

선박평형수관리협약 이행 및 준수 여부 확인을 위한 선박용 in-line P.counter 모니터링 장비 성능 평가

현봉길*, 장민철*, 장풍국*, 임효혁**, 신경순*

*한국해양과학기술원 선박평형수연구센터

**한국해양기상기술

e-mail: bghyun@kiost.ac.kr

Performance Evaluation of In-line P.counter Monitoring Device for ships to verify compliance with Ballast Water Management Convention

Bonggil Hyun*, Min-Chul Jang*, Pung-Guk Jang*, Hyohyuk Im**, Kyoungsoon Shin*

*Ballast Water Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology

**Korea Oceanic & Atmospheric System Technology

요약

선박평형수의 국가 간 이동으로 인한 해양 생태계 교란을 방지하기 위해 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)에서는 2004년에 선박평형수관리협약을 채택하였고, 2017년 9월 8일에 발효되었다. 이에 2017년 9월 8일부터 만들어 지는 신조선은 모두 선박평형수처리장치를 장착해야 하며, 기존선인 경우도 2024년 9월 8일까지 처리장치를 장착해야 한다. 선박평형수처리장치(Ballast Water Treatment System, BWTS)를 장착한 선박은 관리협약을 이행 및 준수 확인을 위해 항만국 검사를 받아야 하며, 이에 선박에서 BWTS를 통과한 처리수 내 해양생물 확인의 필요성이 강조되고 있는 실정이다. 본 연구에서는 형광값과 이미지분석을 동시에 적용하여 생물(주로 식물플랑크톤)의 생사판별을 연속적으로 수행하는 선박용 in-line P.counter의 성능을 FDA/CMFDA 형광현미경 방법과의 비교/분석을 통해 평가해 보고자 하였다. 실험은 한국해양과학기술원 BWTS 정부형식승인 육상시험설비를 이용해서 진행하였으며, 두 가지 타입의 BWTS [A-type: Filter+전기분해(간접식), B-type: 전기분해(간접식)]에 대한 선박용 in-line P.counter의 성능을 확인해 보았다. 해당 장비는 100장의 이미지를 연속적으로 생성한 후 알고리즘을 이용해서 분당 3-4회 평균 측정값을 표시하며, 측정된 결과와 이미지는 자동으로 저장되게 된다. 결과를 보면, 시험수 내 군체를 형성하는 $\geq 10 \mu\text{m}$ & $< 50 \mu\text{m}$ 크기의 식물플랑크톤이 다수 존재함에도 불구하고, 처리수에서 선박용 P.counter 측정값은 FDA/CMFDA 형광현미경 관찰 결과와 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. 그리고 BWTS의 필터 장착 유무에 따른 선박용 in-line P.counter의 성능 변화도 관찰되지 않았다. 이는 해당 장비의 분석 특성(형광-이미지 분석)으로 인해 처리수내 생존 생물을 계수하는데 있어서 부유물질에 의한 영향이 크지 않다는 것을 의미한다. 요약하면, 선박용 in-line P.counter 측정값은 FDA/CMFDA 형광현미경 관찰결과와 비교 측정 방법에 따른 차이는 존재했지만, 선박평형수처리장치 운전자 및 항만국 통제관이 동일한 판단'선박평형수처리장치가 IMO D-2 기준에 준해서 운전되고 있음'을 할 수 있는 결과값을 보여 주었다. 따라서 선박용 in-line P.counter는 선박평형수 관리 협약 이행 및 항만국 검사 대응을 위한 선박 내 모니터링 장비로 활용 가능할 것으로 판단된다.

1. 서론

선박의 안전한 항해를 위해 선박의 선저 탱크에 채우는 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 만들어 지는 신조선은 모두 선

박평형수처리장치(Ballast Water Treatment System, BWTS)를 장착해야 하며, 기존선인 경우도 2024년 9월 8일까지 처리장치를 장착해야 한다. BWTS를 장착한 선박은 선박평형수 관리협약 이행 및 준수 확인을 위해 항만국에 보고 및 항만국통제관의 검사를 받아야 하며, 항만국 통제관의 검사는 초기검사(Initial inspection), 상세검사(Detailed inspection), 지표분석(Indicative analysis), 상세 분석(Detailed analysis) 순서로 진행된다. 여기서 초기검사 및 상세검사는 선박의 입출항에 영향을 미치지 않는 범위 내에서 선박에 장착된 BWTS가 D-2 기준에 준해서 운영 되어 왔는

지 확인하는 문서 검사이며, 이는 BWTS 성능을 연속적으로 확인할 수 있는 모니터링 장비 개발의 필요를 가져오게 하였다. 현재까지 개발되어서 상용화된 in-line 선박평형수 검사장치는 거의 없기 때문에 선제적인 개발을 통한 세계 시장 확보가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 한국해양과학기술원 남해연구소 육상시험설비에 장착된 2가지 타입의 BWTS를 이용해서 선박평형수 in-line 검사장치인 선박용 P.counter의 성능을 평가하고 향후 선박평형수 in-line 검사장치로의 활용 가능성을 확인해 보고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 선박용 P.counter 시험 환경 구축

선박용 P.counter의 성능을 실선과 유사한 수준에서 검증하기 위해 한국해양과학기술원 육상시험설비에 그림 1과 같이 장착하였다.



[그림 1] 선박용 P.counter 육상시험설비 장착 모습

2.2 P.counter 성능 시험 방법

선박평형수 배출(de-ballasting) 시험 시 두 가지 타입의 BWTS[A-type: Filter+전기분해(간접식), B-type: 전기분해(간접식)]로 처리된 처리수 시료와 처리를 하지 않은 대조수 시료를 이용해서 총 4회(각 2회) 선박용 P.counter의 성능을 확인해 보았다. 선박용 P.counter 결과는 형광현미경(Axioplan II, Carl-zeiss, Germany) 염색법(FDA/CMFDA) 관찰 결과와 비교 분석하였으며, 시험수내 생물 농도, 종(species) 조성, 유기물 농도는 국제해사기구 선박평형수 형식승인 시험 기준에 준해서 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 시험수내 수질 환경 및 $\geq 10 \mu\text{m}$ & $< 50 \mu\text{m}$ 생물 개체수와 종 조성

해수 시험 시 시험수내 수질 환경 조건은 표 1과 같다. A-type 선박평형수처리장치 육상시험 시 시험수에서 $\geq 10 \mu\text{m}$ & $< 50 \mu\text{m}$ 생물은 3문 9종이 확인되었고, 약 1,200 indiv./mL 개체가 생존해 있었으며, 두 차례 시험 모두에서 *Thalassiosira* sp.와 *Chaetoceros* sp.가 전체 생물량의 약 90% 이상을 차지하며 우점 하였다[표 2]. B-type 시험에서는 각각 3문 7종과 4문 11종이 출현하였으며, $\geq 10 \mu\text{m}$ & $< 50 \mu\text{m}$

m 크기의 생존 생물 개체수는 $3,500 \pm 171$ indiv./mL 과 $2,117 \pm 61$ indiv./mL 로 확인되었다. Test 3과 4 시험에서 우점종은 각각 *Chaetoceros* spp., *Melosira* spp.와 *Chaetoceros* spp.이며, 이들 우점종들은 각 시험 시 시험수 전체 생물량이 85% 이상을 차지하였다.

[표 1] 선박평형수처리장치 육상 시험 시 유입수 내 수질 환경 조건

| Test cycles | Water Quality Parameters | | | |
|-----------------|--------------------------|----------------|-------------|-----------------|
| | Temperature (°C) | Salinity (PSU) | DO (mg/L) | Turbidity (NTU) |
| Test 1 (A type) | 17.15 ± 0.04 | 33.24 ± 0.08 | 4.77 ± 0.04 | 5.83 ± 0.12 |
| Test 2 (A type) | 17.28 ± 0.01 | 33.51 ± 0.42 | 7.42 ± 0.12 | 5.40 ± 0.20 |
| Test 3 (B type) | 19.54 ± 0.45 | 33.17 ± 0.07 | 8.68 ± 0.15 | 6.56 ± 0.34 |
| Test 4 (B type) | 23.12 ± 0.52 | 32.47 ± 0.34 | 7.23 ± 0.24 | 8.09 ± 0.50 |

[표 2] 선박평형수처리장치 육상 시험 시 유입수 내 $\geq 10 \mu\text{m}$ & $< 50 \mu\text{m}$ 생물 그룹 개체수 및 종 조성

| Test cycles | $\geq 10 \mu\text{m}$ & $< 50 \mu\text{m}$ | |
|-----------------|--|-----------------------|
| | Cell density (indiv./mL) | Species / Phylum |
| Test 1 (A type) | 1,230 ± 10 | 9 species / 3 phylum |
| Test 2 (A type) | 1,233 ± 15 | 9 species / 3 phylum |
| Test 3 (B type) | 3,500 ± 171 | 7 species / 3 phylum |
| Test 4 (B type) | 2,117 ± 61 | 11 species / 4 phylum |

3.2 선박용 P.counter 성능 평가

총 4차례 종료 시험(de-ballasting)에서 선박용 P.counter 측정값을 형광현미경(FDA/CMFDA) 결과와 비교 분석하였다. 대조수에서 선박용 P.counter 결과값은 형광현미경 FDA/CMFDA 염색법 결과에 비해 상대적으로 낮았으며, 전반적으로 생존 생물의 개체수가 높을수록 형광 현미경 관찰 값과 선박용 P.counter 결과값과의 차이는 컸다[표 3]. 이는 선박용 P.counter가 mL 당 10개체 이하의 낮은 밀도로 존재하는 생물을 측정하기 위해 개발된 장치이어서, 상대적으로 단위부피당 개체수 밀도가 높은 시료에 적용하기에는 적합하지 않았던 것으로 판단된다. 또한 이러한 결과값의 차이에는 대조수내 우점 하는 종에 따른 영향도 있었을 것으로 판단된다. 4차례 시험에서 우점종으로 구분된 *Chaetoceros* 속(genus)의 크기가 작고 군체를 형성하는 종은 선박용 P.counter가 군체를 하나의 세포로 계수해서 생존 생물의 개체수가 과소평가 될 수 있다. 따라서 해당 검사 장비를 단위 부피당 생존 생

물의 개체수 밀도가 높은 시료에 적용하기에는 어려움이 있다고 판단된다. 생존 생물 개체수 밀도가 높은 시료에서의 두 방법 간 결과값 차이는 프로토타입 검사 장치에서도 확인되었던 내용이다. 따라서 생존 생물량이 높은 시료인 경우에는 생존 생물 개체수 표시 대신 경고(ex., Out of measuring range) 신호를 보내주는 것이 장비의 신뢰성 향상에 도움이 될 것으로 판단된다.

반면에, 유입수 내 군체를 형성하는 $\geq 10 \mu\text{m}$ & $< 50 \mu\text{m}$ 크기의 식물플랑크톤이 다수 존재함에도 불구하고, 처리수에서 선박용 P.counter 측정값은 형광현미경 관찰 결과와 높은 정확도를 보였다. 또한 일반적으로 필터 시스템을 사용하지 않는 처리장치의 처리수에는 부유물질이 고농도로 존재할 가능성이 높음에도 불구하고 필터시스템을 사용한 A-type과 사용하지 않은 B-type의 처리수내 생존 생물 개체수 결과값의 뚜렷한 차이는 확인 되지 않았다[표 3]. 이는 해당 장비의 분석 특성(형광-이미지 분석)으로 인해 처리수내 생존 생물을 계수하는데 있어서 부유물질에 의한 영향이 적다는 것을 의미한다. 그리고 필터시스템을 장착하지 않은 처리장치인 경우 처리수내 $\geq 50 \mu\text{m}$ 크기의 생물이 존재할 가능성이 필터시스템을 장착한 처리장치에 비해 상대적으로 높으며, $\geq 50 \mu\text{m}$ 크기의 생물은 $\geq 10 \mu\text{m}$ & $< 50 \mu\text{m}$ 크기의 생물 보다 수배에서 수백 배 강한 형광을 발현한다. 이는 현재 사용되어지는 대다수의 형광의 세기를 측정하는 모니터링 장비(형광의 세기를 측정해서 개체수로 환산하는 방식 사용)인 경우 잘못된 결과값을 생산할 수 있다는 것을 의미한다. 하지만 선박용 P.counter는 형광-이미지 직접 계수 방식이어서 필터 시스템 미사용으로 인한 계수 오차가 형광분석장비에 비해 상대적으로 낮을 것으로 판단된다. 하지만 선박용 P.counter가 $\geq 50 \mu\text{m}$ 크기의 생물을 계수 할 수 있기 때문에 자동으로 두 개의 그룹($\geq 10 \mu\text{m}$ & $< 50 \mu\text{m}$, $\geq 50 \mu\text{m}$)을 분리할 수 있는 소프트웨어 업그레이드가 필요하다고 판단된다.

요약하면, $\geq 10 \mu\text{m}$ & $< 50 \mu\text{m}$ 크기의 생물 그룹을 대상으로 진행한 4차례의 성능 검증 시험 처리수에서 선박용 P.counter는 BWTS의 처리성능(D-2기준) 내에서 형광현미경 염색법(FDA/CMFDA) 결과와 매우 높은 정확도를 보여서 선박평형수 in-line 검사장치로 활용 가능할 것으로 판단된다. 하지만 이는 4번의 실험을 통해서 얻어진 단편적인 결과이기 때문에, 선박평형수 육상시험설비 및 선박에 장착해서 추가적인 성능 검증 시험을 통해 선박용 P.counter의 성능을 보다 정확하게 평가할 필요가 있다.

[표 3] 선박평형수처리장치 육상 시험 시 처리수 내 $\geq 10 \mu\text{m}$ & $< 50 \mu\text{m}$ 생존 생물 형광현미경과 선박용 P.counter 결과값 비교 표

| Test cycles | De-ballasting | | | |
|-----------------|---------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| | Control water | | Treated water | |
| | FDA/CMFDA | In-line P.counter | FDA/CMFDA | In-line P.counter |
| Test 1 (A type) | 707 ± 15 | 251 ± 66 | N.D. ¹⁾ | 1.45 ± 0.78 |
| Test 2 (A type) | 1,092 ± 24 | 567 ± 362 | N.D. | 0.95 ± 1.20 |
| Test 3 (B type) | 1,631 ± 142 | 236 ± 109 | 0.25 ± 0.45 | 0.09 ± 0.33 |
| Test 4 (B type) | 103 ± 7 | 98 ± 17 | N.D. | 0.41 ± 1.17 |

1) N.D.: Not-detected

참고문헌

[1] International Maritime Organization. International Convention for the Control and Management of Ship's Ballast Water and Sediment. 2004. Available online: [http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-for-the-Control-and-Management-of-Ships%27-Ballast-Water-and-Sediments-\(BWM\).aspx](http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-for-the-Control-and-Management-of-Ships%27-Ballast-Water-and-Sediments-(BWM).aspx) (accessed on 8 August 2020).