

위험도기반 해양사고 초기대응 지원 시스템 개발 기초연구: 유조선 좌초사고를 중심으로

나성* · 이승현** · † 최혁진

* 한국선급 선박해양기술센터, **, † 선박해양플랜트연구소

Fundamental Research on the Development of a Risk Based Decision Support System for Maritime Accident Response: Focused on Oil Tanker Grounding

Seong Na* · Seung-Hyun Lee** · † Hyuek-Jin Choi

* Ship & Offshore Technology Center, Korean Register, Busan 46762, Korea

**, † Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

요 약 : 최근 우리나라 연근해에서 발생한 몇 건의 대형 해양사고에서, 신속하고 체계적인 초기대응이 사고 전개양상과 사고결과에 얼마나 큰 영향을 미치는지를 확인하였다. 또한, 이를 통해 다양한 해양사고 상황에 대한 정확한 정보와 전개될 수 있는 시나리오, 적용 가능한 사고 대응 방법들에 대한 정보를 신속하게 확보하는 것이 해양사고 초기대응을 위하여 무엇보다 중요함을 알 수 있었다. 이러한 현실적인 문제를 해결하기 위한 일환으로, 본 연구에서는, ‘위험도기반 초기대응 지원 시스템’의 개념을 제시하고, 해양사고 이후 전개 가능한 모든 시나리오와 적용 가능한 사고대응 방법들을 식별하기 위하여 사건전개 시나리오 식별 브레인스토밍 기법을 제안하였으며, 식별된 사고대응 방법들의 적용으로 인한 피해저감 효과 등을 정량화하기 위하여 사건수목분석(Event Tree Analysis: ETA) 기법을 활용한 사건전개수목을 제안하였다. 그리고 각각의 사고대응 방법에 대한 상세분석을 위해서는 PERT/CPM의 사용을 제안하였다. 또한, 상기 제시한 위험도기반 초기대응 지원 시스템의 구성 체계를 설명하기 위하여, 유조선 좌초사고에 대한 사고대응 작업을 예로 간략한 위험도분석 작업을 수행하였다.

핵심용어 : 해양사고, 사고대응, 위험도분석, 위험도기반 의사결정, PERT/CPM

Abstract : A number of maritime accidents, and accident response activities, including the command and control procedures that were implemented at accident scenes, are analyzed to derive useful information about responding to maritime accidents, and to understand how the chain of events developed after the initial accident. In this research, a new concept of a ‘risk based accident response support system’ is proposed. In order to identify the event chains and associated hazards related to the accident response activities, this study proposes a ‘Brainstorming technique for scenario identification’, based on the concept of the HAZID technique. A modified version of Event Tree Analysis was used for quantitative risk analysis of maritime accident response activities. PERT/CPM was used to analyze accident response activities and for calculating overall (expected) response activity completion time. Also, the risk based accident response support system proposed in this paper is explained using a simple case study of risk analysis for oil tanker grounding accident response.

Key words : Maritime Accident, Accident Response, Risk Analysis, Risk-Based Decision Support System, PERT/CPM

1. 서 론

해양사고의 발생과 이로 인한 피해를 줄이기 위한 노력들은 국제해사기구(International Maritime Organization: IMO)를 중심으로 하여 전 세계적으로 꾸준히 이루어지고 있다. 하지만, 이러한 노력에도 국내외에 크고 작은 해양사고들이 발생하고 있으며, 특히, 국내에서 발생한 2007년 허베이 스프

리트호 사고, 2010년 천안함 사고, 2014년 세월호 사고 등은 사고 이후 적절한 초기대응 및 체계적인 대응체계의 구축이 얼마나 중요한지를 일깨워준 대표적인 사고 사례이다 (Jung et al., 2012; Kim et al. 2014).

일반적으로, 해양사고는 발생 직후의 적절하고 신속한 초기 대응 여부에 따라 사고 이후 다양한 사건 전개 양상을 보이게 된다. 예를 들어, 사고에 의한 선체손상으로 복원력과 구조장

* 종신회원, sna@krs.co.kr 070)8799-8551,

** 연회원, shlee@kriso.re.kr 042)866-3617

† Corresponding author : 연회원, hjchoi@kriso.re.kr 042)866-3611

(주) 이 논문은 “해양사고 후 사고대응 및 사건전개 시나리오 식별 및 분석”란 제목으로 “2015 춘계학술대회 한국항해항만학회논문집 (한국해양대학교, 2015.7.9-10, pp.69-71)”에 발표되었음.

도가 저하되고 있는 경우 또는 인화성 화물 등 위험화물을 선적한 선박사고와 같은 경우 등, 해양사고 발생 이후에도 여전히 잠재된 다양한 위험요소들을 내포하고 있을 수 있으며, 이러한 상황에서의 적절하지 못한 초기대응은 인명, 재산 및 환경에 대한 피해를 더욱 확산시킬 수 있다. 더욱이, Kim et al.(2014)의 논문에도 언급 되었듯이, 해양사고가 발생하였을 때 현장의 책임 지휘관 즉, 의사결정권자는 불명확하고 매우 한정된 정보 속에서 긴박하게 의사결정과 대응활동을 해야 하는 것이 대부분의 현실이다. 해양사고 현장은 육지에 비해 고립성이 높고, 조석, 기상 등 해상환경 조건에 따라 상황이 급변할 수 있기 때문에 사고대응을 위한 시간적 여유가 충분하지 못한 경우가 많다.

해양사고가 발생한 급박한 상황 속에서, 사고 상황에 대한 정확한 이해와 사고 피해를 최소화하기 위한 여러 가지 대안들에 대한 평가를 수행한 후에 사고대응에 착수한다는 것은 쉽지 않은 일이다. 이러한 문제점을 해결하고자, 사고선박이 처한 상황에 따라, 사고 상황이 어떻게 전개될 수 있는지, 잠재된 위험과 해결해야 할 문제점은 무엇인지, 적용할 수 있는 대응방법들과 기대되는 결과는 무엇인지 등에 대한 정보를 의사결정권자에게 신속하게 제공할 수 있는 체계를 마련하기 위한 기초 연구를 수행하였다.

해양사고 대응과 관련된 주요 선행 연구들을 몇 가지 살펴보면 다음과 같다. 선박해양플랜트연구소에서는 해난사고 대응기술 개발을 목표로 조난 선박의 표류 거동특성 및 표류지점 추정모델 개발 연구를 수행하였고 (Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, 2001a), 해난사고 예방 및 구난체계 구축사업을 통하여 신속구난 및 방제기술 지원체계를 구축하고 기름 유출량 추정을 위한 연구를 수행한 바 있다 (Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, 2001b). Lee et al.(2010; 2014)은 해양사고 대응 지원 정보시스템 개발을 위하여 해양 기상, 조석 등 해상조건 정보들과 선박으로부터 유출된 유류의 확산 정보를 통합하기 위한 체계 구축 연구와 위험평가 및 취약성분석을 기반으로 한 위험유해물질 유출사고에 대한 가상사고 시나리오를 제시하고, 이에 대한 사고대응 시나리오 개발 연구를 수행 하였다. 또한, Byun et al.(2001)은 해양사고의 원인을 식별하고 해양사고 발생 시 대응방안과 예방정책 및 안전관리를 위한 정보체계를 그들 논문에 제시한 바 있다.

상기 다양한 연구들은 주로 선박 표류 거동 해석, 선체구조 손상, 유류 확산 해석 등 공학적 해석과 정보통합 체계 구축 등의 내용을 다루고 있다. 이와 달리, 본 연구에서는, 해양사고 발생 이후 나타날 수 있는 사건전개 시나리오에 초점을 맞추었으며, 위험도분석 기법의 적용으로, 사건전개 시나리오들과 관련 위험요소 및 대응 방법들을 식별하고, 다양한 사고대응 방법의 적용에 따른 사고 상황 또는 사고결과의 변화를 정량적으로 표현하고자 노력하였다.

또한, 위험도평가 방법론 적용 관점에서 보았을 때, 여러 선

종 또는 해양사고를 대상으로 한 위험도평가 작업들은 국내외 여러 기관에서 다양한 방식으로 진행되어 왔으나 (Lee et al., 2010; SAFEDOR, 2004), 해양사고 이후 사고대응 상황을 상세하게 분석한 위험도평가 연구는 찾아보기 힘들다. 본 논문에서는, 위험도기반 접근법을 해양사고 이후 사고대응 단계에 적용하여, 사고대응 의사결정권자에게 체계적이고 객관적인 정보를 제공할 수 있도록 하는 '위험도기반 초기대응 지원 시스템'의 개념과 지원 시스템에 사용될 위험도분석 방법론을 제시하고자 한다.

2. 해양사고 초기대응 사례 분석

2.1 해양사고 대응사례 분석

해양사고 초기 대응을 효과적으로 수행하기 위하여 필요한 사항들은 무엇인지, 그리고 해양사고 이후 사건전개는 어떠한 양상을 보이는지를 알아보기 위해서 국내외 해양사고 대응사례들을 살펴보았다. 해양사고 대응사례 분석은 사고 보고서를 바탕으로 수행하였으며, 사고대응 사례들 중 상세분석을 위한 대상은, 비교적 자세히 기술된 사고 보고서의 유무에 따라 선정되었다.

본 논문에서는, 좌초사고를 위주로 하여 연구내용을 살펴보고자 하며, 상세분석을 위한 좌초사고 사례로는 유조선 SEA EMPRESS 좌초사고(MAIB, 1997), 컨테이너선 RENA 좌초사고(TAIC, 2014)와 여객선 COSTA CONCORDIA 좌초사고(MIT, 2013)가 사용되었다.

사고대응 사례의 상세분석 작업 시 고려된 주요 사항들은, 사고대응 작업을 위하여 검토되었던 정보들, 사고대응 시 적용되었거나 또는 고려되었던 대응방법들과 사고대응 단계 구분이 될 수 있는 시점에 관한 사항들로, 사고대응 단계를, 사고 발생 후부터 사고대응 지원 도착시점까지, 사고대응 지원 도착부터 2차사고 발생 전까지, 2차사고 발생 후부터 사고로 인한 피해저감 활동이 가능 시간까지와 이후 후속 대응 및 처리 기간으로 분류하고 이를 토대로 시간 경과에 따른 사건전개 양상을 분석하였다.

2.2 사고대응을 위해 필요한 정보

해양사고 대응사례들을 분석한 결과, 사고선박과 사고해역의 특성 등 사고 상황에 대한 정확한 정보, 사고 상황에 따라 발생 가능한 사건전개 시나리오들과 각 사건전개 상황에 적용 가능한 사고대응 방법들 및 관련 잠재 위험요소들에 대한 정보를 의사결정권자에게 제공하는 것이 무엇보다 중요함을 알 수 있었다.

효과적인 해양사고 초기대응을 위해서는, 발생한 해양사고의 속성을 명확하게 파악하는 작업이 선행되어야 할 것이다. 즉, 얼마나 빨리 사고 상황에 대한 정확한 정보를 수집하여 최

적의 의사결정을 내리고 사고대응을 위한 물자를 조달할 수 있느냐에 따라, 신속한 사고대응이 될 수도 그렇지 못할 수도 있기 때문이다. 이와 같이, 사고 상황 파악 및 사건전개 양상 예측을 위하여 기본적으로 필요한 정보들을 환경 정보, 선박 정보, 사고 상황 정보 및 사고대응 지원/자원 정보로 분류하여 Table 1과 같이 식별하였다.

Table 1 Type of information needed for accident response

Environmental Information	current & tide information (current speed & change of tidal level) ^b
	weather conditions & forecast (wind, snow, rain, fog, etc.) ^b
	sea state (wave height, swell, etc.) ^b
	characteristics of the waters (traffic density, narrow channels, fishery, military exercise area, tourist attraction, etc.) ^a
ship Information	ship's particulars ^b
	type & amount of cargo loaded ^b , type & amount of fuel on board ^b
	amount of ballast water on board ^b
	if the main eng. (power supply) etc. available ^b
	if the equipment on board available (equipment for damage recovery or mitigation) ^b
	other specific information ^b
	calculation results (damage stability, residual strength information, etc.) ^c
Accident Information	type of accident ^b
	degree of accident damage & accident escalation potential ^{b, c}
	degree of environmental damage & damage escalation potential ^{b, c}
	other latent hazards ^c
Response Information	accident response (response equipment) arrival (preparation) time ^b
	information of pollution prevention equipment (Oil Spill Response Vessel, etc.) provided ^a
	information of fire fighting equipment (fire boats, etc.) provided in each port ^a
	record of towing vessel holdings ^b
	ship to shore communication method ^b

* a: 준비되어 있어야 할 정보, b: 바로 입수 가능한 정보, c: 시간이 걸리는 정보

또한, 의사결정권자는 상기 정보들을 고려하여 사고 이후 어떠한 방향으로 사건이 전개될 지를 예측하고, 어떠한 사고 대응 방법을 적용하는 것이 가장 효과적일 지를 판단할 수 있어야 한다. Fig. 1은 위험도평가가 결과가 사고대응 지원 시스템에 적용되는 개념을 보여주고 있다.

사고 이후 전개되는 사건전개 시나리오는 해상 환경조건 및 사고 상황 (Information for Response)이 변화함에 따라 다

양한 양상 (Unfolding Scenarios)을 보이게 되며, 또한, 어떠한 사고대응 방법 (Accident Response)을 적용하느냐에 따라 또 다른 전개 양상 (Unfolding Scenarios)을 보이게 된다.

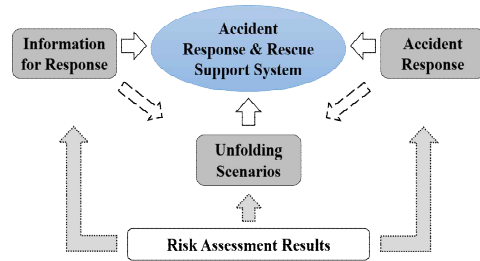


Fig. 1 Concept of risk-based accident response & rescue support system

Fig. 1에서와 같이, 위험도평가 작업은, Table 1에 제시된 다양한 사고 조건들의 변화에 따라 발생 가능한 모든 시나리오들과 각 시나리오에 잠재되어 있는 위험요소들을 식별할 수 있도록 해준다. 또한, 각 사고 상황에서 적용 가능한 모든 사고대응 방법들과 이를 적용하였을 때 전개 가능한 시나리오들을 식별하고, 각 사고대응 방법을 적용하였을 때 얻을 수 있는 효과를 정량적으로 보여줌으로써, 최적의 사고대응 방법을 선택할 수 있도록 정보를 제공할 수 있다. 위험도평가 작업 결과, 즉 시나리오 식별을 위한 전문가 회의 및 다양한 공학적 해석 결과는 사고대응 지원 시스템에 축적되고, 사고대응 지원 시스템에서 체계적으로 정리된 정보는 사고대응 의사결정권자에게 제공되어, 발생 가능한 여러 변수에 따라 사고 상황이 어떻게 변화할 수 있는지 예측할 수 있도록 한다.

2.3 해양사고 초기대응 전개 흐름

일반적으로, 해양사고가 발생하면 사고선박에서는, 무선통신을 이용하여 해상교통관제센터, 해양경비안전서, 해양수산청 및 선박회사에 사고 상황을 보고하고, 인근 통항선박에 사고 내용을 전파하여 구조 요청을 하게 된다. 사고선박은 사고 신고와 함께 선내 사고 상황을 파악하고 사고피해 저감을 위해 선내에서 수행 가능한 긴급조치들을 수행하며, 상황에 따라 대피/탈출/퇴선 조치를 취하게 된다.

해양사고가 접수되면 육상 (관련 항만국/정부)에서는, 구조선 및 구조헬기, 소방선, 방제선 투입 등, 초기 정보를 바탕으로 긴급 초동 조치를 위한 지원활동을 수행하고, 사고대응을 위한 상세 정보를 수집한다. 상세 정보 수집과 동시에, 해양사고의 심각한 정도에 따라서 사고 대응을 위한 조직 (사고 대책본부)을 구성하여 초기대응을 위한 대응자원 투입 등 사고대응 활동을 수행하고 사고 현장 상황을 지속적으로 검토하게 된다(Fig. 2).

위험도기반 접근법을 사고대응 단계에 적용함에 있어, 해양사고 대응 단계를, Fig. 2를 참고하여, 사고 발생 및 신고/접수 단계, 초동 조치 단계 (대책본부 설치 전), 사고대응 활동 단계

(대책본수 설치 후 대응단계)와 사고 수습 단계 (사고 수습/복구 등)로 분류하였으며, 해양사고 초기대응 단계는 사고발생부터 사고대응 활동 단계 중 이차사고 발생 전까지의 기간으로 정의하고 연구를 수행하였다.

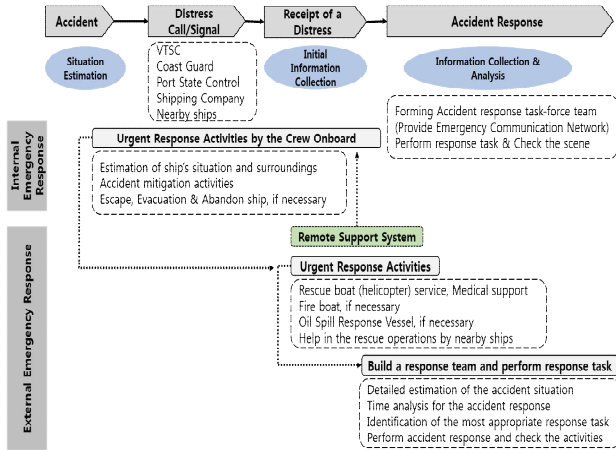


Fig. 2 Maritime accident response flowchart

3. 위험도기반 접근법 적용

위험도평가는, 일반적으로, 위험도평가 대상을 정의하는 것을 시작으로, 관련 위험요소들을 식별하고, 위험요소들로 인하여 발생 가능한 사고의 빈도와 그 결과들을 분석하며, 위험도를 제어할 수 있는 방안들을 마련하고, 각각의 제어방안 적용시 소요되는 비용과 제어방안 적용으로 기대되는 효과를 평가하여 그 결과를 제시하는 과정으로 이루어져 있다(IMO, 2015; Vinnem, 2007).

해양사고 초기대응 단계에 위험도평가 방법론을 적용하고자 하는 목적을 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 해양사고 발생 이후 전개 가능한 모든 시나리오와 이와 관련된 위험요소들을 식별하고, 각 시나리오 상황에 적용 가능한 사고대응 방법들을 식별하기 위함이다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 사건전개 시나리오 식별 브레인스토밍(Brainstorming) 기법의 사용을 제안하였다.

둘째, 식별된 사고대응 방법들을 사고대응 작업에 적용함으로써 나타나는 위험도 또는 사고로 인한 피해 정도의 변화량을 추산하여 해양사고 상황에 따른 최적의 사고대응 방법을 제시하기 위함이다. 위험도 또는 사고 피해 정도 등에 대한 정량적 표현을 위해서는 사건전개수목의 사용을 제안하였으며, 각각의 사고대응 방법에 대한 상세분석을 위해서는 PERT(Program Evaluation and Review Technique)/CPM(Critical Path Method)의 사용을 제안하였다.

셋째, 위험도평가 결과를 바탕으로 사고대응 의사결정을 지원하기 위한 정보들을 체계적으로 준비하고 더욱 객관화할 수 있는 시스템을 마련하기 위함이다.

3.1 사건전개 시나리오 식별

해양사고 이후 발생 가능한 사건전개 시나리오를 식별하기 위해서, 정성적 위험도평가 방법론 중 하나인 HAZID(Hazard Identification) 형식을 따른 브레인스토밍 기법을 선택하였다.

각각의 해양사고는 발생 후 여러 가지 상황과 조건들의 변화에 따라 무수히 다양한 양상으로 사건이 전개될 수 있기 때문에, 브레인스토밍 작업을 효율적으로 진행하기 위하여 발생 가능한 주요 시나리오들을 먼저 식별하고, 각각의 주요 시나리오를 하나의 사고 상황으로 가정하여, 이와 관련된 사건전개 상세 시나리오들을 식별하였다. Fig. 3은 유조선 좌초사고 이후 발생 가능한 사건전개 주요 시나리오들을 식별한 예를 보여주고 있다.

Grounding (Tanker)	Ship's hull punctured	Coming loose	Hull damage condition	Propulsion failure	Excessive trim/heel	Insufficient stability/buoyancy	Scenario ID
No	No			No	No		GA1
				Yes	Yes		GA2
				Yes			GA3
	Yes			No	No		GA4
				Yes	Yes		GA5
				Yes			GA6
Yes	No		Small	No	No		GB1
				Yes	Yes		GB2
			Medium		No		GB3
					Yes		GB4
			Large				GB5
							GB6
	Yes		Small	No	No		GB7
				Yes	Yes		GB8
			Medium				GB9
					Yes		GB10
							GB11
			Large				GB12

Fig. 3 Scenario expansion example: Tanker grounding accident case

유조선 좌초사고의 주요 시나리오를 식별하기 위해, 좌초로 인한 선체파괴 여부, 외력에 의한 부양(의도하지 않은 이초) 여부, 좌초에 의한 선체손상 정도 (Small: 선체외판 파괴, Medium: 이중저(화물탱크) 파괴, Large: 2개 이상의 화물탱크 파괴), 자력항해 가능 여부, 과도한 선체 횡/종 경사각 발생 여부와 부력/복원력 충분 여부에 따라 사건이 전개되는 양상을 분기하였고, 그 결과, 총 18개의 주요 시나리오들(Scenario ID GA1 ~ GB12)을 식별할 수 있었다.

식별된 주요 시나리오들을 각각 하나의 사고 상황이라고 가정하고, 2.3절에서 정의 한 해양사고 대응 단계 중 해양사고 신고/접수 단계, 초동 조치 단계 또는 사고대응 활동 단계를 각각 하나씩 살펴볼 수 있도록 함으로써 시나리오 식별을 위한 사고 상황 범위를 좀 더 명확하게 하여, 주어진 사고 상황에서 전개 가능한 상세 시나리오들과 사고대응 방법(초동 조치 포함)들을, 선체구조, 선박항해, 위험도평가 분야 및 해양사고 대응 관련 분야의 전문가들로 구성된 전문가 그룹의 브레인스토밍 작업을 통하여 식별하였다.

Table 2 Example of brainstorming worksheet: Tanker grounding accident case - Scenario GB1

ID	Potential Scenario	Cause	Potential Hazard	Response Actions					Remark (Response Phase)
				Ship		External			
				Response Actions	Hazard	Response Actions	Charge	Hazard	
GB1	General scenario		<ul style="list-style-type: none"> * Continued wave loading and soil reaction on the ship's hull will cause an increase in structural damage: cargo-oil spill *Worsening weather conditions will cause an increase in structural damage (can cause potential delay in emergency response) *Loss of ship stability from ballast tank flooding or accidental discharging: excessive heel or trim, capsizing 	<ul style="list-style-type: none"> * Stop engines and auxiliaries if grounding is severe (and let go anchor if needed). *Sound bilges, tanks. *Check the pipelines & valve conditions and close valves. *Prepare to transfer cargo oil. *Take overboard soundings around vessel to check on what type of seabank the ship is lying(if necessary), or survey the area from chart. 	<ul style="list-style-type: none"> * When working in enclosed area somewhere in the engine room etc., leaked gas from damaged pipeline can cause asphyxia. 	<ul style="list-style-type: none"> * Provide tugs, rescue boats to be used etc. *Provide oil spill response vessel if necessary. 	* Coast Guard		<ul style="list-style-type: none"> * Understanding potential loads on the ship (wave load, ship's weight, soil reaction, etc.) and environmental condition is important in determining ship safety and the potential for further damage or breaking up. <p>(Early/Urgent response phase)</p>
			<ul style="list-style-type: none"> * In order to refloat the stranded ship, adjust ship's trim by moving weights (transfer cargo oil between cargo tanks or adjust ballast). 	<ul style="list-style-type: none"> * Heel or trim increase / loss of stability due to the ballast system failure or due to human error. 	<ul style="list-style-type: none"> * Hull structure residual strength, ship's stability etc. calculations are required. * Reduce the draft of the ship(transfer cargo oil) and move to a berth. <ul style="list-style-type: none"> - Prepare a lightening tanker to be ready - Check the oil transfer system * Transfer cargo into the lightening tanker and check the draft and the stability - move to an appropriate berth * Adjust ship's trim and re-float ship. <ul style="list-style-type: none"> - pushing or pulling the ship into deeper water using tugs - move to an appropriate berth * Increase the water depth at the site of grounding and re-float the ship. <ul style="list-style-type: none"> - Provide dredger vessels - dredging and scouring to increase the water depth 	* Coast Guard/ Private salvage com.	<ul style="list-style-type: none"> * Consider danger of the situation related to: <ul style="list-style-type: none"> - weather condition and forecast - check the surrounding environment(fish farm, marine resources, etc.) - ship's traffic condition - external support(tugs, lightening tankers, etc.) arrival time (possibility of delay) - flammable material 	<ul style="list-style-type: none"> * When the ship is full loading condition, transferring cargo oil between cargo tanks is not possible. In this case, external support (transferring cargo oil into a suitable vessel) is needed. <p>(Accident response phase)</p>	
	* Human injury or fatality	<ul style="list-style-type: none"> * Man overboard, crew agitation/shock etc. as a result of the collision impact. * Hazardous materials or leaked gas from damaged pipeline in the engine room can cause asphyxia. 	<ul style="list-style-type: none"> * This can cause potential delay in shipboard emergency response 	<ul style="list-style-type: none"> * Minor injury: shipboard emergency treatment. * Serious injury: external emergency medical treatment support. 		<ul style="list-style-type: none"> * Provide rescue boat (helicopter) service and medical support. 	* Coast Guard	<ul style="list-style-type: none"> * Helicopter can not be operated at night. * Flammable gas cloud may possibly be formed around the ship. 	<ul style="list-style-type: none"> (Early/Urgent response phase, Accident response phase)
	* Ship's hull damage increased	<ul style="list-style-type: none"> * Continued wave loading and soil reaction (high ship weight pressure), the condition of ship's hull steadily deteriorates depending on the sea floor materials, such as rock, gravel, coral etc. * Worsening weather conditions and increasing strengths of tides. 	<ul style="list-style-type: none"> * Flooding with seawater caused by increased ship's hull damage may contribute to excessive heel or trim. * Cargo oil spill(environmental pollution). 	<ul style="list-style-type: none"> * Check the pipelines & valve conditions and close the valves. * Check ship's heel & trim, and adjust it if necessary. * Provide oil pollution prevention. 	<ul style="list-style-type: none"> * Asphyxiation caused by leaked gas from damaged pipeline. *pollution prevention equipment provided is not enough or failed. * heel or trim increase/loss of stability due to the ballast system or oil transfer system failure or due to human error. 	<ul style="list-style-type: none"> * Draw the oil fence around the ship (double line of oil fence). * Reduce the draft of the ship(transfer cargo oil from damaged tank into a suitable vessel) and move to a berth. <ul style="list-style-type: none"> - Prepare a lightening tanker to be ready - Check the inert gas and the cargo transfer system - Lighten cargo from the undamaged tanks into the lightening tanker - Transfer cargo out of the damaged tanks into the undamaged tanks - pressurize the damaged tanks with inert gas and check on bottom damage - move to an appropriate berth 	* Coast Guard/ Private salvage com.	<ul style="list-style-type: none"> * Consider danger of the situation related to: <ul style="list-style-type: none"> - weather condition and forecast - check the surrounding environment(fish farm, marine resources, etc.) - ship's traffic condition - external support(tugs, lightening tankers, etc.) arrival time(possibility of delay) - flammable material 	<ul style="list-style-type: none"> * Check the SOPEP / SMPEP manual <p>(Accident response phase)</p>
	* pipeline in engine room damaged.	* Collision impact.	<ul style="list-style-type: none"> * Flammable gas leak. * Asphyxiation caused by toxic gas leak. 	<ul style="list-style-type: none"> * Ventilate the working place properly before and during work. * Be careful with flammable gas and toxic gas formation, ignition source and fire. 	<ul style="list-style-type: none"> * Asphyxiation caused by gas formation. * Lack of emergency equipment and emergency equipment failure. 	<ul style="list-style-type: none"> * Provide rescue boat (helicopter) service and medical support. 			<ul style="list-style-type: none"> (Early/Urgent response phase, Accident response phase)
* Reduction in ship's stability. Excessive heeling or Capsizing.	* Seawater flooding into the ballast tank (can cause insufficient stability/buoyancy).	* Leakage of cargo oil from cargo oil tank vent (oil pollution).	* In order to reduce ship's heel or trim, move weights (adjust ballast or transfer cargo oil between cargo tanks, if possible).	<ul style="list-style-type: none"> * Difficulties in emergency responding because of excessive heel or trim. * Heel or trim increase/loss of stability due to the ballast or cargo oil transfer operation error(including human error and mechanical failure). 	<ul style="list-style-type: none"> * Pressurize the damaged ballast tank with air in order to lighten the ballast tank or in order not to flood seawater into ballast tank anymore. 	* Coast Guard/ Private salvage com.		<ul style="list-style-type: none"> * Check the effectiveness and possibility of the response action. 	
					<ul style="list-style-type: none"> * Load more ballast or make the ship stay grounded using tugs in order to avoid heel or trim increase. * Provide floating cranes to avoid ship's heel or trim increase and capsizing. 	* Coast Guard/ Private salvage com.	<ul style="list-style-type: none"> * Difficulties in evacuation (abandon ship). * Weather condition, Strong current, etc. * Structural strength should be checked. 		

Table 2는 브레인스토밍 작업 내용을 기록한 예시로, 유조 외관 (평형수 탱크) 과공, 좌초상태 고정, 자력항해 가능 및 부선 좌초사고의 상황 (GA1 ~ GB12) 중 시나리오 GB1: 선체 력/복원력 충분한 상황을 가정하여 브레인스토밍 작업을 수행

한 내용을 보여주고 있다.

Table 2와 같이, 브레인스토밍 워크시트 (Brainstorming worksheet)의 각 항목에는 다음과 같은 내용들이 기록되었다. 발생가능 시나리오 항목에는 각 주요 시나리오의 사고 상황에서 발생 가능한 모든 상세 시나리오를 식별한 내용을 기록하고, 시나리오 발생원인 항목에는 식별된 상세 시나리오의 발생 원인을 기록하며, 잠재된 위험요소 항목에는 식별된 상세 시나리오와 관련된 모든 잠재 위험요소들을 기록한다. 또한, 가능한 사고대응 방법과 관련하여, 선박 자체 사고대응 방법 항목에는 사고로 인한 피해를 줄이기 위하여 선내에서 긴급하게 조치해야 할 사고대응 작업들을 식별하여 기록하고, 외부 사고대응 방법 항목에는 상세 시나리오 별 적용 가능한 모든 외부지원 사고대응 방법들을 식별하여 기록하며, 각 사고대응 방법의 위험요소 항목에는 선내/외부 사고대응 작업과 관련된 모든 위험요소들을 식별하여 기록하도록 하고 있다.

3.2 정량적 위험도 표현

선박이 처한 사고 상황에서 적용 가능한 모든 사고대응 방법들이 식별되었다면, 그 중 최적의 사고대응 방법을 선택할 수 있도록 필요한 추가 정보들이 제공되어야 한다. 어떠한 사고대응 방법이 가장 손쉽고 효과적으로 사고로 인한 피해 확산을 막을 수 있는지에 대한 정보들을 정량적으로 표현하기 위하여 ETA (Event Tree Analysis) 형식의 사건전개수목과 PERT/CPM을 사용하였다.

사건전개수목은 해양사고 발생 이후 주요 사건 또는 주요 사고 상황의 변화에 따라 시나리오를 분기하여 사건전개를 표현할 수 있다. Fig. 4는 유조선 좌초사고 이후 발생 가능한 주요 사건전개 상황을 사건전개수목으로 표현한 간략한 예이다 (Vanem & Skjong, 2004).

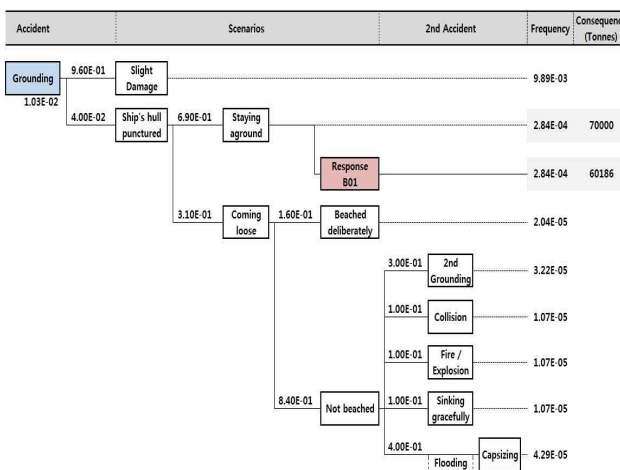


Fig. 4 Event tree example: Tanker grounding accident case

그리고 PERT/CPM은 각 시나리오에서 사용 가능한 사고대응 방법들의 세부 작업을 상세 분석하여, 각 대응작업의 소

요시간, 작업 소요시간을 줄이기 위한 작업 배치 및 비용 증감 효과 등을 추산할 수 있도록 함으로써, 사고대응 상황에 따른 최적의 사고대응 방법을 선택하기 위한 정보를 제공할 수 있다.

다음은 유조선의 좌초사고 이후 화물유 유출에 의한 환경오염 피해 변화량을 보여주기 위한 예로, 사고대응 작업이 성공적으로 수행되었을 때와 사고대응 작업이 적용되지 않았을 때의 상황을 간략하게 비교하였다. 예를 들어, 유조선 SEA EMPRESS 좌초사고 사례에서 적용되었던 사고대응 작업 '사고선박의 흡수를 줄여 이초시킨 후 접안장소로 이동'을 '사고대응 B01'이라고 가정하면, 사고대응 B01은 Table 3과 같은 세부 작업들로 구성할 수 있다 (MAIB, 1997).

Table 3 Response activity B01

No.	Activities	Activity ID
1	Precure salvage equipment, including pumps, diving gear and an inert gas generator from shore	A
2	Pump out the water in the pump room to lower the water level	B
3	Test the casualty's inert gas and cargo pumping system	C
4	Prepare a lightening tanker to be ready	D
5	Lighten cargo from the centre tanks into the lightening tanker	E
6	Transfer cargo out of the damaged tanks into the centre tanks	E
7	Pressurize the damaged tanks with inert gas	-
8	Undertake a diving survey to check on bottom damage	-
9	Move the vessel to an appropriate berth	-
10	Discharge the balance of the cargo to shore	-

만약 Table 3의 1번부터 6번까지 작업이 성공하면 더 이상의 화물유 유출은 없다고 가정하고, 각 작업 (Activity)을 A ~ E라 할 때 (E는 5와 6번 작업), Fig. 5와 같이 작업진행 순서 및 일정을 표현할 수 있다.

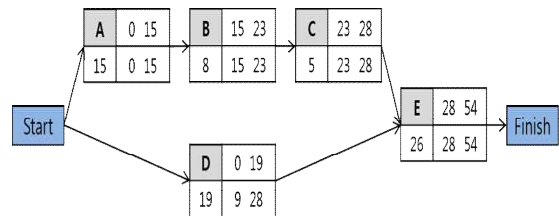


Fig. 5 Frank's fine floats example: PERT/CPM, activities A ~ E, Unit: hour

Table 4 Activity expected times and variances: example, Unit: hour

Activity	Immediate predecessor	a	m	b	t_e	σ^2	ES	EF	LS	LF	Slack
A	-	12	15	20	15	1.78	0	15	0	15	0
B	A	7	8	10	8	0.25	15	23	15	23	0
C	B	4	5	8	5	0.44	23	28	23	28	0
D	-	17	18	25	19	1.78	0	19	9	28	9
E	A, B, C, D	24	26	30	26	1	28	54	28	54	0

$$t_e = \frac{a + 4m + b}{6} \tag{1}$$

$$\sigma = \frac{b - a}{6}, \quad \sigma^2 = \left(\frac{b - a}{6}\right)^2 \tag{2}$$

각 작업을 수행하는데 걸리는 시간 추산은, 모든 상황이 순조롭게 진행될 때 걸릴 낙관적 시간 a (Optimistic time), 정상 조건에서 가장 많이 나타날 최선 시간 m (Most likely time), 가장 불리한 상황이 전개될 때 걸릴 비관적 시간 b (Pessimistic time)를 바탕으로 수식 (1)과 (2)를 사용하여 각 작업의 기대시간 (t_e)과 분산 (σ^2)을 추산할 수 있다.

$$Slack = (LS) - (ES), \text{ or } = (LF) - (EF) \tag{3}$$

또한, 수식 (3)에서 보는 바와 같이, 가장 빠른 작업 시작시간과 종료시간 (Earliest Start time: ES, Earliest Finish time: EF) 및 가장 늦은 작업 시작시간과 종료시간 (Latest Start time: LS, Latest Finish time: LF)을 통하여 각 작업의 여유시간 (Slack)을 추산할 수 있다.

Table 4는 각 작업에 소요되는 기대시간과 전체 작업 일정에 따른 각 작업의 여유시간을 보여주고 있다. 즉, 작업 A ~ E는 각각 15, 8, 5, 19, 26시간의 소요시간을 가지며, 작업 D는 다른 작업과 비교하여 9시간의 여유시간을 가지고 있음을 알 수 있다. 이는, 작업 A, B와 C의 소요시간을 줄이는 것이 전체 작업시간 단축을 위하여 효과적일 수 있음을 나타낸다.

만약, 유출된 화물유에 의한 유류오염 정화 (Clean-up) 비용을 \$16,000/tonne으로 가정하고 (Skjong et al., 2007), 좌초 사고의 발생 시점부터 사고 상황 파악 및 사고대응 작업 (사고대응 B01) 결정까지 걸리는 시간을 12시간으로 가정하였을 경우, 상기 계산에 따른 사고대응 B01 착수부터 완료까지 소요시간이 54시간이기 때문에, 사고가 발생하고 66시간 후에 화물유 유출은 멈춘다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은, 좌초사고 발생 후 150시간 동안 70,000톤의 화물유가 유출된 SEA EMPRESS호 사고에 사고대응 B01을 적용했을 경우의, 시간에 따른 ‘화물유 유출량’과 ‘유류오염 정화비용’을 보여주고 있다.

Fig. 6에서 보는바와 같이, 사고대응 B01이 성공적으로 수행될 경우 10,000톤 정도의 화물유 추가 유출을 막을 수 있

며, 유류오염 정화비용으로 표현하면 약 \$157,000,000의 비용저감 효과를 기대할 수 있다. 사고대응 B01 적용 시나리오와 사고대응을 적용하지 않았을 경우의 시나리오는 Fig. 4와 같이 사건전개수목으로 표현할 수 있다.

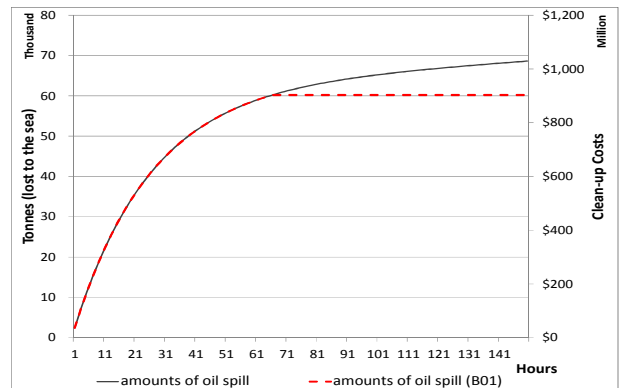


Fig. 6 Tonnes of oil spilled and clean-up cost

상기 설명된 기법들은 위험도기반 의사결정 지원을 위한 위험도 분석 작업의 전체적인 틀을 보여주기 위한 예로, 필요에 따라 다양한 분석 기법들이 함께 사용될 수 있다. 예를 들어, 유류 유출에 의한 환경피해 정량화를 위하여 유류 확산 모델 또는 관련 데이터베이스가 사용될 수 있으며 (Kim et al., 2011; Sung, 2009), 또한, 사고선박의 부양성 및 잔존 복원성과 선체강도, 기름 유출량 등에 대한 정보 등은 해당선급의 선박긴급응답서비스 (Emergency Response Service: ERS) 또는 유관기관의 분석 결과 등을 사용할 수 있다.

4. 초기대응 및 구난지원 시스템

기존의 해양사고 대응 의사결정은 전문가의 경험이 바탕이 되어 내려지고 있으나, 한 인간으로서 전문가의 경험에는 한계가 있고, 또한, 의사결정까지 시간이 많이 소요되거나 잘못된 판단을 내리게 되는 가능성도 있기 때문에, 이를 보완하기 위한 과학적이고 체계적인 사고대응 정보제공 시스템의 구축이 필요하다.

위험도기반 사고대응 지원 체계는, 위험도평가 결과, 즉 전문가들의 경험을 바탕으로 식별된 모든 시나리오 및 사고대응

방법들과 공학적 해석 또는 분석 결과들을 데이터베이스화하여 의사결정권자에게 필요한 정보를 신속하게 제공할 수 있도록 하며, 또한, 현장과의 통신체계가 확보된다면, 2.3절의 Fig. 2에서 보는 바와 같이, 선내에서 수행되어야 할 긴급조치 등에 필요한 정보들을 원거리 지원 (Remote support system)하는 것도 가능하게 될 것이다.

위험도기반 사고대응 지원 체계는 다음과 같은 절차로 이루어져 있다 (Fig. 7).

첫째, 해양사고가 발생하면 사고 상황을 파악하고, 사고대응 정보 DB (Information DB)를 이용하여 사고대응에 필요한 기본 정보들, 즉, 환경 정보, 선박 정보, 사고상황 정보 및 사고대응지원 정보들을 신속하게 입수한다. 환경 정보는 국립해양조사원, 기상청 등 외부기관 DB와 연계를 통하여, 선박 정보는 사고선박, 선박회사 및 관련기관 등으로부터 입수할 수 있으며, 사고상황 정보는 사고선박, 현장 사고대응 주체 및 지원기관으로부터, 사고대응지원 정보는 정부기관 및 민간 구난업체로부터 얻을 수 있을 것이다.

둘째, 입수된 사고대응 정보들은 사건전개 양상 DB (Event scenario DB)로 보내지고, 이를 바탕으로 모든 상황과 조건의 변화에 따라 발생 가능한 사건전개 시나리오들을 사건전개 양상 DB에서 보여주며, 각 시나리오 상황에 적용 가능한 모든 사고대응 방법들을 사고대응 방법 DB (Accident response DB)에서 보여주게 된다. 이러한, 모든 사건전개 시나리오 정보들을 통하여 사건전개 가능성을 검토하고, 더 이상의 사고 확산이나 위험사건으로의 전개 가능성이 없다고 판단될 경우 사고수습 단계 (Post-accident response stage)로 넘어가게 된다.

셋째, 만약 사고피해 확산 가능성이 있을 경우에는 위험도 분석 시스템 (Risk analysis system)에서, 발생 가능 시나리오에 대한 위험도분석 작업을 수행 (정보 DB로부터 최신 정보 갱신하여 위험도분석)하여, 사고대응을 위하여 확보된 시간 추산, 적용 가능한 대응작업 식별, 필요한 사고대응 물자 식별, 다양한 전개 양상 및 결과 추산 등과 같은 '사건전개 분석 및 각 사건 시나리오 결과 예측 정보'와, 사고대응 소요 시간 추산, 대응작업 성공 가능성 추산, 사고대응 효과 추산, 대응작업 관련 위험요소 목록 식별 등과 같은 '사고대응 작업 분석 및 사고대응 결과 추산 정보'를 제공하게 되며, 이러한 정보를 바탕으로 의사결정권자는 최선의 사고대응 방법을 선택하고 이를 적용 (Decision making & response action execution)하게 된다.

마지막으로, 사고대응 작업 적용 결과와 사건진행 상황을 검토 (Check the action taken & accident situation)하고, 더 이상 사고피해 확산 가능성이 없다고 판단될 경우에는 사고수습 단계로 넘어가게 된다.

향후, 다양한 선종과 다양한 해양사고들에 대한 위험도 평가 작업 등 많은 연구를 통하여 사건전개 양상 DB와 사고대응 방법 DB가 충분히 축적된다면, Fig. 7의 위험도분석시스

템이 DB 내에서 구동되도록 하는 것 또한 가능할 것이다.

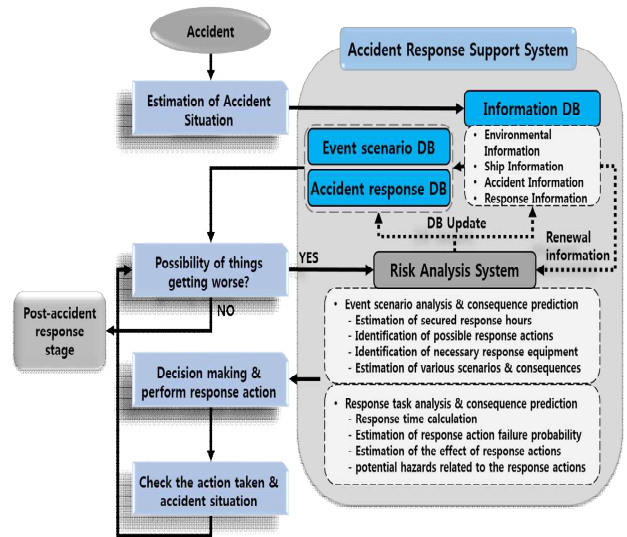


Fig. 7 Risk-based accident response procedure

5. 결론

위험도기반 접근법은 국제해사기구를 비롯한 여러 기관에서 중대한 의사결정의 객관성과 타당성을 확보하기 위하여 주로 사용하는 방법론으로, 본 연구에서는, 위험도기반 접근법을 해양사고 초기대응 단계에 적용함으로써, 최적의 사고대응 의사결정을 위하여 필요한 체계적이고 객관적인 정보를 제공할 수 있도록 하는 '위험도기반 사고대응 지원 체계'를 마련하고자 하였다.

위험도기반 사고대응 지원 체계는 사고 상황에 대한 정확한 정보와 사고 상황에 따라 전개될 수 있는 시나리오 및 적용 가능한 사고대응 방법들에 대한 정보를 의사결정권자에게 제시하기 위한 시스템으로, 이를 해양사고 초기대응에 적용함으로써, 첫째, 신속한 대응정보 지원으로 해양사고 초기대응 시간 단축, 둘째, 전문화된 의사결정 체계를 확립함으로써 행여 발생할 수 있는 의사결정권자의 잘못된 판단으로 인한 사고피해 확대 가능성 저감, 셋째, 사고대응 작업분석 결과를 데이터베이스에 축적시킴으로써 사고대응을 위한 자원/물자의 최적 배치를 위한 자료 제공, 넷째, 사고대응 방법 목록 및 작업 정보들을 사전에 제공함으로써 불필요한 사고대응 장비 투입으로 발생할 수 있는 비용을 절감하는 등과 같은 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대하고 있다.

본 논문에서 제시한 위험도기반 사고대응 지원 체계의 개념과 적용 방법론들은 효과적인 해양사고 초기대응 체계 마련을 위한 기초연구로써, 해양사고에의 실적용을 위해서는 많은 연구와 시간이 필요할 것으로 사료되며, 이를 위한 지속적인 노력을 기울여야 할 것이다.

후 기

본 연구는 선박해양플랜트연구소(KRISO)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다(과제명: 해양사고 초기대응 및 구난기술 지원시스템 개발).

References

- [1] Byun, H. S. and Shin, H. S.(2001), "A Study on The Safety Control for Information System of Maritime Disasters", The Journal of the Korea Institute of Maritime Information & Communication Sciences, Vol. 5, No. 1, pp. 222-226.
- [2] IMO(2015), Revised Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for Use in the IMO Rule-Making Process, MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.1, June 2015, pp. 5-17.
- [3] Jung, C. H., Nam, T. K. and Jeong, J. S.(2012), "A Study on the Improvement of Salvage Procedures through the Collision Accident of Ships", Journal of Navigation and Port Research, Vol. 36, No. 10, pp. 851-856.
- [4] Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering(2001a), "Development of Response Technology for Marine Casualties", pp. 49-87.
- [5] Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering(2001b), "Establishment of Systems for Prevention of Marine Accidents and Salvage (V)", pp. 26-112.
- [6] Kim, H. J., Lee, M. J., Oh, S. W. and Kang, J. M.(2011), "A Study on Development of Operational System for Oil Spill Prediction Model", Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 17, No. 4, pp. 375-382.
- [7] Kim, K. H., Choi, J. H. and Choi, H. K.(2014), "A Study on the Decision Making Process of OSC(On-Scene Commander) and On-Scene Command System on Occuring of Disaster at Sea -Focusing on the Sewol Ferry Sinking Case-", Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 20, No. 6, pp. 692-703.
- [8] Lee, J. K., Na, S., Kim, H. T. and Kim, K. M.(2010), "A Study on High-level FSA for Korean-flagged General Cargo Ships", Journal of Navigation and Port Research, Vol. 34, No. 3, pp. 213-220.
- [9] Lee, M. J., Kim, H. J., Kim, S. Y. and Seo, J. W.(2010), "A Study on Information System to Support Response of Marine Accident", Proceedings of Korean Institute of Navigation and Port Research, Autumn annual Conference 2010, 2010 Oct. 21, pp. 170-176.
- [10] Lee, M. J. and Oh, S. W.(2014), "Development of Response Scenario for a Simulated HNS Spill Incident", Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 20, No. 6, pp. 677-684.
- [11] MAIB(1997), Report of the Chief Inspector of Marine Accidents into the grounding and subsequent salvage of the tanker SEA EMPRESS at Milford Haven between 15 and 21 February 1996, Marine Accident Investigation Branch, ISBN 0 11 551890 8, pp. 19-159.
- [12] MIT(2013), Cruise Ship COSTA CONCORDIA Marine casualty on January 13 2012, Ministry of Infrastructures and Transports, Marine Casualties Investigative Body, May 2013, pp. 27-128.
- [13] SAFEDOR(2004), Information Resources, FSA results: LNG Carriers, Container vessels, Crude oil tankers, Cruise ships, RoPax ships, and Dangerous goods, Design, Operation and Regulation for Ship Safety, <http://safedor.org/resources/index.htm>.
- [14] Skjong, R., Vanem, E. and Endresen, Ø.(2007), Risk Evaluation Criteria, SAFEDOR-D-4.5.2-DNV-Rev3, October 2007, pp. 37-68.
- [15] Sung, J. T.(2009), "Numerical Simulation of Spilled Oil Dispersion in Taean Coastal Zone", Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, Vol. 12, No. 4, pp. 264-272.
- [16] TAIC(2014), Container ship MV Rena grounding on Astrolabe Reef, 5 October 2011, Transport Accident Investigation Commission, Marine inquiry 11-204, November 2014, pp. 7-16.
- [17] Vanem, E. and Skjong, R.(2004), "Collision and grounding of passenger ships-risk assessment and emergency evacuations", Proceedings of the 3rd International Conference on Collision and Grounding of Ships, ICCGS 2004, Izu, Japan, 25-27 October 2004, pp. 195-202.
- [18] Vinnem, J. E.(2007), Offshore Risk Assessment: Principles, modelling and applications of QRA Studies, 2nd Edition, Springer, pp. 119-139.

Received 3 September 2016

Revised 25 October 2016

Accepted 26 October 2016

