선박평형수관리협약 준수를 위한 유동입자 기반의 수처리 장치 성능 평가

차형곤, 신경순, 현봉길
한국해양과학기술원 선박평형수연구센터
e-mail:bghyun@kiost.ac.kr

Performance Evaluation of Floating Particle-based Water Treatment System for compliance with Ballast Water Management Convention

Hyung-Gon Cha, Kyoungsoon Shin, Bonggil Hyun
Ballast Water Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology

요 약

국제해사기구 선박평형수관리협약 채택(2004년) 및 발효(2017년 9월 8일)됨에 따라 협약 발효일 이후부터 건조되는 신조선은 모두 선박평형수처리장치(Ballast Water Management System, BWMS)를 장착해야 하며, 기존선인 경우도 2024년 9월 8일까지 처리장치를 장착해야 한다. 2021년 기준 개발된 BWMS 중 약 70% 정도가 메인 처리장치의 효율을 높이거나 크기가 큰 부유물질 제거 목적으로 전처리 장치를 활용하고 있다. 하지만, 이러한 전처리 장치의 대다수는 필터 방식의 여과 시스템을 채택하고 있어서 부유물질의 농도가 높은 해역에서는 운전이 불가하며, 생물 및 입자성 부유물질에 의한 필터 손상도 빈번하게 발생한다고 보고 되고 있어서 이를 대체할 수 있는 기술 개발이 시급한 실정이다. 그래서 본 연구에서는 선박평형수 전처리 여과장치를 대체하기 위해 유동 입자 기반의 수처리 장비(Floating Particle-based Water Treatment System, FP-WTS) 활용 가능성을 평가해 보고자 하였다. 해당 FP-WTS는 해수가 장비 내부로 유입되면 회전력에 의해 장치 내부에 있는 메디아가 빠르게 회전하면서 물리적 및 기계적인 힘에 의해 생물을 제거하는 원리를 채택하고 있다. BWMS Code 해수 시험수 기준(≥50㎛ 크기 생물 조건: 3 phylum, 5 species, ≥100, 000 indiv./m^3)에 충족하는 유입수(Test 1-3)과 고탁도 해역을 모사하기 위한 총부유물질 농도가 750 mg/L (Test 4)와 1,290 mg/L (Test 5) 이상의 유입수(산화알루미늄과 Arizona Test Dust 사용) 약 12톤을 조성해서 시간당 10 m^3 유량으로 40분 이상 운전하였고, 모든 실험 차수에서 연속 샘플링을 통한 ≥50 ㎛ 크기 생물제거효율 확인해 보았다. 또한 처리장치 통과 전/후 총부유물질 농도 분석을 통해 해당 장치의 정수 효율도 분석했다. ≥50㎛ 크기 생물은 모든 실험 차수에서 평균적으로 89% (75.4%-96.1%)이상 제거되었고, 전반적으로 고탁도환경(생물제거율: Test 4, 5: 80.1%; Test 1-3: 95.7%)에서 생물제거효율이 낮아지는 것으로 확인되었다. Test 4, 5회차에 수행된 고탁도 환경에서 FP-WTS 장비의 탁도 제거 효율은 총부유물질 농도 기준 각각 73.6%. 87.2%로 확인되었다. 추가적인 실제 규모의 모의실험을 통한 검증이 필요할 것으로 판단되지만, 본 연구 결과는 BWMS 전처리 여과장치 대체 기술 개발의 중요한 연구 자료로 활용 가능할 것으로 판단된다.

1. 서론

선박평형수는 매년 약 100억톤 이상이 전 세계 각지에 배출되고 있으며, 이때 다양한 해양 생물이 선박평형수와 같이 배출되어서 해당 해역의 환경과 생태계를 교란시키고 있다. 이에 국제해사기구에서는 선박에 선박평형수 처리장치 설치를 의무화하는 규정을 신설했으며, 2017년 9월 8일에 발효되었다[1]. 이에 2017년 9월 8일부터 건조되어지는 신조선은 모두 선박평형수관리시스템(Ballast Water Management System, BWMS)를 장착해야 하며, 기존선인 경우도 2024년 9월 8일까지 처리장치를 장착해야 한다[1].

대부분의 BWMS에는 크기가 큰 부유물질을 제거하고 메인처리장치의 생물사멸율을 높이기 위해 wedge 또는 mesh type의 여과 장치(Filtration process)를 적용하는데, 2021년 기준 최종승인을 받은 BWMS는 약 72%(48개/ 총 67개)에 해당 한다[2]. 이러한 여과 방식의 전처리 장치를 장착한 선박이 총부유물질의 농도가 높은 해역에서 취수(Uptake)할 경우 여과 장치 내 필터 막힘 현상이 빈번하게 발생되고 있으며, 따라서 지속적인 필터 부품 청소 및 교체에 따른 유지·보수 비용이 발생하고 있다[3]. 따라서 고탁도 해역에서도 BWMS 운전 가능하며, 여과 장치 대비 상대적으로 유지보수 비용이 적

게 드는 새로운 전처리 장비 개발이 시급한 실정이다.

본 연구에서는 새로운 처리방식(유동입자)을 채택한 수처리장치(FP-WTS)를 이용해 일반해역과 고탁도 해역을 모사한 시험수 조건에서 ≥50㎛ 크기 생물 제거 효과를 확인해서 BWMS 전처리 장치로서의 활용가능성을 검토해 보고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 FP-WTS 수처리 원리

해당 장비는 장치 내부로 해수가 유입되면 해수의 회전력에 의해 장치 내부에 존재하는 메디아가 빠른 속도로 회전하면서 물리적 및 기계적(마찰 및 충돌)인 힘에 의해 유입수 내 존재하는 생물을 사멸시키게 된다.

2.2 FP-WTS 운전

2023년 2월 21일부터 2월 22일까지 총 5회(고탁도 실험 2회 포함)에 걸쳐 한국해양과학기술원 남해연구소 부두에서 시간당 10톤 규모의 FP-WTS로 실험을 진행하였다. BWMS Code 해수 시험수 기준(≥50㎛ 크기 생물 조건: 3 phylum, 5 species, ≥100, 000 indiv. m^{-3})을 충족시키기 위해 자연생물 군집을 채집 및 농축해서 사용하였다. 상하이항만과 같은 고탁도 해역 조건을 모사하기 위해 산화알루미늄과 Arizona Test Dust (Powder, technology, Inc. USA)를 해수 약 12톤에 25kg (Test 4)과 36kg (Test 5) 주입하였다.

해수는 10톤 수조 2개에서 동시에 FP-WTS 장비로 유입된 후 내부에 장입된 메디아와 섞여 소용돌이(허리케인)를 형성시키면서 L2 출구로 배출되었다. 배출된 해수는 처리수 탱크로 주입되었고, 장비의 아펙스 노즐부에서 분리된 해수는 파이프를 통해 다시 유입수 탱크로 유입되었다. 모든 시험 회차에서 FP-WTS는 40분 이상 운전되었으며, 9.55 ~ 10.2 m^3 hr^{-1}의 유량 범위에서 운전되었다.

2.3 생물 제거 효율 평가

모든 실험 차수에서 ≥50㎛ 크기 생물에 대한 제거 효율만을 평가하였으며, 계산식은 아래와 같다.

제거율(%) = (실험수 내 생존생물 개체수 - 처리장치 통과 후 생존생물 개체수) / 실험수 내 생존생물 개체수 × 100

2.4 일반수질환경인자

실험수 및 처리수를 대상으로 수온과 염분은 in-situ 측정을 하였으며, 총부유물질, 용존성 및 입자성 물질은 장치가 운전되는 시간 동안 연속적으로 샘플링 한 후 해양환경공정시험기준에 준해서 분석을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 생물사멸효율

1 ~ 3회차 시험수 내 수온은 6.36 ~ 7.89℃, 염분은 33.1 ~ 33.2 psu 그리고 pH는 8.08 ~ 8.14 범위를 나타내었다(표 1). TSS는 20.3 ~ 29.7 mg/L 범위를 보였고, DOC와 POC 농도는 1.42 ~ 1.81 mg/L, 1.75 ~ 3.38 mg/L 범위를 나타내었다. 따라서 TSS, DOC 및 POC 모두 BWMS Code 해수 시험수 기준을 충족하였다.

[표 1] 생물사멸실험(Test 1-3) 유입수 내 수질 환경 조건

Test No.	Temp. (℃)	Sal. (psu)	pH	TSS (mg/L)	DOC (mg/L)	POC (mg/L)
1	7.65 ± 0.1	33.2 ± 0.0	8.11 ± 0.0	20.3 ± 1.01	1.42 ± 0.06	1.75 ± 0.13
2	6.36 ± 0.5	33.1 ± 0.2	8.08 ± 0.0	29.0 ± 1.73	1.81 ± 0.09	2.41 ± 0.17
3	7.89 ± 0.0	33.2 ± 0.0	8.14 ± 0.0	29.7 ± 1.76	1.81 ± 0.12	3.38 ± 0.27
Validation criteria (BWMS Code)	-	28 - 36	-	>1	>1	>1

1 ~ 3회차 시험수에서 확인된 ≥50 ㎛ 생물은 3문 5종 이상 출현하였으며, 요각류가 92.7% 이상을 차지하며 우점하였다. 생존 생물 개체수는 105,000 ~ 260,000 indiv./m^3로 BWMS Code 시험수 기준(≥10^5 indiv./m^3)을 충족하였다(표 2).

[표 2] 생물사멸 실험(Test 1-3) 유입수 내 ≥50 ㎛ 생물 출현종 수와 생존 생물 개체수

Test No.	species / phyla	개체수 (indiv./m^3)	CV (%)	유입수 만족여부
1	5 species 3 phyla	105,000 ± 5,000	4.8	Satisfied
2	5 species 3 phyla	183,333 ± 15,275	8.3	Satisfied
3	5 species 3 phyla	260,000 ± 10,000	3.8	Satisfied
Validation criteria	≥3 phyla/divisions 5 species	More than 10^5 live individuals/m^3		

1 ~ 3 회차 처리수 내 수온은 6.25 ~ 8.18℃, 염분은 33.2 psu, pH는 8.09 ~ 8.12 범위를 보였다. TSS 농도는 20.1 ~ 27.5 mg/L 범위를 보였고, DOC와 POC 농도도 각각 1.49 ~ 1.89 mg/L, 1.01 ~ 1.52 mg/L 범위를 보였다(표 3). 처리수에서 ≥ 50 ㎛ 생물은 4,137 ~ 11,604 indiv./m^3 개체가 생존해 있었으며, 유입수 대비 95% 이상의 높은 생물 제거효율을 보였다. ≥50 ㎛ 생물 사멸 형태를 분석한 결과, 그림 1과 같이 대다수

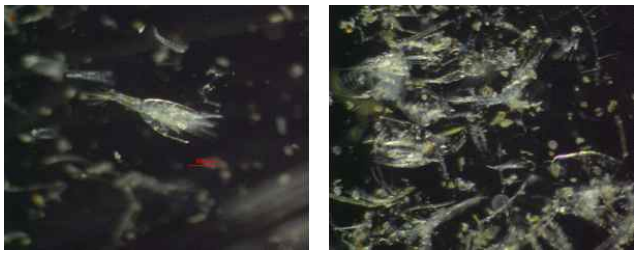
의 개체가 찢긴 형태로 사멸되어 있었으며, 이는 장비 내부에서 빠른 속도로 회전하면서 메디아와의 충돌에 의한 영향이라고 판단된다.

[표 3] 생물사멸실험(Test 1-3) 처리수 내 수질 환경 조건

Test No.	Temp. (℃)	Sal. (psu)	pH	TSS (mg/L)	DOC (mg/L)	POC (mg/L)
1	7.74 ± 0.0	33.2 ± 0.1	8.12 ± 0.0	20.1 ± 0.61	1.49 ± 0.09	1.01 ± 0.06
2	6.25 ± 0.0	33.2 ± 0.1	8.09 ± 0.0	27.5 ± 1.32	1.84 ± 0.18	1.22 ± 0.01
3	8.18 ± 0.0	33.2 ± 0.0	8.12 ± 0.0	26.7 ± 1.04	1.89 ± 0.15	1.52 ± 0.10

[표 4] 생물사멸효율 실험(Test 1-3) 처리수 내 ≥50 ㎛ 생존 생물 개체수 및 제거율

Test No.	개체수(indiv./m^3)	CV(%)	제거율(%)
1	4,137±387	9.4	96.1
2	8,267±562	6.8	95.5
3	11,604±654	5.6	95.5
Validation criteria			≥70



[그림 1] 처리수 내 찢긴 형태로 사멸된 ≥50 ㎛ 크기 플랑크톤

3.2 탁도 제거 효율

탁도 실험 4 회차, 5 회차 유입수 내 TSS 농도는 각각 752 mg/L, 1,290 mg/L로 확인되었다. 이는 Jang et al (2020)이 보고한 중국 상하이항(고탁도 해역에 존재하는 항만)에서 선박으로 유입된 평형수 내 TSS 농도(690 ± 134 mg/L, 310 ± 63 mg/L, 351 ± 21.0 mg/L)보다 약 1.1~4.2배 정도 높았다[3].

탁도 제거 효율 실험 유입수에서 ≥50 ㎛ 생물은 3문 5종 이상 출현하였고, 요각류가 95% 이상을 차지하며 우점하였다. 유입수 내 ≥50 ㎛ 크기 생존 생물 개체수는 4회차와 5회차 실험에서 각각 168,333 indiv./m^3과 216,666 indiv./m^3로 확인되어, BWMS Code 해수 시험수 기준(≥10^5 indiv./m^3)을 충족하였다(표 6).

[표 5] 탁도제거효실험(Test 4, 5) 유입수 내 수질 환경 조건

Test No.	Temp. (℃)	Sal. (psu)	pH	TSS (mg/L)	DOC (mg/L)	POC (mg/L)
4	9.58 ± 0.1	33.2 ± 0.0	8.12 ± 0.0	752 ± 44.9	1.74 ± 0.11	4.27 ± 0.09
5	9.52 ± 0.0	33.2 ± 0.0	8.13 ± 0.0	1,290 ± 165	1.78 ± 0.06	3.74 ± 0.24
Validation criteria (BWMS Code)	-	28 - 36	-	>1	>1	>1

[표 6] 탁도제거 실험(Test 4, 5) 유입수 내 ≥50 ㎛ 생물 출현종 수와 생존 생물 개체수

Test No.	species / phyla	개체수 (indiv./m^3)	CV (%)	시험수 만족여부
4	5 species 3 phyla	168,333 ± 12,583	7.5	Satisfied
5	5 species 3 phyla	216,666 ± 20,817	9.6	Satisfied
Validation criteria (BWMS Code)	≥3 phyla/divisions 5 species	More than 10^5 live individuals/m^3		

4회차 처리수 내 수온, 염분, pH는 각각 9.88℃, 33.3 psu, 8.12이며, 5회차 처리수에서도 수온, 염분, pH는 각각 9.76℃, 33.3 psu, 8.13으로 확인되었다. 4회차와 5회차 처리수에서 ≥50 ㎛ 크기 생존 생물 개체수는 각각 41,455 indiv./m^3과 33,031 indiv./m^3 으로 확인되었으며, 4회차에서는 75.4%, 5회차에서는 84.8%의 생물제거효율을 보였다. 이는 생물사멸시험결과(Test 1-3) 대비 약 10% 이상 낮은 수치로 유입수내 높은 농도로 존재하는 탁도 물질이 장비 성능에 부정적인 영향을 미친 것으로 파악된다. TSS 농도는 4회차 실험에서는 198 mg/L이며, 5회차 실험에서는 165 mg/L로 확인되었다. TSS 농도를 기반으로 FP-WTS 장비의 탁도 제거 효율을 확인해 본 결과 유입수 대비 각각 약 73.6%와 87.2% 감소 효과가 있는 것으로 확인되었다.

[표 7] 탁도제거 실험(Test 4, 5) 처리수 내 수질 환경 조건

Test No.	Temp. (℃)	Sal. (psu)	pH	TSS (mg/L)	DOC (mg/L)	POC (mg/L)
1	9.88 ± 0.0	33.3 ± 0.0	8.12 ± 0.0	198 ± 7.29	1.85 ± 0.08	2.21 ± 0.12
2	9.76 ± 0.0	33.3 ± 0.0	8.13 ± 0.0	165 ± 5.50	1.96 ± 0.11	2.19 ± 0.11

[표 7] 탁도제거 실험(Test 4, 5) 처리수 내 ≥50 ㎛ 생존 생물 개체수 및 제거율

Test No.	개체수(indiv./m^3)	CV(%)	제거율(%)
1	41,455±4,424	10.7	75.4
2	33,031±3,843	11.6	84.8
Validation criteria			≥70

4. 결론

BWMS의 처리 효율 향상 및 고탁도 해역에서의 안정적인 운전 성능을 확보하기 위해서 기존의 여과 시스템을 대체할 수 있는 유동입자 기반의 수처리장치 성능을 확인해 보았다. 3차례 생물제거효율실험에서 모두 95% 이상의 제거효율을 보였으며, 중국 상하이항만 이상의 고탁도를 조성해서 진행한 탁도 제거 효율 실험에서도 생물 제거 효율은 75% 이상이었고, 80% 정도의 탁도 제거 효율도 확인되었다. 또한 고탁도 환경에서도 고형물에 의한 장비 멈춤 현상이 관찰되지 않아서, 기존의 여과 전처리 장비 대비 안정적인 운전이 가능할 것으로 판단된다. 하지만 이는 5번의 소규모 실험을 통해서 얻어진 단편적인 결과이기 때문에, 추가적인 실제 규모(full scale)의 검증 연구를 통해 FP-WTS 장비의 성능을 보다 정확하게 평가할 필요가 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] International Maritime Organization. (IMO), “International Convention for the Control and Management of Ship’s Ballast Water and Sediment”, 2004년.

[2] International Maritime Organization (IMO), “International Convention For The Control and Management of Ships′ Ballast Water and Sediments, 2004 (BWM.2/Circ.34/Rev.10).”, 2021년.

[3] Jang, Pung-Guk, Hyun, Bonggil, Shin, Kyoungsoon, “Ballast Water Treatment Performance Evaluation under Real Changing Conditions”, Journal of Marine Science and Engineering, 8권, 10호, pp 1-19, 2020년.