



저작자표시-비영리 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 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 침몰 및 인양 과정에서의
선체 손상 평가 해석에 대한 연구

A study on the analysis of hull damage
assessment in wreck and salvage process of ship

2021년 1월

서울대학교 대학원

조선해양공학과

이 효 철

선박의 침몰 및 인양 과정에서의
선체 손상 평가 해석에 대한 연구

A study on the analysis of hull damage
assessment in wreck and salvage process of ship

지도교수 장 범 선

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2021년 1월

서울대학교 대학원

조선해양공학과

이 효 철

이효철의 공학석사 학위논문을 인준함

2021년 1월

위원장 _____ 노 명 일

부위원장 _____ 장 범 선

위 원 _____ 우 중 훈



국 문 초 록

해상에서 운용되는 선박은 불의의 사고로 인해 침몰할 수 있으며, 이로 인해 경제적 손실 및 해양 환경오염 등 다양한 부작용을 발생시킨다. 특히 대형 여객선의 경우 비가역적인 다량의 인명 손실을 동반하기 때문에 선박 침몰사고 예방을 위한 노력이 더욱 절실하다.

기본적으로 사고 예방을 위해서는 사고 원인 파악을 우선되어야 하며, 침몰 선체의 외부 손상은 사고 원인을 파악하기 위한 중요 증거가 될 수 있다. 따라서 선체 외부 손상에 대한 평가는 사고 원인 파악을 위해 필요하다.

본 논문에서는 선박의 침몰부터 인양 과정에서 발생하는 선체 외관에 대한 손상평가 방법을 3D 구조해석을 통하여 수행하고자 하며, 이에 대한 기법을 아래와 같이 정립하였다.

먼저 침몰 및 인양 과정에서 발생 가능한 선체에 주요하게 손상이 가해지는 상황을 추정하고, 이를 통해 주요 상황별로 적용되는 하중을 계산하여 3D 구조해석에서 단계별로 적용하도록 하였다. 이는 침몰 및 인양과정은 장시간이 소요되므로 전체 과정을 한꺼번에 해석을 수행하는 것은 시간적, 경제적으로 매우 비효율적이기 때문이다.

이후, 개별적으로 분류된 단계별 하중을 독립적으로 적용하되 각각

의 구조해석 결과가 시간의 흐름에 따라 연속적으로 누적되도록 하여 해석의 정확도를 유지하고자 하였다. 이러한 연속적인 해석 기법의 적용 여부는 선체를 가정한 단순 3D 모델에 대해 기법을 적용한 case와 적용하지 않은 case의 최종 손상 상태를 비교하는 case study를 통해 검증하였다.

마지막으로 실제 침몰 및 인양한 여객선을 예시로 상기 정립된 기법을 3D 모델에 적용한 해석을 수행하였다. 이때 장시간에 걸쳐 발생하는 침몰 및 인양 과정에 대해 준 정적인 해석을 수행하기 위하여 단계를 세분화하였으며, 실제 측정 자료를 기반으로 단계별 하중을 추산 및 적용하였다. 최종적으로 실제 선박의 외관 손상과 해석 결과에 대한 비교 시 전반적인 손상 경향이 일치하는 것을 확인할 수 있다.

이러한 결과를 바탕으로 정립된 손상 평가 해석기법이 시간 및 경제적인 효율성을 확보하면서 동시에 손상 경향에 대한 정확성을 유지할 수 있음을 검증하였다. 이를 통해 향후 발생 가능한 침몰 및 인양되는 선박의 손상 평가를 효과적으로 수행함으로써, 사고 원인 파악 및 예방에 기여할 것으로 기대된다.

주요어 : 침몰선박, 인양, 구조해석, 해석 연속성, 손상 평가

학 번 : 2019-21145

목 차

초 록	iii
목 차	iv
그림 목차	vi
1. 서론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 논문 구성	6
1.3 관련 연구 현황	6
2. 침몰 및 인양 과정 분류 및 하중 계산	9
2.1 침몰 및 인양 과정 분류	9
2.2 침몰 후 착저시 충돌 단계	10
2.3 착저 후 침하 단계	11
2.4 인양 단계	13
3. 압입 실험 결과 비교를 통한 FE 모델 검증	15
3.1 압입 실험	16
3.1.1 압입 실험 구성	18
3.1.1 압입 실험 방법	19
3.2 압입 실험 FE 모델	20
3.2.1 압입 실험 FE 모델 구성	20

3.2.2	압입 실험 FE 모델 구성	21
3.3.	결과 비교	22
4.	단순 FE 모델을 통한 해석 연속 기법 검증	25
4.1.	해석의 연속성 적용 기법	25
4.1.1	Deformed shape, Residual stress, Plastic strain import	28
4.1.2	Deformed shape import only	28
4.2.	단순 FE 모델 구성	29
4.2.1	단순화된 침몰 선체 FE 모델	29
4.2.2	단순화된 화물 FE 모델	30
4.2.3	단순화된 해저지반 FE 모델	31
4.2.4	단순화된 인양장비 FE 모델	32
4.2.5	단순화된 FE 모델 물성치	33
4.3.	단순 FE 모델 해석	36
4.3.1	단계별 해석 방법	36
4.3.2	단계별 작용 하중	39
4.3.3	해석 case의 선정	39
4.4.	해석 Case 별 결과 및 비교	40
5.	실제 사고 사례에 대한 기법 적용	42
5.1.	사고 선박의 형상 및 제원	43
5.2.	사고 선박의 손상	44
5.3.	실제 사고 사례 해석 FE 모델	46

5.3.1 사고 선체 FE 모델	46
5.3.2 사고 선박 적재 화물 FE 모델	47
5.3.3 해저지반 FE 모델	48
5.3.4 인양장구 FE 모델	48
5.4. 실제 사고 사례 해석 FE 모델	49
5.4.1 실제 선체 FE 모델 단계별 해석 방법	49
5.4.2 실제 사고 사례 FE 해석 모델 적용 하중	53
5.4.3 실제 사고 사례 FE 해석 case study 선정	55
5.4.4 FE 모델 해석 결과 case 선정 및 실제 손상과 비교	56
6. 결론	61
참고문헌	63
Abstract	65

그림 목차

그림 1. 국내 해양사고 발생 건수 및 척수 현황	1
그림 2. 선박 침몰 사고 발생 및 인양	2
그림 3. 시간의 흐름에 따른 침몰 및 인양 과정 예시	3
그림 4. 단계별 해석 결과 전달 기법 개요도	5
그림 5. 침몰 후 충돌 단계 개요도	10
그림 6. 착저 후 침하 단계 개요도	12
그림 7. 인양 단계 개요도	14
그림 8. 압입 실험 구성	17
그림 9. 압입기 및 실험 패널 단면 형상	17
그림 10. 압입 실험 패널 재료 Stress-Strain 선도	19
그림 11. 압입 실험 FE 모델 형상 및 경계조건	20
그림 12. 압입 실험 Plate 손상 형상 비교	21
그림 13. 압입 실험 Force-Displacement 선도 비교	22
그림 14. Predefined field - initial state 기능 window	25
그림 15. Restart 기능 window	25
그림 16. Deformed configuration import 기능	26
그림 17. 침몰 선체 box 모델 형상	27
그림 18. 침몰 선체 box 모델 내부 및 화물 sphere 모델 형상(iso view) ..	28

그림 19. 해저지반 FE 모델 형상	28
그림 20. 리프팅 빔 모델 형상	29
그림 21. 단순 FE 모델 적용 물성치 별 Stress-Strain 선도	29
그림 22. 단순 FE 모델 단계별 해석 개요도	29
그림 23. 단순 FE 모델 Case별 해석 개요도	29
그림 24. 단순 FE 모델 Case A 결과	41
그림 25. 단순 FE 모델 Case B 결과	41
그림 26. 단순 FE 모델 Case A와 B 비교 분석	42
그림 27. 사고 선박 형상	43
그림 28. Side shell 파단부 sketch 현황	44
그림 29. 사고 선박 주요 손상부 web frame 별 sketch 현황	45
그림 30. 사고 선박 FE 모델 형상	46
그림 31. 사고 선박 FE 모델 fine mesh area 및 실제 선박 주요 손상부	47
그림 32. 사고 선박 적재 화물 FE 모델 형상	48
그림 33. 리프팅 빔 번호 및 설치 위치	49
그림 34. 리프팅 빔 FE 모델	49
그림 35. 실제 사고 FE 모델 단계별 해석 개요도	49
그림 35. 실제 사고 FE 모델 단계별 해석 개요도	51
그림 36. 단계 미구분 Step 1. ~ 3. 일괄 해석 수행 결과	52

그림 37. 연속적인 해석 기법 적용 개요도	53
그림 38. 침몰 중 추가적인 침수에 따른 침수구역 증가	54
그림 39. Pressure area 선정을 위한 case study	55
그림 40. 실제 사고 해석 선체 FE 모델 좌현 후부 손상 누적	57
그림 41. 실제 사고 사례 FE 해석 모델 case 별 결과 비교	57
그림 42. 실제 사고 사례 FE 해석 모델 case 별 fine mesh area 손상 비교 ..	58
그림 43. FE 해석 결과와 좌현 Side shell 파단부 sketch 비교	59
그림 44. 사고 선박 주요 손상부 web frame 별 sketch 현황	60

1. 서론

1.1. 연구 배경 및 목적

해상에서 운용되는 선박 및 해양구조물은 다양한 원인으로 인해 충돌, 접촉, 좌초, 전복, 화재 및 폭발 등의 사고가 발생하고 있으며, 국내 발생 해상사고 역시 그림 1 과 같이 매년 증가하고 있는 추세이다.

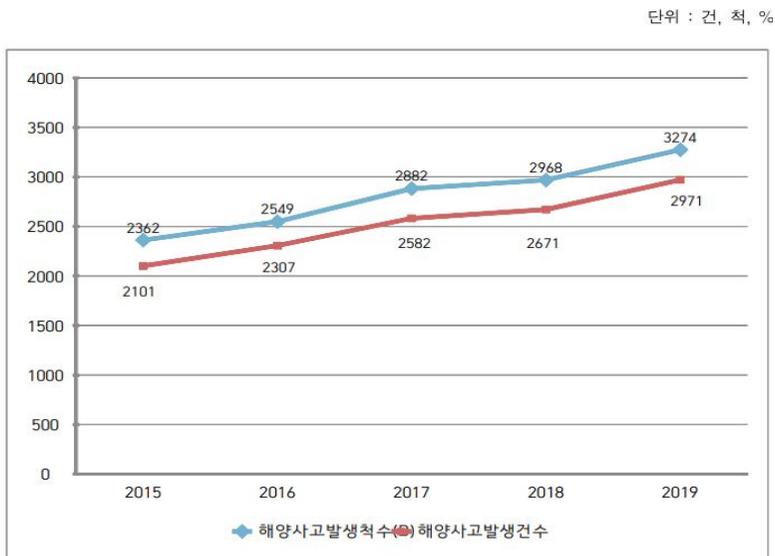


그림 1. 국내 해양사고 발생 건수 및 척수 현황 (해양심판원, 2019)

이러한 사고에 의해 선박이 침몰하게 되면 일반적으로 발생하는 경제적 손실 및 환경오염뿐만 아니라 회생이 불가능한 인명 손실이 발생하며, 특히 대형 여객선의 경우에는 피해 규모가 더욱 크고 치

명적이다. 따라서 이를 예방하기 위한 대책 마련이 요구된다.

사고를 예방하기 위해서는 기본적으로 사고의 원인을 찾는 것이 중요하며, 사고 원인을 추정하는데 있어 침몰한 선박의 외관 손상은 가장 직접적인 증거가 될 것이다.

따라서 그림 2 와 같이 선박 침몰이 발생하면 해당 선박을 인양한 뒤 선체 외관에 대해 조사하는 것이 가장 효과적인 사고 원인 규명 절차이다.



그림 2. 선박 침몰 사고 발생 및 인양

침몰 선박의 외관 손상 평가를 위해 현재 가장 정확한 방법은 실제 선체와 동일한 모형을 제작하여 사고 당시와 동일한 환경을 조성한 뒤 재현하는 것이다. 하지만 이러한 방법은 모형의 형태와 제작, 적절한 물성치 계산 및 적용, 동일한 환경 조성이 동반되어야 하므로 시간 및 경제적인 측면에서 적절하지 못한 방법이다.

또 다른 침몰 선박 외관 손상평가 방법으로는 3D 시뮬레이션을 통한 구조해석을 수행하는 방법이 있다. 이 방법을 이용할 경우 모델링 및 환경 조성을 컴퓨터를 이용하여 수행하기 때문에 실제 모형

을 통한 재현 실험에 대비하여 시간 및 비용이 크게 절약되는 장점이 있다. 단, 이 경우 3D 시뮬레이션을 통한 구조 해석결과의 정확성에 대한 검증이 필요하다.

3D 시뮬레이션을 구성할 때 가장 직관적인 기법은 침몰 선체와 동일한 모델링을 수행하고, 하중 및 기타 조건을 실제 시간에 맞추어 적용하는 방법이다.

하지만 실제 침몰부터 인양까지 발생하는 시간은 일반적으로 그림 3.의 예시와 같이 장시간이 소요되기 때문에 이를 3D 시뮬레이션에 그대로 반영하는 것은 실제 모형을 통한 실험에 못지않은 비용이 발생한다.

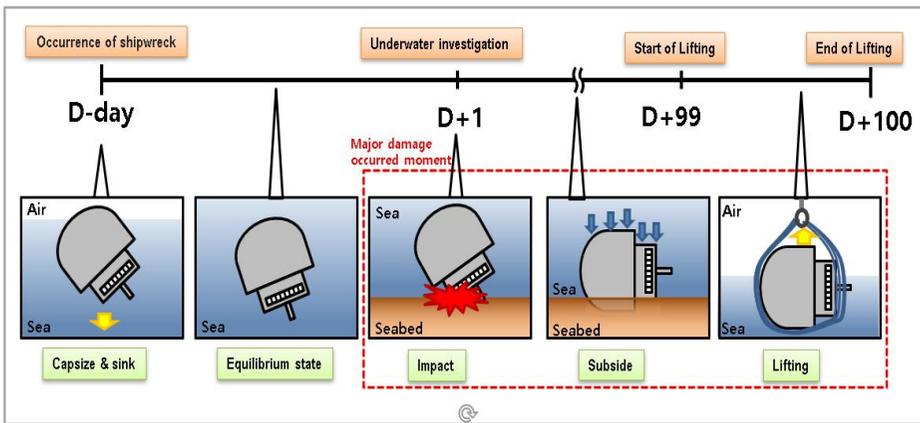


그림 3. 시간의 흐름에 따른 침몰 및 인양 과정 예시

또한 침몰사고가 불시에 발생하는 급박한 상황임을 감안하였을 때 작용하는 하중 및 범위, 기타 환경의 변화를 시간의 흐름에 따라 정

확히 계측하는 것은 불가능하다. 따라서 실제 시간에 따른 하중 및 조건 변화를 적용하는 것 역시 어렵다.

본 연구는 시간 및 경제적인 비용의 효율성을 고려한 3D 시뮬레이션을 수행하면서, 동시에 정확성을 확보할 수 손상평가 기법을 제안하고, 이에 대한 검증을 목표로 한다.

먼저, 작용 하중 계산을 수행하며, 이를 위해 전체 과정 중 주요하게 손상이 일어난 상황을 추정하고 포착하여 각각에 대해 작용하는 하중을 추산한다. 기본적으로 조사 및 측정을 통해 얻은 실제 데이터를 기반으로 계산을 해야 한다. 여기서 주로 고려해야 할 사항은 침몰 중의 상황이다. 이는 일반적으로 선체 외부 손상이 없을 경우, 침수는 매우 느린 속도로 되면서 장시간의 중성 부력 상태를 유지하기 때문이다. 따라서 침몰 중 하중의 다양한 변화는 적절히 가정하여 추산하는 것이 필요하다.

다음으로, 추산된 하중을 기준으로 단계(step)를 나누어 해석을 수행한다. 이때 해석에 사용하는 모델은 유한요소법(Finite Element Method, FEM) 기반의 상용 프로그램인 ABAQUS[2]를 사용하여 모델링 하며, 모델링 기준 및 손상 거동에 대한 검증을 위해 Alsos 등이 2009년 수행하였던 압입 실험(indentation test)[3]와의 결과를 사용한다.

이후, 해석의 정확성을 확보하기 위해 단계별 독립적으로 수행된 해석결과의 연속성을 유지하도록 한다. 연속성 유지를 위해서 그림

4 와 같이 단계별 해석결과를 시간의 흐름에 따라 다음 단계의 초기상태로 전달(import)하는 기법을 적용한다. 이러한 기법의 유효성을 확인하기 위해 단순화한 박스 형태(Simplified box shaped)의 FE(Finite Element, FE) 모델을 예시로 해당 기법을 적용한 case와 적용하지 않은 case를 비교한다.

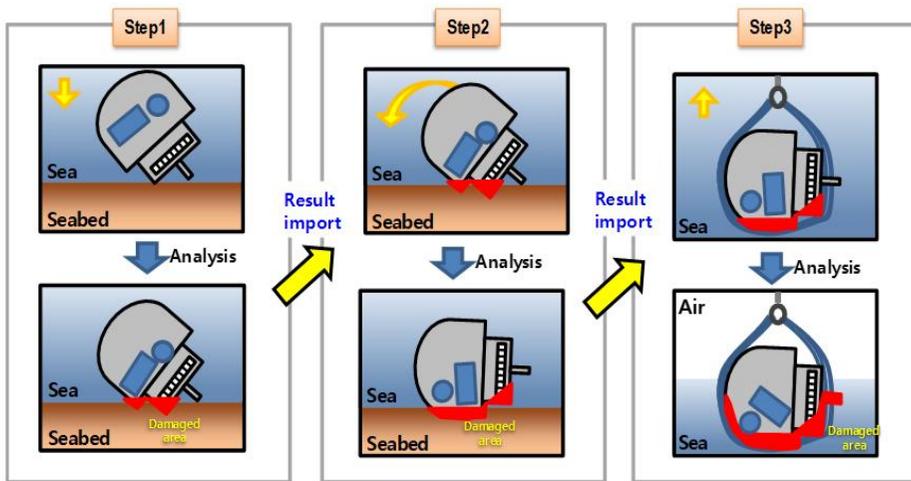


그림 4. 단계별 해석 결과 전달 기법 개요도

마지막으로, 앞서 확립한 기법을 사용하여 실제 사고가 일어난 대형 여객선에 대한 해석을 수행하였다. 이를 위해 실제 선박과 동일한 형태로 FE 모델을 만들고, 계측 데이터를 활용하여 단계별 하중을 적용한다. 단, 하중 적용 범위가 명확하게 추론하기 어려운 경우에는 case study를 통해 결과를 비교·분석 하여 하중 적용 범위를 결정할 수 있다.

1.2. 논문 구성

1장에서는 본 연구의 배경 및 목적, 논문 구성, 관련 연구 현황에 대해 기술하였다. 2장에서는 침몰 선박 손상에 주요하게 가해지는 하중에 대해 분류하고 설명하였다. 3장에서는 3D 시뮬레이션을 위한 FE 해석 모델에 대한 검증 방법을 기술하였고, 4장에서는 2장에서 분류한 해석을 연속적으로 수행하는 기법에 대해 단순 FE 모델에 적용 및 검증하였다. 마지막으로 5장에서는 실제 선박에서 발생한 손상과 4장에서 검증한 기법을 적용한 FE 모델과의 비교를 통해 손상 평가를 수행하였다. 또한 본 연구의 한계 및 향후 발전방향에 대하여 기술하였다.

1.3. 관련 연구 현황

관련 연구는 현재까지 수행된 침몰 및 인양되는 선박에 대한 연구 사항을 중심으로, 다음 사항을 확인하였다.

- 1) 선체 침몰 및 인양 시 가해지는 하중 계산 여부
- 2) 동적 시뮬레이션 수행 여부
- 3) Full 3D 구조해석 수행 여부

Byun et al. (2001) 및 Dewei et al. (2020)은 공통적으로 침몰한 선박의 인양력 계산에 대해 연구하였다. 이중 Byun et al. 은 해저 저질에 따른 인양력 변화를 기반으로 한 계산 프로그램을 개발하였

고. Dewei et al. 은 인양 폰툰(salvage pontoon)을 이용한 인양시의 인양력을 고려한 계산방안을 제시하였다. 하지만 침몰시 작용하는 하중 계산 및 시뮬레이션 수행, 인양력에 의한 선박의 구조 변화에 대한 내용은 포함되지 않았다.

Lee et al. (2016)의 연구는 선박의 충돌(collision) 및 좌초(grounding)로 인한 침몰 발생시 전체 과정에 대한 3D 시뮬레이션 및 유체연성구조(Fluid Structure Interaction, FSI)해석을 수행하였다. 하지만 해석 모델에 대한 물성치에 대한 설명 외 해석에 작용하는 하중에 대한 자료가 전무 하였다.

Stewart et al. (2017)은 2014년 4월경 침몰한 여객선 세월호에 대해 인양력 계산 및 동역학 기반의 상용 프로그램을 이용한 Orcaflex 시뮬레이션을 수행하였으며, 구조변화에 대해서 ANSYS를 이용한 3D 해석을 수행하였지만, 정확한 데이터를 명시하지 않았다는 한계점이 있다.

Ham et al. (2018)의 연구는 선박 침몰부터 인양까지 전 과정에 대한 작용 하중 계산을 하였으며, 자체 개발 프로그램을 통해 다물체 동역학 기반의 시뮬레이션 수행 및 인양 장구 등에 의해 발생하는 마찰력에 의한 구조변형을 고려하였다. 하지만 FE 기반의 3D 구조 해석을 할 경우 시뮬레이션 결과 기반 data를 이용한 추가적인 해석이 필요하였다.

본 연구에서는 침몰 및 인양 시 발생하는 하중에 대한 계산 방법을 제시하고 상용 프로그램을 이용한 3D 동역학 시뮬레이션 수행 및 FE 기반 구조해석을 수행하였으며, 동시에 해석 결과의 연속성을 반영하는 기법을 제시하고 이에 대해 검증하였다.

Authors	침몰 및 인양에 대한 작용 하중 계산	동적 시뮬레이션 수행	Full 3D 구조해석	해석결과 의 연속성
Byun et al. (2001)	△	X	X	X
Kim et al. (2016)	X	X	△	X
Lee et al. (2016)	X	○	○	X
Stewart et al. (2017)	△	○	△	X
Hamet al. (2018)	○	○	△	X
Dewei et al. (2020)	△	X	X	X
This study	○	○	○	○

표 1. 관련 연구 비교 현황

2. 침몰 및 인양 시 단계별 하중 계산

2장은 침몰 및 인양과정에서 발생하는 하중에 대한 적용 기준 및 계산을 설명한다. 2.1 절에서는 선체 구조 변형에 주요하게 기여하는 상황을 분류하는 일반적인 기준을 설명한다. 2.2, 2.3, 2.4 절에서는 앞서 2.1 절에서 분류한 상황을 상세히 설명하고 각 단계별로 적용되는 하중에 대한 계산 방법의 기준을 제안한다.

2.1. 침몰 및 인양시 주요 상황 분류

선박 침몰 및 인양시 구조 손상에 주요하게 기여하는 상황은 크게 다음과 같이 분류하였다.

- 1) 침몰 후 착저 시 충돌
- 2) 착저 후 자중에 의한 침하
- 3) 인양시 인양 장비와의 상호작용

이러한 기준은 순수하게 침몰부터 인양까지 발생하는 하중에 대해서만 고려하였으며, 충돌이나 폭발 등과 같이 특수한 상황에서 발생하는 하중 및 구조 변형은 고려하지 않았다. 단, 상황에 따라 이를 기준으로 더욱 세부적으로 분류하는 것은 가능하다.

2.2. 침몰 후 착저시 충돌 단계

선박이 모종의 이유로 침몰하게 되면 그림 5 와 같은 절차로 최종적으로 해저지반에 충돌하여 손상된다.

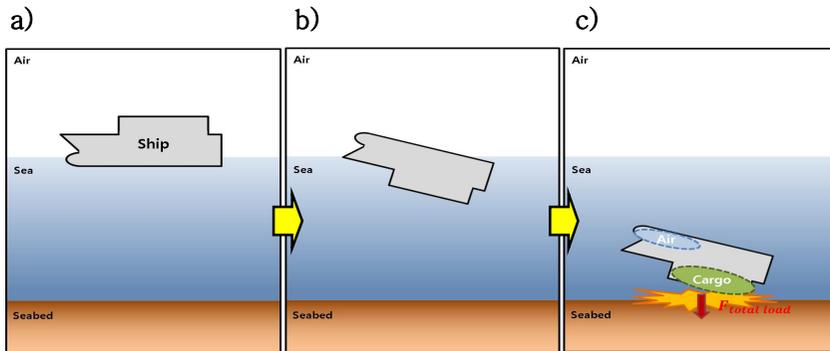


그림 5. 침몰 후 충돌 단계 개요도 : a) 사고 발생 전
b) 사고 발생 후 전복 c) 해저지반 충돌

이때 선박은 선체의 무게($F_{w.s.}$)와 내부 적재 화물의 무게($F_{w.c.}$), 잔존공기(air pocket)에 의한 부력($F_{a.p.}$)이 작용한 하중을 받게 되며, 이는 식 (1) 과 같이 표현된다.

$$F_{totalload} = F_{w.s.} + F_{w.c.} - F_{a.p.} \quad (1)$$

$$F_{weight} = (\rho_{material} - \rho_{s.w.}) \cdot g \cdot \nabla_{material} \quad (2)$$

선체 무게($F_{w.s.}$) 및 내부 적재 화물 무게($F_{w.c.}$)은 식 (2) 와 같이 계산되며, $\rho_{material}$ 은 선체 및 화물 등 해당 물체의 밀도, $\rho_{s.w.}$ 는 해수의 밀도, g 는 중력가속도, $\nabla_{material}$ 은 물체의 부피를 의미한다.

여기서 $\rho_{material}$ 에서 $\rho_{s.w.}$ 를 제외하는 이유는 자체 부피에 의해 해수에서 발생하는 부력을 고려하였기 때문이다.

위와 같이 계산된 총 하중($F_{totalload}$)을 이용하여 식 (3) 과 같이 표현할 수 있다. 수중에서 발생하는 항력(F_{drag})과 전체 질량(M_{total})을 이용한 의해 선박의 침몰 가속도($a_{sinking}$)가 결정되며, 이중 항력(F_{drag})은 식 (4) 과 같이 계산할 수 있다.

$$a_{sinking} = (F_{totalload} - F_{drag})/M_{total} \quad (3)$$

$$F_{drag} = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho_{s.w.} \cdot S_{ship} \cdot V_{sinking}^2 \quad (4)$$

여기서 C_d 는 항력계수(drag coefficient), S_{ship} 은 선체의 투영면적(projected area), $V_{sinking}$ 은 선박의 침몰 속도를 의미한다. 여기서 선박 손상이 적은 경우 매우 작은 침몰 가속도($a_{sinking}$)가 작용한다. 따라서 침몰 속도($V_{sinking}$) 역시 현저히 느리게 작용하게 되므로 이 경우 항력은 무시할 수 있다(negligible).

2.3. 착저 후 침하단계

침몰 선박은 해저지반에 충돌한 후 그림 6 과 같이 무게중심에 따라 한쪽 현측으로 착저한다. 이후 시간의 흐름에 따라 선체 내부에 있는 잔존 공기가 사라지고, mud(진흙)가 선체 내부로 유입된다. 이

렇게 최종적으로 결정되는 총 하중에 의해 해저지반(seabed) 위에서 침하됨에 따라 손상이 발생한다.

이때 인양방식에 따라 인양에 필요한 장비를 설치하는 사전 작업을 수행할 수 있으며, 이러한 작업 여부에 따라 인양 장비에 의한 추가적인 상호작용(interaction)이 발생할 수 있다.

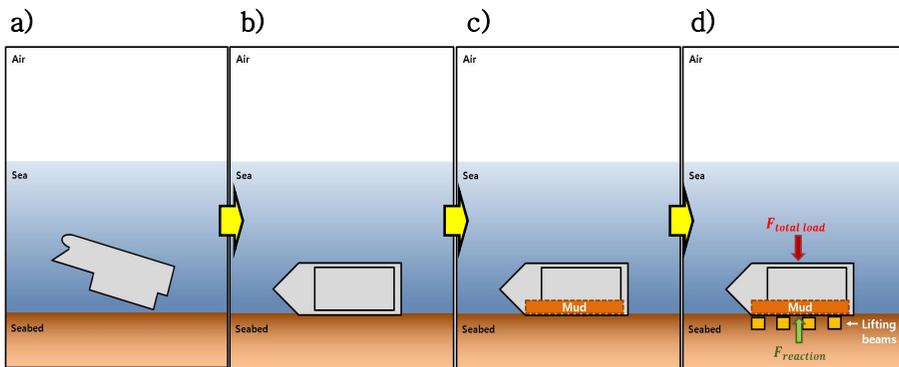


그림 6. 착저 후 침하 단계 개요도 : a) 해저지반 충돌 직후 b) 완전 착저 c) mud 내부 유입 d) 인양 장비(리프팅 빔 등) 설치 및 침하

이 과정에서 작용하는 총 하중은 식 (5) 와 같이 계산한다.

$$F_{totalload} = F_{w.s.} + F_{w.c.} + F_{w.m.} \quad (5)$$

$F_{w.m.}$ 은 선내 유입된 mud의 무게이며, mud의 무게 계산은 상황에 따라 두 가지 방법으로 산출할 수 있다.

첫 번째 방법은 인양 전 내부에 유입된 mud의 밀도 및 부피를 수 중 조사를 통해 확인한 뒤 식 (2) 와 같은 방법으로 계산하는 방법

이다. 이 방법은 실제 인양 작업 전 인양력과 작용 하중을 계산하여 시뮬레이션 수행 및 구조해석이 가능하다는 장점이 있으나, 수중 조사에 따른 시간적 및 경제적인 비용이 들어가며 정확도가 떨어진다는 단점이 있다.

두 번째 방법은 인양이 완료된 상황에서의 측정된 총 무게를 이용하여 역으로 산출하는 방법으로 측정된 총 무게에서 선체, 화물, 인양장비의 무게를 제외하면 mud의 무게를 구할 수 있게 된다. 이러한 방법은 실측자료를 이용하기 때문에 첫 번째 방법보다 정확하나, 인양 작업 및 측정이 완료된 후에 산출이 가능하다는 단점이 있다.

2.4. 인양 단계

선체 인양 시에는 선체에 작용하는 총 하중에 의해 선체와 인양장비의 마찰 등 상호작용에 의한 손상이 발생한다.

인양 방법으로는 부력부양(Buoyant lifts), 조석부양(Tidal lifts), 해상 크레인(Winch or Floating crane), 배수(Draining) 등 다양한 방법으로 수행할 수 있으며,[6] 본 논문에서는 그림 7 과 같이 해상 크레인을 이용한 인양법을 예시로 적용하였다.

인양 작업 중 해상 크레인 및 인양 선체는 파도 및 조류 등의 요인으로 인한 동적 거동(Dynamic behavior)를 보인다. 따라서 인양 작업에서는 이러한 동적 효과를 고려하기 위해 총 하중에 동적 증

폭 계수(Dynamic Amplitude Factor, DAF)를 적용한다.[8] 이중 해상에서의 동적 증폭 계수(DAF)는 표 2.를 기준하여 반영한다.

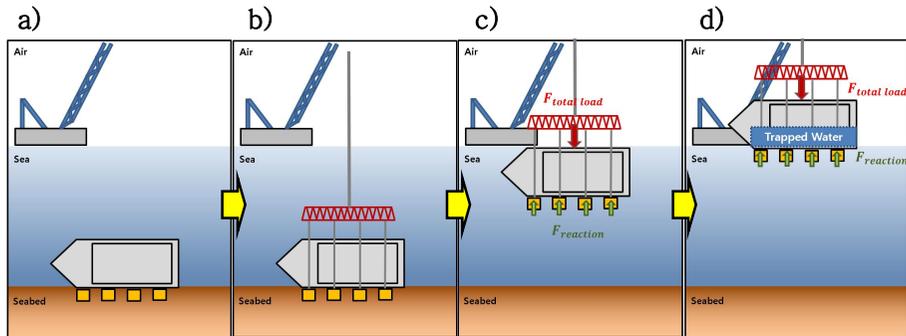


그림 7. 인양 단계 개요도 : a) 리프팅 크레인 도착
b) 인양 장비(와이어 등) 설치 c) 인양(수면하) d) 인양(수면상)

SHL(Static Hook Load)	DAF Offshore
< 100 t	$1+0.25\sqrt{100/SHL}$
100 ~ 300 t	1.25
300 ~ 1,000 t	1.20
1,000 ~ 2,500 t	1.15
> 2,500 t	1.10

표 2. 동적 증폭 계수(DAF) 적용 기준(DNV-OS-H205, 2014)

표 2 를 적용하기 위한 주의사항은 적용 가능한 최대 유의파고 (Significant wave height, H_s)이 어떻게 되는지이다. 이에 대한 기준은 SHL(정적 후크 하중, Static Hook Load) 이 100t보다 클 경우 해상 크레인의 밸러스트가 포함된 인양 작업시 작용 가능한 유의파고는 1 ~ 1.5m, SHL이 100t 보다 작은 경우 적용 가능한 유의 파고

는 2.5 ~ 3.5m이다. 일반적인 인양 작업이 파고 1 ~ 1.5m 이하일 때 이루어지는 것을 고려하면 해당 표의 값을 적용하는 것에 이상이 없다.

인양 작업 시 총 하중에 대한 계산은 수면 하 및 수면 상이 각각 다르며, 각각 식 (6) 와 식 (7) 와 같이 계산된다.

$$F_{totalload} = (F_{w.s.} + F_{w.c.} + F_{w.m.} + F_{drag}) \times DAF \quad (6)$$

$$F_{totalload} = \left\{ (F_{w.s.} + F_{b.s.}) + (F_{w.c.} + F_{b.c.}) + \left(F_{w.m.} \cdot \frac{\rho_{mudbulk}}{\rho_{mudparticle}} \right) + F_{w.t.} \right\} \times DAF \quad (7)$$

이때 식 (6) 에서 항력(F_{drag})의 경우 일반적인 인양 속도가 현저히 느리므로 무시할 수 있다.

식 (7) 에서 $F_{b.s.}$ 및 $F_{b.c.}$ 는 각각 선박 및 화물 자체 무게에 의한 부력이며, 이는 선체 및 화물 등이 수면상으로 나오면서 부력이 더 이상 작용하지 않기 때문이다.

여기서 $\rho_{mudbulk}$ 은 수면 상에서 적용하는 mud의 밀도, $\rho_{mudparticle}$ 은 수면 하에서 적용하는 mud의 밀도이며, 이는 토질이 갖는 특성으로, mud 입자 사이에 존재하는 공극(pore space)에 채워지는 유체(해수)와 공기의 밀도 차이로 인해 발생한다. $F_{w.t.}$ 는 인양 직후 선체 내에 잔존하는 해수(trapped water)에 의한 하중이다.

3. 압입 실험 결과 비교를 통한 FE 모델 검증

3장은 3D 시뮬레이션을 수행하기에 앞서 FE 모델에 대한 기준 정립 및 신뢰성 확인을 목적으로 한다. 이를 위해서 Alsos 등 이 2009년에 수행한 압입 실험 결과를 적용한다. FE 모델링의 경우 상용 프로그램인 ABAQUS를 사용하며, 실제 실험과 동일한 조건으로 모델링하여 수치해석을 수행하여 도출한 결과를 비교한다. 3.1 절에서는 압입 실험의 개요 및 구성에 대해 기술하였고, 3.2 절에서는 FE 모델에 대해 기술하였으며, 3.3 절에서는 실험 결과와 FE 해석 결과를 비교하였다.

3.1. 압입 실험

해당 실험은 선박의 충돌(collision) 및 좌초(stranding) 발생 시 선체 외판(hull plate)이 침투(penetration)에 어떻게 저항하는지에 대한 내용을 실험하기 위한 목적이다. 이를 위하여 실험은 해저 장애물에 의한 큰 접촉력(contact force)가 선체 외판에 가해지면서, 이로 인해 국부적인 침투(local penetration)이 일어나는 것을 가정한다. 실험 장비는 그림 8 과 같이 압입기(indenter), 실험 패널(test panel)로 단순하게 구성된다. 즉, 실험에서 압입기는 바위(rock)를, 실험 패널에서 직접 압입기에 닿는 plate는 선체 외판을 가정한다.

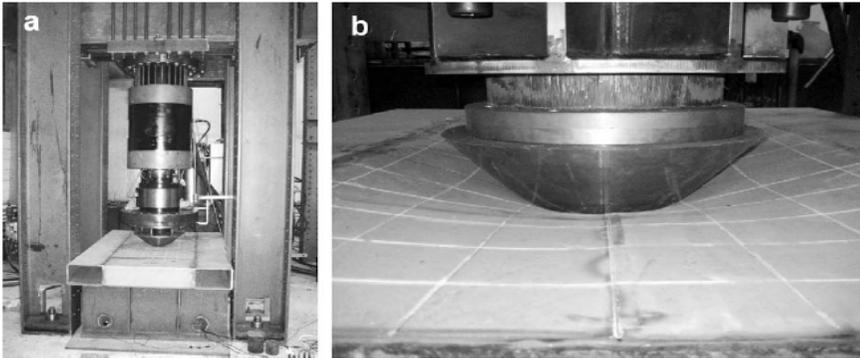


그림 8. 압입 실험 구성 : a) 유압 장치(압입기) 및 실험 패널 및 사진
 b) 압입 실험 중 압입기 및 시험패널 사진(Alsos et al., 2009)

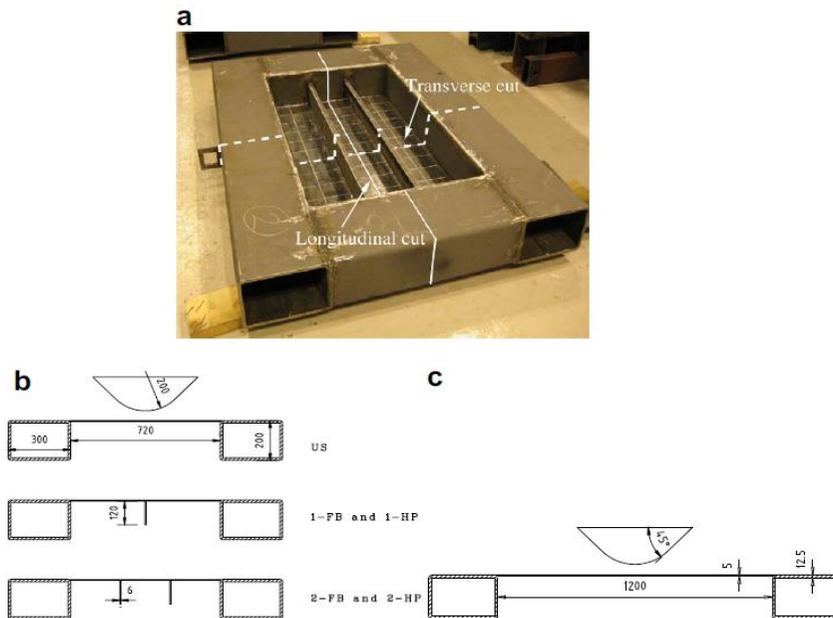


그림 9. 압입기 및 실험 패널 단면 형상 : a) 실험 패널 사진
 b) 가로 방향 단면 c) 세로 방향 단면(Alsos et al., 2009)

3.1.1. 압입 실험 구성

먼저 그림 9 에서 보는 것과 같이 실험 구성품의 형상을 보면, 압입기는 구형(sphere)의 코(nose)를 가진 원뿔 형태(corn shape)로 직경은 200mm 이다. 실험 패널은 선체를 가정한 실험 plate와 실험 plate에 부착되어 있는 stiffener, 실험 plate를 고정하는 박스 형태의 frame으로 구성되어 있으며, 실험 plate는 길이 1,200mm,, 너비 720mm,, 두께 5mm, frame은 높이 200mm, 너비 300mm, 두께 12.5mm 로 구성되어 있다. 이 중 실험에서는 stiffener 부착에 따른 5가지 종류의 실험패널을 이용하여 실험을 하였으나, 본 연구에서는 bulb형 보강재(HP)가 두개의 부착된 실험 plate 만을 다룬다.

실험 패널 재료의 물성치(parameter) 및 물성치에 따른 stress-strain 선도는 표 5 및 그림 10 과 같다.

	Stiffener & Frame	Plate
E [GPa]	210	210
σ_{yield} [MPa]	390	260
ϵ_{yield} [m/m]	0.017	0.02
σ_{ult} [MPa]	590	460
ϵ_{ult} [m/m]	0.2	0.28

표 3. 압입 실험 패널 재료 물성치 (Alsos et al., 2009)

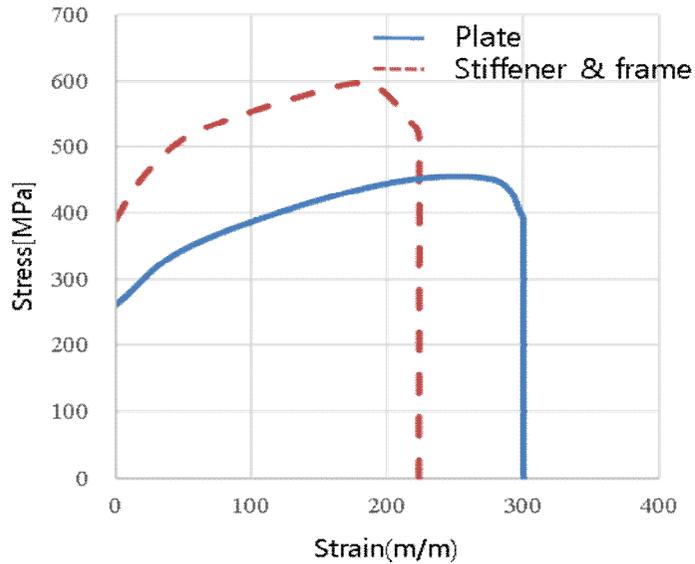


그림 10. 압입 실험 패널 재료 Stress-Strain 선도 (Alsos et al., 2009)

3.1.2. 압입 실험 방법

실험 방법은 다음과 같다. 먼저 그림 8 의 a)에서 보는 것과 같이 압입기가 설치된 유압 장치 밑에 실험 plate을 고정한다. 실험을 시작하면 유압장치는 10mm/min의 속도로 변위 제어(displacement control)를 하며 압입을 수행하며, 총 250mm까지 압입 한다. 이때 압입기에 작용하는 힘(force)와 변위(displacement)를 기록하며, 두 대의 카메라를 이용해 손상 형상에 대해 관찰 및 촬영을 하여 결과를 도출한다.

3.2. 압입 실험 FE 모델

기본적으로 FE 모델을 통한 해석은 실제 선박 모델링에 앞서 실험 결과와 유사한 거동을 하는지를 확인하기 위해 수행한다.

3.2.1. 압입 실험 FE 모델 구성

이를 위해 기본적으로 FE 모델은 실제 실험의 구성과 동일한 형태 및 크기로 구성하였으며, 해석의 효율성을 위해 x-axis 대칭의 1/2 모델링 하였다. 경계 조건 및 형상은 그림 11에서 보는 것과 같다.

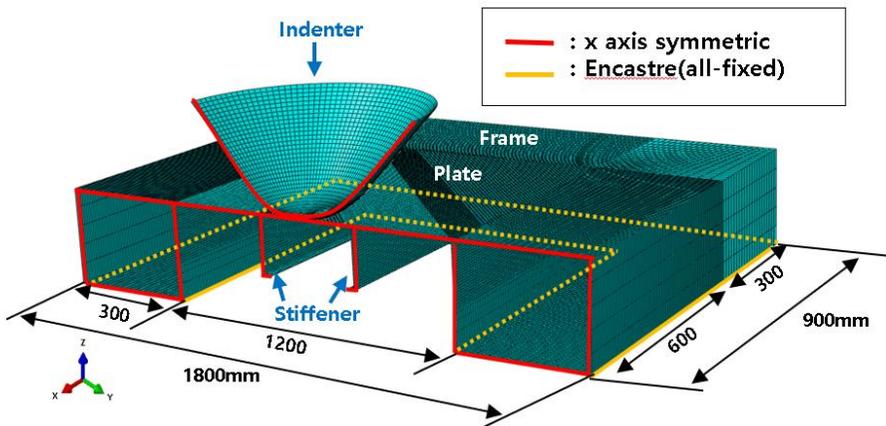


그림 11. 압입 실험 FE 모델 형상 및 경계조건

FE 모델의 element는 압입기의 경우 강체(rigid body)로 적용하였으며, 실험 패널은 변형 가능한 판 요소(deformable plate element)로 적용하였다. 이때 물성치 및 거동의 적용은 실험 패널의 경우 실

제 실험 데이터와 동일하게 적용하였으며, 소성 거동은 Von mises plasticity model을 적용하였다. 또한 압입기와 실험 패널 간에 발생하는 contact 조건은 수직(normal) 방향에 대해 'hard contact', 접선(tangential) 방향에 대해 'penalty' method를 적용하였으며, penalty method의 마찰계수 설정은 0.2를 적용하였다.

향후 선체에 적용할 적절한 mesh size(l) 선정을 목적으로 plate 및 stiffner의 두께(5mm) 대비 1배($l=5\text{mm}$), 3배($l=15\text{mm}$), 6배($l=30\text{mm}$)의 mesh size를 적용하였다.

3.2.2. 압입 실험 FE 모델 해석 방법

3.2.1.에서 설명한 것과 같이 실제 실험과 동일하도록 boundary condition의 경우 실험패널 FE 모델의 frame 하부는 그림 11 과 같이 all-fixed 한 상태이며, 총 압입 깊이 역시 250mm로 동일하게 설정하였다.

해석은 압입기 FE 모델을 일정 속도로 변위 제어를 하는 방식으로 실제 실험과 동일하게 진행하였으나, 압입기 FE 모델의 압입 속도의 경우 실제 실험시 압입 속도인 10mm/min를 그대로 적용하면 해석에 필요한 소요시간이 과도하게 필요하게 된다. 따라서 해석 속도의 효율성을 고려하면서 결과의 영향을 미치지 않을 정도로 충분히 낮은 속도인 10mm/s의 속도로 설정하였다.

3.3. 결과 비교

실험 결과 및 FE 해석 결과에 대한 손상 형상 비교는 그림 12 에서 보는 것과 같다.

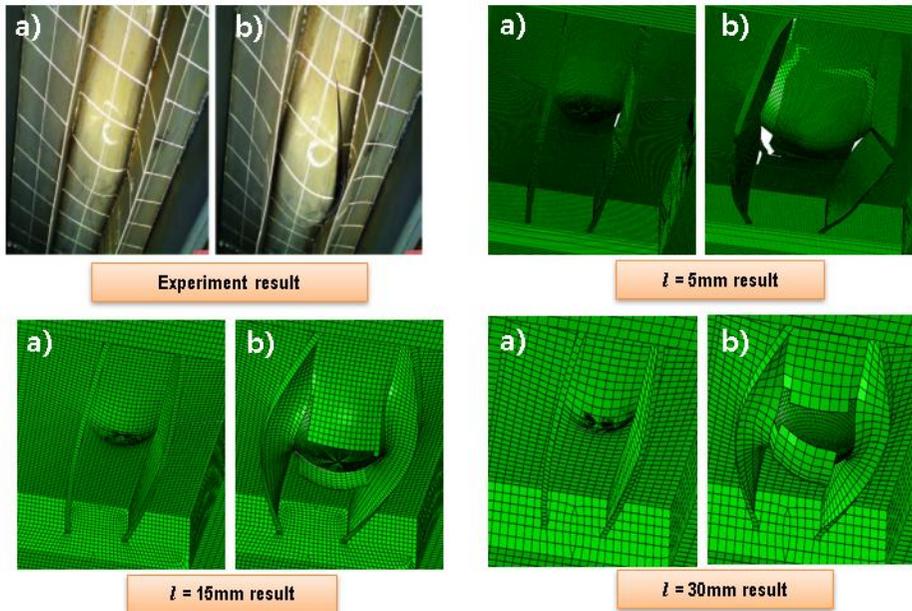


그림 12. 압입 실험 Plate 손상 형상 비교

: a) 손상 시작 지점 b) 최종 손상 지점

손상 시작 지점에서의 형상은 FE 해석 모델의 모든 mesh size에 관계없이 실험 결과와 유사하였다. 하지만 최종 결과에서의 형상은 mesh size에 따라 다소 상이한 모습을 보였으며, mesh size가 작을 수록 실제 손상의 형상과 유사하게 나타났다. 하지만 전반적인 손상의 경향은 대체적으로 동일한 것으로 판단된다.

Force-Displacement 선도 비교는 그림 13 에서 보는 것과 같으며,

전반적인 경향을 보았을 때 $l=15\text{mm}$ 인 case가 적합하였다.

Maximum force가 발생하는 지점에 대한 비교 시에도 $l=15\text{mm}$ 인 case가 가장 적합하였다.

이러한 결과를 바탕으로 선체 모델에 적용할 mesh size 선정을 하게 되면, 일반적인 선체의 외판의 두께(15mm)를 기준 하였을 때 약 45mm가 된다. 하지만 해석이 필요한 전선 모델(global model)에 적용한다면 전선 모델의 크기 및 컴퓨터 성능에 따라 상이하겠으나 해석시간이 기하급수적으로 늘어나게 된다. 따라서 효율성 측면에서 두께 대비 3배의 mesh size는 FE 해석 모델에 적용하기에 부적합하다.

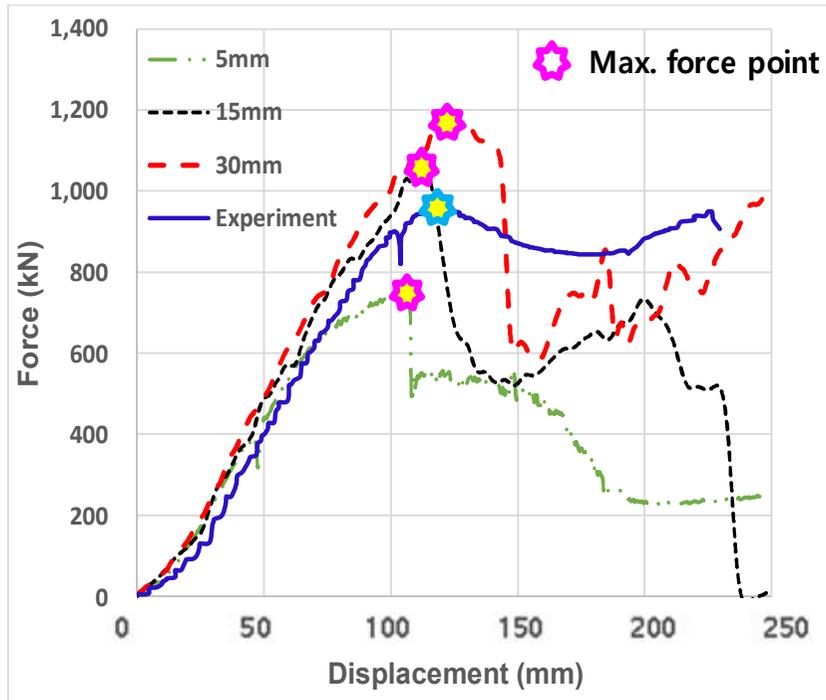


그림 13. 압입 실험 Force-Displacement 선도 비교

따라서 오차는 두께 대비 3배($l=15\text{mm}$)의 mesh 크기의 case와 비교 했을때에 비해 약 15% 가량 크게 발생하지만 효율성과 정확성을 모두 고려하였을 때 두께 대비 6배($l=30\text{mm}$)의 mesh 크기의 case를 적용하는 것이 적절하다고 판단할 수 있으며, 이 경우 mesh 사이즈는 약 100mm로 선정된다.

4. 단순 FE 모델을 통한 해석 연속성 검증

4.1. 해석의 연속성 적용 기법 개요

선체 FE 모델에 대해 단계별로 계산한 하중을 적용하여 해석을 수행하게 되면 구조 변형에 따른 deformed shape(변형 형상), residual stress(잔류 응력), plastic strain(소성 변형률) 등의 정보를 결과로 나타나게 된다. 이러한 해석 결과의 data를 다음 단계로 import 하는 방안은 ABAQUS에서 제공하는 기능을 기준으로 하며, 크게 다음 두가지로 구분한다.

- 1) Deformed shape, Residual stress, Plastic strain
- 2) Deformed shape only

이러한 기법은 단계별 해석 목적 및 특성에 따라 적절하게 적용한다. 4.1.1 및 4.1.2에서는 각각의 import 방안에 따른 ABAQUS에서의 적용 기법을 상세히 다룬다.

4.1.1 Deformed shape, Residual stress, Plastic strain import

FE 해석 결과에서의 deformed shape, residual stress, plastic strain에 대한 data를 다른 해석의 초기상태(initial state)에 import 하는 기법은 ABAQUS에서 제공하는 'Predefined field - initial state' 와 'Restart' 기능을 통해 적용한다.

위 언급된 두가지 기능의 큰 차이점은 'Predefined field - initial

state'의 경우 해석 모델의 inertia에 대한 data를 import 하지 않으나, 'Restart'는 해석 모델의 inertia data를 import 하는 것에 있다.

'Predefined field - initial state'를 적용하는 방법은 다음과 같다.

① 'Model → Predefined field → Create'를 활성화(그림 14 의 a))

② 'Create Predefined Field' window를 활성화 후 Edit 창에서

'Other → initial state'를 클릭(그림 14 의 b))

③ Data import를 하고자 하는 instance를 직접 선택

'Predefined field - initial state' 적용 시 해당 instance는 이전 해석에서의 instance와 동일한 이름, geometry, 물성치, displacement를 갖게 되며 이에 대한 임의 수정은 불가하다.

'Restart' 기능은 기본적으로 Import의 기능보다 해석의 특정 시점에서 load case를 변경하여 수행하거나, 해석이 오류로 인해 정지되었을 때 복구하는 목적으로 주로 사용하는 기능이다. 하지만 본 연구에서는 하중을 단계별로 적용하는 기법으로 적용하였다. 적용 방법은 다음과 같다.

① 기존에 해석을 수행하였던 'model'을 복사

② 복사한 model에 대해 그림 15와 같이 'Edit model attributes'를 활성화(그림 14 의 a))

③ 활성화 후 Restart 기능을 사용하는 창이 가장 먼저 보이게 되며, 'Read data from job'에 import 하고자 하는 기존 해석 job의 이름을 동일하게 입력(그림 15 의 b))

- ④ 'Step name'은 기존 해석에서의 import 하고자 하는 해석 step 의 이름을 입력(그림 15 의 b))
- ⑤ 해석 step이 완전히 종료된 시점을 import 하고자 하면 'Restart from the end of step' 클릭(그림 15 의 b))
- ⑥ 만약 특정 시점에서 import 하고자 하면 'Restart from increment, interval, iteration, or cycle'에 해당되는 시점의 번호를 기입하고, 아래의 'terminate the step at this point'을 선택(그림 15 의 b))
- ⑦ Job 수행시 'restart'를 선택하여 해석 수행(그림 15 의 c))

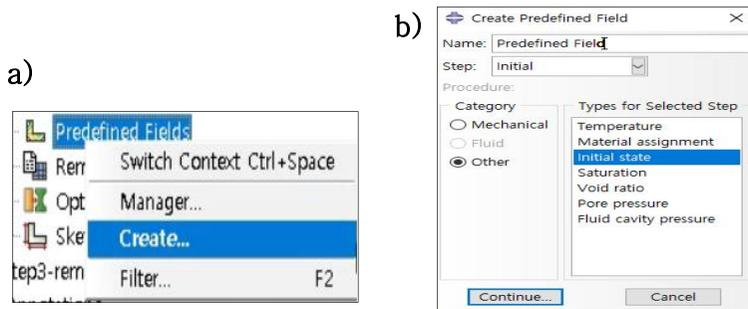


그림 14. Predefined field - initial state 기능 window(ABAQUS/CAE, 2016)

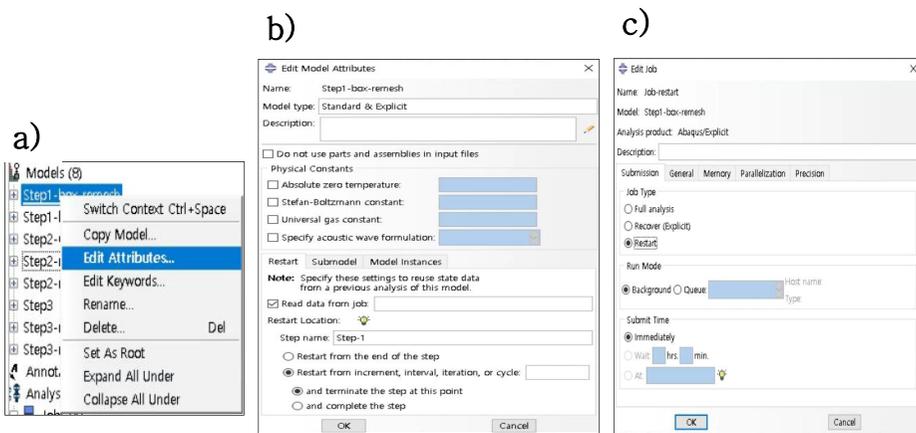


그림 15. Restart 기능 window(ABAQUS/CAE, 2016)

4.1.1 Deformed shape import only

기존 해석에서 deformed shape만을 import 하는 방법은 다음과 같다.(ABAQUS/CAE 기준)

- ① 'File → Import → Part'를 활성화 한 뒤(그림 16 a)) import 하고자 하는 기존 해석 결과 파일(.odb)을 선택
- ② 기존 해석 결과 파일(.odb)을 열면 그림 16. 과 같은 창이 활성화 되며, 이때 deformed shape를 import 하고자 하는 instance를 선택 (그림 16 의 b))
- ③ 'Deformed Configuration'을 통해 instance가 deformed 되는 특정 시점(frame)을 선택 (해당 시점의 instance가 새로운 모델로 import(그림 16 의 b)))

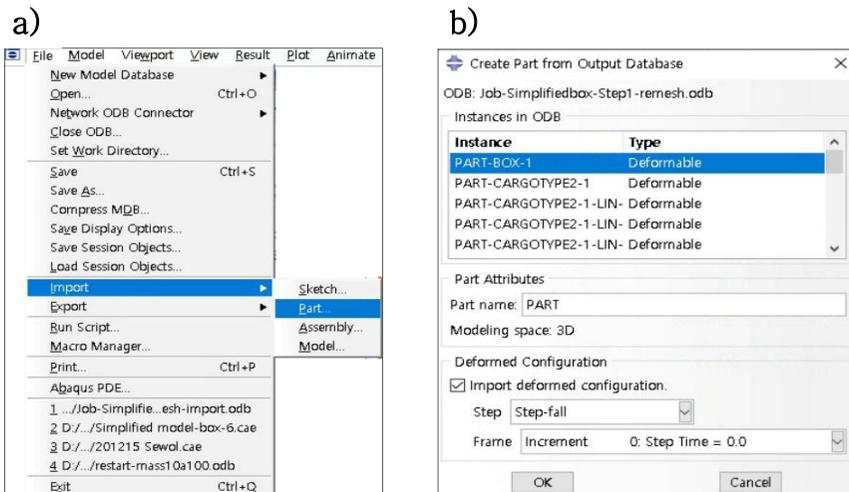


그림 16. Deformed configuration import 기능 (ABAQUS/CAE, 2016)

이 기법은 deformed instance를 기존 해석으로부터 import하여 사용한다는 차이점 외에는 새로운 해석을 수행하는 것과 해석 전처리 (pre-processing) 절차가 동일하므로 물성치 및 load case 등에 대해 새롭게 정의해주어야 한다.

4.2. 단순 FE 모델 구성

앞서 설명한 단계별 하중 및 연속적인 해석 기법의 적용을 확인하기 위해 침몰 선체를 단순화한 box 모델, 화물을 단순화한 sphere 모델, 해저지반 모델, 인양 장구(리프팅 빔) 모델로 구성하였다.

4.2.1. 단순화된 침몰 선체 FE 모델

단순화된 침몰 선체 FE 모델은 2D shell 요소로, 그림 17 의 a) 과 같은 box 형태로 길이 146m, 폭 22m, 높이 24m로 모델링 하였다. 내부에는 그림 18 에서 보는 것과 같이 transverse bulk head와 longitudinal bulk head를 각각 3개씩 동일 간격으로 부착하였다. 이때 plate 및 bulk head의 두께는 모두 15mm로 균등하다.

3장에서 검증한 것과 같이 plate 두께 대비 6배의 크기로 mesh size를 정할 경우 mesh size는 100mm가 된다. 이러한 mesh size를 모델 전체에 적용할 수도 있지만, 시간 효율성을 증대시키기 위해

그림 17 의 b)와 같이 해저지반과 선체, 화물 모델이 접촉되는 관심 area에 대해서만 fine mesh를 적용하였다(적색 강조 area). 이러한 fine mesh area의 범위는 길이 4m, 높이 22m로 mesh size는 100mm로 적용하였다. 이때 관심 영역 밖의 외곽 mesh size는 1,000mm이며 fine mesh area로부터 외곽으로 갈수록 mesh size가 점차 커지도록(single bias) 적용하였다. 이때 single bias 구간은 16m 이다.

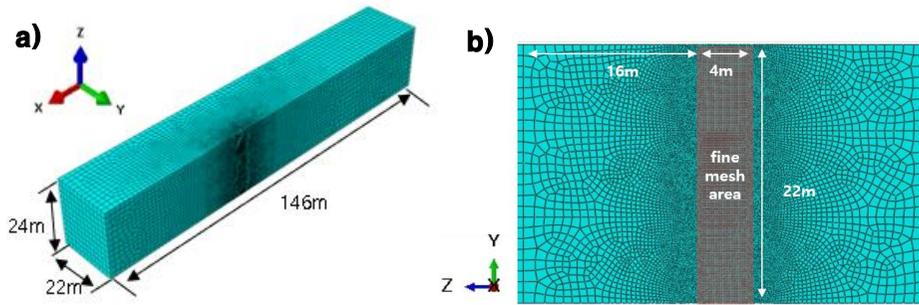


그림 17. 침몰 선체 box 모델 : a) iso view b) fine mesh area(highlighted area)

4.2.2. 단순화된 화물 FE 모델

단순화된 화물 FE 모델은 2D shell 요소로 모델링 하였다. 크기 및 형태는 지름 4m인 sphere 형태이며, 그림 18 과 같이 침몰 선체 box 모델 내부 좌현 정중앙 bulk head 사이에 50cm 간격으로 총 20ea 배치하였다. 화물 FE 모델의 mesh size는 해석시간 단축을 위해 선박 FE 모델의 외곽 mesh size와 동일한 1,000mm로 적용하였다.

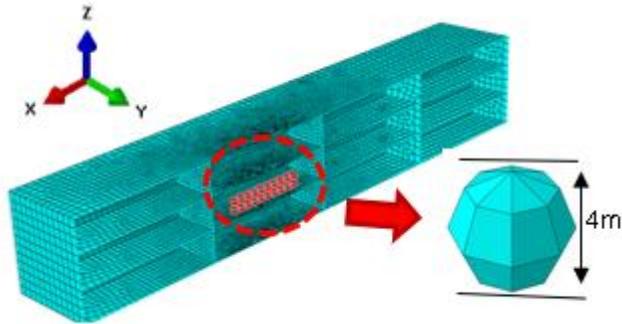


그림 18. 침몰 선체 box 모델 내부 및 화물 sphere 모델 형상(iso view)

4.2.3. 단순화된 해저지반 FE 모델

해저지반 FE 모델은 3D solid 요소로 모델링 하였으며, 그림 19 와 같이 길이 300m, 폭 50m, 높이 20m 크기의 box 형태로 구현하였으 다. 크기의 경우 너무 클 경우 해석시간이 증대하고, 너무 작을 경 우 boundary effect로 인해 정확하지 않은 해석결과가 도출되기 때 문에 case study를 수행하여 적절한 크기로 선정하였다. 해저지반 FE 모델 또한 선체 FE 모델과 동일하게 해석시간의 효율성을 향상 시키기 위한 목적으로 실제 선체가 contact 하여 충돌 및 착저하는 구역을 fine mesh area로 적용하였다. 해당 범위의 크기는 선체 FE 모델 높이 및 길이를 기준하여 약 1.5배 크기인 길이 250m, 폭 30m 이다. 해당 area의 mesh size는 1,000mm로 설정하였다. 그 외 외곽 구역의 요소크기는 5,000mm로 적용하였으며, 이때 선박 FE 모델과 마찬가지로 최대 및 최소 크기의 요소 사이의 size는 fine mesh

area에서 외곽 쪽으로 갈수록 점차 커지도록 적용(single bias) 하였다.

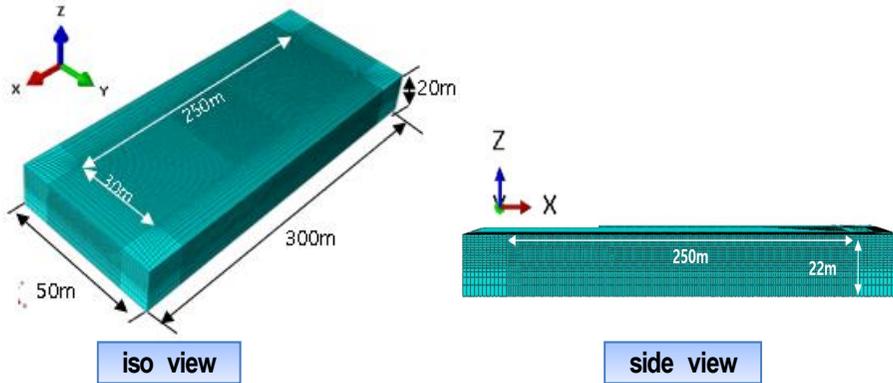


그림 19. 해저지반 FE 모델 형상

4.2.4. 단순화된 인양장비 FE 모델

본 연구에서는 대형 선박을 인양할 때 사용하는 리프팅 빔(lifting beam) 및 리프팅 와이어(lifting wire)를 이용한 인양법을 적용하였다.

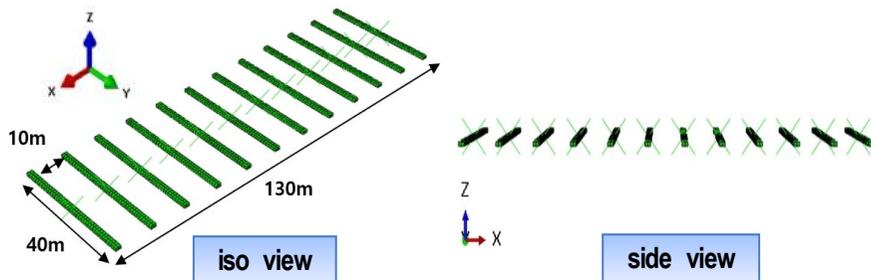


그림 20. 리프팅 빔 모델 형상

먼저 리프팅 빔의 형상 및 배치는 그림 20 과 같다. 2D shell 요소로 모델링 하였으며, 빔 한개의 크기는 길이 40m, 폭 2m, 높이 1m이며 각 빔의 간격은 10m 간격으로, 총 132m 배치하였다. 리프팅 빔의 강성(stiffness)은 선체 대비 매우 크다고 가정하여 강성체(rigid body)로 모델링 하였다.

리프팅 와이어의 경우 1D beam 요소로 모델링 하였으며, 한가닥을 기준 하였을 때 직경 100mm, 길이 50m로 설정하였다. 리프팅 와이어는 인양 단계에서 한쪽 끝을 각 리프팅 빔 양 사이트에 각각 고정한다. 리프팅 와이어는 해석 수행 중 끊어지지 않는다고 가정하여 완전 탄성체(perfectly elastic body)로 물성치를 적용하였으며, 이때 적용된 Young's modulus는 $300MPa$ 이다.

4.2.5. 단순 FE 모델 물성치

선체 box 모델 및 화물 sphere 모델에 적용된 물성치 및 Stress-Strain curve는 각각 표 4 와 그림 20 과 같으며, 선체 box 모델의 경우 일반적으로 선체에 사용되는 mild steel(S235)의 물성치를[9], 화물 모델은 산업용 carbon steel(A36)의 물성치를 적용하였다.

	Ship(S235)	Cargo(A36)
E [GPa]	210	210
σ_{yield} [MPa]	236	250
ϵ_{yield} [m/m]	0.004	0.002
σ_{ult} [MPa]	411	550
ϵ_{ult} [m/m]	0.15	0.2

표 4. 선체 및 화물 단순 FE 모델 적용 물성치

여기서 E 는 탄성계수, σ_{yield} 는 항복응력(yield stress), ϵ_{yield} 는 항복 변형률(yield strain), σ_{ult} 는 극한 응력(Ultimate stress), ϵ_{ult} 는 극한 변형률(Ultimate strain)을 나타낸다.

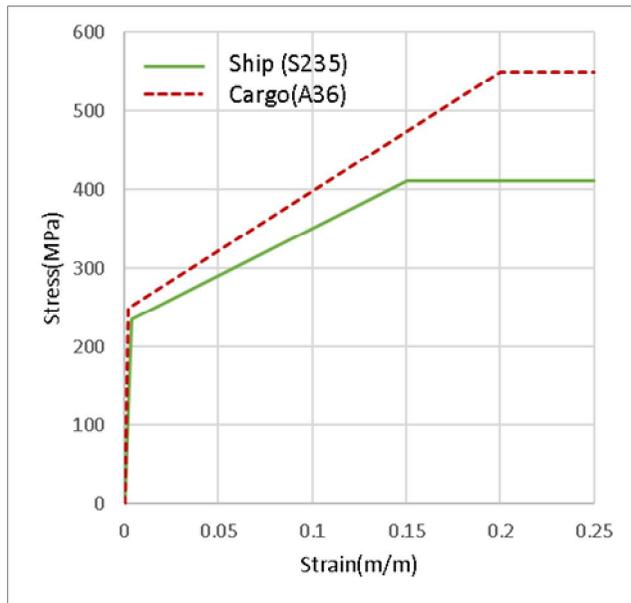


그림 21. 단순 FE 모델 선체 및 화물 적용 물성치별 Stress-Strain 선도

해저지반 FE 모델의 물성치는 자갈·모래 섞인 실트질 점토 (Mixed clay-gravel soil)를 기준으로 적용되었으며, 해당 상세 물성치는 표 5 와 같다.

	Seabed (Mixed clay-gravel soil)
γ [kN/m^3]	23.4
s_u [kPa]	37.1
ϕ [$^\circ$]	20.3
E [MPa]	15
ν	0.38

표 5. 단순 해저지반 FE 모델 적용 물성치(KIOST, 2018)

이때 γ 는 단위중량, s_u 는 비배수전단강도, ϕ 는 내부 마찰각 (friction angle), E 는 탄성계수, ν 는 포아송비를 나타낸다.

선체 및 화물 모델의 소성 모델은 3장에서의 FE 모델과 동일하게 Von mises plasticity model을 적용하였으며, 해저지반 모델은 Mohr-coulumb yield model(Abaqus user manual, 2016[])을 적용하였다. 이때 가해지는 하중에 의해 최종적으로 전단파괴(shear failure)가 일어나게 되면 요소가 삭제(element deletion) 되도록 설정하였다.

화물-선체-해저지반 FE 모델 간에는 수직(normal) 및 마찰(frictional) 접촉 조건을 적용하였으며, 마찰계수(frictional coefficient)의 경우 선체와 화물간의 마찰은 철과 철(mild steel on mild steel)이 마찰이 일어나는 기준인 0.57을, 선체와 해저지반의 마찰은 일반적으로 적용되는 0.2 를 적용하였다.

4.3 단순 FE 모델 해석

단순 FE 모델에 해석을 위해 가정한 상황은 침몰부터 인양까지의 과정으로, 침몰 및 충돌 / 침하 / 인양 총 3단계로 분류한다. 4.3.1.에서는 단계별 해석 방법을 설명하고, 4.3.2.는 각 단계별 해석에서 작용되는 하중을 설명하며, 4.3.3.는 해석 수행 case를 설명하였다.

4.3.1. 단계별 해석 방법

단계별 해석 시 4.2.절에서 설명한 선체 FE 모델, 화물 FE 모델, 해저지반 FE 모델, 인양장구 FE 모델을 배치하여 해석을 수행하며 각각의 개요도 및 주요 하중 및 방향은 그림 23 에서 보는 것과 같다.

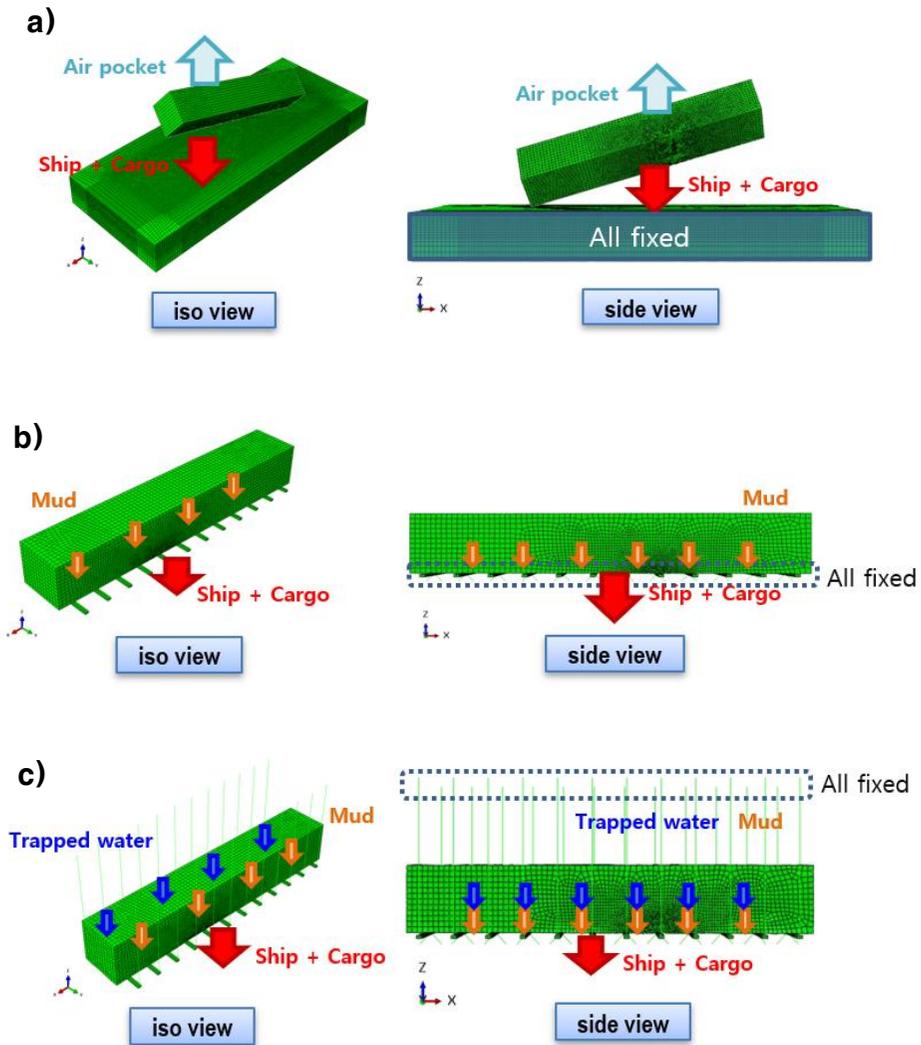


그림 22. 단순 FE 모델 단계별 해석 개요도 : a) Step 1. 침몰 및 충돌 단계
 b) Step 2. 침하단계 c) Step 3 인양 단계(수면상)

Step 1은 그림 23 의 a)에서 보는 것과 같이 선체 및 화물 모델이 선박 및 화물의 무게 및 air pocket에 의한 부력이 주로 작용하여 해저지반 모델과의 충돌에 의해 손상이 발생하는 단계이다. 이때 경

계조건으로 선체 및 화물은 가해지는 하중에 의한 자유 낙하를 하며, 해저지반 모델의 경우 선체와 contact 하는 상부 면을 제외한 측면 및 하부 면에 대해 all fixed 하였다.

Step 2는 그림 23 의 b)에서 보는 것과 같이 선체 모델 기준 좌현 측 하부에 리프팅 빔을 설치한 상황이다. 해석 시점은 리프팅 빔 설치 후로, 해저지반이 아닌 리프팅 빔 위에 선체 및 화물이 놓여있는 것과 동일한 상황이 되기 때문에 기존의 해저지반 모델은 구조 변형에 작용하지 않게 되므로 해석의 효율성을 위해 삭제하였다. 작용되는 주요하중의 경우 선체 및 화물의 air pocket에 의한 부력은 사라진 상태이며, mud에 의해서 하부 plate(선체 모델 기준 좌현)에 등가 pressure가 추가로 가해진다. 이로 인해 주요 손상은 선체 및 화물과 리프팅 빔의 상호작용에 의해 발생한다. 여기서 경계조건은 선체 및 화물의 경우 Step 1.과 동일하며, 리프팅 빔의 경우는 all fixed 된 상태이다.

마지막 Step 3는 인양단계로 그림 23 의 c)와 같이 리프팅 빔 양쪽에 와이어 모델을 고정하고, 리프팅 빔과 고정된 끝의 반대편 끝단은 all fixed 한다. 즉 Step 2와 동일하게 선체 및 화물 모델에 적용된 하중에 의해 리프팅 빔과의 상호작용으로 손상이 발생하며, 이때 작용 하중은 수면상에서의 인양과정을 가정하므로 부력이 제거된 선체 및 화물, mud의 무게와 잔존수(trapped water)에 의한 무게가 주로 작용하게 된다.

4.3.2. 단계별 작용 하중

선체 및 화물의 운동 및 손상에 기여하는 세부 하중은 표 6 과 같이 설정하여 적용하였다.

(Unit : ton)

		Step 1 (침몰 및 충돌)	Step 2 (침하)	Step3 (인양)
Weight	Ship(box)	5,000		
	Cargo(sphere)	2,000		
	Mud	-	10,000	15,000
	Trapped water	-		10,000
Buoyancy	Ship(box)	3,500	-	
	Cargo(sphere)	900		
Total load		2,600	17,000	32,000

표 6. 단순 FE 모델 해석의 단계별 적용 하중

여기서 각 하중 값에 대한 적용 기준은 해석 수행시 해당 하중에 의한 단순화 모델의 결과를 명확히 확인하기 위한 임의의 값이다.

4.3.3. 해석 Case의 선정

import 기능을 적용하여 각 단계별 해석결과가 연속적으로 적용되는지와 누적되는 결과가 어떠한 차이를 도출하는지 확인하기 위한 목적으로 case study를 수행하였다.

수행한 Case는 총 2가지로, 그림 24 에서 보는 것과 같이 연속적인 해석 기법을 적용한 Case A와 단계별로 독립적인 해석만 수행하는 Case B로 구분할 수 있다.



그림 23. 단순 FE 모델 Case 별 개요도

4.4. 해석 Case 별 결과 및 비교

Case A는 앞서 4.3.3.에서 설명한 것과 같이 각 단계의 연속성을 유지하기 위해 deformed shape, residual stress, plastic strain 을 모두 import 하는 기법을 적용하였다. 이러한 기법 적용을 확인하기 위해 그림 25와 같이 선체 하부측 plate (선체 모델 기준 좌현)의 단계별 초기 상태 및 최종상태(final state)의 deformed shape 및 equivalent plastic strain(등가 소성 변형률) contour를 비교하였으며, 단계별 해석의 결과가 다음 해석의 초기상태에 반영되는 손상이 지속적으로 누적되는 것을 확인할 수 있다.

Equivalent Plastic Strain

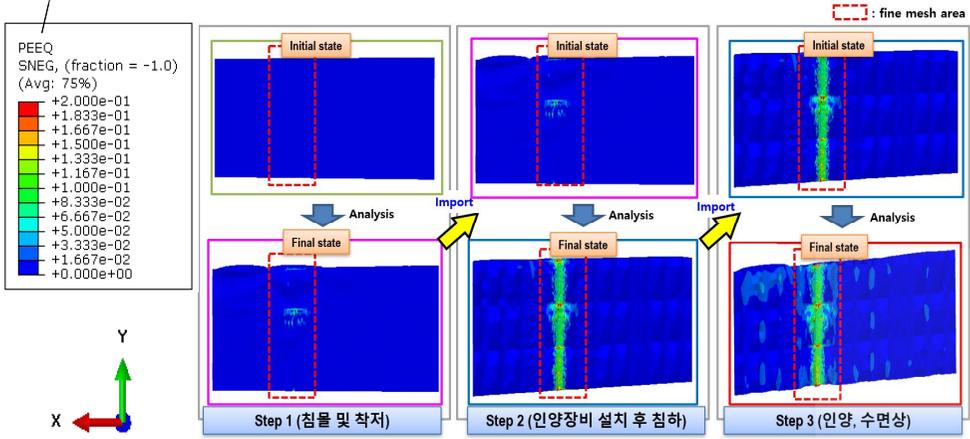


그림 24. 단순 FE 모델 Case A 결과

Case B 해석의 경우 독립적으로 Step 2 및 Step 3 에 대해 해석을 수행하였으며, deformed shape 및 equivalent plastic strain contour 를 비교해보면 하중에 의한 소성변형 및 손상 누적이 발생하였음을 확인할 수 있다.

Equivalent Plastic Strain

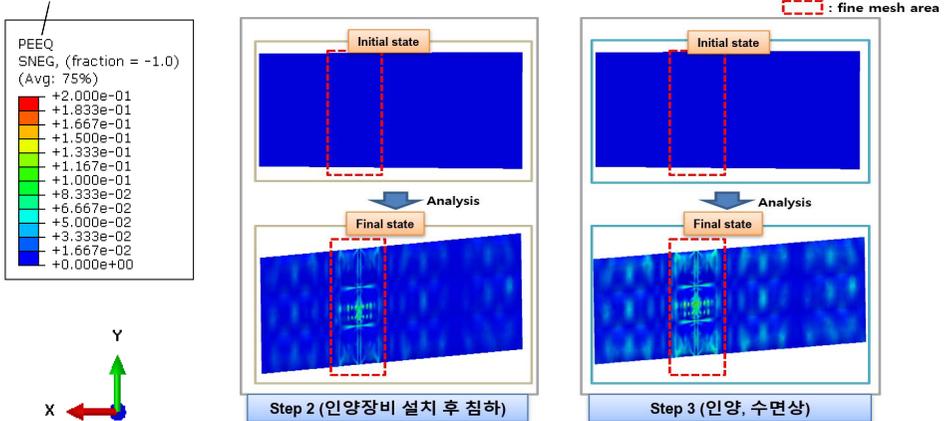


그림 25. 단순 FE 모델 Case B 결과

Case A와 Case B의 해석 결과에서 fine mesh area를 중점적으로 equivalent plastic strain contour를 비교하면 그림 27 에서 보는 것과 같이 단계별로 적용된 하중에 의해 Case A와 Case B 모두 소성 변형이 발생했음을 확인할 수 있으며, Case A의 경우에는 결과의 연속성이 적용되어 손상이 누적되면서 Case B 보다 큰 변형이 발생하였으며, 특히 Case B에서 발생하지 않은 plate의 failure가 Case A에서는 발생한 것을 확인할 수 있다.

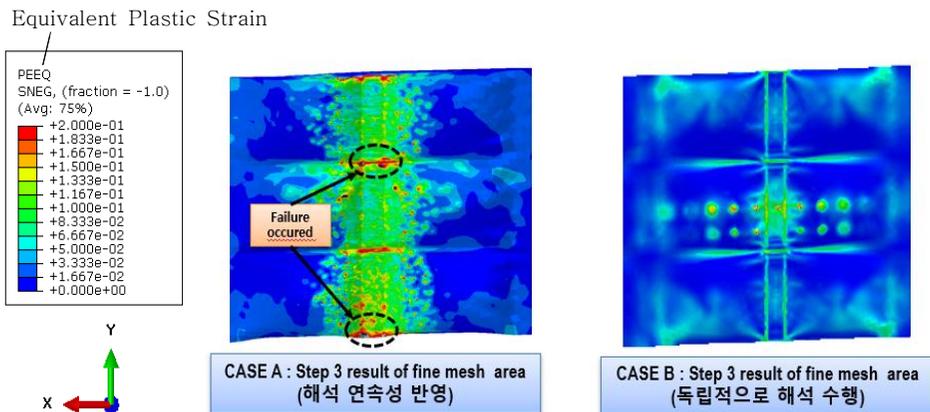


그림 26. 단순 FE 모델 Case A와 B 비교 분석

5. 실제 사고 사례에 대한 기법 적용

5장에서는 실제 사고로 인해 침몰 및 인양을 수행한 선박을 예시로 해석을 수행하며, 4장에서 검증한 연속적인 해석 기법을 적용한다. 5.1절 및 5.2절은 실제 선박의 제원과 실제 선박에서 나타난 손상에 대해 설명하고, 5.3절은 FE 모델 및 구성에 대해 설명하며, 5.4

절은 FE 모델 해석 적용되는 하중을 설명하고, 마지막 5.5 절은 FE 모델의 해석 결과와 실제 선박의 손상을 비교한다.

5.1. 사고 선박의 형상 및 제원

사고 선박에 대한 형상 및 제원은 그림 28 및 표 7 와 같다.



그림 27. 사고 선박 형상(Yonhap, AP, Reuters)

	Value
Length(LOA) [<i>m</i>]	145.6
Width [<i>m</i>]	22
Height [<i>m</i>]	24
Lightweight [t]	6,213
Displacement [t] (at the time of accident)	7,742

표 7. 사고 선박 제원(OTC-27695-MS, 2016)

5.2. 사고 선박의 손상

실제 선박에 발생한 손상은 해저지반 및 인양 장구에 직접 맞닿은 선체 좌현 부에서 크게 발생하였다. 그중 side shell에 대한 파손은 그림 28에서 보는 것과 같이 조사되었다. 여기서 주요 파단부에 대해 적색으로 표시되어 있으며, A-Deck 상부측에 파단이 주로 확인이 되고 특히 좌현 후부 Nav.-Deck 부분은 완전 유실된 것을 확인할 수 있다.

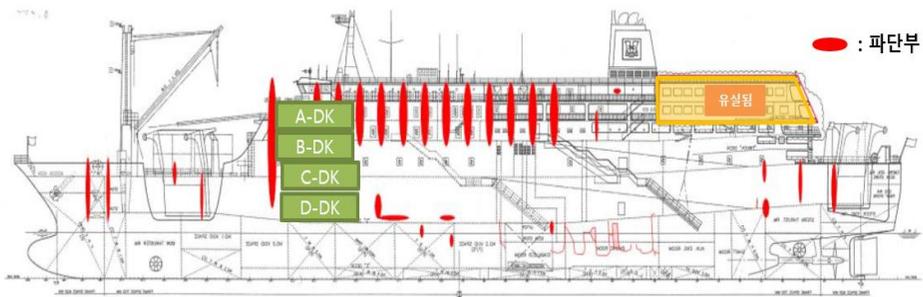


그림 28. Side shell 파단부 sketch 현황(SEWOL-0416-Q-01, HSHI. 2018)

실제 Web frame 별 손상 확인 시에도 좌현 부의 손상이 큰 것으로 확인되며, 손상은 그림 30 에서 보는 것과 같이 B-Deck ~ C-Deck 사이와 C-Deck ~ D-Deck 사이 및 FR. 55 ~ 95. 에서 주로 확인할 수 있다.

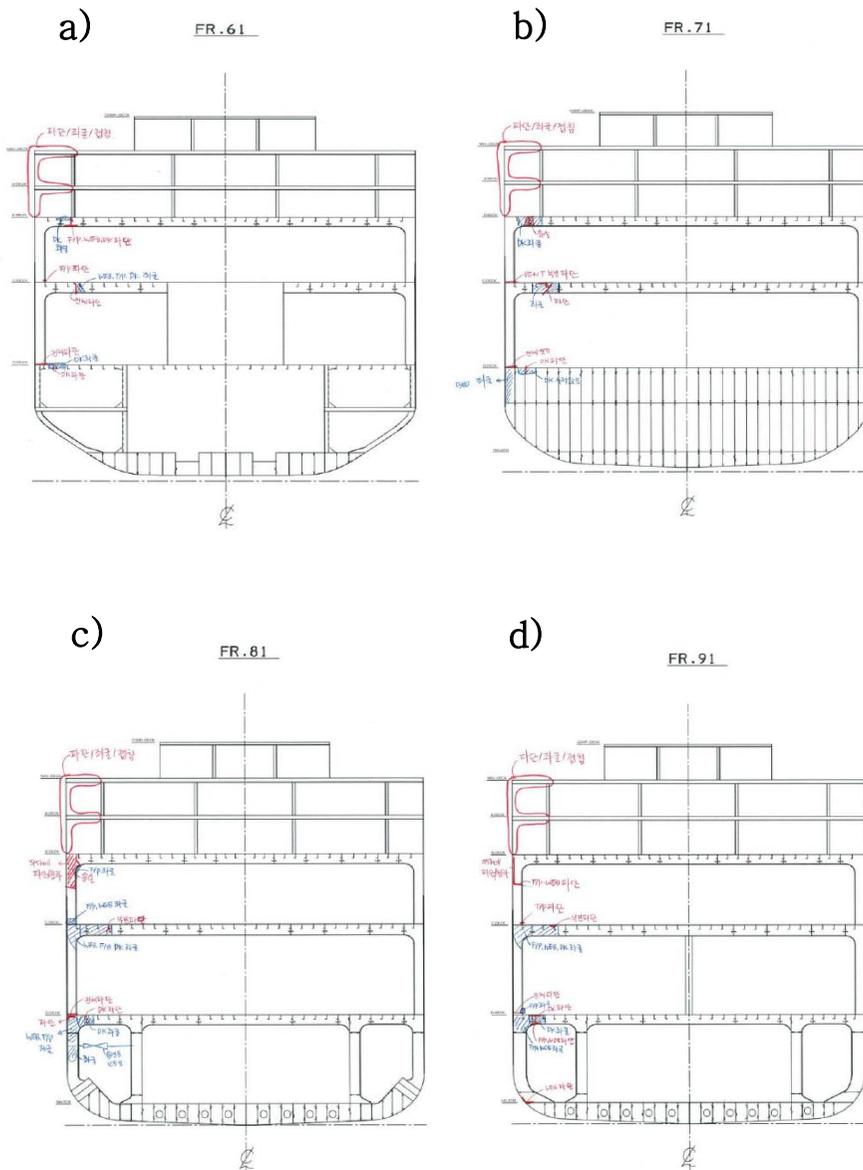


그림 29. 사고 선박 주요 손상부 web frame 별 sketch 현황
 : a) FR 61 b) FR 71 c) FR 81 d) FR 91 (SEWOL-0416-Q-01, HSHI, 2018)

5.3. 실제 사고 사례 해석 FE 모델

5.3.1. 사고 선체 FE 모델

선체 FE 모델은 그림 31에서 보는 것과 같이 실제 선박의 설계도면(general arrangement)을 바탕으로 의장품 및 엔진, 발전기, 보기류를 제외한 동일 구성 및 사이즈로 2D shell 요소를 적용하여 모델링 하였다.

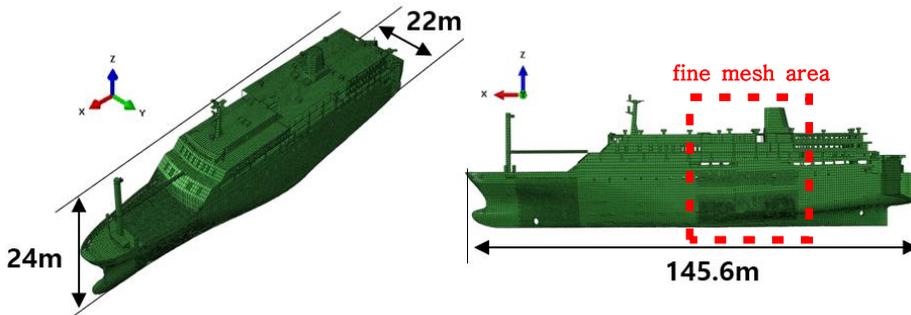


그림 30. 사고 선박 FE 모델 형상

선체에 적용된 물성치의 경우 단순 FE 모델에 적용한 mild steel(S235)와 동일한 재질이며, 선체 손상 역시 Von mises plasticity criterion을 따른다.

mesh size는 그림 31에서 보는 것과 같이 5.2.절에서 설명한 손상이 크게 확인된 범위에 대해 100mm 로 적용하였으며, fine mesh area 외의 선체 적용 mesh size는 약 1,600mm 이다.

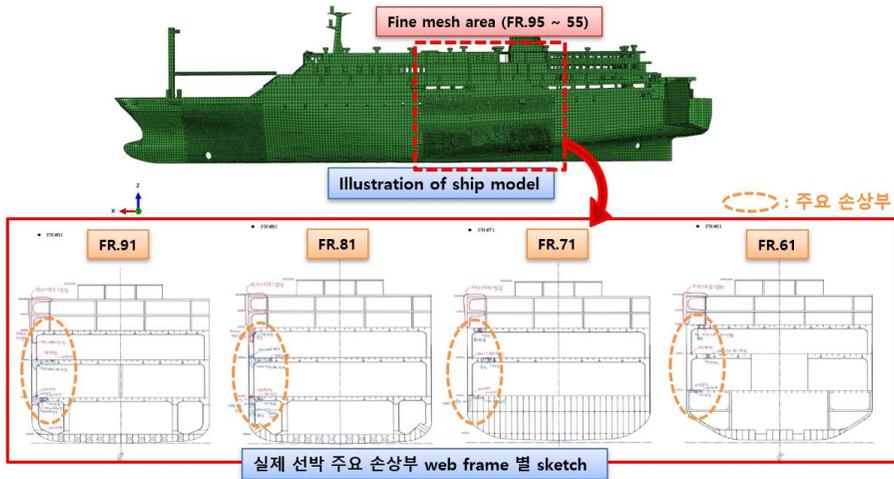


그림 31. 사고 선박 FE 모델 fine mesh area 및 실제 선박 주요 손상부

5.3.2. 사고 선박 적재 화물 FE 모델

사고 당시 선박 내에 적재되어있던 화물은 차량 및 컨테이너, 철근 등 다양한 종류와 형태로 구성되어 있었으며, 적재 화물에 대한 자료를 토대로 그림 33 과 같이 형태 및 크기, 각각의 배치를 동일하게 적용하였다. 또한 화물의 무게의 경우 종류에 따라 밀도를 다르게 적용하여 각각의 화물에 실제와 동일한 무게를 갖도록 하고, 전체 화물의 무게 중심(center of gravity)을 일치시켰다.

단, 화물의 재질은 조사 자료 한계 및 해석의 단순화를 위해 4장에서 화물 FE 모델에 적용한 것과 동일한 재료인 carbon steel(A36)의 물성치를 반영하였다.(표 4 및 그림 20)

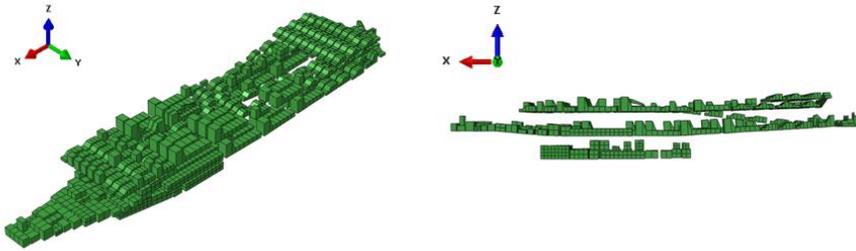


그림 32. 사고 선박 적재 화물 FE 모델 형상

5.3.3. 해저지반 FE 모델

해저지반 FE 모델은 실제 사고 해역에서 조사된 자료를 기준으로 물성치 및 형태를 적용하는 것이 정확하다. 하지만 본 연구에서는 해석의 복잡성을 최소화하기 위해 4장에서 적용한 것과 동일하게 단순화한 3D solid 요소로 모델을 적용하였다. 즉 크기 및 형태는 4장과 동일하며, 마찬가지로 적용된 물성치 역시 사고 해역의 해저지반 조사를 통해 얻은 물성치와 동일하게 반영하였다.(표 5)

5.3.4. 인양장구 FE 모델

실제 사고 당시 인양 준비 과정에서 해저지반과 사고 선체가 닿아있는 하부(선체 기준 좌현)에 리프팅 빔을 그림 34 와 같은 위치에 설치하였다. 이에 따라 FE 모델 역시 그림 35 와 같이 선체에 동일한 위치에 contact 하도록 2D shell 요소로 모델링 하고 배치하

였다. 여기서 리프팅 빔은 선체에 비해 강성이 크므로 변형이 일어나지 않기 때문에, 4장에서 적용한 것과 같은 논리로 rigid body로 적용한다.

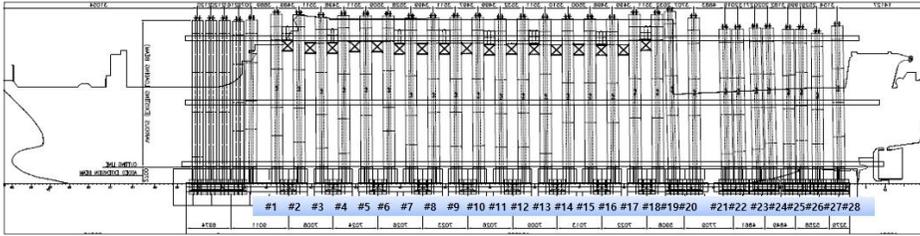


그림 33. 리프팅 빔 번호 및 설치 위치(SEWOL-0416-Q-01, HSHI. 2018)



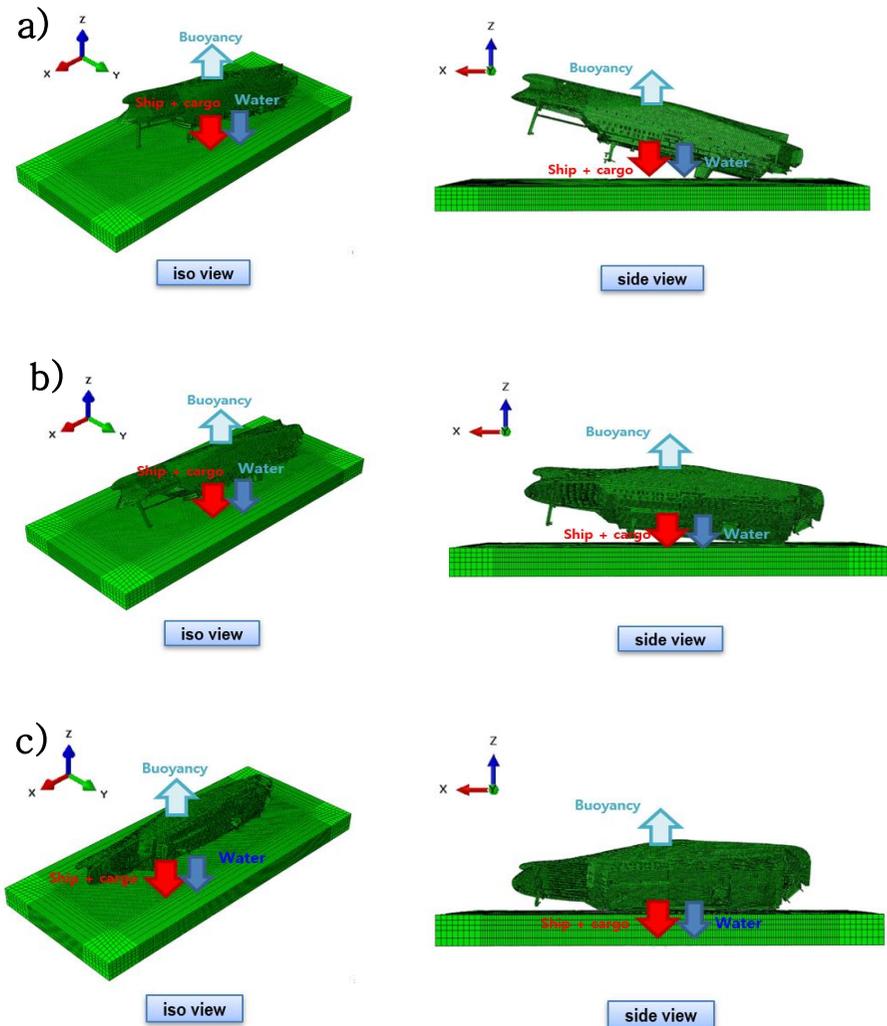
그림 34. 리프팅 빔 FE 모델(bottom view)

5.4 실제 사고 사례에 대한 FE 모델 해석

실제 선박의 침몰부터 인양과정을 FE 해석을 위해 총 5단계로 분류하였으며, 침몰 및 충돌단계를 Step 1~3.로, 착저 단계를 Step 4., 인양 단계를 Step 5. 로 구분하였다.

5.4.1. 실제 선체 FE 모델 단계별 해석 방법

각 단계별 해석시 선체 FE 모델, 화물 FE 모델, 해저지반 FE 모델, 인양 장구 FE 모델을 단계별로 배치하고 작용 하중을 적용하여 해석을 진행하며, 각 단계별 주요 하중 및 모델의 위치는 그림 36와 같다.



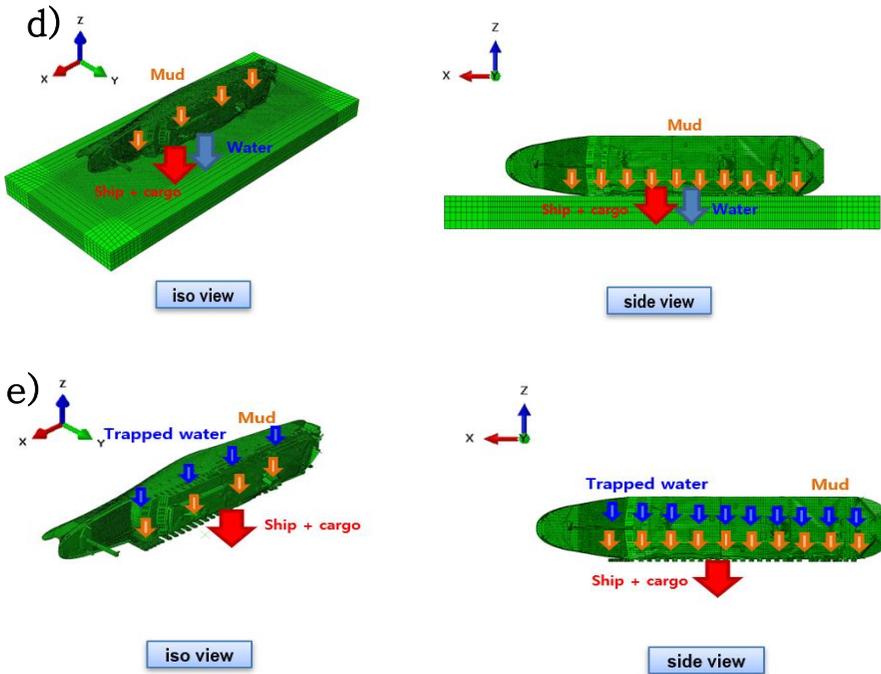


그림 35. 실제 사고 FE 모델 단계별 해석 개요도

: a) Step 1. 좌현 선미 1차 충돌 b) Step 2. 좌현 상부 2차 충돌
 c) Step 3. 좌현 전면 3차 충돌 d) Step 4. 침하 e) Step 5. 인양(수면상)

Step 1.~3.은 그림 36 의 a), b), c)에서 보는 것과 같이 선체 및 화물의 하중, 내부에 들어온 물, air pocket에 의한 부력이 주로 작용하면서 발생하는 침몰 및 충돌단계이다. 4장에서와 다르게 3단계로 조금더 세분화한 이유는 실제 선박이 침몰하는 과정에서 굉장히 오랜 시간이 소모되기 때문에 Step 1.~3.를 준 정적(quasi-static) 해석에 가깝게 하기 위함이다.

만약 Step 1.~3.를 단계별 구분 없이 해석하는 경우, 적용한 하중에

의해 발생하는 inertia에 대한 control이 불가하며 그림 37 과 같이 충돌시 과도한 변형을 일으켜 부정확한 해석결과를 도출할 수 있다.

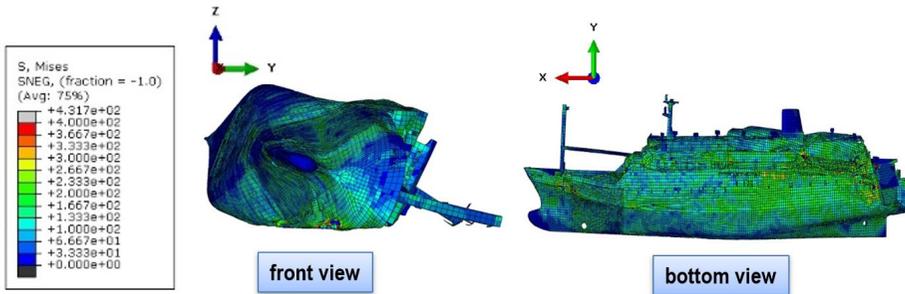


그림 36. 단계 미구분 Step 1. ~ 3. 일괄 해석 수행 결과

Step 4. 는 그림 36 의 d)에서 보는 것처럼 air pocket에 의한 부력이 없어지고 mud가 유입되면서 pressure로 작용하여 해저지반 상에서 침하하는 단계이다.

마지막 Step 5.는 Semi-submersible vessel(반잠수식 선박)을 이용하여 인양하는 단계이다. 이때 선체, 화물, mud는 자체 부력을 잃고, 선체 내에 남아있는 잔존수에 의한 pressure가 가중되며, 동적 증폭 계수를 고려하여 하중이 증가한다. 이때 실질적으로 인양단계에서 선체 구조 변형에 기여하는 것은 선체와 직접 contact 하는 리프팅 빔만 해당되므로 불필요한 추가적인 모델(해저지반, Semi-submersible vessel 등)은 해석에서 생략하였다.

각 단계별 해석은 import 기능을 이용한 연속적인 해석기법을 적용하며, 전체적인 개요도는 그림 38 과 같다.

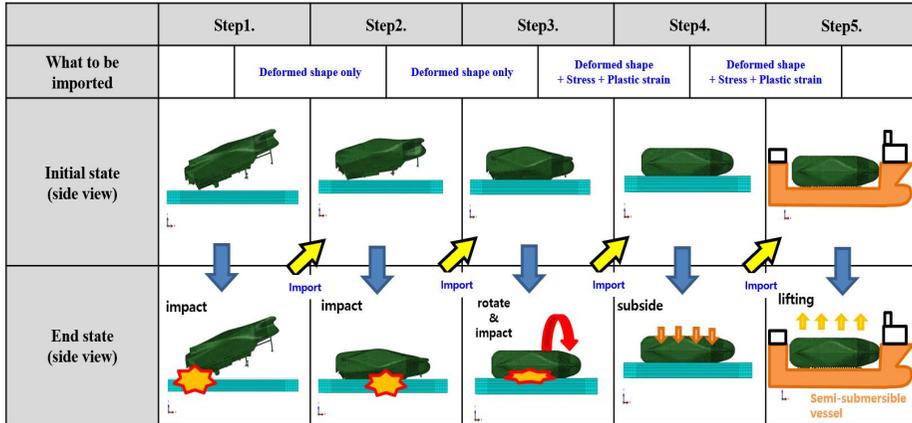


그림 37. 연속적인 해석 기법 적용 개요도

5.4.2. 실제 사고 사례 FE 해석 모델 적용 하중

실제 사고 사례에 대해 FE 모델에서 적용되는 하중은 정확한 해석을 위해 객관적인 자료를 근거로 산출해야 하며, 아래 표 8 은 조사된 자료를 근거로 산출한 하중 값이다.

(Unit : ton)

	Step1.	Step2.	Step3.	Step4.	Step5.
Compared step with Simplified FE model	침몰 및 착저			침하	인양
Ship weight	6,233				6,600
Cargo weight	1,817				2,200
Water weight	47,268	48,118	49,418	53,196	1,700
Mud weight	-		1,522		4,600
Weight summation	55,568	56,168	57,268	62,768	15,100
Buoyancy	55,068				-
Total weight	500	1,100	2,200	7,700	16,600 (15,100×1.1)

표 8. 실제 선박 FE 해석의 단계별 적용 하중

Step 1~3에 적용되는 하중의 경우 동일 선박에 대해 상용 프로그램인 MOSES를 이용하여 최초 침몰 직후 중성 부력 상태를 유지할 때의 하중 값을 산출한 table(세월호 해양사고 구조구난개선 방안 도출 연구 용역, Zentech. 2020)을 활용하였다.

이러한 산출 방법은 선박이 침몰할 때 촬영한 영상자료를 활용하여, Moses를 이용한 3D 시뮬레이션을 실시하고 결과와 실제 선체 침몰자세를 비교하는 것부터 수행된다. 이때 동일한 자세와 중성 부력 조건을 맞추게 되면 정확한 하중을 구했다고 판단할 수 있는 것이다. 이렇게 계산된 하중을 근거로 Step 1. 에서의 하중에 적용하였으며, Step 2., Step 3.는 추가적으로 침수가 가능한 격실 및 tank의 부피를 고려하여, 각각 그림 39에서 보는 것과 같이 시간 경과에 따라 600ton, 1,100ton의 추가적인 침수가 일어난 것으로 가정하여 산출한 값이다.

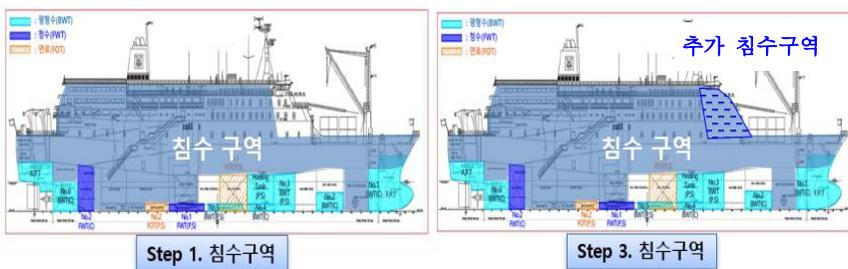


그림 38. 침몰 중 추가적인 침수에 따른 침수구역 증가

Step 4. 및 Step 5. 는 추가로 유입되는 mud 및 인양시 발생하는

trapped water에 의한 pressure, 부력상실 및 동적 증폭 계수에 의해 하중이 추가적으로 부가되는 것이 큰 차이가 있으며, 본 연구에서는 실제 인양시 사고 선박을 인양하면서 측정했던 실측자료를 통해 mud 및 trapped water에 의해 발생하는 하중을 역산하는 방법을 사용했다.

즉, Jacking barge를 이용하여 약 13m 가량 침몰했던 선박이 수면상에 나왔을 때의 실측 총 하중은 11,000ton, Submersible vessel을 이용하여 완전 인양시의 실측 총 하중은 16,600ton 이다.[12]

Step 4의 경우 13m 인양시의 무게에서 기존에 계산하였던 선체 및 화물무게를 제하고 나면 수중에서의 인양 시 총 무게가 7,700ton이며, 이중 선체 및 화물의 무게를 빼면 수중 mud 무게는 약 1,522ton만 남게 된다.

Step 5의 경우 동적 증폭 계수가 1.1이므로, 실제 하중은 15,100ton이 되고 최종적으로 수면상에서의 부력을 제외한 선체 및 화물의 무게와 보정된 mud의 무게를 빼면 trapped water의 무게 1,700ton이 된다.

5.4.3. 실제 사고 사례 FE 해석 case study 선정

mud 및 trapped water의 하중은 5.4.2. 에서 서술한 것과 같이 조사 및 시뮬레이션을 통해 얻은 data를 통해 계산이 가능하나,

pressure가 작용하는 area에 대해서는 data가 명확하지 않다. 따라서 Step 3. 이후 Step 4. ~ 5. 해석 시에 작용 가능한 pressure area를 결정하기 위해 case를 선별하여 case study를 수행하였다. (그림 39)

각 case에 대한 간략한 설명으로, Case A 는 B-deck ~ E-deck 좌현 측 외판 전체에 해당되며 면적은 약 $2,550m^2$ 이다. Case B는 D-deck ~ E-deck 좌현 측 외판 일부가 해당되며 면적은 약 $1,150m^2$ 이다. Case C는 C-Deck ~ D-deck 좌현 측 외판 일부가 해당되며 면적은 $691m^2$ 이다. 즉, 동일한 하중이 가해질 때 단위 면적당 작용하는 pressure는 크기는 Case C > Case B > Case A 순이다.

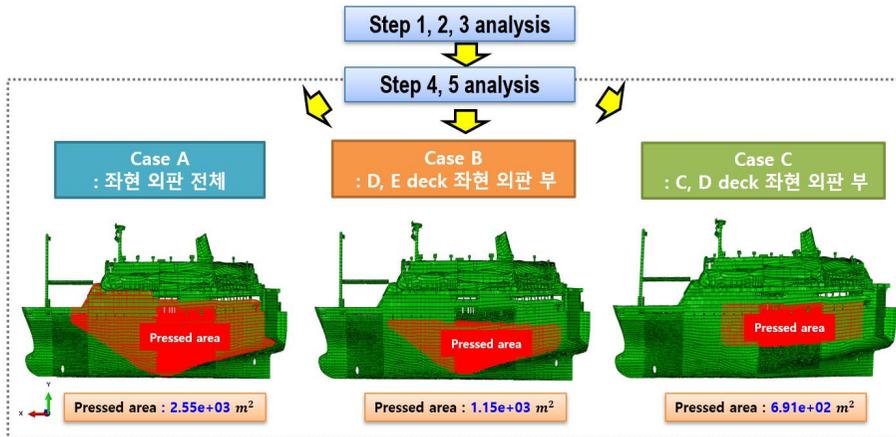


그림 39. Pressure area 선정을 위한 case study

5.5 FE 모델 해석 결과 case 선정 및 실제 손상과 비교

Step 1. ~ 3. 에 대한 해석결과는 deformed shape import로 적용하

여 그림 40 과 같이 손상의 누적이 연속적으로 발생하는 것을 확인할 수 있다. 특히 선체 기준 좌현 후부 및 상부의 손상이 누적되면서 크게 일어나는 것을 확인할 수 있다.

Von mises stress contour를 통한 case 비교 분석 시 그림 41.에서 볼 수 있듯이 전반적인 경향은 큰 차이를 보이지는 않았다. 이는 pressure 로 작용하는 mud 및 trapped water의 값이 크지 않아 손상에 주요한 factor로 작용하지 않기 때문으로 판단된다.

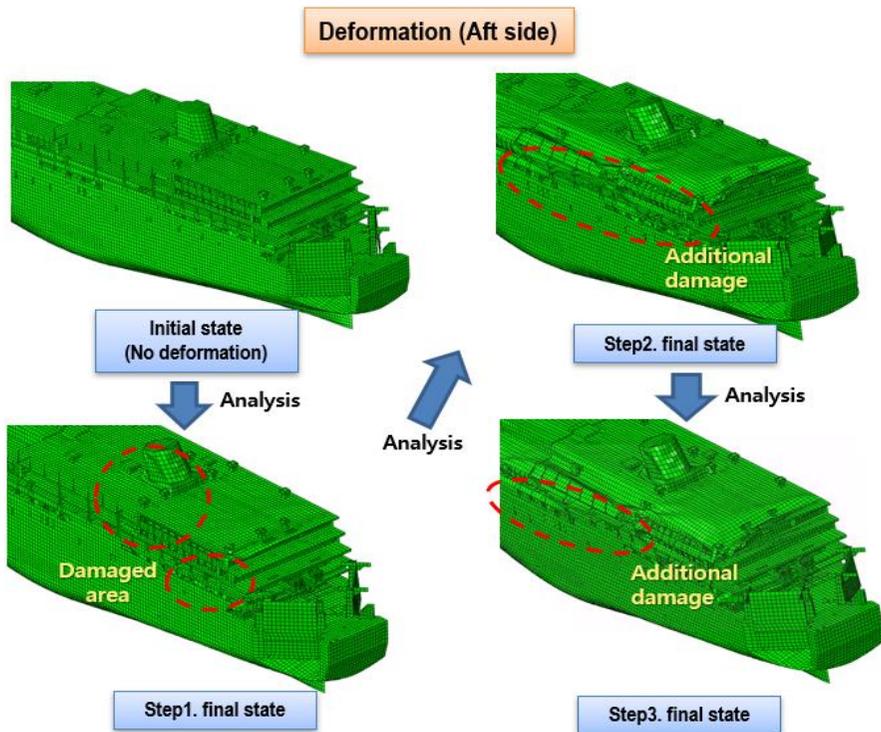


그림 40. 실제 사고 해석 선체 FE 모델 좌현 후부 손상 누적

하지만 실제로 손상이 많이 일어난 C-Deck 과 D-deck 사이, D-deck 과 E-deck 사이를 fine mesh area의 Von mises stress contour을 고려한다면 그림 42 에서 보는 것과 같이 Case C가 다른 case에 비해 조금 더 유의미한 변형을 나타냈다고 판단할 수 있다.

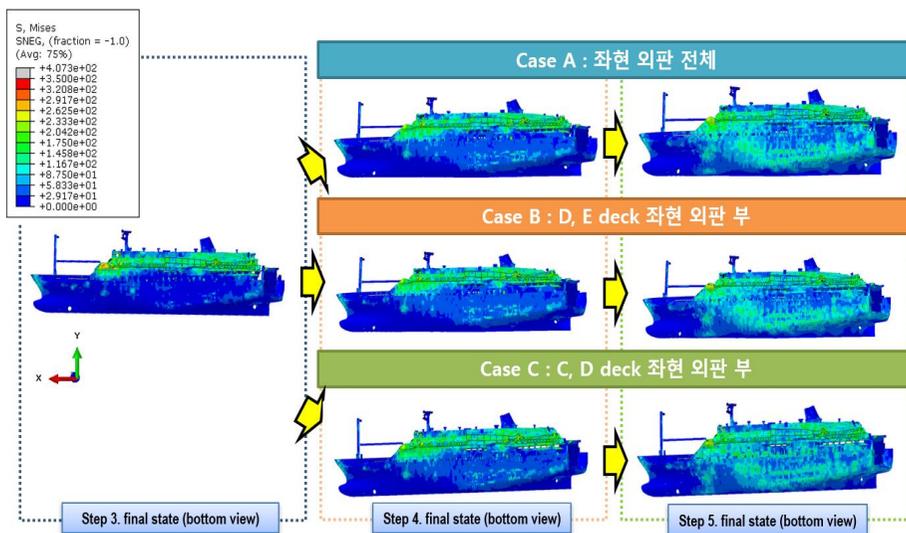


그림 41. 실제 사고 사례 FE 해석 모델 case 별 결과 비교 (Von mises stress contour)

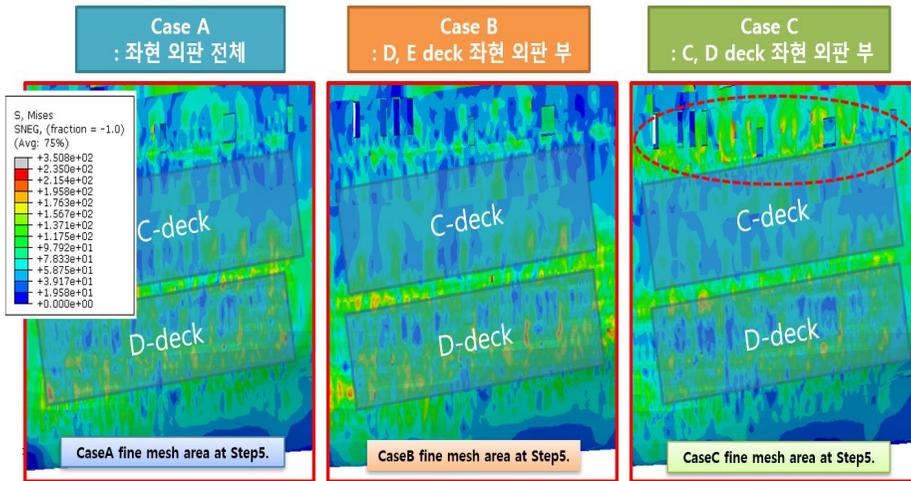


그림 42. 실제 사고 사례 FE 해석 모델 case 별 fine mesh area 손상 비교 (Von mises stress contour)

Case C의 FE 해석결과를 이용하여 좌현 side shell 파단부와 Von mises stress contour 및 형상을 비교하였을 때, 좌현 후부에 유실된 부분 등을 포함하여 전반적인 손상 결과가 매우 유사하게 나오는 것을 확인할 수 있다.

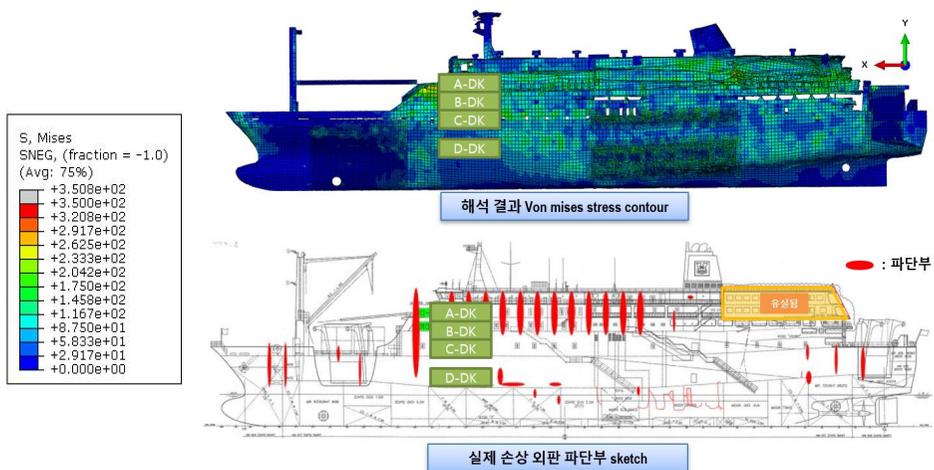


그림 43. FE 해석 결과와 좌현 Side shell 파단부 sketch 비교
(Von mises stress contour)

마찬가지로 Case C의 web frame 별 손상과 해석결과를 비교하였을 때 그림 44 와 같이 전반적인 손상 및 stress 집중 부위의 경향은 유사하게 확인되었다. 하지만 실제 손상부 대비하여 좌굴이 심하게 발생한 사항이나 파단이 발생한 사항은 확인되지 않았다.

종합적으로 연속적인 기법을 적용한 해석결과와 실제 손상에 대한 비교한 결과 global 해석에 대한 시간적인 효율성과 동시에 손상 경향이 유사함을 확인할 수 있다.

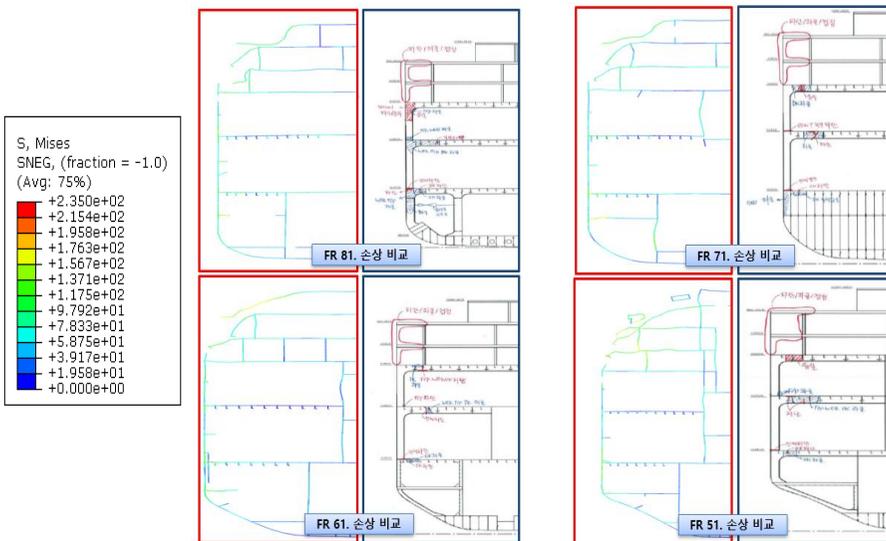


그림 44. 사고 선박 주요 손상부 web frame 별 sketch 현황
(Von mises stress contour)

6. 결 론

본 논문에서는 선박의 침몰 및 인양과정에서의 손상 평가를 위한 기법을 제안하였으며, 실제 사고로 인해 침몰 및 인양을 했던 선박을 예시로 FE 해석을 수행하여 기법을 검증하는 연구를 하였다.

해당 기법의 특징은 상용 구조 해석 프로그램인 ABAQUS에서 제공하는 import 기능을 응용하여 FE 해석시 단계별 결과의 연속성을 유지하는 것이다.

연속성을 적용하는 것에 있어 총 두가지 방법이 있으며, 첫 번째 방법은 deformed shape 만을 import 하는 방법과 두 번째 방법은 deformed shape를 포함하여 residual stress 및 plastic strain 역시 import 하는 방법이다. 때문에 해석의 연속성을 적용할 때 각 단계별 해석 목적을 고려하여 inertia effect 반영 필요 여부 또는 residual stress 및 plastic strain에 대한 data가 불필요 여부 등의 공학적인 판단을 통하여 결정해야 한다.

단, import 기법 중 ABAQUS에서 제공하는 ‘Predefined field-initial state’ 기능을 동적인 해석에서 사용할 경우 manual 상에서 설명하는 것과 달리 동적인 response가 reaction force의 형태로 residual stress 및 plastic strain 등의 data와 동시에 import 되는 것이 확인되어 물리적으로 부정확한 결과를 도출하게 된다. 이것은 아직 개발 초기 단계에서 발생하는 error로 판단되며, 향후 보완 및 적용방안 마련이 필요하다.

또한 해당 기법은 global model 해석에서 효율성 및 결과의 정확성을 향상시키는 방안으로 활용하는 것을 주목적으로 하며, 더욱 정확한 결과를 도출하기 위해서는 선체 FE 모델에 대한 추가적인 수정(메인엔진, 발전기 등 모델링 후 첨부) 및 본 연구에서 수행한 연속적인 해석기법을 통해 손상이 크게 발생하게 되는 주요 부위에 대한 판단을 하고, 이러한 주요 손상 부위에 대해 global model 보다 finer한 mesh(thickness 대비 3~4배)를 적용한 local model 해석을 추가적으로 수행한다면 더욱 정확한 해석결과를 도출할 수 있을 것으로 기대 된다.

참 고 문 헌

- [1] Domestic marine accident statistics. 2019. Korean Maritime Safety Tribunal, Ministry of Maritime Affairs and Fisheries.
- [2] ABAQUS User's Manual. (2016)
- [3] Lee S.H., Kim D.W., Suh J.J., 2016. Structural Safety Assessment of a Sunken Ship Considering Hull Corrosion and Damaged Members - Focus on the Sunken Ship 'No. 7 HaeSung' -. Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy.
- [4] Ham S.H., Roh M.I., Kim J.S., 2018. Numerical analysis of wreck removal based on multibody system dynamics. Journal of Marine Science and Technology. 23:521-535. (2018)
- [5] W. P. Stewart et al., Heavy Lift Dynamic Sewol Ferry Offshore Salvage. OTC-27695-MS., (2017)
- [6] Lee C.S., A Study on the Evaluation of Lifting Force and Salvage Method of Submerged Ship. Pukyong National University, 2014.
- [7] Alsos H.S., Amdahl J., On the resistance to penetration of stiffened plates, Part I - Experiments., International Journal of Impact Engineering 36 (2009) 799-807
- [8] DNV-OS-H205., Lifting Operations. (2014)
- [9] DNV-RP-C208., Determination of Structural Capacity by Non-linear FE analysis Methods. (2013)
- [10] Document Number SEWOL-0416-Q-01, HSHI. (2018)

- [11] External Load Assessment to Fin Stabilizer on Port Side and Offshore Site Investigation, Foresys. (2019)
- [12] 세월호 선체 무게 및 육상거치 관련자료 요구에 대한 회신, 해양수산부. (2015)
- [13] 해양사고 구조구난개선 방안 도출 연구 용역, Zentech (2020)

Abstract

A study on the analysis of hull damage assessment in shipwreck and lifting process

Hyochol, Lee

Naval Architecture and Ocean Engineering

The Graduate School

Seoul National University

The ship that operating at sea can be sunk by an unexpected accident, resulting in various side effects such as economic loss and marine environmental pollution. Especially, in the case of large passenger ships, a large amount of irreversible loss of life is accompanied, so efforts to prevent ship sinking accidents are more urgent.

Basically, in order to prevent accidents, it is necessary to prioritize the identification of the cause of the accident. and in case of the external damage on shipwreck can be an important evidence to determine the cause of the accident. Therefore, evaluation of the

external damage on shipwreck is necessary to determine the cause of the accident.

In this study, the damage assessment for shipwreck appearance occurring during the lifting process from the sinking of the hull is to be performed through 3D structural analysis. The techniques for the damage assessment for shipwreck established as follows.

First, situations in which major damage applied to the hull that may occur during the process from the sinking to the lifting are estimated. then with this, the load applied for each major situation is calculated and applied step by step in 3D structural analysis. because the sinking and lifting process takes a long time, so it is very inefficient in terms of time and economy to perform the analysis at once for the entire process.

After that, each structural analysis result was continuously accumulated over time to maintain the accuracy of the analysis even the individual classified loads were applied independently with each analysis. The application of this continuous analysis technique was verified through a case study comparing the final damage state of the case to which the technique was applied and the case not applied to the simplified box shaped 3D model.

At the last, an analysis was performed in which the above-established technique was applied to a 3D model using an actual sunk and lifted passenger ship as an example. At this time, the steps were subdivided in order to perform a quasi-static analysis of the sinking process occurring over a long period of

time.

then it can be confirmed that the overall damage tendency is consistent. when comparing the actual ship's external damage of the shipwreck and the analysis results,

Based on these results, it was verified that the established impairment evaluation analysis technique can secure time and economic efficiency while maintaining the accuracy of the damage tendency. Furthermore, it is expected to contribute to the identification and prevention of the cause of accidents by effectively carrying out damage assessment of possible shipwreck and lifting ships.

Keywords : Shipwreck, Lifting, FEM(Finite Element Method), Result continuity, Damage assessment

Student number : 2019-21145