

[특별조사 2024-007]



해양사고 특별조사보고서

- 유류 및 액체화학품산적운반선 거영썬호 전복사고 -

사고일자 : 2024.03.20.

공표일자 : 2024.12.27.



중앙해양안전심판원 특별조사부

참고사항

이 보고서는 「해양사고의 조사 및 심판에 관한 법률」 제18조의3에 따라 해양사고의 원인을 규명하고 사고 교훈을 공유함으로써 향후 유사한 해양사고 발생을 방지하기 위하여 작성되었습니다.

이 보고서의 기술된 관련 법령 및 기관 명칭 등은 보고서 작성 당시 시점을 기준으로 작성되었음을 알려드립니다.

Contents

1. 사고 개요	2
2. 사실 정보	5
2.1 선박 제원	5
2.2 선박관리 및 운항	8
2.3 승선원 구성	9
2.4 화물의 적재	10
2.5 앵커 파주력	13
2.6 선박의 복원성	17
2.7 선박의 동요	19
3. 사고 경위	21
3.1 평형수 펌프 고장	21
3.2 출항 및 기상악화	21
3.3 피항 및 투묘	23
3.4 선체 전복	25
3.5 선원구조 및 피해 사항	26
4. 사고 분석	28
4.1 선박 복원성 검토 결과	28
4.2 동적 운동 해석 및 전복 시뮬레이션	32
4.3 화물적재 계획서 작성 부적절	33
4.4 만재흡수선 초과 상태 출항	34
4.5 정박지 위치 선정 부적절	35
4.6 악천후 시 정박당직 수칙 미이행	36

5. 결론	38
6. 권고	40
6.1 화물적재 계획서 수립 철저	40
6.2 만재흡수선 초과 운항 금지	40
6.3 피항 시 안전한 정박지 선정	40
6.4 악천후 시 정박당직 수칙 준수 철저	41

section

1

사고 개요

1. 사고 개요

- 1.1 거영썬(KEOYOUNG SUN)호는 일본의 사사키조선소에서 건조된 선박으로 총톤수는 597톤(ton), 국제톤수 870톤, 길이(등록장) 64.01미터(m), 너비 10.60미터, 깊이 4.60미터이며, 최대출력 1,176킬로와트(kW)의 디젤기관 1기를 장치하고 있는 대한민국 제주시 선적의 유류 및 액체화학품산적 운반선이다.
- 1.2 거영썬호는 2024년 3월 17일 11시경 일본 히메지(Himeji)항에 도착하여, 다음날인 3월 18일 09시 45분경부터 아크릴산(Acrylic Acid)¹⁾ 화물의 적재 작업을 시작하였고 같은날 14시 30분경 화물 978톤을 적재하고 출항하였다. 출항 시 흘수는 선수 3.85미터, 선미 4.45미터였다.
- 1.3 본선은 당초 중국 타이싱(Taixing)항에 입항하려 했으나 히메지 항에서 화물 적재 중 평형수가 배출되지 않아 평형수 펌프 수리를 위해 목적지를 부산으로 변경하였고, 부산항 도착 예정 시간은 2024년 3월 19일 23시경이었다.
- 1.4 거영썬호는 3월 19일 12시경 간몬해협을 통과하였으며, 3월 19일 17시경 선장은 기상 상태가 좋지 않으며, 선체가 좌현으로 기울고 있다고 선사에 보고하였다. 같은 날 20시경 선장은 기상이 더욱 나빠지고 있으며 선속이 3 내지 4노트로 떨어져 항해가 어려운 상황으로 간몬해협 인근 해상에 투묘해야겠다고 선사에 보고하였다.
- 1.5 본선은 3월 19일 20시경 피항을 위해 일본 시모노세키 북서방 약 7해리 떨어진 해상까지 항해하였고 3월 20일 02시 05분경 우현 앵커를 6샤클(Shackle)²⁾ 신출하여 단묘박(Lying at single anchor) 하였다. 투묘 위치는 북위 34도 03분 31초, 동경 130도 50분 11초였다.

1) 아크릴산(Acrylic Acid) : 무색의 부식성 및 인화성 액체로서 물에 잘 섞이며 해양오염 물질임, 인화점 48 내지 55°C, 녹는점 13°C로 급격하게 증합하며 적절하게 안정화하지 않으면 화재 및 폭발의 위험이 있음. 화재 시 자극성, 부식성, 독성 가스가 발생할 수 있으며, 인체에 유해하며 피부 및 점막을 부식시킴, 타는 동안 열분해 또는 연소에 의해 자극적이고 매우 유독한 가스가 발생될 수 있음(Material Safety Data Sheet 발췌)

2) 앵커체인 길이의 단위로 1 샤클(Shackle)은 27.5미터임

- 1.6 투묘 중이던 선체는 악천후로 인해 주묘되었으며, 2024년 3월 20일 06시경 선장은 기상 악화로 선체가 좌현 쪽으로 기울고 있다고 선사에 보고하였다. 이후 07시경에는 선박이 좌현으로 많이 기울어 선원들의 구조가 필요하다고 선사에 보고하였다. 선체는 좌현쪽으로 계속 기울다 2024년 3월 20일 07시 53분경 일본 후타오이 섬 남동방 약 3.5해리 해상(북위 34도 03분 11초, 동경 130도 50분 58초)에서 전복되었다.
- 1.7 악천후 상황에서 선체가 전복되어 선원들은 구명정에 승선하지 못하고 구명동의만 착용한 채 바다로 추락하였다. 전복 후 약 50분 후인 3월 20일 08시 15분경부터 일본 해상보안청에서 구조작업을 진행하였으나 총 11명의 선원 중 일등기관사만 생존하였고, 선장과 기관장을 포함한 나머지 선원 10명은 사망하였다. 전복된 선체는 회수되었으나 침수로 손상되어 전손 처리되었다.

section

2

사실 정보

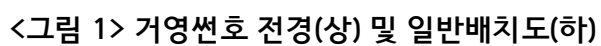
2. 사실 정보

2.1 선박제원

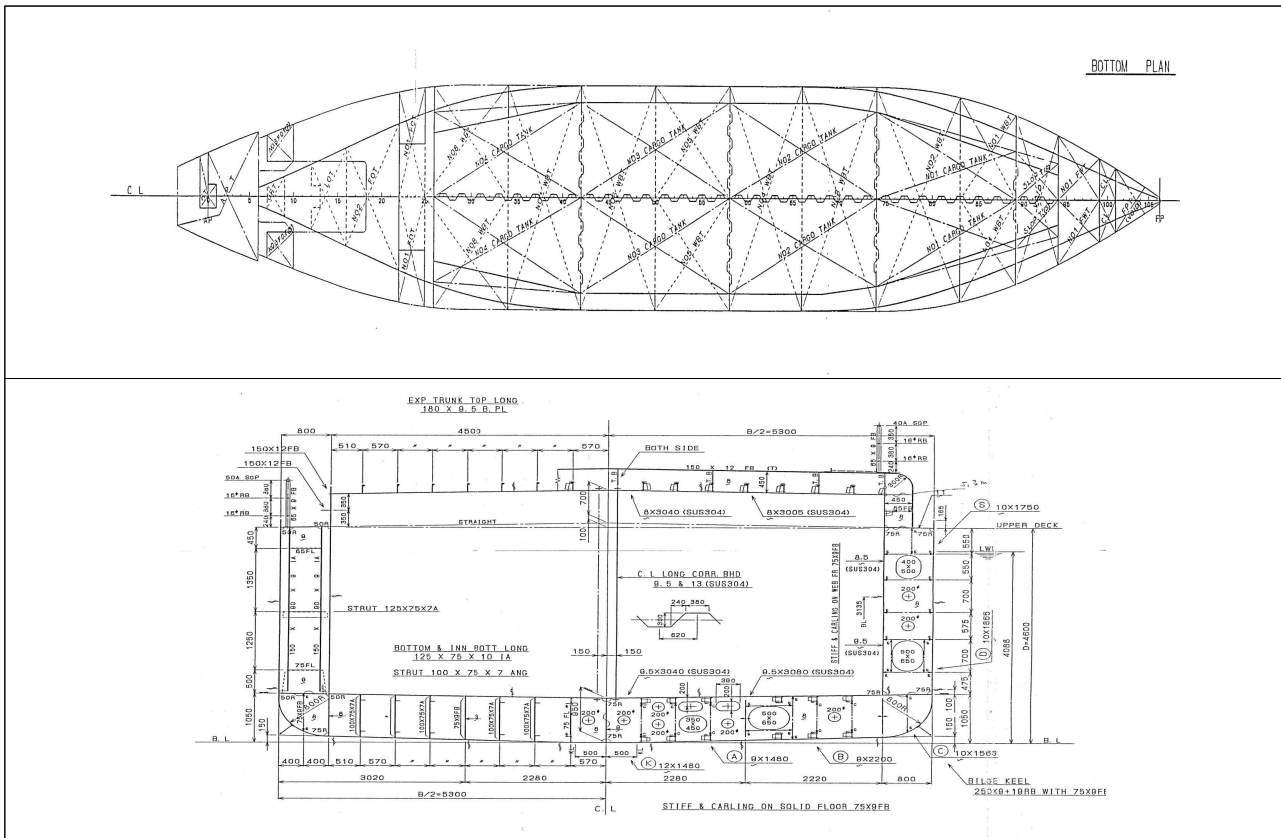
2.1.1 주요 명세

선 명	거영썬호(KEOYOUNG SUN)
국 적	대한민국
선 적 항	제주시
IMO 번호 / 선박번호	9146924 / JJR-059071
선박용도	유조선(유류 및 액체화학품산적운반선)
선박소유자	거영해운(주)
안전관리사	거영해운(주)
조 선 자	사사키조선소(Sasaki Shipbuilding Co. Ltd.)
진수일(용골거치일)	1996년 5월 1일(3월 28일)
선박검사기관	사단법인 한국선급
총톤수/국제톤수/재화중량톤수(톤)	597 / 870 / 1,168
길 이(미터)	64.01
너 비(미터)	10.60
깊 이(미터)	4.60
주 기 관	디젤엔진 1기
최대출력(킬로와트)	1,176
추 진 기	나선추진기 1기

2.1.2 거영썬호는 일본의 사사키조선소에서 건조된 선박으로 총톤수 597톤, 길이 64.01미터, 너비 10.60미터, 깊이 4.60미터이며, 최대출력 1,176킬로와트의 디젤기관 1기를 장치하고 있는 대한민국 제주시 선적의 유류 및 액체화학품산적운반선이다.



2.1.3 거영선호는 선미에 선교가 위치해 있는 선미선교형 선박으로 선수에서 선미 방향으로 화물 탱크가 배치되어 있다. 화물 탱크는 선수부터 선미 방향으로 1번부터 4번까지 구분되어 있다. 1번 화물 탱크 앞쪽으로 슬롭(SLOP) 탱크가 위치하고 있고, 슬롭 탱크부터 4번 화물 탱크까지 총 10개의 탱크가 좌우현으로 분리되어 있다. 평형수 탱크는 화물창 바깥쪽으로 1번부터 8번까지 구분되어 있다. 이 중 2번, 3번, 4번, 6번, 7번은 좌우현 구분 없이 하나의 탱크로 되어 있고 나머지 1번, 5번 및 8번은 좌우현으로 구분되어 있다.



〈그림 2〉 거영선호 화물 탱크 및 평형수 탱크 배치도

2.1.4 거영선호는 주요 항해 및 통신장비로 레이더(RADAR) 2대, 선박 자동식별장치(AIS) 및 위성항법장치(GPS) 등을 설치하고 있으며 전자해도표시시스템³⁾(ECDIS)과 항해자료기록장치⁴⁾(VDR)는 설치되어 있지 않다. 주요 구명설비로는 자유강하식구명정 1대, 구명뗏목 2개 및 구명부환 등을 보유하고 있다.

3) 전자해도표시시스템(Electronic Chart Display and Information System) : 항해자의 항로 계획을 보조하고 항해 관련 정보를 표시하는 항해정보시스템, 2014년 7월1일 이후 건조된 탱커 이외의 3천톤 이상 1만톤 미만의 화물선 등이 설치대상이나, 본선은 탱커선이지만 870톤으로 미대상

4) 항해자료기록장치(Voyage Data Recorder) : 해양사고 발생 전후의 선박 위치, 움직임, 물리적 상태 등의 정보를 안전하고 검색 가능한 형태로 저장하기 위해 설치하며 입력 신호 소스, 신호 처리 및 인코딩, 재생 장비, 전원 공급 장치 등 모든 항목을 포함한 완전한 시스템을 말함((RESOLUTION MSC.333(90), 22 May 2012)), 2002년 7월 1일 이후 건조된 여객선 이외의 3천톤 이상의 선박 등이 설치대상이나 본선은 870톤으로 미대상

2.2 선박관리 및 운항

- 2.2.1 거영썬호의 소유자는 거영해운(주)(KEOYOUNG SHIPPING CO., LTD)으로 2002년 6월 설립 이후 현재까지 유류 및 액체화학품을 전문적으로 운송하여 왔다.
- 2.2.2 거영해운(주)은 사고 시점 기준으로 유류 및 액체화학품 운반선 15척을 소유하고 있었으며 이중 11척은 자체적으로 안전관리를 시행하고 나머지 4척은 외부업체에 안전관리를 위탁하고 있었다.⁵⁾ 거영썬호는 자체적으로 안전관리를 하고 있던 선박이다.
- 2.2.3 거영해운은 안전관리책임자 이하 공무팀, 안전품질관리팀, 운항팀 및 해무팀을 두고 있었다. 공무팀에서는 선박의 성능 유지·개선을 위한 선용품 보급 및 선박수리 업무를 담당하고, 안전품질관리팀은 선박 안전관리문서, 외부 점검 대응 및 인증심사 업무를 수행하였다. 운항팀은 선박 운항 관리를 해무팀에서는 선원 관리업무를 맡고 있었다.
- 2.2.4 거영썬호는 2023년 4월 9일 대한민국 감천항에서 (사)한국선급으로부터 1종 중간검사를 받았으며 2025년 3월 11일까지 유효한 선박검사증서(항행구역은 근해구역)를 보유하고 있었다. 액체화학품의 국제운송을 위해 필요한 국제위험화학품 산적운송 적합증서⁶⁾도 2023년 4월 9일 감천항에서 중간검사를 받았으며 2025년 3월 11일까지 유효하였다.
- 2.2.5 거영썬호는 2023년 7월 2일 일본 고베에서 (사)한국선급으로부터 본선의 안전관리체제에 대한 심사를 받았으며 2025년 9월 10일까지 유효한 선박안전관리증서⁷⁾를 발급받았다.
- 2.2.6 거영썬호는 주로 한국, 중국, 일본 항로를 운항해 왔다. 직전 항차는 울산항에서 폴리페릭 설페이트(Poly Ferric Sulfate)를 적재하여 일본의 호리카와(Horikawa)항에서 하역하였고 이번 항차는 일본의 히메지항에서 적재한 아크릴산(Acrylic Acid)을 중국 타이싱(Taixing)항에서 양하할 계획이었다.

5) 2024년 12월 기준, 거영해운은 자체 안전관리하던 선박을 모두 전문업체에 위탁하여 관리하는 등 안전관리체계를 개편함

6) IBC Code(International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Dangerous Chemicals in Bulks)에 따라 국제위험화학품산적운송적합증서 별지1에 등재된 케미컬 화물을 운송할 수 있음(아크릴산 운송 가능)

7) 선박안전관리증서(SMC: Safety Management Certificate)

2.3 승선원 구성

2.3.1 사고 당시 거영썬호에는 총 11명의 선원이 승선하고 있었다. 이중 선장과 기관장은 한국인이고 인도네시아 국적 선원이 8명, 중국 국적 선원은 1명이었다.

2.3.2 선장은 1급 항해사 면허를 소지하고 있었고 총 승선경력은 약 42년이며 선장으로는 약 27년 동안 승선하였다. 거영해운 소속 선박으로는 세 번째 선박으로 2023년 11월 29일 본선에 승선하였다.

2.3.3 기관장은 2급 기관사 면허를 소지하고 있었고 총 승선경력은 약 31년 3개월이며 기관장으로는 약 15년 동안 승선하였다. 거영해운 소속 선박으로는 두 번째 선박으로 2024년 1월 16일 본선에 승선하였다.

부서	직책		승선인원(국적)	비고
갑판부	사관	선장(Master)	1명(한국)	사망
		일등항해사(Chief Officer)	1명(인도네시아)	사망
		이등항해사(2 nd Officer)	1명(인도네시아)	사망
		삼등항해사(3 rd Officer)	1명(인도네시아)	사망
	부원	갑판장(Bosun)	1명(인도네시아)	사망
		갑판수(Able Seaman)	1명(인도네시아)	사망
			1명(인도네시아)	사망
		조리장(Chief Steward)	1명(중국)	사망
기관부	사관	기관장(Chief Engineer)	1명(한국)	사망
		일등기관사(1 st Engineer)	1명(인도네시아)	생존
		이등기관사(2 nd Engineer)	1명(인도네시아)	사망
		총원	11명	

<표 1> 거영썬호 선원 구성

2.4 화물의 적재

2.4.1 거영선호가 히메지항에서 출항할 당시 화물적재 계획서(Stowage Plan)에 따르면(그림 4 참조) 아크릴산(Acrylic Acid) 978톤, 연료유 49킬로리터(kl), 청수 76톤, 불명중량(Unknown Constant) 70톤 등을 적재하였으며 이들을 더한 배수량(Displacement) 계산값은 1910.3톤이다.

2.4.2 한편, 출항보고서에 기재된 흘수인 4.15미터(선수 3.85미터, 선미 4.45미터)를 본선 유체정역학표(Hydrostatic Table)에 대입하여 배수량을 찾아보면 2048.2톤으로 화물적재 계획서를 토대로 계산한 배수량 보다 137.9톤 많게 계산된다. 이는 본선이 출항할 당시 흘수를 잘못 읽어 기재 하였거나 또는 흘수값이 맞다면 화물적재 계획서에 포함되지 않은 137.9톤의 중량이 본선에 존재하고 있다는 것을 의미한다.⁸⁾

보낸 날짜:	2024년 3월 18일 월요일 오후 7:00
받는 사람:	운항; 해무
참조:	공무; 안품
제목:	KEOYOUNG SUN-V24-013 SAILING REPORT AT HIMEJI
첨부 파일:	KY SUN-ALL DOCS AFTER LOADING HIMEJI.zip

TO : KEOYOUNG SHIPPING CO.,LTD

FM : KEOYOUNG SUN

<<< SAILING REPORT >>>

1). PORT : HIMEJI , JAPAN

2). SAILING TIME : 03/18/1430 LT

3). CARGO NAME : ACRYLIC ACID

4). BUNKER : MGO :49.32 KL SYS :855 Ltr FW :76 MT

5). SAILING DRAFT : F : 3.85 M / A : 4.45 M

6). NEXT PORT ETA BUSAN : 03/ 19/2300 LT

7). REMARK : PLEASE FIND ATTACHED DOCUMENT

GOM : 0.726 M ,SHERRING FORCE : 165 MT 11.5. % / , BM : 2720 MT : 76.3 %

BST RGDS/CAPT

<그림 3> 거영선호의 히메지항 출항보고서

8) 화물적재 계획서에는 평형수가 없는 것으로 기재되어 있지만, 본선이 히메지항에서 화물작업 시 평형수 펌프 고장으로 평형수 배출이 완전히 되지 않았다는 점 등을 감안할 때 불명중량 137.9톤은 본선에서 배출되지 않은 평형수로 추정해 볼 수 있다.

STOWAGE PLAN

AFTER LOADING (m3)

SHIP NAME

KEOYOUNG SUN

VOY. NO.

24-13

DATE

18-Mar-24

SLOP-P	23.215	m'	SLOP-S	23.215	m'
Sounding	0.000	%	Sounding	0.000	%
	0.000	M/T		0.000	M/T
	0.000	m'		0.000	m'
1-P	128.383	m'	1-S	128.383	m'
Sounding	3.595	m	Sounding	3.620	m
	81.563	%		81.911	%
	109.722	M/T		110.190	M/T
	104.713	m'		105.160	m'
2-P	189.987	m'	2-S	190.654	m'
Sounding	3.780	m	Sounding	3.725	m
	86.686	%		85.424	%
	172.571	M/T		170.655	M/T
	164.693	m'		162.864	m'
3-P	193.394	m'	3-S	194.027	m'
Sounding	2.175	m	Sounding	2.170	m
	49.780	%		49.691	%
	100.876	M/T		101.026	M/T
	96.271	m'		96.414	m'
4-P	179.588	m'	4-S	180.221	m'
Sounding	2.505	m	Sounding	2.508	m
	56.571	%		56.643	%
	106.455	M/T		106.966	M/T
	101.595	m'		102.083	m'

S.G in air	1.0537	TTL	933.793	m'
Temp'ture	20.3	TTL	978.462	M/T
V C F	0.00105	TTL	67.440	%

TOTAL CAPA INCLUDE SLOP	1431.067	m'
TOTAL CAPA EXCLUDE SLOP	1384.637	m'
NO. 1 GROUP 1 & 3 P/S	644.187	m'
NO. 2 GROUP 2 & 4 P/S	740.450	m'
SLOP TANK	46.430	m'

LAST THREE CARGO			TANK- SUS 304
TANK	1ST	2ND	3RD
SLOP			
1P/S	POLYFERRIC SULPHATE	DINP	ACRYLIC ACID
2P/S	POLYFERRIC SULPHATE	DINP	ACRYLIC ACID
3P/S	POLYFERRIC SULPHATE	DINP	ACRYLIC ACID
4P/S	POLYFERRIC SULPHATE	DINP	ACRYLIC ACID

CARGO INFORMATION		
CARGO NAME	ACRYLIC ACID	
LOAD PORT	HIMEJI	
DISCH PORT	TAIXING	
DENSITY	1.0548	IN VACUM 15°C
V C F	0.00105	
B/L Q'TY	979.714	M/T
S/F Q'TY	978.462	M/T

TANK CLEANING METHOD	TANK - SUS 304
1. B/W with sea water 3 cycles	
2. Flushing with fresh water	
3. Steaming for 2 hours each tank 60°C	
4. Draining of tanks, line and pumps	
5. Mopping & Drying	

ARRIVAL CONDITION	
FORE DRAFT	1.50 M
AFT DRAFT	3.10 M
FO / DO/ LO	49.0 K/L
F/WATER	77 m'
BALLAST	0 m'
CONSTANT	70 M/T
SLOP WATER	0 m'

DEPARTURE CONDITION	
FORE DRAFT	3.85 M
AFT DRAFT	4.45 M
FO / DO/ LO	49.0 K/L
F/WATER	76 m'
BALLAST	0 m'
CONSTANT	70 M/T
SLOP WATER	0 m'

Discharging procedure : Tanks no. 1→ 3→2→4 (P/S)

ASEP SAEPUDIN JUHRI

MC/DEP OFFICER

MASTER

Captain BEOMJIN

MASTER

<그림 4> 거영썬호 화물적재 계획서

***** * HYDROSTATIC PARTICULARS - 1 * *****								
DRAFT B.O.K	DISPT	MOLDED VOLUME	T.P.C	M.T.C	L.C.B	L.C.F	K.B	K.M.T
M	TON	M**3	TON/CM	M*TON	M	M	M	M
4.10	2020.07	1961.44	5.61	21.50	0.505	-0.788	2.152	4.325
4.11	2025.67	1966.88	5.62	21.54	0.502	-0.798	2.157	4.326
4.12	2031.26	1972.33	5.62	21.58	0.498	-0.809	2.162	4.327
4.13	2036.86	1977.77	5.62	21.63	0.495	-0.819	2.167	4.327
4.14	2042.51	1983.27	5.63	21.67	0.491	-0.829	2.173	4.328
4.15	2048.16	1988.77	5.63	21.72	0.487	-0.839	2.179	4.330
4.16	2053.82	1994.27	5.64	21.76	0.484	-0.849	2.184	4.331
4.17	2059.47	1999.77	5.64	21.80	0.480	-0.858	2.190	4.332
4.18	2065.12	2005.28	5.64	21.85	0.476	-0.868	2.195	4.333
4.19	2070.78	2010.78	5.65	21.89	0.472	-0.878	2.201	4.334

<그림 5> 거영선호의 유체정역학표(Hydrostatic table) 발췌

2.4.3 화물적재 계획서 상 평형수 적재량은 없는 것으로 기록되어 있으나 일본 구난업체가 전복된 선체를 뒤집어 원상태로 만든 후 측정한 평형수 탱크의 적재량은 307.86톤으로 계산되었다. 이 때 측정된 평형수 탱크 적재량은 출항 당시 흘수 값을 통해 계산한 불명중량 137.9톤 보다 169.96톤이 많은 것이다.

적재 탱크	Weight(MT)
No.2 W.B.T(C)	45.326
No.3 W.B.T(C)	49.405
No.4 W.B.T(C)	27.808
No.5 W.B.T(P)	31.263
No.5 W.B.T(S)	8.989
No.6 W.B.T(C)	27.573
No.7 W.B.T(C)	33.507
No.8 W.B.T(P)	41.041
No.8 W.B.T(S)	41.041
Total	307.86

<표 2> 일본 구난업체의 구난보고서에 기록된 평형수 탱크 적재량

2.5 앵커 파주력

2.5.1 거영선호는 좌현과 우현에 재래형(ASS형) 앵커를 보유하고 있으며 각각 8 샤클(220미터, 1 Shackle은 27.5미터)의 앵커체인을 보유하고 있었다.



<그림 6> 거영선호 앵커와 ASS형 앵커 모델

2.5.2 ASS형 앵커와 앵커체인의 파주계수는 다음 표와 같다.

구분		진흙	모래	자갈	암석	주요 중
앵커	ASS형	4	3.5	3	2	1.5
앵커체인		1	1	0.8	0.8	0.5

<표 3> 앵커 및 앵커체인의 파주계수

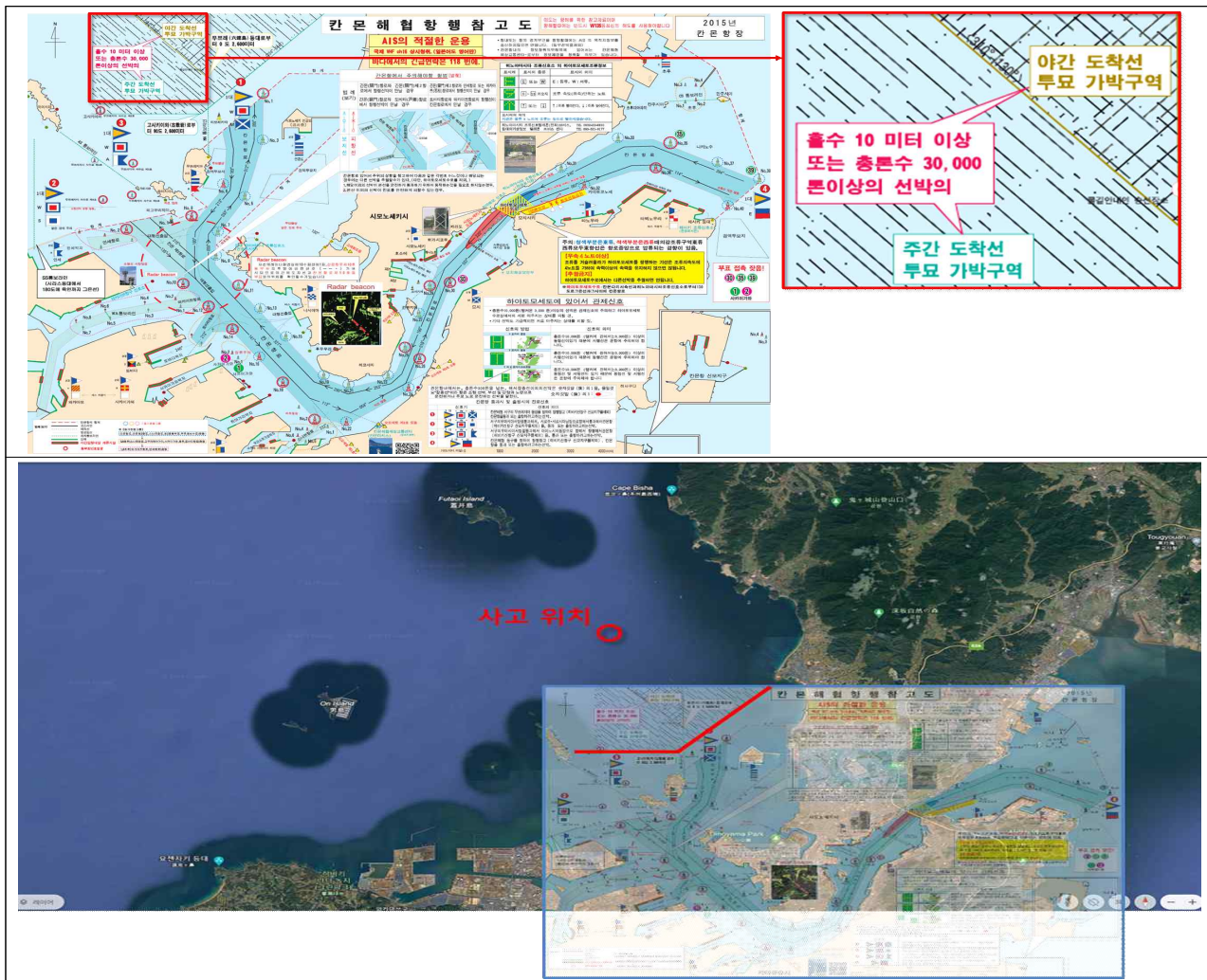
2.5.3 투묘 시 앵커체인의 적정 신출 길이는 아래의 <표 4>와 같이 실시될 것이 권고되고 있으며 조선론을 따르면 본선이 투묘한 곳의 수심은 약 30미터로 약천후 시 적정 파주력 확보를 위해서는 약 265미터의 앵커체인이 신출되어야 한다.

출처	신출 길이	비고
조선론 ⁹⁾	- 통상의 정박 : $L = 3H + 90m$ - 약천후의 정박 : $L = 4H + 145m$ (265미터)	H (수심) : 30미터
선박조종학 ¹⁰⁾	- 일반적인 해면상태 : 수심의 7~8배 - 약천후의 해면상태 : 수심의 10배 이상(300미터 이상)	

<표 4> 투묘 시 앵커체인 신출 길이 기준((사)한국선장포럼)

2.5.4 본선이 보유한 좌·우현 앵커체인은 각 220미터(8 샤클)이며 사고 당시 앵커체인은 165미터(6 샤클) 신출되었다.

2.5.5 본선이 투묘한 위치는 일본 해상보안청에서 발행한 간몬해협 참고도를 보면 홀수 10m 이상 또는 총톤수 30,000톤 이상의 선박들이 투묘하도록 권고되는 정박지인 것으로 확인되었다.



<그림 7> 사고위치도 및 간몬해협 참고도(일본 해상보안청)

9) 동경상선대학, 岩井聰 교수, 해문당

10) 정창현, 김철승, 박영수 역, 도서출판 문헌, 2009년

2.5.6 투묘 중 주요 현상은 선박에 작용하는 외력(F)이 파주력¹¹⁾(P_T)보다 클 경우 발생하며, 선박에 작용하는 외력은 풍압력(F_a , Wind force), 유압력(F_w , Tidal Currents force), 표류력(F_D , Drifting force)으로 구분할 수 있다.

$$P_T = \lambda_a W_a + \lambda_c W_c l \quad 12)$$

$$F = F_a + F_w + F_d$$

$$F_a = \frac{1}{2} \rho_a C_a V_a^2 (A \cos^2 \theta + B \sin^2 \theta) \times \frac{1}{1000}$$

$$F_w = \frac{1}{2} \rho_w C_{xc} V_w^2 L_{bp} d \times \frac{1}{1000}$$

$$F_d = \frac{1}{2} \rho_w C_w g L h_c^2 \times \frac{1}{1000}$$

2.5.7 파주력과 외력을 계산하기 위한 계수값과 외력 조건은 다음표와 같으며 파주력이 가장 큰 경우를 고려하기 위해 닛 파주계수(λ_a)는 지질이 진흙에 해당하는 4를 적용하였다.

파주력		풍압력		유압력		표류력	
λ_a	4	ρ_a	0.124kgs ec ² /m ⁴	ρ_w	104.5kgs ec ² /m ⁴	ρ_w	104.5kgs ec ² /m ⁴
W_a	1.12MT	C_a	0.998	C_{xc}	0.5	C_w	0.1
λ_c	1	V_a	30m/s	V_w	1.54m/s	g	9.81
W_c	0.02MT	A	62m ²	L_{bp}	64.0	L	68.82
l	129.25m	B	115m ²	d	4.15	h_c	0.95
		θ	90 deg.				

<표 5> 파주력 및 외력계산을 위한 계수

구분	바람	조류	수심	해저 지질	파랑		
					파장	파고	진폭
외력수치	30m/s	2.0m/s	30m	4 (진흙)	100m	1.89m	0.95m

<표 6> 대상 수역의 외력 조건

11) 파주력(Holding power) : 앵커가 해저에 박히고 앵커체인이 해저에 깔려 장력이 걸릴 때 끌리지 않으려는 힘으로 해저에 박힌 앵커와 해저바닥에 깔린 앵커체인의 파주부(Holding part)에 의하여 형성된다.(한국선장포럼, 앵커운용실무, 2023, 11면)

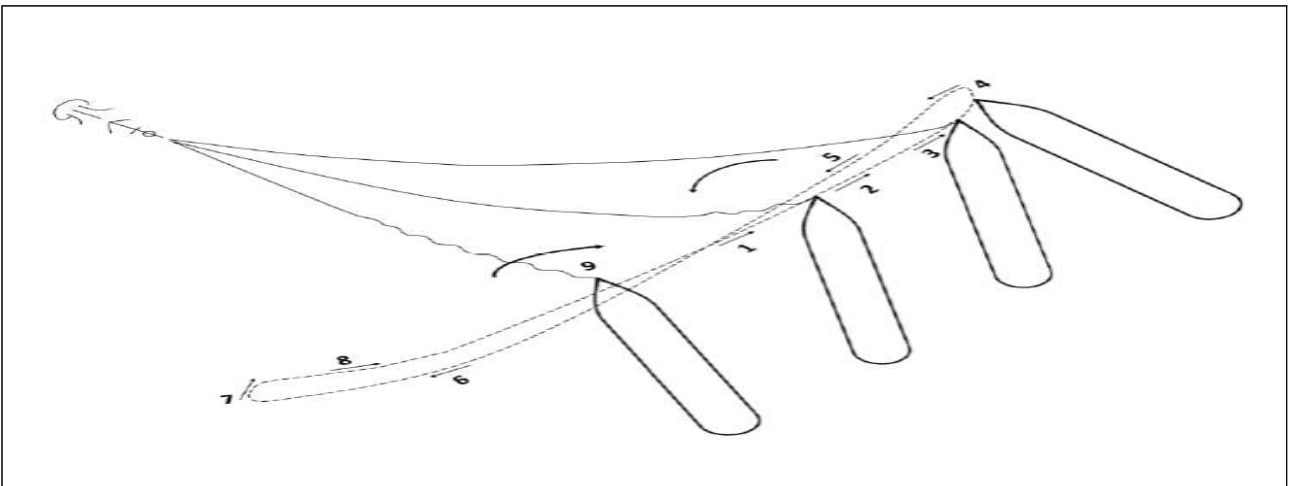
12) λ_a 는 앵커 파주계수, λ_c 앵커체인 파주계수, W_a 는 앵커의 수중무게, W_c 는 앵커체인의 1m 수중무게, l 는 해저에 깔린 체인의 길이, ρ_a 는 공기밀도, C_a 풍압계수, V_a 는 풍속, A 는 선박 정면 풍압면적, B 는 선박 측면 풍압면적, θ 는 바람의 입사각, ρ_w 는 해수밀도, C_{xc} 는 유압계수, V_w 는 유속, L_{bp} 는 수선간장, d 는 흘수, C_w 는 표류력 계수, g 는 중력가속도, L 는 선체 길이, h_c 는 파 진폭

2.5.8 위와 같은 조건에서 파주력은 7.1톤, 외력은 26.1톤이 작용하는 것으로 시뮬레이션 용역을 통해 확인할 수 있었다. 이에 본선 앵커의 파주력 보다 약 3배 이상의 힘이 사고 당시 본선에 작용하였음을 추정할 수 있다.

구분	파주력	외력			
		풍압력	유압력	표류력	합계
외력수치	7.1톤	6.4톤	16.5톤	3.2톤	26.1톤

<표 7> 파주력 및 외력 계산 결과

2.5.9 본선은 우현 앵커로 단묘박 하였다. 단묘박 중 바람이 세지면 선체는 다음 그림과 같이 스윙(Swing)을 하며, <그림 8>에서 3의 위치(Swing의 폭의 최대점)에 왔을 때 파주력이 풍압력을 이겨 내면 선체는 4의 위치로 바뀌며, 이후 5의 위치로 돌아서며 그림과 같이 이동하는 과정을 반복하게 된다. 그러나 3 위치에서 파주력을 상실하면 순식간에 앵커가 끌리는 주요 현상이 발생하며, 주요로 인해 파주력은 상실되고 선수는 바람이 부는 방향으로 돌아가지 못하게 된다.



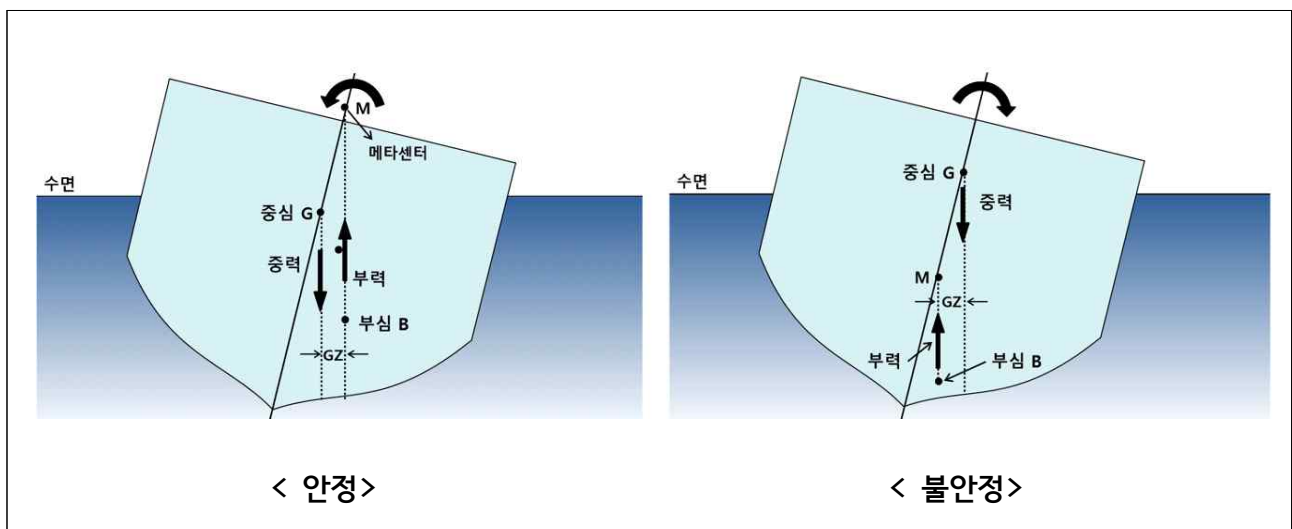
<그림 8> 강풍하에서 묘박 중 선체의 스윙 및 주요가 되는 과정(한국선장포럼)

2.5.10 정박 중 선체의 주요가 발생할 경우, 주요 초기에는 선체가 스윙하면서 점점 바람이 불어나가는 방향으로 흘러가며 이때까지 적절한 대책을 취하지 못하면, 본격적인 주요가 시작되어 선체를 제어할 수 없게 된다.

2.6 선박의 복원성

2.6.1 복원성이라 함은 수면에 평형상태로 떠 있는 선박이 파도 및 바람 등 외력에 의하여 기울어졌을 때 원래의 평형상태로 되돌아오려는 성질을 말하는 것으로, 평형상태에 있던 선박이 외적요인에 의해 교란되었다가 외적요인이 사라졌을 때 초기 평형상태로 되돌아오는 성질을 의미한다.¹³⁾

2.6.2 선박의 복원성은 <그림 9>와 같이 부력중심(B), 무게중심(G), 경심(M)의 위치에 따라 결정되며, 무게중심이 경심보다 낮은 경우 안정된 상태로 초기 평형상태로 돌아오지만 반대로 무게중심이 경심보다 높은 경우 불안정한 상태로 초기 평형상태로 돌아오지 못하게 된다.



<그림 9> 선박의 복원성 예시

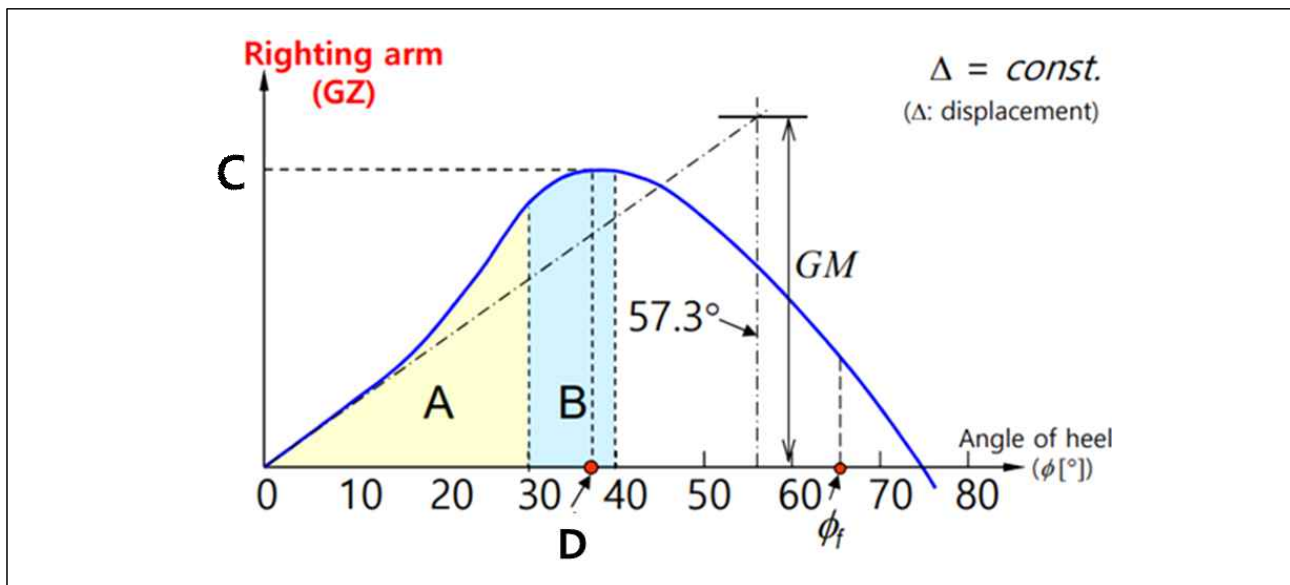
2.6.3 국제해사기구(IMO)에서는 선박의 복원성을 판단하기 위해서 다음 표와 같이 무게중심에서 경심까지 길이(GM)와 복원정(GZ)¹⁴⁾ 곡선을 이용한 6가지 기준을 제시하고 있으며, 선박은 6가지 기준을 모두 만족하여야 한다.

13) 대한조선학회, 선박계산, 2012

14) 복원정(Righting arm, GZ)은 선체가 기울어졌을 때 무게중심(G)을 수직으로 내린선과 경심(M)과의 거리를 말하여 GZ가 길면 복원력이 좋고, GZ가 짧으면 복원력이 나쁘다.(한국선장포럼, 선박복원성실무, 2020, 4면)

구분	기준값
① Area under GZ to 30 deg	$\geq 0.055\text{m}\cdot\text{rad}$
② Area under GZ to 40 deg	$\geq 0.090\text{m}\cdot\text{rad}$
③ Area between 30 to 40 deg	$\geq 0.030\text{m}\cdot\text{rad}$
④ Max GZ	$\geq 0.2\text{m}$
⑤ Heel angle at max GZ value	$\geq 25 \text{ deg.}$
⑥ G_0M	$\geq 0.15\text{m}$

<표 8> 국제해사기구 복원성 기준(IMO Resolution A.749(18))



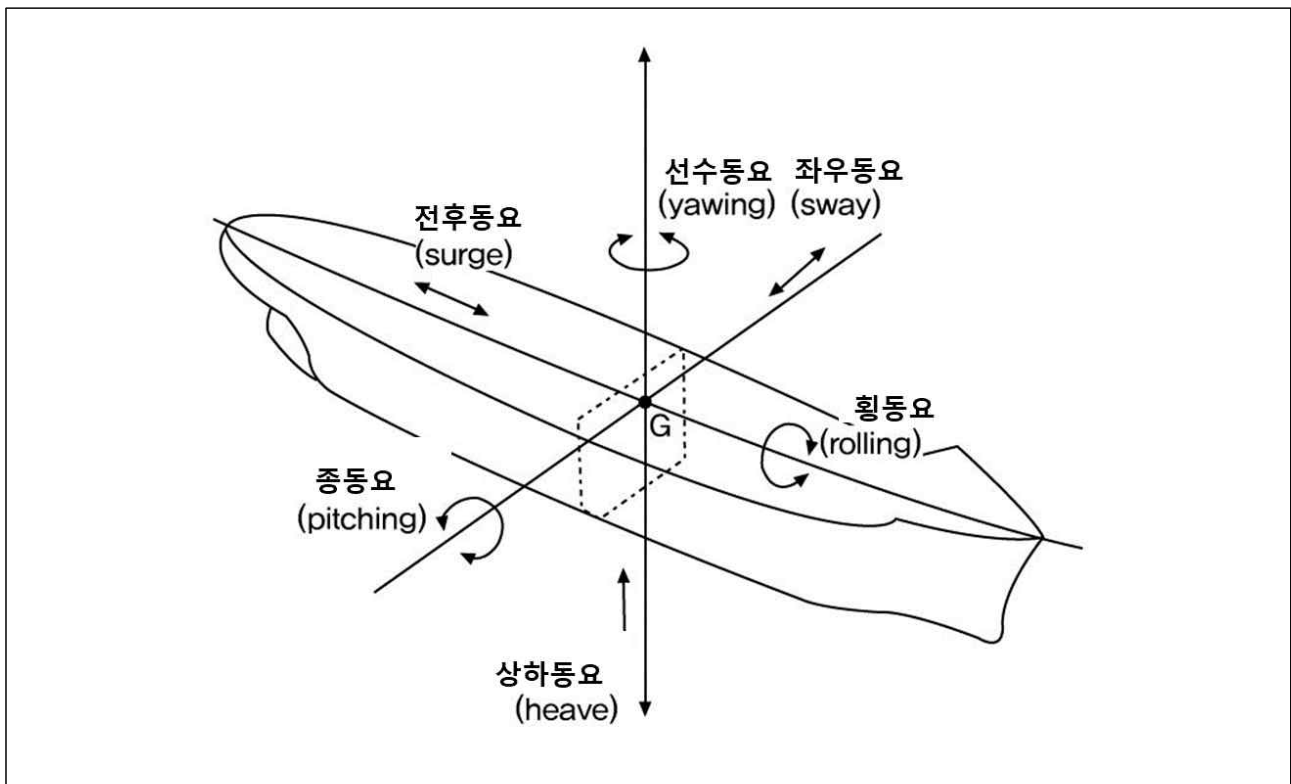
<그림 10> 복원정(GZ) 곡선 예시

2.6.4 <그림 10>의 A는 선박의 경사가 없는 초기 상태에서 선박이 30도까지 기울어졌을 때 까지의 복원정 곡선의 면적을 나타내며, <표 8>의 ①과 같다. B는 선박이 30도에서 40도까지 기울어졌을 때 까지의 복원정 곡선의 면적을 나타내며, <표 8>의 ③과 같다.

2.6.5 그리고 A와 B를 합친 면적은 <표 8>의 ②와 같으며 선박이 초기상태에서 40까지 기울어졌을 때 까지의 복원정 곡선의 면적을 나타낸다. C는 복원정 값이 가장 큰 경우로 <표 8>의 ④와 같으며, 최대 복원정이 나타내는 선박 경사각도(D)는 <표 8>의 ⑤와 같이 25도가 넘어야 한다. 이때, 자유표면효과가 고려된 G_0M 값은 0.15 이상이어야 한다.

2.7 선박의 동요

- 2.7.1 선박은 항해 시 바람과 파도 등의 환경외력 때문에 그림 11과 같이 6 자유도(전후동요, 좌우동요, 상하동요, 횡동요, 종동요, 선수동요) 운동을 하게 된다.¹⁵⁾
- 2.7.2 선박의 6 자유도 운동 중 횡동요와 종동요는 선박의 내항성능을 나타내는 중요한 지표로 선박의 폭이 길이에 비해 짧은 특성으로 인해 선박의 길이 방향 축을 중심으로 회전하는 횡동요가 종동요에 비해 상대적으로 중요하며, 과도한 횡동요의 경우 복원력이 나쁜 상태에서 선박의 전복을 유발 할 수 있다.
- 2.7.3 종동요의 경우 선박의 폭 방향 축을 중심으로 회전하는 운동으로, 선수미가 오르락 내리락 하는 선체 운동이며, 동요가 크지 않으면 시소를 타는 듯한 느낌이 들게 된다. 동요가 커짐에 따라 공포감 및 뱃멀미를 유발할 수 있으며, 종동요가 심할 경우 선박의 선수로 물이 넘어 오는 청파(Green water)로 인해 선박이 파손 혹은 침몰할 수 있다.



<그림 11> 선박의 6 자유도 운동 예시

15) 대한조선학회, 조선기술-배만들기의 모든 것, 2011

section

3

사고 경위

3. 사고 경위

3.1 평형수 펌프 고장

- 3.1.1 거영선호는 2024년 3월 17일 11시경에 일본 히메지(Himeji)항에 입항하였으며, 3월 18일 09시 45분경부터 아크릴산(Acrylic Acid) 화물의 적재 작업을 시작하였다.
- 3.1.2 화물작업 시작 후 약 15분이 지난 10시경 일등항해사는 일등기관사 방에 찾아가 평형수 펌프에 이상이 있으니 펌프룸에 가서 확인해 줄 것을 요청하였다. 일등기관사는 이등기관사, 항해부원과 함께 펌프룸으로 이동하여 평형수 펌프 그랜드 패킹(Gland packing) 부위에서 해수가 새고 있는 것을 발견하고 패킹을 교환하였다.
- 3.1.3 같은 날 13시경 일등항해사는 평형수 펌프를 통해 해수가 배출되고 않고 있으니 다시 확인을 해달라고 요청하였고, 일등기관사는 이등기관사와 함께 펌프룸에 가서 평형수 펌프 상태를 확인하였다. 확인 결과 평형수 펌프가 작동할 때 베어링을 잡고 있는 하우징 사이에 유격이 있는 것을 발견하였고 이를 기관장에게 보고하였다. 기관장은 다음 기항하는 항구에서 육상직원이 올라와 수리하는 것이 좋겠다는 방향으로 선장에게 보고하겠다고 하였다.¹⁶⁾
- 3.1.4 거영선호 선장은 출항 약 30분 전인 3월 18일 14시경 선사 안전관리 담당자에게 전화하여 만재할수가 약 100톤 정도 초과되는 상황이며 계속 평형수 배출을 하겠다고 보고¹⁷⁾하였다. 선사에서는 평형수 잔수가 남아 있으면 중국에 입항이 안되므로 최대한 배출해 줄 것을 요청했으며 평형수 펌프 고장 여부 확인이 필요하므로 부산항에 기항하도록 지시를 했다.

3.2 출항 및 기상악화

- 3.2.1 거영선호는 2024년 3월 18일 14시 30분경 일본 히메지항을 출항하여 부산항으로 향했다. 당초 중국 타이싱항이 목적지였으나 평형수 펌프 수리를 위해 변경하였다.

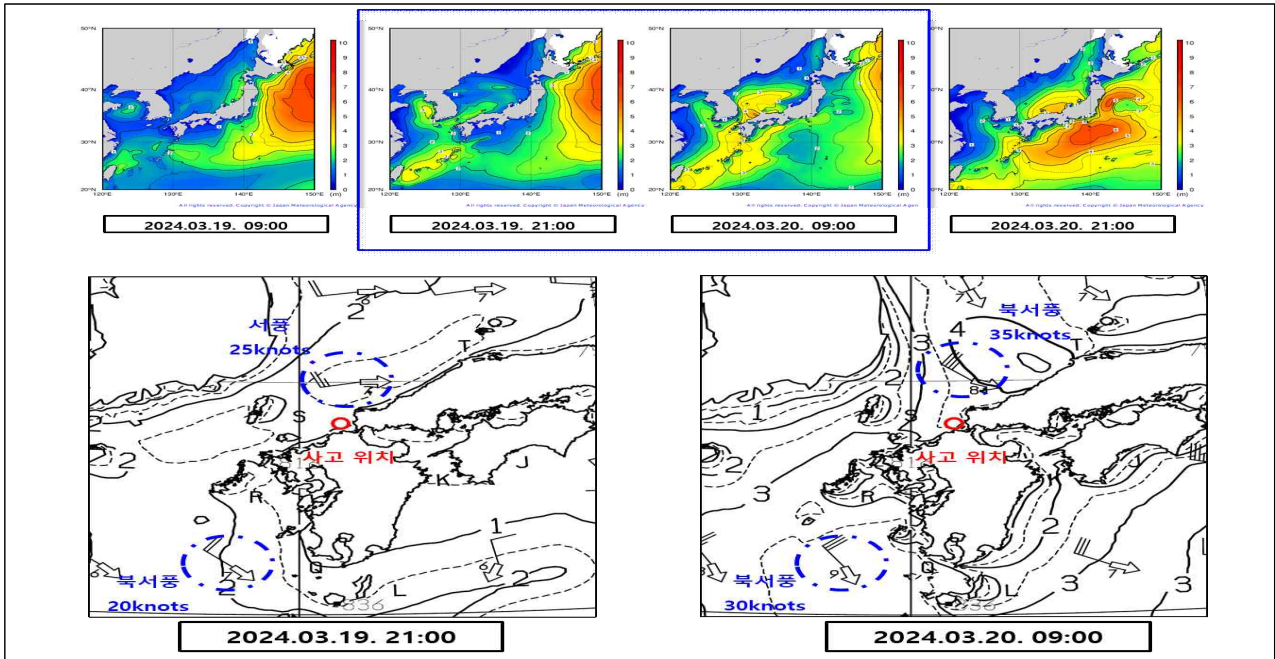
16) 일등기관사의 진술(2024.3.30.)

17) 거영해운 운항팀 진술(2024.6.13.)



<그림 12> 출항 후 거영선호 이동경로

- 3.2.2 거영선호는 3월 19일 12시경 간몬해협을 통과하였으며, 3월 19일 17시경 선장은 기상 상태가 좋지 않으며, 선체가 좌현으로 기울고 있다고 선사에 보고하였다.
- 3.2.3 당시 기상청 기상자료에 따르면 3월 19일 21시경 약 25노트의 서풍이 불었으며 파고는 2 내지 4미터였고 3월 20일 09시경에는 북서풍이 35노트로 불었다.
- 3.2.4 거영선호 선장은 같은 날 20시경 기상이 더욱 나빠지고 있으며 이에 선속이 3 내지 4 노트(knots) 밖에 나오지 않아 부산까지 항해하기가 어렵겠다고 선사에 보고하였다. 선장은 이후 다시 선사와 연락하여 피항을 결정하였고, 피항지는 대마도 인근 해상은 수심이 깊은 관계로 간몬해역 인근으로 피항하기로 하였다.
- 3.2.5 선장은 본선을 선회하여 피항지로 향했다. 배를 돌리니 순풍을 맞아 선속은 10노트 정도가 나왔으며 정박지까지의 도착 예정시간은 3월 20일 02시경이었다. 본선은 3월 20일 02시 15분경 정박지에 도착하였다.
- 3.2.6 한편, 우리나라 기상청의 자료를 살펴보면 3월 19일 15시부터 부산·울산·경상남도 지방에 강풍주의보가 발표 및 발효되었고 18시부터는 풍랑주의보가 발효되었다. 3월 20일 10시경에는 동해남부먼바다에 풍랑경보가 발효되었다.



<그림 13> 일본 기상청 기상자료

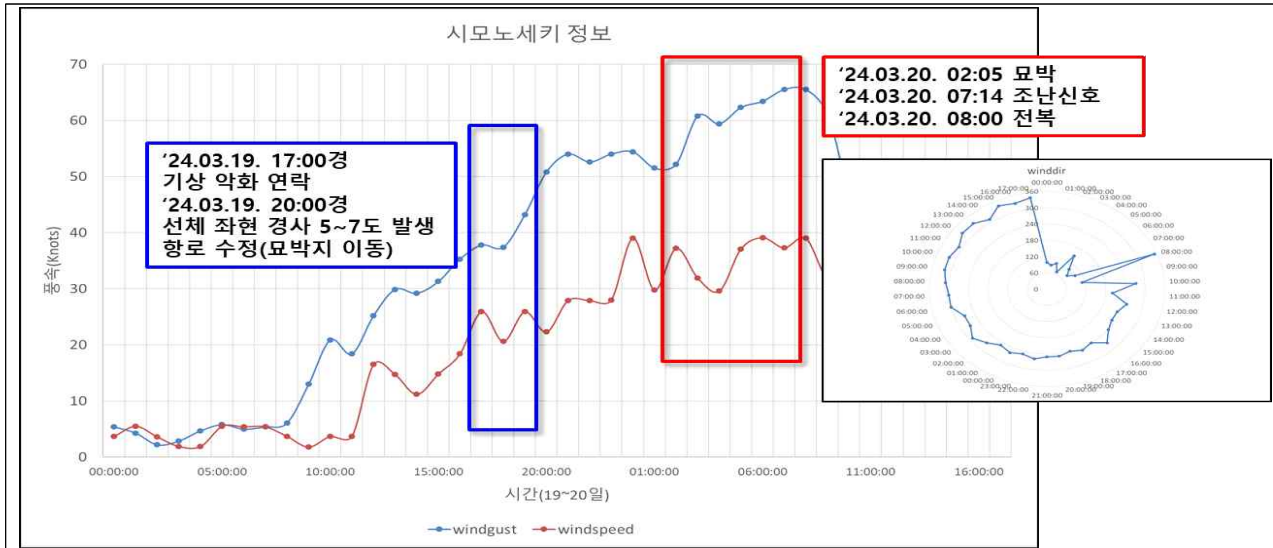
3.3 피항 및 투묘

3.3.1 거영선호는 2024년 3월 19일 20시경 부산항으로 향하던 항로를 기상악화로 인해 회항하여 일본 시모노세키 근방까지 이동하였고 3월 20일 02시 05분경 우현 앵커를 6샤클 신출하여 단묘박하였다. 해당 지역의 수심은 약 30미터이며 투묘 위치는 북위 34도 03분 31초, 동경 130도 50분 11초였다.



<그림 14> 기상악화로 거영선호 회항

3.3.2 일본 시모노세키항의 기상정보에 따르면 2024년 3월 19일 오후부터 사고가 발생한 2024년 3월 20일 오전까지 풍속이 증가하는 경향이 보이고 있으며 순간 돌풍의 경우 최대 60노트 이상 그리고 풍속의 경우 최대 약 40노트가 나타나고 있다.



<그림 15> 시모노세키항 기상정보

3.3.3 앞서 살펴본 것처럼 현재 본선의 투묘 상태에서 30노트의 바람이 불었을 때 파주력은 7.1톤이고 작용하는 외력은 26.1톤으로 파주력 보다 약 3배 이상의 힘이 본선에 작용하여 본선은 주요한 것으로 추정된다. <표 7 참조> 아래의 선박자동위치식별장치(AIS) 항적 자료에서도 거영선호는 정박 중에 이동이 있었던 것으로 확인된다.



<그림 16> 거영선호 투묘 및 주요 관련 자료(AIS항적)

3.4 선체 전복

- 3.4.1 거영썬호 선장은 2024년 3월 20일 06시경 선사에 전화하여 선체가 좌현 측으로 기울어 있고 기상이 매우 나쁜 상황이니 평형수 펌프를 한국에서 수리하지 말고 일본의 수리 업체를 수배하여 수리해 달라고 선사에 요청하였다.
- 3.4.2 이후 선장은 07시경 선체가 좌현 측으로 더 기울어 경사가 30도를 넘는 상황임을 선사에 보고하였으며 일본 해상보안청에 구조요청을 하였다.
- 3.4.3 본선은 악천후 상황에서 좌현으로 더 기울어졌고 선원들이 퇴선을 위해 우현 윈브릿지에 모여 있는 상황에서 좌현 측으로 전복되었다. 선원들은 구명정에 승선하지 못하고 구명 동의만 착용한 채 바다로 떨어졌다.
- 3.4.4 본선은 2024년 3월 20일 07시 53분경 일본 후타오이(Futaoi) 섬 남단으로부터 남동방 약 3.5해리 해상 북위 34도 03분 11초, 동경 130도 50분 58초에서 전복되었다.



<그림 17> 거영썬호 전복사고 위치

3.5 선원구조 및 피해사항

3.5.1 2024년 3월 20일 08시 15분경 일본 해상보안청 함정이 도착하여 구조작업을 실시하였다. 선원 총 11명 중 인도네시아 국적 일등기관사 1명만 생존하였고, 선장과 기관장을 포함한 나머지 선원 10명은 사망하였다.

3.5.2 전복된 선체는 부력을 유지하여 침몰하지 않고 바다 위에 계속 떠 있었으며 일본 구난 업체에 의해 2024년 5월 19일 바로 세워졌다. 본선의 화물은 2024년 6월 3일 회수되었고, 이후 목포항으로 예인되어 2024년 7월 23일 (주)목포조선공업에서 해체되었다.



<그림 18> 거영썬호 전복 시 현장사진

section

4

사고 분석

4. 사고 분석

4.1 선박 복원성 검토 결과

4.1.1 거영선호의 전복 원인 규명을 위한 복원성 계산 및 분석을 위해 선체 선도와 일반배치도를 이용하여 선박의 3차원 모델링을 수행하였다. 완성된 3D 모델링은 정확도를 확인하기 위해 복원성 자료에 있는 유체정역학표(Hydrostatic Table)와 비교하여 정확도를 확인하였으며, 0.11퍼센트 이하의 오차만 있음을 확인하였다. <표9 참고>

	Draft(m)			
	1.500	2.700	3.200	3.892
3D Modeling(m ³)	640.1	1232.2	1486.8	1848.7
Hydrostatic table(m ³)	639.9	1231.1	1485.2	1847.6
Error (%)	0.03	0.09	0.11	0.06

<표 9> 3D 모델링 배수용적 비교

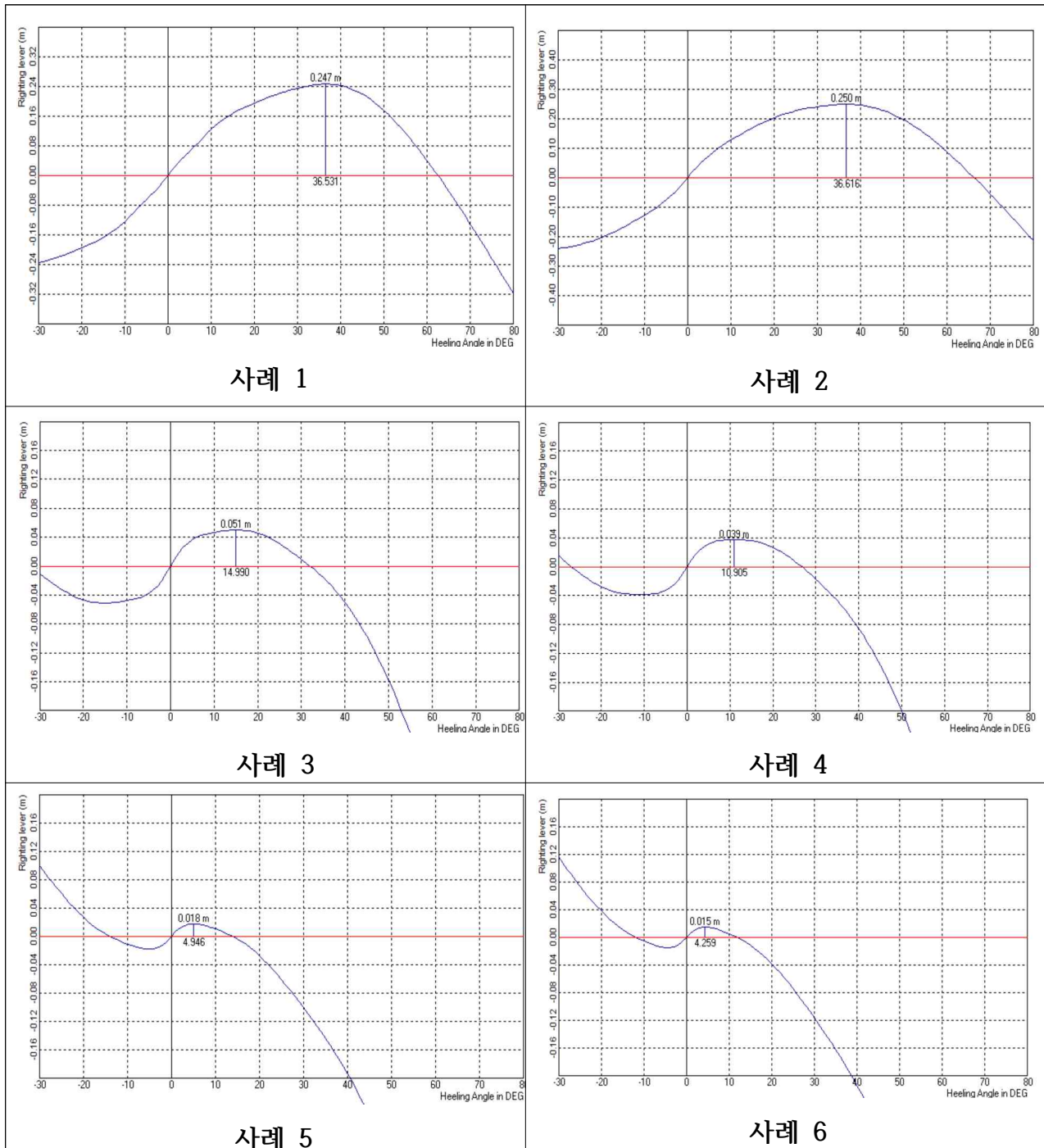
4.1.2 선박 복원성 해석을 위해 필요한 화물 탱크, 평형수 탱크, 청수 탱크 등의 구획 설정은 일반배치도 및 복원성 자료를 참고하여 구획을 설정하였다. 정적 해석의 경우 거영편호의 현장조사에서 외판의 손상이 없음이 확인되어 비손상 복원성 계산(Intact stability)을 수행하였으며 비손상 복원성 계산 결과는 <표 10>와 같다.

	사례 1	사례 2	사례 3	사례 4	사례 5	사례 6
Displacement(MT)	1895.4	2033.3	2033.3	2033.3	2201.3	2201.3
Draft at F.P(m)	2.920	3.790	3.780	3.779	3.567	3.559
Draft at A.P(m)	4.801	4.440	4.452	4.448	4.392	4.385
Draft at Mid.(m)	3.861	4.115	4.116	4.113	5.216	5.211
Trim(m)	1.882	0.650	0.672	0.669	1.649	1.653
Heeling(deg.)	-0.1	0.0	0.0	-19.1	-6.8	-69.0
KM _T (m)	4.310	4.327	4.327	4.327	4.362	4.361
KG(m)	3.289	3.177	3.146	3.204	2.944	2.974
G ₀ M(m)	0.747	0.893	0.430	0.375	0.298	0.266
IMO Criteria	O.K	O.K	Not O.K	Not O.K	Not O.K	Not O.K
Area under GZ to 30 deg	0.078	0.082	0.020	0.012	-0.009	-0.014
Area under GZ to 40 deg	0.121	0.125	0.017	0.004	-0.035	-0.042
Area between 30 to 40 deg	0.043	0.043	-0.003	-0.008	-0.025	-0.029
Max GZ	0.247	0.250	0.010	-0.017	-0.101	-0.117
Heel angle at max GZ value	36.531	36.616	14.990	10.905	4.946	4.259
G ₀ M	0.747	0.893	0.430	0.375	0.298	0.266
비고	- Trim : + is stern, - is stem - Heeling : + is Starboard , - is port - IMO criteria(IMO Resolution A.749(18)) · Area under GZ to 30 deg ≥ 0.055m·rad · Area under GZ to 40 deg ≥ 0.090m·rad · Area between 30 to 40 deg ≥ 0.030m·rad · Max GZ ≥ 0.2m · Heel angle at max GZ value ≥ 25 deg. · G₀M ≥ 0.15m - 사용 S/W : Maxsurf Stability, LOADPLUS					

<표 10> 비손상 복원성 계산 결과

- 4.1.3 화물적재 계획서 상의 탱크 적재량에 따른 조건들을 이용하여 계산된 사례 1의 경우 배수량은 약 1,900톤이며 배수량에 따른 흘수는 3.861미터이므로 만재흘수선 3.892미터를 넘지 않고 좌현 우현 경사는 미미한 수준으로 IMO 기준을 모두 만족하며 안정적인 상태이다.
- 4.1.4 사례 2의 경우 화물적재 계획서 상에 기재된 흘수를 기준으로 한 배수량 값에 1번 좌우현 평형수 탱크와 2번 평형수 탱크에 불명중량 137.9톤을 배치하였으며 이로 인해 배수량이 사례 1보다 증가하였다. 증가한 배수량으로 인해 흘수는 4.115미터가 되며 만재흘수선을 넘는 과적 상태이다. 과적 상태이긴 하지만 IMO 기준을 모두 만족하며 복원성에는 문제가 없는 상태이다.
- 4.1.5 사례 3의 경우 출항 당시 선장이 유선을 통해 선사 통화한 내용 등을 토대로 평형수 탱크 1번(P,S), 2번(C), 5번(P,S), 6번(C), 7번(C)에 불명중량 137.9톤을 나누어 배치하였으며, 평형수 탱크의 자유표면 효과로 인해 GM 값이 사례 2에 비해 상대적으로 많이 감소하여 IMO 기준을 만족하지 못한 불안정한 상태이다. 또한 복원성 계산 결과는 IMO 기준을 위반한 상태이다.
- 4.1.6 사례 4는 사례 3에서 선체 경사로 인해 평형수가 최대한 이동하였을 경우를 가정한 경우이며 사례 3과 동일하게 IMO 기준을 만족하지 못해 불안정한 상태이다. 특히, 평형수가 이동함에 따라 최대 경사 각도가 약 19도까지 발생할 수 있는 것으로 산출되어 전복의 위험이 있는 상태로 추정된다.
- 4.1.7 사례 5의 경우 일본에서 작성한 구난보고서 상의 탱크 적재량에 따라 계산되었으며 평형수 적재량 증가로 인해 만재흘수선을 넘긴 과적 상태이고, IMO 기준을 만족하지 못해 불안정한 상태이며 해당 조건에서 좌현 경사가 약 7도 발생하여 갑판이 침수될 수 있는 상황으로 추정할 수 있다.
- 4.1.8. 사례 6은 사례 5의 조건에서 평형수가 최대로 이동될 경우를 가정한 상태로 IMO 기준을 만족하지 못한 불안정한 상태이다. 특히 평형수 이동에 따라 최대 경사 각도가 약 70도까지 발생할 수 있는 것으로 산출되어 선박은 전복될 것으로 추정된다.
- 4.1.9. 본선의 사고 당시 추정되는 6가지 상황으로 구분하여 분석한 복원성 계산 검토 결과, 출항 당시의 선박의 상태로 추정되는 사례 3부터 사례 6의 경우 모두 IMO 기준을 만족하지 못하고 복원성에 문제가 있는 것으로 확인되었다.

4.1.10. 본선의 정적 복원성 계산 결과 평형수 이동으로 인한 경사와 화물 탱크의 유동수 영향으로 최대 경사 각도가 약 70도까지 발생할 수 있는 것으로 산출되었으며 복원성 계산에 따른 복원정(GZ) 곡선은 다음과 같다.

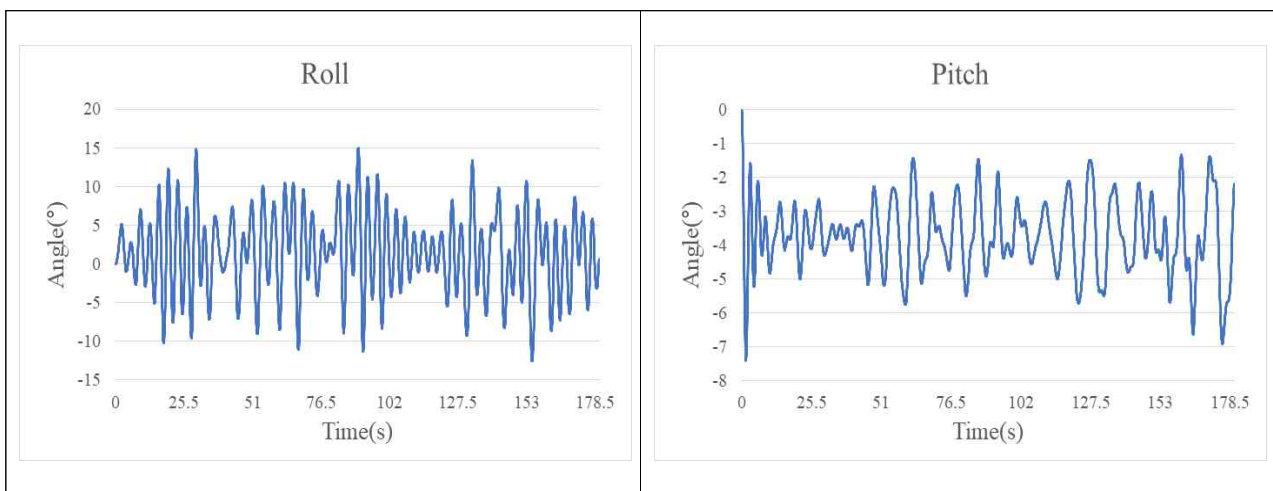


<그림 19> 복원성 계산에 따른 GZ 곡선¹⁸⁾

18) 사례 1 : 안정 상태(IMO Criteria 모두 만족), 사례 2 : 안정 상태(IMO Criteria 모두 만족), 사례 3 : 불안정 상태(IMO Criteria G_0M 만 만족), 사례 4 : 불안정 상태(IMO Criteria G_0M 만 만족), 사례 5 : 불안정 상태(IMO Criteria G_0M 만 만족), 사례 6 : 불안정 상태(IMO Criteria G_0M 만 만족)

4.2 동적 운동 해석 및 전복 시뮬레이션

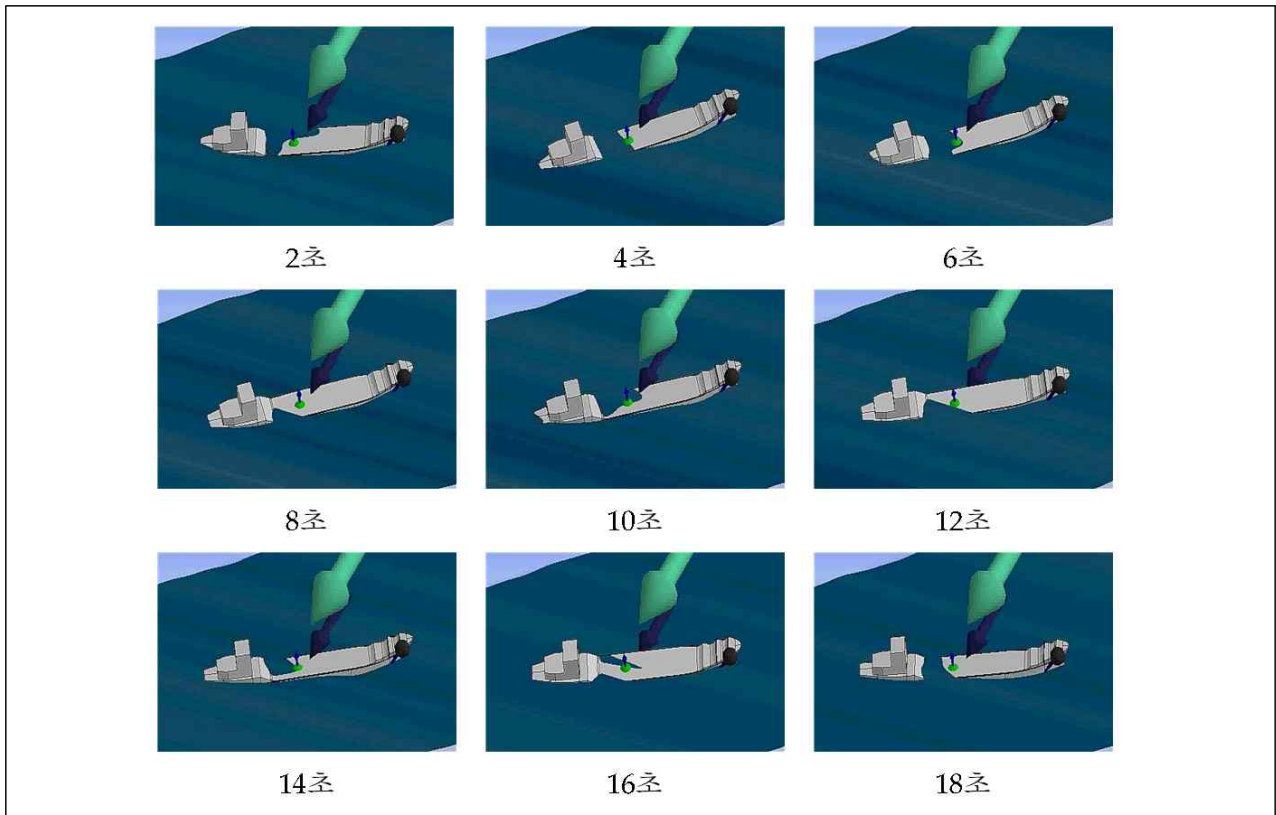
- 4.2.1 사고 당시 거영선호의 동적 운동 및 전복 가능성을 시뮬레이션하였다. 당시 기상 상황은 유의파고 약 3.0미터, 파장 길이 약 100미터, 유의 파주기 8초, 풍속 30노트, 파향 및 풍향은 북서에서 남동으로 나아가는 방향으로 반영하였다.
- 4.2.2 선박은 주묘가 발생한 상태에서 작용하는 환경 외력(바람 및 파도 등)은 우현 측에서 작용하는 것으로 고려하였다.
- 4.2.3 본선은 파도와 바람이 우현에서 작용하면서 횡동요(Rolling)와 종동요(Pitching) 움직임이 주로 발생하였다. 우현 측의 파랑 영향으로 횡동요는 증폭되었으며, 특히 바람의 영향과 파도 주기의 상호 작용으로 인해 횡동요의 주기가 길어졌다. 횡동요의 경우 최대 15도까지 움직였다.
- 4.2.4 종동요는 파도의 방향과 주기에 따라 다소 변동이 있었으나, 파도의 방향이 일정함에 따라 특정 각도에서 계속 종동요가 발생하는 것을 볼 수 있으며 최소 1.5도에서 최대 7.2도로 움직임을 보였다.



<그림 20> 횡동요 특성(좌), 종동요 특성(우)

- 4.2.5 본선의 운동 해석 결과, 우현에서 작용하는 파도와 바람의 상호작용으로 인해 횡동요가 크게 증폭되어, 선체의 복원력을 저하시키고 전복 위험을 증가시켰을 것으로 보여진다. 특히 바람과 파도의 주기적 영향으로 횡동요의 주기가 길어져, 선박의 안정성에 심각한 문제를 야기했을 것으로 추정된다.

4.2.6 전복 시뮬레이션에서는 갑판으로 물이 차오르는 현상을 통해 전복의 위험을 확인할 수 있었다. 주요 상태에서 강풍과 높은 파도로 인해 선체의 복원력이 크게 약화되고 횡동요가 커지는 상황에서 선체 전복은 발생했을 것으로 추정된다.



<그림 21> 전복 시뮬레이션

4.3 화물적재 계획서 작성 부적절

4.3.1 선사의 안전항해지침서 제5장 화물관리업무 2.1항 화물의 계획 및 복원성 관련 규정에는 ‘일등항해사는 전 항해기간 동안 적정 복원력 확보, 국제만재흘수선 규정에 따른 최대 적재 가능량과 선창 내 화물 배분에 따른 선체강도 허용치, 최적 트림유지, 작업 기간 동안 평형수의 적재 및 배출을 포함한 작업순서 등을 포함하여 화물적재 계획서를 작성해야 하고 선장은 이를 승인해야 한다’라고 규정하고 있다.

4.3.2 일본 히메지항 출항 당시 작성한 화물적재 계획서는 2024년 3월 18일 일등항해사가 작성하여 선장이 승인한 것으로 되어 있으나 화물적재 계획서에 기재된 화물, 연료유, 불명중량 등을 더한 배수량의 계산값과 화물적재 계획서와 출항보고서 상에 기재된 흘수를 토대로 한 배수량의 계산값은 137.9톤의 차이가 있는 것으로 확인되었다.

- 4.3.3 화물적재 계획서 상 평형수량은 없는 것으로 작성되었다. 그러나, 출항 전 선장과 선사와의 통화 내용, 하역 작업 중 평형수 펌프의 고장으로 평형수 배출이 완전히 배출되지 않았다는 점 등을 고려했을 때 정확한 양은 알 수 없으나 평형수가 본선에 남아 있었을 것으로 추정되며, 이에 4.3.2에서 계산된 137.9톤의 차이는 평형수의 양일 수 있다고 유추할 수 있을 것이다.
- 4.3.4 남아 있던 평형수는 U자 형상의 평형수 탱크(U Shape Ballast tank) 내에서 선박의 움직임에 따라 움직였을 것이고 이는 유동수 효과(Free surface effect)¹⁹⁾를 발생시켜 선박의 복원력 감소 효과를 가져왔을 것이다.
- 4.3.5 결국 본선의 화물적재 계획서는 평형수 탱크에 남아 있는 평형수량 등을 정확하게 반영하지 못하였고 이에 따라 선박의 복원성 및 선체 강도 등 선박의 안전항해를 가능하게 하는 값들도 잘못 계산되었을 것으로 추정된다.
- 4.3.6 또한 화물적재 계획서에 따르면 아크릴산 총 978톤을 1번 화물 탱크에는 탱크 용량의 약 82퍼센트를 적재하였고 2번 화물 탱크에는 약 86퍼센트, 3번 화물 탱크에는 약 50퍼센트, 4번 화물 탱크에는 약 57퍼센트를 적재한 것으로 작성되어 있었다.
- 4.3.7 특히, 3번과 4번 화물 탱크의 경우 화물 적재량은 약 50 내지 60퍼센트이므로 항해 중 악천후로 인해 선체 동요 발생 시 탱크 내 화물의 이동으로 자유표면적이 증가하여 유동수 효과가 발생할 수 있을 것이다.

4.4 만재흘수선 초과 상태 출항

- 4.4.1 국제만재흘수선협약²⁰⁾(LL)은 해상에서의 재산과 인명보호를 위해 국제항해에 종사하는 선박이 적재할 수 있는 한도에 관한 통일적 원칙과 규칙을 설정하고 있으며 이에 따라 각 선박은 본선의 만재흘수선을 넘겨 적재하고 항해해서는 아니된다.
- 4.4.2 선사의 안전항해지침서 제2장 2.2항에 따르면 ‘일등항해사는 하역작업 계획에 따라 평형수를 적재 또는 배출하여 출항 전 당해 항차의 최적 상태의 흘수와 트림을 확보해야 하고 이등 또는 삼등항해사는 출항 흘수를 실측하고 출항보고서를 작성하여 선장에게

19) 해수, 기름 등의 액체가 탱크 내에 만재되지 아니하여 자유표면(Free surface)이 있을 경우, 선박이 동요하면 선박 전체의 중심을 상승시킨 것과 같은 복원력의 감소효과가 생김, 2020, 한국선장포럼, 선박복원성 실무, 35면

20) Load Lines(International Convention on Load Lines, 1966)

제출한다'라고 규정하고 있다.

- 4.4.3 본선의 국제만재흘수선협약에 따른 하기(Summer) 만재흘수선은 3.892미터이다. 그리고 히메지항 출항 당시에 본선에서 확인하여 선사에 보고된 흘수는 4.150미터(선수 3.850미터, 선미 4.450미터)이다. 본선은 만재흘수선 협약에 따른 만재흘수선을 약 0.26미터(약 26센티미터)를 넘겨 적재하고 출항한 것으로 추정된다.
- 4.4.4 만재흘수선을 넘겨 적재하고 출항하면 부력이 중력보다 작은 상태에서 선박이 항해하게 되어 선박은 침몰하게 된다. 본선은 만재흘수선의 중요성을 고려하여 평형수를 배출하거나 화물량 조절하는 등 만재흘수선 협약에 따른 만재흘수선을 준수하여 출항해야 했으나 그렇게 하지 못했다.
- 4.4.5 한편, 본선의 과거 항차 출항 흘수를 살펴보면 2024년 2월 18일 출항 시 3.950미터, 2024년 2월 24일 출항 시 3.900미터 등 만재흘수선인 3.892미터를 넘겨 출항한 경우가 추가로 확인되었다.
- 4.4.6 본선은 출항 전 흘수를 확인하여 만재흘수선을 초과할 경우 평형수 배출 및 화물 조정 등을 통해 과적 상태를 해소해야 했으나 그렇게 하지 못했고, 선사에서 본선에서 보고한 출항 보고서에 적힌 흘수를 만재흘수선과 비교하여 면밀히 확인하지 않았던 것으로 추정된다.

4.5 정박지 위치 선정 부적절

- 4.5.1 거영선호는 부산항으로 향하던 항로를 기상악화로 인해 회항하여 일본 시모노세키 근방(후타오이섬 남단으로부터 남동방 약 3.5해리 해상)에서 피항을 위해 우현 앵커 165미터(6 샤클)를 단묘박 하였다. 투묘 위치의 수심은 약 30미터 였다.
- 4.5.2 정박지를 선정할 때에는 수심, 저질, 해조류의 강도 등 지리적 여건과 본선의 투묘 장소 인근 수역이 충분한 지 여부 등 정박선의 밀집도를 고려하여야 한다.²¹⁾ 그중에서도 수심은 앵커를 투묘하여 과주력을 확보하는 데 있어 매우 중요한 고려 요소이다.
- 4.5.3 피항 당시처럼 악천후인 상황에서 본선이 투묘하여 적정 과주력을 얻기 위해서는 평상시 보다 추가적인 앵커체인을 신출해야 하며 수심 약 30미터인 곳에서는 단묘박일 경우

21) 한국선장포럼, 앵커운용실무, 2023, 32면

약 265미터의 앵커체인을 신출하여야 충분한 파주력을 확보할 수 있다.

4.5.4 본선이 우현 앵커체인을 165미터 신출한 상황에서 당시 파주력은 7.1톤이었고 외력은 26.1톤이 작용하는 것으로 계산되었다. 사고 당시 파주력 보다 약 3배 이상의 외력이 작용하였을 것으로 추정되며 앵커는 주묘된 것으로 확인된다.

4.5.5 한편 본선이 정박한 위치는 일본 항만정보(그림 12 참조)에 따르면 흘수 10미터 이상 또는 총톤수 3만톤 이상의 선박이 투묘하도록 권고되는 정박지였다. 거영썬호의 총톤수는 597톤으로 본선이 투묘하기에는 수심이 깊은 곳이었다.

4.5.6 거영썬호는 악천후 상황에서 본선이 주묘되지 않도록 정박지의 수심과 본선 앵커체인 길이 등을 고려한 안전한 정박지를 선정해야 했으나 그렇게 하지 못했다.

4.6 악천후 시 정박당직 수칙 미이행

4.6.1 거영썬호는 일본 히메지항에서 출항하여 부산항으로 항해 중 악천후를 만나 회항하였으며, 일본 시모노세키 근방에 2024년 3월 20일 02시 05분경 우현 앵커를 6 샤클 신출하여 정박(단묘박) 하였다.

4.6.2 STCW 제8장 제3편²²⁾에서는 ‘본선이 정박하였을 때 투묘 위치에 있는지 충분히 자주 점검하고 주묘 발생 시 선장에게 보고하고 필요한 모든 조치를 취하며, 선장의 지시에 따라 주기관과 기타 기계를 준비해야 한다’라고 규정하고 있다.

4.6.3 또한 선사의 안전항해지침서 제1장 정박당직에서는 ‘투묘 중일 때는 정박지에 관한 수로지 및 항만정보를 검토 숙지하고, 기상과 조류 그리고 해면 상태의 변화에 유의해야 한다’라고 규정하고 있다. 아울러 ‘주기관 사용 등에 있어 추가 조치가 필요한 경우에는 선장 및 기관장에게 즉시 필요한 조치를 요청해야 한다’라고 언급하고 있다.

4.6.4 그러나 본선은 기상악화로 본선이 주묘 되고 선박이 경사 되는 상황에서도 주기관을 사용하여 주묘에 대응하지 않았고 좌현 앵커를 추가로 투묘하는 쌍묘박을 실시하여 파주력을 확보하는 등 안전조치를 해야 했으나 그렇게 하지 못했다.

22) STCW CHAPTER VIII STANDARDS REGARDING WATCHKEEPING Section A-VIII/2 Watchkeeping arrangements and principles to be observed, PART 3 - WATCHKEEPING AT SEA

section

5

결론

5. 결론

- 5.1 거영썬호가 출항할 때부터 평형수가 탱크 내에 남아 있을 것을 가정하고 시뮬레이션 용역을 통해 평형수의 양과 탱크별 배치 등을 조정하여 6가지 사례로 정적 복원성을 계산한 결과, 평형수의 이동과 약 50퍼센트 가량 적재된 화물 탱크 내 화물의 이동으로 인한 유동수 효과로 최대경사각도가 약 70도까지 발생할 수 있는 것으로 산출되었다.
- 5.2 본선의 사고 당시 상황을 가정하여 운동 해석한 결과, 우현에서 작용하는 파도와 바람의 상호작용으로 인해 횡동요가 크게 증폭되어, 선체의 복원력을 저하시키고 전복 위험을 증가시켰다. 특히 바람과 파도의 주기적 영향으로 횡동요의 주기가 길어져, 선박의 안정성에 심각한 문제를 야기했을 것으로 추정된다. 전복 시뮬레이션에서는 갑판으로 물이 차오르는 현상을 통해 전복의 위험을 확인할 수 있었다.
- 5.3 선사의 안전항해 지침서에 따라 작성된 화물적재 계획서에는 평형수 탱크에 남아 있는 잔존 평형수량이 없다고 기록되어 있으나 홀수 값으로 계산한 배수량은 화물적재 계획서와 다르게 나타나는 등 본선의 화물적재 계획서는 선박의 정확한 적재 상태를 반영하지 못했던 것으로 추정된다.
- 5.4 본선의 만재홀수선은 3.892미터이나 출항 당시 홀수는 4.150미터로 본선은 만재홀수선을 약 0.26미터를 넘겨 적재하고 출항하였다. 본선은 만재홀수선을 넘긴 홀수를 출항보고서에 기재하여 보고하였으나 선사에서는 이를 확인하지 못하였고 이에 과적 해소를 위해 필요한 조치도 취해지지 않았다.
- 5.5 본선이 정박한 곳은 총톤수 3만톤 이상의 선박에게 권고되는 수심 약 30미터의 정박지로 본선이 투묘하기에는 수심이 깊은 곳이었다. 본선은 악천후 상황에서 정박지의 수심과 앵커체인 길이 등을 고려한 안전한 정박지를 선정해야 했으나 그렇게 하지 못했다.
- 5.6 거영썬호는 기상악화로 본선이 주묘 되고 선박이 경사 되는 상황에서 주기관을 사용하여 주묘에 대응하거나 좌현 앵커를 추가로 투묘하는 쌍묘박을 실시하여 파주력을 확보하는 등 안전조치를 이행하지 않았다.

section

6

권고

6. 권고

6.1 화물적재 계획서 수립 철저

- 6.1.1 선박은 화물적재 계획서 작성 시 평형수 등의 탱크별 적재량을 정확하게 반영하여 항해기간 동안 복원력, 선체 강도, 최적 트림 등을 계산하여야 할 것이다.
- 6.1.2 아울러 특정 화물 탱크의 적재량이 적을 경우 유동수효과 등으로 인해 선박의 복원력에 악영향을 줄 수 있다는 점을 인식하고 화물적재 계획서를 작성해야 할 것이다.
- 6.1.3 선사는 화물적재 계획서가 본선에서 규정에 맞게 작성되고 있는지 주기적으로 확인·감독하여 선박이 안전하게 운항할 수 있도록 관리해야 할 것이다.

6.2 만재흘수선 초과 운항 금지

- 6.2.1 선박은 출항 전 흘수를 실측하여 만재흘수선 초과 여부를 반드시 확인해야 한다. 만약 흘수가 만재흘수선을 초과한 것이 확인될 경우 평형수 배출 및 화물량 조정 등을 통해 만재흘수선이 넘지 않도록 조치하여야 할 것이다.
- 6.2.2 선사는 출항보고서를 형식적으로 받아볼 것이 아니라 출항보고서에 기재된 선박의 흘수가 만재흘수선을 초과하였는지 반드시 확인하는 한편 선박들이 만재흘수선이 넘은 상태로 출항하는 일이 없도록 철저히 관리해야 할 것이다.

6.3 피항 시 안전한 정박지 선정

- 6.3.1 선박은 악천후로 인해 피항 시 정박지의 수심과 본선의 앵커체인 길이 등을 고려하여 최대의 파주력을 확보할 수 있는 안전한 정박지를 찾아 투묘해야 할 것이다.
- 6.3.2 선사는 선박이 피항하여 정박지를 찾을 경우, 정박 예정 장소의 기상정보, 항만정보 등을 제공하는 등 선박이 안전한 곳에 정박할 수 있도록 최대한 지원해야 할 것이다.

6.4 악천후 시 정박당직 수칙 준수 철저

- 6.4.1 정박 당직자는 악천후 시 앵커가 주묘될 수 있음을 감안하여 투묘 위치를 자주 확인하고, 주기관 사용을 미리 준비해 두는 등 주묘에 대한 대비를 해야 할 것이다.
- 6.4.2 선장은 주묘가 발생하게 될 경우 주기관을 사용하여 선수를 바람이 불어오는 방향으로 유지하여 주묘가 되지 않도록 조치하고, 주묘가 계속될 경우 쌍묘박을 하거나, 외해로 나가는 등 선박안전 확보를 위한 조치를 해야 할 것이다.



해양수산부

중앙해양안전심판원