

중국을 포함한 동남아시아 주요 국제항 운전 경로를 가진 선박에 설치된 BWMS 성능 평가

장풍국, 현봉길, 장민철
한국해양과학기술원 선박평형수연구센터
e-mail:pgjang@kiost.ac.kr

Performance evaluation of ballast water management system installed on ships with major international ports in the Southeast Asia including China

Pung-Guk Jang, Bong-Gil Hyun, Min-Chel Jang
Ballast Water Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology

요 약

국제해사기구는 선박평형수관리협약(BWMSC)의 이행으로 국제 항만에서 실제적으로 선박평형수처리장치(BWMS) 운전과 BWMC가 잘 이행되는지를 보기 위한 경험측적기(EBP)를 수행하고 있다. 본 연구는 부유물질 조건이 최악인 중국 상해를 포함한 동남아시아를 운항하는 선박에 설치된 BWMS에 대한 선상시험을 수행했다. BWMS 운전이 가능한 지역에서 5번의 선상 시험 모두 선박평형수처리 기준인 D-2를 만족했다. 그러나 상해항에서 2개 타입의 BWMS로 운전을 시도했지만 성공하지 못했다. 이는 부유물질이 높고, 담수 지역인 상해 지역에서 필터 막힘 현상과 목표 총잔류산화물농도(TRO)가 생성되지 않아 BWMS가 운전되지 않았다. 본 연구 결과는 부유물질이 높은 지역에서 필터를 가진 BWMS를 운전 시, sea to sea 방법으로 탁도(NTU)를 측정하여 탁도가 일정 수준 이상이 되면, ballasting 시 필터를 사용하지 않고 배출 시 필터 장치를 사용하는 것을 제안한다. 또한 전기 분해 장치를 가진 BWMS는 부분 평형수 탱크 운영 방법을 이용하여 탱크 내 잔류 TRO 농도를 유지시킴으로써 IMO D-2 기준을 보다 더 잘 만족시킬 수 있을 것 판단된다.

1. 서 론

해양생태계의 외래종 침입은 그 지역의 고유생태계를 교란시킬 수 있으며, 선박 기원인 biofouling과 선박평형수가 해양에서 외래종을 이동시키는 주요 요인이다[1]. 국제해사기구(IMO)는 2004년 선박평형수관리협약(Ballast Water Management Convention, BWMC)을 제정하여 형식승인을 받은 선박평형수처리장치(Ballast Water Management System, BWMS)를 선박에 설치하여 일정 기준 미만으로 생물을 처리한 후 배출하도록 규정을 만들었다. BWMC는 2017년 9월 8일 발효되어, 2019년 9월 8일부터 2024년 9월 8일까지 국제항을 이동하는 대부분의 선박들은 5년마다 실시하는 선박정기검사(IOPP)를 기준으로 순차적으로 선박평형수처리장치를 설치해야만 한다.

선박에 설치하는 BWMS가 형식승인을 받기 위해서는 육상 및 선상 시험을 IMO G8에 따라 수행해야만 한다. 육상 시험은 BWMS 성능을 평가하기 위해

일반적인 해양환경보다 열악한 조건의 시험수 조건으로 담수, 기수, 해수에서 연속 5회 시험을 성공해야지만 형식승인을 획득할 수 있다. 하지만 특정 지역의 해양환경 조건은 시험수 조건보다 더 열악한 조건일 수 있다. 형식승인 육상 시험을 위한 시험수 조건과 특정 항만의 자연수 조건 중에서 가장 큰 차이를 보이는 것이 총부유물질(TSS) 농도이다. 선박의 입출항이 잦은 주요 국제항만 중에는 큰 강의 하구에 위치한 곳들이 많으며, 대표적인 항만이 중국 양자강 하구에 위치하고 있는 상해 인근 항 등이다. 양자강은 세계에서 3번째로 가장 큰 강이며 연평균 퇴적물 방류량이 약 4.8×10^8 metric tonnes이며 이는 세계에서 네 번째 규모이다. 방류되는 퇴적물 중 40%는 만내에 퇴적되고 만내의 TSS 농도는 연중 상당히 높은 값을 유지한다[2][3]. 2019년 11월까지 IMO로부터 최종형식승인을 득한 제품은 45개 제품이며, 이 중에서 주요 처리 방식이 전기분해를 이용하는 장비가 22개 제품으로 가장 많으며, chemical 주

입하는 방식 12개, UV 방식 7개, 오존 방식 3개 제품이다. 장비 특성과 선박의 설치 조건에 따라 BWMS가 설치되는데 현재까지 주로 선박에 설치되는 주요 BWMS는 UV 장치와 전기분해장치인 것으로 파악된다. 개발된 BWMS 장치 중 필터를 가지고 있는 제품이 32개 제품으로 전체에 71%를 차지한다. TSS 농도가 높은 환경에서는 역세척을 수행하기도 전에 필터 막힘 현상이 발생해 BWMS를 안정적으로 운전하는데 어려울 수 있다. 이외에도 높은 농도의 부유 물질은 UV 장치에서 UV dose 양에 영향을 줄 수 있고, BWMS에 장착되어 있는 각종 센서류 측정에도 문제를 일으켜 BWMS의 정상적인 운전을 방해할 수 있으며, 활성물질의 산화력을 감소시킬 수 있다.

본 연구는 현재 선박에 가장 많이 설치되고 있는 2가지 유형의 형식승인 받은 BWMS를 설치한 국제선을 대상으로 선박평형수처리장치의 성능이 D-2 기준을 만족하는지 평가하고자 하였다. 또한 열악한 환경(부유물질이 높은 조건)에서 실제 선박에서 BWMS 운전하여 발생할 수 있는 문제점을 모니터링하고 이를 해결할 수 있는 운전 방법을 제안하고자 한다.

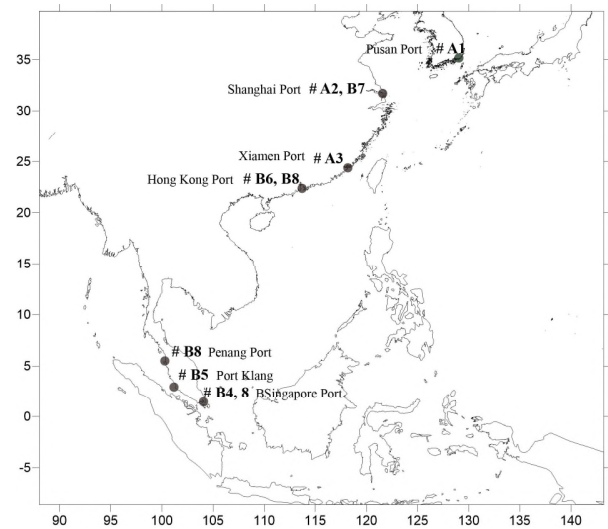
2. 재료 및 방법

선상시험 경로는 부산항을 출발해서 중국, 홍콩, 동남아시아 주요 항을 경유하는 선박들을 이용하였다(그림 1). 지금까지 최종형식승인을 획득한 BWMS 중에서 활성물질을 이용하는 전기분해 장치와 약품주입 방식을 이용하는 BWMSs의 총잔류산화물 농도(TRO) 범위는 1-20 mg/L로 다양하고, BWMS 중 필터를 가지고 있는 제품들은 대부분 여과장치의 필터 mesh 크기는 40-50 μm 이다. 본 연구는 지금까지 가장 많은 선박에 설치된 2가지 타입의 BWMS 대해서 선상시험을 수행했다. A 타입은 필터+ UV로 구성되어 있고, B 타입은 필터가 없는 전기분해장치로 구성되어 있다. A type 장비의 필터 mesh 크기는 50 μm 이며, B type의 목표 TRO 농도는 8 mg/L이다.

선상시험의 샘플링과 분석 방법은 IMO G8(2008)에 따라 이루어졌으며, 2016년에 IMO G8이 개정되었지만, 본 연구에서 수행된 시험 방법과 다소 차이는 있지만 시험 결과에 영향을 주는 큰 차이는 없다. Ballasting 시험 시 유입수(uptake water, UW)와 deballasting 시 처리하지 않은 대조수(control water, CW)의 시료 채취는 운전 시간을 감안해서 시작(20%), 중간(50%), 그리고 종료(80%) 시점에 수행

하였으며, 처리된 배출수의 샘플링은 ballasting 탱크가 비워지는 것을 감안하여 10% 간격으로 총 9번(10%-90%) 샘플링을 수행하였다. 평형수 탱크의 저장 시간은 1일-8일 사이로 선박의 운영 조건에 따라 달리 이루어졌다.

수질 항목은 수온, 염분, DO, pH, 탁도는 YSI6600으로 측정하였고, 화학 분석은 입자성유기탄소(POC), 용존성 유기탄소(DOC), 총부유물질(TSS)을 분석하였으며, 생물 유효성을 분석하기 위해 $\geq 50 \mu\text{m}$, $\geq 10 \& < 50 \mu\text{m}$, $< 10 \mu\text{m}$ 크기의 생물을 대상으로 수행하였으며, 분석 방법은 IMO G2에 언급된 방법에 따라 이루어졌다. 부수적으로 Phyto-pam(제품 이름)을 이용하여 Chl-*a*와 활성 Chl-*a*를 분석하였다.



[그림 1] 선박평형수를 취수하거나 배출한 주요 국제항

3. 결과 및 고찰

A type의 선박평형수처리장치 효능 평가

A type을 설치한 선박은 부산, 상해, 샤먼에서 선상시험을 시도했지만, 부산항에서 선박에 실은 선박평형수만 BWMS 성능을 평가할 수 있는 ballasting 시험과 de-ballasting 시험을 모두 수행되었다(표 1). 선박평형수의 주요 수질환경 및 생물 조건은 표 1과 2에 정리하였다.

총부유물질(TSS)은 입자 크기 분포, 밀도와 퇴적물의 성질 등에 따라 BWMS의 필터 막힘 현상, UV 투명도 저하, 활성물질의 산화력 감소의 문제가 일어난다. BWMS에 설치된 Filter unit은 굵은 입자의 부유물질을 제거하는 것이 목적이 아니라 $\geq 50 \mu\text{m}$ 크기 이상의 생물을 제거하는 것이 주목적이기 때문에 대부분의 필터사이즈는 40-50 μm 이다. A type은 상해항에서 3번의 ballasting을 시도했지만 운전과 동시에 3분 동안 차압이 0.7 bar를 초과해 운전이

중단되었다. 이는 TSS의 농도가 너무 높아 필터에 부유입자들이 응집되어 역세척 운전이 작동했지만, 운전조건 차압(<0.6 bar)을 맞추지 못해 BWMS가 운전 중지된 것으로 판단된다.

[표 1] 선박평형수의 주요 수질환경

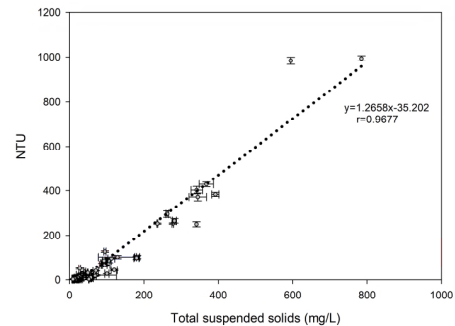
시험차수	선박평형수	염분	부유물질(mg/L)
#A1	B UW	32.1±0.3	28.9±12.4
	DB CW	30.9±0.0	43.8±18.7
#A2	B UW	30.5±0.2	57.8±3.30
#A3	B UW	19.0±0.1	690±134
#B1	B UW	26.0±0.3	93.3±3.21
	B UW	32.3±0.1	22.0±5.9
	DB CW	32.1±0.1	19.0±3.29
#B2	DB TW	31.5±0.3	18.7±4.1
	B UW	27.5±0.4	51.5±15.1
	DB CW	28.0±0.1	34.3±11.9
#B3	DB TW	27.7±0.4	15.7±7.20
	B UW	33.7±0.8	22.8±7.00
	DB CW	33.9±0.1	17.1±3.90
#B4	DB TW	32.3±0.2	20.3±5.90
	B UW	1.53±0.5	310±63
	B UW	32.3	23.5±9.48
#B5	B UW	31.1	22.4±2.83
	B UW	32.8	29.4±0.85
	DB CW	32.7±0.1	16.9±7.20
	DB TW	31.9±0.3	23.2±7.90

[표 2] 선박평형수의 주요 생물조건

시험차수	선박평형수	≥ 50µm (inds./m³)	10-50µm (cells/ml)	Active Chl-a (µg/L)
#A1	B UW	4586±2604	5.49±0.95	-
	DB CW	6853±1923	4.11±1.36	-
	TW	0.0	0.32±0.17	-
#A2	B UW	61438	28.0±15.5	-
#A3	B UW	6407	10.6±5.4	-
#B1	B UW	407±27	51.2±6.74	0.08±0.02
	DB CW	993±375	5.21±1.82	0
	TW	0	0	0
#B2	B UW	5152±2147	201±90.3	0.11±0.05
	DB CW	563±78	89.8±128	0.03±0.02
	TW	0	0	0
#B3	B UW	2407±976	98.5±52.8	0.09±0.01
	DB CW	952±105	31.0±26.7	0.03±0.02
	TW	0.3±0.4	0.07±0.01	0
#B4	B UW	307±111	29.8±2.62	0.34±0.01
	B UW	18471	34	0.47
	B UW	3115	43	0.07
#B5	B UW	2407	103	0.08
	DB CW	535±536	9.93±5.03	0.02±0.01
	DB TW	0	0.14±0.41	0

Wang 등(2009)은 레이저 입자크기 분석기를 이용한 중국 양자강 하구의 부유물질 주요 구성성분에 대한 연구에서 clay 16%, 실트 42%, sand 42%이고, 양자강 하구가 황허강 하구보다 입자가 크다고 보고하였다[2]. Lie 등(2010)은 양자강 하구에 유입되는 부유물질의 40% 정도가 만의 입구에서 퇴적된다고 보고하였다[3]. 이는 양자강 하구로 유입되는 부유물

질의 입자가 무거워 빨리 침전될 수 있음을 의미한다. 본 연구에서도 상해에서 이루어진 두 번의 선상 시험(A2, B4)에서 유입수 TSS 분석을 위한 전처리 과정에서 부유물질이 쉽게 가라 앉는 것을 확인하였다. 이는 상해와 같은 고탁도 지역에서 선박평형수를 유입하면 상당수의 부유물질이 평형수 탱크의 바닥에 가라앉는다는 것을 의미한다. 또한 모든 선박들은 평형수를 배출할 때 밑바닥에 있는 모든 물을 배출할 수 없어 잔수를 남긴다. 따라서 선박평형수를 배출할 때 부유물질의 농도는 낮고 부유물질은 탱크 내에 축적된다. 그래서 ballasting을 할 때는 필터를 bypass하고 UV만 가동시키고, deballasting 시 필터+ UV 처리로 처리한다면 필터의 막힘없이 BWMS가 정상적으로 가동할 수 있을 것이다. 본 연구에서 탁도(NTU)와 TSS의 피어슨 상관 계수(r)가 0.968으로 높게 나타나 탁도 값으로 부유물질 농도를 간접적으로 측정할 수 있음을 알 수 있다(그림 2). 즉 탁도가 높은 지역으로 의심되는 해역에서 선원은 sea to sea 방법으로 선박평형수를 ballasting 하면서 탁도 농도를 측정하여 기준치 이상이면, 필터를 deballasting 시 사용하는 방법으로 BWMS를 운전 전환할 수 있을 것이다.

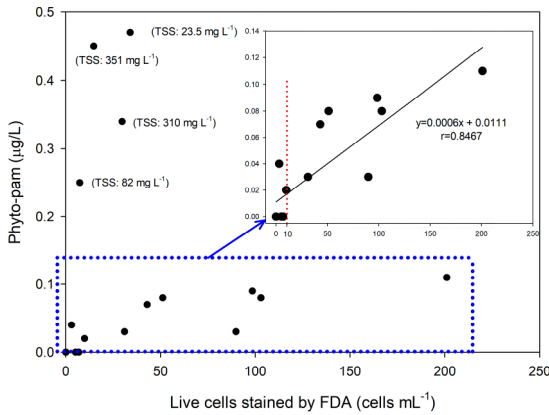


[그림 2] 총부유물질(TSS)과 탁도(NTU)의 상관관계

B type의 선박평형수처리장치 효능 평가

B type의 BWMS를 설치한 선박은 싱가포르, 포트겔랑, 페낭, 홍콩, 상해를 경유하였다. 본 선박은 선상시험에 활용할 수 있는 선박평형수 탱크가 4개였기 때문에 2개는 선상시험 기준에 맞게 ballasting과 deballasting을 한 번씩 수행하고, 다른 2개의 평형수 탱크는 Ballasting을 페낭에서 30%, 싱가포르에서 30% 그리고 홍콩에서 40%를 채웠으며, 홍콩에서 상해로 이동 중에 deballasting 시험을 수행하였다(표 1). 상해에서는 BWMS가 활성 물질인 TRO를 4ppm 이하(평균 1.59 ppm)로 발생하여 장비가 shut

dawn되어 유입수 조건만 확인하였다. Phytopam의 활성 Chl-a와 현미경으로 살아있는 개체를 계수한 (FDA 형광) 값은 유의미한 상관성을 나타내지 않았지만, phyto-pam의 활성 Chl-a 값이 2.0 이상의 값을 제외하면 유의한 상관성을 보였다(그림 3). 활성 Chl-a가 높게 나타난 곳은 대부분 TSS 농도가 높은 곳이기 때문에 활성 Chl-a 측정할 때 부유물질이 측정을 방해한 것으로 판단된다. 현재 BWMS를 선박에 설치하고 난 후 시범 운전에서는 간단한 장치의 측정으로 BWMS 장비의 효능을 시험하고 있으며, ≥ 10 & $< 50 \mu\text{m}$ 크기 생물에서는 phyto-pam 기술을 사용하고 있다. 하지만 본 연구에서 배출수 기준인 10개체 미만에서는 좋은 상관성을 나타내지 못해서 phyto-pam 값으로 배출수 기준 만족 여부를 판단하는 것은 어렵다고 판단된다.



[그림 3] FDA로 염색된 살아있는 식물플랑크톤과 Phyto-pam의 활성엽록소-a와의 상관성

필터를 가지고 있지 않은 전기분해 장치(B type)도 낮은 염분에서 TRO 농도 형성이 어렵고, 부유물질 내 유기물 농도가 높을 경우 산화력을 감소될 수 있다. 본 연구에서 B type은 상해지역에서 염분이 낮아(1.25 psu) target TRO를 생성하지 못했으며, 약 10분 동안 평균 2.0 mg/L미만 생성되어 BWMS가 운전이 정지되었다. 현재 이러한 방식의 BWMS는 염분 측정 장치를 설치하여 낮은 염분 지역에 도착하면 처리 유량을 낮추어서 target TRO 농도를 맞추는 방법으로 운전하고 있다.

전기분해장치는 ballasting시 형성되는 활성 물질로 생물을 사멸시키지만 저장되는 동안의 잔류 TRO도 생물을 사멸에 중요한 역할을 한다. 항해 시간이 길어지면 잔류 TRO 농도가 감소하거나 유기물질이 농도가 높은 곳에서 ballasting을 할 경우 잔류

TRO 농도가 낮다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 본 연구의 선상시험처럼(B5) 선박평형수 탱크를 부분 ballasting 운영 방식으로 운전하면 탱크 내 잔류 TRO 농도를 유지할 수 있다. 선박평형수의 잔류 TRO 농도를 높게 유지하는 것은 저장 기간 동안 미생물뿐만 아니라 다른 크기의 생물도 사멸시킬 수 있어 D-2 조건을 만족시키는데 유리할 것이다.

본 연구에서 5번의 정상적인 BWMS 운전에 따른 선상 시험이 이루어졌으며, 모든 시험에서 처리된 배출수 조건이 D-2 조건을 만족하여 형식승인된 BWMS의 신뢰성을 확인하였다. 그러나 탁도가 높은 상해 지역에서는 필터가 있는 장비와 전기분해장치는 정상적인 BWMS 운전이 어렵기 때문에 이러한 위급 상황에서는 일시적인 BWMS 운전 방식을 고려해야 할 것이다.

References

[1] David, M., Linders, J., Gollasch, S., et al., 2018. Is the aquatic environment sufficiently protected from chemicals discharged with treated ballast water from vessels worldwide? - A decadal environmental perspective and risk assessment. *Chemosphere*. 207, 590-600.

[2] Wang, Y., Yu, Z., Li, G., Oquchi, T., He, H., Shen, H., 2009. Discrimination in magnetic properties of different-sized sediments from the Changjiang and Huanghe estuaries of China and its implication for provenance of sediment on the shelf. *Mar. Geo.* 260, 121-129.

[3] Lie, S., Zhang, W., He, Q., Li, D., Liu, H., Yu, L., 2010. Magnetic properties of East China Sea shelf sediment off the Yangtze Estuary: Influence of provenance and particle size. *Geomorphology*. 119, 212-220.