

Original Article

해양산업시설 배출 위험유해물질(HNS)의 위해성평가기반 수질준거치설정 체계 제안

최 훈¹ · 강원수² · 김태원³ · 이문진^{2,†}

¹선박해양플랜트연구소 해양안전환경연구본부 연구원

²선박해양플랜트연구소 해양안전환경연구본부 책임연구원

³해양생태기술연구소 연구기획실 책임연구원

Proposed Water Quality Criteria based on the Risk Assessment for the Hazardous and Noxious Substances in effluent from Marine industrial facilities

Hoon Choi¹, Wonsoo Kang², Tae-Won Kim³, and Moonjin Lee^{2,†}

¹Researcher, Maritime Safety and Environmental Research Division, Korea Research
Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO), Daejeon 34103, Korea

²Principal Research Scientist, Maritime Safety and Environmental Research Division,
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO), Daejeon 34103, Korea

³Principal research scientist, Research Planning Division, Marine Eco-technology Institute (MEI), Busan 48520, Korea

요 약

본 연구에서는 위험유해물질(HNS; Hazardous and Noxious Substances)의 지정 및 배출허용기준 설정 체계를 마련하고자 우리나라의 HNS 관련 현행 법체계와 주요 선진국의 준거치 설정사례를 조사하고, 국내 실정에 맞는 인체독성기준 수질준거치와 해양생태독성기준 수질준거치 설정안을 제안하고자 하였다. 현행 법체계에서는 수질 유해물질 관리를 위하여 환경기준과 배출허용기준을 설정하여 관리한다. 또한 국제조약에 근거하여 법률로 제정하여 관리하기도 한다. 하지만 HNS의 경우 관리체계가 전무하며, 해양시설로부터 배출되는 유해물질의 경우 물환경보존법에 위임되어있는 상황이다. 그러므로 MARPOL 73/78, OPRC-HNS 2000등의 국제조약이 존재하는 HNS의 경우 별도의 법률로 제정하는 가능성을 포함하여 체계적 관리가 가능한 법체계가 마련되어야 할 것이다. 또한 과학적인 기준을 통하여 인체·생물·생물군을 보호하기 위한 위해성평가기반 해양환경 준거치 설정체계의 경우, 인체독성기준 수질준거치는 한국인에 적합한 최신의 계수를 적용하였으며, 해양생태독성기준 수질준거치는 해양환경공정시험기준에 등재된 것을 포함하여 최소 8개 이상의 분류학 그룹에서 최소 10종 이상의 국내산 해양환경 시험종을 이용한 준거치의 도출이 가능한 기법을 제안하였다. 본 연구를 통해 제안된 인체독성 및 해양생태독성기준 수질준거치 설정방법은 HNS 뿐만 아니라 다양한 해양오염물질의 위해성평가에 기여할 것이다. 향후 HNS의 체계적 관리를 위하여 환경기준 항목에 포함되어있는 5종의 HNS를 포함하여 우선순위물질목록을 작성하고 지속적인 배출실태 및 분포조사를 수행하여 중점관리물질목록의 작성 및 현황을 파악하는 등의 기초 연구가 수행되어야 할 것이다.

Abstract – In this study, the current legal system related to HNS (Hazardous and Noxious Substances) in Korea was analyzed to prepare a system for the designation of HNS and the establishment of emission standards. In addition, to proposed two AWQC (Ambient Water Quality Criteria) tailored to domestic characteristics. Generally, environmental standards exist as enforcement ordinances and emission standards exist as enforcement rules. But, the possibility of enactment of HNS as a law cannot be excluded because exist the international conventions (MARPOL 73/78, OPRC-HNS 2000). Proposed two AWQC based on human health and ecotoxicological evaluation suitable for the characteristics and environment of Korea were applying the PERA (probabilistic ecological risk assessment) technique. In the case of AWQC for human health, the latest coefficients suitable for Koreans were applied, And in the case of AWQC for ecotoxicological evaluation, it will be possible to derive criteria using

[†]Corresponding author: Moonjin.Lee@kriso.re.kr

8 or more domestic test species from 8 or more taxonomic groups. This method will contribute to risk assessment for various marine pollutants as well as HNS in the future.

Keywords: Hazardous and Noxious substances(위험유해물질), Human Risk Assessment(인체위해성평가), Ecological risk assessment(생태위해성평가), Water quality criteria(수질기준치), Marine industrial facilities(해양산업시설)

1. 서 론

위험유해물질(HNS; Hazardous and Noxious Substances)은 「위험유해물질의 오염사고 대비·대응 및 협력에 관한 의정서(OPRC-HNS protocol; Protocol on Preparedness, Response and Co-operation to Pollution Incidents by Hazardous and Noxious Substances)」에 의해 해양환경에 유출되었을 때 인간에게 위해를 주고, 생물자원 및 해양생물에게 악영향을 미치거나, 기타 해양의 정당한 사용을 방해하는 물질로 정의된다. 주로 「선박을 통해 대규모 화물로 운송되는 유독성 액체물질 및 산적액체위험물 운송선박의 시설 등에 관한 국제코드(the International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Dangerous Chemicals in Bulk)」에 규정된 위험 액체물질, 「국제해상위험물코드(International Maritime Dangerous Goods Code)」에서 규정한 위험 액체물질, 「액화가스를 산적 운송하는 선박의 구조 및 설비에 관한 국제규약(the International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk)」에서 규정한 액화가스, 「인화점이 60℃를 넘지않는 대량수송액체물질 및 국제해상고체산적화물코드(International Maritime Solid Bulk Cargoes Code)」에 언급된 모든 위험·유해물질을 말한다(IMO[2010]). 산업의 발달에 따라 지속적으로 늘어나는 추세이며(Kim *et al.*[2019]), 그 분류를 위하여 IOPC Funds(The International Oil Pollution Compensation Funds)의 HNS convention에서 제공하는 HNS finder에 1,823개의 기여물질을 포함하여 6,839개의 물질이 목록화 되어있다(The HNS convention[2022]). 반면에 국내에서는 「해양환경관리법 선박오염방지규칙」에 799개의 유해액체물질을 분류하여 관리하고 있다.

환경부에서는 수질환경을 보전하기 위하여 환경기준과 산업폐수 및 특정수질오염물질의 배출허용기준을 제시하여 관리하고 있다. 반면에 해양의 경우 해양생태계를 보호하고자 해수수질, 해저퇴적물, 해역별 해양환경기준을 제시하고 있지만 해양환경관리법 제 8조에 따른 해양환경기준은 육상으로부터 기인한 HNS로부터 해양환경을 보호하는 것이 어려운 실정이다. 더욱이 현재의 HNS의 해양배출규제는 선박에서의 배출을 중심으로 체계가 구축되어있으며, 해양산업시설에서부터 배출되는 HNS의 경우 관련 규정이 모호하고 산업의 특성을 반영하지 못하고 있다(Lee *et al.*[2021]). 그럼에도 실제 1,000여 개소에 달하는 해양시설로부터 수계로 유입되는 HNS의 양은 2016년 기준 약 86톤에 이르고 있으며(Ministry of Environment [2016]; Lee *et al.*[2021]), 산업규모의 성장과 고도화로 인하여 관련 오염대응 기술의 발전에 따라 우리나라도 세계적인 추세에 따라 효과적인 규제방식의 도입이 필요한 상황이다(Lee *et al.*[2021]).

생태위해성평가(ERA; Ecological Risk Assessment)는 생물이 하나 또는 여러 환경스트레스 요인에 노출되는 경우 잠재적으로 나타날 수 있는 생태학적 영향가능성을 추정하는데 사용되며(Wang *et al.*[2018]), 일반적으로 하나 혹은 유사한 중에 속하는 생물종의 농도-반응평가 결과를 백분율로 표기하는 독성값인 EC₅₀(Median effect concentration) 또는 LC₅₀(median lethal concentration) 값을 기반으로 합리적인 환경기준을 개발하거나 생태수준에서 오염물질의 위험을 평가하기 위해 수행된다. 하지만 HNS의 해양생태위해성평가 수행사례 및 해양환경의 생태계보호기준 설정을 위한 근거치설정을 위한 연구는 전무한 상황이다.

이에, 본 연구에서는 해양시설로부터 배출되는 HNS의 국내형 해양배출 허용기준을 설정하기 위한 해양환경준거치를 설정하고자, 우리나라의 HNS 관련 현행 법체계와 국내외의 위해성평가기법을 이용한 수질기준치 설정사례를 조사하고, 국내실상에 적합한 생태위해성 평가기법 기반 해양환경준거치 도출(안)을 작성해 보고자 한다.

2. 국내의 환경기준 관리체계

2.1 우리나라의 유해물질 관련 현행 법체계

환경기준이란 국민의 건강을 보호하고 쾌적한 환경을 조성하기 위하여, 국가가 달성하고 유지하는 것이 바람직한 환경상의 조건 또는 질적인 수준을 말한다. 일반적으로 환경기준은 허용원칙으로 경제발전이 저해되더라도 달성할 것이 절대적으로 요구된다(Chae[2016]). 이에 환경부에서는 해역의 수질환경기준을 「환경정책기본법 제 12조」에 의거하여 대통령령으로 생활환경(3개 항목), 생태기반 해수수질 기준(5개항목), 해양생태계 보호기준(6개 항목), 사람의 건강보호(19개 항목) 기준을 세우 수질목표를 달성하고자 하고 있다. 또한 「물환경보전법」 및 동법 시행령과 시행규칙을 통하여 수질오염물질 61종 및 특정수질유해물질 33종과 배출허용기준(47개 수질오염물질, 24개 특정수질유해물질)을 설정하여 수계로의 유해물질 배출을 관리하고 있다(Fig. 1).

해양환경의 경우 「해양수산발전기본법」 제 13조, 14조에 따르면 해양생물 및 해양생태계의 보전과 보호를 위하여 오염물질의 발생, 유입의 방지, 제거를 위한 시책을 마련해야한다고 되어있다. 이에 해양환경의 보전을 위하여 「환경정책기본법」 제 12조의 환경기준을 고려하고 「해양환경보전법」에 의거 해양환경기준을 설정하고 있다. 「해양환경 보전 및 활용에 관한 법률 행정규칙」에서 고시된 해양환경기준은 해수수질, 해저퇴적물, 해역별 해양환경으로 구분된다. 해수수질의 경우 생활환경 기준(3개 항목), 생태기반 해

환경부			해양수산부		
유해화학물질관리	환경기준 설정	배출허용기준 설정	해양환경기준 및 해양환경기준 설정		위험유해물질 항목 설정, 배출기준 설정
환경보전법	환경정책기본법	물환경보전법 <small>수질 및 수질환경보전에 관한 법률</small>	해양수산발전기본법	해양환경보전법	해양환경관리법
· 환경오염과 유해화학물질이 국민건강 및 생태계에 미치는 피해의 조사·규명·감시	· 제 12조. 국가는 생태계 또는 인간의 건강에 미치는 영향 등을 고려하여 환경기준을 설정 · 환경 여건의 변화에 따라 그 적정성이 유지되도록 하여야 함	물환경보전법 시행령 · 사업장의 규모별 구분 · 과정급 산정방법 및 기준 등 물환경보전법 시행규칙 · 수질오염물질(54종) · 특정수질유해물질(24종) · 배출양조사 및 조사방법 · 수질오염물질 배출기준 · 특정수질 유해물질 배출기준 수질오염물질 지정 등에 관한 지침(환경부 훈령) · 우선순위를 결정 · 실태조사 및 수질분석방법 · 감시행위의 지정 절차 · 수질오염물질의 지정 절차 · 수질오염물질 배출허용기준 설정 체계 등	· 제 13조. 오염·배기물질의 발생·유입의 방지, 제거 등을 위한 시책을 마련하여야 함 · 제 14조. 해양생물의 다양성을 보전 및 서식지를 보호하는 등 해양생태계의 보전 및 복원을 위하여 노력하여야 함	· 제 13조. 환경정책기본법 제 12조에 따른 환경기준을 고려하여 해양수산발전기본법 제 13조 및 제 14조에 따른 해양환경 및 해양생태계의 보전을 위한 시책에 필요한 해양환경기준을 책역별 용도별로 설정 고시 · 해양환경 변화에 따라 그 적정성이 유지되도록 하여야 함 해양환경보전법 행정규칙(고시) 해양환경기준 · 해수수질: 생활환경 기준, 생태기반 해수수질 기준, 해양생태 보호 기준, 사람의 건강보호 기준 · 해역피해물·주의기준, 관리기준 · 해역별 해양환경기준: 해수수질기준	· 제 22조. ①누구든지 해양시설 또는 해수욕장·하구역 등 대량방류가 정하는 장소에서 발생하는 오염물질을 해양에 배출하여서는 아니 된다. 다만, 다음 각 호의 경우에는 그러하지 아니하다. · 해양시설 등에서 발생하는 기름 및 유해액체물질을 해양수산부령이 정하는 처리기준 및 방법에 따라 배출하는 경우 · 제 37조. ①선박 및 해양시설의 소유자는 해당 선박 및 해양시설에서 발생하는 오염물질 중 해양수산부령으로 정하는 물질을 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 자에게 수거·처리하게 하여야 한다. · 제 63조. ①대량방류가 정하는 배출기준을 초과하는 오염물질이 해양에 배출되거나 배출될 우려가 있다고 예상되는 경우 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 자는 지체 없이 해양경찰청장 또는 해양경찰서장에게 이를 신고하여야 한다 해양환경관리법 시행규칙 · 제 21조. 해양시설에서 발생하는 오염물질로서 제 37조 제 1항에 따라 수거·처리하게 해야 하는 물질은 다음 각 호와 같다. ① 유해액체물질(해양시설 소유자가 스스로의 선박이나 장비를 이용하여 「물환경보전법 시행규칙」 별표 13 제 1호기목②에 따른 가지역에 적용하는 같은 표 제 2호 항목별 배출허용기준 이하로 처리하는 경우는 제외) 선박오염방지규칙 유해액체물질의 분류를 위한 세부기준 및 물질목록 799종 (GESAMP X, Y, Z, ZF) ※ 해양시설 등에서 발생하는 유해액체물질의 경우 물환경보전법 시행규칙 별표 13. 수질오염물질의 배출허용기준에 의거 유해액체물질을 처리하여 배출 => 해양환경 특성을 반영하여는 분류, 배출기준 등의 설정 필요
화법법 & 화관법 <small>· 화학물질의 등록 및 평가 등에 관한 법률 · 화학물질 관리법</small>	환경정책기본법 시행령(환경기준) · 환경기준: 대기(소음·수질 및 수생태계) · 수생태계는 하천, 호소, 지하수, 해역으로 구분 · 해역에 대한 사람의 건강보호기준, 생활환경기준, 수질기준, 생태계보호기준이 존재				
잔류성유기오염물질 관리법					
· 유해화학물질 및 중금속관리물질 환경부 장관이 고시 · 사고대비물질의 지정 · 화학물질 유해성 심사 등					
· 「잔류성유기오염물질에 관한 스크린링법」 및 「수온에 관한 미니미터법」의 시행을 위함 · 잔류성유기오염물질 종류 · 환경기준(잔류성유기오염물질 등)					

Fig. 1. Current environmental management law system for ministry of environment and ministry of oceans and fisheries.

수수질 기준(5개 항목), 해양생태계 보호 기준(8개 항목), 사람의 건강보호기준(19개 항목)으로 나누어져 있다. HNS의 경우 이 중 사람의 건강보호기준에 5개 항목으로만 포함되어 있다. 또한 HNS의 경우 「선박에서의 오염방지에 관한 규칙」에 유해액체물질의 분류를 위한 물질목록은 설정되어 있으나, 해양시설 등에서 발생하는 유해액체물질의 경우 「물환경보전법」 제 62조에 따라 처리하여, 동법 시행규칙 별표 13. 수질오염물질의 배출허용기준 가지역에 해당하는 기준을 적용하여 배출하도록 되어있다(유해액체물질 799종 중 13종 포함). 그러므로 해양환경의 특성이 고려되고 해양생물 및 해양생태계의 보전 및 보호라는 목적을 달성하고자, 해양산업시설로부터 배출되는 HNS를 선정·지정하기 위한 지침을 포함하여 규제를 위한 배출허용기준과 그 설정체계가 필요한 상황이다.

환경부의 환경기준설정, 배출허용기준 설정사례를 보았을 때, 준거치를 포함하는 배출허용기준은 시행규칙 혹은 행정규칙 정도로 제정되어 있다. 하지만, 국제협약에 의해 제정되어 잔류성오염물질을 관리하는 「잔류성물질법」과 같이 법령으로서 존재하기도 한다. 이에 MARPOL 73/78, OPRC-HNS 2000 등의 국제협약으로 관리되고 있는 HNS도 단독법률로서 제정해 관리하는 것도 고려해 보아야 할 것이다.

USEPA에서는 특정 환경에 적용되는 법적 실체인 기준(standard)와 생물이나 생물군을 보호하기 위해 과학적인 판단을 토대로 도출된 물질의 적절한 안전수준인 준거치(Criterion)를 혼용해서는 안 된다고 하고 있다. 특정한 생태계의 안전 수준에 따라 기준과 준거치는 다르게 나타날 수 있기 때문이다(USEPA[1976]; Kim *et al.*[2017]). 결국 현재의 관련법에는 해양시설에서 해양으로 배출되는 HNS 환경기준 혹은 배출기준이 미흡할 뿐만 아니라 기준을 제시하기 위한 준거치 및 준거치의 도출체계가 부재하여 HNS를 관리하기 위한 근거가 부족한 상황이다. 특히 기존의 준거치 도출을 위한 독성평가 및 위해성평가는 대부분이 담수생물종을 이용한 시험법을 통하여 도출된 연구 결과이므로 해양환경에 직접 적용하기 어려우며, HNS로부터 해양환경 및 서식 해양생물을 보호하기 위한 준거치의

경우 관련 연구가 담수생물을 이용한 연구에 비하여 미진하여 추가적인 연구를 통하여 향후 준거치를 마련해 나가야 하는 상황이다.

이에 인체 및 해양생물 각각을 보호하기 위하여 국가적 특성과 환경적 특성을 고려한 준거치 및 도출체계를 마련하여 해양산업시설로부터 해양환경내로 유입되는 HNS 관리체계의 마련이 시급한 상황이다.

2.2 해외 주요국가의 환경기준 설정사례

2.2.1 미국

미국의 CWA(Clean Water Act)는 EPA로 하여금 최신의 과학적 지식을 정확하게 반영하여 수질준거치를 설정하도록 하고 있다. 이에 오염물질이 인체건강 및 환경에 미치는 영향을 근거로 하여 수질준거치(AWQC; Ambient Water Quality Criteria)를 도출한다. 수질준거치는 인체독성기준 수질준거치와 생태독성기준 수질준거치를 각기 나누어 제시하고 있다(USEPA[2000]; USEPA[2010]).

사람의 인체독성기준 수질준거치는 해당물질의 발암성 여부를 확인하며, 발암성일 경우 발암잠재력(Cancer potency factor, q1)을 통한 위해도별 용량(RSD; Risk-Specific Dose)을, 비발암성일 경우 참고용량(RfD; Reference Dose)과 물을 통하지 않은 노출에 대한 오염원의 상대기여도(RSC; Relative Source Contribution)을 계수로 고려하여 제시한다(USEPA[2006]). 2015년 개정된 내용에 의하면 준거치 도출에 사용된 노출자료는 BW(Body weight)값은 80 kg, DI(Drinking water Intake)값은 2.4 L/day, FI(Fishery intake)값은 22 g/day로 변경된 바 있다. 또한, 발암위해도(Cancer Potency)의 경우 인구 십만명~천만명 당 한명에게 추가 발병할 확률인 10⁻⁴~10⁻⁶을 적용한다.

생태독성기준 수질준거치의 경우 최종만성치(FCV; Final Chronic Value), 최종급성치(FAV; Final Acute Value)의 산출을 통하여, 만성독성 및 급성독성 생태독성평가결과 담수생태계에 유해영향을 미치지 않는 유해물질의 최고농도를 의미하는 CMC(Criterion Maximum Concentration)와 CCC(Criterion Continuous Concentration)

의 두 가지 준거치를 제시하고 있다. 준거치의 경우 필요시 지역 특이적인 기준을 도출할 수 있으며 국가적 특징을 적용하도록 권장하고 있다. 이에 북미에서 서식하는 최소 6개 이상의 분류학적 그룹(과; family)이 다른 시험생물 중 8종 이상을 이용한 급·만성독성 평가자료를 사용하여 준거치를 도출하여야 한다(Stephan *et al.*[1985]; USEPA[2010]).

2.2.2 일본

일본은 「환경기본법」에 대기오염, 수질오염, 토양오염, 소음에 관한 기준이 있으며, 「수질오염방지법」에 의거하여 사람의 건강 보호에 관한 환경기준(27개 항목), 생활환경의 보전에 관한 환경기준(해역의 경우 총 11개 항목)으로 구분하여 규정하고(Kim *et al.*[2017]), 항상 적절한 과학적 판단을 통해 개정을 요구한다.

인체건강보호를 위한 수질준거치의 경우 미국과 동일한 방식으로 발암성/비발암성 물질로 구분하여 설정하며 물과 서식생물의 섭취를 통한 영향을 고려하고 있다. 발암물질의 경우 발암잠재력이 10⁻⁵이 내가 되도록 하며, 비발암물질의 경우 해당물질의 1일 노출량이 일 섭취한계량(TDI; Tolerable Daily Intake)을 상회하지 않도록 준거치를 설정한다. 또한 식품을 통한 영향은 DI, FI값을 고려하여 생물농축 안전성을 확보하고자 하고 있다.

수생태계 보호를 위한 수질환경기준의 경우 수질 현황, 어패류 서식, 산란, 치어 서식처, 수온(냉수역, 온수역) 상태를 파악하여 수역 유형을 결정하고, 수역의 종류 및 유형에 따라 자연적인 원인에 의하여 기준치를 초과할 수 있는 가능성을 고려하고 있다. 기술적인 수질준거치의 경우 급·만성 독성평가 결과 FAV와 FCV를 산출한 뒤 보수적인 값으로 결정된다(Ministry of Environment, Government of Japan[2007]; Lee and Kim[2007]).

2.2.3 영국

영국의 환경기준 설정관련 전반적인 사항은 EU의 물관리지침(WFD; The Water Framework Directive)에 의해 45개 우선순위 물질의 환경기준과 35개의 특수물질 환경기준이 설정되어 있으며, 수질기준에 관한 영국의 법률은 따로 존재하지 않는다(Kim *et*

al.[2017]). 영국의 환경청에서는 기존의 환경기준에 변화가 필요할 경우 환경청의 주도하에 환경식량농촌부와의 협의로 변경된다. 신규 오염물질 수질기준 설정의 경우 환경청의 주도로 UKTAG(UK Technical Advisory Group on the Water Framework Directive) 및 CTT(Chemical Testing Team)에서 수질기준(안)의 의견수렴과정을 거치고, 환경식량농촌부에서 규제영향평가를 수행하여 신규 항목 환경기준을 설정한다(Kim *et al.*[2017]).

또한 영국은 유럽위원회(European Communities, EC)에서 제시하는 수서 생태계 보호를 위한 예측무영향농도(PNEC; Predicted no effect concentration)를 이용하여 수질권고치(Water quality guideline)를 사용하고 있다. PNEC는 급성 또는 만성독성자료를 이용해 종민감분포도(SSD; Species sensitivity distribution) 및 평가계수(AF; Assessment factor)를 적용하는 방식을 사용하고 있으며, 각 방식별로 8개의 생물군에 대하여 10개 이상의 독성자료를 포함해야 한다(Nam and An[2018]).

2.2.4 호주·뉴질랜드

호주·뉴질랜드의 ANZECC and ARMCANZ(Australian and New Zealand Environment and Conservation Council and Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand)에서는 인체건강을 위한 수질 준거치를 따로 마련하고 있지 않고 식품 중 화학물질 기준으로 제시하고 있다. 반면에 수생태계 보호를 위한 수질권고치(Water quality guideline)의 경우 만성 또는 급성 독성 자료를 이용하여 SSD 및 AF를 제시하는 방식을 이용하고 있다. 다만 2009년부터 SSD값의 활용도를 높이는 대신 AF의 활용도를 축소해 오고 있다(Kim *et al.*[2017]). 이때 사용하는 생태독성 시험종의 생물분류군 및 결과값의 종류와 개수에 따라 고신뢰도, 중간신뢰도, 저신뢰도 방식으로 나누어 구분하고 있으며, 고신뢰도 방식의 경우 최소 생물 3개 분류군에서 최소 5종의 만성 NOEC자료 혹은 최소 5종의 E(L)C₅₀ 자료가 필요하며, 이때 활용되는 생태독성자료는 해당 지역/국가에 서식하는 시험종인지 여부를 판별한 뒤 활용하고 있다(ANZECC and ARMCANZ[2000]; Lee *et al.* [2019]).

Table 1. Comparison of various data requirement levels for aquatic ecosystem protection criteria from different nations based on the ecotoxicological evaluation

Nation	Data Requirement Level (Chronic/Acute)	Reference
US	At least 8 species in the 6 different taxonomic (Family level) group (Chronic and Acute)	USEPA, 2006, 2010
EU (UK)	At least 10 species in the 8 different taxonomic (Family level) group (Chronic)	European Commission, 2011
Australia/New Zealand	At least 5 species in the 3 different taxonomic (Family level) group (Chronic and Acute)	ANZECC and ARMCANZ, 2000
Netherlands	At least 5 species in the 4 different taxonomic (Family level) group (Chronic)	RIVM 2001
Korea (Ministry of Environment)	At least 5 species in the 4 different taxonomic group (Chronic and Acute)	Ministry of Environment 2015

All data requirement levels were based on the ‘guidelines on procedures and methods for risk assessment of environmental hazards’ of Ministry of Environment of Korea with references.

3. 우리나라 특성에 맞는 위해성평가 기반 HNS 관리 체계 고찰

3.1 HNS 우선순위물질 목록 지정체계(안)

HNS의 체계적인 관리를 위해서는 해당 물질을 지정·관리해주는 체계가 필요하다. 환경부에서는 별도의 배출허용기준(안)의 설정을 위하여 「물환경보전법」 내에 「수질오염물질 지정 등에 관한 지침」을 마련하여 우선순위물질 목록, 감시항목 지정, 수질오염물질 지정 및 특정수질오염물질 지정에 관련한 절차가 체계적으로 마련되어 있다(Kim *et al.*[2011]). 이 외에도 「잔류성유기오염물질 관리법」을 통해 「잔류성유기오염물질에 관한 스톡홀름협약」 및 「수은에 관한 미나마타협약」에서 제시하는 물질로부터 환경을 보호하고자 노력하고 있다. 동법에 의하면 물질의 종류는 협약에 따르기에 물질선정 체계가 존재하지 않으나, 물질별 인체노출안전 기준, 환경기준, 배출허용기준을 각기 만들어 규제를 시행하고 있다.

반면에 해수부에서는 「해양환경관리법 선박오염방지규칙」에 유해액체물질을 분류하고 있으나 지정체계는 존재하고 있지 않으며, 해양환경전문가그룹(GESAMP; The Joint Group of Expert on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection)에서 생체축적, 생물분해, 수중생물 급·만성 독성, 인체독성 및 해양생물과 해저서식지 영향을 기준으로 목록화 한 X, Y, Z류의 799개 물질을 유해액체물질로 지정한 것이다. 그러므로 HNS의 경우 국내외사례를 참조하여 우선순위물질 지정체계와 수질준거치 산출체계를 포함한 배출허용기준 설정체계를 구축할 필요가 있다.

HNS의 경우 「환경정책기본법 시행령」의 사람의 건강보호기준에 5종의 물질(1,1,1-트리클로로에탄, 벤젠, 디클로로메탄, 페놀, 트

리클로로에틸렌), 「물환경보전법 시행규칙」의 수질오염물질 배출허용기준에 13종의 물질(페놀, 트리클로로에틸렌, 벤젠, 디클로로메탄, 사염화탄소, 1,1-디클로로에틸렌, 크로로포름, 1,4-다이옥산, 아크릴로니트릴, 나프탈렌, 폼알데하이드, 아크릴아미드, 스티렌), 그리고 「해양환경 보전 및 활용에 관한 법률 행정규칙」의 해양환경기준 사람의 건강강보호기준에 5종의 물질(1,1,1-트리클로로에탄, 벤젠, 디클로로메탄, 페놀, 트리클로로에틸렌)이 포함되어 있다. 그러므로 해양산업시설로부터 배출되는 HNS 관리의 시작을 위한 우선순위물질의 선정을 위하여 기존의 환경기준이나 배출허용기준이 설정되어 있는 물질을 대상으로 고려할 수 있을 것이다.

후보물질은 해양시설 업종별 사용량, 물질의 물리화학적특성, 위해성 등을 고려하여 우선순위목록으로 작성되고 대상물질의 PBT(Persistent, Bioaccumulative and Toxic)등의 자료를 기반으로 자문의견을 반영하여 조사대상물질로의 선정이 필요하다. 이렇게 선정된 조사대상물질은 해양시설에서의 배출실태조사를 통한 배출수 내 농도와 위해성기반 수질준거치와의 비교를 수행한다. 이때 인체위해성기준 수질준거치와 생태위해성기준 수질준거치를 이용하되 국가/지역 기반의 준거치가 마련되지 않았다면 기타 국내외 수질준거치를 활용하도록 한다. 만일 해양산업시설에서의 우선순위물질의 배출농도가 준거치 이상이라면 해당물질을 중점관리물질 목록으로 설정하여 지속적으로 관리하여 것이 바람직하다(Fig. 2). 반대로 실태조사결과 우선순위물질의 배출농도가 준거치 이하라면 인체 및 수생태계 유해성, 검출률 및 검출농도, 물질의 특성(잔류성, 생물농축도) 등의 요소를 평가하여 시급성을 평가한 뒤 후보물질에 목록화하여 체계적인 HNS 관리체계를 마련할 수 있다(Fig. 2).

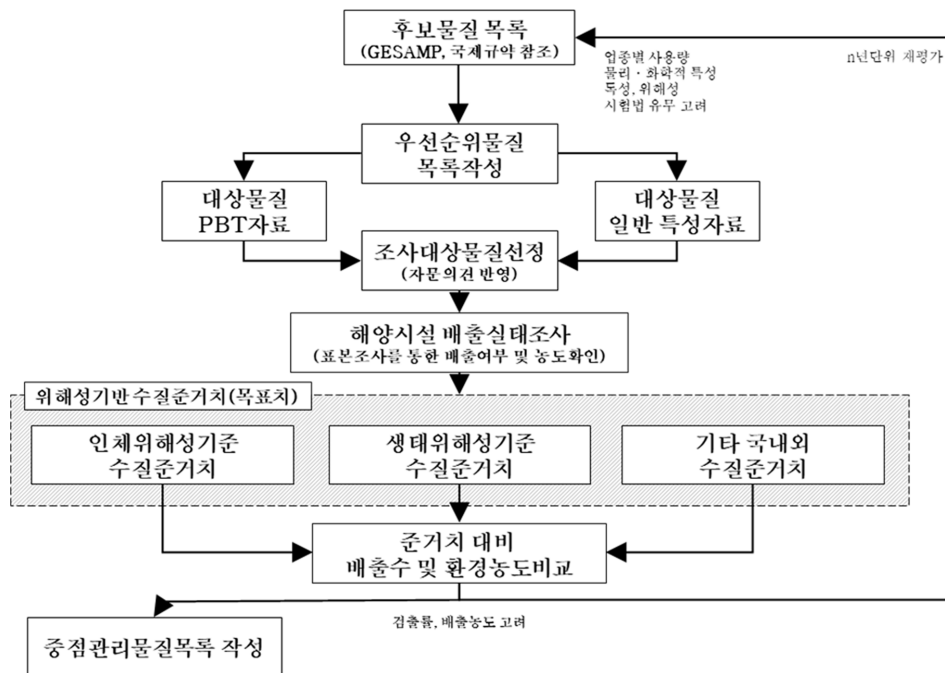


Fig. 2. Proposed workflow on the establishment of HNS emission limit and HNS listed designation system.

3.2 HNS 위해성기반 수질기준치 산출체계 제안

HNS에는 사람에게는 영향이 적거나 없는 물질이지만 수생생물에게는 민감한 영향을 줄 수 있는 구리(Cu), 니켈(Ni), 아연(Zn) 등과 같은 물질이 존재할 수 있다. 이에 인체보호와 해양생물의 보호를 위해 준거치를 분리하여 설정할 필요가 있다(Kim et al.[2017]). 실제로 USEPA, 일본 그리고 환경부에서는 유해화학물질 준거치를 별도로 제시하고 있으며, 국내에서도 2007년부터 수질환경기준을 수질 및 수생태계환경기준으로 변경·적용함으로써 인체 및 수생생물 보호를 강화하고자 한 바 있다.

3.2.1 인체독성기준 수질기준치 설정방법(안)

HNS는 발암성물질과 비발암성물질로 구분될 수 있으며, 발암성 물질의 정보는 국제암연구기관(IARC; International Agency for Research on Cancer) 혹은 EPA's IRIS(Integrated Risk Information System)에서 확인할 수 있다. IRIS혹은 IARC에서 발암가능물질(발암등급 B) 이상에 해당하는 물질은 발암물질로 규정하고, IRIS의 발암등급 D, E에 해당하거나(IARC의 경우 3, 4) RfD값이 존재하는 물질은 비발암물질로 규정하여 준거치를 설정한다(An et al.[2008]). 대부분의 국가들이 이와같은 방법을 채택하여 시행중에 있으며 그에 따라 본 연구에서 제안하는 수질기준치는 환경부 예규 「환경유해인자의 위해성 평가를 위한 절차와 방법 등에 관한 지침」에 따를 수 있을 것이다. 수질기준치는 Table 2에 제시하는 바와 같이 발암성 물질의 경우 선형 용량-외삽법에 의한 발암물질의 위해도에 따른 섭취량(RSD)값을 산출하며 우리나라 실정에 맞는 BW, DI, FI, BW 값과 생물축적계수(BCF값)을 통해 계산된다. 비발암성 물질일 경우 비발암성 영향 참고용량(RfD)과 물을 통하지 않은 오염원의 상대기여도(RSC) 값을 통하여 계산하여 준거치를 제시한다.

수질기준치의 경우 국가별 특성을 고려할수록 더욱 정확한 준거치를 제시할 수 있으므로(NIER[2019]), 인체독성기준 수질기준치는 최신의 계수를 사용해야 한다. 2019년 국립환경과학원에서 발간한 한국인의 노출계수 핸드북에 의하면 BW값은 64.5 kg, DI값은 1 L/day,

Table 2. Proposed methodology of deriving Ambient Water Quality Criteria (AWQC) based on the Human health for Korea

Carcinogenic HNS	$AWQC = RSD \times \frac{BW}{DI + (FI \times BCF)}$
Non-carcinogenic HNS	$AWQC = RfD \times RSC \times \frac{BW}{DI + (FI \times BCF)}$
RSD	$RSD = \frac{Cancer\ Potency\ (10^{-4} \sim 10^{-6})}{Cancer\ Slope\ Factor\ (q1)}$

RSD: Risk Specific Dose (mg/kg/d)
 RfD: Reference Dose (mg/kg/d)
 RSC: Relative Source Contribution
 *BW: Body Weight (= 64.5 kg)
 *DI: Drinking water Intake (= 1 L/d)
 *FI: Fishery intake (0.084 kg/d)
 BCF: Bioconcentration Factor (L/kg)

*According to the average body weight of Korean adults and average fish and shellfish intake (NIER, 2019)

FI값은 0.084 kg/day로 나타나 이를 적용시켜 계산하여야 할 것이다. Cancer potency값의 경우 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 범위로 적용하고 있으며, WHO에서는 10^{-5} 를 이용하므로 이를 고려해야 한다. 더불어 해역에 특성에 맞는 희석률과 섭취에 따라 위해도수준이 높을 가능성이 있는 해역에 대해서는 10^{-4} 을 채택하는 등의 효과적으로 보호가 가능한 위해도 수준을 채택해야 한다(USEPA[2000]). 또한 해양에 배출되는 HNS의 경우 생선체내 축적을 통한 인체노출량이 기하급수적으로 높아질 가능성이 있으므로, 물질의 특성에 맞는 생물축적 계수가 필요하다.

3.2.2 해양생태독성기준 수질기준치 설정방법(안)

해양생태독성기준 수질기준치의 경우 각 국가마다 다양한 방법을 사용하고 있다. 전술한 내용 같이 미국은 CMC와 CCC의 도출을 통하여 준거치를 제시하고, 환경부, 호주, 뉴질랜드는 SSD의 HC5% 값을 만성 준거치로 이용하고 있으며, 영국은 PNEC의 SSD값을 급성 준거치로 제시하며, 네덜란드는 최대허용농도(MPC; Maximum permissible concentration)을 통해 생태계 보호를 위한 수질 권고치를 제시하고 있다(European Communities[2000]; An et al.[2009]; Nam and An[2018]). 이에 본 연구에서는 급성독성과 만성독성을 모두 반영하는 확률생태위해성평가(PERA)방식 USEPA 기법을 기반으로 우리나라의 특성에 맞는 수질기준치 도출방법을 제시하고자 한다.

생태독성기준 수질기준치 설정을 위해서는 최소 10개의 분류군에 속하는 해양생물의 급성독성 및 만성독성 자료를 산출하여야 한다. 14일 이하의 노출결과를 통해 도출된 급성독성 EC_{50} 값은 GMAV를 도출하는데 사용되어지며, 14일 이상의 노출결과를 통해 도출된 만성독성 EC_{50} 값은 GMCV를 도출하는데 사용되어진다. 각 도출된 GMAV, GMCV값은 P(Cumulative probability)값과 함께 Table 3의

Table 3. Proposed methodology of deriving Ambient Water Quality Criteria(AWQC) based on the eco toxicological evaluation of Korea

CMC (µg/L)	$CMC = \frac{FAV}{2}$
CCC (µg/L)	$CCC = \frac{FAV}{2}$ or $\frac{FAV}{FACR}$
	$FC(A)V = e^A$
	$A = (S \times \sqrt{0.05}) + L$
	$L = \frac{\sum \ln[GMC(A)V] - \times \sum \sqrt{P}}{4}$
FCV, FAV (µg/L)	$S^2 = \frac{\sum \ln[GMC(A)V]^2 - \times \sum \ln[GMC(A)V]^2}{\sum P - \frac{(\sum \sqrt{P})^2}{4}}$
	$P = R/(N + 1)$

FC(A)V: Final Chronic (Acute) Value
 FACR: Final Acute-Chronic Ratio
 GMC(A)V (µg/L): Genus Mean Chronic (Acute) Value
 P: Cumulative probability
 R: Assign ranks
 N: Total number of MC(A)V in data set

Table 4. Proposed list of 14 Korean territorial marine species with endpoint for ecological risk assessment

Common name /Phylum	Class/Family	Species name	Endpoint	Standard	Reference
Bacteria/ Proteobacteria	Gammaproteobacteria/ Vibrionaceae	<i>Vibrio fischeri</i>	30min inhibition of bioluminescence	ISO 11348, *KSMME	Abbas <i>et al.</i> , 2018
Diatom/ Ochrophyta	Bacillariophyceae/ Skeletonemaceae	<i>Skeletonema costatum</i>	72h population growth inhibition 96h population growth inhibition	ISO 1053, KSMME	Heo <i>et al.</i> , 2018
Green algae/ Chlorophyta	Chlorophyceae/ Dunaliellaceae	<i>Dunaliella tertiolecta</i>	96h population growth inhibition	ASTM	Flood <i>et al.</i> , 2018
	Ulvophyceae/ Ulvaceae	<i>Ulva pertusa</i>	24h reproduction inhibition 48h reproduction inhibition	ISO 13308	Kim <i>et al.</i> , 2015
Brown algae/ Ochrophyta	Phaeophyceae/ Alariaceae	<i>Saccharina japonica</i>	24h germination inhibition 168h germtube length inhibition	KSMME	Han <i>et al.</i> , 2011
Brown algae/ Ochrophyta	Phaeophyceae/ Laminariaceae	<i>Undaria pinnatifida</i>	72h germination inhibition 21d sporophyte growth inhibition	KSMME	Park <i>et al.</i> , 2016
Amphipoda/ Arthropoda	Malacostraca/ Corophiidae	<i>Monocorophium acherusicum</i>	10d survival rate 42d survival rate	KSMME	Seok <i>et al.</i> , 2022
	Copepoda/ Harpacticidae	<i>Tigriopus japonicus</i>	48h survival rate 21d population growth rate	ISO, OECD, ASTM	Choi <i>et al.</i> , 2020(b)
Rotifer/Rotifera	Eurotatoria/ Brachionidae	<i>Brachionus plicatilis</i>	72h population growth inhibition 92h population growth inhibition	ASTM, KSMME	Choi <i>et al.</i> , 2018
Shellfish/ Mollusca	Bivalvia/ Ostreidae	<i>Crassostrea gigas</i>	1h fertilization rate 26h D-shape embryogenesis rate	KSMME	Choi H., 2021
Sea urchin/ Echinodermata	Echinoidea/ Strongylocentrotidae	<i>Hemicentrotus pulcherrimus</i>	10min fertilization rate 64h normal embryogenesis rate	KSMME	Choi <i>et al.</i> , 2020(a)
	Echinoidea/ Strongylocentrotidae	<i>Strongylocentrotus nudus</i>	10min fertilization rate 48h normal embryogenesis rate	KSMME	Choi <i>et al.</i> , 2021
Fish/Chordata	Actinopteri/ Serranidae	<i>Epinephelus akaara</i>	7d Survival rate of fertilized embryos	OECD 201(modified)	Ahn <i>et al.</i> , 2018
	Actinopteri/ Paralichthyidae	<i>Paralichthys olivaceus</i>	7d Survival rate of fertilized embryos	OECD 201(modified)	Kim <i>et al.</i> , 2019

*Korean Standard Method for Marine Environment

수식에 의해 CMC, CCC값을 도출할 수 있다.

한편 독성자료의 생산을 위하여 생태독성 시험생물로 외국도입종을 활용하면 자국 내 서식 생물들의 먹이사슬과 연관된 시험생물 간 상호 관련성을 고려할 수 없으며, 더욱이 각국의 해양환경특성을 제대로 반영하지 못한다는 문제가 있다(Park *et al.*[2003]; Lee *et al.*[2012]). 이에 각국에서는 경제적 비용 소모, 유입생물로 인한 생태계 교란을 포함한 자료의 지역특이성을 고려해 자국의 생물을 이용한 시험을 적용하고 있다. 한편 우리나라의 경우 생태독성시험법이 도입되던 시기에는 해양생물을 이용한 생태독성시험법이 부족한 상황이었으나, 현재는 10개 이상의 분류학 그룹에서 10개 이상의 시험법을 사용할 수 있는 상황이며, 그중 9개는 해양환경공정시험법에 등재되어있는 상황이다(Table 4). 그러므로 본 연구에서는 급성독성과 만성독성을 모두 고려하며, 최소 8개의 강(class) 혹은 과(family) 수준의 다른 그룹에서 10종 이상의 시험생물을 이용한 생태독성자료를 생산하는 것을 제안하고자 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 해양시설로부터 배출되는 HNS의 지정 및 배출허용기준 설정체계를 마련하고, 국내형 인체독성기준 수질준거치와

해양생태독성기준 수질 준거치를 설정하는 안을 제안하고자 하였다. HNS의 경우 유해액체물질의 분류는 「선박오염방지규칙」에 목록화 되어 있으나, 「물환경보전법」에 따라 처리하고, 동법에 따라 배출허용기준을 적용하여 배출하도록 되어있다(유해액체물질 799종 중 13종만 포함). 이에 「해양수산발전기본법」 및 「해양환경보전법」에 의해 해양생물 및 해양생태계의 보전 및 보호라는 목적을 달성하고자, 해양산업시설로부터 배출되는 HNS를 선정·지정하기 위한 지침이 포함된 배출허용기준과 그 설정체계가 필요하다. 또한, 배출허용기준을 설정하기 위한 국가적 특성과 해양환경 특성을 고려한 인체보호, 해양생물 및 해양생태계보호를 위한 수질 준거치와 수질준거치의 도출체계가 필요한 상황이다. 이에 국내수계에 적합하며 PERA기법을 이용한 수질준거치 설정체계를 제안하고자 하였다. 본 연구에서는 해양시설로부터 HNS가 배출되는 환경이 해역이라는 특수성을 고려하여, 국내형 인체독성기준 수질준거치 도출방법과 해양생태독성기준 수질준거치의 도출방법을 제안하였다. 또한 지속적인 생태독성평가기법의 발달은 최소 10개 이상의 분류학 그룹에서 10종 이상의 국내산 시험종을 이용한 준거치의 도출이 가능할 것으로 보인다. 해양환경에 분포하거나 육지로부터 유입되는 HNS와 관련된 연구는 시작하는 단계에 불과하다. 해역별 특성에 맞는 생물축적계수, 희석률 등 향후 HNS를 이용한

다양한 연구가 진행되는 것이 필요하며, 향후 생산되는 다양한 연구결과들의 정보공유체계 구축도 필요할 것이라 사료된다.

후 기

이 논문은 2022년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(20210660, 해양산업시설 배출 위험유해물질 영향평가 및 관리기술 개발).

References

- [1] Abbas, M., Adil, M., Ehtisham-ul-haque, S., Munir, B., Yameen, M., Ghaffar, A., Abbas, G., Tahir, M.A., Iqbal, M., 2018, Science of the Total Environment Vibrio fischeri bioluminescence inhibition assay for ecotoxicity assessment : A review. Sci. Total Environ. 626, 1295-1309.
- [2] Ahn, J.Y., Park, J.Y. and Lim, H.K., 2018, Cryobiology Effects of different diluents, cryoprotective agents, and freezing rates on sperm cryopreservation in *Epinephelus akaara*. Cryobiology 83, 60-64.
- [3] An, Y.-J., Nam, S.-H. and Lee, J.-K., 2008, Expanding the Substances of Water Quality Standard for the Protection of Human Health Based on Risk Assessment. Korean J. Limnol. 41(1), 34-42.
- [4] An, Y.-J., Nam, S.-H. and Lee, W.M., 2009, Comparative Study of Probabilistic Ecological Risk Assessment (PERA) used in Developed Countries and Proposed PERA approach for Korean Water Environment. J. Korean Soc. Water Environ. 25(4), 494-501.
- [5] ANZECC and ARMCANZ, 2000, Australian and New Zealand Guidelines for Fresh and Marine Water Quality. 1, 1-314.
- [6] Chae, Y.G., 2016, A Study on Environmental Quality Standards under the Framework Act on Environmental Policy. ELR, 38(3), 361-389.
- [7] Choi, H., Lee, J.-W., Park, Y.H., Lee, I.-S., Heo, S. and Hwang, U.-K., 2018, Ecotoxic Evaluations of BDE-47 and BDE-209 using Rotifer (*Brachionus plicatilis*). Korean J. Environ. Biol. 36(1), 43-49.
- [8] Choi, H., Park, Y.-H., Lee, J.-W., Kwon, K.-Y. and Hwang, U.-K., 2020(a), Toxic effects of new anti-fouling agents (diuron and irgarol) on the embryogenesis and developmental delay of sea urchin, *Hemicentrotus pulcherrimus*, Korean J. Environ. Biol. 38(4), 518-527.
- [9] Choi, J.S., Hong, S.H. and Park, J.-W., 2020(b), Evaluation of microplastic toxicity in accordance with different sizes and exposure times in the marine copepod *Tigriopus japonicus*. Mar. Environ. Res. 153, 104838.
- [10] Choi, H., 2021, Investigation of Microplastic in the Maricultural Organisms: Abundance, Absorption, Egestion, and Toxicity, Ph.D dissertation, Incheon National University.
- [11] Choi, H., Lee, J.-W., Lee, S.-M., Jeon, H.-J., Heo, S. and Hwang, U.-K., 2021, Ecotoxicity Evaluation of PFCs using Marine Invertebrate, Sea Urchin (*Mesocentrotus nudus*). Journal of Marine Life Science. 6(2), 80-87.
- [12] European Commission, 2011, Common implementation strategy for the water framework directive (2000/60/EC). Guidance document No. 27. Technical guidance for deriving environmental quality standards.
- [13] Flood, S., Burkholder, J.A. and Cope, G., 2018, Assessment of atrazine toxicity to the estuarine phytoplankter, *Dunaliella tertiolecta* (Chlorophyta), under varying nutrient conditions. Environ. Sci. Pollut. Res. 25, 11409-11423.
- [14] Han, T.J., Kong, J.-A., Kang, H.-G., Kim, S.-J., Jin, G.-S., Choi, H. and Brown, M.T., 2011, Sensitivity of spore germination and germ tube elongation of *Saccharina japonica* to metal exposure. Ecotoxicology. 20, 2056-2068.
- [15] Heo, S., Lee, J.-W., Park, Y.-H., Park, N.-Y., Lee, I.-S., Hwang, U.-K. and Choi, H., 2018, Toxic Assessment of BDE-47 and BDE-209 using the Population Growth Rates of *Skeletonema costatum*. Korean J. Environ. Biol. 36(3), 386-392.
- [16] IMO, 2010, Manual on oil spill risk evaluation and assessment of response preparedness. International Maritime Organization, London, ISBN: 978-92-801-1512-3.
- [17] Kim, H.J., Kang, H.S., Ryu, J.N., Lee, Y.G., Jung, A.Y., Lee, S.M., Lee, S., K, H.E., Jeon, S.M., Lee, C.H., Kim, C.G., Park, P.S., Jeong, J.W. and Park, D.H., 2017, A study on improving water quality and environmental standards for aquatic ecosystems.
- [18] Kim, J.H., Shin, J.S., Kim, S.J., Lee, J.Y., Lee, Y. S. and Yoo, S.J., 2011, Manual of Standard Technological Assessment for Establishment of Individual Wastewater Limitations on each Industrial Facility. National Institute of Environmental.
- [19] Kim, J.-H., K, Y.J., Kim, K.I., Kim, S.K. and Kim, J.-H., 2019, Toxic effects of nitrogenous compounds (ammonia, nitrite, and nitrate) on acute toxicity and antioxidant responses of juvenile olive flounder, *Paralichthys olivaceus*. Environ. Toxicol. Pharmacol. 67, 73-78.
- [20] Kim, Y.-J., Han, Y.-S., Kim, E., Jung, J., Kim, S.-H., Yoo, S.-J., Shin, G.-S., Oh, J.-J., Park, A.R., Choi, H., Kim, M.-S., Brown, M.T. and Han, T.J., 2015, Application of the *Ulva pertusa* bioassay for a toxicity identification evaluation and reduction of effluent from a waste water treatment plant. Frontiers in Environmental Science. 3(2), 1-9.
- [21] Lee, J.-H. and Kim, Y.-S., 2007, A Study on Water Quality Standard for the Protection of Human Health and Aquatic life. Journal of Korean Society on Water Quality, 23(6), 985-992.
- [22] Lee, M.J., Kim, K.W. and Kang, W.S., 2021, A Study on the Necessity and Direction of Regulations on the Emission of Hazardous and Noxious Substances from Marine Industrial Facilities. Korean Soc. Mar. Environ. Saf. 27(6), 737-743.
- [23] Lee, S.J., Kim, S.J., Lee, H.Y. and Choi, S.D., 2019, Determination of Effluent and Influent Limitations for Hazardous Chem-

- icals to Prevent Chemical Accidents in Wastewater Treatment Plants. *J. Environ. Anal. Health Tox.* 22(4), 277-290.
- [24] Lee, W.-M., Kim, S.W., Jeong, S.-W. and An, Y.-J., 2012, Comparative study of Ecological Risk Assessment : Deriving Soil Ecological Criteria. *The Journal of Korean Society of Soil and Groundwater Environment.* 17(5), 1-9.
- [25] Ministry of the Environment, Government of Japan, 2007, Environmental quality standards for water. Retrieved from <https://www.env.go.jp/en/standards/>.
- [26] Ministry of Environment, 2015, Development of water quality criteria for aquatic life I.
- [27] Ministry of Environment, 2016, Pollutant release and transfer register (2001-2016).
- [28] Nam, S.H. and An, Y.J., 2018, Investigation of Korean Native Organisms for Development of Ecotoxicity Test : (1) Aquatic Test Species. *J. Korean Soc. Environ. Eng.* 40(1), 34-47.
- [29] NIER, 2019, Korean Exposure Factors Handbook. Retrieved from <https://ecolibrary.me.go.kr/nier/#/search/detail/5686028>.
- [30] Park, J.H., Jin, G.-S., Hwang, M.-S., Brown, M.T. and Han, T.J., 2016, Toxicity tests using the kelp *Undaria pinnatifida* for heavy metal risk assessment. *Toxicology and Environmental Health Science*, 8, 86-95.
- [31] Park, Y.-S., Lee, S.-G., Lee, S.-J., Moon, S.-K., Choi, E.-J. and Rhie, K.-T., 2003, Heavy metal toxicity test in *Moina macrocopa* with Glucose-6-phosphate dehydrogenase activity. *J. Environ. Toxicol.* 18(4), 305-310.
- [32] RIVM, 2001, Guidance document on deriving environmental risk limits.
- [33] Seok, H.J., Kim, Y.R., Kim, T.W., Hwang, C.-H., Son, M.H., Choi, K.-Y. and Kim, C.-J., 2022, Biological Toxicity Assessment of Sediment at an Ocean Dumping Site in Korea, *Journal of the Korean society of Marine Environment & safety*, 28(1), 1-9.
- [34] Stephan, C.E., Mount, D.I., Hansen, D.J., Gentile, J.H., Chapman, G.A. and Brungs, W.A., 1985, Guidelines for deriving numerical national water quality criteria for the protection of aquatic organisms and their uses (p. 98). Washington, DC: US Environmental Protection Agency.
- [35] The HNS convention, IOPC Funds. last modified may 31, 2022, accessed Aug 17, <https://www.hnsconvention.org/the-convention/>
- [36] USEPA, 1976, Quality Criteria for Water.
- [37] USEPA, 2000, Methodology for Deriving Ambient Water Quality Criteria for the Protection of Human Health.
- [38] USEPA, 2006, National recommended water quality criteria.
- [39] USEPA, 2010, Guideline for deriving numerical national water quality criteria for the protection of aquatic organisms and their uses.
- [40] Wang, M., Tong, Y., Chen, C., Liu, X., Lu, Y., Zhang, W., He, W., Wang, X., Zhao, S. and Lin, Y., 2018, Ecological risk assessment to marine organisms induced by heavy metals in China's coastal waters, *Mar. Pollut. Bull.* 126, 349-356.

Received 4 October 2022

Revised 16 October 2022

Accepted 31 October 2022