

국내 위험·유해물질(HNS) 해상운송사고 위험도 분석 및 사고 저감방안 연구

조심정* · 김동진**† · 최강식**

*, ** 부산대학교 국제전문대학원

Hazardous and Noxious Substances(HNS) Risk Assessment and Accident Prevention Measures on Domestic Marine Transportation

Sim-Jung Cho* · Dong-Jin Kim**† · Kang-Sik Choi**

*, ** Graduate School of International Studies, Pusan National University, Busan, 609-735, Korea

요 약 : 유류를 포함한 위험·유해물질(Hazardous and Noxious Substances : HNS, 이하 HNS)의 물동량이 증가하는 추세에 있음에도 불구하고 우리나라에서는 HNS 해상운송 중에 일어난 사고의 분석과 위험에 관한 연구가 미진하다. HNS는 형태와 종류가 다양하고, 사고발생 시 피해가 심각하게 나타나기 때문에 사고에 대한 위험도 분석과 저감방안 모색이 필요하다. 본 연구는 ETA를 통해 국내에서 발생하고 있는 HNS 해상운송사고의 전개과정을 분석하여 사고유형과 특징을 고찰하고, 시나리오별 확률과 인명피해를 산출하여 F-N curve로 표현함으로써 위험도를 평가한다. 또한 Risk Matrix를 이용하여 고위험군 시나리오를 선정하여 국내에 적용 가능한 현실적인 사고 저감방안을 모색한다. 연구의 결과는 충돌사고의 발생확률이 가장 높은 반면 인명위험도는 발생확률이 낮은 질식, 침몰, 폭발의 사고유형이 높은 것으로 나타났다. 이러한 인명피해를 줄이기 위해서는 기본적으로 선내에서 안전수칙 및 작업절차를 준수하는 것으로도 효과를 얻을 수 있다.

핵심용어 : 위험·유해물질, 해상운송, 위험도, 사고 시나리오, 저감방안

Abstract : HNS, including crude oil and products, shipments have increased. The risk analysis of HNS has assumed the importance, especially in maritime transportation area. There are various forms and kinds of HNS and the consequences of an accident are serious. In order to provide practical measures for preventing accidents, this study analyses the potential risks of HNS on maritime transportation accidents at domestic sea by using Event Tree Analysis. This study carries out risk assessment with F-N curve and risk matrix focusing on liquid cargo carriers (Oil and Products Tanker, Chemical Tanker, LPG/LNG Tanker, etc.). Explosion and sinking, suffocation indicate high consequence when on collision represent high probability. Improving human errors should be the main factor to mitigate risk on human lives.

Key Words : HNS, Maritime Transportation, Risk, Accidents Scenario, Mitigation Measures

1. 서 론

1989년 알래스카에서 발생한 엑시온 발데즈(Exxon Valez)호 사고로 전 세계적인 방재체제 구축을 위해 IMO(International Maritime Organization, 국제해사기구)는 해양오염 대비, 대응 및 협력에 관한 국제 협약(OPRC)을 채택하였다. 또한 국제적으로 유류에 의한 해양오염사고 피해보상을 위하여 국제

유류오염보상기금(IPOC)과 유류오염손해에 대한 민사책임에 관한 협약(CLC)을 제정하여 대응하였다.

이후 막대한 인명 및 재산, 환경피해를 동반하는 HNS의 해상운송사고가 발생하자 HNS 화물 해상운송에 관한 책임 협약(HNS Convention) 및 HNS 오염사고에 대한 대비, 대응 및 협력에 관한 의정서(OPRC-HNS Protocol)가 채택되기에 이르렀다. 이와 같은 협약은 HNS의 해상운송 중 사고의 위험이 증대되어 유류뿐만 아니라 HNS 운송의 규제가 국제적으로 강화되는 계기가 되었다. 2001년 9.11 사건 이후, 전 세계 주요국과 국제기구는 선박과 항만의 보안을 강화하였고 이

* First Author : sim8491@naver.com, 051-510-3726

† Corresponding Author : ssskdj@hanmail.net, 051-510-3726

러한 국제협약을 이행하지 않는 국가에 대하여 강화된 규제
로 PSC(Port State Control, 항만국통제), 무역보복 등 제재를
가하고 있다.

최근 해상운송에 의존하고 있는 HNS의 국제 운송이 급증
하고 있다. 또한 규모의 경제와 기술의 발달로 선박의 대형
화, 고속화 등 해상운송환경이 변화하였다. 이는 원유·석유
정제품·화학물질 등의 HNS가 대량으로 운송되어 효율성을
극대화 시키지만, 전체 운송량이 증가함으로써 그 이면에
내재된 위험도가 증가하고 있다는 것을 의미한다.

탱커선으로 불리는 액체화물운반선은 비포장 상태의 액
체화물을 선창 내에 그대로 싣고 운반하는 선박 구조의 특
성상 사고의 발생가능성이 일반화물선, 컨테이너선 등 다른
종류의 선박보다 높다. 탱커선은 수송대상화물이 광범위하
고, 이러한 물질은 인화성·폭발성·유독성·반응성 등 고
유의 성질을 내포하고 있는 경우가 있다. 또한 탱커선은 일
반화물선과는 달리 보통 만재상태로 수송하고, 양하지에서
선적지로 되돌아갈 때는 공선상태로 항해하면서 화물유 탱
크세정(Gas free)을 하는 특징을 보인다.

HNS 해상운송사고는 충돌 등의 사고만으로 발생하는 선
박과 항만 자체의 손상뿐만 아니라, 폭발·화재 또는 독극물
의 분산에 의하여 인명과 선박 및 장비, 해양, 항만시설에
치명적인 손상을 미칠 수 있다. 이러한 내재된 위험을 억제
또는 감소시키기 위해서는 발생가능한 잠재적 위험을 예측
하는 정량적 위험도 분석이 선행되어, 사고의 저감방안을
마련해야 한다.

유류를 포함한 HNS의 물동량이 증가하는 추세에 있음에
서 불구하고 우리나라에서는 HNS 해상운송 중에 일어난 사
고의 분석과 위험도에 관한 연구가 활발하게 진행되지 않았
다. 따라서 본 연구는 국제 협약에 따라서 다르게 정의되는
HNS를 비교하고 국내에서 발생하는 HNS 해상운송사고의
유형과 특징을 고찰하고자 한다. 또한 지속적으로 발생하고
있는 HNS 해상운송사고의 인명피해를 정량적 위험도 분석
을 통해 사고 저감방안에 대하여 연구하고자 한다.

본 연구에서 HNS는 HNS 협약에 따른 MARPOL 부속서 I
의 유류 및 MARPOL 부속서 II, IBC Code에 따른 유해액체
물질과 IGC Code의 액화가스류를 포함한 액체 HNS에 한정
한다. 선박유형은 액체화물운반선으로 선정하고 사고 데이
터는 최근 10년간(2002~2011) 국내 해상 및 주요 항만에서
발생한 사고를 분석한다.

연구의 흐름은 4개의 장으로 구성되며, 각 장에서 다루는
내용은 다음과 같다. 2장 이론적 배경에서는 HNS의 정의와
해상물동량, 해상운송사고 현황 등 HNS의 개요를 파악한다.
3장 위험도 평가 및 사고 저감방안에서는 ETA(Event Tree

Analysis, 사건수목분석)를 통해 국내 HNS 해상운송사고의
전개과정에 대한 시나리오를 구축하고, 시나리오별 확률 및
사망자 수를 계산하여 위험도를 분석한다. 그리고 국내 HNS
해상운송사고 위험도를 F-N curve(Frequency-Number of Fatalities
curve, 확률-사망자 수 곡선)로 도식화하여 평가하고, Risk
Matrix를 이용하여 고위험군 시나리오 선정을 통한 사고의
저감방안을 모색한다. 4장 결론 및 향후 연구에서는 본 연구
의 결과를 요약하고 한계점과 발전방향을 제시한다.

2. 이론적 배경

2.1 HNS의 개요

Table 1과 같이 위험·유해물질로 불리는 HNS는 국제협약
과 국내법에 따라 다르게 정의된다.

Table 2. Definition of HNS

Convention or Act	Name
MARPOL 73/78	Harmful Substance
SOLAS 74	Dangerous Goods
HNS Convention	Hazardous and Noxious Substances
OPRC-HNS	Hazardous and Noxious Substances
Ship Safety Act(Korea)	Dangerous Articles

MARPOL 73/78에는 해양생태계에 해를 주는 물질로서 유
해물질(Harmful Substance)을 규정하고 있으며, SOLAS 74에서
는 선박 및 선원의 안전과 관련된 물질로 위험물질(Dangerous
Goods)을 규정하고 있다. HNS 협약은 가장 광의의 개념으로
HNS를 해상운송되는 화물로서 어떠한 물질, 원료, 품목이라
고 정의하고, Table 2와 같이 IMO가 제정하고 관리하는 모든
협약과 규칙 등에서 위험하거나 해로운 물질을 모두 포함한
다. 또한 OPRC-HNS 의정서는 HNS를 기름을 제외한 물질로
인간의 건강과 해양 생명체 또는 생물체에 해로운 물질과
쾌적성을 손상시키거나 다른 합법적인 바다의 이용에 방해
가 되는 물질로 정의한다.

국내에서는 선박안전법에 따른 위험물 선박운송 및 저장
규칙에 근거한 위험물과 해양환경관리법에서 유해액체물질
로 정의하고 있으며, 위험물안전관리법과 유해화학물질관리
법에서 위험물과 유해화학물질로 분류된다.

HNS는 액체, 고체 및 포장위험물 등 3가지의 형태를 띠
며, 이에 따라 주요 해상 운송수단은 3가지 선박유형으로 분
류된다. 액체 HNS는 액체화물운반선, IMDG Code에 의한 포
장위험물은 컨테이너선으로 운반되며 고체 HNS는 벌크선으
로 운송된다.

Table 2. Classification by HNS Convention

HNS	Material	Type of Ship
Oil (MARPOL ANNEX I)	Crude Oil, Asphalt, Heavy Oil, Naphtha, etc.	Oil Tanker
Noxious Liquid Substance Carried in Bulk (MARPOL ANNEX II)	Acetic Acid, Ammonia, Sulfuric Acid, etc.	Chemical Tanker
Dangerous Liquid Substance Carried in Bulk (IBC Code)	Benzene, Xylene, Toluene, etc.	Chemical Tanker
Dangerous, Hazardous and Harmful Substance, Material and Articles in Packaged Form (IMDG Code)	Car, Paint, Explosives, Raw Cotton, etc.	Container Ship
Liquified Gas (IGC Code)	LPG, LNG, Butane, Methane, etc.	LPG, LNG Tanker
Liquid Substance Carried in Bulk with a Flash Point Not Exceeding 60°C	Acetal, Allyl-acetate, etc.	Chemical Tanker
Solid Bulk Material Processing Chemical Hazard (BC Code ANNEX B)	Limestone, Sulfur, etc.	Bulk Carrier
Residue		
Total	About 6,000 kinds of Cargo	

Source : Developed by authors based on Korea Coast Guard(2004; 2007)

2.2 HNS 해상물동량 현황

Table 3은 국내 유류 및 HNS의 해상물동량을 나타낸다. 전 세계의 해상물동량이 증가함에 따라 우리나라 유류 및 HNS의 물동량 또한 증가 추세에 있다. 유류와 HNS의 물동량은 전체 해상화물 중 약 45%의 높은 비율을 나타낸다. 최근 5년 동안 유류의 증가는 3.06%에 머무르는 반면 같은 기간 동안 HNS의 물동량 증가는 40.56%에 이른다.

Table 3. Trend of HNS Maritime Transportation in Korea

Year	Total (C)	HNS(A)						Oil & Products (B)	A/C	B/C
		Sub- Total	Solid	Gas	Liquid	Packaged				
2006	1,036,843	181,155	74,815	50,055	42,405	13,880	275,932	17.47	26.61	
2007	1,093,480	190,469	78,899	51,056	45,148	15,366	282,720	17.42	25.86	
2008	1,139,088	215,529	95,887	55,691	47,408	16,543	282,872	18.92	24.83	
2009	1,076,541	227,320	103,850	51,169	51,336	20,965	282,157	21.12	26.21	
2010	1,204,068	254,625	119,153	61,607	56,759	17,106	284,434	21.15	23.62	

Source : SP-IDC(2006-2010) and KOMDI(2012)

2010년 HNS 물동량 중 산적고체위험물이 46.80%로 가장 높은 비중을 차지하며, 가스류(24.20%), 산적액체화학품(22.29%), 포장위험물(6.72%) 순으로 나타난다.

Table 4는 국내 원유운반선, 석유정제품운반선, 케미컬운반선, LPG/LNG운반선을 포함한 액체화물운반선의 입출항수를 나타낸다. 액체화물운반선의 입출항 수는 컨테이너선 보다 약 3배 높은 것으로 나타난다.

Table 4. Arrival and Departure of Vessels in Domestic port

Year	Total (C)	Liquid Cargo Carrier(A)					Container ship A/C B/C			
		Sub- Total	Crude Oil	Oil Products	Chemical	LPG/ LNG	(B)			
2006	385,333	114,039	2,939	79,833	23,463	7,804	42,964	29.59	11.15	
2007	401,875	116,790	3,135	80,944	24,864	7,847	45,510	29.06	11.32	
2008	418,548	115,096	2,935	78,771	24,969	8,421	43,732	27.50	10.45	
2009	395,634	119,083	4,546	81,277	24,610	8,650	41,806	30.10	10.57	
2010	403,209	121,253	4,087	84,206	24,873	8,087	47,446	30.07	11.77	

Source : SP-IDC(2006-2010)

2.3 HNS 해상운송사고 현황

Table 5는 국내에서 발생한 유류와 HNS 해상운송과 관련된 주요사고를 나타낸다. 2012년 1월, 선원 16명을 태우고 인천항에서 대산항으로 향하던 두라3호가 해상에서의 선체 폭발로 인해 11명이 사망 또는 실종되었다. 이와 같이 HNS 해상운송사고의 발생빈도는 낮지만, 대형사고의 발생가능성이 내재되어 있다.

Table 6. Major Accidents of HNS Maritime Transportation in Korea

Year	Location	Vessel Name	Material	Accident Type
1993	Port of Deasan	Frontier express	Naphtha	Human Casualty, 157 people injured
1995	Off Yeosu Coast	Sea prince	Crude oil and Bunker Fuel Oil C	Oil Spill
2002	Port of Yeosu	Pioneer	Mixed Cargo Sludge	Suffocation, 7 people killed and injured
2007	Off Taean Coast	Hebei Sprit	Crude Oil	Oil spill
2012	Off Incheon Coast	Do-ra3	Petrol	Explosion, 11 people killed and missing

HNS는 화재, 폭발, 독성, 감염, 반응, 부식, 방사능 등 또는 결합된 형태의 위험성·유해성을 나타낸다(Korea Coast Guard, 2004). 화재 및 폭발은 인명피해 뿐만 아니라 선박과 항만시설에 경제적인 손실을 초래할 수 있다. 그리고 독성을 띠는 HNS는 호흡, 오염된 음식물 섭취, 피부와 상처를 통한 유입으로 단시간 내 영향이 나타나 극한경우 사망을 초래하기도 하며, 오랜기간에 걸쳐 지속적으로 건강에 해를 입히기도 한다. 또한 환경에 대한 영향을 가할 가능성을 내포하고 있다. 게다가 HNS는 열 또는 마찰과 같은 에너지유입 또는 다른 물질과 접촉할 때 자연발생적으로 반응한다. 이때 독성 가스나 위험을 초래하는 새로운 물질을 생성할 가능성이 존재한다. HNS는 그 화물 자체의 특징 보다 물질의 운송방법과 관련하여 추가적인 위험을 가진다.

이와 같은 특성을 가진 HNS는 부주의나 불순한 의도로 인해 사고 발생 시 초기대응이 미흡하면, 1차적인 사고의 피해뿐만 아니라 HNS 유출로 인해 연쇄적으로 사고가 발생하고 불특정 다수와 환경에 직접적인 영향을 미치는 2차, 3차 피해가 예상된다.

2.4 선행연구 고찰

HNS와 관련된 주요 선행연구는 다음과 같다. Choi(2002)는 우리나라 해상 위험·유해물질의 관리체도를 미국과 비교 연구하였다. Korea Coast Guard(2004)는 해상에서 발생하는 HNS 대형오염사고에 대비해 국가방재계획의 실행력 제고 방안을 모색하였다. Lee et al.(2012)은 화재, 건강 및 환경 위험도에 기반을 둔 HNS 방제자원 모델을 개발하였다.

한편 국외에서는 여러 연구자들이 HNS 해상운송사고의 위험에 관하여 연구를 수행하였다. Rao and Raghavan(1996)은 항만시설 및 선박에서 화학물질의 유출 시 발생하는 위험단계를 분류하고 그 영향을 분석하였다. Boulton(2000)은 홍콩에서 발생하는 LPG 운송에 대한 위험도를 F-N curve로 표현하였다. Ronza et al.(2006)은 항만에서 발생하는 Hydrocarbon 사고의 위험을 F-N curve로 나타냈다. Cozzani et al.(2007)은 HAZOP(Hazard and Operability, 위험과 운전 분석), FTA(Fault Tree Analysis, 고장수목분석)를 이용하여 항만 내 마살링 야드에서 위험물(Hazmat)의 이동경로선정을 위하여 위험도를 F-N curve로 평가하였다. Arslan and Ismail(2008)은 SWOT-AHP를 이용하여 산적액체화학품 해상운송사고의 위험요인을 규명하였다.

또한 국·내외 해상운송사고의 위험도 분석과 평가에 대한 연구는 다음과 같다. Yang et al.(2001)은 FSA(Formal Safety Assessment, 공식안전성평가)의 단계에 따라 국내 해양사고 통계를 분석하여 충돌사고의 위험을 평가하였다. Keum and Jang(2006)은 우리나라 연안해역을 8개로 나누고 퍼지로그와 쇼케적분을 이용하여 위험도를 평가하였다. Kim and Kim(2008)은 항만에서 선박사고의 위험도 분석 방법으로 불확실성을 고려한 F-N curve를 제시하였다. Ronza et al.(2003)은 ETA로 항만에서 발생한 사고의 발생빈도와 그에 따른 결과를 분석하였다. Portela(2005)은 해상운송사고의 인명피해 분석 방법으로 Risk Matrix를 도입하고 인적오류 개선을 위한 조사방법을 제시하였다. Yang et al.(2005)은 항공과 해상 화물의 위험도 비교와 관리에 관하여 Matrix 기법을 이용한 Risk Mapping을 고안하였다. Trucco et al.(2008)은 선박의 충돌 위험에 대하여 FTA를 활용 분석하였다. Kim and Kwak(2010)은 국내 해양선박사고에 대한 인적요인을 선정하여 평가하였다.

본 연구는 다음과 같이 차별성을 갖는다.

첫째, 국내 주요항만 및 해상에서 일어나는 HNS 해상운송사고를 바탕으로 ETA를 작성함으로써 단편적인 원인, 결과만을 보여주는 기존사례의 한계점을 보완하고자 한다.

둘째, 본 연구는 MAIS¹⁾ 기준으로 부상정도에 따라 가중치를 부여하여 부상자를 사망자로 환산함으로써 보다 정확한 분석 결과를 도출하고자 한다. 기존의 인명피해에 대한 위험도 분석은 부상자의 수를 고려하지 않고 사망자만을 고려하였다.

셋째, 액체화물에 대한 위험도와 폭발, 질식 등 다양한 사고유형(Event)을 조명하고자 한다. 기존의 연구는 컨테이너 선과 충돌 등의 사고유형에 초점을 맞추고 있다. 따라서 본 연구에서는 선박의 유형과 화물의 종류에 따라 상이한 사고의 특성과 피해속성을 파악한다.

3. 위험도 평가 및 사고 저감방안

위험도(Risk)란 위험이 내재되어 있는 어떤 사건의 발생가능성과 적절한 방식으로 측정된 사건의 결과의 조합으로 정의할 수 있다. 정량적으로 위험도를 분석하기 위해서는 식(1)과 같이 위험도의 두 가지 요소인 사고의 빈도 또는 확률과 결과를 규명하여 산출해야 한다. 일반적으로 사고의 결과는 인명피해, 경제적인 손실, 환경에 대한 영향으로 계산한다(Kim and Kim, 2008).

$$R = P \times C \quad (1)$$

식(1)에서, R = 사고의 위험, P = 사고의 빈도 또는 확률, C = 사고의 결과이다.

본 연구에서 제시하는 HNS 해상운송사고 위험도 평가 절차는 다음과 같다.

- 1단계 : 사고자료 수집
- 2단계 : 사고유형 선정
- 3단계 : 시나리오 구축 및 확률 계산
- 4단계 : 인명피해 산출
- 5단계 : 위험도 평가
- 6단계 : 사고 저감방안

3.1 사고자료 수집

국내 자연, 해상운송 및 선박기술의 환경 등의 해양환경의 변화를 반영하고자 최근 10년간(2002~2011)의 사고에 대

¹⁾ MAIS(Maximum Abbreviated Injury Scale)는 미국 교통부에서 발표한 사고 등으로 인한 인체의 손상정도를 가장 높은 수준으로 나타내는 지표를 말한다.

하여 전수조사를 하는 것으로 한다. 분석대상은 액체 HNS로 한정하고, 선박유형은 원유운반선, 석유정제품운반선, 케미컬탱커선, LPG/LNG탱커선을 포함하는 액체화물운반선으로 제한한다. 사고자료는 해양안전심판원의 재결서를 수집하여 국내 주요 항만 및 해상에서 발생한 112건의 사고를 선정하였다.

또한 유용하고 신뢰할 만한 분석 결과를 얻기 위하여 어선과 비어선과의 사고는 제외하였다. 어선의 사고는 불특정하고 비어선과의 사고 발생 시 어선에 피해가 집중되는 특징을 보인다. 따라서 본 연구는 비어선과 비어선간의 사고에 초점을 맞춘다.

3.2 사고유형 선정

본 연구에서는 HNS 해상운송 중에 발생한 사고의 특징을 반영하고자 일반적인 해양사고와 차별화하여 사고유형을 새롭게 선정하였다.

해양안전심판원, 영국 MAIB(Maritime Accident Investigation Branch)등 국·내외 해양사고조사기관에서 정의하는 사고유형을 참조하였다. 해양안전심판원은 충돌, 접촉, 좌초, 화재·폭발, 침몰, 기관손상, 조난, 인명사상의 8가지 사고를 규정하며, 영국 MAIB는 Machinery, Fire/Explosion, Injury/Fatality, Grounding, Collision/Contact, Flooding/Foundering, Listing/Capsizing, Cargo Handling Failure, Weather Damage, Hull Defects, Hazardous Incidents의 11가지 유형을 정의하고 있다. 그러나 이러한 유형은 일반적인 사고의 특징을 포괄하므로, HNS 해상운송사고에 적용하기에는 미흡한 점이 있다.

따라서 화재와 폭발을 각각 분류하고, 3가지의 새로운 사고유형을 정의하였다. 추가된 사고유형은 인명사상사건의 일부인 질식, 최근 심각하게 대두되고 있는 해양오염사고를 유발하는 유출과 HNS의 속성과 탱커선의 구조에서 기인되는 가스집적이다. 본 연구에서 선정한 10가지의 사고유형은 다음과 같다.

① 가스집적(Gas Cloud)

HNS라는 화물자체의 특성상 유해가스 또는 위험가스가 발생하고, 이때 발생한 가스가 탱커선이라는 선박구조의 밀폐구역 내부에 결집하여 산소결핍 현상이 생기는 것. 밀폐지역 내의 공기는 때때로 자연 환기에 의해서 쉽게 이동하지 않으므로, 산소 함유량이 감소함.

② 유출(Spill/Release)

HNS의 경우 포장되지 않은 상태의 액체 또는 기체로 선상의 탱크 등에서 흘러내리는 상태. 화재나 폭발과 같은 새로운 사고를 유발함. 또한 선박의 운항에 필요한 연료유가 해상에 유출되는 경우뿐만 아니라 선박이 운송을 목적으로

적재한 원유, 석유제품 등이 해양생태에 피해를 가할 수 있는 가능성이 높음.

③ 인명사고(Human Casualty)

선박의 구조·설비 또는 운용과 관련하여 선원 또는 승객이 사망, 실종, 부상을 입은 것.

④ 좌초(Grounding)

선박이 해저의 지형 및 구조물에 얽혀 지는 것.

⑤ 접촉(Contact)

다른 선박이나 해저를 제외하고 외부물체나 외부시설물에 부딪치거나 맞붙어 닿은 상태.

⑥ 질식(Suffocation)

공기 중에 극히 미량의 산소(농도 18% 미만)를 함유하는 산소결핍(Oxygen Depletion) 상태가 지속되어 사망에 이르는 것. 선상에서의 화물저장 탱크 등 밀폐공간에서 가스집적 상태에서 오랫동안 지속적으로 노출될 가능성이 존재함. 또한 한 명이 질식한 경우 동료작업자가 구조하기 위해 연달아 밀폐 공간에 출입하여 질식하는 사고가 빈번히 발생함.

⑦ 충돌(Collision)

다른 선박과 부딪치거나 맞붙어 닿은 것으로 선박간의 물리적 작용.

⑧ 침몰(Sinking/Foundering)

선박이 수면 아래로 완전히 가라앉은 상태.

⑨ 폭발(Explosion)

충격이나 강한 압력파를 유발하는 갑작스런 에너지의 방출 상태. 폭발, 파편, 불, 뜨거운 복사열, 유독성 등의 추가적인 위험이 초래됨.

⑩ 화재(Fire)

주로 열 형태로 에너지를 방출하는 것. 화재는 산소와 관련된 화학적 과정으로 유독가스를 유발함.

3.3 시나리오 구축 및 확률 계산

본 연구에서 사용되는 ETA는 전통적으로 사용되는 의사결정수(Decision Tree)의 수정된 형태이다. 이 기법의 목적은 초기 사고에 뒤따르는 사건들의 전개과정과 결과를 체계적이며 효과적으로 규명하고 모형화 하는데 있다.

본 연구에서 선정한 사고유형으로 국내 HNS 해상운송사고의 전개과정을 도식화하면 Fig. 1과 같다. ETA는 국내 해상과 주요 항만에서 운항중에 일어난 사고인 운항중 사고와 항만에 정박하여 급유·정비·출항 준비 및 탱크세정 등의 작업을 하던 중에 발생한 비운항중 사고로 분류하여, 15가지의 개별 시나리오를 구축하였다. 운항중 사고는 9가지의 시나리오(S1~S9)로 규명되며, 비운항중 사고는 6가지의 시나리오(S10~S15)로 분류된다.

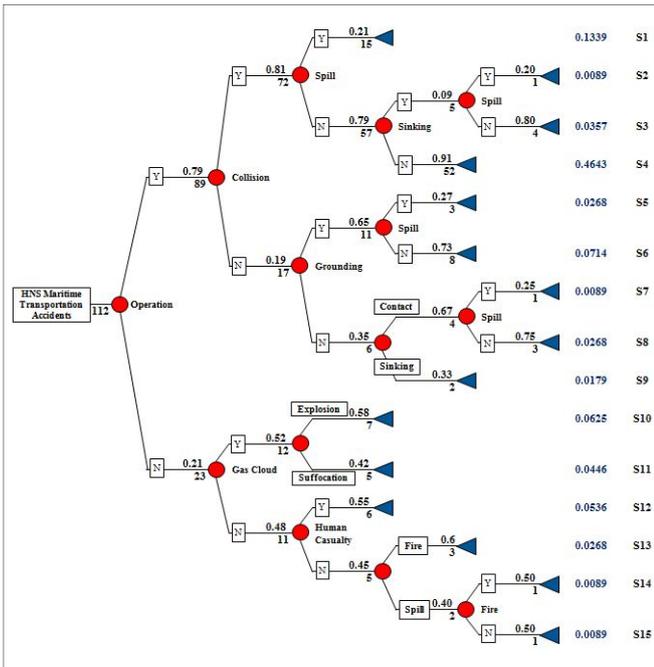


Fig. 1. ETA of HNS Maritime Transportation Accidents(2002~2011).

운항중 사고에 포함되는 충돌은 가장 다양한 개별 시나리오를 가지는 사고유형이다. 유출 또는 침몰의 유, 무에 따라서 충돌-유출(S1), 충돌-침몰-유출(S2), 충돌-침몰(S3), 단순충돌(S4)로 이어지는 4가지의 시나리오로 발생하는 것으로 분석되었다. 좌초는 좌초-유출(S5)과 단순좌초(S6)로 나누어지며, 접촉은 접촉-유출(S7)과 단순접촉(S8)으로 개별 시나리오를 구축할 수 있다. 침몰(S9)은 하나의 사고로 하나의 시나리오를 구성한다.

비운항중 사고 시나리오는 가스집적에서 기인하여 폭발(S10)과 질식(S11)으로 이어지며, 인명사고(S12)와 화재(S13)는 독립된 사고가 각각의 시나리오로 구성된다. 유출사고는 유출된 물질이 화재를 발생시키는 시나리오(S14)와 해상으로 곧바로 유출(S15)되는 두 가지 시나리오로 구축된다.

운항중 사고의 발생확률은 0.79(89건)로, 0.21(23건)을 나타내는 비운항중 사고보다 약 4배 높다. 운항중 사고 시나리오에서 단순충돌(S4)의 발생확률이 0.4643(52건)으로 가장 높으며, 비운항중 사고는 가스집적에서 이어지는 폭발(S10)이 0.0625(7건)로 가장 높은 시나리오 확률을 나타낸다.

운항중 사고 시나리오의 두드러진 특징은 충돌, 좌초, 접촉에서 이어지는 2차사고로 유출사고가 빈번히 발생한다는 것이다. 비운항중 사고 시나리오에서 유출은 화재로 연결되는 사고과정을 나타내는데, 이는 유출사고를 발단으로 또 다른 사고 발생가능성이 잠재되어 있음을 의미한다.

3.4 인명피해 산출

위험도 평가의 결과인 인명피해는 다음의 두 가지로 정의할 수 있다.

- ① 인명피해 = 사망자 + 부상자 × MAIS VSL 가중치
- ② 인명피해 = 사망자

본 연구에서 인명피해를 사망자와 부상자에 가중치를 곱한 합으로 산출함으로써 보다 정확한 국내 해상운송사고의 인명위험도를 분석한다.

사망자만을 인명피해로 정의하는 기존의 위험도 평가는 부상자의 수를 고려하지 않아, 실질적인 위험도를 정확하게 반영하지 못한다는 단점이 있다. 화물 자체의 특성이 잠재적으로 사고의 위험을 내포하고 있는 HNS의 경우, 부상자가 발생하는 사고가 빈번하고 사망수준에 준하는 부상자가 발생하므로 심각한 인명피해의 결과가 나타날 가능성이 높다 (Table 7 참조).

Table 6과 같이 6단계로 나누어지는 MAIS 지표를 이용하여 부상자를 사망자로 환산하고자 한다. 미국 교통부에서 발표한 MAIS 기준의 VSL(Value of a Statistical Life)을 가중치로 적용한다.

Table 7. Weight of Injury Severity Level

MAIS Level	Severity	Fraction of VSL
MAIS 1	Minor	0.0020
MAIS 2	Moderate	0.0155
MAIS 3	Serious	0.0575
MAIS 4	Severe	0.1875
MAIS 5	Critical	0.7625
MAIS 6	Fatal	1.0000

Source : U.S. Office of the Secretary of Transportation(2008)

부상자의 수준은 재결서 및 국내, 미국, 영국의 교통사고로 인한 상해등급을 활용하였다. 계산된 사망자수는 Table 7과 같다.

가중치를 부상자에 곱해 사망자로 환산한 경우 S9, S11, S2 순으로 인명피해가 높게 나타난다. 반면 부상자를 제외한 사망자만을 고려한 경우 S9, S2, S11 순으로 인명피해의 환산결과가 변동하는 것을 알 수 있다.

HNS 해상운송사고는 112건 중 60.7명의 사망자가 발생하였다. 운항중 사고는 30.2명의 사망자가 발생하였으며, 비운항중 사고는 30.5명의 인명피해를 입은 것으로 분석되었다. 인명피해는 사고의 발생확률이 낮은 비운항중 사고가 높은 것으로 도출된다.

운항중 사고 시나리오에서 높은 인명피해의 결과를 보여

Table 8. Number of Calculated Fatality for Each Scenario

	Calculated Fatality (A+C)	Fatality (A)	Injured (B)	Injury Severity (People)	Injured×Weight (C)
S1	0	0	0	-	0
S2	12	12	0	-	0
S3	2.0575	2	1	MAIS 3(1)	0.0575
S4	0.0885	0	3	MAIS 2(2), MAIS 3(1)	0.0885
S5	0	0	0	-	0
S6	0.0575	0	1	MAIS 3(1)	0.0575
S7	0	0	0	-	0
S8	0	0	0	-	0
S9	16	16	0	-	0
S10	7.1420	6	8	MAIS 1(2), MAIS 2(1), MAIS 3(3), MAIS 4(1), MAIS 5(1)	1.1420
S11	14.3375	9	7	MAIS 5(7)	5.3375
S12	4.8200	4	2	MAIS 3(1), MAIS 5(1)	0.8200
S13	4.1875	4	1	MAIS 4(1)	0.1875
S14	0	0	0	-	0
S15	0	0	0	-	0
Total	60.6905	53	23	23	7.6905

주는 시나리오는 단순침몰(S9)과 충돌에서 시작하여 침몰, 유출(S2)로 이어지는 시나리오로 각각 16명과 12명의 사망자가 발생하였다. 비운항중 시나리오는 질식이 14.3명으로 가장 높은 인명피해의 결과로 나타난다. 또한 비운항중 사고는 6개의 시나리오 중 4개에서 인명피해가 나타나며, 질식과 폭발은 매 사고 시 인명피해를 초래한다는 특징이 도출되었다.

3.5 위험도 평가

일반적으로 위험도를 평가하기 위해서 F-N curve를 작성한다. 본 연구에서 분석한 시나리오 확률 및 인명피해 결과 값을 이용하여 위험도를 Fig. 2와 같이 표현하였다.

평면은 위험을 수용 할 수 있는 범위(Acceptable Region)와 실행할 수 있는 한 위험을 낮게 하는 범위(As Low As Reasonably

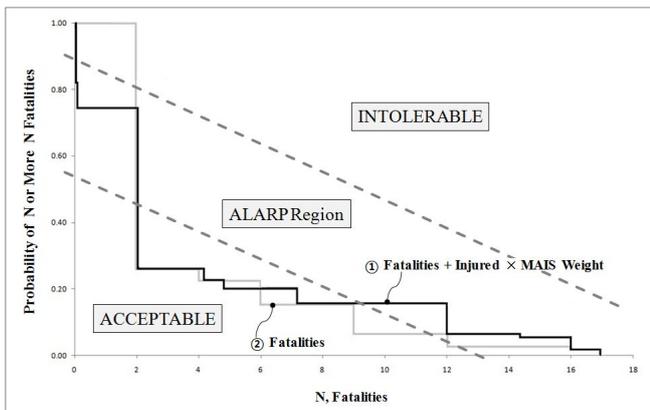


Fig. 2. F-N curve of HNS Maritime Transportation Accidents (2002~2011).

Practical, ALARP), 수용 불가능한 범위(Intolerable Region)의 3 가지 영역으로 나뉘어져 있다. 이는 위험에 대한 수용여부를 평가함으로써 위험도 감소를 위한 추가적인 조치 여부를 판단 할 수 있는 기준을 제시한다. 해외의 경우 사회적 위험도 기준을 제정하고 있어 분석된 결과의 위험도를 평가 할 수 있지만 우리나라는 이와 같은 명확한 기준이 없다.

Fig. 2에서 굵은 실선으로 표현된 F-N curve는 부상자를 반영한 환산사망자를 나타내며, 연한 실선의 F-N curve는 사망자만을 고려한 결과를 의미한다. 그래프는 사망자 수의 구간별로 위험도가 다르게 평가된다. 인명피해가 낮은 구간에서 두 개의 F-N curve가 교차하는 것으로 나타났고, 인명피해가 높은 구간에서 부상자를 고려한 F-N curve의 위험도가 높게 도출된다.

위험도가 높게 평가되면 저감방안을 모색해야한다. 부상자를 고려해 인명피해를 산출하는 경우, 보다 정확한 현재 상황의 위험도를 반영함으로써 현실적인 사고 저감대책을 마련할 수 있다.

3.6 사고 저감방안

3.6.1 시나리오 선정

위험도가 높은 시나리오를 선정하기 위하여 x축은 인명피해, y축은 발생확률을 나타내는 Risk Matrix를 이용한다. 본 연구에서 산출한 시나리오별 확률과 사망자 수를 이용한 Risk Matrix 평가의 결과는 Fig. 3과 같다.

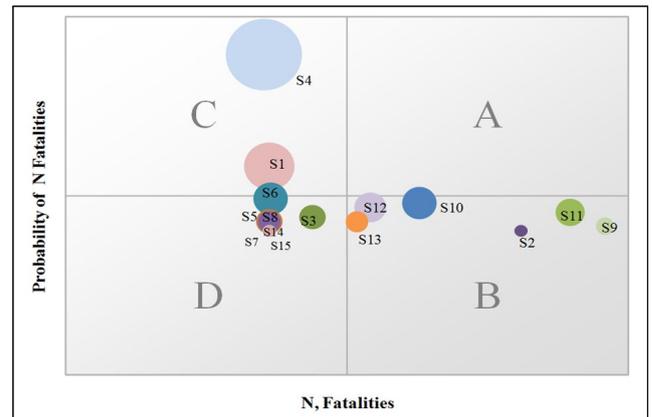


Fig. 3. Risk Matrix for Scenario Selection.

4분면은 High Probability-High Risk(A), Low Probability-High Risk(B), High Probability-Low Risk(C), Low Probability-High Risk(D)로 구분된다.

A영역에 속하는 사고유형은 없는 것으로 도출된다. 그러나 B군에 속하는 가스집적-폭발(S10)은 A영역에 근접하다. 그리고 침몰(S9), 가스집적-질식(S11), 충돌-침몰-유출(S2), 인

명사고(S12), 화재사고(S13)는 B군에 포함된다. 6개의 시나리오 중 침몰을 포함하는 시나리오를 제외하고 비운항중 사고 유형인 것으로 나타난다. C, D영역에는 주로 운항중 사고유형이 포함된 것으로 도출된다.

이러한 Risk Matrix를 활용하면 F-N curve를 이용하여 위험도 기준과 같은 절대적인 평가를 하기 어렵거나 한계가 있을 시, 상대적인 위험도를 평가 할 수 있다. 또한 위험도가 높은 영역 또는 발생확률이 높은 영역의 사고유형을 그룹화하여 효율적으로 위험도 저감방안을 모색할 수 있다는 장점을 가진다.

사고의 저감방안을 모색하기 위해 Risk Matrix에서 평가한 B영역에 속하는 시나리오 중 인명피해가 높은 유형을 선정하였다. 선정된 시나리오의 사고유형은 다음과 같다.

- Case 1 : S10/S11, 가스집적
- Case 2 : S10, 폭발
- Case 3 : S11, 질식
- Case 4 : S9, 침몰

3.6.2 사고 저감방안

해상운송시스템의 중심은 인간(해양종사자)이다. 인적요인은 기술요인, 환경요인 및 조직요인과 상호작용을 하며(Kim et al., 2011), 이 과정에서 오류를 범하게 된다.

해양사고의 발생은 약 80%가 인적오류에 기인한다. 최근에는 많은 사고조사기관에서 주요 원인인 인적오류의 조사를 통하여 개선을 위한 노력하고 있다(Portela, 2005). 따라서 인적오류를 향상시키는 것이 사고를 저감할 수 있는 효과적인 방법이 될 수 있다.

인적오류는 의도한 목적을 이루기 위하여 계획된 행위들이 실패하여 의도하지 않은 결과를 유발한 행위라고 정의한다(Reason, 1990). 인적요인의 구조에 관한 이론은 SHEL, Reason의 사고인과관계, GEMS(Generic Error-Modeling System) 및 Rasmussen의 SRK 이론 등으로 설명된다.

이러한 이론들을 종합적으로 정리하면, 사고는 하나의 원인이 발단되어 발생하는 경우 보다 여러 가지 원인의 복합적인 조합으로 발생한다. 따라서 사고를 방지하기 위해서는 중간단계의 한 가지 원인만을 제거 하여도 사고발생을 낮출 수 있다.

또한 사고의 원인은 직접적으로 관여하는 직접원인과 사고의 발생을 조장하는 비교적 먼 원인이 간접원인으로 분류할 수 있다(Keum et al., 2003). 따라서 본 연구에서는 HNS 해상운송사고의 저감방안을 사고에 직접적으로 작용하는 인적오류를 중심으로 모색하였다.

HNS 해상운송사고는 안전수칙 및 업무절차를 준수함으로써

인적오류를 개선하여 상당부분 예방이 가능하다. 사고 저감을 위해 모색한 대안은 적은 노력과 비용으로 충분히 가능한 방안들을 선정하였다. 사고 저감을 위한 조치사항은 아래와 같이 요약할 수 있다.

- ① Case 1 : S10/S11, 가스집적
 - 밀폐구역작업 승인 및 관리자 감독 강화
 - 탱크세정 시, 작업자 임의작업 금지
 - 유독가스 · 산소농도 확인 및 점검표 작성
 - 환기 후 밀폐구역 출입 및 작업개시
- ② Case 2 : S10, 폭발
 - 방폭용 장비 및 적절한 작업도구의 사용
 - 폭발가능성이 존재하는 화물탱크 주변에서 화기사용 주의 등 안전의식 교육 강화
- ③ Case 3 : S11, 질식
 - 밀폐구역 작업 시, 화물의 종류 확인 및 특성 고려한 안전장비 착용
 - 작업자의 안전의식 제고
- ④ Case 4 : S9, 침몰
 - 출항 전 탱크 덮개 개폐 유무 등 장비 · 설비 및 선체 점검(특히, 악천후 시)

Table 8은 위와 같은 저감방안 적용에 따른 사고건수의 변화를 나타낸다. Case 1에서 적절한 조치사항을 Gas Cloud(S10/S11)에 시행하면 12건 중 8건의 사고발생을 방지 할 수 있다. 이는 Gas Cloud를 포함하는 사고의 2/3에 해당한다. 또한 Case 2, 3, 4에서 마찬가지로 사고가 저감되는 것을 알 수 있다.

Table 8. Comparison of Effect with Accidents Mitigation

Case	Scenario	Accident Type	No. of Accident Mitigation		
			Difference	From	To
1	S10/S11	Gas Cloud	8	12	4
2	S10	Explosion	5	7	2
3	S11	Suffocation	3	5	2
4	S9	Sinking	1	2	1

Fig. 4는 사고건수의 변화를 반영한 저감방안의 효과를 나타낸다. 각 Case별로 연한실선으로 표시된 F-N curve는 저감방안의 적용 이전 위험도이며, 진한실선으로 표시된 F-N curve는 저감방안의 적용 이후 위험도를 나타낸다. 인적오류를 개선하는 등 조취사항을 취함으로써 전체 사고건수가 줄어들고 전반적인 위험도 수준이 감소된다.

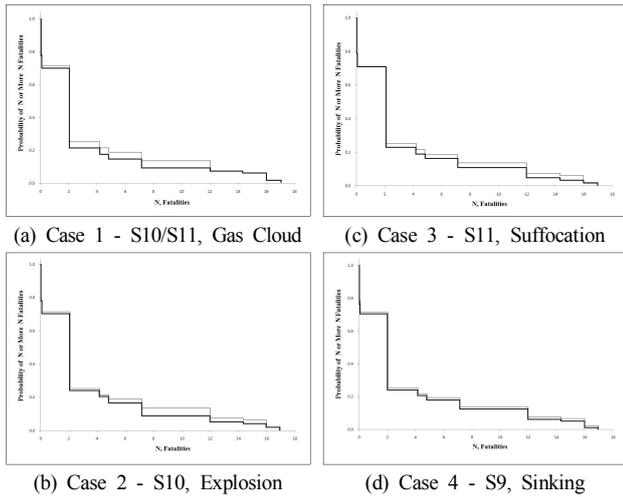


Fig. 4. Risk Mitigation by Case.

HNS 해상운송사고의 저감을 위해서 선내에서 정확한 직 무인지 및 안전인식 제고가 필요하다. 업무를 담당하는 선원은 작업메뉴얼을 따르며 임의적으로 작업을 진행하지 않아야 한다.

4. 결론 및 향후 연구

본 연구는 최근 10년간 우리나라 주요 항만과 국내 해상에서 발생한 산적상태로 운송되는 액체 HNS의 해상운송사고 데이터 112건을 수집하여 분석자료로 활용하였다. ETA를 이용하여 운항중 사고와 비운항중 사고로 나누어 분석하였다. 충돌, 좌초, 접촉 등의 운항중 사고가 빈번하게 발생하지만, 폭발, 질식 등의 사고유형이 포함된 탱크세정 및 급유, 출항 준비, 정비 등의 작업을 하던 중에 발생한 비운항중 사고의 위험도가 높은 것으로 도출되었다. 평가된 위험도는 안전수칙 및 밀폐구역, 화기사용 등 특수업무지침을 준수함으로써 인적오류를 개선하는 것으로 사고 저감효과를 얻을 수 있다.

선박의 전용선화는 해상운송 환경변화의 가장 뚜렷한 특징으로, 특히 탱커선이 대형화되며 적수도 증가 추세에 있다. 본 연구는 10년을 한 단위로 하여 국내에서 발생한 HNS 해상운송사고의 사고유형, 특징 및 양상을 포괄적으로 고찰하고, 국내에 적용할 수 있는 사고 저감을 위한 실효성 있는 안전관리 방안을 모색하기 위하여 진행되었다.

향후 연구는 직접적 요인인 인적오류와 기술적, 환경적, 관리적 요인을 포함하는 간접적 요인을 세분화하고 구체화하는 연구로 이어져야 할 것이다. 이를 통해 1차적으로 선내에서 발생하는 인적오류 이외에 추가적으로 선박과 선내 설

비 및 장비의 점검과 보급, 선내 관리자 감독교육 실시, 안전수칙의 준수여부 확인을 위한 정기적, 상시 점검 등 선사와 국가적 차원의 사고 저감방안을 선정하는 연구로 확대할 수 있을 것이다. 또한 효율적인 사고 저감방안을 모색하기 위해 인터뷰, 설문조사 등을 통한 전문가의 의견을 반영하여야 할 것이다.

그리고 불확실성을 고려한 위험도 분석으로 확장되어야 할 것이다. 사고사례가 112건으로 매우 적다. 사고사례에 의한 확률값으로 인해 발생할 수 있는 판단의 오류를 감소시키기 위해 확률분포를 이용한 시뮬레이션 등을 고려한 객관적인 위험도 분석을 수행하여야 할 것이다.

해상운송사고는 다른 운송수단의 사고에 비해 다양한 변수가 작용하고 많은 요인에 영향을 받는다. 따라서 해상운송 시, 사고를 저감하는 노력과 안전에 대한 인식을 고취하여야 한다.

사 사

이 논문은 2012년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2012S1A5A2A03034415)

참 고 문 헌

- [1] Arslan, O. and D. E. Ismail(2008), SWOT Analysis for Safer Carriage of Bulk Liquid Chemicals in Tankers, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 154, pp. 901-913.
- [2] Boulton, M.(2000), Risk Management of LPG Transport Activities in Hong Kong, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 71, pp. 85-100.
- [3] Choi, J. H.(2002), A Comparative Study on Risk Management Systems for Hazardous and Noxious Substances at Sea, in Korea and USA, *Journal of The Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 8, No. 1, pp. 15-52.
- [4] Cozzani, V., S. Bonvicini, G. Spadoni, and S. Zanelli(2007), Hazmat Transport: A Methodological Framework for the Risk Analysis of Marshalling Yards, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 147, pp. 412-423.
- [5] Keum, J. S., W. J. Yang and W. J. Jang(2003), A Study on the System Dynamics Analysis for Human Factors in Ship's Collision Accidents, *Journal of Korean Navigation and Port Research*, Vol. 27, No. 5, pp. 493-498.
- [6] Keum, J. S. and W. J. Jang(2006), Evaluation of the Navigational Risk Level in Coastal Waterway using Fuzzy Logic, *Journal of The Korean Society of Marine Environment*

- & Safety, Vol. 12, No. 1, pp. 53-59.
- [7] Kim, D. J. and S. Y. Kim(2008), A Methodology for Risk Analysis on Ship Accidents at Port Area, Journal of Shipping and Logistics, Vol. 59, pp. 105-121.
- [8] Kim, D. J and S. Y. Kwak(2010), Evaluation of Human Factors in Ship Accidents in the Domestic Sea, Journal of the Ergonomics Society of Korea, Vol. 30, No. 1, pp. 87-98.
- [9] Kim, H. T., S. Na and W. H. Ha(2011), A Case Study of Marine Accident Investigation and Analysis with Focus on Human Error, Journal of the Ergonomics Society of Korea, Vol. 30, No. 1, pp. 137-150.
- [10] KOMDI(2012), Korea Maritime Dangerous Goods Inspection and Research Institute, Hazardous and Noxious Substance(HNS) Convention, Report, pp. 1-23.
- [11] Korea Coast Guard(2004), Preparedness, Response to Major Pollution, Final Report, pp. 1-85.
- [12] Korea Coast Guard(2007), HNS Accidents Preparedness and Response, Report, pp. 1-12.
- [13] Lee, E. B., J. H. Yun and S. T. Chung(2012), A Study on the Development of the Response Resource Model of Hazardous and Noxious Substances Based on the Risks of Marine Accidents in Korea, Journal of Korean Navigation and Port Research, Vol. 6, No. 10, pp. 857-864.
- [14] Portela, C.(2005), Maritime Casualties Analysis as a Tool to Improve Research about Human Factors on Maritime Environment, Journal of Maritime Research, Vol. 2, No. 2, pp. 3-18.
- [15] Rao, P. G. and K. V. Raghavan(1996), Hazard and Risk Potential of Chemical Handling at Ports, Journal of Loss Prevention Process Industries, Vol. 9, No. 3, pp. 199-204.
- [16] Reason, J.(1990), Human Error, Cambridge University Press
- [17] Ronza, A., S. Carol, V. Espejo, J. A. Vilchez, and J. Arnaldos(2006), A Quantitative Risk Analysis Approach to Port Hydrocarbon Logistics, Journal of Hazardous Materials, Vol. A128, pp. 10-12.
- [18] Ronza, A., S. Felez, R. M. Darbra, S. Carol, J. A. Vilchez and J. Casal(2003), Predicting the Frequency of Accidents in Port Areas by Developing Event Trees from Historical Analysis, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 16, pp. 551-560.
- [19] Trucco, P., E. Cagno, F. Ruggeri and O. Grande(2008), A Bayesian Belief Network Modelling of Organisational Factors in Risk Analysis: A Case Study in Maritime Transportation, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 93, pp. 823-834.
- [20] U. S. Office of the Secretary of Transportation(2008), Departmental Guidance Memorandum, Report, pp. 1-8.
- [21] Yang, Y. L., W. H. Shyu, C. H. Lin and S. F. Hsu(2005), Risk Management of International Transportation of Integrated Circuit Products, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 6, pp. 3386-3400.
- [22] Yang W. J., S. H. Jun and J. S. Keum(2001), Risk Assessment of the Ship's Collision using Formal Safety Assessment Methodology I, Journal of The Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 7, No. 3, pp. 61-74.

원고접수일 : 2013년 01월 30일

원고수정일 : 2013년 03월 26일

게재확정일 : 2013년 04월 25일