

# 제501 오룡호 침몰사고 원인분석을 위한 선박 복원성 계산

이재석\* · 정영구\*\* · 김지훈\*\*\* · 박지훈\*\*\*\* · † 이상갑

\*해양안전기술 책임연구원, \*\*한국시뮬레이션기술 연구소장, \*\*\*선박안전기술공단 책임검사원, \*\*\*\*한국해양대학교 대학원 조선해양시스템공학과, † 한국해양대학교 조선해양시스템공학부 교수

## Ship Stability Calculation for Cause Analysis of No. 501 Oryong Sinking Accident

Jae-Seok Lee\* · Young-Gu Chung\*\* · Jee-Hun Kim\*\*\* · Ji-Hoon Park\*\*\*\* · † Sang-Gab Lee

\*Marine Safety Technology, Busan, Korea

\*\*Korea Simulation Technologies, Goyang-Si, Korea

\*\*\*Korea Ship Safety Technology Authority, Sejong-Si, Korea

\*\*\*\*Depart. of Naval Architecture and Ocean Systems Eng, Graduate School of Korea Maritime & Ocean University, Busan, Korea

† Division of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering, Korea Maritime & Ocean University, Busan, Korea

**요 약** : 원양어선 제501 오룡호는 황천 중인 베링해에서 조업 후 피항하던 중 개구부를 통한 침수로 인하여 침몰하였으며 많은 선원들이 사망하고 실종되었다. 본 연구에서는 사고선박 침몰사고의 진행상황 별 유동수 영향과 어획물 배치 등을 고려한 선박복원성 계산을 KST-SHIP (선박안전기술공단 선박계산시스템)을 사용하여 수행하고 사고선박의 침몰사고 시의 침수 후 선박복원성을 분석하였다. 먼저 만재출항상태 (Full Load Departure Condition)에서의 사고선박의 비손상 복원성 계산서와 KST-SHIP을 사용한 비손상 선박복원성 계산 결과를 비교하여 검증하고, 사고선박의 출항 시부터 사고 직전까지의 배수량에 따른 비손상 복원성 계산을 수행하여 비손상 복원성을 분석하였다. 또한 사고선박 침몰사고 시의 진행상황 별 침수 후 선박복원성 계산을 수행하여 침수 후 복원성도 분석하였다.

**핵심용어** : 원양어선 제501 오룡호, 침몰사고 원인분석, 선박 복원성 계산, KST-SHIP (선박안전기술공단 선박계산시스템), 비손상 복원성, 침수 후 복원성

**Abstract** : Deep-sea fishing vessel No. 501 Oryong was fully flooded through its openings and sank to the bottom of the Bering Sea. The tragic accident was attributed to rough sea weather after a fishing operation in the Bering Sea, and led to the death or loss of many crewmen. In this study, the ship stability calculation was carried out using KST-SHIP (ship calculation system of KST), considering the free surface effect and fish catch arrangement according to the progress of its sinking accident, and stability after flooding was analyzed. The calculation results obtained using KST-SHIP were verified by comparing them to intact stability calculation sheet of the accident ship under the full load departure condition, and intact stability according to displacement from the departure of accident ship up to the moment of the accident was calculated and analyzed. The stability after flooding was also calculated and analyzed according to the progress during its sinking accident.

**Key words** : Deep-Sea Fishing Vessel No. 501 Oryong, Cause Analysis of Sinking Accident, Ship Stability Calculation, KST-SHIP (ship calculation system of KST), Intact Stability, Stability After Flooding.

### 1. 서 론

2014년 12월 1일 17:06경 (현지시각), 북태평양 러시아 베링해에서 조업 중이던 Fig. 1의 원양어선 제501 오룡호 (총톤수 1,753톤, 길이 76.17m, 너비 13.00m, 깊이 8.40m, 1978년 1월 1일 건조)가 기상악화로 어획물처리실 (processing & working space), 어창 (fish hold) 등에 다량의 해수가 유입되어 Fig. 2에서와 같이 수심 약 117m의 북위 61도 54분 36초, 서경 177도 09분 00초의 위치에서 침몰되어 많은 승무원이 사망 및 실

종되었다. LS-DYNA 코드 (LSTC, 2013)의 유체-구조 연성 (Fluid-Structure Interaction, FSI) 해석기법의 고도 정밀 M&S (highly advanced Modeling & Simulation) 시스템을 사용하여 실선 (full-scale ship) 침수·침몰 시뮬레이션을 수행하여 거친 해상상태에서 사고선박의 어획 및 피항 시의 침몰사고의 경과 과정 및 원인을 합리적으로 재현하여 분석하였다 (Lee et al., 2017; KMST, 2016). 러시아 베링해 침몰사고 지역의 기상 및 해상상태를 객관적으로 확보하기 위하여 침몰사고 지역의 시간대별 해상 시뮬레이션을 수행하여 침몰사고

† Corresponding author : 종신회원, sglee@kmou.ac.kr 051)410-4306

\* jslee\_mst@hanmail.net 051)410-4934

\*\* young@kostech.co.kr 031)903-2061

\*\*\* jeehunkim@kst.or.kr 044)330-2282

\*\*\*\* pjh15gorgy@naver.com 051)410-4934

당시의 파랑과 강풍 등을 분석하였고, Bretschneider & Mitsuyasu 스펙트럼과 von Karman 모델을 이용하여 유체-구조 연성 (FSI) 해석기법으로 불규칙 파랑과 강풍을 구현하였다.



Fig. 1 Scenery of deep-sea fishing vessel No. 501 Oryong

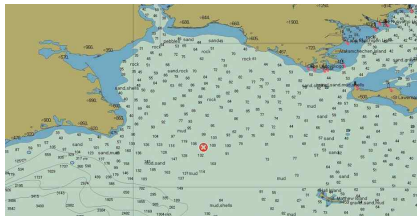


Fig. 2 Sinking location in the Bering Sea

제501 오룡호 침몰사고의 과정을 크게 2가지 시나리오 Case 1과 Case 2로 나누고 이를 다시 각각 6개(Case 1-0a, 1-0b, 1-1, 1-2, 1-3 및 1-4)와 7개(Case 2-0a, 2-0b, 2-1, 2-2, 2-3, 2-4 및 2-5)의 소 시나리오로 분류하여 실선 침수·침몰 시물레이션을 수행하였다. Case 1은 어획물을 피쉬병커에 투하하면서 다량의 해수가 유입된 상황에서 해치커버를 불완전하게 폐쇄하고 피항 하던 중 크게 우현으로 급경사가 발생하는 과정이고, Case 2는 어획물과 연료유를 좌현으로 이동시킨 후 파도를 좌현에서 우현으로 받으면서 또다시 좌현으로 급경사하고 선미가 수면에 잠기면서 침몰하는 과정이다. 각 시나리오에 따른 실선 침수·침몰 시물레이션의 결과들을 거친 해상상태에서와 사고선박에 발생한 횡·중요 운동에 따른 선박의 거동과 선내에서의 해수 유입에 따른 구획별 침수과정과 유동을 동영상을 제작하여 실제와 같이 현실감 있게 구현하였다. 또한 각 시나리오 별 선내 어획물처리실, 어창 및 기관실 등의 선내 각 구획에 유입된 해수 침수량과 침수율을 추정하였고, 해치커버와 오물배출구를 통해 유입된 해수 유입량도 분석하였다 (Lee et al., 2017).

우현이나 좌현 측으로 선체가 횡경사 함에 따라 어획물처리실로 다량의 해수가 유입되고 또한 무게중심보다 낮은 기관실과 어창으로도 해수가 다량 유입됨에 따라 이미 선미 트림된 사고선박의 선미흘수가 더욱 증가되면서 선미는 수면 아래로 동시에 침하하였다. 무게중심보다 상부에 위치한 어획물처리실에만 해수가 유입되었다면 선미부의 선미트림이나 선미부의 수면 아래로의 침하가 그렇게 크게 증가하지는 않았을 것으로 사료되고 횡경사가 전진됨에 따라 선박의 복원성은 훨씬 더 빨리 악화되었을 것으로 사료된다. 사고선박의 경우 횡

경사가 크게 진행되어도 선미부가 수면 아래로 침수되면서 기관실과 어창에 유입된 다량의 해수로 인하여 무게중심이 다소 아래로 내려가므로 일반적인 복원성 부족으로 인한 전복에 의한 침몰사고라기 보다는 선미의 침수가 병행한 대각도의 횡경사로 이어진 전복으로 침몰되었다는 것을 본 수치 시물레이션의 거동으로 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 제501오룡호 사고선박 침몰사고의 진행상황별 유동수 영향과 어획물 배치 등을 고려한 선박복원성 계산을 KST-SHIP (선박안전기술공단 선박계산시스템, KST, 2013)을 사용하여 수행하고 사고선박의 침몰사고 시의 침수 후 선박복원성을 분석하였다 (MOF, 2015). 먼저 만재출항상태 (Full Load Departure Condition)에서의 사고선박의 비손상 복원성 계산서와 KST-SHIP을 사용한 비손상 선박복원성 계산 결과를 비교하여 검증하고, 사고선박의 출항 시부터 사고 직전까지의 배수량에 따른 비손상 복원성 계산을 수행하여 비손상 복원성을 분석하였다. 또한 실선 침수·침몰 시물레이션의 시나리오 중 대표적으로 아래의 경우에 대하여 사고선박 침몰사고 시의 진행상황 별 침수 후 선박복원성 계산을 수행하여 침수 후 복원성도 분석하였다.

- Case 1 : 과도한 조업활동과 기상악화로 인해 선내로 해수가 다량으로 유입되고, 좌현 횡파에 의해 우현 횡경사가 발생한 경우
  - Case 1-1(0°) : 피시병커 해치커버를 통한 어획물 투하 시 피쉬병커에 해수가 대량으로 유입되어 침수된 상태
  - Case 1-3(25°) : Case 1-2에서 피시병커 나무 간이칸막이의 파손으로 어획물과 해수가 어획물처리실로 유입되었고 불완전하게 폐쇄된 해치커버와 덮개가 파손된 오물배출구를 통해 해수가 지속적으로 유입되어 선체가 25° 정도까지 우현으로 경사한 상태
  - Case 1-4(35°) : 불완전하게 폐쇄된 해치커버와 오물배출구를 통한 지속적인 해수 유입으로 35° 정도까지 우현으로 횡경사한 상태
- Case 2 : 연료유와 어획물의 좌현 측 이동과 배수 작업으로 일시적인 평형상태에서 선체를 선회하여 우현 횡파에 의해 좌현으로 급경사가 발생하여 침몰한 경우
  - Case 2-0(0°) : 일시적인 평형상태
  - Case 2-2(30°) : 해치커버와 오물배출구를 통한 지속적인 해수 유입으로 좌현 30° 정도까지 좌현으로 횡경사한 상태
  - Case 2-3(45°) : 해치커버와 오물배출구를 통한 지속적인 해수 유입으로 좌현 45° 정도까지 좌현으로 횡경사한 상태

## 2. KST-SHIP의 사고선박 비손상 복원성 계산 결과 검증

KST-SHIP을 사용한 비손상 복원성 계산 결과를 검증하기 위하여 사고선박의 만재출항상태에서의 복원성 계산서와 비교하였다. Table 1은 사고선박의 복원성 계산서와 KST-SHIP을 사용하여 계산한 유체정역학적 주요 특성치를, Table 2는 사고선박의 복원성 계산서와 KST-SHIP을 사용하여 계산한 연료유 탱크 (F.O.T.), 윤활유 탱크 (L.O.T.), 청수 탱크

(F.W.T.) 및 어창 (fish hold) 등의 각 구획별 용적을 보여주 고 있다. 이들의 오차가 크지 않음을 알 수 있다.

만재출항상태의 비손상 복원성 계산표에서의 각 탱크의 중 량분포(Fig. 3)에 따른 경우와 KST-SHIP의 계산에 의한 경 우의 각 중량별 및 선박 전체의 유체정역학적 특성치는 각각 Table 3과 Table 4에 요약하였고, 횡경사 각도에 따른 복원정 (GZ)의 계산결과는 Table 5에, 복원정 곡선은 Fig. 4(a) 및 (b)에 나타내었다. 복원성 계산서와 KST-SHIP에 의한 계산 결과의 복원성 판정기준 (stability criteria)과 복원정 곡선은

Table 1 Comparison of hydrostatic characteristics of stability calculation sheet and KST-SHIP calculation

draft (m)	displacement (ton)			M.T.C. (ton*m)			L.C.B. (m)			L.C.F. (m)			KB (m)		
	calculation	KST-SHIP	error	calculation	KST-SHIP	error	calculation	KST-SHIP	error	calculation	KST-SHIP	error	calculation	KST-SHIP	error
6.00	3,114.5	3,115.2	-0.70	38.73	38.95	-0.22	-2.04	-2.22	0.18	-5.04	-5.65	0.61	3.09	3.06	0.03
6.05	3,153.8	3,155.5	-1.70	39.07	39.30	-0.23	-2.08	-2.26	0.18	-5.08	-5.67	0.59	3.12	3.09	0.03
6.10	3,194.0	3,195.8	-1.80	39.40	39.66	-0.26	-2.12	-2.31	0.19	-5.11	-5.69	0.58	3.15	3.12	0.03
6.15	3,234.3	3,236.0	-1.70	39.73	40.02	-0.29	-2.15	-2.35	0.20	-5.14	-5.72	0.58	3.18	3.15	0.03
6.20	3,275.4	3,276.6	-1.20	40.04	40.37	-0.33	-2.19	-2.39	0.20	-5.16	-5.74	0.58	3.21	3.17	0.04
6.25	3,316.4	3,317.5	-1.10	40.35	40.72	-0.37	-2.23	-2.43	0.20	-5.18	-5.75	0.57	3.24	3.20	0.04
6.30	3,357.5	3,358.4	-0.90	40.66	41.07	-0.41	-2.27	-2.47	0.20	-5.20	-5.77	0.57	3.27	3.23	0.04
6.35	3,398.5	3,399.3	-0.80	40.97	41.42	-0.45	-2.30	-2.51	0.21	-5.22	-5.78	0.56	3.30	3.26	0.04
6.40	3,439.5	3,440.6	-1.10	41.28	41.77	-0.49	-2.34	-2.55	0.21	-5.24	-5.79	0.55	3.32	3.29	0.03
6.45	3,480.9	3,482.0	-1.10	41.58	42.10	-0.52	-2.37	-2.59	0.22	-5.25	-5.80	0.55	3.35	3.32	0.03
6.50	3,522.6	3,523.5	-0.90	41.86	42.44	-0.58	-2.41	-2.63	0.22	-5.26	-5.80	0.54	3.38	3.35	0.03
6.55	3,564.4	3,565.0	-0.60	42.15	42.78	-0.63	-2.44	-2.67	0.23	-5.27	-5.81	0.54	3.41	3.38	0.03
6.60	3,606.2	3,606.8	-0.60	42.43	43.00	-0.57	-2.47	-2.70	0.23	-5.27	-5.78	0.51	3.44	3.41	0.03
6.65	3,648.0	3,648.7	-0.70	42.72	43.22	-0.50	-2.50	-2.74	0.24	-5.28	-5.76	0.48	3.50	3.44	0.06
6.70	3,689.7	3,690.6	-0.90	43.00	43.44	-0.44	-2.54	-2.77	0.23	-5.28	-5.73	0.45	3.50	3.47	0.03
6.75	3,731.9	3,732.6	-0.70	43.28	43.69	-0.41	-2.57	-2.80	0.23	-5.29	-5.71	0.42	3.53	3.50	0.03
6.80	3,774.4	3,775.0	-0.60	43.54	44.02	-0.48	-2.60	-2.84	0.24	-5.28	-5.71	0.43	3.56	3.53	0.03
6.85	3,816.8	3,817.3	-0.50	43.80	44.36	-0.56	-2.63	-2.87	0.24	-5.28	-5.70	0.42	3.59	3.56	0.03
6.90	3,859.2	3,859.7	-0.50	44.07	44.69	-0.62	-2.66	-2.90	0.24	-5.28	-5.70	0.42	3.62	3.59	0.03
6.95	3,901.7	3,902.3	-0.60	44.33	45.02	-0.69	-2.68	-2.93	0.25	-5.28	-5.69	0.41	3.64	3.62	0.02
7.00	3,935.6	3,935.2	0.40	44.54	45.36	-0.82	-2.71	-2.96	0.25	-5.28	-5.68	0.40	3.67	3.65	0.02

Table 2 Comparison of each compartment volume of stability calculation sheet and KST-SHIP calculation

compartment	Capacity (m3)			L.C.G. (m)			V.C.G. (m)		
	calculation	KST-SHIP	error	calculation	KST-SHIP	error	calculation	KST-SHIP	error
No. 3 F.O.T. (P)	16.47	16.65	-0.18	29.57	28.82	0.75	1.97	2.02	-0.05
No. 4 F.O.T. (S)	48.10	48.77	-0.67	29.44	29.01	0.43	4.01	4.01	0.00
No. 5 F.O.T. (P)	18.60	19.29	-0.69	22.42	22.15	0.27	1.22	1.19	0.03
No. 6 F.O.T. (S)	18.60	19.29	-0.69	22.42	22.15	0.27	1.22	1.19	0.03
No. 7 F.O.T. (P)	32.52	32.71	-0.19	14.50	13.90	0.60	1.05	1.03	0.02
No. 8 F.O.T. (S)	32.52	32.71	-0.19	14.50	13.90	0.60	1.05	1.03	0.02
No. 9 F.O.T. (P)	37.63	37.91	-0.28	6.50	6.35	0.15	0.91	0.88	0.03
No. 10 F.O.T. (S)	37.63	37.91	-0.28	6.50	6.35	0.15	0.91	0.88	0.03
No. 11 F.O.T. (P)	38.23	38.39	-0.16	-0.30	-0.76	0.46	0.76	0.74	0.02
No. 12 F.O.T. (S)	38.23	38.39	-0.16	-0.30	-0.76	0.46	0.76	0.74	0.02
No. 15 F.O.T. (P)	54.15	53.87	0.28	-22.82	-22.94	0.12	2.03	2.02	0.01
No. 16 F.O.T. (S)	17.10	17.07	0.03	-20.07	-20.21	0.14	2.03	2.02	0.01
No. 17 F.O.T. (P)	83.85	83.76	0.09	-28.16	-28.01	-0.15	4.83	4.70	0.13
No. 18 F.O.T. (S)	25.30	25.20	0.10	-24.25	-24.40	0.15	2.22	2.22	0.00
No. 19 F.O.T. (P)	30.00	29.99	0.01	-33.35	-33.46	0.11	5.40	5.43	-0.03
No. 20 F.O.T. (S)	68.25	68.58	-0.33	-27.73	-28.01	0.28	4.88	4.70	0.18
No. 21 F.O.T. (P)	37.20	37.50	-0.30	-38.57	-38.76	0.19	5.59	5.54	0.05
No. 22 F.O.T. (S)	30.00	29.99	0.01	-33.35	-33.46	0.11	5.40	5.43	-0.03
No. 24 F.O.T. (S)	37.20	37.50	-0.30	-38.57	-38.76	0.19	5.59	5.54	0.05
No. 25 F.O.T. (C)	66.50	66.82	-0.32	-33.51	-33.67	0.16	4.96	5.10	-0.14
Sub Total	768.08	772.29	-4.21	-	-	-	-	-	-
No. 27 L.O.T. (P)	8.90	8.92	-0.02	-17.53	-17.58	0.05	2.28	2.30	-0.02
No. 28 L.O.T. (S)	8.90	8.92	-0.02	-17.53	-17.58	0.05	2.28	2.30	-0.02
Sub Total	17.80	17.84	-0.04	-	-	-	-	-	-
No. 29 F.W.T. (P)	37.50	37.39	0.11	-12.31	-12.43	0.12	2.07	2.06	0.01
No. 30 F.W.T. (S)	37.50	37.39	0.11	-12.31	-12.43	0.12	2.07	2.06	0.01
No. 31 F.W.T. (P)	34.43	34.95	-0.52	-6.52	-6.35	-0.17	1.90	1.92	-0.02
No. 32 F.W.T. (S)	29.35	29.40	-0.05	-6.22	-6.04	-0.18	1.89	1.92	-0.03
Sub Total	138.78	139.14	-0.35	-	-	-	-	-	-
No. 1 Fish Hold	471.30	471.91	-0.61	17.22	17.15	0.07	3.82	3.90	-0.08
No. 2 Fish Hold	635.21	635.15	0.06	2.75	2.98	-0.23	3.55	3.73	-0.18
Sub Total	1106.51	1,107.05	-0.55	-	-	-	-	-	-

Table 3 Hydrostatic characteristics according to weight under full load departure condition

(a) stability calculation sheet	weight (ton)	L.C.G. (m)	L-Moment (ton*m)	V.C.G. (m)	V-Moment (ton*m)	F.S.M. (ton*m)
Constant Weight	87.77	-9.77	-857.78	7.93	696.19	5.74
Standard Loading for Departure	795.69	-11.69	-9,303.63	3.03	2,409.91	176.59
Sub Total	883.45	-11.50	-10,161.41	3.52	3,106.10	182.33
Paper Box & Vinyl	4.00	2.20	8.80	2.87	11.48	0.00
Sub Total	4.00	2.20	8.80	2.87	11.48	0.00
Dead Weight	887.45	-11.44	-10,152.61	3.51	3,117.58	182.33
Light Weight	2,487.14	-3.88	-9,650.10	5.87	14,599.51	0.00
Displacement	3,374.59	-5.87	-19,802.71	5.25	17,717.09	182.33

(b) KST-SHIP calculation	weight (ton)	L.C.G. (m)	L-Moment (ton*m)	V.C.G. (m)	V-Moment (ton*m)	F.S.M. (ton*m)
Constant Weight	87.67	-9.81	-859.94	7.93	695.30	5.74
Standard Loading for Departure	797.23	-11.76	-9,378.59	2.95	2,349.30	171.15
Sub Total	884.89	-11.57	-10,238.53	3.44	3,044.60	176.89
Paper Box & Vinyl	4.00	2.20	8.80	2.87	11.48	0.00
Sub Total	4.00	2.20	8.80	2.87	11.48	0.00
Dead Weight	888.892	-11.51	-10,229.72	3.44	3,056.08	176.89
Light Weight	2,487.14	-3.88	-9,650.10	5.87	14,599.51	0.00
Displacement	3,376.03	-5.89	-19,879.83	5.23	17,655.59	176.89

Table 4 Hydrostatic characteristics of total ship under full load departure condition

	(a) stability calculation	(b) KST-SHIP calculation		(a) stability calculation	(b) KST-SHIP calculation
Draft Equivalent	6.321 m	6.322 m	Transverse Metacenter (KMT)	6.242 m	6.204 m
Total Trim by Stern	-2.968 m	-2.783 m	Vertical Center of Gravity (KG)	5.250 m	5.230 m
Draft Forward	4.625 m	4.710 m	Metacentric Height (GM)	0.992 m	0.975 m
Draft Aftward	7.593 m	7.493 m	Free Surface Correction (GG')	0.054 m	0.052 m
Draft Mean	6.109 m	6.102 m	Correction Metacentric Height (G'M)	0.938 m	0.922 m
L.C.B.	-2.281 m	-2.490 m	M.T.C.	40.786 m*ton	41.224 m*ton
L.C.F.	-5.209 m	-5.772 m	T.P.C.	8.223 mt/cm	8.206 mt/cm

Table 6과 Fig. 4(c)에 비교하였으며 KST-SHIP에 의한 계산 결과는 복원성 계산서와 전반적으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

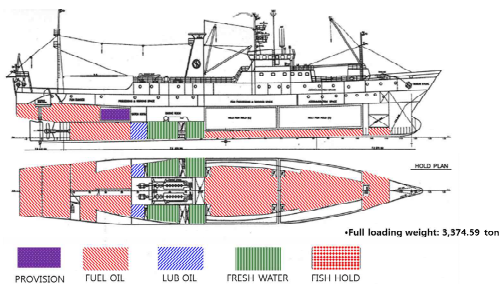
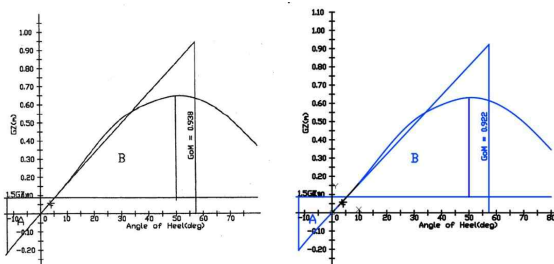
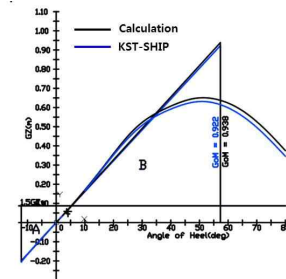


Fig. 3 Weight distribution under full load departure condition



(a) stability calculation sheet (b) KST-SHIP calculation



(c) stability calculation sheet & KST-SHIP calculation  
Fig. 4 Righting arm (GZ) curve under full load departure condition

Table 5 Righting arm (GZ) according to heeling angle under full load departure condition

heeling angle (°)	(a) stability calculation sheet			(b) KST-SHIP calculation		
	KN (m)	KG*SIN (m)	GZ (m)	KN (m)	KG*SIN (m)	GZ (m)
10	1.091	0.942	0.170	1.083	0.917	0.166
20	2.173	1.855	0.359	2.159	1.807	0.352
30	3.174	2.711	0.522	3.148	2.641	0.507
40	4.016	3.486	0.607	3.987	3.395	0.592
50	4.713	4.154	0.650	4.678	4.046	0.631
60	5.217	4.696	0.623	5.173	4.574	0.598
70	5.511	5.096	0.526	5.460	4.964	0.496
80	5.598	5.340	0.375	5.548	5.202	0.346

Table 6 Comparison of stability criteria between stability calculation sheet & KST-SHIP calculation under full load departure condition

stability criteria	stability calculation sheet	KST-SHIP calculation	criterion
GoM (m):	0.938	0.922	0.150
GZ Curve Area between 0-30 deg (m-rad):	0.138	0.135	0.055
GZ Curve Area between 30-40/SWI deg (m-rad):	0.099	0.097	0.030
GZ Curve Area between 0-40/SWI deg (m-rad):	0.238	0.232	0.090
GZ at 30 deg (m):	0.522	0.507	0.200
Angle of Max. GZ occurs at (deg):	51.5	50.9	25.0

### 3. 사고선박 출항 후 배수량에 따른 비손상 복원성 계산

사고선박의 출항 후 Table 7의 각 조업 일자에서의 배수량에 따른 비손상 복원성을 계산하여 항해 중 복원성을 분석하였다. 2014년 12월 1일 오전은 양망 작업하기 전의 배수량을, 사고 직전은 어획물을 양망하여 갑판에 적재한 배수량 상태를 의미한다. 해수유입 개구(Sea Water Inlet; SWI)를 원래 위치인 연돌 아래에서 오물배출구 덮개가 파손된 위치로 변경하여 비손상 복원성을 계산하고 원래 위치인 연돌 아래인 경우와 비교 검토하였다.

제2장에서와 같이 7월 10일 출항 시, 8월 14일 어획 당시, 12월 1일 사고 당일 오전 및 사고 직전의 비손상 복원성 계산서의 각 중량별 및 선박 전체의 유체정역학적 특성치, 횡경사 각도에 따른 복원정 및 복원정 곡선을 구하고, Table 8에서와 같이 그들의 비손상 복원성 판정기준을 요약하였다. 7월 10일

출항 시와 8월 14일 어획 당시는 비손상 복원성 판정기준을 만족하고 있음을 알 수 있다. 그러나 12월 1일 사고 당일 오전과 사고 직전은 복원성 판정기준이 일부 미달되었고, 격심한 바람에 의한 경사우력정과 파도에 의한 횡요를 고려한 동복원력(이하 ‘파도와 바람에 의한 동복원력’이라 한다) 면적비도 7월 10일 출항 시와 8월 14일 어획 당시에 비하여 매우 작았다.

Fig. 5와 Table 9는 각각 7월 14일 출항 후에서 12월 1일 사고 직전까지의 사고선박의 배수량에 따른 복원정 곡선 및 복원성 판정기준을 비교해 보여주고 있다. 배수량이 큰 순서로 복원정 값이 작아지는 경향을 확인할 수 있었지만, 8월 14일은 어획물이 어창에 만재되어 있어서 무게중심이 낮아 복원성은 양호하였다. 12월 1일 어획당시 오전과 사고 직전은 복원성 판정기준에 미달하였고, 격심한 파도와 바람에 의한 동복원력 면적비도 7월 10일과 8월 14일에 비교하여 매우 작았음을 알 수 있다. 이것은 9월에 오물배출구 덮개가 파손되었고 그 이후 조업 활동 시 해수유입 개구가 연돌 아래에서 오

Table 7 Displacement and draft according to loading condition at each fishing date on voyage

date (2014)	fuel oil (ton)	lubrication oil (ton)	fish hold (ton)	fish catch (ton)	etc. (ton)	deadweight (ton)	displacement (ton)	draft (Ext.) (m)	draft (baseline) (m)	Remark
7. 10	670.8	14.7	-	-	258.2	944.7	3,431.8	6.39	5.74	departure
7. 22	554.8	14.0	-	-	194.0	762.8	3,249.9	6.17	5.52	arrival at fishing ground
7. 27	500.9	13.7	391.3	-	194.0	1,099.9	3,587.0	6.58	5.93	record of fish hold
8. 1	445.7	13.4	811.4	-	194.0	1,464.5	3,951.6	7.01	6.36	before transshipment
8. 4	593.9	9.54	5.6	-	194.0	803.0	3,290.2	6.22	5.57	after transshipment
8. 5	582.9	13.1	87.3	-	194.0	877.3	3,364.4	6.31	5.66	
8. 6	571.8	13.1	170.7	-	194.0	949.6	3,436.7	6.39	5.74	
8. 14	468.3	12.5	824.3	-	194.0	1,499.1	3,986.2	7.05	6.40	excess of full load draft
8. 16	451.9	12.3	7.3	-	194.0	665.5	3,152.6	6.05	5.40	after transshipment
11. 25	586.9	5.6	64.5	-	194.0	851.0	3,338.1	6.28	5.63	
11. 26	575.9	5.5	104.5	-	194.0	879.9	3,367.0	6.31	5.66	
11. 27	566.1	5.4	150.5	-	194.0	916.0	3,403.1	6.36	5.71	excess of full load draft
11. 30	537.3	5.2	275.2	-	194.0	1,011.7	3,498.8	6.47	5.82	
12. 1	527.7	5.1	315.2	-	194.0	1,042.1	3,529.2	6.51	5.86	morning
12. 1	527.7	5.1	315.2	20	194.0	1,062.1	3,549.2	6.53	5.88	before accident

Table 8 Intact stability criteria on July 10, August 14, in the morning and right before accident on December 1

stability criteria	departure from the port on 7. 10,			fishing on 8. 14.		
	KST-SHIP	criterion (>=)	judgement	KST-SHIP	criterion (>=)	judgement
GoM (m):	1.018	0.150	GOOD	1.180	0.150	GOOD
GZ Curve Area between 0-30 deg (m-rad):	0.147	0.055	GOOD	0.166	0.055	GOOD
GZ Curve Area between 30-40/SWI deg (m-rad):	0.105	0.030	GOOD	0.121	0.030	GOOD
GZ Curve Area between 0-40/SWI deg (m-rad):	0.253	0.090	GOOD	0.287	0.090	GOOD
GZ at 30 deg (m):	0.551	0.200	GOOD	0.616	0.200	GOOD
Angle of Max. GZ occurs at (deg):	51.5	25.000	GOOD	49.6	25.000	GOOD
Angle of down-flooding (deg):	53.7	-		49.2	-	
Area A (m-rad)	0.048	-		0.054	-	
Area B (m-rad)	0.304	-		0.361	-	
Area Ratio B/A	6.269	1	GOOD	6.654	1	GOOD
stability criteria	morning on accident date 12. 1.			right before accident on 12. 1.		
	KST-SHIP	criterion (>=)	judgement	KST-SHIP	criterion (>=)	judgement
GoM (m):	0.923	0.150	GOOD	0.910	0.150	GOOD
GZ Curve Area between 0-30 deg (m-rad):	0.136	0.055	GOOD	0.133	0.055	GOOD
GZ Curve Area between 30-40/SWI deg (m-rad):	-0.104	0.030	N.G	-0.101	0.030	N.G
GZ Curve Area between 0-40/SWI deg (m-rad):	0.029	0.090	N.G	0.027	0.090	N.G
GZ at 30 deg (m):	0.522	0.200	GOOD	0.508	0.200	GOOD
Angle of Max. GZ occurs at (deg):	50.7	25.000	GOOD	50.4	25.000	GOOD
Angle of down-flooding (deg):	14.3	-		13.7	-	
Area A (m-rad)	0.043	-		0.042	-	
Area B (m-rad)	0.013	-		0.011	-	
Area Ratio B/A	0.307	1	N.G	0.270	1	N.G

Table 9 Comparison of stability criteria according to displacement from 7. 10. ~ 12. 1.

stability criteria	7. 10. departure	8.14. fishing	12.1. morning	12.1. before accident	criterion (>=)
Displacement (ton)	3,431.8	3,986.2	3,529.2	3,549.2	-
GoM (m):	1.018	1.180	0.923	0.910	0.150
GZ Curve Area between 0-30 deg (m-rad):	0.147	0.166	0.136	0.133	0.055
GZ Curve Area between 30-40/SWI deg (m-rad):	0.105	0.121	-0.104	-0.101	0.030
GZ Curve Area between 0-40/SWI deg (m-rad):	0.253	0.287	0.029	0.027	0.090
GZ at 30 deg (m):	0.551	0.616	0.522	0.508	0.200
Angle of Max. GZ occurs at (deg):	51.5	49.6	50.7	50.4	25.000
Angle of down-flooding (deg):	53.7	49.2	14.3	13.7	-
Area A (m-rad)	0.048	0.054	0.043	0.042	-
Area B (m-rad)	0.304	0.361	0.013	0.011	-
Area Ratio B/A (>=1)	6.269	6.654	0.307	0.270	1

물배출구로 변경되어 해수유입각(Angle of down-flooding)의 크기가 크게 감소한 결과로 볼 수 있다. 이에 따라 선체가 횡경사한 후 복원이 쉽게 되지 못하고 지속적인 해수의 유입으로 인하여 침수로 인한 침몰이 예측된다.

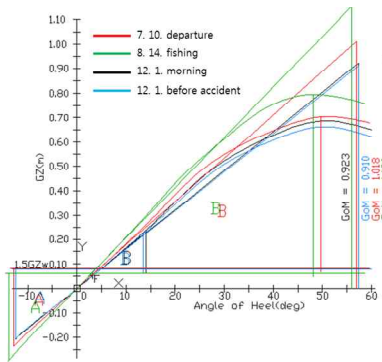


Fig. 5 Comparison of righting arm (GZ) curve according to displacement from 7. 10. ~ 12. 1.

다음은 해수유입 개구를 원래 위치인 연돌 아래로 수정한 경우의 복원성 곡선 및 복원성 판정기준을 각각 Fig. 6과 Table 10에 비교하였다. 예상한 대로 해수유입 개구 위치를 연돌 아래로 수정한 결과 복원성 판정기준을 만족하였고 바람에 의한 동복원력 면적비도 크게 나왔다. 해수유입 개구가 오물배출구 위치에 있을 경우 해수유입각은 12월 1일 어획당시 오전과 사고 직전에 각각 14.3°와 13.7°에서 원래 위치인 연돌 아래로 수정한 후 53.3°와 53.0°로 크게 차이가 나고 이에 따른 바람에 의한 동복원력 면적비도 큰 차이가 있음을 확인할 수 있다. Fig. 6에서 해수유입각이 각각 53.3°와 53.0°인 후자의 기준선은 50.0°를 적용하여 일치하고 있음을 발견할 수 있

다. 즉, 비손상 복원성 기준에 따르면 오물배출구 덮개가 파손되어 수밀이 되지 않음에도 불구하고 조업을 계속하여 선체가 악화된 해상상태에서 큰 파도와 강한 바람에 급격히 횡경사가 발생할 경우 쉽게 복원되지 못하고, 그 결과 지속적인 해수 유입으로 침수로 인한 침몰이 발생할 것으로 추정된다.

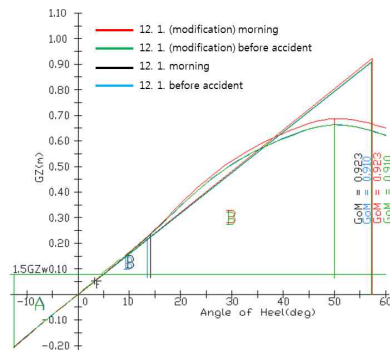


Fig. 6 Comparison of righting arm (GZ) curve according to seawater inflow opening in morning and right before accident on 12. 1

#### 4. 사고 시의 침수 후 복원성 계산 및 분석

사고선박의 어획물처리실은 선박의 무게중심보다 상부에 위치하기 때문에 어획물처리실에 해수가 유입됨에 따라 침수 후 복원성은 현저히 떨어지는 경향이 있고 복원성이 악화되는 경향이 있다는 것을 유체-구조 연성 해석기법을 이용한 시뮬레이션 결과로부터 확인할 수 있었다. 시뮬레이션 결과로부터 사고당시의 해수의 구획별 침수상황에 따라 침수 후 복원성 계산 시나리오를 설정하고 계산을 수행하였다.

Table 10 Comparison of stability criteria according to seawater inflow opening in morning & right before accident on 12. 1

stability criteria	12.1. morning	12.1. morning (modification)	12.1 before accident	12.1. before accident (modification)	criterion (>=)
GoM (m):	0.923	0.923	0.910	0.910	0.150
GZ Curve Area between 0-30 deg (m-rad):	0.136	0.136	0.133	0.133	0.055
GZ Curve Area between 30-40/SWI deg (m-rad):	-0.104	0.101	-0.101	0.098	0.030
GZ Curve Area between 0-40/SWI deg (m-rad):	0.029	0.238	0.027	0.231	0.090
GZ at 30 deg (m):	0.522	0.522	0.508	0.508	0.200
Angle of Max. GZ occurs at (deg):	50.7	50.7	50.4	50.4	25.000
Angle of down-flooding (deg):	14.3	53.3	13.7	53.0	-
Area A (m-rad)	0.043	0.043	0.042	0.042	-
Area B (m-rad)	0.013	0.288	0.011	0.279	-
Area Ratio B/A (>=1)	0.307	6.745	0.270	6.635	1

침수·침몰 시뮬레이션 결과로부터 확인할 수 있었던 선체가 우현 35° 경사졌을 때는 기관실을 밀폐시키고 기관실 입구의 해수를 배수시켰기 때문에 기관실로의 해수 유입은 없었으나 어창의 어획물을 좌현으로 이동시킬 때 어창으로는 일부 해수가 유입되고 있었고, 30°, 45°로 좌현으로 경사가 크게 발생할 경우에는 기관실과 어창으로 해수가 상당히 다량으로 유입되었다.

사고선박 침몰사고 시의 진행상황 별로 크게 2가지 Case 1 (과도한 조업활동과 기상악화로 인해 선내로 해수가 유입되고, 좌현 횡파에 의해 우현 횡경사가 발생한 경우)과 Case 2 (어획물 이동과 배수 작업으로 일시적인 평형상태에서 선체를 선회하여 우현 횡파에 의해 좌현으로 급경사가 발생한 경우)의 경우에 대하여 각각 단계적으로 어획물처리실뿐만 아니라 기관실과 어창에도 해수가 유입되는 경우에 대하여 침수 후 복원성 계산을 수행하고 분석하였다. Fig. 7에서와 같이 어창 1번과 2번에 적재되어 있는 어획물은 침몰사고의 각 진행상황에 따라 좌우 및 길이방향으로 적재되는 형상이 변경되었다.

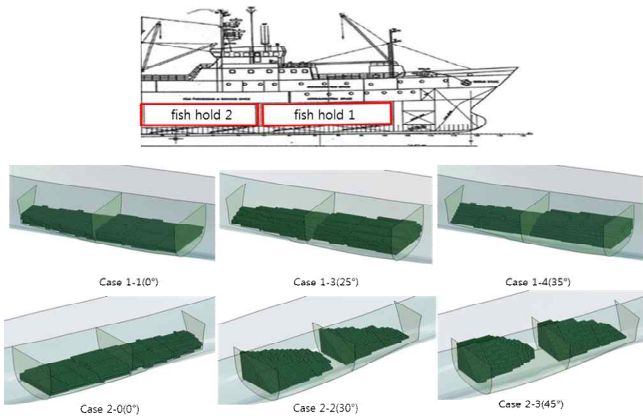


Fig. 7 Laden situation of fish catch according to sinking accident progress

4.1 Case 1(좌현 횡파에 의해 우현 횡경사가 발생한 경우)

과도한 조업활동과 기상악화로 인해 선내로 해수가 유입되고, 좌현 횡파에 의해 우현 횡경사가 발생한 경우의 Case 1에서는 아래와 같이 3개의 경우, Case 1-1(0°), Case 1-3(우현 25°), Case 1-4(우현 35°)에 대하여 단계적으로 어획물처리실뿐만 아니라 기관실과 어창에도 해수가 유입되는 경우에 대하여 침수 후 복원성 계산을 수행하고 분석하였다. Fig. 8과 Table 11은 Case 1의 침몰사고 진행상황에 따른 어획물의 적재상태와 각 경우에 대한 외부 해수 유무를 고려한 선내 침수 구획 및 침수율을 각각 보여주고 있다. 침수 구획은 각각 경사각에 따른 복원정 및 그 면적비를 Table 12에 요약하였고 복원정 곡선은 Fig. 9에 나타내었다. 그리고 복원성 판정기준은 Table 13에 요약하였다.

Case 1-1(0°)는 복원성 판정기준은 모두 만족하였고, 격심한 파도와 바람에 의한 동복원력 면적비도 양호하였다. Case

1-3(우현 25°)과 Case 1-4(우현 35°)는 복원성 판정기준 중 GoM을 제외하고 불만족하였고, 바람에 의한 동복원력 면적비도 만족하지 못하였다. 이것은 침수로 인한 횡경사로 복원력이 각각 25° 및 35° 경사 이후로부터 발생하기 때문에 충분한 복원력 및 동복원력 에너지를 가지지 못함을 의미한다.

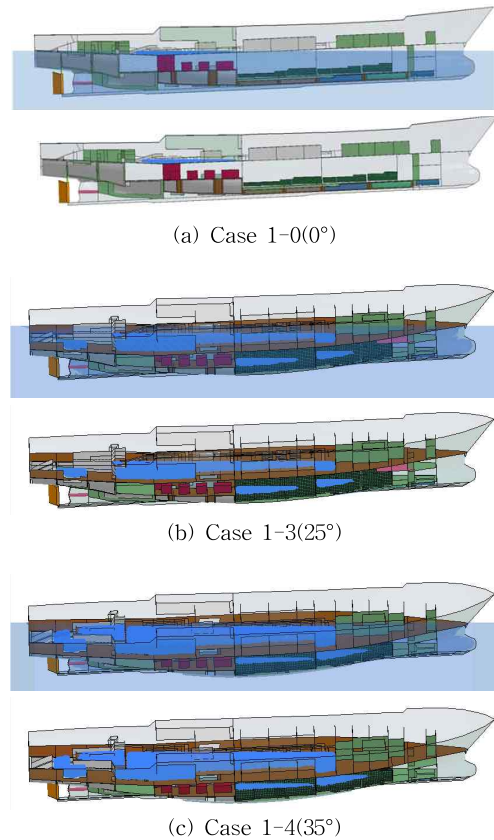
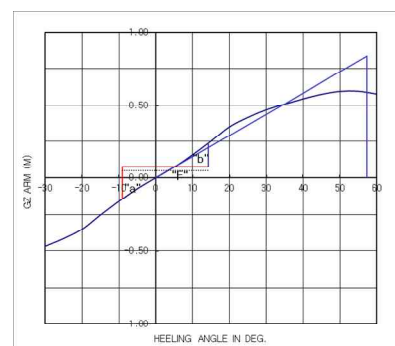


Fig. 8 Flooding compartment situation in Case 1

Table 11 Permeability according to flooding compartment in Case 1

Flooding Compartment	Permeability(%)		
	(a) Case 1-0(0°)	(b) Case 1-3(25°)	(c) Case 1-4(35°)
NO. 1 Fish Hold	-	5.0	7.0
NO. 2 Fish Hold	-	4.0	8.0
Engine Room	-	-	-
Process Room	3.3	34.0	47.9
Fish Bunker	51.0	27.0	65.3



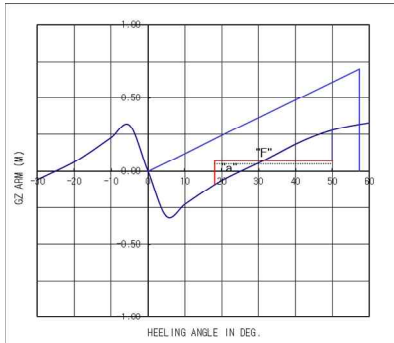
(a) Case 1-0(0°)

Table 12 Righting arm (GZ) and area ratio in Case 1

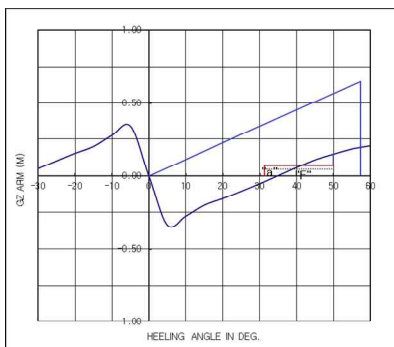
angle(°)	(a) Case 1-0(0°)			(b) Case 1-3(25°)			(c) Case 1-4(35°)		
	K.Go*sinθ (m)	GZ (m)	area (m*rad)	K.Go*sinθ (m)	GZ (m)	area (m*rad)	K.Go*sinθ (m)	GZ (m)	area (m*rad)
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.458	0.073	0.003	0.458	-0.310	-0.014	0.458	-0.340	-0.013
10	0.912	0.159	0.013	0.912	-0.227	-0.037	0.912	-0.277	-0.036
15	1.360	0.253	0.031	1.360	-0.142	-0.053	1.360	-0.201	-0.054
20	1.797	0.352	0.057	1.797	-0.064	-0.062	1.797	-0.155	-0.067
25	2.220	0.417	0.091	2.220	-0.001	-0.065	2.220	-0.105	-0.076
30	2.627	0.469	0.130	2.627	0.058	-0.063	2.627	-0.053	-0.082
35	3.013	0.509	0.173	3.013	0.120	-0.055	3.013	0.004	-0.085
40	3.377	0.545	0.219	3.377	0.184	-0.042	3.377	0.060	-0.084
45	3.714	0.575	0.268	3.714	0.237	-0.024	3.714	0.112	-0.080
50	4.024	0.595	0.319	4.024	0.278	-0.002	4.024	0.150	-0.074
55	4.303	0.596	0.371	4.303	0.307	0.024	4.303	0.184	-0.066
60	4.549	0.576	0.422	4.549	0.328	0.052	4.549	0.206	-0.056

Table 13 Stability criteria after flooding in Case 1

stability criteria	(a) Case 1-0(0°)			(b) Case 1-3(25°)			(c) Case 1-4(35°)		
	KST-SHIP	criterion	judgement	KST-SHIP	criterion	judgement	KST-SHIP	criterion	judgement
GoM (m):	0.834	0.150	GOOD	0.696	0.150	GOOD	0.647	0.150	GOOD
GZ Curve Area between 0-30 deg (m-rad):	0.130	0.055	GOOD	-0.063	0.055	N.G	-0.097	0.055	N.G
GZ Curve Area between 30-40/SWI deg (m-rad):	0.089	0.030	GOOD	0.021	0.030	N.G	-0.001	0.030	N.G
GZ Curve Area between 0-40/SWI deg (m-rad):	0.219	0.090	GOOD	-0.042	0.090	N.G	-0.096	0.090	N.G
GZ at 30 deg (m):	0.469	0.200	GOOD	0.058	0.200	N.G	-0.053	0.200	N.G
Angle of down-flooding (deg):	14.3	-	-	14.3	-	-	14.3	-	-
Area A (m-rad)	0.024	-	-	0.018	-	-	0.023	-	-
Area B (m-rad)	0.028	-	-	-	-	-	-	-	-
Area Ratio B/A	1.167	1	GOOD	-	1	N.G	-	1	N.G



(b) Case 1-3(25°)



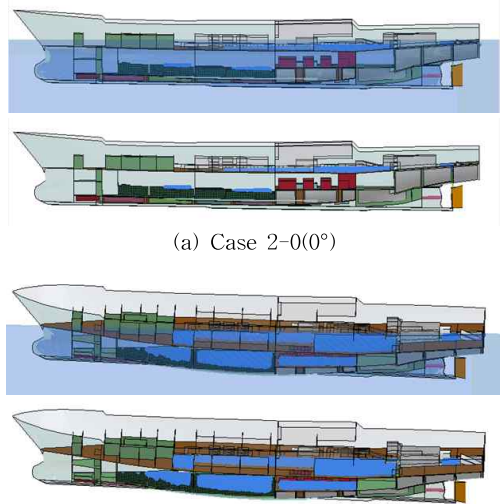
(c) Case 1-4(35°)

Fig. 9 Righting arm (GZ) curve in Case 1

4.2 Case 2(우현 횡파에 의해 좌현 급경사가 발생한 경우)

Case 1에서와 같이 Case 2에서도 아래와 같이 3개의 경우, Case 2-0(0°), Case 2-2(좌현 30°), Case 2-3(좌현 45°)에 대

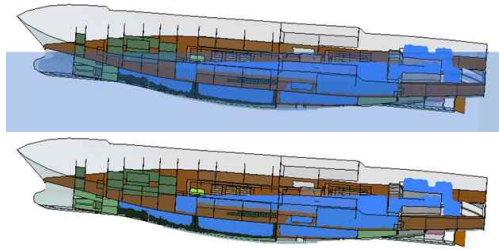
하여 단계적으로 어획물처리실뿐만 아니라 기관실과 어창에 해수가 유입되는 경우에 대하여 침수 후 복원성 계산을 수행하고 분석하였다. Case 2의 침몰사고 진행상황에 따른 어획물의 적재상태와 각 경우에 대한 외부 해수 유무를 고려한 선내 침수 구획 및 침수율을 각각 Figure 10과 Table 14에 보여주고 있다. 경사각에 따른 복원정 (GZ) 및 그 면적비를 Table 15에 요약하였고 복원정 곡선은 Fig. 11에 나타내었다. 그리고 복원성 판정기준은 Table 16에 요약하였다.



(a) Case 2-0(0°)

(b) Case 2-2(30°)





(c) Case 2-3(45°)

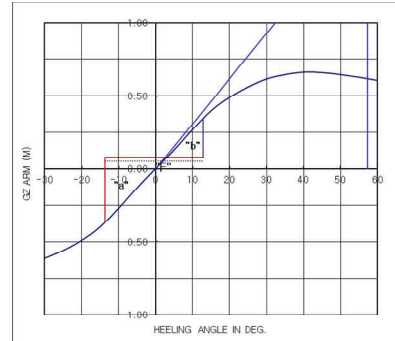
Fig. 10 Flooding compartment situation in Case 2

Table 14 Permeability according to flooding compartment in Case 2

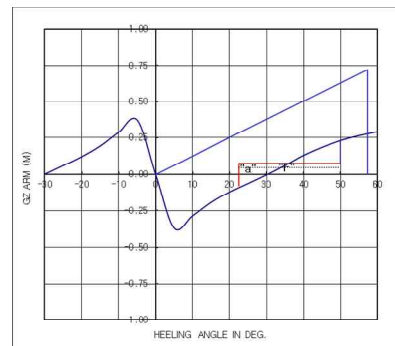
Flooding Compartment	Permeability(%)		
	(a) Case 2-0(0°)	(b) Case 2-2(30°)	(c) Case 2-3(45°)
NO. 1 Fish Hold	7.0	18.0	24.0
NO. 2 Fish Hold	8.0	19.0	23.0
Engine Room	-	24.0	48.0
Process Room	13.0	35.0	44.0
Fish Bunker	36.0	69.0	92.0

Case 2-0(0°)은 동복원력에 대한 관정기준을 만족하지만 오물투입구를 통한 해수유입으로 동복원력 감소에 따른 격심한 파도와 바람에 의한 동복원력 면적비를 만족하지 못하고 있다. 이것은 일시적인 평형상태라 하더라도 각 구획에 침수된 상태 및 오물배출구를 통한 지속적인 해수유입으로 격심한 파도와 바람의 영향에 대응할만한 복원력을 갖지 못함을 의미한다. 따라서 이후 우현 횡파로 인한 좌현 횡경사에 대한 복원력이 회복되지 못하는 근거로 중요한 분석적 자료라 사료된다. Case 2-2(30°)와 Case 2-3(45°)은 GoM의 기준을 제외하

고는 동복원력에 대한 관정기준을 만족하지 못하였고, 격심한 파도와 바람에 의한 동복원력 면적비 또한 만족하지 못하였다. 예상한 바와 같이 Case 2-3(45°)은 Case 2-2(30°)의 경우보다는 더욱 상황이 악화되었다. Case 2의 침수 후 복원성 계



(a) Case 2-0(0°)



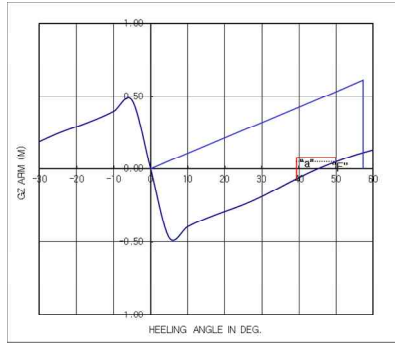
(b) Case 2-2(30°)

Table 15 Righting arm (GZ) and area ratio in Case 2

angle(°)	(a) Case 2-0(0°)			(b) Case 2-2(30°)			(c) Case 2-3(45°)		
	K.Go*sinθ (m)	GZ (m)	area (m*rad)	K.Go*sinθ (m)	GZ (m)	area (m*rad)	K.Go*sinθ (m)	GZ (m)	area (m*rad)
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.457	0.128	0.006	0.457	-0.372	-0.016	0.457	-0.472	-0.021
10	0.911	0.269	0.023	0.911	-0.285	-0.045	0.911	-0.396	-0.059
15	1.358	0.398	0.052	1.358	-0.193	-0.066	1.358	-0.338	-0.091
20	1.795	0.491	0.091	1.795	-0.121	-0.080	1.795	-0.290	-0.118
25	2.217	0.560	0.137	2.217	-0.062	-0.088	2.217	-0.244	-0.141
30	2.624	0.614	0.188	2.624	-0.002	-0.091	2.624	-0.187	-0.160
35	3.010	0.643	0.243	3.010	0.063	-0.088	3.010	-0.122	-0.173
40	3.373	0.659	0.300	3.373	0.131	-0.080	3.373	-0.059	-0.181
45	3.710	0.657	0.357	3.710	0.185	-0.066	3.710	-0.001	-0.184
50	4.019	0.643	0.414	4.019	0.231	-0.048	4.019	0.048	-0.182
55	4.298	0.625	0.469	4.298	0.264	-0.026	4.298	0.093	-0.176
60	4.544	0.604	0.523	4.544	0.290	-0.002	4.544	0.129	-0.166

Table 16 Stability criteria after flooding in Case 2

stability criteria	(a) Case 2-0(0°)			(b) Case 2-2(30°)			(c) Case 2-3(45°)		
	KST-SHIP	criterion	judgement	KST-SHIP	criterion	judgement	KST-SHIP	criterion	judgement
GoM (m):	1.774	0.150	GOOD	0.719	0.150	GOOD	0.608	0.150	GOOD
GZ Curve Area between 0-30 deg (m-rad):	0.188	0.055	GOOD	-0.091	0.055	N.G	-0.160	0.055	N.G
GZ Curve Area between 30-40/SWI deg (m-rad):	0.112	0.030	GOOD	0.011	0.030	N.G	-0.021	0.030	N.G
GZ Curve Area between 0-40/SWI deg (m-rad):	0.300	0.090	GOOD	-0.080	0.090	N.G	-0.181	0.090	N.G
GZ at 30 deg (m):	0.614	0.200	GOOD	0.002	0.200	N.G	-0.187	0.200	N.G
Angle of down-flooding (deg):	12.9	-		12.9	-		12.9	-	
Area A (m-rad)	0.065	-		0.015	-		0.003	-	
Area B (m-rad)	0.027	-		-	-		-	-	
Area Ratio B/A	0.415	1	N.G	-	1	N.G	-	1	N.G



(c) Case 2-3(45°)

Fig. 11 Righting arm (GZ) curve in Case 2

산을 통해서 격심한 파도와 바람에 의해 경사가 진행되고, 해치커버와 오물배출구로 지속적인 해수유입으로 인해 어창과 기관실로도 침수가 진행되면서 좌현으로 횡경사가 더욱 진행되어 선미부터 점진적으로 침수되면서 침몰 될 것으로 추정된다.

## 5. 고찰 및 결론

제501오룡호 사고선박의 만재출항상태에서의 복원성 계산서와 KST-SHIP을 사용한 비손상 복원성 계산 결과를 비교하여 검증한 후, 출항 후 배수량에 따른 비손상 복원성 계산을 통하여 사고 직전의 항해상태가 비손상 복원성 기준을 만족하는지 평가하였다. 사고선박 침몰사고의 진행상황 별 시뮬레이션의 구획별 침수량을 고려하여 우현 0°, 25°, 35°, 좌현 0°, 30°, 45° 경사 시의 선박 침수 후 복원성 계산을 KST-SHIP을 사용하여 수행하고 사고선박의 침몰사고 시의 침수 후 복원성을 분석하였다.

비손상 복원성 분석결과 오물배출구 덮개가 파손됨으로써 해수유입각이 크게 감소하고, 격심한 파도와 바람에 의해 선박이 횡경사하면서 낮아진 해수유입각으로 유입된 해수로 인해 경사 후 복원되어지는 에너지가 줄어들어 쉽게 복원되지 못함을 보여주고 있다. 이것은 격심한 파도와 바람에 따른 횡경사로 불완전 폐쇄된 해치커버와 오물배출구를 통해 지속적인 해수유입이 가능하여 어획물처리실이 침수, 어창과 기관실까지 해수가 전파되어 침몰에 이르는 것으로 추정이 가능하다.

침수 후 복원성은 침수 진행상황 별 복원성 계산을 수행하여 분석하였다. 침수 후 복원성 분석 결과도 불완전하게 밀폐된 해치커버와 오물배출구 덮개의 파손으로 인해 격심한 파도와 바람에 의한 동복원력 면적비와 동복원력 관련 기준을 만족하지 못하게 되기 때문에 횡경사 시 복원이 어려워 경사가 점차 심해지면서 해수가 지속적으로 유입되고, 여러 가지 분석을 통하여 선미부가 먼저 침수가 되어 침몰이 된 것이라고 추정이 가능하다. 이것은 시뮬레이션 결과와 비교하더라도 횡경사 및 침수상태 등 상당한 부분이 일치함을 보여줌으로써 침몰사고의 원인분석에 중요한 근거가 될 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 해양안전심판원의 “제501오룡호 침몰사고 원인 분석 침수·침몰 시뮬레이션 연구 용역” 과제의 지원을 받아 수행한 침수·침몰 시뮬레이션과 복원성 계산에 관한 연구의 일부이며, 해양안전심판원 특별조사부의 원양어선 제501오룡호 침몰사고 특별조사 보고서의 기초가 되었습니다. 저자들은 이에 감사드립니다.

## References

- [1] KMST(2016), Sinking Accident Safety Investigation Report of Deep-Sea Fishing Vessel No. 501 Oryong, Special Investigation Department of Korea Maritime Safety Tribunal.
- [2] KST(2013), KST\_SHIP System User's Manual, Version 2.1, Korea Ship Safety Technology Authority, Korea.
- [3] Lee, J. S., Jung, H. S., Oh, J. H. and Lee, S. G.(2017), “A Study on Flooding-Sinking for Cause Analysis of No. 501 Oryong Sinking Accident(Korean)”, J. Navig. Port Res., 41, 6, pp. 451-466.
- [4] LSTC(2013), LS-DYNA User's Manual, Version 971 R7, Livermore Soft Technology Corp., USA.
- [5] MOF(2015), Standards for Fishing Vessel Stability and Load Water Line, 2015-14, Ministry of Oceans and Fisheries., Korea.

Received 11 October 2018

Revised 12 November 2018

Accepted 13 November 2018