

새로운 선박평형수 전처리 장치 활용가능성 : 분쇄장치

차형곤*, 현봉길*, 안영규*, 이우진*, 배미경*

*한국해양과학기술원 선박평형수연구센터

e-mail:chahg@kiost.ac.kr

Possibility of using New Ballast Water Pre-treatment System : Grinding Device

Hyung-Gon Cha*, Bonggil Hyun*, Yeongkyu An*, Woojin Lee*, Mikyung Bae*

*Korea Institute of Ocean Science&Technology

요약

선박평형수를 관리 및 통제하기 위해 모든 선박은 2024년까지 선박평형수관리시스템(BWMS)을 설치 완료해야 한다. BWMS에 적용된 기술 중에 메인 처리장치의 효율을 높이거나 큰 부유물질 및 생물을 제거하기 위해 현재까지 개발된 BWMS 중 약 70%가 전처리장치로 여과장치를 이용하고 있다. 그러나 여과장치는 막힘 현상에 따른 유지 보수비용이 발생할 뿐만 아니라 중국의 양자강과 같은 부유물질의 농도가 높은 해역에서는 필터 막힘 현상으로 인해 사용이 불가능하기 때문에 이를 대체할 수 있는 기술 개발이 시급한 실정이다. 본 연구에서는 선박평형수 전처리 여과장치를 대체하기 위해 부유물질 분쇄장치의 활용가능성을 검토 해보았다. IMO Guideline G8 기준($\geq 50 \mu\text{m}$ 크기 생물 조건)에 준한 시험수를 가지고 $5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ 규모 모의 실험을 진행해서 $\geq 50 \mu\text{m}$ 크기 생물 제거 효율을 확인해 보았다. 또한, 분쇄장치 통과 전/후 입자크기 분포와 총부유물질 농도를 확인을 통해 분쇄장치의 고히형물(Arizona Test Dust) 분쇄 능력도 확인하였다. $5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ 규모 모의 실험에서 크기 $>110 \mu\text{m}$ 동물플랑크톤의 제거율은 100% 제거되었다. 반면, $\leq 110 \mu\text{m}$ 동물플랑크톤의 제거율은 87-90%으로 다소 낮았다. 분쇄장치 통과 후 고히형물의 평균 입도 크기는 실험수 내 입자의 크기가 클수록 작아지는 경향을 나타내었다. 선박평형수 전처리 장치인 여과장치 대체 가능성에 대해서는 실제규모의 모의실험과 같은 추가적인 검증이 필요할 것으로 판단되지만, 본 연구 결과는 $\geq 50 \mu\text{m}$ 생물 그룹 제거를 위한 전처리 여과장치 대체 기술 개발의 중요 연구 자료로 활용 가능할 것으로 판단된다.

1. 서론

선박의 안전한 운항을 위해 사용되는 선박평형수는 박테리아, 미생물, 작은 무척추 동물 등 다양한 생물들과 부유물질을 포함한다. 이들의 운반 및 배출은 해양 생태계, 인간 건강, 수산업 경제에 심대한 영향을 미치고 있다[1]. 이에 국제해사기구(IMO)는 ‘Control and Management of Ships’ Ballast Water and Sediments’ 협약을 2004년에 제정하였다. 이 협약에 근거하여 모든 선박은 2024년 9월 8일까지 배출수 규정(D-2) 및 협약 규정(D-3)에 준하는 선박평형수관리시스템(Ballast Water Management System, BWMS)을 설치 해야 한다.

BWMS 배출수 규정(D-2)을 보면, 선박평형수 배출 시 $\geq 50 \mu\text{m}$ 크기 생물은 $<10 \text{ indiv. m}^{-3}$, $10 - 50 \mu\text{m}$ 크기 생물은 $<10 \text{ indiv. mL}^{-1}$, 독성 비브리오 콜레라는 $<1 \text{ cfu (colony forming unit) } 100 \text{ mL}^{-1}$, 대장균은 $<250 \text{ cfu } 100 \text{ mL}^{-1}$, 장내 구균은 $<100 \text{ cfu } 100 \text{ mL}^{-1}$ 으로 생존해야 한다.

선박평형수 내 생물들을 제거하기 위해 BWMS에 적용된 주요기술로는 전기분해를 이용한 염소처리(Electrolysis -

Chlorination), 약품주입(NaDCC, NaOCl, ClO_2 등), 오존 (O_3) 처리, UV 처리 기술과 함께 이를 혼합한 복합처리기술등이 있다. 그리고 대부분의 BWMS는 평형수를 통해 유입되는 크기가 큰 부유물질과 생물을 제거하고, BWMS의 처리 효율을 높이기 위해 여과 공정(Filtration process)을 적용한다. 여과장치에 이용되는 필터들은 wedge 또는 mesh 등의 재질을 사용하며, 공극 크기(pore size)는 $40 \mu\text{m}$ 혹은 $50 \mu\text{m}$ 가 주를 이룬다. 2019년 기준 기본 승인 및 최종승인을 받은 BWMS는 총 66 개이며 이들 중 전처리 장치로 여과장치를 이용한 BWMS는 46 개로 전체의 약 70%에 해당 한다[2].

하지만 여과장치를 장착한 선박이 중국에 위치한 장강 하구처럼 총부유물질(Total Suspended Solids, TSS) 농도가 매우 높게 유지되는 지역($23.2-577 \text{ mg L}^{-1}$, $174 \pm 128 \text{ mg L}^{-1}$)[3]에서 선박평형수를 취수(uptake) 할 경우 고탍도 환경으로 인해 여과공정에서 필터의 공극이 막히는 현상이 빈번하게 발생하고 있으며, 지속적인 필터 청소 및 교체를 통해 많은 유지·보수 비용이 발생하고 있다. 따라서 BWMS 처리 효율 향상과 유지보수 비용 절감을 위한 새로운 전처리 장비

개발이 시급한 실정이다. 본 연구에서는 새롭게 개발된 분쇄장치를 이용해 $\geq 50 \mu\text{m}$ 크기 생물 제거 효과와 고품질의 분쇄 효과를 확인하여 BWMS 전처리 장치로서의 활용가능성을 검토하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 분쇄장치

분쇄장치는 큰 부유물질을 분쇄하는 고품질 전수통과 방식으로 흡이 있는 고정부와 구동부가 있으며 선박평형수가 분쇄장치를 통과하면서 생물 및 큰 부유물질이 공동, 전단, 충격을 통해 분쇄하게 된다.

2.2 생물 제거 효율 평가

모든 실험의 분쇄장치 생물 제거 평가는 $\geq 50 \mu\text{m}$ 크기 생물만 평가하였다. 제거율은 다음과 같이 계산 하였다.

$$\text{제거율(\%)} = (\text{실험수 생물수} - \text{처리장치 통과 후 살아있는 생물수}) / \text{실험수 생물수} \times 100$$

생물 사망 확인 및 사망 형태는 이미지 시스템을 갖춘 해부 현미경을 이용해서 생사판별을 수행하였다.

2.3 모의 BWMS 실험

2018년 10월 3일부터 11월 9일까지 총 8회에 걸쳐 거제시 장목면 한국해양과학기술원 연구원부두에서 $5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ 규모의 분쇄장치로 모의 BWMS 실험을 진행하였다. 생물은 망목 $45 \mu\text{m}$, $200 \mu\text{m}$ 의 두 종류 네트로 농축 채집하였다. 모의 평가에 사용된 실험수는 IMO Guideline G8 (혹은 BWMS Code)조건에 따라 $\geq 50 \mu\text{m}$ 크기 생물의 개체수($\geq 100,000 \text{ indiv. m}^{-3}$) 및 종조성(≥ 3 문 5종)을 충족 시킨 후 수행하였다. 잘 혼합된 실험수는 분쇄장치로 매 실험 마다 $4.4\text{--}4.8 \text{ m}^3$ ($4.64 \pm 0.14 \text{ m}^3$)이 처리되었고 가동 시간은 50분 이상 진행하였다. 유량 및 분쇄장치에 걸리는 압력은 각각 약 $5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, 약 1 kgf cm^{-2} 에서 진행하였다.

모든 실험 회차에서 실험수(10 L) 및 분쇄장치를 통과한 처리수(전량)는 망목 $32 \mu\text{m}$ 네트로 1 L 농축 후 생멸 제거율을 확인 하였다. 전체 실험 중 6-8회차 실험은 가동 시간 내에서 일정한 생물 제거 효율 성능을 확인하기 위해 10분 간격으로 샘플링 및 분석하였다. 분쇄장치가 처리 할 수 생물의 최소 크기를 확인하기 위해 생물크기(짧은 축 기준)에 따른 제거율과 분쇄장치 통과 후 동물플랑크톤의 사망형태를 비교하였다(전체 실험 중 8회차 실험).

2.4 고품질 분쇄 평가

2019년 04월 17일부터 04월 18일까지 총 3회에 걸쳐 거제시 장목면 한국해양과학기술원에서 $5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ 규모의 분쇄장치로 고품질의 분쇄 능력을 알아보기 위한 모의 BWMS 실험을 진행하였다. 여과, 자동차 및 증장비 구성 요소를 테스트에 사용되는 3가지 크기의 ISO 12103-1 Arizona Test dust(Powder technology Inc. USA)를 해수 5 m^3 에 각각 $\geq 2 \text{ kg}$ 을 주입하였다. 사용된 Arizona Test dust는 A2 Fine test dust에서 A3 Medium test dust, A4 Coarse test dust로 갈수록 입자의 사이즈가 커지고 분포가 넓어지며 제조사가 제공한 각각의 Dust의 크기 및 분포 정보는 다음과 같다(이하 각각 A2, A3, A4) [표 1].

[표 1.] 제조사에서 제공한 Arizona dust의 입자 크기 분포

| Size (μm) | A2 Dust (% Less than) | A3 Dust (% Less than) | A4 Dust (% Less than) |
|------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 0.97 | 4.5 - 5.5 | 2.0 - 2.4 | 0.74 - 0.83 |
| 1.38 | 8.0 - 9.5 | 3.8 - 4.4 | 1.8 - 2.1 |
| 2.75 | 21.3 - 23.3 | 10.3 - 11.1 | 5.5 - 6.3 |
| 5.5 | 39.5 - 42.5 | 22.1 - 23.2 | 11.5 - 12.5 |
| 11 | 57.0 - 59.5 | 42.3 - 43.6 | 21.0 - 23.0 |
| 22 | 73.5 - 76.0 | 62.5 - 64.5 | 36.0 - 38.5 |
| 44 | 89.5 - 91.5 | 82.0 - 83.5 | 58.0 - 60.0 |
| 88 | 97.9 - 98.9 | 94.7 - 96.0 | 85.0 - 86.5 |
| 124.5 | 99.0 - 100.0 | 97.2 - 98.6 | 93.0 - 94.0 |
| 176 | 100 | 99.0 - 100 | 97.2 - 98.2 |
| 248.9 | - | - | 99.0 - 100.0 |
| 352 | - | - | 100 |

실험은 약 50분간 진행되었으며 시료는 10분마다 4 L씩 총 5회 샘플링 후 혼합 하였다. 실험수 및 처리수의 TSS 농도 측정 및 비교 하였다. 분쇄 처리 전/후 dust 입자크기(μm)를 비교하기 위해 실험수와 처리수 각 16 L를 원심분리기 Combi 514R (Hanil Inc.)를 이용하여 4000 rpm, 1시간 원심 분리 후 약 100 mL로 농축하였다. 농축된 시료는 X-선 자동입도 분석기인 Sedigraph 5000D (Micromeritics Inc.)를 이용하여 입도 분포를 확인하였다.

3. 결과

3.1 모의 BWMS 실험에서 생물 제거율

분쇄장치의 $\geq 50 \mu\text{m}$ 크기 생물 제거율은 총 8회의 실험 모두 처리수 전량을 관찰한 결과 $\geq 90\%$ 제거율 ($95.3 \pm 2.01\%$)을 나타내었다. 6-8회차 실험에서 10분 간격으로 샘플링 및 제거율을 관찰한 결과 제거율의 변동계수(coefficient of variation, CV)가 0.6% 미만으로 일정한 성능을 나타내었다. 전체 실험 중 8회차 실험

험에서 생물 크기에 따른 제거율은 짧은 변 기준으로 50-70 μm (이매패류 유생, 요각류 유생); 87%, 70-90 μm (요각류 미성숙체, 요각류 *Oithona spp.*, *haracticoda* 성체, 다모류 유생); 99%, 90-110 μm (주로 따개비 유생); 90%, 110-150 μm , 150-200 μm , >200 μm (요각류 성체, 미충류, 야광충, 해파리 유생 등); 100% 사망하여 크기 및 형태에 따라 다른 제거율을 나타내었다 [표2].

[표 2] 소규모 모의 BWMS 실험(8회차)에서 동물플랑크톤 크기별 제거율

| 크기(μm) 구분 (짧은 변 기준) | 크기별 대상생물 | 점유율(%) | | 제거율 (%) |
|---|-------------|--------|------|------------|
| | | 실험수 | 처리수 | |
| 50-70 | | 22.1 | 37.5 | 87.0 |
| 70-90 | | 31.8 | 9.0 | 99.0 |
| 90-110 | | 25.1 | 53.3 | 90.0 |
| 110-150 | | 17.3 | 0.1 | 100.0 |
| 150-200 | | 2.6 | 0.0 | 100.0 |
| >200 | | 0.9 | 0.0 | 100.0 |

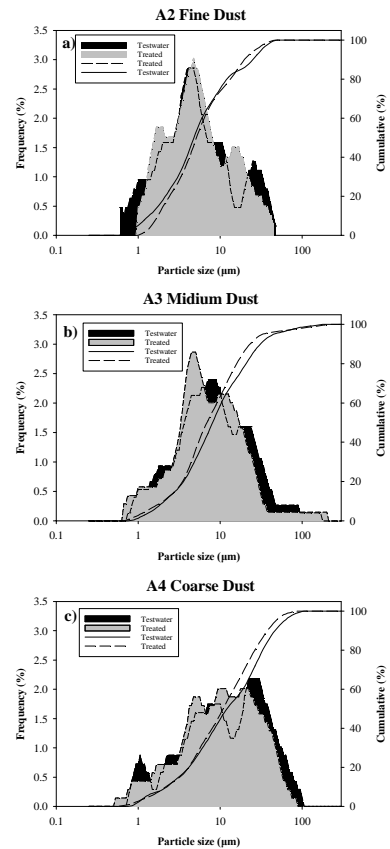
분쇄장치 통과 전/후 사망형태 비교 결과 대부분의 동물플랑크톤은 분쇄장치 통과 후 몸체가 절단된 형태로 사망하였다(8회차 실험). 특히, 크기 >110 μm 동물플랑크톤의 대부분을 차지한 요각류의 경우 몸체가 절단되거나 부속지가 탈락되는 형태가 보다 명확하였다. 실험수 내 상대적으로 크기가 작은 50-110 μm 동물플랑크톤에서 점유율이 높았던 요각류 유생, 이매패류 유생, 따개비 유생의 경우에는 처리수에서 몸체가 온전한 형태로 사망한 개체가 다수 관찰되었다 [표 3].

[표3] 소규모 모의 BMWS 실험(8회차)에서 분쇄장치 통과 후 동물플랑크톤 주요 분류군 사망 형태

| 분류군 | 분쇄장치 통과 전 | 분쇄장치 통과 후 | 형태 비교 |
|-----------------------------------|--------------|--------------|-------------------|
| 요각류 (Copepoda) | | | 몸체가 절단되는 형태 |
| 따개비 유생 (Cirriped larvae) | | | 몸체가 온전한 형태 |
| 요각류 유생 (Copepod nauplii) | | | |
| 이매패류 유생 (Bivalve larvae) | | | |

3.2. 고형물 분쇄 평가

모든 Test Dust는 처리 전에 비해 처리 후 입자 크기 분포가 다소 작아지는 경향을 나타내었다 [그림 1].



[그림 1] '분쇄장치'를 통과 전/후 a) A2 Fine Dust, b) A3 Midium Dust, c) A4 Coarse Dust의 크기별 입자 분포(%) 및 입자 크기 가중분포(%)

A2의 분쇄 처리 전/후 평균 크기는 $8.42 \pm 9.56 \mu\text{m}$ 에서 $8.10 \pm 8.03 \mu\text{m}$ 로 3.8% 작아졌으며, A3의 분쇄 처리 전/후 평균 크기는 $14.2 \pm 11.0 \mu\text{m}$ 에서 $12.6 \pm 9.65 \mu\text{m}$ 로 11 % 작아졌다. 또한 A4의 분쇄 처리 전/후 평균 크기는 $19.1 \pm 22.6 \mu\text{m}$ 에서 $15.6 \pm 17.8 \mu\text{m}$ 로 18 % 작아졌다. D_{20} , D_{50} , D_{90} 은 입자크기 누적 백분위 수 20%, 50%, 90%를 나타낸다. 표 4에서 A2는 처리 후 D_{90} 크기가 작아지지만 D_{20} , D_{50} 입자 크기가 커졌다. A3는 처리 후 D_{20} , D_{50} , D_{90} 모두 입자 크기가 작아졌다. A4의 경우 처리수 D_{20} 은 크기가 커졌고 D_{50} , D_{90} 은 크기가 작아졌다. 각 실험수의 TSS 농도는 A2 ; $317 \pm 4.12 \text{ mg L}^{-1}$, A3 ; $541 \pm 18.0 \text{ mg L}^{-1}$, A4; $453 \pm 19.8 \text{ mg L}^{-1}$ 을 나타내었다. 처리수에서 TSS 농도는 A2 ; $318 \pm 15.3 \text{ mg L}^{-1}$, A3 ; $485 \pm 7.34 \text{ mg L}^{-1}$, A4; $339 \pm 15.0 \text{ mg L}^{-1}$ 을 나타내었다. 상대적으로 입자 크기가 작은 A2 에서 입자 크기가 큰 A4로 갈수록 처리수의 TSS 농도가 실험수보다 낮게 측정되었다.

adding carbon dioxide”, Marine Pollution Bulletin, 95(1), pp 315-323, 6월, 2015년

[2] IMO, List of ballast water management systems that make use of active substances which received basic and final approval (BWM.2/Circ.34/Rev.7). International Maritime Organization. 2019년.

[3] Yanqun Pan, Fang Shen and Xaiodao Wei, “Fusion of Landsat-8/OLI and GOCI Data for Hourly Mapping of Suspended Particulate Matter at High Spatial Resolution: A Case Study in the Yangtze (Changjiang) Estuary”, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 10(2), pp 158, 11월, 2017년.

[표 4] 입자 크기(μm)백분위수 변화, TW : 실험수; Tr : 처리수

| | D_{20} | | D_{50} | | D_{90} | |
|----|----------|------|----------|------|----------|------|
| | TW | Tr | TW | Tr | TW | Tr |
| A2 | 2.18 | 2.44 | 4.87 | 5.16 | 25.1 | 20.0 |
| A3 | 3.65 | 3.45 | 8.18 | 6.88 | 30.7 | 23.1 |
| A4 | 4.10 | 4.40 | 12.2 | 10.9 | 46.0 | 38.7 |

4. 결론

BWMS의 처리 효율을 향상시키고 고탁도 환경에서 안정적인 운전 성능을 확보하기 위해서 기존의 여과장치를 대체할 수 있는 새로운 타입의 분쇄장치 성능을 확인해 보았다. BWMS 전처리장치로서 분쇄장치가 활용되기 위해서 부유물질(생물)을 높은 수율로 제거해야 하며, 유입된 부유물질에 의한 생물 제거율 저하 영향이 낮아야 한다. 8 차례의 분쇄장치 모의 실험에서 모두 $\geq 90\%$ 의 생물 제거 효율을 보였으며, Dust를 이용한 실험 평가에서도 확인할 수 있었다. 또한 IMO 기준에 준해서 실험수를 조성했음에도 불구하고 연구를 수행하는 동안 생물 및 고형물에 의한 막힘 현상이 발생하지 않았다. 추가적인 실제 규모(full scale)의 검증 연구가 필요하지만, $\geq 50 \mu\text{m}$ 생물 그룹을 처리하기 위한 BWMS 전처리 장치 대체 기술 연구 자료로 활용 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] Hyung-Gon Cha, Min-Ho Seo, Heon-Young Lee, Ji0hyun Lee, Dong-Sup Lee, Kyounggon Shin, Keun-Huyung Choi, “Enhancing the efficacy of electrolytic chlorination for ballast water treatment by