

USCG Phase II 선박평형수 성능 평가를 위한 해양 식물플랑크톤군집 대량 확보 및 생물사멸시험

현봉길* · 백승호** · 이우진*** · 신경순***†

*, *** 한국해양과학기술원 선박평형수연구센터, ** 한국해양과학기술원 남해연구소

Viability Test and Bulk Harvest of Marine Phytoplankton Communities to Verify the Efficacy of a Ship's Ballast Water Management System Based on USCG Phase II

Bonggil Hyun* · Seung Ho Baek** · Woo Jin Lee*** · Kyoungsoon Shin***†

*, *** Ballast Water Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Geoje 53201, Korea

** South Sea Institute, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Geoje 53201, Korea

요약 : 본 연구는 USCG phase-II의 형식승인 기준인 자연상태 생물군집의 75% 이상 유지하여야 하는 평가체계에 대비하여 자연생물군집 농축 및 선박평형수관리시스템(Ballast Water Management System, BWMS) 처리 전·후 생물사멸시험을 실시하였다. 자연 식물플랑크톤군집의 농축 조사는 중영양수계인 장목만과 부영양화수계의 마산만에서 동계에 수행하였다. 장목만과 마산만에서 1톤 기준으로 생물을 농축하였을 경우, 10-50 μm 크기 생물 현존량은 4.7×10^4 cells mL^{-1} 과 0.8×10^4 cells mL^{-1} 이었고, 농축생물의 생존율은 90.4%와 88.0%로 각각 나타났다. 특히 장목만에서는 *Skeletonema costatum*-like species 같은 체인을 형성하는 소형 규조류가 극우점한 반면, 마산만에서는 <10 μm 보다 작은 편모조류 및 체인을 형성하지 않는 대형 와편모조류(*Akashiwo sanguinea*, *Heterocapsa triquetra*)가 우점하였다. 이와 같은 우점종 세포크기의 차이로 장목만 농축효율이 마산만보다 높게 나타났다. BWMS 장비를 통과한 처리 당일 생물 사멸률은 장목만이 90.4%로, 마산만의 93%보다 약간 낮았고, 장목만에서 BWMS 처리 5일 경과 후, 대조군의 대상생물의 사멸률은 6.7%로 나타났다. 처리군에서는 >99%로 대부분 사멸되어, 시험 생물로서의 적용 가능성을 확인할 수 있었다. 결과적으로 동계와 같이 해역내 생물량이 낮은 경우, 주간 8시간 수행한 네트의 생물농축만으로는 USCG Phase II의 형식승인 기준인 500톤 탱크에 1.0×10^3 cells mL^{-1} 이상으로 자연생물 개체수 밀도를 충족하기는 쉽지 않다는 것을 파악하였고, 이를 보완하기 위해서는 일정기간 자연생물을 대량 배양 및 채집할 수 있는 시스템 도입이 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 선박 평형수, 선박평형수관리시스템, 자연상태 생물군집, ≥ 10 and $<50 \mu\text{m}$ 생물, USCG Phase II

Abstract : The type approval test for USCG Phase II must be satisfied such that living natural biota occupy more than 75% of whole biota in a test tank. Thus, we harvested a community of natural organisms using a net at Masan Bay (eutrophic) and Jangmok Bay (mesotrophic) during winter season to meet this guideline. Furthermore, cell viability was measured to determine the mortality rate. Based on the organism concentration volume (1 ton) at Masan and Jangmok Bay, abundance of ≥ 10 and $<50 \mu\text{m}$ sized organisms was observed to be 4.7×10^4 cells mL^{-1} and 0.8×10^4 cells mL^{-1} , and their survival rates were 90.4% and 88.0%, respectively. In particular, chain-forming small diatoms such as *Skeletonema costatum*-like species were abundant at Jangmok Bay, while small flagellate ($<10 \mu\text{m}$) and non chain-forming large dinoflagellates, such as *Akashiwo sanguinea* and *Heterocapsa triquetra*, were abundant at Masan Bay. Due to the size-difference of the dominant species, concentration efficiency was higher at Jangmok Bay than at Masan Bay. The mortality rate in samples treated by Ballast Water Treatment System (BWMS) (Day 0) was a little lower for samples from Jangmok Bay than from Masan Bay, with values of 90.4% and 93%, respectively. After 5 days, the mortality rates in control and treatment group were found to be 6.7% and >99%, respectively. Consequently, the phytoplankton concentration method alone did not easily satisfy the type approval standards of USCG Phase II ($>1.0 \times 10^3$ cells mL^{-1} in 500-ton tank) during winter season, and alternative options such as mass culture and/or harvesting system using natural phytoplankton communities may be helpful in meeting USCG Phase II biological criteria.

Key Words : Ballast water, Ballast Water Management System, Living natural biota, ≥ 10 and $<50 \mu\text{m}$ sized organisms, USCG Phase II

* First Author : bghyun@kiost.ac.kr, 055-639-8516

† Corresponding Author : ksshin@kiost.ac.kr, 055-639-8510

1. 서론

선박평형수는 공선선박의 무게중심을 유지하여 안전한 항해를 돕기 위해서 적재하는 물이며, 전 세계적으로 연간 50~100억톤 규모로 이송되고 있다(Kang et al., 2010). 선박평형수에 이송된 대부분의 생물은 배출되는 해역 환경에 적응하지 못해 사멸하지만, 일부 내성이 강한 종은 살아남게 되어 항만고유의 생태계를 교란시킬 수 있다(IMO, 2001). 이에 국제해사기구(IMO: International Maritime Organization)에서는 선박평형수관리시스템(BWMS: Ballast Water Management System)을 개발하여 생물을 원천적으로 제거 및 사멸시킨 후 배출해야 하는 국제선박평형수관리협약(IMO D2 regulation)을 제정하였다(IMO, 2001). IMO D2규정에 의하면, 선박평형수 처리장치의 형식승인을 위한 육상시험에 필요한 ≥ 10 and $< 50 \mu\text{m}$ 크기 생물(대부분 식물플랑크톤, 이하 10-50 μm 크기 생물로 표기)군에 관해서는 배양생물이나 자연생물군집에 관계없이 최소 3문(Phylum) 5종(Species) 이상이 존재해야 하며, 또한 일정 수준을 초과한 개체수 밀도($> 1.0 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$)를 유지하도록 시험수를 규정하고 있다. 이러한 IMO 규정을 충족시키기 위해서 대부분 형식승인 시험기관에서는 현재 BWMS 육상시험 수행 시 자연해수와 함께 고밀도의 배양생물(예: *Tetraselmis suecica*)을 희석하여 시험수 개체수 밀도를 충족시키고 있다.

하지만, IMO D2 기준보다 1000배 강화된 USCG(U.S. Coast Guard) Phase II 형식승인기준에서는 시험수에 자연 상태 생물군집을 75% 이상으로 유지하도록 하는 새로운 조항을 만들었다(Miller et al., 2011). 따라서 USCG Phase II 형식승인시험을 수행하기 위해서는 높은 밀도의 자연생물을 확보하는 것이 매우 중요하다. 자연 상태의 10-50 μm 크기 생물을 확보하기 위해서는 첫 번째로 해수나 담수에서 생물을 채집할

수 있는 네트 등의 도구를 이용하여 고밀도의 자연생물시료를 확보한 후 BWMS시험수의 생물농도를 맞추는 방법과, 두 번째로는 폐쇄생태계(mesocosm)를 조성한 후 일정양의 영양염을 첨가하여 2~3일 동안 자연 상태의 생물군집을 고밀도로 배양한 후 시험수로 활용하는 방법을 고려해 볼 수 있다.

본 연구에서는 첫 번째 자연생물군집 확보 방법 중 네트를 이용한 생물 농축 시 USCG Phase II 형식승인시험 시험수내 생물 농도를 충족시킬 수 있는 방법인지 검토하였다. 또한 10-50 μm 크기 생물 군집 구조는 계절 및 해역에 따라 매우 다양하게 변화하며, 이는 네트를 이용한 자연생물군집 농축 시 다양한 문제점을 발생시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 10-50 μm 크기 생물군집을 대규모로 농축해서 BWMS 형식 승인 시험수로 이용하였을 경우 발생할 수 있는 문제점 파악과 함께 적절한 대책을 강구할 수 있는 자료를 확보하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 식물플랑크톤 자연종 농축

자연종 생물 농축은 장목만과 마산만에서 2015년 1월 15일과 22일에 한국해양과학기술원 연구선 ‘장목1호’를 이용해서 수행하였다(Fig. 1). 생물 농축을 동절기에 수행한 이유는 다른 계절에 비해 상대적으로 개체수 밀도가 낮을 것으로 예측되는 동절기에 생물 농축을 효과적으로 수행할 수 있다면, 개체수 밀도가 상대적으로 높은 계절에는 보다 빠르고 간단하게 생물을 농축할 수 있을 것으로 판단하였기 때문이다. 장목만과 마산만의 조사는 각각 오전 9시에 장목만을 출항하여 생물을 네트로 채집하여 20L 용기에 넣고, 빛의 영향을 적게 받도록 보관하였다. 오후 4~5시에 현장 조사 완료 후 채집된 시료를 1톤 탱크로 옮긴 다음 1차적으

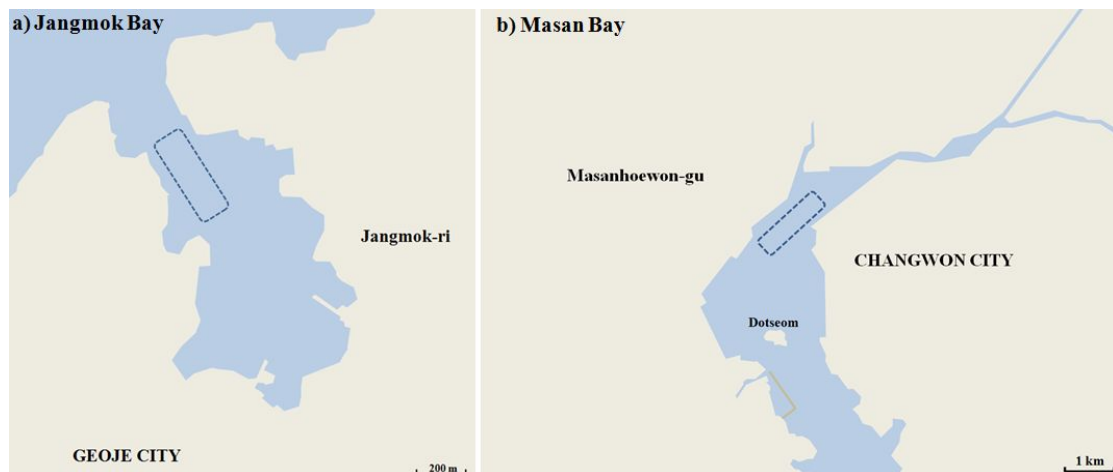


Fig. 1. The location of sampling of 10-50 μm marine organism in Jangmok Bay and Masan Bay.

로 농축시료의 농도, 사망률, 종 조성을 확인하였고, 1톤 탱크에서 펌프를 이용해서 다시 500톤 시험수 탱크로 농축 시료를 이동시킨 후 최종 생물 농도를 환산하여 시험수 생물 농도 조건 만족 여부를 확인하였다.

일반적으로 우리나라에서는 10-50 µm 크기 생물을 정성적으로 평가하기 위해 망목 20 µm, 직경 30 cm, 길이 0.7 m 내외의 네트를 제작한 후 사용한다. 하지만 본 연구에서는 500톤 규모의 육상시험설비 시험수 탱크에 10-50 µm 크기 생물을 채집하여 BWMS 장치의 시험수 조건(>1 × 10³ cells mL⁻¹)을 충족해야하기 때문에, 망목 20 µm, 직경 50 cm, 길이가 1.5 m의 네트를 제작하였다. 10-50 µm 크기 생물 농축은 5 m 수직 인양하여 농축하는 방법과 선박을 저속 운항(약 1 knot)시켜, 30~60초간 표층부에서 인양하는 두 가지의 방법으로 수행하였다. 장목만과 마산만에서 네트를 이용하여 현장에서 채집한 방법 및 횡수는 Table 1과 같다.

Table 1. The frequency of netting in Jangmok Bay (JM) and Masan Bay (MS)

Location	Vertical towing (5 m)	Surface towing time	
		30 sec.	60 sec.
JM	72	0	15
MS	4	18	45

2.2 선박평형수관리시스템(BWMS) 운전 정보

본 연구 시 적용된 BWMS는 Fig. 2와 같이 필터와 전기분해과정을 거치면서 생물을 사멸시키는 방법으로 전 세계적으로 실용성과 안전성이 검증된 방식이다(Kim, 2012). 본 방식의 생물 제거 원리에 대해서 간략하게 소개하면, 시험수 내 생물은 75 µm 크기 필터에 의해서 1차적으로 제거가 된다. 전기분해장치를 거치면서 전위차와 발생된 산화물(HOCl, OCl⁻, HOBr, OBr⁻, O₂, H₂O₂)에 의해서 2차적으로 생물이 제거되게 된다. 본 연구에 사용된 BWMS 장비 생물사멸 및 처리효율을 평가는 장목만 농축시료를 이용한 시험(1월 15일)과 마산만 농축 시료를 이용한 시험(1월 21일)으로 나누어 진행하였다. 시험은 시간 당 250~300톤 유속으로 각각 처리장치를 통과하지 않은 비처리수(Control water: 250톤)와 처리장치를 통과한 처리수(Treated water: 250톤) 탱크로 흘러 보내면서 진행하였다. 생사판별을 위한 시료 분석은 비처리수 및 처리수 탱크 수위에 따라 3부분(25%, 50%, 75%)으로 나누어 진행하였으며, 0일차에서는 장목만 및 마산만 시험수(Test water)와 처리수(Treated water)에 대해서 생사판별을 수행하였고, 5일 후에는 장목만 비처리수와 처리수에 대해서 다시 생사판별을 실시해서 대상생물군이 처리 효율을 제

평가 하였다. 처리수 내 생존해 있는 10-50 µm 크기 생물 생사판별 시 보다 많은 양을 검경하기 위해 처리수 10 L를 5 µm 망목 네트로 여과·농축한 다음 분석하였다.

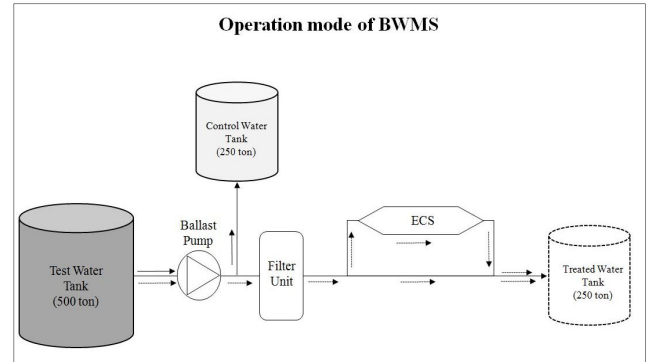


Fig. 2. Ballast Water Management System (BWMS) operating mode at initial test.

2.3 생사판별법

최근에 개정된 미국형식승인(USCG Phase II)에서 10-50 µm 크기 생물에 대한 기준을 보면, 개체 사멸에 관해서는 IMO D2 규정에 비해 1000배 강화된 규정을 제시하였으나, 결과 도출을 위한 분석 방법에 대해서는 명확하게 언급하고 있지 않다. 본 연구에서는 보편적으로 널리 사용되고 있는 Fluorescein diacetate(FDA) 염색법(Garvey et al., 2007; Baek and Shin, 2009; Hyun et al., 2014)과 자가형광(Autofluorescence) 관찰 방법(Tang et al., 2007)을 비교해서 상대적으로 효율이 좋은 방법을 선정한 후 시험에 적용하였다. 먼저 FDA 염색 시약은 FDA(10209CE, Sigma-Aldrich) 시약 100 mg을 25 mL 갈색 암병에 넣은 후, 20 mL의 dimethylsulfoxide(DMSO)와 혼합해서 표준용액을 조제하였다(Baek and Shin, 2015). 조제된 표준용액을 400배 희석한 후 시료 1 mL에 25 µL를 넣어서 약 15분간 암상 상태에서 시료와 염색약을 반응을 시킨 다음 형광현미경(Axioplan II, Carl Zeiss, Germany) blue excitation filter(excitation: 450-490nm, emission: ≥520 nm) 하에서 염색 유무를 관찰하였다. 자가형광관찰도 FDA와 동일한 파장대에서 수행하였다. 생사판별은 Sedgewick-Rafter counting chamber에 농축된 시료를 100~200 µL 분주하여 5분간 침강시킨 후 200배 배율로 동정 및 계수하는 방법으로 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 FDA 염색법 및 자가형광관찰법

생물 사멸 시험 전에 10-50 µm 크기의 살아 있는 생물에 대한 FDA 염색법과 자가형광관찰법 효율을 확인해 보았다

(Table 2, Fig. 3 and 4). 동계의 마산만 동일 시료를 이용하였음에도 불구하고 전체적으로 FDA 염색법($177 \pm 116 \text{ cells mL}^{-1}$) 보다는 자가형광관찰법($497 \pm 59 \text{ cells mL}^{-1}$)에서 살아 있는 생물수가 2배 이상 높게 나타났다. 특히 FDA 염색법은 체인을 형성하는 규조류인 *Chaetoceros* spp., *Skeletonema costatum*-like species, *Thalassiosira* spp.에서 자가형광관찰법보다 살아 있는 개체수가 적게 나타났는데, 이는 FDA 특유의 녹색 형광을 적색형광이 간섭하는 현상이 강하게 나타났기 때문이다(Fig. 4a-4c). Hyun et al.(2014)의 연구에서도 특정 대형종(e.g. *Ditylum brightwellii*)을 제외하면 FDA 염색 효율이 90% 이하이며, 특히 *Chaetoceros affinis*를 제외한 *Chaetoceros* spp., *Cylindrotheca closterium*, *Pseudo-nitzschia* spp. 등은 40% 이하라고 보고하였다. 또한 Hyun et al.(2014)과 Baek and Shin(2015)은 *S. costatum*-like species 는 FDA 염색이 잘 되지 않는다고 보고하였다. 따라서 FDA 염색법은 염색 효율이 낮을 것으로 판단되어, 본 연구에서는 자가형광관찰방법을 생물사멸효율 판별을 위한 생사판별방법으로 선택·적용 하였다.

Table 2. List of 10-50 μm organisms and their response to vital stain fluorescein diacetate assay (FDA) and autofluorescence (AF)

10-50 μm marine organism	FDA			AF		
	1	2	3	1	2	3
BACILLARIOPHYCEAE						
<i>Asterionellopsis glacialis</i>				+		+
<i>Chaetoceros</i> spp.		+	+++	+	+++	+++
<i>Cylindrotheca closterium</i>				+		+
<i>Eucampia zodiacus</i>				+		
<i>Navicula</i> spp.						+
<i>Odontella longicruris</i>			+			++
<i>Pleurosigma</i> spp.				+		
<i>Pseudo-nitzschia</i> spp.				++	+++	+
<i>Skeletonema costatum</i> like species	+		+	+		+++
<i>Thalassiosira</i> spp.	+		++	+++	++	++
DINOPHYCEAE						
<i>Gyrodinium spirale</i>				+		
<i>Protoperidinium</i> spp.	+			+	+	
<i>Scrippsiella trochoidea</i>	+	+	+			
Unidentified dinoflagellate				++	++	++
≥ 10 and $< 50 \mu\text{m}$ phytoplankton (Unidentified)	+					
EUGLENOPHYCEAE						
<i>Euglena</i> spp.			+++			
≥ 10 and $< 50 \mu\text{m}$ live cell abundance (cells mL^{-1})	70	160	300	430	520	540

Notes: +, 1~50 cells mL^{-1} ; ++, 51~100 cells mL^{-1} ; +++, > 101 cells mL^{-1} .

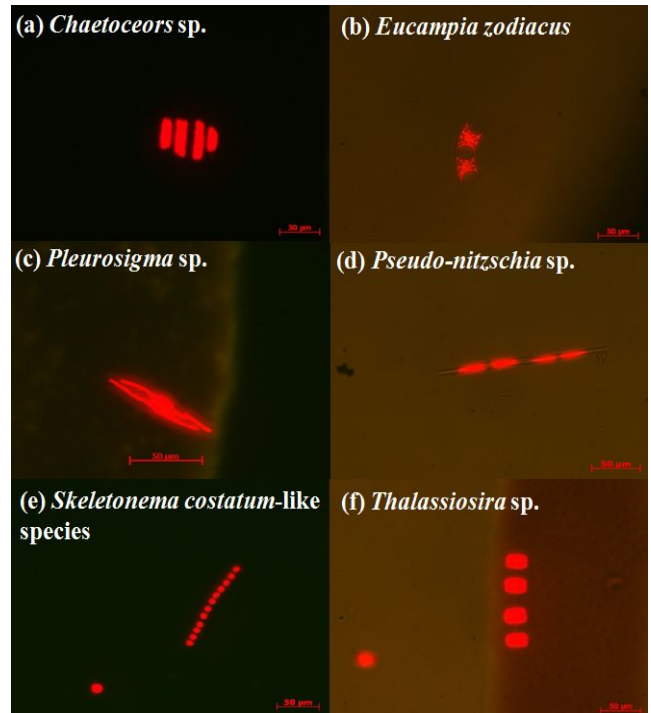


Fig. 3. Autofluorescence image of live 10-50 μm phytoplankton.

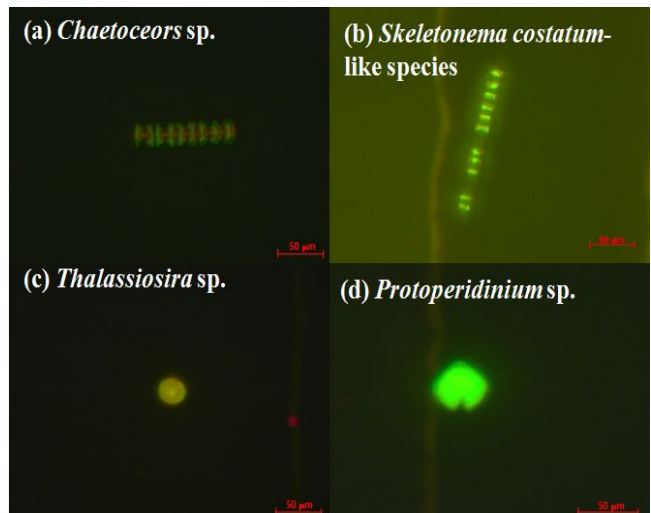


Fig. 4. Live picture of 10-50 μm phytoplankton stained with FDA.

3.2 자연생물군집 농축

장목만 농축 시료에서 10-50 μm 크기 생물 군집 조성을 확인해 본 결과 3문 11종이 출현하였으며, 전반적으로 규조류가 다른 분류군에 비해 높은 점유율을 보였다. 특히 동계 낮은 수온(7~10°C)에도 불구하고 *S. costatum*-like species가 극우점 출현하였다(Table 3). 장목만 조사 7일 뒤, 마산만에서 10-50 μm 크기 생물을 채집 및 농축한 결과, 3문 12종이 출현

하였고, 장목만과는 다르게 외편모조류가 극우점하는 경향을 보였다(Table 3). 특히 *Heterocapsa triquetra*가 전체 군집의 70% 이상으로 극우점 출현하였다.

Table 3. The species list of net harvested sample in Jangmok Bay (JM) and Masan Bay (MS)

Phylum	Species	JM	MS
Bacillariophyta	<i>Chaetoceros compressus</i>		*
	<i>Chaetoceros diadema</i>	*	
	<i>Chaetoceros</i> spp.	*	*
	<i>Cylindrotheca closterium</i>	*	
	<i>Eucampia zodiacus</i>	*	*
	<i>Nitzschia</i> spp.	*	*
	<i>Pleurosigma</i> sp.		*
	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp.	*	*
	<i>S. costatum</i> - like species	**	
	<i>Thalassiosira essentrica</i>	*	
	<i>Thalassiosira rotula</i>		
	<i>Thalassiosira</i> sp.		*
	Miozoa	<i>Alexandrium tamarense</i>	*
<i>Akashiwo sanguinea</i>			**
<i>Heterocapsa triquetra</i>			**
<i>Oxyphysis oxytoxoides</i>			*
<i>Protoperidinium</i> spp.			*
Unidentified dinoflagellate		*	
Euglenophyta	<i>Eutreptiella gymnastica</i>	*	
Ciliophora	<i>Helicostomella</i> sp.		*

** dominant species

장목만에서 채집 및 농축한 10-50 μm 크기 생물의 개체수 밀도는 $4.7 \times 10^4 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 마산만($0.8 \times 10^4 \text{ cells mL}^{-1}$)보다 높았으며, 살아 있는 생물의 비율도 장목만이 90.4%로 88.0%인 마산만보다 높게 나타났다(Fig. 5a, 5b). 장목만에서 농축한 시료의 현존량이 마산만 시료보다 약 5배 정도 높은 이유는 장목만에서 우점한 *S. costatum*-like species 세포 체적이 마산만에서 우점 출현한 *Akashiwo sanguinea*와 *H. triquetra*의 1/2 - 1/8에 해당되며, 또한 *S. costatum*-like species는 체인을 형성해서 높은 개체수 밀도를 유지할 수 있기 때문으로 사료된다. 마산만 해역에서는 채집 당시 외편모조류와 함께 크기가 $<10 \mu\text{m}$ 보다 작은 은편모조류를 포함한 편모조류가 매우 높은 밀도로 존재해서 네트를 이용한 생물 농축 시 농축 효율을 떨어뜨려 10-50 μm 크기 생물 개체수 밀도가 낮게 나타난 것으로 판단된다. 결과적으로 각 해역에서 우점 출현하는 종조성 차이로 인해 네트를 이용한 농축 효율이 다르

게 나타날 수 있음을 확인할 수 있었다. 아울러 우점 출현하는 종조성 차이는 생물 활성 측면에서 사멸률에 영향을 미칠 수 있다. 특히, 대부분의 종들이 유영능력을 갖고 있지 않은 규조류와 비교하여 유영능력이 활발한 외편모조류를 높은 밀도로 농축하였을 경우 유영능력이 떨어지게 되며, 이는 생물 사멸에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서 마산만과 같이 크기가 작은 소형 편모조류 및 외편모조류가 높은 밀도로 존재를 하는 해역에서 자연중 농축을 수행하기 위해서는 망목 크기를 현행 20 μm 에서 $>30 \mu\text{m}$ 로 크게 해서 네트로 유입되는 해수의 여과율을 증가시켜야만 네트 막힘으로 인한 여과율 손실을 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 또한 대부분이 편모를 가지고 있는 식물플랑크톤인 점을 고려하였을 때 농축 시료 보관 시 보관 용기 내 농축 밀도 또한 낮게 유지할 필요성이 있을 것으로 판단된다.

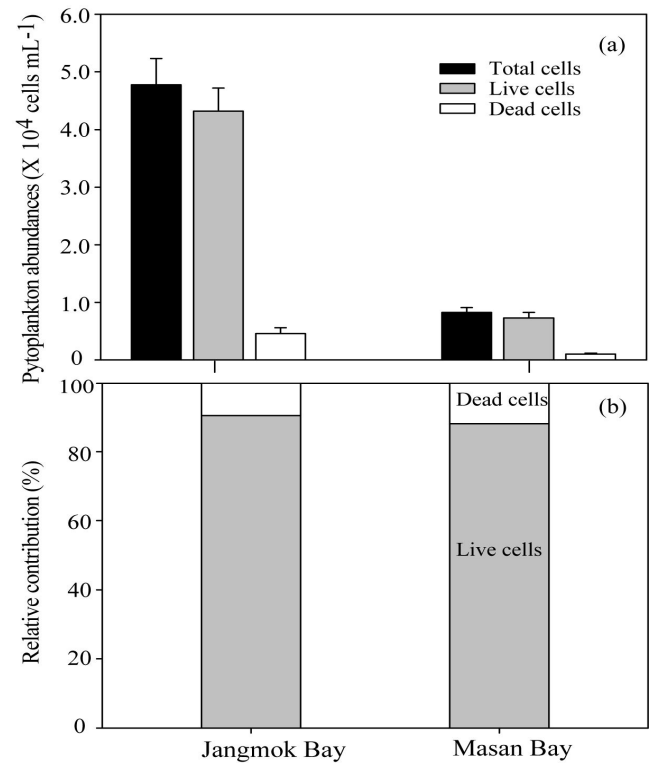


Fig. 5. Total abundances (a) and relative contribution (b) of net harvested sample during winter season in Jangmok Bay and Masan Bay.

3.3 생물사멸시험

마산만과 장목만 농축 시료를 대상으로 BWMS이 생물사멸 효율을 평가하였다(Table 4). 500톤 시험수 탱크 내 10-50 μm 크기 살아 있는 생물 농도를 보면, 마산만 농축 시험수는 $62 \pm 7 \text{ cells mL}^{-1}$ 이고, 장목만 농축 시험수는 $562 \pm 18 \text{ cells mL}^{-1}$ 로

나타났다. 마산만 및 장목만 농축 시험수 모두 USCG Phase II의 10-50 μm 크기 시험 생물 개체수($>1.0 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$) 조건을 충족하지 못하였다. 본 결과는 생물량이 낮을 것으로 예측되는 동계에 1척의 선박을 이용해서 약 8시간 정도 채집 과정을 통해서 얻어진 결과로, 체인을 형성하는 규조류가 우점한 장목만 농축 시료인 경우 시험수 기준의 1/2 수준의 개체수 밀도를 보여서 추가적으로 1척의 선박을 더 이용해서 생물 농축을 수행 한다면 시험수 조건을 만족시킬 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 와편모조류 및 $<10 \mu\text{m}$ 보다 작은 편모조류가 우점한 마산만 농축 시료인 경우 시험수 기준이 1/15 수준에 미쳐, 추가적으로 드립스크린 방식과 같이 생물을 대량으로 농축할 수 있는 방법이 병행되어야 할 것으로 판단된다. 드립스크린 방식은 드립 크기에 따라 여과량은 변하지만, 일반적으로 가로×세로가 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 인 드림인 경우 시간당 해수 160톤 여과를 통해 크기가 $16 \mu\text{m}$ 이상이 생물을 고밀도로 농축할 수 있다고 보고되고 있다(www.fishvil.com). 하지만 드립디스크 방식은 이동이 용이하지 않아서 드립디스크가 설치된 해역 생물 농도에 의존을 해야 하는 단점이 존재한다. 따라서 채집 해역 내 생물 밀도가 낮거나 혹은 생물상이 네트를 이용한 농축에 적합지 않을 경우 추가적으로 드립디스크 방식을 이용해서 생물을 농축한다면 보다 효과적으로 USCG Phase II 형식승인 시험수 생물 농도 조건을 충족시킬 수 있을 것으로 판단된다.

시작 시험 시 BWMS를 거친 처리수와 시험수에 살아 있는 생물 개체수 밀도를 비교해서 생물사멸효율을 확인해 보았다 (Table 4; Fig. 6). 마산만 Day 0 처리수내 살아 있는 개체수 밀도는 $7 \pm 3 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 초기 생물사멸효율은 89.9%이며, 장목만 Day 0 처리수내 살아 있는 개체수 밀도는 $58 \pm 18 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 초기 생물사멸효율은 90.6%로 나타났다. 전반적으로 처리 당일에도 불구하고 BWMS의 장비를 통과한 생물은 대부분 사멸하여 장비의 처리효율이 좋은 것으로 확인되었다. 장목만 농축시료를 대상으로 BWMS처리 5일 경과 후 비처리수와 처리수의 살아 있는 생물 개체수 밀도를 파악하였다. Day 5 비처리수 생물 농도는 시작 시험 시 시험수 내 생물 농도와 유사한 $552 \pm 94 \text{ cells mL}^{-1}$ 이며, day 5 처리수에서는 $1.3 \pm 1.4 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 약 99.8%의 높은 생물 사멸 효율을 보였다. Day 5 비처리수에서 10-50 μm 크기 생물의 높은 생존율은 네트를 이용한 생물 농축 방법이 대상 생물 군집이 활성을 크게 저하시키지 않는다는 것을 의미한다.

현재 IMO 기준을 만족하는 BWMS 시장은 약 80조원으로 예측하고 있으며, USCG Phase II와 같이 기준을 강화하면 처리설비의 고도화가 발생해서 시장 규모는 더욱 커질 것으로 예측된다. 2010~2014년까지 우리나라 BWMS 개발 기업은 총 2,569척의 선박에 BWMS를 설치해서 1조 4,425억이 매출

Table 4. Comparison of results from live 10-50 μm organisms between before and after treatment

Source water	Test cycle	Sample ID	Sampling	Live cell abundance (cells mL^{-1})	
MS	Initial Test	Test water	20 %	67	
			50 %	64	
			80 %	54	
			Mean \pm SD	62 ± 7	
			20 %	4	
	Treated water (Day 0)	50 %	7		
		80 %	10		
		Mean \pm SD	7 ± 3		
		Initial Test	Test water	20 %	678
				50 %	611
80 %	468				
Mean \pm SD	562 ± 103				
20 %	39				
Treated water (Day 0)	50 %	61			
	80 %	74			
	Mean \pm SD	58 ± 18			
	Final Test	Control water (Day 5)	20 %	527	
			50 %	473	
80 %			657		
Mean \pm SD			552 ± 94.3		
20 %			0.16		
Treated water (Day 5)	50 %	2.85			
	80 %	0.78			
	Mean \pm SD	1.3 ± 1.4			

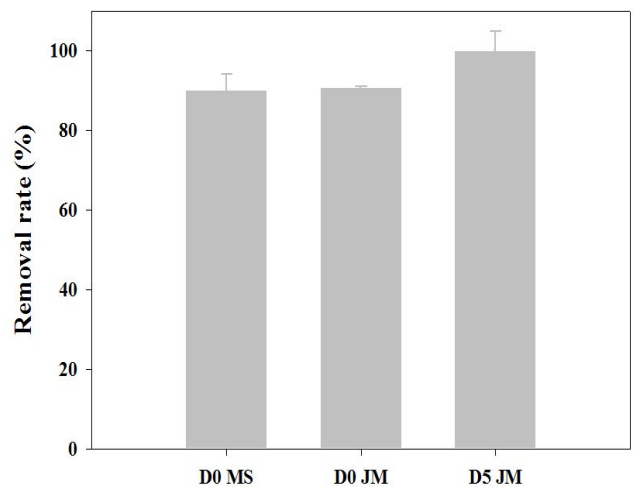


Fig. 6. Removal rate (%) in D0 (Day 0) and D5 (Day 5) samples treated by ballast water management system (BWMS). Note: Jangmook Bay (JM), Masan Bay (MS).

을 달성하였으며, 시장 점유율도 55%로 세계 1위이다 (해양수산부). 따라서 선박평형수처리설비 글로벌리더로서 지속적인 성장을 위해선 현재의 IMO 기준과 더불어 보다 강화된 기준인 USCG Phase II를 만족시킬 수 있는 BWMS 개발과 함께, 이를 체계적으로 평가·관리하는 시스템 구축이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 자연 생물 군집을 75% 이상으로 유지해야 하는 USCG Phase II 시험수 조건 품질관리 일환으로, 2015년 1월에 국가공인 육상시험설비와 인접한 장목만과 마산만에서 각각 2명이 조사 인원이 참여해서 약 6~8시간 동안 10-50 µm 크기의 생물을 채집·농축하였다. 결과적으로 동계의 낮은 개체수 밀도가 원인이 되어 제한된 시간에 500톤에 $>1.0 \times 10^3 \text{ cells mL}^{-1}$ 의 시험수를 조성할 수 없었으나, 5일 동안 생물활성이 지속적으로 높게 유지되는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 특정 해역 내 우점하는 생물군집에 따라서 네트를 이용한 생물 농축효율이 달라질 수 있었고, 특히 체인을 형성하는 규조류가 높은 밀도로 존재하는 해역에서는 2척이 선박을 이용해서 4명의 인력으로 약 6~8 시간을 네트를 이용한 생물을 농축할 경우 USCG Phase II 육상시험 시험수 기준을 충족할 수 있을 것으로 판단된다. 반면에 와편모조류 및 <10 µm보다 작은 은편모조류를 포함한 편모조류가 매우 높은 밀도 존재하는 해역에서는 크기가 작은 생물로 인해 네트 농축 효율이 크게 저하되기 때문에 네트를 이용한 생물 농축과 더불어 메조코즘 및 드립디스크 생물농축방식을 같이 병행해서 활용할 수 있는 방안이 필요할 것으로 판단된다. 결과적으로 본 연구를 통해서 네트를 이용한 10-50 µm 크기의 생물 농축으로 USCG Phase II 육상시험 시험수 기준을 충족할 수 있다는 가능성을 시사할 수 있었다. 본 연구 결과는 향후 USCG Phase II 시험을 위한 시험수 조성 및 매뉴얼 구축에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 해양수산부 과제(PM59300)에 의해 수행되었습니다.

References

[1] Baek, S. H. and K. Shin(2015), A staining method to determine marine microplanktonic organism viability and

investigate the efficacy of a ship's ballast water treatment system, Journal of Korea Academia Industrial Cooperation Society, Vol. 16, pp. 4328-4334.

[2] Garvey, M., B. Moriceau and U. Passow(2007), Applicability of the FDA assay to determine the viability of marine phytoplankton under different environmental conditions, Marine Ecological Progress Series, Vol. 352, pp. 17-26.

[3] Hyun, B., K. Shin, H. C. Chung, S.-Y. Choi, M.-C. Jang, W.-J. Lee and K.-H. Choi(2014), Application of Neutral Red Staining Method to Distinguishing Live and Dead Marine Plankton for the Investigation of Efficacy of Ship's Ballast Water Treatment System, Journal of the Korean Society of Oceanography, Vol. 19(4), pp. 223-231.

[4] IMO(2001), Report on the ballast water treatment standards workshop, In 1st International ballast water treatment standards workshop, IMO London, pp. 28-30 March, <http://globallast.Imo.org/workshopreport.htm>, 2001.

[5] Kang, J. H., B.-G. Hyun and K. Shin(2010), Phytoplankton viability in ballast water from international commercial ships berthed at ports in Korea, Marine Pollution Bulletin Mar. Pollut. Bulletin, Vol. 60, pp. 230-237.

[6] Kim, E.-C.(2012), Consideration on the Ballast Water Treatment System Technology and its Development Strategies, Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, Vol. 15(4), pp. 349-356.

[7] Miller, A. W., M. Frazier, G. E. Smith, E. S. Perry, G. M. Ruiz and M. N. Tamburri(2011), Enumerating sparse organisms in ships' ballast water: Why counting to 10 is not so easy, Environmental Science and Technology, Vol. 45, pp. 3539-3546.

[8] Tang, Y. Z. and F. C. Dobbs(2007), Green autofluorescence in diatoms, diatoms, and other microalgae and its implications for vital staining and morphological studies. Applied Environmental Microbiology, Vol. 73, pp. 2306-2313.

Received : 2016. 05. 24.

Revised : 2016. 07. 29. (1st)

: 2016. 08. 21. (2nd)

Accepted : 2016. 08. 29.