



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

안전성과 경제성을 고려한 침몰 선박

인양 설계

**Design of Wreck Removal Considering Safety and
Economy**

2019년 2월

서울대학교 대학원
조선해양공학과
이 주 필

Contents

국문 초록	1
1. 개 요	3
1.1. 연구 필요성.....	3
1.2. 연구 개요.....	6
1.3. 관련 연구 현황.....	7
2. 이론 배경	10
2.1. 다물체 운동해석.....	11
2.2. 와이어의 접촉 및 마찰력.....	13
2.2.1. 구속조건 기반 와이어.....	13
2.2.2. 구속조건 기반 와이어의 접촉.....	14
2.2.3. 와이어의 마찰력.....	16
2.3. 인양력 계산.....	22
2.3.1. 중량.....	23
2.3.2. 부력.....	24
2.3.3. 외력.....	26
2.4. 인양 비용 추정.....	33
2.4.1. 인양 소요 시간 추정.....	34
2.4.2. 인양 비용 추정.....	35
3. Test case	37
3.1. 실린더 인양 예제.....	37

3.2. 소형 선박 인양 예제.....	40
3.2.1. 인양 개요.....	40
3.2.2. 시뮬레이션 모델링.....	41
3.2.3. 시뮬레이션 결과 분석.....	42
4. 제안방법의 적용 예제.....	43
4.1. 시뮬레이션 개요.....	43
4.2. 인양 예제 선정.....	46
4.2.1. 부력재를 사용한 인양 방법.....	47
4.2.2. 부력재를 사용하지 않는 인양 방법.....	49
4.3. 시뮬레이션 결과.....	53
4.3.1. Case 1 : 부력재 설치, 해상크레인 1대, 와이어 부착 인양.....	53
4.3.2. Case 2 : 부력재 설치, 해상크레인 1대, 와이어 감기 인양.....	60
4.3.1. Case 3 : 부력재 미설치, 해상크레인 2대, 와이어 부착 인양.....	63
4.3.2. Case 4 : 부력재 미설치, 해상크레인 2대, 와이어 감기 인양.....	67
4.3.3. Case 5 : 잭업바지 2대, 리프팅빔 이용 인양.....	71
4.4. 안전성 평가 결과.....	75
4.5. 경제성 평가 결과.....	77
4.5.1. 총 인양 기간 추정 결과.....	77
4.5.2. 총 인양 비용 추정 결과.....	80
4.6. 요약 정리.....	81
5. 결 론.....	82
참고문헌.....	83
6. 부 록.....	84
6.1. 인양장비 비용 목록.....	85
6.2. Case 1 인양 비용 계산 결과.....	90

6.3. Case 2 인양 비용 계산 결과.....	94
6.4. Case 3 인양 비용 계산 결과.....	98
6.5. Case 4 인양 비용 계산 결과.....	101
6.6. Case 5 인양 비용 계산 결과.....	104
Abstract.....	107

Figures

Fig. 1-1. 선박 인양 방법 결정 과정.....	3
Fig. 1-2. 기존의 선박 인양 방법에 대한 평가 및 검증 방법.....	4
Fig. 1-3. 선박 인양 시뮬레이션 및 인양 비용 추정 프로그램.....	5
Fig. 1-4. 선박 인양 방법 평가 및 검증 절차.....	6
Fig. 2-1. 본 연구의 핵심 요소.....	10
Fig. 2-2. 다물체 시스템(Multibody system) 구성도.....	11
Fig. 2-3. 선박 인양 시뮬레이션 구성도.....	12
Fig. 2-4. 구속 조건 기반 와이어 로프.....	13
Fig. 2-5. 구속 조건 기반 와이어 로프와 물체의 접촉.....	14
Fig. 2-6. 선체와 와이어 사이의 마찰력 종류.....	16
Fig. 2-7. 수직 항력 계산.....	17
Fig. 2-8. 와이어 방향 정지 마찰력.....	18
Fig. 2-9. 와이어 방향 운동 마찰력.....	19
Fig. 2-10. 물체의 모서리 방향으로의 움직임 특징.....	20
Fig. 2-11. 운동 마찰력을 고려한 노드의 움직임.....	21
Fig. 2-12. 인양력 변화에 따른 인양 단계.....	22
Fig. 2-13. 침몰 선박의 해저 착저 상태.....	27
Fig. 2-14. 미사질 점토(silty clay)에서 강도 그래프 (Bartholomew and Hooper, 1992)	27
Fig. 2-15. 선체의 무게와 해저 저질의 버팀력과의 관계.....	28
Fig. 2-16. 조류의 방향에 따른 조류 계수값.....	30
Fig. 2-17. 평균 풍속과 스펙트럼을 이용한 풍력 계산.....	31

Fig. 2-18. Cummins 방정식을 사용한 파도력 계산	32
Fig. 2-19. 경제성 평가 방법	33
Fig. 2-20. 인양 기간 추정 방법	34
Fig. 3-1. 실린더 및 인양 와이어 배치도.....	37
Fig. 3-2. 정지 마찰력이 작용하는 실린더 인양 케이스.....	38
Fig. 3-3. 운동 마찰력이 작용하는 실린더 인양 케이스.....	39
Fig. 3-4. 인양 선박 제원	40
Fig. 3-5. 인양 작업 진행도	40
Fig. 3-6. 시뮬레이션 모델링	41
Fig. 3-7. 인양 선체의 인양력 분석 결과.....	42
Fig. 4-1. 선박 인양 시뮬레이션 구성.....	43
Fig. 4-2. . 인양 선체 제원	44
Fig. 4-3. 인양 예제 선정	46
Fig. 4-4. Case 1 : 부력재 설치, 해상 크레인 1대, 와이어 부착 인양.....	47
Fig. 4-5. Case 2 : 부력재 설치, 해상크레인 1대, 와이어 감기 인양.....	48
Fig. 4-6. 리프팅 백 종류 및 부력 크기.....	48
Fig. 4-7. Case 3 : 부력재 미설치, 해상크레인 2대, 와이어 부착 인양.....	49
Fig. 4-8. Case 4 : 부력재 미설치, 해상 크레인 2대, 와이어 감기 인양	50
Fig. 4-9. Case 5 : 잭업 바지 2대, 리프팅빔 이용 인양	51
Fig. 4-10. 잭업 바지 2대, 와이어를 선체 감아서 인양.....	52
Fig. 4-11. 동적 인양력 분석 결과 (Case 1).....	53
Fig. 4-12. 침몰 선체 움직임 정의	55
Fig. 4-13. 침몰 선체 움직임 분석 결과 (Case 1)	56

Fig. 4-14. 해상 크레인 움직임 분석 결과 (Case 1).....	58
Fig. 4-15. 동적 인양력 분석 결과 (Case 2).....	60
Fig. 4-16. 침몰 선체 움직임 분석 결과 (Case 2).....	61
Fig. 4-17. 해상 크레인 움직임 분석 결과 (Case 2).....	62
Fig. 4-18. 동적 인양력 분석 결과 (Case 3).....	63
Fig. 4-19. 침몰 선체 움직임 분석 결과 (Case 3).....	64
Fig. 4-20. 10,000톤 해상 크레인 움직임 분석 결과 (Case 3).....	65
Fig. 4-21. 3,600톤 해상 크레인 움직임 분석 결과 (Case 3).....	66
Fig. 4-22. 동적 인양력 분석 결과 (Case 4).....	67
Fig. 4-23. 침몰 선체 움직임 분석 결과 (Case 4).....	68
Fig. 4-24. 10,000톤 해상 크레인 움직임 분석 결과 (Case 4).....	69
Fig. 4-25. 3,600톤 해상 크레인 움직임 분석 결과 (Case 4).....	70
Fig. 4-26. 동적 인양력 분석 결과 (Case 5).....	71
Fig. 4-27. 침몰 선체 움직임 분석 결과 (Case 5).....	72
Fig. 4-28. 잭업 바지1 움직임 분석 결과 (Case 5).....	73
Fig. 4-29. 잭업 바지2 움직임 분석 결과 (Case 5).....	74
Fig. 4-30. 총 인양 기간 분석 결과.....	79
Fig. 4-31. 총 인양 비용 분석 결과.....	80

Tables

Table 1. 관련 연구 비교 현황	9
Table 2. 재질에 따른 밀도.....	24
Table 3. 특성에 따른 인양 장비 사용 비용.....	36
Table 4. 선박 제원	44
Table 5. 해상 환경 조건.....	45
Table 6. 안전성 평가 결과.....	76
Table 7. 단계별 인양 기간 산출 결과.....	78
Table 8. 적용 예제 결과 요약	81

국문 초록

안전성과 경제성을 고려한 침몰 선박 인양 설계

선박 인양 설계 단계에서 가장 중요한 것은 적절한 인양 방법을 선정하는 것이다. 여기서 적절한 인양 방법이란 안전성과 경제성을 모두 고려한 인양 방법이다. 본 연구에서는 다양한 인양 방법들에 대해 안전성 및 경제성 측면에서 검증 및 평가 방법을 제시하였다.

인양 방법의 안전성을 평가하는 방법으로서 다물체 동역학(Multi-body dynamics)을 적용한 시뮬레이션 프로그램을 활용하였다. 특히, 선박 인양 시 인양 와이어의 접촉과 마찰력을 계산함으로써 기존 방법으로는 할 수 없었던, 침몰 선박을 와이어로 감아서 인양하는 방법에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 이외에도 다양한 외적 영향을 고려하여 동적 인양력을 계산할 수 있도록 하였다.

다음으로 다양한 인양 방법에 대하여 인양 비용을 분석하고 분석결과를 이용하여 경제성 평가 방법을 제안하였다. 선박 인양 시 필요한 비용을 분석하기 위해서 인양 단계별로 필요한 시간을 계산하고 선박 인양 시 사용하는 장비, 인력, 소모품, 자재 등에 대한 비용을 추정하였다. 본 연구에서는 인양 필요 시간 및 비용을 예측하는데 전문가 자문 결과와 물리적 계산을 활용해 정량적으로 추정하고자 노력하였다.

최종적으로 본 연구에서 제안한 안전성 및 경제성 평가 방법을 이용하여 실제 선박의 다양한 인양 방법에 대해 평가를 실시하고 결과를 분석하였다.

Keywords: Wreck removal, Multibody dynamics, Safety assessment, Cost estimation

Student number: 2017-28669

1. 개 요

1.1. 연구 필요성

선박이 사고로 침몰하게 되면 여러 가지 요소를 고려하여 침몰 선박 인양 여부를 결정하게 된다. 침몰 선박을 인양하기로 결정하게 되면 인양 설계 단계에서 제일 먼저 인양 방법을 결정하게 된다. Fig. 1-1은 인양 설계 단계에서 인양 방법 결정에 대한 예시이다.

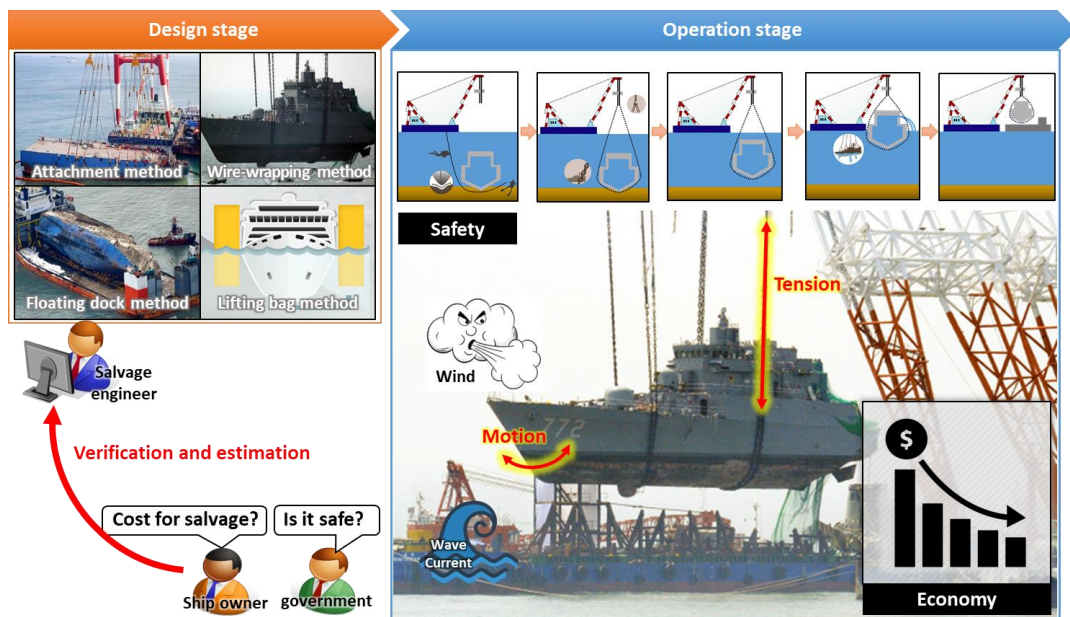


Fig. 1-1. 선박 인양 방법 결정 과정

이 때 다양한 인양 방법 중에서 적절한 인양 방법을 선택해야 한다. 여기서 적절한 인양 방법이란 안전성과 경제성이 모두 고려된 인양 방법이다. 안전성이

고려된 인양 방법이란 오퍼레이션 단계에서 선박을 인양할 때 선박의 움직임과 인양 장력을 최대한 작게 줄이는 방법을 말하며, 경제성이 고려된 인양 방법이란 인양 임무를 수행하는데 필요한 예산을 최대한 줄이는 방법을 말한다. 따라서 선주와 정부는 이러한 적절한 인양 방법을 선정하기 위해 주어진 인양 방법에 대한 평가 및 검증을 요구한다. 기존의 선박 인양 방법에 대한 평가 및 검증 방법은 Fig. 1-2과 같다.

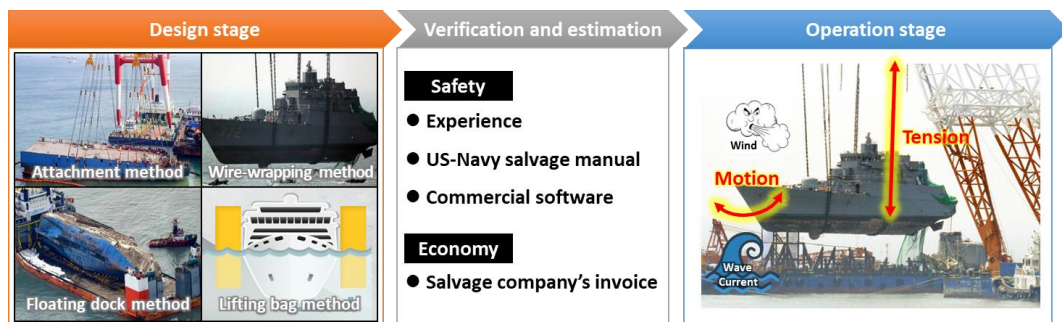


Fig. 1-2. 기존의 선박 인양 방법에 대한 평가 및 검증 방법

인양 방법의 안전성에 대한 평가 및 검증 방법으로 첫번째 전문가의 경험에 의존하는 방법이 있다. 하지만 이 방법은 증명하기 어려우며, 배우기가 어려운 단점이 있다. 두번째로 미해군 구조 교범에 나와 있는 인양 방법을 적용하는 방법이 있다. 이 방법의 경우 적용할 수 있는 부분이 제한적이고 인양력이 과도하게 계산되는 문제가 있다. 세번째는 GHS, OrcaFlex 같은 해양 시뮬레이션 프로그램을 사용하는 것이다. 이 경우 선체를 와이어로 감아서 인양하는 방법 (wire wrapping method)을 구현할 수 없으며, 현재 사용하는 해양 시뮬레이션 프로그램들은 선박 인양 중 발생하는 외력의 변화에 대해 모두 반영할 수 없는

문제가 있다.

인양 방법의 경제성에 대한 평가 및 검증 방법으로 현재 해난구조업체에서 제공하는 계약서에 수록되어 있는 가격을 확인하는 방법 외에는 없다. 이 경우 업체가 시세에 비해 비용을 과다하게 청구하는지 확인할 수가 없다.

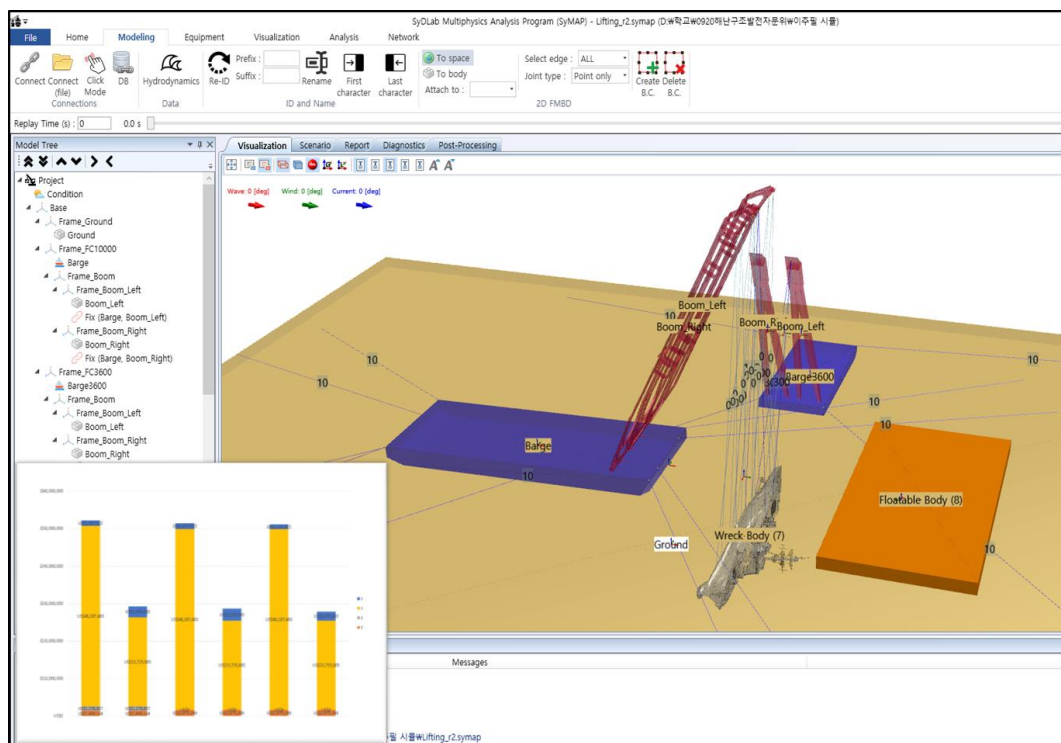


Fig. 1-3. 선박 인양 시뮬레이션 및 인양 비용 추정 프로그램

따라서 본 연구에서는 Fig. 1-3과 같은 선박 인양에 특화된 선박 인양 시뮬레이션 프로그램을 개발하여 다양한 인양 방법의 안전성에 대한 검증 및 평가가 가능하도록 하였으며, 선박 인양 비용 추정 방법을 개발하여 다양한 인양 방법의 경제성에 대한 평가가 가능하도록 하였다.

1.2. 연구 개요

다음으로 본 연구에서 제안하는 선박 인양 방법에 대한 안전성 평가 및 경제성 평가 방법은 Fig. 1-4와 같다.

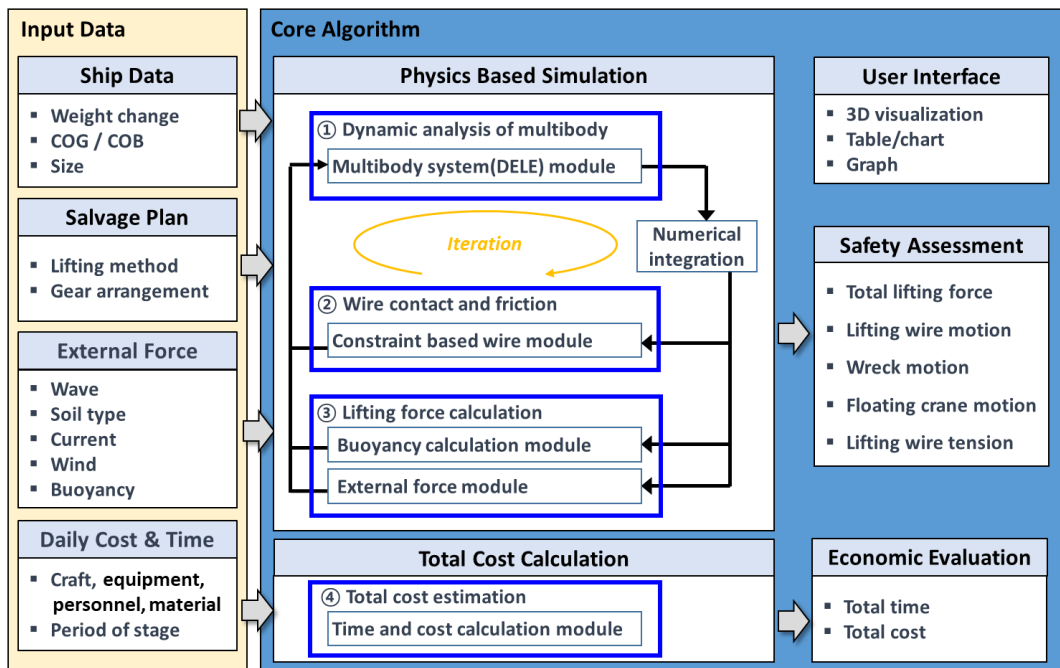


Fig. 1-4. 선박 인양 방법 평가 및 검증 절차

먼저 다양한 정보들이 물리 기반 시뮬레이션에 입력된다. 이후 시뮬레이션 결과로 물체의 동적 인양력과 선체 및 해상 크레인의 움직임 등을 알 수 있다. 이러한 정보를 바탕으로 인양 방법의 안전성 평가가 가능하다. 다음으로 장비의 일별 사용료 정보를 이용하여 총 인양 비용을 계산할 수 있으며, 이를 바탕으로 경제성 평가가 가능하다. Fig. 1-4에서 파란색 사각형으로 되어 있는 부분이 본 연구의 핵심 요소이며, 자세한 내용은 이론 배경에서 설명하겠다.

1.3. 관련 연구 현황

관련 연구는 학술 논문과 상용 프로그램으로 나눌 수 있다. 학술 논문에서 Byun et al. (2001)은 선박 인양 시 해저 저질에 의해 발생하는 흡착력을 계산하는 프로그램을 개발하였다. 그들은 연구에서 토양의 저항력을 구하기 위해 미국 해군 구조 매뉴얼에 제시된 공식을 사용하였다. 그러나 흡착력에 의해서 발생하는 인양력의 동적인 변화에 대해서는 고려하지 않았다.

Byun et al. (2001)의 연구에서는 질량이 없는 접촉점을 사용하여 와이어 접촉과 마찰을 연구했지만 와이어의 움직임에만 집중하여 연구하였으며, 다른 외력들을 반영하지 않았다.

Lee. (2014)의 연구에서는 단순화된 실험용 모델을 만들어서 물 탱크에서 유체 실험을 통해 인양력을 측정하였다.

Lee et al. (2016)의 연구는 조선소에서 블록과 와이어 사이의 간섭을 고려한 블록 회전을 시뮬레이션을 연구하였다. 하지만 와이어의 마찰력은 고려되지 않아 선체를 와이어로 감아서 인양하는 방법은 적용 할 수 없는 한계가 있다.

Ham et al. (2017)의 연구는 선박 인양에 초점을 맞춰 연구를 진행하였다. 하지만 이 연구도 와이어의 마찰력을 고려하지 않아 선체를 와이어로 감아서 인양하는 방법은 적용할 수 없다.

다음으로 조선 및 해양 산업에서 주로 사용되는 상업 프로그램에는 OrcaFlex, SIMO, MOSES, HECSALVE 및 GHS가 있다. 대부분은 단일 물체의 운동 분석을 기반으로 하므로 다물체 운동시 발생하는 상호 작용을 고려할 수 없다. 또한

인양 와이어와 선체 간의 마찰력을 구현할 수 있는 프로그램이 없어 선체를 와이어로 감아서 인양하는 방법은 모든 상용 프로그램에서 불가능하다.

이처럼 운동 해석에서 다물체에 대한 해석과 와이어의 접촉 및 마찰력에 대한 연구는 거의 없었다. 또한 선체의 부력과 인양 비용을 평가하는 연구는 그동안 전무하였다.

하지만 본 연구에서는 다물체의 동적인 움직임과 와이어의 접촉과 마찰력, 선체에 작용하는 외력과 선체의 재질이 가지는 부력을 모두 반영하였다. 또한 선박 인양 시 예상되는 비용을 추정하였다.

Table 1. 관련 연구 비교 현황

		Dynamic analysis		External force				Wreck buoyancy	Cost estimation
		Multi body	Wire contact and friction	Wind	Wave	Current	Soil resistance		
Research paper	Byun et al.(2001)	X	X	X	X	X	O	X	X
	Servin et al. (2011)	O	O	X	X	X	X	X	X
	Lee. (2014)	X	X	X	X	O	O	X	X
	Lee et al. (2016)	O	△	O	X	X	X	X	X
	Ham et al. (2017)	O	X	O	O	O	O	X	X
Commercial program	OrcaFlex	X	X	O	O	O	X	X	X
	SIMO	X	X	O	O	O	X	X	X
	MOSES	X	X	O	O	O	X	X	X
	HECSALV	X	X	O	O	O	X	X	X
	GHS	O	X	O	O	O	X	X	X
	This study	O	O	O	O	O	O	O	O

2. 이론 배경

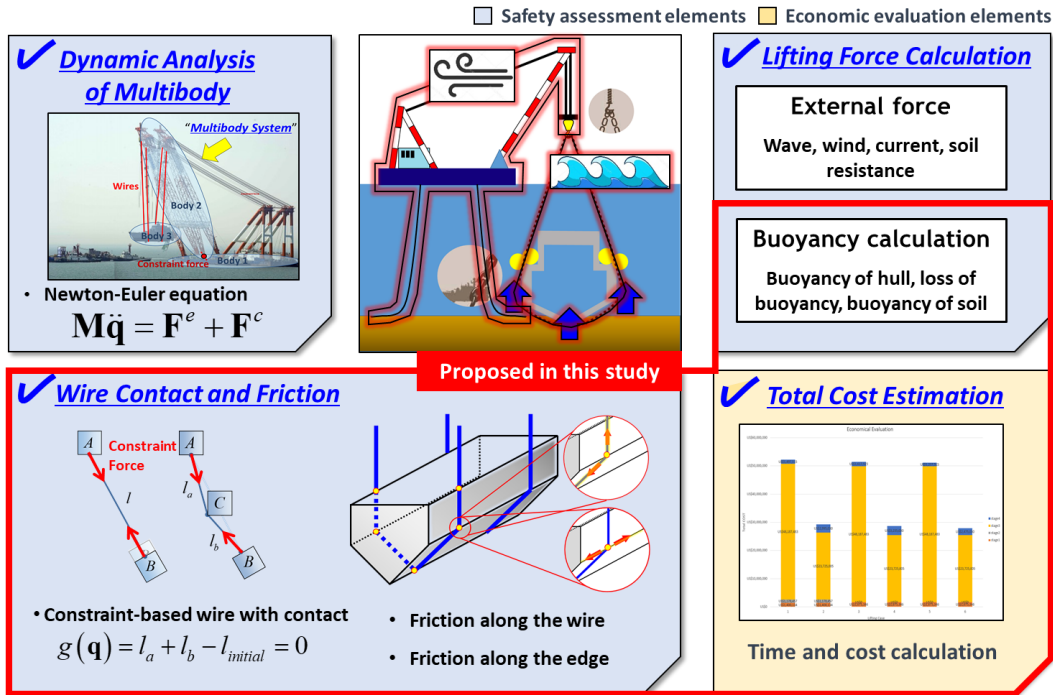


Fig. 2-1. 본 연구의 핵심 요소

본 연구의 핵심 요소는 Fig. 2-1과 같다. 첫번째로 다물체 운동 해석, 두번째로 와이어의 접촉과 마찰력 구현, 세번째로 다양한 외력을 반영한 인양력 계산, 마지막으로 총 인양 비용을 추정하는 부분이 있다. 본 연구에서 새롭게 제안한 부분은 빨간색 사각형 안의 내용으로 와이어의 접촉과 마찰력을 구현하여 선박을 감아서 인양하는 방법을 시뮬레이션 하였으며, 선체의 부력을 계산하여 선박 인양시 선체가 수면 위로 나옴에 따라 인양력이 증가하는 것을 구현하였다. 또한 총 인양 비용을 추정하는 방법을 제안하였다.

2.1. 다물체 운동해석

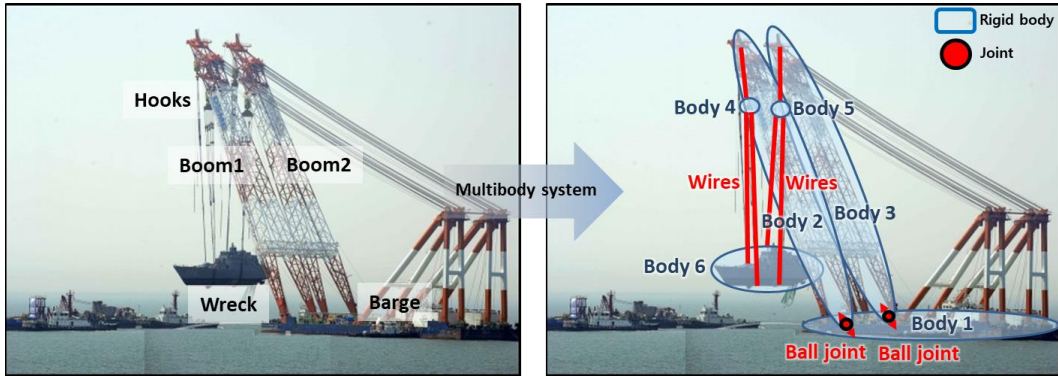


Fig. 2-2. 다물체 시스템(Multibody system) 구성도

먼저 다물체 운동 해석 방법에 대해서 알아보면, Fig. 2-2에 보이는 크레인을 보면 후크와 붐 인양체와 바지 등이 있다. 이러한 다양한 바디가 와이어와 조인트로 연결되어 있는 것을 다물체 시스템 (multibody system) 이라고 부른다.

다물체 시스템은 기본적으로 구속 조건과 구속력이 존재하기 때문에 일반적인 뉴턴 오일러 방정식 (Newton-Euler equation)으로 풀 수 없다. 따라서 다물체 운동방정식을 사용하는데, 본 연구에서는 DELE (Discrete Euler-Lagrange Equation) 방정식을 사용하여 운동을 해석하였다. (Lee et al., 2016; Lew, 2003; Marsden and West, 2001; Wendlandt et al., 1997)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & -\mathbf{G}_k^T \\ \mathbf{G}_k & \Gamma \frac{4\boldsymbol{\varepsilon}}{h^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{k+1} \\ \boldsymbol{\lambda}_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}\mathbf{v}_k - h \frac{\partial V}{\partial \mathbf{q}_k} + h\mathbf{f}(\mathbf{q}_k, \mathbf{v}_k) \\ -\frac{4\Gamma}{h} \mathbf{g}_k + \Gamma \mathbf{G}_k \mathbf{v}_k \end{bmatrix}, \quad (1)$$

여기서 h 는 시간, \mathbf{M} 은 질량 행렬, \mathbf{v} 는 일반화된 속도, \mathbf{q} 는 일반화된 좌표, V 는 위치 에너지, \mathbf{g}_k 는 구속 방정식, \mathbf{G}_k 는 구속 방정식의 미분값, λ 는 라그랑지안 계수이다.

DELE 방정식을 사용한 시뮬레이션 구성은 Fig. 2-3에 나타나 있다. 주어진 정보를 통해서 계산된 속도를 적분하여 위치 및 자세를 구하게 되고 이 정보들이 다시 외력 계산 모듈과 부력 계산 모듈, 와이어 모듈로 들어가게 된다. 이후 제약 조건과 외력의 형태로 DELE 방정식에 반영이 되고 이러한 과정은 반복되어 진행된다.

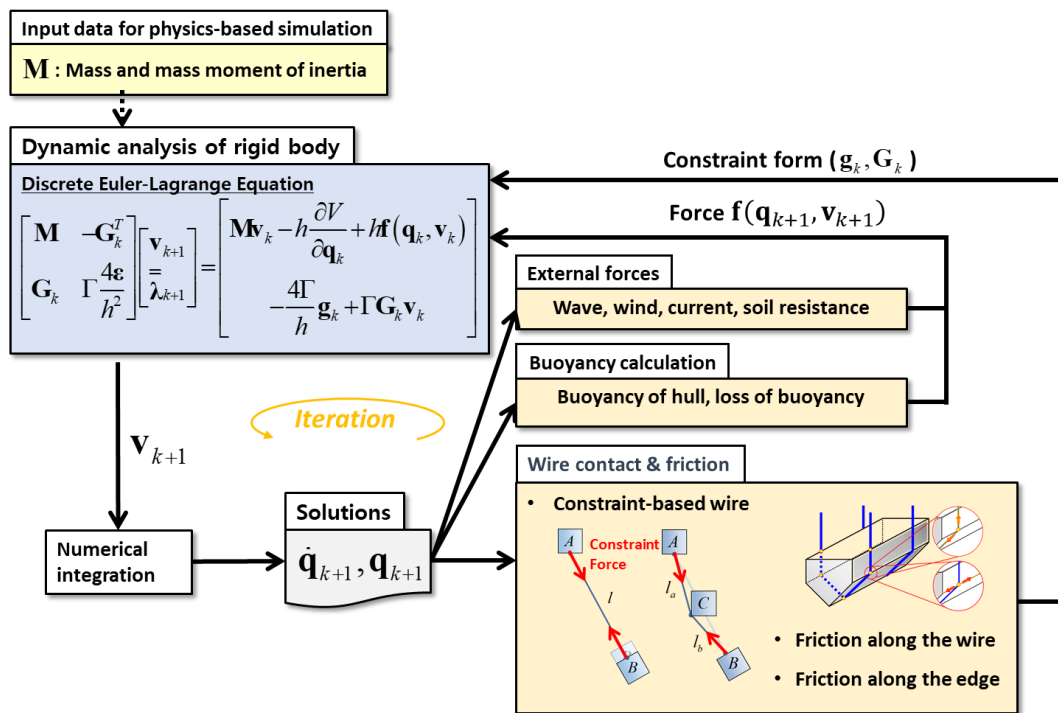


Fig. 2-3. 선박 인양 시뮬레이션 구성도

2.2. 와이어의 접촉 및 마찰력

선체를 감아서 인양하는 방법을 구현하기 위해서는 와이어의 동적 운동이 구현되어야 한다. 와이어의 동적 운동은 세가지로 나눌 수 있다. 첫번째 와이어가 혼자 움직이는 경우, 두번째 와이어 로프가 물체에 접촉했을 경우, 세번째 와이어로프가 물체에 접촉하여 움직이는 경우이다. 이를 구현하기 위해서 먼저 와이어를 구현하고, 와이어와 물체 간의 접촉과 마찰력을 구하였다.

2.2.1. 구속조건 기반 와이어

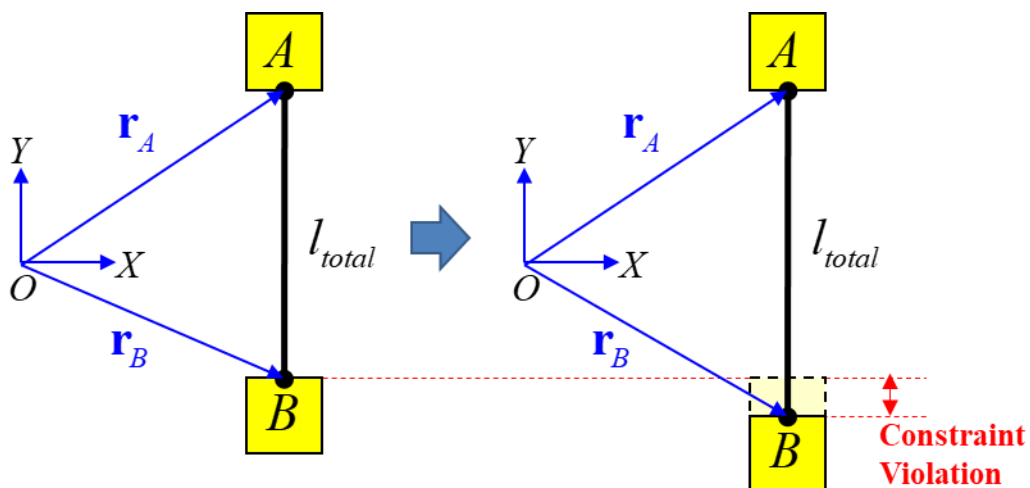


Fig. 2-4. 구속 조건 기반 와이어 로프

본 연구에서 와이어는 구속력에 기반하여 시뮬레이션에 구현된다. Fig. 2-4와 같이 물체 A와 B를 와이어를 이용해서 연결하는 경우 부착 된 두 점 사이의 거리가 일정하게 유지될 것이다. 이러한 조건을 이용하는 것이 구속 조건 기반

와이어의 구속 방정식이 되며 아래와 같이 표현된다. (Lee et al., 2016)

$$g(\mathbf{q}) = l - l_{initial} = |\mathbf{r}_A - \mathbf{r}_B| - l_{initial} = 0, \quad (2)$$

그리고 와이어 로프가 주어진 길이보다 늘어날 경우는 구속 조건 위반으로 간주되어 구속력이 발생한다.

2.2.2. 구속조건 기반 와이어의 접촉

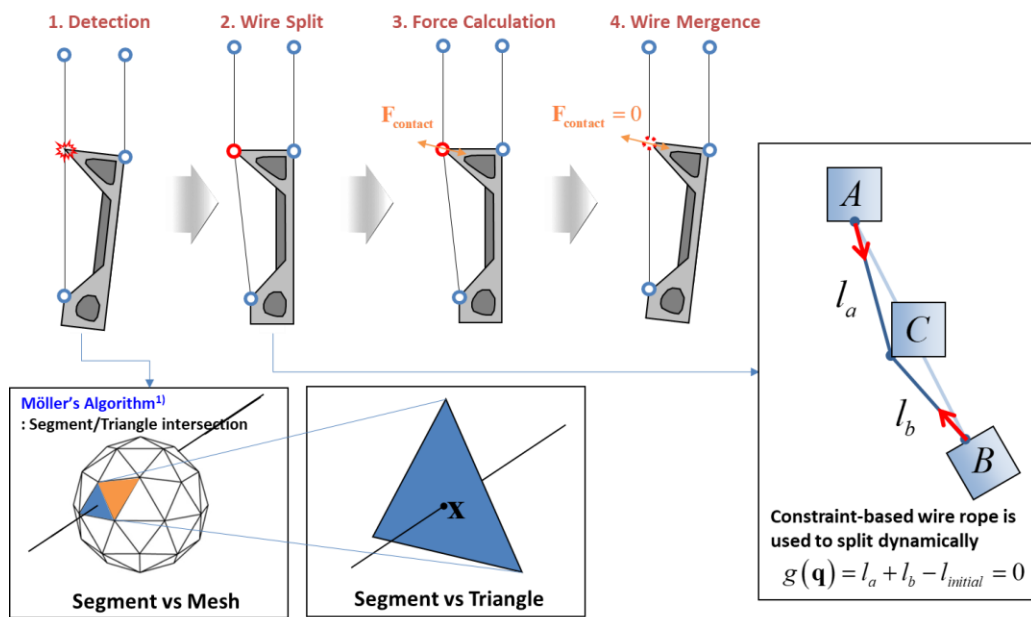


Fig. 2-5. 구속 조건 기반 와이어 로프와 물체의 접촉

다음으로 구속력 기반 와이어로프의 접촉을 알아보면 총 4단계로, Fig. 2-5에서 볼 수 있듯이 탐지, 와이어 분할, 힘 계산, 와이어 병합으로 나눌 수 있다.

탐지단계에서 물체의 메시가 와이어와 만나게 됐을 때 접촉점을 찾아야

하는데 이 과정에서 세그먼트와 삼각형의 교차점을 찾는 가장 빠른 알고리즘 중 하나로 알려져 있는 물리의 알고리즘을 사용하였다. 그리고 이 접촉점을 기준으로 와이어가 분할되게 되는데, 와이어 분할과 구속력 계산은 와이어 로프의 전체 길이가 일정하다는 것으로 구속 방정식을 공식화하여 풀 수 있으며 아래와 같이 표현된다 (Lee et al., 2016).

$$g^*(\mathbf{q}) = (l_a + l_b) - l_{initial} = |\mathbf{r}_A - \mathbf{r}_C| + |\mathbf{r}_C - \mathbf{r}_B| - l_{initial} = 0 \quad (3)$$

2.2.3. 와이어의 마찰력

와이어를 감아서 인양하는 경우 선체와 인양 와이어 간의 마찰력이 매우 중요하다. 마찰력에 따라서 선체가 움직일 수 있기 때문이다. 본 연구에서는 와이어 로프의 마찰력을 구현하기 위해 마찰력의 종류를 Fig. 2-6과 같이 2가지로 구분하였다.

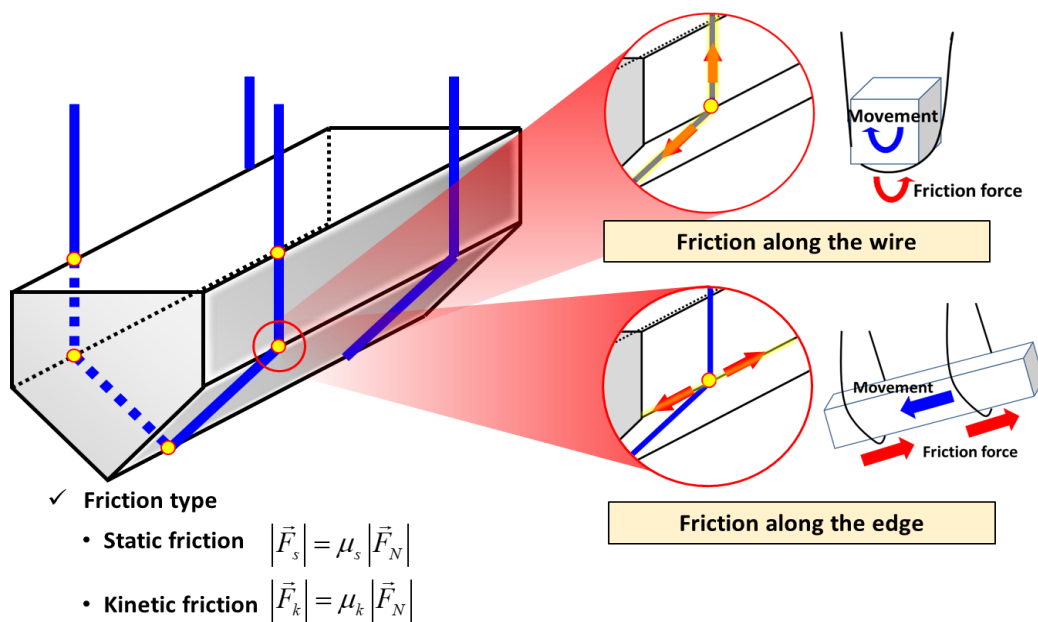


Fig. 2-6. 선체와 와이어 사이의 마찰력 종류

먼저 와이어 방향 마찰력에 대해서 설명하자면 이 마찰력의 경우 선체가 회전하는 경우 작용하게 되는 마찰력이다. 다음으로 물체의 모서리 (edge) 방향 마찰력이 있다. 이 마찰력의 경우 와이어에서 선체가 미끄러질 때 작용하게 되는 마찰력이다. 또한 각각의 상황에서 마찰력은 주어진 힘의 크기에 따라 정지 마찰력 또는 운동마찰력이 적용된다.

(1) 수직 항력 계산

마찰력을 구하기 전에 먼저 마찰력의 크기를 결정하는 가장 중요한 요소인 수직 항력을 구해야 한다. 수직 항력을 구하는 방법은 아래와 같다.

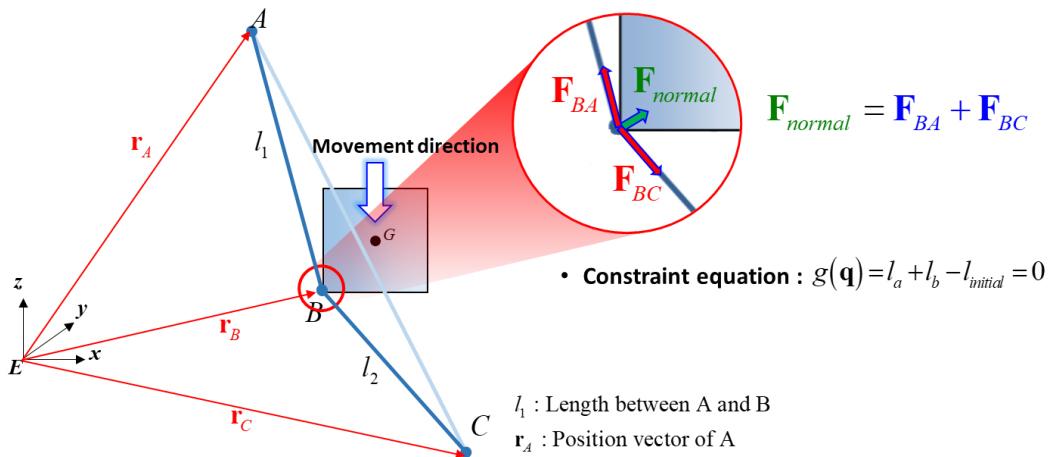


Fig. 2-7. 수직 항력 계산

구속 조건 기반 와이어에서 물체의 접촉으로 와이어를 분할하게 되었을 때 전체 길이가 일정하다는 구속 조건을 위반하게 된다. 이 구속력은 다물체 운동 방정식에서 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{G}^T \lambda = \begin{bmatrix} -\mathbf{k}_{i-1} + \mathbf{k}_i \\ \mathbf{r}_{p_i/G} (-\mathbf{k}_{i-1} + \mathbf{k}_i) \end{bmatrix} \lambda = \begin{bmatrix} (-\mathbf{k}_{i-1} + \mathbf{k}_i) \lambda \\ \{\mathbf{r}_{p_i/G} (-\mathbf{k}_{i-1} + \mathbf{k}_i)\} \lambda \end{bmatrix} \quad (4)$$

이 구속력을 좀 더 살펴보면 Fig. 2-7에서 보이는 것처럼 접촉점을 기준으로 동일한 힘의 크기가 서로 다른 방향으로 작용하게 된다. 이러한 구속력의 합이

물체에 미치는 총 힘의 크기를 수직 항력을 정의하였다.

$$\vec{F}_{normal} = \mathbf{G}^T \lambda \quad (5)$$

(2) 와이어 방향 마찰력

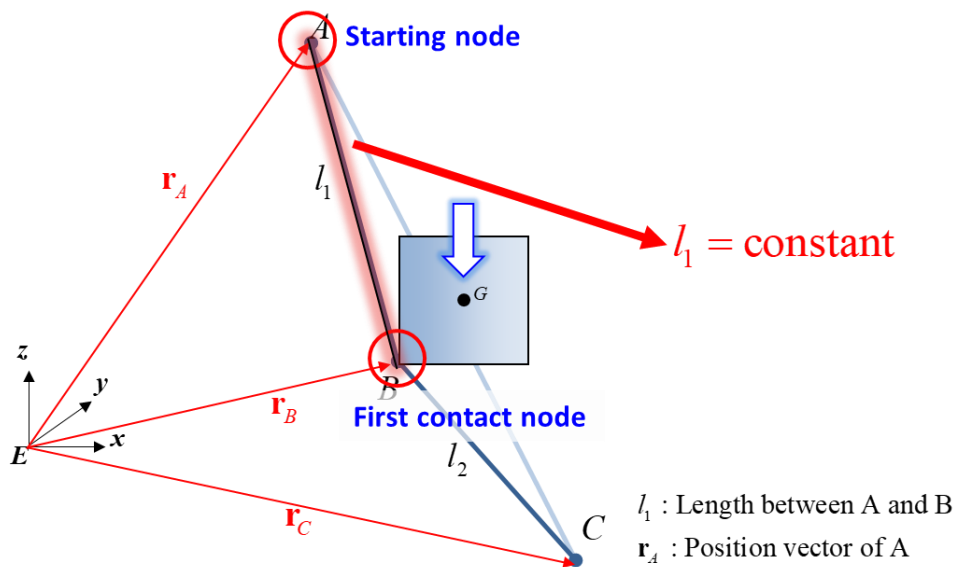


Fig. 2-8. 와이어 방향 정지 마찰력

다음으로 와이어 방향 마찰력 중 정지 마찰력이다. 물체가 와이어와 접촉하게 되었을 때 와이어의 시작점 A와 물체와 와이어가 처음으로 만나는 점 B를 연결한 직선 l_1 이 만들어 진다. l_1 의 길이를 제한하는 제약조건을 만들어서 접촉 노드가 미끄러지는 것을 막았다.

거기에 추가로 l_1 의 길이가 와이어 자체가 가지는 탄성에 의해서 늘어날 수

있는데, 이는 전체 와이어의 길이에서 l_1 이 차지하는 비율이 늘어나기 전과 후가 같다는 제약 조건을 만들어서 구현하였다. 제약조건식은 아래와 같다.

$$g_{static}(\mathbf{q}) = l_1 - l_{total} \times \left(\frac{l_1}{l_{total}} \right)_{initial} = |\mathbf{r}_A - \mathbf{r}_B| - (|\mathbf{r}_A - \mathbf{r}_B| + |\mathbf{r}_B - \mathbf{r}_C|) \times \left(\frac{l_1}{l_{total}} \right)_{initial} = 0 \quad (6)$$

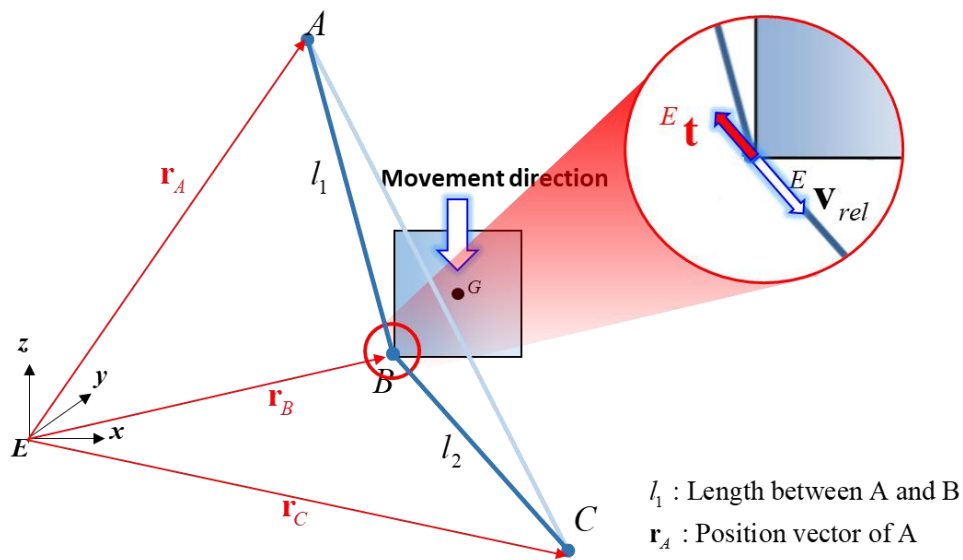


Fig. 2-9. 와이어 방향 운동 마찰력

다음으로 운동 마찰력의 경우 Fig. 2-9에서 볼 수 있듯이 주어진 수직 항력의 크기에 운동 마찰계수를 곱해서 마찰력의 크기를 구할 수 있다.

여기에 마찰력의 방향은 접촉 노드의 상대속도의 반대 방향으로 주어지는 것으로 구할 수 있다.

$$\mathbf{F}_k = |\mathbf{F}_k| \cdot {}^E \mathbf{t} = \mu_k \cdot \lambda \cdot {}^E \mathbf{t} \quad (7)$$

μ_k 는 운동 마찰 계수이며, λ 는 라그랑지 계수, ${}^E \mathbf{t}$ 는 평면상의 접촉점에서의 상대 속도의 투영으로 얻어지는 단위 벡터이다.

(3) 물체의 모서리(edge) 방향 마찰력

다음으로 물체의 모서리 방향 마찰력이다. 마찰력을 알아보기 전에 먼저 와이어가 모서리 방향으로 움직일 때의 특징에 대해 먼저 알아보겠다.

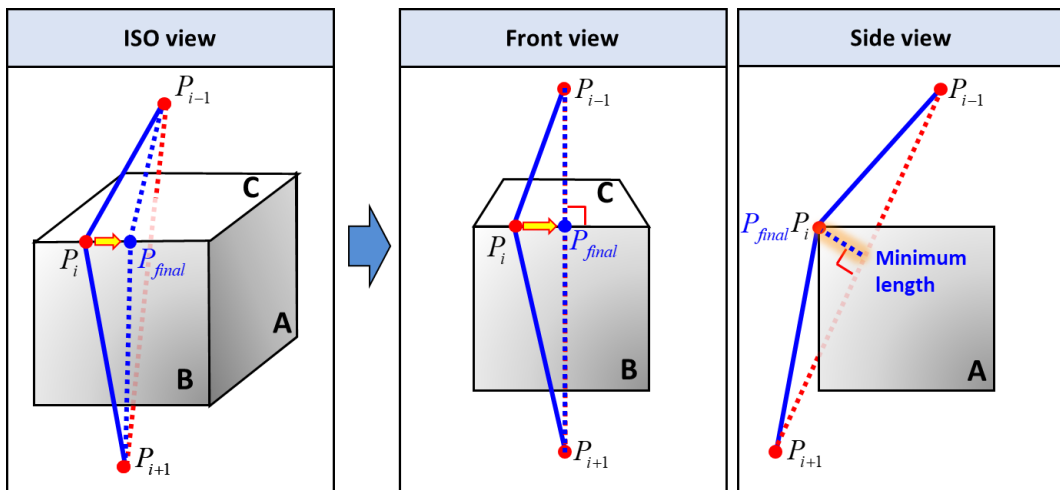


Fig. 2-10. 물체의 모서리 방향으로의 움직임 특징

와이어가 최초로 접촉한 위치에서 와이어에 힘이 가해지면 Fig. 2-10에서 볼 수 있듯이 와이어와 물체의 접촉점은 와이어 길이가 최소가 되는 최종점으로 이동하게 된다. 이 최종점은 기하학적으로 인접한 두 점을 연결한 직선과 최단거리가 되는 점이 된다.

정지마찰력을 먼저 보면, 물체와 와이어가 처음 접촉한 점에서 움직이지 않는 것으로 구현이 가능하다.

$$P_i^{k+1} = P_i^k \quad (8)$$

다음으로 운동 마찰력의 경우 최초점에서 최종점으로 이동할 때 Fig. 2-11에서 보이는 것처럼 특정 비율만큼 이동하는 것으로 구현할 수 있다.

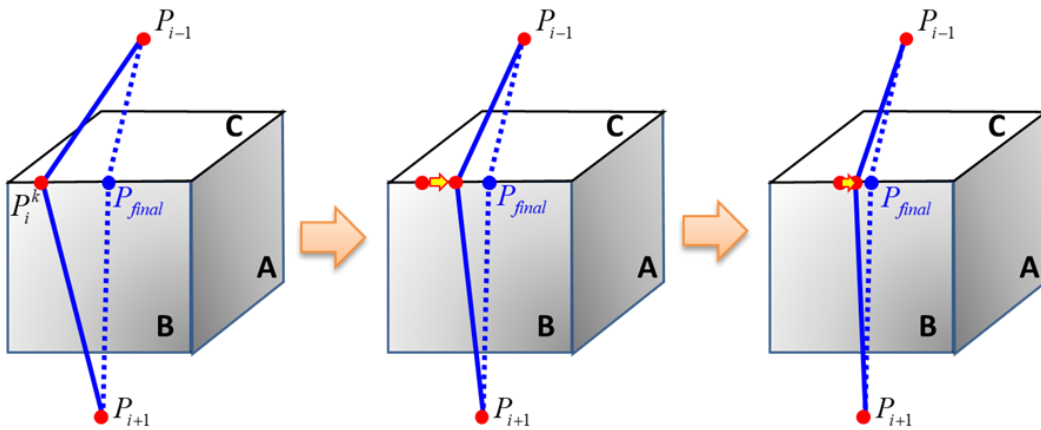


Fig. 2-11. 운동 마찰력을 고려한 노드의 움직임

$$P_i^{k+1} = P_i^k + \alpha(P_{final} - P_i^k) \quad (9)$$

P_i^k 는 노드의 현재 위치이고, P_i^{k+1} 은 노드의 다음 위치이다. 여기서 운동 마찰의 경우, 특정 비율 α 만큼 최종점으로 접촉점이 이동하게 된다. (Servin et al., 2011)

2.3. 인양력 계산

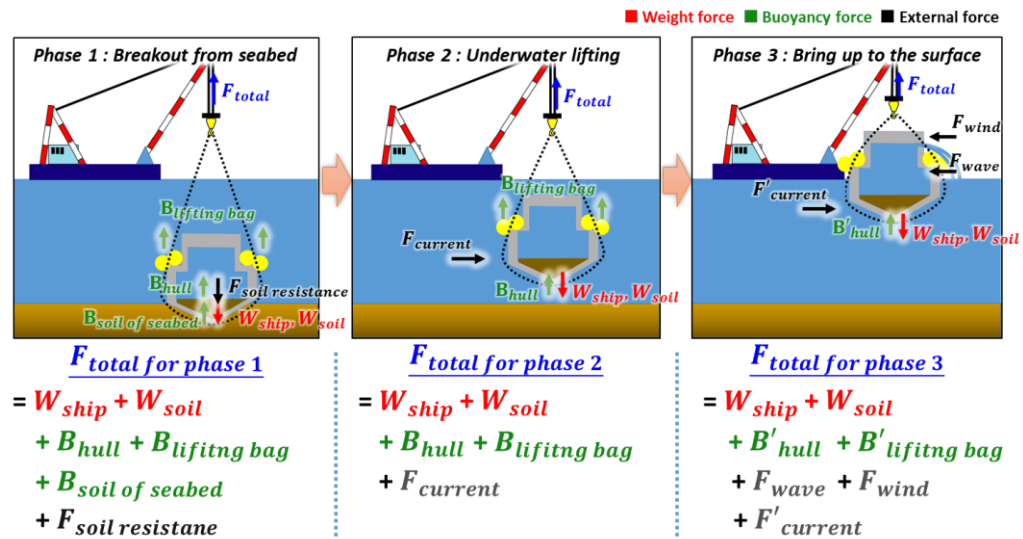


Fig. 2-12. 인양력 변화에 따른 인양 단계

다음으로 인양력 계산이다. 먼저 인양단계를 인양력의 변화에 따라 Fig. 2-12에서 볼 수 있듯이 3단계로 나누고 각 단계별로 인양력을 분석하였다.

1단계로 해서 이탈 단계를 보면, 먼저 선체의 무게와 침전물의 무게가 있다. 거기에 선체의 부력과 리프팅백의 부력에 의해 인양력이 감소되고, 마지막으로 해저저질에 의한 흡착력이 추가된다.

2단계로 수중 인양 단계에서는 흡착력은 사라지고 조류힘의 영향을 받게 된다.

3단계로 수면상 인양 단계에서는 선체가 물 밖으로 나오에 따라 선체의 부력과 리프팅백의 부력 및 조류힘은 감소하게 되고 추가로 파도와 바람힘을 받게 된다. 각 단계별로 작용하게 되는 세부적인 힘에 대해서 무게, 부력, 외력으로 구분하여 아래에서 설명토록 하겠다.

2.3.1. 중량

(1) 선체의 중량

무게의 경우 첫번째로 선체가 가지는 무게가 있다. 이는 선체의 제원에 나와 있는 경하 중량에 현재 적재되어 있는 재화 중량을 추정하여 더하면 구할 수 있다.

$$W_{ship} = Lightweight + Deadweight \quad (10)$$

(2) 선체 내부 침전물의 중량

두번째로 선체 내부에 쌓여 있는 침전물의 무게가 있다. 이를 구하기 위해서 먼저 잠수사나 ROV를 이용하여 대략적인 침전물의 양을 확인하여야 한다. 이후에 침전물의 밀도에 해당 격실의 부피를 곱해서 침전물의 무게를 구할 수 있다.

$$W_{soil} = \rho_{soil} V_{inside} \quad (11)$$

2.3.2. 부력

(1) 선체 재질에 따른 부력

부력은 첫번째로 선체의 재질 자체가 가지는 부력이 있다. 아래 표에 보이는 것처럼 다양한 재질의 물체들의 밀도를 사용해서 선체의 무게에 따른 부피를 구할 수 있다.

Table 2. 재질에 따른 밀도

종 류	밀도 (kg / m3)
해수	1025
담수	1000
철	7833.3
알루미늄	2643.02
FRP	1377.57
플라스틱	1201.37
목재	352.4~768.88

선체의 밀도에 이렇게 구한 선체의 부피를 곱해서 선체의 재질이 가지는 부력을 구할 수 있으며, 거기에 선체 내부의 밀폐되어 있는 격실의 부력을 더해서 선체의 총 부력을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} B_{hull} &= \rho_{sw} (V_{hull} + V_{tank}), \quad V_{steel} = \frac{\Delta}{\rho_{hull}} \\ &= \rho_{sw} \left(\frac{\Delta}{\rho_{hull}} + V_{tank} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

(2) 부력재 설치에 따른 부력

다음으로 선체의 인양력을 줄이기 위해서 추가로 설치하는 리프팅 백의 부력이다. 리프팅 백의 경우 종류와 크기가 매우 다양하며, 제조사에서 정확한 부력의 크기가 제원에 적혀 있다. 이러한 정보를 이용하여 설치한 모든 종류의 부력재의 부력을 다 합하여 총 부력을 구할 수 있다.

$$B_{lifting\ bag} = \rho_{SW}(V_{drop} + V_{cylindrical}) \quad (13)$$

(3) 수면상으로 부상에 따른 부력 변화

수면 밖으로 침몰 선박이 나올 경우 중량 및 부력의 변화를 고려해야 한다. 수면 바깥으로 들어 올려진 초기에는 선체 내부에 포함된 해수가 모두 추가적인 중량으로 작용한다. 이후 일정하게 해수가 배수되면서 선체의 중량은 감소하게 된다. 이후 모든 해수가 배출되면, 결국 중량은 일정하게 된다. 본 연구에서는 선체 내부의 해수가 모두 배수되었다고 가정하였다. 따라서 수면 밖으로 올라오는 중 침몰 선박의 중량은 변화가 없다. 한편, 부력 변화의 경우 수면 바깥으로 나온 선체의 비율을 고려하여 선박 강판 두께에 의한 부력이 감소한다고 가정하였다. 또한 설치한 부력재가 수면 밖으로 나오게 되면서 부력이 사라지게 되는 것도 고려하였다.

2.3.3. 외력

(1) 흡착력

흡착력은 선체가 해저에서 이탈할 때 발생하게 된다. 흡착력은 선박이 해저에 박힌 깊이와 밀접한 관련이 있다. 따라서 선체가 해저에 착저 했을 때 박히는 깊이를 먼저 알아야 한다. 이는 흙의 지지력(F_q)을 구하는 과정에서 수치해석으로 구할 수 있다.

일반적으로 2m/s이하의 낙하 속도를 가지고 있을 경우 아래 방정식으로부터 해저 저질에 의한 지지력을 구할 수 있다 (Bartholomew and Hooper, 1992).

$$\begin{aligned} F_q &= A_e \cdot q_u \\ &= A_e \cdot 5s_u \left[1 + 0.2 \left(\frac{D_e}{B_e} \right) \right] \left[1 + 0.2 \left(\frac{B_e}{L_e} \right) \right], \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, F_q 는 해저 저질에 의한 지지력, S_u 는 해저 저질의 전단 응력, A_e 는 해저면과 침몰 선박의 접촉 면적(contact area), D_e 는 박힌 깊이, L_e 와 B_e 는 각각 접촉 면적의 길이와 폭을 의미한다.

각각을 그림으로 나타내면 Fig. 2-13에서 확인할 수 있고, S_u 의 경우 미 해군 구조 교범에서 그래프 형태로 확인할 수 있으며 예시는 Fig. 2-14과 같다.

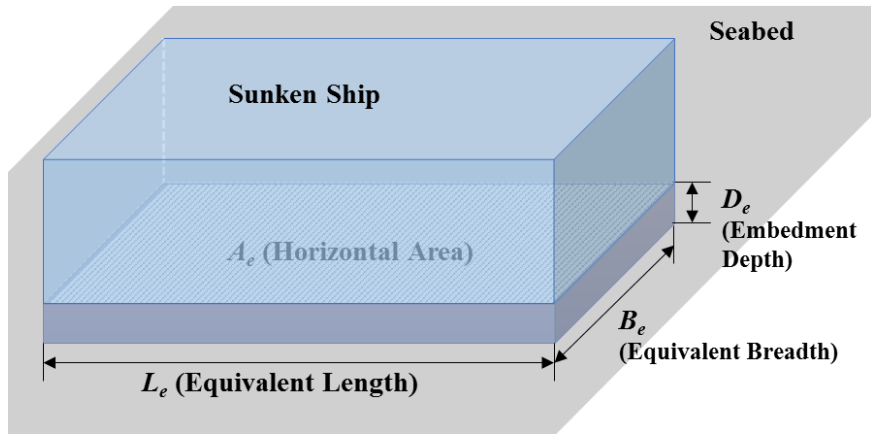
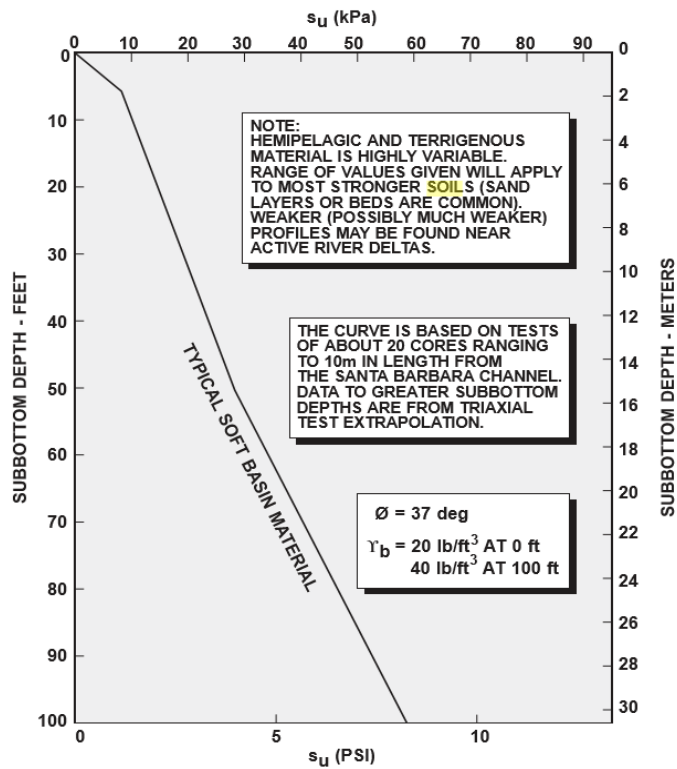


Fig. 2-13. 침몰 선박의 해저 착저 상태



FROM THE HANDBOOK FOR MARITIME GEOTECHNICAL ENGINEERING, KARL ROCKER JR, NAVAL CIVIL ENGINEERING LABORATORY, 1985

Fig. 2-14. 미사질 점토(silty clay)에서 강도 그래프 (Bartholomew and Hooper, 1992)

지지력(F_q)은 박힌 깊이에 따라 증가하게 되므로 처음 해저 바닥에 침몰 선박의 바닥이 닿게 되면 해저 저질에 의한 지지력(F_q)이 선박에 작용하는 중력과 부력의 합보다 작기 때문에 점점 땅에 박히게 된다. 그러던 중 지지력(F_q)과 선박에 작용하는 중력과 부력의 합과 같아지는 평형 상태에 도달하면 Fig. 2-15에 나타난 것처럼 더 이상 박히지 않고 멈추게 된다. 따라서 이 경우, 해저 저질에 의한 부력(B_{soil})도 인양력 계산 시 추가적으로 고려가 되어야 한다.

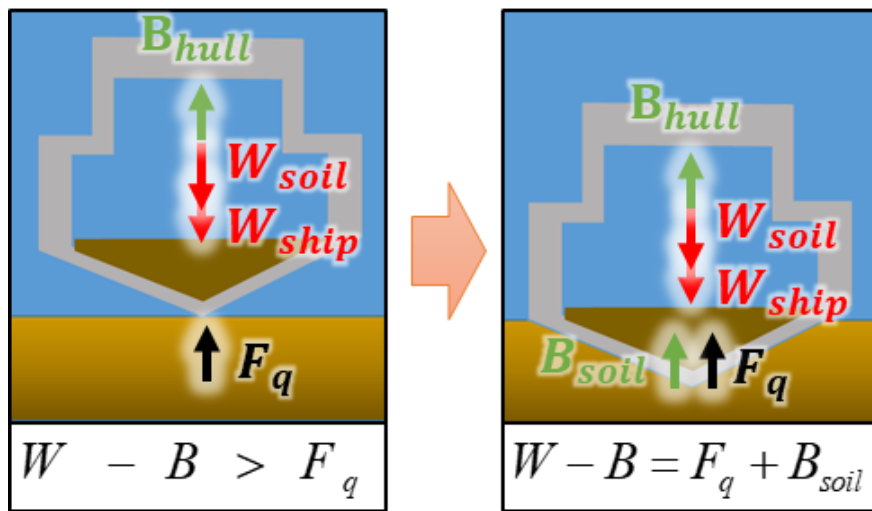


Fig. 2-15. 선체의 무게와 해저 저질의 버팀력과의 관계

해저 저질에 박혀 있는 침몰 선박이 평형 상태에 있을 때의 지지력은 아래 식과 같이 표현할 수 있다.

$$F_q = W - B - B_{soil} = W - B - \rho_{soil} A_e D_e \quad (15)$$

여기서 해저 저질에 의한 부력은 해저 저질의 밀도와 접촉 면적(A_e), 박힌 깊이(D_e)의 곱으로 나타낼 수 있다. 해저 저질의 전단 응력(S_u)에 대한 식으로 정리하면 다음 식과 같다.

$$s_u = \frac{W - B - \rho_{soil} A_e D_e}{A_e \cdot 5 \left[1 + 0.2 \left(\frac{D_e}{B_e} \right) \right] \left[1 + 0.2 \left(\frac{B_e}{L_e} \right) \right]} \quad (16)$$

S_u 는 D_e 에 따른 그래프로 표현되어 있는데 수치 해석법에 의해 양변이 같아지는 D_e 를 구할 수 있다 (Ham et al., 2015). 일단 D_e 가 구해지고 나면, 아래의 식을 이용하여 해저 저질에 의한 흡착력을 구할 수 있다.

$$F_{\text{soil resistance}} = F_q \left[1.0 - 0.97 e^{-2.75 \left(\frac{D_e}{B_e} \right)} \right] \quad (17)$$

(2) 조류력

조류력은 일반적으로 다음과 같은 경험식으로 계산할 수 있다. (Bartholomew and Hooper, 1992)

$$F_{current} = \frac{1}{2} \rho_{sw} S V_C^2 \times C_d(a_c) \quad (18)$$

여기서, S 는 투영 면적, V_C 는 조류의 속도, C_d 는 조류력 저항 계수, a_c 는 조류의 입사각을 의미한다. 여기서 C_d 는 a_c 에 따라 달라지며, Fig. 2-16과 같다.

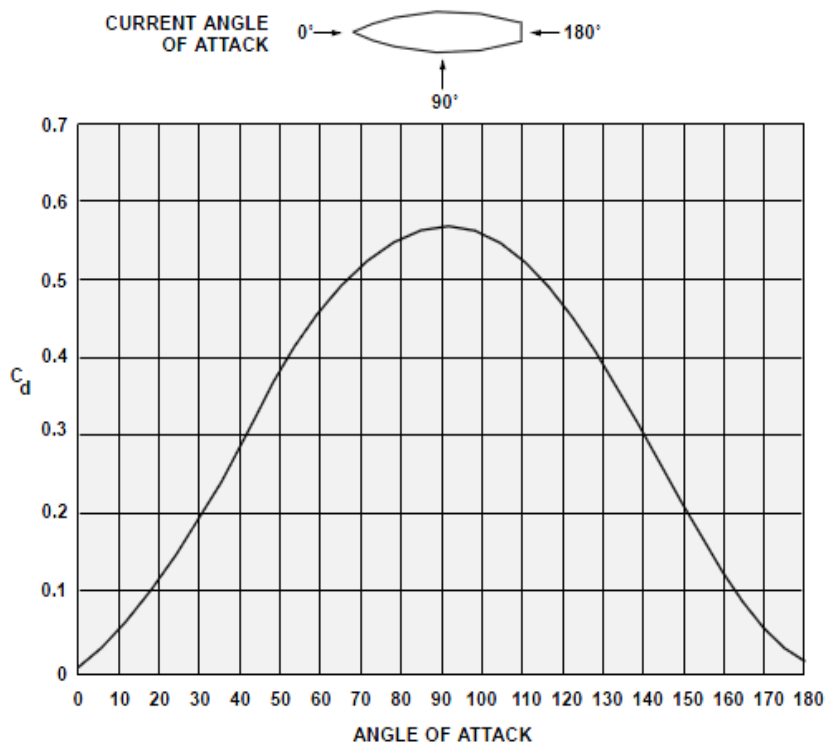


Fig. 2-16. 조류의 방향에 따른 조류 계수값

(3) 풍력

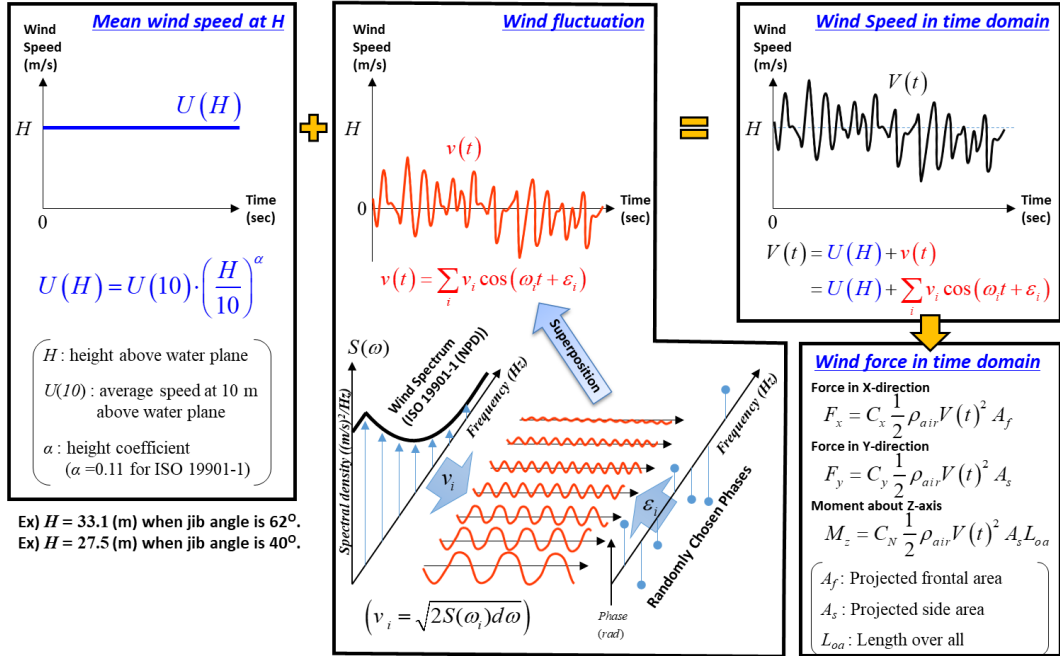


Fig. 2-17. 평균 풍속과 스펙트럼을 이용한 풍력 계산

$$F_{wind} = \frac{1}{2} \rho_{air} S V_{wind}^2 \times C_d(a_c) \quad (19)$$

S는 난파선의 투영 면적이며, V_{wind} 는 풍속, C는 바람 계수이며, a_c 는 입사 각이다. C_d 는 a_c 의 함수이며 실험에 의해 얻어진다. 그러나 풍속 (V_{wind})은 일정하지 않으므로 평균 풍속과 풍 스펙트럼을 사용한다. (Ham et al., 2017b)

(4) 파도력

파도력은 해상크레인을 흔들리게 하고 이러한 움직임이 인랑력에 동적인 변화를 주게 된다. 파도력을 DELE 방정식에 반영하는 방법은 Fig. 2-18과 같다. 먼저 파도력은 $F_{exciting}$ 과 $F_{radiation}$ 으로 나누어진다. 이 두가지 힘을 구하기 위해서 DNV의 WADAM을 사용하여 추가 질량 ($a_{ij}(\omega)$)과 감쇠 계수 ($b_{ij}(\omega)$), 힘 RAO ($F(\omega)$)를 얻을 수 있다. 그리고 Cummins 방정식을 사용하여 $F_{exciting}$ 과 $F_{radiation}$ 을 계산할 수 있다. (Ham et al., 2017b)

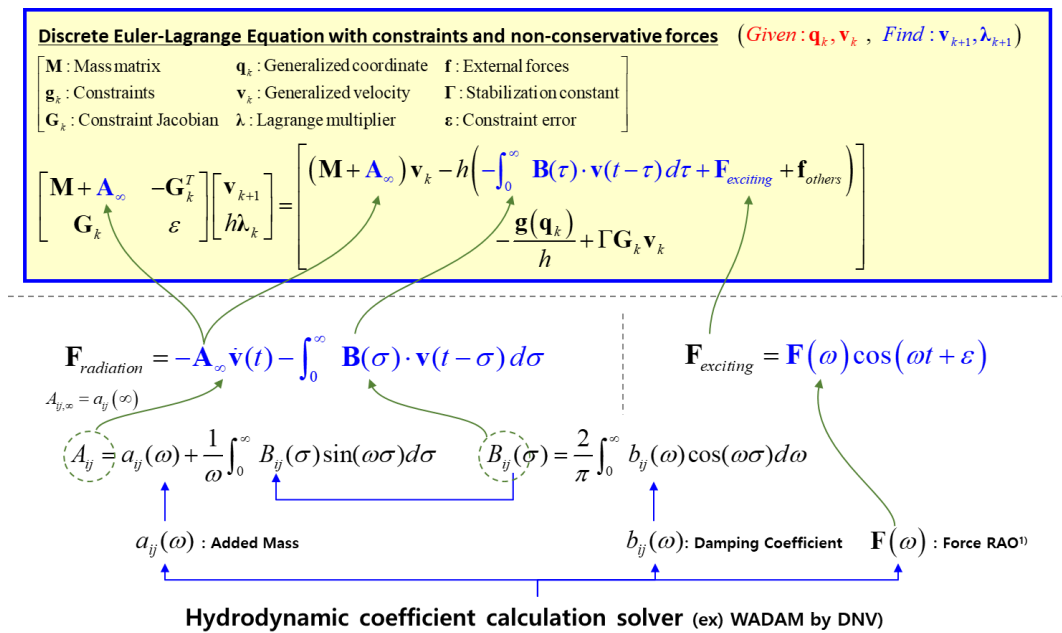


Fig. 2-18. Cummins 방정식을 사용한 파도력 계산

2.4. 인양 비용 추정

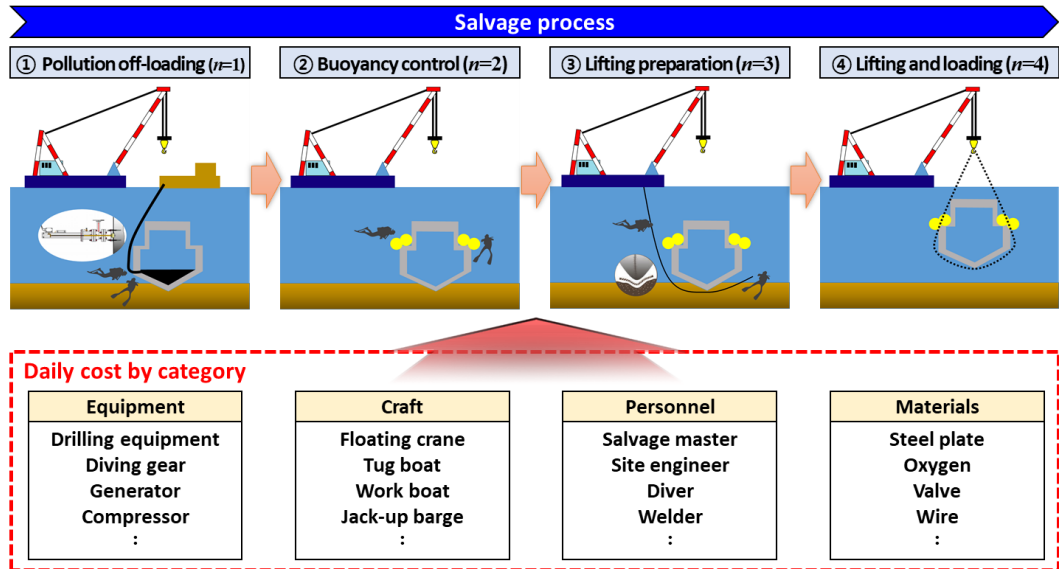


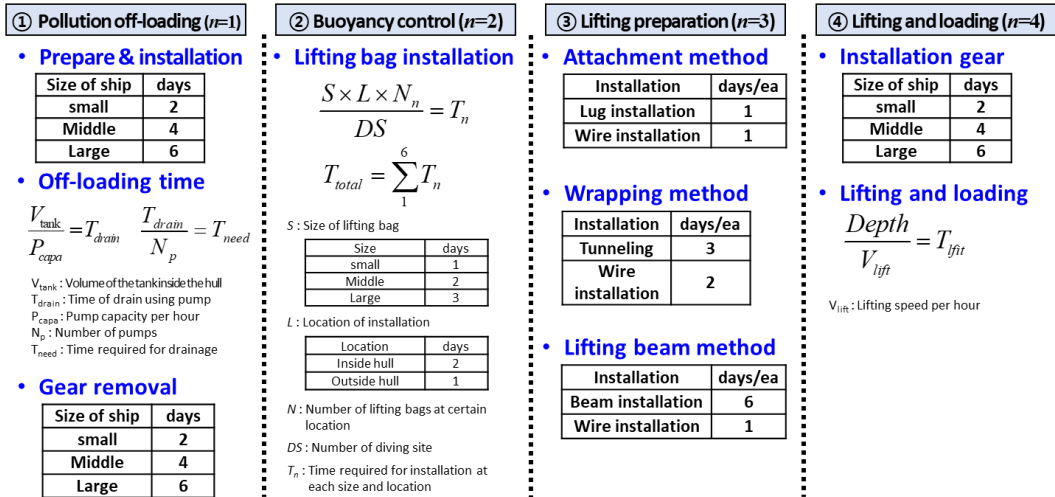
Fig. 2-19. 경제성 평가 방법

다음으로 인양 비용 추정을 위해서 먼저 선박 인양 전 과정을 4단계로 나누었다. 이 단계에 따라서 소요 시간을 예측하고 필요한 비용을 계산하였다. 각 단계별로 계산된 인양 비용을 모두 합하여 총 인양 비용을 구하게 되며 계산식은 아래와 같다.

$$C_{total} = \sum_{n=1}^4 T_n \times (E_n + C_n + P_n + M_n) \quad (20)$$

C_{total} 은 총 금액, n 은 회수 단계, T_n 은 n 번째 단계의 소요시간, E_n 은 n 번째 단계의 장비 비용, C_n 은 n 번째 단계의 선박 비용, P_n 은 n 번째 단계의 인력 비용, M_n 은 n 번째 단계의 재료비용이다.

2.4.1. 인양 소요 시간 추정



* Consulted by the salvage expert group : navy SSU, Korea salvage, Pacific ocean marine industries

Fig. 2-20. 인양 기간 추정 방법

다음으로 인양 단계별 소요 시간 계산에 대해서 알아보겠다. Fig. 2-20에 나와 있는 것처럼 먼저 선체 내부의 오염물질 제거 단계가 있다. 이 단계는 오일, 윤활유, 내부 퇴적물과 같은 선체 내부의 오염 물질을 제거하게 된다. 준비에 필요한 시간은 선박의 크기에 따라 계산된다. 이후 선체 내부에서 오염 물질을 제거하는 데 필요한 시간은 설치된 펌프 수를 펌프 용량으로 나누어 계산한다.

두번째로 부력 조절 단계로 리프팅 백이나 폰툰 같은 부력재를 설치하여 총 인양력을 줄이는 단계이다. 설치에 필요한 시간은 소, 중, 대형으로 구분되는 리프팅 백의 크기에 따라 계산된다. 크기를 선택한 후 설치 위치에 따라 소요 시간을 증가시켰다. 이후 잠수 작업 개소의 숫자에 따라 나눠서 소요 시간을 결정하였다.

세번째로 인양 준비단계로 인양 와이어를 설치하는 방법에 따라 선체에 와이어를 부착하는 방법과 선체를 감아서 인양하는 방법, 그리고 리프팅 빔을 설치하여 인양하는 방법으로 나눠서 소요 시간을 계산하였다.

마지막으로 인양 및 적재 단계로 장비 인양을 위한 장비 설치 시간과 인양 와이어 감는 속도로 시간을 계산하였다.

2.4.2. 인양 비용 추정

다음으로 인양 비용 추정이다. 비용 계산을 위해 인양에 필요한 장비들을 특성에 따라서 구분하였는데, 장비, 선박, 인원, 자재로 구분하였다. 이러한 구분을 기준으로 세부 항목들을 선정하고 비용을 산출하였는데 세부 항목 및 비용 산출은 해난구조업체들의 자문을 받았다.

Table 3. 특성에 따른 인양 장비 사용 비용

	Name	Unit	Cost (USD)	
			Daily working rate	Daily standby rate
Craft	Floating crane	1	50,000	37,500
	Tugboat	1	13,760	10,320
	Jack-up barge	1	12,000	9,000
	Work boat	1	251	188
	work barge	1	3,500	2,625
	:	:	:	:
Equipment	drilling equipment	1	10,000	7,500
	mud pumping equipment	1	250	187
	decompression chamber	1	472	354
	mixed gas diving equipment	1	10,000	7,500
	:	:	:	:
Personnel	salvage master	1	1,420	1065
	chief engineer	1	1,184	888
	diving supervisor	1	949	711
	diver	1	851	638
	:	:	:	:
Material	steel plate	Ton	1,100	-
	oxygen	Bottle	22	-
	acetylene	Bottle	33	-
	chain	m	220	-
	:	:	:	:

3. Test case

3.1. 실린더 인양 예제

첫번째로 실린더에 대한 시뮬레이션 결과이다. Fig. 3-1에서 볼 수 있듯이 실린더의 무게 중심을 1m 왼쪽으로 이동시켜 인양시 불균형 상태에서 인양이 되어 미끄러 질 수 있도록 하였다.

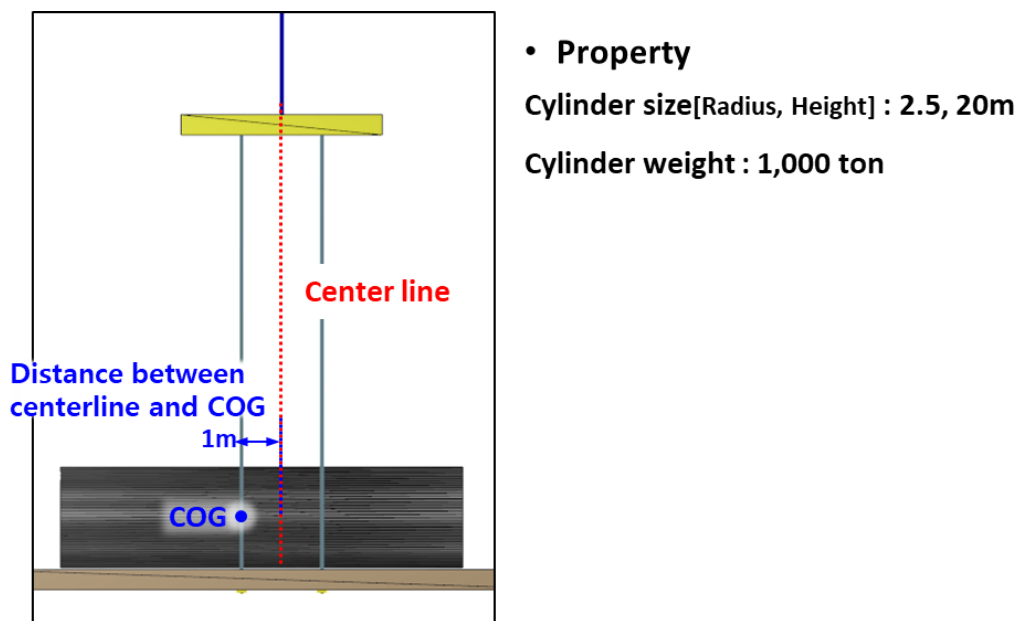


Fig. 3-1. 실린더 및 인양 와이어 배치도

실린더의 정지 마찰 계수에 따라 2가지 경우의 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 실린더의 정지 마찰계수가 0.6인 경우로 인양 시 정지 마찰력이 작용하여

실린더가 미끄러지지 않는 케이스이다. 두번째는 정지 마찰계수가 0.4인 경우로 인양 시 운동 마찰력이 작용하면서 실린더가 미끄러지게 된다.

Case 1 ($\mu_s = 0.6, \mu_k = 0.4$)

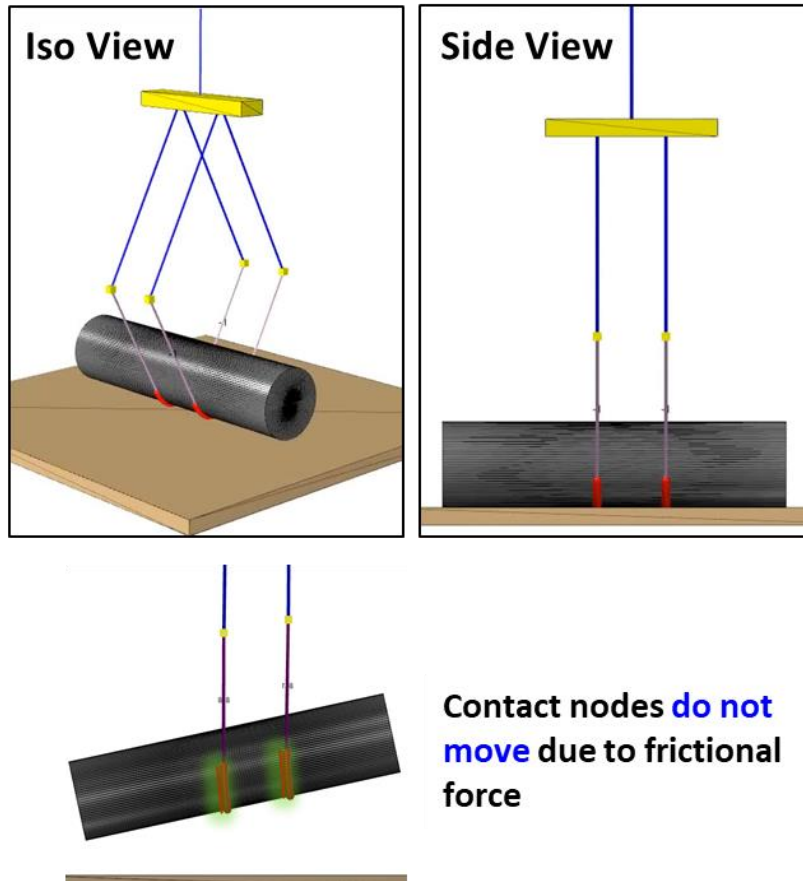


Fig. 3-2. 정지 마찰력이 작용하는 실린더 인양 케이스

시뮬레이션 결과 Fig. 3-2에서 볼 수 있듯이 Case 1에서 인양 와이어가 선체에 정상적으로 잘 감기는 것을 볼 수 있으며, 접촉 노드들이 빨간색 점으로 생성되는 것을 볼 수 있다. 또한 실린더가 들어 올려 짐에 따라서 정지

마찰력이 작용하여 와이어가 실린더의 길이 방향을 따라서 미끄러 지지 않고
 멈춰 있는 것을 확인 할 수 있다.

Case 2 ($\mu_s = 0.4, \mu_k = 0.2$)

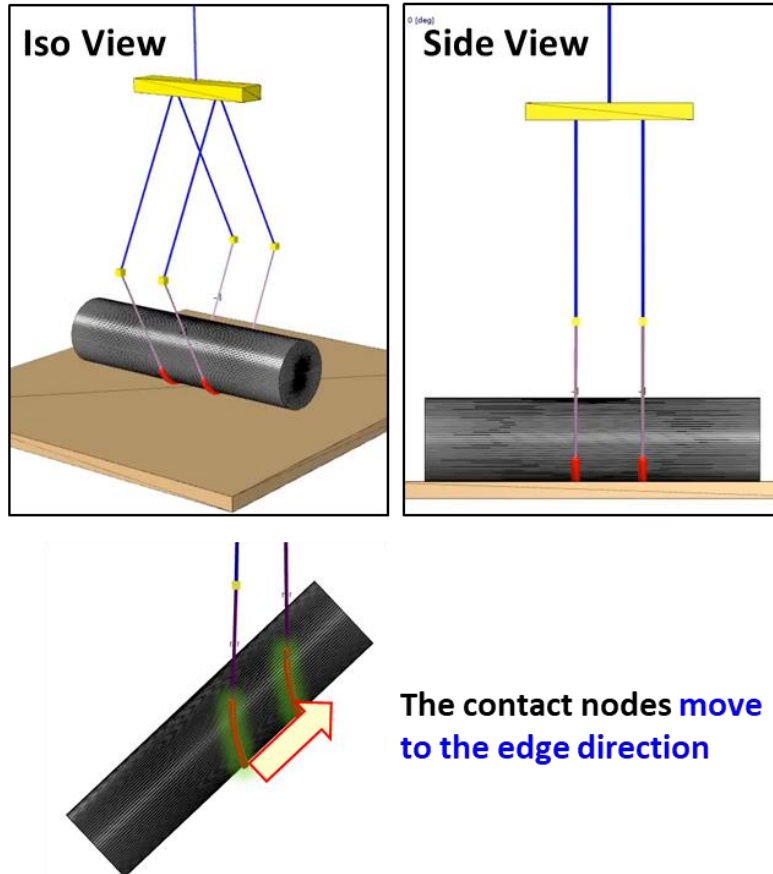


Fig. 3-3. 운동 마찰력이 작용하는 실린더 인양 케이스

Case 2의 시뮬레이션 결과 Fig. 3-3에서 볼 수 있듯이 실린더가 들어 올려 짐에
 따라 와이어가 실린더의 길이 방향을 따라서 미끄러지는 것을 확인하였다.

3.2. 소형 선박 인양 예제

3.2.1. 인양 개요



Fig. 3-4. 인양 선박 제원

실제 해군에서 인양한 소형 선박에 대해 시뮬레이션으로 인양 결과를 분석하였다. 선박의 형상 및 제원은 Fig. 3-4과 같으며 선박 인양 과정에서 처음에 선박을 56톤으로 예상하고 60톤급 해상 크레인으로 인양을 시도하였다.

하지만 Fig. 3-5의 인양 작업 진행 시간표에서 볼 수 있듯이 선박이 수면 근처에서 더 이상 올라오지 않아서 인양을 실패하였고, 다음날 300톤 육상 크레인을 이용하여 인양작업을 완료하였다. 최종적으로 확인한 선박의 무게는 65톤이었다.

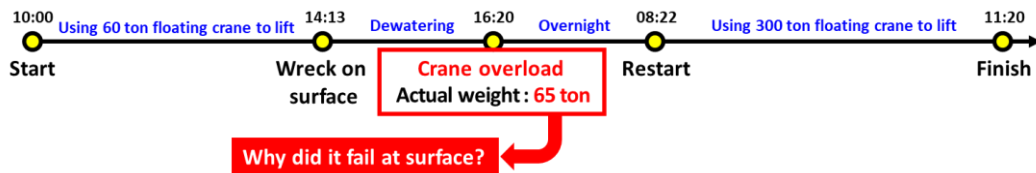


Fig. 3-5. 인양 작업 진행도

선박이 수면 밖으로 나오지 못한 이유를 시뮬레이션을 통해서 확인한 결과 수중에서는 60톤보다 적은 인양력이 필요하다가 수면 밖으로 나오에 따라 선체의 부력이 소실되면서 70톤까지 인양력이 증가하여 크레인의 인양 능력을 초과하였음을 확인하였다.

3.2.2. 시뮬레이션 모델링

해상 크레인과 인양 선박에 대한 시뮬레이션 모델은 Fig. 3-6과 같다. 인양 방법은 선체와 인양 와이어를 4개 지점에 연결하였고, 시뮬레이션에서 선체 무게는 65톤을 사용하였다.

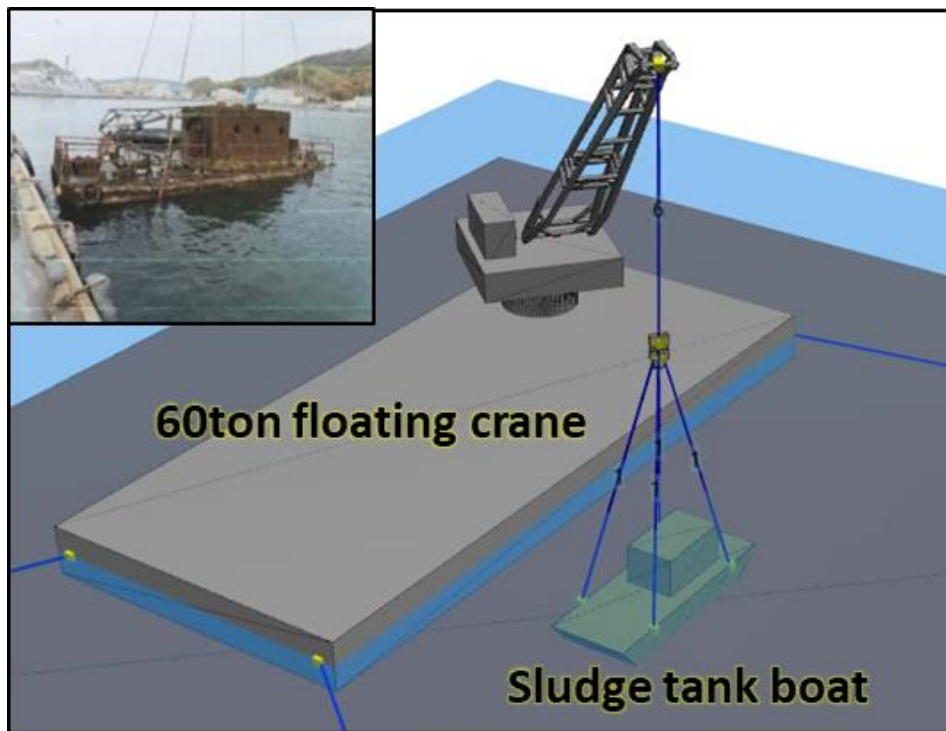


Fig. 3-6. 시뮬레이션 모델링

3.2.3. 시뮬레이션 결과 분석

시뮬레이션 결과는 Fig. 3-7을 보면 선체 재질에 의한 부력이 고려하여 수중 인양 단계에서 인양력이 60톤보다 작은 것을 확인할 수 있다. 따라서 60톤급 해상 크레인으로도 충분히 인양하는 것이 가능하였다. 하지만 난파선이 물 표면으로 떠오르면 선체 부력이 사라지게 되고 인양력이 70톤까지 상승하였다. 이는 60톤급 해상 크레인의 인양 능력을 초과하는 무게로 실제 작업에서 수면 밖으로 선체를 들어 올릴 수 없었던 이유를 확인할 수 있었다.

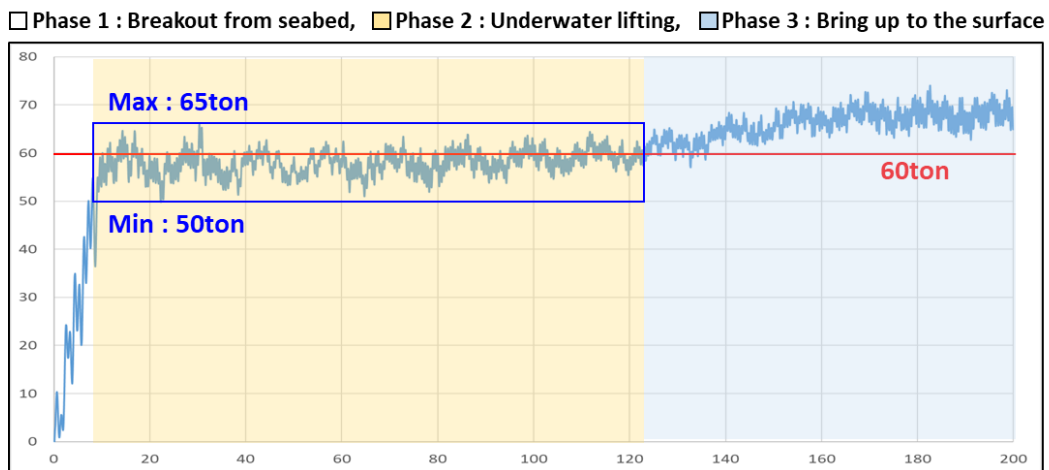


Fig. 3-7. 인양 선체의 인양력 분석 결과

4. 제안방법의 적용 예제

4.1. 시뮬레이션 개요

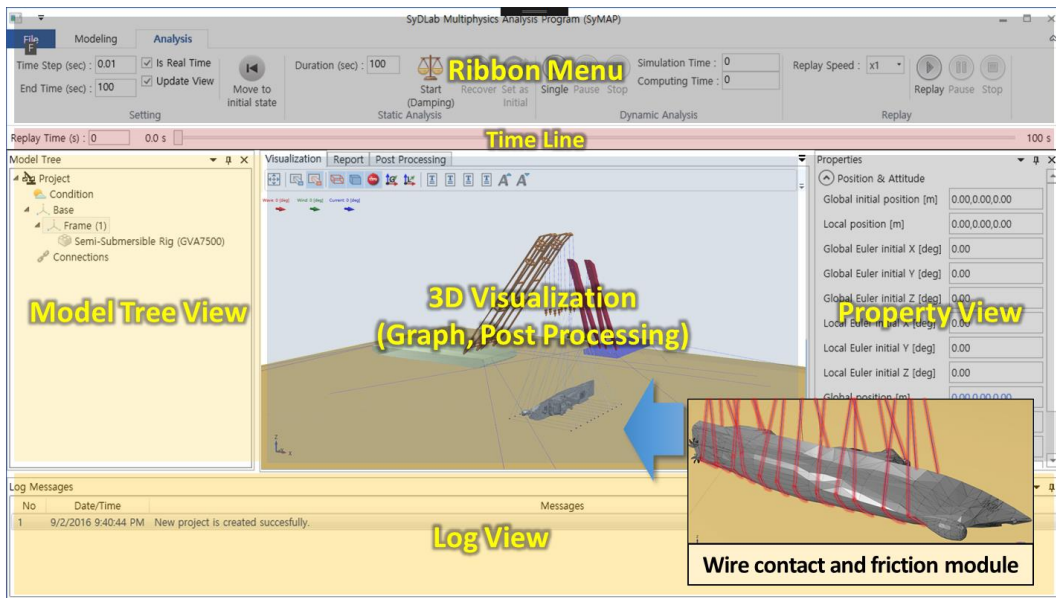


Fig. 4-1. 선박 인양 시뮬레이션 구성

안전성 평가를 위한 물리 기반 시뮬레이션 수행을 위하여 본 연구실에서 개발한 프로그램을 사용하였다. 이 시뮬레이션 프로그램을 기반으로 하여 와이어의 접촉 및 마찰력 모듈을 본 연구에서 추가로 구현하여 적용하였다.

현실적인 적용을 위해 시뮬레이션 선박은 해군 선박 모델을 사용하였다. 인양 선체에 대한 제원은 Fig. 4-2와 같다.

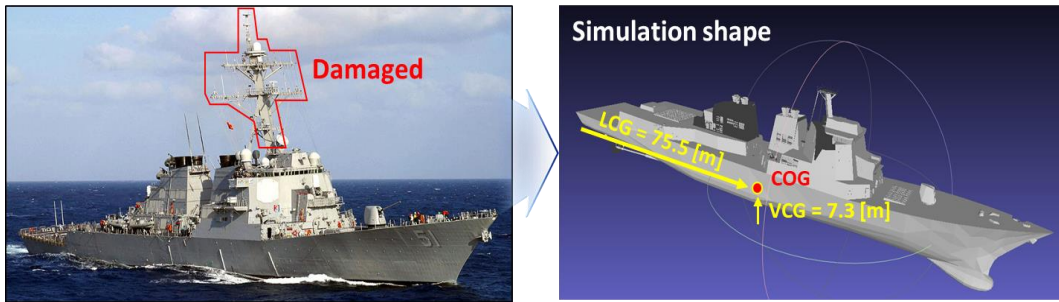


Fig. 4-2. . 인양 선체 제원

선체의 무게는 만재배수량과 내부 침전물을 고려하여 9,000톤으로 가정하였다. 선박의 자세한 제원과 수중에서의 인양력, 흡착력 계산값, 수면 상에서의 인양력은 아래와 같다.

Table 4. 선박 제원

Item	Value
Length overall	156 m
Breadth	20 m
Depth	15.33 m
LCG (from A.P.)	75.5 m
VCG (from the bottom)	7.3 m
TCG (from the center line)	0 m
Displacement (lightweight + deadweight)	8,500 ton
Soil sediment (W_{soil})	500 ton
Total weight ($W_{ship} + W_{soil}$)	9,000 ton
Hull buoyancy force (B_{hull})	1,291 ton
Total static weight in seawater ($W_{ship} + W_{soil} - B_{hull}$)	7,709 ton

해상 상태는 파도의 경우 JONSWAP 스펙트럼을 사용하여 불규칙파를 적용하였으며, 조류는 선체가 침몰하여 해저 바닥에 도착하게 되면 조류의 저항이 최소화 되는 길이방향으로 최종적으로 위치하게 된다. 바람의 경우 해상 크레인이 가장 많은 면적으로 영향을 받는 방향으로 적용하였다.

Table 5. 해상 환경 조건

	Direction	Speed
Wave	JONSWAP spectrum, significant wave height: 2.0m, wave period: 8s	
Current	180 degrees	1m/s
Wind	090 degrees	3m/s

4.2. 인양 예제 선정

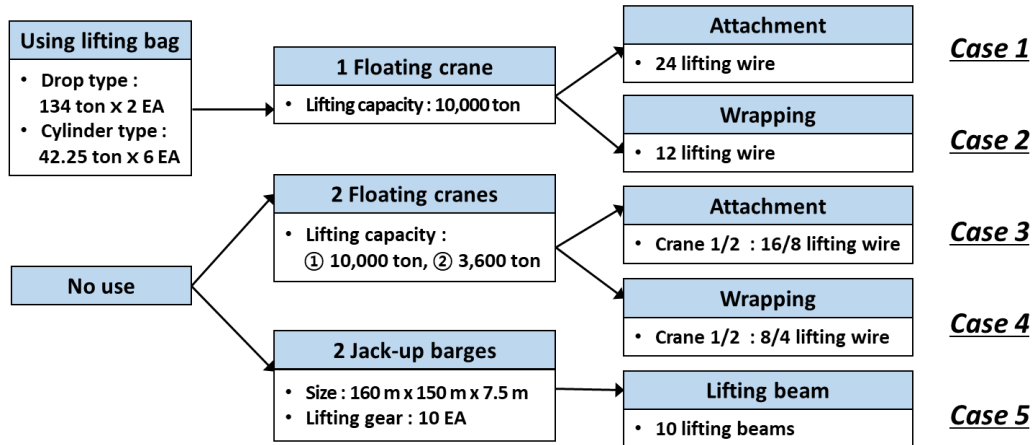


Fig. 4-3. 인양 예제 선정

다음으로 본 연구에서 적용한 인양 예제 선정 기준이다. 먼저 인양력을 감소시키기 위한 부력재를 추가로 설치하는지 여부를 나누었다. 추가 부력재를 설치하는 경우 인양력이 줄어들게 됨으로 해상 크레인을 1대만 사용하여 인양하는 것이 가능할 것으로 판단하였고, 반면에 추가 부력재를 설치하지 않을 경우 해상 크레인을 2대 사용하거나 완전히 다른 방법을 사용해야 할 것이라고 판단하였다. 여기서 완전히 다른 방법은 다양한 방법 중에서 잭업 바지를 사용하여 인양하는 방법을 선택하였다. 이후 각각의 방법에서 인양 와이어를 선체에 부착하는 방법에 따라 인양 예제를 구분하였다.

4.2.1. 부력재를 사용한 인양 방법

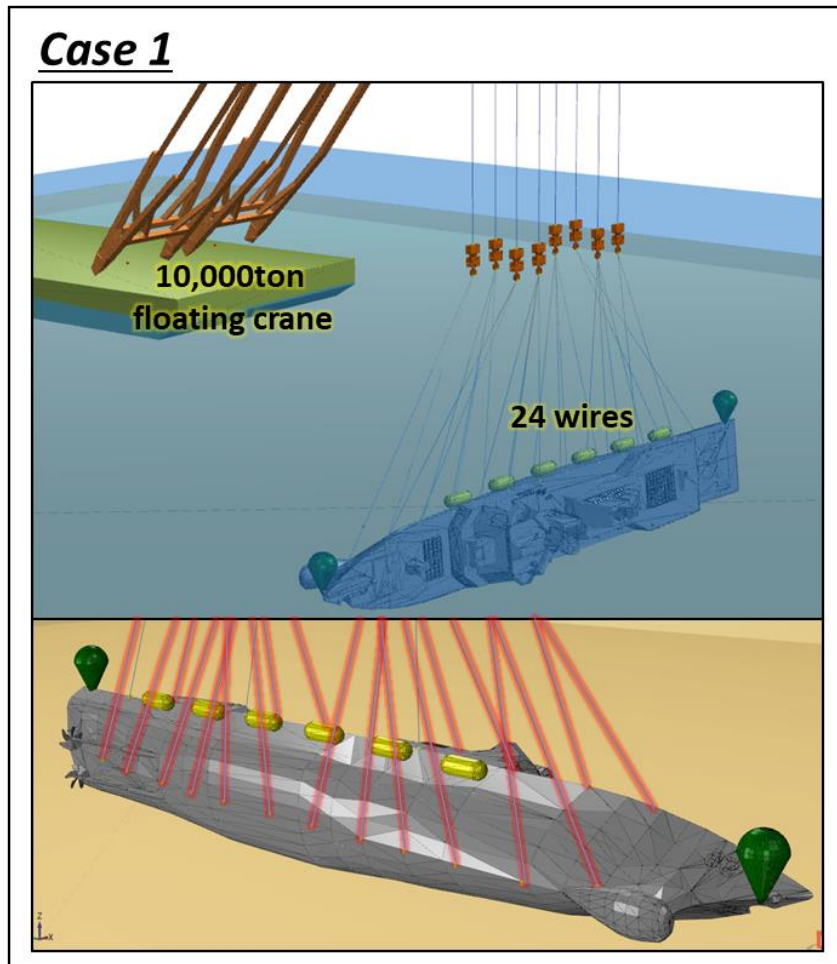


Fig. 4-4. Case 1 : 부력재 설치, 해상 크레인 1대, 와이어 부착 인양

Case 1, 2는 해상크레인을 1척 사용하는 방법이다. 해상 크레인을 1척만 사용하기 위해서 부력재를 사용하여 총 인양력을 감소시켰다. 부력재는 리프팅 백을 사용하였으며 사용한 리프팅 백의 크기 및 종류는

Fig. 4-6와 같다. 그리고 인양 와이어와 선체를 결속하는 방법에 따라서 선체에

부착하는 방법과 선체를 감는 방법으로 나누었다.

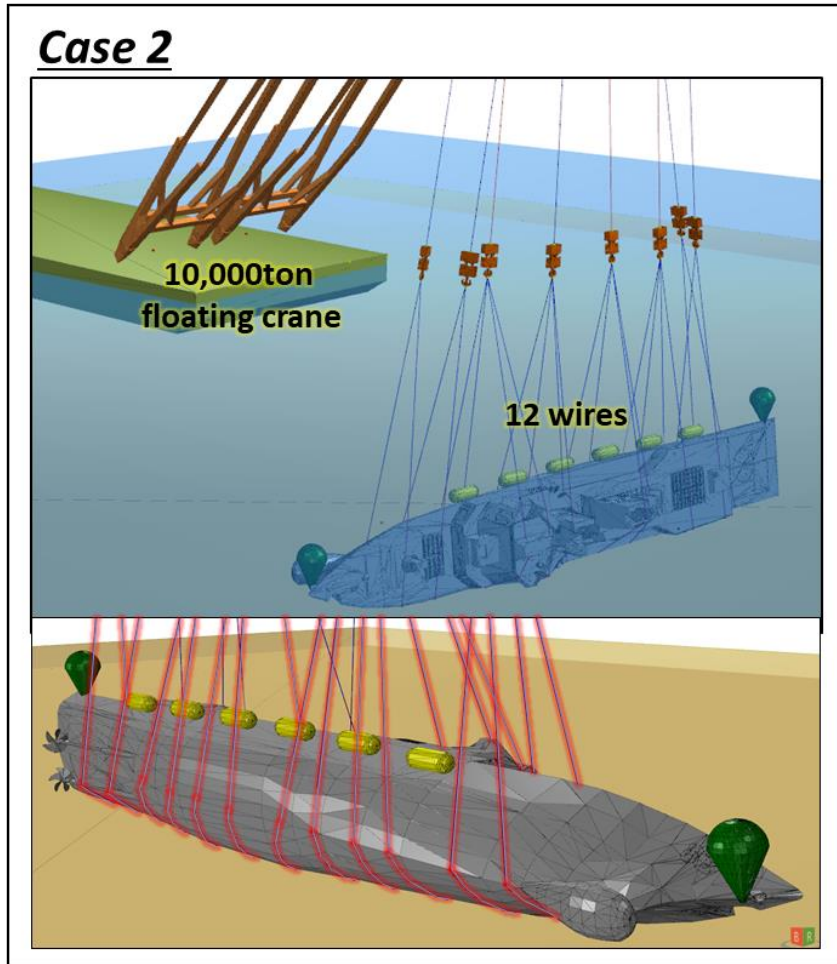


Fig. 4-5. Case 2 : 부력재 설치, 해상크레인 1대, 와이어 감기 인양

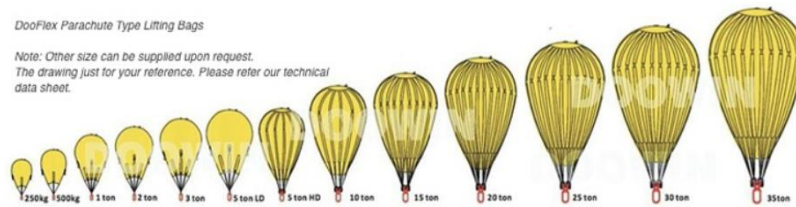


Fig. 4-6. 리프팅 백 종류 및 부력 크기

4.2.2. 부력재를 사용하지 않는 인양 방법

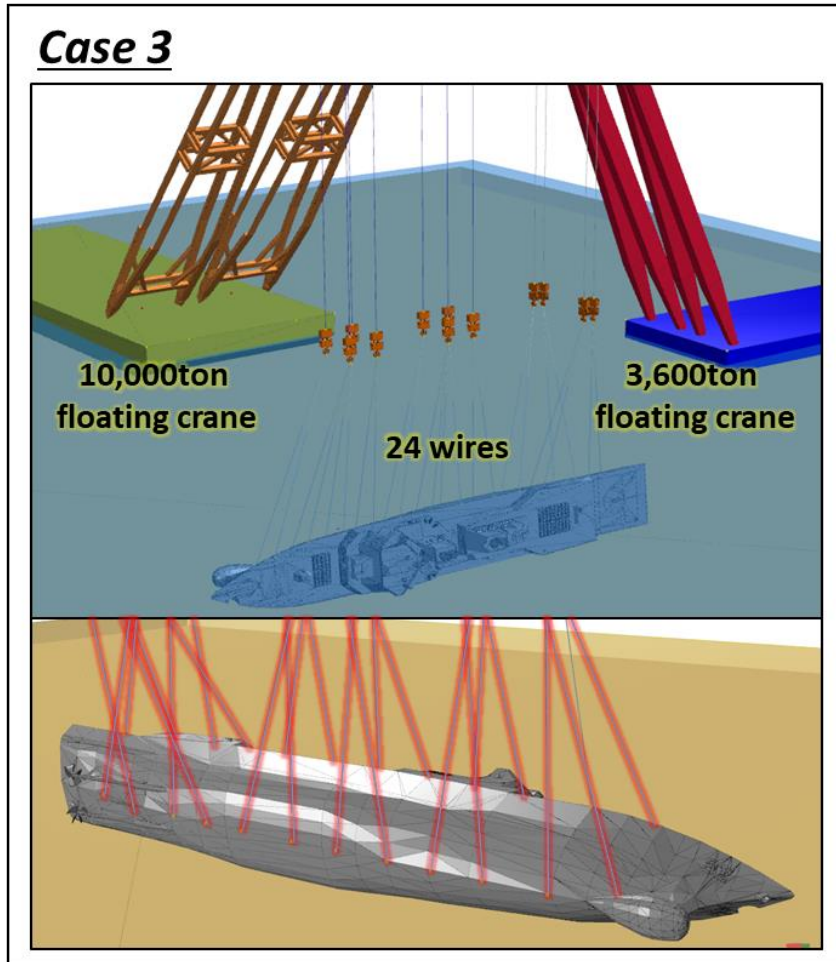


Fig. 4-7. Case 3 : 부력재 미설치, 해상크레인 2대, 와이어 부착 인양

Case 3, 4는 부력재를 설치하지 않는 방법이다. 부력재를 설치하지 않기 때문에 해상 크레인을 2대 이용해서 인양하였다. 해상 크레인은 10,000톤 크레인과 3,600톤 크레인을 사용하였으며 두 해상 크레인의 묘박 와이어의 간섭으로 인해 수평으로 배치하지 하지 못하였다. 그리고 Case 1, 2와 마찬가지로 인양 와이어를

선체에 부착하는 방법과 선체를 감는 방법으로 나누었다.

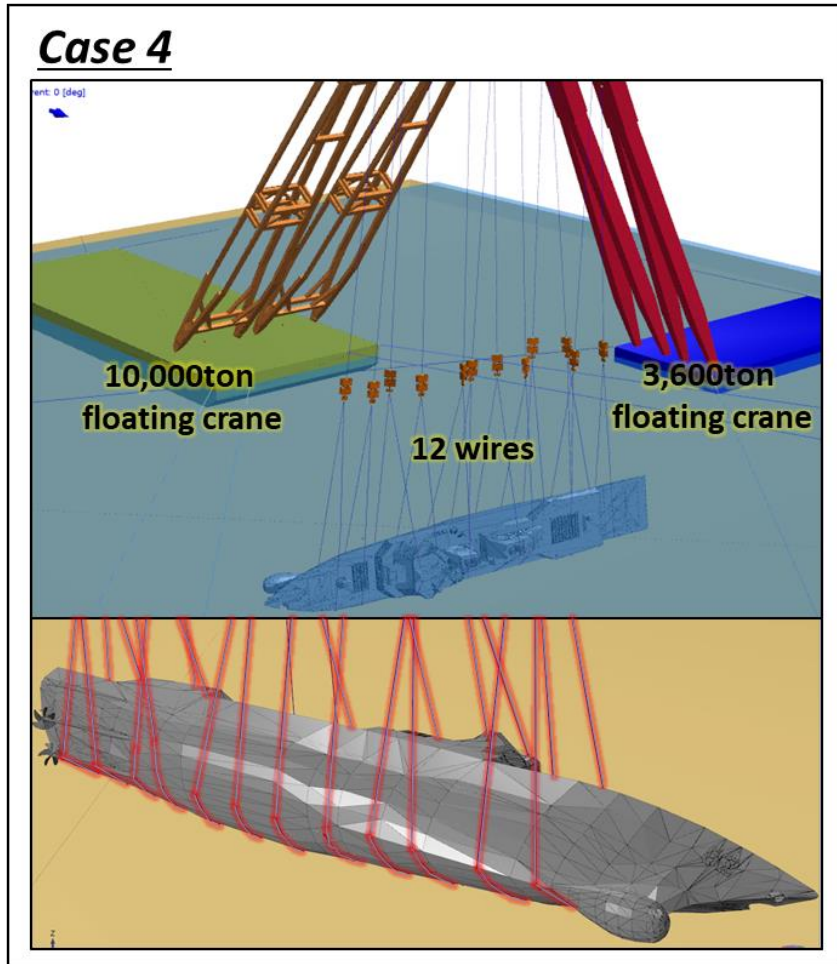


Fig. 4-8. Case 4 : 부력재 미설치, 해상 크레인 2대, 와이어 감기 인양

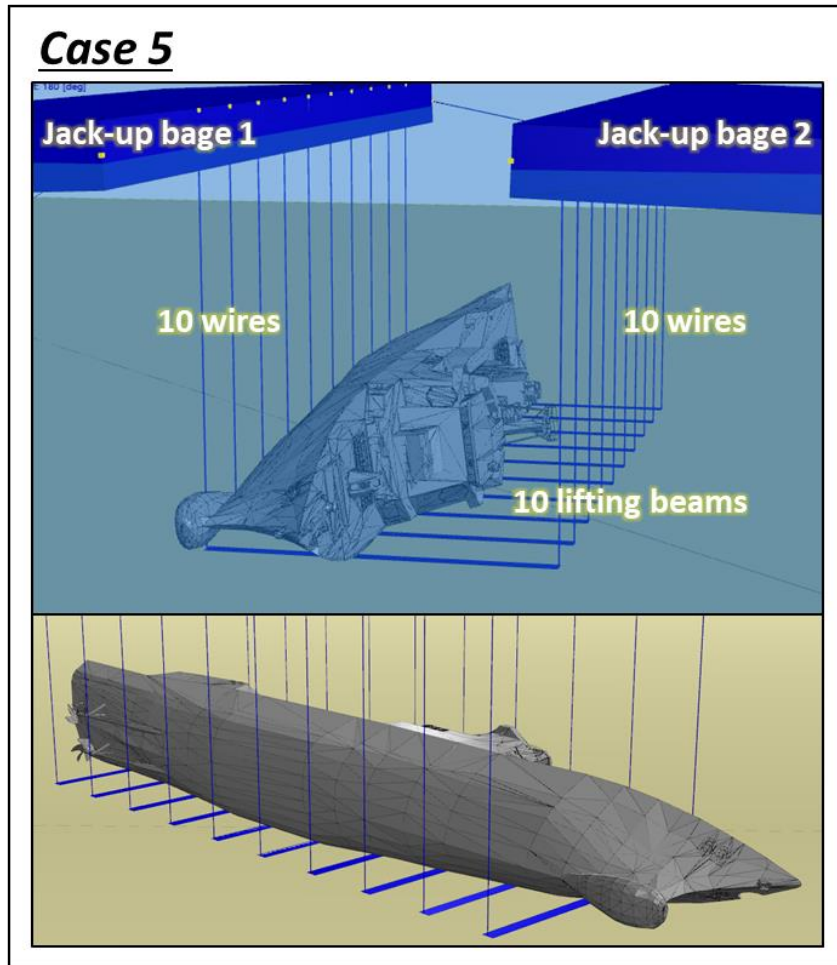


Fig. 4-9. Case 5 : 잭업 바지 2대, 리프팅빔 이용 인양

Case 5는 잭업 바지를 사용하는 방법이다. Fig. 4-9에서 볼 수 있듯이 잭업 바지 2대를 이용해서 인양을 하고 선체 밑에 리프팅 빔을 설치하였다. 리프팅 빔과 선체는 따로 고정하지 않았으며 마찰력에 의해 지지되도록 하였다.

그 이외에 선체를 와이어를 감아서 인양하는 경우도 검토해 보았는데 Fig. 4-10에서 볼 수 있듯이 잭업 바지 사이의 간격이 17m로 너무 좁아져 선체가

수면 상으로 부상할 수 없고 위험하여 현실성이 없는 것으로 판단되어 제외하였다.

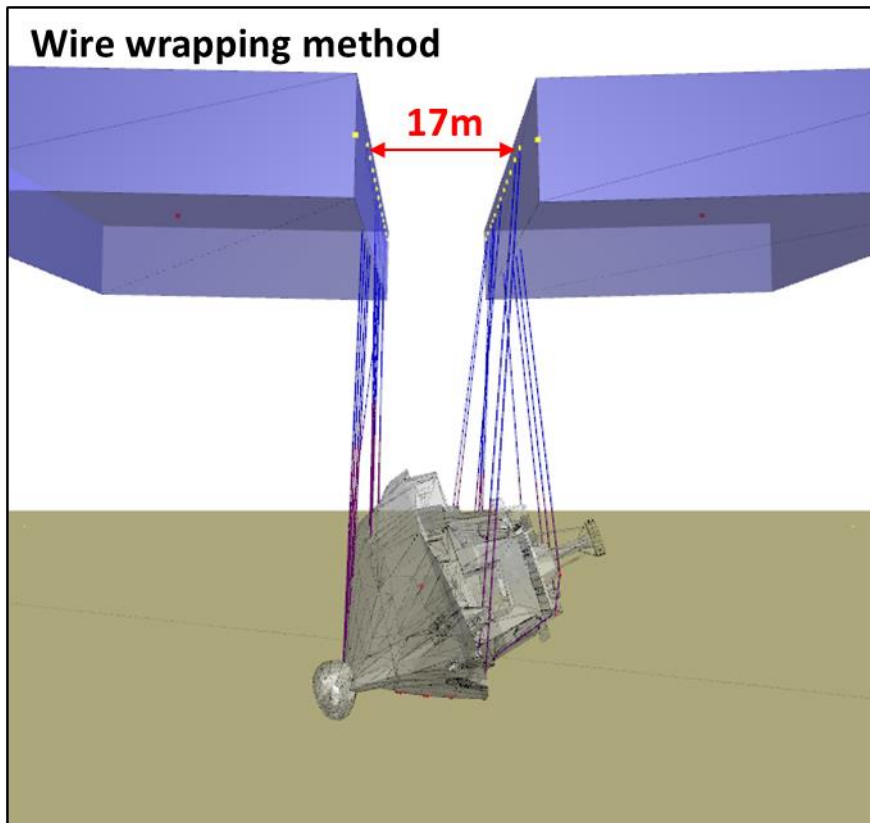


Fig. 4-10. 잭업 바지 2대, 와이어를 선체 감아서 인양

4.3. 시뮬레이션 결과

4.3.1. Case 1 : 부력재 설치, 해상크레인 1 대, 와이어 부착 인양

첫번째 케이스는 부력재를 설치하여 총 인양력을 줄이고 해상크레인을 1대만 이용하여 인양하는 경우이다. 부력재의 경우 원통 형태의 부력재 6개, 물방울 형태의 부력재 2개를 설치하였다.

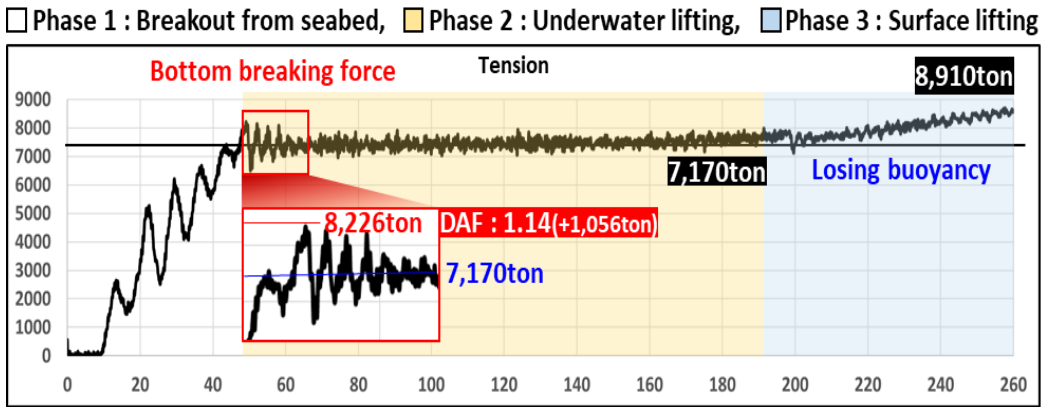


Fig. 4-11. 동적 인양력 분석 결과 (Case 1)

각 인양 단계별 정적 인양력을 먼저 살펴보면, 해저 이탈단계에서는 해저 저질에 의한 흡착력이 270톤 작용하여 7,440톤의 인양력이 필요하다.

이 후 수중 인양 단계에서 부력재 설치로 필요한 인양력이 감소하였다. 부력재로 인해 감소한 인양력은 539톤으로 부력재 설치 시 수중에서 인양력은 7,170톤이 필요하다.

이후 수면상 인양 단계에서 선체가 물 밖으로 나오에 따라 선체의 부력이나

부력재의 부력이 사라져서 인양력이 증가하게 된다. 실제 선박 인양시 선체 내부의 해수가 모두 배출되지 않기 때문에 일부 중량 증가가 발생하나, 본 연구에서는 모두 배수되었다고 가정하여 해수에 의한 추가 중량 증가는 고려하지 않았다. 또한 선체를 완전히 물 밖으로 드러내지 않고 절반만 부상시키는 것으로 하였기 때문에 선체 재질에 의한 부력의 경우도 총 부력의 절반인 646톤만 증가하는 것으로 계산하여 총 인양력은 8,354톤이 필요하다.

다음으로 정적인 인양력을 기준으로 본 연구의 핵심요소인 물체간의 상호작용을 고려한 동적 인양력 분석 결과를 살펴보도록 하겠다. 해저 이탈 단계에서 흡착력이 사라짐에 따라 정적 인양력의 크기와 동적 인양력의 크기의 차이가 크게 발생하게 된다. 이러한 차이를 나타내기 위해서 동적 응답 계수 (Dynamic Amplitude Factor)를 사용하였다. 동적 응답 계수란 동적 최대 인양력과 정적 인양력과의 비율이다.

$$\text{동적응답계수(DAF)} = \frac{\text{최대 동적 인양력의 크기}}{\text{정적 인양력의 크기}} \quad (21)$$

Case 1의 경우 해저 이탈단계에서 동적 응답 계수는 1.14로 정적 인양력과 비교 시 1.14배 더 큰 값을 가지는 것을 확인하였다. 이후 수중 인양 단계 및 수면 상 인양단계에서는 큰 영향을 받지 않고 정적 인양력을 기준으로 100톤 내외로 증감하였다.

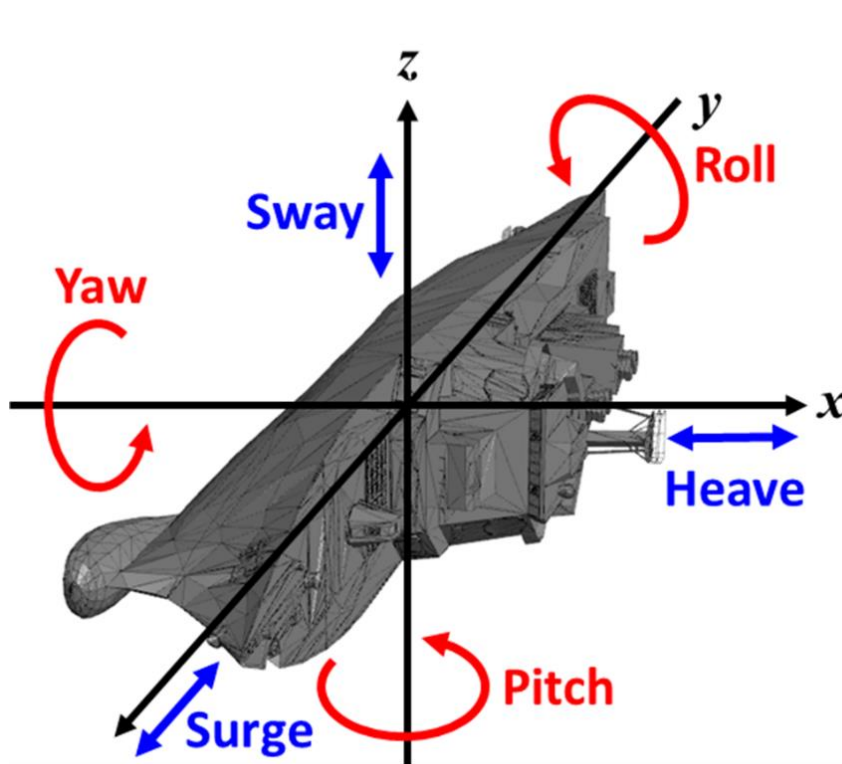


Fig. 4-12. 침몰 선체 움직임 정의

다음으로 침몰 선체의 움직임 분석 결과이다. 침몰 선체의 경우 옆으로 누워 있기 때문에 회전움직임에서 yaw와 pitch가 서로 바뀌었으며, 수평 움직임에서는 sway와 heave가 서로 바뀌었다.

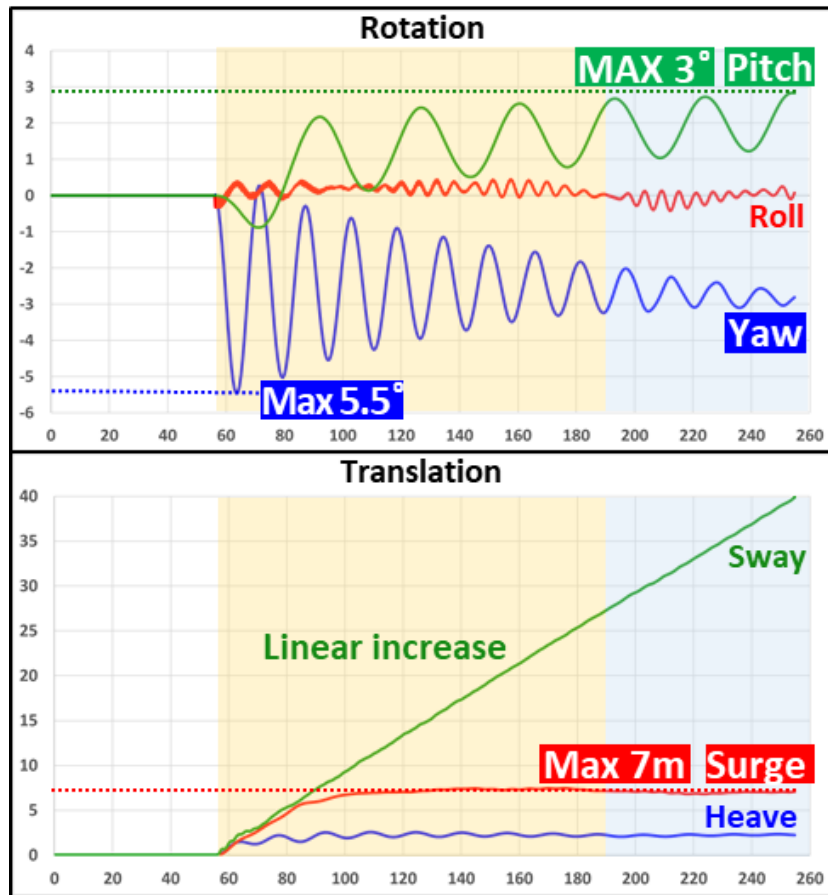


Fig. 4-13. 침몰 선체 움직임 분석 결과 (Case 1)

다음으로 침몰 선체의 움직임 분석 결과이다. 해저 이탈단계에서 선체의 무게 중심과 작용하던 흡착력의 중심이 달라 회전이 크게 일어나는 것을 볼 수 있다. 선체는 yaw 방향으로 최대 5.5도 발생한 이후 점차 감소하여 3도까지 수렴하였으며, pith 방향의 경우 2도 크기의 폭으로 계속 진동하면서 조금씩 회전각을 증가하여 최대 3도까지 회전하였다. Roll의 경우 1도의 폭 안에서 크게 움직이지 않고 안정적인 것을 확인할 수 있다.

수평 이동의 경우 해상 크레인의 중심과 인양 중심점이 정확히 일치하지 않아
해저 이탈 단계 이후 선체가 부상함에 따라 surge 방향으로 최대 7m까지
이동하였다. Heave 방향의 경우 해저 이탈 단계 이후 3도까지 움직인 후
안정적으로 유지되었다. Sway 방향은 선박이 인양됨에 따라 계속 올라가게 된다.
따라서 선체가 인양됨에 따른 상승을 배제하면 안정적으로 인양되는 것을
확인할 수 있다.

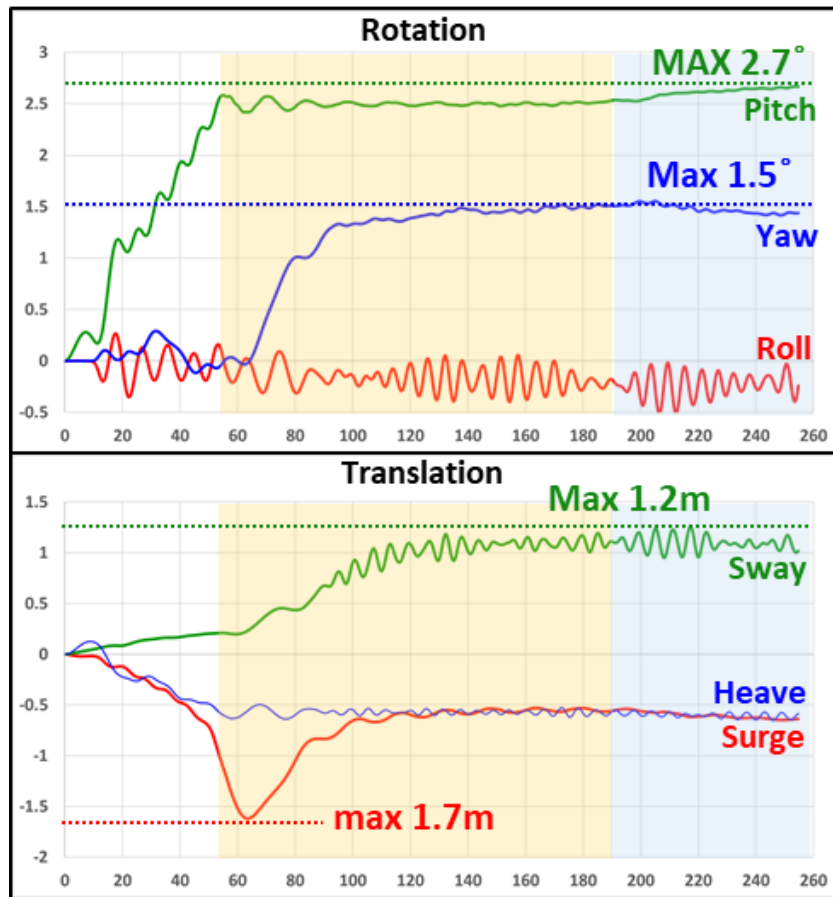


Fig. 4-14. 해상 크레인 움직임 분석 결과 (Case 1)

다음으로 침몰 선체를 인양하는 해상 크레인의 움직임을 분석한 결과이다. 해상 크레인의 경우 파도의 영향으로 그래프 진폭의 주기가 짧은 것을 볼 수 있다. 회전 운동의 경우 pitch 방향으로 최대 2.7도까지 움직였는데, 이는 선체의 인양력으로 인해 해상 크레인이 앞으로 기울게 되면서 발생하는 현상이다. Yaw 방향 움직임은 최대 1.5도로 침몰 선체와 해상 크레인의 위치가 정확히 일치하지 않아 크레인이 좌현으로 1.5도 회전하게 되었다.

해상크레인의 수평 움직임은 surge 방향으로 최대 1.7m가 발생하였는데 이는 침몰 선체의 인양하기 위해 인양 와이어를 당기면서 해상 크레인이 침몰 선체 방향으로 움직인 결과로 볼 수 있다.

4.3.2. Case 2 : 부력재 설치, 해상크레인 1 대, 와이어 감기 인양

두번째 케이스는 침몰 선체와 인양 와이어의 연결 방식이 선체에 고정하는 방법이 아니라 와이어를 선체에 감아서 인양하는 방법이다.

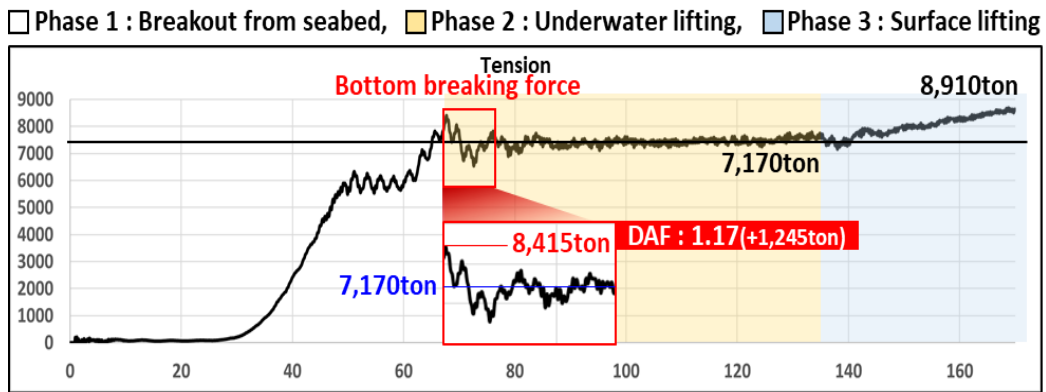


Fig. 4-15. 동적 인양력 분석 결과 (Case 2)

정적인 인양력의 경우 케이스 1과 동일하다. 동적인 인양력에서 차이가 발생하는데 Case 2의 경우 동적 응답 계수 (DAF)가 1.17로 Case 1보다 높다. 이는 선체가 해저를 이탈할 때 흡착력이 갑자기 사라지게 되는데 선체를 감아서 인양할 경우 와이어를 부착해서 인양하는 것 보다 선체가 더 큰 요동을 보이기 때문으로 보인다.

이는 선체의 움직임 분석 결과에서도 알 수 있다.

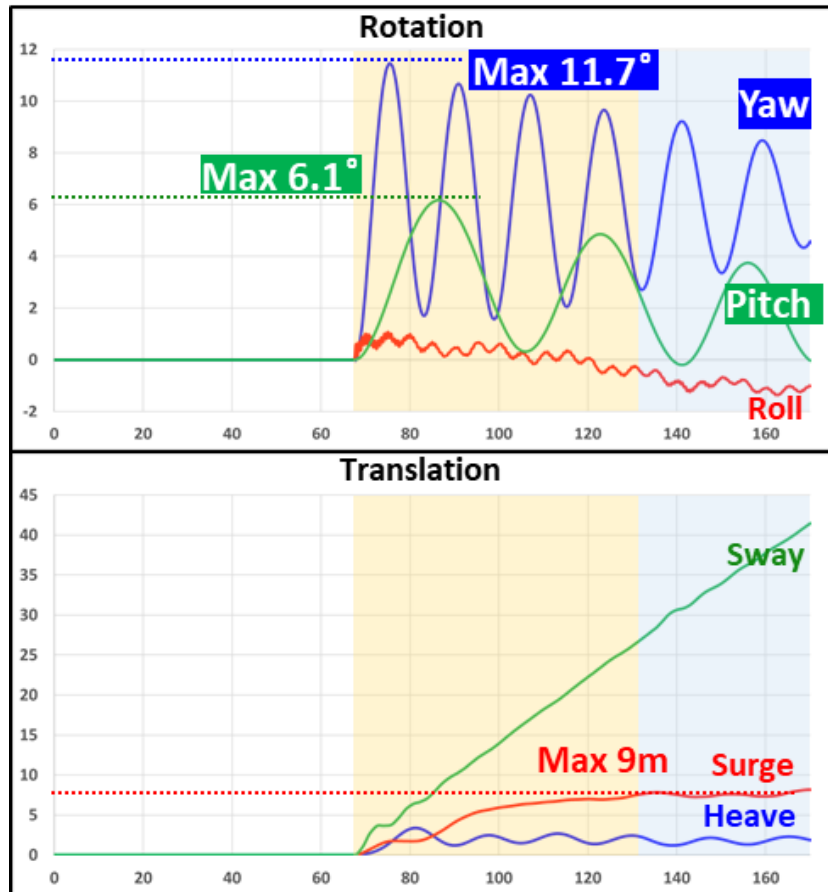


Fig. 4-16. 침몰 선체 움직임 분석 결과 (Case 2)

선박의 움직임은 침몰 선박의 회전 운동은 yaw 방향으로 최대 11.7도로 한번 크게 움직였다가 진동하면서 수렴하고 있다. 이것은 선체가 해저를 이탈하면서 흡착력이 사라짐에 따라 와이어의 장력 변화로 인해 크게 요동 친 후에 안정화되는 것으로 볼 수 있다.

해상 크레인의 경우는 반대로 선체와 와이어가 고정되어 있지 않아서 선체의 요동에 영향을 덜 받은 것을 확인할 수 있다.

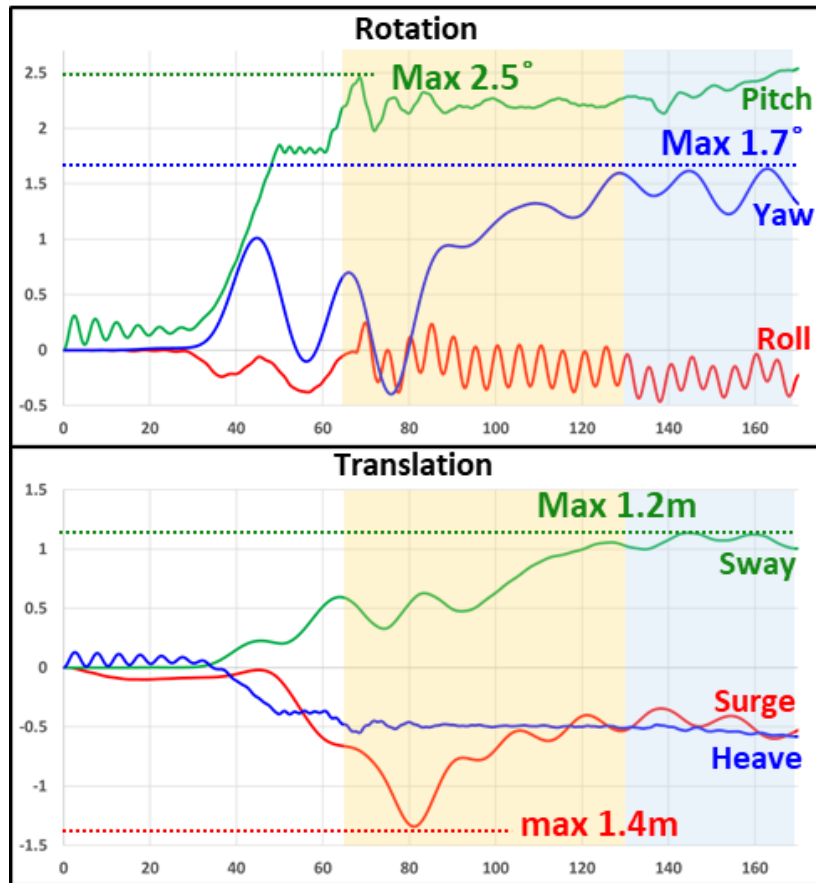


Fig. 4-17. 해상 크레인 움직임 분석 결과 (Case 2)

4.3.1. Case 3 : 부력재 미설치, 해상크레인 2 대, 와이어 부착 인양

Case 3은 부력재를 설치하지 않는 경우이다. 부력재를 설치하지 않음에 따라 인양력이 증가하게 되고, 해상 크레인을 2기 사용하여 인양을 하였다.

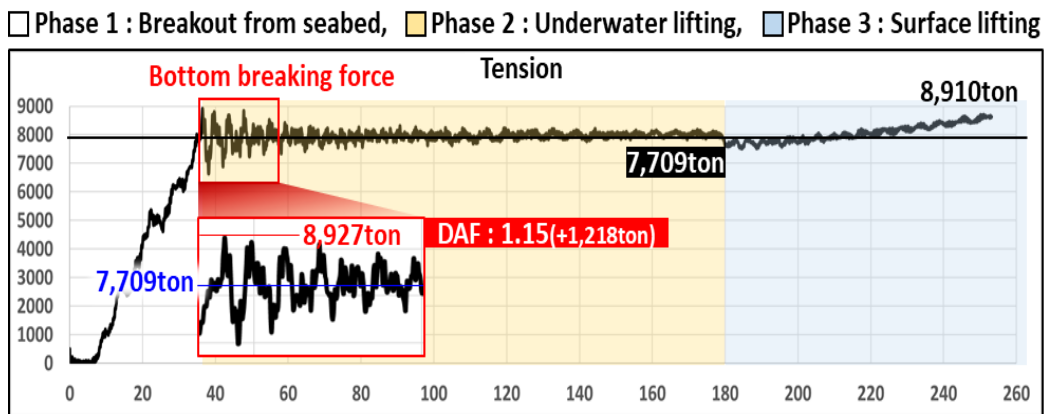


Fig. 4-18. 동적 인양력 분석 결과 (Case 3)

각 인양 단계별 정적 인양력을 먼저 살펴보면, 리프팅 백을 설치하지 않으므로 총 인양력이 증가하게 된다. 해저 이탈단계에서는 해저 저질에 의한 흡착력이 270톤 작용하여 7,979톤의 인양력이 필요하다. 이 후 수중 인양 단계에서 인양력은 7,709톤이 필요하다. 마지막 수면 상 인양 단계에는 부력재 설치 여부와 상관없이 동일하게 8,354톤이 필요하다.

다음으로 동적 인양력을 살펴 보면 동적응답계수(DAF)의 경우 Case 1보다는 크고 Case 2 보다는 작다. 이는 와이어를 선체에 부착하여 인양하는 방법을 사용하는 경우 해상 크레인을 1대를 사용하고 선체를 와이어로 감아서 인양하는 방법보다 동적 응답 계수 (DAF)가 작다는 것을 보여준다. 그만큼 와이어가

선체에 고정되어 있는지 여부가 동적 인양력의 변화에 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

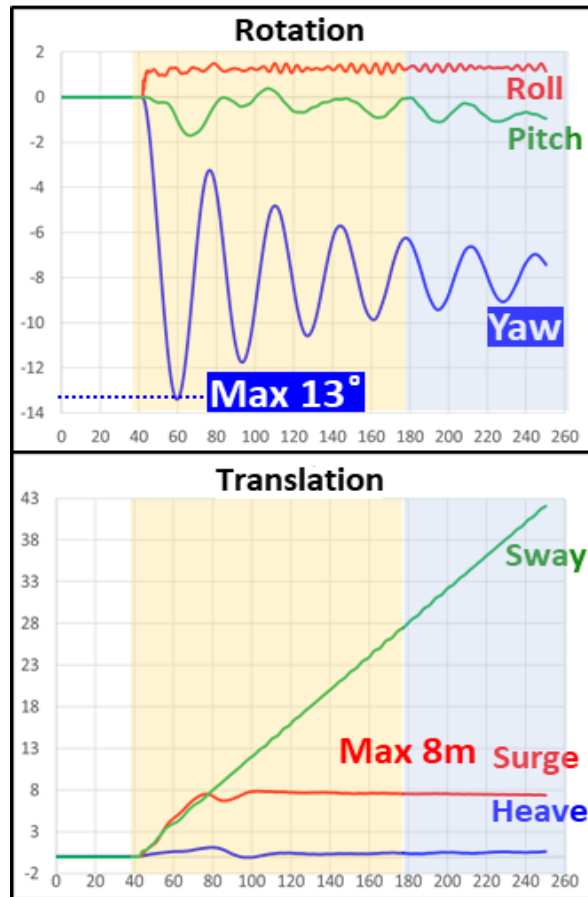


Fig. 4-19. 침몰 선체 움직임 분석 결과 (Case 3)

다음으로 침몰 선체의 움직임 분석 결과이다. 선박의 움직임은 yaw 방향으로 최대 13도까지 움직였다가 8도로 수렴하고 있다. 이는 두개의 크레인으로 인양함에 따라 상호 움직임이 decoupling 되면서 선체의 요동을 크게 하였다.

크레인의 경우 2대 모두 3도 이내의 움직임을 보였다. 수평 이동의 경우 이전 케이스와 비교시 큰 차이점은 없었다.



Fig. 4-20. 10,000톤 해상 크레인 움직임 분석 결과 (Case 3)

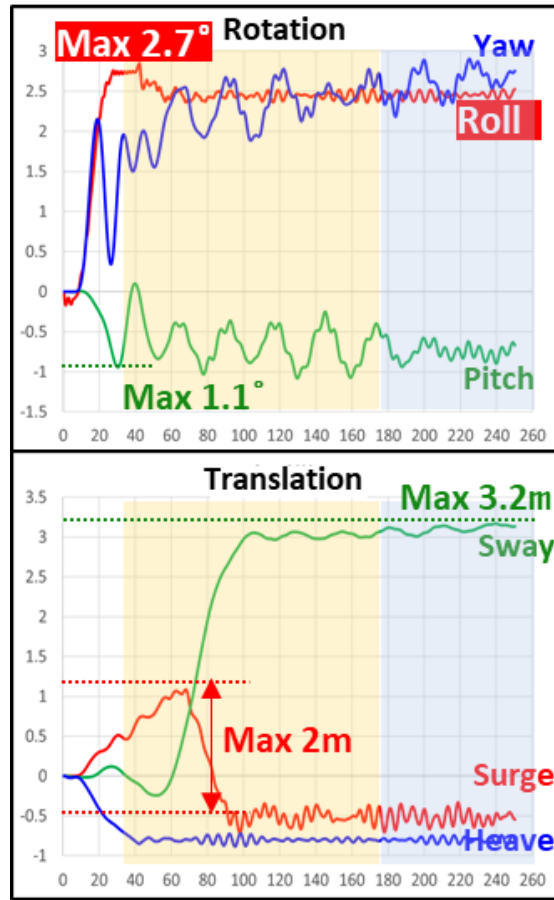


Fig. 4-21. 3,600톤 해상 크레인 움직임 분석 결과 (Case 3)

4.3.2. Case 4 : 부력재 미설치, 해상크레인 2 대, 와이어 감기 인양

Case 4는 인양 와이어를 침몰 선체에 부착하지 않고 선체를 감아서 인양하는 방법이다.

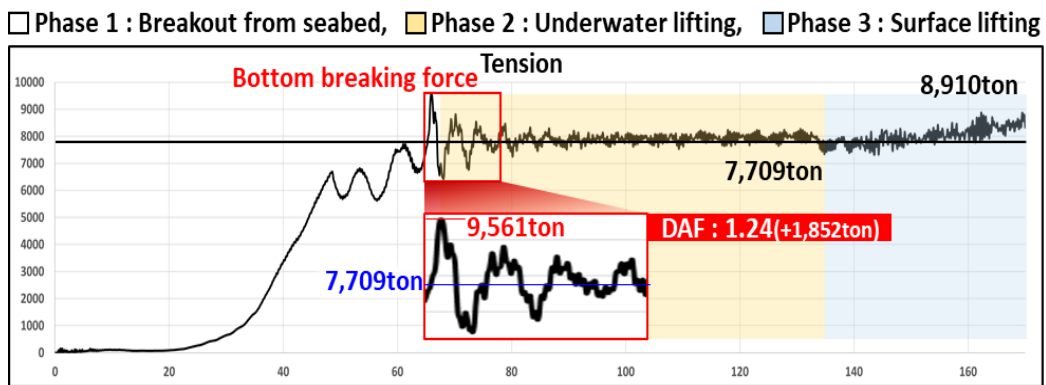


Fig. 4-22. 동적 인양력 분석 결과 (Case 4)

정적 인양력의 경우 Case 3와 같다. 동적 인양력의 경우 동적 응답 계수 (DAF)가 1.24로 모든 케이스 중 가장 크게 계산되었다. 이는 해상 크레인 2대의 decoupling과 인양 와이어를 감아서 인양하는 방법으로 인한 선체의 움직임 때문인 것으로 판단된다.

선체의 움직임의 경우도 pitch 방향으로 13.98도로 가장 크게 움직였다. 이외에 yaw, roll 역시 큰 움직임을 보였다. 선체의 수평 이동도 surge 방향으로 12m로 가장 많이 움직였다.

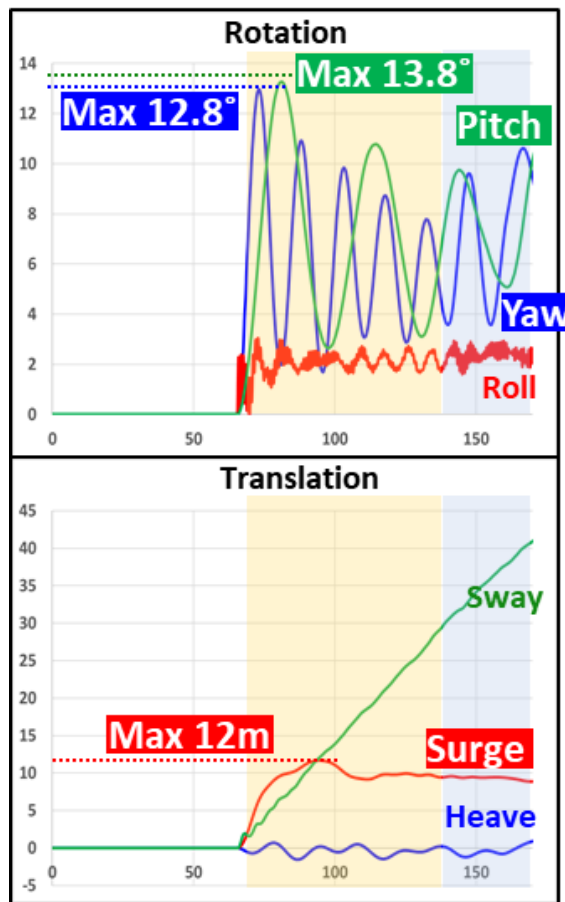


Fig. 4-23. 침몰 선체 움직임 분석 결과 (Case 4)

해상 크레인의 경우 10,000톤 크레인이 yaw 방향으로 회전을 크게 하였다. 이는 해상 크레인이 배치된 위치 때문이라고 판단된다. 해상 크레인을 정확한 위치에 묘박 시키기 위해서 사용하는 묘박 와이어의 상호 간섭을 피하기 위해 선체의 함수 부분과 함미 부분에 한대씩 배치하였다. 따라서 인양 선박의 무게 중심에서 해상 크레인이 벗어나 있는데 이에 따라 인양시 무게 중심 방향으로 크레인이 회전하는 것으로 판단된다. 3600톤 해상 크레인의 경우 크레인의 배치 위치로 인해 yaw가 아니라 pitch가 가장 크게 움직였다.

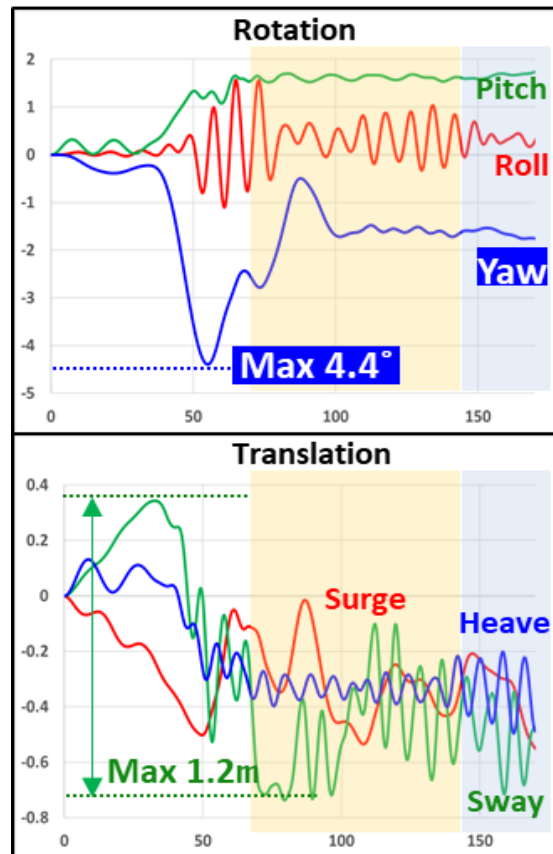


Fig. 4-24. 10,000톤 해상 크레인 움직임 분석 결과 (Case 4)

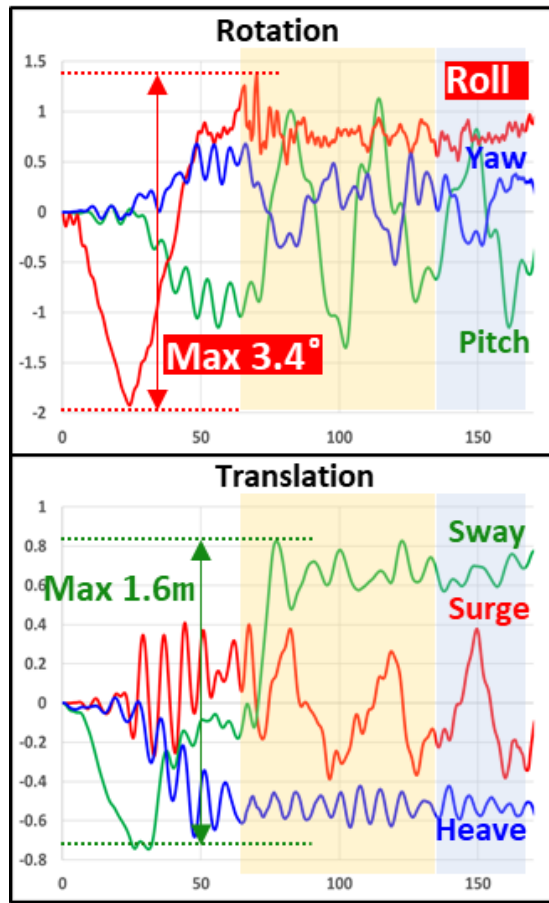


Fig. 4-25. 3,600톤 해상 크레인 움직임 분석 결과 (Case 4)

4.3.3. Case 5 : 잭업바지 2 대, 리프팅빔 이용 인양

Case 5는 잭업 바지를 사용하여 인양하는 방법이다. 잭업 바지의 경우 세월호 인양시 사용했던 방법으로 대형 선박 인양시 주로 사용하는 방법이다.

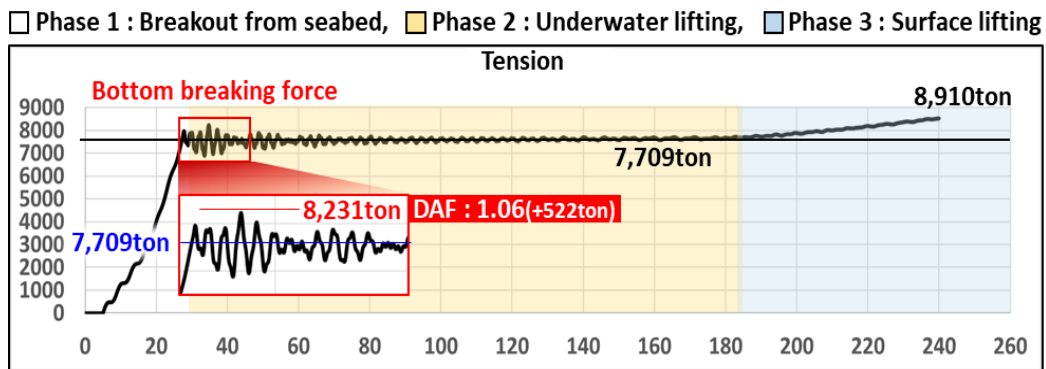


Fig. 4-26. 동적 인양력 분석 결과 (Case 5)

정적 인양력의 경우 Case 4, 5와 같다. 동적 인양력의 경우 동적응답계수 (DAF)가 1.06으로 모든 인양 케이스 중에서 가장 작다. 이는 잭업 바지를 사용함에 따라 해상 크레인을 사용할 때 보다 인양 와이어의 길이가 짧아졌으며, 와이어의 위치 또한 바지와 리프팅 빔에 고정되어 있어 수직으로 힘을 받게 되기 때문으로 판단된다.

침몰 선체의 움직임의 경우도 마찬가지이다. 침몰 선박의 회전 운동은 최대 1.2도로 거의 없으며, 수평 운동의 경우 surge, sway 방향 모두 거의 없는 것을 확인하였다.



Fig. 4-27. 침몰 선체 움직임 분석 결과 (Case 5)

잭업 바지의 경우도 움직임이 거의 없는 것을 확인하였다. roll 방향의 회전이 해저이탈단계에서 최대 2.5도까지 발생하는데 이는 침몰 선체를 잭업 바지의 측면에서 인양함에 따른 이유로 판단된다.

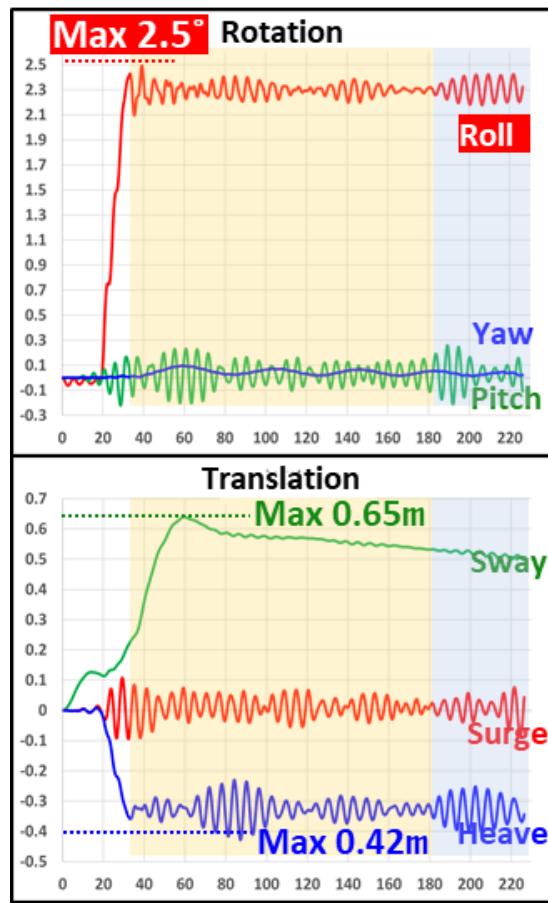


Fig. 4-28. 잭업 바지1 움직임 분석 결과 (Case 5)

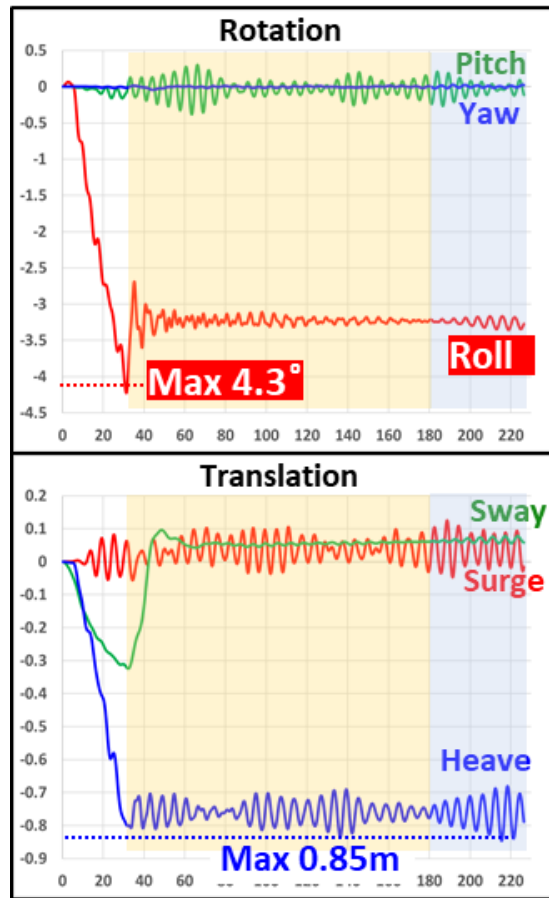


Fig. 4-29. 잭업 바지2 움직임 분석 결과 (Case 5)

4.4. 안전성 평가 결과

본 연구에서 제안하는 안전성 평가 방법은 아래와 같다. 표에 나와 있는 것처럼 인양력과 물체의 움직임으로 구분한 뒤 인양력은 동적 응답 계수 (DAF)로 기록하였다. 물체의 움직임은 3개축의 움직임에 따라 회전 움직임은 roll, pitch, yaw으로 수평 움직임은 surge, sway, heave로 나누었다. 그리고 각 움직임의 변위의 최대 변화량을 기록하였다.

이후 각 움직임별로 최대 변위 변화량을 빨간색, 최소 변위 변화량을 파란색으로 표시하였다. 각 케이스 별로 빨간색이 있는 경우 -1점 파란색이 있는 경우 +1점으로 계산하여 총 합을 구한 뒤 총점에 따라 안전성 평가 순위를 계산하였다.

결과를 보면 잭업 바지를 사용하는 경우가 해상 크레인을 사용하는 방법 보다 안전하다는 것을 확인할 수 있다. 또한 같은 조건이라면 해상 크레인 1대가 2대보다 안전하다는 것을 볼 수 있다. 인양 와이어의 연결 방법에 따른 안전성을 보면, 와이어를 선체에 연결하는 방법이 선체를 와이어로 감아서 인양하는 방법보다 동적 인양력의 크기가 더 작다는 것을 확인할 수 있다.

마지막으로 모든 것을 고려하였을 때 잭업 바지를 사용하는 방법이 가장 안전하며, 해상 크레인 2기를 사용하며 감아서 인양하는 방법이 가장 위험하다는 안전성 평가 결과를 얻었다.

Table 6. 안전성 평가 결과

		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5			
Lifting Force	DAF	1.14 (+1,056ton)	1.17 (+1,245ton)	1.15 (+1,218ton)	1.24 (+1,182ton)	1.06 (+522ton)			
	Roll [deg]	0.5	1.7	1.5	2.5	2.3			
Movement of Wreck	Pitch [deg]	3.0	6.1	2.0	13.8	0.1			
	Yaw [deg]	5.5	11.7	13.0	12.8	1.2			
	Surge [m]	7.0	9.0	8.0	12.0	1.0			
	Heave[m]	2.0	3.0	1.0	3.0	1.0			
	Roll [deg]	0.5	0.4	1.0	2.7	1.5	3.4	2.5	4.3
Movement Of Lifting vessel	Pitch [deg]	2.7	2.5	1.5	1.1	1.8	2.4	0.3	0.3
	Yaw [deg]	1.5	1.7	1.6	2.7	4.4	1.0	0.1	0.1
	Surge [m]	1.7	1.4	1.2	2.0	0.6	0.8	0.1	0.1
	Sway [m]	1.2	1.2	0.7	3.2	1.2	1.6	0.6	0.3
	Total score	0	0	-2	-6	8			

4.5. 경제성 평가 결과

본 연구에서 제안한 방법에 따라 위의 5가지 케이스에 대해서 경제성 평가를 하였다. 총 인양 비용을 계산하기 위해서 먼저 총 인양 기간이 얼마나 걸리는지 인양 단계별로 계산을 하였다. 이후 계산된 기간에 일별 인양 비용을 곱하여 총 인양 비용을 산출하였다.

4.5.1. 총 인양 기간 추정 결과

첫번째 오염물질제거단계 (Pollution off-loading)는 5가지 케이스 모두 동일하게 계산되었다. 두번째 부력조절단계 (buoyancy control)는 1번, 2번 케이스에서만 계산되었다. 세번째 인양준비단계 (lifting preparation)는 인양 와이어의 연결 방법에 따라 선체 부착 방법 (attachment method)와 선체를 감는 방법 (wrapping method) 인양빔 설치 방법 (lifting beam method)로 나뉘서 계산되었다. 마지막 인양 및 적재 단계(lifting and loading)는 모두 동일하게 계산되었다. 각 계산에 사용된 데이터는 아래 표에서 확인할 수 있다.

Table 7. 단계별 인양 기간 산출 결과

Phase	Classification	Quantity	Periods(day)
Phase 1 Pollution off-loading	Ship size	Large	6
	Tank volume	2,400,000m3	7
	Tank capacity	680m3/h	
	Pump number	20ea	
	Gear removal	Large	6
	Total		19
Phase 2 Buoyancy Control		Diff. Size Amounts Diving site	
	Inside hull	2 2 2 1	8
	Inside hull	2 3 2 1	12
	Outside hull	1 3 5 1	15
	Total		35
Phase 3 Lifting preparation	Attachment	Lug install 1	24
		Wire install 1	24
		Amount 24	
	Total		48
	Wrapping	Tunneling 3	36
		Wire install 2	24
		Amounts 12	
	Total		60
	Lifting beam	Beam install 6	60
		Amount(beam) 10	
	Wire install 1	20	
	Amount(wire) 20		
Total		80	
Phase 4 Lifting and loading	Installation gear	Large	6
	Winch speed	25	2
	Depth	50	
	Total		8

총 인양 기간을 계산한 결과를 그래프로 그리면 Fig. 4-30과 같다. 오염물질 제거 단계의 경우 모두 동일하게 19일이 걸리는 것으로 계산되었고, 1번과 2번 케이스의 부력조절단계의 경우 작업 준비에 15일 설치에 20일이 걸리는 것으로 계산되었다. 인양준비단계는 해상 크레인을 사용하는 경우 선체 부착 방법은 48일, 감아서 인양하는 방법은 60일이 걸리는 것으로 계산되었다. 작업 바지를 사용하는 경우는 총 80일이 걸리는 것으로 계산되었다. 마지막 인양 및 적재단계에서는 모두 동일하게 준비기간 6일, 인양 2일로 8일로 계산되었다.

이렇게 각 단계별 소요 시간을 구한 이후에 모두 더해서 총 인양 기간으로 봤을 때 Case 3가 가장 짧은 기간이 걸리며 Case 2가 가장 오랜 기간이 걸리는 것을 확인하였다.

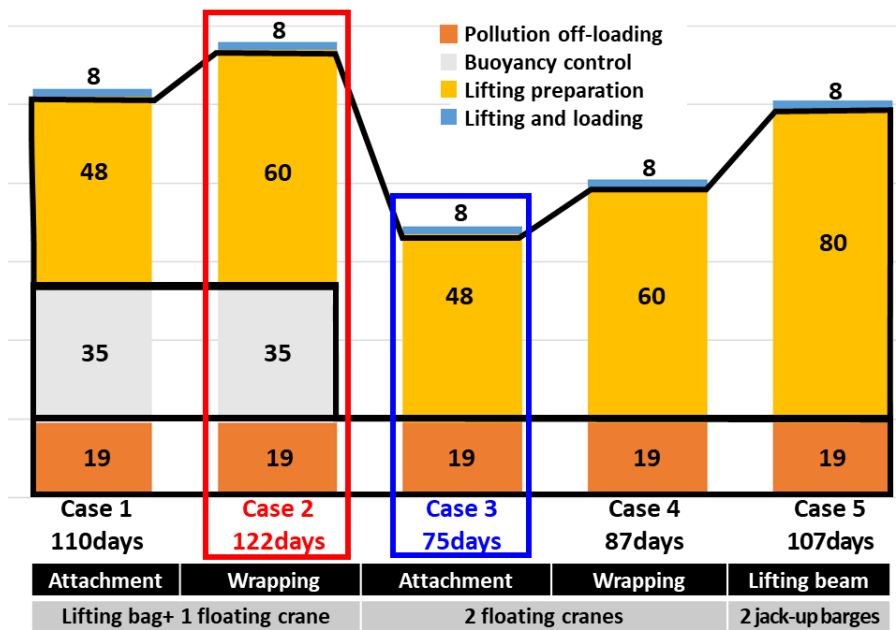


Fig. 4-30. 총 인양 기간 분석 결과

4.5.2. 총 인양 비용 추정 결과

인양 단계별 계산한 기간을 사용하여 인양 비용을 계산하였다. 각 단계별로 4가지 성분으로 구분한 인양 장비의 일별 사용 비용을 계산한 뒤 합산하여 단계별 인양 기간을 곱하였다. 총 비용을 계산한 결과를 그래프로 그리면 Fig. 4-31과 같다. Case 4가 가장 적은 비용이 요구되며 Case 5가 안전성 평가에서는 가장 우수하였으나, 비용면에서는 가장 높은 금액이 요구되었다.

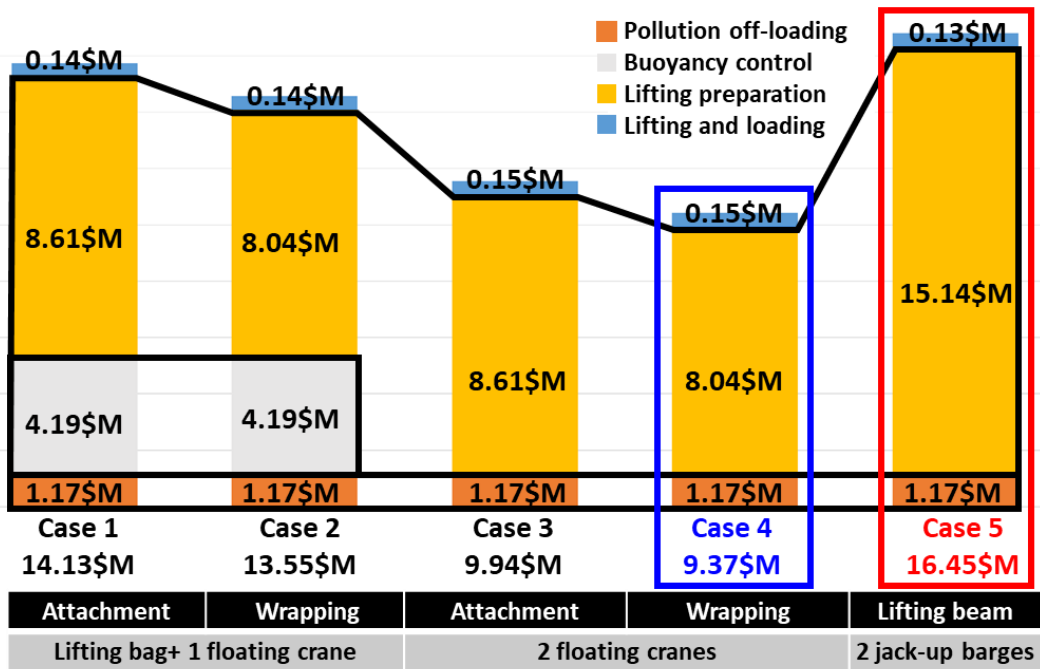


Fig. 4-31. 총 인양 비용 분석 결과

4.6. 요약 정리

적용 예제에 대한 결과 요약으로 총 5가지 케이스에 안전성 평가 결과 작업 바지를 사용하는 것이 가장 안전한 것으로 평가되었다.

인양 기간으로 보면 해상 크레인을 2대를 사용하고 인양 와이어를 선체에 부착하는 방법이 가장 인양 기간이 짧으나, 경제성 측면에서는 해상 크레인을 2대 사용하고 인양 와이어를 선체에 감아서 인양하는 방법이 가장 비용이 저렴한 것을 확인하였다.

Table 8. 적용 예제 결과 요약

		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Safety assessment	Score	0	0	-2	-6	8
	Rank	2	2	4	5	1
Period estimation	Period (days)	110	122	75	87	107
	Rank	4	5	1	2	3
Economic evaluation	Cost (Million)	14.13	13.55	9.94	9.37	16.45
	Rank	4	3	2	1	5

5. 결 론

본 연구에서는 침몰 선박 인양 계획을 검증하는 방법을 제안하였다. 다양한 인양 계획에 대해 검증하기 위해서 두가지 방법을 제안하였다.

첫번째는 안전성 평가 방법이다. 안전성 평가를 위해 물리 기반 선박 인양 시뮬레이션 프로그램을 개발하였으며, 인양에 적합한 시뮬레이션을 위해서 다물체 동역학을 적용하여 동적인 움직임을 해석하고, 인양시 사용하는 와이어를 구현하였다. 또 해상에서 발생하는 다양한 외력에 대해서도 시뮬레이션에 반영할 수 있도록 하였다. 이러한 시뮬레이션을 이용하여 침몰 선체를 인양하기 위해 필요한 인양력과 침몰 선박과 인양 장비의 움직임을 확인하였다.

이후 시뮬레이션 결과를 안전성 측면에서 평가하기 위한 평가 기준을 정립하였으며, 적용 예제를 통해 실제로 다양한 인양 방법에 대한 안전성 평가를 실시하였다.

두번째는 경제성 평가 방법으로 기존에 시도하지 못했던 총 인양 기간 및 인양 비용을 예측 방법을 제시하였다. 총 인양 기간은 선박 인양을 4단계로 구분하여 단계별로 필요한 시간을 계산하였다. 인양 비용의 경우 선박 인양에 필요한 모든 항목들을 특성에 따라 4가지로 구분하고 각각의 물품의 일별 사용 비용을 입력하였다. 이후 인양 기간에 비용을 곱하여 총 인양 비용을 산출하고 이를 통해서 다양한 인양 계획에 대한 경제성 평가가 가능하도록 하였다.

참고문헌

- Bartholomew, C.A., Hooper, R., 1992. SALVAGE ENGINEER ' S HANDBOOK Salvage Engineering. US Navy, CA.
- Byun, S.H., Choi, H.J., Chun, T.B., Information, C., 2001. Calculation of Lifting Force for a Sunken Ship Considering the Bottom Soil Property, in: The Korean Society for Marine Environment & Energy. pp. 135–139.
- Ham, S.-H., Roh, M.-I., Kim, J.-S., 2017a. Numerical analysis of wreck removal based on multibody system dynamics. J. Mar. Sci. Technol. 1–15.
<https://doi.org/10.1007/s00773-017-0489-z>
- Ham, S.-H., Roh, M.-I., Kim, J.-S., 2017b. Numerical analysis of wreck removal based on multibody system dynamics. J. Mar. Sci. Technol. 1–15.
<https://doi.org/10.1007/s00773-017-0489-z>
- Ham, S.-H., Roh, M.-I., Kim, J.-S., Lee, H.-W., Ha, S., 2015. Physics-based Salvage Simulation for Wrecked Ship Considering Environmental Loads. J. Soc. Nav. Archit. Korea 52, 387–394. <https://doi.org/10.3744/SNAK.2015.52.5.387>
- Lee, C.-S., 2014. A Study on the Evaluation of Lifting Force and Salvage Method of Submerged Ship. Pukyong National University.
- Lee, H., Roh, M.-I., Ham, S.-H., 2016. Block turnover simulation considering the interferences between the block and wire ropes in shipbuilding. Autom. Constr. 67, 60–75. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.03.013>
- Lew, A., 2003. Variational time integrators in computational solid mechanics. California Institute of Technology Pasadena, California.
- Marsden, J.E., West, M., 2001. Discrete mechanics and variational integrators. Acta Numer. 357–514. <https://doi.org/10.1017/S096249290100006X>
- Servin, M., Lacoursière, C., Nordfelth, F., Bodin, K., 2011. Hybrid, multiresolution wires with massless frictional contacts. IEEE Trans. Vis. Comput. Graph. 17, 970–982.
<https://doi.org/10.1109/TVCG.2010.122>
- Wendlandt, J.M., Marsden, J.E., Meiss, J.D., 1997. Mechanical integrators derived from a discrete variational principle, Physica D.

6. 부 록

6.1. 인양장비 비용 목록

Craft

No	craft	description	unit	Qty	Daily working rate	Daily standby rate
1	Floating crane	lift 900MT, 108bed	set	1	US\$50,000.00	US\$37,500.00
2	Tug boat	7200HP	set	1	US\$13,760.60	US\$10,320.45
3	Jack-up barge	21set strand jack	set	1	US\$12,000.00	US\$9,000.00
4	Tug boat	4400HP	set	1	US\$9,209.20	US\$6,906.90
5	Load ship	load 7000MT	set	1	US\$12,000.00	US\$9,000.00
6	Floating crane	lift 350MT	set	1	US\$25,000.00	US\$18,750.00
7	work boat	120HP	set	1	US\$251.16	US\$188.37
8	work barge	36x12x2.4	set	1	US\$3,500.00	US\$2,625.00
9	Submersible barge		set	1	US\$50,000.00	
10	SMIT Work barge			1	US\$45,000.00	
11	SMIT salvage ship			1	US\$12,500.00	

Equipment

No	Equipment	Description	Unit	Qty	Daily working rate	Daily standby rate
1	drilling equipment	passing the guide wire		1	US\$10,000.00	US\$7,500.00
2	mud pumping equipment	include 6' hose 100m		1	US\$250.00	US\$187.50
3	large mud pumping equipment			1	US\$350.00	US\$260.00
4	generator(300kw)		set	1	US\$189.00	US\$141.75
5	decompression chamber			1	US\$472.50	US\$354.38
6	mixed gas diving equipment	helmet, umbilical, cctv, etc		1	US\$10,000.00	US\$7,500.00
7	air compressor			1	US\$363.60	US\$177.45
8	underwater cutting machine			1	US\$47.60	US\$35.70
9	flare cutter			1	US\$47.60	US\$35.70
10	electric welding machine			1	US\$37.60	US\$35.70
11	HP water pump			1	US\$288.40	US\$216.30
12	8'submersible pump			1	US\$1,639.17	US\$1,229.38

Equipment

No	Equipment	Description	Unit	Qty	Daily working rate	Daily standby rate
13	4' submersible pump			1	US\$299.60	US\$224.70
14	hydraulic span			1	US\$50.00	US\$37.50
15	current speed meter			1	US\$50.00	US\$37.50
16	DGPS			1	US\$100.00	US\$75.00
17	underwater hole drilling machine			1	US\$2,500.00	US\$1,875.00
18	hydraulic grinding machine			1	US\$20.00	US\$15.00
19	oil boom			1	US\$18.41	US\$13.81
20	lifting bag			1	US\$1,600.00	
21	underwater nail gun			1	US\$20.00	US\$15.00
22	fender			1	US\$70.00	US\$50.00
23	LARS			1	US\$400.00	

Personnel

No	Personnel	Unit	Qty	Daily working rate	Daily standby rate
1	salvage master	person	1	US\$1,420.30	US\$1,065.23
2	project duty officer		1	US\$1,207.26	US\$905.44
3	chief engineer		1	US\$1,184.40	US\$888.30
4	HSE officer		1	US\$1,184.40	US\$888.30
5	commercial cooperater		1	US\$949.20	US\$711.90
6	site engineer		1	US\$949.20	US\$711.90
7	diving supervisor		1	US\$949.20	US\$711.90
8	diving doctor		1	US\$952.70	US\$714.53
9	diver		1	US\$851.90	US\$638.93
10	salvage foreman		1	US\$709.80	US\$532.35
11	welder		1	US\$568.40	US\$426.30
12	mechanist		1	US\$568.40	US\$426.30
13	electrician		1	US\$568.40	US\$426.30
14	savage engineer		1	US\$1,692.00	US\$1,692.00
15	diving medical technician		1	US\$1,356.00	US\$1,356.00
16	diving tenter		1	US\$900.00	US\$900.00

Materials

No	Materials	Description	Unit	Qty	Price
1	steel plate		ton	1	US\$1,100.00
2	oxygen		bottle	1	US\$22.00
3	acetylene		bottle	1	US\$33.00
4	medical oxygen	diving	bottle	1	US\$55.00
5	helium	diving	bottle	1	US\$550.00
6	welding rod		ton	1	US\$1.32
7	glove		set	1	US\$1.10
8	nail		set	1	US\$5.50
9	flange		set	1	US\$55.00
10	magnetic		set	1	US\$300.00
11	rubber plate		m2	1	US\$55.00
12	nylon rope		batch	1	US\$1,100.00
13	chain		m	1	US\$220.00
14	wire		ton	1	US\$2,970.00
15	shackle		pcs	1	US\$50.00
16	lifting belt	20ton	pcs	1	US\$220.00
17	steel wire		ton	1	US\$3,000.00
18	steel beam		set	1	US\$10,000.00

6.2. Case 1 인양 비용 계산 결과

1단계 : 오염물질 제거 (Pollution off-loading)

craft			equipment			Personnel			Materials		
name	Unit	cost	name	Unit	cost	name	Unit	cost	name	Unit	cost
Tug boat	1	US\$13,760.60	generator(300kw)	1	US\$189.00	salvage master	1	US\$1,420.30	oxygen	19	US\$22.00
work boat	3	US\$251.16	decompression chamber	2	US\$472.50	project duty officer	1	US\$1,207.26	acetylene	19	US\$33.00
work barge	1	US\$3,500.00	mixed gas diving equipment	1	US\$10,000.00	chief engineer	1	US\$1,184.40	medical oxygen	19	US\$55.00
			air compressor	1	US\$363.60	HSE officer	1	US\$1,184.40	helium	19	US\$550.00
			underwater cutting machine	1	US\$47.60	commercial cooperater	1	US\$949.20	glove	1000	US\$1.10
			flare cutter	1	US\$47.60	site engineer	1	US\$949.20	nail	100000	US\$5.50
			electric welding machine	1	US\$37.60	diving supervisor	1	US\$949.20			
			HP water pump	1	US\$288.40	diving doctor	1	US\$952.70			
			8'submersible pump	1	US\$1,639.17	diver	10	US\$851.90			
			4' submersible pump	1	US\$299.60	salvage foreman	5	US\$709.80			
						welder	2	US\$568.40			
						mechanist	2	US\$568.40			
						electrician	2	US\$568.40			
Cost		US\$342,267.52	Cost		US\$263,293.83	Cost		US\$461,226.14	Cost		US\$10,709,160.00

2단계 : 부력 조절 (Buoyancy control)

craft			equipment			Personnel			Materials		
name	Unit	cost	name	Unit	cost	name	Unit	cost	name	Unit	cost
Tug boat	1	US\$13,760.60	generator(300kw)	1	US\$189.00	salvage master	1	US\$1,420.30	oxygen	19	US\$22.00
work boat	3	US\$251.16	decompression chamber	2	US\$472.50	project duty officer	1	US\$1,207.26	acetylene	19	US\$33.00
work barge	1	US\$3,500.00	mixed gas diving equipment	1	US\$10,000.00	chief engineer	1	US\$1,184.40	medical oxygen	19	US\$55.00
			air compressor	1	US\$363.60	HSE officer	1	US\$1,184.40	helium	19	US\$550.00
			underwater cutting machine	1	US\$47.60	commercial cooperator	1	US\$949.20	glove	1000	US\$1.10
			flare cutter	1	US\$47.60	site engineer	1	US\$949.20	nail	100000	US\$5.50
			electric welding machine	1	US\$37.60	diving supervisor	1	US\$949.20	welding rod	3000	US\$1.32
			HP water pump	1	US\$288.40	diving doctor	1	US\$952.70	steel plate	500	US\$1,100.00
			8' submersible pump	1	US\$1,639.17	diver	20	US\$851.90			
			4' submersible pump	1	US\$299.60	salvage foreman	5	US\$709.80			
			lifting bag	10	US\$1,600.00	welder	2	US\$568.40			
						mechanist	2	US\$568.40			
						electrician	2	US\$568.40			
Cost		US\$630,492.80	Cost		US\$1,045,014.95	Cost		US\$1,147,792.10	Cost		US\$39,116,000.00

3단계 : 인양 준비 (Lifting preparation)

craft			equipment			Personnel			Materials		
name	Unit	cost	name	Unit	cost	name	Unit	cost	name	Unit	cost
Tug boat	1	US\$13,760.60	generator(300kw)	2	US\$189.00	salvage master	1	US\$1,420.30	oxygen	100	US\$22.00
work boat	3	US\$251.16	decompression chamber	2	US\$472.50	project duty officer	1	US\$1,207.26	acetylene	100	US\$33.00
work barge	1	US\$3,500.00	mixed gas diving equipment	2	US\$10,000.00	chief engineer	1	US\$1,184.40	medical oxygen	19	US\$55.00
			air compressor	1	US\$363.60	HSE officer	1	US\$1,184.40	helium	19	US\$550.00
			underwater cutting machine	4	US\$47.60	commercial cooperater	1	US\$949.20	wire	200	US\$2,970.00
			flare cutter	1	US\$47.60	site engineer	1	US\$949.20	glove	1000	US\$1.10
			electric welding machine	1	US\$37.60	diving supervisor	1	US\$949.20	nail	100000	US\$5.50
			HP water pump	1	US\$288.40	diving doctor	1	US\$952.70	steel plate	500	US\$1,100.00
			8' submersible pump	1	US\$1,639.17	diver	20	US\$851.90	welding rod	3000	US\$1.32
			4' submersible pump	1	US\$299.60	salvage foreman	5	US\$709.80			
						welder	10	US\$568.40			
						mechanist	2	US\$568.40			
						electrician	2	US\$568.40			
Cost		US\$864,675.84	Cost		US\$1,161,089.76	Cost		US\$1,792,380.48	Cost		US\$82,370,640.00

4단계 : 인양 및 적재 (Lifting and loading)

craft			equipment			Personnel			Materials		
name	Unit	cost	name	Unit	cost	name	Unit	cost	name	Unit	cost
Floating crane	1	US\$50,000.00	generator(300kw)	1	US\$189.00	salvage master	1	US\$1,420.30	oxygen	19	US\$22.00
Tug boat	4	US\$13,760.60	air compressor	1	US\$363.60	project duty officer	1	US\$1,207.26	acetylene	19	US\$33.00
work boat	1	US\$251.16	flare cutter	1	US\$47.60	chief engineer	1	US\$1,184.40	glove	1000	US\$1.10
work barge	1	US\$3,500.00	electric welding machine	1	US\$37.60	HSE officer	1	US\$1,184.40	nail	100000	US\$5.50
Submersible barge	1	US\$50,000.00	HP water pump	1	US\$288.40	commercial cooperater	1	US\$949.20			
			8'submersible pump	1	US\$1,639.17	site engineer	1	US\$949.20			
			4' submersible pump	1	US\$299.60	salvage foreman	5	US\$709.80			
						welder	2	US\$568.40			
						mechanist	2	US\$568.40			
						electrician	2	US\$568.40			
Cost		US\$1,270,348.48	Cost		US\$22,919.76	Cost		US\$110,833.28	Cost		US\$4,417,160.00

6.3. Case 2 인양 비용 계산 결과

1단계 : 오염물질 제거 (Pollution off-loading)

craft			equipment			Personnel			Materials		
name	Unit	cost	name	Unit	cost	name	Unit	cost	name	Unit	cost
Tug boat	1	US\$13,760.60	generator(300kw)	1	US\$189.00	salvage master	1	US\$1,420.30	oxygen	19	US\$22.00
work boat	3	US\$251.16	decompression chamber	2	US\$472.50	project duty officer	1	US\$1,207.26	acetylene	19	US\$33.00
work barge	1	US\$3,500.00	mixed gas diving equipment	1	US\$10,000.00	chief engineer	1	US\$1,184.40	medical oxygen	19	US\$55.00
			air compressor	1	US\$363.60	HSE officer	1	US\$1,184.40	helium	19	US\$550.00
			underwater cutting machine	1	US\$47.60	commercial cooperator	1	US\$949.20	glove	1000	US\$1.10
			flare cutter	1	US\$47.60	site engineer	1	US\$949.20	nail	100000	US\$5.50
			electric welding machine	1	US\$37.60	diving supervisor	1	US\$949.20			
			HP water pump	1	US\$288.40	diving doctor	1	US\$952.70			
			8' submersible pump	1	US\$1,639.17	diver	10	US\$851.90			
			4' submersible pump	1	US\$299.60	salvage foreman	5	US\$709.80			
						welder	2	US\$568.40			
						mechanist	2	US\$568.40			
						electrician	2	US\$568.40			
Cost		US\$342,267.52	Cost		US\$263,293.83	Cost		US\$461,226.14	Cost		US\$10,709,160.00

2단계 : 부력 조절 (Buoyancy control)

craft			equipment			Personnel			Materials		
name	Unit	cost	name	Unit	cost	name	Unit	cost	name	Unit	cost
Tug boat	1	US\$13,760.60	generator(300kw)	1	US\$189.00	salvage master	1	US\$1,420.30	oxygen	19	US\$22.00
work boat	3	US\$251.16	decompression chamber	2	US\$472.50	project duty officer	1	US\$1,207.26	acetylene	19	US\$33.00
work barge	1	US\$3,500.00	mixed gas diving equipment	1	US\$10,000.00	chief engineer	1	US\$1,184.40	medical oxygen	19	US\$55.00
			air compressor	1	US\$363.60	HSE officer	1	US\$1,184.40	helium	19	US\$550.00
			underwater cutting machine	1	US\$47.60	commercial cooperator	1	US\$949.20	glove	1000	US\$1.10
			flare cutter	1	US\$47.60	site engineer	1	US\$949.20	nail	100000	US\$5.50
			electric welding machine	1	US\$37.60	diving supervisor	1	US\$949.20	welding rod	3000	US\$1.32
			HP water pump	1	US\$288.40	diving doctor	1	US\$952.70	steel plate	500	US\$1,100.00
			8' submersible pump	1	US\$1,639.17	diver	20	US\$851.90			
			4' submersible pump	1	US\$299.60	salvage foreman	5	US\$709.80			
			lifting bag	10	US\$1,600.00	welder	2	US\$568.40			
						mechanist	2	US\$568.40			
						electrician	2	US\$568.40			
Cost		US\$630,492.80	Cost		US\$1,045,014.95	Cost		US\$1,147,792.10	Cost		US\$39,116,000.00

3단계 : 인양 준비 (Lifting preparation)

craft			equipment			Personnel			Materials		
name	Unit	cost	name	Unit	cost	name	Unit	cost	name	Unit	cost
Tug boat	2	US\$13,760.60	generator(300kw)	1	US\$189.00	salvage master	1	US\$1,420.30	oxygen	19	US\$22.00
work boat	3	US\$251.16	decompression chamber	2	US\$472.50	project duty officer	1	US\$1,207.26	acetylene	19	US\$33.00
work barge	1	US\$3,500.00	mixed gas diving equipment	1	US\$10,000.00	chief engineer	1	US\$1,184.40	medical oxygen	19	US\$55.00
			air compressor	1	US\$363.60	HSE officer	1	US\$1,184.40	helium	19	US\$550.00
			underwater cutting machine	1	US\$47.60	commercial cooperator	1	US\$949.20	wire	200	US\$2,970.00
			flare cutter	1	US\$47.60	site engineer	1	US\$949.20	glove	1000	US\$1.10
			electric welding machine	1	US\$37.60	diving supervisor	1	US\$949.20	nail	100000	US\$5.50
			HP water pump	1	US\$288.40	diving doctor	1	US\$952.70			
			8'submersible pump	1	US\$1,639.17	diver	20	US\$851.90			
			4' submersible pump	1	US\$299.60	salvage foreman	5	US\$709.80			
			drilling equipment	10	US\$10,000.00	welder	10	US\$568.40			
						mechanist	2	US\$568.40			
						electrician	2	US\$568.40			
Cost		US\$1,906,480.80	Cost		US\$6,831,454.20	Cost		US\$2,240,475.60	Cost		US\$69,458,400.00

4단계 : 인양 및 적재 (Lifting and loading)

craft			equipment			Personnel			Materials		
name	Unit	cost	name	Unit	cost	name	Unit	cost	name	Unit	cost
Floating crane	1	US\$50,000.00	generator(300kw)	1	US\$189.00	salvage master	1	US\$1,420.30	oxygen	19	US\$22.00
Tug boat	4	US\$13,760.60	air compressor	1	US\$363.60	project duty officer	1	US\$1,207.26	acetylene	19	US\$33.00
work boat	1	US\$251.16	flare cutter	1	US\$47.60	chief engineer	1	US\$1,184.40	glove	1000	US\$1.10
work barge	1	US\$3,500.00	electric welding machine	1	US\$37.60	HSE officer	1	US\$1,184.40	nail	100000	US\$5.50
Submersible barge	1	US\$50,000.00	HP water pump	1	US\$288.40	commercial cooperater	1	US\$949.20			
			8'submersible pump	1	US\$1,639.17	site engineer	1	US\$949.20			
			4' submersible pump	1	US\$299.60	salvage foreman	5	US\$709.80			
						welder	2	US\$568.40			
						mechanist	2	US\$568.40			
						electrician	2	US\$568.40			
Cost		US\$1,270,348.48	Cost		US\$22,919.76	Cost		US\$110,833.28	Cost		US\$4,417,160.00

6.4. Case 3 인양 비용 계산 결과

1단계 : 오염물질 제거 (Pollution off-loading)

craft			equipment			Personnel			Materials		
name	Unit	cost	name	Unit	cost	name	Unit	cost	name	Unit	cost
Tug boat	1	US\$13,760.60	generator(300kw)	1	US\$189.00	salvage master	1	US\$1,420.30	oxygen	19	US\$22.00
work boat	3	US\$251.16	decompression chamber	2	US\$472.50	project duty officer	1	US\$1,207.26	acetylene	19	US\$33.00
work barge	1	US\$3,500.00	mixed gas diving equipment	1	US\$10,000.00	chief engineer	1	US\$1,184.40	medical oxygen	19	US\$55.00
			air compressor	1	US\$363.60	HSE officer	1	US\$1,184.40	helium	19	US\$550.00
			underwater cutting machine	1	US\$47.60	commercial cooperator	1	US\$949.20	glove	1000	US\$1.10
			flare cutter	1	US\$47.60	site engineer	1	US\$949.20	nail	100000	US\$5.50
			electric welding machine	1	US\$37.60	diving supervisor	1	US\$949.20			
			HP water pump	1	US\$288.40	diving doctor	1	US\$952.70			
			8' submersible pump	1	US\$1,639.17	diver	10	US\$851.90			
			4' submersible pump	1	US\$299.60	salvage foreman	5	US\$709.80			
						welder	2	US\$568.40			
						mechanist	2	US\$568.40			
						electrician	2	US\$568.40			
Cost		US\$342,267.52	Cost		US\$263,293.83	Cost		US\$461,226.14	Cost		US\$10,709,160.00

3단계 : 인양 준비 (Lifting preparation)

craft			equipment			Personnel			Materials		
name	Unit	cost	name	Unit	cost	name	Unit	cost	name	Unit	cost
Tug boat	1	US\$13,760.60	generator(300kw)	2	US\$189.00	salvage master	1	US\$1,420.30	oxygen	100	US\$22.00
work boat	3	US\$251.16	decompression chamber	2	US\$472.50	project duty officer	1	US\$1,207.26	acetylene	100	US\$33.00
work barge	1	US\$3,500.00	mixed gas diving equipment	2	US\$10,000.00	chief engineer	1	US\$1,184.40	medical oxygen	19	US\$55.00
			air compressor	1	US\$363.60	HSE officer	1	US\$1,184.40	helium	19	US\$550.00
			underwater cutting machine	4	US\$47.60	commercial cooperator	1	US\$949.20	wire	200	US\$2,970.00
			flare cutter	1	US\$47.60	site engineer	1	US\$949.20	glove	1000	US\$1.10
			electric welding machine	1	US\$37.60	diving supervisor	1	US\$949.20	nail	100000	US\$5.50
			HP water pump	1	US\$288.40	diving doctor	1	US\$952.70	steel plate	500	US\$1,100.00
			8' submersible pump	1	US\$1,639.17	diver	20	US\$851.90	welding rod	3000	US\$1.32
			4' submersible pump	1	US\$299.60	salvage foreman	5	US\$709.80			
						welder	10	US\$568.40			
						mechanist	2	US\$568.40			
						electrician	2	US\$568.40			
Cost		US\$864,675.84	Cost		US\$1,161,089.76	Cost		US\$1,792,380.48	Cost		US\$82,370,640.00

4단계 : 인양 및 적재 (Lifting and loading)

craft			equipment			Personnel			Materials		
name	Unit	cost	name	Unit	cost	name	Unit	cost	name	Unit	cost
Floating crane	2	US\$50,000.00	generator(300kw)	1	US\$189.00	salvage master	1	US\$1,420.30	oxygen	19	US\$22.00
Tug boat	8	US\$13,760.60	air compressor	1	US\$363.60	project duty officer	1	US\$1,207.26	acetylene	19	US\$33.00
work boat	1	US\$251.16	flare cutter	1	US\$47.60	chief engineer	1	US\$1,184.40	glove	1000	US\$1.10
work barge	1	US\$3,500.00	electric welding machine	1	US\$37.60	HSE officer	1	US\$1,184.40	nail	100000	US\$5.50
Load ship	1	US\$12,000.00	HP water pump	1	US\$288.40	commercial cooperator	1	US\$949.20			
			8'submersible pump	1	US\$1,639.17	site engineer	1	US\$949.20			
			4' submersible pump	1	US\$299.60	salvage foreman	5	US\$709.80			
						welder	2	US\$568.40			
						mechanist	2	US\$568.40			
						electrician	2	US\$568.40			
Cost		US\$1,806,687.68	Cost		US\$22,919.76	Cost		US\$110,833.28	Cost		US\$4,417,160.00

6.5. Case 4 인양 비용 계산 결과

1단계 : 오염물질 제거 (Pollution off-loading)

craft			equipment			Personnel			Materials		
name	Unit	cost	name	Unit	cost	name	Unit	cost	name	Unit	cost
Tug boat	1	US\$13,760.60	generator(300kw)	1	US\$189.00	salvage master	1	US\$1,420.30	oxygen	19	US\$22.00
work boat	3	US\$251.16	decompression chamber	2	US\$472.50	project duty officer	1	US\$1,207.26	acetylene	19	US\$33.00
work barge	1	US\$3,500.00	mixed gas diving equipment	1	US\$10,000.00	chief engineer	1	US\$1,184.40	medical oxygen	19	US\$55.00
			air compressor	1	US\$363.60	HSE officer	1	US\$1,184.40	helium	19	US\$550.00
			underwater cutting machine	1	US\$47.60	commercial cooperator	1	US\$949.20	glove	1000	US\$1.10
			flare cutter	1	US\$47.60	site engineer	1	US\$949.20	nail	100000	US\$5.50
			electric welding machine	1	US\$37.60	diving supervisor	1	US\$949.20			
			HP water pump	1	US\$288.40	diving doctor	1	US\$952.70			
			8' submersible pump	1	US\$1,639.17	diver	10	US\$851.90			
			4' submersible pump	1	US\$299.60	salvage foreman	5	US\$709.80			
						welder	2	US\$568.40			
						mechanist	2	US\$568.40			
						electrician	2	US\$568.40			
Cost		US\$342,267.52	Cost		US\$263,293.83	Cost		US\$461,226.14	Cost		US\$10,709,160.00

3단계 : 인양 준비 (Lifting preparation)

craft			equipment			Personnel			Materials		
name	Unit	cost	name	Unit	cost	name	Unit	cost	name	Unit	cost
Tug boat	2	US\$13,760.60	generator(300kw)	1	US\$189.00	salvage master	1	US\$1,420.30	oxygen	19	US\$22.00
work boat	3	US\$251.16	decompression chamber	2	US\$472.50	project duty officer	1	US\$1,207.26	acetylene	19	US\$33.00
work barge	1	US\$3,500.00	mixed gas diving equipment	1	US\$10,000.00	chief engineer	1	US\$1,184.40	medical oxygen	19	US\$55.00
			air compressor	1	US\$363.60	HSE officer	1	US\$1,184.40	helium	19	US\$550.00
			underwater cutting machine	1	US\$47.60	commercial cooperater	1	US\$949.20	wire	200	US\$2,970.00
			flare cutter	1	US\$47.60	site engineer	1	US\$949.20	glove	1000	US\$1.10
			electric welding machine	1	US\$37.60	diving supervisor	1	US\$949.20	nail	100000	US\$5.50
			HP water pump	1	US\$288.40	diving doctor	1	US\$952.70			
			8'submersible pump	1	US\$1,639.17	diver	20	US\$851.90			
			4' submersible pump	1	US\$299.60	salvage foreman	5	US\$709.80			
			drilling equipment	10	US\$10,000.00	welder	10	US\$568.40			
						mechanist	2	US\$568.40			
						electrician	2	US\$568.40			
Cost		US\$1,906,480.80	Cost		US\$6,831,454.20	Cost		US\$2,240,475.60	Cost		US\$69,458,400.00

4단계 : 인양 및 적재 (Lifting and loading)

craft			equipment			Personnel			Materials		
name	Unit	cost	name	Unit	cost	name	Unit	cost	name	Unit	cost
Floating crane	2	US\$50,000.00	generator(300kw)	1	US\$189.00	salvage master	1	US\$1,420.30	oxygen	19	US\$22.00
Tug boat	8	US\$13,760.60	air compressor	1	US\$363.60	project duty officer	1	US\$1,207.26	acetylene	19	US\$33.00
work boat	1	US\$251.16	flare cutter	1	US\$47.60	chief engineer	1	US\$1,184.40	glove	1000	US\$1.10
work barge	1	US\$3,500.00	electric welding machine	1	US\$37.60	HSE officer	1	US\$1,184.40	nail	100000	US\$5.50
Load ship	1	US\$12,000.00	HP water pump	1	US\$288.40	commercial cooperater	1	US\$949.20			
			8' submersible pump	1	US\$1,639.17	site engineer	1	US\$949.20			
			4' submersible pump	1	US\$299.60	salvage foreman	5	US\$709.80			
						welder	2	US\$568.40			
						mechanist	2	US\$568.40			
						electrician	2	US\$568.40			
Cost		US\$1,806,687.68	Cost		US\$22,919.76	Cost		US\$110,833.28	Cost		US\$4,417,160.00

6.6. Case 5 인양 비용 계산 결과

1단계 : 오염물질 제거 (Pollution off-loading)

craft			equipment			Personnel			Materials		
name	Unit	cost	name	Unit	cost	name	Unit	cost	name	Unit	cost
Tug boat	1	US\$13,760.60	generator(300kw)	1	US\$189.00	salvage master	1	US\$1,420.30	oxygen	19	US\$22.00
work boat	3	US\$251.16	decompression chamber	2	US\$472.50	project duty officer	1	US\$1,207.26	acetylene	19	US\$33.00
work barge	1	US\$3,500.00	mixed gas diving equipment	1	US\$10,000.00	chief engineer	1	US\$1,184.40	medical oxygen	19	US\$55.00
			air compressor	1	US\$363.60	HSE officer	1	US\$1,184.40	helium	19	US\$550.00
			underwater cutting machine	1	US\$47.60	commercial cooperator	1	US\$949.20	glove	1000	US\$1.10
			flare cutter	1	US\$47.60	site engineer	1	US\$949.20	nail	100000	US\$5.50
			electric welding machine	1	US\$37.60	diving supervisor	1	US\$949.20			
			HP water pump	1	US\$288.40	diving doctor	1	US\$952.70			
			8' submersible pump	1	US\$1,639.17	diver	10	US\$851.90			
			4' submersible pump	1	US\$299.60	salvage foreman	5	US\$709.80			
						welder	2	US\$568.40			
						mechanist	2	US\$568.40			
						electrician	2	US\$568.40			
Cost		US\$342,267.52	Cost		US\$263,293.83	Cost		US\$461,226.14	Cost		US\$10,709,160.00

3단계 : 인양 준비 (Lifting preparation)

craft			equipment			Personnel			Materials		
name	Unit	cost	name	Unit	cost	name	Unit	cost	name	Unit	cost
Tug boat	1	US\$13,760.60	generator(300kw)	2	US\$189.00	salvage master	1	US\$1,420.30	oxygen	100	US\$22.00
work boat	3	US\$251.16	decompression chamber	2	US\$472.50	project duty officer	1	US\$1,207.26	acetylene	100	US\$33.00
work barge	1	US\$3,500.00	mixed gas diving equipment	2	US\$10,000.00	chief engineer	1	US\$1,184.40	medical oxygen	19	US\$55.00
			air compressor	1	US\$363.60	HSE officer	1	US\$1,184.40	helium	19	US\$550.00
			underwater cutting machine	4	US\$47.60	commercial cooperater	1	US\$949.20	wire	200	US\$2,970.00
			flare cutter	1	US\$47.60	site engineer	1	US\$949.20	glove	1000	US\$1.10
			electric welding machine	1	US\$37.60	diving supervisor	1	US\$949.20	nail	100000	US\$5.50
			HP water pump	1	US\$288.40	diving doctor	1	US\$952.70	steel plate	500	US\$1,100.00
			8'submersible pump	1	US\$1,639.17	diver	20	US\$851.90	welding rod	1000	US\$1.32
			4' submersible pump	1	US\$299.60	salvage foreman	5	US\$709.80	steel beam	10	US\$10,000.00
					welder	10	US\$568.40				
					mechanist	2	US\$568.40				
					electrician	2	US\$568.40				
Cost		US\$1,441,126.40	Cost		US\$1,935,149.60	Cost		US\$2,987,300.80	Cost		US\$145,073,200.00

4단계 : 인양 및 적재 (Lifting and loading)

craft			equipment			Personnel			Materials		
name	Unit	cost	name	Unit	cost	name	Unit	cost	name	Unit	cost
Jack-up barge	2	US\$12,000.00	generator(300kw)	1	US\$189.00	salvage master	1	US\$1,420.30	oxygen	19	US\$22.00
Tug boat	2	US\$13,760.60	air compressor	1	US\$363.60	project duty officer	1	US\$1,207.26	acetylene	19	US\$33.00
work boat	1	US\$251.16	flare cutter	1	US\$47.60	chief engineer	1	US\$1,184.40	glove	1000	US\$1.10
work barge	1	US\$3,500.00	electric welding machine	1	US\$37.60	HSE officer	1	US\$1,184.40	nail	100000	US\$5.50
Submersible barge	1	US\$50,000.00	HP water pump	1	US\$288.40	commercial cooperater	1	US\$949.20			
			8'submersible pump	1	US\$1,639.17	site engineer	1	US\$949.20			
			4' submersible pump	1	US\$299.60	salvage foreman	5	US\$709.80			
						welder	2	US\$568.40			
						mechanist	2	US\$568.40			
						electrician	2	US\$568.40			
Cost		US\$842,178.88	Cost		US\$22,919.76	Cost		US\$110,833.28	Cost		US\$4,417,160.00

Abstract

Design of Wreck Removal Considering Safety and Economy

The most important thing when planning a salvage is choosing a proper lifting method. An appropriate method of lifting is considering safety and economy. In this study, we proposed the evaluation and verification method considering safety and economy. Simulation based on multi-body dynamics is used for assessing the safety of the lifting method. In particular, we implemented a module to calculate the contact and friction force of the wire when lifting the ship, so we can simulate the wire wrapping method. In addition, the dynamic lifting force is calculated by considering various external influences.

Next, we propose a method of estimating the salvage cost and economic evaluation is obtained by comparing the results of various lifting methods. To estimate the cost of lifting the ship, the salvage operation is divided into four stages and the required time is calculated. For calculating the cost of lifting, lifting materials are divided into equipment, craft, personnel, and material. In this study, we tried to estimate the time and cost of salvage quantitatively using expert consultation results and calculations. Finally, the safety assessment and economic evaluation method proposed in this study are applied to various lifting methods.

Keywords: Wreck removal, Multibody system dynamics, Safety assessment, Cost estimation

Student number: 2017-28669