한국항해항만학회지 제43권 제1호
J. Navig. Port Res. Vol. 43, No. 1 : 33-41, February 2019 (ISSN:1598-5725(Print)/ISSN:2093-8470(Online))
DOI : http://dx.doi.org/10.5394/KINPR.2019.43.1.33

침몰된 항타선 분석을 통한 한국선급 규칙 적용에 관한 연구

정원준* · 김정대** · 박성부*** · 정광효**** · † 이제명

*국방과학연구소, **,***부산대학교 대학원 조선해양공학과, ****,† 부산대학교 조선해양공학과 교수

A Study on the Adoption of Korean Register of Shipping Rules through the Analysis of Pile Driving Boat Capsizing

Won-Jun Chung · Jeong-Dae Kim* · Sung-Boo Park* · Kwang-Hyo Jung** · † Jae-Myung Lee*

**Agency for Defense Development, Daejeon, Korea*
,*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Graduate School of Pusan National University, Busan, Korea*
*****,† Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, Korea*

요 약 : 2012년 12월, 한국 울산항 앞바다에서 항타선이 침몰되었다. 본 사고 선박의 침몰원인은 인적요소, 기상악화 등의 복합적인 문제라 여겨진다. 사고 이후 선박안전기술공단에서는 리더부(크레인)는 충분한 안전율이 확보된 강도로 설계되었다고 결론을 내렸으나 국립과학수사연구원의 현장조사 감정서에서는 선박 침몰은 리더부의 파손으로 인한 것이라고 결론 내렸다. 이에 본 저자들은 선박안전기술공단이 선박 검사에 사용하는 선박안전법과 강도 계산 및 구조해석 방법 등을 검토하였다. 나아가 한국선급의 규칙을 기반으로 두어 선박 침몰원인을 분석하기 위한 유체동역학적해석 및 구조해석에 관한 수치시뮬레이션을 수행하였으며 국립과학수사연구원의 현장조사 결과와 유사한 결론을 얻을 수 있었다. 결론적으로, 본 사고 선박과 같이 선급 규칙의 적용을 받지 않고도 자유롭게 국내에서 운항 될 수 있는 항타선의 경우 유사한 사고가 발생할 수 있으며 이를 방지하기 위하여 한국선급 규칙의 적용을 받는 검사가 수행되어야 할 것임을 제안한다.

핵심용어 : 항타선, 유체동역학적해석, 구조해석, 침몰 사고, 선박 검사

Abstract : *In December 2012, a pile driving boat sunk off the coast of Ulsan port in Korea. The cause of capsizing of these boats was considered a complex problem. Although Korean Ship Safety Technology Authority concluded that leaders (cranes) of the vessel were designed with sufficient safety factors, National Forensic Service concluded that the capsizing was caused by the failure of leaders. This study reviewed the related laws, strength calculations, and structural analysis methods used by the Korea Ship Safety Technology Authority. In addition, numerical simulations were carried out on hydrodynamic analysis and structural analysis to analyze the cause of vessel capsizing based on the rules of the Korean Register of Shipping. The results were similar to those found by National Forensic Service. In conclusion, the study suggested that inspection especially for a pile driving boat subjected to the Korean Register of Shipping rules should be carried out to prevent the similar accident.*

Key words : *Pile Driving Boat, Hydrodynamic Analysis, Structural Analysis, Capsizing Accident, Ship Inspection*

1. 서 론

선박은 비록 개인 소유의 것이라 할지라도 공적인 의미를 갖고 있으므로, 안전성이 매우 중요하다. 또한, 선박의 침몰 사고는 인명피해와 경제적 피해를 주는 것 이외에도 기름 유출로 인한 환경오염 문제와 직결되기 때문에 피해가 크다. 이에 따라 선박 침몰 사고는 선주 측의 고의 침몰인지, 해상 환경에 의한 자연재해인지, 선박 검사 기관의 오류인지 등을 규명하여 책임 소재를 명확히 하는 것이 중요하다(Kim et al., 2008). 최근에는 컴퓨터 성능의 발달로 Lee et al.(2017)은 원양어선 제 501 오룡호 침몰 사고 당시 해상 환경을 그대로 모사한 수치시뮬레이션 방법을 통하여 선박의 침몰사고 원인을 분석하기도 하였다.

선박 사고의 문제를 방지하기 위해 각 국가는 공권력을 이용하여 선박검사제도, 항만국통제(PSC: port state control), 해상교통관제제도(VTS: vessel traffic service) 등의 안전제도를 운용하고 있다(Lee et al., 2011). 우리나라의 경우 선박을 운용하기 위해서는 법정선박검사를 의무적으로 받아야 한다. 법정선박검사는 선박의 안전에 대한 검사를 국가가 공익

† Corresponding author : 정회원, jaemlee@pusan.ac.kr 051)510-2342
* 정회원, wj6860@add.re.kr 055)540-6267
** 정회원, jeongdae3416@pusan.ac.kr 051)510-2340
*** 정회원, fpso1119@pusan.ac.kr 051)510-2343
**** 정회원, kjung@pusan.ac.kr 051)510-2343

적인 목적으로 시행하는 것으로 정부검사라고도 한다. 우리나라 정부는 이러한 법정선박검사를 수행 할 수 있는 권한을 한국선급(KR: Korean Register of Shipping)과 선박안전기술공단(KST: Korea Ship Safety Technology Authority)에 부여하고 있다. 한국선급은 국제해사법규 및 협약, 그리고 선급기술규칙에 근거하여 각종 검사를 시행하는 정부 대행 검사기관이다. 그리고 선박안전기술공단은 선박안전법 제 45조에 따라 설립된 특수법인으로 각종 선박에 관한 검사를 수행하고 있으며 이 역시 정부 대행 검사 기관이다. 만약 어떤 선박에 대해 선박안전기술공단으로부터 선박검사가 수행될 경우 법정선박검사가 수행된 것으로 간주되기 때문에 한국선급의 선박검사는 강제 사항이 아니게 된다. 일반적으로 우리나라에서는 중소형 선박 중 자국에서 운용되는 대부분의 내항선의 경우 선박안전기술공단의 승인으로 건조 및 운용되며 추가 비용이 드는 선급검사를 수행하지 않는 편이다.

본 연구에서는 2012년 한국 울산항 앞바다에서 운용된 내항선이었던 항타선(pile driving boat)이 계류된 상태에서 악화된 기상환경에 의해 전도되어 침몰된 사고를 다룬다. 국립과학수사연구원(NFS: National Forensic Service)은 현장조사 결과, 높은 너울로 인하여 선체가 흔들리면서 설치되어있던 리더 5열을 고정하는 벡스테이(backstay) 우측 메인 붐의 손상으로 리더부의 균형이 상실되어 전도되었다고 결론지었다(Kim et al., 2014).

높은 크레인을 싣고 다니는 항타선의 경우 일반 바지선과 달리 무게중심이 높고, 바람 및 파도에 취약한 특성상 유사한 사고가 재발할 가능성이 높다. 본 사고가 발생 한 이후, 선박안전기술공단은 도면 감리 용역을 수행하였다. 그 중 리더 강도계산 결과보고서에 따르면, 충분한 안전율이 확보 되어 있었다고 언급되고 있다(KST, 2013). 하지만 이는 국립과학수사연구원의 현장조사 결론에 비추어 봤을 때 상이한 결과임을 알 수 있다.

본 연구에서는 선박안전기술공단의 기술규칙과 사고 이후 수행된 도면감리 용역 결과 보고서를 검토하고 나아가 사고 선박에 관련된 법률 문서 및 국립과학수사연구원의 현장조사와 관련된 감정서 등을 검토하였다. 이후, 한국선급의 기술규칙에 기반을 두어 수치시뮬레이션 방법을 활용하여 선박의 안정성 및 구조 안전성을 정량적으로 평가하였으며 선박안전기술공단의 용역 보고서 결과와 비교하였다.

2. 사고 관련 검토

본 연구에서 다루는 선박 침몰 사건은 2012년 12월 14일 19시 13분 경 작업 중이던 2,600 톤 급 선박이 침몰한 사건이다. Fig. 1(a)은 본 사고가 일어나기 전 선박의 모습을 나타내며 리더의 우측 하부 대각지주가 누락되어 있음을 확인 할 수 있다. Fig. 1(b)은 사고 이후 선박의 리더와 백스테이 부분의 변형과 파손이 발생한 모습을 나타낸다. 사고가 발생한 선박의 종류는 항타선 중 DCM(deep cement mixing)선박으로서 일명 말뚝박기 선박으로 불리며 항구 및 항만 시설 또는 인공섬 구조물과 같은 근해 건설 공사 시 해저 퇴적물을 개선하기 위해 특별히 고안된 배이다.

2.1 사고 경위

사고 당일 사건 공사현장에는 풍랑예비특보가 발효되었고 07시 경 기상청은 “남서쪽에서 다가오는 저기압의 영향을 받아 바다의 물결은 남해동부와 동해 남부 전해 상에서 오전에는 0.5~2.5 m, 오후에는 1.5~4.0 m로 점차 매우 높게 일겠음”이라고 예보하였다. 하지만 본 선박은 13시가 되도록 작업을 멈추지 않았고 13시 30분경에 닻을 올리며 피항 작업을 시작하였다. 결국 악화된 기상 환경으로 5 개의 닻 중 3 개의 닻을 인양하지 못하였고 피항 작업이 지연되었다. 16시경 선장은 울산예인선조합에 연락하여 마력이 큰 예인선을 지원해 달라고 요청하여 16시 40분 경 예인선이 공사현장에 도착하였으나, 기상악화로 사건 선박에 접근이 불가능하여 회항하였다. 이후, 선장은 울산지방해양항만청에 대형 예인선 지원을 요청하였는데, 날씨로 인해 대형 예인선의 지원도 불가능하다는 답을 받았다. 결국 본 선박은 피항 계획을 다음날로 미루고 대기하기로 결정하였다. 19시 13분 경, 본 사건 선박은, 2.2 m 높이의 파도와 11.5 m/s 풍속의 바람에 의한 선체의 요동으로 수직형 리더 등 구조물을 지지하고 있던 지지대 중 약 40 m 높이에 위치한 우측 지지대의 메인 붐이 부러지면서, 균형을 상실한 리더 등 중장비가 선미 쪽 갑판으로 넘어져 무게중심이 선미부분으로 쏠린 결과, 선미부분부터 침수되면서 바다에 침몰하게 되었다. 이로 인해 사망 12명, 부상 9명 등의 인적피해가 발생하였다.

(a) Appearance of the vessel before an accident (Kim et al., 2014)

(b) Fractured and deformed state of the leader & the backstay (Kim et al., 2014)

Fig. 1 Features of the vessel (a)before and (b)after the accident

2.2 선박안전기술공단 규정 검토

본 사고 선박은 건설기계관리법 시행령 별표1의 제 23호에 따른 항타선으로, 선박안전법 시행규칙 제 6조 제 5호에 명시된 특수한 구조로 되어 있는 선박 중 하나이며, 이는 “선박안전법 적용을 받는 특수한 구조로 되어 있는 선박의 종류에 대한 고시”의 제 3조에 따라 선박안전법의 적용을 받아 검사가 수행되도록 명시되어 있다.

침몰 사고 발생 후, 본 선박은 선박안전법을 토대로 선박안전기술공단에 의하여 도면 감리가 수행되었으며 복원성 평가 및 구조 강도 평가 등이 수행되었다. 선박안전기술공단의 선박 검사의 경우 선급과 같은 자체 규칙을 토대로 수행되는 것이 아니라 정부의 법령을 참고하여 검사가 수행된다. 예를 들면 해양 수산부의 ″강선의 구조 기준″과 같은 고시를 참고하는 것이다. 하지만 이러한 고시에 따른 규정들에는 본 논문에서 연구된 항타선과 같은 특수한 선박의 경우 구조 강도 평가 등에 관한 구체적인 기준이 명확히 나와 있지 않다. 그나마 대표적으로 “강선의 구조 기준”, “부선의 구조 및 설비 등에 관한 기준” 등의 선박 규정이 본 사고 선박의 구조 안전성 평가를 수행하는데 사용되는 규정이라 볼 수 있다. 특히, “강선의 구조 기준” 내용을 살펴보면, 선박의 종강도 등과 같은 선체(hull) 및 선체의장에 대한 구조 안전성 평가를 다루고 있으며, 응력을 구하는 구체적인 식과 재료 및 작용 응력에 따른 허용응력 값까지 구체적으로 명시되어 있다. 하지만 본 사고 선박에 탑재된 85 m 리더와 같이 높은 크레인 부분의 구조 강도 평가까지는 충분히 다루지 못하고 있다. 이 부분은 “부유식 해상구조물의 구조 및 설비 등에 관한 기준” 등 해양 구조물 규정에서 다루고 있기는 하나, 크레인에 관한 도면 승인 및 구조 강도 평가는 주관청의 자체 규정을 만족하면 된다고 명시되어 있다. 여기서 주관청이라 함은 구조물의 기국 정부를 말하며 여기서는 정부를 대행하는 선박안전기술공단으로 봐도 무방하다. 즉, 규정상에는 리더부에 관한 강도 평가 절차나 강도 평가에 사용되는 이론, 식 등은 존재하지 않은 실정이다.

선박안전기술공단이 2013년 3월 26일에 수행한 도면감리 용역 보고서의 리더 강도 계산서를 살펴보면, 계산 방법은 유한요소해석 기반의 검증된 상용 프로그램이 사용되었으며 설계조건은 횡동요 주기 10초에 최대각도 15도, 종동요는 주기 10초에 최대각도 10도로 평가되었다. 계산 결과, 응력 수준은 최대주응력 값이 113 MPa로 판단되었으며 재료의 항복응력 235 MPa 의 약 48%의 수준으로 리더는 충분한 안전율을 확보하여 설계되었다고 결론 내렸다(KST, 2013).

하지만, 구조해석을 위한 설계 하중 조건을 선박의 동요 주기로 사용한 이유를 분명히 밝히지 않았으며, 명확한 해석 절차나 방법에 대한 설명이 없었다. 또한, 세 차례의 국립과학수사연구원 현장조사 결과 본 선박은 리더부의 구조 파손에 의하여 침몰되었다고 판명되었으며 이는 엄연히 선박안전기술공단과는 상반된 결과이다(Kim et al., 2014). 주관청의 역할을 수행하는 선박안전기술공단의 이와 같은 결론은 자칫 동종의 선박 사고를 유발할 가능성이 있다고 볼 수 있다. 선박안전법의 규정에서 다루는 선박의 크레인 부분의 구조 강도 평가에 관한 내용이 구체적이지 못하고 주관청 기준을 만족하면 된다는 식의 선박안전법의 내용은 여전히 위험 요소를 내재하고 있음을 알 수 있다.

2.3 한국선급 규정 검토

한국선급의 경우 일반적으로 선박검사에 대하여 “선급 및 강선규칙” 또는 “강재부선규칙”의 규정을 적용한다(KR, 2018a; KR 2018b). 이는 선박안전기술공단의 “강선의 구조 기준”과도 유사한 내용이 많으며 한국선급이 더 세부적인 사항들을 다루고 있음을 볼 수 있다. 하지만 이 규정 역시 본 사고 선박에 탑재된 85 m 리더와 같이 높은 크레인 부분의 구조 강도 평가까지는 충분히 다루지 못하고 있다.

한국선급의 해상 크레인 부분에 관한 규칙 및 규정은 해양구조물 관련 규칙에서 살펴 볼 수 있는데, 본 사고 선박 항타선의 경우 한국선급의 “이동식 해양구조물 규칙” 제 11장 “특정 해양구조물” 중에서 1절의 “크레인용 해양구조물”에 해당되는 선박으로 볼 수 있다(KR, 2017). 이에 따르면 본 선박의 선체구조 및 의장에 대하여는 본 규칙의 3장부터 6장의 규정을 적용 한다고 명시되어 있으며 종강도의 경우 “강재부선규칙” 4장을 적용한다고 명시되어 있다. 특히, 본 규칙 제 11장 102. 3.을 살펴보면, 크레인 페데스탈 및 지지구조의 상세 및 강도계산서를 검토용으로 제출해야 한다고 명시되어 있으며 허용응력은 4장 3절의 규정을 적용한다고 명시되어 있다. 강도계산 방법에 관한 내용은 본 규정과 “선급 및 강선 규칙” 그리고 “강재부선규칙”에 자세히 나와 있다.

“이동식 해양구조물 규칙” 4장 설계조건 내용을 살펴보면, 설계 중 고려해야 할 하중에는 풍하중, 파랑하중, 정하중 등이 있다. 또한, 한국선급 규정에는 크레인 높이에 따라 풍하중, 파랑하중, 정하중 등이 구조물에 미치는 영향을 상세히 기록해 두고 있다. 그럼에도 불구하고 선박안전기술공단은 크레인의 높이에 대한 다양한 하중들의 변화에 대한 고려 없이 횡동요와 종동요의 크기로만 강도평가를 수행하였다. 또한, 본 규정 4장 3절 전체강도해석에서 언급하고 있는 조합하중상태에 대하여 고려된 유한요소해석이 수행되었어야 하며 허용응력 역시 이에 맞추어 고려되었어야 했다.

3. 수치시뮬레이션 해석

수치시뮬레이션 해석은 한국선급의 규정에 기반을 두어 수행되었으며 이동식 해양구조물 규칙 4장의 설계하중 대신, 사고 당시 해상 환경 하중을 조합하여 Fig. 2와 같은 순서로 해석을 수행하였다. 선박의 유체동역학적해석 및 구조해석에 관한 상세한 이론적 설명은 Brebbia et al.(2013)에 수록되어 있다. 또한, 조합하중상태를 고려하였으며 이는 정하중과 풍하

중, 파랑하중 등 전체강도에 영향을 미치는 하중, 이들의 하중에 의하여 발생하는 구조물의 운동가속도, 경사에 의하여 발생하는 동하중이 동시에 작용하는 영향을 모두 고려하였다는 의미이다.

사고 당시와 동일한 환경 모사를 위하여 해상 환경 조사 및 사고 선박의 위치를 추정하였다. 해상 환경의 경우 기상청 자료를 참고 하였고 사고 당시 바람, 파도에 관한 자료를 얻을 수 있었다. 동일한 해상 환경 조건이라 할지라도 선박의 선수방향에 따라 바람 및 파도의 입사각이 달라지며 이는 선박의 운동응답(ship motion response) 값에 영향을 미친다. 따라서 선박의 운동 및 구조해석을 위해 선박의 정확한 사고 위치를 추정하여 바람 및 파도의 입사각을 판단해야 한다. 국립과학수사연구원의 사고 현장조사 결과를 통해 사고 당시 선박의 위치를 판단할 수 있었고 파악된 선박의 위치를 바탕으로 선박에 작용한 해상 환경 하중의 조합을 찾을 수 있었다.

사고 지역의 해상 환경은 시스템이 구축되어 있지 않아, 기상청 자료 중 실제 사고 해역과 가장 가까운 직선거리 15.7 km 떨어진 이덕서 지역의 기상환경 자료를 활용하여 추정하였다. 사고 당시의 파도는 유의파고 2.2 m, 최대파고 3.3 m, 파주기는 6 s였으며 파향은 남쪽과 남동쪽 이었다. 바람은 최대 풍속 11.5 m/s, 풍향은 남동쪽으로 추정되었다. Fig. 3은 이 정도의 바람과 파도가 각각 어느 정도 수준의 해상 환경을 나타내는지를 파악하기 위하여 사고 당시 연도를 기준으로 3년간의 이덕서 해상 데이터 분포 값을 확률밀도함수(pdf: probability density function)를 통해 나타내었다.

사고 선박 위치는 국립과학수사연구원의 사고현장 감식 결과를 바탕으로 Fig. 4와 같이 재구성 되었다. 초기에는 선박이 Fig. 4(a)와 같이 5 개의 계류선으로 고박 되어 있었으나 피항을 위하여 2 개의 계류선을 인양하게 됨으로써 당시 해상 환경에 의하여 Fig. 4(b)와 같이 선박의 초기 위치가 변경되었다. 이로 인해 사고 선박에 대한 파도와 바람의 입사각 역시 변경되었다. 초기 파도의 입사각은 120°~150°, 바람의 입사각은 150° 수준이었으나 계류선 인양에 따른 선박의 위치 변화로 인해 파도의 입사각은 150°~180°, 바람은 180° 수준으로 변경되었다.

3.1 유체동역학적해석

본 연구에서는 실제 도면을 참고하여 사고 선박의 선체가 모델링 되었으며 Fig. 5와 같이 대상 선박의 운동 응답 및 가속도를 도출하기 위해 프랑스 선급(BV: Bureau Veritas)의 내항성능(seakeeping) 해석 소프트웨어인 HydroSTAR v7.3이 사용되었다. HydroSTAR는 3D 패널법을 기반으로 하여 주파수 영역에서 선형 및 2차 radiation/diffraction 해석을 수행하며, 그 결과로 6 자유도 운동에 대한 진폭응답함수(RAO: response amplitude operator), 유체 동역학적 계수(부가 질량 및 감쇠 계수), 높이에 따른 가속도 등을 구할 수 있다. 사고 선박에 대한 유체동역학적 해석시 필요한 제원은 Table 1에 나타나 있다. 사고 선박에 대한 운동해석은 실제 사고 당시 선박의 배수량으로 수행되어야 하나 정확한 배수량 측정이 불가능 하므로 기록물로 남아 있었던 만재 상태(full load condition)와 밸러스트 상태(ballast condition)를 활용하여 해석이 수행되었다.

파 스펙트럼은 완전히 발달된 해역(fully developed sea)에 대표적으로 사용되는 Pierson-Moskowitz Spectrum을 사용하여 나타내었으며 바람 프로파일은 한국선급에서 제안하는 프로파일을 사용하여 나타내었다. 파 주파수는 0.05 rad/s에서부터 2.0 rad/s까지 0.05 rad/s 간격으로 총 40개를 사용하였고, 파향은 0°에서 180°까지 30° 간격으로 총 7가지 방향에 대해 해석을 수행하였다. 여기서 파향은 선체가 좌우 대칭이기 때문에 0° ~ 180° 까지만 수행하여도 전 방향 대한 결과를 얻을 수 있다. 또한, 구조해석에서 필요한 파도에 의하여 발생하는 리더부에 작용하는 파랑하중을 산정하기 위해 길이방향(x), 폭방향(y), 높이방향(z)에 대한 가속도를 구하였다.

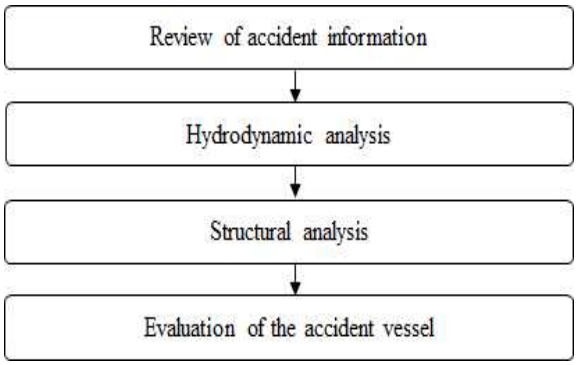


Fig. 2 Procedure of numerical analysis for the accident vessel

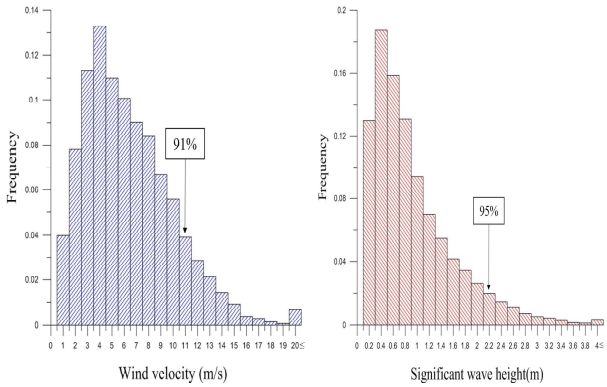


Fig. 3 In the past three years(2012~2014), the marine condition of Iduk-seo (a)wind velocity pdf data and (b)significant wave height pdf data

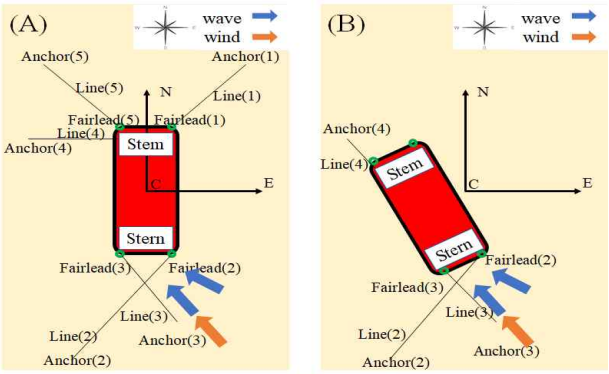


Fig. 4 The incident angle of the waves and wind according to the location of the vessel (a)at the initial time and (b)at the accident time

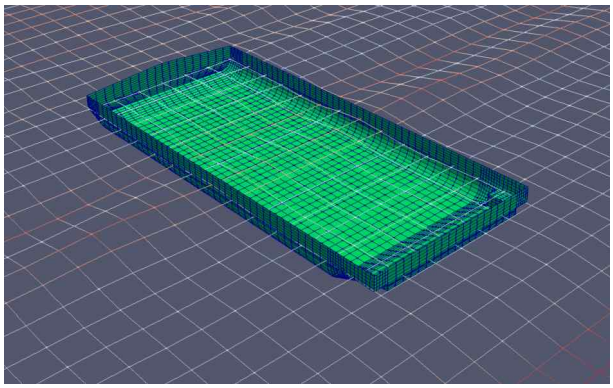


Fig. 5 Hydrodynamic analysis for the hull of the accident vessel through HydroSTAR ver. 7.3

3.1.1 유체동역학적해석 결과

선박의 6 자유도 운동에 대한 유체동역학적해석을 수행하였으며 Fig. 6은 그중 선박 안정성에 가장 취약한 횡동요(roll motion)에 대한 만재 배수량 상태에서의 진폭응답함수를 나타낸다. Table 2와 같이 선박의 메타센터를 이용하여 선박 복원성을 평가하였을 때 G_0M값이 기준 요구치를 충분히 만족함을 볼 수 있으며 본 결과는 선박안전기술공단의 값과도 유사함을 볼 수 있었다. G_0M의 미소한 차이는 자유수면 효과(free-surface effect) 반영 유무로 판단된다.

파도에 의한 리더부에 작용하는 파랑하중을 산정하기 위해 길이방향(x), 폭방향(y), 높이방향(z)에 대한 가속도가 각각 구해졌으며 대표적으로 Fig. 7은 만재 배수량 상태에서 리더 83 m에 길이방향으로 작용하는 가속도 값을 7 개의 각도에 따른 진폭응답함수로 나타낸 것이다. Table 3은 사고 당시의 해상환경을 토대로 실제 입사각으로 고려되는 두 가지 파도 입사각과 6 개의 높이에 따른 길이방향의 가속도 값을 나타낸다. 이 가속도 값은 선박의 질량과 함께 고려되어 구조해석에서 파도에 의한 하중조건으로 사용되었다.

Table 1 Main particulars of the accident vessel for hydrodynamic analysis

Particulars		Full load condition	Ballast condition
Length overall (m)		69	69
Breadth (m)		30.5	30.5
Depth (m)		5	5
Draft (m)		2.66	2.17
Displacement (ton)		5148.3	4100.3
Center of buoyancy / Center of gravity from stern within longitudinal direction (m)		32.9	32.9
Center of buoyancy/ Center of gravity within transverse direction (m)		0	0
Center of buoyancy/ Center of gravity from draft within height direction (m)		-1.26/ 14.07	-1.03/ 16.19
Radius of gyration (m)	Longitudinal direction	15.50	16.08
	Transverse direction	25.63	27.29
	Height direction	21.33	22.67
Area of wind for longitudinal direction (m^2)		798	785
Area of wind for transverse direction (m^2)		826	791

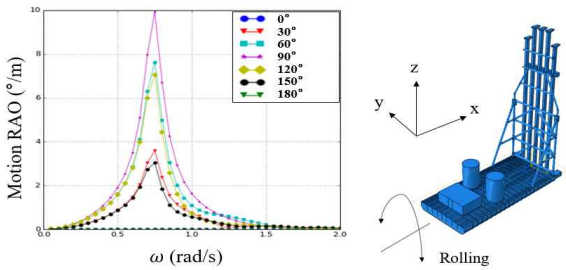


Fig. 6 RAO of roll motion of the DCM vessel in full-load condition

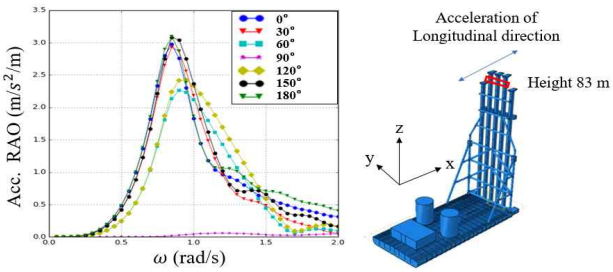


Fig. 7 RAO of acceleration of the DCM vessel for longitudinal direction in full load condition at 83 m height

Table 2 Comparison of G_0M of the accident vessel between KST and HydroSTAR

Displacement	Requirement	KST	Hydro-STAR
Full load condition (m)	$G_0M \geq 2.898$	17.597	16.10
Ballast condition (m)		24.123	21.99

Table 3 Acceleration and pressure of longitudinal direction applied on the leader induced by waves in an accident case under full load condition

Height (m)	x-direction acceleration (m/s^2)	
	wave direction 180°	wave direction 150°
0.0-15.3	0.103	0.066
15.3-30.5	0.369	0.440
30.5-46.0	0.638	0.828
46.0-61.0	0.906	1.213
61.0-76.0	1.170	1.592
76.0-91.5	1.438	1.978

3.2 구조해석

본 사고 선박의 구조해석을 위하여 유한요소해석 상용 프로그램인 ABAQUS 6.13이 사용되었으며 유체동역학적해석 결과를 통해 얻어진 해상 환경 하중 값을 적용하여 폰 미제스(von-Mises) 응력 수준 분석을 통한 선박의 구조 안전성 평가가 수행되었다. 구조해석에서는 실제 파손이 일어난 리더부의 모델링을 가지고 국부적인 해석이 수행되었다. 또한, 만재상태와 밸러스트 상태의 배수량에 의한 시나리오 2개, 파도 입사각(180°, 150°)에 따른 시나리오 2개를 고려하여 총 4개의 시나리오에 대하여 해석이 수행되었다. 본 선박에 사용된 일반구조용강재, SS 400의 재료 비선형 구간을 고려한 구조해석이 수행되었으며 서로 다른 두께를 지닌 쉘(shell) 요소를 활용한 모델링이 수행되어 시뮬레이션 시간을 줄였다.

Fig. 8은 구조해석을 위한 경계 조건과 하중 조건을 나타낸다. 국립과학수사연구원 감정서에 따르면 본 사고 선박은 사고 과정 중에 Fig. 4 (b)와 같이 앵커 1 개는 선수방향, 2 개는 선미방향으로 고박 되어 있었으며 몇 시간을 동일한 상태에서 버티다가 리더가 붕괴되어 침몰하게 되었다. 본 구조해석에서 리더부는 백스테이와 함께 선수에 위치한 상부구조물로서 선체와 동일한 운동을 가정하였다. 또한, 사고 당시 선박이 장시간 동일한 위치에 고정되어 있었다는 점, 구조물의 손상이 계류 장력의 영향을 직접적으로 받지 않는 약 40 m 높이에서 발생하였다는 점 등을 고려하여 고정지지 경계조건을 Fig. 8과 같이 적용하였다. 하중 조건으로는 구조물의 자중 및 기상환경에 의한 바람, 파도를 고려하였다. 모델의 자중의 경우 ABAQUS 프로그램에서 중력가속도, 재료 밀도, 모델링 치수를 통하여 자동적으로 구해지며 Table 4와 같이 국립과학수사연구원의 보고 자료 값과 일치하도록 교정 작업이 수행되었다. 바람의 경우, 바람 속도에 관한 바람프로필을 참고로 한국선급의 제안 식을 통해 바람 압력(wind pressure) 값을 산출하였다(KR, 2017). 선급 규칙에서 제시된 높이별 고도계수(height coefficient)를 기준으로 하여 6 단계로 이산화를 수행하였으며 결과는 Table 5와 같다.

유한요소해석에서, 응력과 같은 결과는 요소(element)의 크기나 숫자에 의해 크게 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 보다 정확한 근사 해를 찾으면서 해석 시간을 단축시킬 수 있는 최적의 요소망(mesh) 크기를 결정하기 위해 요소망 수렴성 연구 평가를 수행하였다. 기본적으로 요소망의 형태는 사각형이 사용되었으며 전체적으로는 거친 요소망(coarse mesh)을 형성 한 후, 관측하고자 하는 대상의 위치는 정밀 요소망(fine mesh)을 형성하였다. 최종적으로 최적요소 개수는 229,896 개로 산정되었다.

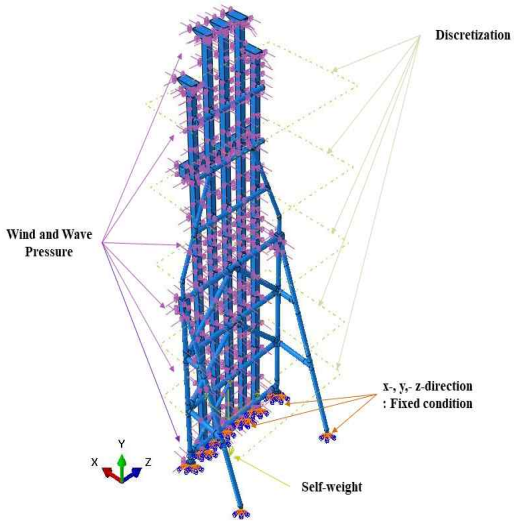


Fig. 8 Boundary and loading conditions for the local-structural analysis

Table 4 Total weight of the leader parts of the pile driving boat

Equipment	Unit weight(*ton*)	Quantity (EA)	Weight(*ton*)
Auger	25	5	125
Leader	123.75 (Leader 85 *m*)	3	591.5
	110 (Leader 80 *m*)	2	
Rod	1.2 (Rod)	132	323.4
	3 (Stir rod)	20	
	6 (Mid rod)	25	
	2.5 (Mid rod)	5	
	0.25 (Mid guide rod)	10	
Top sheave	7.5	3	35.5
	6.5	2	
Total			1,075.2

Source : Kim et al., 2014

Table 5 Discretization of wind pressure with heights

Height (*m*)	Height coefficient	Velocity (*m/s*)	P (*KPa*)
0.0-15.3	1.00	11.5	0.080805
15.3-30.5	1.10	12.9	0.101677
30.5-46.0	1.20	13.68	0.114344
46.0-61.0	1.30	14.23	0.123723
61.0-76.0	1.37	14.67	0.131493
76.0-91.5	1.43	14.91	0.135830

3.2.1 구조해석 결과

본 구조해석에서는 만재 상태와 밸러스트 상태의 배수량과 파도 입사각도(180°, 150°)를 고려하여 총 4가지 시나리오에 대해 해석을 수행하였으며 Fig. 9와 같이 폰 미제스 응력 수준을 통하여 구조 안전성을 평가하였다.

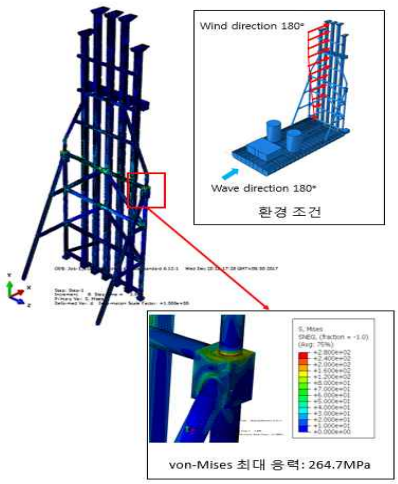
Fig. 9(a)와 (c)를 보면, 적재 상태에 따른 응력 수준은 미소한 차이를 나타낸다. 이는 적재 상태에 따른 선박의 6 자유도 운동의 차이가 리더부에는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 즉, 사고 당시 적재상태에 따른 선박의 침몰 기여도는 크지 않은 것으로 보인다.

Fig. 9(b) 에서와 같이 만재상태에서 파도의 방향이 150°일 때 최대 응력 값이 더 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 파도의 방향이 150°가 되면 폭 방향의 가속도를 추가적으로 받기 때문으로 보인다.

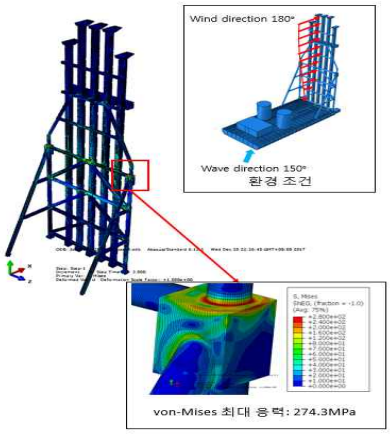
해석 결과, 본 선박은 사고 환경당시 최우측 백스테이 메인붐 연결부위에서 260 MPa이상의 최대 응력 값을 가졌을 것으로 판단된다. 이는 설계 허용응력(188 MPa)과 항복응력(235 MPa) 값을 초과하는 값으로 선박의 피로, 균열, 용접 결함과 부식 등을 고려한다면 충분히 구조물이 항복하여 전도 되었을 것으로 판단된다.

한편, 반대편인 최좌측 백스테이 메인붐 연결부위에도 응력 집중이 발생하는 모습이 보이기도 하였으나 모든 time step에서 최대 응력 수준은 최우측 백스테이 메인붐 연결부위에서 발생하였다. 이는 Fig. 1(a)와 같이 리더의 우측 하부 대각지주 누락이 구조 안전성에 악영향을 끼쳤기 때문인 것으로 추정된다. 따라서 최우측 백스테이 메인붐 연결부위에서 발생한 응력 수준이 허용응력 및 항복응력을 가장 먼저 초과하면서 구조물이 항복하여 전도되었을 것으로 판단된다.

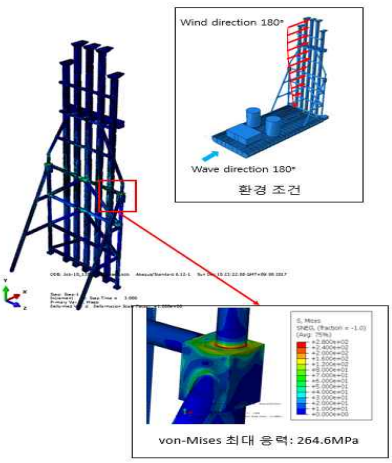
구조해석은 일반적으로 경계조건에서 응력이 집중되는 양상을 나타낸다. 본 구조해석의 경우에도 고정지지 경계조건 부위에서 응력 집중이 발생하였다. 하지만 그 값은 허용응력에도 한참 도달하지 못하는 수준이었다. Table 3, 5와 같이 바람과 파도는 상대적으로 구조물의 높이가 높을수록 크게 영향을 미친다. 본 구조물의 경우 대부분의 하중이 구조물 중간에 위치한 리더와 백스테이의 연결부위에 집중적으로 영향을 주었기 때문에 경계조건에서 응력 집중이 덜 하였던 것으로 추정된다.



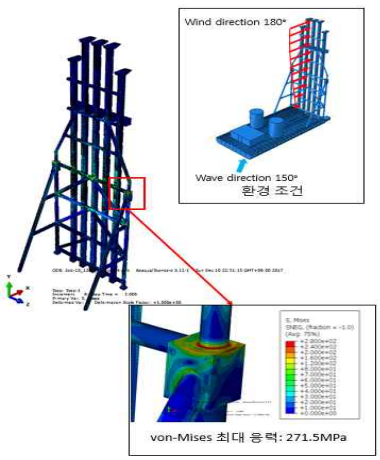
(a) Full load condition, wave 180°, maximum von-Mises stress



(b) Full load condition, wave 150°, maximum von-Mises stress



(c) Ballast condition, wave 180°, maximum von-Mises stress



(d) Ballast condition, wave 150°, maximum von-Mises stress

Fig. 9 Structural analysis results with von-Mises stresses

4. 토 론

사고 당시 해상 환경을 분석해본 결과, 한국선급 “이동식 해양구조물 규칙” 제 4장에 명시되어 있는 50년 주기 내에 예상되는 가장 가혹한 해상 조건에 한참 미치지 못한 해상 환경이었음에도 불구하고 본 선박 사고가 일어났음을 발견할 수 있었다. 2013년 3월 26일 선박안전기술공단에서 수행된 도면 감리 용역 보고서에서는 리더 강도계산을 횡동요와 종동요만을 보고 안전하다고 판단하였다. 하지만 한국선급에서 제시하는 규칙에 따르면 정하중, 바람하중, 파랑하중 등의 설계 하중을 고려하여 조합하중 상태를 고려한 강도 계산을 수행할 것을 언급하고 있다. 본 연구에서는 한국선급 규칙에 기반을 두어 유체동역학적해석과 구조해석을 수행하였다. 해석 결과 최대 폰 미제스 응력 수준이 260 MPa임을 알 수 있었고, 이는 선박안전기술공단의 응력 수준, 주응력 값 113 MPa 값과는 상이한 결과임을 알 수 있었다. 국립과학수사연구원 현장조사 결과 본 선박은 리더부의 구조 파손에 의하여 침몰되었다고 판명되었으며 이는 엄연히 선박안전기술공단과는 상반된 결과임을 알 수 있다. 따라서 선박안전법을 따르는 선박안전기술공단의 항타선에 관한 리더 강도 계산 방법의 검토가 필요하며 이는 한국선급의 규칙으로 대체 될 수 있다.

국내 선박 검사 기관이 검사한 선박이 외국 항구에 기항하다가 항만국통제에 지적당했을 경우 해양수산부로 즉각 연락이 오며 본 검사 기관은 여러 방면으로 불이익을 당하기 때문에 아주 철저한 검사를 하게 된다. 선주 역시 이러한 항만국통제 때문에 공인된 선급 업체에 검사를 맡긴다. 문제는 국제항해를 하는 외항선들이 아니라 국내항해를 하는 내항선들이다. 일반적으로 내항선의 경우 선급의 검사는 선택사항이기 때문에 선주는 굳이 외국을 나가지 않을 것이라면 추가적인 금액을 지불하면서까지 선급 검사를 받지 않으려고 한다. 지금 이러한 내항선들이 사각지대에 있는 것이다. 즉, 선박안전기술공단의 검사만 받으면 국내에서는 자유롭게 운항 될 수 있다는 것이다. 본 연구에서 다루고 있는 항타선 역시 내항선으로서 선급의 검사가 수행되지 않았던 선박이었다. 이와 같은 추세가 지속된다면 내항선으로 운용되는 항타선은 충분히 선급검사를 받지 않고도 운항 될 수 있고 동종의 사고가 발생할 가능성이 높다고 볼 수 있다. 따라서 항타선의 경우 선박안전기술공단의 규칙 적용 대신 한국선급의 규칙을 적용하는 등의 대책이 필요하다.

5. 결 론

본 사고 선박의 침몰원인은 인적요소, 기상악화 등의 복합적인 문제라 여겨진다. 하지만, 사고 당시 파도 높이와 주기가 기본적인 설계파 수준에 미치지 못함에도 불구하고 침몰 사고가 발생한 점과 선박안전기술공단에서는 리더부 강도 부분은

충분한 안전율이 확보 되었다고 결론 내렸으나 국립과학수사연구원은 현장조사 결과, 리더부의 파손으로 선박 침몰이 일어났다고 결론 내린 점 등에서 상이한 부분이 있었다. 따라서 본 저자들은 선박안전기술공단이 선박 검사에 사용하는 선박안전법과 강도 계산 및 구조해석 방법 등을 검토하였다.

나아가 한국선급의 규칙을 검토하고 실제 사고 해상 환경을 모사하여 침몰 선박에 대한 수치시뮬레이션을 수행하였다. 하지만 본 연구의 검증에서 어려운 점은 검증이 가능한 모델실험이나 실선에 대한 자료가 한정되어 있다는 것이다. 따라서 이러한 수치시뮬레이션의 보다 정확한 검증을 위해서는 향후 비교 가능한 실선에 대한 자료나 실험 데이터가 필요해 보인다.

그럼에도 불구하고 본 연구 결과는 국립과학수사연구원의 현장조사 결과와 유사한 결론을 얻을 수 있었다. 따라서 본 저자들은 본 사고 선박과 같은 항타선의 경우 한국선급의 규칙을 적용하여 선박 검사가 수행 되어야 한다는 것을 제안한다. 특히, 항타선이 내항선일 경우 선박안전기술공단의 규칙만 만족하면 국내에서 자유롭게 운항될 수 있는 사각지대에 놓일 수 있다. 유사 선종의 사고를 방지하기 위해서라도 SCP(sand compaction pile)선박, DCM선박과 같은 항타선에 대하여 한국선급 규칙 적용이 필요하다.

후 기

이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2018R1A2B6007403).

이 논문은 2013년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2011-0030013).

이 논문은 산업통상자원부의 재원으로 추진 중인 '한-영 해양플랜트 글로벌 전문인력 양성사업(N0001288)'의 지원으로 수행된 연구 결과임.

References

[1] Brebbia, C. A. and Walker, S.(2013), Dynamic analysis of offshore structures, Newnes-Butterworths Press, pp. 1-327.

[2] Kim, E. S. and Kim, J. H.(2014), “Forensic Engineering Study on Structure Stability Evaluation of Deep Cement Mixing Vessel using ADINA Software”, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, 38.11: pp. 1283-1290.

[3] Kim, S. W. and Kim, D. H.(2008), “A study on applying of the ITC-Hulls & ISM Code for the Accident of the Foundering Ship”, Journal of Korean Navigation and Port Research, 32(3), pp. 229-235.

[4] Korean Register of Shipping(2017), “Rules and Guidance for the Classification of Mobile Offshore Units”, p. 92.

[5] Korean Register of Shipping(2018a), “Rules and Guidance for the Classification of Steel Ships”, p. 244.

[6] Korean Register of Shipping(2018b), “Rules for the Classification of Steel Barges”, p. 84.

[7] Korean Ship Safety Technology Authority(2013), “L 69m geub hangman-gongsayong hangtaseon[Seok-Jung 36ho] domyeon-gamli”, p. 54.

[8] Lee, J. S., Jung, H. S., Oh, J. H. and Lee, S. G.(2017), “A Study on Flooding·Sinking Simulation for Cause Analysis of No. 501 Oryong Sinking Accident”, Journal of Korean Navigation and Port Reserch, 41(6), pp. 451-466.

[9] Lee, Y. C., Nam, D. and Lee, S. I.(2011), “A study on the Legal Responsibility of Ship Survey”, Maritime Law Review, 23(2), pp. 25-53.

Received 27 June 2018
Revised 22 January 2019
Accepted 28 January 2019