

선박평형수처리장치의 외국형식승인 선상시험결과를 정부형식승인 시험결과로 대체하기 위한 연구

장풍국*, 신경순
한국해양과학기술원 선박평형수연구센터

A study on replacing the result of shipboard test of the type approval by foreign governments with that of the type approval by Korean government on Ballast Water Management Systems

Pung-Guk Jang*, Kyoungsoon Shin
Ballast Water Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology

요약 국제해사기구(IMO)는 선박평형수로 인한 외래생물의 침입을 방지하기 위해 2004년 선박평형수관리협약을 제정하여 정부형식승인을 받은 선박평형수처리장치(BWMS)로 선박평형수를 처리해 배출하도록 하였다. 우리나라는 IMO가 제시한 시험 방법으로 인증된 BWMS에 대해 형식승인증서를 발급하지만, 미국정부형식승인은 자체 시험방법으로 시험을 통과한 BWMS만 인증한다. 두 시험 방법 중 식물플랑크톤에 대한 채집 방법, 전처리 과정(농축과 비농축)과 검경 양에 차이가 있어 이에 대한 검토가 필요하다. 본 연구는 검증 단계를 3단계로 설정하여 미국형식승인 선상시험 결과 값을 정부형식승인 선상시험 결과 값으로 대체할 수 있는 과학적 접근 방법을 제시하고자 한다. 검증 1단계는 시료의 균질도 검증, 2단계는 분석 양에 대한 검경, 3단계는 시료 농축에 대한 식물플랑크톤 손실/손상 정도를 반영하는 단계이다. 실제 미국형식승인 선상시험을 수행한 8척의 선박에서 각 5회씩 수행된 결과 값을 검증한 결과 한번의 선상시험을 제외하고 모두 정부형식승인 선상시험 결과 값으로 대체할 수 있었다. 또한 선상시험을 통해 농축/비농축 시료를 비교한 결과, 두 방법 간에 통계적 유의한 차이가 없었다. 따라서 본 연구에서 제시한 검증 단계로 미국형식승인 선상시험 결과 값을 검증하면 정부형식승인 선상시험 결과 값으로 대체 가능한지를 판단할 수 있는 방법으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract The International Maritime Organization (IMO) Convention on ballast water treatment systems (BWMSs) requires that ballast water be treated and discharged by BWMSs approved by the government. The Korean government issues a type approval (TA) for BWMSs tested with the guidelines (BWMS Code) of the IMO, but the US's TA certifies only the BWMSs tested with its test method (the ETV protocol). This study aims to propose a methodology that can replace the result of the shipboard test (SB) of the ETV protocol with that of the BWMS Code by splitting the verification step into three steps as follows. The first step verifies the homogeneity of the sample, the second step verifies the amount of the analysis, and the third step reflects the degree of loss and damage of phytoplankton caused by concentrations using the net. The result of comparing the concentrated and non-concentrated samples through the actual SB showed no significant difference. In addition, when the SB result of the US's TA was evaluated at the verification stage, it was determined to be replaced with that of the government's TA. Therefore, the verification step in this study could determine whether the SB result of the US's TA can be substituted with that of the government's TA.

Keywords : Ballast Water, Ballast Water Management System, Shipboard Test, Type Approval, BWMS Code

본 논문은 2021년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(과제명: IMO 평형수 관리협약 이행 ICT 기반 PSC 대응기술 및 핵심기자재 개발(PM61820)/선박부착물 관리 및 평가기술 개발, 과제번호:20210651)

*Corresponding Author : Pung-Guk Jang((Korea Institute of Ocean Science Technology, KIOST))
email: pgjang@kiost.ac.kr

Received July 28, 2021

Revised August 26, 2021

Accepted November 5, 2021

Published November 30, 2021

1. 서론

국제해사기구(IMO)는 선박평형수로 인한 외래생물의 침입을 막기 위해 2004 선박평형수관리협약을 제정하고, 2008년 개발된 선박평형수처리장치(BWMS)의 형식승인을 위한 시험방법의 가이드라인(Old G8)을 수립했고, 2018년에 이를 BWMS Code 시험 방법으로 개정하였다[1]. 우리 정부는 IMO 형식승인 체계를 바탕으로 한 정부형식승인시험을 인정하고 있지만, 미국은 미국연안 경비대(United States Coastal Guard, 이하 USCG)의 자체 시험 가이드라인(ETV protocol)으로 시험에 통과한 BWMS에 대해 미국 형식승인을 인정하고 있다[2]. 따라서 원칙적으로 제조사가 미국정부형식승인을 받은 경우 아국의 정부형식승인을 다시 받아야한다. 정부형식승인을 받기 위한 IMO BWMS Code 선상시험 기준은 선상에서 6개월 이상 BWMS가 운전되어야 하고, 선상시험이 연속적으로 3회 이상 처리수 기준(D-2 기준)을 만족해야 한다. 분석 항목도 입자성 및 용존성 유기물질, 총부유물질을 분석해야하고, 샘플은 크기별 3가지로 나누어 분석해야하기 때문에 선상시험을 수행하는데 BWMS 제조사는 많은 비용과 시간을 소비해야 한다. 그래서 정부는 외국정부형식승인을 획득한 경우 수행한 시험방법이 IMO의 BWMS Code 시험 방법과 동등 또는 동등 이상의 시험방법으로 외국형식승인을 받은 BWMS 제품에 대해서 정부형식승인 시험을 완화 면제해 줄 수 있도록 선박평형수법(법률 제17031호, 2020.02.18)을 일부 개정하였다.

IMO는 BWMS의 기존 시험 기준(G8)을 검토하여 기존의 방법론에서 몇 가지 문제가 될 수 있는 점들을 IMO의 해양환경 분과위원회(MEPC)에서 2년 동안의 논의를 걸쳐 IMO MEPC 70차 회의에서 개정된 가이드라인 G8(BWMS Code)을 채택했다[1]. BWMS Code는 ETV protocol과 유사하지만 몇 가지 차이점이 있다. 이 중에서 두드러지는 차이점은 $\geq 10 \mu\text{m}$ 와 $\leq 50 \mu\text{m}$ 크기인 생물(식물플랑크톤)에 대한 시험 방법이다. ETV protocol과 Old G8은 처리된 선박평형수에서 식물플랑크톤을 전처리하는 과정에서 네트로 농축할 수 있음을 명시하고 있지만, BWMS Code는 비농축을 권장하고 있으며 농축 시 반듯이 유효성 검증을 하도록 명시하고 있다. 이는 식물플랑크톤을 농축하는 과정에서 대상종이 네트를 통과할 있는 손실 및 농축하는 동안 수압 등의 외부적인 환경요인으로 인해 대상종이 손상되는 것을 방지하여 처리된 평형수 내의 살아있는 식물플랑크톤을 올바르게

게 평가하고자 하는 의도이다[3]. 식물플랑크톤에 대한 농축과 비농축 관련 연구에서도 비농축 방법이 개체수 손실이 더 적다고 보고되었다[3-5].

선상시험을 수행할 경우 BWMS Code는 식물플랑크톤을 처리수에서 연속적으로 $>10 \text{ L}$ 이상 채집하고 여기에서 1 L 을 부시료로 채집해서 농축하지 말고 최소 6 mL ($1 \text{ mL} \times 6$)을 관찰해야하고, 관찰한 시료에서 100 개체 이상을 개수해야한다고 명시되어있다. 그러나 ETV protocol은 식물플랑크톤을 처리수에서 연속적으로 채집하거나 비연속적으로 시작(B), 중간(M), 종료(E) 시점에 10 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 함을 권고하고 있다.

따라서 식물플랑크톤 채집 방법, 시료 검경 양, 시료의 전처리에 있어서 농축 여부가 두 형식승인시험 간의 가장 큰 차이이다. 본 연구는 외국형식승인 선상시험에서 제시한 식물플랑크톤의 평균값이 정부형식승인 선상시험의 IMO 처리수의 배출 기준(D-2 기준, $<10 \text{ cells/mL}$)을 만족하는지를 판단할 수 있는 과학적인 접근 방법을 제시함으로써 선박평형수법에 제시한 외국형식승인 완화 면제와 관련하여 판단기준을 제시하고자 한다. 또한 IMO의 Old G8으로 수행된 선상시험 방법이 ETV potocol과 유사하기 때문에 본 연구 결과가 Old G8으로 선상시험을 수행한 경우에도 BWMS Code의 선상시험을 면제할 수 있는지를 검토하는데 활용할 수 있다.

2. 재료 및 방법

외국형식승인 선상시험 결과를 정부형식승인시험결과로 대체하기 위한 3단계 검증 방법을 다음과 같이 제안한다. 1단계는 시료의 균질도 확보 여부, 2단계는 신뢰할 수준만큼 검경 양이 분석되었는지 여부, 3단계는 1단계와 2단계를 만족한 경우 처리수 내 출현종의 네트 손실 및 손상의 정도에 대한 전문가 의견을 반영해 외국형식승인 시험결과를 정부형식승인 시험결과로 전환하기 위한 인자 값을 결정하여 외국형식승인 선상시험에서 제시한 실제 측정값에 인자 값을 곱해 구해진 개체수가 10 cells/mL 을 초과하는지 여부로 외국형식승인 시험 결과값의 수용 여부를 결정하고자 한다.

1단계는 시료가 균질도를 확보했는지 판별하기 위해 카이제곱 검정을 사용하여 분석하였다. 카이제곱 검정은

카이제곱 분포에 기초한 통계적 방법으로 관찰된 빈도가 기대되는 빈도와 통계적으로 다른지의 여부를 검증하기 위해 이용되는 방법이다. 카이 제곱 값은 $\chi^2 = \sum (\text{관측값} - \text{기댓값})^2 / \text{기댓값}$ 으로 산출하며, 유의 확률(p)이 0.05 이상인 경우 균질성이 확보된 것으로 판단할 수 있다.

2단계는 적절한 검정 양을 결정하기 위해 베이지안 추론(Bayesian simulation) 방법을 사용하였다. 이는 균질화된 1L 병에 생물이 무작위로 분포(포아송 분포)한다는 가정 하에 수행하였다. 포아송 분포에 대한 사후 분포는 형상 매개 변수 (a)와 척도 매개 변수 (β)를 가진 감마 분포를 기반으로 계산한다. 사후 분포의 형상 및 규모 매개 변수 각각은 $\alpha + nM$ 및 $\beta + n$ (M 은 샘플의 평균, n 은 샘플 크기)의 매개 변수를 가지는 감마 분포이며, 이를 이용해 각각의 최대수의 분포를 계산한다[6]. 시뮬레이션은 1 mL의 부차 표본을 1000번 반복하여 계수될 수 있는 범위를 보여준다.

3단계는 우리나라 연안에서 자주 출현하는 식물플랑크톤 종을 식별하여 이들의 네트 손실 및 손상 정도를 전문가의 설문을 통해서 결정했으며, 인자 값은 대상종의 손실 및 손상 등급의 평균값을 적용하였다. 외국형식승인 시험 결과를 정부형식승인 시험결과로 전환하기 위해 결정된 인자 값을 외국형식승인 시험결과 값에 곱해서 살아있는 평균개체수가 1 mL 당 10개체 미만이면 정부형식승인 선상시험을 만족한 것으로 결정한다.

미국정부형식승인을 받기 위한 실제 선상시험에서 농축과 비농축 시료에 대한 차이를 확인하기 위해 비교시험을 수행하였다. 또한 미국형식승인 선상시험을 수행한 자료를 이용해 본 연구의 식물플랑크톤의 손실 및 손상 등급을 적용하여 평가하였다. 배출수 비교 시험의 선상시험은 IMO의 BWMS Code와 USCG ETV protocol을 병합하는 방법으로 진행하였다. 식물플랑크톤은 de-ballasting 시 BWMS 운전하는 동안 연속적으로 시료를 20 L 채취하였으며, 20 L을 잘 혼합하여 1 L의 부시료와 4 L을 1 L로 농축한 부시료를 만들어 각각 12 mL과 3 mL을 관찰하여 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 시료의 균질도에 대한 검증

BWMS Code는 처리수의 시료 채집을 연속적으로 수행하도록 하고 있으며, 이는 시료의 대표성을 확보하기 위해서이다. 그러나 ETV protocol은 연속 또는 비연속

적으로 시료를 채집하는 것을 허용하기 때문에 비연속적으로 수행된 선상시험 결과를 과학적으로 입증하기 위해서는 1차적으로 배출수 내 대상 생물이 균질하게 분포되어 있다는 것을 증명해야 한다. 선박평형수에서 낮은 밀도의 유기체는 무작위로 분포하지 않을 수 있지만[7][8], 시간이 지난 시료는 그러한 가변성을 감소시킬 수 있다.

본 연구에서는 시료의 균질성을 확보하기 위한 1단계에 카이 제곱 검증(Chi-square test)을 사용하여 시료의 균질성을 판단하였다. 실제 선상시험에서 유입수를 시작, 중간, 종료 시점에 각각 샘플링하여 1 mL subsample을 9번 반복 분석하는 경우, 계산된 카이 제곱 값이 15.5 이하(자유도 8)이면 유의 확률(p)이 0.05보다 커 균질성이 확보된 것으로 판정할 수 있다.

3.2 시료 검정 양에 대한 검증

BWMS Code는 BWMS의 성능을 평가하기 위해 처리된 선박평형수 내 살아있는 식물플랑크톤이 mL 당 10개체 미만이면 처리수의 배출 기준(D-2 기준)을 만족한 것으로 평가한다. 그러나 평균 개체수 값을 신뢰하기 위해 처리수 내 개체수가 100개 이상일 때까지 시료를 계수해야 한다. 만약 100개까지 계수하지 못하고 평균값을 구할 경우 시험 방법에 대한 유효성을 검증해야 한다. 일반적으로 외국형식승인 선상 시험의 경우 이러한 규정이 없어 6 mL 혹은 9 mL만 분석하고 이에 대한 유효성 검증을 수행하지 않았으며, 이는 Old G8에서 유효성 검증이 언급되어 있지 않았기 때문이다.

BWMS 장비로 처리된 선박평형수 내 생물은 각각의 BWMS 성능에 따라 차이가 있지만, 살아있는 식물플랑크톤이 처리된 선박평형수에 mL 당 1개체 미만으로 존재하는 경우 분석해야 하는 양이 기하급수적으로 증가할 수 있다. 또한 분석 시간을 생물의 자연적 사망을 고려해 6시간 이내에 제한하고 있기 때문에 분석 시료의 증가는 규정된 시간 내에 분석을 하지 못할 수도 있다. 물론, 시험 요원을 증가시켜 개수할 수 있지만, 이는 인력과 시간의 낭비이다. 따라서 평균값을 입증할 수 있는 적당량의 분석 양을 결정하는 것이 중요하기 때문에 검증 2단계는 선상시험 결과에 제시된 처리수 내 살아있는 대상 생물의 평균값의 신뢰성을 확보하기 위해 베이지안 추론을 사용하였다.

베이지안 추론으로 시뮬레이션을 수행한 결과 1 mL 씩 10번 분석하여 얻은 평균값이 5인 경우 1,000번을 분석하여도 최대 개수가 10을 초과하지 않았다(Fig. 1a). 외국 선상시험의 경우 BWMS Code에 명시된 것과 같이

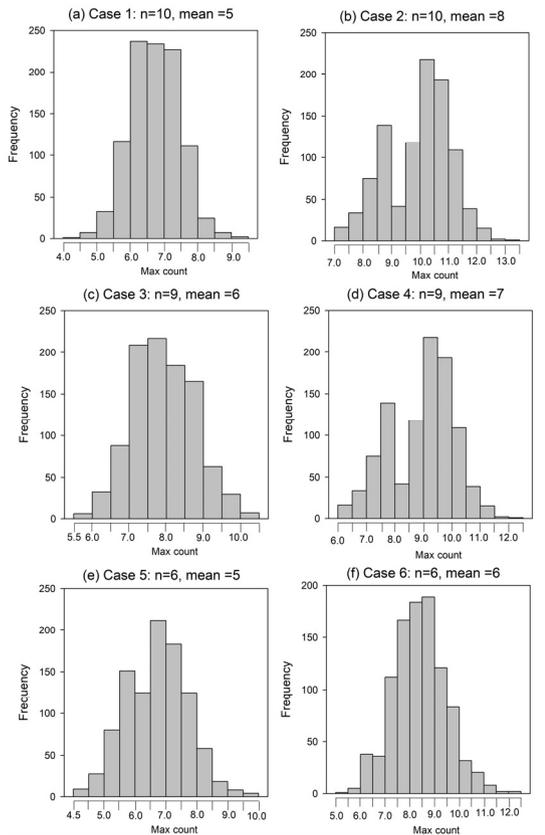


Fig. 1. Bayesian simulation of posterior distribution of the maximum number of individuals given Poisson mean values (X-axis) and the number of 1 ml subsamples (Y-axis). The simulation was repeated a thousand times for each of the mean number of individuals and the number of subsamples to be analysed.

연속 채집하여 최소 6 mL을 분석한 경우와 B, M, E로 채집하여 각각 3 mL씩 총 9 mL을 분석한 경우가 대부분이다. 1mL씩 9번 분석하여 구한 평균값이 6인 경우는 993번의 시물레이션에서 최대 개수가 10을 초과하지 않았고(Fig. 1c), 6 mL을 분석하여 구한 평균값이 5인 경우 996번 분석하여도 최대 개수가 10을 초과하지 않았다(Fig. 1e). 따라서 외국형식승인 선상시험에서 검경 양이 6 mL과 9 mL인 경우 각각의 평균 개체수가 mL 당 6 개체와 5 개체 미만이라면 이 값들은 검경 양에 대한 유효성을 입증한 것으로 입증할 수 있다.

3.3 네트 손실과 손상에 대한 등급 결정

선상시험에서 시험수 유입 조건이 mL당 100 개체 이

상이기 때문에 시료 농축에 의한 생물의 사멸은 제조사의 입장에서 형식승인시험에 불리한 조건이다. 따라서 유입수 시료의 농축 여부는 외국형식승인 선상시험의 결과를 평가하는데 고려해야할 대상은 아니다. 그러나 BWMS로 처리된 배출수의 기준은 ml 당 10 개체 이하이기 때문에 농축에 의한 식물플랑크톤의 사멸을 고려해야만 한다. BWMS 형식승인시험에서 비농축 방법은 네팅에 의한 식물플랑크톤의 손실과 손상을 고려한 반면, 농축 방법은 보다 더 많은 시료를 분석할 수 있다는 점을 고려한 것으로 판단된다.

넛 농축 과정에서 다양한 원인으로 식물플랑크톤이 손상될 수 있다. 연질의 플랑크톤(e.g., gelatinous plankton)은 그물에서 수압을 견디지 못할 수 있으며, 사슬형 플랑크톤은 단독형보다 그물을 통과할 가능성이 낮지만, 사슬이 끊어질 경우 일부는 수직으로 그물을 통과할 수 있어 세포의 모양도 중요하다[3, 4, 9]. 백 등[4]은 chlorophyll a 응집법으로 측정한 결과, 구조류 *Pseudo-nitzschia* spp. (길이 30-50 μm , 폭 3-8 μm)의 약 80%가 7 μm 플랑크톤네트를 통과했다고 보고했다. 장 등[3]도 식물플랑크톤의 폭이 10-20 μm 인 경우 네트 통과에 대한 손실이 크게 나타나며, 단일클론보다 사슬 형태의 식물플랑크톤 농축에 대한 시료의 손실율이 크다고 보고하였다. 따라서 대상종의 농축에 대한 손실과 손상의 정도는 대상 생물의 생리·형태학적 특징인 세포크기, 체인형성여부, 잠재적 생물 활성에 대한 정보를 바탕으로 결정해야 한다.

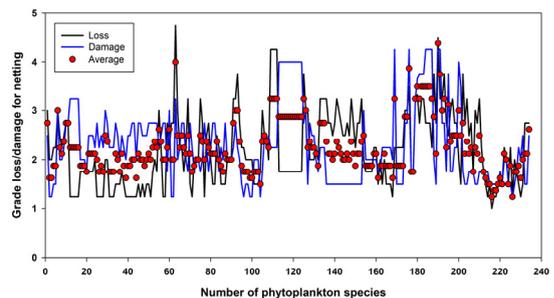


Fig. 2. Expert assessment on loss and damage of phytoplankton species by concentration using a net

본 연구는 전문가 설문을 통해서 대상종의 네트 손실과 손상을 평가하였다(Fig. 2). 이러한 전문가의 평가 방법은 바이오파우링의 생물적위해성을 평가하기 위한 Infection Modes and Effects Analysis (IMEA)를 산

출하는 방법에도 적용된다[10]. 전문가 간의 객관성을 부여하기 위해 생물별 네트 손실과 손상의 등급점수를 각각 1점에서 5점까지 등급을 5단계로 나누었으며, 점수가 낮을수록 손실/손상이 적다는 것을 의미한다. 또한 전문가에게 식물플랑크톤의 외각의 특성, 결합 형태, 결합 세기 및 크기를 주요 평가 기준으로 제시하여 평가에 대한 객관성을 높였다. 식물플랑크톤 종은 우리나라 연안에서 보고되어진 종들을 대상으로 하였으며, 규조류 153종과 와편모류 81종에 대해 설문을 진행했다. 4명의 전문가에 의해 작성된 규조류와 와편모류의 네트 손실은 1-5등급의 범위를 보였고, 평균 등급은 각각 2.15±1.17와 2.29±1.24의 값을 보였다. 이들의 네트 손상도 1-5등급의 범위를 보였고, 평균 등급은 각각 2.06±1.31와 2.28±1.41의 값을 보였다. 조사된 전체 식물플랑크톤에 대한 평균 등급은 2.26±1.32의 값을 보였다. 규조류와 와편모류 중에서 *Cylindrotheca closterium*와 *Heterosigma akashiwo*가 농축 시 손실/손상이 모두 큰 것으로 평가되었다.

Table 1. Rating for loss and damage due to the concentration of major phytoplankton that appeared in the influent of the shipboard test that performed the comparative test of concentrated and non-concentrated samples

	L*	D*	A*		L*	D*	A*
Diatom				Thalassiosira spp.	2.8	1.5	2.1
Asterionellopsis sp.	2.8	3.0	2.9	Unidentified diatom ¹⁾			2.2
Chaetoceros spp.	1.5	2.5	2.0	Dinoflagellate			
Cylindrotheca sp.	4.8	3.3	4.0	<i>Ceratium turca</i>	1.6	2.1	1.8
<i>Dactyliosolen</i> spp.	2.1	2.6	2.3	<i>Dinophysis</i> spp.	2.3	1.5	1.9
Ditylium spp.	1.4	2.5	1.9	<i>Gymnodinium</i> spp.	3.1	3.7	3.4
Guinardia striata	1.7	2.6	2.1	<i>Gyrodinium</i> spp.	2.7	4.3	3.5
<i>Lauderia</i> spp.	2.0	2.0	2.0	<i>Heterocapsa</i> spp.	3.3	1.8	2.5
<i>Pleurosigma</i> sp.	2.5	2.3	2.4	<i>Heterosigma</i> sp.	4.5	4.3	4.4
<i>Probosira alata</i>	2.0	2.5	2.3	<i>Nematodinium</i> sp.	2.5	3.8	3.1
<i>Pseudonitzschia</i> spp.	4.3	2.3	3.3	<i>Protoperidinium</i> spp.	1.7	1.6	1.7
<i>Rhizosolenia</i> sp.	1.8	4.0	2.9 ⁵				
<i>Skeletonema</i> spp.	3.8	2.8	3.3	Unidentified dinoflagellate ¹⁾			2.3
<i>Thalassionema</i> spp.	3.3	2.3	2.8	Unidentified phytoplankton ¹⁾			2.3

*L: Loss value, D: damaged value A: average value

¹⁾ Mean value of phylum calculated by experts

Table 1은 실제 선상시험에서 출현한 주요 종에 대한 전문가 설문에 따른 네트 손실과 손상 및 이들에 평균 등급을 나타내었다. 외국형식승인 선상시험에서 식물플랑크톤이 속 수준으로 언급된 경우는 설문지에 작성된 같은 속의 종들의 손실/손상 등급을 평균하여 이들의 등급 값을 결정하였다. 선상시험의 유입수에서 관찰된 식물플

랑크톤의 손실/손상 등급은 1.7 - 3.5의 범위를 나타내었다. 그리고 종이 불명확할 경우, 종의 특징을 자세히 기술했거나 사진을 첨부하였다면 이에 대한 전문가의 의견을 반영할 수 있지만, 종의 특징을 서술하지 않은 경우에는 전문가가 평가한 등급의 평균값으로 정의하였다.

3.4 외국형식승인 선상시험 결과 값을 대체하기 위한 인자 값의 결정

1단계의 시료의 균질성 확보와 2단계 검경 양에 대한 검증이 통과한 경우에만 배출수 내 관찰된 식물플랑크톤에 대해 농축에 의한 식물플랑크톤의 손실/손상에 대한 등급을 적용하면 된다. 3단계에서 산출한 전문가의 등급 점수를 인자 값으로 사용하되 2개 이상의 종이 나타난 경우 그들의 평균값을 인자 값으로 사용한다. 예를 들면, 선상 2차 시험의 배출수에서 관찰된 *Guinardia striata*와 unidentified dinoflagellate이 각각 1개체씩 관찰된 경우 두 등급의 평균값인 2.2를 인자 값으로 설정하고, 실제 관측된 0.15 cells/mL에 인자 값을 곱해 0.33 cells/mL로 대체한다. 이 값은 D-2 기준을 만족하기 때문에 외국형식 선상시험 결과 값을 정부형식승인 선상시험의 결과 값으로 인정할 수 있다. 배출수에서 관찰되는 대상종에 대한 우점율도 고려되어야 하나 D-2 기준을 만족하기 위해서는 mL 당 10개체 미만으로 개체수가 적기 때문에 종들에 대한 기여율은 고려하지 않았다.

결과적으로 2단계를 만족하는 경우 배출수 내 식물플랑크톤의 평균 개체수가 분석 양에 따라 다소 차이가 있지만, 3단계에 적용되는 인자 값의 평균이 2.3이기 때문에 선상시험의 평균 개체수가 4 cells/mL 이하이면 선상시험의 면제를 받을 수 있다.

3.4 선상시험 시 농축과 비농축 결과비교

선상시험의 비교 시험(선박 A)은 2019년 10월 14일부터 2020년 12월17일까지 부산-중국-파나마-미국을 오가는 실제 국제선박에서 수행되었으며, 선상시험 기준을 만족하는 5번의 시험이 성공적으로 이루어졌다 (Table 2). 농축과 비농축의 비교시험 중 4차 시험의 비농축 시료에서 1.08 cells/mL로 높게 나타났고, 농축 시료에서는 2차 시험에서 0.15 cells/mL로 가장 높은 값을 보였다. 2차 선상시험은 농축한 시료에서 검출된 반면 비농축 시료에서는 검출되지 않았지만, 4차 시험에서는 비농축 시료에서 상대적으로 높은 값을 보였다. 그 이외의 값들은 살아있는 개체수가 검출되지 않았다. 또한 A

선박의 배출수 개체수가 2 cells/mL을 초과하지 않아 식물플랑크톤 손실 및 손상에 대한 최대 인자 값(5)을 곱해도 모든 선상시험이 D-2 기준을 만족한다(Table 2).

Table 2. Phytoplankton abundance collected from the treated discharge water of the shipboard test and their factor values in three step suggested in this study

Ship	Test cycle	Abundance of phytoplankton (cells/mL)		
		Deballasting		
		Non-C ¹⁾	Con. ²⁾	Factor
A	1, 3, 5	0	0	-
	2	0	0.15±0.26	2.2
	4	1.08±1.08	0.08±0.14	2.3
B	1-5	-	0	-
C	1,2,4,5	-	0	-
	3	-	0.1	1.7
D	1-5	-	0	-
E	1	-	0.83	
	2	-	0.33	
	3	-	1.30	2.3*
	4	-	2.00	
	5	-	1.30	
F	1-5	-	0	-
G	1	-	2.8	
	4, 5	-	0	2.4*
	6	-	0.50	
	7	-	0.67	
H	1	-	0	
	2	-	0.67	
	3	-	8.8	2.2*
	4	-	1.7	
	5	-	2.0	

1) Non-C: non-concentrated sample, 2) Con: concentration using the net

* Mean grade of loss/damage of appearance species in uptake water of shipboard tests

장 등[3]은 육상시험에서 식물플랑크톤 전처리 과정에 서 농축에 의한 대상종들의 손실 및 손실이 발생한다고 보고하고 있으며, 또한 시험수의 개체수가 적으면 농축에 의한 대상종의 개체수의 손실/손상이 낮다고 보고하였다[4]. 따라서 처리된 배출수 내 식물플랑크톤의 배출수 기준은 mL 당 10개체 이하로 낮기 때문에 농축에 의한 손실/손상이 적을 것으로 예상된다.

외국형식승인으로 수행된 선박(B-H)의 선상시험 결과 값을 본 연구에서 제시한 검증단계를 적용하고 3단계 인자 값을 Table 2에 제시하였다. 선상시험 결과 자료에

배출수 내 살아있는 식물플랑크톤의 정보가 없는 경우 유입수 내의 식물플랑크톤에 대한 손실/손상 등급을 평균하여 인자 값으로 사용하였다(Table 2). 이 들 중 H 선박의 3차수 선상시험을 제외하고 모든 선상시험이 산출된 인자 값을 곱해도 배출수 처리 기준을 만족한다 (Table 2).

정부형식승인 선상시험은 무효한 시험과 유효한 시험으로 나누며, 유효한 시험은 성공과 실패로 나누어진다. 무효한 시험은 시험수가 생물 기준을 만족하지 못하거나 장치의 이상으로 BWMS 운영이 제시된 운전 범위를 벗어난 경우에 배출수의 D-2 기준 만족 여부와 관계없이 연속적인 시험 차수에서 제외한다. 그러나 유효한 시험에서 D-2 기준을 만족하지 못할 경우 시험 실패로 간주되며 이 경우는 시험 차수에 포함되어 연속시험을 인증 받을 수 없어 처음부터 다시 선상시험을 수행하여야 한다.

H 선박의 3번째 선상시험을 실패로 처리할 경우 선상 시험이 연속적으로 2회만 성공한 것으로 인정되어 선상 시험 기준(연속 3회)을 통과하지 못한 것으로 간주할 수 있다. 그러나 시료 농축에 의한 식물플랑크톤의 손실/손상이 실제로 선상시험에서 이루어졌다고 확신할 수 없기 때문에 본 연구에서 개발한 검증 단계를 이용해 산출된 개체수가 D-2를 만족하지 못한다고 판단하여 이를 실패로 간주하는 것은 너무 가혹하다. 따라서 검증 단계로 대체된 선상시험 결과 값이 D-2 기준을 만족하지 못했다고 하더라도 이를 실패가 아닌 무효한 시험으로 보는 것이 타당하다고 판단된다. 따라서 H 선박의 경우 3번째 시험이 D-2 기준을 만족하지 못했지만 3번째 시험을 무효한 시험으로 간주하고 전체 5번 중 4번의 시험이 D-2 기준을 연속적으로 성공한 것으로 판단하여 외국정부형식승인 완화 면제에서 선상시험을 면제할 수 있다.

4. 결론

실제 IMO BWMS Code나 USCG ETV protocol에 제시한 시험 방법은 과학적으로 타당한 방법으로 제정된 것이다. 식물플랑크톤의 농축 여부도 장단점을 가지고 있기 때문에 단지 시료의 농축의 여부에 따라 선상시험의 결과가 크게 차이가 발생하지 않을 것으로 판단된다. 또한 선상시험 시 배출수 내의 식물플랑크톤의 개체수가 낮아 농축에 의한 손실 및 손상이 적을 것으로 예상된다. 본 연구 결과도 7척의 선박에서 수행된 외국형식승인 선상시험 결과가 정부형식승인시험을 면제받는 결과로 도

출되었다.

외국정부형식승인 시험 방법 중 정부형식승인 시험방법과 차이가 있는 식물플랑크톤 시험방법에 대해서 본 연구에서 제시한 방법이 과학적인 접근 방법으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

<https://doi.org/10.4319/lo.1979.24.5.0956>

- [10] D. Morrissey, J. Gadd, M. Page, O. Floerl, C. Woods, "In-water cleaning of vessels: Biosecurity and chemical contamination risks," MPI Technical Paper No:2013/11.267, 2013.

References

- [1] International Maritime Organization, "Code for Approval of Ballast Water Management Systems(BWMS CODE) (Resolution 300(72))" [Internet]. International Maritime Organization, May 2018. Available From: <https://docs.imo.org/Documents/Detail.aspx?did=110918> (accessed Sept. 13, 2020)
- [2] U.S. EPA. "Generic Protocol for the Verification of Ballast Water Treatment technology", EPA/600/R-10/146, U.S. EPA, Sept. 2010, pp.1-156.
- [3] P.G. Jang, B. Hyun, W.J. Lee, K.H. Choi, "Comparison of sampling method of phytoplankton for type approval of ballast water management system", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society. Vol.21, No.12, pp.426-433, Dec. 2020. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.12.426>
- [4] S. H. Baek, M. J. Lee, K. Shin, "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. Vol.17, No.3, pp.136-143, Jan. 2016. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.3.136>
- [5] Malone, T.C., Chervin, M.B., Boardman, D.C., 1979. Effects of 22- μ m screens on size-frequency distributions of suspended particles and biomass estimates of phytoplankton size fractions 1. Limnol. Oceanogr. 24, 956-960. <https://doi.org/10.4319/lo.1979.24.5.0956>
- [6] W.M. Bolstad, J.M. Curran, "Introduction to Bayesian statistics," John Wiley & Sons, 600p, 2016
- [7] E.G. Costa, R.M. Lopes, J.M. Singer, "Implications of heterogeneous distributions of organisms on ballast water sampling," Mar. Pollut. Bull. 91, 280-287, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.11.030>
- [8] A.W. Miller, M. Frazier, G.E., Smith, E.S. Perry, G.M. Ruiz, M.N. Tamburri, "Enumerating sparse organisms in ships' ballast water: why counting to 10 is not so easy," Environ. Sci. Technol. 45, 3539-3546. 2011. <https://dx.doi.org/10.1021/es102790d>
- [9] T.C. Malone, M.B. Chervin, D.C. Boardman, 1979. Effects of 22- μ m screens on size-frequency distributions of suspended particles and biomass estimates of phytoplankton size fractions 1. Limnol. Oceanogr. 24, 956-960, 1979.

장 풍 국(Pung-Guk Jang)

[정회원]



- 1998년 2월 : 경남대학교 환경보호학과 (환경학석사)
- 2008년 8월 : 부산대학교 해양학과 (해양학박사)
- 2008년 9월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 책임연구원

<관심분야>

선박평형수, 해양환경오염, 수질, 해양화학

신 경 순(kyoungsoon Shin)

[정회원]



- 1988년 2월 : 인하대학교 해양학과 (이학석사)
- 1997년 2월 : 인하대학교 해양학과 (이학박사)
- 1997년 4월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 책임연구원

<관심분야>

선박평형수, 외래생물 생리, 생태학, 해양생물학,