

## 선체부착생물관리와 수중제거기술

현봉길\* · 장풍국\*\* · 신경순\*\* · 강정훈\*\*\* · 장민철\*\*†

\*, \*\* 한국해양과학기술원 선박평형수연구센터, \*\*\* 한국해양과학기술원 위해성분석연구센터

## Ship's Hull Fouling Management and In-Water Cleaning Techniques

Bonggil Hyun\* · Pung-Guk Jang\*\* · Kyoungsoo Shin\*\* · Jung-Hoon Kang\*\*\* · Min-Chul Jang\*\*†

\*, \*\* Ballast Water Research Center, Korea Institute of Ocean Sciences &amp; Technology, Geoje 53201, Republic of Korea

\*\*\* Risk Assessment Research Center, Korea Institute of Ocean Sciences &amp; Technology, Geoje 53201, Republic of Korea

**요약** : 국제해사기구는 선체부착생물의 위험성을 인식해서 2011년 ‘선체부착생물에 의한 외래위해종 이동 저감을 위한 관리 및 제어 가이드라인’을 공표하였고, 향후 이를 강제화하기 위한 국제 협약을 계획하고 있다. 본 연구에서는 향후 강제화 될 국제협약에 효과적으로 대응하기 위해 선체부착생물관리 관련 선도국 사례를 소개하고 수중제거에 대한 환경 위해성 평가 기법에 대해서도 알아보았다. 선체부착생물관리 관련해서 선도국인 호주와 뉴질랜드는 수중제거 시나리오 의거해 수행한 생물 및 화학 위해성 평가를 근간으로 선체부착생물관리 규제를 마련하였다. 자국 정부의 특별한 규정이 없는 대부분의 유럽 국가들은 국제해사기구의 선체부착생물 규정에 따라 수중제거를 수행하는 것으로 확인되었다. 우리나라인 경우 선체부착생물에 대한 국내법은 존재하지 않고, 해양 생태계법에 의거해서 약 17종의 해양생태계교란생물만 지정해서 관리하고 있다. 선박 선체에 대한 수중제거는 외래생물 확산 및 수생 환경으로의 화학 물질 방출을 수반하므로, 생물학적 위해성평가와 화학적 위해성평가를 별개로 수행한 후 이 둘의 평가를 종합하여 수중제거 수용 여부를 판단하였다. 생물학적 위해성평가는 수중제거과정에서 외래생물 유입에 영향을 미치는 핵심요소를 기반으로 40 code의 수중제거 시나리오 작성하고 위해성우선순위(Risk Priority Number, RPN) 점수를 산정하였다. 화학적 위해성평가는 수중제거 시 용출되는 구리(Copper) 농도를 기준으로 MAMPEC(Marine Antifoulant Model to Predict Environmental Concentrations) 모델 프로그램을 사용하여 PEC(Predict Environmental Concentration) 값과 PNEC(Predict No Effect Concentration) 값을 산출하였다. 최종적으로 PEC/PNEC 비의 값이 1 이상이면 화학적 위해성이 높음을 의미한다. R/V 이어호가 부산 감천항에서 수중제거를 수행한다는 가정하에 위해성평가를 시범 실시한 결과, 생물학적 위해성은 RPN이 <10,000 이어서 저위험으로 판단되었으나, PEC/PNEC 비의 값이 1 이상으로 화학적 위해성이 높아 최종적으로 수중제거가 불가능한 것으로 평가되었다. 따라서 우리나라도 선도국 사례를 참조해서 수중제거기술을 개발하고 또한 국내 항만 현실에 맞는 선체부착생물관리 국내법을 제정해야 할 필요가 있을 것이다.

**핵심용어** : 선체부착생물, 선체부착생물관리, 환경 위해성 평가, 생물학적 위해성평가, 화학적 위해성평가

**Abstract** : The International Maritime Organization (IMO) has recognized the risk of hull fouling and announced ‘2011 Guidelines for the control and management of ship’s biofouling to minimize the transfer of invasive aquatic species’ and is planning international regulations to enforce them in the future. In this study, to effectively respond to future international regulation, we introduce the case of leading countries related to management of hull fouling and also investigate environmental risk assessment techniques for in-water cleaning. Australia and New Zealand, the leading countries in hull fouling management, have established hull fouling regulations through biological and chemical risk assessment based on in-water cleaning scenarios. Most European countries without their government regulation have been found to perform in-water cleaning in accordance with the IMO’s hull fouling regulations. In the Republic of Korea, there is no domestic law for hull fouling organisms, and only approximately 17 species of marine ecological disturbance organisms, are designated and managed under the Marine Ecosystem Law. Since in-water cleaning is accompanied by diffusion of alien species and release of chemical substances into aquatic environments, results from biological as well as chemical risk assessment are performed separately, and then evaluation of in-water cleaning permission is judged by combining these two results. Biological risk assessment created 40 codes of in-water cleaning scenarios, and calculated Risk Priority Number (RPN) scores based on key factors that affect intrusion of alien species during in-water cleaning. Chemical risk assessment was performed using the MAMPEC (Marine Antifoulant Model to Predict Environmental Concentrations), to determine PEC and PNEC values based on copper concentration released during in-water cleaning. Finally, if the PEC/PNEC ratio is >1, it means that chemical risk is high. Based on the assumption that the R/V EARDO ship performs in-water cleaning at Busan’s Gamcheon Port, biological risk was estimated to be low due to the RPN value was <10,000, but the PEC/PNEC ratio was higher than 1, it was evaluated as impossible for in-water cleaning. Therefore, it will be necessary for the Republic of Korea to develop the in-water cleaning technology by referring to the case of leading countries and to establish domestic law of ship’s hull fouling management, suitable for domestic harbors.

**Key Words** : Ships’ hull fouling, Ships’ hull fouling management, Environmental risk assessment, Biological risk assessment, Chemical risk assessment

\* First Author : bghyun@kiost.ac.kr, 055-639-8516

† Corresponding Author : mcjang@kiost.ac.kr, 055-639-8511

## 1. 서론

선박을 통한 해양 생물의 국가간 이동은 다양한 경로를 통해 이루어지는데, 그 중 가장 대표적인 것이 선박평형수이다 (Ruiz et al., 2000; Hyun et al., 2016; 2017). 선박평형수는 선박의 안전 및 운항을 위해서는 필수적인 요소지만, 해양 환경 측면에서는 외래 생물 유입에 따른 해양 생태계 교란 및 종 다양성을 저하시키는 주요 원인으로 지목되어 왔다(De Stasio et al., 2014; Hyun et al., 2016). 이에 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)의 해양환경보호위원회(Marine Environment Protection Committee, MEPC)는 2004년에 선박평형수 및 퇴적물 관리 방안에 관한 국제 협약을 채택하였고, 2017년 9월 8일에 발효됨으로서 선박평형수를 통한 유해생물의 확산을 방지하는 국제적인 규제의 틀이 마련되었다.

선박을 통한 유해생물 이동의 또 다른 원인은 선체부착생물에 의한 오손(Fouling)이다. 최근 연구 결과에 따르면, 필리핀, 호주, 뉴질랜드, 미국 샌프란시스코 등 세계 주요 항만에서 선박평형수보다 선체부착생물오손(Hull fouling)을 통한 생태계 교란이 더 심각하다고 보고되고 있다(e.g., Chan et al., 2015). 선체부착생물오손이란 미세생물로부터 동물에 이르기까지 의도하지 않았지만 해수면에 잠긴 선박의 구조물에 생물이 부착된 상황을 말하며, 생물들의 선체 부착으로 인해 선박의 운항 속도가 감소하고, 연료 소모율이 최대 40%까지 증가하며, 부착된 구조물을 부식시켜서 구조물 수명을 단축시킬 뿐만 아니라, 부착생물 제거를 위해 건조(Dry dock) 이용 시 시간 및 추가적인 비용도 발생된다(e.g., Yebra et al., 2004). 이에 IMO의 MEPC는 선체부착생물의 위험성을 인식해서 2011년 ‘선체부착생물에 의한 외래위해종 이동 저감을 위한 관리 및 제어 가이드라인’을 공표하였고, 선체부착생물에 대해 환경 친화적 규제 및 과학적인 위해성 평가가 필요하다고 명시하였다(MEPC, 2011). 미국 캘리포니아주에서는 2017년 10월 1일 이후 캘리포니아 주 항구에 접안하는 총톤수 300톤 이상의 모든 선박은 ‘Marine Invasive Species Program Annual Vessel Reporting Form(New)’을 작성해서 제출해야 하며, 2018년 1월 1일 이후에 인도되는 신조선은 인도 시부터, 그리고 운항중인 현조선은 2018년 1월 1일 이후 최초로 도래하는 정기 드라이도크까지 선체부착생물오손 관리계획서 및 선체부착생물오손 기록부를 의무적으로 작성해야 한다.

선박의 선체에 생물 오손으로 인한 피해를 줄이기 위해 가장 보편적으로 사용하는 방법은 방오도료를 활용한 생물오손방지기술이다. 1960년대 Tributyltin(TBT) 계열의 방오도료가 개발되었고(Kotrikla, 2009), 1970년대 이후 널리 사용되었다(Champ and Seligman, 1996). 하지만 TBT 계열 방오도료

는 매우 우수한 생물부착방지효율을 가졌지만, 상대적으로 매우 낮은 농도(part per trillion level)에서도 해양 생물에게 부정적인 영향을 미친다는 연구 결과가 발표되어서 세계 각국은 TBT 계열 방오 도료 사용에 대해 많은 고심을 하게 되었다(e.g., Leung et al., 2001). TBT의 생물 위해성 연구 보고는 1975년 프랑스 굴 양식 산업 붕괴되면서 처음으로 공개된 후, 조개껍질 기형(Alzieu and Heral, 1984), 홍합 유생 사망(Beaumont and Budd, 1984), 복조류의 임포섹스(imposex) 현상(Bryan and Gibbs, 1991) 등 많은 TBT 피해 사례들이 보고되었다. Cheung et al.(2003)은 홍콩 연안에서 퇴적물내 TBT 농도가 2.4~2,837 mg kg<sup>-1</sup>(Dry weight)로 매우 높아서 TBT 오염이 매우 심각하며, 긴 반감기로 인해 자연적으로 개선이나 회복이 거의 진행되지 않을 것으로 예측하였다. 이러한 TBT가 가지고 있는 생물 독성 및 긴 반감기로 인해 1980년대 중반 많은 국가들이 사용을 금지하였으며(de Castro et al., 2012), 2008년 9월 IMO에서 유기주석화합물을 기반으로 생산되는 모든 방오도료 사용을 금지하였다(IMO, 2005). TBT 사용 금지 이후 현재까지 사용되고 있는 방오도료는 크게 구리(Copper-based products)를 함유한 제품과 구리를 함유하지 않은 제품(Copper-free products)으로 구분된다(Hearin et al., 2015). 하지만 이들 방오도료 또한 무척추동물 및 식물플랑크톤 성장을 저해한다고 보고되고 있다(Nimmo and Hamaker, 1982; Brand et al., 1986). Diuron과 Irgarol 1051은 가장 대표적인 TBT 대체 방오도료로 많이 사용되었지만, 연구 결과 해당 방오 도료가 광합성을 하는 생물의 성장을 저해하고, 다른 대체 방오도료들에 비해 상대적으로 해양 및 해양 퇴적물 속에서 매우 안정적인 상태로 존재해서 해양 생태계에 부정적인 영향을 미친다고 보고 되었다(Zhou, 2008; Thomas and Brooks, 2010; Kim et al., 2015). 그래서 2000년대 초 영국, 스웨덴, 덴마크, 프랑스를 포함한 몇몇 국가들은 Diuron과 Irgarol 1051의 사용을 금지하였다(Readman, 2006; Zhou, 2008; Silkina et al., 2009; Sapozhnikova et al., 2013; Kim et al., 2015).

선박평형수관리협약 사례처럼, IMO에서는 선체부착생물 국제협약을 제정할 계획이다. 선체부착생물협약이 제정되면, 생물 오손 방지 및 제거 기술 관련 새로운 시장이 열릴 것이고, 이는 선박 제조사, 선주, 항만당국, 선박 청소 및 정비 기술자등의 이해관계자들에게도 심대한 영향을 미칠 것으로 예측된다. 따라서 아국의 산업 활성화 측면에서 수중 제거 시 수중제거 파생물을 환경 위해성이 없는 수준 내에서 제거 및 회수 할 수 있는 친환경적인 수중제거기술개발이 필요한 실정이다. 또한 선박평형수관리협약 사례를 참고하였을 경우, 선체부착생물 국제협약 발효 시 까지 약 10년 정도의 시간이 소요될 것으로 판단된다. 따라서 선체부착생물관리규정이 존재하지 않는 국가인 경우 해당 기간 동안

자국 항만 내 선체부착생물 수중 제거로 인해 항만 환경이 심각한 수준으로 오염 될 것으로 예측된다. 현재 선체부착생물 관련 국내 연구는 뉴질랜드와 같은 선도국에 비해 많이 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 선체부착생물관리 관련 선도국 사례를 소개하고, 수중제거 위해성 평가를 통해 선체부착생물규제 국내법 제정의 필요성에 대해서 알아보고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

2017년 3월 감천항에서 한국해양과학기술원 연구선 이어도(R/V EARDO)호 상가수리 시, 선체부착생물의 종류 및 양을 확인하기 위해 선박의 선저 사진을 촬영하였으며(Fig. 1), 사진 촬영 및 샘플링 종료 후 고압세척기(Water-Jet)를 이용해서 선체부착생물을 제거하였다. 선체부착생물 제거 전 다양한 방법(사진, 방형구)을 통해서 부착생물의 종류와 양을 확인하였고, 고압세척기를 활용해서 선체부착생물 제거 시 발생된 유출수내 화학적 인자들도 분석하였다. 보다 자세한 실험 방법 및 연구 결과는 Kang(2018)의 연구 결과 보고서에서 확인 할 수 있다. 이렇게 획득한 자료를 이용해서 이어도호가 감천항내에서 water-jet 방식으로 선체부착생물 수중 제거를 수행한다는 가정하에 부산물 위해성 시범 평가를 수행했다. 수중 제거 부산물 위해성 평가는 크게 외래종의 유무 및 환경 적응 가능성 등을 고려해서 평가하는 생물학적 위해성 평가와 수중 제거 시 발생하는 유출수내 중금속 및 살생물제 농도와 발생량 결과를 활용한 화학적 위해성 평가로 나누어서 수행했다. 생물학적 위해성 평가를 수행하기 위해 먼저 감천항내 수중제거 위해성 핵심 관리요소를 선정하고, 이를 통해 수중제거 시나리오를 도출하였다. 수중제거 시나리오별 상대적인 생물 위해성 평가를 위해 감염 유형 및 영향 분석(Infection Modes and Effects Analysis, IMEA)을 수행한 후 각 시나리오별 위험우선순위(Risk Priority Number)를 산출하였다. 화학적 위해성 평가는 MEMPEC(Marine Antifouling Model to Predict Environmental Concentration) 모델을 이용하였으며, 방오도료에 많이 사용되는 구리(Copper) 농도를 이용해서 PEC(Predict Environmental Concentration) 값과 PNEC(Predict No Effect Concentration) 값을 이용해서 PEC/PNEC 값을 산출하였다. PEC/PNEC 값이 1보다 높은 경우 수중제거 시 해당 항만 위해도가 높아지게 된다. 최종적으로 생물학적 위해성 평가 결과와 화학적 위해성평가 결과를 토대로 선체부착생물 수중 제거 가능 여부를 결정하였다. 선저부착생물관련 수중 제거 기술 및 국가별 관리 사례는 Floerl et al.(2010), Morrissey and Woods(2015), Burrows and Aitken(2015) 등의 문헌 내용을 참고해서 작성하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 수중제거 기술 및 환경 위해성

선체부착생물 수중 제거는 사용하는 수중 제거 기술의 종류, 부착생물과 함께 배출되는 방오도료 종류 및 살생물제 함량에 따라 서로 다른 수준의 해양 환경 위험을 야기 할 수 있다. 현재 사용 되고 있는 수중 제거 기술을 보면, 모터의 동력 힘을 이용하지 않고 브러쉬(Brush), 끌(Scraper) 등을 이용해서 제거하는 수동 제거(Manual removal) 방식, 모터 동력의 힘을 이용해서 부착생물을 제거하는 기계적 제거(Mechanical removal) 방식, 기계적 힘을 이용하지만 추가적으로 사멸된 생물을 분리·수거 하지 않아도 되는 표면처리(Surface treatment) 방식, 선체 표면을 감싸서 처리하는(Shrouding technologies) 방식 등이 있다(Table 1). 일반적으로 수동 제거 및 감싸서 부착생물을 제거하는 방식은 낚시배, 요트 등과 같은 소형선박에 주로 적용되며, 상선에는 모터의 동력을 이용해서 부착생물을 제거하는 기계적 제거 및 표면 처리 방식이 주로 사용된다(Table 1). 기계적 제거 방식은 다시 잠수부들의 차량(cart)을 직접 운용하는 방식과 원격제어차량(Remotely operated vehicle, ROV) 등을 조정하면서 처리하는 방식으로 구분된다(Morrissey and Woods, 2015). 현재 전 세계적으로 가장 보편적으로 많이 사용하는 있는 수중제거기술은 기계적 제거방식인데, 대다수의 방법이 선체 방오도료에 영향을 줄 뿐만 아니라 제거된 과생물을 수거할 수 있는 시스템도 없이 운영되고 있다. 실제로 회전식 브러쉬(Rotary brush) 방식을 이용해서 전체 선박 표면에 부착된 생물 제거 시 매년 약 1,000,000톤 정도의 살생물제를 함유한 활성물질이 발생되며, 이는 작업을 수행하는 잠수사 및 해양환경에 심대한 영향을 미칠 수 있다(<http://wikigreen.net/one-shipping-giant-can-release-10000-tons-of-biocides-into-oceans-every-year/>). 또한 Cart 및 ROV 등과 같은 기계 장비를 사용하기 때문에 선체의 평평한 면에는 적합하지만 굴곡이 있는 프로펠러 부분 및 안쪽 들어가거나 혹은 바깥쪽으로 튀어나온 부분의 청소에는 부적합하다. 최근 수동 및 기계적 제거 방식을 이용한 부착생물 제거 시 떨어져서 확산되는 생물 및 방오도료의 위해성에 대한 우려로 뉴질랜드와 호주를 포함한 몇몇 국가는 드라이도크 방법과 선체표면을 감싸는 방법 사용을 권장하고 있다. 드라이도크 방식은 우선 선박을 부유식 이동 도크에 정박을 시킨 후 물리적 장비(브러쉬, 고압세척, 끌)를 이용해서 세척을 진행하며, 세척 과정에서 발생하는 부착생물 및 방오도료 성분을 여과 시스템 및 오염물질 저장탱크 등을 이용해서 해양 환경으로 유출되는 것을 방지하는 방식이다. 소형선박에만 주로 적용이 되었던 선체 표면을 감싸는 방식은 선박을 비닐 같은 재질로 감싸서 무산소 상태를 만들어

Table 1. Summaries of in-water cleaning methods (referred as study by Morrisey and Woods (2015))

Treatment method	Manual removal		Mechanical removal				Surface treatment		Shrouding technologies		
	Hand-removal with brushes, scrapers and pads	Rotary brush/pad: hand-held devices	Rotary brush/pad: diver-operated brush carts	Contactless mechanical system	High-pressure water jet: hand tools	High-pressure water jet: cart/ROV	Cavitational jet	Hot water/heat/steam	Encapsulation	Encapsulation with biocide	Shrouding with manual or mechanical cleaning
Suitable for vessel	*RL	S	M	M	RL	M	M	M	RL	RL	RL
Target application	Isolated patches of fouling	Continuous sections of hull	Continuous sections of hull	All hull surfaces including niche areas	Hull sections, sea chests	Continuous sections of hull	Continuous sections of hull	Hull sections, sea chests if gratings removed, isolated patches of fouling	All hull surfaces including niche areas	All hull surfaces including niche areas	All hull surfaces including niche areas
Effect on anti-fouling coating	Potential	High potential	High potential	None	Potential	Potential	None	None	None	None	Depends on the tools used by divers
Ability to capture	Generally no.	Generally no.	Generally no.	Generally no.	Generally no.	ROV: Yes, Cart: generally no	Generally no.	Not required	Yes	Yes	Yes

\* RL (Recreational and light commercial vessels), S (Small commercial vessels), M (Merchant shipping vessels)

Table 2. Examples of hull fouling management in Europe (referred as study by Møller and Stuer-Lauridsen (2016))

	Hull cleaning locations	Required facilities	Methods employed	Frequency	Guidelines
Denmark	Mainly shipyards. In-water cleaning in ports and anchorage.	Dry-docks, robot/divers in-water.	Sandblasting and water jet streams in ship yards. Under-water ROVs apply brushes or jet streams.	Parallel with repairs or servicing, i.e. variations between 0.5-5 year intervals.	Promotes the IMO guidelines. Harbour permissions given locally.
Finland	-	Divers for in-water cleaning.	One Finnish company offers in-water cleaning by divers using brushes and residue collection.	When needed.	No national guidelines
Germany	Large Dockyards	Dry-docks.	Sand blasting	-	International guidelines.
Netherlands	Dockyards. However, an initiative involving in-water ROVs in one port is mentioned.	Dry-docks with high-pressure jet streams	Removed fouling material is sampled for toxic levels of inorganics, then discarded as waste and thus not returned into the water.	No information available.	Promotes the IMO guidelines.
Norway	Shipyards.	Dry-dock	-	Parallel with repairs or servicing.	Promotes the IMO guidelines. Harbour permissions given locally.
Poland	Repair shipyards	Dry-dock	The mechanical methods like sandblasting, washing under high pressure by means of hydro monitors are used in the shipyards.	Parallel with repairs or servicing.	No national guidelines
Scotland	Dry-docks in e.g. Aberdeen, Edinburgh and Garval Clyde.	Dry-docks.	Power wash with dock hoses to remove fouling and the current paint, then re-coating with new antifoulant. In some cases a couple of layers can be applied, with a primer being used as a base.	Generally every 1-3 year. Ferries typically have yearly turnarounds. Oil and gas vessels every 2-3 year.	Pollution Prevention and Control Regulations. MEPC's biofouling guidelines are recommended.
Sweden	Dry-docks, in port at designated quays or in designated areas. Hull cleaning is performed (at least) in Helsingborg, Göteborg, and Stockholm	Dry-docks, robot/divers in-water.	In general, divers use brushes and hull cleaning robots use water jet technique. One company uses cleaning robots, and another company uses brushes and residue collection.	When ships are to be repainted every 3-5 years they dry-dock but in-water hull cleaning takes place in between those intervals. Dependent on the grade of fouling, some ship-operators performs hull cleaning every 6th month.	No national guidelines.
Australia/ New Zealand	-	Dry-docks, robot/divers in-water	In general, divers use brushes and hull cleaning robots use water jet technique.	6-12 month interval	Australia and New Zealand rule (joint policy document).

서 생물을 제거 하는 기술로, 뉴질랜드에서 *Styela clava*와 *Didemnum vexillum*을 현장에서 제거하기 위해 고안되었다 (Coutts and Forrest, 2005; 2007). 하지만 이 기술은 무산소 상태 (Anoxic condition)로 만드는데 오랜 시간이 소요되기 때문에 균함 및 중규모 이상의 선박에 적용이 되지 않다가, 화학물질 첨가로 무산소 시기를 앞당길 수 있게 되면서 최대 길이 30 m 선박에 적용 가능하다고 보고되었다(Morrissey and Woods, 2015). 요약하면, 현재까지 사용하는 대부분의 수중 제거 기술은 떨어져 나가는 생물과 방오도로 성분을 흡수할 수 없는 기술적 한계가 있으며, 이로 인해 해양으로 유출된 엄청난 양의 외래생물 및 활성물질이 많은 국가의 해양 생태계를 교란하였거나 오염 시킨 것으로 확인된다. 하지만 선체부착생물제거를 하지 않았던 시기에도 해양유해생물이 국가 간 이동이 보고되고 있고, 선박의 연료 절감 측면에서도 정기적인 선체부착생물 제거는 이루어져야하기 때문에, 건식 도크 사용이 비용 및 시간적 측면에서 비효율적이라면, 수중 제거 시 발생하는 유해물질을 제거 할 수 있는 친환경적인 수중 제거 기술을 개발해야 할 것이다.

### 3.2 선체부착생물관련 국가별 관리 사례

IMO에서는 현재까지 선체부착생물관리 협약을 제정·발효하지 않았지만, ‘환경 친화적인 처리’에 근거해서 수중 제거 파생물을 환경위해성 없는 수준 내에서 제거 및 회수할 수 있는 수중제거기술 사용을 권고하고 있다. 이에 몇몇 국가에서는 국제해사기구 및 자국의 규정을 근거로 적용 가능한 선체 부착생물 처리 기술 및 방법에 대한 관리를 수행하고 있다(Møller and Stuer-Lauridsen, 2016). 유럽 국가들의 사례를 살펴보면, 대부분의 국가들에서 선체부착생물 제거에 대한 자국 정부의 특별한 규정이 존재하지 않을 경우 국제해사기구의 선체부착생물 규정에 따라 수중 제거가 가능한 건조식 도크를 이용해서 부착생물을 제거를 하는 것으로 확인되었다(Table 2). 그리고 스코틀랜드와 스웨덴은 사전에 지정된 장소의 건조식 도크를 이용해서만 부착생물 제거가 가능하며, 네덜란드 또한 조선소 내 건조식 도크 사용을 기본으로 하지만 ROV를 이용한 수중 제거 관련 계획도 언급하고 있다. 몇몇 국가에서 건조식 도크를 이용해서 제거할 것을 규정하였지만, 이러한 규정이 존재하지 않는 국가가 더 많기 때문에, 비용 및 시간 등을 고려해서 부착생물 관련 규정이 없는 국가 항구 정박 시 수중에서 선체부착생물을 제거하는 방식을 많이 사용하고 있다. 하지만 수중제거를 할 경우에 시간 및 비용적인 측면에서 장점을 가지지만 외래종 및 활성물질이 유입 등과 같은 환경적인 측면에서는 단점을 가지고 있다(ANZECC, 1996; Woods et al., 2007). 선체부착생물 제거 주기도 국가마다 상이한데, 덴마크, 노르웨이, 폴란드는

수리 및 정비를 받을 때 부착생물을 제거하면 되는 데 반해, 스코틀랜드는 선박의 종류, 스웨덴은 선체에 부착된 생물량에 따라서 주기가 다르게 적용되는 것을 확인할 수 있었다 (Table 2). 따라서 향후에 수중에서 선체부착생물을 제거하기 위해서는 국제법 및 각 항만 선체부착생물관리규정에 위배가 되지 않아야만 수중 제거를 수행할 수 있을 것으로 예측이 된다.

### 3.3 선체부착생물 국내법 현황 및 제정 필요성

현재 우리나라는 해양 생태계의 보전 및 관리에 관한 법률(해양생태계법)에서 선체부착생물오손을 통하여 유입되는 생물에 대한 개념은 존재하지 않고, 대신에 보다 넓은 개념의 ‘유해해양생물’ 및 ‘해양생태계교란생물’이 존재한다. 해양생태계법 제2조에 의거해 유해해양생물은 사람의 생명이나 재산에 피해를 주는 해양 생물로서 해양수산부령이 정하는 종을 말하며, 해양생태계교란생물은 외국으로부터 인위적 혹은 자연적으로 유입되었거나 유전자변형생물체중 해양생태계의 균형에 교란을 가져올 우려가 있는 해양생물을 지칭한다. 2017년 10월 기준으로 17종의 유해해양생물 및 1종의 해양생태계교란생물이 지정되었다. 우리나라 양식산업에 피해를 주는 극피동물인 ‘아무르불가사리(*Asterias amurensis*)’는 IMO 에서도 선체부착생물오손을 통해 유입될 수 있는 주요 침입종 9종 중 하나로서 공시하고 있다(Suk, 2018). 선체부착생물관리 관련 국제 협약이 체결 되려면 선박평형수관리협약 사례(10년)를 참고하였을 경우, 유사한 시간이 소요될 것으로 판단된다. 따라서 대부분의 국가는 자국의 해양생태계를 보호하기 위해 현재 만들어진 규정을 보다 엄격하게 조정하거나 새롭게 제정할 것으로 예측되며, 우리나라도 선체부착생물관리 관련 세계적 흐름에 편승하기 위해 빠른 시간 내에 국내 주요 항으로 접안하는 선박에 대한 부착생물관리 규정이 필요한 실정이다. 호주와 뉴질랜드는 선체부착생물관리를 가장 체계적으로 수행해 오고 있는 국가로, 2014년 5월에 선체부착생물관리 관련 규제인 ‘선박 위험관리 기준(Craft Risk Management Standard, CRMS)’을 시범 적용하였고, 2018년 5월 15일에 발효가 되었다. CRMS의 핵심 내용은 다음과 같다: i) 반드시 ‘clean hull’ 상태로 입항 ii) 입항 전 30일 이내에 모든 오손생물 제거 증명 iii) ‘clean hull’ 상태가 아닐 경우, 입항 24시간 이내에 자국의 가이드라인에 의한 수중제거 필수. 호주와 뉴질랜드의 선체부착생물관리 규제안은 수중 제거 시나리오를 바탕으로 수행한 생물 위해성 평가와 화학위해성 평가를 근간으로 제정되었다(Morrissey et al., 2013). 따라서 우리나라도 선도국 사례를 참조해서 우리나라 주요 항구에 도착하는 선박의 입출항 및 선체부착생물오손의 현황, 수중제거 파생물 실험 결과, 전문가 자문 등을 종합적으로

고려한 위해성 평가를 수행하고, 이를 토대로 국내 항만 현실에 맞는 선체부착생물규제 국내법을 제정해야 할 필요가 있다.

### 3.4 부산 감천항 수중제거 환경 위해성 시범 평가

#### 3.4.1 생물학적 위해성 평가

부산 감천항 내 생물학적 위해성 시범 평가를 수행하기 위해 수중 제거 시 고려되어야 할 핵심 관리 요소를 선정하였다. 선정된 핵심요소는 선체부착생물 기원, 방오도로 코팅 형태, 부착생물 형태, 수중제거 방법, 수중제거 파생물 포집 적용 여부 등이다(Fig. 1, Table 3). 핵심 관리 요소를 기반으로 총 40개의 가상 시나리오에 대해서 IMEA 분석을 수행한 후 RPN을 구해서 각각의 시나리오별 위험 정도를 확인하였다(Table 4 and 5). IMEA 분석 시 먼저 침입종 유입이나 정착을 유발할 수 있는 6개의 핵심구성인자를 규정하였고, 개별 구성인자에 대해 생물 유입 관점에서 1점(저위험)에서 10점(고위험)의 RPN값 산정을 위한 기준을 정하였다(Table 5). 이러한 산정 기준은 뉴질랜드 연구 사례를 참고하였다(Morrissey and Woods, 2015).

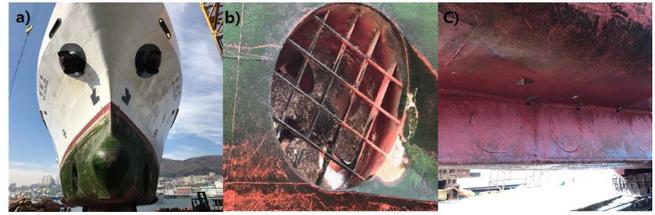


Fig. 1. Examples of biofouled hull (a), propeller (b), bottom of hull (c).

Table 3. Core factors for creating an in-water cleaning scenario

<b>① Biofouling origin</b> · International · Domestic	<b>④ Cleaning method</b> · None · Soft tool · Brushes · Water-jet
<b>② Anti-fouling coating type</b> · Biocide · Biocide-free	<b>⑤ Debris capture?</b> · Not applicable · No · Yes
<b>③ Biofouling type</b> · Microfouling · Macrofouling	

Table 4. In-water cleaning scenario of ship's hull fouling

Code	Biofouling origin	Anti-fouling coating type	Biofouling type	Cleaning method	Debris capture
1				None	Not applicable
2				Soft tool	No
3			Microfouling	Brushes	No
4				Soft tool	Yes
5				Brushes	Yes
6		Biocide		None	Not applicable
7				Brushes	No
8			Macrofouling	Water-jet	No
9				Brushes	Yes
10	International			Water-jet	Yes
11				None	Not applicable
12				Soft tool	No
13			Microfouling	Brushes	No
14				Soft tool	Yes
15				Brushes	Yes
16		Biocide-free		None	Not applicable
17				Brushes	No
18			Macrofouling	Water-jet	No
19				Brushes	Yes
20				Water-jet	Yes
21				None	Not applicable
22				Soft tool	No
23			Microfouling	Brushes	No
24				Soft tool	Yes
25				Brushes	Yes
26		Biocide		None	Not applicable
27				Brushes	No
28			Macrofouling	Water-jet	No
29				Brushes	Yes
30				Water-jet	Yes
31	Domestic			None	Not applicable
32				Soft tool	No
33			Microfouling	Brushes	No
34				Soft tool	Yes
35				Brushes	Yes
36		Biocide-free		None	Not applicable
37				Brushes	No
38			Macrofouling	Water-jet	No
39				Brushes	Yes
40				Water-jet	Yes

선체부착생물관리와 수중제거기술

Table 5. IMEA component and scoring criteria for RPN value estimation

Score	Component 1	Component 2	Component 3	Component 4	Component 5	Component 6
1 (Lowest risk)	Highly unlikely	0-10%	0-10%	Highly unlikely	Highly unlikely	Highly unlikely
2	Unlikely	10-20%	10-20%	Unlikely	Unlikely	Unlikely
3	Slight chance	20-30%	20-30%	Slight chance	Slight chance	Slight chance
4	Small chance	30-40%	30-40%	Small chance	Small chance	Small chance
5	Occasional	40-50%	40-50%	Occasional	Occasional	Occasional
6	Moderate chance	50-60%	50-60%	Moderate chance	Moderate chance	Moderate chance
7	Frequent	60-70%	60-70%	Frequent	Frequent	Frequent
8	Highly likely	70-80%	70-80%	Highly likely	Highly likely	Highly likely
9	Very likely	80-90%	80-90%	Very likely	Very likely	Very likely
10 (Highest risk)	Certain	90-100%	90-100%	Certain	Certain	Certain

- Component 1 (Likelihood of arrival): The likelihood that a non-indigenous species novel to the port of arrival is present on the incoming vessel under this scenario relative to other scenarios.
- Component 2: The percentage of material originally present on the hull that remains after cleaning under this scenario relative to other scenarios, Score "no action" option as 10.
- Component 3: The percentage of material removed during cleaning that is NOT captured under this scenario relative to other scenarios, Score "no action" option as 1 and the "no capture" option as 10.
- Component 4: The likelihood that material not captured is viable and capable of establishing in the receiving environment under this scenario relative to other scenarios, Score "no action" option as 1.
- Component 5: The likelihood that cleaning will enhance the release of propagules from the hull under this scenario relative to other scenarios, Score "no action" option as 1. Score same for "capture" and "no-capture" since this material may be released after cleaning tool has passed, and will then not be captured.
- Component 6: the likelihood of infection from residual material on the hull after cleaning (or from an uncleaned hull) under this scenario relative to other scenarios, Score "capture" and "no-capture" options the same, since this sheet relates to material left on the hull.

Table 5의 산정기준 기준에 의해 개별 구성인자에 대한 점수를 구한 후 IMEA 구성인자의 개별점수를 곱하여 40개 code의 수중제거 시나리오에 대한 RPN을 산정하였다. 산정 결과, 국제선이며 수중제거 과정에서 발생하는 부산물을 포

집하지 않는 시나리오 code는 20,000점 이상 이였으며, 반면에 부산물을 포집하는 시나리오 code에서는 10,000점 이하로 상대적으로 낮은 RPN을 보였다(Table 6). 수중제거 시나리오에 대한 RPN을 분석하여 >20,000점을 고위험, 10,000~20,000점을 중위험, <10,000점을 저위험 시나리오로 구분하였다. 고위험 및 중위험 시나리오는 외래생물 유입의 가능성이 높아 수중제거가 불가능할 것으로 판단하였다. 본 연구는 수중제거 위해성평가의 절차와 기법을 이해하는데 목적을 두어 시범적으로 RPN을 산정했지만, 향후에는 많은 전문가들에 의해 산정된 RPN의 평균값을 사용하는 것이 바람직하다.

Table 6. RPN values and biological risk assessment results for individual In-water cleaning scenario

Code	RPN	Risk	In-water cleaning ?	Code	RPN	Risk	In-water cleaning ?
17	78,400	High		20	3,024	Low	Yes
7	39,200			39	2,940		
12	36,000			29	1,568		
13	33,600			4	1,500		
18	30,240			34	1,350		
37	29,400			10	1,350		
27	15,680	Medium	No	35	1,260		
2	15,000			40	1,134		
32	13,500			5	1,050		
8	12,600			24	600		
33	12,600			16	560		
38	11,340			30	504		
3	10,500	Low	Yes	25	420		
28	8,400			11	400		
19	7,840			6	350		
22	6,000			1	250		
23	4,200			36	210		
9	3,920			31	150		
14	3,600			26	140		
15	3,360			21	100		

3.4.2 화학적 위해성 평가

화학적 위해성평가를 위한 구리(Copper) 농도 기준의 MAMPEC 프로그램을 구동하기 위해서는 아래와 같은 구성요소의 결정인자에 대한 값을 입력해야 한다(Table 7). MEPMPEC 프로그램의 주요 입력값은 해양수산부의 Port-MIS 자료, 기존 문헌자료, 프로그램 자체 제공 자료를 이용하였으며, 구리의 용출률은 한국해양과학기술원의 R/V 이어도호가 도크 수리 시 water-jet 방식으로 부착생물을 제거한 시료를 취득하여 직접 분석한 값을 적용하였다.

Table 7. MAMPEC configuration and key determination factors

MAMPEC component	Main Factors
1. Environment	dimensions of the harbour, hydrodynamics, abd properties of the environment
2. Compound	property data determining the chemical fate
3. Emission	
3.1 Service life	length class, Surface area, ships at berth, ships moving, application factor, leaching rate
3.2 Maintenance & Repair	painting period, painting frequency per year, number of ships treated per period, concentration of active ingredient(a.i) in the paint, average hull surface of ship, theoretical coverage of the paint, number of coats applied on the hull, fraction to surface water
3.3 Removal	removal period, number of days for the treatment of one boat, number of ships treated per period, fraction of a.i. of the paint that is to be removed from hull by HPW and abrasion, average hull surface of ship, theoretical coverage of the paint, number of coats applied on the hull, ratio reblasting/spot blasting, fraction to surface water
4. Run model	PEC estimation

\*HPW: High Preasure Water

부산 감천항을 대상으로 항만의 지리적 및 수질환경 특성, 입항하는 선박정보 등을 입력하였다. 다만, Maintenance & Repair에서 감천항내 1년에 페인팅 되는 선박의 수(Painting frequency per year)에 대한 정보가 부재하여 여러 가지 경우의 수를 입력하여 PEC 및 PEC/PNEC의 변화를 살펴보았다 (Fig. 2) 결정인자의 값을 입력한 후 MAMPEC 프로그램을 구동하여 PEC 값을 계산한 결과, PEC 및 PEC/PNEC값은 1년 동안 감천항에서 페인팅 되는 선박의 수에 의해 영향을 받는 것으로 확인되었다. 즉, 감천항에서 1년에 25척이상의 선박이 페인팅 되면 PEC/PNEC값이 1 이상으로 화학적 위해성이 높아지는 것으로 분석되었다.

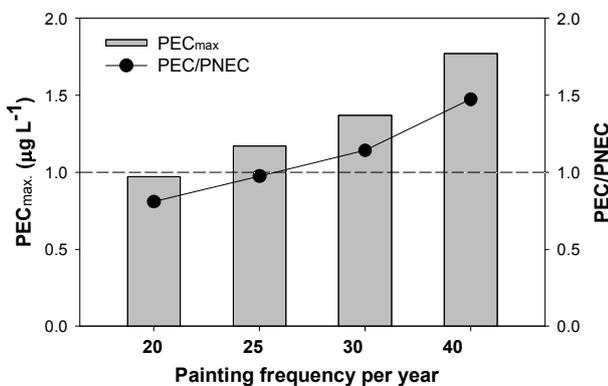


Fig. 2. Variation of PEC and PEC/PNEC values by the number of vessels painted in Busan's Gamcheon Port per year.

### 3.4.3 수중제거 위해성 평가의 시범 적용

한국해양과학기술원의 연구선 R/V 이어도호 감천항내 수중제거 수용여부를 시범 평가하였다. 이어도호의 선박 페인팅 정보, 생물부착형태, 수중제거 형태 등은 선박 문서와 선박수리 시 현장방문 및 시료채취를 통해 확인하였다. 확인 결과, 이어도호는 작성된 수중제거 시나리오의 28번 code에 해당되었고, code 28번의 RPN은 8,400점으로 외해생물의 유입의 가능성이 낮은 저위험에 해당되었다(Table 6). 즉, 생물학적 위해성 평가에서 이어도호는 감천항에서 수중제거가 가능한 것으로 평가되었다(Table 8). 이어도호의 보다 명확한 화학적 위해성평가를 위해 감천항의 선박수리 업체 확인결과, 최소한 감천항에서 1년에 최소한 50척 이상의 선박이 페인팅 되는 것으로 확인되었다. 즉, MAMPEC 프로그램 구동에 의한 화학적 위해성평가에서 PEC/PNEC 값이 1 이상으로 이어도호의 수중제거는 수용 불가능한 것으로 평가되었다 (Table 8). 최종적인 이어도호의 위해성평가는 화학적 위해성평가의 결과가 반영되어 수중제거가 불가능한 것으로 평가되었다(Table 8).

Table 8. Risk assessment of in-water cleaning of R/V EARDO ship

Biosecurity decision	Chemistry decision	Overall decision
<b>Yes</b> (RPN: 8,400, Low risk)	<b>No</b> (PEC/PNEC: >1)	<b>No</b>

### 3.5 선체부착생물 국내 대응 방안

선체부착생물관리규정 내 생물 및 화학적 위해성 평가는 수중제거기술발달에 많은 영향을 받는다. 따라서 수중 제거 시 선체로부터 분리되는 생물 및 부산물 포집 효율(Capture efficiency)에 따라 선체부착생물관리규정이 변경될 수 있다. 친환경적이면서 선체에 부착된 생물을 제거하는 기술은 크게 ‘친환경적인 수중제거(In-water cleaning and capture)’와 생물 오손을 부드러운 재질의 도구를 이용해서 자주 (e.g., 일주일 간격) 제거해 주는 ‘선체표면관리(Grooming)’ 방식으로 구분된다. 친환경적인 수중 제거는 일반적으로 브러쉬 등을 장착해서 수중 제거를 수행하는 ROV 형태의 본체와 파생물을 수거하는 흡입 및 여과 시스템 부분으로 나누어지며, 굴, 담치, 따개비 등 생물오손이 많이 진행된 선박에 주로 적용된다. 현재 다수의 개발업체에서 친환경적인 수중 제거 시스템을 개발 하였으나, 운영비용 및 규제 조항 등을 포함한 여러 가지 문제로 인해 널리 활용되고 있지 않다. 하지만 몇몇 개발업체 제품은 곧 선체부착생물제거기술 시장에 진출할 것으로 예상된다. 선체표면관리 기술은 방오도료의 훼손이 발생하지 않는 수준에서 생물막(Biofilm) 형태의 부착 생

물을 짧은 기간 내에 정기적으로 제거하는 방식으로, 현재 다양한 제거 방법과 기간에 대해서 연구가 진행중에 있다. Hearin et al. (2015)의 연구에 따르면 1주 혹은 2주 간격으로 선체표면관리를 수행할 경우 방오도료의 손상을 최소화하면서 생물의 부착을 효과적으로 방지할 수 있고, 선체 청소를 위한 건조식 도크 비용 및 선박의 연료 절감 효과도 기대할 수 있다고 보고 하였다. 하지만 선체표면관리 작업도 수중 제거처럼 ROV와 같은 장비가 이용되기 때문에, 너무 잦은 선체표면관리는 비용적인 측면에서 건조식 도크 방법을 상회할 수 있다. 따라서 적합한 관리 규정을 세운 후 작업을 수행해야 할 것으로 판단된다.

현재 우리나라는 각 항만 현실에 맞는 선체부착생물관리 규정이 없다. 이로 인해 무분별한 선체부착생물 수중제거과정에 노출된 우리나라 주요 항만 환경은 활성물질 오염과 외래종 유입 위험성에 그대로 노출되어 있어서, 해당 해양 생태계 뿐만 아니라 국민의 건강에도 심대한 영향을 미치고 있다. 그래서 본 연구에서는 국내 주요항으로 입항하는 선박의 선체부착생물을 효과적으로 관리하기 위해서 친환경적인 수중제거기술개발 및 국가적 차원에서 선체부착생물 관련 국내법 제정 필요성에 대해서 강조하였다. 또한 뉴질랜드 사례를 참고해서 감천항에서 가상의 생물 및 화학적 위해성 시범 평가도 수행하였다. 하지만 언급된 내용 중 상당 부분이 선도국에서 수행한 연구 결과 소개에 국한되었지, 국내 연구진에 의해 도출된 연구 결과 내용은 소개하지 못했다. 이는 국내에서 수행한 선체부착생물 수중제거기술 및 선체부착생물 수중 제거에 따른 항만 환경 위해성 평가 연구가 전무해서 소개할 내용이 없었기 때문이다. 많은 사람들이 오염된 해양 환경을 복원 하는 것보다 오염원을 사전에 확인해서 차단하는 게 가장 효과적이고 경제적인 방법이라는 사실을 알고 있다. 따라서 선체부착생물 수중제거시 발생하는 파생물로부터 항만 환경을 보호하기 위해서는 최우선적으로 파생물이 환경 노출을 차단하는 기술 개발과 강제력을 가지는 국내법이 제정되어야 한다. 수중 제거 시 파생물이 환경 노출을 차단하는 기술 개발 연구로는 친환경적인 방오도료 개발 및 포집효율이 우수한 수중 제거 기술 개발 등이 있다. 세계 방오도료 시장은 2018년 기준 60억달러/년 이상이고, 매년 연평균 8% 이상으로 성장하고 있지만, 일부 메이저 해외 기업들이 대부분을 차지하는 과점 구조여서 국내 기업들이 생존 및 성장하기 위해서는 기술 경쟁력 강화가 무엇보다 요구된다. 선체부착생물 수중제거기술 관련해서는 아직 시장이 개방되기 전이며, 현재까지 개발된 대다수의 장비도 파생물을 포집할 수 없는 형태이다. 국내에서는 2014년에 삼성중공업에서 브러시를 이용해서 선체표면에 부착된 유기물을 제거 및 흡입 한 후 장비 내부에 있는

필터를 통해 유기물을 회수할 수 있는 친환경적인 수중청소 로봇을 개발하였다(<http://blog.samsungshi.com/489>). 위의 사례와 같이 국내 기업들이 경쟁력 있는 기술을 개발할 수 있다면 충분히 세계 시장 선도국 위치를 선점할 수 있을 것으로 판단된다. 우리나라 항만 환경을 보호하기 위한 다른 하나의 방법은 선체부착생물 수중제거 관련 강제력을 가진 국내법 제정이다. 현재까지 국내에서 수행된 대부분의 연구는 우리나라 항만 환경에 대해서 해양 생물의 분포 및 해양생태계 변화 양상을 모니터링결과가 대부분이다. 이들 자료를 통해서 외래종 유입 사실은 확인이 가능하나, 외래종 유입 경로, 확산 및 생태계 교란 정도를 확인하기는 어렵다. 따라서 항만 환경 내 외래종의 분포와 생태계 교란 양상 그리고 활성물질의 종류 및 농도 등을 포함하는 종합적인 모니터링 연구가 필요하다. 또한 위해성 평가 부분에서도 국제 규격 시험종 외 해당 해역의 부유 및 저서 대표종을 활용해서 수중 제거 시 발생하는 파생물의 독성 실험을 다양한 규모 (실험실, 메조코즘, 현장등)에서 진행한 후 위해성의 수준을 파악 할 필요가 있다. 이러한 연구를 통해서 얻어지는 결과들은 항만 내 위해성을 파악하고 정책을 입안하고 시행하는 과정에서 가장 기초적이고 중요한 정보를 제공할 것이다.

현재 우리나라는 선제적 대응을 통해 선박평형수처리장치 시장 선도국의 위치를 유지하고 있으며, 이로 인해 많은 경제적 효과를 창출 하였고 또한 기대가 되고 있는 실정이다. 하지만 선체부착생물 관련해서는 아직까지 개발된 친환경적인 수중 제거 장비 및 환경 위해성 평가 기준이 없다. 선체부착생물관리협약이 발효가 되면, 부착생물 분야도 선박평형수와 마찬가지로 선체부착생물방지기술 개발, 수중제거 기술개발, 부착생물 모니터링 및 관리·감독 분야 등 새로운 산업이 창출될 것이다. 한 예로 향후 개발될 수중제거기술은 대부분 원격으로 개발되는 장비에 항만 환경 위해성을 낮추기 위해 파생물 및 방오도료를 수거할 수 있는 시스템을 갖출 것이며, 또한 선체표면관리법령이 강화되면 선체표면을 관리하기 위해 해당 장비를 보다 빈번하게 사용되기 때문에 보다 큰 시장이 열릴 수도 있다. 이에 우리나라는 수중제거기술 및 항만 환경 위해성 평가 기술 개발을 위한 노력을 기울여야 할 것이다.

#### 4. 요약

효율적인 선체부착생물 관리를 위해서는 선박평형수 배출 수 관련 규제 (IMO G8)처럼 전 세계 대다수의 국가가 참여 하는 체계적인 국제법이 필요한 것으로 판단된다. 하지만 국제법 제정에 수년의 시간이 필요하기 때문에, 먼저 국내법을 제정해서 국내 주요항구로 입항하는 선박에 대해 부착

생물 관리를 수행하고, 이와 동시에 수중제거기술개발도 같이 병행해서 이루어져야 효율적인 선체부착생물관리가 이루어 질 수 있을 것이다. 본 자료는 향후 선체부착생물관련 기초 연구 자료로 활용 될 수 있을 것으로 예상된다.

## 후 기

본 연구는 한국해양과학기술원 연구사업 “미래규제대응 선박부착생물 제거기술 위해성 평가기법 개발: 수중제거기술(PE99624)”의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- [1] Alzieu, C. and M. Heral(1984), Ecotoxicological effects of organotin compounds on oyster culture. In: Ecotoxicological Testing for the Marine Environment; G. Persoone & al. (Eds.), Ghent & Inst. Mar. Scient. Res., Belgium, Vol. 2, pp. 187-196.
- [2] ANZECC(1996), Working together to reduce impacts from shipping operations: code of practice for antifouling and in-water hull cleaning and maintenance. Australia and New Zealand Environment and Conservation Council, Canberra, p. 10.
- [3] Beaumont, A. R. and M. D. Budd(1984). High mortality of the larvae of the common mussel at low concentrations of tributyltin, Marine pollution bulletin, Vol. 15, No. 11, pp. 402-405.
- [4] Brand, L. E., W. G. Sunda and R. R. Guillard(1986), Reduction of marine phytoplankton reproduction rates by copper and cadmium. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, Vol. 96, No. 3, pp. 225-250.
- [5] Champ, M. A. and P. F. Seligman(1996), Organotin: environmental fate and effects, London: Chapman & Hall.
- [6] Chan, F. T., J. J. MacIsaac and S. A. Bailey(2015), Relative importance of vessel hull fouling and ballast water as transport vectors of nonindigenous species to the Canadian Arctic, Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, Vol. 72, No. 8, pp. 1230-1242.
- [7] Cheung, K. C., M. H. Wong and Y. K. Yung(2003), Toxicity assessment of sediments containing tributyltin around Hong Kong harbour, Toxicology letters, Vol. 137, No. 1-2, pp. 121-131.
- [8] Coutts, A. D. and B. M. Forrest(2007), Development and application of tools for incursion response: lessons learned from the management of the fouling pest *Didemnum vexillum*, Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, Vol. 342, No. 1, pp. 154-162.
- [9] Coutts, A. D. M. and B. M. Forrest(2005), Evaluation of eradication tools for the clubbed tunicate *Styela clava*, Cawthron Report, Vol. 1110, p. 48.
- [10] de Castro, Í. B., F. C. Perina and G. Fillmann(2012), Organotin contamination in South American coastal areas, Environmental Monitoring and Assessment, Vol. 184, No. 3, pp. 1781-1799.
- [11] De Stasio, B. T., M. B. Schrimpf and B. H. Cornwell(2014), Phytoplankton communities in Green Bay, Lake Michigan after invasion by dreissenid mussels: Increased dominance by cyanobacteria, Diversity, Vol. 6, No. 4, pp. 681-704.
- [12] Hearin, J., K. Z. Hunsucker, G. Swain, A. Stephens, H. Gardner, K. Lieberman and M. Harper(2015), Analysis of long-term mechanical grooming on large-scale test panels coated with an antifouling and a fouling-release coating, Biofouling, Vol. 31, No. 8, pp. 625-638.
- [13] Hyun, B., S. H. Baek, K. Shin and K. H. Choi(2017), Assessment of phytoplankton invasion risks in the ballast water of international ships in different growth conditions, Aquatic Ecosystem Health & Management, Vol. 20, No. 4, pp. 423-434.
- [14] Hyun, B., K. Shin, M. C. Jang, P. G. Jang, W. J. Lee, C. Park and K. H. Choi(2016), Potential invasions of phytoplankton in ship ballast water at South Korean ports, Marine and Freshwater Research, Vol. 67, No. 12, pp. 1906-1917.
- [15] IMO(2005), International Convention on the control of harmful antifouling systems (AES) on ship, 2005 Edition, IMO, London, p. 69.
- [16] Kang(2018), Development of risk assessment for control technology to reduce transfer fo ships' biofouling: In-water cleaning technique.
- [17] Kim, N. S., S. H. Hong, J. G. An, K. H. Shin and W. J. Shim(2015), Distribution of butyltins and alternative antifouling biocides in sediments from shipping and shipbuilding areas in South Korea, Marine pollution bulletin, Vol. 95, No. 1, pp. 484-490.
- [18] Kotrikla, A.(2009). Environmental management aspects for TBT antifouling wastes from the shipyards, Journal of Environmental Management, Vol. 90, S77-S85.
- [19] Leung, K. M., J. R. Wheeler, D. Morritt and M. Crane(2001), Endocrine disruption in fishes and invertebrates: issues for

- saltwater ecological risk assessment, Coastal and Estuarine Risk Assessment, Lewis Publishers, Boca Raton, pp. 189-216.
- [20] MEPC(2011), Guidelines for the Control and Management of Ships' Biofouling to Minimise the Transfer of Invasive Aquatic Species.
- [21] Morrisey, D. and C. Woods(2015), In-water cleaning technologies: Review of information, MPI Technical Paper.
- [22] Morrisey, D. J. Gadd, M. Page, J. Lewis, A. Bell and E. Georgiades(2013), In-water cleaning of vessels: Biosecurity and chemical contamination risks, MPI Technical Paper, 2013/11, Wellington, New Zealand, p. 267.
- [23] Møller, J. K. and F. Stuer-Lauridsen(2016), Non-indigenous species from hull fouling in Danish marine waters.
- [24] Nimmo, D. R. and T. L. Hamaker(1982), Mysids in toxicity testing-a review, In Ecology of Mysidacea (pp. 171-178), Springer, Dordrecht.
- [25] Readman, J. W.(2006), Development, Occurrence and Regulation of Antifouling Paint Biocides: Historical Review and Future Trends, In Antifouling paint biocides, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 1-15.
- [26] Ruiz, G. M., T. K. Rawlings, F. C. Dobbs, L. A. Drake, T. Mullady, A. Huq and R. R. Colwell(2000), Global spread of microorganisms by ships, Nature, Vol. 408, No. 6808, p. 49.
- [27] Sapozhnikova, Y., E. Wirth, K. Schiff and M. Fulton(2013), Antifouling biocides in water and sediments from California marinas, Marine pollution bulletin, Vol. 69, No. 1-2, pp. 189-194.
- [28] Silkina, A., A. Bazes, F. Vouvé, V. Le Tilly, P. Douzenel, J. L. Mouget and N. Bourgougnon(2009), Antifouling activity of macroalgal extracts on *Fragilaria pinnata* (Bacillariophyceae): a comparison with Diuron, Aquatic toxicology, Vol. 94, No. 4, pp. 245-254.
- [29] Suk, J. H.(2018), A Study on the Regulatory Framework Related to Ship's Biofouling. The Korea Institute Of Maritime Law, Vol. 30, No. 1, pp. 139-173.
- [30] Thomas, K. V. and S. Brooks(2010), The environmental fate and effects of antifouling paint biocides, Biofouling, Vol. 26, No. 1, pp. 73-88.
- [31] Woods, C., O. Floerl, I. Fitridge, O. Johnston, K. Robinson, D. Rupp, N. Davey, N. Rush and M. Smith(2007), Evaluation of the seasonal efficacy of hull cleaning methods, Biosecurity New Zealand Technical Report, ZBS2005-22, p. 119.
- [32] Yebra, D. M., S. Kiil and K. Dam-Johansen(2004), Antifouling technology - past, present and future steps towards efficient and environmentally friendly antifouling coatings, Progress in organic coatings, Vol. 50, No. 2, pp. 75-104.
- [33] Zhou, J. L.(2008), Occurrence and persistence of antifouling biocide Irgarol 1051 and its main metabolite in the coastal waters of Southern England, Science of the total environment, Vol. 406, No. 1-2, pp. 239-246.

---

Received : 2018. 08. 03.

Revised : 2018. 10. 11. (1st)

: 2018. 10. 25. (2nd)

Accepted : 2018. 10. 26.