

암모니아 연료추진 선박의 병커링 누출 영향에 관한 연구

신일섭* · 천정민** · 이지현****

*, ** 방재시험연구원 책임연구원, *** 한국화학융합시험연구원 책임연구원

A Study on the Hazard Area of Bunkering for Ammonia Fueled Vessel

Ilsup Shin* · Jeongmin Cheon** · Jihyun Lee****

*, ** Senior Researcher, Life & Spatial Safety Research Center, Fire Insurers Laboratories of Korea, Yeosu 12661, Korea

*** Head Researcher/Ph.D., Korea Testing & Research Institute, Changwon 51391, Korea

요 약 : 국제해사기구의 온실가스 감축 노력으로, 해운 산업에서는 저탄소 연료로서 액화천연가스 및 메탄올, 그리고 무탄소 연료로서 수소와 암모니아가 대두되고 있으며, 환경 친화적인 연료로 평가되고 있다. 특히 암모니아의 경우 화물로써 운반을 통한 상당 기간의 운항 경험을 보유하고 있으며, 24년 하반기에는 암모니아 선박 엔진이 공급 예정으로, 상용화가 상대적으로 용이한 연료 중 하나로 간주되고 있다. 그러나 암모니아를 연료로 사용하기 위해서는 독성의 문제점을 극복해야 할 필요가 있다. 5ppm 수준의 농도에서 후각으로 판단이 가능하며, 300ppm 이상을 30분 이상 흡입할 경우 회복이 불가능한 상태에 이를 수 있는 독성물질이다. 화학물질안전원에서 제공하는 KORA 프로그램을 사용하여 암모니아 병커링시 누설시 발생할 수 있는 위험성에 대하여 평가하였으며, 1분간의 누설로 인해서 반경 약 7.5km에서 5ppm의 영향이 있을 수 있으며 이는 부산시 주요지역에 해당하며, 인체에 치명적일 수 있는 300ppm의 경우 병커링 인근 인구 밀집지역 및 학교등에 심각한 영향을 미칠 수 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 암모니아 병커링 관련 법제도가 부재한 상태로 작은 누설에도 광범위한 지역에 독성의 영향이 미칠 수 있기 때문에 지자체, 소방, 환경관서 등과의 유기적인 체계 구축이 마련될 수 있도록 법제도 개발이 필요하다.

핵심용어 : 암모니아 연료, 독성, 병커링 누출 사고, 화학사고예방관리계획서, 위험도 분석

Abstract : As part of the International Maritime Organization efforts to reduce greenhouse gas emissions, the maritime industry is exploring low-carbon fuels such as liquefied natural gas and methanol, as well as zero-carbon fuels such as hydrogen and ammonia, evaluating them as environmentally friendly alternatives. Particularly, ammonia has substantial operational experience as cargo on transport ships, and ammonia ship engines are expected to be available in the second half of 2024, making it relatively accessible for commercial use. However, overcoming the toxicity challenges associated with using ammonia as a fuel is imperative. Detection is possible at levels as low as 5 ppm through olfactory senses, and exposure to concentrations exceeding 300 ppm for more than 30 min can result in irreparable harm. Using the KORA program provided by the Chemical Safety Agency, an assessment of the potential risks arising from leaks during ammonia bunkering was conducted. A 1-min leak could lead to a 5 ppm impact within a radius of approximately 7.5 km, affecting key areas in Busan, a major city. Furthermore, the potentially lethal concentration of 300 ppm could have severe consequences in densely populated areas and schools near the bunkering site. Therefore, given the absence of regulations related to ammonia bunkering, the potential for widespread toxicity from even minor leaks highlights the requirement for the development of legislation. Establishing an integrated system involving local governments, fire departments, and environmental agencies is crucial for addressing the potential impacts and ensuring the safety of ammonia bunkering operations.

Key Words : Ammonia fuel, Toxicity, Leakage of bunkering, KORA, Risk assessment

1. 서 론

최근 국제해사기구의 온실가스 감축규제로 인하여 대체

연료의 사용이 지속적으로 요구되어지고 있다. 규제 도입 초기에는 저탄소 연료인 액화천연가스의 사용이 대두되어져 왔으나, 온실가스 감축목표의 상향, 탄소 집약도 개선 등 규제가 강화됨에 따라 무탄소 연료시대가 곧 도래할 것으로 예상하고 있다(Kim and An., 2021). 이러한 노력의 일환으로

* First Author : isshinn@kfpa.or.kr, 055-731-1253

† Corresponding Author : ljh@ktr.or.kr, 055-285-7595

국제해사기구는 조속한 대체연료의 도입을 위하여 수소, 암모니아, 메탄올 등에 대한 안전규정을 개발하고 있다. 또한 OECD 국제교통포럼(International Transport Forum, ITF, 2018)의 Decarbonising Maritime Transport 에 따르면 탄소계수 80% 이상을 저감하게 될 경우수소와 암모니아와 같은 대체연료는 전체 연료시장의 70% 이상을 차지할 것으로 예상하였다 (Park et al., 2020).

암모니아는 육상에서 하버보쉬법이 개발된 1909년부터 농업비료, 요소수 등 다양한 분야에 사용되면서 100여년 이상 암모니아의 생산, 저장, 운송 등에 대한 노하우가 축적되어있다. 그러나 유독물질로써 5ppm의 낮은 농도에서도 후각으로 식별이 가능하고, 300ppm에 노출 될 경우 건강이 회복되지 않을 수 있는 극도의 주의가 필요한 독성 물질이다 (IMO CCC, Republic of Korea, 2023). 또한 암모니아를 화물로서 운송하는 선박은 IGC Code를 적용받아 관리해온 경험이 있으나, 16조 9항 2 독성화물은 연료로 사용할 수 없는 규칙에 따라 연료로서의 사용을 제한 받고 있었다(Belgium et al., 2023). 그러나 최근 국제해사기구의 화물운송컨테이너 전문 위원회에서는 암모니아를 연료로 사용하기 위한 선박의 안전지침을 24년도까지 개발 완료 및 해사안전위원회의 승인을 목표로 하고 있다. 이에 암모니아 연료추진선박의 운항을 위한 첫 단계인 안전한 연료 공급을 위해 독성을 고려한 영향범위를 설정은 반드시 고려되어야 한다, 따라서 본 연구에서는 국내에서 안정적이고 효율적인 암모니아의 병커링을 위해, 한국화학물질 안전원의 화학사고예방관리 계획서 작성지원 프로그램(Korea Off-site Risk Assessment Supporting Tool)을 사용하여 병커링 시나리오를 설정하고 영향범위 평가 연구를 실시하였다.

2. 위험 독성 농도의 설정

2.1 암모니아의 특성

암모니아는 물에 대하여 높은 흡수성을 가지고 있으며, 무색의 염기성 화학물질로써, 인화점이 132℃, 자연발화온도 630℃로 화재 폭발 위험성은 낮다. 그러나 강한 자극적인 냄새를 가지며, 독성으로 인하여 인체에 심각한 손상을 입힐 수 있다. 보통 흡입으로 인하여 인체에 흡수되게 되며, 코점막의 자극, 두통 기침등의 경미한 증상에서, 중독상태로 진전이 될 경우 후두 수종, 인후염, 폐 부종 등으로 이어져 심각할 경우 사망에 이르게 된다. Table 1과 같이 암모니아 흡입 농도에 따른 인체 영향을 구분한 것으로, 250ppm 이상에 30분 노출되면 참기 힘든 고통이 수반되며 2,500ppm에 노출 될 경우 사망의 위험성이 매우 높은 수준으로 나타났다.

2.2 암모니아의 노출

암모니아의 노출에 대한 작업 환경에서의 관리 기준은 농도를 기반으로 노출 시간을 고려하여 관리 하고 있다. Table 2와 같이 국가별 관리 기준을 나타내었으며, 미국의 NIOSH 및 ACGHI 에서는 일상적인 작업 환경에서의 노출시간에 따른상시 노출과 단기 노출로 구분하여, TWA(Time-Weighted Average), STEL(Short-Term Exposure Limit), Ceiling(Maximum Exposure Limit) 관리할 것을 권고 하고 있다.

Table 1. Summary of toxic effects following acute exposure to ammonia by inhalation (Republic of Korea, 2023)

exposure		Sign and symptoms
mg/m ³	ppm	
3.5	5	Human can smell
35	50	irritation to eyes, nose and throat (2 hours' exposure)
70	100	Rapid eye and respiratory tract irritation
174	250	Tolerable by most people (30-60 minutes' exposure)
300	431	Stimulation of the upper respiratory tract
488	700	Immediately irritating to eyes and throat
>1045	>150	Pulmonary oedema, coughing, laryngospasm
1,740-3,134	2,500-4,500	Fatal (30 minutes' exposure)
3,480-6,965	5,000-10,000	Rapidly fatal due to airway obstruction, may also cause skin damage

Table 2. Occupational exposure limit of Ammonia (Republic of Korea, 2023)

Country	Administration of Toxicity	Standard	Value		
Korea	MOEL	PEL	50ppm		
USA	ACCGIH	TLV	TWA 25ppm(8h)		
			STEL 35ppm		
	NIOSH	RELs	Celling 50ppm		
UK	OSHA	PEL	TWA 25ppm(10h)		
			STEL 35ppm		
JAPAN	HSE	WEL	TWA 25ppm(8h)		
CANADA	Minstry of Health	CL	20ppm		
			25ppm		
GERMANY	ESDC&ECCC	WHMIS	25ppm		
			MAK	Excursion limit	25ppm
					75ppm(under 3min)
			125ppm		

3. 벙커링 시나리오 설정

3.1 벙커링 대상 지역

대상 항만은 우리나라에서 가장 큰 항만인 부산항을 대상 항만으로 선정하였다. 부산항의 허치슨 터미널은 1978년 개항한 항구로써 5만 DWT급 선박이 접안 할 수 있는 부산항 제 5부두이다. 이 부두는 부산항만 중 인구밀집지역 및 거주 구역과 가장 가까운 항만으로(Kim, 2014), 1,000 세대 이상이 거주하는 아파트 단지과 800m 가량 밖에는 떨어져 있지 않아 암모니아 누출에 대한 평가가 필요할 것으로 사료되었다. 따라서 부산항의 허치슨 컨테이너 터미널의 선석에서 접안한 컨테이너 선박에 소형 암모니아 벙커링 선박이 접안 후 벙커링을 하는 것으로 가정하였다.

3.2 벙커링 대상 선박

본 연구에서는 부산항 제 5부두에 접안이 가능한 가장 큰 크기인 5만dwt급 선박인 4,300 teu급 컨테이너 선박(54,344 dwt)을 대상 선박으로 선정하였으며 제원은 Table 3과 같다.

Table 3. Ship's Particulars (Capital Exeuctive, 2023)

Ship's spec	Value
LOA	260.32 m
Breadth	32 m
Draught(design)	19.2 m
Deadweight	54,344 MT
Main Engine	MAN 8K60MC-C
MCR	36,560 kW
NCR	24,408 kW
SFPC	177 g/kWh
F.O TANK	abt 6,200 m ³ (HFO)

3.3 벙커링 상태 및 누설 가정

암모니아 연료추진선박의 탱크 저장방식은 크게 냉동식, 준냉동식, 가압식 3가지로 분류할 수 있으며(Heo, 2021), 현재 암모니아 운반선에 적용되는 냉동식(-34℃, 대기압) 즉 액화 상태의 탱크로 계산하였다.

탱크용량의 경우 6,200m³의 연료탱크내에 비중 0.99, 총발열량 41.6MJ/kg으로 가정하여 발열량을 추정한 뒤, 암모니아의 비중0.88, 발열량 18.6MJ/kg 탱크 충전 85%를 가정하여 18,352m³의 탱크 용량을 산출하였다.

연료 공급방식에 따라 탱크로리, 벙커링 선박, 터미널 파이프가 고려되어질 수 있다(Yang, 2023). 현재 선박의 크기 및 제원을 고려할 경우 탱크로리 벙커링은 현실적으로 불가능하며, 항만 벙커링의 경우 현재까지 기본계획에 포함되어 있지 않아, 위험 화학시설 설치가 사실상 어려워, 가능성이 가장 높은 연료 공급 방법인 벙커링 선박을 이용하는 것으로 가정하였다. 벙커링 선박은 Table 4와 같이 선행연구인 싱가포르 NTU에서 적용한 선박의 제원은 사용하였다.

Table 4. Bunkering Condition (Yang, 2023)

Bunkering Condition	Value
Temp & Pressure	-33.4℃, atmospheric pressure
Connection	8" pipeline(Flange), 40m long
Leak time	Case.1 60 sec (ESD systmes et al) Case.2 10 min
Bunkering ship Tank Capacity	20,000m ³
Fuelled ship Tank Capacity	18,352 m ³

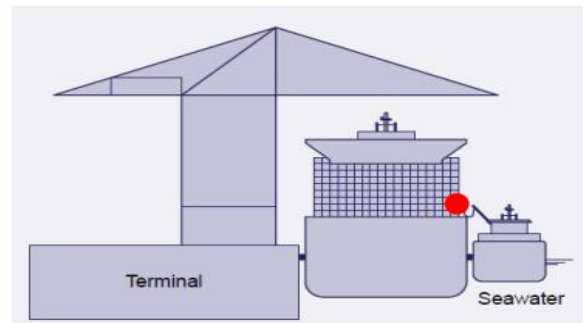


Fig. 1. Bunkering condition.

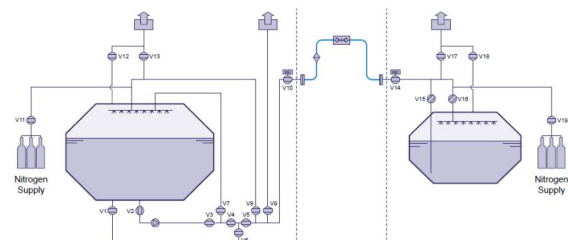


Fig. 2. PFD of Fully refrigerated ammonia bunkering.

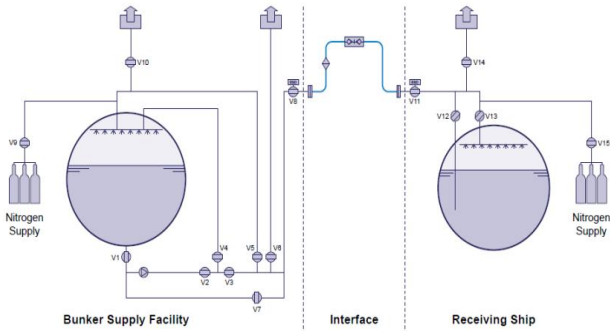


Fig. 3. PFD of Fully compressed ammonia bunkering.

암모니아 누설의 가정은 암모니아 병커링 연결부의 파공으로 누설 후 60 초 후 선박 승조원이 발견, ESD를 발동하여 ESD 정지 권고 시간인 60초 내에 정상 작동한 것으로 가정하였으며, 초도 대응이 불가능한 상황을 고려하여 10분 누출도 가정하였다.

파공의 크기는 미국석유화학협회의 API 581, 위험기반 검사 기준 중 누출공 산정 방법에 따라 파열형으로 산정하여, 6inch로 산정하였다(API, 2008).

4. 암모니아 독성 위험지역 해석

4.1 소프트웨어 선정

우리나라의 위험 화학물질을 다루는 시설은 화학사고예방관리계획서의 장외영향평가를 수행해야하며, 이는 환경부 산하 화학물질안전원에서 개발한 작성지원 프로그램(Korea Off-site Risk Assessment Supporting Tool)를 사용해야 한다. 이 프로그램은 화학사고예방관리계획서 작성을 지원하는 프로그램으로 피해영향범위, 위험성 분석등을 국내 지도, 인구, 기상청 데이터와 연계하여 분석할 수 있도록 되어져 있다.

KORA에서는 화학사고가 발생한다면, 시설을 운전조건, 사고지역, 기상상황등을 파악하여 독성, 폭발 등의 피해예상범위를 산정하고, 인근지역에 미치는 영향을 평가하는 프로그램으로 미국의 환경보호청(EPA)에서 개발한 화학물질 위험평가 소프트웨어 ALOHA를 기반으로 만들어졌다. 따라서 위험화학물질 취급 시설에서의 시나리오를 바탕으로 사고피해범위 및 경감 수준을 평가할 수 있는 국내에서 개발한 유일한 프로그램으로 본 연구의 독성위험평가에 사용하였다.

4.2 주요 인자 설정

화학사고예방계획 프로그램인(KORA)의 정확한 피해예상 지역 도출을 위해서는 Table 5와 같은 데이터가 입력되어야 한다.

Table 5. Input data for using KORA (Kim, 2023)

Analysis Factor	Input data
Submission and description criteria	Facility, Factory
	Judgment of criteria
Analysis of Accident effect	Position
	Weather Condition
	Scenario
	Information of Surrounding environment
Risk Analysis	Management of Scenario
	Risk Analysis
Basic Information	General information
	Harmful Chemical Substance
Processing and Facility information	General of Facility
	Fixed Risk monitoring system
Environment Assessment	Result of Judgment

날씨와 연관된 주요한 입력 인자는 풍향, 풍속, 습도, 기온으로 2022년 부산기상대에서 측정된 월평균 값을 사용하였으며, 이 자료는 기상청 종관기상관측자료(ASOS, Automated Synoptic Observing System)를 기반으로 Table 6과 같이 산출하였다(KMA, 2023).

Table 6. Climate data (KMA, 2023)

Month	Average Temp (°C)	Average Relative humidity (%)	Most frequent wind direction	Average wind speed (m/s)
Jan	4.0	41	NW	2.8
Feb	3.6	44	W	3.3
Mar	10.5	65	NE	3.4
Apr	14.9	64	NE	3.3
May	19	60	S	3.2
Jun	21.7	84	SW	4.3
July	26.2	84	S	2.6
Aug	26.4	81	S	3.7
Sep	22.9	76	NE	3.0
Oct	17.6	64	NE	3.1
Nov	14.4	57	NE	2.7
Dec	3.3	44	NW	3.3

4.3 액화 암모니아 병커링 누설 영향평가(1분)

액화 암모니아(-35℃)에서 병커링 호스의 누설로 인하여 1분간 암모니아가 누출된 상황을 가정하였다. 사람이 불쾌함을 느낄 수 있는 5ppm, 정상 작업 조건에서의 25ppm, 그리고 인체의 회복이 불가능한 독성 농도인 300ppm으로 나누어 분석을 수행하였다.

시나리오 분석을 위한 주요 인자는 장소, 날씨조건, 시나리오는 4.2절에서 설정한 주요 인자로 설정하였으며, 암모니아 연료추진선박의 탱크용량은 18,352m³으로 진행하였다.

Table 7. Toxicity effect Area (1 min)

Toxicity	Toxicity effect Area
5 ppm	7,545.7 m
25 ppm	2722.1 m
300 ppm	393.2 m



Fig. 4. Hazard area of 5 ppm at 1 min Leak.



Fig. 5. Hazard area of 300 ppm at 1 min Leak.

Fig. 4 및 Fig. 5는 Case 1으로 암모니아가 병커링 중 1분간 누출이 되었을 때의 영향범위이며, Table 7과 같이 독성 값과 범위가 도출되었다. 사람이 암모니아의 독성을 후각으로 파악할 수 있는 영향범위가 7,545.7m에 달하며 부산시내 대부분이 위험지역에 포함된다. 영향범위내의 인구수는 약 133만명으로 상당수의 부산시민이 독성의 위험에 노출 될 우려가 있다.

인체에 영향을 미치는 300ppm 이상 독성에 위험 노출되는 지역은 393.2m로 항만 및 접안된 선박에만 영향을 미칠 것으로 보이며, 가까운 크루즈 여객 터미널에도 약 100ppm 가량의 영향을 미칠 것으로 예상됨으로 이에 따른 피난 대책 수립이 필요해 보인다.

4.4 액화 암모니아 병커링 누설 영향평가(10분)

액화 암모니아(-35℃)에서 병커링 호스의 누설로 인하여 10분간 암모니아가 누출된 상황을 가정하였으며 시나리오 분석을 위한 주요인자는 1분간 누설평가와 동일하게 설정하였다. 독성농도는 앞의 연구와 같이 5ppm, 25ppm, 300ppm으로 영향평가를 수행하여 Table 8과 같이 결과를 얻었다.

Table 8. Toxicity effect Area (Ref type, 10min)

Toxicity	Toxicity effect Area
5 ppm	10,000.0 m
25 ppm	3035.5 m
300 ppm	1796.4 m

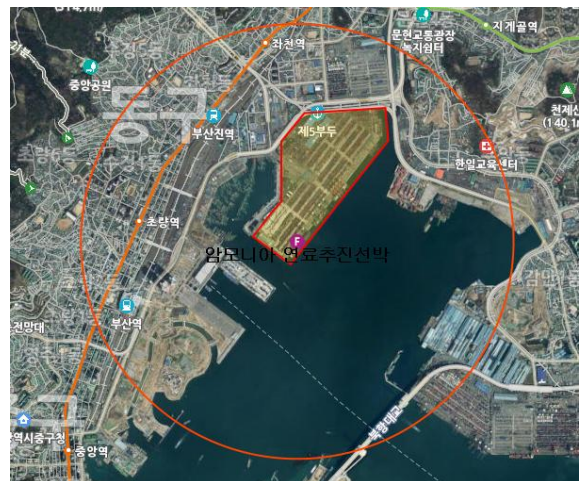


Fig. 6. Hazard area of 300ppm at 10 min Leak.

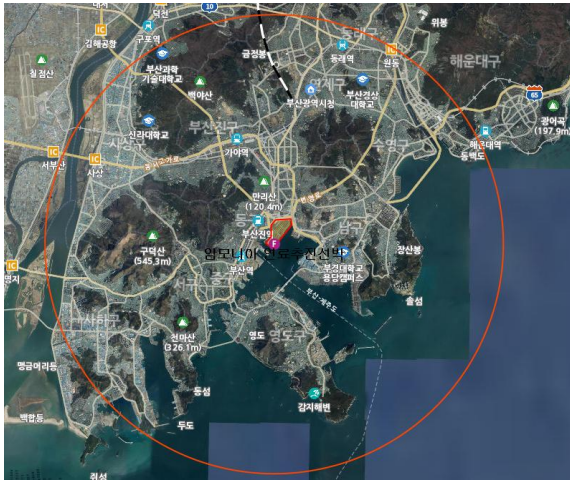


Fig. 7. Hazard area of 5ppm at 10 min Leak.

Fig. 6 및 Fig. 7는 Case 2로 암모니아가 병커링 중 10분 간 누출이 되었을 때의 영향범위이며 독성값은 Table 8과 같다. 사람이 암모니아의 독성을 후각으로 파악할 수 있는 영향범위가 10,000m에 달하며 부산시내 대부분이 위험지역에 포함된다. 영향범위내의 인구수는 약 207만명으로 상당수의 부산시민이 독성의 위협에 노출 될 우려가 있다.

인체에 영향을 미치는 300ppm 이상 독성에 위험 노출되는 지역은 1796.4m로 항만 배후지역에 영향을 미칠 것으로 보이며, 피해 예상인구는 약 3.8만명으로 예상된다. 특히 학교, 대단지 아파트 등이 밀집 되어있는 동구의 많은 피해가 예상된다.

5. 결론

선박에서 발생하는 온실가스 저감을 위한 다양한 조치가 마련되고 있으며, 특히 수소, 암모니아 등의 대체연료의 필요성이 대두됨에 따라 연료 특성을 고려한 안전 기준 마련 및 상용화를 위한 기술 개발 등의 노력이 진행되고 있다.

본 연구에서는 무탄소 연료인 암모니아연료의 특성을 고려하여, 기존의 선박에 대한 영향보다는 선박 접안시 항만 및 배후지역에 암모니아 연료 누설에 따른 독성 영향에 대하여 평가하였다. 1분 이내의 누설이 발생되더라도 부산 대부분 지역에 후각으로 암모니아를 인지할 수 있는 5ppm의 누출이 발생할 수 있다. 또한 인체에 치명적인 영향을 주는 300ppm 누출의 경우 1분이내의 항만 및 인근지역에 영향을 미치며, 10분 이상 지속될 경우 인근 1796.4m 지역까지 영향을 미칠 수 있는 것을 확인하였다.

현재 암모니아의 병커링과 관련된 관계 법제도가 마련되어 있지 않은 상황이다. 육상에서 암모니아를 관리하는

법령은 고압과 저압으로 나뉘며, 저압은 화학물질관리법, 고압의 경우 고압가스안전관리법에 따라 관리 되어 지고 있다. 고압의 경우 사고가 발생하더라도 관련 환경관서에서는 사고 시설의 자료 확인이 불가하여 사고 대응이 지연 및 제한이 있다. 누출사고 발생시 인근 주민의 안전에 중요한 대피 명령의 경우 지자체에서 결정할 수 있기 때문에, 암모니아 병커링 누설의 경우 환경관서, 지자체, 소방, 항만등의 유기적인 협력이 필요하다

현재 육상과 동일한 규정 적용 또는 화석연료 선박 병커링 누설대응계획을 적용한다면 암모니아 누설사고에 대한 적절한 대응은 어려울 가능성이 높다. 따라서 암모니아 병커링 관련 법제도 정비시 항만, 소방, 지자체, 환경관서 등의 대응 계획이 유기적으로 수립될 수 있는 제도적 장치가 필수적으로 고려되어야 할 것으로 사료되며, 화학사고예방관리계획서와 같은 육상의 위험평가 기법을 통하여 위험성이 높은 항만에서는 암모니아 병커링의 제한을 두는 등의 위험관리제도 방안 마련이 필요하다.

사 사

이 논문은 2023년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(20220633, 친환경선박 실용화를 위한 법제도개선 및 IMO 의제개발) 2023년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(NRF-2022R1A2C11092562) 논문입니다.

References

- [1] API 581(2008), Risk Based Inspection Technology.
- [2] Belgium, Canada, Japan, Liberia(2023), CCC9/4/9, Comments on the report from the Correspondence Group on Amendments to the IGF Code and Review of the IGC Code.
- [3] Kim, Dabin(2023), master degree, A Study on the Prediction of Chemical Accident Damage at Hazardous Chemicals Handling Workplaces in Busan Metropolitan City
- [4] Heo, Eunjung(2021), Korean Register, Report for ammonia fuelled ship
- [5] Capital Executive(20230, <https://www.capital-executive.gr/our-fleet/container-carriers/14-hyundai-paramount>.
- [6] Kim, B. and Y. Ahn(2021), A Study on the Development of National Impact Assessment Guidelines for Greenhouse Gas Reduction Measures of IMO, Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety, Vol. 27, No. 2, pp. 286-294
- [7] Kim, Kyungsu(2014), Busan Development Institute, Comprehensive

Development Plan for the Surrounding Areas in the Second Stage of North Port Redevelopment,

- [8] KMA(2023), <https://data.kma.go.kr/data/grnd/selectAsosRltmList.do?pgmNo=36>
- [9] Park, H. S., B. R. Kim, S. W. Park, and I. H. Jeong(2020), A Study on Policy Directions for Responding IMO's Regulation on GHG Emission, Korea maritime insitute (KMI), pp. 1-249.
- [10] Republic of Korea(2023), CCC9/3/2, Study on Safety Assessment of Ammonia Toxicity.
- [11] SIGTTO(2021), Recommendation for Emergency Shutdown and Related Safety System.
- [12] Yang, Mengyao(2023), Ammonia as a Marine fuel - Consequences from Accidental Release and Mitigation Measures, 2023 MPA ammonia fuel Workshop.

Received : 2023. 10. 20.

Revised : 2023. 11. 29.

Accepted : 2023. 12. 29.