



연구논문

Exhaust Gas Cleaning Systems 배출수에 대한 환경위해성평가

임유정[†] · 김성훈 · 백재열 · 이은아 · 유태규 · 이현재 · 장기혁

한국화학융합시험연구원 조선해양센터

Environmental Risk Assessment of Discharge Water from Exhaust Gas Cleaning Systems

Yu Jeong Lim, Seonghun Kim, Jae Yeol Baek, EunA Lee, Taegyue Ryue, Heonjae Lee, and Kihyeok Chang

¹Shipbuilding & Marine Center, Korea Testing & Research Institute, Ulsan, 44776, Korea

Received December 19, 2023 / Revised December 21, 2023 / Accepted December 26, 2023

This study aimed to provide scientific evidence for the environmental risk of scrubber discharge water, considering the local Korean marine environment. In February and March, 2023, an exhaust gas cleaning system (EGCS) was installed and operated to measure water quality parameters of the discharge water, analyze concentrations of harmful substances, and conduct an environmental risk assessment. Compared to the inflow water, solution pH and alkalinity of the discharge water decreased, and temperature and turbidity increased by 4.6°C. There was no significant change for salinity. Sixteen different types of polycyclic aromatic hydrocarbons were not detected in the inflow water, whereas 6 types were detected in the discharge water. The results of Ni, Cr, and V measurements revealed their consistent increase in discharge water. In the environmental risk assessment, phenanthrene was judged as a persistent bioaccumulative and toxic substance, but it was assumed that the environmental risk was low as there were no substances with RCR (Risk Characterization Ratio) values > 1. In summary, the environmental risk posed by open-loop EGCS discharge water used in this study is not considered to be high. This study adds evidence for the stability of EGCS use and provides basic data for future research.

Keywords: EGCS, Discharge water, PAHs, Heavy metals, PEC, PNEC

1. 서 론

국제교역의 활성화로 화물물동량이 증가하고 있으며, 화물물동량 90% 이상이 해상운송을 통해 운송되고 있다. 이에 대응하기 위해 선박 및 항만도 대형화되기 시작하면서 선박의 배기가스로 인한 대기오염이 환경문제로 대두되기 시작했다.¹⁻²⁾ 최근에는 친환경 선박이 개발되고 보급되고 있지만 아직도 대부분의 선박은 디젤엔진으로 운항에 필요한 동력과 전기를 생산하고 있다.³⁾ 운항 중인 선박은 지구온난화의 주요 원인으로 꼽히는 질산화물(NO_x), 황산화물(SO_x), 이산화탄소(CO_2), 입자상물질

(PM), 아산화질소(N_2O) 및 유해물질 등을 배출한다.⁴⁾ 국내 선박의 배기가스 배출량은 도시마다 차이가 있으나, 배출기여도 기준으로 선박 입항이 많은 부산에서는 전체 대비 질산화물(NO_x) 43.9%, 황산화물(SO_x) 81.1%, 입자상물질(PM) 57.3% 등으로 나타났다. 이는 발전시설, 제조업 및 도로이동오염원(자동차)의 배출 규모와 비교해도 작지 않으며, 때로는 더 높은 기여도를 보인다.⁵⁾ 선박에서 배출된 대기오염물질은 천식, 알레르기성 비염, 아토피 등의 환경성질환을 유발하는 것으로 알려져 있고,⁶⁾ 2차 오염물질인 초미세먼지(PM 2.5)를 발생시켜 심장병과 호흡기질환을 일으킨다.⁷⁻⁸⁾

[†]To whom correspondence should be addressed.

Tel: 82-052-279-0419, Fax: 82-052-279-0401, E-mail: khchang@ktr.or.kr

이에 따라 UN 산하 국제 해사기구(International Maritime Organization, 이하 IMO)에서는 배출 규제 구역(Emission Control Area)을 지정하여 규제를 강화하고 있으며, 2020년부터 '선박용 연료유에 대한 황 규제(Global Sulfur Cap 2020)'를 시행하고 있다. 이에 따라 전 세계 해역에서 모든 선박들은 배기가스 세정장치배기가스 세정장치(Exhaust Gas Cleaning Systems, 이하 EGCS)를 필수적으로 설치하여야 한다.⁹⁾

ESCG로 알려진 탈황장치인 스크러버(Scrubber)는 배기가스 내 SO_x 를 포집하는 방식에 따라 개방형(Open mode) 스크러버와 폐쇄형(Close mode) 스크러버로 구분된다. 개방형 스크러버는 배기가스를 해수와 반응시킨 후 해수로 배출하고, 폐쇄형 스크러버는 선 내에서 물을 순환시켜 배기가스와 접촉시켜 나온 오염물질을 저장소에 보관 후 육상시설에서 처리한다.¹⁰⁾ 하지만 개방형 스크러버의 세정수가 그대로 해수로 배출된다는 점에서 MEPC(해양환경보호위원회)가 유해성 검토의 필요성을 제기하면서 EGCS 배출수의 환경오염 문제가 대두되기 시작했다. 반면 일본을 비롯한 일부 국가에서는 EGCS 배출수의 위험성은 크지 않다고 주장하면서 해운국가간의 주장이 대립되고 있다.¹¹⁾

이러한 상황에서 개방형 스크러버의 안정성에 관한 논의가 현재까지 지속되고 있으며, 국제해사기구 IMO에서도 각 회원국의 적극적인 참여 및 지속적인 연구를 통해 개방형 스크러버의 위해성평가 가이드라인을 배포하였다(MEPC.1/Circ.899, 2022).¹²⁾ 국내에서도 개방형 스크러버의 폐세정수 위해성평가에 관한 연구¹³⁻¹⁷⁾와 처리시스템 성능 평가에 대한 연구^{10,18-23)}가 활발하게 이루어지고 있지만, 국내 세정수 배출 규제에 대한 타당성 분석의 사례는 부족한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 IMO 가이드라인에 맞추어 개방형 스크러버 배출수 내 유해물

질에 대한 해양환경 위해성평가를 실시하고 국내 지역적 해양환경을 고려한 스크러버 배출수의 위해성평가에 활용할 수 있는 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시료 채취 방법

본 연구에서는 군산에 위치한 한국선급 그린쉽기자재 시험인증센터 내에 구축되어있는 선박용 7.4 MW급 2행정 저속 디젤 엔진(26 MW급 수동력계)에 EGCS를 연결해 설치하여 2023년 2월, 3월에 걸쳐 EGCS의 성능을 테스트하였다. 해당 EGCS는 질산화물과 황산화물을 동시 저감하기 위한 본 연구사업의 일환으로 개발되었으며, 본 연구에서는 황산화물의 저감을 목적으로 한 개방형 EGCS의 성능평가를 위하여 Open mode에서의 EGCS 배출수 내의 유해물질 농도 및 해당 물질에 대한 위해성평가를 수행하였다.

개방형 EGCS는 스크러버 하단에 배기가스가 주입되며, 스크러버 내부에는 총 5군데에서 배기가스와의 접촉을 위해 압을 통해 물이 분사되며, 중력식으로 배기가스와 접촉한 해수가 아래로 배출되도록 설계되었다(Fig. 1). 본 연구에서는 엔진 연료유로 Bunker C를 사용하였고, 육상실증을 수행하는 현장상황을 고려하여 운용 가능한 엔진 부하 범위 중 최대인 40 %에서 군산 앞바다에서 공수한 자연 바닷물(유입수, Inlet water)을 펌프를 통해 200 m³/hr의 속도로 공급하였다. 이후 유입수가 배기가스 통과 후 모니터링 장치를 통과하여 후단으로 나오는 물(배출수, discharge water)을 채취하여 분석을 진행하였다. 현장에서 분석이 가능한 항목은 바로 분석을 진행하였고, 현장에서 분석이 불가능한 항목은 실험실로 시료를 이송하여 수질 일반항목 및 유해물질 농도 분석과 해당

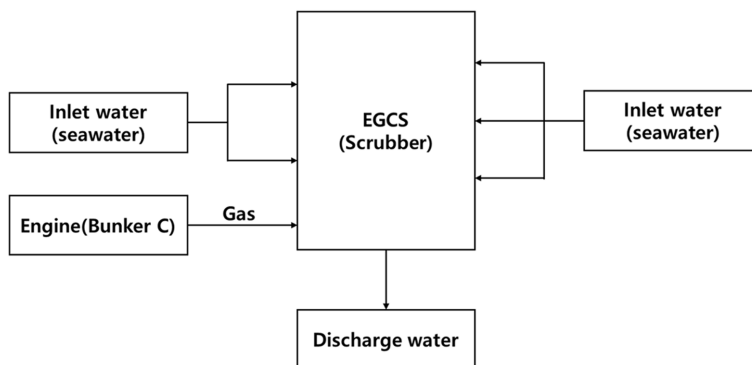


Fig. 1. Flowchart of Exhaust Gas Cleaning System (EGCS), including inlet and outlet water.

Table 1. Sampling of analysis parameters for inlet and discharge water based on sampling requirements of MEPC.340(77)

Parameter	Bottle material	Sample volume (mL)	Preservative	Storage temperature
Nitrate, Nitrite	PE	250	No preservative	≤ 18°C
Total metals	PE	500	HNO ₃	4°C
Dissolved metals	PE	500	No preservative	4°C
PAHs	Amber glass with PTFE seal	2,000	No preservative	4°C
HOI	Glass	1,000	H ₂ SO ₄ (pH < 2)	4°C

결과를 토대로 환경위해성평가를 진행하였다.

2.2. 수질 일반항목 측정 및 유해물질 농도 분석

본 연구에서는 IMO MEPC.340(77)에 따라 분석항목을 선정하여 유해물질 농도를 분석하였다.²⁴⁾ 분석항목 중 현장측정항목인 pH, 염분, 알칼리도, 탁도는 현장에서 시료 채취 후 바로 분석하였다. 질산염(Nitrate), 아질산염(Nitrite), EPA 선정 다환방향족탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, 이하 PAHs) 16종, Hydrocarbon Oil Index(HOI), 카드뮴(Cd), 구리(Cu), 니켈(Ni), 납(Pb), 아연(Zn), 비소(As), 크롬(Cr), 바나듐(V), 셀레늄(Se)은 시료를 샘플링하여 실험실로 이송하여 분석하였다. 유해물질 농도 분석을 위해 사용한 샘플링 병 및 첨가한 보존제는 MEPC.340(77)에서 제시한 각 항목에 따른 샘플링병 및 보존제에 의거하여 별개로 샘플링하였다(Table 1). 질산염과 아질산염 분석용 시료는 250 mL PE병에 샘플링하여 냉동하여 이송하였고, 총 중금속 분석용 시료는 500 mL PE병에 질산을 첨가하여, 용존 중금속 분석용 시료는 500 mL PE병에 샘플링하여 냉장보관하여 이송하였다. PAHs 분석용 시료는 2 L 암병에 샘플링하여 PTFE 뚜껑으로 봉하여 냉장 상태로 이송하였고, HOI 분석용 시료는 1L 유리병에 황산을 첨가하여 냉장 상태로 이송하였다.

pH, 온도, 염분, 알칼리도, 탁도는 Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA Standard Methods, 24th edition)에 따라 시험을 진행하였다. pH는 pH/전기전도도 측정장비(메틀러토레도, Seven-Compact Duo)와 탁도측정기(Hach, 2100P)를 사용하여 측정하였다. 질산염, 아질산염은 ISO 13395:1996에 따라

자동분석기(Seal Analytical, QuAAtro39, XY-2 Sampler)를 이용하여 분석하였다. PAHs는 ISO 28540:2011에 따라 전처리하여 기체크로마토그래피-질량분석기(Gas Chromatography-Mass Spectrometry, Agilent, 7890B GC, 5977A MSD 7693A Autosampler)를 이용하여 분석하였다. HOI는 ISO 9377-2:2000에 따라 가스크로마토그래피 불꽃이온화검출기(Gas Chromatography-Flame Ionization Detector, PerkinElmer, Clarus 600)를 이용하여 분석하였다. 중금속 9종(Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, As, Cr, V, Se)은 ISO 17294-2:2016에 따라 seaFAST (Elemental Scientific)와 유도결합플라즈마 질량분석기(Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer, PerkinElmer, NexION 2000)를 이용하여 분석하였다.²⁵⁾

2.3. 환경위해성평가

배출수의 영향평가를 위하여 MEPC.1/Circ.899에서 제시된 방법에 따라 생태위해성평가를 수행하였다.²⁶⁾ Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, As, Cr, V, Se 및 PAHs 16종에 대해 검출유무를 확인한 뒤 지속성(Persistent), 생물축적성(Bioaccumulative), 생물독성(Toxic) (이하 PBT)에 대해 BWM.2/Circ.13/Rev.5에 따라 평가하였다(Table 2).²⁶⁾

본 연구에서 진행된 시험은 보편적인 항구에 배출되었다는 상황을 가정하여 MAMPEC (Marine Antifoulant Model to Predict Environmental Concentrations, Deltatre) 3.1.0.5 프로그램으로 예측환경농도 (Predicted Environmental Concentration, 이하 PEC)를 계산하였다. 본 연구 기간 동안의 EGCS의 평균 배출량은 200 m³/hr이었으므로, PEC 계산을 위한 배출량은 4,800 m³/day로 가정하였고, GESAMP-BWWG Model Harbour (Commercial

Table 2. Criteria of PBT by methodology for information gathering and conduct of work of the GESAMP-BWWG (BWM.2/Circ.13/Rev.5)

Parameter	Criteria
Persistence	Half-life: > 60 days in marine water, or > 40 days in fresh water, or > 180 days in marine sediments, or > 120 days in freshwater sediments
Bioaccumulation	Experimentally determined BCF > 2,000 or Log Pow ≥ 3
Toxicity	Chronic NOEC < 0.01 mg/L

The screenshot displays the MAMPEC commercial harbor model interface, organized into several sections:

- Description:**
 - GESAMP-BWWG Model Harbour
 - Environment type: Commercial harbour
 - Reference: Recommended default environment for BW exposure assessment. GESAMP-BWWG, STW3 4-6 April, 2011
- Hydrodynamics:**
 - Tidal period: 12.41 hour
 - Tidal difference: 1.5 m
 - Max. density difference tide: 0 kg/m³
 - Non tidal daily water level change: 0 m
 - Flow velocity (F): 1 m/s
- Layout:**
 - Length: x1 5000 m, x2 5000 m
 - Width: y1 1000 m, y2 500 m
 - Depth: 15 m
 - Mouth width: x3 1000 m
- Wind:**
 - Average wind speed: 0 m/s
 - Fraction of time wind perpendicular: 0 -
- Flush:**
 - Flush (f): 0 m³/s
 - Max. density difference flush: 0 kg/m³
- Submerged dam specification:**
 - Height of submerged dam: 0 m
 - Width of submerged dam: 0 m
 - Depth-MSL in harbour entrance: 15 m
 - Exchange area harbour mouth (below mean sea level): 15000 m²
- Water characteristics:**
 - SPM concentration: 35 mg/l
 - POC concentration: 1 mg/l
 - DOC concentration: 2 mg/l
 - Chlorophyll: 3 µg/l
 - Salinity: 34 psu
 - Temperature: 15 °C
 - pH: 8
- General:**
 - Latitude: 50 ° (dec) NH
 - Cloud coverage: 5 class [0-10]
- Sediment:**
 - Depth mixed sediment layer: 0.2 m
 - Sediment density: 1000 kg/m³
 - Degr. organic carbon in sediment: 0 1/d
 - Nett sedimentation velocity: 1 m/d
 - Fraction organic carbon in sediment: 2.85E-002
- Calculated exchange volumes (m³/tide):**

Category	Value	Percentage
Tidal	7.500E+006	73.05%
Horizontal	2.766E+006	26.95%
Density induced	0.000E+000	0.00%
Wind driven	0.000E+000	0.00%
Non tidal	0.000E+000	0.00%
Flushing	0.000E+000	0.00%
Total	1.027E+007	m³ / tide
	13.69	% / tide

Fig. 2. Environmental conditions of MAMPEC commercial harbor model.

harbour) 항구모델(Fig. 2)을 적용하여 EGCS 배출수에서 검출된 유해물질 농도 검출유무를 토대로 항구와 선박 인근의 영향범위에서 각 유해물질의 PEC를 위에 언급된 프로그램으로 계산하였다.²⁶⁾

예측무영향농도(Predicted No Effect Concentration, 이하 PNEC)를 산출하기 위하여 ECOTOX(EPA) 데이터베이스를 통해 식물플랑크톤, 무척추동물, 어류 등 각 영양단계별 독성자료를 수집하여 독성값 중 최빈값을 조사하였다. 이러한 독성값의 불확실성을 고려하여 IMO GESAMP-BWWG의 평가인자(Assessment Factor, 이하 AF)를 적용하여 PNEC를 산출하였다. 이것으로 PEC/PNEC를 계산하여 환경에 대한 위험도결정비(Risk Characterization Ratio, 이하 RCR)를 산출하여 결정하였으며, 이를 통해 환경에 유해한 수용불가능한 영향을 미칠 가능성을 탐색하였다.²⁶⁾

3. 결과 및 고찰

3.1. 수질 일반항목 측정 및 유해물질 농도 분석 결과

본 연구 중 현장에서 측정한 수질 일반항목의 결과 및 실험실에서 분석을 진행한 유해물질의 농도 결과는 Table

3에 정리하여 제시하였다.

3.1.1. 현장측정항목

현장에서 측정한 pH, 온도, 염분, 알칼리도, 탁도의 결과는 각각 유입수에서 8.31, 4.9°C, 29.77 psu, 120 mg CaCO₃/L, 7.41 NTU, 배출수에서 각각 4.36, 9.5°C, 29.74 psu, 5 mg CaCO₃/L, 8.44 NTU로 나타났다(Fig. 3). 유입수에서 질산염은 1.0 mg/L으로 나타났으나 아질산염은 정량한계 (0.01 mg/L) 미만으로 검출되지 않았으며, 배출수에서는 질산염은 1.6 mg/L, 아질산염은 0.22 mg/L로 나타났다(Fig. 3).

유입수에 비해 배출수에서 pH는 3.95만큼 감소하였고, 온도는 4.6°C도 상승하였다(Fig. 3). 염분은 유입수와 배출수가 유사한 결과를 나타냈으며, 알칼리도는 유입수에 비해 배출수에서 115 mg CaCO₃/L만큼 감소하였고, 탁도는 유입수에 비해 배출수에서 1.03 NTU만큼 증가하였다. 이는 EGCS를 통과하는 해수가 연료를 가열함으로써 생기는 황산화물, 질산화물과 같은 대기오염물질 및 열기를 흡수하여 배출되기 때문으로, 약염기를 띄고있는 유입수에 비해 배출수에서 pH는 감소하고, 온도는 증가하고, 알칼리도는 감소하였다. 스크러버 배출수의 산성화 결과는 다른 선행연구의 보고와도 일치하며, 낮은 세정수와 반

Table 3. Concentration results of inlet and discharge water including *in situ* parameters (pH, temperature, salinity, alkalinity, and turbidity) and laboratory analysis parameters (nitrate, nitrite, PAHs 16 species, HOI, total metals, and dissolved metals)

Parameter		Unit	Detection limit	Inlet water	Discharge water
pH		-	-	8.31	4.36
Temperature		°C	-	4.9	9.5
Salinity		psu	-	29.77	29.74
Alkalinity		mg CaCO ₃ /L	-	120	5
Turbidity		NTU	0.02	7.41	8.44
Nitrate		mg/L	0.2	1.0	1.6
Nitrite		mg/L	0.01	N.D. ^a	0.22
PAHs	Sum of 16 species	μg/L	0.01	N.D.	1.7
	Naphthalene	μg/L	0.01	N.D.	1.3
	Acenaphthylene	μg/L	0.01	N.D.	0.013
	Acenaphthene	μg/L	0.01	N.D.	0.057
	Fluorene	μg/L	0.01	N.D.	0.16
	Phenanthrene	μg/L	0.01	N.D.	0.22
	Anthracene	μg/L	0.01	N.D.	N.D.
	Fluoranthene	μg/L	0.01	N.D.	N.D.
	Pyrene	μg/L	0.01	N.D.	0.017
	Benzo(a)anthracene	μg/L	0.01	N.D.	N.D.
	Chrysene	μg/L	0.01	N.D.	N.D.
	Benzo(k)fluorancene	μg/L	0.01	N.D.	N.D.
	Benzo(b)fluorancene	μg/L	0.01	N.D.	N.D.
	Benzo(a)pyrene	μg/L	0.01	N.D.	N.D.
	Indeno(1,2,3-cd)pyrene	μg/L	0.01	N.D.	N.D.
	Dibenzo(a,h)anthracene	μg/L	0.01	N.D.	N.D.
	Benzo(ghi)perylene	μg/L	0.01	N.D.	N.D.
Hydrocarbon	Oil Index	mg/L	0.1	N.D.	0.11
Total metals	Cd	μg/L	0.000 3	0.07	N.D.
	Cu	μg/L	0.007	8.45	6.97
	Ni	μg/L	0.001	2.91	17.19
	Pb	μg/L	0.007	1.45	2.83
	Zn	μg/L	0.002	50.59	48.65
	As	μg/L	0.002	0.84	1.43
	Cr	μg/L	0.010	7.49	39.42
	V	μg/L	0.096	8.71	33.34
	Se	μg/L	0.080	0.32	1.10
Dissolved metals	Cd	μg/L	0.000 3	0.03	N.D.
	Cu	μg/L	0.007	2.62	1.77
	Ni	μg/L	0.001	0.54	16.16
	Pb	μg/L	0.007	0.65	1.43
	Zn	μg/L	0.002	26.60	37.53
	As	μg/L	0.002	0.40	0.97
	Cr	μg/L	0.010	0.16	32.93
	V	μg/L	0.096	0.57	32.59
	Se	μg/L	0.080	0.05	N.D.

^aNot Detected

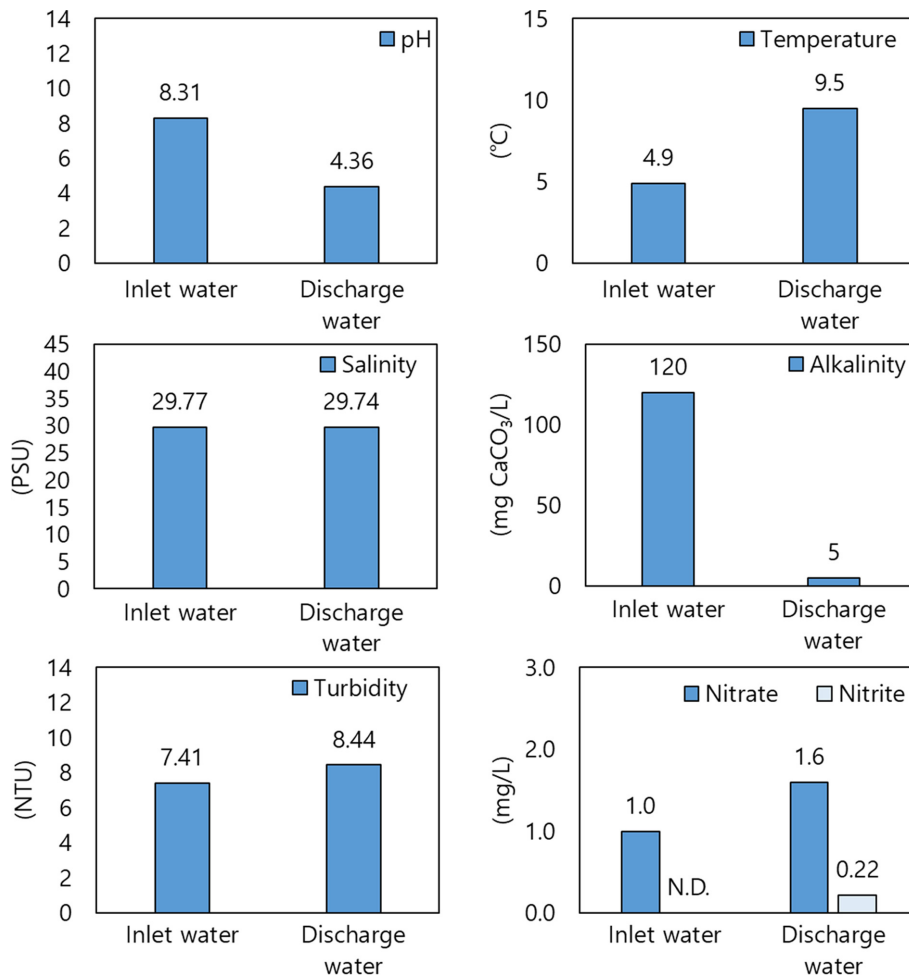


Fig. 3. Comparison between results of pH, temperature, salinity, alkalinity, turbidity, and levels of nitrate and nitrite of inlet water and the corresponding results for discharge water.

응수의 유속(390 m³/hr (2.5 MGD))이 원인일 수 있음을 보고하였으므로 현 연구의 낮은 유속(200 m³/hr)이 산성화의 원인일 가능성도 있다.²⁷⁾

IMO MEPC.340(77)에서 제시한 배출수질 기준에 따르면 본 연구의 배출수는 pH 값이 6.5 이상으로 높게 나타나 배출수 기준에 부합하지 않았으나, 가이드라인에서 제시된 다른 기준에서는 선박이 항해 중일 경우에는 유입수와 배출수의 pH 차이가 최대 2를 초과하지 않으면 되고, 그 외에도 선외 배출 지점으로부터 4 m 떨어진 지점에서 회석 및 확산 후 pH 6.5 이상을 입증할 수 있으면 기준에 부합하기에, 실 선박에서의 배출될 때에 대한 고려가 필요하다.²⁴⁾ 본 연구결과에서는 연료의 가열로 생성되어 해수로 흡수되는 오염물질이 염분 및 탁도의 차이에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 여겨지나, 다른 연구에서도 언급되었듯이 해수산성화, 열오염에 미치는 영향

은 있을 가능성이 있다.²⁷⁾

3.1.2. PAHs

유입수의 분석결과 EPA 선정 PAHs 16종 개별물질(정량한계 0.01 µg/L) 및 HOI(정량한계 0.1 mg/L)는 검출되지 않았다. 배출수에서는 PAHs 16종의 합은 1.7 µg/L로 나타났으며, 각 개별 16종 중에서는 Naphthalene, Acenaphthylene, Acenaphthene, Fluorene, Phenanthrene, Pyrene 총 6종에서 각각 1.3 µg/L, 0.013 µg/L, 0.057 µg/L, 0.16 µg/L, 0.22 µg/L, 0.017 µg/L으로 나타났고, 나머지 종에서는 정량한계 (0.01 µg/L) 미만으로 검출되지 않았으며(Fig. 4), HOI의 분석결과는 0.11 mg/L로 나타났다.

위 결과에 따르면, 유해물질로 분류되는 PAHs 16종은 유입수에서는 검출되지 않았으나, 배출수에서는 6종에 대하여 검출되었다. 이는 PAHs가 불완전연소의 결과물로 주로 생성되기에 배출수에서 증가한 것으로 여겨된다. 이

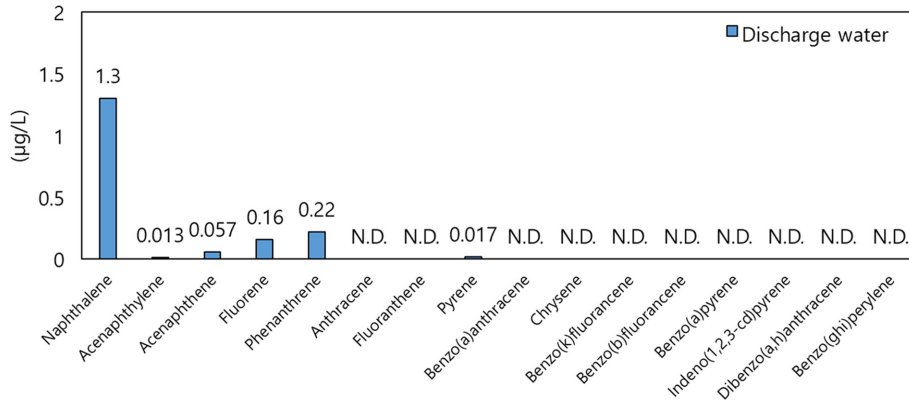


Fig. 4. Concentrations of 16 species of PAHs in discharge water.

는 Phenanthrene이 선박 세정수 시스템에서 PAHs 중 가장 흔히 존재한다는 기존 연구 결과와도 일치한다.²⁸⁾

3.1.3. 중금속

유입수의 중금속 분석 결과는 총 중금속에서 Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, As, Cr, V, Se 각각 0.07 µg/L, 8.45 µg/L, 2.91 µg/L, 1.45 µg/L, 50.59 µg/L, 0.84 µg/L, 7.49 µg/L, 8.71 µg/L, 0.32 µg/L으로 나타났고, 배출수의 중금속 분석 결과는 총 중금속에서 Cd은 정량한계 (0.000 3 µg/L) 미만으로 검출되지 않았으며, Cu, Ni, Pb, Zn, As, Cr, V, Se 각각 6.97 µg/L, 17.19 µg/L, 2.83 µg/L, 48.65 µg/L, 1.43 µg/L, 39.42 µg/L, 33.34 µg/L, 1.10 µg/L으로 나타났다(Fig. 5).

유입수의 용존 중금속 분석결과는 Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, As, Cr, V, Se는 각각 0.03 µg/L, 2.62 µg/L, 0.54 µg/L, 0.65 µg/L, 26.60 µg/L, 0.40 µg/L, 0.16 µg/L, 0.57 µg/L, 0.05 µg/L으로 나타났고, 배출수에서는 Cd, Se에서 정량

한계(Cd 0.000 3 µg/L, Se 0.080 µg/L) 미만으로 검출되지 않았으며, 나머지 Cu, Ni, Pb, Zn, As, Cr, V는 각각 1.77 µg/L, 16.16 µg/L, 1.43 µg/L, 37.53 µg/L, 0.97 µg/L, 32.93 µg/L, 32.59 µg/L으로 나타났다(Fig. 6).

결과를 정리하면, 유입수에 비해 배출수에서 총 중금속의 농도 결과가 Cd, Cu, Zn는 감소하였고, Ni, Pb, As, Cr, V, Se는 증가하였고, 용존 중금속의 농도 결과는 Cd, Cu, Se는 감소하였으며, Ni, Pb, Zn, As, Cr, V에서는 증가하였다. 이 중 Ni, Cr, V의 결과는 총 중금속과 용존 중금속 모두에서 유입수에 비해 배출수에서 다른 중금속과 비해 상대적으로 증가하는 경향을 보였다.

선행연구에서는 배출수에서 PAHs, Pb, V, Cu, Zn 등이 증가하는 현상은 연료, 파이프 부식, 부식방지제 유출 등이 원인일 수 있다고 하였다. 다른 연구에서는 PAHs 중 특히 Naphthalene, Fluorene, Phenanthrene 의 큰 상승과 모든 종류의 중금속 농도 상승을 보고하기도 하였다.²⁹⁻³¹⁾ 중금속의 증가는 선박 시스템에 대표적으로 존재하는 철,

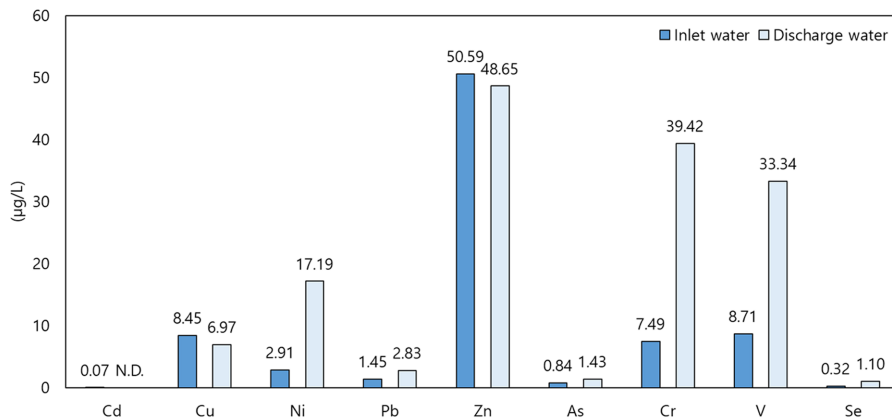


Fig. 5. Concentrations of total metals (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, As, Cr, V, and Se) in inlet and discharge water.

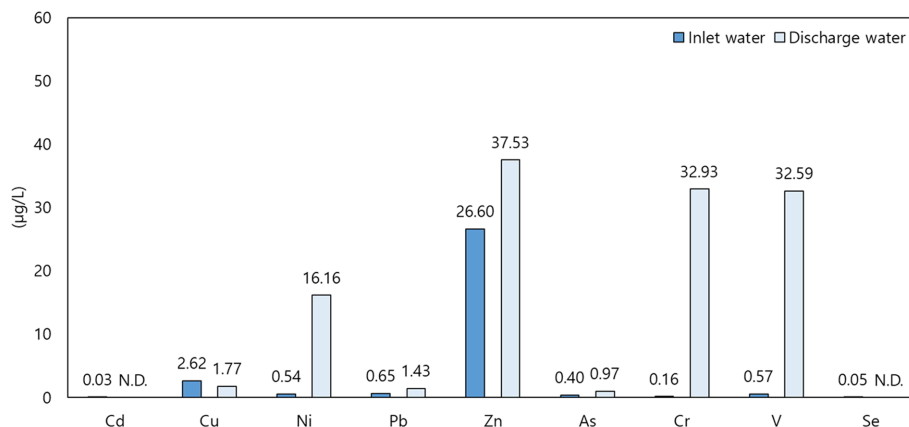


Fig. 6. Concentrations of dissolved metals (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, As, Cr, V, and Se) in inlet and discharge water.

구리와 아연 같은 물질이 용출된 것이 원인일 수 있으며, 해수나 해수 파이프의 부식을 방지하기 위한 전기화학적 보호장치나 부식방지 페인트 등에서 유래했을 수 있다. 또한 연료 연소나 윤활제가 V, Ni, Ca, Zn 등을 배출할 수 있다.²⁷⁾

따라서, 이와 같은 변수를 고려하여 배출수에서 중금속이 증가한 정확한 원인을 밝히기 위한 추가적인 연구가 필요하다. 게다가 실제 선박에서의 항구로의 배출을 고려할 경우, 배출 당시에 희석 및 확산 현상이 발생하므로 해당 환경에 따른 미치는 영향이 환경마다 차이가 있을 수 있다. 따라서 상황 및 환경을 고려한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료되며, 특히 유해물질의 경우에는 지속적인 데이터 확보를 위하여 다양한 환경에서의 배출량 등을 고려한 위해성평가가 필요할 것으로 고려된다.^{32, 33)} 한

편, IMO guideline에서는 구체적인 PAHs 종류와 중금속에 대한 세세한 기준은 제시하고 있지 않지만, 생태계 오염에 대한 경각심이 높아지고 있는 현 상황을 고려할 때, 선제적인 저감 조치가 필요하다.

3.2. 환경위해성평가

PBT 평가를 위하여 PBT 평가기준에 따라 지속성, 생물축적성, 생물독성으로 분류하여 본 연구에서 분석한 물질 중 검출된 PAHs 6종(Naphthalene, Acenaphthylene, Acenaphthene, Fluorene, Phenanthrene, Pyrene)과 중금속 8종(Cu, Ni, Pb, Zn, As, Cr, V, Se)에 대하여 평가를 진행하였다. 해당 결과는 Table 4에 제시하였으며, 지속성은 중금속의 경우 해당사항이 없었으며, Fluorene, Phenanthrene, Pyrene에서 지속성이 있음을 확인할 수 있

Table 4. PBT assessment results of chemical substances in discharge water

	Parameter	Persistence (days)	Bioaccumulation (BCF/P _{ow})	Toxic (mg/L)
PAHs	Naphthalene	No (43)	No (510/3.34)	No (0.5)
	Acenaphthylene	No (37.5)	Yes (179.2/3.92)	No (0.026)
	Acenaphthene	No (24.8)	No (511/3.96)	No (0.52)
	Fluorene	Yes (128)	No (468/4.20)	No (0.062 5)
	Phenanthrene	Yes (11,000)	Yes (2 410/4.52)	Yes (0.005)
	Pyrene	Yes (283)	Yes (105 000/5.08)	No (0.055)
Metals	Cu	Not Applicable	No (7 000/-0.57)	Yes (0.005)
	Ni	Not Applicable	No (5 930/-0.57)	Yes (0.000 4)
	Pb	Not Applicable	No (15 200/0.73)	Yes (0.002 7)
	Zn	Not Applicable	No (18 400/-0.47)	Yes (0.000 75)
	As	Not Applicable	No (8 900/0.68)	No (0.426)
	Cr	Not Applicable	No (691/0.23)	No (0.519)
	V	Not Applicable	No (4 360/0.23)	No (0.16)
	Se	Not Applicable	No (944/0.24)	No (0.01)

었다. 생물독성은 Acenaphthylene, Phenanthrene, Pyrene에서 확인되었고, 생물독성은 Phenanthrene, Cu, Ni, Pb, Zn에서 확인되었다. 연구결과, Phenanthrene에서 PBT 평가기준을 모두 초과하여 해당 물질이 PBT 물질로 판단되었다.

본 연구의 배출수에서 검출된 PAHs 6종(Naphthalene, Acenaphthylene, Acenaphthene, Fluorene, Phenanthrene, Pyrene)과 중금속 8종(Cu, Ni, Pb, Zn, As, Cr, V, Se)에 대하여 MAMPEC에서 보편적인 항구모델로 제시되는 환경에서의 최대 PEC와 평균 PEC를 계산하여 Table 5에 제시하였다. 해당 결과를 바탕으로 PEC 결과 중 PEC의

최대값을 적용하여 독성값과 AF를 적용하여 산출한 PNEC 결과와 비교하여 RCR을 Table 6에 제시하였다. 그 결과 본 연구의 배출수에서 검출된 PAHs 6종과 중금속 8종 중 RCR 값이 1을 초과하는 물질은 없는 것으로 확인되었다.

검출된 물질 중 Phenanthrene가 PBT 물질로 판명되었으나, 실제적인 환경위해성 평가에서는 RCR 값이 1을 초과하는 물질이 없어 배출수의 환경위해성은 낮을 것으로 사료된다.²⁶⁾ 그러나 오염 물질 농도가 개별 물질 기준 이내라고 해서 생태 독성의 우려가 없는 것이 아니다. 또한 가이드라인에서 제시한 오염 물질 외에 조사하지 못한 다

Table 5. Results of harbor PEC calculations of chemical substances in discharge water.

	Parameter	Concentration in discharge water (µg/L)	Maximum PEC (µg/L)	Average PEC (µg/L)
PAHs	Naphthalene	1.26	5.28E-05	1.73 E-05
	Acenaphthylene	0.013	2.22 E-06	1.20 E-06
	Acenaphthene	0.057	8.10 E-06	4.23 E-06
	Fluorene	0.16	2.63 E-05	1.42 E-05
	Phenanthrene	0.22	2.83 E-05	1.45 E-05
	Pyrene	0.017	2.80 E-06	1.51E-06
Metals	Cu	6.97	9.33 E-04	4.81 E-04
	Ni	17.19	2.29 E-03	1.18 E-03
	Pb	2.83	4.19 E-04	2.21 E-04
	Zn	48.65	6.55 E-03	3.38 E-03
	As	1.43	1.94 E-04	1.00 E-04
	Cr	39.42	5.18 E-03	2.66 E-03
	V	33.34	4.37 E-03	2.24 E-03
	Se	1.10	1.57 E-04	8.21 E-05

Table 6. Results of minimum toxic values, AF, PNEC, and RCR of chemical substances in discharge water.

	Parameter	Minimum toxic value (mg/L)	AF	PNEC (µg/L)	RCR
PAHs	Naphthalene	5.00E-01	10	5.00E+01	1.06E-06
	Acenaphthylene	3.30E-02	50	6.60E-01	3.36E-06
	Acenaphthene	5.20E-01	100	5.20E+00	1.56E-06
	Fluorene	6.25E-02	10	6.25E+00	4.21E-06
	Phenanthrene	5.00E-03	10	5.00E-01	5.66E-05
	Pyrene	5.50E-02	50	1.10E+00	2.55E-06
Metals	Cu	5.00E-03	10	5.00E-01	1.87E-03
	Ni	4.00E-04	10	4.00E-02	5.73E-02
	Pb	2.70E-03	10	2.70E-01	1.55E-03
	Zn	7.50E-04	10	7.50E-02	8.73E-02
	As	4.26E-01	10	4.26E+01	4.55E-06
	Cr	5.19E-01	10	5.19E+01	9.98E-05
	V	1.60E-01	10	1.60E+01	2.73E-04
	Se	8.50E-02	10	8.50E+00	1.85E-05

양한 오염 및 독성 물질의 영향이 있을 수 있다. 그리고 독성 물질의 장기 축적 효과를 무시할 수 없기 때문에, 실제 생물을 이용한 생태 독성 조사에서는 결과가 달리 나타날 수 있다.³⁴⁻³⁹⁾ 따라서 이와 관련된 추가적인 검증과 연구가 필요하다.

4. 결 론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다. 첫째, 수질 일반항목 측정 및 유해물질 농도 분석 결과, 유입수에 비해 배출수에서 pH는 3.95만큼 감소하였고, 온도는 4.6°C도 상승하였으며, 염분은 유입수와 배출수가 유사하였으며, 알칼리도는 유입수에 비해 배출수에서 115 mg CaCO₃/L 만큼 감소하였고, 탁도는 유입수에 비해 배출수에서 1.03 NTU만큼 증가하였다. 배출수의 pH는 IMO MEPC.340(77)에서 제시한 배출수 수질 기준 중 pH 기준에 부합하지 않은 것으로 나타나, IMO MEPC.340(77)에서 별도의 기준도 제시하고 있기 때문에 실제 배출 상황에서는 기준에 부합할 수 있다.

둘째, 유입수에 비해 배출수에서 총 중금속의 농도를 비교 분석한 결과, Cd, Cu, Zn는 감소하였고, Ni, Pb, As, Cr, V, Se는 증가하였고, 용존 중금속의 농도는 Cd, Cu, Se에서 감소하였고, Ni, Pb, Zn, As, Cr, V에서는 증가하였다.

셋째, 환경위해성평가를 위해 PBT 평가 기준에 따라 분석한 결과, 본 연구에서 분석한 물질 중 검출된 PAHs 6종과 중금속 8종 중 Phenanthrene이 PBT 물질로 판단되었다.

넷째, 본 연구에서 검출된 유해물질 PAHs 6종과 중금속 8종의 PNEC 결과와 RCR을 비교한 결과, RCR 값이 1을 초과하는 물질은 없는 것으로 확인되었다.

본 연구는 국내에서 개발한 개방형 EGCS의 유입수와 배출수 내 유해물질을 분석하였고, 배출수 내 유해물질에 대한 환경위해성 평가를 시행하였다. 종합적으로, 본 연구에서 사용된 개방형 EGCS 배출수의 환경유해성은 우려할만한 수준은 아닌 것으로 판단된다. 이를 통해 환경위해성 사용에 대한 안정성에 대한 근거를 더하고, 향후 연구에 대한 기초자료를 제공하였다.

본 연구는 선박에 주로 사용하는 Bunker C 연료를 사용하여 선박 엔진을 통해 배기가스를 발생시켜 실제 운행 상황과 유사한 조건을 설정하였다. 그러나 장기간 해양환경에서 운행되는 선박과는 다르게 본 연구에서는 육상에 EGCS를 설치하고 짧은 시간 가동되었기에 실제 배

출 상황을 충분히 고려하지 못하였다. 또한 여건상 오염물질 분석을 1회 시행하여 데이터의 신뢰도가 낮을 수 있다는 한계가 있다. 향후 폐쇄형 장비와의 비교와 더불어 실제 배출 환경에서의 유입수와 배출수의 환경유해성 측정이 필요하며, 수차례 실험을 진행하여 엄밀한 통계 분석과 더불어 결과값의 신뢰도를 높여야 할 것으로 생각된다. 또한 이 연구에서 더 나아가 식물플랑크톤 성장저해시험, 무척추동물 및 어류 급·만성독성시험 등을 통한 실질적인 생태 독성과 인체 유해성에 대한 연구 역시 제언하는 바이다.

감사의 글

이 연구는 ‘선박배출 미세먼지 통합저감 기술개발사업’의 일환으로 진행되고 있는 ‘선박 배출 대기오염물질 동시저감 후처리시스템 실증 및 인증체계 구축’ 과제의 지원으로 수행되었습니다(20190402).

참고문헌

1. 조동오, “LA/LB항과 부산항의 저탄소 항만운영에 관한 비교연구 - 비용부담을 중심으로 -”, *해양환경안전학회지*, **2010**, 16, 223-228.
2. D. Bailey and G. Solomon, “Pollution prevention at ports: clearing the air”, *Environmental Impact Assessment Review*, **2004**, 24, 749-774.
3. Y. S. Ahn, K. S. Kim, and S. M. Jeong, “A study on assessment and certification system for reduction technology of emission from ship”, *Korea Maritime Institute*, **2019**.
4. H. C. Lee, J. H. Hwang, H. S. Park, and H. Y. Ryu, “A study on the systematic management of air pollutant from ships in Korea”, *Korea Maritime Institute*, **2016**.
5. 최정길, 김명원, 이효진, 강태순, 이강웅, “국내 주요 항구도시의 선박 배기가스 배출량 산정 및 사회적 비용 추정”, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, **2021**, 27, 905-917.
6. 서형준, 이형석, “대기오염물질이 환경성 질화에 미치는 영향: 수도권지역의 자치구 및 시군을 중심으로”, *서울도시연구*, **2019**, 20, 39-59.
7. G. E. Song and C. H. Han, “A study on the strategies for the reduction of port pollution”, *Journal of Korea Port Economic Association*, **2007**, 23, 95-113.
8. J. Wu, D. Houston, F. Lurmann, P. Ong, and A. Winer, “Exposure of PM_{2.5} and EC from diesel and gasoline vehicles in communities near the ports of Los Angeles and Long Beach, California”, *Atmospheric Environment*,

- 2007, 43, 19.
9. 이정욱, 한승훈, “300 kW급 선박용 디젤엔진 저배압 미세먼지저감 전기집진장치 설계”, *동력시스템공학회지*, **2021**, 25, 60-69.
 10. 해양한국, <http://www.monthlymaritimekorea.com/news/articleView.html?idxno=22733>, 2023년 12월.
 11. 한국해양수산개발원, “IMO 국제해사 정책동향”, **2020**, 38, 1-5.
 12. International Maritime Organization, “2022 Guidelines for risk and impact assessments of the discharge water from exhaust gas cleaning systems (MEPC.1/Circ.899)”, **2022**.
 13. 이정석, 문성대, 강민호, 박혜민, “해양환경 유해물질의 평가 및 관리기술 개발: 생태위해성 평가 및 진단체계 마련”, *환경독성보건학회 심포지엄 및 학술대회*, **2019**, 29-29.
 14. 이영환, 이재성, “해양환경 유해물질의 평가 및 관리기술 개발-생태위해성 평가 및 진단체계 확립”, *환경독성 보건학회 심포지엄 및 학술대회*, **2019**, 32-32.
 15. 손명백, 손민호, 이지현, 손영준, 이광현, 문창호, 김영수, “전기분해원리를 이용한 선박평형수관리장치의 배출수에 대한 해양생태독성 및 해양환경위해성에 관한 연구”, *한국해양환경-에너지학회지*, **2013**, 16(2), 88-101.
 16. 장풍국, 현봉길, 신경순, 서진영, 장민철, “선체부착생물 관리에 대한 국제적인 동향 및 국내 위해성 평가에 대한 소개”, *한국해양환경-에너지학회지*, **2023**, 26, 310-319.
 17. 김영운, 석형주, 이광섭, 김태원, 오상우, 이문진, “국내 주요 항만의 위험유해물질(HNS) 유출 사고 후 해양생태 위해성 평가”, *한국해양환경-에너지학회지*, **2022**, 25, 237-247.
 18. 하신영, 국승기, “선박 배출 오염물질 항만처리시스템 확보방안 연구”, *한국항해항만학회지*, **2020**, 44, 488-493.
 19. 여인설, 박찬규, “산화공정 연계형 용존공기부상분리 시스템 개발을 통한 선박 스크러버 폐세정수 처리 연구”, *대한상하수도학회-한국물환경학회 2019년 공동춘계학술발표회*, **2019**.
 20. 여인설, 박찬규, “선박 습식스크러버 폐세정수 처리를 위한 산화공정 연계형 high-rate DAF 시스템 개발 연구”, *한국유체기계학회 하계학술대회 논문집*, **2019**, 314-315.
 21. 박찬규, 여인설, 안주석, 조은영, 이주열, “선박 습식스크러버 폐세정수 처리를 위한 전기화학적 처리 및 다단침전반응 연계공정 개발 연구”, *한국유체기계학회 하계 학술대회 논문집*, **2018**, 420-430.
 22. 엄한기, 박병현, 정순관, 김성수, “선박 연료의 황 함유량 규제에 따른 스크러버 기술의 동향과 전망”, *공업화학전망*, **2019**, 22(5), 1-13.
 23. 류영현, 김태우, 김정식, 남정길, “선박용 디젤엔진의 NO_x를 저감하기 위한 습식 배기가스 처리기술 적용에 관한 실험적 연구”, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, **2017**, 41(3), 216-221.
 24. International Maritime Organization, “2021 Guidelines for exhaust gas cleaning systems”, **2021**, 340(77).
 25. International Organization for Standardization, “International standard, water quality-marine algal growth inhibition test with *Skeletonema costatum* and *Phaeodactylum tricornutum* (ISO 10253)”, **2016**, 12.
 26. International Maritime Organization, “Methodology for information gathering and conduct of work of the GES-AMP”, **2022**, BWM.2, Circ.13, Rev.5.
 27. US Environmental Protection Agency, “Exhaust gas scrubber washwater effluent (EPA-800-R-11?006)”, **2011**.
 28. M. Hufnagl, G. Liebezeit, and B. Behrends, “Effects of Sea Water Scrubbing, Final Report”, **2005**, BP Marine.
 29. M. Koski, C. Stedmon, and S. Trapp, “Ecological effects of scrubber water discharge on coastal plankton: potential synergistic effects of contaminants reduce survival and feeding of the copepod *Acartia tonsa*”, *Marine Environmental Research*, **2017**, 129, 374-385.
 30. A. L. Hermansson, I. - M. Hassellöv, J. Moldanová, and E. Ytreberg, “Comparing emissions of polyaromatic hydrocarbons and metals from marine fuels and scrubbers”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **2021**, 97, 102912.
 31. M. Picone, M. Russo, G. G. Distefano, M. Baccichet, D. Marchetto, A. V. Ghirardini, A. L. Hermansson, M. Petrovic, M. Gros, E. Garcia, E. Giubilato, L. Calgaro, K. Magnusson, M. Granberg, and A. Marcomini, “Impacts of exhaust gas cleaning systems (EGCS) discharge waters on planktonic biological indicators”, *Marine Pollution Bulletin*, **2023**, 190, 114846.
 32. (주)파나시아, “선박 배기가스 후처리 장치의 배출수 통합 자가 모니터링 시스템 국산화 개발”, **2022**, 해양수산과학기술진흥원.
 33. A. Zipperle, J. V. Gils, B. V. Hattum, and S. Heise, “Guidance for a harmonized Emission Scenario Document (ESD) on Ballast Water discharge”, **2011**, 75, Federal Environment Agency, Germany.
 34. H. C. Sarakinos, N. Bermingham, P. A. White, and J. B. Rasmussen. “Correspondence between whole effluent toxicity and the presence of priority substances in complex industrial effluents”, *Environmental Toxicology and Chemistry*, **2000**, 19, 63-71.
 35. US Environmental Protection Agency, “Final report: inter-laboratory variability study of EPA short-term chronic and acute whole effluent toxicity test method (EPA-821-B-01-004)”, **2001**, 153.
 36. Organisation for Economic Cooperation and Development, “Freshwater alga and cyanobacteria, growth inhibition test (OECD-201)”, **2011**, 25.

37. US Environmental Protection Agency, "Methods for measuring the acute toxicity of effluents and receiving waters to freshwater and marine organisms (EPA-821-R-02-012)", **2002**, 266.
38. US Environmental Protection Agency, "Short-term methods for estimating the chronic toxicity of effluents and receiving waters to marine and estuarine organisms (EPA-821-R-02-014)", **2002**, 464.
39. US Environmental Protection Agency, "Ecological effects test guidelines oppts 850. 1055 Bivalve acute toxicity test (EPA-712-C-16-006)", **2016**, 22.