 이론

본 논문에서는 전단력에 의한 파공 발생 계산법과 판부재의 소성힌지 계산법으로 간이 해석법을 정립하였다.

#### 3.2.1 충돌에너지

Fig. 1은 컨테이너가 모서리 라인으로 상갑판의 하역 장소에 낙하하는 3가지 시나리오를 가정한 것이다. 즉 보강재 사이의 판에 떨어지는 CASE 1과 2개의 보강재(stiffener)에 걸쳐서 낙하하는 CASE 2 그리고 웹에 떨어지는 CASE 3의 경우를 나타낸 것이다.

충돌체인 낙하물의 초기 위치에너지( $E_h$ , potential energy of dropped object)는 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$E_h = mgH_c \tag{1}$$

where,  
 $m$ : mass of dropped object  
 $g$ : gravity of earth  
 $= 9.81m/s^2$   
 $H_c$ : dropped height

충돌체가 피충돌체인 구조물에 부딪치기 직전에는 운동에너지( $E_k$ , kinetic energy of dropped object)는 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot mv^2 \tag{2}$$

where,  
 $v$ : impact velocity

낙하물의 위치에너지가 낙하시 어떠한 저항도 없이 자유낙하한다고 가정하면 위치에너지는 어떠한 에너지 손실 없이 모두 운동에너지로 바뀌게 되어 식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$E_h = E_k \tag{3}$$

식(3)으로부터 충돌체의 속도( $v$ )는 식(4)로 나타낼 수 있다.

$$v = \sqrt{2gH_c} \tag{4}$$

또한 충돌체를 강체(rigid body)로 가정하면 피충돌체의 운동 에너지는 충격에너지( $E_c$ , impact energy of dropped object)와 같아지며 식(5)로 된다.

$$E_k = E_c \tag{5}$$

또한 충돌로 인한 어떠한 열적인 에너지 손실이 없이 피충돌체가 충격에너지를 모두 흡수한다고 가정하면 피충돌체인 구조물의 내부 변형률에너지( $E_i$ , internal strain energy of structure after impact)는 식(6)으로 나타낼 수 있다.

$$E_c = E_i \tag{6}$$

#### 3.2.2 판 부재의 파손

##### 굽힘에 의한 파손

컨테이너의 코너 또는 모서리 라인 형상의 충돌체가 판부재에 낙하할 때 판부재에 과도한 굽힘변형이 발생하여 파단이 발생하는 것에 대한 계산을 수행하여야 한다. Fig. 2는 처짐량을 계산하는 식을 유도하기 위하여 판부재의 소성힌지, 경사각 등을 도식화한 것이고 이로부터 처짐량( $\Delta_{act\_bending}$ )은 식 (7)과 같다.

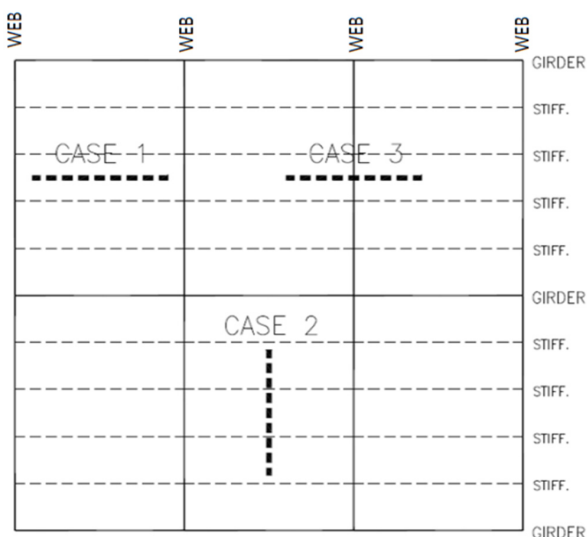


Fig. 1 Impact scenario of dropped object

$$\Delta_{act\_bending} = E_i \frac{b}{8M_p \left[ B + 12t + \frac{b^2}{24t} \right]} \quad (7)$$

where,

$$E_i = M_p \left[ 2(B + 12t)\theta_1 + B\theta_2 + 4\sqrt{(b/2)^2 + (6t)^2}\theta_5 \right]$$

$$= 8M_p \frac{\Delta_{act\_bending}}{b} \left[ B + 12t + \frac{b^2}{24t} \right]$$

$$\theta_1 = \frac{\Delta_{act\_bending}}{(b/2)}$$

$$\theta_2 = 2\theta_1$$

$$\theta_3 = \frac{\Delta_{act\_bending}}{\sqrt{\left(\frac{b}{2}\right)^2 + (6t)^2} \cdot \left(\frac{b/2}{6t}\right)}$$

$$\theta_4 = \frac{\Delta_{act\_bending}}{\sqrt{\left(\frac{b}{2}\right)^2 + (6t)^2} \cdot \left(\frac{6t}{b/2}\right)}$$

$$\theta_5 = \theta_3 + \theta_4$$

$$\theta_6 = \frac{\Delta_{act\_bending}}{\sqrt{\left(\frac{b}{2}\right)^2 + (6t)^2}} \cdot \left( \frac{1}{b/(12t)} + \frac{1}{12t/b} \right)$$

length of plastic hinge line(see Fig. 2 (b))

$$\overline{①②} + \overline{③④} = 2(B + 12t)$$

$$\overline{⑤⑥} = B$$

$$\overline{①⑥} + \overline{⑥③} + \overline{②⑤} + \overline{⑤④} = 4\sqrt{\left(\frac{b}{2}\right)^2 + 12t^2}$$

$M_p$ : plastic bending moment capacity

$$= \frac{t^2 \sigma_0}{4}$$

$\sigma_0$ : material yield stress

$b$ : plate width

$l$ : plate length

$t$ : plate thickness

판부재의 굽힘 처짐량( $\Delta_{act\_bending}$ )은 처짐 허용량( $\Delta_{allow}$ )보다 작아야 하고 이는 식 (8)로 나타낼 수 있다.

$$\Delta_{allow} > \Delta_{act\_bending} \quad (8)$$

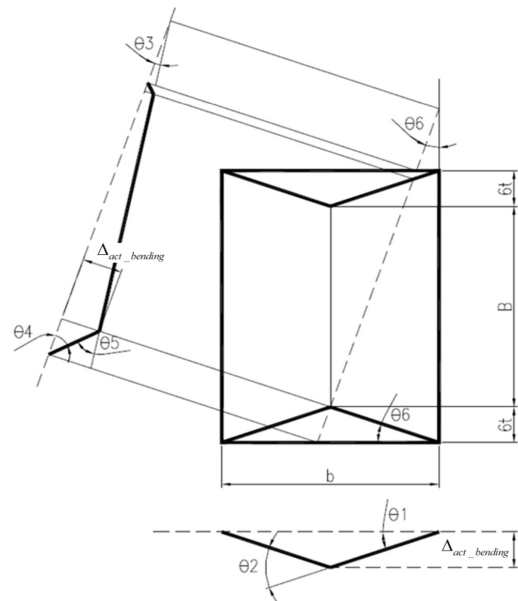
Fig. 2 (c)로부터 처짐에 기인한 판의 반폭( $b/2$ )이  $r$ 로 변하는 식 (9)와 이에 대한 변형률( $\epsilon_{act}$ )은 식 (10)으로 각각 나타낼 수 있다.

$$r = \sqrt{\left(\frac{b}{2}\right)^2 + \Delta_{act\_bending}^2} \quad (9)$$

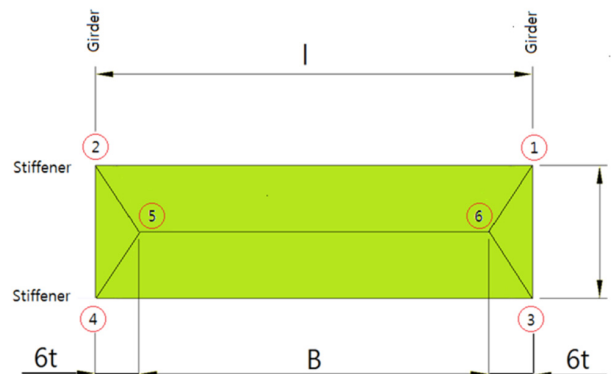
$$\epsilon_{act} = \frac{r - b/2}{b/2} \quad (10)$$

판부재의 손상을 판단하는 기준으로, 변형률( $\epsilon_{act}$ ) 값이 판단 변형률( $\epsilon_u$ )보다 작아야 하는 조건으로 식 (11)로 나타낼 수 있다.

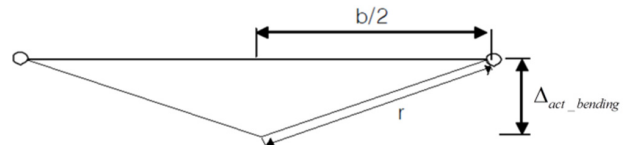
$$\epsilon_u > \epsilon_{act} \quad (11)$$



(a) Angle of inclination



(b) Plastic hinge line



(c) Axial displacement( $r$ ) due to vertical deflection ( $\Delta_{act\_bending}$ )

Fig. 2 Deflection of the plate member by plastic hinge theory

**전단에 의한 관통**

드릴 파이프(drill pipes) 또는 드릴 칼라(drill collars)와 같이 충돌체가 날카롭거나 낙하 접촉 면적이 적을 경우, 판부재와 보강재는 찢김 현상과 파공에 의하여 국부적 손상이 발생하기 쉽다. 낙하물에 의한 판부재의 전단 관통(punching shear) 가능성에 대한 계산을 수행하여야 하며 Fig. 3은 낙하물에 의한 판부재의 전단에 의한 파공 발생을 묘사한 것이다.

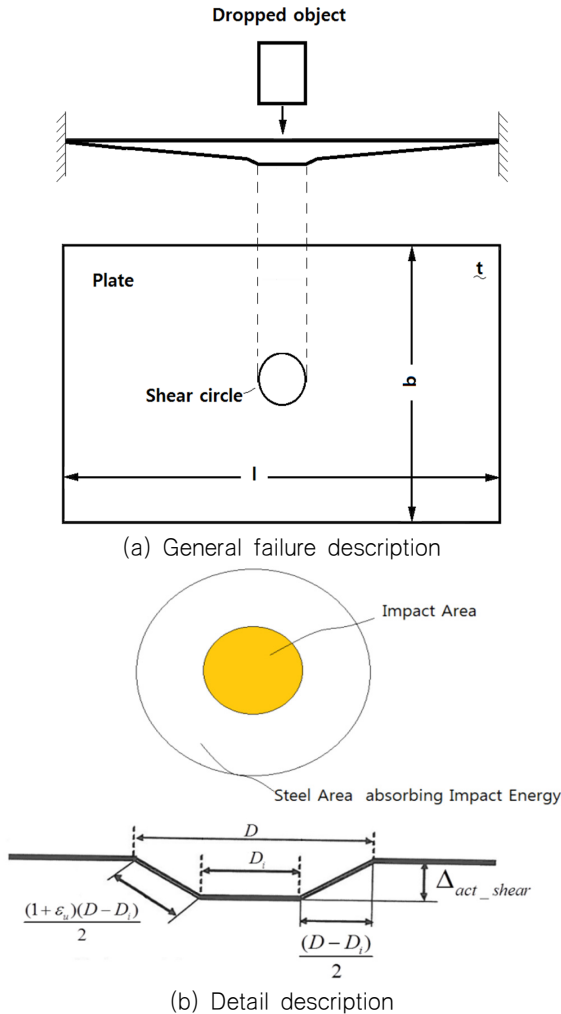


Fig. 3 Plate failure due to the punching shear

i) 관통 에너지 계산

낙하물이 판부재를 관통하는데 필요한 에너지( $E_w$ )는 식 (12)로 계산 할 수 있다.

$$E_w = Ft \tag{12}$$

where,

$E_w$ : shear through work

$F$ : average shear through force

$$= \left( \frac{Pt\tau_o}{2} \right)$$

$P$ : perimeter of dropped object

$$\cong 2(L_o + B_o)$$

$L_o$ : length of dropped object

$B_o$ : width of dropped object

낙하사고에 대한 판부재의 관통손상을 판단하는 기준으로 충격에너지( $E_c$ )가 관통에 필요한 에너지( $E_w$ )보다 작아야 하는 조건으로, 식 (13)으로 나타낼 수 있다.

$$E_w > E_c \tag{13}$$

ii) 관통 깊이 계산

낙하물이 판부재를 관통하는 깊이( $d_{s-t}$ )는 식 (14)로 계산한다.

$$d_{s-t} \tag{14}$$

$$= d_{o-p} - d_{w-p}$$

where,

$d_{o-p}$ : distance of object passed in  $T_w$

$$= T_w v$$

$d_{w-p}$ : distance of  $W_{absorb}$  passed in  $T_w$

$$= (a T_w^2) / 2$$

$T_w$ : time to impact

$$= v/a$$

$W_{absorb}$ : weight of absorbed area

$$= V\rho$$

$V$ : absorbed volume

$$= E_c / d_{s-c}$$

$\rho$ : density of material

$d_{s-c}$ : strain energy density

$$= \epsilon_u \sigma_u$$

$\sigma_u$ : material tensile strength

$a$ : acceleration of weight

$$= F / W_{absorb}$$

판부재의 관통을 판단하는 기준으로 관통 깊이( $d_{s-t}$ )가 판의 두께( $t$ )보다 작아야 하는 조건으로, 식 (15)로 나타낼 수 있다.

$$t > d_{s-t} \tag{15}$$

iii) 처짐 계산

전단에 의한 판부재의 처짐량( $\Delta_{act\_shear}$ )은 식 (16)으로 구한다.

$$\Delta_{act\_shear} = \sqrt{(2\epsilon_u + \epsilon_u^2)} \cdot \left( \frac{D - D_i}{2} \right) \tag{16}$$

where,

$D$ : equivalent diameter absorbing the impact energy

$$\cong \sqrt{\frac{4V}{\pi t} + D_i^2}$$

$D_i$ : diameter of dropped object

$$\cong \sqrt{\frac{4L_o B_o}{\pi}}$$

낙하사고에 대한 판부재의 전단 처짐량( $\Delta_{act\_shear}$ )은 처짐 허용치( $\Delta_{allow}$ )보다 작아야 하는 조건으로, 식 (17)로 나타낼 수 있다.

$$\Delta_{allow} > \Delta_{act\_shear} \tag{17}$$

### 3.2.3 보강재의 파손

#### 굽힘에 의한 파손

보강재의 굽힘에 의한 파손은 판부재의 유효폭을 고려한 보강재의 과도한 굽힘 변형에 의하여 파단이 발생하는 것으로 판단한다. Fig. 4는 보강판의 기호 정의를 위하여 그 단면과 길이 방향 처짐을 나타낸 것이다.

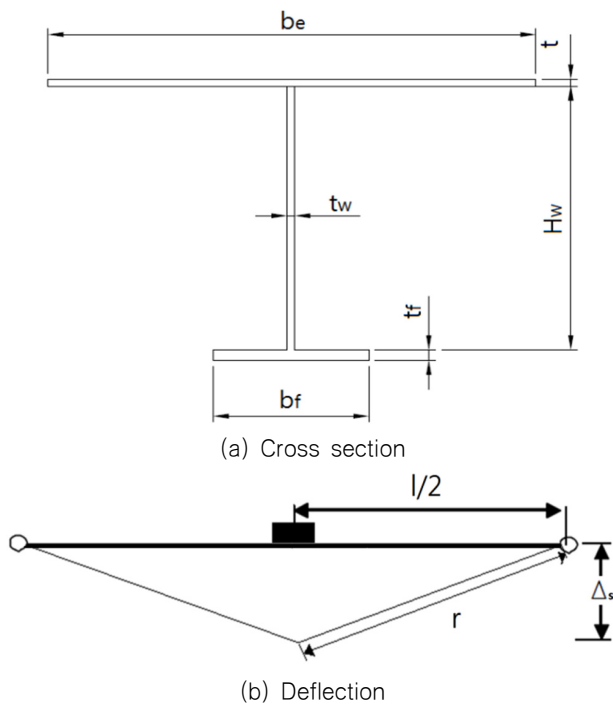


Fig. 4 Cross section of the stiffened plate

보강재의 처짐( $\Delta_s$ )은 식 (18)으로 구한다.

$$\Delta_s = \frac{E_c}{P_{us}} \tag{18}$$

where,

$P_{us}$  : collapse load of stiffened panel

$$= \frac{4M_{ps}}{l}$$

$M_{ps}$  : plastic bending moment of stiffened panel

$$= \sigma_o \cdot Z_{ps}$$

$Z_{ps}$  : plastic section modulus of stiffened panel

$b_c$  : effective width of stiffened plate

충돌체에 의한 판부재의 굽힘 처짐량( $\Delta_s$ )은 처짐 허용치( $\Delta_{s\_allow}$ )보다 작아야 하는 조건으로, 식 (19)로 나타낼 수 있다.

$$\Delta_{s\_allow} > \Delta_s \tag{19}$$

Fig. 4(b)로부터 처짐( $\Delta_s$ )에 기인한 보강재 전체의 면내 변형률( $\epsilon_s$ )과 1개의 보강재에서 나타나는 변형률( $\epsilon_{cs}$ )은 각각 식 (20)과 식 (21)로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_s = \frac{\sqrt{(l/2)^2 + \delta_s^2} - (l/2)}{l/2} \tag{20}$$

$$\epsilon_{cs} = \frac{\epsilon_s}{N_s} \tag{21}$$

where,

$N_s$  : number of stiffener in the impact area  
 $= \text{floor}(L_{co}/b)$ ,  $N_s \geq 1$

$L_{co}$  : length of striking face

낙하사고에 대한 보강의 손상을 판단하는 기준으로 1개의 보강재에서 나타나는 변형률( $\epsilon_{cs}$ ) 값이 파단 변형률( $\epsilon_u$ )보다 작아야 하는 식 (22)로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_u > \epsilon_{cs} \tag{22}$$

낙하물이 보강재에 떨어질 때 보강재가 갖고 있는 탄성 변형률에너지 저항 능력(elastic strain energy resistance,  $E_r$ )은 식 (23)으로 계산한다.

$$E_r = K_{factor} (2\mu_u) \frac{lZ_{es}}{y_{es}} \tag{23}$$

where,

$\mu_u$  : ultimate energy resistance

$$= \frac{\sigma_o + \sigma_u}{2} \cdot \epsilon_u$$

$Z_{es}$  : section modulus of the stiffened panel

$y_{es}$  : neutral axis of the stiffened panel

Beam condition		$K_{factor}$
Load	Boundary	
Concentrated	Simple support	0.167
Distributed	Simple support	0.267
Concentrated	Cantilever beam	0.167
Distributed	Fixed	0.100
Concentrated	Fixed	0.167

낙하사고에 대한 보강의 손상을 판단하는 기준으로 단위 보강재에 작용하는 충격에너지( $E_{cl}$ )가 탄성 변형률 에너지 저항 능력( $E_r$ ) 값 보다 작아야 하는 조건, 식 (24)로 나타낼 수 있다.

$$E_r > E_{cl} \tag{24}$$

where,

$E_{cl}$  : impact energy per unit stiffened panel

$$= \frac{E_c}{N_s}$$

**전단에 의한 파손**

낙하물이 보강재에 떨어질 때 보강재가 갖고 있는 전단 탄성 변형률 에너지 저항 능력(elastic shear strain energy resistance,  $E_{rs}$ )은 식 (25)로 계산한다.

$$E_{rs} = t_w H_w^2 \frac{\sigma_o}{\sqrt{3}} \tag{25}$$

전단에 의한 손상 판단 조건으로, 단위 보강재에 작용하는 충격에너지( $E_{cl}$ )이 탄성 전단 변형률 에너지 저항 능력( $E_{rs}$ ) 값 보다 작아야 하는 식 (26)으로 나타낼 수 있다.

$$E_{rs} > E_{cl} \tag{26}$$

또한 처짐량( $\delta_s$ )와 소성 변형률(plastic strain,  $\epsilon_p$ )는 각각 식 (27)과 (28)로 구한다.

$$\delta_s = \frac{E_{cl}}{M_{ps}} \left( \frac{l}{2} \right) \tag{27}$$

$$\epsilon_p = \frac{\sqrt{(l/2)^2 + \delta_s^2} - (l/2)}{(l/2)} \tag{28}$$

계산한 소성 변형률( $\epsilon_p$ ) 값이 파단 변형률( $\epsilon_u$ ) 보다 작아야 하는 식(29)로 파손 여부를 판단할 수 있다.

$$\epsilon_u > \epsilon_p \tag{29}$$

**3.2.4 거어더 또는 웨브의 파손**

보강재에 대한 계산과 동일한 방법으로 수행한다.

**3.3 간이 해석법의 수행절차**

Fig. 5은 간이 해석법에 의한 단위 판부재, 보강재, 거어더나 웨브에 대한 충돌체에 대응하는 강도평가 절차를 나타낸 것이다. 충격에너지와 강도평가 허용기준을 정립하고 재료의 물성치와 구조 부재 기하학적 특성치로 각각의 구조물에 대하여 손상과 처짐량을 계산하고 허용기준으로 평가하는 순서로 진행한다.

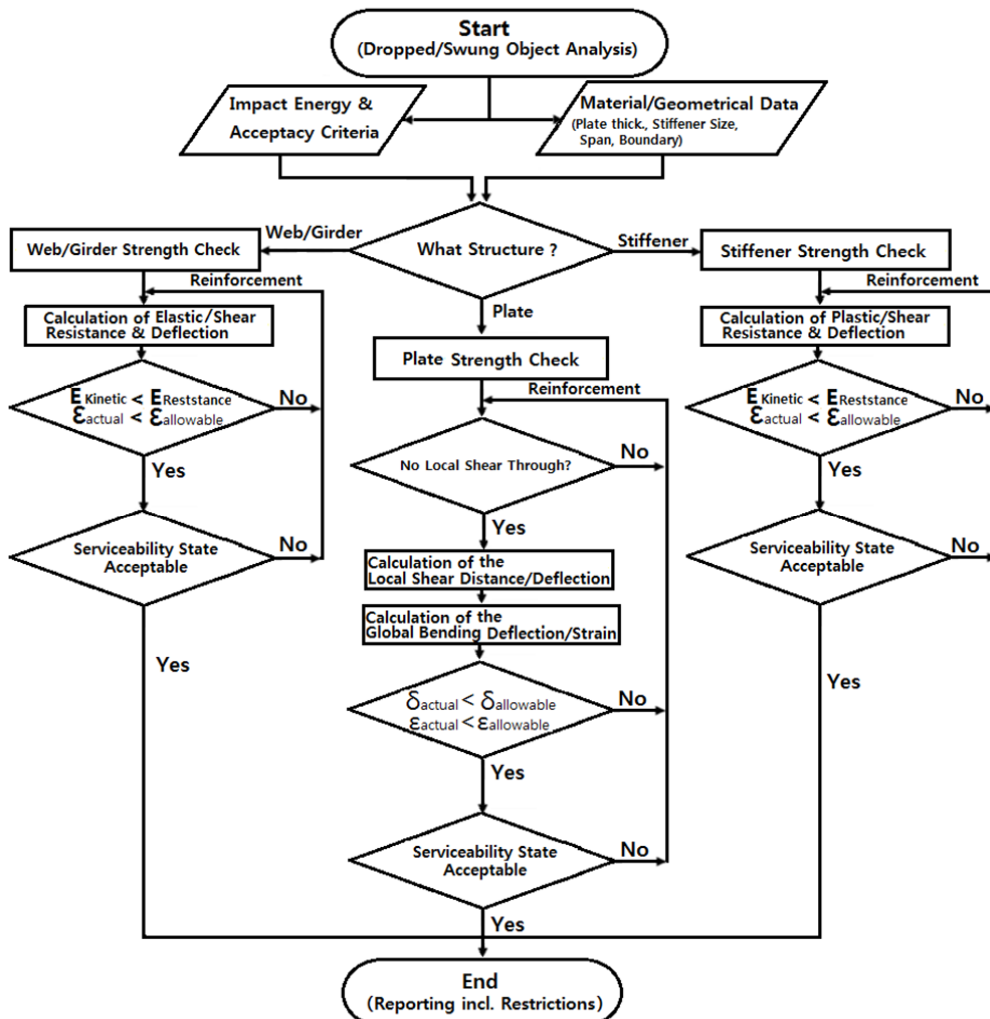


Fig. 5 Flowchart of the dropped object analysis



### 3.4 간이 해석법 검증

#### 3.4.1 기존수행 공사의 분석

현대중공업에서 수행 완료한 공사(Table 1)들의 낙하사고 해석과 관련한 발주처의 시방서 요구치를 분석하였다.

Table 1 Experienced project of the offshore structure

Type	Project(Ship owner)
FPSO	Goliat(ENI), Q204(BP), Rosebank(Shevron), AKPO(Total), USAN(Total)
FPU	MHN(Total), Jangik(ENI), Gendalo-Gechem(Chevron)
SPAR	Asta Hansteen(Statoil)
TLP	MHN(Total)
S/S Rig	West Mira(Sea drill), Bollsta Dolphin(FOE)

Table 2는 Table 1의 수행 공사들 중 대표적 낙하 해석 시나리오에 대하여 충돌체 크기와 중량, 충격에너지, 낙하지점의 구조물을 정리한 것이다.

Table 2 Required kinetic energy and scenarios for the dropped objects

Selected object	Impact Energy (kJ)	Dropped Area	Contacted surface/ Weight of object(ton)
Container (6.1mx2.4mx2.4m, Rigid)	790	Laydown area	Single surface/20.0
Square box shaped pump (2.4mx2.4mx2.4m, Rigid)	790	Laydown area	Single surface /7.3
2m Cube (2mx2mx2m, Rigid)	750	Deck	Single corner /7.5
Container (6.1mx2.4mx2.4m, Deformable)	600	Laydown area	2.4m equally distributed Line /20.0
Container (6.1mx2.4mx2.4m, Rigid)	240	Laydown area	2.4m equally distributed Line/20.0
Drill collar (Dia.241mmxlength 740mm, Rigid)	179.5	Drill floor	section/12.2
Drill collar (Dia.241mmxlength 740mm, Rigid)	89.8	Pipe storage deck	section/3.05
Drill collar (Dia.241mmxlength 740mm, Rigid)	44.9	Roof of shake house	Inclined section/3.05

Fig. 6은 현대중공업에서 수행한 Q204 FPSO 프로젝트의 상갑 판상에 10톤 중량의 정육면체 충돌체(2mx2mx2m, Rigid)가 코너로 판부재의 중앙부에 높이 7.5m에서 떨어질 때에 대한 비선형 유한요소 해석 결과를 예로서 나타낸 것이다. 사용한 구조해석용

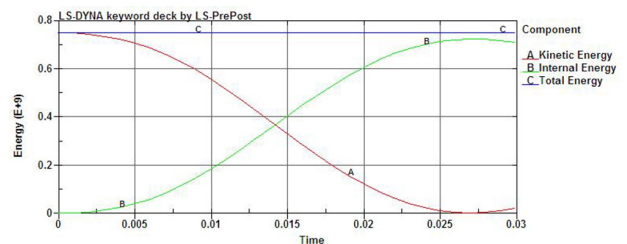
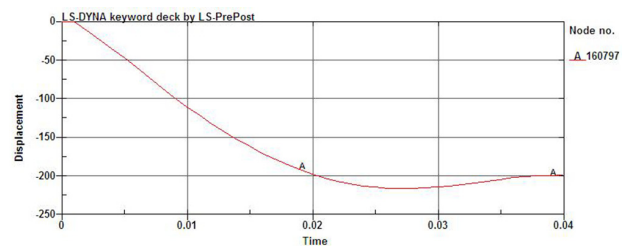
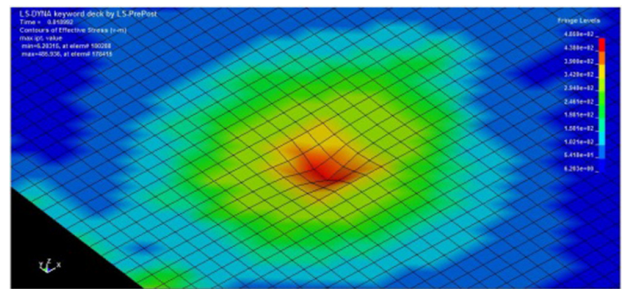
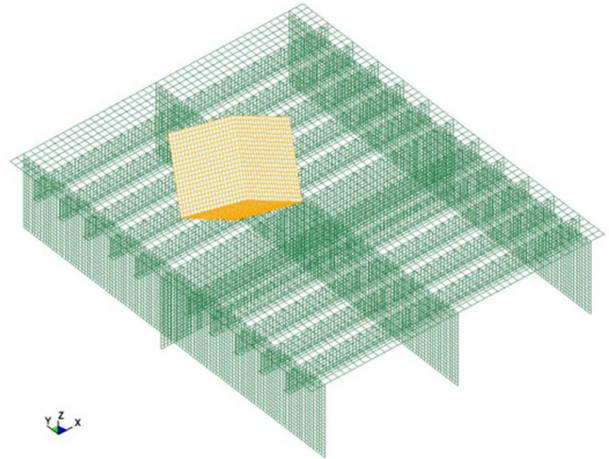
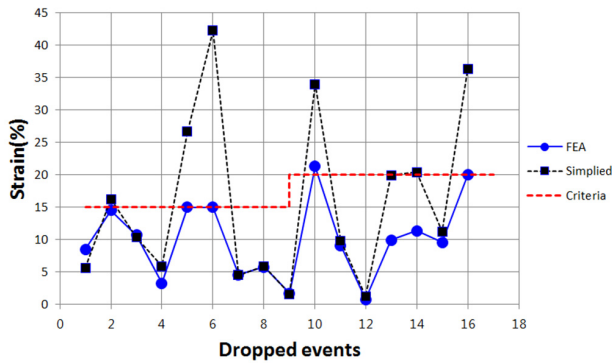


Fig. 6 Example of Nonlinear FE analysis using by LS-DYNA

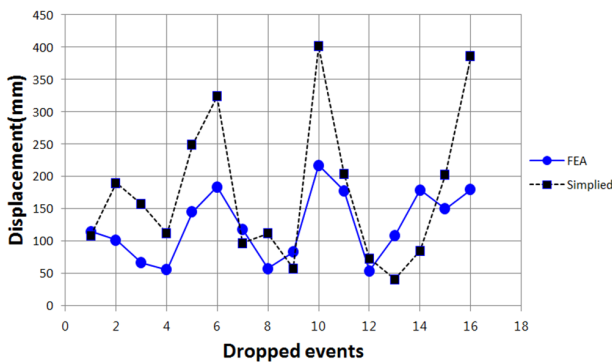
소프트웨어는 LS-DYNA (LSTC, 2012)로 재료 물성치와 파손기준은 DNV(2010)에 제시하는 값으로, 요소의 크기는 200mmx200mm로 모델링 하였다. 상갑판의 판부재 두께는 26mm이고 보강재의 간격은 800mm로 해석결과 나타난 최대 변형률은 0.21로 파손기준인 0.22를 만족하였다.

### 3.4.2 해석결과 비교

현대중공업에서 수행한 공사들의 비선형 유한요소해석에 의한 낙하해석 결과와 개발한 간이 해석법에 의한 결과를 비교하였다. Fig. 7의 (a)와 (b)는 각각 피충돌체의 낙하위치에서의 변형률과 변위를 비교한 것으로 이론적 설계식에 기반한 간이 해석법에 의한 결과가 안전측으로 평가되는 것을 알 수 있으며 초기 설계 또는 상세설계에서 약간의 안전여유를 갖고 실용적으로 사용할 수 있을 것으로 사료된다.



(a) Failure strains



(b) Displacements

Fig. 7 Comparison of the FEA and theoretical results for experience projects

## 3.5 설계변수에 대한 파라메타 연구

### 3.5.1 요소크기의 영향

Fig. 8은 요소 크기에 따른 낙하지점에서의 변형률을 나타낸 것이다. 요소 크기가 감소함에 따라 변형률이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 즉 100mmx100mm 요소 크기일 때 변형률은

300mmx300mm의 값보다 약 3배이상 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 요소 크기에 따른 수렴의 정도를 확립한 후에 실제 구조물에 대한 해석을 수행하는 것이 바람직하다.

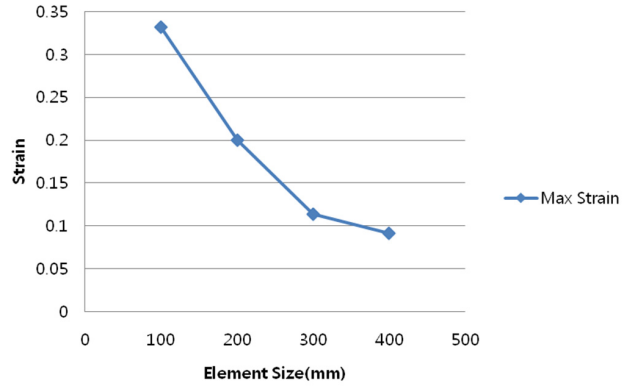


Fig. 8 Strain according to change of the mesh sizes

Fig. 9는 구형 충돌체가 상갑판 상의 보강재위에 낙하한 경우에 대하여 요소크기를 변경하며 피충돌체에서 흡수한 에너지를 비교한 것이다. 충돌에너지는 9MJ이며 요소크기가 작을수록 국부손상도 일찍 일어나며 내부 에너지도 낮게 나타났으며 차이가 30%정도이다.

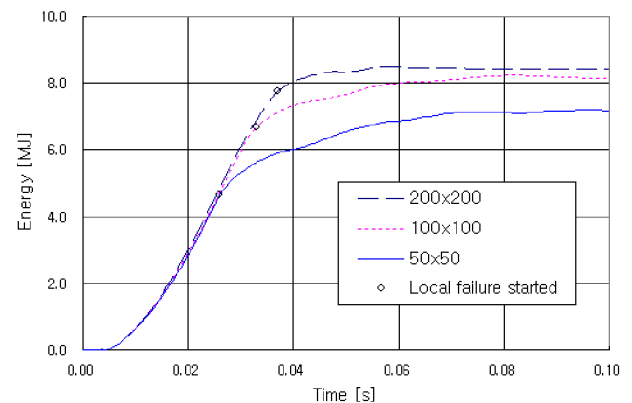
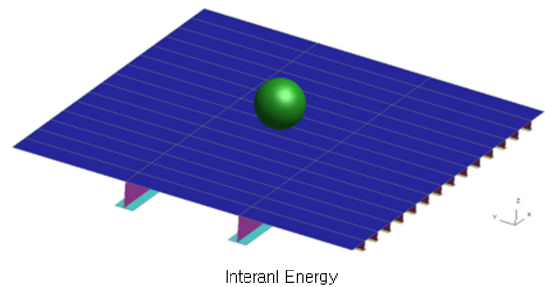


Fig. 9 Strain energy for different mesh sizes

### 3.5.2 충돌체의 형상

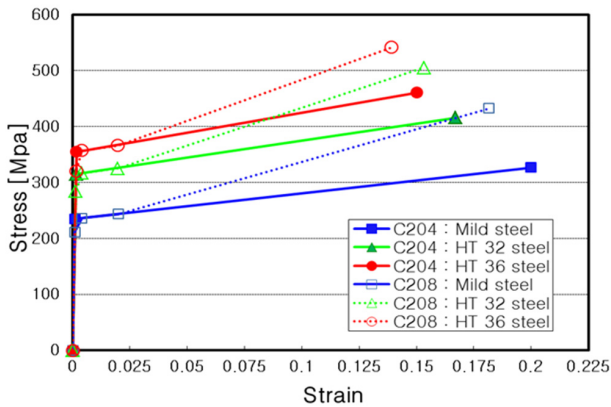
드릴 파이프 또는 드릴 칼라와 같이 충돌체가 날카롭거나 낙하 접촉 면적이 적을 경우, 판부재와 보강재는 찢김 현상과 파공에 의하여 국부적 손상이 발생하기 쉽다. 이에 반하여 종량이 큰

컨테이너가 면접촉으로 충돌할 때, 큰 충격 에너지를 흡수하는 웨브나 거어더의 손상으로 인한 전체구조물의 붕괴 우려가 있다.

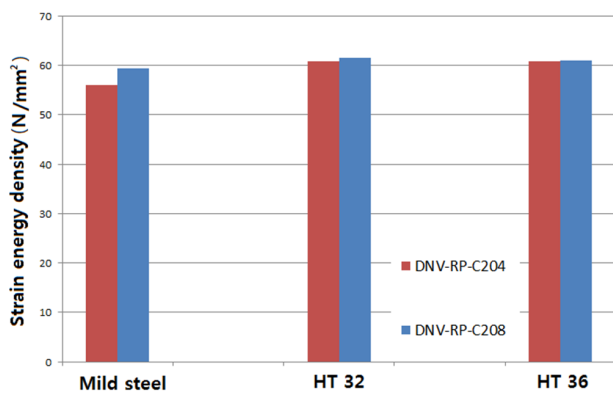
충돌체의 접촉부 끝단이 날카로워서 국부적 판부재의 찢김을 방지하기 위하여 강재 위에 나무(wood) 또는 GRP(glass fiber reinforced plastic) 덮개를 설치할 수 있다. 그러나 나무덮개를 설치하는 것에 의한 구조물의 추가 강도 증가효과는 구조강도 계산을 수행할 때 고려하지 않는 것이 일반적이다.

### 3.5.3 구조 부재의 재질

DNV 선급 규정에 정의된 재료 물성치에 대하여 검토하였다. Fig. 10은 DNV(2010)의 DNV-RP-C204와 DNV(2013)의 DNV-RP-C208에서 제시하는 응력-변형률 곡선을 조선소에서 많이 사용하고 있는 연강과 고장력강(high tensile steel)에 대하여 비교한 것이다.



(a) Stress-strain relation curve

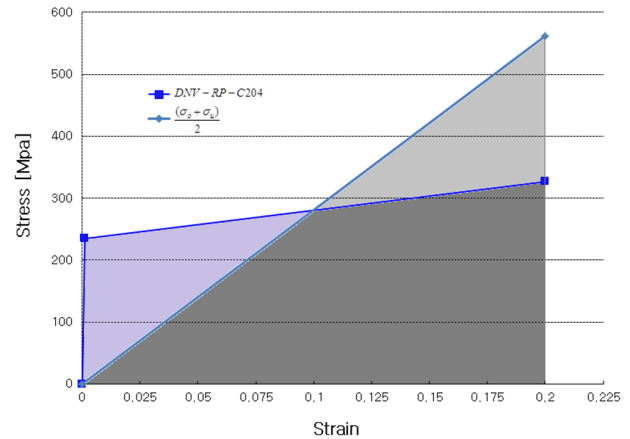


(b) Strain energy density

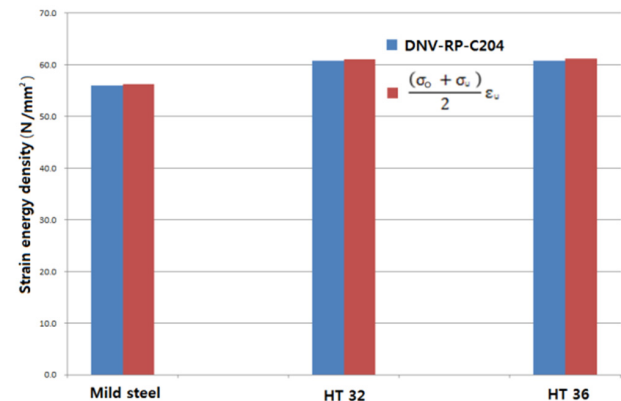
Fig. 10 Comparison of material properties by the DNV-RP-C204 and C208

Fig. 10 (b)는 DNV-RP-C204와 C208의 응력-변형률 곡선과 이 곡선의 아래 면적을 적분하여 나타내는 인성계수(modulus of toughness)를 비교한 것이다. 인성계수는 연강의 경우, RP-C208에 의한 것이 5.8%, HT32의 경우 1.3%, HT36의 경우 0.2% 각각 높게 나타났다. 또한 강재변경에 따라, 연강을 HT32로 바꿀 때 4~8%, 연강을 HT36으로 변경시 4~8% 파

손 변형률 에너지 값이 각각 상승하였다. 고장력강 사용으로 항복강도의 상승은 크지만 인장강도 상승과 충격 흡수율은 미미하다는 것을 알 수 있다. 따라서 항복응력이 인장강도보다 훨씬 낮으면서 큰 파괴 인성치(fracture toughness properties)를 갖는 재질을 선택하는 것이 파손을 예방하는데 도움이 된다.



(a) Modulus of toughness for the mild steel



(b) Strain energy density

Fig. 11 Comparison of material properties by the DNV-RP-C204 and simplicity formula

Fig. 11에 나타낸 바와 같이 DNV(2010)에서 제시하는 값과, 항복응력과 인장강도의 평균치에 파손 변형률 곱한 이론적 인성계수 차이는 연강 0.3%, HT32 0.5% HT36 0.65% 차이가 아주 작다. 따라서 이론적 계산을 수행할 때, 주어진 항복응력과 인장강도로 정의된 인성계수를 사용하여도 간이 해석을 수행할 때 충분한 정확도를 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

### 3.6 낙하사고 손상방지를 위한 조치

충돌체의 형상이 뾰족할 경우, 적은 낙하에너지에도 피충돌체에서 찢김 또는 파공이 발생할 수 있기 때문에 하부 보호용 커버를 충돌체에 씌어 운반하는 것이 좋으며 피충돌체에 복합재료, Wooden 등 충격완화용 재질을 사용하면 파공 발생 방지에 많은 도움이 된다. 한편, 갑판 하부에 약간의 공간을 두는 2중

데크 구조로 설계하면 파공과 처짐에 의한 위험도를 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 선박 및 해양구조물의 낙하사고에 대한 구조물의 설계 개념을 정립하고 부재 치수의 결정 및 구조 강도평가를 손쉽게 수행할 수 있는 이론적 간이 해석법을 제시하였다. 낙하구조물에 대한 강도 증명은 시험 또는 동적 효과를 고려한 비선형 유한요소 구조해석으로 수행하고 있으나 해석수행 비용과 시간 문제로 간이 해석 필요성이 대두되었다. 특히 초기구조 치수를 결정할 때 또는 잦은 설계변경이 발생할 때 그리고 구조물의 중량이 설계에서 주요 문제가 되지 않을 때 경제적 측면으로 간이 해석법이 요구된다. 이를 위하여 본 연구에서는 현대중공업에서 기 수행한 조선과 해양 공사들의 시방서와 구조해석 보고서, 선급규정의 요구치, 직접해석법 적용시 재료물성치/평가 기준 적용성 등을 검토하고 설계 개념을 마련하였다. 낙하 사고에 대한 구조강도 평가법을 통상의 공학에서 적용하고 있는 소성이론을 적용한 이론식으로 정립하고 그 결과를 비선형 유한요소해석결과와 비교하여 정확도를 검증하였다.

또한 유한요소 해석 수행시 요소의 크기에 따른 변형률과 내부 변형률 에너지의 영향 그리고 충돌체의 형상, 재료의 물성치의 영향들에 대하여 토의 하였다.

## References

Cho, S. R. et al., 2015. Cases and Lessons for Marine Accident, Safe Sea. *Special Committee for Marine Accident, Society of Naval Architects of Korea.*

Det Norske Veritas (DNV), 2010. *Structural design against accidental loads, recommended practice, DNV-RP-C204.* Norway Oslo: DNV.

Det Norske Veritas (DNV), 2013. *Determination of structural capacity by non-linear finite element analysis methods, recommended practice. DNV-RP-C208,* Norway Oslo: DNV.

International Association of Classification Societies (IACS), 2013. *Shipbuilding and Repair Quality Standard, IACS Recommendation No. 47(Rev. 7), Table .12.* UK London: IACS.

Jang, C. H. & Lee, J. S., 2017. Risk assessment of dropped object in offshore engineering through quantified risk analysis. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 54(2), pp.143-150.

LSTC, 2012. LS-DYNA Keyword User's Manual Version 971 R6.1.0, *Livermore Software Technology Corp., USA.*

NORSOK Standard N-004, 2004. *Design of steel structures, Annex A.*

NORSOK Standard R-002, 2008. *Lifting equipment.*

Paik, J.K. & Thayamballi, A.K., 2003. *Ultimate limit state design of steel-plated structures.* UK Chichester: Wiley.

Simulia, 2014. ABAQUS ver. 6.14, *Analysis User's Manual, HTML Vol. 1, 2, 3,* Hibbitt Karlsson and Sorensen Inc.

USFOS AS, 2014, *USFOS User's Manual.*

Veritec, 1988. *Design guidance for offshore steel structures exposed to accidental loads, section 4. design guidance for structures exposed to falling object,* Veritec Report No. 88-3172.



김을년

김한별