

# 선박평형수처리장치의 외국형식승인 선상시험결과를 정부형식승인 시험결과로 대체하기 위한 연구

장풍국\*, 신경순\*, 최근형\*\*

\*한국해양과학기술원 선박평형수연구센터, \*\*충남대학교 해양환경과학과  
e-mail:pgjang@kiost.ac.kr

## A study on replacing the results of shipboard test of the type approval by foreign governments with the shipboard test of the government type approval

Pung-Guk Jang\*, Kyoungsoon Shin\*, Keun-Hyung Choi\*\*

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

\*\*Dept. of Oceanography and Ocean Environmental Sciences, Chungnam National University

### 요 약

국제해사기구(IMO)는 선박평형수로 인한 외래 생물의 침입을 방지하기 위해 2004년 선박평형수관리협약을 제정하여 선박평형수처리장치(BWMS)로 선박평형수를 처리해 배출하도록 하였다. IMO는 BWMS를 인증하기 위한 시험절차 가이드라인(G8)을 2008년에 제정하였으며, 2018년에 BWMS code로 시험 지침을 개정하였다. 우리 정부는 IMO가 제시한 시험 방법으로 인증된 BWMS에 대해서 정부형식승인 인증서를 발급하지만, 미국정부형식승인은 자체 시험규정으로 시험을 통과한 BWMS만 인증한다. 두 시험 방법은 다소 차이가 있으며, 특히 식물플랑크톤 시료를 전처리하는 과정에서 미국정부형식승인 시험 방법은 농축을 허용하지만, IMO의 BWMS code의 형식승인시험은 비농축을 권고하고 있으며, 농축을 할 경우에는 농축 방법에 대한 유효성을 입증해야한다. 따라서 외국형식승인 시험결과를 정부형식승인 시험결과로 인정하기 위해서는 농축에 대한 시험결과를 비농축했을 때의 시험결과로 대체하는 과학적 접근이 필요하다. 본 연구에서 제안한 검증 방법은 선박평형수의 균질도 검정, 분석 양에 대한 검정, 출현한 식물플랑크톤의 생리·형태적 특성에 따른 농축에 대한 손실 및 손상 정도와 이들의 기여도를 고려하는 것이다. 따라서 외국형식승인 시험결과가 본 연구에서 제시한 검증 단계를 만족하면 정부형식승인 선상시험 시험결과로 대체할 수 있을 것으로 판단된다.

### 1. 서 론

국제해사기구(IMO)는 선박평형수로 인한 외래생물의 침입을 막기 위해 2004 선박평형수관리협약을 제정하고, 2008년 개발된 선박평형수처리장치(BWMS)의 형식승인을 위한 시험방법의 가이드라인(G8)을 수립했고, 2016년에 이를 BWMS code 시험 방법으로 개정하였다[1]. 우리 정부는 IMO 형식승인 체계를 바탕으로 한 정부형식승인시험을 인정하고 있지만, 미국은 자체 시험 가이드라인으로 시험에 통과한 BWMS에 대해 형식승인을 인정하고 있다[2]. 따라서 원칙적으로 제조사가 미국형식승인을 받을 경우 정부형식승인을 다시 받아야한다. 이 경우 정부형식승인을 받는데 걸리는 시간과 비용이 제조사에게는 큰 부담이 된다. 그래서 정부는 IMO의 BWMS code 시험 방법과 동등이상의 시험방법으로 외국형식승인을 받은 BWMS 제품에 대해서

정부형식승인을 인증해 줄 수 있도록 선박평형수법을 개정하였다. 그러나 USCG 형식승인과 IMO BWMS code에 따른 시험 방법이 다소 차이가 있어 외국형식승인 시험방법에 대한 유효성 검증이 필요하다. 이 중에서 가장 큰 차이는  $\geq 10$ - $< 50 \mu\text{m}$  크기 생물(이하 식물플랑크톤)을 채집하고 전처리하는 과정이다.

선상시험을 수행할 경우 BWMS code에서는 식물플랑크톤을 처리수에서 연속적으로  $> 10 \text{ L}$  이상 채집하고 여기에서  $1 \text{ L}$ 을 부시료로 채집해서 농축하지 말고 최소  $6 \text{ mL}(1 \text{ mL} \times 6)$ 을 관찰해야하고, 관찰한 시료에서 100 개체 이상을 개수해야한다고 명시되어있다. 만약, 농축을 한다면 사용하는 농축 방법이 유효한 방법을 입을 입증해야한다. 그러나 USCG 형식승인은 식물플랑크톤을 처리수에서 연속적으로 채집하거나 비연속적으로 시작(B), 중간(M), 종료(E) 시점에  $10 \text{ L}$  이상시료를 채집하고 이 시료를

관찰하기 위해 농축할 경우 최대한 부드럽게 대각선의 길이가 7  $\mu\text{m}$  이하인 네트로 일정량 농축해서 각각 3 mL 이상 관찰해야 됨을 권고하고 있다. 식물플랑크톤을 농축할 경우 농축 시료의 개체수가 농축하지 않은 시료보다 낮은 경향을 낸다고 보고되었다 [3][4].

따라서 식물플랑크톤 채집 후 시료의 전처리에 있어서 농축 여부가 두 형식승인시험 간의 가장 큰 차이이다. 그래서 외국형식승인 선상시험 시 농축해서 관찰한 처리수 내 살아있는 개체의 평균값을 정부형식승인 시험 기준으로 평가할 수 있는지에 대한 연구가 필요하다. 본 연구는 외국형식승인 선상시험에서 제시한 식물플랑크톤의 평균값이 정부형식승인 선상시험의 IMO D-2 기준(<10 cells/mL)을 만족하는지를 판단할 수 있는 과학적인 접근 방법을 검토하고자 한다.

### 2. 재료 및 방법

BWMS 선상시험은 선박에서 이루어지기 때문에 시험이 수행되는 동안 유입되는 선박평형수 내 식물플랑크톤을 분석하기 위해 대표성 있는 시료를 채집하는 것이 중요하다. 그리고 이러한 대표성이 있는 시료를 채집하여 얼마나 많은 양을 분석하여 분석한 평균값이 신뢰를 가질 수 있는지를 증명해야 한다. 외국형식승인 선상시험 결과를 정부형식승인 시험결과를 대체하기 위해서는 선상시험에서 출현한 식물플랑크톤이 농축했을 경우에 발생하는 손실이나 손상이 어느 정도인지 예측하는 것이 중요하다. 그리고 마지막으로 외국형식승인 시험결과를 정부형식승인 시험 결과로 대체할 수 있는 인자를 개발해야 한다. 그래서 다음과 같은 외국형식승인 선상시험 결과에 대한 4단계 검증을 방법을 제안한다.

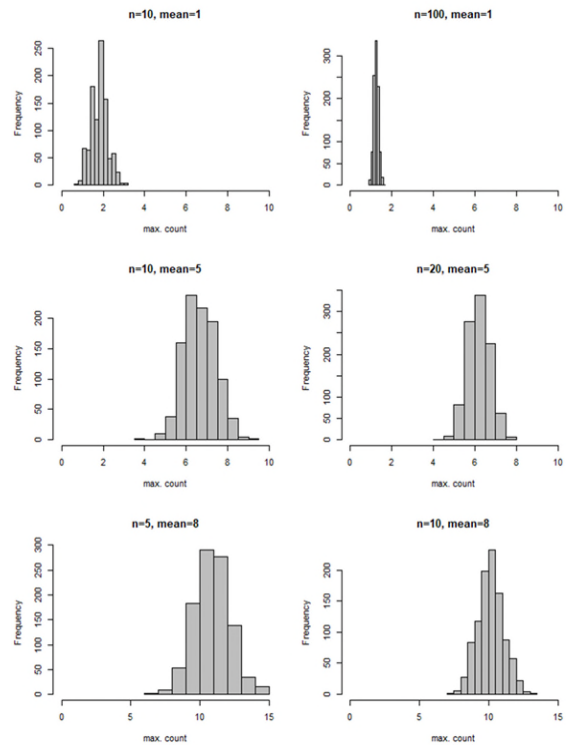
- 1 단계: 시료의 균질도 검증
- 2 단계: 유효한 분석시료 양의 검증
- 3 단계: 농축에 따른 식물플랑크톤 종의 손실 및 손상 율에 대한 고려
- 4 단계: 외국형식승인 선상시험 시험결과 값을 정부형식승인시험 시험결과로 대체 적용

### 3. 결과 및 고찰

외국형식 선상시험 결과에 대한 검증 1단계는 시험 결과를 통계적으로 입증하기 위해서는 제일 먼저 유입수 내 대상 생물이 균질하게 분포되어 있다는 가정 하에 수행되어야 한다. 그래서 시료의 균질도를 확인하는 방법으로 카이제곱을 이용하였다. 카이제곱 분포는 n개의 서로 독립적인 표준정규 확률변수를 각각 제곱한 다음 합해서 얻어지는 분포이며, 자유도는 n-1이고 카이제곱 분포의 매개변수가 된다.

카이제곱 검증을 활용해 95% 신뢰구간 내에 시험수의 균질도 여부를 파악한다.

선상시험 대체보고서 검증 2단계는 선상시험 결과에 제시된 처리수 내 살아있는 대상 생물의 평균값이 D-2 기준인 개체수 10을 초과하지 않음을 증명하기 위해 충분한 양을 분석했는지를 검증하는 단계이다. 선상시험 결과의 평균값을 입증하기 위한 적절한 분석 양을 결정하기 위해 베이저안 추론(Bayesian simulation) 방법을 사용하였다. 모델 결과 1 mL씩 10번 분석하여 얻은 평균값이 5인 경우 같은 방법으로 시뮬레이션을 1,000번을 수행하여도 평균값이 절대로 10을 초과하지 않는다(그림 1). 따라서 선상시험에서 균질도가 확보된 시료에서 평균값이 5를 초과하지 않았다면 1 mL씩 10번 분석해서 획득한 평균값이 D-2 기준인 10마리를 초과하지 않았다고 판단할 수 있다.



[그림 1] Bayesian posterior distribution 방법을 통해 얻어진 최대 개체수 분포

시험결과 검증 3단계는 대상 생물을 농축할 경우 발생할 수 있는 손실과 손상의 정도를 산정할 수 있는 척도로서 대상 생물의 생리·형태학적 특징인 세포크기, 체인형성여부, 잠재적 생물 활성화에 대한 정보를 바탕으로 각 생물별 농축에 따른 손실 및 손상에 대한 대상 생물별 등급점수(1 ~ 5)를 설문을 통한 전문가 평가로 수행한다. 외국형식승인 선상시험에서 식물플랑크톤이 속 수준에서 언급되어 있기 때문에 이를 보완하기 위해 국내 연안에서 주로 우점하는 같은 속의 종들에 대한 생물별 등급을 평균하여 속 수준의 등급 값을 설정한다.

선상시험 검증 4단계는 생물 특성을 고려해 농축에 대한 손실 및 손상 여부를 5개 등급점수에 상위 5개의 우점종 위주로 평가하기 위해 우점율에 대한 기여도를 부여한다. 등급 점수와 우점 점수를 합한 최종 점수(건강도)의 구간을 바탕으로 설정된 인자(1 ~ 10) 값을 선상시험 결과에서 나온 개체수에 곱해 예측되는 비농축 시 평균값을 산출한다. 즉, 선상시험 시 유입수 내 대상 생물 종이 농축에 대한 영향을 크게 받고, 또한 이 종의 우점율이 높다면,  $F$  값이 10이 되어 실제 선상시험 결과 한 마리만 검출되어도 IMO D-2 기준(<10 cells/mL)을 초과하게 되어 선상시험이 실패로 간주된다.

[표 1] 처리수를 농축해서 분석한 결과를 비 농축으로 했을 때 예측되는 생물 개체수로 산정하는 계산식

$$Ps = \sum_{i=1}^5 (P_i \times C_1) \quad Ds = \sum_{i=1}^5 (P_i \times D_i \times C_2)$$

$$H = Ps + Ds$$

$$nCn = Cn \times F$$

- $P_i$  :  $i$ 번째 우점종의 농축 시 발생할 수 있는 종의 손실 및 손상에 대한 등급 값
- $Ps$  : 선상시험에 출현한 상위 5개 우점종의 손실 및 손상의 등급 합
- $C_1$  : 우점종 등급의 합이 100에 근접하도록 곱해주는 상수
- $D_i$  : 선상시험에 출현한 상위 5개 우점종의 순위에 따른 우점율 점수
- $Ds$  : 선상시험에 출현한 상위 5개 우점종의 순위에 따른 우점율 점수의 합
- $C_2$  : 우점 점수의 합이 100에 근접하도록 곱해주는 상수
- $H$  : 선상시험에 우점한 종들의 건강도
- $Cn$  : 선상시험에서 농축해서 얻은 처리수에 살아있는 생물 개체수
- $F$  : 건강도 점수를 구간별 10개의 점수대로 나누어 구한 인자값으로 비농축 된 대상생물의 개수를 유추할 수 있도록 곱해지는 인자 값
- $nCn$  : 비농축으로 선상시험을 수행했을 때 예상되는 처리수 내 살아있는 생물 개체수

이와 같은 방법으로 실제 식물플랑크톤을 농축하여 선상시험을 수행한 자료를 이용하여 비농축 시 예측되는 살아있는 식물플랑크톤의 개수를 산출한 최종평가의 예를 표2에 나타내었다.

[표2] 선상시험 결과에 대한 최종평가

	등급 ( $P_i$ )	상수 ( $C_1$ )	등급 점수 ( $P$ )	우점율 (%)	기여도 ( $D_i$ )	상수 ( $C_2$ )	우점 점수 ( $D$ )
<i>Thalassiosira</i> sp.	4	4	16	37	2	1.33	10.6
<i>Guinardia</i> sp.	4		16	2	1		5.32
<i>Chaetoceros</i> sp.	4		16	28	2		10.6
<i>Prorocentrum micans</i>	4		16	42	3		16.0
<i>Gyrodinium</i> sp.	3		12	2	1		3.99
등급점수 합( $Ps$ )			76	우점점수 합 ( $Ds$ )		46.6	
건강도 점수 ( $H$ )			123	인자 ( $F$ )		5	
실제 개체수 ( $Cn$ )		인자 ( $F$ )	개체수 산정 ( $nCn$ )		최종판정		
0		5	0		D-2 기준 통과		

외국(USCG) 형식승인 선상시험은 5회 연속으로 D-2 기준을 만족해야만 형식승인 인증서를 발급하지만, 정부형식승인 선상시험은 3회 연속으로 D-2 기준을 만족을 하면 인증서를 발급한다. 따라서 선상시험 검증단계를 이용해 외국형식승인 선상시험 결과 값( $Cn$ )을 비농축 시 결과 값으로 전환하고, 이 값이 D-2 기준인 mL 당 10마리를 초과하지 않는 시험결과가 3회 연속시험으로 인정될 수 있다면, 정부형식승인 선상시험을 면제해 줄 수 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] MEPC, 2016. Guidelines for approval of ballast water management systems (G8) ANNEX 5 RESOLUTION MEPC.279(70) (Adopted on 28 October 2016).
- [2] U.S. EPA., 2010. Generic Protocol for the Verification of Ballast Water Treatment technology. EPA/600/R-10/146.
- [3] Baek, S.H., Lee, M.J., 2016. Efficiency of concentrating marine microplanktonic organisms using net sampler to verify the efficacy of a ship's ballast water treatment system. Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society. 17, 136-143.
- [4] Malone, T.C., Chervin, M.B., Boardman, D.C., 1979. Effects of 22  $\mu$ m screens on size frequency distributions of suspended particles and biomass estimates of phytoplankton size fractions 1. Limnol. Oceanogr. 24, 956-960.