

전복사고 발생 소형선박의 적재상태를 고려한 파랑중 횡동요 연구

김성욱* · 김인섭*** · 송미경*** · 이건경****

*, **** 한국해양교통안전공단 선임검사원, ** 한국해양교통안전공단 스마트안전연구실장,
*** 한국해양교통안전공단 연구원

A Study on Roll Motion in Waves of Capsized Small Vessel Based on Loading Condition

Sung-Uk KIM* · In-Seob KIM*** · Mi-Kyoung SONG*** · Gun-Kyung LEE****

*, **** Senior Surveyor, Korea Maritime Transportation Safety Authority

** Chief, Smart Safety Research Department, Korea Maritime Transportation Safety Authority

*** Researcher, Korea Maritime Transportation Safety Authority

요 약 : 국내 선박의 해양사고 발생률은 지속적으로 증가하고 있으며, 총톤수(Gross tonnage) 10톤 미만의 소형선박에서 집중적으로 발생하고 있다. 선박의 전복사고는 인명 및 재산 피해를 동반하기 때문에 반드시 예방되어야 하는 사고임에도 불구하고, 전복사고와 관련이 깊은 운항중인 소형선박의 내항성능 연구는 미진한 상태이며 내항성능과 관련된 국내·외 규정이 존재하지 않는 실정이다. 이에 본 연구에서는 전복사고가 발생한 소형선박의 재결서를 조사하여 전복사고의 주요 원인이 적재상태 불량이라는 점을 파악하고, 대표 선박을 선정하여 유체정역학적 계산 및 내항성능 해석을 수행하였다. 일반적으로 선박은 운항중 6자유도 운동을 하게 되는데 본 연구에서는 전복사고와 관련이 깊은 횡동요(Roll)를 알아보기 위해 대표 선박의 응답진폭연산자(RAO) 및 운동응답 스펙트럼(Response Spectrum)을 계산하고 3시간동안의 파도 정상상태(Stationary)에 대한 단기(Short Term) 통계 해석을 수행하였다. 그 결과 적재상태가 불량할 때에는 선박의 횡동요가 크게 발생하여 선박의 안정성을 크게 감소시킨다는 사실을 알 수 있었다.

핵심용어 : 소형선박, 전복, 적재상태, 내항성능, 횡동요

Abstract : The frequency of marine accidents of vessels in Korea is steadily increasing and it is concentrated on small vessels with less than 10 tons of gross tonnage. Therefore, preventing capsizing accidents in small vessels is important to reduce the cost in terms of human and property damage due to such accidents. However, research on the seakeeping performance of small vessels has been insufficient, and there are no domestic and international regulations on seakeeping performance. Therefore, in this study, capsizing accidents caused by poor loading conditions were investigated by examining the adjudications of the small vessels in which the capsizing accidents occurred. Hydrostatic calculations and seakeeping performance analysis were performed for a representative vessel. A vessel generally performs a six-degree-of-freedom motion during operation. In this study, the response amplitude operator and response spectrum of a representative vessel were calculated to determine the roll motion. Moreover, a short-term statistical analysis of the vessel according to the loading conditions was performed for the wave stationary status for 3 h. From the results, it was estimated that, when the loading condition of a small vessel is poor, its roll motion increases, greatly reducing its stability.

Key Words : Small vessel, Capsizing, Loading condition, Seakeeping performance, Roll motion

1. 서 론

중앙해양안전심판원의 통계자료에 따르면, 국내 선박의 등록 척수 및 해양사고 발생률은 Fig. 1과 같이 지속적으로

증가하고 있다. 선박의 해양사고는 Fig. 2와 같이 총톤수 10톤 미만의 소형선박에서 집중적으로 발생하고 있으며, 이로 인한 사망·실종 등의 인명피해는 매년 20여명에 육박하고 있다(KMST, 2019).

한편, 선박의 사고 종류별 해양사고 원인 현황에 따르면, 2016년부터 2020년까지 선박 전복 발생사고의 주요 원인은

* First Author : sukim0125@komsa.or.kr, 044-330-2350

† Corresponding Author : cookie@komsa.or.kr, 044-330-2450

화물의 적재불량이 전체 48건 중 12건으로 가장 높은 비중을 차지하고 있다(KMST, 2019).

이러한 선박의 전복사고를 예방하기 위해 국내에서는 「선박안전법」 및 「어선법」에 선박의 복원성능 관련 규정을 두어 선박의 감항성을 유지하도록 하고 있으나, 파도와 같은 외력 조건이 반영된 소형선박의 내항성능 관련 규정은 국내뿐만 아니라 국외에도 존재하지 않고 있는 실정이다.

항해중인 선박은 파도와 같은 외력을 받아 동요를 야기하게 되는데, 전복사고는 대부분 횡동요(Roll)에 의해 발생하게 된다. 이러한 이유로 대형선은 설계단계부터 내항성능 해석 및 모형시험 등을 수행하여 안전성을 확보하고 있으나, 소형선은 대형선에 비해 건조비가 저렴하고 인력부족 및 수익성의 문제 등으로 인해 내항성능 관련 연구 없이 설계업체 및 조선소의 경험에 따라 선박이 건조되고 있는 실정이다.

최근 국내에서도 소형선박의 운항한계 및 내항성능 평가 등의 연구를 통해 내항성능 기준과 관련된 연구가 수행되었으나(Bae, 2015; Jung, 2008; Kim et al., 2019), 전복사고가 발생했던 소형선박의 내항성능 해석을 통한 원인 규명 등의 연구는 거의 수행되지 않았다.

이에 본 연구에서는 전복사고가 발생한 소형선박 중 대표 선박 한 척을 선정하고, 적재상태에 따라 선박의 횡동요가 어떻게 변화하는지에 대해 검토해 보았다.

2. 재결서 분석을 통한 해석대상 선박 선정

2016년부터 2020년까지 전복사고가 발생했던 선박의 재결서는 총 42건이었으며, 그 중 소형선박의 일반적인 특성과 전복사고 현상을 나타내는 선박을 해석 대상으로 선정하기 위해서 다음과 같이 선정 기준을 정하였다.

- 사고 비율이 높은 총톤수 10톤 미만 선박
- FRP 재질의 선박
- 적재상태 및 기상상태가 불량했던 선박
- 횡방향 파도를 맞아 전복된 선박
- 인명피해 사고가 발생했던 선박
- 쌍동선 및 특이 선형이 아닌 일반적인 선형의 선박

한편, 상기 조건을 만족하는 선박은 일반선과 어선으로 구분할 수 있는데 국내 등록 선박은 어선이 일반선에 비해 높은 비중을 차지하고 있어 본 연구에서는 상기 조건에 부합하는 통발어선(A어선)을 해석 대상으로 선정하였다.

재결서에 따르면 A어선은 전복사고 당시 통발을 규정보다 2배 이상 과적하고 있었으며, 파고 약 2.5m의 해상상태에서 조업을 하던 중 횡방향 파도에 의해 전복이 발생한 사고로 선원 1명이 사망하였다.

해석대상으로 선정된 A어선의 기본 제원 및 일반배치도는 Table 1 및 Fig. 3과 같다.

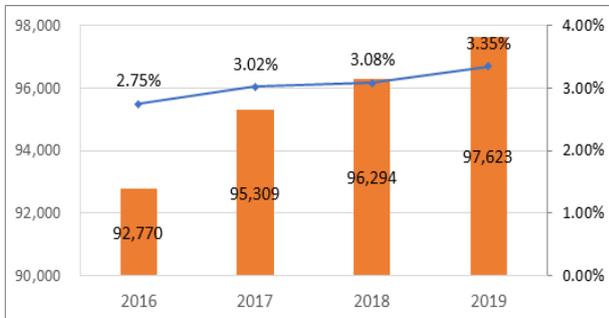


Fig. 1. Status of Registered Vessels and Accident Rates by Year.

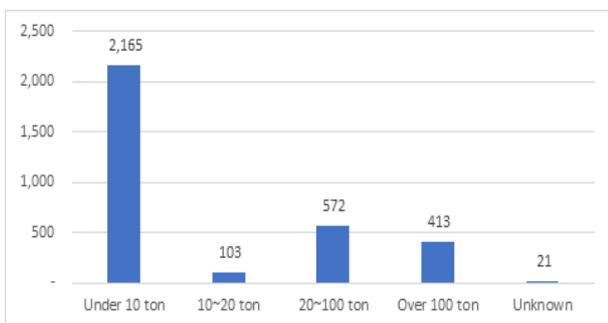


Fig. 2. Status of Marine Accidents by Gross Tonnage, 2019.

Table 1. Basic Dimension for A Fishing Vessel

Item	Dimension
Length Between Perpendicular	14.10 m
Breadth, moulded	3.90 m
Depth, moulded	1.21 m
Gross Tonnage	8.55 Ton
Box of Keel	0.559 m

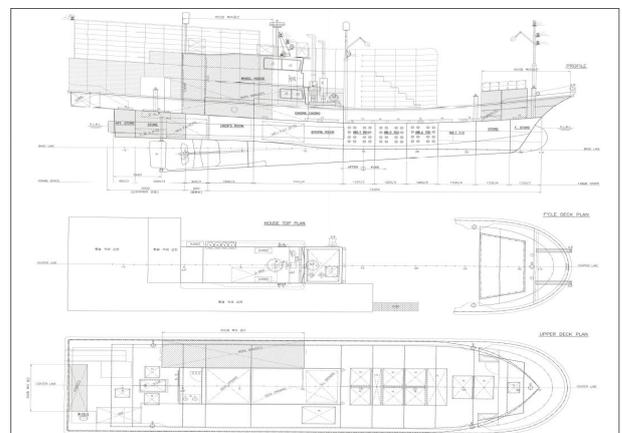


Fig. 3. General Arrangement of A Fishing Vessel.

3. K-SHIP S/W를 이용한 유체정역학적 계산

내항성능 해석을 수행하기 위해서는 선박의 적재상태 및 무게중심 등의 기본적인 유체정역학적 정보들이 필요하다.

일반적으로 선박의 내항성능은 경하상태와 만재상태를 해석하고 그 사이의 적재상태는 경하상태와 만재상태 사이의 값에 해당한다고 간주한다. 따라서 본 연구에서는 유체정역학적 계산 및 내항성능 해석 범위를 경하상태(Light Ship), 어장발상상태(Full Load Fishing Ground)¹⁾, 전복사고 당시의 적재상태(Capsizing Accident)로 선정하였다.

A 어선의 유체정역학적 계산은 한국해양교통안전공단에서 개발하여 선박의 도면 승인 등에 활용되고 있는 K-SHIP 소프트웨어를 사용하였으며, A어선의 계산 결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Hydrostatics Result of A Fishing Vessel (unit: m)

Item	Light Ship	Full Load Fish GR.	Capsizing Accident
L.C.G	-1.430	-1.448	-2.915
KG	1.405	1.363	1.837
Draft	0.634	0.971	0.969
L.C.B	-0.775	-1.443	-2.915
GM	2.264	1.091	0.513
Displacement(Ton)	26.240	48.976	48.006

Table 2의 계산 결과에 따르면, 어장발상상태와 전복사고상태에서는 배수량 및 흘수가 크게 차이 나지 않으나, LCG 및 GM은 크게 차이 나는 것을 알 수 있다. 따라서 어장발상상태와 전복사고 당시의 적재상태만을 비교한다면 흘수 및 배수량은 어장발상상태보다 작아 과적상태로 볼 수 없지만, 통발을 규정보다 2배 이상 적재하면서 발생한 적재상태 불량으로 볼 수 있다. 이는 출항전 기상상태가 좋지 않을 것이라는 예보를 접했던 A어선의 선장이 통상 5일치를 선적하던 선용품 및 주부식을 약 2일치만 선적하고, 통발을 규정보다 2배 이상인 선적하였기 때문이라고 제결서에 나타나 있다.

4. 내항성능 해석

4.1 해상상태 모델 선정

선박이 운항중에 마주하는 파도 및 바람과 같은 외력은 선박 내항성능 평가의 중요한 요소이다. 이에 A어선의 사고 발생 위치를 조사하여 사고당시의 해상상태가 내항성능 해

석에 반영될 수 있도록 하였다.

A어선은 Fig. 4와 같이 경남 통영시 남방 약 12마일 해상에서 사고가 발생하였으며, 사고 발생 위치에서의 수심은 약 70m로 조사되었다(KHOA, 2021). 또한 사고 발생 당시의 해상상태는 북동풍이 초속 약 15m로 불었으며, 평균 파고는 약 2.5m로 제결서에 보고되어 있다.

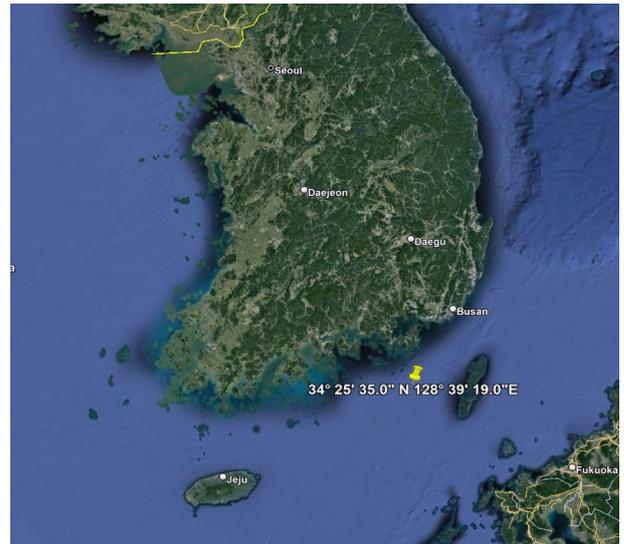


Fig. 4. Capsizing Accident Location of A Fishing Vessel.

일반적으로 수치해석을 위해 사용되는 해상모델은 JONSWAP 스펙트럼과 PM 스펙트럼 등이 있는데(DNV-GL, 2018), JONSWAP 스펙트럼은 천해파에 적합한 모델로 알려져 있다(Kang and Lee, 2014).

따라서 본 연구에서는 사고 발생위치에서의 해상모델로 JONSWAP 스펙트럼을 선정하였으며, 유의파고는 사고당시의 평균 파고인 2.5m를 해석 조건으로 하였다.

아래 Fig. 5는 유의파고 2.5m와 파도주기 7.19초(Hz)에서 생성된 JONSWAP 스펙트럼을 보여주고 있다.

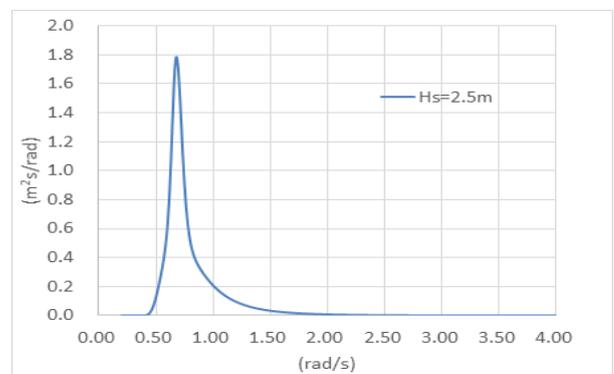


Fig. 5. JONSWAP Spectrum for Significant Wave Height 2.5m.

1) 「어선복원성 및 만재흘수선 기준」의 표준재화상태 중 어선의 만재상태에 해당하는 적재상태

해상상태의 파도는 여러 방향으로 진행하는 성분파가 모여 나타나는 다방향파이다. 따라서 실제 해상상태를 엄밀히 구현하기 위해 파도 방향분포함수(Wave Spreading Function)를 사용하고 있는데 본 연구에서는 일반적으로 사용되는 $\cos^2 u$ 의 분포식(1)을 사용하였다(DNV-GL, 2018).

$$S_w(w, u) = \left(\frac{2}{\pi}\right) S_w(w, u) \cos^2 u : -\frac{\pi}{2} \leq u \leq \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

여기서, S_w 는 파도 스펙트럼

4.2 A어선의 내항성능 해석 모델

A어선의 선형 모델은 내항성능 및 유체해석 분야에서 자주 활용되는 상용 소프트웨어인 Rhino를 사용하였다. Rhino에 의해 생성된 A어선의 3차원 선형 모델이 Fig. 6에 나타나 있다.

Rhino로 생성된 A어선의 배수량(Displacement)은 K-Ship 소프트웨어로 계산된 값과 비교하였으며, 그 차이는 2% 미만으로 줄여 내항성능 해석 결과에 대한 신뢰도를 높였다. 계산된 배수량 및 그 차이는 Table 3과 같다.

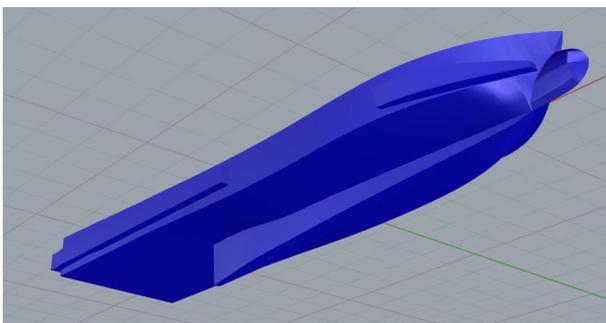


Fig. 6. 3D Model of A Fishing Vessel.

Table 3. Displacement of the models using Rhino and K-Ship

Item	Light Ship	Full Load Fish GR.	Capsizing Accident
K-Ship(ton)	26.240	48.976	48.006
Rhino(ton)	26.436	48.91	48.808
Disp. difference(%)	0.741	0.072	1.643

4.3 A어선의 응답진폭함수(RAO)

선박의 RAO(Response Amplitude Operator)는 단위파고에 대한 선박의 응답을 나타내는 값으로 내항성능 해석의 가장 기본적인 함수이다.

항해중인 선박은 6자유도 운동(Surge, Sway, Heave, Roll,

Pitch, Yaw)을 하게 되는데, 본 연구에서는 선박의 전복사고와 관련이 깊은 횡동요(Roll)만을 다루기로 한다.

A어선의 RAO는 Rhino에서 생성된 해석모델과 K-SHIP의 유체정역학적 계산 결과를 사용하였으며, 관성반경(Radius of Gyration) 및 감쇠비는 횡동요에 대한 영향이 해석에 잘 반영될 수 있도록 Table 4와 같이 설정하였다. 또한 관성반경과 감쇠비는 적재상태별로 동일한 값을 사용하여 이들 값에 따른 영향이 발생하지 않도록 하였다.

Table 5. Radius of Gyration (R.G.) and Damping Ratio

Item	Light Ship	Full Load Fish GR.	Capsizing Accident
R.G. for X, Z Directions	3.525m (0.25 × LBP)		
R.G. for Y Direction	1.755m (0.45 × B)		
Damping Ratio	1% of Critical Damping Coefficient		

A어선의 RAO를 구하기 위해 본 연구에서는 DNV 선급의 WADAM 소프트웨어를 사용하였으며(DNV-GL, 2017), A어선의 적재상태별 횡동요(Roll) RAO는 Fig. 7~9와 같았다. 이때 그래프에서 0도는 선미파, 180도는 선수파이다.

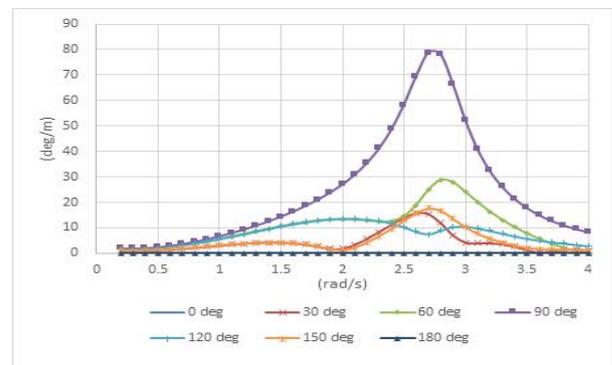


Fig. 7. Roll RAO for Light ship Condition.

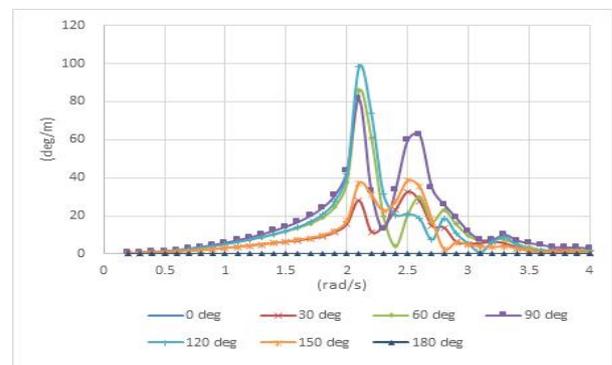


Fig. 8. Roll RAO for Fishing Ground Departure Condition.

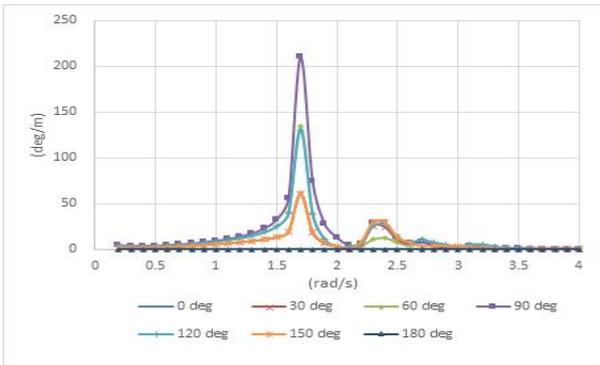


Fig. 9. Roll RAO for Capsizing Accident Condition.

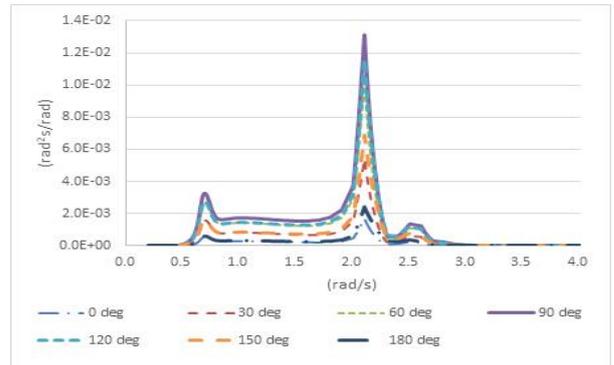


Fig. 11. Roll Response Spectrum for F.G. Departure Condition.

A어선의 적재상태별 RAO를 살펴보면, 경하상태와 전복 사고상태는 90도 방향의 횡파에서 최대 횡동요가 발생한다. 반해, 어장발상태는 120도 방향의 횡파에서 가장 크게 발생하였다. 또한 경하상태는 파도 주파수 2.7 rad/s에서 78도, 어장발상태는 파도 주파수 2.1 rad/s에서 98도로 최대 응답(Peak)이 발생한다. 반해, 전복사고상태에서는 파도 주파수 1.7 rad/s에서 최대 응답(Peak)이 210도로 다른 적재상태에 비해 급격하게 증가하였다.

그리고 Fig. 5에 따르면 JONSWAP 스펙트럼은 약 0.7 rad/s의 저주파수 영역에서 최대치(Peak)를 가지고 있는데, A어선의 최대 횡동요(Peak)가 발생하는 주파수 영역은 경하상태, 어장발상태, 전복사고상태 순으로 JONSWAP 스펙트럼의 최대치(Peak)가 발생하는 영역에 점점 가까워지고 있다.

4.4 A어선의 운동 응답 스펙트럼(Response Spectrum)

파랑 중 선박의 응답은 식(2)와 같이 선박의 단위파고에 대한 특성(RAO)과 파도 스펙트럼(S_w)의 연산값으로부터 얻을 수 있으며, 이에 대한 결과값은 Fig. 10~12와 같다.

$$S_R(w, u) = \left(\frac{2}{\pi} \right) S_w(w, u) \times |RAO(w)|^2 \quad (2)$$

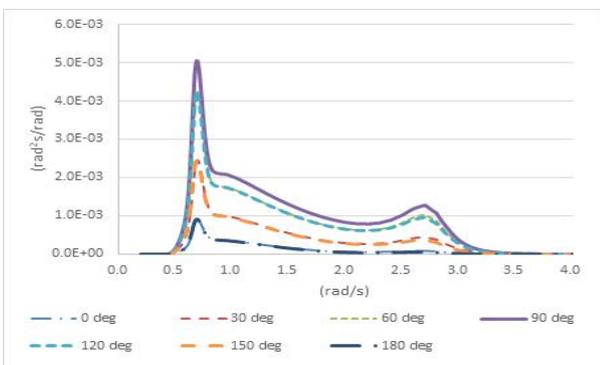


Fig. 10. Roll Response Spectrum for Light ship Condition.

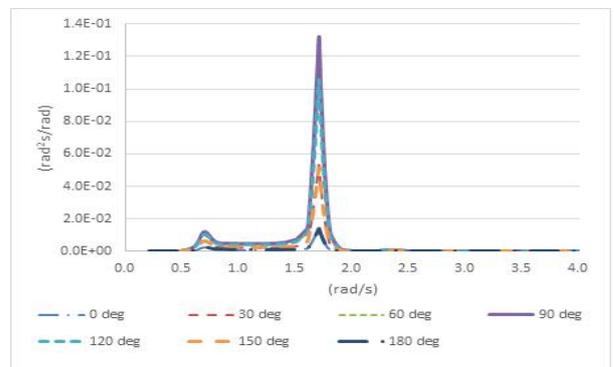


Fig. 12. Roll Response Spectrum for Capsizing Accident Condition.

A어선의 운동 응답 스펙트럼(S_w) 계산 결과에 따르면, 경하상태에서는 약 0.8 rad/s의 저주파수에서 최대값을 가지며, 어장발상태와 전복사고상태에서는 각각 2.1 rad/s, 1.7 rad/s의 주파수 부근에서 최대값을 가지고 있는 것으로 나타났다. 이는 경하상태에서는 파도 스펙트럼이 A어선의 RAO에 비해 더 큰 영향을 끼쳤으며, 어장발상태와 전복사고상태에서는 RAO가 파도 스펙트럼보다 더 큰 영향을 끼쳤기 때문에 판단된다. 또한 Fig. 8에서 어장발상태의 RAO는 입사파 120도에서 가장 큰 응답(peak)을 보였으나, 어장발상태의 운동 응답 스펙트럼은 Fig. 11과 같이 90도 방향의 입사파에서 가장 큰 응답(peak)을 가지는 것으로 나타났다.

실제 해상상태에 대한 선박의 횡동요는 운동 응답 스펙트럼의 면적을 이용하여 계산되어지는데, 여기서는 소형어선의 조업시간이 반영될 수 있도록 단기 통계 해석을 수행하였다.

4.5 A어선의 단기(Short Term) 통계 해석

단기 통계 해석의 개념은 해상상태가 몇 분 또는 몇 시간 동안 변화하지 않는다는 가정을 사용하는데, 파도에 대한 선박의 응답을 얻을 때 자주 사용되는 통계처리 방법이다.

즉, 파도가 단기간 해상상태에서 정상적(Stationary)이라고 가정한다면, 그것의 통계적 특성치는 파도 스펙트럼(Wave Spectrum)으로 나타낼 수 있기 때문에 선체의 응답 역시 파도 스펙트럼과 유사한 분포를 따르게 된다는 것이다.

본 연구에서는 해상상태가 3시간동안 정상적이며, 그 응답은 레일리 분포를 따른다고 가정하였으며, DNV의 통계처리 프로그램인 POSTRESP를 사용하였다(DNV-GL, 2007).

A어선의 횡동요에 대한 단기 통계 해석 결과는 Table 5와 같다.

Table 5. Short Term Statistics Analysis for Roll Motion (unit: deg)

Wave Direction	Light Ship	Full Load Fish GR.	Capsizing Accident
0	5	6	12
30	9	11	21
60	12	14	29
90	14	16	32
120	12	15	29
150	9	11	21
180	5	7	12

단기 통계 해석 결과를 보면 A어선은 90도 방향의 횡파에 의해 가장 크게 횡동요를 일으키는 것을 알 수 있으며, 경하상태 및 어장발상태에 비해 전복사고상태에서 횡동요가 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 파도 방향 60도, 120도에서도 90도에 준하는 횡동요가 발생하였으며, 전복사고상태에서의 선수파와 선미파에 대한 횡동요는 경하상태에 준하는 크기로 발생하였다.

5. 결론

총톤수 10톤 미만의 어선은 사고 발생률이 높음에도 불구하고, 이들은 설계나 건조시에도 내항성능 연구가 수행되지 않으며, 전복사고 발생시에도 내항성능 해석을 통한 원인 규명은 거의 전무한 상태이다.

이에 본 연구에서는 실제 전복사고가 발생했던 소형어선의 유체정역학적 계산 및 내항성능 해석을 통해 적재상태가 선박의 횡동요에 미치는 영향에 대해 알아보려고 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 동일한 선박에서 배수량 및 흘수가 유사할지라도 선박의 적재상태에 따라 GM 값은 크게 달라진다.
2. 선박의 적재상태가 불량할 경우, RAO는 정상 적재상태 일 때의 RAO보다 파도 에너지 밀도가 높은 쪽으로 가까이 치우쳐져 횡동요가 크게 발생하였다.

3. 운동응답 스펙트럼은 RAO의 크기뿐만 아니라 주파수 영역과도 밀접한 관계를 가지고 있으며, 큰 값을 가지는 RAO에서 횡동요가 크게 발생하는 것은 아니다.

4. 정상 적재상태에서의 횡동요에 대한 단기 통계 해석 결과는 유사하였으나, 적재상태가 불량할 경우에는 횡동요가 2배 정도 크게 증가한 결과가 나타났다.

5. 소형선박의 적재상태가 불량할 경우, 선수파 및 선미파를 포함한 모든 방향의 파도에 대해 횡동요가 크게 발생하였다.

본 연구는 대형선의 내항성능 연구에 자주 사용되는 DNV의 WADAM 소프트웨어를 이용한 해석 결과로 모형시험 등을 수행하지 않아 정량적인 수치 측면에서는 정확도가 다소 떨어질 수 있다는 한계점이 있다. 그러나 그동안 소외되었던 소형어선의 내항성능 해석을 수행하고, 내항성능 전문 소프트웨어를 통해 전복 사고가 발생했던 어선의 적재상태별 횡동요를 연구를 통해 소형선박 분야의 기술 향상 및 해양사고 감소에 일조하고자 하였다.

현재 소형선박의 내항성능 해석 및 모형시험 등의 연구는 많이 부족한 실정인데, 관련 연구가 보다 활성화되어 소형선박의 전복과 같은 해양사고가 감소되기를 바란다.

후 기

본 연구는 한국해양교통안전공단 ‘전복사고 발생 10톤급 소형선박에 대한 내항성능 해석 연구’의 연구비로 수행되었습니다.

References

- [1] Bae, J. Y.(2015), A Study on Operating Limit Analysis for Small High-speed Boat, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 21, No. 6, pp. 784-789.
- [2] DNV-GL(2007), SESAM USER MANUAL, Postprocessor
- [3] DNV-GL(2017), SESAM USER MANUAL, Wave Analysis by Diffraction and Morison theory.
- [4] DNV-GL(2018), CLASS GUIDELINE, Wave Loads.
- [5] Jung, C. H.(2008), Evaluation of Seakeeping Performance for Regulation of Vessel Traffic Control(I), Journal of Navigation and Port Research, Vol. 32, No. 10, pp. 785-791.
- [6] Kang, D. H. and B. G. Lee(2014), Evaluation of Wave Characteristics and JONSWAP Spectrum Model in the Northeastern Jeju Island on Fall and Winter, Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy, Vol. 17,

No. 2. pp. 63-69. for Statistical Response Calculations.

- [7] Kim, Y. R., J. B. Park, J. C. Park, S. K. Park, and W. M. Lee(2019), Development of an Evaluation Procedure for Seakeeping Performance of High-speed Planing Hull using Hybrid Method, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 56, No. 3, pp. 200-210.
- [8] Korea Maritime Safety Tribunal(KMST)(2019), Statistics of Marine Accidents, <https://www.kmst.go.kr>, Accessed: December.
- [9] Korea Hydrographic and Oceanographic Agency(KHOA) (2021), Oceanmap Service, <http://www.khoa.go.kr>, Accessed: oceanmap.

Received : 2021. 11. 26.

Revised : 2021. 12. 15.

Accepted : 2021. 12. 28.