

# 해양산업시설 배출 위험유해물질(HNS)의 우선순위 선정을 위한 평가인자 및 평가체계 도출

최훈\* · 강원수\*\* · 황운기\*\*\* · 이문진\*\*†

\* 선박해양플랜트연구소 해양공공디지털연구본부 연구원, \*\* 선박해양플랜트연구소 해양공공디지털연구본부 책임연구원,  
\*\*\* 국립수산과학원 갯벌연구센터 센터장

## Development of Scoring and Ranking System Methodology for Prioritization of Hazardous and Noxious Substances (HNS) Discharged from Marine Industrial Facilities

Hoon Choi\* · Wonsoo Kang\*\* · Un-Ki Hwang\*\*\* · Moonjin Lee\*\*†

\* Researcher, Ocean and Maritime Digital Technology Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO), Daejeon 34103, Korea

\*\* Principal researcher, Ocean and Maritime Digital Technology Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO), Daejeon 34103, Korea

\*\*\* Center leader, Tidal Flat Research Center, National Institute of Fisheries Science (NIFS), Gunsan, 54014, Korea

**요약** : HNS(Hazardous and Noxious Substances)는 해양환경에 유입될 경우 인간 및 해양생물에게 해를 끼치거나, 해양시설에 부식 등의 손상을 입히거나 기타 해역의 이용을 방해할 수 있다. HNS의 규제나 관리를 위해서는 과학적인 방법을 통하여 우선순위 대상의 선정이 필요하며 이러한 방법론으로 CRS(Chemical Ranking and Scoring)기법이 전세계적으로 개발되어 사용되고 있다. 본 연구에서는 해양산업시설로부터 해양환경으로 배출되는 HNS의 체계적 관리를 목적으로 국내외 CRS 체계를 비교 분석하였으며, 이를 통하여 우선순위 선정 도출체계를 확립하고 연구대상 지역 및 대상시설을 선정하고 우선순위 선정체계 주요인자를 도출하였다. 또한 주요인자별 세부인자 및 정량적 배점체계를 구축하였다. 주요인자는 각각 사회적 관심과 이슈(20점), 물질거동(10점), 노출가능성(30점), 독성(35점), 해양이용에의 영향(5점)을 상대적으로 부여하였으며, 독성과 물질거동 세부인자의 곱을 통하여 100점만점으로 환산가능하도록 적용하였으며, 불확실성점수(Uncertainty score)와 불확실성 비율(Uncertainty ratio)와 혼합물에 대한 고려방안을 제시하였다. 본 연구결과는 해양산업시설로부터 배출/유출되는 HNS 관리를 위하여 우선순위 선정시 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**핵심용어** : 해양산업시설, 위험유해물질, 화학물질 우선순위 설정체계, 노출, 독성

**Abstract** : Hazardous and noxious substances (HNS), when discharged into the marine environment, lead to effects on humans and marine organisms, corrosive damage to marine facilities, and interference in using marine areas. For the regulation and management of HNS, it is necessary to select prioritization through scientific methods. To address this, the Chemical Ranking and Scoring (CRS) technique has been developed and used worldwide. In this study, a comparison of various CRS systems was conducted to establish a prioritization system for systematic management of HNS discharged into the marine environment from marine industrial facilities. First, the target chemicals and target facilities were selected. Second, the main factors of the prioritization system were derived. Third, detailed factors and a quantitative scoring system were established for five major factors. The five main factors were relatively assigned as social interest and issues (20 points), exposure potential (30 points), toxicity (35 points), behavior (10 points), and interference with marine uses (5 points). The method is applied such that it can be converted to 100 points through the product of toxicity and detailed factors of behavior. Uncertainty scores, uncertainty ratios, and mixtures were proposed for consideration. The outcomes of this study are expected to be used for prioritization for the management of HNS discharged or spilled from offshore industrial facilities.

**Key Words** : Marine industrial facilities, Hazardous and Noxious substances, Chemical Ranking and Scoring, Exposure, Toxicity

\* First Author : lv85choi@kriso.re.kr, 042-866-3363

† Corresponding Author : moonjin.lee@kriso.re.kr, 042-866-3614

## 1. 서론

현대 사회에서 화학물질은 생산량과 사용량이 지속적으로 증가하고 있으며(Arnot et al., 2006; Muir and Howard, 2006), 유럽 상업용 화학물질 인벤토리(EINECS)에 따르면 유럽 내 상용화된 화학물질은 106,212종에 달하고(ECHA, 2023), 한국의 경우 등록되어 관리되는 화학물질은 45,839종에 이른다(National Chemicals Information System, <https://icis.me.go.kr>). 이렇게 다양한 종류의 화학물질은 광범위하게 생산되고 사용되어 환경으로 배출된다. 특히 해양환경은 육상에서 발생하는 오염물질의 주요한 흡수원으로 여겨지며(Zhang et al., 2013), 인구밀도가 높고 인간활동이 집중된 연안의 해양환경에는 상당한 화학물질이 유입되고 있다(Dachs and Méjanelle, 2010; Brumovský et al., 2016; Wang et al., 2020). 환경에 유입된 화학물질 중 일부는 해양환경 및 생물에 장·단기적으로 예측할 수 없는 영향을 줄 수 있어(Guillén et al., 2012) 상시적인 관리가 필요한 상황이다. 우리나라의 경우 수질 및 수생태계의 보호를 위하여 배출수역의 안전성과 목표수질 등을 고려하여 규제대상물질과 배출허용기준을 적용한다(US EPA, 2000a, 2000b). 하지만 해양환경관리법에서는 원칙적으로 해양시설로부터 오염물질의 해양배출을 금지하고 있으며, 해양시설로부터 발생하는 기름 및 유해액체물질의 처리기준 및 방법은 물환경보전법에 위임하고 있다(Lee et al., 2021; Choi et al., 2021). 특히 2019년 국토교통부 통계에 따르면, 우리나라의 연안지역에는 전국 산업단지 64.8%가 위치하고 있어 산업활동으로 인한 화학물질의 해양환경 유입에 대한 우려가 상당함에도 해양환경에 서식하는 생물과 인간에 독성과 위해성이 존재하는 유해물질을 관리하는 체계는 전무한 상황이다.

위험유해물질은(HNS)은 해양환경에 유입될 경우 인간의 건강, 생물 자원 및 기타 해양 생물에 위험을 초래할 가능성이 있는 기름 이외의 물질로, 해양시설에 부식 등의 손상을 입히거나 기타 해역의 이용을 방해할 수 있는 물질의 종류로(IMO, 2000), 국내에는 선박오염방지규칙으로 799개가 지정되어있다. 지금까지 기름 유출 및 오염과 관련된 독성과 위해성에 대해서는 상당한 수준의 연구가 진행된 바 있지만 HNS에 대해서는 매우 제한적으로 수행됐으며, 주요 내용도 해상운송 중 유출 사고에 대한 것이 대부분이다(Solé et al., 2008, Cunha et al., 2015, 2016; Neuparth et al., 2011). 또한 기름의 경우 연안환경에 배출되면 물과 섞이지 않고 해수 표면에 떠다니는 등 거동과 환경에 영향을 예측하는 것이 용이하지만, HNS는 물질의 특성에 따라 다양한 거동(침강, 부유, 용해, 가스, 증발 등)을 나타내므로, 해양환경 조건별로 해양 생물이나 인간에게 예측 불가능한 영향을 미칠 수 있다(CEFAS,

2009). 그럼에도 배출된 HNS가 생물에 미치는 영향에 관한 연구는 대부분 담수 생물을 대상으로 수행한 것이기 때문에 해양 생물에 대한 영향을 예측하고 대비하기는 매우 어려운 상황이다(Neuparth et al., 2011). 이에 해양시설로부터 배출되는 HNS의 관리를 위한 기초연구를 수행하려면 물질의 물리·화학적 및 독성학적 특성에 대한 자세한 지식이 필요하지만(Cedre, 2009), 수백개에 달하는 HNS에 대해 과학적 데이터를 조사하는 것은 비현실적인 상황이며(Neuparth et al., 2011) 이에 다양한 우선순위 전략의 개발이 필요한 상황이다.

화학물질의 규제 및 모니터링 목적으로 화학물질을 식별하고 순위를 매기는 우선순위설정 체계는 대부분 위험평가(Risk assessment) 개념에 기반하여 노출과 영향의 관계를 통해 정해진다(Guillén et al., 2012). 과학적이고 정량적인 방법으로 화학물질을 관리하기 위하여 우선순위 물질을 선별하는 CRS(Chemical Ranking and Scoring) 시스템은 독성과 노출로 결정되는 위해성이 높은 물질을 선정하기 위해 미국, 유럽, 캐나다 등에서 개발되어 왔으며(An et al., 2008; An et al., 2009), 유해화학물질 관리를 위한 의사결정과 분석을 용이하게 하여 시간 및 소요제원의 절약을 돕는다(US EPA, 1994; Swanson et al., 1997; Kim et al., 2003, An et al., 2008; An et al., 2009). 하지만 다양한 우선순위설정 체계방식에 따라서 노출과 영향을 정의하고 정량화는 방식에 차이가 존재한다. 특히 HNS는 인체에 위험하고 유해한 화학물질을 인위적으로 재그룹한 집합으로 물질의 특성이 다양하고 제대로 규명되지 않았을 뿐더러 특성정보가 부족하여 기존의 방식으로 구분지어 규제되기엔 제한점이 존재한다.

이에 본 연구에서는 해양산업시설에서 배출되는 HNS의 위험평가요소와 그 평가프로세스에 대한 정보를 정의하고 평가인자를 정량화하는 방식을 해양환경(특히 연안환경)에 적용하고자 하는 평가체계를 도출하고자 하였다.

## 2. 연구방법 및 사례연구

### 2.1 연구방법

본 연구는 크게 네 단계로 구성된다. 첫째, 국내외 대표적 CRS 개발사례와 HNS의 우선순위 선정 체계 연구사례들의 특징들을 비교하였다. 둘째, 해양산업시설 및 HNS를 명확하게 정의하여 연구 대상을 정확하게 설정하였다. 셋째, 정의된 연구 대상을 기반으로 하는 단계별 우선순위 선정 체계를 구성하였다. 넷째, 단계별 체계에 따른 주요인자를 선정하고 가중치를 설정하는 등 세부인자를 구성하였다.

국내외 사례조사를 위하여, 기존 국내외 주요 CRS체계 개발 사례로 미국 US EPA의 TSCA(The Toxic Substances Control Act)에서 사용하는 CHEMS, 유럽 REACH(Registracion, Evaluation,

Authorization and Restriction of Chemical)에서 사용하는 EURAM, 국내 인체 및 수생태보호를 목적으로 지표수를 대상으로 우선관리대상 유해물질 선정기법으로 개발된 바 있는 CRAFT (Chemical Ranking of surfacewater pollutants)를 비교평가하였다. 또한, HNS 우선순위를 선정하기 위한 연구(Neuparth et al., 2011, Kim et al., 2015; Cunha et al., 2016)를 동시에 비교평가하여 물질의 특성, 인체건강보호, 연안생태계 및 해양생물보호, 해양 이용 영향을 고려하며 해양산업시설 배출되는 HNS를 대상으로 하는 우선순위 선정체계를 제안하고자 하였다.

## 2.2 기존 CRS체계 사례연구

화학물질의 우선순위를 선정하기 위한 CRS 시스템은 국제적으로 1990년대부터 미국, 캐나다, 유럽 등지에서부터 CHEMS-1, SCRAM, ARET, EURAM 등을 개하여 사용하고 있으며(Kim et al., 2003; Park et al., 2005; Choi et al., 2005; An et al., 2008; An et al., 2009) 국내의 경우 2005년 CRS-KOREA의 개발을 시작으로 수질유해화학물질, 식품오염물질, 토양, 의약품 등 다양한 분야에서 개발·적용하여 사용하고 있다(Park et al., 2005; Yang et al., 2010; Nam et al., 2011; Kim and Park, 2022). 한편 HNS의 경우 지금까지 유럽과 국내에서만 우선순위 물질을 선별하려는 시도가 있었으나, 주로 선박을 이용해 해상유통되는 HNS의 사고·유출과 관련된 목적을 가지고 있어(Neuparth et al., 2011; Kim et al., 2015; Cunha et al., 2016; Kim et al., 2019), 산업시설에서 사용되고 육지로부터 배출되는 HNS에 대해서는 연구가 전무한 상황이다. 이에 국내의 대표적인 CRS사례인 미국의 CHEMS, 유럽의 EURAM, 한국의 CRAFT와 HNS의 우선순위를 설정하고자 시도한 사례 3건을 비교하고자 하였다.

CHEMS, EURAM, CRAFT는 전통적인 화학물질 우선순위 선정 체계로서 개발 및 사용 목적의 경우 CHEMS는 제공되는 화학물질 배출자료를 평가하는데 목적이 있으며(US EPA, 1994; Swanson et al., 1997), EURAM은 연간생산량 천 톤 이상 물질의 유해화학물질 순위를 결정하는 방법이다(Hansen et al., 1999). CRAFT는 지표수를 대상으로 특성을 반영하여 수질 및 수생태계를 보호하고자 하는 관리체계이다(Nam et al., 2011). 공통적으로 (잠재적)노출, 독성의 인자를 사용하여 위해성을 기반으로 평가하지만, CRAFT의 경우 사회적 이슈를 주요 이슈로 포함하여 평가하는데 사용한다. CHEMS, EURAM, CRAFT의 주요 인자별 세부평가인자는 Table 1과 같다.

HNS를 대상물질로 하는 대표적인 우선순위 선정연구인 Neuparth et al.(2011)의 경우 유럽 해역에서의 HNS 운송사고를 통해 유출된 사례가 있는 23종의 HNS의 우선순위를 선정하였고, Kim et al.(2015)의 경우 해양환경관리법에 등록된 유

해액체물질 및 해상운송량 자료가 존재하는 585종을 대상으로 점수화를 통해 우선관리물질 상위 20종을 선정하였으며, Cunha et al.(2016)의 경우 유럽에서 사고사례가 존재하는 24종의 물질(HASREP, 2005에서 최초 선정)을 대상으로 우선순위를 선정하였다. Neuparth et al.(2011)과 Cunha et al.(2016)의 경우 이미 사고가 발생한 바 있는 물질을 대상으로 우선관리 대상을 선정하기 위한 연구를 하였다는 점에서 공통점을 지니지만, Neuparth et al.(2011)에서는 GESAMP의 위해성평가 체계를 기반으로 물동량과 생물축적, 생분해, 급성독성, 수송량 등의 인자를 고려했다면 Cunha et al.(2016)에서는 HNS의 물리화학적 특성, 물리화학적 분해 및 생분해, 생체축적/생체내 변화, 독성(생태독성, 인체독성)을 주요인자로서 고려했다는 점에서 차별점을 갖는다. 반면에 Kim et al.(2015)의 경우 위해성과 잠재적 노출을 고려하는 것은 여타 CRS 기법과 유사하지만 물동량, 발화점, 인화점 등을 고려한다는 점에서 한국의 지역특이적인 HNS 사고를 대비하기 위한 체계라는 점에서 특이성을 지닌다(Table 1).

하지만 HNS는 해양 사고로부터만 기인하지 않는다. 국내의 경우 2014년부터 2022년까지 연평균 82.5회의 화학물질 사고가 발생한 바 있으며, 이 중 HNS 및 해양산업시설이 대상인 경우도 존재한다(화학물질안전원 화학물질종합정보시스템, <https://icis.me.go.kr>). 다양한 CRS체계 및 HNS 우선순위 설정 사례, 그리고 HNS관련 사고현황으로부터 확인할 수 있듯이 넓은 범위의 HNS를 대상으로 하는 우선순위 관리체계는 독성, 노출을 고려할 뿐만 아니라 지역 대표성, 사고 위험 등을 폭넓게 고려해야만 HNS와 관련된 대응체계를 구축하기 위한 의사결정에 도움이 될 것이다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 해양산업시설 배출 HNS 우선순위 선정 도출체계 확립

전통적으로 화학물질 우선순위 선정체계를 도출하기 위한 방법은 아래와 같이 크게 네가지로 구분될 수 있다. 첫째, 사회적으로 문제를 야기했거나 문제가 될 가능성이 높은 물질, 둘째, 다양한 독성자료를 비교 검토하여 우선순위를 선정하는 방법, 셋째, 생산량(사용량), 잔류성, 농축성 등 환경적으로 노출 가능성이 높은 물질을 선정하는 방법, 넷째, 독성 및 노출가능성을 배점하여 우선순위를 정하는 방법이다(Kim, 2017). 독성과 노출가능성을 동시에 감안하는데 번째 방법은 인체와 환경독성과 노출을 고려하는 위해성의 개념과 일치하며 국내외에서 다양하게 사용되는 화학물질 우선순위 선정체계의 도구로 사용된다(Kim, 2017). 본 연구를 통해 우선순위 선정체계를 도출하고자 하는 HNS는 위험하고 유해한 물질이므로 인간의 건강이나 해양생물에 위

해양산업시설 배출 위험유해물질(HNS)의 우선순위 선정을 위한 평가인자 및 평가체계 도출

Table 1. Comparison of several CRS (Chemical Ranking and Scoring) methods for general chemicals and prioritization methods for HNS

Prioritization methods	General chemical prioritization method			HNS prioritization method		
	CHEMS	EURAM	CRAFT (Nam et al., 2011)	Neuparth et al., 2011	Kim et al., 2015	Cunha et al., 2016
Factors for prioritization	<b>[Exposure potential]</b> ·Bioaccumulation ·Persistence(Hydrolysis degradation, Biological oxygen demand half-life) ·Emission(Release-weighting factor)	<b>[Environmental score]</b> ·Emission ·Biodegradation ·Toxicity ·Assessment factor	<b>[Exposure]</b> ·Bioaccumulation ·Persistence ·Wastewater transfer ·Emission to water body/Circulation amount	<b>[Basically based on hazard evaluation procedure assessment of GESAMP<sup>1</sup>]</b> ·HNS volumes transported ·Reported Incidents	<b>[Exposure]</b> ·Tonnage shipped ·Persistence ·Bio-accumulation ·Flash point ·Ignition point ·Vapour pressure ·Water solubility	<b>[Physicochemical properties]</b> ·Behaviour ·Relative molecular mass ·Density ·Vapour pressure ·Water solubility ·Dynamic viscosity ·Melting point, ·Boiling point ·Volatilization half-life, Fugacity, Persistence
	<b>[Toxicity-human health]</b> ·Oral acute toxicity ·inhalation toxicity ·Carcinogenicity ·Chronic toxicity ·Mutagenicity, Development toxicity, Reproduction toxicity, Neurotoxicity,	<b>[Human health score]</b> ·Carcinogenicity ·Genetic Toxicity ·Reproductive toxicity ·Respiratory sensitization ·Repeated dose toxicity ·Acute toxicity ·Irritation ·Skin sensitization ·Reproductive screening test ·Chernoff/Kavlock screen test	<b>[Toxicity-Human]</b> ·Carcinogenicity ·Acute toxicity ·(sub)Chronic toxicity ·Other toxicity	<b>[Cut-off values for prioritization using below factors]</b> ·Bioaccumulation ·Biodegradation ·Acute toxicity ·Traffic ranking	<b>[Toxicity-Human]</b> ·Acute ·Chronic ·Carcinogenic ·Other toxicity (Mutagenicity, Genotoxicity, Reproductive, Developmental toxicity, Neurobehavioral, Immunotoxicity)	<b>[Physicochemical degradation and biodegradation]</b> ·Atmospheric oxidation ·Biodegradation rate ·Aerobic biodegradation probability, Primary aerobic biodegradation half-life, Ultimate aerobic biodegradation half-life ·Hydrocarbon biodegradation half-life, Anaerobic biodegradation probability
	<b>[Toxicity-environmental]</b> ·Acute oral toxicity to rodent ·Acute toxicity to fish ·Chronic toxicity to fish	<b>[Distribution]</b> ·Biodegradation ·Persistence ·Boiling point ·Vapor pressure ·Log K <sub>ow</sub>	<b>[Toxicity-Environment]</b> ·Acute toxicity ·(sub)Chronic toxicity		<b>[Toxicity-Aquatic ecological]</b> ·Acute ·Chronic	<b>[Bioaccumulation/Biotransformation]</b> ·Biotransformation half-life ·Partition coefficient ·Bioaccumulation rate ·Adsorption coefficient
			<b>[Issue]</b> ·The number of state regulation ·Incident ·Other properties ·Pollution level			<b>[Toxicity-Aquatic]</b> ·Acute/Chronic toxicity
		<b>[Reliability]</b> ·Bioaccumulation ·Persistence ·(Sub)Chronic aquatic toxicity ·Degree of state regulation			<b>[Toxicity-mammalian/human health effects]</b> ·Acute(Oral, Percutaneous, Inhalation, Skin irritation/corrosion, Eye irritation/corrosion) ·Chronic(Carcinogenicity, Mutagenicity, Reprotoxicity, Sensitizing, Aspiration hazard, Target organ systemic toxicity, Lung injury, Neurotoxicity, Immunotoxicity)	
Subject to application	General chemical substances	General chemical substances (for High production volume chemicals)	Hazardous chemicals of surfacewater (159 species)	For prevent spill incidents of HNS (23 species)	For prevent spill incidents of HNS (585 species)	Selected HNS (24 species)

험을 초래하여 사회적으로 문제가 될 가능성이 높다. 또한, 해양 환경 내로 배출되어 해양생물에 미치는 영향에 관한 연구가 부족하므로 다양한 독성자료를 비교 검토하는 등 다양한 방식으로 수집된 인자의 포함이 고려되는 체계를 구축해야 한다. 또한 화학물질이 해양환경 및 인간에게 노출될 가능성을 고려하여 생산량(사용량)과 수계배출량을 포함하여 잔류성, 생물축적성 등을 고려하여야 한다. 하지만 해양 산업시설에서 배출되는 HNS는 일부를 제외하고 대부분 제도적으로 관리되고 있지 않아 파악되지 못한 물질이 다수 포함되어 있으므로 실제 산업계를 포함하여 국내에서 사용되는 양을 고려하기 위해서는 선적되어 수송되는 물질의 물동량 등의 요인도 포함되어야 한다. 이에 본 연구에서는 독성과 노출가능성을 기반으로 HNS의 사회적 관심, 현장 검출빈도 등의 현안사항을 고려하고, 동시에 공신력있는 다양한 독성자료를 검토하여 비교평가를 통해 배점하는 방식의 우선순위 선정체계를 도출하고자 한다(Fig. 1).

일반적으로 CRS는 네 단계로 구성되며(Swanson et al., 1997), 해양산업시설에서 배출되는 HNS의 우선순위 선정을 위한 평가인자 및 평가체계의 도출을 위하여 첫째, 관리 목표의 정의와 범위의 결정, 둘째, 독성 및 노출 등 우선순위 선정을 위한 주요인자 선정, 셋째, 단계별 점수부여 및 순위산정, 넷째, 분석과정에서의 불확실성 등을 포함하여 도출된 결과를 효율적으로 표현하기 위한 위해성 소통(Risk communication) 과정의 네단계를 따르고자 하였다. 본 연구에서도 각 단계별로 목적에 맞추어 명확한 도출이 가능하도록 설계하였다(Fig. 1).

### 3.2 연구대상 물질 선정

본 연구는 산업적 필요성에 사용되는 HNS를 대상으로 하며, HNS란 OPRC-HNS protocol(위험유해물질의 오염사고 대비·대응 및 협력에 관한 의정서)에 의해 해양환경에 유출되었을 시 인간 및 생물에 유해하며, 자원 및 해양환경에 악영향을 미치거나, 기타 해양의 이용을 방해하는 물질로 정의된다. 지금까지 HNS는 IOPC(the International Oil Pollution Compensation)에서 제공하는 HNS convention의 HNS finder에 7,325개가 등록되어 있으나(2023년 7월 기준), 본 연구에서는 해양환경관리법 시행규칙인 선박에서의 오염방지에 관한 규칙(별표 1. 유해액체물질의 분류를 위한 세부기준 및 물질 목록)에 포함된 799종을 국내에 적용가능한 대상물질로 선정하였다.

### 3.3 연구대상 지역 및 대상시설 선정

연구대상 지역의 경우 산업적 필요성에 의해 사용되어 안전한 환경을 대상으로 한다. 구체적으로 화학물질 및 HNS의 유

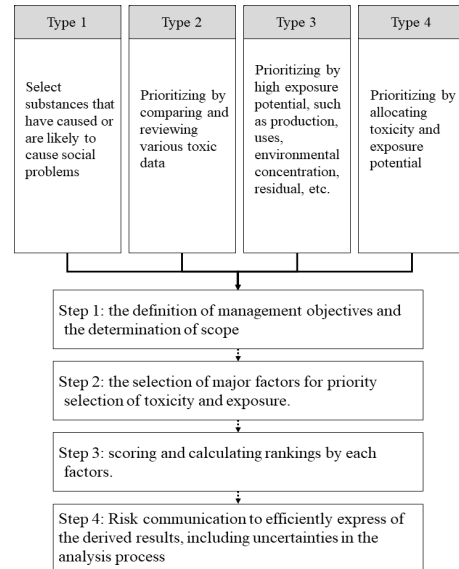


Fig. 1. Four categories and step-by-step development systems for the development of CRS systems for HNS emissions from marine industrial facilities.

출·배출가능성이 존재하는 시설을 대상으로 해양환경관리법 제 2조 제 17호에 해당하는 해양시설(별표 1. 해양시설의 범위)을 대상으로 하였다. 그 외에 해양공간 내에 존재하며 화학물질 및 HNS의 유출·배출가능성이 존재하는 시설을 대상으로 하고자, 해양환경관리법 시행령 제 34조의 해양공간(별표 4. 해양공간의 범위)에 해당하는 해상유역, 항만구역, 어항구역, 먼허수면, 발전소, 제철소, 정유소 중 발전소, 제철소, 정유소를 포함하여 해양산업시설로 정의하였다.

### 3.4 우선순위 선정체계 주요인자 도출

해양산업시설에서 배출되는 HNS의 우선순위를 선정하기 위한 주요인자의 경우 (1) 사회적 관심과 이슈, (2) 물질거동, (3) 노출 가능성, (4) 독성, (5) 해양 이용에의 영향의 다섯 개 인자로 나누어 도출하고자 하였다(Fig. 2).

#### 3.4.1. 사회적 관심 및 이슈

국민의 지적 수준이 높아지고 삶의 질이 향상됨에 따라 화학물질의 유입으로 인한 환경오염과 국민건강에 대한 우려가 사회적으로 주요 쟁점이 되고 있다(Lee et al., 2009). 이에 해양환경으로 배출된 HNS의 사회적 영향 측면으로 국내의 유출 사건 및 사고 빈도, 해양환경 또는 해양산업시설 배출수에서 탐지된 빈도, 국내외 환경기준 제정여부(또는 환경기준 초과 여부)와 현재까지의 국내 관리상태(또는 누출사고 현황)을 반영하여 사회적 관심 및 이슈 인자를 선정하고자 하였다.

해양산업시설 배출 위험유해물질(HNS)의 우선순위 선정을 위한 평가인자 및 평가체계 도출

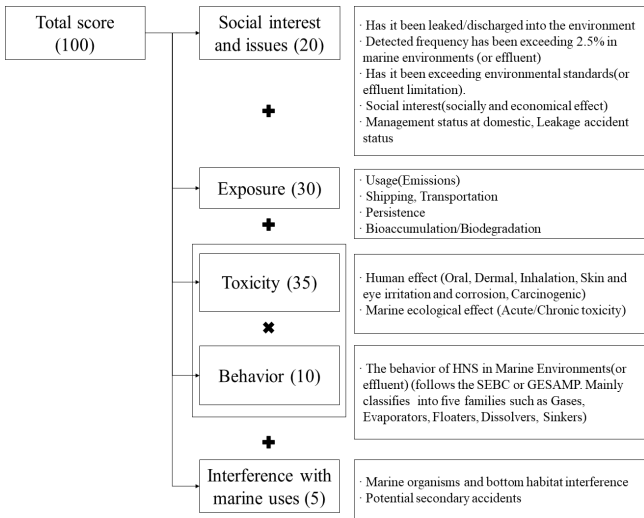


Fig. 2. Five major considerations of the priority selection system for emission HNS of marine industrial facilities.

본 연구에서 사회적 관심 및 이슈는 각 국가나 지역사회 특이적으로 관심을 가져야하는 부분을 반영하는 인자로서, 환경오염이나 유출사고 등으로 인한 관심도가 높은 물질을 고려하여 국내에서 유출사고나 관련 관심사건이 발생한 적이 없는 물질에 0점을, 1번이라도 발생한 적이 있는 물질에 최소점을 배점하고 각 구간을 5건별로 등차로 설정하여 20번 이상의 유출사고나 관심사건이 발생한 물질에 최고점을 배점하여 점수를 산출한다. 또한, 현재까지 많은 국가나 협의체 등에서는 다양한 화학물질의 규제를 위하여 목적과 대상에 따라 우선순위 관리물질을 지정하여 관리하고 있다. 이에 본 연구에서는 국제적인 관심 물질을 반영하고자 하였다. HNS 중 국내외에서 우선순위 관리물질 혹은 규제대상물질로 지정된 적 없는 물질을 0점, 한번이라도 규제대상물질로 지정된 적 있는 물질에 최소점을 배점하고 각 구간을 등비로 설정하여 16번 이상의 규제대상물질로 지정된 적있는 물질에 최고점을 배점하여 점수를 산출한다.

US EPA에서는 Clean Water Act를 통하여 화학적 표준물질이 존재하며, 발생빈도가 최소 2.5%로 보고되거나, 상당한 양의 생산량이 존재하는 물질을 기반으로 우선순위 물질을 선정하여 제시한 바 있다. 이에 본 연구에서는 한번도 검출되지 않은 물질의 경우 0점을 배점하고 한번이라도 검출되거나 2.5% 이상 검출된 물질에 최저점을 배점하며 20% 이상 검출된 물질에 최고점을 배점하여 점수를 산출한다. 생산량의 경우 EURAM과 USPEA에서 사용하는 기존의 CRS 체계를 기반으로 1톤 미만을 0점 10,000톤 이상을 만점으로 하여 10의 제곱수별로 점수를 산출한다. 해양환경관리법상 지정된 유해액체물질은 유통되는 물질을 기준으로 지정되어있어 국내 지정 HNS는 상당수가 혼합물의 형태로 되어있다(Park et al., 2016). 혼합물의 형태는 물질정보를 확인하기 어려우며 표준물질을 확보하기 부적합할 수 있으므로 표준물질의 존재(확보가능) 여부는 우선순위를 선정할 때 고려되어야 할 중요한 인자일 수 있다. 그러므로 본 체계에서는 표준물질이 존재하는 경우 최고점을 배점하고, 표준물질이 존재하지 않는 경우 0점을 배점하여 점수를 산출한다(Table 2).

3.4.2 노출 가능성

노출가능성 인자는 크게 배출량(배출량, 수계배출량, 폐수 이동량), 물동량(선적 수송량), 잔류성, 생물축적성, 생분해성으로 구분된다. 배출량의 경우 국내 화학물질 배출이동량 정보(PRTR; Pollutant Release and Transfer Register)에 기반하여 산출 가능하지만, 표준물질이 존재하지 않거나 혼합물 형태의 HNS의 경우 PRTR정보가 존재하지 않으므로 물동량에 기반하여 노출 가능성 인자를 도출한다. 일반적으로 배출량이 많을수록 환경 내 유입량이 늘어나 환경오염으로 이어져 인간 혹은 생물에게 노출될 가능성이 늘어난다. 배출량의 경우 연간 배출량이 백만 kg 이상이면 최고점 1,000 kg 미만일 때 최소점을 배점한다. 수계배출량의 경우 연간 배출량이 2,500 kg 이상이면 최고점을 배점하고 312 kg 미만일 때 최저점을 배점한다. 폐수 이동량의 경우 연간 폐수 이동량

Table 2. Scoring scheme of social interest and issues assessment factors presented for HNS prioritization

Score	Domestic Issue (incident)	No. of regulation	Detection rate(%)	Produced quantities (mt/year)	Chemical Standard available
5	≥20	≥16	≥20	≥10 <sup>4</sup>	Chemical standard exist
4	10 - 20	8	10 - 20	10 <sup>3</sup> - 10 <sup>4</sup>	
3	5 - 10	4	5 - 10	10 <sup>2</sup> - 10 <sup>3</sup>	
2	1 - 5	2	2.5 - 5	10 <sup>1</sup> - 10 <sup>2</sup>	
1	1	1	<2.5 (at least detected once)	10 <sup>0</sup> - 10 <sup>1</sup>	
0	0	0	no detected (or data non exist)	<10 <sup>0</sup>	Chemical standard non-exist

Table 3. Scoring scheme of toxicity assessment factors presented for HNS prioritization. Since different effects are expected to object depending on the each single HNS, the behavior factors are obtained multiplied by human health and marine ecological factors to derive the final value

Score	Human health (Mammalian toxicity)						Marine ecology	
	Oral toxicity (LC <sub>50</sub> , mg/kg)	Dermal toxicity (LC <sub>50</sub> , mg/kg)	Inhalation toxicity (LC <sub>50</sub> , mg/L/4hr)	Skin irritation and corrosion	Eye irritation and corrosion	Carcinogenic (IRIS, IARC)	Acute (EC <sub>50</sub> , mg/L)	Chronic (EC <sub>50</sub> or NOEC, mg/L)
5	≤5	≤50	≤0.5	-	-	A, 1	≤0.01	≤0.001
4	5 - 50	50 - 200	0.5 - 2	-	-	B(B1, B2), 2A	0.01 - 0.1	0.001 - 0.01
3	50 - 300	200 - 1,000	2 - 10	Corrosive	Corrosive	C, 2B	0.1 - 10	0.01 - 0.1
2	300 - 2,000	1,000 - 2,000	10 - 20	Irritating	Irritating	D, 3	10 - 100	0.1 - 1
1	>2,000	>2,000	>20	Mildly irritating	Mildly irritating	E, 4	100 - 1,000	1 - 10
0				Not irritating	Not irritating		>1,000	>10

이 십만 kg 이상이던 최고점, 10 - 100 kg 구간일 때 최저점을 배점하며, 10 kg 미만일 때 0점을 배점한다. 물동량의 경우 연간 물동량이 만 kg 이상일 때 최고점을 배점하고, 1 - 10 kg 구간일 때 최저점을 배점하며 1 kg 미만은 0점을 배점한다.

일단 환경 내에 유입된 HNS는 환경 내에 오래 잔류할수록 노출 가능성이 커지며 이는 반감기(Half-life in water)를 기준으로 추산한다. 수중에서 반감기가 60일 이상이면 최고점을 배점하고, 7.5일 이하이면 최소점을 배점하여 점수를 산출한다. 반감기로 인하여 잔류할 수 있는 정도와 생물축적성은 직접적인 노출 가능성과 연결될 수 있는 주요한 인자이다. 생물축적성의 경우 BCF값과 Log Pow값으로 점수를 산출하며 BCF값이 4,000 혹은 Log Pow값이 5 이상인 경우 최고점을 배점하고, 1 - 10이거나 1 - 2인 경우 최소점을 배점한다. 1 미만이면 0점을 배점하여 점수를 산출한다(Table 3).

생분해성이란 가수분해 현상을 포함하여 미생물 등에 의해 환경 내에서 분해되는 성질을 말한다. 생분해성을 지니지 않는 경우 최고점을 배점하고, 생분해성을 가지고 있으면 최소점을 배점하여 점수를 산출한다. 하지만 생분해성을 지닌 물질이 분해를 통해 생성된 물질이 더욱 높은 독성을 가지는 경우도 존재하므로 생분해성은 환경적으로 무조건 이점을 지니는 것은 아닐 수 있으므로 정성적 판단을 수반해야 할 것이다.

### 3.4.3 독성

독성인자의 배점은 GESAMP를 참조하였으며, 크게 인체 건강 영향과 해양 생태 영향 두 개로 구분될 수 있다. 인체 건강의 영향은 다시 경구독성, 상피독성, 흡입독성, 피부 혹은 눈 자극 및 부식, 발암성으로 구분된다. 경구독성의 경우 LC<sub>50</sub>값이 5 mg/kg 이하이면 최고점을 배점하고, 2,000 mg/kg을 초

과하는 경우 최소점을 배점하여 점수를 산출한다. 상피독성의 경우 LC<sub>50</sub>값이 50 mg/kg 이하이면 최고점을 배점하고, 2,000 mg/kg을 초과하는 경우 최소점을 배점하여 점수를 산출한다. 흡입독성의 경우 LC<sub>50</sub>값이 0.5 mg/L 이하이면 최고점을 배점하고, 20 mg/L을 초과하는 경우 최소점을 배점하여 점수를 산출한다. 피부 혹은 눈 자극 및 부식인자의 경우 해당 물질이 부식성을 가지는 경우 3점을 배점하고, 자극성을 가지는 경우 2점을 배점하며, 미미한 자극성을 가지면 1점, 자극성을 보유하지 않으면 0점을 배점한다. 발암성의 경우 US EPA IRIS(Integrated Risk Information System)기준과 WHO의 IARC(International Agency for Research on Cancer)기준을 사용하며 IRIS기준과 IARC기준에 따라 물질의 발암성이 각각 A혹은 1 등급일 때 최고점을 배점하고, B(B1, B2)혹은 2A 등급일 때 4점, C 혹은 2B 등급일 때 3점, D 혹은 3 등급일 때 2점, E 혹은 4등급일 때 1점을 배점하여 점수를 산출한다. 이외에도 돌연변이성, 유전독성, 생식독성, 신경독성, 면역독성이 고려되어질 수 있다. 세부인자들이 점수 산출에 포함되지 않더라도 위험이 존재하지 않는다는 의미로 받아들여질 수 없으며 (GESAMP, 2019), 정성적인자로서 우선순위산정시 고려할 필요가 있다.

해양 생태 영향인자의 경우 급성독성과 아/만성독성으로 구분된다. 급성독성 인자의 경우 EC<sub>50</sub>값이 0.01 mg/L 이하인 경우 최고점을 배점하고 100 - 1,000 mg/L인 경우 최소점을 배점하며 1,000 mg/L를 초과하는 경우 0점을 배점하여 점수를 산출한다. 아/만성독성 인자의 경우 EC<sub>50</sub>값 또는 NOEC값이 0.001 mg/L 이하인 경우 최고점을 배점하고 1 - 10 mg/L인 경우 최소점을 배점하며 10 mg/L를 초과하는 경우 0점을 배점하여 점수를 산출한다.

독성인자는 물질이 생물에게 노출되었을 때 나타나는 악

Table 4. Scoring scheme of exposure potential assessment factors presented for HNS prioritization

Score	Emission factors				Persistence (Half-life in water (days))	Bioaccumulation		Biodegradation
	Emission (kg/year)	Emission to water (kg/year)	Waste water transport (kg/year)	Shipped transport (t/year)		BCF	Log Pow	
5	$\geq 10^6$	$\geq 2,500$	$\geq 10^5$	$\geq 10^4$	$\geq 60$	$\geq 4000$	$\geq 5$	Not readily biodegradable
4	$10^5 - 10^6$	1,250 - 2,500	$10^4 - 10^5$	$10^3 - 10^4$	30 - 60	500 - 4000	4 - 5	
3	$10^4 - 10^5$	625 - 1,250	$10^3 - 10^4$	$10^2 - 10^3$	15 - 30	100 - 500	3 - 4	
2	$10^3 - 10^4$	312 - 625	$10^2 - 10^3$	$10^1 - 10^2$	7.5 - 15	10 - 100	2 - 3	
1	$< 10^3$	$< 312$	$10^1 - 10^2$	$10^0 - 10^1$	$\leq 7.5$	1 - 10	1 - 2	readily biodegradable
0	-	-	$< 10^1$	$< 10^0$		$< 1$	$< 1$	

영향을 지표로 만든 것으로 노출인자와 관계가 깊으며, 이에 많은 CRS 체계에 노출과 독성의 곱을 기반으로 위해성 점수를 도출하여 우선순위를 선정한다(Kim, 2017). 하지만 본 연구에서 다루는 HNS는 거동특성이 상이한 물질을 동시에 대상으로 하고 있어, 물질의 거동에 따른 영향이 다르게 나타날 수 있다. 이에 인체 건강 영향과 해양 생태 영향인자의 인자별 합산 배점에 물질의 거동특성에 따른 점수의 곱을 통해 최종 독성인자 점수를 산출하여 우선순위 선정에 사용한다(Table 4).

### 3.4.4 물질거동

해양환경으로 유입되는 HNS는 각 물질의 물리화학적특성(밀도, 증기압, 용해도 등)에 의해 거동이 달라질 수 있어 효과적인 우선순위관리체계를 도출하기 위하여 개별 HNS 별로 거동특성을 반영하는 것이 필요하다(GESAMP, 2002; EMSA, 2007; Bonn agreement, 2015; Kim et al., 2015). 본 협약에서는 화학물질의 거동정보를 12개로 구분하여 도출할 수 있는 SEBC(Standard European Behavior Classification) 체계를 도출한 바 있으며, GESAMP(Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection)에서는 저서환경을 포함한 생물의 서식지에 잠재적 영향을 결정하기 위하여 화학물질의 거동정보 및 그 체계를 13개로 구분하여 제공하고 있다. 본 연구에서는 HNS의 거동을 밀도, 증기압, 용해도에 따라 가스(G; Gas), 증발(E; Evaporator), 부유(F; Floater), 용해(D; Dissolver), 침전(S; Sinker)의 다섯 개로 구분하였으며(Table 5), HNS의 거동별 점수산정의 경우 해안기반시설로부터 유출되는 화학물질을 평가 및 우선순위 선정하는 시스템에 기반하였다(Harold et al., 2019).

용해도, 밀도, 및 증기압의 값을 통해 화학물질의 거동을

Table 5. Scoring scheme of behavior assessment factors presented for HNS prioritization

Behavior	Score	
	Human health	Marine ecology
Gas	4	1
Evaporator	4	1
Floater	3	2
Dissolver	2	3
Sinker	1	4

Since different effects are expected to object depending on the each single HNS, the behavior factors are obtained multiplied by human health and marine ecological factors to derive the final value.

결정하기 위해서는 증기압이 101.3 kPa (at 20°C)이며 용해도가 10% 이하인 물질은 G로, 증기압이 3 kPa 이상 10 kPa 이하인 물질이며 용해도가 1% 이하인 물질을 E로, 용해도가 0.1% 이면서 해수의 밀도(1,025 kg/m<sup>3</sup>)보다 큰 물질은 S로, 용해도가 10% 이하이면서 밀도가 해수의 밀도보다 작은 물질은 F로, 용해도가 100%를 초과하는 물질은 D로 구분한다. 거동이 G, E, F, D, S로 구분되면 Table 5와 같이 대상유형(Human health, Marine ecology)에 따라 점수를 배점하며, 각 대상에 따른 독성평가인자 점수에 곱하여 최종 독성인자 점수의 산출에 사용한다.

### 3.4.5 해역 이용의 영향

해양산업시설로부터 HNS가 배출 혹은 유출되어 해양환경에 유입되면 잠재적으로 2차사고와 해역을 이용하는 인간 및 해양생물 그리고 저서서식지에 대한 영향이 우려되는 상



황이다. 이에 본 연구에서는 가연성을 기준으로 잠재적인 2차사고 영향을 해석이용의 영향인자로 사용하고자 하였다. 2차사고 영향인자의 경우 인화점이 23℃ 이하인 물질에 최고점을 배점하고 23 - 60℃인 물질에 4점, 60 - 93℃인 물질에 3점 93℃를 초과하는 물질에 2점을 배점하여 점수를 산출한다. 또한 해양생물과 저서서식지의 영향의 경우 물질의 거동정보가 Floater인 물질 중 점도(Viscosity)가 > 10 cSt (20℃)인 물질에 3점을 배점한다. 또한 물질 거동이 Sinker인 물질의 경우 저서서식지에 직접적인 악영향을 줄 수 있으므로 3점을 배점하여 점수를 산출한다(Table 6).

Table 6. Scoring scheme of Interference with marine uses assessment factors presented for HNS prioritization

Score	Potential secondary accidents	Marine organisms and bottom habitat interference
	Flashpoint Temperature (°C)	Behavior
5	≤23	-
4	23 - 60	-
3	60 - 93	Floater, Sinker
2	>93	-
1	-	-

### 3.5 HNS 우선순위 설정 및 불확실성 평가

본 연구결과 도출된 주요인자는 사회적 관심과 이슈, 물질거동, 노출, 독성, 해양 이용에의 영향 다섯 개로 나누어진다. 이 중 환경 내 잔류가능성, 수생 생물 내 생물학적 축적 가능성, 쉽게 생분해 되지 않는 특성, 포유류에 대한 구강, 피부, 흡입 독성, 피부 및 눈에 자극성, 잠재적인 발암성, 해양생물에 대한 급성, 아/만성독성, 가연성, 해양생물 및 저서서식지 영향의 경우 연안환경을 구성하거나 이용하는 생물과 인간에게 영향을 미칠 수 있는 직접적 세부인자이다. 직접적 인자 외에도 다양한 인자들의 배점구간의 경우 사회적 관심과 이슈 0 - 25점, 노출 4 - 40점, 해양 이용에의 영향 0 - 10점으로 선정되었으며, 독성의 경우 인체건강 4 - 96점, 해양생태영향 0 - 40점으로 선정되었다. 해양산업시설로부터 배출되는 HNS의 영향을 판단하고 인자별 배점된 값을 순위 점수체계로 환산하기 위하여 변환계수(0.485)를 곱하여 최종 순위를 위한 점수를 산출한다(Table 7).

이처럼 다양한 우선순위 선정시스템에서 평가인자의 선정을 통한 합리적인 배점은 매우 중요한 부분이다(Shin, 2014). 하지만 배점을 위하여 사용하는 세부인자별 자료가 실측값(Measured data)이 아니라 추정값(Estimated data)인 경우

데이터의 신뢰성에 차이가 나타날 수 있다. 또한 자료가 없는 결측치(No available data)의 경우 표준값(default value)을 부여하거나(Choi et al., 2005), 보수적으로 평가하여 최고점을 부여하거나(Shin, 2014; Snyder et al., 2000), 최소점을 부여하는 등(Kim et al., 2015) 다양한 방식의 결측치 보완방법을 통해서 우선순위를 선정하는 방식이 알려져 있다.

이러한 예처럼 추정값의 사용 혹은 결측치의 존재는 불확실성을 증대시켜 결과의 신뢰성을 저하시키는 요인이 될 수 있다. 이에 본 연구에서는 결측치의 경우 불확실성을 보수적으로 반영하기 위하여 세부인자별 최대배점을 부여하고(Baik et al., 2010; Shin, 2014; Snyder et al., 2000) 불확실성 점수를 별도로 도출하여 결과의 불확실성을 최소화하고자 하였다. 불확실성 점수(Uncertainty Score)의 경우 주요 인자의 최고 배점과 최소배점의 차의 반값과 전체 세부 인자 대비 추정값 및 결측치 개수인 불확실성 비율(Uncertainty Ratio)의 곱으로 도출하고, 주요 인자별 결과값과의 합을 최종 우선순위 점수로 사용하는 방식을 통하여 결과의 불확실성을 최소화하고자 하였다. 불확실성 비율 및 불확실성 점수의 도출을 위한 계산식은 아래와 같다(Equation 1).

$$US = \frac{F_{Max} - F_{min}}{2} \times UR(\%)$$

$$UR(\%) = \frac{N_e + N_{na}}{N_t}$$

Equation 1. Calculations to derive an uncertainty score (US: Uncertainty Score, UR: Uncertainty Ratio, F<sub>Max</sub>: Max score of major factor, F<sub>min</sub>: Min score of major factor, N<sub>e</sub>: No. of estimated data, N<sub>na</sub>: No. of no available data, N<sub>t</sub>: No. of total factors)

불확실성을 고려하고자 불확실성 점수를 반영하더라도 우선순위 선정체계를 통한 기계적인 점수 도출만으로 불확실성에 고려되는 모든 불안 요소들을 제거할 수는 없다. 예를 들어 주요인자인 노출에 포함되는 배출량 같은 세부인자의 경우 보고자의 전문성 부족 및 조사대상 물질의 누락 등이 추가적인 변수로 작용할 수 있으며, 연구대상인 HNS의 경우 국내에만 799개의 유해액체물질로 등록되어 있어 물질별 특성이 다양하게 구분 가능하므로 물질을 집단으로 평가하는 방법을 추가하는 등의 고려가 필요할 것이다. 이외에도 우선순위 선정체계를 통해 산출된 결과 및 순위를 전문가 집단의 정성적 평가를 통해 불확실성을 최소화하는 작업도 수반되어야 할 것이다.

### 3.6 혼합물에 대한 대응

해양환경 혹은 해양생물에 악영향을 미치는 다수의 화학

해양산업시설 배출 위험유해물질(HNS)의 우선순위 선정을 위한 평가인자 및 평가체계 도출

Table 7. Summary table of the overall scheme of HNS prioritization and uncertainty assessment

Factors	Social Interest and Issues					Exposure								Toxicity								Behavior		Interference with marine uses	
	S1	S2	S3	S4	S5	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	B1	B2	I1	I2
Assessment	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	NR	5	5	5			5	5	5	4	1	5	5
	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		4	4	4			4	4	4	4	1	4	4
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3		3	3	3	C	C	3	3	3	3	2	3	3
	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		2	2	2	I	I	2	2	2	2	3	2	2
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	R	1	1	1	MI	MI	1	1	1	1	4	1	1
	0	0	0	0	0			0	0		0	0					NI	NI		0	0			0	0
		0-25					4-40								4-96 (Human health), 0-40 (Marine ecology)								0-10		
Rating	Multiply the sum of each factors by the conversion factor (0.485)																								
	Calculating uncertainty scores and summing up with existing scores																								
	Final HNS priority score evaluation																								

물질 또는 HNS의 경우 배출수나 환경 내에서 단독으로 존재하기보다 혼합물의 형태로 존재하여(Guillén et al., 2012) 단일 물질로의 우선순위 뿐만 아니라 혼합물의 형태를 고려해야 한다. 또한 국내법(해양환경관리법)상 지정된 HNS의 경우 상당수가 혼합물의 형태로 포함되어 있어, 우선순위선정의 배점을 위한 기초데이터를 획득하기도 어려운 상황이다(Park et al., 2016). 뿐만 아니라 혼합물은 혼합된 물질간의 시너지작용이나 길항작용이 일어날 수 있어 일반적 특징뿐만 아니라 독성 등과 같은 혼합물에 대한 효과는 예측하기 매우 어렵다(Van Gestel et al., 2010; Kortenkamp et al., 2009; Guillén et al., 2012). 한편 GESAMP에서는 위해성평가절차 내에 각 세부인자별로 혼합물에 대한 개별적인 평가방법을 제시하고 있다. 만일 혼합물 자체에 대한 독성평가 데이터가 존재할 경우 직접적 활용을 하지만, 사용할 데이터가 없는 경우 독성학적 영향이 알려진 유사한 혼합물을 차용한다. 얻어진 혼합물 중 개별물질의 이화학적 기초자료는 세부인자(생물축적성, 생분해성, 인체영향, 해양생태영향, 거동 등)별로 혼합물을 이루는 개별물질의 개수·농도·배점에 따라 다시급 배점하여 최종 점수를 산출한다(GESAMP, 2019).

현재까지 다양한 방법을 통하여 기초정보가 부족한 혼합물에 대한 대응 및 혼합독성 평가를 하고 있다. 이에 혼합물의 이화학적 기초데이터 획득을 위하여 국내에서는 혼합물질의 환경 유해성 예측 QSAR 모델의 개발이 필요하다고 제안된 바 있으며(NIER, 2018), 국외의 경우 유럽화학물질청(ECHA; European chemicals agency)는 캐나다, 미국 등과의 협력을 통해 IUCLID(International Uniform Chemical Information

Database)의 확장을 통해 약 2백만 종의 혼합물 조성 정보를 구축하고 있다(NIER, 2018). 이에 향후 혼합독성 평가 등에 활용이 가능할 것으로 예상된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 해양산업시설로부터 해양/연안 환경으로 배출되는 HNS의 체계적 관리를 목적으로 사회적 관심 및 이슈(이슈 빈도, 검출빈도, 환경기준 제정여부, 생산량, 표준물질 존재여부), 물질거동(인체 건강의 영향, 해양환경영향), 노출 가능성(배출량, 수계배출량, 폐수 이동량, 물동량, 잔류성, 생물축적성, 생분해성), 독성(경구독성, 상피독성, 흡입독성, 피부 혹은 눈자극, 발암성, 해양생물 급성독성, 해양생물 아/만성독성), 해양 이용에의 영향(잠재적 2차사고, 해양생물과 저서서식지의 영향)을 주요인자 및 세부인자로 도출하였다. 본 체계의 차별점은 연구대상물질인 HNS와 연구대상 시설이 해양산업시설인 점을 반영하여 환경 내 검출빈도, 물동량 등을 세부인자로 반영한다는 점이며, 도출된 주요 다섯 개 주요인자별 배점에 결측치, 추정값 등으로 인하여 발생하는 불확실성을 반영하고 결과의 신뢰성을 높이기 불확실성 비율 및 불확실성 점수를 반영한다는 점이다. 그러므로 본 연구에서 제안한 평가인자 및 선정체계는 해양산업시설로부터 배출되는 HNS를 대상으로 하여 정확하고 과학적인 데이터를 기반으로 물질의 우선순위 선정에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

그럼에도 독성인자 경우 기존에 제시되어있는 데이터가

시험방법, 시험 종 등에 따라 차이가 있거나 담수생물에 대한 데이터만 제공되고 있거나, 일부 HNS(특히 혼합물)의 경우 이화학적 기초데이터가 제공되지 않아 추가적인 기초연구가 필요한 상황이다. 이에 따라 앞으로 해결해야 할 과제로 실제 해양환경에서 배출되는 HNS의 실태조사 기반 배출 현황조사, 해양환경 분포현황조사 및 생물 내 HNS 축적도의 조사가 수행되어야 한다. 또한, 국내에 수입·생산·사용 여부와 위해성을 기반으로 3 - 4개의 물질군으로 분류하여 799종이나 되는 국내 지정 유해액체물질의 효율적인 관리가 가능하도록 해야 할 것이다. 또한 분포 및 배출 실태 현황자료를 기반으로 국내에서 보고되는 물질을 관리 대상 후보물질로서 선정하고, HNS 관리 우선순위선정시 기초자료로서 활용할 필요가 있을 것이다.

## 사 사

이 논문은 2023년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구이다(20210660, 해양위험유해물질(HNS)배출 등 관리기술 개발사업, 해양산업시설 배출 위험유해물질 영향평가 및 관리기술 개발). 또한, 이 논문은 국립수산과학원 연구개발과제(R2023027)의 지원을 받아 수행된 연구이다.

## References

- [1] Arnot, J. A., D. Mackay, E. Webster, and J. M. Southwood (2006), Screening level risk assessment model for chemical fate and effects in the environment, *Environmental Science & Technology*, Vol. 40, pp. 2316-2323.
- [2] An, Y. J., S. W. Jeong., T. S. Kim., W. M. Lee., S. H. Nam, and Y. W. Baek(2008), Assessment factors for the Selection of Priority Soil Contaminants based on the Comparative Analysis of Chemical Ranking and Scoring Systems, *The Journal of Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, Vol. 13(6), pp. 62-71.
- [3] An, Y. J., S. W. Jeong, M. J. Kim, and C. Y. Yang(2009), Comparative study of exposure potential and toxicity factors used in Chemical Ranking and Scoring System. *Journal of Environmental Toxicology*, Vol. 24(2), pp. 95-105.
- [4] Baik, N. S., J. D. Chung, and C. H. Park(2010), Assessment of priority order using the chemical to cause to generate occupational diseases and classification by GHS. *Journal of the Environmental Sciences*, Vol. 19(6), pp. 715-735.
- [5] Bonn Agreement(2015), Bonn agreement counter pollution manual. accessed Sep 13, 2023, <http://www.bonnagreement.org/manuals>.
- [6] Brumovský, M., J. Bečanová, J. Kohoutek, H. Thomas, W. Petersen, K. Sørensen, O. Sáňka, and L. Nizzetto(2016), Exploring the occurrence and distribution of contaminants of emerging concern through unmanned sampling from ships of opportunity in the North Sea, *Journal of Marine Systems*, Vol. 162, pp. 47-56.
- [7] Choi, S. P., H. S. Park, D. S. Lee, Y. S. Shin, Y. S. Kim, and D. C. Shin(2005), Development of CRS-Korea II and its application to setting the priority of toxic chemicals for local provinces, *Journal of Environmental Toxicology*, Vol. 20(4), pp. 322-325.
- [8] Choi, H., W. Kang, T. W. Kim, and M. Lee(2021), Proposed Water Quality Criteria based on the RISK assessment for the Hazardous and Noxious Substances, *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, Vol. 25(4), pp. 270-278.
- [9] Cedre(2009), Review of chemical spills at sea and lessons learnt, INTERSPILL 2009 Conference White Paper Technical Appendix. Marseille, France p. 40.
- [10] CEFAS(2009), UK risk assessment for hazardous and noxious substances - RP 593.
- [11] Cunha, I., S. Moreira, and M. M. Santos(2015), Review on hazardous and noxious substances (HNS) involved in marine spill incidents-An online database, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 285, pp. 509-516.
- [12] Cunha, I., H. Oliveira, T. Neuparth, T. Torres, and M. M. Santos(2016), Fate, behaviour and weathering of priority HNS in the marine environment: an online tool, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 111, pp. 330-338.
- [13] Dachs, J. and L. Méjanelle(2010), Organic pollutants in coastal waters, sediments, and biota: a relevant driver for ecosystems during the anthropocene? *Estuaries and Coasts*, Vol. 33, pp. 1-14.
- [14] ECHA(European Chemicals agency)(2023), last modified Oct 31, 1993, accessed Sep 13, 2023, <https://echa.europa.eu/information-on-chemicals/ec-inventory>.
- [15] EMSA(2007), European Maritime Safety Agency. Action Plan for HNS Pollution Preparedness and Response. (Available at:) <http://www.emsa.europa.eu/hns-pollution/123-hns-pollution/260-action-plan-for-hns-pollution-preparedness-and-response.html> (accessed July 16, 2015).
- [16] GESAMP(2002), The Revised GESAMP Hazard Evaluation

- Procedure. London: GESAMP, 2002.
- [17] GESAMP(2019), Report of the 45th session of GESAMP, GESAMP Reports & Studies in print. London: GESAMP, 2019
- [18] Guillén, D., A. Ginebreda, M. Farré, R. M. Darbra, M. Petrovic, M. Gros, and D. Barceló(2012), Prioritization of chemicals in the aquatic environment based on risk assessment: analytical, modeling and regulatory perspective, *Science of Total Environment*, Vol. 440, pp. 236-252.
- [19] Hansen, B. G., A. G. van Haelst, K. van Leeuwen, and P. van der Zandt(1999), Priority setting for existing chemicals: European union risk ranking method, *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 18(4), pp. 772-779.
- [20] Harold, P., A. Kibble, E. Huckle, and P. Callow(2019), Prioritising chemical pollution hazards from coastal infrastructure. A frame work to inform planning and preparedness. *Proceeding of the Forty-second AMOP Technical Seminar*, Environment and Climate Change Canada, Ottawa, ON, Canada, pp. 246-263.
- [21] IMO(2000), Protocol on Preparedness, Response and Cooperation to Pollution Incidents by Hazardous and Noxious Substances (OPRC-HNS protocol), Attachment 1, pp. 1-11.
- [22] Kortenkamp, A., T. Backhaus, and M. Faust(2009), State of the art report on mixture toxicity, Final Report, Executive Summary, University of London School of Pharmacy, London, UK.
- [23] Kim, Y. S., H. S. Park, D. S. Lee, and D. C. Shin(2003), Comparisons of chemical ranking and scoring methods, *Journal of Environmental Toxicology*, Vol. 18(3), pp. 183-191.
- [24] Kim, Y. R., T. W. Kim, M. H. Son, S. Oh, and M. Lee(2015), A Study on Prioritization of HNS Management in Korean Waters. *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, Vol. 21(6), pp. 672-678.
- [25] Kim, S. H.(2017), Risk Assessment of Glue using CSI Chemical Ranking and Scoring Method, Graduate School of Engineering, Ajou University.
- [26] Kim, Y. R., M. Lee, J. Y. Jung, T. W. Kim, and D. Kim(2019), Initial environmental risk assessment of hazardous and noxious substances (HNS) spill accidents to mitigate its damages, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 139, pp. 205-213.
- [27] Kim, H. and K. Park(2022), A Study on the Selection of Candidates for Substances Subject to Permission Using Chemicals Ranking and Scoring (CRS), *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*, Vol. 32(3), pp. 253-267.
- [28] Lee, K. S., J. Jo, J. H. Choi, H. H. Shin, and J. S. Yang(2009), Study on the validity of selection of hazardous substances requiring management on industrial safety and health act, *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*, Vol. 19(2), pp. 139-155.
- [29] Lee, M., K. Kim, and W. Kang(2021), A Study on the Necessity and Direction of Regulations on the Emission of Hazardous and Noxious Substances from Marine Industrial Facilities, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 27(6), pp. 737-743
- [30] Muir, D. C. G. and P. H. Howard(2006), Are there other persistent organic pollutants? A challenge for environmental chemists, *Environmental Science & Technology*, Vol. 40, pp. 7157-7166.
- [31] Nam, S. H., J. I. Kwak, S. J. Yoon, S. W. Jeong, and Y. J. An(2011), Chemical Ranking and Scoring Methodology for the Protection of Human Health and Aquatic Ecosystem in Korean Surfacewater: CRAFT (Chemical RAnking of surFacewater polluTants). In *Journal of Korean Society on Water Quality*, Vol. 27(6), pp. 804-812.
- [32] Neuparth, T., S. M. Moreira, M. M. Santos, and M. A. Reis-Henriques(2011), Hazardous and Noxious Substances (HNS) in the Marine Environment: Prioritizing HNS that pose major Risk in a European Context, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 62, pp. 21-28.
- [33] NIER(National Institute of Environmental Research)(2018), Establishment of big data construction and utilization system for the introduction of the existing rapid evaluation system for chemical substances, the Ministry of Environment.
- [34] Park, H., Y. Kim, D. S. Lee, Y. Shin, S. Choi, S. Park, M. Kim, J. Yang, and D. Shin(2005), Development of Korean chemical ranking and scoring system (CRS-Korea) and its application to prioritizing national toxic chemicals, *Journal of Environmental toxicology*, Vol. 20(2), pp. 109-121.
- [35] Park, M. O., H. S. Park, T. Kim, S. Oh, and M. Lee(2016), A study on the development of HNS Database for Response system of marine spill accident in Korea, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 22(1), pp. 52-58.
- [36] Shin, S.(2014), A Chemical Risk Ranking and Scoring Method for the Selection of Harmful Substances to be Specially Controlled in Occupational Environments, Department of Health Science, Korea University.

- [37] Solé, M., G. Lobera, D. Lima, M. A. Reis-Henriques, and M. M. Santos(2008), Esterases activities and lipid peroxidation levels in muscle tissue of the shanny *Lipophrys pholis* along several sites from the Portuguese coast, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 56, pp. 999-1007.
- [38] Snyder, E. M., S. A. Snyder, J. P. Giesy, S. A. Blonde, G. K. Hurlburt, C. L. Summer, R. R. Mitchell, and D. M. Bush(2000), SCRAM: A scoring and ranking system for persistent, bioaccumulative, and toxic substances for the North American Great lake. Part. Structure of the scoring and ranking system. *Environment Science and Pollution Research*, Vol. 7, pp. 51-61.
- [39] Swanson, M. B., G. A. Davis, L. E. Kincaid, T. W. Schultz, J. E. Bartmess, S. L. Jones, and E. L. George(1997), A screening method for ranking and scoring chemicals by potential human health and environmental impact. *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 16, pp. 372-383.
- [40] US EPA(1994), Chemical hazard evaluation for management strategies: A method for ranking and scoring chemicals by potential human health and environmental impacts, EPA/600/R-94/177, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- [41] US EPA(2000a). National Nutrient Strategy: A Focus on Regional Nutrient Criteria Development, EPA 822-F-98-002, Office of Water, US Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- [42] US EPA(2000b), Estuarine and Coastal Marine Waters: Bioassessment and Biocriteria Technical Guidance. EPA 822-B-00-024, Office of Water, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- [43] Van Gestel, C. A. M., M. J. Jonker, J. E. Kammenga, R. Laskowski, and C. Svendsen(2010), Mixture toxicity: linking approaches from ecological and human toxicology. CRC Press Inc. C. Editors.
- [44] Wang, Z., G. W. Walker, D. C. G. Muir, and K. Nagatani-Yoshida(2020), Toward a global understanding of chemical pollution: a first comprehensive analysis of national and regional chemical inventories, *Environmental Science & Technology*, Vol.54, pp. 2575-2584.
- [45] Yang, J., J. Jang, S. Kim, Y. Kim, H. Lee, D. C. Shin, and Y. Lim(2010), Development of Korean Food-Chemical Ranking and Scoring System (Food-CRS-Korea) and Its Application to Prioritizing Food Toxic Chemicals Associated with Environmental Pollutants. *Journal of Environmental Toxicology*, Vol. 25(1), pp. 41-55.
- [46] Zhang, R. J., J. H. Tang, J. Li, Q. Zheng, D. Liu, Y. J. Chen, Y. D. Zou, X. X. Chen, C. L. Luo, and G. Zhang(2013), Antibiotics in the offshore waters of the Bohai Sea and the Yellow Sea in China: occurrence, distribution and ecological risks, *Environmental Pollution*, Vol. 174(5), pp. 71-77.

---

Received : 2023. 09. 19.

Revised : 2023. 10. 20.

Accepted : 2023. 10. 27.