Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety
Research Paper
Vol. 28, No. 6, pp. 955-964, October 31, 2022, ISSN 1229-3431(Print) / ISSN 2287-3341(Online) https://doi.org/10.7837/kosomes.2022.28.6.955

어선 제66풍성호 전복사고 원인분석에 대한 연구

이리나* · 이창현** · 온성욱***†
*, *** 목포해양대학교 박사, ** 목포해양대학교 항해학부 교수

Study on Cause Analysis of Capsizing Accident in Fishing Boat No. 66 Poongsung

Li-Na Lee* · Chang-Hyun Lee** · Sung-Wook Ohn***†
*, *** Ph.D, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea
** Professor, Division of Navigation Science, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

요 약 : 최근 5년간 국내에서 발생한 해양사고를 선박용도별로 살펴보면 어선이 67.1%(10,211척)를 차지하고 있으며, 어선에 의한 해양사고는 2016년 1,646건에서 2020년 2,100건으로 매년 증가하고 있다. 특히 최근 5년간 발생한 378건의 전복사고 중 어선의 전복사고가 252건으로 66.7%의 높은 비중을 차지하고 있어 이에 따른 대책 마련이 시급한 실정이다. 본 연구에서는 어선 제66풍성호의 전복사고의 원인 규명을 위해 복원성 및 해수 유입경로 등의 자료 수집과 풍성호에 설치된 방수구, 추가 갑판 및 바람막이 등이 복원성에 미치는 영향을 정량적으로 분석 후 전복사고의 대응 방안을 제시하였다. 복원성에 영향을 주는 요인으로 풍성호에 설치된 추가 갑판, 바람막이, 방수구가 초기 횡경사를 일으키고, 복원성을 악화시키며 어선구조기준을 충족시키지 못할 뿐만 아니라 풍성호의 선형 특성 등으로 인해 복원성을 약화 시키는 것으로 분석되었다. 사고 당시의 복원성을 추정하기 위해 어로작업 시점의 복원성과 해상 상태 변화에 따른 해수 유입량 및 이에 따른 동요 상황, 그리고 선체 요인에 의한 복원성 변화를 계산하였다. 그 결과, 어로작업의 시점에서는 최소 GoM을 모두 만족하였으나 최대파고 4m에서 복원이 불가하였으며, 선체 경사에 따른 해수 유입, 동요의 영향에 의해 최대파고 4m 상태에서 최소 GoM을 만족하지 못하는 것으로 분석되었다. 그러나, 풍성호의 복원성에 영향을 미치는 요인 중 추가 갑판과 바람막이 설치를 제외한다면 최소 GoM을 만족하는 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 전복사고, 방수구, 추가 갑판, 바람막이, 복원성

Abstract : *According to the statistics of maritime accidents statistics that have occurred in Korea over the past five years, maritime accidents caused by fishing boats have increased every year from 1,646 in 2016 to 2,100 in 2020. In particular, of the 378 capsizing accidents that have occurred in the past five years, 252 capsizing accidents of fishing boats account for a high proportion of 66.7%, therefore, it is urgent to come up with countermeasures. In this study, to determine the cause of the capsizing accident of fishing boat No. 66 poongsung, data such as stability and seawater inflow routes were collected, and the effects of waterproof, additional wood decks, and windbreakers on stability on were quantitatively analyzed. Additional decks, windbreakers, and waterproof installed in No. 66 poongsung cause initial list, deteriorate stability, and fail to meet fishing boat structural standards. In addition, it was analyzed that the stability was weakened due to the characteristics of the hull shape of No. 66 poongsung. To estimate the stability at the time of the accident, the stability at the time of the working in the fishing ground condition, amount of seawater inflow according to the change in sea conditions, hull oscillation situation, and change in stability due to the hull factor were calculated. As a result, the minimum GoM was satisfied at the time of working in the fishing ground, but it could not be restored at the maximum wave height of 4 m, and the minimum GoM was not satisfied at the maximum wave height of 4 m owing to the influence of seawater inflow and oscillation due to the hull list. However, the minimum GoM was satisfied if additional decks and windbreakers installation was excluded among the factors affecting the stability of No. 66 poongsung.*

Key Words : *Capsizing Accidents, Waterproof, Additional Deck, Windbreaker, Stability*

* First Author : lnlee@mmu.ac.kr, 061-240-7816
† Corresponding Author : ohnsw1012@mmu.ac.kr, 061-240-7817

1. 서 론

제66풍성호(이하, 풍성호)는 2019년 2월 13일 04:55경 투승 작업을 하며 약 8.5노트의 속력으로 항해하고 있던 중 갑자기 다량의 해수가 우현 선측을 넘어 갑판으로 유입되면서 우현으로 기울어진 상태에서 직립 상태로 복원되지 않아 전복되어 선장이 사망하였다. 중앙해양안전심판원에서 발간한 '2020 해양사고 통계'에 따르면 최근 5년간 국내에서 발생한 어선사고는 Fig. 1과 같이 2016년 1,646건에서 2020년 2,100건으로 매년 증가하고 있으며, 어선의 전복사고 또한 2016년 36건에서 2020년 73건으로 매년 꾸준히 증가하고 있는 추세이다(KMST, 2021). 또한, 최근 5년간 발생한 378건의 전복사고 중 어선사고가 252건으로 66.7 %의 높은 비중을 차지하고 있어 이에 따른 대책 마련이 시급한 실정이다.

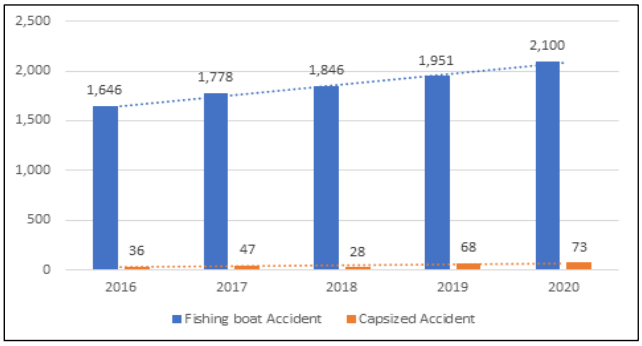

Fig. 1. Statistics of Fishing boat Accident.

Kang et al.(2007)은 해양안전심판원의 재결서 자료를 기반으로 전복사고에 대한 통계분석과 해양사고 예방을 위해 교육과 훈련의 강화 방안을 제시하였고, Jung et al.(2012)은 어선의 복원성에 관한 국내외 규정과 해양안전심판원의 전복사고 재결서 분석을 통하여 어선의 전복사고 예방을 위한 조치방안을 제안한 바 있다.

Kim et al.(2015)은 2014년 12월에 발생한 제501오룡호 전복사고의 상황에 대한 역학적 요인 분석을 통하여 전복 원인을 파악하고자 하였으며, Lee et al.(2017)은 동일한 사고에 대한 시뮬레이션을 통해 선내 침수 경로를 분석하고 주요 탱크들의 용적과 중량 분포를 추정하여 사고선박이 일반적인 전복사고와 다소 차이가 있음을 제시하였다. Choi(2016)는 선체의 자유 횡 운동 진폭 감쇠 비를 기준으로 저속으로 전복되는 선박사고의 선체 특성에 관하여 연구하였고, Kang(2011)은 어선의 해양사고 발생 원인이 기상요소와 관련성이 존재하는지의 여부를 분석하여 해양사고 예방을 위한 대책을 제안한 바 있다. 또한, 한국해양교통안전공단에서는 어선의 전복사고 예방 및 대책에 관하여 지속적으로 제안하고 있다(Kim, 1987; Choi, 1992; Lim, 1995; Gwon and Lee, 2007).

본 연구에서는 풍성호의 전복사고 원인을 규명하기 위하여 현장조사를 통해 선체구조의 특성 및 복원성, 해수 유입 경로 및 유입량에 대한 자료를 수집하였으며 풍성호에 추가로 설치된 구조물(추가 갑판, 바람막이)이 복원성에 미치는 영향 등을 종합적이고 정량적으로 분석하기 위하여 복원성 계산을 위한 NAPA Software를 활용하였다. 본 연구를 통하여 어선의 방수구, 추가 갑판, 바람막이 등이 복원성에 미치는 영향을 분석함으로써 풍성호와 유사한 선박에서 발생할 수 있는 전복사고에 대한 대책을 마련하는 효과를 기대할 수 있다.

2. 대상선박 및 해양사고 현황

2.1 대상선박

풍성호는 등록 길이 24미터 미만의 근해연승어업 어선으로 제원은 Table 1과 같으며, 사고 발생 전 실제 촬영된 사진은 Fig. 2와 같다. 풍성호는 조업편의시설인 FRP 바람막이를 설치하는 연승어선 검사지침(현행 폐지)에 따라 '어선복원성 및 만재흘수선 기준(Stability Criteria of Vessels Act(2015))' 중 등록 길이 40미터 미만 어선에 적용하는 복원성 기준을 적용하여 2016년 9월 1월 상가 수리 중 관련 경사 시험을 수행하였다.

Table 1. Ship's particular

Parameter	Particulars(Value)
Length Over All	27.70m
Length Between Perpendiculars	21.59m
Moulded Breadth	4.86m
Moulded Depth	2.33m
Full Load Draft	2.06m
Gross Tonnage	29.0tons
Full Displacement	126.54tons

Fig. 2. The photograph of no.66 Poongsung.

2.2 해상 및 기상 현황

사고 시점의 기상변화에 특이사항은 없으나 강우가 있으며, Fig. 3과 같이 남쪽에 저기압이 지나가고 있어 해상상태가 급격히 악화될 가능성이 존재하였다. 선원들의 진술 역시 일치하여 사고 시점의 기상은 Beaufort scale 5로 풍속 11~16노트, 파고 2~3 m로 검토하였다. 해상 상태는 파랑 변화가 있는 상황으로 Fig. 4의 파랑실황도에 따른 기준은 파주기 5초, 유의 파고 2 m이지만 사고 시점에는 남쪽에 저기압이 지나가고 있었으므로 바람 방향과 해상 상태가 급격히 악화될 가능성이 있어 낮은 확률이지만 거의 2배에 가까운 파고를 조우할 수 있으므로 최대파고를 4 m로 가정하여 불워크를 넘어 오는 해수 침수량을 고려하였다. 이 또한 구조선 선장이나 선원들의 진술과 동등한 수준으로 추정된다.

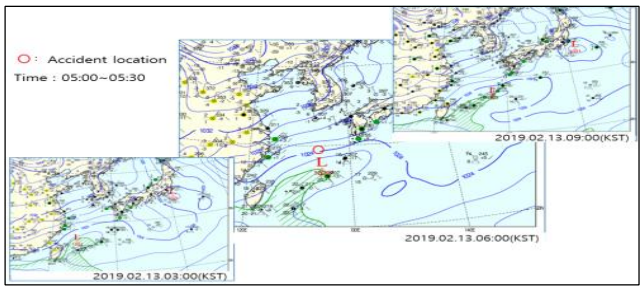

Fig. 3. Weather chart at the time of accident.

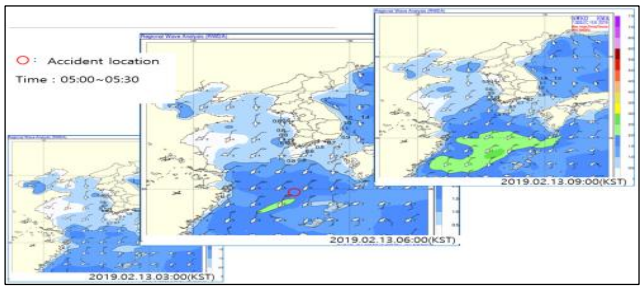

Fig. 4. Wave chart at the time of accident.

또한, 파랑은 Fig. 5와 같이 남서방향으로 진행하는 파주기 5초, 파장 약 37 m의 파랑을 적용하였으며 우현 추종 사파를 받았다는 선원들의 진술에 따라 선박은 서진하고 있는 상황 및 투승 작업 중이었으므로 속력은 8.5노트로 적용하였다.

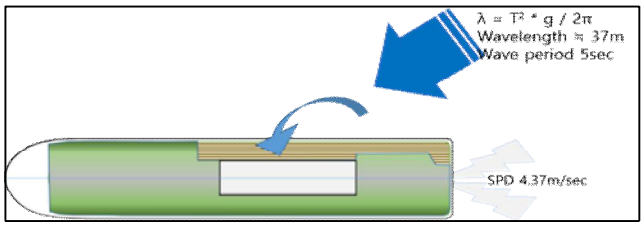

Fig. 5. State of the sea condition at the accident.

3. 복원성에 영향을 미치는 요인

3.1 추가 갑판 설치

현장조사 결과 풍성호는 합판 중심 부분의 심재가 가벼운 아비통 재질의 목재로, 2016년 9월 상가 수리 중 밀도 0.9, 두께 30 mm의 추가 갑판이 설치된 것으로 추정되었으며, 설치 면적 및 무게는 Fig. 6에서 보는 것과 같이 74.4 m^2, 2.008톤으로 계산되었다. 목재 갑판은 FRP 갑판 대비 중량증가가 약 4배이며, 주갑판으로 빗물과 해수가 침투될 수 있어 초기 횡경사 발생 등 복원성 확보에 불리하게 작용할 수 있다.

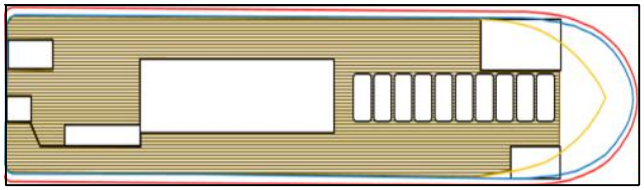

Fig. 6. Additional deck area.

또한, 추가 갑판 설치에 따라 Fig. 7에서 보는 것과 같이 우천 시 우현 경사가 3°이상 발생되면 목재 갑판 하부는 강우로 인한 웰이 형성되어 좌현 갑판에 침투된 물 역시 우현으로 이동할 수 있으므로 초기 횡경사의 원인으로 작용할 수 있다.

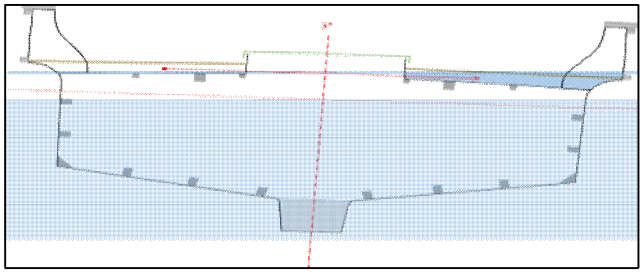

Fig. 7. The main deck slope for 3°.

3.2 바람막이 설치

풍성호는 조업편의시설인 FRP 바람막이를 설치하는 연승어선 검사지침(현행 폐지)에 따라 '어선복원성 및 만재흘수선 기준' 중 등록 길이 40미터 미만 어선에 적용하는 복원성 기준을 적용하여 2016년 9월 상가 수리 중 관련 경사 시험을 수행하였다. 이후 2017년 1월 경사시험 성적서에 의거하여 완성비손상복원력 계산서 승인을 득하였다. 이 때 설치된 바람막이에 대한 상세 시공서와 중량에 대한 검증 자료는 기록되지 않았으므로 바람막이가 선박의 복원성에 미치는 영향을 조사하기 위해 풍성호의 사진자료와 승인도면을 통하여 중량을 추정하였다.

Fig. 8과 같이 바람막이 설치 시 승인된 일반 배치도 기준으로 측면투영면적을 계산한 결과 바람막이가 설치된 전체 측면투영면적은 75.36 m^2, 작용 중심점은 선체 중심에서 선미 측으로 3.109 m, 선체 바닥에서 3.944 m이었으며, 전체 측면투영면적에서 바람막이에 의한 영향이 추가로 발생한다고 판단되는 측면투영면적 증가분은 10.61 m^2, 작용 중심점은 선체 중심에서 선수 측으로 1.549 m, 선체 바닥에서 4.212 m로 계산되었다.

이에 따라 바람막이의 총 중량은 2.331톤으로 추정되었고, 바람막이 설치에 따른 LCG는 0.558 m, VCG는 4.788 m로 추정되어 관련된 복원성 계산의 수치로 적용한 결과 만재 배수량의 약 1.8 %, 경하배수량의 약 3.5 %로 산출되었다.

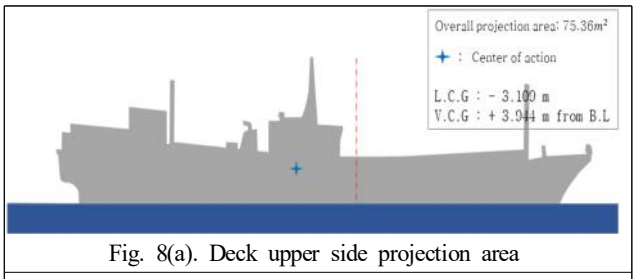

Fig. 8(a). Deck upper side projection area

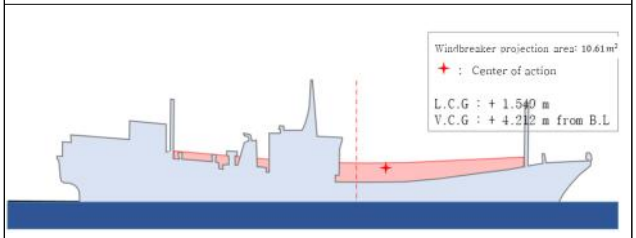

Fig. 8(b). Increased projection area due to windbreaker

Fig. 8. Calculation data according to the projection area of the windbreaker.

3.3 방수구 상태

2017년 1월 경사시험 성적서에 의거하여 완성비손상복원력 계산서 승인을 득하였을 때 승인받은 풍성호의 도면상에는 Fig. 9와 같이 각 현측 현단 상부에 10개의 방수구가 설치되어 있으며, 도면 상 각 방수구의 단면적은 0.0579 m^{2}로 각 현 방수구의 총 단면적은 0.579 m^{2}로 계산되었다.

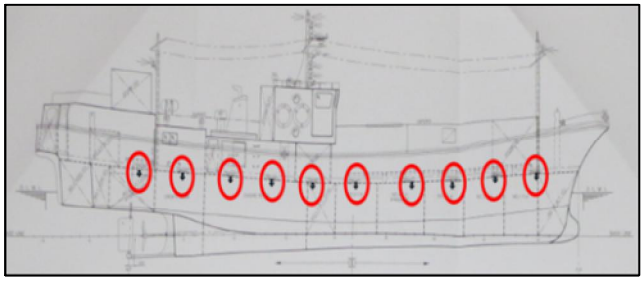

Fig. 9. Waterproof layout drawing.

우리나라의 어선구조기준에서는 건현갑판 또는 선루갑판의 노출부의 불워크가 웰을 형성하는 경우에는 갑판부터 신속하게 방수하기 위한 충분한 방수구를 설치하도록 하고 있다. 어선구조기준 제350조(방수구의 면적)에 따른 바람막이 설치 시 요구되는 방수구의 면적은 식(1)을 적용하여 1.229 m^{2}로 계산되며, 바람막이 미설치 시 요구되는 방수구 면적은 식(2)를 적용하여 1.058 m^{2}로 계산된다. 식(1)과 (2)에서 a는 불워크의 높이에 따른 수정량을 의미하며, 전복사고 당시 풍성호의 불워크 높이는 1미터로 측정되어 Table 2에 따라 수정량 a는 0으로 계산하였다.

Table 2. Correction amount by height of bulwark

The length of bulwark(m)	Correction amount(m^2)
h < 0.9	$a = -0.04l(0.9-h)$
0.9 ≤ h ≤ 1.2	$a = 0$
1.2 < h	$a = 0.04l(h-1.2)$

$$A = 0.07l + a \quad (1)$$

여기서, A : 방수구의 총면적(m^2)
l : 불워크의 길이 ($l > 20m$)
a : 불워크의 높이에 따른 수정량(m^2)

$$A = 0.035l + 0.7 + a \quad (2)$$

여기서, A : 방수구의 총면적(m^2)
l : 불워크의 길이 ($l \leq 20m$)
a : 불워크의 높이에 따른 수정량(m^2)

따라서 풍성호 도면에 따른 방수구의 총면적은 Table 3에서 보는 것과 같이 Fishing boat rescue Act(2015)에서 요구하는 어선구조기준을 충족하지 못한 것으로 확인되었다.

Table 3. Based on the total area of the waterproof

	Drawing	Windbreak not installed	Windbreak installation	Standard
Waterproof total area(m^2)	**0.579**	1.058	1.229	Insufficient

3.4 어창 침수의 영향

Fig. 10에서 보는 것과 같이 풍성호의 만재흘수선을 기준으로 한 선체중앙부 주요 경사각은 하부 방수구 7°, 상부 방수구 10°, 난간 상단 26°, 어창 코밍 상단 41°, 기관실 출입구 문지방 27°이며, 선형은 평저형에 가까워 선체 경사 11° 이상에서 어창으로 침수가 발생할 경우 유동수의 영향으로 경사가 가속될 것이라는 것을 알 수 있다. 직립 상태에서 수면하부에

서 침수가 발생할 경우 선저로부터 해수가 차오르기 때문에 횡경사 속도가 완만하고 급격한 대각도 경사로 연결되기는 어렵다. 수선 하부 손상에 의한 침수 발생 시 선박의 경사는 풍하 측으로 진행되므로 풍성호의 전도는 어창 하부 손상으로 인한 침수경사로 볼 수 없다(Son, 2000). 각 어창의 용적은 20 m^3 미만으로 한 쪽 현측으로 유동수가 쏠려도 25° 이상의 횡경사가 발생하지 않기 때문에 어창 이외의 장소에서 해수 유입에 의한 대각도 횡경사가 발생되었다고 추정할 수 있다.

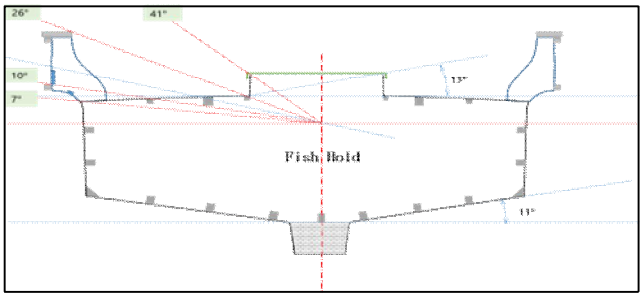

Fig. 10. Major Slope Angle on Load Line.

3.5 기관실 침수의 영향

기관실은 어창에 비해 가운데로 유동수가 모여들 수 있는 형태를 가지므로 기관실 하부 손상이 발생하여도 급격한 대각도 횡경사 발생은 예상되지 않지만 Fig. 11과 같이 경사가 13° 이상 진행된 상태에서 해수가 유입될 경우 경사가 가속화 된다. Fig. 12와 같이 27° 이상 경사가 발생되어 우현 기관실 문틈으로 해수가 지속적으로 유입될 경우 초당 평균 약 0.0065 m^3의 해수가 유입되며, 약 1.9톤의 해수가 기관실에 유입될 경우 약 32°의 선체경사가 발생된다. 약 12.7톤의 해수가 기관실에 유입될 경우 약 45°의 경사가 발생하며, 41°~45° 경사 시점부터 기관실 내의 수면 수위는 좌현 측이 증가하게 되어 복원 모멘트가 작용하게 되나, 동시에 어창에 침수가 시작되므로 경사가 계속되어 복원은 불가하게 된다.

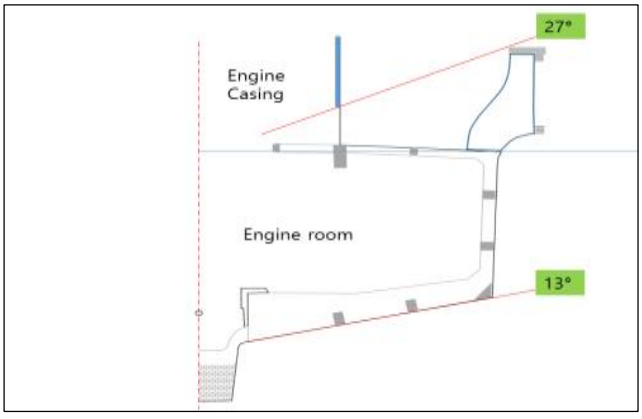

Fig. 11. Engine room flooding angle of incidence

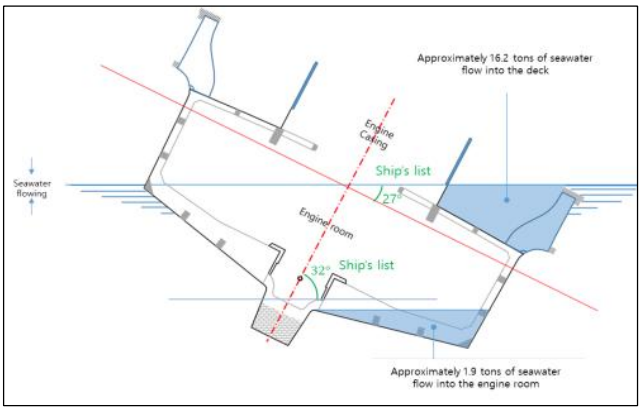

Fig. 12. Engine room flooding progression stage

4. 사고시점의 복원성 계산 결과

4.1 어로작업 시점의 복원성 계산

풍성호의 어로 작업 시점의 복원성을 계산하기 위해 선박 및 해양구조물의 초기 기본설계를 위한 소프트웨어인 NAPA 프로그램을 이용하였다. NAPA 프로그램은 구조물의 형상, 매치 등의 모델링을 통해 안전성과 복원성 등을 평가할 수 있는 프로그램으로 NAPA 풍동모델에서는 플로팅 도크의 타워 데크 형상을 고려하여 방향별 풍하중을 보다 정확하게 고려할 수 있다(Yang et al., 2015).

어선복원성 및 만재흘수선 기준 제11조 1항에 따라 길이 40미터 미만의 어선은 식(3)에 따라 계산된 값 이상의 최소 GoM을 확보해야 하며, 만재흘수상태에서 풍성호의 최소 GoM은 0.568 m로 계산되었다.

$$G_oM = 0.04B + a\frac{B}{D} - \beta \quad (3)$$

여기서, B : 선박의 전폭

D : 선박의 깊이

a : FRP선에 있어서는 0.54

β : $\frac{F}{D}$(어선복원성 기준 표에 따른 값)

사고 당시의 상태를 추정하기 위해 승인 복원성 자료의 만재출항상태와 어장발상태의 재화상태에 의거하여 어로작업 시작 단계에서부터 사용한 어구류 및 소모품을 고려하여 어로작업 시점의 계산 기준으로 사용하였다. 어항 출항 시 풍성호의 재화상태는 Table 4와 같으며, 이 때 계산된 풍성호의 GoM은 0.601 m로 등흘수 1.957 m 상태일 때 최소 GoM인 0.576 m 이상을 만족하였다.

Table 4. Full load departure condition

Item	LOAD (%)	Weight (ton)	LCG (m)	VCG (m)	I.M. (m^4)
Fresh water	100	3.624	9.458	1.557	1.740
Fuel Oil	96	19.46	-3.873	1.159	3.220
Small Tanks	100	2.265	-9.818	3.072	0.365
LUB. Oil	100	0.368	-3.245	2.109	
Crew's Effect	100	1.5	-7.641	2.179	
Provision	100	1.406	3.318	1.904	
Drink Water	100	3.0	7.985	1.359	
Store & Spare	100	0.7	5.646	2.921	
Ice	100	10.0	4.667	1.140	
Fish box	100	1.125	4.388	3.482	
Fishing Tool	100	4.42	-4.668	3.478	
Light Ship Weight		67.132	-0.799	2.187	
Total		115.0	-0.575	1.961	5.325
· KG: 1.961m/ · GM: 0.643m/ · GGo: 0.042m/					
· GoM: 0.601m/ · Required GoM: 0.576m/ **Result: Sufficient**					

어획물을 만재하고 어항을 출항하는 풍성호의 재화상태는 Table 5와 같으며 GoM은 0.647 m로 만재흘수 상태의 최소 GoM인 0.641 m 이상을 만족하였다.

Table 5. Fishing ground departure condition

Item	LOAD (%)	Weight (ton)	LCG (m)	VCG (m)	I.M. (m^4)
Fresh water	25	0.906	9.346	0.7582	0.220
Fuel Oil	24	4.866	-10.728	1.327	2.222
Small Tanks	100	2.265	-9.818	3.072	0.365
LUB. Oil	24	0.092	-3.245	2.109	
Crew's Effect	100	1.5	-7.641	2.179	
Provision	25	0.352	-8.420	3.276	
Drink Water	25	0.75	-11.195	3.035	
Store & Spare	100	0.7	5.646	2.921	
Fishing Tool	100	4.862	-4.668	3.478	
Fish	100	43.115	3.724	1.111	
Light Ship Weight		67.132	-0.799	2.187	
Total		126.540	-0.007	1.854	2.807
· KG: 1.854m/ · GM: 0.667m/ · GGo: 0.019m/					
· GoM: 0.647m/ · Required GoM: 0.641m/ **Result: Sufficient**					

선원들의 진술을 일부 참조하여 계산된 어로 작업 시점의 배수량은 112.869톤이었으며, 등흘수 1.939 m 상태에서 계산된 GoM은 0.763 m로 최소 GoM인 0.475 m를 만족하였다. 만재출항상태 및 어장발 상태보다 GoM이 높아진 것은 어로작업을 위한 투승 및 소모품과 연료유 소모에 따라 중심점이 낮아졌기 때문으로 추정된다.

Table 6. Working at fishing ground condition

Item	LOAD (%)	Weight (ton)	LCG (m)	VCG (m)	I.M. (m^4)
Fresh water	95	3.624	9.454	1.522	0.74
Fuel Oil	97	20.312	-6.41	1.278	5.48
Small Tanks	100	2.265	-9.818	3.072	0.365
LUB. Oil	95	0.35	-3.245	2.109	
Crew's Effect	9	0.9	-8.057	2.126	
Provision	95	1.336	3.073	1.933	
Drink Water	95	2.85	-11.195	-3.05	
Store & Spare	100	0.7	5.646	2.921	
Ice	85	8.518	3.423	0.7	
Fish box	100	1.125	4.388	3.482	
Fishing Tool	85	3.757	-4.668	3.478	
Light Ship Weight		67.132	-0.799	2.187	
Total		112.869	-1.661	1.806	6.585
· KG: 1.806m/ · GM: 0.814m/ · GGo: 0.051m/					
· GoM: 0.763m/ · Required GoM: 0.475m/ **Result: Sufficient**					

4.2 해상 상태 변화에 따른 해수 유입량

선박이 파랑 중에 횡파를 받을 경우 파랑에 의해 능파 경사가 발생하며, 사고 당시의 파랑주기와 선박의 자유횡요 주기가 약 5초로 동일하므로 동조횡요가 발생할 가능성이 높다. 사고 당시 선박의 속력이 4.37 ㎧이고, 선박 진행방향으로의 파속은 5.23 ㎧이므로 당시 선박이 받고 있었던 추종 사파는 0.86 ㎧의 속도로 현측을 지나가며, 파정은 약 1분 간격으로 선박의 동일한 지점을 통과한다. 추종 사파가 선체 중앙을 지나 좌현 선수 들림이 발생되면서 우현 선미가 침하하는 순간에 추종 사파를 조우하게 될 경우 월파의 가능성이 존재하며, 최대파고에 해당하는 추종 사파가 선미 현호가 낮아진 지점부터 바람막이가 설치된 중앙부 지점까지 약 9 m 길이를 월파하게 될 경우 약 10초 이상 지속적으로 해수가 유입될 수 있다.

선박의 초기경사가 없을 경우 하부 방수구는 분당 3.614 ㎥ 배출이 가능하나 당시는 우천상황으로 우현측으로 약 5°의 경사가 발생되었으며, 초기경사가 있을 경우 Beaufort scale 5의 해상에서 최대 파고 4 m를 기준으로 할 때 하부 방수구는 수면에 잠기게 되며, 상부 방수구는 횡요에 따라 해수가 유입되고 배출되는 과정을 반복한다.

파고가 4 m인 해상상태에서는 파정이 난간 상단보다 하방에 위치하므로 한 파장이 지나는 동안 방수구로 유입되는 해수량은 식(4)의 계산에 의해, Table 7과 같이 약 18초간 11.1 ㎥이며, 배출되는 해수량은 Table 8과 같이 약 42초간 7.6 ㎥로 약 3.5 ㎥의 해수가 선내에 잔류하게 된다.

$$Q = A \times V \tag{4}$$

여기서, Q : 부피유량(㎥/sec)
A : 전체 방수구 개구 면적(㎡)
V : 평균유속(m/s)

Table 7. Calculation results of the amount of seawater inflow

Inflow	Head Loss(m)							
	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.30	0.35	0.510
V(m/s)	0.990	1.401	1.716	1.981	2.215	2.426	2.620	3.163
A(㎡)	0.194	0.194	0.194	0.194	0.194	0.194	0.194	0.194
Q(㎥/sec)	0.192	0.272	0.333	0.384	0.430	0.471	0.508	**0.614**
Q=0.614㎥/sec×18sec=11.1㎥								

※ $V=\sqrt{2gh}$, $g=9.81$m/s²

Table 8. Calculation results of the amount of seawater drain

Drain	Head Loss(m)							
	0.045	0.1	0.15	0.2	0.25	0.30	0.35	0.4
V(m/s)	0.940	1.401	1.716	1.981	2.215	2.426	2.620	2.801
A(㎡)	0.194	0.194	0.194	0.194	0.194	0.194	0.194	0.194
Q(㎥/sec)	**0.182**	0.272	0.333	0..384	0.430	0.471	0.508	0.543
Q=0.182㎥/sec×42sec=7.6㎥								

파고 2 m 해상상태에서 계산된 4.5 ㎥의 갑판 유동수에, 약 18초 동안 추가된 11.1 ㎥의 해수를 고려할 때 우현 갑판에 15.6 ㎥의 유동수가 존재하는 상황으로 사고 시점의 복원성을 계산하였다. 파고 4 m의 해상상태에서 NAPA 복원성 프로그램을 통하여 계산된 풍성호의 최대 복원정은 Fig. 13과 같이 15°에서 0.09 m, 복원정 소실 경사각은 약 28°로 계산되었으며, 추종사파로 인한 월파로 인해 선체가 26° 이상 경사될 경우 직립상태로 복원하지 못한 상태에서 해수가 기관실에 유입되어 복원이 불가하게 된다.

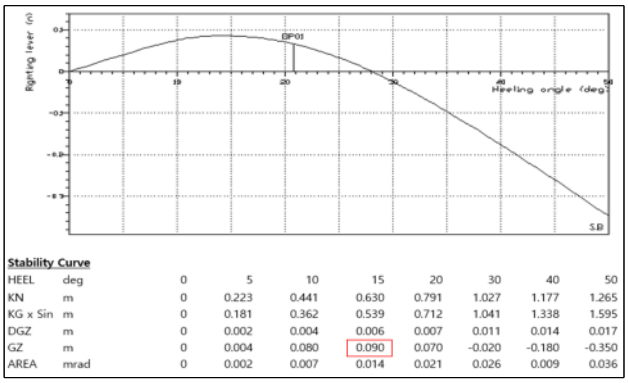

Fig. 13. Stability curve (NAPA Program).

4.3 선체 동요 상황

Fig. 14는 현장조사와 침수량 추정 자료 따라 복원성 추정 계산 결과를 기반으로 전도 초기 2분간의 선체 동요 상황을 나타낸 것이며, Fig. 15는 풍성호가 복원성을 소실하기까지 진행된 40분간의 선체 동요 상황을 나타낸 것이다. 여기서 GoM은 복원성 계산 결과 값이며, 침수량은 직립 상태에서 파고와 시간 변화에 따른 침수 유동량을 표시하였고, 횡경사는 해수 유입량에 대한 계산 값이다.

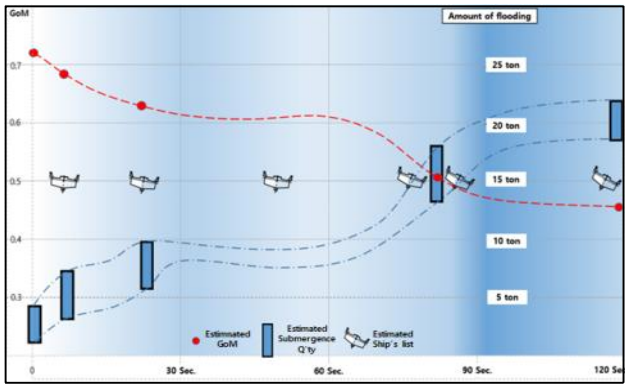

Fig. 14. Capsize for the first 2 minutes of conduction.

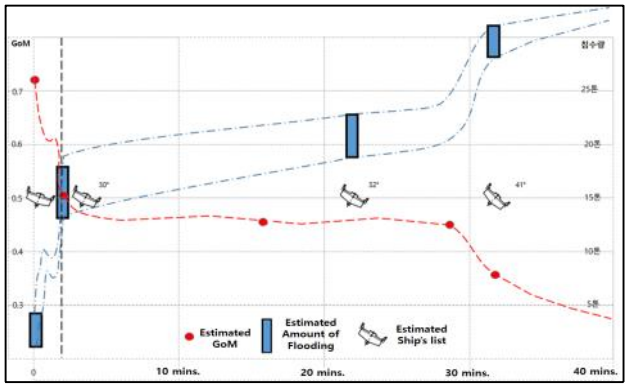

Fig. 15. Capsize for 40 minutes of conduction.

초기 경사는 우현 약 5°~6°로 추정되며, 첫 번째 추종 사파 조우 시 7.8톤의 해수가 우현 갑판에 머무르게 되어 약 12°의 우현 경사가 발생된 것으로 계산되었다. 월파가 발생하지 않았을 경우 18초 동안 유입된 해수는 15.6톤으로 약 26°의 선체 경사를 발생시키며, 월파가 발생된 경우 약 2~3톤의 추가 해수가 갑판으로 유입되면서 약 30°의 경사가 발생하며 기관실로 침수되는 조건이 되어 경사를 가속화 시킨다. 우현 감판의 추가 유동수 영향과 더불어 우현 기관실 문틈으로 12.7톤의 해수가 유입될 경우 45°의 경사가 발생되지만, 약 41°의 경사가 발생할 때부터 어창의 침수가 시작되므로 기관실 내의 좌현측 수위 증가가 복원우력으로 작용하지 않고 침수되었다.

4.4 선체 요인에 의한 복원성 변화

어로 작업 시점에 풍성호의 GoM은 Table 6과 같이 0.743 m로 최소 GoM인 0.475 m를 만족하였으나, 선체 경사에 따른 해수의 유입과 선체 동요의 영향에 의해 최대 파고 4 m 해상 상태에서 풍성호의 GoM은 Table 9와 같이 0.508 m로 요구되는 최소 GoM인 0.694 m에 부족하게 되며, 약 26°의 우현경사를 발생시키는 것으로 계산되었다.

Table 9. Wave 4m height condition at fishing ground

Item	LOAD (%)	Weight (ton)	LCG (m)	VCG (m)	I.M. (m^4)
Fresh water	95	3.443	9.454	1.522	1.7
Fuel Oil	78	20.312	-6.410	1.278	5.48
Small Tanks	100	2.265	-9.818	3.072	0.365
LUB. Oil	80	0.350	-3.245	2.109	
Crew's Effect	9	0.9	-8.057	2.126	
Provision	80	1.336	3.073	1.933	
Drink Water	80	2.85	-11.195	-3.050	
Store & Spare	100	0.7	5.646	2.921	
Ice	70	8.518	3.423	0.7	
Fish box	100	1.125	4.388	3.482	
Fishing Tool	70	3.757	-4.668	3.478	
Seawater		15.6	0	2.769	
Light Ship Weight		67.132	-0.799	2.187	
Total		128.288	-1.475	1.923	10.746
· KG: 1.923m/ · GM: 0.586m/ · GGo: 0.078m					
· GoM: 0.508m/ · Required GoM: 0.694m/ **Result: Insufficient**					

따라서, 전복 사고 방지를 위한 개선방안을 제시하고자 풍성호에 추가된 추가 갑판 및 바람막이의 설치 여부가 복원성에 미치는 영향을 검토하였다.

Table 10. Ship's condition except for additional installations

Item	LOAD (%)	Weight (ton)	LCG (m)	VCG (m)	I.M. (m^4)
Fresh water	95	3.624	9.454	1.522	0.74
Fuel Oil	97	20.312	-6.410	1.278	5.48
Small Tanks	100	2.265	-9.818	3.072	0.365
LUB. Oil	95	0.35	-3.245	2.109	
Crew's Effect	9	0.9	-8.057	2.126	
Provision	95	1.336	3.073	1.933	
Drink Water	95	2.85	-11.195	-3..05	
Store & Spare	100	0.7	5.646	2.921	
Ice	85	8.518	3.423	0.7	
Fish box	100	1.125	4.388	3.482	
Fishing Tool	85	3.757	-4.668	3.478	
Additional Deck		**-2.008**	**4.024**	**3.05**	
Windbreaker		**-2.331**	**0.358**	**4.788**	
Light Ship Weight		67.132	-0.799	42.187	
Total		108.53	-1.316	0.366	6.585
· KG: 0.366m/ · GM: 2.299m/ · GGo: 0.051m					
· GoM: 0.895m/ · Required GoM: 0.454m/ **Result: Sufficient**					

추가로 설치된 목재 갑판과 바람막이에 따른 복원성 계산 결과는 Table 10과 같이 GoM이 0.895 m로 요구되는 최소 GoM인 0.454 m를 만족하였으나, 추가 목재 갑판과 바람막이의 설치를 제외한 복원성 계산 결과는 동일한 환경에서 우천 시 풍성호의 복원성을 NAPA 프로그램으로 계산한 결과 Fig. 16과 같이 약 22° 선체 경사에서 최대 복원정이 0.02 m이며, 복원정 소실 경사각은 약 40°로 계산되었고, 우천 시 GoM은 0.684 m로 승인 복원성 계산보다 작게 산출되었으나 통상적인 운항 GoM으로 볼 수 있다.

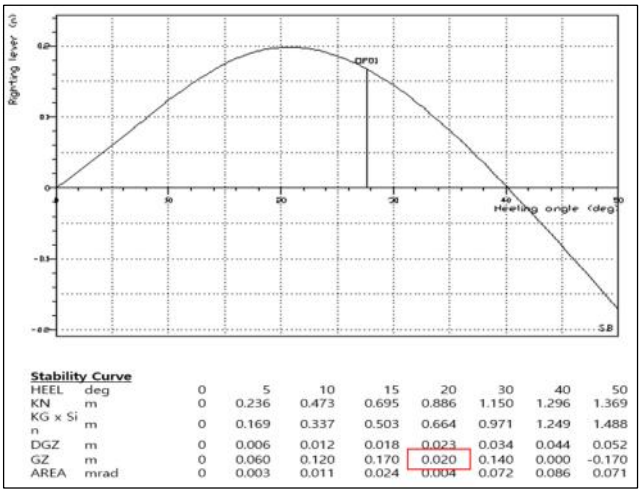

Fig. 16. Stability curve (NAPA Program).

5. 분석 결과 및 개선방안

5.1 추가 갑판

추가 갑판의 설치 목적은 갑판 상 연료유 탱크의 맨홀과 같은 요철 부위가 산재해 있어 어구류의 선미 이동 편의와 양승한 어획물 손상 방지를 목적으로 하고 있으며, 연승어선의 추가 갑판은 목재와 FRP의 두 종류로 시공되어 있는 것으로 조사되었다. 풍성호에 설치된 목재감판은 FRP 갑판 대비 약 4배의 중량을 증가시키며 주갑판으로 강우나 해수가 침수되어 초기 횡경사 발생 등 복원성 확보에 불리하게 작용한다. 풍성호의 목재 갑판 침수에 의한 초기 경사는 약 3.5°, 중량은 약 2톤이며 자체로는 GoM 감소가 4 cm 발생하는 것으로 분석되었다.

따라서 추가 갑판 설치와 관련하여 다음과 같이 개선방안을 제시한다.

1) 추가 갑판 설치로 인한 복원성 손실의 위험성에 관한 사항을 어선의 선주에게 교육하고 정기적인 목재 갑판 하부 점검을 통하여 청소 및 이물질 제거

2) 어선 건조 시점부터 설계도면에 추가 갑판을 반영하고, 방수구와 연계하여 하부 주갑판으로 해수가 침수되지 않도록 설계 검토

5.2 바람막이

어선에 설치된 바람막이는 원활한 조업 활동을 위하여 풍랑을 막아주는 것을 목적으로 한다. 풍성호의 바람막이 중량은 2.331톤으로 목재 갑판에 비해 계산 상 약 325 kg 증가하였으나 GoM 감소는 약 9 cm 발생하여 두 배 이상의 GoM이 감소하였으며, 선체 경사가 25° 이상이 되면 바람막이가 수면에 닿게 되므로 초기 침수나 월파에서 바람막이로 인한 방수를 차단할 수 없다.

따라서 바람막이 설치와 관련하여 다음과 같이 개선방안을 제시한다.

1) 바람막이 상부에 물건을 적치하는 경우 GoM 감소를 심화 시킬 수 있어 물건 적치 금지
2) 조업 안전 필수 시설로 지정하여 바람막이 관련 설치 도면의 승인이 필요하며, 건조 시점부터 설계도면에 반영하고 총톤수에 산입하는 규정 수립
3) 바람막이의 경량화/표준화/ 최적화 필요

5.3 방수구

방수구는 해수가 선체에 올라왔을 때 과도한 트림과 경사가 발생하지 않도록 원활한 방수 역할 및 일반적인 해상상황에서 폭우에 대응한 배수 능력을 갖추기 위하여 설치한다. 따라서 관리소홀로 인해 방수구가 막히거나 Flap 형식의 덮개가 제대로 작동하지 않을 경우 불워크와 함께 웰을 형성하여 초기 경사를 과도하게 발생시키므로 월파의 위험성을 높일 수 있다. 추정되는 풍성호의 방수구 최대면적은 법적 기준에 미달한 약 17% 수준이었으며, 도면 상 표시된 방수구의 면적도 법적 기준에 미달한 약 50% 수준으로, 3 m 이상의 해상상태에서 해수의 유입이 증가될 우려가 존재한다.

따라서 방수구 설치와 관련하여 다음과 같은 개선방안을 제시한다.

1) 목재 추가 갑판은 하부 방수구를 확인하고 소제할 수 있도록 방수구 상부 목재를 제거
2) 파랑 중에도 유입보다 방수를 증가시킬 수 있는 어선용 표준형 방수구 개발 및 보급이 요구되며, 어선구조기준에 규정된 방수구 기준의 재검토가 요구됨

6. 고찰 및 결론

중앙해양안전심판원에서 발간한 '2020 해양사고 통계'에 따르면 최근 5년간 국내에서 발생한 어선사고는 2016년 1,646건에서 2020년 2,100건으로 매년 증가하고 있으며, 어선의 전복사고 또한 2016년 36건에서 2020년 73건으로 매년 꾸준히 증가하고 있는 추세이다. 또한, 최근 5년간 발생한 378건의 전복사고 중 어선사고가 252건으로 66.7%의 높은 비중을 차지하고 있어 이에 따른 대책 마련이 시급한 실정이다.

본 연구에서는 풍성호 전복사고를 기반으로 어선의 추가 갑판, 바람막이, 방수구 등이 복원성에 미치는 영향을 분석하여 어선 전복사고의 대응 방안을 제시하였다.

어선 전복사고를 방지하기 위한 실효성을 확보하기 위해서 어선의 운항자와 선주는 조업 편의 시설은 강력하게 요구하고 있지만, 안전 확보에 대한 운항자 준비 사항은 핵심적 정보 취득이 부족할 수밖에 없어 관련 교육과 정보 전달이 요구된다. 또한, 안전기술관리 기관에서는 연승어선에 대한 방수구 설치 기준의 규정 적합성 검토가 필요해 보인다. 조업환경을 고려하여 필수조업안전시설에 관한 표준화와 경량화의 요구 및 표준화가 필요한 톤수별 어선 선형을 식별하고 개발해야 할 것이다.

마지막으로 소형 선박의 안전성을 확보하기 위하여 정부, 검사기관, 선주들은 지속적인 관심을 갖고 선형 표준화, 구획 안전성 검증, 필수조업안전시설 표준화 및 경량화 등의 연구개발을 통하여 해당 조업 해역에 안전한 선박이 투입될 수 있도록 노력해야 할 것이다.

사 사

본 연구는 해양안전심판원의 "연승어선 방수구, 추가 갑판, 바람막이 등이 복원성에 미치는 영향분석 용역" 과제의 지원을 받아 수행되었음.

References

[1] Choi(1992), Safety Measures Based on the Current Situation and Marine Accident Cases of Fishing Vessels, Journal of the Korea Ship Safety Technology Authority, Vol. 51, pp. 23-27.

[2] Choi, S. M.(2016), An analytic study on the hull characteristics of ship accidents at low capsizing speeds. Journal of Advanced Marine Engineering and Technology, 40(3), 235-239.

[3] Fishing boat structural Act(2015), Ministry of Oceans and Fisheries, Act 345-350.

[4] Gwon, S. Y. and H. J. Lee(2007), Study on the stability criteria for small fishing vessels and cargo ships. Journal of Korea Ship Safrty Technology Authority, 19-33.

[5] Jung, C. H., Y. S. Park, J. S. Kim, and S. W. Kim(2012), A Study on the Cause Analysis for the Capsizing Accident in Fishing Vessels, The Korea Society for Fisheries and Marine Sciences Education, Vol 24, No. 1, pp. 1-8.

[6] Kang, I. K., H. S. Kim, H. I. Shin, Y. W. Lee, J. C. Kim, and H. J. Jo(2007), Safety countermeasures for the marine casualties of fishing vessels in Korea, Journal Korean Society of Fisheries and Ocean Technology. Vol. 43, No. 2, pp. 149-159.

[7] Kang, J. P.(2011), A Study on the Relationships Between A Fisher boat sea accidents and Meterological Factors, Pukyong National University.

[8] Kim, K. H.(1987), Case of Marine Accident - Focused on the Abolition of Fishing Vessel, Journal of the Korea Ship Safety Technology Authority, Vol. 33, pp. 49-53.

[9] Kim, Y. J., I. K. Kang, S. J. Ham, and C. W. Park(2015), Analysis the dynamic factors on the capsize of O-Ryong 501, ournal Korean Society of Fisheries and Ocean Technology. Vol. 51, No. 4, pp. 1-17.

[10] KMST(2021), Korea Maritime Safety Tribunal, https://www.kmst.go.kr/web/board.do?menuIdx=135.

[11] Lee, J. S., H. S. Jung, J. H. Oh, and S. G. Lee(2017), A Study on Flooding·Sinking Simulation for Cause Anlysis of No. 501 Oryong Sinking Accident, Korean Institute of Navigation and Port Research, Vol. 41, No. 6,, pp. 451-466.

[12] Lim, H. S.(1995), The Cause and Countermeasures of the Surrender of the Fishing Boat through Case Analysis, Journal of the Korea Ship Safety Technology Authority, Vol. 61, pp. 30-36.

[13] Son, K. H.(2000), Dynamic Stability of a Damaged Ship in Beam Wind and Waves, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol. 37, No. 1, pp. 50-59.

[14] Stability Criteria of Vessels Act(2015), Ministry of Ocean s and Fisheries, Act 18.

[15] Yang, S. H., J. W. Cho, H. J. Kim, and B. K. Kim(2015), Study on the Mooring Stability of Floating Dock with Ultra Large Offshore Structure, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 52, No. 6, pp. 509-519.

Received : 2022. 07. 29.
Revised : 2022. 09. 08.
Accepted : 2022. 10. 28.