



Original Article

침몰선박 위해도 평가 및 관리체계에 관한 연구

이승현¹ · 최혁진¹ · 김경택² · 서재준^{3,†}
¹선박해양플랜트연구소 해양안전환경연구본부
²한남대학교 산업경영공학과
³한밭대학교 산업경영공학과

A Study on Risk Assessment and Management Framework of Sunken Ships

Seung-Hyun Lee¹, Hyuek-Jin Choi¹, Kyungtaek Kim², and Jae-Joon Suh^{3,†}

¹Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering/KRISO, Daejeon 34103, Korea
²Department of Industrial & Management Engineering, Hannam University, Daejeon 34430, Korea
³Department of Industrial & Management Engineering, Hanbat National University, Daejeon 34158, Korea

요 약

우리나라의 침몰선박은 2017년 12월 기준 2,200척으로 보고되고 있다. 선박의 침몰은 그 자체로 큰 손실이며 이들 침몰선박은 해양환경오염과 항행안전, 인명피해 등 다양한 위험 요소로 인하여 2차적인 사고를 일으킬 수 있다. 따라서 2차 사고를 방지하기 위해서는 침몰선박의 체계적인 관리와 처리가 요구된다. 이 논문에서는 우선 침몰선박 위해도 관리체계를 제시하고, 위해도 관리체계에 따라 초기 위해도 평가 절차와 해양환경오염에 대한 상세 위해도 평가 방안을 제안하였다. 그리고 상세 위해도 평가 결과를 바탕으로 침몰선박의 위해도 저감 대책을 위험 등급에 따라 마련할 수 있도록 제시하였다.

Abstract – The number of sunken ships in Korea is reported to be 2,200 as of December 2017. Sinking of ships can well cause a total loss itself and moreover the sunken ships may cause the secondary accidents of navigation safety, ocean environmental pollution, damage of human life and so on due to various risk factors. Therefore, systematic management and treatment for sunken ships is necessary to prevent the second accidents. In this paper, first of all, we present a risk management framework of sunken ships. And we describe the procedure of the initial risk assessment and propose a method of the specific risk assessment for ocean environmental pollution according to the risk management framework. And based on the results of the specific risk assessment, it was proposed that the risk reduction measures for sunken ships to be prepared according to the risk level.

Keywords: Sunken Ship(침몰선박), Risk Management Framework(위해도 관리체계), Initial Risk(초기위해도), Specific Risk(상세위해도), Risk Reduction(위해도 저감)

1. 서 론

전 세계 침몰선박 중 총톤수 150톤 이상의 유조선, 총톤수 400톤 이상의 유조선 이외의 선박 중 화물 및 잔존기름을 적재한 채 침몰한 선박은 3백만척이며, 이들 선박 중 8,569척은 잠재적 위험성이 있는 선박으로 평가되었다(Michel *et al.*[2005]). 한편, 국내 침몰선박은 해양수산부 통계에 따르면 2017년 12월 현재 2,200척이며, 연평균 약 50여척이 침몰되고 있는 것으로 보고되고 있다(Ministry of

Oceans and Fisheries[2017]). 해양사고로부터 침몰된 선박은 2차적으로 해양환경오염, 선박의 항행안전, 나아가 인명 손실까지 경제적, 사회적으로 심각한 손실을 야기할 수 있다. 그러므로 침몰선박은 초기 발생부터 그 위험성이 완전히 제거될 때까지 체계적으로 관리되어야 한다. 침몰선박의 위험성을 완전히 없애기 위해서는 인양하여 해체하는 방안이 가장 확실한 방법이라 할 수 있겠으나 이는 기술적으로 또는 비용상의 문제로 현실적으로 거의 불가능하다. 따라서 그 정도에 따라 내재한 위험성을 완전히 제거하든지 또는 감소시키기 위한 적절한 저감 및 제어 대책을 수립하기 위한 체계적인 침몰선박 관리체계가 필요하다.

†Corresponding author: jjsuh@hanbat.ac.kr

침몰선박을 체계적으로 관리하기 위해선 우선 그 위험성을 평가하기 위한 적절한 평가방안이 필요하며 이를 위한 몇몇 연구가 국내에서 진행되었다. Choi *et al.*[2005]은 사상수 분석법(Event Tree Analysis)과 결함수 분석법(Fault Tree Analysis, FTA)을 이용하여 침몰선박의 원인과 결과를 분석하고, 침몰선박의 관리방법을 국제해사기구(IMO)의 공식안전성평가기법인 FSA(Formal Safety Assessment)기법을 이용하여 확률기반의 위해도 평가모델을 개발하였다. Chang *et al.*[2016]은 재화중량(dead weight tons)과 연료적재량(fuel capacity)을 이용하여 잔존량 정보가 없는 침몰선박의 잔존기름 양 추정방법을 제안하였다. 또한 Lee *et al.*[2015], Lee *et al.*[2016]은 현행법상의 위해도 평가항목 개선에 관한 연구와 현장조사정보를 통해 획득된 영상정보를 분석하여 침몰선박의 구조안전성에 대한 평가절차에 대한 연구를 수행하였다.

국내에서는 침몰선박의 위험성을 평가하기 위해 7개의 평가항목을 설정하고 각 항목별로 가중치를 부여하여 침몰선박의 위험성을 평가하도록 해양환경관리법 및 시행령에 규정하고 있지만 단지 관리대상 선박 분류에 한정되어 있다. 다시 말해 평가결과는 단순히 침몰선박에 내재한 위험성의 총량을 나타내는 수치로 해양환경이나 선박의 항행 안전 등에 미치는 세부적인 영향을 나타내기는 어렵다. 예를 들어, 침몰선박에 잔존하는 위험물질이 많으면 위هد도는 높게 평가될 수밖에 없는데 위험물질의 유출가능성이 거의 없으면 해양환경에 미치는 실질적인 영향은 거의 없을 것이다. 반대로 위험물질이 없어 해양환경에 미치는 영향은 없다 하더라도 사고원인, 침몰해역 또는 침몰상태에 따라 다른 선박의 안전항행에 큰 위험이 될 수 있을 것이다. 그러므로 현재 단순히 각 평가 항목별로 가중치를 부여하여 침몰선박의 위هد도를 평가하는 방법은 침몰선박에 대한 총체적인 위험도를 나타낼 수는 있지만 침몰선박이 해양환경 오염이나 선박의 안전항행, 더 나아가 인명손상을 가져올 수 있는 2차적인 사고에 대한 영향을 반영하여 적합한 저감대책을 수립하기에는 적절치 않다.

본 연구에서는 침몰선박을 합리적으로 관리하기 위한 위해도 관리체계(management framework)를 1단계와 2단계로 제시하였다. 그리고 추가적인 위험요소를 고려하여 위هد도를 보정할 수 있는 1단계 2차 위해도 매트릭스 평가방법을 제안하였다. 또한 침몰선박의 해양환경오염에 대한 상대적인 위험성을 추정하기 위한 2단계 상세위해도 평가 방법을 제안과 위해도 저감대책 수립에 각계 전문가들의 정성적인 분석과 비용-편익 분석이 필요한 기본적인 방법론 만을 제시하였다.

2. 침몰선박 위해도 관리체계

세계 여러 국가에서는 침몰선박으로부터 발생할 수 있는 위هد도를 파악하기 위하여 여러 프로젝트들이 진행되었다(NOAA[2013]; Landquist *et al.*[2016]). 이들 국가별 프로젝트에서는 침몰선박의 관리 목적과 필요성에 따라 다양한 위해도요소를 파악하고, 침몰선박의 위هد도를 평가하기 위한 데이터베이스를 개발하는 데 많은 노력을

기울여왔다.

본 장에서는 우리나라의 침몰선박 관련 현행 해양환경관리법과 시행규칙을 검토하고, 국제해사기구 해양분야에서 공식적으로 승인된 FSA 절차(IMO[2013])를 바탕으로 Fig. 1과 같은 침몰선박 위해도 관리 체계를 제시하였다. 그림에서 보듯이 침몰선박 위해도 관리체계는 1단계 초기위해도 평가(Initial Risk Assessment)와 2단계 상세위해도 평가(Specific Risk Assessment)를 거쳐 최종 위해도 저감대책을 결정하는 단계로 구성된다.

1단계 초기위해도 평가는 침몰선박의 위험상태에 따라 내재한 총체적인 위험성을 평가하여 관리대상 선박을 분류하기 위한 평가 단계이다. 초기위해도 평가에서 ‘집중·일반’관리 대상으로 분류된 선박은 해양오염, 항행안전, 인명손상 등 구체적인 위험에 노출되어 그 위험에 미칠 영향을 분석하기 위한 2단계 상세위هد도를 평가한다.

2단계 상세위해도 평가는 초기위해도 평가에서 ‘집중·일반’ 관리 대상으로 분류된 선박과 유조선 및 특수 위험물 운반선을 대상으로 해양오염, 항행안전, 인명손상 등 실질적으로 특정 위험에 미칠 영향을 분석하기 위한 단계이다.

상세위해도 평가결과는 전문가들의 정성적인 평가와 비용-편익 분석 과정을 거쳐 궁극적으로 적절한 위해도 저감대책을 수립하기 위한 지표로 활용한다.

Fig. 1에 제시한 세부적인 각 단계를 설명하면 다음과 같다.

① 침몰선박의 인지(Notification of sunken ship): 해양사고로 침몰된 선박은 선주, 해경 등의 유관기관으로부터 인지하고 사고 현황 정보를 DB에 저장한다.

② 평가대상 선박의 식별(Identification of target ships): 100톤 미만의 경우를 사용하는 소형선박이 민감해역 외해(offshore)에 침몰할 경우 빠른 대기중 증발로 해양환경 오염의 발생 가능성은 거의 없으며 해양생물에 미치는 기름의 독성도 거의 없는 것으로 알려져(Whiticar *et al.*[1993]) 위해도 평가대상에서 제외한다. 그러나 연안 가까운 민감해역에 침몰하면 위해도 평가대상으로 선정하고, 유조선과 특수 위험물 운반선의 경우는 당연히 2차 상세위해도 평가 대상 선박으로 분류한다.

③ 초기위해도 평가(Initial Risk assessment): 관련 규정에 정의된 7개 항목별 가중치에 따라 정량적인 분석을 수행한다. 초기위해도 평가 절차에 대해서는 3장에서 기술하였다.

④ 정성적 분석(Qualitative Analysis): 초기위해도 평가 결과를 바탕으로 전문가들의 정성적 평가를 거쳐 최종적인 침몰선박의 관리 대상 선박을 분석한다. 정성적 평가에 참여하는 전문가는 해양·조선공학분야, 해양환경 및 해양안전·탐사분야, 해양수산분야 등의 관련 전문가로 구성한다.

⑤ 관리 대상 선박 분류(Classification of management group): 초기위해도 평가 결과를 바탕으로 전문가들의 정성적 분석을 거쳐 침몰선박은 그 위험의 정도에 따라 비관리, 일반관리, 집중관리로 구분한다. 각각의 분류기준과 그에 따른 관리기준은 3장에서 설명하였다.

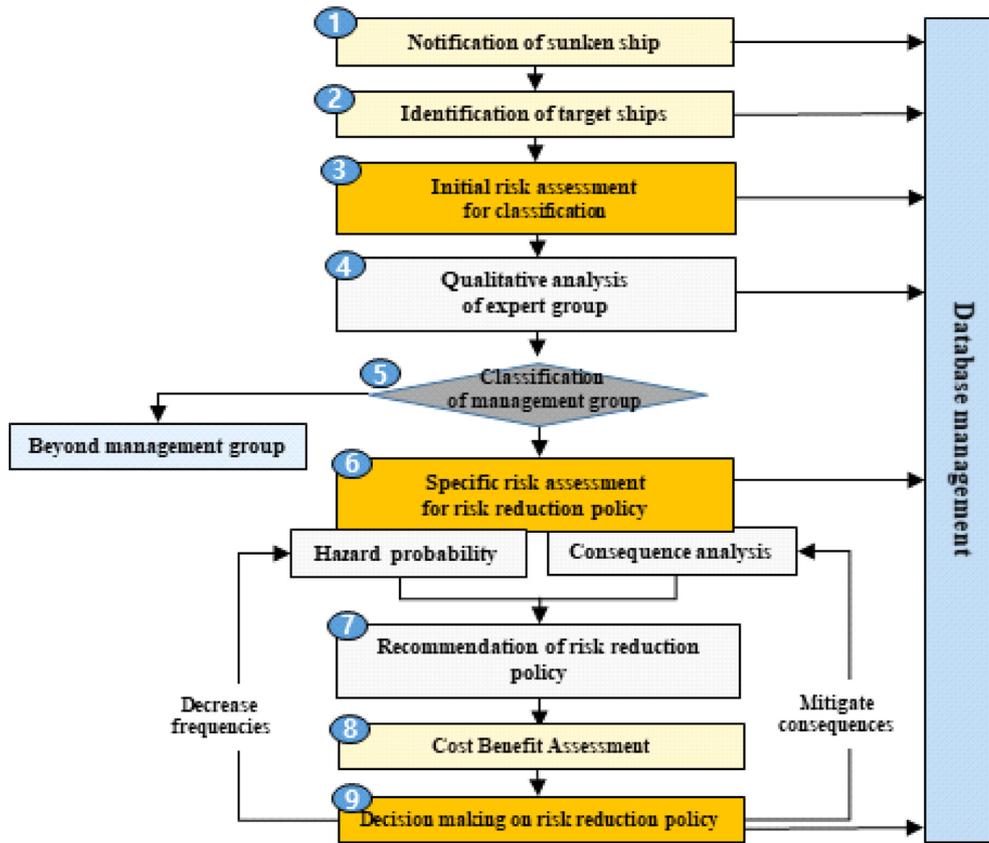


Fig. 1. Risk Management Framework of Sunken Ship.

⑥ 상세위해도 평가(Specific Risk assessment): 유조선과 특수 위험물 운반선을 포함하여 집중·일반관리 대상으로 분류된 침몰선박은 인명, 해양안전 또는 해양환경오염에 심각한 위험을 야기할 수 있으므로 적절한 위해도 저감대책의 기준을 제공하기 위해 상세위해도 평가를 수행한다. 상세위해도는 위험사건의 발생 확률과 그 영향에 대한 위험정도를 나타내는 지표로 자세한 상세위해도 평가 방법은 4장에서 다룬다.

⑦ 저감대책 수립(Recommendation of risk reduction policy): 상세위해도 평가에서 산출된 침몰선박의 유출확률과 영향도를 바탕으로 다양한 전문가들로 구성된 위원회에서 매트릭스 평가를 통해 구체적인 위해도 저감 대책을 수립한다.

⑧ 비용-편익 분석(Cost-benefit Analysis): 매트릭스 평가에서 도출된 저감대책에 대한 비용-편익 분석을 실시한다.

⑨ 최종 위해도 저감 대책 결정 및 시행: 매트릭스 평가와 비용-편익 분석을 통해 최종 위해도 저감 대책을 결정하고 관련 절차를 통해 수립된 저감대책을 시행한다. ⑦~⑨까지의 절차에 대해서는 5장에서 기술하였다.

관리체계 중 ④⑥⑨는 현행 침몰선박관리체계를 개선하여 추가적으로 제시된 부분이다. 개선된 관리체계 중 본 논문에서는 ⑥⑦의 상세위해도 평가방법과 저감대책을 중심으로 다루었다. ⑧의 비용-편익과 ⑨의 위해도 저감대책 결정 등은 향후 추가적인 연구가 필요한 부분이다.

3. 초기위해도 평가

초기위해도 평가는 침몰선박의 위험상태 및 총체적인 위험에 따라 관리대상 선박으로 분류하기 위한 평가단계로, Fig. 2에 제시된 바와 같이 위험식별 및 위험분석 단계를 거쳐 위해도를 산정한다.

침몰선박의 위험식별 단계는 침몰선박이 내포하고 있는 잠재적 위험요소를 파악하기 위한 단계로, 위험식별을 위해서는 침몰선박의 사고 시나리오(risk contribution tree, RCT)를 논리적이고 체계적으로 작성하여야 한다. 사고 시나리오에 근거하여 초기위해도 평가에 필요한 다음과 같은 네 가지 위험요소를 분석하여 각각의 위험요소를 정량화 한다.

- 선박 및 내부 위험요소: 침몰선박 자체위험과 잔존기름 및 잔존화물의 잠재적 위험
- 환경 피해 및 영향 위험요소: 해상 및 해안의 해양환경과 해상 교통에 대한 영향
- 사고원인 위험요소: 침몰사고 초기 사고형태에 따른 위험의 정도
- 유출 가능성 위험요소: 침몰 후 부식, 조류 및 해류, 방치 기간에 따른 유출 가능성

이와 같은 위 네 가지 침몰선박의 위험요소는 2001년 침몰선박 관리규정에 근거하여 7가지 항목(①선박종류, ②선박규모, ③위험물질(잔존기름, 유해액체물질), ④여유수심, ⑤해역환경민감도, ⑥유출가능성, ⑦해상교통환경)으로 구분되어 현행 해양환경관리법

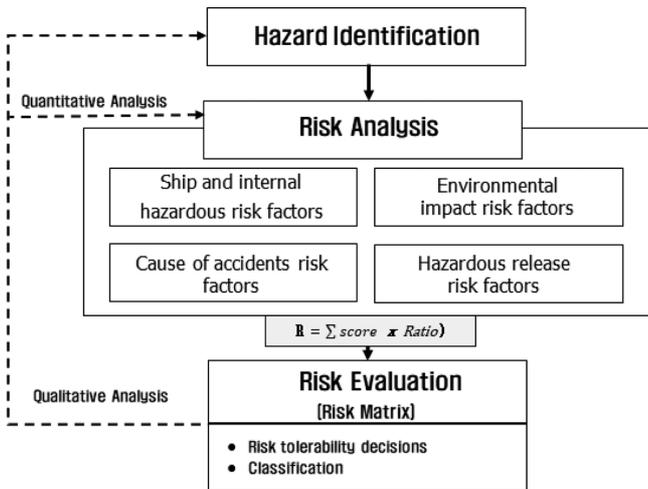


Fig. 2. Assessment procedure of Initial Risk.

제83조의 2, 동 시행규칙 47조의 2 및 제47조의 3에 규정되어 정량적 침몰선박 위해도 평가에 활용되고 있다.

다음 단계로 정량적 평가 방법으로 산정된 위해도가 타당하게 도출되었는지는 Table 1과 같은 위해도 매트릭스 평가표를 활용하여 각 분야별 전문가로 구성된 전문위원회에서 검토하고, 최종 평가결과는 위해도 저감조치 및 계획에 활용된다. 이때, 매트릭스 평가는 40점 이상의 일반관리 대상으로 수행한다.

현행 우리나라의 침몰선박 위해도 평가체계는 상세 위해도 평가 체계를 갖추지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 상세 위해도 평가가 개발되지 않은 평가체계에서 침몰선박의 위험을 결정할 수 있는 초기 위해도 평가체계를 제시하였다. 이후, 상세 위해도 평가체계가 개발되면 초기 위해도 평가단계에서 수행되는 매트릭스 평가방법은 생략될 수 있다.

한편, 현행법상의 위해도 평가 결과에 따른 침몰선박의 위해도 관리는 60점 이상이면 집중관리, 40점 이상 60점 이하이면 일반관리, 40점 이하는 비관리 선박으로 구분하여 관리기준에 따라 관리 대책을 다음과 같이 마련하도록 하고 있다.

- 비관리 대상 선박은 해양오염 및 해양안전에 위해요소가 없다고 판단되는 선박으로 위치정보를 비롯한 최소 해양사고 정보를 데이터베이스화하여 관리한다.

- 일반관리 대상 선박은 해양오염사고 유발 가능성에 대한 자료를 수집·분석하고, 해당 침몰선박의 적재화물 및 주변해역의 특성 등을

고려하여 해당 침몰선박이 해양오염과 해양안전에 미치는 영향 등에 관한 정보를 관리한다.

- 집중관리 대상 선박은 침몰 위치 및 선체의 상태파악, 잔존기름 또는 화물 등의 유출이나 이탈 가능성, 그 밖에 해양오염사고 유발 가능성에 대한 정밀조사 계획을 수립하고 필요한 위해도 저감조치 대책을 수립한다.

4. 상세위해도 평가

침몰선박은 침몰위치 및 선체의상태, 잔존기름 또는 독성화물에 따라 해양안전 또는 해양환경오염, 나아가 인명손상까지 심각한 위험을 야기할 수 있다. 그러므로 침몰선박의 위해도 평가 및 관리의 궁극적인 목적은 침몰선박으로 인한 2차 사고를 예방하기 위한 저감대책을 수립하고 시행하는 데 있다 할 것이다. 초기위해도 평가는 다양한 위험요소들에 가중치를 부여하여 그 위험성을 합산함으로써 침몰선박에 내재한 위험성의 총량을 의미하는 것으로 위해도 저감 대책을 수립하기 위한 지표로 활용하기에는 부적절하다. 그러므로 침몰선박에 대한 구체적인 저감방안을 수립하기 위해서는 인명, 해양안전 또는 해양환경오염 등 특정위험에 노출될 가능성과 그 영향을 정량적으로 분석하기 위한 상세위해도 평가가 필요하다.

본 연구에서는 가장 우선적으로 고려해야 할 해양환경오염에 대한 상세위해도 평가 방안을 제시한다. 해양환경오염에 대한 상세위해도 평가는 유조선과 특수 위험물 운반선을 포함하여 1단계 초기위해도 평가에서 ‘집중·일반’ 관리대상으로 분류된 침몰선박을 대상으로 해양환경오염을 야기할 가능성과 그 영향을 정량적으로 분석하여 적절한 위해도 저감대책을 수립하는 데 정량적인 지표로 활용하기 위한 평가이다.

해양환경오염에 대한 상세위해도(Specific Risk; SR)는 위험물질의 유출확률(Release Probability)과 위험물질의 유출이 발생했을 때 그 심각성을 나타내는 영향도(Consequence)로 표현한다. 유출확률은 어떤 위험사건의 발생으로 인해 침몰선박에 잔존하는 위험물질 또는 잔존유가 유출될 위험의 정도를 의미하며, 영향도는 실제 위험물질이 유출되었을 때 해양환경오염, 해양안전, 인명손상 등 특정 위험에 얼마나 피해를 줄 수 있는지 그 정도를 의미하는 지표로 본 연구에서는 해양환경에 미치는 영향만을 고려한다. 상세위해도는 유출확률과 영향도의 조합으로 표현되며 유출확률과 영향도의 곱으로 나타난다. 산출된 위해도는 위해도 저감대책 수립의 정량지표로 활용될 수 있다. Fig. 3은 상세위해도 산출 과정을 보여주고 있다.

Table 1. Example of Matrix Evaluation Table on Initial Risk

Hazard factor	High risk	Medium risk	Low risk
Ship and inside of ship (40%)	Over 30	15-30	1-15
Environmental Damage and Impact (30%)	Over 26	10-25	1-10
Possibility of hazardous substances spills (20%)	Over 16	7-15	1-7
Accident Cause (10%)	Over 8	3-7	1-3
Other (10%)	Over 8	3-7	1-3

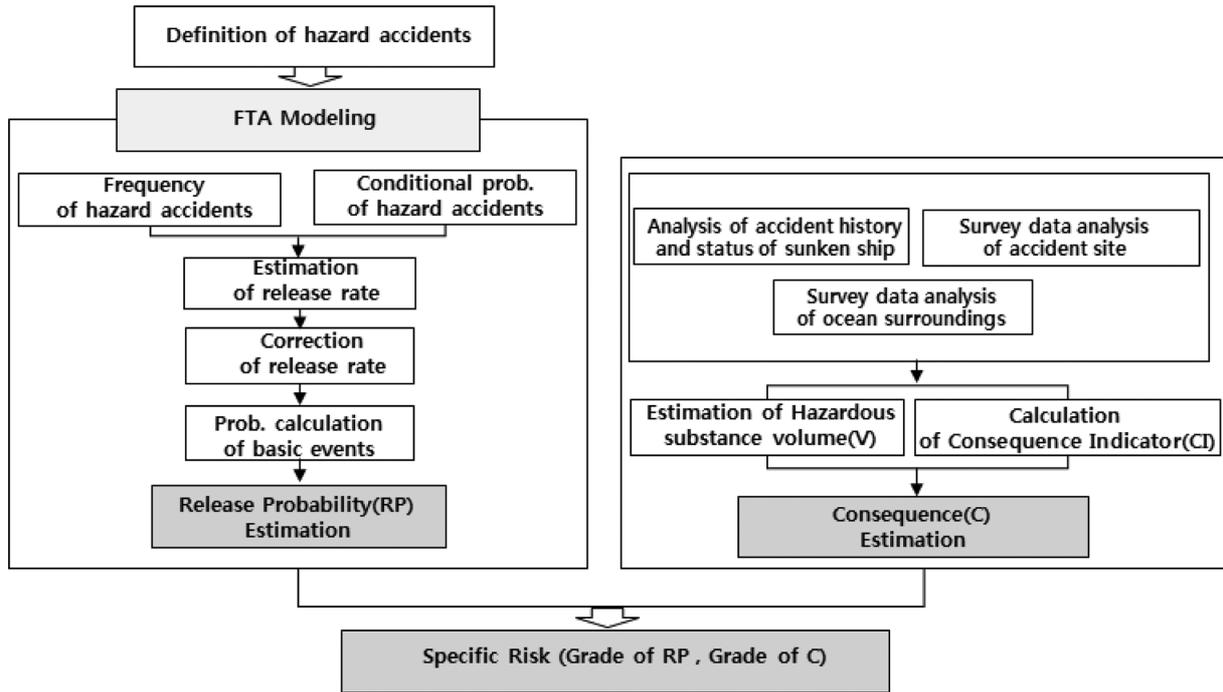


Fig. 3. Assessment process of Specific Risk.

Table 2. Example of typical hazard accidents

No	Hazard accidents	Form of risk
1	Construction work	Risks vary by type
2	Deterioration/Corrosion	Continuous occurrence
3	Diving	Risks vary by type
4	Unstable seabed	Risks vary by type
5	Military activity	Risks vary by type
6	Ship traffic	Risks vary by type
7	Storms/extreme weather	Risks vary by type
8	Trawling	Risks vary by type

4.1 유출확률 추정

위험물질의 유출확률을 추정하기 위해서는 우선 침몰선박의 위험물질 유출을 야기할 수 있는 위험사건을 정의하고 이를 확률모형으로 모형화하여 추정할 수 있다. Table 2에 대표적인 위험사건의 예를 보여주고 있으며(Landquist *et al.*[2016]), 위험사건에 대한 확률모형을 이용한 추정은 여러 방법들이 있을 수 있겠지만 본 연구에서는 FTA 기법을 이용해서 추정하는 방법을 제시한다.

4.1.1 유출확률 추정

Fig. 4에서 보는 바와 같이 FTA 기법은 최상위사상(top event)을 정의하고, 최상위사상이 발생할 수 있는 직접적인 원인이 되는 중간사상(intermediate event) 및 최하위 기본사상(basic event)을 AND gate 또는 OR gate로 연결한다. 유출확률을 추정하기 위한 FTA 모형에서 최상위사상은 ‘위험물질 유출’이며 최하위 기본사상은 위험물질의 유출을 야기할 수 있는 위험사건으로 설정한다.

FTA 모형을 이용하여 top event의 확률을 구하기 위해서는 먼저

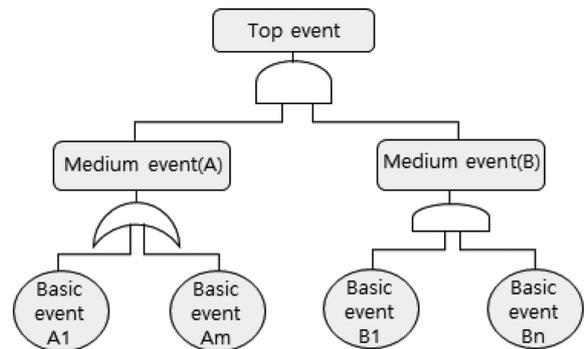


Fig. 4. Example of FTA Model.

기본사상들의 확률을 이용하여 중간사상의 확률을 계산하고 마지막으로 최상위 사상의 확률을 계산한다. 하위사상 i 의 확률을 P_i 라 할 때, AND gate 또는 OR gate로 연결된 상위사상의 확률은 Boolean 연산을 이용하여 다음 식으로 구할 수 있다.

$$P_{AND} = \prod_i P_i \tag{1}$$

$$P_{OR} = 1 - \prod_i (1 - P_i) \tag{2}$$

FTA 모형에서 최하위 기본사상 즉, 위험사건으로 인해 유출이 발생할 확률은 단위시간당 위험사건의 발생빈도와 위험사건이 발생했을 때 실제 유출이 발생할 조건부유출확률(**generic probability**)을 이용하여 구할 수 있다. 위험사건의 발생빈도와 위험사건이 발생했을 때 유출이 발생할 조건부유출확률은 통계자료와 전문가의 의견을 활용하여 주어진다.

위험사건으로 인한 위험물질의 유출 발생 사건이 포아송과정(Poisson process)을 따른다고 가정하면 t 단위시간 동안 유출이 발생할 확률은 지수분포를 따르므로, 위험사건의 단위시간당 유출발생률 $\lambda_{r,i}$ 와 위험사건으로 인한 유출확률 p_i 는 각각 다음 (식 3), (식 4)로 표현할 수 있다.

$$\lambda_{r,i} = \lambda_i \times P(\text{유출|사건}) \tag{3}$$

λ_i = 사건 i 의 발생률,
 $P(\text{유출|사건}_i)$ = 사건 i 의 조건부 유출 확률

$$P_i = 1 - e^{-\lambda_{r,i} t} \tag{4}$$

(식 4)에서 위험사건 i 의 유출발생률 $\lambda_{r,i}$ 는 침몰선박의 해역 특성 및 침몰선박이 처한 상황에 따라 다르게 나타날 수 있기 때문에 논리적이고 체계적인 절차에 따라 적절히 보정되어야 한다.

4.1.2 유출발생률의 보정

침몰선박의 위험물질 유출을 야기할 수 있는 대표적인 위험사건 중 부식, 트롤어업 및 기상악화의 유출발생률을 보정하기 위한 보정항목, 척도 및 가중치에 대한 예를 Table 3에 나타내었다. 각각의 위험사건에 대한 보정항목, 항목별 지표값 척도, 가중치 및 기준지수는 전문가 브레인스토밍과 현장 모니터링, 관련문헌 자료에 의해 산정한다. 예를 들어, 선체부식에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 용존 산소로 알려져 있으며(Baek[2004]), 다음으로 선체파손, 선령, 조류 및 수심 등이 부식에 영향을 미치는 것으로 전문가 브레인스토밍에서 평가되었다(Lee[2018]). 부식에 대한 보정항목별 지표값을 산정하는 기준을 나타내면 Tables 4~6과 같다.

위험사건 유출발생률의 보정은 각각 보정항목별로 산정된 지표값과 가중치를 이용하여 (식 5)와 같이 산출한다.

$$\lambda_{r,i}^* = \left(\sum_j W_{ij} C_{ij} / S_i \right) \lambda_{r,i} \tag{5}$$

Table 5. Index values on age of ship

Age of ship (year)		Index value
Before accident	After accident	
< 5	Under 5	1
5~10	5~10	2
10~20	10~20	3
Over 20	20~25	4
	25~30	4.5
	30~40	5
	40~50	5.5
	Over 50	6

Table 3. Correction indices and values of hazard accidents

Hazard accident	Correction index	Index value	Weight (%)
Deterioration	Dissolved oxygen	5point scale	25
	Hull damage	5point scale	20
	Age of ship	10point scale	16
	Tidal current	5point scale	16
	Depth of water	5point scale	13
	Sedimentation	5point scale	10
	Trawling	Accident location	5point scale
Ship size		6point scale	30
State of a ship		5point scale	20
Storms/Extreme weather	Depth of water	5point scale	40
	Ship size	6point scale	25
	State of a ship	5point scale	25
	Accident location	5point scale	10

Table 4. Criteria of index values on deterioration

Scale	Depth of water (m)	Dissolved oxygen (mg/l)	Tidal current(m/s)	Sedimentation (phi)
1	Over 80	Under 2	Under 0.5	Over 10
2	60 - 80	2 - 5	0.5 - 1.0	8 - 10
3	40 - 60	5 - 8	1.0 - 1.5	6 - 8
4	20 - 40	8 - 12	1.5 - 2.0	4 - 6
5	0 - 20	12 이상	2 이상	-2 - 4

Table 6. Index values of hull damage location

Hull damage location	Index value
Central part	5
Central stern part	4
Central bow part	3
Stern part	2
Bow part	1

$\lambda_{i,j}^*$ = 위험사건 i 의 보정된 유출발생률,
 w_j = 위험사건 i 의 보정항목 j 가중치,
 C_j = 위험사건 i 의 보정항목 j 지표값,
 S_i = 위험사건 i 의 기준지수

4.2 영향도 추정

영향도는 위험물질이 유출됨으로써 해양환경에 미치는 정도를 나타내는 지표로 먼저 침몰선박에 잔존하고 있을 것으로 추정되는 위험물질을 추정하고, 침몰선박 또는 위험물질의 특성에 따른 영향지수와 각각의 가중치를 곱하여 (식 6)과 같이 산출한다.

위험물질의 영향지수로는 해안으로부터의 거리를 반영하는 거리지수와 주변의 해양 민감자원에 대한 민감지수, 잔존위험물질의 종류에 따른 독성지수 및 자료의 불확실성지수를 들 수 있으며 Table 7에 영향도 산출을 위한 영향지수 항목, 항목별 지표값 및 가중치 예를 보여주고 있다. Table 7에서 민감도지수는 초기 위험도 평가에서 산정된 해양환경민감지수 값을 총 지수 10으로 나누어 산출하고, 그 외의 독성지수, 거리지수 및 불확실성지수는 전문가들의 의견을 거쳐 도출된 값이다.

$$\text{영향도(CR)} = V * \sum w_i C_i \tag{6}$$

V: 잔존기름량, C_i : 영향지수, w_i : 영향지수 i 의 가중치

Table 7. Consequence indicators and values

Consequence indicators	Details	Indicator value	Weight
Toxicity	Diesel	MGO, MDO	0.2
	Heavy oil and hazardous substances	IFO, MFO	0.4
		HFO, hazardous substances	1
Sensitivity	Major Fishery, Farm	10	0.1
	Natl. Park, Uncontaminated	8	
	Tourist Region (Beach)	6	
	Environment Protection Area	4	
	National Infrastructure	2	
	Etc.	1	
Distance	Under 10 miles	1 ²	0.3
	10~50 miles	0.6 ²	
	Over 50 miles	0.3 ²	
Uncertainty	Clear data such as oil spill response correspondence	1	0.1
	Residual oil can be inferred from accident data	0.7	
	Location information but no related data	0.5	

5. 상세위해도에 따른 위험도 저감 대책

위해도 저감대책은 침몰선박이 가지고 있는 위험성의 특성(항행 안전, 해양환경오염, 인명손상 등)과 정도에 따라 달리 수립되어야 할 것이다. 즉, 다른 선박의 항행안전에 위험요인으로 작용하느냐, 또는 해양환경오염에 영향을 미치느냐, 나아가 인명손상을 야기할 요인이 있느냐에 따라 위험도 저감대책 방향과 방법이 달리 수립되어야 할 것이다. 이를 위해 특정위험에 노출될 침몰선박의 상세 위험도 평가가 필요하며, 상세위해도는 결국 합당한 저감대책을 수립하기 위한 정량적인 지표로 활용할 수 있다.

해양환경오염에 대한 상세위해도는 침몰선박에 잔존하는 위험물질(잔존유 또는 위험화물)의 유출확률과 유출되었을 때 해양환경오염에 미치는 영향도로 표현하는 방안을 제시하였다. 그러므로 위험도 저감대책은 유출확률과 영향도의 경중에 따라 위험등급을 설정하고 그에 따른 적절한 저감대책을 수립하여야 할 것이다. 본 연구에서는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 유출확률과 영향도를 상중하로 나누어 9개의 세부 군으로 구분하여, 우선순위에 더불어 적절한 위험도 저감대책을 권고하기 위한 위험등급을 적색위험군, 황색위험군 및 녹색위험군으로 분류하는 방안을 제시한다.

Release Prob.	High	(3,1)	(3,2)	(3,3)
	Medium	(2,1)	(2,2)	(2,3)
	Low	(1,1)	(1,2)	(1,3)
		Low	Medium	High
Consequency				

Fig. 5. Risk group classification by Specific Risk.

Table 8. Risk reduction policies according to risk group

Risk group	Risk group cells	Recommendation of risk reduction policies
Red Risk Group	(3, 3)	Basically, consider salvage If the salvage is not feasible through the cost-benefit analysis, remove the risk factor and collect the hazardous materials
	(3, 2)	Removal risk factors of hazard accidents and blockade of hazardous substances
	(2, 3)	Mitigate risk factors and recover hazardous materials
Yellow Risk Group	(3, 1)	Risk events factors removal
	(2, 2)	Mitigate risk factors Or hazardous material containment
	(1, 3)	Recovery of hazardous substances
Green Risk Group	(1, 1)	Periodic observations and assessments since risk is not yet a concern,
	(1, 2)	
	(2, 1)	

- 적색위험군: 유출의 위험성과 해양환경오염에 미치는 영향이 매우 높아 최우선적으로 위해도 저감대책을 요하는 침몰선박 ((2,3), (3,2), (3,3))

- 황색위험군: 유출의 위험성 또는 영향도가 높지만 둘 중 하나의 위해도 저감으로 충분한 침몰선박((3,1), (2,2), (1,3))

- 녹색위험군: 유출의 위험성과 해양환경오염에 미치는 영향이 상대적으로 미약하여 당장의 위해도 저감대책이 필요없는 침몰선박((1,1), (1,2), (2,1))

위에서 분류한 각각의 위험등급에 대한 위해도 저감방안을 Table 8에 나타내었다. 침몰선박의 위험성을 제거하기 위한 가장 확실한 방법은 침몰선박을 인양하는 방법일 것이다. 그러나 모든 침몰선박을 인양하려면 비용이 방대하여 제한된 예산으로 불가능할 것이고, 또 어떤 경우는 인양 자체가 불가능할 수 있다. 그러므로 침몰선박의 위험 특성에 따라 적절한 저감대책을 수립하여야 할 것이다. 여기서 제시한 저감방안은 정량적인 상세위해도 평가에 따른 권고안으로, 최종적인 위해도 저감대책은 권고안을 바탕으로 비용-편익 분석을 통해 타당성을 검토하고 전문가들로 구성된 심의위원회의 정성적 분석 과정을 거쳐 수립되어야 할 것이다.

본 연구에서는 저감대책을 수립하기 위한 기본적인 방법론만 제시하였으며, 위험등급을 설정하기 위한 기준값과 비용-편익 분석 방법은 다양한 통계자료와 해양수산 관련 각계 전문가들의 의견을 수렴하여 결정되어야 할 것이다. 또한 이와 관련된 구체적인 절차와 방법에 관한 제도적인 규정도 마련되어야 할 것이다.

6. 결 론

선박의 침몰 사고는 그 자체로 큰 손실이지만 여러 요인들로 인해 항행안전, 해양오염 및 인명손상까지 다양한 2차 사고를 유발할 수 있다. 그러므로 이런 2차 사고를 방지하기 위한 침몰선박에 대한 체계적인 관리가 필요하다. 본 연구에서는 침몰선박의 위험정도를 평가하여 분류하고 궁극적으로 2차 사고를 방지하기 위한 저감대책을 강구하기까지 필요한 위해도 관리체계를 제시하고 각 단계별로 평가방법론과 저감대책 방안을 기술하였다.

본 연구에서 제시한 침몰선박 위해도 관리체계에서 초기위해도

평가는 침몰선박이 가지고 있는 위험의 총량에 따라 관리등급 분류를 위한 목적으로 수행되며 그 평가항목과 평가 방법 및 법적인 제도까지 어느 정도 잘 갖추어져 있다. 그러나 침몰선박으로 인한 2차 사고에 대비한 적절한 저감대책을 마련하기 위한 상세위해도 평가 방안에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 침몰선박의 위해도 관리는 궁극적으로 침몰선박에 내재한 위험의 저감대책을 수립하고 시행하는 데 목적을 두어야 할 것이다. 이를 위해서는 해양 환경, 항행안전, 인명손상 등 특정 위험에 대한 침몰선박의 상세위해도 평가가 이루어져야 하는데 본 연구에서는 해양환경에 대한 상세위해도를 평가하기 위한 평가방법론과 절차만 제시하였다. 향후 항행안전과 인명손상에 대한 상세위해도 개념을 정의하고 평가 방법을 개발하여, 그에 따른 위해도 저감 방안 및 비용-편익 분석 방법과 제도적 절차까지 추가적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

후 기

이 연구는 선박해양플랜트연구소 주요사업으로 추진하는 “수색 구조장비 수중 안전성능 평가기술 개발(2/3)”, 연구 결과의 일부이며, 지원에 감사드립니다.

References

- [1] Baek, K.K., 2004, Corrosion and Protection of Ship's Hull and Marine Structure, J. Corros. Sci. Soc. Of Kor, 3(1), 28-42.
- [2] Choi H.J., Lew J.M., Kim H.T., Lee S.H., Kang C.G., 2005, Development of the Risk Assessment Systems for Management of Sunken Ships, Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, 8(4), 193-202.
- [3] Chang, Woo-Jin, Lee, Seung-Hyun, Yeom, Hong-Jun, Lee, In-Cheol, 2016, A Study on the Development of Risk Assessment for Sunken Vessels Using Remaining-Fuel Estimations Model, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, 22(1), 90-97.
- [4] IMO, 2013, MSC-MEPC. 2/Circ.12. Revised guidelines for formal safety assessment(FSA) for use in the IMO Rule-mak-

- ing process.
- [5] Hanna Landquist, Lars Rosén, Andreas Lindhe, Ida-Maja Hassellöv, 2016, VRAKA—A Probabilistic risk assessment method for Potentially Polluting Shipwrecks. *Frontiers in Environmental Science*.
- [6] Lee, Seung-Hyun, Choi, Hyuek-Jin, Suh, Jae-Joon, 2015, A Study on the Improvement of Risk Assessment Items and Index for Sunken Ship, *Journal of Korean Society of Marine Environment & Safety*. 21(6), 704-711.
- [7] Seung Hyun Lee, Won Don Kim, Jae-Joon Suh, 2016, Structural Safety Assessment of a Sunken Ship Considering Hull Corrosion and Damaged Members, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 19(4), 332-340.
- [8] Lee Seung Hyun, 2018, A Study on Risk Management Framework and Risk Assessment Method of Sunken Ship”, Dept. of Industrial and Management Engineering Graduate School, Hanbat National Univ.
- [9] MICHEL, J., Gilbert T., Urban R., 2005, Potentially Polluting Wrecks in Marine Waters International Oil Spill Conference. Miami, Florida, USA.
- [10] Ministry of Oceans and Fisheries, 2017, Sinking Ship Management System.
- [11] NOAA, 2013, Risk Assessment for Potentially Polluting Wrecks in U.S. waters. Silver Spring, MD: National Oceanic and Atmospheric Administration.
- [12] Whiticar, S., Bobra, M., Liuzzo, P., Callaghan, S., Fingas, M., Jokuth, P., Ackerman, F., Cao, J., 1993, A catalogue of crude oil and oil product properties, River Road Environmental Technology Center, Environment Canada, Ottawa, Ontario.
-

Received 17 July 2018

Revised 12 August 2018

Accepted 13 August 2018