

論 文

좌초 선박의 종강도 안전성 및 부양계산 기술 개발

강 창 구* · 김 진 환**

Longitudinal Strength Safety and Refloat Calculation of a Grounded Ship

Kang Chang-Gu · Kim Jin-Wan***

〈 목 차 〉	
Abstract	4. 적용 사례
1. 서언	5. 결론
2. 좌초 선박의 구난 작업 및 그에 필요한 계산	참고 문헌
3. 긴급 구난 계산 프로그램 SP_EMS	

Abstract

Marine casualty causes not only loss of lives and ships, but also severe damages to marine environment and related economic activities such as fishing industry, sea farming, and tourist industry. Basically, the great effort should be made to prevent the occurrence of maritime accidents by any means. However, once accident has occurred, the salvage works should be done rapidly and properly based on theoretical and technical informations, which could minimize the risk during salvage operation and the overall damage from the maritime accidents.

Generally, to calculate accurate hydrostatics of a stranded ship, a large amount of input data is needed. But, an availability and a reliability of input data cannot be guaranteed in most situations, and the adequate time required for preparing all input data is not allowed to perform the timely operations of salvage.

In this paper, the development process of simple computer program for salvage operation using limited input data is introduced and its application example is presented. This program was developed to provide technical support for planning salvage operations in the grounding accident.

* 한국기계연구원 해상안전방재 연구단 단장

** 한국기계연구원 해상안전방재 연구단 연구원

1. 서 언

근래 들어 세계적인 해상 교통량의 증가에 따라 각종 해난 사고의 발생이 급증하고 있다. 해난 사고는 귀중한 인명과 선박 손상 또는 유실에 따른 경제적 손실을 유발시키는 외에도, 최근 그 중요성이 급격히 부각되고 있는 환경에 대해 치명적인 위협을 준다. 특히 유조선 사고가 해양 환경에 얼마나 심각한 피해를 주는가에 대해서는 실제 발생했던 많은 사고 사례를 통해 쉽게 확인할 수 있다. 지금까지 세계적으로 발생한 대형 해양 오염 사고들을 살펴보면, 영국의 Torrey Canyon호 사고(1967), Atlantic Empress호 사고(1979), Exxon Valdez호 사고(1989), Braer호 사고(1993), Sea Empress호 사고(1996) 등을 들 수 있다. 그 가운데 가장 널리 알려진 사고로서 Exxon Valdez호 사고가 있다. 이 사고는 미국 Alaska 부근해역에서 운항 중이던 선박이 좌초하면서 발생하였다. 이 사고로 42,000톤이 넘는 원유가 바다로 유출되었는데, 사고 해역은 미국에서도 청정 해역에 해당하는 곳이어서 해양 환경에 엄청난 피해를 입혔다. 그 피해의 경제적 규모는 40억불이 넘는 것으로 추정되고 있으며, 10년이 지난 지금까지도 생태계 파괴 등 환경 피해의 회복이 완전하게 이루어지지 않고 있는 실정이다.

우리 나라의 경우도 급격한 경제 성장과 함께 해상을 통한 유류 물동량이 크게 증가하였으며, 그에 따른 유조선 유류 유출 사고가 빈번히 일어나고 있다. 최근의 대표적인 사고들로 코리아 비너스호 사고(1993), 제 5 금동호 사고(1993), 씨 프린스호 사고(1995), 제 1 유일호 사고(1995), 제 3 오성호 사고(1997) 등이 있으며, 특히 1995년 전남 여수 부근 소리도에서 발생했던 씨 프린스호 좌초에 의한 유류 유출 사고는, 우리 나라도 대형 해양 오염 사고에 있어 예외일 수 없다는 점과, 대형 유조선에 의한 해양 오염의 심각성에 대한 국가적인 경각심을 불러일으킨 바 있다.

이러한 해난 사고는 근본적으로는 사고 원인에 대한 조사를 바탕으로 사고 자체가 발생하지 않게 하기 위한 조치가 이루어져야 하겠으나, 현실적으

로 모든 사고를 미연에 방지하기란 불가능하므로, 일단 발생한 사고에 대해서는 그 피해를 최소화하기 위한 신속하고도 적절한 대응 조치가 반드시 이루어져야 할 것이다.

이를 위해서는 사고 선박에 대한 유체 정역학적 계산을 바탕으로 한 이론적, 기술적인 결과가 구난 작업의 각 단계에서 적절히 제공되고 사용되어야 한다. 유체 정역학적 계산은 선박 설계 단계에서 사용되어왔던 기존의 여러 프로그램을 이용하면 정확한 결과를 얻을 수 있다. 그러나 실제 사고에서는 이러한 기존 프로그램의 운용에 필요한 입력 자료에 대한 모든 정보를 얻을 수 없는 경우가 거의 대부분이며 계산 정도(精度)가 의미를 가질 수 있는 정확한 정보의 취득도 불가능하기 때문에 신속한 구난 기술 지원이 이루어지지 못했던 것이 사실이다. 본 연구에서는, 가능한 한 적은 입력 자료만으로 구난 작업에 필요한 가능한 한 많은 정보를 얻을 수 있는 구난 기술 지원 프로그램 SP_EMS의 개발 및 적용 사례에 대한 내용을 밝히고자 한다. 본 프로그램은 좌초 사고에서의 종강도 계산을 통한 구조 안전성 해석과 부양 계산에 중점을 두고 개발되었다. 특히, 본 프로그램의 주 계산 모듈(Module)은 실제 사고에서의 구난 기술 지원을 위해 작성되었으며, 사고 현장으로부터 수시로 보고되는 사고선 상태에 관한 새로운 정보를 바탕으로 좌초선 구난 작업의 진행 상황에 맞추어 적절한 작업 계획을 수립하는데 사용이 가능하다.

2. 좌초 선박의 구난 작업 및 그에 필요한 계산

좌초란 조선자의 실수 또는 조선자의 의도와는 달리 불가항력적인 외력이나 특수한 상황으로 인하여 선박의 중량 일부가 지면(해저면)에 의해 지지되고 있는 상태를 말한다. 대개의 경우 좌초 사고는 선체 손상으로 인한 침수를 유발하며, 지면과의 접촉면에서 발생하는 반력(지지력)으로 인한 2차적인 선체 손상의 가능성이 존재한다. 특히 조석간만으로 인한 해수면 변동이나 태풍의 내습 등

사고 이후 외부 외력의 변화는 추가 손상의 위험성을 크게 증가시키게 되어 신속한 구난 작업이 필수적이다.

2.1 좌초 상태에 대한 계산

좌초 상태에서의 주된 검토 대상은 선체의 종강도이며 이에 대한 검토를 바탕으로 이후 구난 작업의 방향을 결정하게 된다.

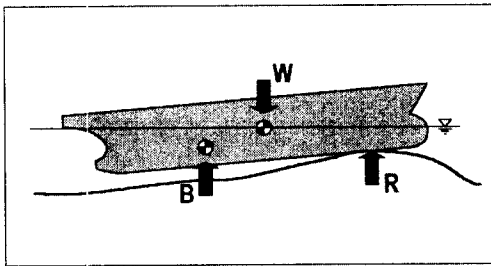


Fig. 1 좌초선에 작용하는 힘

- 선박의 좌초력 계산

선박의 종방향 하중 분포(경하 중량 및 재화 중량 분포) 및 선체 손상에 의한 침수를 고려한 부력 분포를 고려하여, 좌초 선박에 작용하는 해저면으로부터의 반력의 크기 및 반력의 중심 위치를 추정한다.

- 선체 종강도의 계산

좌초상태에 있는 선박은 선체 전체에 걸친 하중의 균형이 깨져 있기 때문에 반드시 손상부 주위의 국부 강도에만 문제가 발생하는 것은 아니며, 예상치 못한 부위에서의 파손이 먼저 발생할 수도 있다. 따라서 그 종강도에 대한 추정이 가장 중요한 부분이라 할 수 있다.

좌초력 계산 단계에서, 좌초 선박에 있어서의 전단력(Shear Force) 곡선 및 굽힘 모멘트(Bending Moment) 곡선을 얻는다. 또한 선체의 구조 강도에 대한 정보와 굽힘 모멘트 곡선으로부터 선체의 외판(특히, 갑판 및 선저판)에 작용하는 응력(Stress)을 계산할 수 있다. 이러한 응력 계산 결과를 이용

하면 선박의 파손 가능성 및 파손이 일어날 수 있는 위치에 대한 추정이 가능하게 된다.

- 선체 굽힘량(Deflection)의 계산

앞서 언급한 바 있듯이 좌초 상태의 선박은 하중 균형이 무너져 있는 상태이므로, 과도한 선체의 굽힘이 유발될 수 있는 가능성이 상당히 크다. 따라서 보다 정확한 좌초력 및 종강도 계산을 위해서는 이러한 굽힘으로 인한 부력의 변화에 대한 고려가 필요할 수 있다. 이에 대한 정확한 계산을 위해서는 재화 상태 및 선체 손상에 따른 부력 손실량에 대한 정확한 정보를 이용한 반복 계산(Iteration)이 수행되어야 한다.

2.2 부양 상태에 대한 계산

좌초 단계에 대한 계산 결과, 부양이 가능하다고 판단되면 부양에 필요한 검토에 들어가게 된다. 물론 부양 단계에서도 앞서의 종강도 해석을 동시에 수행하여, 각 부양 단계에서의 구조적 위험성은 없는지를 지속적으로 검토하여야 한다.

- 화물 이동에 따른 종강도 변화 계산

먼저, 화물 이동을 통한 부양이 가능한 지의 여부를 검토한다. 비교적 경미한 선체 손상의 경우 화물의 투기 또는 이적을 통하여 부양이 가능하다. 그러나 선체 손상이 심하여 이후 공기 주입을 통한 부양이 필요할 수 있는데, 이러한 경우에도 공기 주입을 위한 준비 단계의 작업으로 화물 이동 작업이 수행되게 된다. 특히, 유류와 같은 해양 오염의 위험성이 큰 화물의 경우 조속한 화물 이적이 필요할 수 있기 때문에, 선이적 후부양(先移積 後浮揚) 작업이 바람직 할 수 있다. 하지만, 단순한 이적은 선체의 구조 강도에 문제를 유발시킬 수 있으므로, 해수 주입을 동시에 수행하여, 구조 강도에 무리를 일으키지 않는 방향으로 적절한 화물 이동 작업이 이루어져야 한다.

- 공기 주입에 따른 종강도 변화 및 홀수 계산
화물 이동만으로 부양이 불가능하다고 판단되는

경우 공기의 압력을 이용한 부양을 시도하게 된다. 단 공기 주입을 통한 부양은 선체의 종강도 상에 어느 정도 여유가 있는 경우에 한하며, 종강도 상에 심각한 문제가 있다고 판단되면 선체 절단 후 인양 등의 기타 수단의 선택이 불가피할 수도 있다.

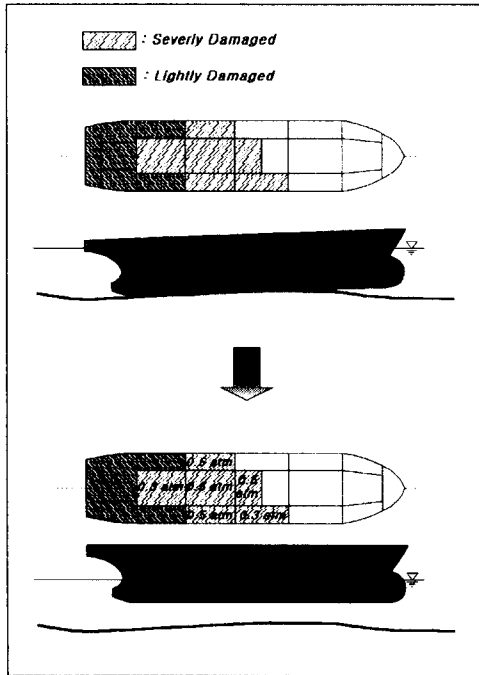


Fig. 2 공기 주입을 통한 부양

부양을 위해 주입되는 기체는 일반 공기일 수도 있으나, 폭발의 위험성이 있는 유류 운반선 같은 경우 불활성 기체의 주입이 이루어지게 된다. 주입 방식은 풍선과 같은 유연 재질의 주머니를 이용할 수도 있으며 화물창에 직접적으로 주입하는 방식이 사용될 수도 있는데, 후자의 경우에는 공기가 새어나가지 못하도록 화물창 상부 개구부(開口部)에 대한 밀폐가 이루어져야 한다. 특히, 공기가 주입되는 화물창은 손상으로 침수된 화물창일 것이며, 이곳에서는 공기압에 의해 화물창 내 수두가 밀려 내려가게 된다. 따라서 측면 선체의 손상 정도를 정확히 파악하여 측면 손상부를 통해

공기가 새는 일이 없도록 적절한 양의 공기 주입이 이루어져야 한다.

3. 긴급 구난 계산 프로그램 SP_EMS

3.1 프로그램의 개요

SP_EMS는 좌초 사고의 수습을 위한 기술 지원에 중점을 두고 개발되었다. 프로그램의 대부분은 사고 당시 현장에서 요구되는 기술 검토 사항에 대한 계산 모듈을 그때그때 추가시키는 형태로 개발이 수행되었다. 최초의 프로그램은 시간적 여유가 많지 않은 관계로 작성 및 오류 수정이 용이하고 각종 결과에 대한 그림 등을 손쉽게 얻을 수 있도록 MATLAB의 자체 언어를 이용하여 작성되었으며, 씨 프린스 호 사고 당시 구조 강도 계산과 부양 계산에 실제로 사용되었다. 그러나 사고 수습 후 이를 범용 프로그램화할 필요성이 있다고 판단하여 Visual C++ 및 Visual Basic을 이용하여 전반적인 프로그램의 재작성이 수행되었다. 특히, Visual Basic을 이용한 GUI 기능의 강화를 통해 보다 손쉬운 운용과 함께 결과에 대한 모든 그래프를 화면상에 직접 표현하고 이를 출력하는 기능을 추가시켰다.

SP_EMS는 실제 사고에서의 적용 필요성에 따라 작성된 관계로 종강도 계산 및 종방향의 유체 정역학 계산 기능만을 갖추고 있으며, 이후 횡방향 유체 정역학 계산 기능 등 추가적 보완이 필요할 것으로 판단하고 있다.

3.2 프로그램의 기능

먼저 프로그램의 수행에 필요한 입력 정보는 다음과 같다.

- 선체의 주요 제원 및 형상 정보 (Offset Table)
- 선체 길이 방향의 경하 중량 분포
- 좌초선의 선수미 홀수 상태
- 길이 방향의 구조 강성 정보

- 화물창 배치 정보
- 화물창 손상 상태 정보
- 화물창 별 화물 중량 및 주입 공기압 정보

기본적 계산에 필요한 최소한의 입력 정보만을 필요로 하기 때문에, 기존 범용 유체 정역학 프로그램 사용 시 자료 수집 및 입력에 소요되던 시간을 크게 단축시킬 수 있다. 또한, 본 프로그램이 횡강도 계산 기능이나 횡방향 유체 정역학 기능을 갖추지 못했다는 단점이, 오히려 필요 입력 정보의 양을 상당 부분 줄이는 긍정적 효과를 줄 것으로 기대하였으며, 실제로도 이에 따른 효과가 상당히 큰 것으로 확인되었다.

프로그램 수행을 통해 얻을 수 있는 계산 결과는 다음과 같다.

- 좌초선의 하중 곡선(Fig. 3) 및 부력 곡선
- 좌초력 계산 : 좌초 반력 및 반력 중심)
- 임의 화물 적재 상태에서의 홀수 계산
- 화물창에 대한 공기 주입시의 홀수 계산
- 중강도 계산 : 전단력 곡선 및 굽힘 모멘트 곡선 (Fig. 4~5)
- 상갑판 및 선저판 응력 분포 (Fig. 6)
- 선체 굽힘량 계산

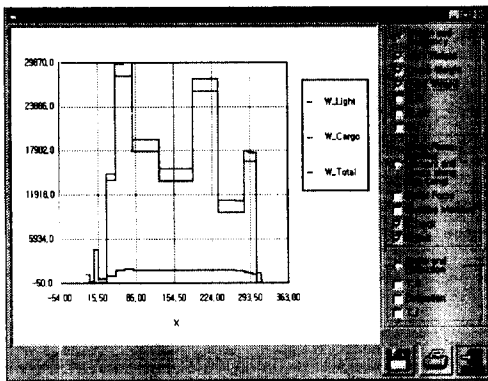


Fig. 3 하중 분포 곡선

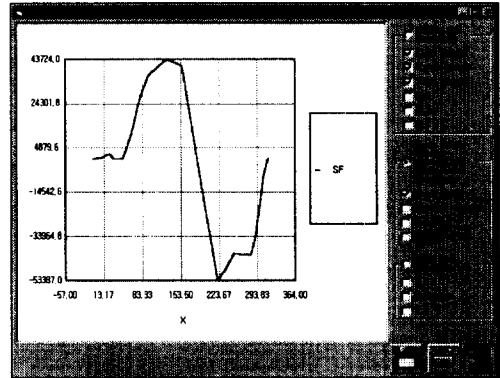


Fig. 4 전단력 Diagram

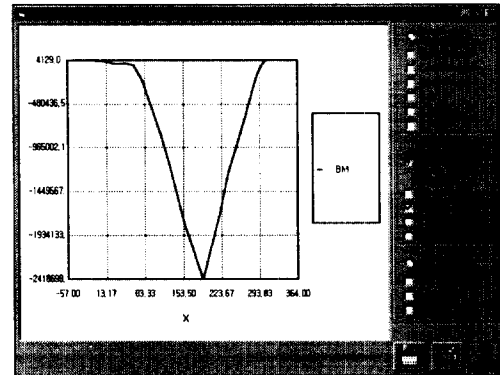


Fig. 5 굽힘 모멘트 Diagram

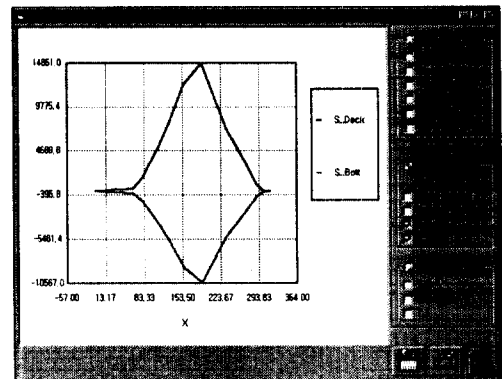


Fig. 6 갑판 및 선저판 응력 분포 곡선

4. 적용 사례

30만톤급 유조선의 좌초 사고에 대한 기술 지원에 본 프로그램이 사용되었다. 구난 기술 지원에는 본 프로그램 외에도 계산 결과의 검증 및 보다 정확한 유체 정역학 계산을 위해 SIKOB 프로그램이 동시에 사용되었고, 파랑 중 선체 안정성 계산을 위한 별도의 계산도 수행되었다.

4.1 사고의 발생

호유해운 소속 사이프러스 국적원유선인 씨 프린스호(선장 임종민 외 19명 승선)는 중동지역에서 원유 266,850톤을 선적 후 여수 호남정유 원유부두에서 하역을 시작하였다. 그러나 당시 북상 중이던 A급 태풍 페이(Faye)의 내습 예보에 따라, 안전을 위해 183,850톤 양하시점에서 하역을 중단하고 부두에서 피항차 원유잔량 83,000톤을 적재한 채 1995년 7월 22일 18시 외항으로 피항하였다.

태풍 페이는 여수방향으로 접근하였고 이 선박은 피항 도중 7월 23일 14시경 강풍과 높은 파도에 떠밀려 오동도 남남서쪽 25마일에 위치한 작도에 충돌하였다.

작도에 충돌시 발생한 충격에 의해 기관실이 파손되었고, 이때 흘러나온 연료유가 폭발하면서 엔진과 선교 등이 심각하게 손상을 입어 선박의 모든 운항 기능이 정지되고 교신마저 끊어졌다. 이때는 또 다시 강한 풍랑에 떠밀려 작도에서 5마일 정도 서쪽에 위치한 소리도에 좌초하였다. 좌초시 암초에 심하게 부딪혀 바위가 선각을 뚫고 들어가 선체 중앙부 선저와 선측이 1/3가량 손상을 입었으며, 선미부의 경우 전체적으로 선저에 심한 손상을 입고 바위 위에 올라앉게 되었다.

4.2 구난 작업의 진행 및 구난 기술 지원

사고 직후 외국의 전문 구난 업체에서 구난 작업을 담당하게 되었으며, 구난 작업의 기본 방향을 사고선 선체를 부양시킨 후 다른 유조선으로 예인하여 원유를 이적하는 선부양 후이적 방법을 채택하

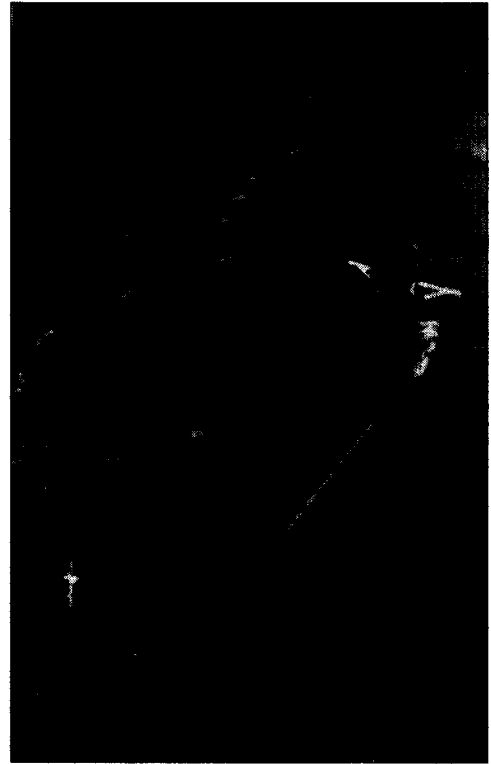


Fig. 7 Sea-Prince호 좌초 사고

고자 하였다. 그러나 7월 31일 사고선에 대한 자료를 넘겨받아 본 프로그램을 이용한 부양에 따른 선체 강도, 작업 위험성 등을 검토한 결과 선부양 후이적 방법은 상당히 위험하며, 사고선의 위험화물인 원유를 먼저 이적한 후 선체를 부양시키는 선이적 후부양 방법이 바람직하다고 판단하였다. 당시, 사고선은 선체 중앙부에서 선미에 이르는 모든 화물 탱크가 손상되어 있었으나 원유의 비중이 해수보다 낮은 관계로 손상 탱크 내의 원유가 해수 위에 떠 있는 상태였기 때문에 이적이 가능하였다.

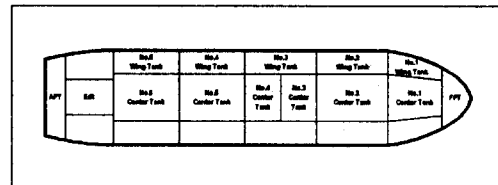


Fig. 8 사고선의 화물창 배치도

당시, 83,000톤의 원유 잔량 가운데, 손상 탱크 내에 남아 있던 원유의 양은 26,000톤 가량이었으며, 유출량 일부를 제외한 나머지는 선수부 비상 탱크 내에 실려 있었다. 기술 검토 결과에 따라 선이적 후부양 방법이 실제로 채택되었고, 그에 따른 구난 작업 진행을 위한 세부 검토에 들어가게 되었다. 먼저, 3가지 정도의 원유 이적 시나리오를 가정하고 각 시나리오에 따른 작업 수행시의 선체 강도 및 안정성에 대한 검토를 수행하였다.

단순한 이적으로 인해 좌초력이 감소하고 부력이 증가하여 선체 일부가 뜨게 되면 파랑 등에 의한 추가 손상이 발생할 수 있으므로, 원유 이적과 해수 주입을 동시에 수행하되, 선체의 구조 강도에 문제가 발생하지 않도록 하기 위해 가능한 한 균일한 하중 분포가 유지되는 안을 찾고자 하였다. 화물창으로 주입된 해수는 이후 유수분리기(油水分離機)를 거쳐 처리되어야하므로 해수 주입 및 이동량도 가능하면 최소화하는 고려가 필요하였다.

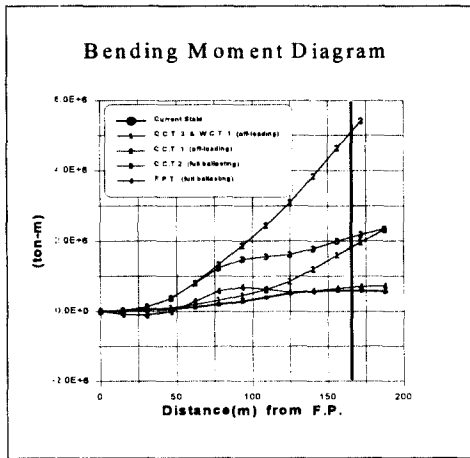


Fig. 9 화물 이동에 따른 단계별 굽힘 모멘트 변화

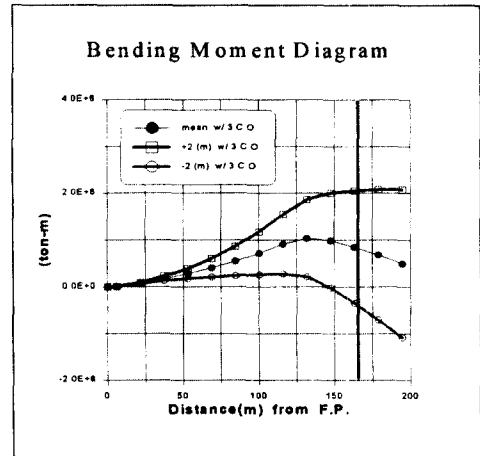


Fig. 10 조위 변동에 따른 굽힘 모멘트 변화

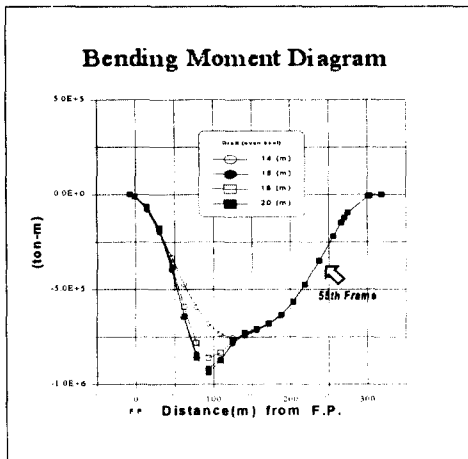


Fig. 11 부양 상태에서의 굽힘 모멘트 곡선

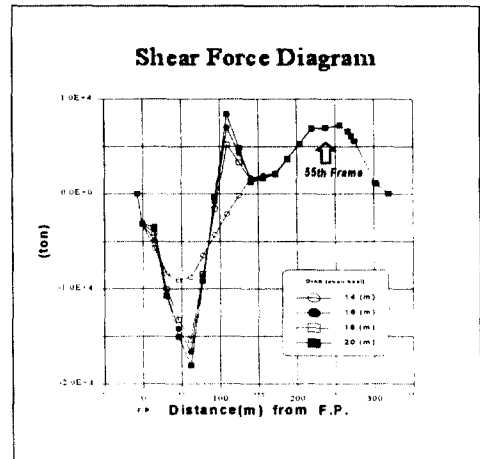


Fig. 12 부양 상태에서의 전단력 곡선

또한, 소리도 해역에서는 4m 정도의 간만의 차이가 존재한다는 점을 감안, 선체 강도 및 안정성에 미치는 영향을 검토하였다. (Fig. 10)

원유 이적이 상당량 진척되자, 이후 부양 및 도킹 상태에 대한 검토의 필요성이 요구되었다. 계속적으로 이루어진 손상 상태에 대한 수중 조사 작업을 통해 선체 우현이 손상이 심한 것으로 나타나 우현 Wing Tank에 공기 주입이 어려울 것으로 판단되었다. 그러나 선미부 엔진룸의 손상 정도에 대한 완전한 파악이 이루어지지 않아 손상 정도 가정을 통한 다양한 경우에 대한 부양 가능성 검토가 이루어졌다. 검토 결과 심각한 선체 손상을 가정하더라도 공기 주입을 통해 일정 홀수까지의 부양이 가능한 것으로 나타났다. 공기 주입 화물창 선정 및 주입 공기압에 대한 여러 가지 안에 대한 부양 가능성 검토가 수행되었으며, 최종적으로 Table 1의 홀수별 부양안이 확정되었다. Fig 11~12는 부양상태에서의 종강도 계산 결과이다.

부양 단계에서의 구난 업체가 변경되어 실제 부양 작업의 진행은 상당 기간 지연되었으나, 이후 공기 주입에 의한 부양 작업이 무사히 이루어졌고 사고 선박은 해체를 위해 필리핀 근해로 예인되었다

Table 3. 홀수별 부양안

목표 홀수 (m)	부양을 위한				선수 홀수 (m)	선미 홀수 (m)
	탱크별 FPT	해수 Tank No. 1	주입량 Tank No. 2	(ton) Tank No. 2		
14	8760	31500	26000	3000	13.88	14.19
16	8760	45000	14500	14000	15.86	16.25
18	8760	49500	23000	14000	17.96	17.93
20	8760	57000	22000	19000	19.62	20.12
<ul style="list-style-type: none"> • 선미 선저부 완전 손상 가정 • Cargo Tank No. 4 & 5 : 공기 주입 압력 : 0.5 (기압) • Cargo Tank No. 6 : 공기 주입 압력 : 0.1 (기압) 						
<ul style="list-style-type: none"> • 손상부(55th Frame)에서의 굽힘 모멘트 : 전단력 (계산치) : 8,500 (ton) : 굽힘 모멘트 (계산치) : 350,000 (ton-m) : 굽힘 모멘트 (허용치) : 414,000 (ton-m) 						

5. 결 론

해상에서 다양한 형태로 발생하는 사고 선박의 성공적인 구난을 위해서는 효율적이고 적절한 기술 검토에 의한 구난 계획의 수립이 선행되어야 한다. 잘못된 정보 분석과 구난 계획으로 인한 선박 구난은 구난 실패와 함께 2차 사고를 유발할 수 있기 때문이다. 그러나 현재 우리 나라는 열악한 구난 장비를 이용한 구난 종사자의 경험에 의존한 구난 작업이 대부분이어서 구난 작업 중의 2차 사고의 발생 위험에 크게 노출되어 있는 실정이다.

이와 같은 기존의 구난 작업에 대한 개선 방향을 제시하여, 보다 체계적이고 과학적인 구난 계획 수립에 실제적 도움을 주기 위해, 본 연구에서는, 좌초 선박의 종강도 안전성 및 부양 계산을 위한 프로그램의 개발 내용을 기술하고 및 그 적용 사례를 소개하였다. 추후 현 프로그램의 각종 기능에 대한 보완을 통해, 다양한 해난 사고의 구난 작업에 유용한 기술 지원용 도구로서 활용될 수 있을 것으로 기대하고 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부 특정연구과제인 “해난사고 대응기술개발”과제로 수행한 연구 결과의 일부이다.

참고문헌

- [1] Porricelli, J.D., Boyd, J.H., Jr., and Schleiffer, K.E., "Modern Analytic Techniques in Salvage Engineering Using Portable Computers", Trans. SNAME, Vol. 91, 1983.
- [2] Clay, J.S., "Salvage of Stranded Tankers with the Aid of Computers", Marine Technology, Vol. 22, No. 4, Oct., 1985.
- [3] Principles of Naval Architecture, 2nd Revision, E.V. Lewis, Ed., SNAME, 1988.
- [4] 강창구, "대형 유조선 사고 - 어떻게 대처할 것인가", 한국해양환경공학회 추계학술대회 논문집, Hot Issue Session 주제 발표, 1997.