



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

선박의 충돌·좌초 사고 원인규명
해석기법 개발

Analysis Technology Development of Cause Investigation for
Ship Collision · Grounding Accident



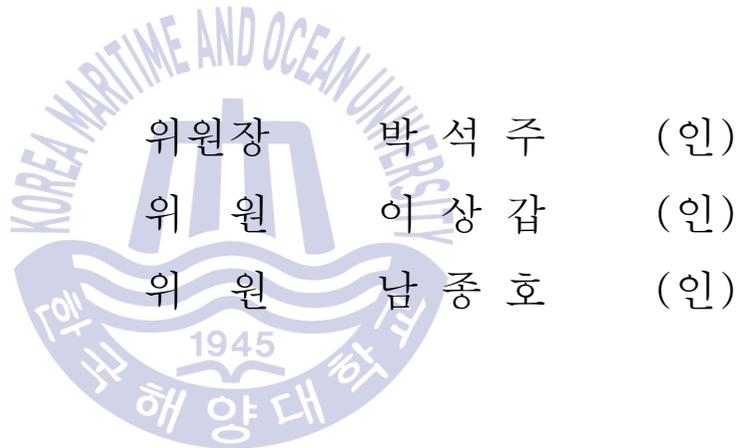
지도교수 이상갑

2018 년 2 월

한국해양대학교 대학원

조선해양시스템공학과
박지훈

논문을 박지훈의 공학석사 학위논문으로 인준함.



2018 년 2 월

한국해양대학교 대학원

Table of Contents

List of Tables	ii
List of Figures	iii
Abstract	v
초 록	vii
1. 서 론	1
2. 선박 재료의 파단기준	7
3. 충돌사고의 원인규명 시뮬레이션 기법	11
4. 좌초사고의 구조 안전성 평가 시뮬레이션 기법	23
5. 고찰 및 결론	32
Reference	34
감사의 글	35

List of Tables

Table 1	Material properties of ASTM 569	9
Table 2	Material properties of mild and high tensile steels	16



List of Figures

Fig. 1 Marine accidents according to type (KMST Judgment Report, 2000–2015)	1
Fig. 2 Test and simulation of guard rail and side collision of car	2
Fig. 3 Collision and grounding accident damages	3
Fig. 4 Sketch of penalty coupling algorithm (Aquelet et al. 2006)	5
Fig. 5 Grounding test of NSWCRod and Sikora 1995)	7
Fig. 6 Grounding test model and simulation of ADH/PD328V model (Lee 2007)	8
Fig. 7 Stress-strain curve of ASTM 569	9
Fig. 8 Comparison of simulation responses to grounding test results of ADH/PD328V (Lee 2007)	10
Fig. 9 Striking scenario of struck fishing vessel	11
Fig. 10 Collision damage configuration of struck fishing vessel	12
Fig. 11 F.E. mesh configuration of struck fishing vessel	13
Fig. 12 F.E. mesh configurations of striking cargo ships	13
Fig. 13 F.E. mesh configuration and scenario of full-scale collision simulation using FSI analysis technique	14
Fig. 14 F.E. mesh configuration and scenario of full-scale collision simulation in void condition	15
Fig. 15 Stress-strain curve of mild & high tensile steel	16
Fig. 16 Overall view of full-scale collision & capsize simulation behavior using FSI analysis technique	17
Fig. 17 Side view of full-scale collision & capsize simulation behavior using FSI analysis technique	18

Fig. 18	Side view of full-scale sinking simulation behavior by striking ships of bulbous & vertical bows using FSI analysis technique	18
Fig. 19	Stress and plastic strain response of struck ship by striking one with bulbous bow using FSI analysis technique	19
Fig. 20	Stress and plastic strain response of struck ship by striking one with vertical bow using FSI analysis technique	19
Fig. 21	Full-scale collision & capsize simulation behavior of striking ship with bulbous bow in void condition	21
Fig. 22	Stress and plastic strain response of struck ship by striking one with bulbous bow in void condition	21
Fig. 23	Stress and plastic strain response of struck ship by striking one with vertical bow in void condition	22
Fig. 24	Full-scale grounding simulation model	24
Fig. 25	Full-scale ship grounding scenario of grounding model ship using FSI analysis technique	25
Fig. 26	Grounding response behaviors in full loading condition with rock position center	28
Fig. 27	Grounding response behaviors in full loading condition with rock position 3.0m off	29
Fig. 28	Grounding response behaviors in full loading condition at free motion according to rock position in void condition	30
Fig. 29	Grounding response behaviors in full loading condition at plan constraint according to rock position in void condition	31

선박의 충돌·좌초 사고 원인규명 해석기법 개발

박 지 훈

한국해양대학교 대학원
조선해양시스템공학과

초 록

With the advent and ongoing advances in numerical simulation capabilities and its sophisticated tools, such as highly accurate dynamic nonlinear simulation hydrocode LS-DYNA, development of shock response analysis techniques has been actively carried out for the structural safety assessment with viable, less costly alternatives as well as more reliable aids to the tests and/or experiments. To ensure an accurate and reasonable prediction of shock response with relation to the fluid, such as explosion, sloshing, collision, grounding, capsizing, flooding and sinking etc., full-scale simulations would be the best approach using highly advanced M&S (Modeling & Simulation) of its Fluid-Structure Interaction (FSI) analysis technique.

Several coupling effects in the water could be conceptualized in this highly advanced M&S system of FSI analysis technique, such as floating, motion, wave making, squeezing pressure, bank effect and realistic ship velocity. Fracture criteria have to be also suitably applied to the structural damage considering strain rate effect, together with careful investigation of damage information.

In this study, using highly advanced M&S system of FSI analysis technique, full-scale ship collision & grounding simulations were performed for the investigation of small fishing ship collision and capsizing accident and for the structural safety assessment of radioactive waste matter carrying vessel. More accurate and realistic collision and grounding behaviors, damage responses could be found in water condition using highly advanced M&S system of FSI analysis technique.

KEY WORDS : Full-Scale Ship Collision · Grounding Simulation, Fluid-Structure Interaction(FSI) Analysis Technique, Highly Advanced M&S(Modeling & Simulation) System, Cause Investigation of Marine Accident



Analysis Technology Development of Cause Investigation for Ship Collision · Grounding Accident

Park, Ji-Hoon

Department of Naval Architecture & Ocean Systems Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

최근 대용량의 전산시스템의 개발과 더불어 LS-DYNA 코드와 같은 고도 비선형 동적 상용해석 프로그램이 크게 발전됨에 따라 구조 안전성 평가를 위한 내충격 응답해석 기법이 매우 활발히 수행되고 있으며 실험이나 시험을 보조하거나 대체할 수 있는 단계에 있다. 폭발, 슬로싱, 충돌, 좌초, 전복, 침수 및 침몰 등과 같이 유체와 관련된 내충격 응답을 정확하고 합리적으로 수행하기 위해서는 유체-구조 연성 해석기법의 고도 정밀 M&S 시스템을 이용한 실선 시뮬레이션을 수행하는 것이 가장 최선의 접근 방법이라 할 수 있다.

이러한 유체-구조 연성 해석기법의 고도 정밀 M&S 시스템은 해수에서 선박이 부양(floating)되고, 6자유도의 운동(motion)도 하고, 선내에 해수도 침수(flooding)되고, 운항 중일 때 파도(wave)도 생성하고, 두 물체가 근접할 경우에는 압착압력(squeezing pressure)이 발생하고, 두 물체가 스쳐 지나거나 안벽과 해저에 근접하게 운항할 경우에는 압력이 저하(banking effect)되는 등 해수에서의 여러 가지 연성효과를 구현할 수 있다. 손상자료를 세심히 분석하면서 충돌속도에 따른 변형을 의존 재료 물성치를 고려하는 파단모델을 합리적으로 구조 손상을 구현하는 것도 중요하다.

본 논문에서는 소형 어선의 충돌사고의 원인분석과 방사성폐기물 운반선의 좌초에 대한 구조 안전성 평가를 위해 유체-구조 연성 해석기법의 고도 정밀 M&S 시스템을 이용한 실선 충돌 및 좌초 시뮬레이션을 수행하였으며, 해수 중에서 보다 정확하고 실제적인 충돌 및 좌초 거동과 손상 응답을 구현할 수 있었다.

KEY WORDS : 실선 충돌·좌초 시뮬레이션, 유체-구조 연성(FSI) 해석기법, 고도 정밀 M&S 시스템, 해난사고 원인규명



1. 서 론

전 세계적으로 해난사고를 줄이기 위한 노력은 끊임없이 기울여 왔지만 여전히 막대한 인명 피해와 재산상 손실, 해양오염이라는 큰 재앙까지 초래하고 있다. 얼마 전 세월호 참사로 수많은 유가족들과 국민들은 진상 규명을 통해 건강하고 안전한 사회를 위한 염원을 모았다. Fig. 1에서와 같이 2000년부터 2015년까지의 해양안전심판원의 해난사고 유형별 재결서에 의하면 충돌사고가 절반에 가깝고, 화재 폭발, 침몰, 좌초, 기관고장, 사망 부상, 전복, 접촉 등의 순서로 발생하였다.

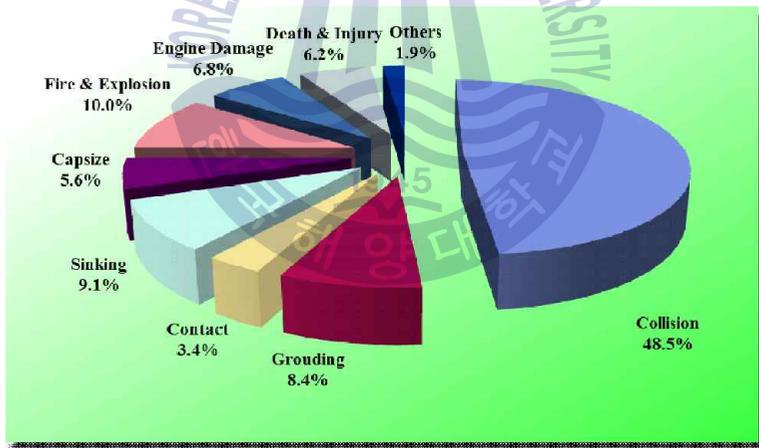


Fig. 1 Marine accidents according to type (KMST Judgment Report, 2000-2015)

국내에는 해양안전심판원에서 해양경찰과 더불어 주로 운항경험 및 운항자료에 의존하여 해난사고 원인을 규명하고 분석하고 있으나, 소형선박의 경우 항해장비 부재로 증거확보가 어렵거나 항해장비가 있어도 항해장비의 기록만으로는 원인규명의 정확성과 효율성이 미흡할 경우 심판결과에 대한 불복과 관련

당사자 간의 시비가 빈번할 수 있어 막대한 시간과 경비가 소비되고 있다. 해난사고의 특성 상 해상에서의 사고현장 유지가 어렵고 목격자가 부재일 경우가 많고 해난사고의 손상 메카니즘과 침수 및 침몰 과정에 대한 이해도가 부족할 수 있다.

최근 대용량의 전산시스템의 개발과 더불어 LS-DYNA 코드(LSTC, 2013)와 같은 고도 비선형 동적 상용해석 프로그램이 크게 발전됨에 따라 Fig. 2에서와 같이 실험이나 시험을 보조하거나 대체할 수 있는 단계에 있다. Fig. 3에서와 같이 선박의 충돌이나 좌초사고 시 선체도 대변형과 파단이 발생하는 등 고도의 비선형을 고려하여야 하고 특히 선체 재질의 손상 또는 파단되는 속도의 영향을 고려하는 등 파단조건을 적절히 고려하여야 하고 손상자료도 면밀히 파악하여야 할 것이다. 이와 같은 고도 정밀 Modeling & Simulation(M&S) 시스템을 사용한 실선 선박 시뮬레이션을 수행하는 것이 해난사고의 원인을 과학적이고 공학적으로 규명할 수 있을 것이다. 그러나 해난사고는 일반적으로 자동차나 비행기 등의 사고와는 달리 공기 밀도보다 약 1,000배가 큰 유체(해수)에서 발생하므로 이러한 유체에서의 사고 손상거동을 합리적으로 구현하여야 실제적이고 정확하게 추정할 수 있다.

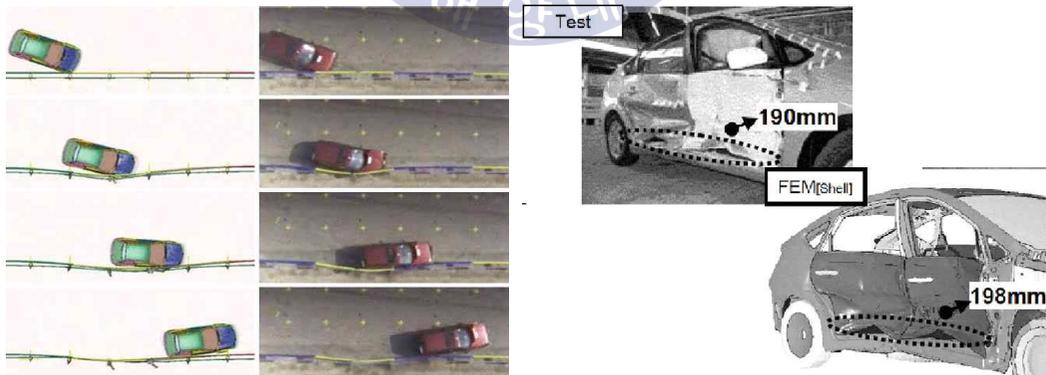


Fig. 2 Test and simulation of guard rail and side collision of car



Fig. 3 Collision and grounding accident damages

실선 충돌, 좌초, 침수, 전복 및 침몰 시뮬레이션을 LS-DYNA 코드의 유체-구조 연성(FSI; Fluid- Structure Interaction) 해석기법의 고도 정밀 M&S 기법을 사용하여 해수와의 다양한 연성효과(coupling effect)을 고려하고 항해하는 선박은 추진력(propulsion force)에 의해 항해하도록 수행함으로써 일반적으로 무중력 진공(void) 상태에서 해수와의 연성효과를 무시하고 수행하는 시뮬레이션 응답거동에 비하여 매우 실제적(realistic)이고 정확한(accurate) 해난사고 원인규명과 구조 안전성 평가(structural safety assessment)가 가능하다. 특히 손상이 발생하는 경우의 해난사고 원인규명이나 구조 안전성 평가에서는 구조적인 손상과 관련된 자료를 면밀히 조사하고 재료의 변형률 효과(strain rate effect) 등을 고려하여 재료의 파단기준(fracture criteria)을 정확히 적용하여야 할 것이다.

해난사고는 육상과 공중에서 발생하는 자동차와 비행기 등의 충돌사고와는 달리 공기의 밀도보다 약 1,000배의 유체에서 발생하므로 해수에서 부양(floating)되고, 6자유도의 운동(motion)도 하고, 선내에 해수도 침수(flooding)되고, 운항 중일 때 파도(wave)도 생성하고, 두 물체가 근접할 경우에는 압착압력(squeezing pressure)이 발생하고, 두 물체가 스쳐 지나거나 안벽과 해저에 근접하게 운항할 경우에는 압력이 저하(banking effect)되는 등 해수에서의 연성효과를 충분히 고려하여 재현하여야 해난사고의 원인을 정확하고 실제적으로 규명 및 분석할 수 있고, 구조 안전성 평가도 합리적으로 추정할 수 있을 것이다. 또한 황천에서 발생하는 해난사고일 경우에는 강한 조류, 강풍 및 해일성 파도

등을 불규칙 스펙트럼을 사용하여 정확히 구현하여야 해난사고의 원인을 정확히 분석할 수 있을 것이다.

육상에서의 자동차 등의 주행 시에는 제동장치에 의한 감속과 급정거가 짧은 시간에 가능하고 선회 시에는 지면에서 발생하므로 어느 정도 견고한 경계(boundary)에서 발생하므로 고도 정밀 M&S 시스템을 이용하여 실물(실선) 충돌 시뮬레이션을 수행할 경우에는 자동차가 지면 위에서 초기 주행속력을 주어 차량이나 주변 지형지물 등과 충돌시키는 것이 일반적이다. 자동차의 중량을 고려하는 경우 지면상에서 주행하도록 하거나 지면이 평면일 경우에는 중력을 무시하여 평면상에서 주행하도록 할 수 있다. 이와는 달리 선박은 운항 중일 경우 자동차와는 달리 제동장치에 의해 감속과 급정거가 가능하지 않고 지면에서와는 달리 해수에 잠겨서 항주하거나 외방경사와 함께 큰 반경으로 선회한다.

고도 정밀 M&S 시스템으로 실선 충돌, 접촉 및 좌초 시뮬레이션을 수행할 경우 육상에서의 지면과는 달리 해수에서 부양되므로 해수와 선체를 연성(coupling) 시켜야 가능하다. 해수와의 연성으로 부양시키지 못할 경우 일반적으로 중력을 무시하여 선박을 진공 상태에서 거동하도록 하거나 평면상에서 거동하도록 구속하여 일반적으로 시뮬레이션을 수행하고 있다. 또한 선속은 일반적으로 육상에서의 자동차 충돌사고의 경우와 같이 초기속력을 적용하고 있으나 해수 중에서 초기속력을 적용할 경우 공기 밀도의 약 1,000배인 해수에서는 해수의 저항으로 바로 정지하게 되어 추진력(propulsion force)으로 실제와 같이 선속을 일정한 시간동안 가하여야 할 것이다.

일반적으로 슬로싱(sloshing) 및 슬래밍(slamming) 등의 유체-구조 연성 해석은 LS-DYNA 코드의 Multi-Material ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian) 정식화와 Euler-Lagrange 연성 알고리즘(coupling algorithm)을 사용하는 이동격자 알고리즘(moving mesh algorithm)과 유체 격자를 구조물에 접칠 수 있는 기능을 사용할 수 있어 매우 편리하게 수행할 수 있다. VOF(Volume Of Fluid) 기법 또한 다양한 비선형 자유수면 문제를 해석하는데 적합하고, Fig. 4와 같은 연성 알고리즘은 실선 선박의 충돌 및 좌초 문제의 유체-구조 연성해석에 적합하다 (Aquelet et al. 2006).

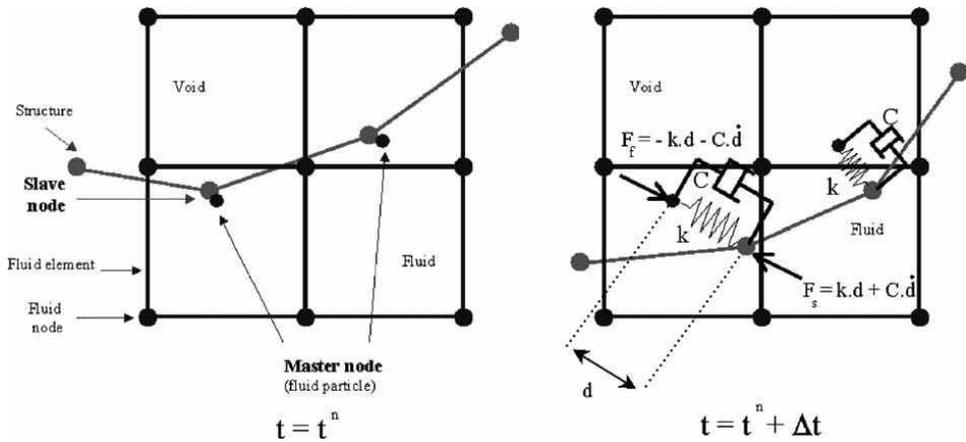


Fig. 4 Sketch of penalty coupling algorithm (Aquelet et al. 2006)

유체-구조 연성 해석기법을 구현하기 위해서는 충돌 및 좌초 시뮬레이션을 구현할 수 있는 유체(해수 및 공기) 영역이 필요하고, 충돌선과 피충돌선 및 좌초선의 해수와의 연성을 위한 모델링과 연성 파라미터들의 조정(calibration)을 통한 해수에서의 부양, 침수 및 추진력을 구현하고, 충돌선과 피충돌선과의 충돌 및 좌초선의 좌초 시나리오에 따른 충돌선의 충돌 부위와 좌초 부위의 상세(fine) 파손(fracture or rupture criterion)에 적합한 모델링을 수행하였다. 충돌선과 피충돌선 및 좌초선의 상세 파손모델은 강재의 파손기준과 충돌속도에 따른 변형률 의존 재료 물성치(strain rate material properties)를 구현하도록 하였다.

본 논문은 유체-구조 연성 해석기법의 고도 정밀 M&S 시스템을 사용하여 해수와의 연성효과 등을 실제적으로 구현하고 선박의 강재 파손기준과 충돌속도에 따른 변형률 의존 재료 물성치를 정확히 구현하여 선박의 충돌사고에 따른 원인규명과 좌초사고에 따른 구조 안전성 평가를 수행하는 실선 충돌 및 좌초 시뮬레이션 기법을 개발하고자 하였다. 또한 일반적으로 실선 충돌 및 좌초 시뮬레이션에 사용되고 있는 공기 중에서의 기법과의 차이점을 보여 주어 본 논문의 시뮬레이션 기법의 우수성을 보여주고자 한다.

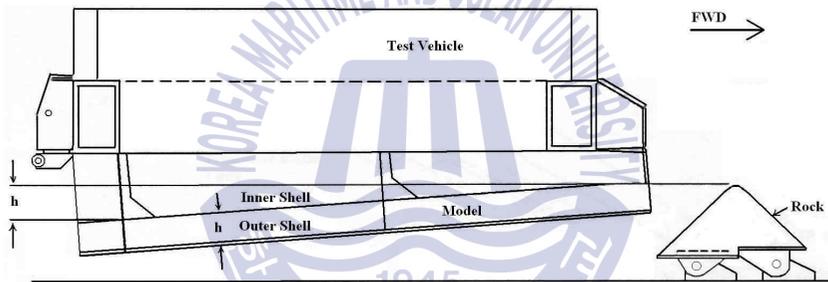
본 연구를 효율적으로 정리하기 위하여 2장에서는 실선 충돌 및 좌초 시뮬레

이선에 사용되었던 선박의 강재의 파단기준에 대하여 이중저 유조선 모델을 이용한 좌초실험과 시뮬레이션을 통하여 자세히 설명하였다. 3장은 124톤 어선이 4,000톤 이상의 화물선에 의해 충돌되어 침몰된 해난사고의 원인규명을 공기중 실선 시뮬레이션을 수행한 경우와 본 연구의 해석기법을 이용한 실선 충돌 시뮬레이션과의 비교 검토를 통하여 본 연구의 해석기법의 우수성을 보여주었다. 4장은 최대설계속력으로 운항중인 좌초선박 준전위 원자력 폐기물 운반선이 만재상태로 선저로부터 2.0m 위로 올라와 있는 암초가 선체 중앙과 중앙에서 3.0m의 선측에 있는 경우에 충돌하는 실선 좌초 시나리오에 대하여 본 연구에서 제안하는 기법을 이용한 시뮬레이션과 공기 중에서의 시뮬레이션을 수행하여 한 구조 안전성 평가를 수행하여 비교 검토하였다. 마지막으로 5장은 본 논문의 결론부로서 연구결과를 종합적으로 분석하였다.

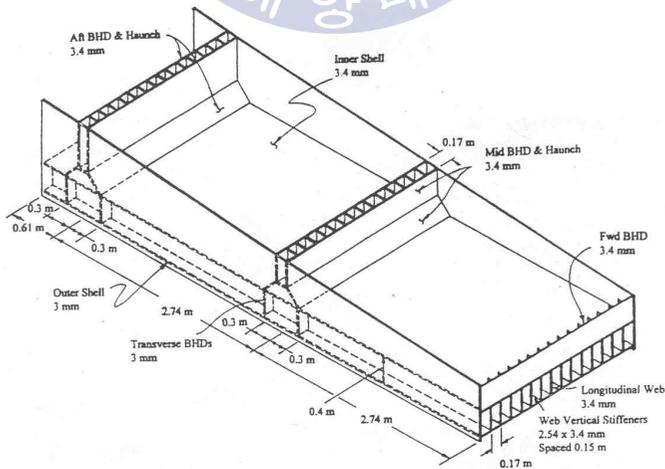


2. 선박 재료의 파단기준

고도 정밀 M&S 시스템을 이용한 실선 충돌 및 좌초 시뮬레이션을 위해서는 선박의 재료의 파단기준은 유한요소 모델링과 실험 및 실측 결과와의 검증을 통하여 추정하는 것이 바람직하다. 일반적으로 NSWC에서 수행한 Fig. 5와 같은 1:5 축적 이중저 유조선 모델의 좌초 실험을 이용하여 유한요소 시뮬레이션의 수행 능력을 검증하고 강재의 파단기준을 설정한다.



(a) double hull grounding model test set up



(b) double hull oil tanker grounding model(ADH/PD328V)

Fig. 5 Grounding test of NSWC(Rodd and Sikora 1995)

Fig. 6과 같은 실험 모델 ADH/PD328V(Rodd and Sikora 1995)의 유한요소 상세모델(fine model)과 거친모델(rough model)을 이용하여 과단 변형률(failure strain) 0.20~0.35에 따른 시뮬레이션과 실험 결과를 비교 검토하였다. Table 1과 같이 ASTM 569 강재 물성치에 변형률 의존 재료 물성치를 사용하였고 응력-변형률 관계는 Fig. 7과 같다.

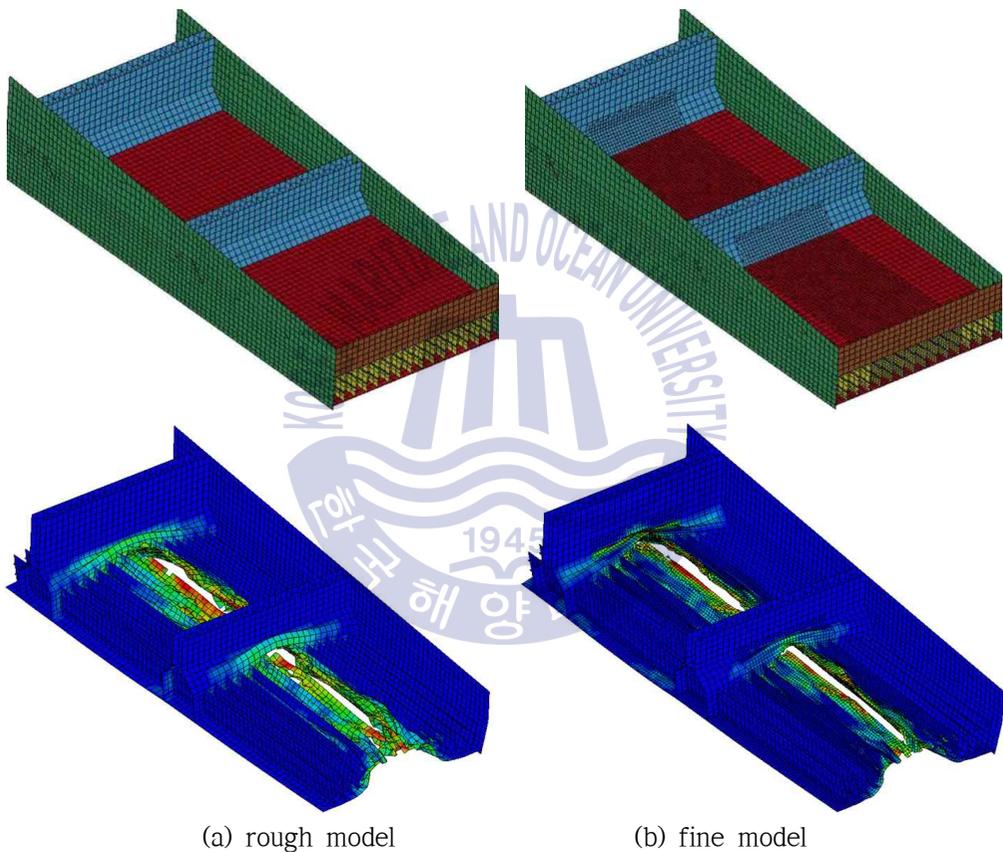


Fig. 6 Grounding test model and simulation of ADH/PD328V model (Lee 2007)

Table 1 Material properties of ASTM 569

Property	ASTM 569
Young's modulus	3.00×10^7 ksi
Density	7.43×10^{-4} lbf·s/in ²
Poisson's ratio	0.30
Yield stress	41.00 ksi
Ultimate stress	50.00 ksi
Failure strain	0.20, 0.25, 0.30, 0.35
Dynamic yield stress constants	$D=40.4 \text{ s}^{-1}$, $q=5$

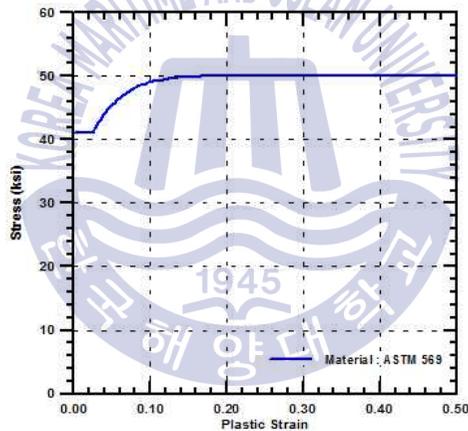
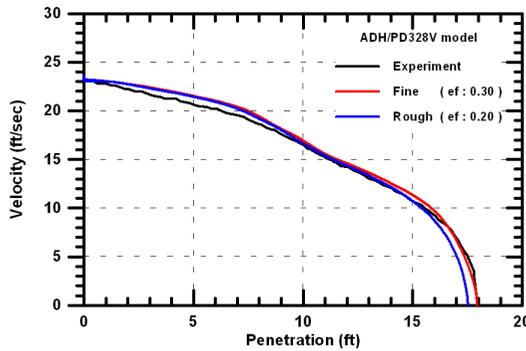


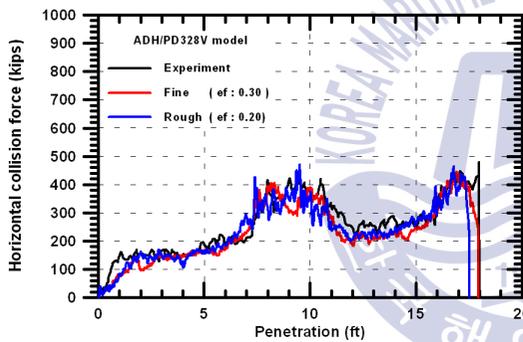
Fig. 7 Stress-strain curve of ASTM 569

본 연구에서는 파단기준의 모델로서 전단변형률 파단모델(shear strain fracture model)을 사용하였고, Fig. 8은 좌초실험에 대한 파단 변형률에 따른 실선 좌초 시뮬레이션의 상세 및 거친 좌초모델의 수평 속력, 수평 및 수직방향의 좌초 충격력에 대한 응답 중 실험결과와 가장 잘 일치하는 경우에 대하여 보여주고 있다. 상세 좌초모델인 경우 파단 변형률은 0.3, 거친 경우에는 0.2가 실험결과에 가장 근접하다는 것을 알 수 있다. 이 결과로부터 강재의 파단기준

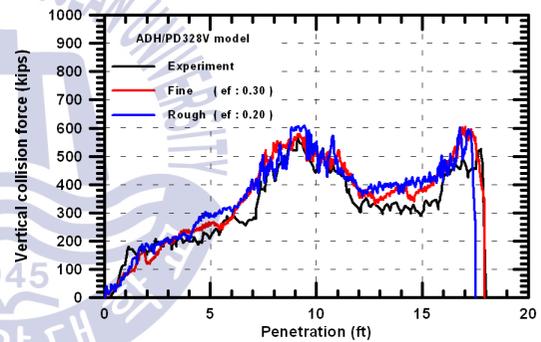
의 파단 변형률은 유한요소 크기(요소길이/두께)에 의해 결정된다는 것을 확인할 수 있었다.



(a) velocity response



(b) horizontal force response



(c) vertical force response

Fig. 8 Comparison of simulation responses to grounding test results of ADH/PD328V (Lee 2007)

3. 충돌사고의 원인규명 시뮬레이션 기법

선박의 충돌사고 원인규명을 해수를 고려한 경우와 공기 중에서 거동하는 경우에 대하여 고도 정밀 M&S 시스템으로 실선 시뮬레이션을 수행한 결과를 이용하여 기법에 따른 선박의 손상거동을 살펴보고자 한다. 배수량 124톤의 어선은 Fig. 9에서와 같이 약 4,000톤 정도의 화물선들을 가로지르다 조타실 후미와 선측에 충돌되고 강물 바닥으로 침몰되어 선원들이 다수 희생된 사례이다. Fig. 10은 피충돌 어선의 조타실 후미와 선측의 손상된 부위를 보여주고 있다. 수직 선수부(vertical bow) 화물선과 구형선수부(bulbous bow) 화물선들 중 어느 화물선에 의해 충돌 되었는지를 규명하는 경우, 해수에 부양된 경우와 무중력 상태의 공기 중에서 충돌되는 경우의 피충돌 어선의 충돌 거동과 손상의 차이점을 살펴보고자 한다.

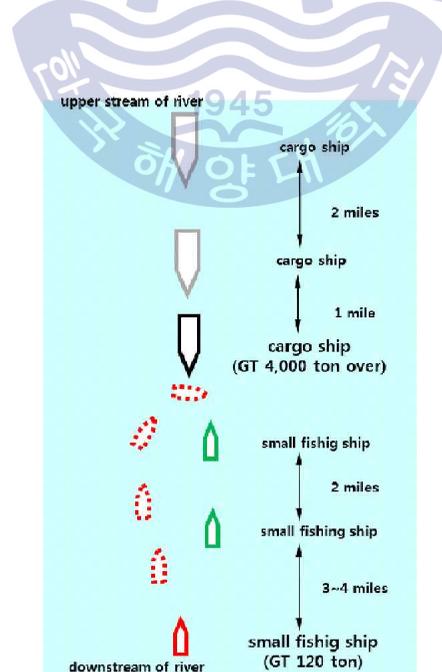


Fig. 9 Collision scenario of struck fishing vessel



Fig. 10 Collision damage configuration of struck fishing vessel

피충돌 어선(LBP 34.40m, B 6.30m, D 2.85m d 1.8m, GT 124 ton)의 실선 충돌 시뮬레이션을 위한 유한요소 모델을 Fig. 11에 보여주고 있고, 수직선수부 화물선(LBP 103.1m, B 16.4m, D 8.55m d 7.1m, GT 4,195 ton)과 구형선수부 화물선들의 유한요소 모델은 Fig. 12에 보여주고 있다. 충돌부위는 상세모델을 하였고 파단 변형률은 이에 맞추어 결정하였다. 본 충돌사고에 의한 Fig. 10에서와 같은 피충돌 어선의 손상자료에 따른 충돌선과 피충돌선의 충돌 각도, 충돌 부위 및 충돌 속력의 충돌 시나리오를 다양하게 유체-구조 연성 해석기법을 이용한 실선 충돌 시뮬레이션을 수행하여 가정 근접한 시나리오를 Fig. 13에 보여주고 있다: 충돌 각도 80° , 충돌선 및 피충돌선의 충돌속력 각각 7 knots 및 5 knots. 여기서 충돌선 및 피충돌선은 추진력을 가하여 충돌속력을 가하였다.

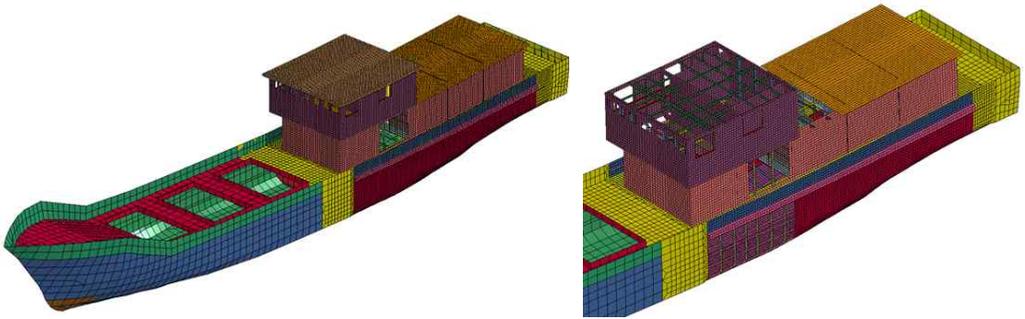
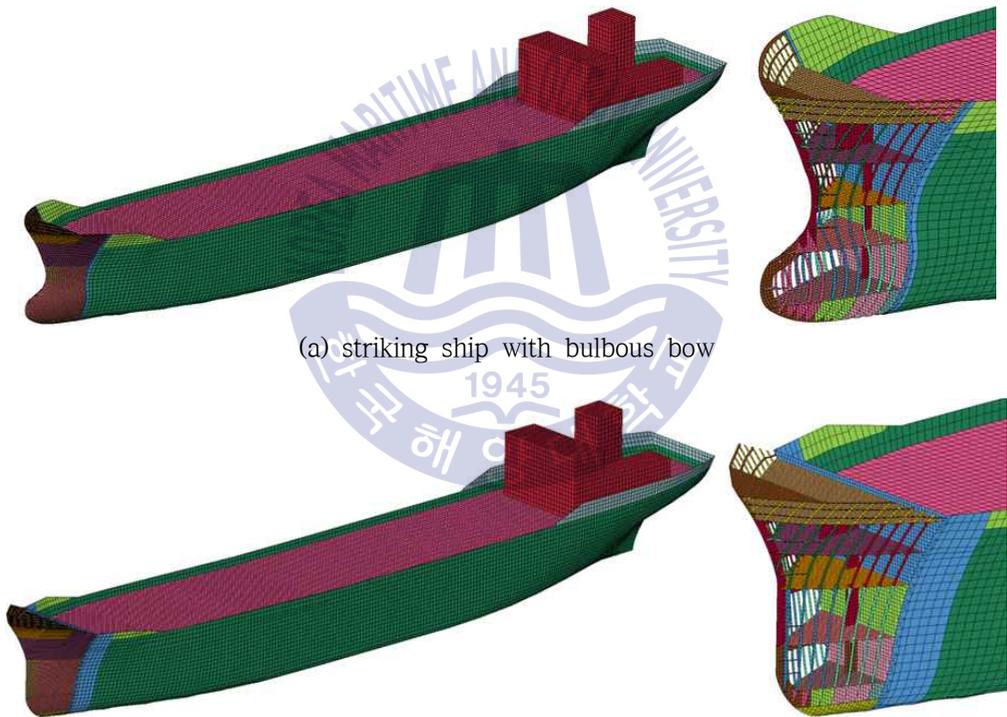


Fig. 11 F.E. mesh configuration of struck fishing vessel



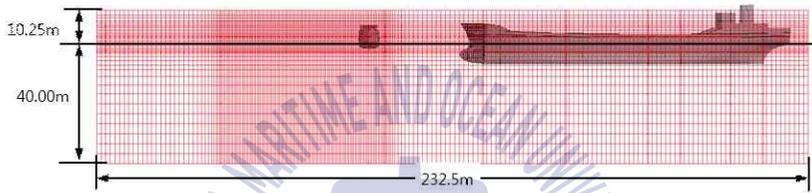
(a) striking ship with bulbous bow

(b) striking ship with vertical bow

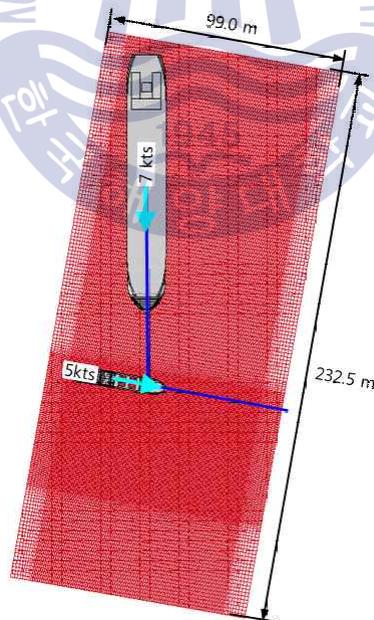
Fig. 12 F.E. mesh configurations of striking cargo ships



(a) iso view



(b) side view



(c) top view

Fig. 13 F.E. mesh configuration and scenario of full-scale collision simulation using FSI analysis technique

유체-구조 연성 해석기법을 이용한 경우와 비교 검토를 위하여 공기 중(void condition)에서의 실선 충돌 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 14는 공기 중에서의 실선 충돌 시뮬레이션을 위한 시나리오를 보여주고 있고, 충돌선은 약 1.1배, 피충돌선은 약 1.8배의 부가질량(added mass)을 고려하였다. 그리고 충돌선과 피충돌선은 각각 7 knots 및 5 knots의 초기속력을 가하였다. 충돌각도와 충돌 부위는 유체-구조 연성 해석기법을 사용한 경우와 동일하게 하였다.

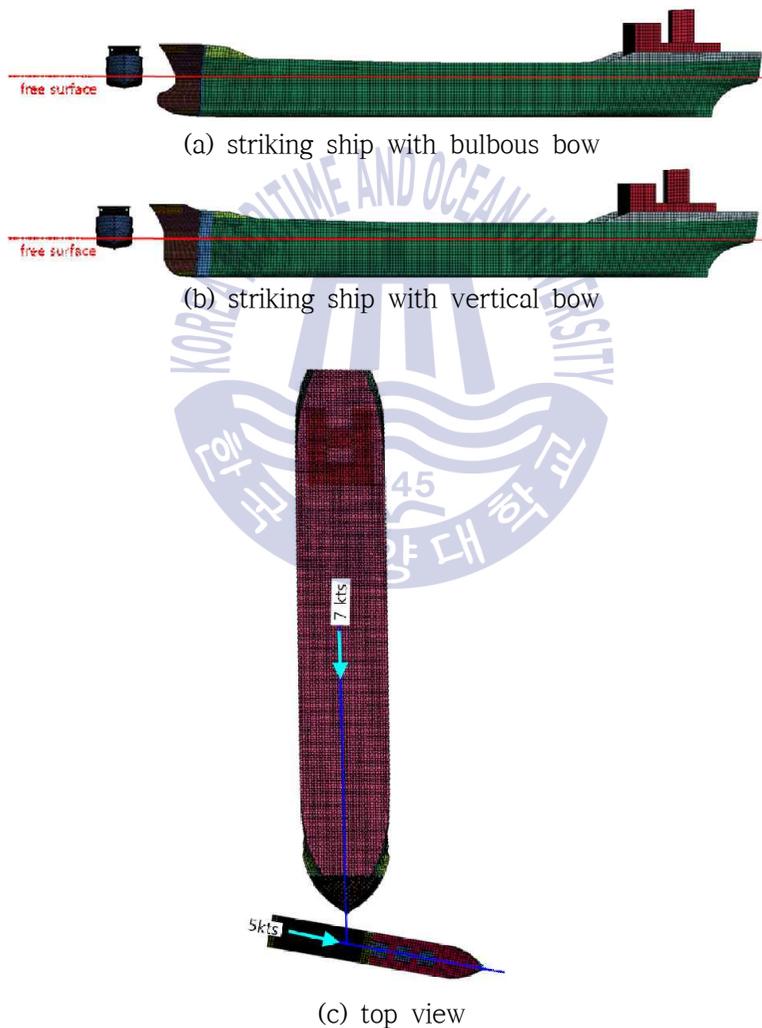


Fig. 14 F.E. mesh configuration and scenario of full-scale collision simulation in void condition

충돌선과 피충돌선의 연강(mild steel)과 고장력강(high tensile steel)에 대한 재료 물성치를 Table 2에서와 같이 Cowper-Symonds 변형률 의존 재료와 파단 변형률을 고려하여 충돌에 의한 파단을 정확하게 구현할 수 있도록 설정하였고, Fig. 15와 같은 재료의 응력-변형률 곡선을 사용하였다.

Table 2 Material properties of mild and high tensile steels

Property	Mild steel	High tensile steel(AH32)	High tensile steel(AH36)
Young's modulus	206.0 GPa	206 GPa	206 GPa
Density	$7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	$7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	$7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Yield stress	235.0 MPa	315.0 MPa	355.0 MPa
Ultimate stress	445.0 MPa	525.0 MPa	565.0 MPa
Failure strain	0.2-0.3	0.2-0.3	0.2-0.3
Dynamic yield stress constants	$D=40.4 \text{ s}^{-1}, q=5$	$D=24,804.6 \text{ s}^{-1}, q=5$	$D=50,194.4 \text{ s}^{-1}, q=5$

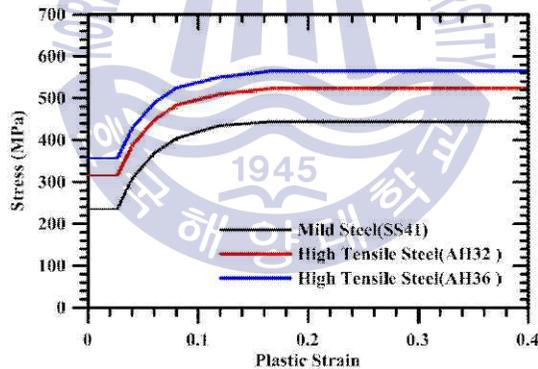


Fig. 15 Stress-strain curve of mild & high tensile steel

Figs. 16~18은 유체-구조 연성 해석기법의 고도 정밀 M&S 시스템을 이용하여 어선의 수직선수부 및 구형선수부 화물선과의 실선 충돌, 전복 및 침몰 시뮬레이션을 수행한 결과를 보여주고 있고, Figs. 19~20은 각 경우에 대한 어선의 충돌 손상응답(응력 및 소성 변형률)을 보여주고 있다. Fig. 16(a) 및 (b)는 각각 구상 및 수직선수부 화물선에 전반적인 초기 충돌, 침수 및 전복하는 거

동을, Fig. 17(a) 및 (b)는 각각 구상 및 수직선수부 화물선에 선측에서의 초기 충돌, 침수 및 전복하는 거동을, Fig. 18은 구상 및 수직선수부 화물선의 침수에 따른 침몰하는 거동과 과정을 보여주고 있다. Figs. 19~20에서 알 수 있듯이 어선의 충돌 손상에 의하면 구상선수부와 수직선수부 화물선에 의해 각각 충돌되어도 서로 비슷하고, Fig. 10의 어선의 손상자료와도 대체로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이것은 어선이 화물선에 비하여 매우 작아서 구상 및 수직선수부 상부의 선수 플레어(flare)에 충돌되었지만 해수에 부양되어 있어서 수면 하의 구상 및 수직선수부와는 접촉 또는 충돌되지 않았고 어선의 선측 상갑판에 이어 하부에 충돌되면서 화물선 선수부와 비껴나면서 침수 및 전복되었다는 것을 알 수 있다.

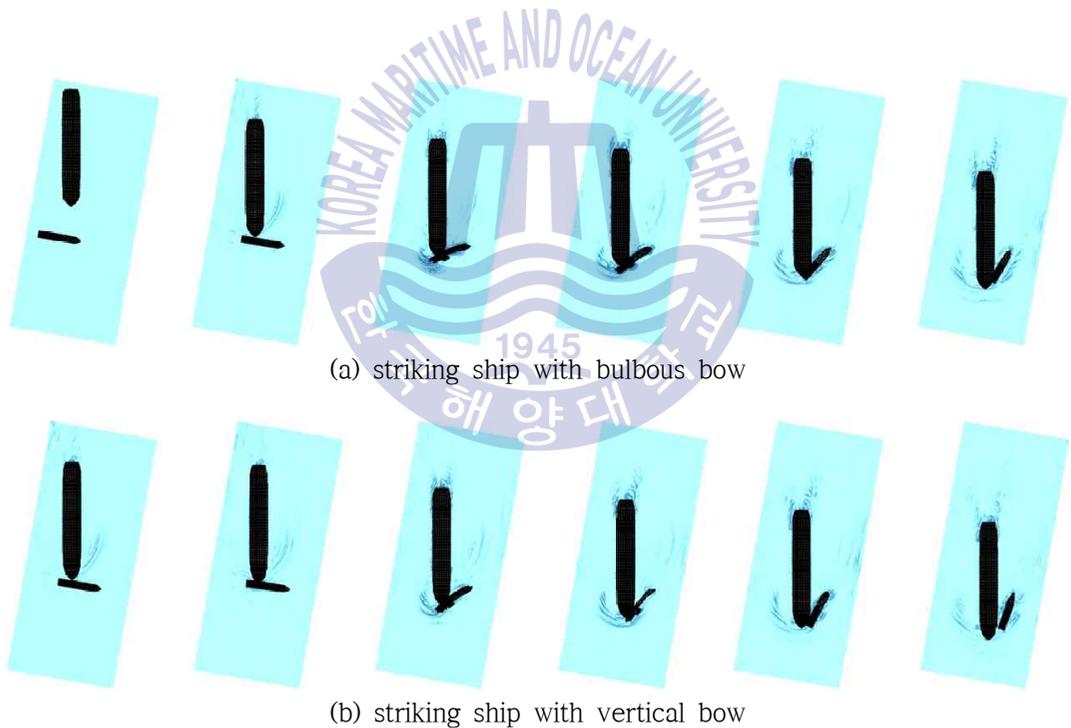
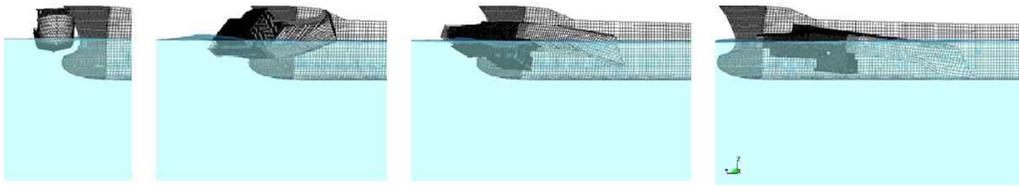
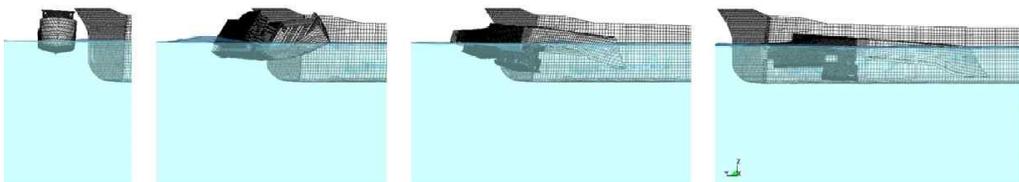


Fig. 16 Overall view of full-scale collision & capsizing simulation behavior using FSI analysis technique



(a) striking ship with bulbous bow

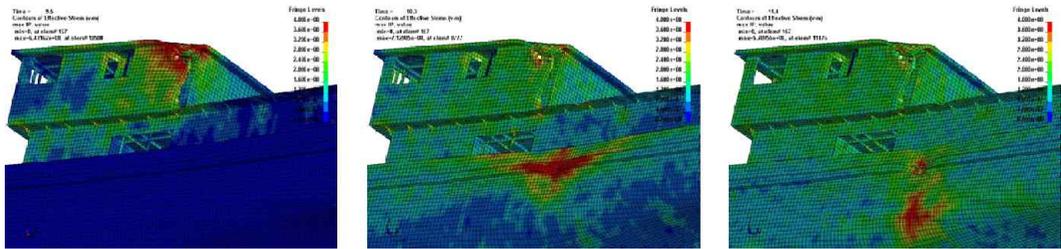


(b) striking ship with vertical bow

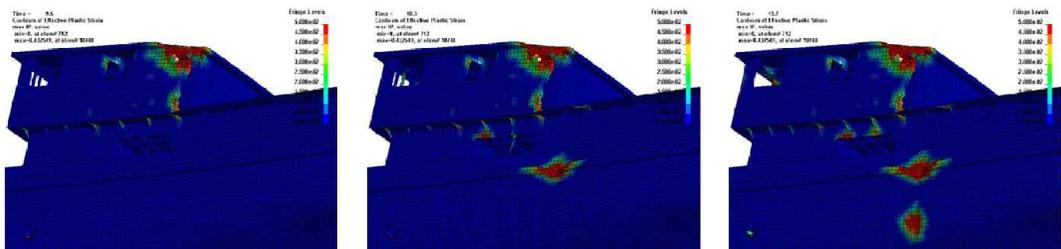
Fig. 17 Side view of full-scale collision & capsize simulation behavior using FSI analysis technique



Fig. 18 Side view of full-scale sinking simulation behavior by striking ships of bulbous & vertical bows using FSI analysis technique

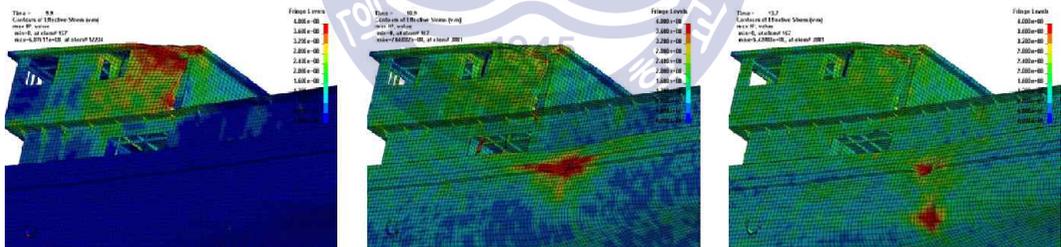


(a) stress

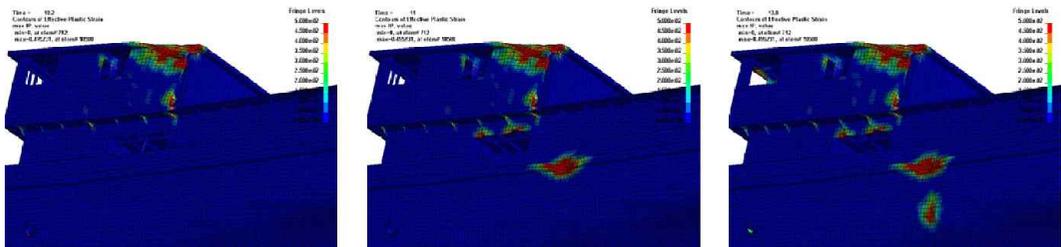


(b) plastic strain

Fig. 19 Stress and plastic strain response of struck ship by striking one with bulbous bow using FSI analysis technique



(a) stress



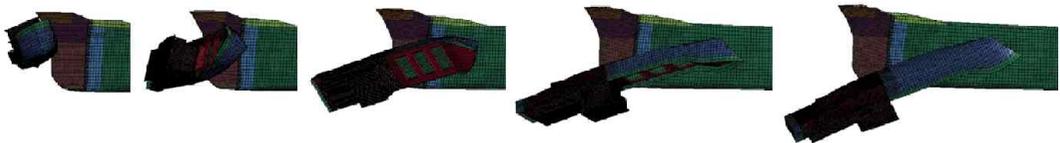
(b) plastic strain

Fig. 20 Stress and plastic strain response of struck ship by striking one with vertical bow using FSI analysis technique

해수를 고려하지 않은 경우에는 Fig. 14에서와 같이 직진하는 화물선과 선측으로 충돌되어 밀려나는 어선에는 선체와 함께 이동하는 주위 해수의 부가질량을 고려하여 시뮬레이션을 하였다. 직진하는 경우에는 약 10%, 선측으로 밀려나는 경우에는 약 80% 정도의 해수 부가질량을 고려하였다. 구상선수부 화물선에 충돌되는 경우 Fig. 21(a)에서와 같이 어선이 수직선수부 화물선의 경우와 같이 경사진 선수 플래어에 충돌된 후 해수에서 부양되지 못하므로 튕겨 나오면서 선저 부위가 구상선수부 상부에 부딪쳐서 위로 튕겨 올라가는 것을 볼 수 있고, Fig. 22에서와 같이 상부 조타실 후미에서만 손상이 발생하는 것을 볼 수 있다. 수직선수부 화물선에 충돌되는 경우는 Fig. 21(b)에서와 같이 경사진 선수 플래어 부위에 충돌되고 튕겨 나오면서 해수에 부양되지 못하므로 선측 하부가 수직선수부에 부딪치면서 아래로 떨어지고 계속 뒤틀리면서 선수부를 비껴나가는 것을 볼 수 있고, Fig. 23에서와 같이 어선의 조타실 상부 후미와 바로 아래의 선측 하부에 충돌 손상이 발생하는 것을 볼 수 있다. 해수 중에서의 실선 시뮬레이션에서는 어선이 선수 플래어에 충돌된 후에도 감속된 추진속력이 남아있기 때문에 선측에 발생하는 손상은 Fig. 10에서와 같이 조타실 후미의 손상보다는 약간 선미쪽으로 뒤쳐져 발생하지만 공기 중에서는 충돌되는 순간에 초기 속력이 크게 감소되어 바로 아래로 튕겨나면서 선측 하부만이 수직선수부에 다시 부딪쳤다는 것을 알 수 있다.

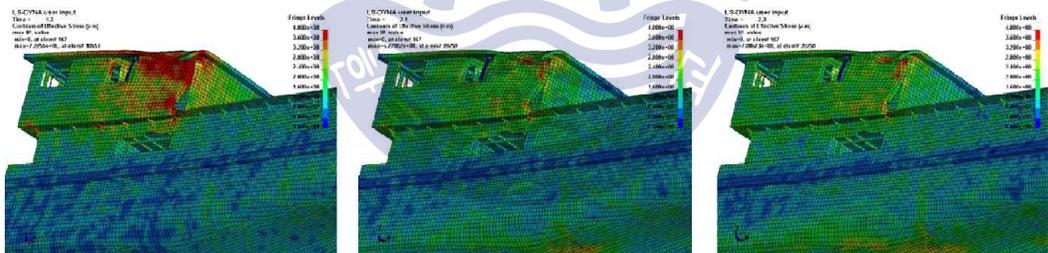


(a) striking ship with bulbous bow

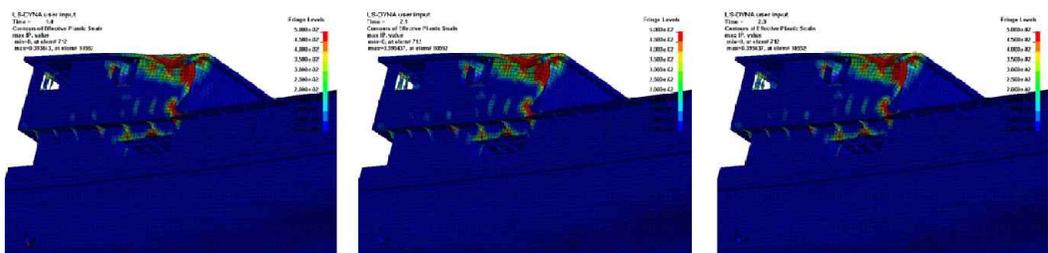


(b) striking ship with vertical bow

Fig. 21 Full-scale collision & capsize simulation behavior of striking ship with bulbous bow in void condition

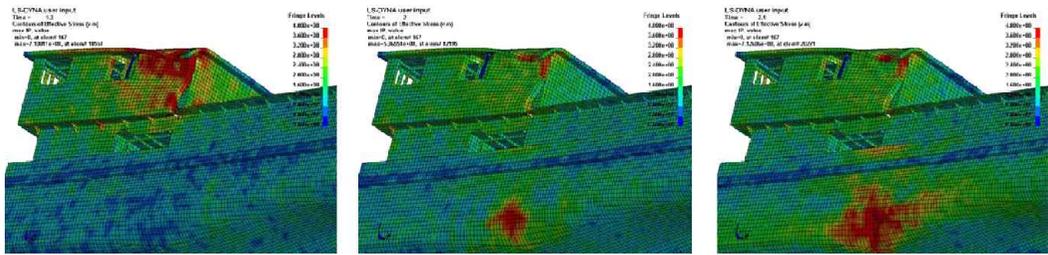


(a) stress

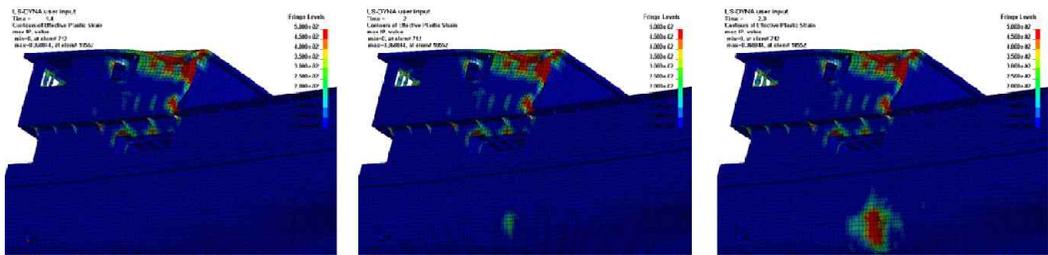


(b) plastic strain

Fig. 22 Stress and plastic strain response of struck ship by striking one with bulbous bow in void condition

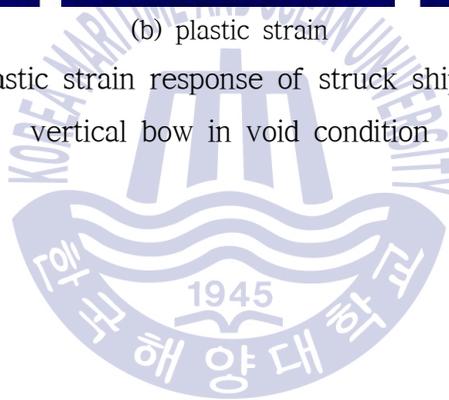


(a) stress



(b) plastic strain

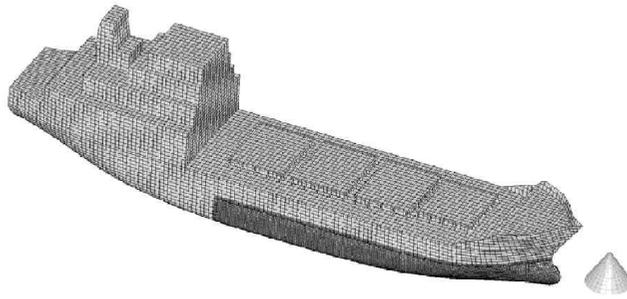
Fig. 23 Stress and plastic strain response of struck ship by striking one with vertical bow in void condition



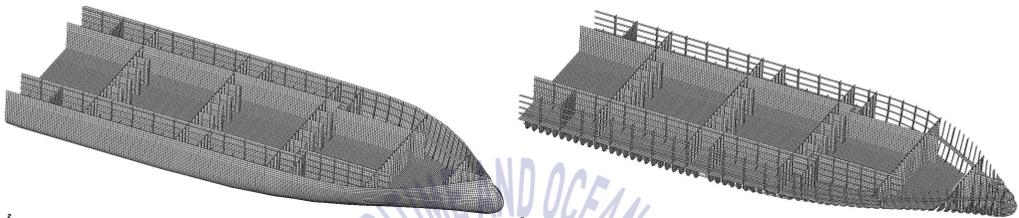
4. 좌초사고의 구조 안전성 평가 시뮬레이션 기법

최대설계속력(12 knots)으로 운항중인 좌초선박 방사성폐기물 운반선박(LBP 71.0m, B 15.8m, D 7.3m d 4.0m, DWT 2,600ton)이 만재상태로 선저로부터 2.0m 위로 올라와 있는 암초가 선체 중앙선과 중앙선에서 3.0m의 선측에 있는 경우에 충돌하는 실선 좌초 시뮬레이션을 수행하여 구조 안전성을 평가하였다. 앞 장에서 유체-구조 연성 해석기법을 사용한 경우와 공기 중에서의 실선 충돌 시뮬레이션을 수행하여 충돌 해난사고 원인규명을 검토한 것과 같이 두 가지 기법을 이용하여 실선 좌초 시뮬레이션을 수행하여 안전성 평가를 비교 검토하였다. 유체-구조 연성 해석기법을 사용한 경우 최대설계속력으로 운항 중인 좌초선박은 추진력에 의해 추진되어 일정한 속력으로 가하여 졌고, 공기 중에서의 경우에는 초기 최대설계속력을 가하였다.

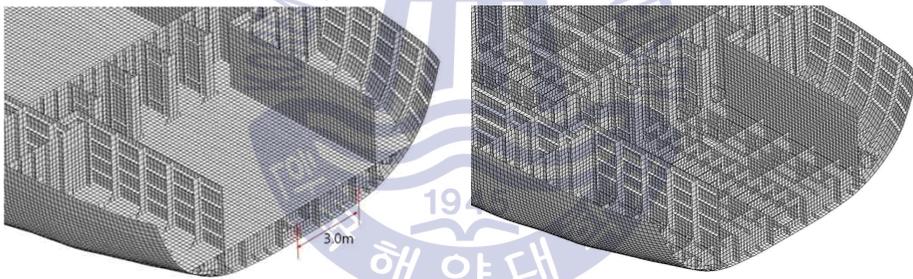
좌초선박의 유한요소 모델은 Fig. 24와 같다. Fig. 24(a)는 전체 좌초선박과 암초 유한요소 모델을, Fig. 24(b)는 선저외판을 포함하거나 제거한 선체 선저부 모델을 보여주고 있다. 또한 Fig. 24(c)는 근거리에서 바라본 선저부 모델과 암초의 폭방향 위치를, Fig. 24(d)는 암초 높이방향의 선저내판으로 부터의 높이와 암초의 제원을 보여주고 있다. Fig. 25는 유체-구조 연성 해석기법을 사용한 실선 좌초 시뮬레이션의 두 가지 좌초 시나리오를 보여주고 있다. 여기서 유체(해수와 공기)를 제거하면 공기 중의 실선 좌초 시나리오에 해당된다.



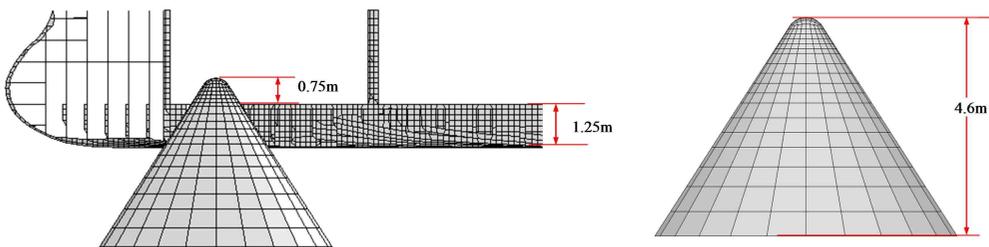
(a) overall view



(b) overall view of double bottom structure



(c) close view of double bottom structure & rock position



(d) rock height & size

Fig. 24 Full-scale grounding simulation model

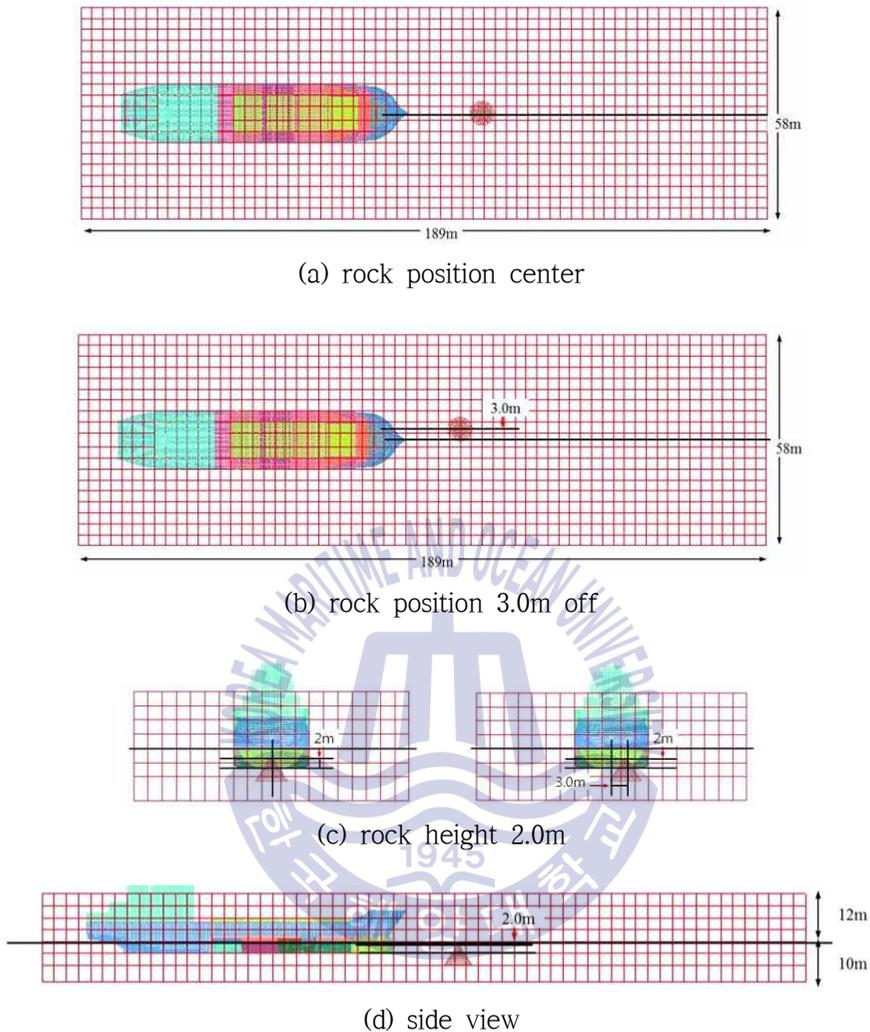
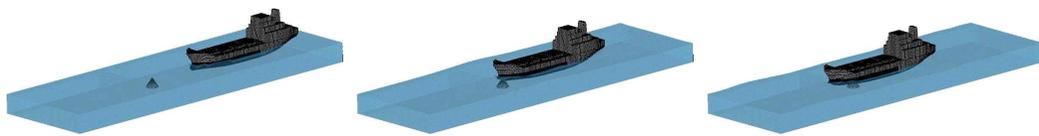


Fig. 25 Full-scale ship grounding scenario of grounding model ship using FSI analysis technique

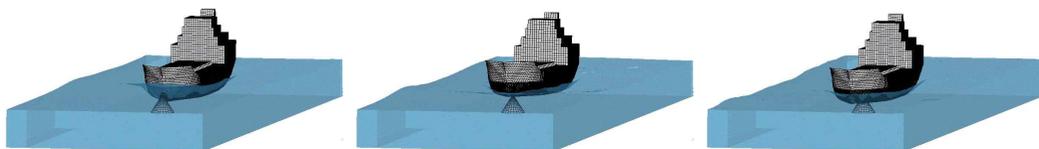
본 연구에서 적용한 유체-구조 연성 해석기법을 사용하면 좌초선박은 해수 중에서 부력에 의해 부상되고 운항하면서 외부 물체와의 충돌에 의한 운동할 수 있어 수면 상에 제한할 필요가 없다. 또한 일반적으로 운항 중인 선박이 긴급한 상황에서도 갑자기 정지시킬 수 없으므로 본 연구에서는 운항 속도를 유지하도록 선박 중심선 방향으로 추진력을 주었고, 선박이 선회할 경우에도 중

중심선 방향으로 연속적으로 추진력이 가하도록 하였다. 암초와의 충돌로 인한 선저구조의 손상 변형에너지에 의해 운동에너지가 자연스럽게 소실되어 정지하게 될 것이다.

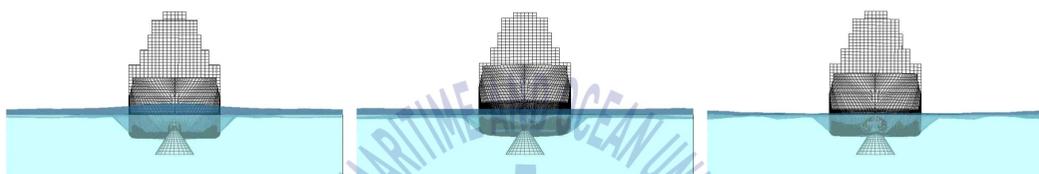
Figs. 26~27은 각각 암초가 종단면 중앙과 선측으로 3.0m 정도 떨어진 있는 경우의 좌초선박 좌초 시나리오에 대한 구조 안전성 평가를 위하여 유체-구조 연성 해석기법을 이용한 고도 정밀 M&S 시스템으로 실선 좌초 시뮬레이션을 수행한 결과를 보여주고 있다. 암초가 선체의 종단면 상에 있는 경우와 선측으로 3.0m 정도 떨어져 있는 경우에 대한 선체의 좌초 거동에서 알 수 있듯이 선박은 해수에서 자중에 의해 부양되어 있고 암초 위치에 따라 부딪치면서 약간 떠오르고 암초를 중심으로 선회도 하는 등 선체의 좌초 거동과 선저에서의 파단 형상은 실제 좌초사고 때와 같이 실제적으로 재현되고 있음을 알 수 있다. 이중저 높이(1.25m)는 일반선박과 별 차이가 없는데도 본 연구에서 고려한 좌초 시나리오에 대하여 만재상태에서 최대설계속력으로 운항하다 선저 내저판에서 0.75m 솟아 있는 암초와 충돌하여도 내저판에는 매우 미미한 파손만 발생하였다는 것은 횡 및 종부재들의 적절한 배치로 내좌초에 우수하다는 것을 시사하고 있다고 사료된다.



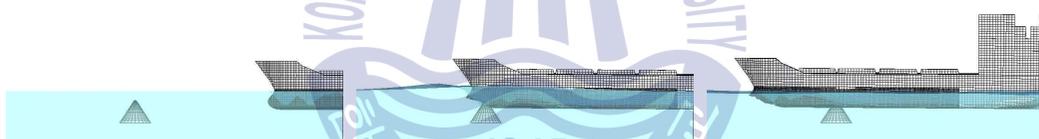
(a) overview in sea water



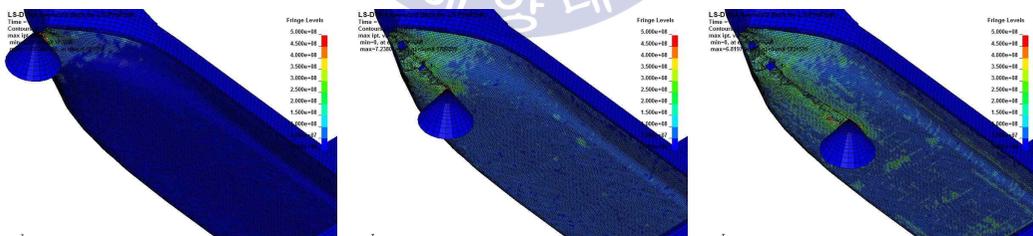
(b) iso view in sea water



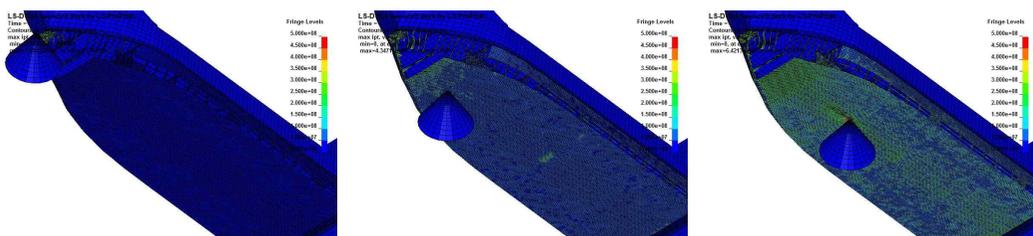
(c) front view in sea water



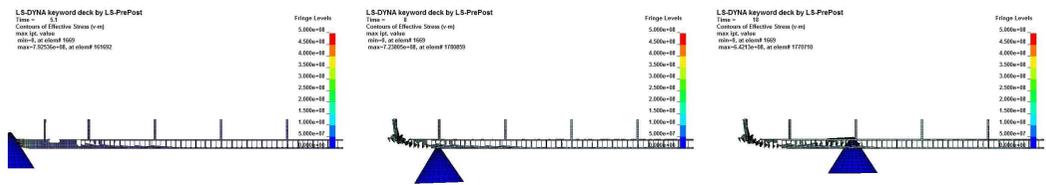
(d) side view in sea water



(e) grounding damage behavior in bottom shell



(f) grounding damage behavior in bottom inner hull

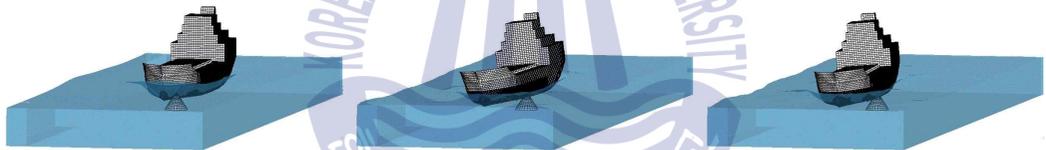


(g) side view of grounding damage behavior in bottom structure

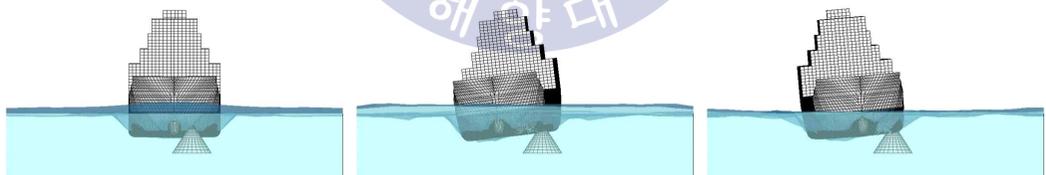
Fig. 26 Grounding response behaviors in full loading condition with rock position center



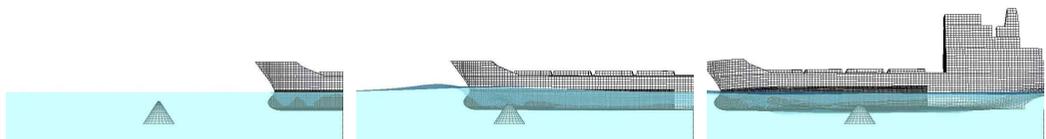
(a) overview in sea water



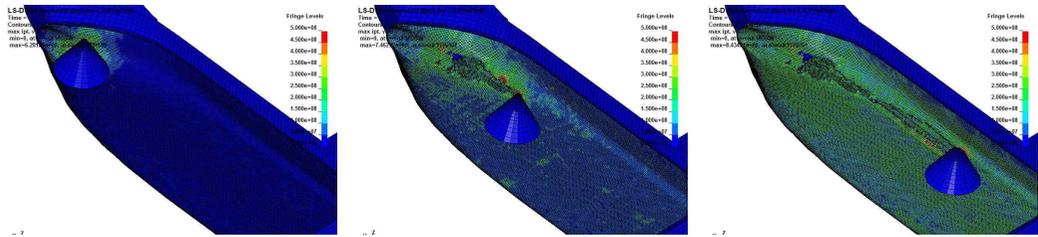
(b) iso view in sea water



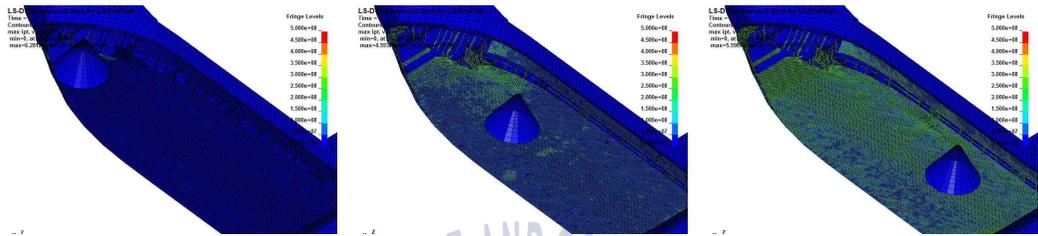
(c) front view in sea water



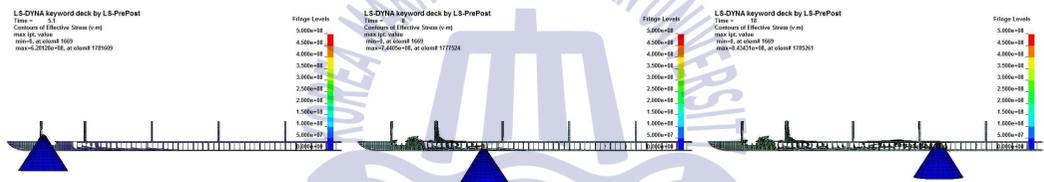
(d) side view in sea water



(e) grounding damage behavior in bottom shell



(f) grounding damage behavior in bottom inner hull



(g) side view of grounding damage behavior in bottom structure

Fig. 27 Grounding response behaviors in full loading condition with rock position 3.0m off

이와는 달리 해수를 고려하지 않는 경우에는 일반적으로 암초와의 실선 좌초 시뮬레이션에서는 공기 중에서 중력을 고려하게 되면 선박은 아래로 떨어지게 되므로 중력을 고려할 수 없게 된다. 이러한 경우에는 좌초선박은 초기속력으로 암초와 충돌하게 되고 초기 운동에너지와 선저구조와의 파손 변형에너지와의 관계에 따라 선체는 전진운동을 하거나 반동에 의해 튕겨나갈 것으로 사료된다. 또 하나 고려할 수 있는 암초와의 좌초 시뮬레이션은 좌초선박을 수면 상에 한정하여 운항하도록 하는 것으로 현재 가장 널리 사용되고 있다. 이러한 경우 좌초선박은 시나리오에서 설정한 암초와의 높이와 위치에서 강제적으로 선저구조와의 충돌로 인한 파손과정을 겪게 되고 초기 운동에너지와 파손 변형

에너지와의 관계에 따라 전진하다가 평면상에서 멈추게 될 것으로 사료된다.

해수를 고려하지 않는 경우에는 Fig. 28과 같이 공기 중에서 무중력 상태로 선체가 초기 속력으로 암초에 부딪치거나 Fig. 29에서와 같이 평면상에서 암초에 초기 속력으로 부딪치도록 시뮬레이션 하는 것이 일반적이며, 해수에서 선체와 함께 이동하는 주위의 해수 부가질량을 약 1.1배 고려하였다. 해수를 고려하지 못할 경우 선체의 좌초 거동이 실제와는 달리 비현실적이고 특히 좌초로 인한 선저 손상도 실제와는 달리 매우 미미하다는 것을 알 수 있었다.

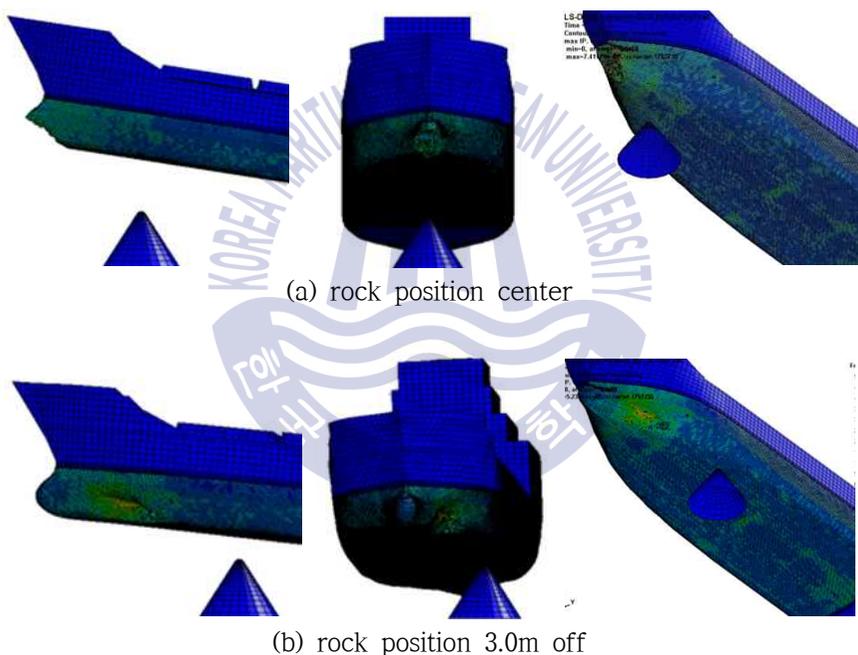
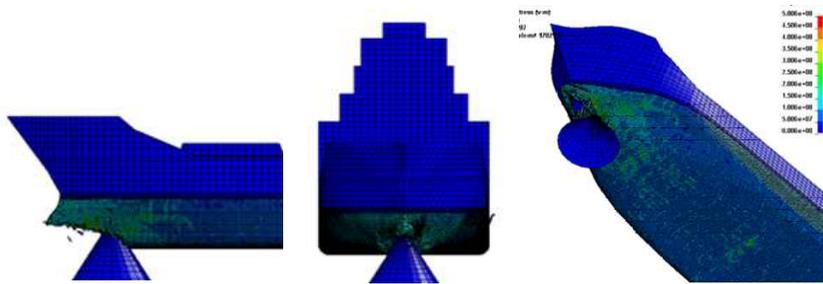
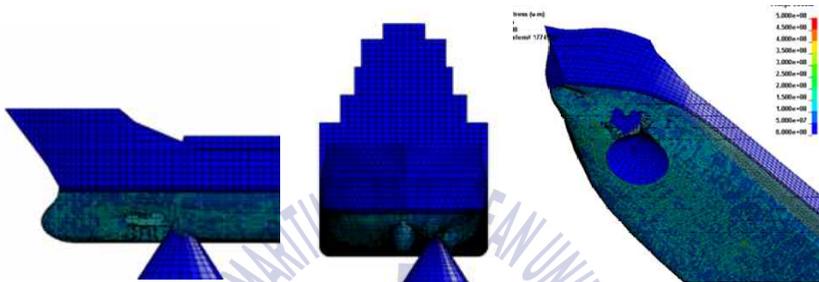


Fig. 28 Grounding response behaviors in full loading condition at free motion according to rock position in void condition

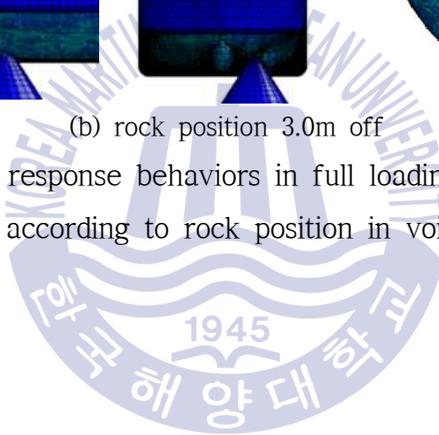


(a) rock position center



(b) rock position 3.0m off

Fig. 29 Grounding response behaviors in full loading condition at plan constraint according to rock position in void condition



5. 고찰 및 결론

공기 중에서의 실선 충돌 시뮬레이션에 의한 충돌 거동과 손상 등은 부가질량을 고려하였지만 비현실적이라는 것을 알 수 있었다. 이것은 소형 어선의 조타기가 대형 화물선의 선수 플레어에 의해 충돌되고 난 후 합리적으로 부력에 의해 지지될 수 없으므로 수면 아래의 충돌선 선수부 구조에 의해 어선의 선측이 충돌되어 이러한 비현실적인 충돌 거동이 발생하게 된 것이다. 보다 정확하고 실제적인 충돌 거동과 손상은 유체-구조 연성 해석기법의 고도 정밀 M&S 시스템을 사용하여 해수 중에서 시뮬레이션을 수행하는 것이 가능하다는 것을 알 수 있었고 또한 시뮬레이션에 의한 손상 응답이 실제 어선의 손상과 거의 일치함을 알 수 있었다.

좌초선박 방사성폐기물 운반선의 실선 좌초 시뮬레이션의 거동과 손상에서도 공기 중에서는 중력에 의한 부력으로 지지할 수 없어 중력을 고려하지 않는 자유로운 경우와 평면상에 제한된 경우 모두 비현실적이었다는 것을 발견할 수 있었다. 이와는 달리 해수 중에서의 실선 좌초 시뮬레이션은 자중에 의해 부양되고 추진력으로 항해가 가능하므로 압초의 위치와 높이에 따라 압초에 부딪치면서 점핑도 하고 압초 주위를 따라 선회도 하는 등 충돌 거동과 손상이 매우 현실적이라는 것을 알 수 있었다. 압초가 내판보다 0.75m나 높았지만 좌초선박의 내판은 손상이 발견되지 않음을 구조 안전성 평가를 통해 추정하였다.

이상에서와 같이 선체가 해수에서 부양된 실선 충돌 및 좌초 시뮬레이션과 공기 중에서의 시뮬레이션에서의 선박의 거동과 손상은 현격히 차이가 있고, 공기 중에서의 시뮬레이션을 통하여 매우 비현실적인 결과를 확인할 수 있었다. 정확한 해난사고의 원인규명과 구조 안전성 평가를 위해서는 해수를 고려할 수 있도록 유체-구조 연성 해석기법을 이용한 고도 정밀 M&S 시스템을 사용하여 실선 시뮬레이션을 수행하는 것이 중요하다는 것을 본 연구를 통하여

다시 한 번 확인할 수 있었다.

이 기법을 이용하여 어선의 충돌에 의한 전복 시 해수의 선내 침수와 함께 수행한 실선 침몰 시뮬레이션 기법과 거친 해상에서의 불규칙 스펙트럼을 이용한 조류, 강풍 및 파랑 등을 구현하는 시뮬레이션 기법 등을 수조에서의 다양한 실험을 통한 검증 작업을 거쳐 보다 완벽한 기법으로 발전시키도록 하여야 할 것이다.



References

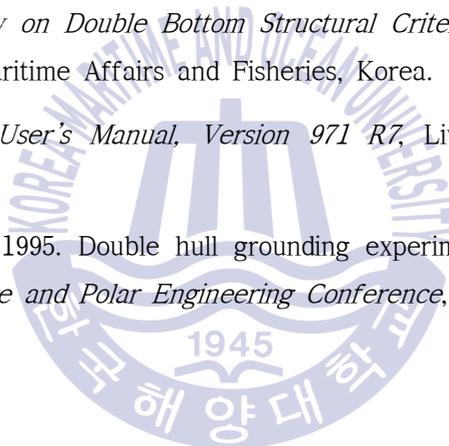
Aquelet, N., Souli, M. and Olovsson, L., 2006. Euler-Lagrange coupling with damping effects: Application to slamming problems, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195, pp. 110-132.

KMST, 2015. KMST(Korea Maritime Safety Tribunal) Judgment Report(2002~2015), <https://data.kmst.go.kr/kmst/verdict/writtenVerdict/selectWrittenVerdict.do>.

Lee, S.G., 2007. *A Study on Double Bottom Structural Criterion of Small Oil Tanker*, Report of Ministry of Maritime Affairs and Fisheries, Korea.

LSTC, 2013. *LS-DYNA User's Manual, Version 971 R7*, Livermore Soft Technology Corp., USA.

Rodd, J. and Sikora, J., 1995. Double hull grounding experiments, *Proceedings of the 5th International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp. 446-456.



감사의 글

본 논문이 완성되기까지 지난 몇 년간 부족함 많은 저를 끊임없이 지적해주시고 이끌어 주신 교수님께 감사드립니다.

또한 본 논문을 위해 끝까지 세심함 심사와 조언을 아끼지 않으신 박석주 교수님과 남중호 교수님께 감사드리며, 학위 과정 중 여러 가지 도움과 격려를 주신 조선해양시스템 공학부의 교수님들께 감사드립니다.

실험실에서 함께하며 항상 조언과 충고를 해주며 많은 도움을 준 재석이형에게 정말 감사하다고 전하고 싶습니다.

그리고 함께하며 많은 도움을 준 환수, 태영, 현섭, 상호, 범수 에게도 너무 고마웠고 마지막으로 매번 항상 믿고 격려해준 부모님들께 감사의 말씀을 드립니다.

