

# 침몰된 선박의 안전 인양에 관한 연구

신 맹 기\* · 최경식\*\*

## Study on Safe Lifting of a Sunken Ship

### ABSTRACT

In this study a simple engineering approach to the sunken ship salvage is made. The method takes into account the relation of lifting forces acting in wire rope slings to the inclination of the vessel including the effect of lug positions of which the application to salvage is relatively new. An introduction to the general salvage is made and the several salvage techniques are categorized. The importance of the sunken ship salvage is explained from the statistics of ship casualties during last 15 years. Euler angles are introduced to represent the inclination of a sunken ship in developing the static force and moment equations. Two dimensional and three dimensional examples with one redundant degree of freedom for a GT1500 oil tanker are analyzed and the results show that the information obtained by the method could be useful to salvors to conduct salvage work.

### 1. 서 론

각종 해난사고의 피해를 줄이기 위한 신속한 사후대책과 제반의 처리과정 일체를 구난(salvage)이라 한다. 구난은 현장확인, 인명구조, 사고유형에 따른 세부조사, 계획 수립과 시행 모두를 의미하지만, 일반적으로는 선박과 화물을 해난사고로부터 구해내는 것을 말한다. 그러나, 국내외를 막론하고 학계나 업계의 관심은 구난분야에 공학적, 기술적 혜택을 제대로 부여하지 못해왔다.

따라서, 구난분야에 대한 실제적이고도 효과적인 구난방법의 제안을 위하여 본 논문

---

\* 한국해양대학교 대학원

\*\* 한국해양대학교

문에서는 먼저, 기존의 구난에 관한 문헌들을 종합하고 구난의 개념을 정립하였으며, 일반적인 구난절차의 소개와 대표적인 사고유형에 따른 기존의 구난방법을 정리하였다. 다음으로, 국내의 해난사고와 관련된 자료들을 조사 분석하여 가장 우선적으로 이루어져야 될 구난의 형태를 결정하였다. 셋째로, 결정된 구난형태에 따라 전형적인 시나리오를 선정하였는데, 여러 가지 구난의 대상 중 국내 해난사고의 주종을 이루는 침몰선 인양(lifting)문제에 주목하였고, 기존의 인양방법과는 달리 선박건조시 중량물 인양에 널리 사용되는 러그(eye lug)를 이용한 기계적 인양을 시도해 신속한 구난절차 수립을 보조하는 간략한 계산법을 제안하였다. 그리고, 본 연구방법을 적용하는 사례로서 1500톤급 침몰 유조선의 인양문제를 다루었다.

## 2. 구난의 개념

일반적으로 구난의 대상이라 하면 선박과 그 선박에 적재된 화물을 생각하게 되지만, 최근에는 비행기, 핵폭탄, 핵추진잠수함, 우주왕복선에 이르는 각종 새로운 대상들이 점차 구난의 영역으로 들어오고 있는 추세이다.

구난의 범위는 구난을 수행하는 사람들의 목적에 따라서 달라진다. 상업적인 구난(commercial salvage)은 선박과 화물만을 대상으로 간주하지만 해군과 같은 공공기관에서는 공공적인 이익 혹은 국가의 정치, 외교적인 필요에 의해 구난의 범위를 정하기 때문에 해상에서 유실된 대상의 위치 획득이나 항로상에 놓여있는 침몰선 같은 각종 장애물의 제거 등도 구난에 포함된다.

MISSION SAN FRANCISCO, OCEAN EAGLE, TORREY CANYON, PACIFIC GLORY, AMICO CADIZ, EXXON VALDEZ 등의 선박사고는 환경문제를 구난의 원칙에 포함시키게 된 계기가 되었다. 그러나, 아직은 현대적인 공학기술을 활용하는 기술 진전은 이루어지지 않아 2차세계대전 전후의 노동집약적이고 짐작에 의존하는 부정확한 방법들에 의한 구난이 행해지고 있다.

구난이란 다음의 세 가지 목적을 달성하기 위해 해양과 연안에서 행해지는 모든 공학적이고 기술적인 일련의 활동이라고 정의할 수 있다.

- 첫째, 해양에서 일차적 혹은 이차적으로 발생한 재난으로부터 재화 손실의 최소화,
- 둘째, 환경 파괴의 최소화,
- 셋째, 사고의 원인을 분석하기 위한 자료의 획득.

## 2.1 구난의 절차

구난의 절차(salvage procedure)는 일반적으로 다음과 같다.

- ① 대상의 위치 확인(acquiring the location of the object lost in the sea)
- ② 건전상태의 정보 수집(collecting information about the intact object)
- ③ 대상의 안정화 작업(stabilizing the vessel)
- ④ 대상과 환경의 피해상황 분석(identifying and quantifying risk to and by the object and the environment)
- ⑤ 적합한 구난활동 선택(selecting appropriate salvage actions)
- ⑥ 필요한 장비의 이용기간 결정(selecting an appropriate commercial instrument or contract terms)
- ⑦ 적절한 인력과 도구의 확보(matching resources: people and equipment)
- ⑧ 구난작업의 수행(carrying out the salvage actions)
- ⑨ 구난에 성공한 대상의 인도(delivering the salvaged object)
- ⑩ 해산(demobilizing)

## 2.2 초동조치와 조사활동

초동조치는 인명구조와 안정화 작업으로 이루어진다. 인명구조는 해난사고가 접수되는 즉시 최우선적으로 선행되어야 할 조치이다. 그리고, 안정화 작업은 대개 좌초사고의 경우에 강조되며, 좌초사고의 경우는 급격한 해양환경의 변화 때문에 시간적으로 매우 긴급을 요하는 조치이다.

조사활동은 선박과 환경의 피해정도를 조사하고 구난활동에 영향을 주는 물리적 조건을 파악하여 사고의 확장을 방지하기 위한 조치이다. 보통 해수면을 기준으로 수면조사(topside survey)와 수중조사(underwater survey)로, 그리고 수중조사는 다시 선체를 기준으로 외부조사(external survey)와 내부조사(internal survey)로 나누어진다.

## 2.3 구난의 일반적인 방법

### 2.3.1 좌초 구난

양은 곤여 좌초된 경우에는 서바이 호스를 주는 바번과 서바이 호스에 맞는 수

## 2.1 구난의 절차

구난의 절차(salvage procedure)는 일반적으로 다음과 같다.

- ① 대상의 위치 확인(acquiring the location of the object lost in the sea)
- ② 건전상태의 정보 수집(collecting information about the intact object)
- ③ 대상의 안정화 작업(stabilizing the vessel)
- ④ 대상과 환경의 피해상황 분석(Identifying and quantifying risk to and by the object and the environment)
- ⑤ 적합한 구난활동 선택(selecting appropriate salvage actions)
- ⑥ 필요한 장비의 이용기간 결정(selecting an appropriate commercial instrument or contract terms)
- ⑦ 적절한 인력과 도구의 확보(matching resources; people and equipment)
- ⑧ 구난작업의 수행(carrying out the salvage actions)
- ⑨ 구난에 성공한 대상의 인도(delivering the salvaged object)
- ⑩ 해산(demobilizing)

## 2.2 초동조치와 조사활동

초동조치는 인명구조와 안정화 작업으로 이루어진다. 인명구조는 해난사고가 접수되는 즉시 최우선적으로 선행되어야 할 조치이다. 그리고, 안정화 작업은 대개 좌초사고의 경우에 강조되며, 좌초사고의 경우는 급격한 해양환경의 변화 때문에 시간적으로 매우 긴급을 요하는 조치이다.

조사활동은 선박과 환경의 피해정도를 조사하고 구난활동에 영향을 주는 물리적 조건을 파악하여 사고의 확산을 방지하기 위한 조치이다. 보통 해수면을 기준으로 수면조사(topside survey)와 수중조사(underwater survey)로, 그리고 수중조사는 다시 선체를 기준으로 외부조사(external survey)와 내부조사(internal survey)로 나누어진다.

## 2.3 구난의 일반적인 방법

### 2.3.1 좌초 구난

얕은 곳에 좌초된 경우에는 선박의 흘수를 줄이는 방법과 선박의 흘수에 맞는 수심을 만드는 방법이 있는데, 첫째 방법은 사고 전의 흘수와 사고 후의 흘수를 조사하여 필요한 중량만큼 유류이적, 발라스트용 해수의 배수, 화물의 이동 및 이적을 통하여 달성할 수 있다. 둘째 방법은 선박 주위의 해저를 준설하거나 수심이 깊은 쪽으로 선

박을 진수시키는 것이다.

선저면이 전체적으로 좌초되지 않고 부분적으로 좌초된 경우는 호깅(hogging)이나 새깅(sagging)상태를 만나게 되므로 본격적인 구난작업에 앞서 선박의 중량을 단순히 줄이는 것이 아니고 이러한 상태에 반대되는 방향의 모멘트가 발생하도록 화물의 이적을 적절히 수행하는 것이 필요하다. 그리고, 구난작업시에 선체중앙부 좌초는 상당히 치명적이므로 침탑효과(broaching)가 발생하지 않도록 신속한 구난활동이 필요하고 선수부 좌초는 선수부를 가볍게 하고 선미부를 무겁게 하여 트림에 변화를 주는 것이 효과적이다.

이외에도 앵커와 앵커 체인을 풀어줌으로써 선체를 가볍게 하고, 만조를 기다리고 잭(jack)을 이용하여 해저와의 마찰을 최대한 줄이면서 예인선이나 윈치 등을 이용하고, 다른 선박으로 인공파도를 일으켜서 사고선박의 균형을 순간적으로 깨뜨려 좌초된 선박이 움직이기 쉽도록 돕는 등의 종합적인 방법을 사용하는 것이 좋다.

### 2.3.2 침몰 구난

주갑판이 잠기기 않을 정도로 얇은 물에 침몰한 대부분의 선박들은 펌프를 사용하여 쉽게 부양(refloating)시킬 수 있다.

주갑판이 잠길 정도로 침몰한 선박에는 물막이(cofferdam) 공법이 이용되기도 한다. 전체 물막이(complete cofferdam)는 여객선이나 상갑판 이상의 구조물이 큰 선박에 사용되고 너울(swell)에 의해 안정성에 영향을 받기 쉽다. 부분 물막이(partial cofferdam)는 일반적으로 화물선에 사용되고 창구와 창구테두리(hatch coaming) 그리고 기관실 채광창에 설치된다.

구난을 목적으로 압축공기를 사용하는 데는 상당한 제한이 따른다. 왜냐하면, 압축공기가 새지 않을 정도의 완벽한 선각의 수리와 패치를 설치하는 작업은 필요한 사전 작업량과 비용이 많이 들기 때문이다. 그리고, 갑판은 압축공기의 상향력을 지탱할 만큼 강하지 않으므로 갑판의 붕괴를 막기 위해서는 지주를 설치하여야 한다.

펌프, 물막이, 압축공기를 사용하는 방법들은 모두 선박의 부력을 확보하는 데 관심을 기울이는 반면, 폰툰(pontoon)이나 에어백(air bag), 그리고 해상크레인을 이용한 기계적인 인양은 선체의 일부분에 집중된 일련의 상향력을 발생시키는 방법들이다.

선박의 중량에 맞는 로프의 개수를 결정할 때는 외판두께를 고려하여야 하고 로프를 선체 밑으로 설치하기 위해서는 두 척의 예인선이나 구난선에 로프의 양끝을 고정시켜 한 번씩 시소 타듯이 잡아끄는 방법이 보통 사용된다. 수심이 깊어서 이러한 방법이 불가능할 때는 잠수사를 동원하여 직접 로프를 걸 위치에 터널을 만든다.

전복된 선박의 구난은 대체로 선체를 올바로 들린 후 부양하는 순서로 행해진다. 선체를 바로잡는 작업은 인장용 도르래장비(purchase gear)나 해수를 이용해 모멘트를 발생시켜 이루어진다.

## 2.4 국내 해난사고 통계

본 절에서는 해경의 해난사고 통계자료로부터 연도별, 선종별, 톤수별, 유형별 사고 발생과 재산피해 정도를 차트를 통해 살펴보았다.

Fig. 2.9는 1979년부터 1997년까지의 인명과 선박의 사고발생을 정리한 것인데, 인명사고는 꾸준한 감소추세를 보이고 있으나 선박사고는 여전히 연간 500여 척에 달한다. 이것은 상대적으로 승선인원이 많은 선박의 사고는 줄어들고 있지만 승선인원이 적은 선박사고는 늘어나고 있음을 암시한다.

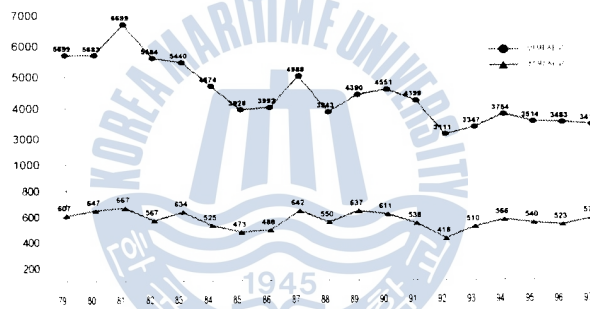


Fig. 2.9 Yearly occurrence of the sea perils.

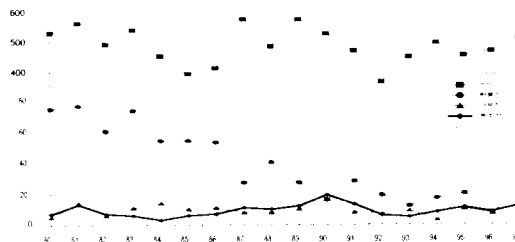


Fig. 2.10 Yearly occurrence of the sea perils categorized by vessel type.

해경에서 분류하는 선종은 어선, 화물선, 여객선, 유조선, 관공선, 기타의 5가지이다. 이들 중 어선이 선종별 해난사고의 절대적인 다수를 차지하고 있는데, 어선사고는 다른 선종의 10배가 넘어 한 해 발생하는 해난사고의 대부분을 차지한다. 그런데, 어선사

고의 경우, 상대적으로 다른 선종에 비해 소형이 많고 포획한 어류가 곧 화물이므로 연료에 의한 환경오염만 생각하면 영향이 적다. 그러나, 유조선 한 척의 사고로도 한 해 어선사고로 유출된 연료 전부를 합한 것보다 더 많은 양의 유류가 해양으로 흘러들어갈 수 있다. 그리고, 해난사고 대응하는 국제적인 추세가 인명보호에서 환경보호 쪽으로 변화되어져가고 있는 시점에서 인명사고의 예방, 구조와 함께 대형 환경오염을 발생시킬 수 있는 화물선, 여객선, 그리고 유조선 사고에 대한 대응에 관심이 모아지고 있다.

톤수별 해난사고는 Fig. 2.11로부터 80년대 초반에서 90년대 중반까지 각 톤수별로 눈에 띄는 별다른 변동폭이 없이 일정 수준을 유지하고 있고 척수에서 500톤을 기준으로 두 개의 그룹으로 나뉘어져 있다. 피해발생 척수가 많은 쪽을 차지하고 있는 그룹은 20-100톤, 5톤 미만, 5-20톤, 100-500톤의 선박들로 구성되어 있고 특히 가장 많은 20-100톤 선박은 주로 안강망, 채낚기, 유자망 등의 어선이다. 그리고, 사고 척수에 있어서 500톤 이상의 선박 그룹 세 개중 어느 쪽도 연간 20척을 넘지 않고 있다.

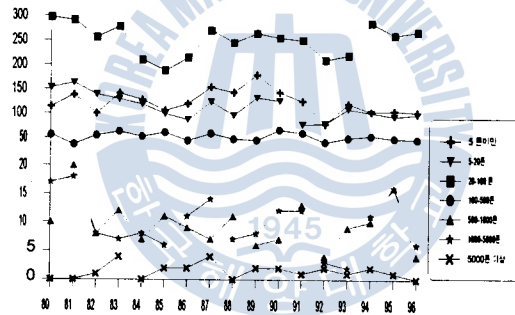


Fig. 2.11 Yearly occurrence of the sea perils categorized by tonnage.

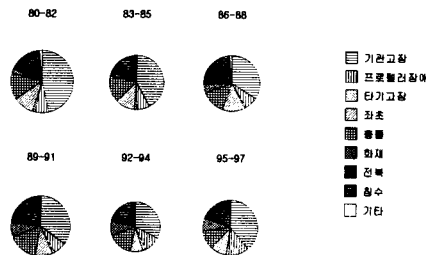


Fig. 2.12 Yearly occurrence of the sea perils categorized by the sea peril type.

기관고장, 프로펠러장애, 타기고장, 좌초, 충돌, 화재, 전복, 침수, 기타의 9가지로 구분되는 유형별 해난사고에 대한 1980년부터 1997년까지 3년씩 평균하여 파이 차트로

나타낸 Fig. 2.12를 보면 기관고장은 가장 많은 비율을 차지하고 있으나 점차 감소하는 추세를 보이고 있고 전복은 80년대 후반에 약간 증가했다가 다시 감소하고 있고 타기 고장과 기타에 의한 피해는 상대적으로 미미하며 화재와 프로펠러장애는 약간 증가하는 경향이고 나머지 좌초, 충돌, 침수는 뚜렷한 변화를 보이지 않고 있다. 그런데, 기관 고장과 프로펠러장애의 경우는 선박의 부력이 그대로 유지되는 사고이므로 거의 다 구난에 성공하고 있고 미미한 타기 고장과 기타의 경우를 제외하면 좌초, 충돌, 화재, 전복, 침수의 5가지 해난사고의 유형이 실질적으로 예방 및 사후 조치 노력이 요구되는 대표적인 유형들이라 하겠다. 이러한 좌초, 충돌, 화재, 전복, 침수에 의한 침몰사고 대부분이 선체 정비불량, 운항부주의, 기상악화 사전대피 불이행, 화재 등에 의한 급박한 사고에 기인한 것들이다. 그리고, 그 중 가장 많은 다수를 차지하는 유형은 침수와 충돌에 의한 침몰인데, 그 예로 1996년 한 해의 침수와 충돌침몰은 전체 구난불가의 64.8%를 차지한다. 한편, 전복침몰은 선박손실로는 침수와 충돌 다음이지만 인명손실로는 이들 사고의 인원수를 넘어선다.

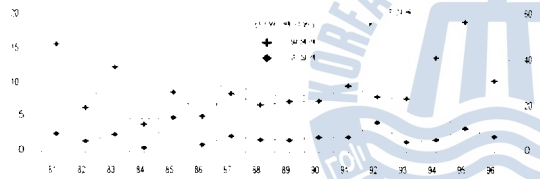


Fig. 2.13 Yearly property loss by the sea perils.

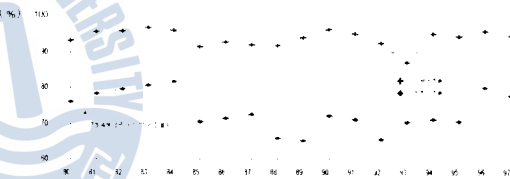


Fig. 2.14 Rescue rate of the sea perils.

1981년부터 1996년까지 해난사고에 의한 재산피해는 총 발생액 약 1조5천억원, 총 손실액 3천7백50억원이므로 연평균 약 25%의 손실이 발생했음을 알 수 있는데, Fig. 2.13을 참고하면 손실률이 20%를 조금 웃돌고 있음을 확인할 수 있다. 이는 대략 한 해당 2백억원의 재산손실이 선박해난사고로 발생하고 있음을 말해준다. 그러나, 여기에는 환경오염의 효과는 포함되어 있지 않으므로 선박에서 유류가 흘러나와 양식장을 황폐화 시켜 어민보상이 필요하다든지 하는 2차적인 피해는 고려되지 않았다. 그리고, 어민에 대한 보상 같은 실제적인 재화의 지출이 이루어지지 않았다고 해도 환경오염으로 인한 생태계의 파괴는 다시 인간에게 그것도 사고를 일으킨 사람에게가 아니라 불특정다수에게 돌아온다. 그러므로, 이러한 피해는 화폐로 환산할 수가 없는 것이다.

해난사고의 발생과 구조는 Fig. 2.14에 나타나 있는데 인명구조율은 1993년의 87.1%를 제외하면 항상 90% 이상을 유지해왔다. 그러나, 선박의 평균 구조율은 73.4%로 대략 사고발생의 1/4에 해당하는 선박이 구조불가로 처리됨을 알 수 있다. 1996년



을 예를 들어 구난불가 중 가장 많은 비율을 차지하는 침수침몰과 충돌침몰의 척수를 비교해보면 발생 124척, 침몰 68척으로 구조율이 50%에 못 미치고 있고 구조율이 가장 저조했던 1989년과 1992년의 경우도 각각 43.6%와 40.3%로 침수와 충돌사고를 당하는 선박의 반 이상이 구난불가로 이어짐을 알 수 있다.

### 3. 침몰선박의 인양

침몰 구난의 방법은 크게 선박의 부력을 확보하는 부양법과 선체에 상향력을 가하는 인양법 2가지로 대별되고 이에 따라 각종 공법이 사용된다. 그런데, 수심이 조금만 깊어도, 예를 들어, 선체 깊이의 2배 이상의 수심이면 부양법은 사용하기 거의 불가능하고, 인양법이라 할지라도 부력체를 이용하는 방법은 소형선박에 제한적으로 적용가능하며 크레인을 이용하는 방법은 슬링을 선저면에 통과시킬 수 있는가에 따라 결정된다. 더구나 이런 수심에서 전복까지 동반된 침몰의 경우라면 거의 구난불가에 해당된다. 기존의 전복사고를 처리하는 방법은 선체의 일부가 수면 밖으로 드러난 침몰의 경우에만 가능하기 때문이다.

본 장에서는 이러한 기존의 공법의 제한을 극복하고자 일반적으로 선박건조시 블록공법을 사용하면서 널리 사용되고 있는 러그(eye lug)를 이용한 기계적 인양을 시도해 신속한 구난절차 수립을 보조하는 간략한 계산법을 제안하였다.

#### 3.1 침몰선 인양문제의 이해

일반적인 인양작업에서 가장 중요한 문제는 무게중심과 크레인의 리깅 후크(rigging hook)와의 위치관계이다. 리깅 후크의 위치는 언제나 무게중심의 연직선상에 있어야 하고 이러한 조건이 만족되면 리깅은 얼마든지 기하학적인 대칭을 이용하여 중량물의 하중을 각각의 로프에 분배해 줄 수 있는 매우 간단한 문제가 된다. 그러나, 들어 올려야 할 중량물이 선박처럼 큰 규모를 가진 대상이라면 이야기가 달라진다. 일단, 그 만큼의 하중을 들어올릴 수 있는 용량을 가진 크레인의 확보가 쉽지 않을뿐더러 기하학적으로도 슬링과 중량물이 이루는 적절한 수평각(horizontal angle)을 유지할 수도 없게 된다. 수평각이 너무 작게 되면 슬링에는 과도한 인장력이 걸리게 되고 중량물도 손상을 입게 되기 때문이다. 그리고, 적절한 수평각을 얻을 수 없을 때 사용하는 버팀보(spreader beam)도 규모가 큰 중량물에 적용하는 데는 제한이 따를 수밖에 없다. 따라서, 다중 후크를 이용한 리깅 즉, 여러 대의 크레인으로 중량물을 들어올리는 방법을 사용할 수밖에 없는데 이때, 크레인의 인장력을 결정하는데 정역학으로 풀 수 없는 부

정 혹은 부정정 문제가 발생하게 된다.

부정정 문제의 해결은 일반적으로 정역학적 평형방정식과 더불어 구성방정식, 그리고 적합조건을 알아야 가능하고 보(beam)와 같은 간단한 구조물이라도 부정의 문제를 다루기 위해서는 단면의 특성치(section property)를 알아야만 미지반력을 결정할 수 있다. 그런데, 선박처럼 복잡한 구조물의 경우라면 유한요소법과 같은 방법이 아니고는 상세한 해석을 한다는 것이 불가능하다.

선박구난의 인양문제에 유한요소법을 사용한다면 확실히 정확한 상황을 구현할 수 있을 것이고 실제의 구난의 과정을 통제하기에 상당히 수월한 면이 있을 것이다. 그러나, 항로나 항구에 장애물로 작용할 뿐만 아니라 오염을 지속적으로 발생시키는 침몰선을 이러한 모든 유한요소해석이 종료될 때까지 현장에 그대로 방치해야 한다면 시간적인 측면에서 효과적인 구난을 기대하기는 힘들 것이다. 즉, 신속한 구난이 이루어질 수 없게 될 것이다.

그리고, 선박의 규모, 현장 환경, 구난장비의 운영특성 등이 반영되어야 할 뿐 아니라 예기치 못한 상황변화에 유연하게 대처할 수 있어야만 하는 구난작업의 특성상, 인양작업이 진행되는 과정의 철저한 통제와 제어가 필요하게 된다. 그러나, 이러한 일련의 변수들을 예측하여 유한요소법과 같은 방법으로 쉽사리 재현할 수 있을 만큼 충분한 조사 및 연구가 이루어지지 못하고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해, 구성방정식과 적합조건 없이 정역학적인 방법만으로 1자유도의 잉여미지력을 가지는 부정정방정식을 구성하였고 인장력과 중량물의 경사, 그리고 인장력을 가할 위치를 고려하였다. 하나의 잉여 인장력을 크레인 기사의 입장에서 능동적으로 제어하게 되면 이 미지력은 외력으로 간주할 수 있게되고 결국은 외력이 변하는 정정 문제로 취급이 가능해진다.

## 3.2 크레인 인장력의 결정

### 3.2.1 평형방정식의 구성

경사효과는 회전에 의해서 하중의 상대적인 위치가 달라지기 때문에 높이를 무시할 수 없는 중량물을 다룰 때 두드러지게 나타난다. 여러 대의 크레인을 이용하여 하나의 중량물을 들어올리게 되면 환경하중의 영향을 무시하더라도 반드시 이들 크레인의 조작과 관련하여 균형(balance)문제가 발생하게 되고 중량물은 수평 상태를 유지하지 않으려고 한다. 이러한 상황을 묘사하기 위해서 물체의 회전에 관한 오일러 각(Euler angles)을 도입한다.

일반적으로 3차원 직각 좌표(cartesian coordinates)에서 좌표계의 회전은 다음 관계

식으로 표현할 수 있다.

$$x_i' = \alpha_{ij} x_j \quad (1)$$

그런데,

$$\alpha_{ij} \alpha_{ik} = \delta_{jk} \quad (2)$$

이기 때문에, (1)식의  $\alpha_{ij}$ 는 9개의 방향여현(direction cosine)으로 구성되어있지만 (2)식에 의해 6개의 제약조건이 주어지므로 실제로는 이들 방향여현들 중 3개만 독립적이다.

회전각을  $x$ -,  $y$ -,  $z$ -좌표축에 관한 회전행렬의 곱으로 표현하면 다음과 같다.

$$R = R_x(\psi) R_y(\theta) R_z(\phi) \quad (3)$$

여기서

$$R_x(\psi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & -\sin \psi \\ 0 & \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix}, \quad R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad R_z(\phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

축을 회전시키지 않고 대상물체(object)를 회전시키는 효과는 축을 회전시키는 방향과 반대방향의 회전각으로 표현 가능하기 때문에  $\psi$ ,  $\theta$ ,  $\phi$ 에 대하여 각각  $-\psi$ ,  $-\theta$ ,  $-\phi$ 와 같이 음의 부호를 고려하면 (4)식에서  $\sin(\psi, \theta, \phi)$ 에 대해서만  $-\sin(\psi, \theta, \phi)$ 로 대체시켜 고정된 좌표계에서의 대상물체의 기울어짐을 묘사할 수 있다.

힘과 모멘트의 평형을 생각하면 다음의 평형방정식이 성립한다.

$$\sum \vec{F} = \vec{0}, \quad \sum \vec{M} = \vec{0} \quad (5)$$

그런데, 중량물에 가해질 인장력 및 인장력의 위치벡터를  $\vec{T}_\alpha$ <sup>2)</sup>,  $\vec{r}_\alpha$ , 전체중량 및 그 위치벡터를  $\vec{W}$ ,  $\vec{r}_c$ 라 하면 (5)식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{W} + \sum \vec{T}_\alpha = \vec{0}, \quad \vec{r}_c \times \vec{W} + \sum \vec{r}_\alpha \times \vec{T}_\alpha = \vec{0} \quad (6)$$

여기서

$$\vec{W} = -W\hat{j}, \quad \vec{T}_\alpha = T_\alpha\hat{j}, \quad \vec{r}_c = x_c\hat{i} + y_c\hat{j} + z_c\hat{k}, \quad \vec{r}_\alpha = x_\alpha\hat{i} + y_\alpha\hat{j} + z_\alpha\hat{k} \quad (7)$$

또한, 일정각을 회전한 중량물의 평형을 고려하려면 (6)식에서 인장력을 가할 위치와 무게중심의 위치를 각각  $\vec{r}_c$ 와  $\vec{r}_\alpha$  대신에  $\vec{r}_c'$ 과  $\vec{r}_\alpha'$ 으로 대체하면 되고 이 때 이러한 회전변환은 오일러 각을 이용하면 다음과 같다.

$$\vec{r}_\alpha' = R \vec{r}_\alpha, \quad \vec{r}_c' = R \vec{r}_c \quad (8)$$

2)  $\alpha$ 는 중량물에 가해지는 각각의 인장력과 인장력의 위치를 구분하기 위해 사용된 아래첨자이다.

여기서

$$\mathbf{r}'_a = \begin{Bmatrix} x'_a \\ y'_a \\ z'_a \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{r}_a = \begin{Bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{r}'_c = \begin{Bmatrix} x'_c \\ y'_c \\ z'_c \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{r}_c = \begin{Bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{Bmatrix}, \quad (9)$$

### 3.2.2 평형방정식의 해

#### (a) 2차원 평형방정식의 해

Fig. 3.2는 2차원 문제를 풀기 위한 모델이다. 여기서,  $T_a$ 는 크레인에 의한 인장력,  $(x_a, y_a)$ 는 러그의 결속 위치,  $W$ 와  $(x_c, y_c)$ 는 선박의 중량과 무게중심의 위치이다. 그리고,  $\phi$ 는  $z$ 축을 중심으로 직사각형을 회전시키는 각이다.

$T_1$ 과  $T_2$ 를  $T_3$ 에 관하여 풀 결과는 다음의 식 (10), (11)과 같다. 풀이와 검증을 위한 프로그램은 부록 A2.1에 실었다.

$$T_1 = -((T_3 x_3 - W x_c) \cos \phi - (T_3 y_3 - W y_c) \sin \phi - (T_3 - W)(x_2 \cos \phi - y_2 \sin \phi)) / ((x_1 - x_2) \cos \phi - (y_1 - y_2) \sin \phi) \quad (10)$$

$$T_2 = ((T_3 x_3 - W x_c) \cos \phi - (T_3 y_3 - W y_c) \sin \phi - (T_3 - W)(x_1 \cos \phi - y_1 \sin \phi)) / ((x_1 - x_2) \cos \phi - (y_1 - y_2) \sin \phi) \quad (11)$$

식 (12)와 (13)은 러그의  $y$  좌표  $y_a$ 가 모두  $D$  즉, 러그의 용접위치가 모두 상갑판이라고 가정하여 식 (10)과 (11)을 재정리한 식이다.

$$T_1 = (T_3(x_2 - x_3) + W(-x_2 + x_c) + W(D - y_c) \tan \phi) / (x_1 - x_2) \quad (12)$$

$$T_2 = (T_3(-x_1 - x_3) + W(x_1 + x_c) - W(D - y_c) \tan \phi) / (x_1 - x_2) \quad (13)$$

#### (b) 3차원 평형방정식의 해

Fig. 3.3은 3차원 문제를 풀기 위한 모델이다. 선박의 중량이 좌우대칭이 이루어지지 않았거나 침몰 후 이차적으로 전복이 발생한 경우에 해당한다. Fig. 3.2에서와 마찬가지로  $T_a$ 는 크레인에 의한 인장력,  $(x_a, y_a, z_a)$ 는 러그의 결속 위치,  $W$ 와  $(x_c, y_c, z_c)$ 는 선박의 중량과 무게중심의 위치이다. 그리고, 그림에는 나타내지 않았지만  $\phi, \theta, \phi$ 는 각각  $x, y, z$ 축을 중심으로 직육면체를 회전시키는 각으로 앞에서 오일러 각을 정의하는 방법과 동일하다.

$T_1, T_2, T_3$ 를  $T_4$ 에 관하여 풀 결과는 다음의 식 (14), (15), (16)과 같다. 풀이와 검증을 위한 프로그램은 부록 A2.2에 실었다.

식 (17), (18), (19)는 러그의  $y$  좌표가 모두  $d$ 인 경우에 식 (14), (15), (16)을 재정리한 식이다. 여기서,  $d$ 는 러그의 용접위치가 모두 상갑판이라고 가정한 경우와  $90^\circ$ 로 전복된 경우 선축이라고 가정한 경우 모두에 해당한다.

$$\begin{aligned}
T_1 = & -(- (T_4 x_4 \cos \theta \cos \phi - \\
& W x_c \cos \theta \cos \phi + T_4 z_4 \sin \theta - W z_c \sin \theta - T_4 y_4 \cos \theta \sin \phi + \\
& W y_c \cos \theta \sin \phi - (T_4 - W)(x_2 \cos \theta \cos \phi + z_2 \sin \theta - y_2 \cos \theta \sin \phi)) \\
& (z_2 \cos \theta \cos \phi - z_3 \cos \theta \cos \phi - x_2 \cos \phi \cos \psi \sin \theta + \\
& x_3 \cos \phi \cos \psi \sin \theta + y_2 \cos \psi \sin \theta \sin \phi - y_3 \cos \psi \sin \theta \sin \phi + \\
& y_2 \cos \phi \sin \psi - y_3 \cos \phi \sin \psi + x_2 \sin \phi \sin \psi - x_3 \sin \phi \sin \psi) + \\
& (-x_2 \cos \theta \cos \phi + x_3 \cos \theta \cos \phi - \\
& W x_c \cos \phi \cos \psi \sin \theta - T_4 y_4 \cos \psi \sin \theta \sin \phi + W y_c \cos \psi \sin \theta \sin \phi - \\
& z_2 \sin \theta + z_3 \sin \theta + y_2 \cos \theta \sin \phi - y_3 \cos \theta \sin \phi) \\
& (-T_4 z_4 \cos \theta \cos \phi + W z_c \cos \theta \cos \phi + T_4 x_4 \cos \phi \cos \psi \sin \theta - \\
& T_4 y_4 \cos \phi \sin \psi + W y_c \cos \phi \sin \psi - T_4 x_4 \sin \phi \sin \psi + \\
& W x_c \sin \phi \sin \psi - (T_4 - W)(-z_2 \cos \theta \cos \phi + x_2 \cos \phi \cos \psi \sin \theta - \\
& y_2 \cos \psi \sin \theta \sin \phi - z_2 \cos \phi \sin \psi - x_2 \sin \phi \sin \psi)) / \\
& ((-x_2 \cos \theta \cos \phi + x_3 \cos \theta \cos \phi - \\
& z_2 \sin \theta + z_3 \sin \theta + y_2 \cos \theta \sin \phi - y_3 \cos \theta \sin \phi) \\
& (-z_1 \cos \theta \cos \phi + z_2 \cos \theta \cos \phi + x_1 \cos \phi \cos \psi \sin \theta - \\
& x_2 \cos \phi \cos \psi \sin \theta - y_1 \cos \psi \sin \theta \sin \phi + y_2 \cos \psi \sin \theta \sin \phi - \\
& y_1 \cos \phi \sin \psi + y_2 \cos \phi \sin \psi - x_1 \sin \phi \sin \psi + x_2 \sin \phi \sin \psi) - \\
& (x_1 \cos \theta \cos \phi - x_2 \cos \theta \cos \phi + \\
& z_1 \sin \theta - z_2 \sin \theta - y_1 \cos \theta \sin \phi + y_2 \cos \theta \sin \phi) \\
& (z_2 \cos \theta \cos \phi - z_3 \cos \theta \cos \phi - x_2 \cos \phi \cos \psi \sin \theta + \\
& x_3 \cos \phi \cos \psi \sin \theta + y_2 \cos \psi \sin \theta \sin \phi - y_3 \cos \psi \sin \theta \sin \phi + \\
& y_2 \cos \phi \sin \psi - y_3 \cos \phi \sin \psi + x_2 \sin \phi \sin \psi - x_3 \sin \phi \sin \psi))
\end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned}
T_2 = & -(- (T_4 x_4 \cos \theta \cos \phi - \\
& W x_c \cos \theta \cos \phi + T_4 z_4 \sin \theta - W z_c \sin \theta - T_4 y_4 \cos \theta \sin \phi + \\
& W y_c \cos \theta \sin \phi - (T_4 - W)(x_1 \cos \theta \cos \phi + z_1 \sin \theta - y_1 \cos \theta \sin \phi)) \\
& (z_1 \cos \theta \cos \phi - z_3 \cos \theta \cos \phi - x_1 \cos \phi \cos \psi \sin \theta + \\
& x_3 \cos \phi \cos \psi \sin \theta + y_1 \cos \psi \sin \theta \sin \phi - y_3 \cos \psi \sin \theta \sin \phi + \\
& y_1 \cos \phi \sin \psi - y_3 \cos \phi \sin \psi + x_1 \sin \phi \sin \psi - x_3 \sin \phi \sin \psi) + \\
& (-x_1 \cos \theta \cos \phi + x_3 \cos \theta \cos \phi - \\
& z_1 \sin \theta + z_3 \sin \theta + y_1 \cos \theta \sin \phi - y_3 \cos \theta \sin \phi) \\
& (-T_4 z_4 \cos \theta \cos \phi + W z_c \cos \theta \cos \phi + T_4 x_4 \cos \phi \cos \psi \sin \theta - \\
& W x_c \cos \phi \cos \psi \sin \theta - T_4 y_4 \cos \psi \sin \theta \sin \phi + W y_c \cos \psi \sin \theta \sin \phi - \\
& T_4 y_4 \cos \phi \sin \psi + W y_c \cos \phi \sin \psi - T_4 x_4 \sin \phi \sin \psi + \\
& W x_c \sin \phi \sin \psi - (T_4 - W)(-z_1 \cos \theta \cos \phi + x_1 \cos \phi \cos \psi \sin \theta - \\
& y_1 \cos \psi \sin \theta \sin \phi - y_1 \cos \phi \sin \psi - x_1 \sin \phi \sin \psi)) / \\
& ((-x_1 \cos \theta \cos \phi + x_3 \cos \theta \cos \phi - \\
& z_1 \sin \theta + z_3 \sin \theta + y_1 \cos \theta \sin \phi - y_3 \cos \theta \sin \phi) \\
& (z_1 \cos \theta \cos \phi - z_2 \cos \theta \cos \phi - x_1 \cos \phi \cos \psi \sin \theta + \\
& x_2 \cos \phi \cos \psi \sin \theta + y_1 \cos \psi \sin \theta \sin \phi - y_2 \cos \psi \sin \theta \sin \phi + \\
& y_1 \cos \phi \sin \psi - y_2 \cos \phi \sin \psi + x_1 \sin \phi \sin \psi - x_2 \sin \phi \sin \psi) - \\
& (-x_1 \cos \theta \cos \phi + \\
& x_2 \cos \theta \cos \phi - z_1 \sin \theta + z_2 \sin \theta + y_1 \cos \theta \sin \phi - y_2 \cos \theta \sin \phi) \\
& (z_1 \cos \theta \cos \phi - z_3 \cos \theta \cos \phi - x_1 \cos \phi \cos \psi \sin \theta + \\
& x_3 \cos \phi \cos \psi \sin \theta + y_1 \cos \psi \sin \theta \sin \phi - y_3 \cos \psi \sin \theta \sin \phi + \\
& y_1 \cos \phi \sin \psi - y_3 \cos \phi \sin \psi + x_1 \sin \phi \sin \psi - x_3 \sin \phi \sin \psi))
\end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned}
 T_3 = & -(- (T_4 x_4 \cos \theta \cos \phi - \\
 & W x_c \cos \theta \cos \phi + T_4 z_1 \sin \theta - W z_c \sin \theta - T_4 y_4 \cos \theta \sin \phi + \\
 & W y_c \cos \theta \sin \phi - (T_4 - W)(x_1 \cos \theta \cos \phi + z_1 \sin \theta - y_1 \cos \theta \sin \phi)) \\
 & (z_1 \cos \theta \cos \phi - z_2 \cos \theta \cos \phi - x_1 \cos \phi \cos \psi \sin \theta + \\
 & x_2 \cos \phi \cos \psi \sin \theta + y_1 \cos \psi \sin \theta \sin \phi - y_2 \cos \psi \sin \theta \sin \phi + \\
 & y_1 \cos \phi \sin \psi - y_2 \cos \phi \sin \psi + x_1 \sin \phi \sin \psi - x_2 \sin \phi \sin \psi) + \\
 & (-x_1 \cos \theta \cos \phi + x_2 \cos \theta \cos \phi - \\
 & z_1 \sin \theta + z_2 \sin \theta + y_1 \cos \theta \sin \phi - y_2 \cos \theta \sin \phi) \\
 & (-T_4 z_4 \cos \theta \cos \phi + W z_c \cos \theta \cos \phi + T_4 x_4 \cos \phi \cos \psi \sin \theta - \\
 & W x_c \cos \phi \cos \psi \sin \theta - T_4 y_4 \cos \psi \sin \theta \sin \phi + W y_c \cos \psi \sin \theta \sin \phi - \\
 & T_4 y_4 \cos \phi \sin \psi + W y_c \cos \phi \sin \psi - T_4 x_4 \sin \phi \sin \psi + \\
 & W x_c \sin \phi \sin \psi - (T_4 - W)(-z_1 \cos \theta \cos \phi + x_1 \cos \phi \cos \psi \sin \theta - \\
 & z_1 \sin \theta + z_3 \sin \theta + y_1 \cos \theta \sin \phi - y_3 \cos \theta \sin \phi) \\
 & (y_1 \cos \psi \sin \theta \sin \phi - y_1 \cos \phi \sin \psi - x_1 \sin \phi \sin \psi)) / \\
 & (-(-x_1 \cos \theta \cos \phi + x_3 \cos \theta \cos \phi - \\
 & (z_1 \cos \theta \cos \phi - z_2 \cos \theta \cos \phi - x_1 \cos \phi \cos \psi \sin \theta + \\
 & x_2 \cos \phi \cos \psi \sin \theta + y_1 \cos \psi \sin \theta \sin \phi - y_2 \cos \psi \sin \theta \sin \phi + \\
 & y_1 \cos \phi \sin \psi - y_2 \cos \phi \sin \psi + x_1 \sin \phi \sin \psi - x_2 \sin \phi \sin \psi) + \\
 & (-x_1 \cos \theta \cos \phi + \\
 & x_2 \cos \theta \cos \phi - z_1 \sin \theta + z_2 \sin \theta + y_1 \cos \theta \sin \phi - y_2 \cos \theta \sin \phi) \\
 & (z_1 \cos \theta \cos \phi - z_3 \cos \theta \cos \phi - x_1 \cos \phi \cos \psi \sin \theta + \\
 & x_3 \cos \phi \cos \psi \sin \theta + y_1 \cos \psi \sin \theta \sin \phi - y_3 \cos \psi \sin \theta \sin \phi + \\
 & y_1 \cos \phi \sin \psi - y_3 \cos \phi \sin \psi + x_1 \sin \phi \sin \psi - x_3 \sin \phi \sin \psi))
 \end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned}
 T_1 = & (\cos \phi ((T_4(-x_1 + x_2) + W(-x_2 + x_c)) \cos \phi + W(d - y_c) \\
 & \sin \phi) + \sin \theta (W(d - y_c) \cos \phi + (T_4(x_1 - x_2) + W(x_2 - x_c)) \\
 & \sin \phi) \sin \phi) / ((x_1 - x_2)(\cos \phi \cos \psi - \sin \theta \sin \phi \sin \psi))
 \end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned}
 T_2 = & (\cos \phi ((T_4(x_1 - x_2)(z_1 - z_3) + \\
 & W(-x_c z_1 - x_1 z_3 + x_c z_3 + x_2(z_1 - z_c) + x_1 z_c)) \\
 & \cos \phi - W(d - y_c)(z_1 - z_3) \sin \phi) + \\
 & (-W(d - y_c)((x_1 - x_2) \cos \theta + (z_1 - z_3) \cos \phi \sin \theta) - \\
 & (T_4(x_1 - x_2)(z_1 - z_3) + \\
 & W(-x_c z_1 - x_1 z_3 + x_c z_3 + x_2(z_1 - z_c) + x_1 z_c)) \sin \theta \sin \phi) \\
 & \sin \phi) / ((x_1 - x_2)(z_1 - z_3)(\cos \phi \cos \psi - \sin \theta \sin \phi \sin \psi))
 \end{aligned} \tag{18}$$

$$\begin{aligned}
 T_3 = & (T_4(-z_1 + z_3) + W(z_1 - z_c) + \\
 & (W(-d + y_c) \cos \theta \sin \phi) / (-\cos \phi \cos \psi + \sin \theta \sin \phi \sin \psi)) / \\
 & (z_1 - z_3)
 \end{aligned} \tag{19}$$

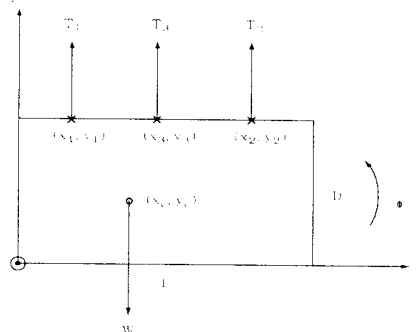


Fig. 3.2 Model for two dimensional one redundancy problem.

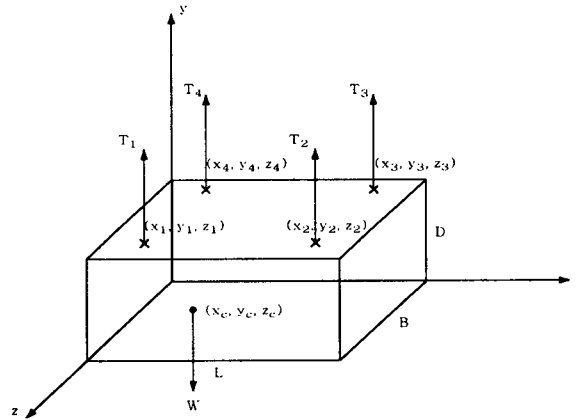


Fig. 3.3 Model for three dimensional one redundancy problem.

## 4. 해석 사례

선박의 인양작업이 이루어지기 전에 선박의 어느 지점에 인장력을 가할 것인가를 결정하고, 인양중인 침몰선에 발생하는 경사와 인장력 사이의 관계를 고려하여 인장력을 얼마나 가할 것인가를 결정하는 것은 침몰선 인양에 있어 매우 중요한 문제이다. 이를 위한 예제로서 1500톤급 유조선에 대한 2차원과 3차원의 1잉여자유도 정역학 부정방정식을 풀어 그 해석결과를 살펴보기로 한다. 이러한 결과를 응용하면 크레인 기사는 선박의 경사와 선박에 가해지는 다른 크레인의 인장력을 알고 자신의 크레인이 얼마나 인장력을 가해야 할지를 결정할 수 있다.

### 4.1 2차원 해석 및 결과

2차원 문제에서는 총 길이 82.05 m, 수선간 길이 74 m, 폭 12 m, 깊이 6 m, 그리고 만재흘수 5.684 m이며 중앙중격벽을 가지고 좌우 각각 4개의 원유탱크(crude oil tank)가 배치되어있는 근해에서 사용되는 소형유조선에 대해서 좌우대칭이며 해저면에 올바르게(upright) 놓여있고 모든 구획이 완전히 침수된 경우를 가정하여 예제해석을 수행하였다. 여기서 완전침수란 선박 내부의 모든 공간을 해수가 채우고 있는 것으로 간주한 것이다. 그러나, 유류가 해수보다 가벼운 것을 고려해볼 때 유출될 위험만 확실히 배제할 수 있다면 오히려 중량 면에서는 선내에 잔존류가 있는 것이 유리하다. 다만, 상대적으로 유류와 해수가 선체 내부에 같이 공존하기 때문에 무게중심이 어느 정도

한 쪽으로 쏠리게 될 텐데, 이러한 영향이 안전 인양을 위한 적절한 인장력과 선박의 정사에 얼마나 영향을 줄 것인가 하는 문제는 논외로 했다.

선박이 박판구조물임을 생각할 때 선박자체의 강도상의 취약성 때문에 리그의 위치는 횡격벽의 위치를 벗어나지 못한다. 그러므로, 선박의 여지가 몇 가지 없고 각각의 경우를 해석해본 후에 가장 적절한 위치를 선정하면 된다. 여기서는  $T_3$ 의 위치를 Fig. 4.1에 보는 바와 같이 2가지 경우로 나누어 그 결과를 비교했다. 그리고, 선체가 경사를 가지게 되는 효과는  $-6^\circ$  에서  $+6^\circ$  까지  $3^\circ$  간격으로 5가지 경우에 대해 살펴보았다.

Fig. 4.2는 case 1에 대하여  $T_3$ 에 따른  $T_1$ 의 변화를  $z$ 축을 회전축으로 한 각변화  $\phi$ 에 따라 도시한 그래프이다.  $T_3$ 가 약 20톤 정도 증가하면  $T_1$ 은 10톤이 약간 못되는 정도로 감소하는 기울기가  $-0.5$ 보다 약간 큰 5개의 직선 군으로 이루어져 있는데, 선수부가 올라가고 선미부가 내려갈수록  $T_1$ 의 인장력은 작아진다. 그러나, 그 정도는 별로 심하지 않아서  $1^\circ$  당 1톤 정도에 그치는 미미한 크기이다.

Fig. 4.3은 case 1에 대하여  $T_3$ 에 따른  $T_2$ 의 변화를  $z$ 축을 회전축으로 각변화  $\phi$ 에 따라 도시한 그래프이다.  $T_3$ 가 약 20톤 정도 증가하면  $T_2$ 은 10톤을 약간 넘는 정도로 감소하는 기울기가  $-0.5$ 보다 약간 작은 5개의 직선 군으로 이루어져 있는데, Fig. 4.2와는 반대로 선수부가 올라가고 선미부가 내려갈수록  $T_2$ 의 인장력은 커진다. 그러나, 역시 그 정도는 별로 심하지 않아서  $1^\circ$  당 1톤 정도에 그치는 미미한 크기이다. 각변화에 따른 인장력의 영향은 반대로 인장력의 영향에 따른 각변화로 생각해볼 수 있는데, 기울어진 쪽이 인장력이 작게 걸린다고 할 수도 있고 인장력이 작은 쪽으로 선체가 기울어졌다고 할 수도 있다. 따라서, 기울어진 정도를 작게 하려면 기울어진 쪽의 인장력을 높이면 된다.

Case 2에 해당하는 Fig. 4.4와 Fig. 4.5도 Fig. 4.2와 Fig. 4.3의 경향과 다르지 않다. 다만, 그래프의 기울기에 있어서 case 1의 경우는 거의 같은 정도였으나 case 2에서는 제법 차이를 보인다. 즉,  $T_3$ 가 20톤 정도 증가하면  $T_1$ 은 약 15톤 정도의 감소를 보이지만  $T_2$ 는 6톤 정도 감소된다. 이는 case 1이  $T_1$ 과  $T_3$  위치와의 간격이  $T_3$ 와  $T_2$  위치와의 간격과 25.9 m와 23.5 m로 비슷한데 반해, case 2의 경우는 14.15 m와 35.25 m로 차이가 있기 때문이다.

Fig. 4.2부터 Fig. 4.5까지의 그래프들을 한꺼번에 모아놓은 것이 Fig. 4.6이다. 여기에서 case 1보다 case 2가 크레인에 걸리는 하중측면에서 훨씬 유리함을 알 수 있다. case 1의  $T_3$ 의 위치는 CG로부터 6.24 m 전방에 있고 case 2의  $T_3$ 의 위치는 5.51 m 후방에 있기 때문에 그 값의 차이인 73 cm에 불과하다. 하지만, case 2를 선택했을 때



$T_1$  위치에서 약 70톤 정도의 인장력의 감소효과를 볼 수 있다. 이 경우는 비록 러그간의 간격이 차이가 많이 나서  $T_3$ 의 변화에 따른 균등한  $T_1$ 과  $T_2$ 의 변화를 얻을 수 없지만 변화의 폭은 작은 편이고 상대적으로 영향이 큰 전체적인 인장력 감소효과를 가져오는 case 2를 선택하는 것이 바람직하다는 뜻이 된다.

#### 4.2 3차원 해석 및 결과

3차원 문제에서는 2차원 문제와 같은 재원의 선박에 대해 좌우대칭인 직립의 (upright) 경우와 좌우대칭이 아닌  $90^\circ$  전복(capsized)의 경우를 각각 다루어보았다. 그리고, 2차원과 마찬가지로 선박의 모든 구획은 완전침수 상태를 가정했다.

Fig. 4.7에 보는 바와 같이 좌표계 내에서 선박이 놓여 있는 상태는 직립의 경우에는 선수부는  $x$ 축의 양의 방향으로 놓여 있고, 선저는  $x-z$ 평면에 놓여있으며, 원점 (axes origin)의 위치는  $L, B, D$ 로 이루어지는 선박을 둘러싼 직육면체에서 좌현(port side) 후방 아래 꼭지점으로 삼았고, 전복의 경우에는 선수부는 직립의 경우와 마찬가지로  $x$ 축의 양의 방향으로 놓여 있고 우현(star board) 쪽으로  $90^\circ$  전복되어 선저면이  $x-y$ 평면에 놓여있으며, 원점의 위치는 우현 후방 아래 꼭지점으로 정했다.

Fig. 4.8은  $T_4$ 에 따른  $T_1$ ,  $T_2$ , 그리고  $T_3$ 의 변화를  $x$ 축을 회전축으로 한 각변화  $\phi$ 에 따라 도시한 그래프이다. 일단,  $T_4$ 가 증가하면  $T_2$ 는 따라서 증가하고  $T_1$ 과  $T_3$ 는 감소한다. 즉, 인장력을 가하는 위치와 대각방향으로 위치한 지점에서 인장력이 증가하고 인접한 지점에서는 인장력이 감소한다. 그리고,  $T_2$ ,  $T_3$ 와는 달리  $T_1$ 은  $\phi$ 의 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 실제로 회전에 의한 인장력의 분배가  $T_2$ 와  $T_3$ 사이에는 잘 이루어지고 있는데  $T_1$ 과  $T_4$ 사이에서는 잘 이루어지지 않는다는 것이 아니라  $T_4$ 는 임의로 하중을 가하는 쪽이기 때문에 회전에 의한 효과가 이미 고려되어 있는 것이다. 이 현상은 Fig. 4.8 말고도 Fig. 4.9부터 Fig. 4.11에 걸쳐 모두 나타나고 있는데 회전축의 직각인 평면에 있는 지점의 인장력이 회전의 영향을 받지 않는 것처럼 보일 뿐이다. 즉,  $\phi$ 에 대해서는  $T_1$ 이,  $\phi$ 에 대해서는  $T_3$ 가 해당 각변화에 영향을 받지 않는다. 또한,  $T_4$ 가 1톤 증가하면  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ 도 각각 1톤씩 증가하거나 감소한다. 그리고, 선체가 우현으로 기울수록  $T_2$ 는 감소하고  $T_3$ 는 증가하는 것이 2차원 문제에서 살펴본 바와 동일하고  $1^\circ$  당 약 5톤의 인장력의 변화를 보이는데,  $-6^\circ$ 에서  $+6^\circ$  까지  $12^\circ$  정도의 폭을 가지고 선박이 좌우로 흔들린다면 자그마치 약 60톤의 인장력의 차이가 나기 때문에 특히  $\phi$ 방향의 경사변화는 주의를 기울여야 될 것이다.

이에 반해, Fig. 4.9에서  $\phi$ 방향의 경사변화는 인장력에 거의 영향을 주지 않는다.

마지막 2개의 그래프 Fig. 4.10과 Fig. 4.11은 우현 쪽으로 90° 전복된 경우를 나타낸 것인데, Fig. 4.7에서 보는 바와 같이 좌현 선측에서 인장력을 가하고 있고 Table 4.2를 참고하면  $T_1$ 과  $T_4$ , 그리고  $T_2$ 와  $T_3$  사이의 간격이 3.56 m에 불과함을 알 수 있다. 그런데, Fig. 4.10을 보게되면 각  $\phi$ 가 인장력에 미치는 영향이 엄청나다. 1° 당 약 27톤의 인장력의 변화를 보이는데, 이것은 결국 회전축에 직각인 평면에서 인장력이 작용하는 지점의 거리가 가깝기 때문에 발생하는 것이다. 즉, CG를 사이에 두고 인장력이 작용하는 지점의 간격이 크면 해당지점을 포함하는 평면의 회전에 의한 각 변화가 인장력에 미치는 영향이 작고, 간격이 작으면 영향이 크다는 것을 말해 준다.

Table 4.1 Locations of lugs and CG(2D case)

(단위:m)

|       | case 1 |     | case 2 |     |
|-------|--------|-----|--------|-----|
|       | x      | y   | x      | y   |
| $T_1$ | 16.2   | 6   | 16.2   | 6   |
| $T_2$ | 65.6   | 6   | 65.6   | 6   |
| $T_3$ | 42.1   | 6   | 30.35  | 6   |
| $W$   | 35.86  | 2.5 | 35.86  | 2.5 |

Table 4.2 Locations of lugs and CG(3D case)

(단위:m)

|       | x     |       | y   |     | z  |      |
|-------|-------|-------|-----|-----|----|------|
|       | up    | cap   | up  | cap | up | cap  |
| $T_1$ | 16.2  | 16.2  | 6   | 12  | 12 | 4.78 |
| $T_2$ | 65.6  | 65.6  | 6   | 12  | 12 | 4.78 |
| $T_3$ | 65.6  | 65.6  | 6   | 12  | 0  | 1.22 |
| $T_4$ | 16.2  | 16.2  | 6   | 12  | 0  | 1.22 |
| $W$   | 35.86 | 35.86 | 2.5 | 6   | 6  | 2.5  |

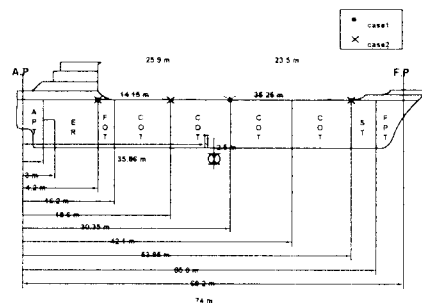


Fig. 4.1 Particulars indicating the locations of lugs and CG.

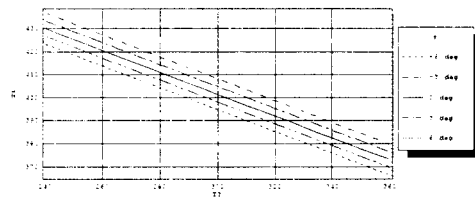


Fig. 4.2  $T_1$  versus  $T_3$  with the changes of the angle  $\phi$ (2D case 1).

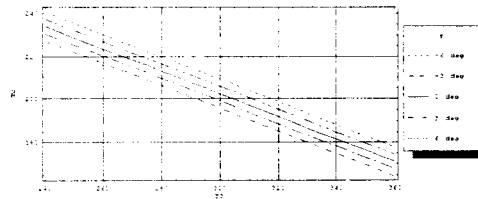


Fig. 4.3  $T_2$  versus  $T_3$  with the changes of the angle  $\phi$ (2D case 1).

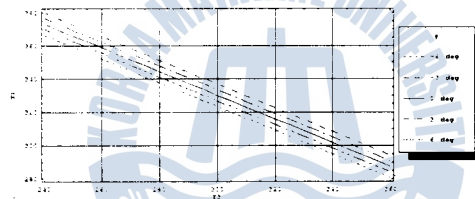


Fig. 4.4  $T_1$  versus  $T_3$  with the changes of the angle  $\phi$ (2D case2).

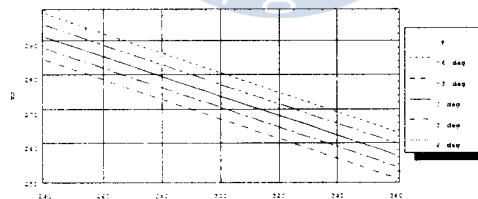


Fig. 4.5  $T_2$  versus  $T_3$  with the changes of the angle  $\phi$ (2D case 2).

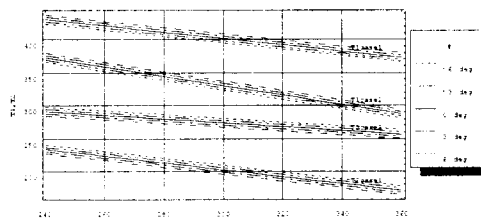


Fig. 4.6 Comparison between the case 1 and the case 2.

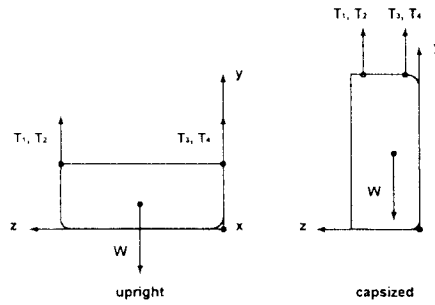


Fig. 4.7 Initial configuration of the ship.



Fig. 4.8  $T_1, T_2, T_3$  versus  $T_4$  with the change of the angle  $\phi$ (3D upright).



Fig. 4.9  $T_1, T_2, T_3$  versus  $T_4$  with the change of the angle  $\phi$ (3D upright).

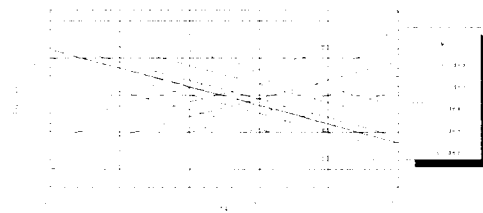


Fig. 4.10  $T_1, T_2, T_3$  versus  $T_4$  with the change of the angle  $\phi$ (3D capsized).

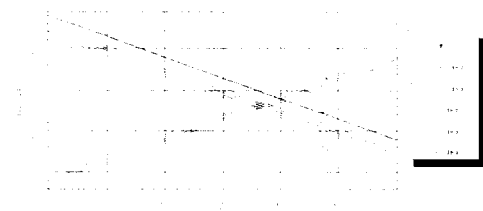


Fig. 4.11  $T_1, T_2, T_3$  versus  $T_4$  with the change of the angle  $\phi$ (3D capsized).

## 5. 결 론

본 논문에서는 최근까지 학계나 업계의 관심을 별로 받아오지 못하다가 환경오염의 견지에서 서서히 그 중요성이 재조명되고 있는 구난분야에 관하여 다루었다. 기존의 구난에 대한 각종 지식과 자료들을 수집 정리하고, 국내 해난사고의 현황과 해양환경의 보전 차원에서 침몰선의 인양을 가장 시급한 구난유형으로 규정하여, 가능하고도 실제적인 인양을 위한 인양력, 선체의 경사, 러그의 위치 사이의 간단한 관계를 찾는 방법을 제안했다.

고려된 문제는 일차적으로 1자유도의 잉여미지력을 가지는 부정정방정식을 푸는 것이었지만 하나의 잉여인장력을 크레인 기사의 입장에서 능동적으로 제어하게 되면 이 미지력은 외력으로 간주할 수 있게 되고 외력이 변하는 정정 문제의 해집합으로 방정식을 풀 수 있다.

유한요소법과 같은 변형을 고려하는 정교한 방법을 사용하지 않은 이유는 선박의 기하학적 복잡성 때문에 모델링하는 데 시간이 많이 걸리게 되므로 구난의 적절한 시기를 놓칠 수 있고, 예측 못한 돌발사태가 발생했을 때 시간적인 부족 때문에 별로 유용하지 못하기 때문이다. 본 논문에서의 관심영역은 선박 자체의 추가적인 손상위험을 파악하는 것이 아니라 인양력을 어디에 어떻게 작용시키며, 선체가 이루는 경사와는 어떤 관련이 있는가를 밝혀내는 것이었으므로 선체의 파단을 가져올 정도의 혹독한 경우가 아니라면 결국 선박을 강체로 보아도 상관이 없다는 데 주목했다.

2차원 문제와 3차원 직립 문제, 그리고 3차원 전복 문제의 예제를 통하여 선박의 길이 방향을 따라 주어진 횡격벽들에 균형있는 인장력을 가할 수 있는 위치를 선정할 수 있었고, 인접한 위치의 인장력은 서로 반비례하고 마주보는 위치의 인장력은 비례한다는 것을 보였고, 러그간의 간격은 선체가 이루는 경사와 밀접한 관계가 있음을 파악할 수 있었다. 따라서, 선박의 경우는 기본적으로 종방향의 경사보다는 횡방향의 경사에 더 인장력이 민감하게 영향을 받게된다.

본 논문은 환경하중에 의한 영향을 고려하지 않았기 때문에 선체에 가해지는 인장력들은 모두 수직한 힘들로만 가정했다. 그러나, 환경하중을 고려하게 되면 수평방향의 힘성분도 존재하고 그러한 힘들의 영향으로 선체가 어느 정도 옆으로 밀려나 약간의 경사진 힘들을 만들어 낼 것이다. 그리고, 선체의 경사는 단순히 크레인에 의한 인장력에 의해서만 발생하지 않고 이러한 환경하중의 영향을 받게될 수 있다. 선박을 인양하려면 적어도 몇백 톤 이상의 인장력을 가해야하기 때문에 환경하중의 영향은 적을 것이라고 예상하기는 했으나 정량적인 확인이 필요하다. 또한, 논문의 결과가 실제적인 인양작업에 유용하게 쓰일 수 있도록 하려면 인장력이 가해지는 위치에서 선각구조의

찢어짐(tearing)이 발생하지 않도록 하는 최대한의 인장강도를 결정하는 것이 필요하다. 이를 뒷받침하는 실험과 사례의 확보가 이루어져야하고 부정정도를 더욱 높였을 때도 여전히 유용하게 쓰일 수 있는지에 관해서도 계속적인 보완 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- Bartholomew, C.A., *Mud, Muscle, and Miracles: marine salvage in the United States Navy*, Naval Historical Center and Naval Sea Systems Command.
- Brady, E.M., 1960, *Marine Salvage Operations*, Cornell Maritime Press.
- Colquhoun, A., 1994, "Raising From The Depths (In The Antipodes)", *International Tug and Salvage Conference*, Day 2, No.4, pp.85-90.
- Colquhoun, A., 1991, "Refloating from a Strand - Practical Naval Architectural Aspects", *Proceedings of the Eleventh International Tug Convention Marine Salvage Symposium*, Day 3, No.3, pp.155-160.
- Gibbs, B., Milwee, W.I. and Detlev, H., 1990, "Double Hull Tankers-A Salvor's Perspective", *The Eleventh International Tug Convention and Marine Salvage Symposium*, Day 3, No.3, pp.161-167.
- Liang, S. and Yang, G.L., 1984, "The Refloating of the M/V American Sioux", *Marine Technology Society Journal*, Vol.18, No.2, pp.26-33.
- Milwee, W.I., Jr., 1996, *Modern Marine Salvage*, The Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- Niemann, G.A.F., 1979, "Salvage of Malaysia Kita", *Marine Technology Society Journal*, Vol.13, No.4, pp.22-28.
- Rossnagel, W.E., Higgins, L.R. and MacDonald, J.A., 1988, *Handbook of Rigging For Construction and Industrial Operations*, 4th edition, McGraw-Hill.
- Sullivan, W.A., 1948, "Marine Salvage", *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, Vol.56, pp.104-148.
- Wang, C., 1953, *Statically Indeterminate Structures*, McGraw-Hill.
- Wheeler, G.J., 1958, *Ship Salvage*, George Philip and Son.
- Whitaker, F.H., 1944, "The Salvage of U.S.S. Oklahoma", *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, Vol.52, pp.133-209.
- Yang, G.L., 1992, "Calculations for Refloating Grounded Ships", *Marine Technology*

Society Journal, Vol.26, No.3, pp.39-46.

Yang, G.L., 1984, "The Theory and Practice of the Refloating Project of the M/V Damodar Ganga", Marine Technology Society Journal, Vol.18, No.2. pp.18-25.

\_\_\_\_\_, 1988, 해난사고통계연보, 해양경찰대

\_\_\_\_\_, 1989, 해난사고통계연보, 해양경찰대

\_\_\_\_\_, 1990, 해난사고통계분석, 해양경찰청

\_\_\_\_\_, 1991, 해난사고통계분석, 해양경찰청

\_\_\_\_\_, 1992, 해난사고통계분석, 해양경찰청

\_\_\_\_\_, 1996, 해난사고통계분석, 해양경찰청

\_\_\_\_\_, 1997, 해난사고통계분석, 해양경찰청

