

USCG phase-II 선박평형수 처리장치 성능 평가를 위한 자연 해수의 동물플랑크톤 대량 확보 및 생사판별

장민철¹, 백승호¹, 신경순^{1*}
¹한국해양과학기술원 남해연구소

Viability test and bulk harvest of natural zooplankton communities to verify the efficacy of a ship's ballast water treatment system based on USCG phase-II

Min-Chul Jang¹, Seung Ho Baek¹, Kyoungsoon Shin^{1*}

¹South Sea Institute, Korea Institute of Ocean Science & Technology

요약 USCG Phase-II 규정에 근거한 형식승인 시험은 전체 시험수에서 자연상태 생물군집이 75% 이상을 차지해야만 하며, 이러한 기준을 충족하기 위해 장목만과 마산만에서 Bongo네트를 이용해서 자연 해수의 동물플랑크톤 군집을 채집하였다. 장목만과 마산만에서 1톤으로 생물을 농축하였을 경우, 동물플랑크톤의 현존량은 각각 1.8×10^7 ind. ton⁻¹ 과 2.3×10^7 inds. ton⁻¹ 으로 나타났고, 살아 있는 생물 비율은 장목만이 82.6%로 마산만의 80.1%보다 약간 높게 나타났다. 특히 두 해역에서 동계에 출현한 동물플랑크톤의 군집조성은 유사하였고, 요각류 *Acartia* 속의 성체과 미성숙체가 극우점하는 양상을 보였다. 500톤 규모로 희석된 Test water에서 >50 μ m 크기 생물의 총 개체수 밀도는 장목만과 마산만에서 유사하게 6.0×10^4 ind. ton⁻¹ 로 관찰되었으나, 생물의 사멸율은 장목만 시료보다 마산만에서 12% 높게 나타났다. 동일 방법으로 수행하였음에도 불구하고 마산만이 사멸률이 높은 이유는 우점하는 *Acartia* 속의 미성숙 개체가 장목만에서 관찰된 현존량보다 30% 높게 나타났고, 미성숙체는 인위적인 채집 및 이송과정에서 일정한 지속적인 스트레스를 받아 사멸하였을 가능성이 높다. 장목만에서 BWTS 처리 당일과 처리 5일 경과 후, BWTS처리군의 생물은 100% 사멸되어, 처리장비의 성능을 검증할 수 있었다. 결과적으로 동계와 같이 낮은 생물현존량이 존재할 경우, 주간 6-7시간 수행한 네트의 생물농축만으로는 USCG Phase II의 형식승인 기준인 500톤 탱크에 10×10^4 ind. ton⁻¹ 이상으로 >50 μ m 자연생물 개체수를 만족시키는 것은 쉽지 않았고, 이를 보완하기 위해서는 선박을 추가하는 등의 현실적인 대안이 필요할 것으로 판단되었다.

Abstract We investigated >50- μ m marine planktonic organisms (mainly zooplankton) using a bongo net in Masan Bay and Jangmok Bay in order to harvest 75% of natural communities based on Phase-II approval regulations by the United States Coast Guard (USCG). The concentrated volume (in 1 ton) and abundance of zooplankton were 1.8×10^7 ind. ton⁻¹ and 2.3×10^7 ind. ton⁻¹, and their survival rates were 82.6% and 80.1%, respectively. The community structure in Jangmok Bay was similar to that in Masan Bay, and dominant species were adult and immature groups (stage IV) of genus *Acartia*. Harvested populations were inoculated in a 500-ton test tank. Although the population abundances were 6.0×10^4 ind. ton⁻¹ for both bay samples, the mortality rates were higher in the Masan Bay population (32%) than the Jangmok Bay population (20%). We considered the reason to be that there were 30% more immature individuals of *Acartia* from Masan Bay than from Jangmok Bay. The younger population may have been greatly stressed by the moving process and netting gear. After applying a Ballast Water Treatment System (BWTS) using a sample from Jangmok Bay, the mortality rates in the treatment groups were found to be 100% after 0 days and 5 days, implying that the BWTS worked well. During the winter season, the zooplankton concentration method alone did not easily satisfy the approval standards of USCG Phase II (> 10×10^4 ind. ton⁻¹ in the 500 ton tank). Increasing the netting frequency and additional fishing boats may be helpful in meeting the USCG Phase II biological criteria.

Keywords : Zooplankton, Natural harvest, Ship's ballast, Viability, USCG Phase-II

본 논문은 KIMST사업 [PM57480]으로 수행되었음.

*Corresponding Author : kyoungsoon Shin (Korea Institute of Ocean Science & Technology)

Tel: +82-55-639-8510 email: ksshin@kiost.ac

Received October 14, 2015

Revised (1st December 8, 2015, 2nd March 2, 2016)

Accepted March 3, 2016

Published March 31, 2016

1. 서론

선박은 전 세계 무역 물동량의 80%이상을 수송하면서 선박평형수를 연간 50-100억톤 규모로 이송시켜, 약 7000여종의 미생물, 수생생물 및 동·식물플랑크톤을 옮기는 것으로 알려져 왔다[1]. 선박평형수에 이송된 대부분의 생물은 배출되는 해역 환경에 적응하지 못하여 사멸되지만, 일부 내성이 강한 종은 살아남게 되어 항만 고유 생태계를 교란시키는 부작용을 유발하고 있다[2]. 따라서 국제해사기구(IMO: International Maritime Organization)에서는 이와 같이 선박평형수에 포함되어 있는 수생생물이 다른 지역으로 옮겨져 생태계 파괴 및 교란시키는 것을 사전에 방지하기 위해서 “선박평형수와 침전물 통제 및 관리 협약”을 2004년에 채택하였고, 회원국의 비준을 받아 발효 및 이행을 앞두고 있다. 협약의 주요 골자는 국제 기준에 맞게 선박평형수를 처리할 수 있는 선박평형수처리 장치(BWTS:Ballast Water Treatment System)를 개발하여 생물을 제거 및 사멸시킨 후 배출할 수 있도록 하는 것이다. 아울러 협약의 각 분야별 업무분장을 구분하여 G1-G14의 세부지침을 두었고, 그 중 G2의 평형수 시료 채취에 관한 지침의 세부항목으로 D-2 regulation을 두어, 각 생물군 크기에 따른 배출기준을 제정하였다. 또한 이들 기준에 맞게 선박평형수 형식승인(G8) 기준을 정리하였다.

선박평형수 관리협약의 원활한 이행을 위해서는 선박평형수 처리장치개발, 항만내 생물검사, 선박평형수 및 침전물에 대한 수용시설확보, 선박평형수 교환 등이 중요하게 작용할 수 있지만, 원천적으로 외래생물 유입을 차단할 수 있는 방법으로는 BWTS의 개발이 무엇보다 시급하다. 아울러, 처리장치와 관련된 핵심기술로는 살아 있는 생물을 효과적으로 처리하고, 그들 생물의 생물사멸 여부를 정량적으로 제시하여 장비 성능을 명확하게 평가하여야만, IMO 형식승인을 받을 수 있다. 형식승인에 관하여 D-2 규정을 구체적으로 살펴보면, 선박평형수 처리장치 평가를 위한 육상시험에서 >50 μm 크기 생물군은 배양생물이나 자연생물군집에 관계없이 3문(Phylum) 5종(species) 이상 존재할 것과 함께 일정의 개체수 밀도(>1.0 $\times 10^5$ inds. ton⁻¹)를 유지하도록 시험수를 규정하고 있다. 이러한 IMO 규정을 충족시키기 위해서 대부분 형식승인 시험기관에서는 자연해수와 함께 고밀도의 배양생물(예: 알테미아)을 희석하여 시험수 개체수 밀도를 충족시키고 있다.

반면 IMO D-2기준보다 1000배 강화된 USCG(U.S Coast Guard) phase-II 형식승인기준에서는 자연 해수 및 담수에 실제로 존재하지 않거나 일부지역에 국한되어 소량 출현하는 생물을 고밀도로 사육하여 시험수로 활용하는 것을 엄격히 규제하기 위하여 시험수내 자연계에서 실제 존재하는 생물군집을 75% 이상 유지하도록 하는 새로운 시험수 조건을 추가하려고 한다[3]. 따라서 USCG phase-II 형식기준을 충족하는 육상시험을 수행하기 위해서는 높은 밀도의 자연생물군집을 확보하는 것이 무엇보다 중요하다고 하겠다. 결과적으로 해양에서 >50 μm 자연 생물을 얻기 위해서는 네트 등과 같은 도구를 이용하여 고밀도의 자연생물시료를 확보한 후 BWTS시험수의 생물농도를 맞추는 방법이 중요하다고 할 수 있다.

선행된 현 등[4]의 연구에서는 10-50 μm 의 크기의 생물군에 해당되는 식물플랑크톤에 관해서 구체적으로 언급하였다. 본 연구에서는 >50 μm 에 해당되는 동물플랑크톤 군집에 관해서 자연생물군집 시료를 확보하여 BWTS 시험수로 활용 가능여부를 평가하고자 하였다. 자연생물을 채집하여 BWTS시료를 확보하는 방법으로는 출현하는 생물 개체수의 계절적 차이와 시·공간적인 생물분포 패턴의 차이 등과 같은 다양한 문제점이 존재한다. 이러한 문제점을 고려하여, 연중 생물의 서식환경이 좋지 않은 동계의 조건에서 >50 μm 의 생물군이 USCG(U.S Coast Guard) phase II 형식승인에 대비한 기준을 충족하는지 알아보고자 하였다.

2. 재료 및 방법

USCG(U.S Coast Guard) phase-II 형식승인에 대비하여 적합한 BWTS장비의 성능검사를 위해서, >50 μm 자연생물을 70% 이상 유지하는 것이 중요하다. 이들 >50 μm 해양생물 채집은 국가공인 육상시험설비가 위치한 한국해양과학기술원 남해연구소에 인접한 거제시 장목만과 부영양화 현상이 장기적으로 지속되는 수계이면서 부유생물 개체수 밀도가 매우 높은 창원시 마산만 내측에서 2015년 1월15일과 22일에 각각 수행하였다.

해양 자연생물 채집은 한국해양과학기술원 연구선 “장목1호”를 이용하였고, 조사는 오전 9시에서 오후 4-5시까지 수행되었다. >50 μm 해양생물 채집(주로 동물플랑크톤)은 네트 막힘 현상이 나타나지 않고, 채집 효율을 높이기 위해 망목 200 μm 의 네트(망구 60cm, 길이 3m)

가 두 개 장착된 Bongo 타입의 네트를 이용하여 채집하였다[Fig. 1]. BWTS장비의 성능검사를 위한 채집은 망목 200 μm 네트를 이용하였고, 200 μm 이하의 생물은 채집되지 않는 단점이 있다. 이를 고려하기 위해 만약 50 μm 망목 크기의 네트를 이용할 경우 일정량 생물농축이 되면 네트가 훼손될 가능성이 매우 높을 뿐만 아니라, 지속적인 네트 세척을 반복하여야 하는 번거로움과 함께 다양한 생물을 효율적으로 채집하기에는 적합하지 않을 것으로 판단되었다. 따라서 해수 여과효율 증대와 동시에 생물채집 횟수를 늘리는 것이 다양한 생물을 농축하기에 합리적인 방법이라 판단되어, 200 μm 망목의 네트를 이용하였다.

생물을 대량으로 채집하기 위해서는 채집시 네트가 바닥에 가라앉는 것을 방지하는 것이 중요하며, 그렇게 하기 위해서는 네트 프레임에 부유할 수 있는 부이를 장착하여 생물이 상대적으로 높은 표층부에서 채집하는 것이 유리하다. 아울러 채집 시 망목의 막힘 현상으로 네트의 파손을 방지하기 위해서 선박 항해 속도는 2노트 이하로 유지하였다. 또한 네트 입구에 유속계 (Hydro-Bios Kiel, Model 438115)를 부착하여 네트를 통하여 여과되는 해수의 량을 측정하여, 총 대량 농축된 생물량을 산출하였다. 특히 동계 생물밀도가 상대적으로 낮게 유지되는 시기에 대량 생물농축 정도를 평가하는 것은 실제 다른 계절에 BWTS 장비를 평가할 경우, 채집시간을 파악할 수 있는 기초자료로 활용 가능하다. 아울러, 이와 같은 자료 산출은 >50 μm 생물 농축효율을 체계적으로 관리하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

네트작업(플랑크톤 네트로 예인)은 일괄적으로 약 5분 동안 수행하였고, 네트를 선상으로 올리기 전 해수로 네트를 깨끗하게 세척한 후 선상에서 네트 끝부분 cod-end를 분리하였다. 그 후 BWTS설비 평가에 비효율적인 크기의 생물군, 부유물 및 해파리를 제거할 수 있도록 플라스틱 여과망을 통과시킨 후 버킷에 모아 신속하게 1톤 탱크에 옮겼다. 특히 1톤 탱크에는 농축된 시료의 지속적인 생물 활성을 유지할 수 있도록 사전에 일정량의 해수를 채워, 에어펌프를 이용하여 공기를 공급하였다. 결과적으로 5분간 생물채집 후, 시료 처리, 다음 채집준비 등의 순서로 이루어진 일련의 채집과정을 수행하는데 소요되는 시간은 약 13-15분이 소요되었으며, 1시간 당 4-5회 채집이 가능하였다.

각 조사해역에서 >50 μm 해양생물 채집이 완료된 후

한국해양과학기술원 남해연구소 부두에 오후 5시경에 입항하였다. 입항 즉시, 자연생물 시료가 담긴 1톤 탱크를 크레인을 이용하여 부두로 하역하였고, 다시 지게차를 이용하여 형식승인 육상시험설비로 옮겼다.

현장조사 후 육상시험설비에서 시험수 조건에 부합되는지 평가하기 위해 장목만(1/15)과 마산만(1/22)해역에서 채집된 시료를 매 항차별 1톤 용기를 균일하게 혼합하여 >50 μm 자연생물 개체수 및 종조성을 실제 현미경 (Zeiss, SV11, Germany)으로 1차적으로 관찰하였고, 총 개체수 및 생물사망 개체수를 산출하였다. 아울러, 육상시험설비 500 톤 탱크에 자연해수를 주입하고 난 후, 농축된 1톤 시료를 넣고, 시험수(Test water)내 >50 μm 동물플랑크톤 개체수, 종조성 및 생물 사망률을 산출하였다.

그 후 “테크로스” 업체에서 개발한 BWTS 장비를 가동시켜 실제로 대조군과 처리군에서 어떻게 처리되고 있는지 >50 μm 생물의 처리효율을 평가하였다. 특히 장목만에서 채집한 시료를 대상으로 BWTS처리 5일 경과 후 생물 생사판별 및 생물활성을 평가하였다. 각 실험군 동물플랑크톤 군집조성과 현존량 분석을 위해 35 μm 네트로 1톤 해수를 현장에서 농축한 후, Bogorove 계수판에 10 mL의 농축 시료를 분주하여 실제현미경 (Zeiss, SV11)으로 3회 반복 관찰하였다.

상기에서 언급된, >50 μm 생물 생사판별은 해부현미경하에서 뾰족한 침으로 자극하여 움직임이 없는 생물을 죽은 것(사망률)으로 간주하여 평가하였다[5].

3. 결과 및 고찰

2015년 1월 15일에 실시된 장목만 채집은 오전 10시부터 오후 4시 30분까지 총 25회 이루어졌으며, 네트를 통과한 여과된 해수의 총량은 2,629톤으로 나타났다 [Table 1]. 아울러 마산만에서 수행된 채집 작업은 오전 10시 30분부터 오후 3시 30분까지 총 23회 수행되었고, 총 여과량은 2,978톤으로 장목만보다 조금 높게 나타났다.

Table 1. The list of net harvesting in Jangmok Bay(JM) and Masan Bay(MB).

Location	Towing frequency	Volume of filtered seawater (ton)
JM	25	2629
MB	23	2978

각 항차별 1톤 용기에서 농축한 생물량을 평가한 결과, 채집된 >50 μm 자연시료에서 동물플랑크톤 종조성은 장목만에서 5문 15종이 출현하였고, 마산만에서 4문 11종이 출현하였다[Table 2].

Table 2. The species list of net harvested sample in Jangmok Bay(JM) and Masan Bay(MB).

Phylum	Species	JM	MB
Dinoflagellata	Noctiluca scintillans		*
Cnidaria	Trachymedusae		*
	Podon leucarti	*	*
	Acartia omorii	**	**
	Acartia steueri	*	*
	Acartia copepodite	**	**
Arthropoda	Centropages abdominalis	*	*
	Centropages copepodite	*	*
	Paracalanus parvus s.l.	**	**
	Corycaeus affinis	*	*
	Oithona spp.	*	*
	Cirriped larvae	*	*
Chaetognatha	Sagitta crassa	*	*
Chordata	Oikopleura dioica	*	*
Mollusca	Gastropod larvae	*	*
Echinodermata	Ophiopluteus larvae	*	*
Other	Fish larvae	*	*

** dominant species

결과적으로 출현하는 종조성 관점에서는 장목만과 마산만 채집 시료에서 3문 5종 이상이 출현하여 IMO 및 USCG phase II의 기준의 시험수 조건을 충족할 수 있었다. 채집 및 농축한 >50 μm 개체수 밀도는 장목만에서 1.8×10^7 ind. ton⁻¹로 관찰되었고, 마산만에서는 2.3×10^7 ind. ton⁻¹으로 장목만의 조사 보다 약간 높게 나타났다[Fig. 1a].

반대로 살아 있는 생물 비율은 장목만에서 82.6%로 마산만 80.1%보다 약간 높게 나타났다[Fig. 1]. 그 중 절지동물에 속하는 요각류 *Acartia omorii* 개체수는 장목만과 마산만에서 각각 8.4×10^6 ind. ton⁻¹과 11.8×10^6 ind. ton⁻¹로 극우점종으로 구분되었다. 특히, 1톤 용기 내 >50 μm 자연시료의 자연사망물은 장목만과 마산만 채집에서 각각 17.4%와 19.9%로 관찰되었다[Fig. 1b]. 이러한 자연생물 사망물은 채집 전 생물활성 순화에 따른 사망, 채집 중 농축된 cod-end에서 일정 유속에 의한 지속적인 압력에 의한 스트레스에 의한 사망, 그리고 1톤 용기 내 고밀도에 의한 사망 등의 환경요인에 의하여 나타난 결과로 사료된다. 결과적으로 USCG phase II 시험수 조건으로 BWTS 설비를 평가하기 위해서는 자연

시료 생물 사망률이 극히 낮게 유지되는 것이 중요하다. 따라서 본 연구를 통하여, >50μm 움직이는 생물군에 대한 자연시료를 확보할 경우, BWTS의 처리 전 단계에서 전체 15-20% 생물 사망을 고려하여, 가능하면 산술적으로 예상된 밀도보다 높은 생물 농축을 수행하는 것이 BWTS처리수 생물기준을 만족시킬 수 있을 것으로 판단된다.

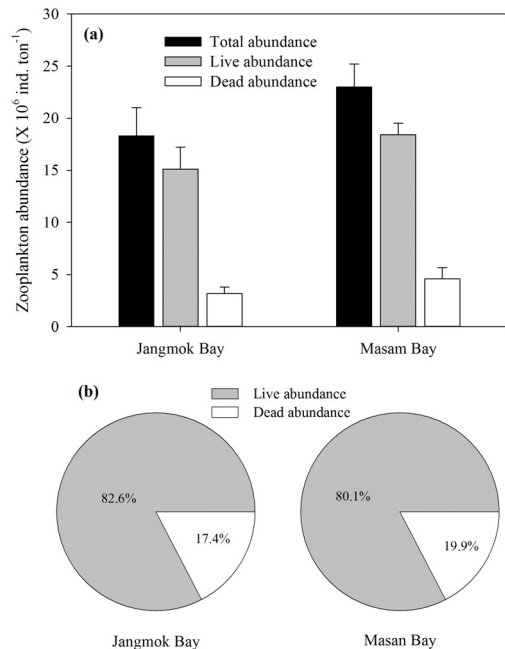


Fig. 1. Total abundances(a) and relative contribution (b) of net harvested sample during winter season in Jangmok Bay and Masan Bay.

현 등[4]의 보고에 의하면, 10-50μm 생물군에 관해서는 움직이지 않는 생물군이 높은 밀도로 차지하고 있으며, 이들 생물군의 대부분은 광합성을 하며, 두꺼운 규산질의 피각으로 구성된 규조류로 확인되었다. 그 결과, 네트에 의한 고밀도 농축에서도 생물의 사망률은 10% 전후로 낮게 관찰되어, >50 μm 생물군보다 생물 사망률이 상대적으로 낮게 유지될 수 있었던 이유라 판단된다. 특히, 유영능력이 없는 규조류와 비교하여 유영능력이 활발한 와편모조류의 농축 비율이 높을 경우, 생물의 사망률이 높게 나타나는 것 또한 움직이는 생물의 종 특이적인 스트레스에서 기인된 것으로 사료된다.

현장에서 농축한 생물을 1톤 용기에서 생물 생사판별

및 전체 개체수 밀도를 1차적으로 확인 후, 장목만 해수를 시간당 250-300톤을 처리할 수 있는 유속으로 배관을 통과시켜 원수탱크(Test water) 500톤에 채웠다. 그 후, 각 항차별 1톤으로 농축된 현장시료를 원수탱크의 용기에 넣고 프로펠러로 혼합(탱크의 내부에 장착됨)한 후 $>50 \mu\text{m}$ 생물 총개체수 밀도와 생물사멸 여부를 평가하였다. 아울러 500톤 원수탱크의 해수를 동시에 BWTS를 처리하지 않은 대조군(Control:250톤)과 BWTS를 처리한 후 처리군(Treatment:250톤) 탱크로 흘러보내 생물 개체수 밀도 및 생물 사멸여부를 2차적으로 평가하였다. 그 결과, 장목만에서 채집된 시료의 Test water에서 $>50 \mu\text{m}$ 동물플랑크톤 총 개체수 밀도는 $6.0 \times 10^4 \text{ ind. ton}^{-1}$ 로 나타났고, 그 중 살아있는 세포가 $4.8 \times 10^4 \text{ ind. ton}^{-1}$ 로 80%의 생존율을 보였다. 반면, 마산만의 시료에서도 총 개체수 밀도는 장목만과 유사하게 $6.0 \times 10^4 \text{ ind. ton}^{-1}$ 으로 나타났으나, 그 중 살아있는 세포가 $4.1 \times 10^4 \text{ ind. ton}^{-1}$ 로 전체의 68%를 차지하였다[Fig. 2].

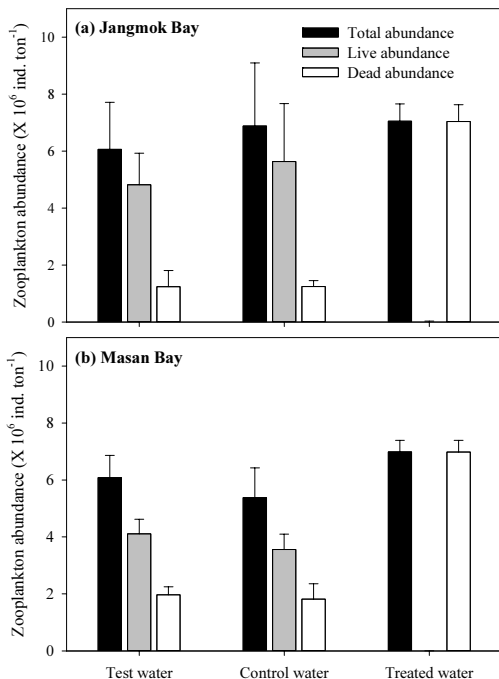


Fig. 2. Changes in total abundances, live cells, and dead cells in each experimental treatments.

여기서 마산만 농축시료의 총 개체수는 장목만과 유사하게 나타났는데, 사망한 개체수의 비율이 장목만 보

다 12% 높은 전체 32%의 사망률이 관찰된 이유를 2가지로 유추해 볼 수 있다. 먼저, 장목만 시료는 BWTS육상 시험 설비와 가까이 위치하고 있어 현장조사 완료 후 곧바로 설비로 이동이 가능한 반면, 마산만의 농축시료는 선박으로 1.5시간 이동하여, 고밀도로 농축된 시료에 스트레스를 주어 영향을 미친 것으로 판단된다.

두 번째로는 농축된 생물 군집조성의 차이에서 기인된 것으로 판단 할 수 있다. 마산만과 장목만에서 농축된 생물은 *Acartia* 속이 극우점 하였고, 그 중 마산만에서는 장목만보다 *Acartia* 속의 미성숙체가 장목만보다 약 30% 높게 나타난 것이 특이적 이었다. $>50 \mu\text{m}$ 생물이 네트로 예인되면서 농축되는 과정에서 성체보다 미성숙체가 받는 스트레스가 크게 작용되었을 가능성이 높다, 특히, 1톤의 생물농축 탱크의 생물사멸률은 장목만(17.4%)과 마산만(19.9%)에서 크게 차이를 보이지 않았으나, 원수탱크에 넣는 과정에서 펌프를 이용하였고, 그 결과 두 해역간의 생물 사망률은 현저하게 차이를 보였다(t -test, $p < 0.001$). 이는 동일한 방법으로 생물을 주입하였음에도 불구하고 유의한 차이가 나타났다는 것은 누적되는 인위적인 스트레스가 *Acartia* 속의 미성숙체에 치명적인 영향을 미쳐, 마산만의 시료에서 높은 사망률로 이어졌을 가능성이 높다. 결과적으로 본 연구에서 관찰된 것과 같이 두 해역의 생물의 출현 및 농축효율이 비슷할 경우 가까운 장목만에서 생물을 농축하는 것이 유리할 것으로 판단되고, 미성숙체 개체수가 높을 정도로 존재할 경우 농축된 1톤 시료를 크레인을 이용하여 원수탱크 위치로 올려 자연 낙하로 생물 스트레스를 최소화할 수 있는 방법론 개선으로 BWTS 설비를 평가하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

한편 원수 탱크에서 분배된 대조군에서는 장목만과 마산만에서 생물 사멸율은 각각 18%와 32%로 나타났고, 이는 앞서 언급된 test water에서 관찰된 사망률과 유의한 차이를 보이지 않았다($p > 0.001$). 반면, BWTS의 처리군에서는 장목만과 마산만 시료 모두 100%로 사멸되어 완벽하게 생물을 처리할 수 있는 것으로 나타났다. 이는 현 등[4]의 선행된 10-50 μm 크기의 생물군의 연구결과와 유사하였고, BWTS의 처리장치는 완벽하게 대상생물을 사멸된다는 것을 시사 할 수 있었다.

마지막으로 장목만 농축시료를 대상으로 BWTS처리 5일 경과 후 대조군과 처리군의 $>50 \mu\text{m}$ 생물 생사여부 및 총 개체수 밀도를 파악하였다. 그 결과, 대조군에서는

>50 μm 생물 개체수가 3.1×10^4 inds. ton^{-1} 로 나타났고, 그 중 살아있는 개체수는 5.0×10^3 inds. ton^{-1} 로 전체 16%의 생존율을 보였다. 특히 대조군에서조차 선박평형수와 같은 암조건에서 5일 보관하게 되면, 운동성이 활발한 생물은 활력을 잃고 자연적으로 사멸될 수 있다. 반면, 처리군의 총 개체수밀도도 대조군과 큰 차이를 보이지 않은 2.5×10^4 inds. ton^{-1} 으로 나타났으나, 생물 사멸율은 처리 당일과 같은 100%의 사멸률을 보였다 [Fig. 3]. 아울러, 처리 당일과 비교하여 5일 경과 후 전체 개체수 밀도가 35.5%로 감소하여 현저하게 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 결과적으로 동계에 출현한 >50 μm 생물을 현장에서 농축 평가한 결과, 농축된 시료는 형식승인을 받을 수 있는 시험수 기준의 1/3수준에 머물렀으나, "테크로스"업체의 BWTS 장비를 통과한 생물은 처리당일에 전멸하여, 처리 5일 경과 후에도 동일한 결과를 보였고, 이와 같은 결과는 BWTS장비가 정상적으로 가동되어 생물처리 효능이 있다고 판단된다.

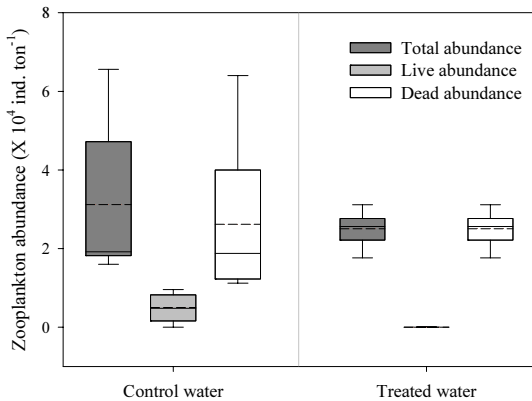


Fig. 3. Changes in total abundances, live cells, and dead cells in control and treatment after day 5 through ballast water treatment systems (BWTS).

전 세계 물동량의 많은 비중을 차지하고 있는 미국에서는 IMO D-2 규정보다 1000배 강화된 USCG(US Coast Guard) Phase II 기준을 제안하여 2016년에 수정 및 보완을 한 후 공식적인 규정을 발표할 예정이다. 이에 많은 국가들이 선박평형수 처리 장치 개발에 참여 하고 있으며, 시장 규모는 80조원에 달할 것으로 예측하고 있다. 현재 우리나라는 IMO 형식승인 기준으로 세계에서 가장 많은 선박평형수 처리기술을 보유하고 있는 선도국 입장에 있고, USCG Phase II 형식승인에서도 선도적으로 대응하기 위하여 다양한 처리기술 및 형식승인 품질

평가 및 관리에 대한 방법론을 정립하고 있는 중이다. 본 연구에서도 산업체에서 개발하고 있는 선박평형수 처리 설비의 글로벌리더로서 지속적 성장을 위해선 선박평형수 처리 장치 개발에 대한 품질 관리(QA/QC)를 뒷받침할 수 있는 과학적인 근거 자료의 축적이 중요하다고 할 수 있다. 결과적으로 BWTS의 장비에 대한 원천기술개발뿐만 아니라, 이를 평가할 수 있는 시험수 조건을 충족할 있도록 체계적으로 설비의 품질을 관리하고, 매뉴얼화하는 작업이 중요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 USCG Phase-II 형식시험 기준의 자연시료 확보 방안의 일환으로, 2015년 1월에 국가공인 육상시험설비와 인접한 장목만과 마산만에서 각각 2명의 조사 인원이 참여하여 약 6-7시간 동안 50 μm 이상의 자연시료를 채집하였다. 그 결과, 육상시험에 필요한 종조성 조건(3문 5종 이상)은 충족시켰으나, 생물의 개체수 밀도는 시험조건 10×10^4 inds. ton^{-1} 의 약 1/3 수준에 머물렀다. 본 연구에서 수행한 동계 낮은 개체수밀도가 관찰되는 시기에 USCG phase II 형식승인 시험을 수행할 경우, 자연생물군집의 70%이상 유지하기 위해서는 3척의 선박을 이용하여 1일(8시간)동안 수행하는 것이 필요할 것이다. 결과적으로 본 연구를 통하여 IMO G2의 D-2 규정에 근거하여 USCG phase-II 형식승인 시험수기준인 자연생물군집을 70% 이상 유지할 수 있는 가능성을 시사할 수 있었다. 이와 같은 결과는 산업체에서 추가적으로 USCG phase-II BWTS를 개발하여 평가할 수 있는 체계를 구축하는데 있어, 생물을 배양하거나 사육하지 않고, 시험수 조건을 충족할 수 있는 유익한 정보를 제공할 수 있었다.

References

- [1] IMO "Report on the ballast water treatment standards workshop". In 1st International ballast water treatment standards workshop, IMO London, 28-30 March. <http://globallast.Imo.org/workshopreport.htm>, 2001.
- [2] N. Bax, A. Williamson, M. Aguero, E. Gonzalez, W. Geeves, "Marine invasive alien species: a threat to global biodiversity". *Mar. Policy*, 27, 313-323, 2003. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0308-597X\(03\)00041-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0308-597X(03)00041-1)

- [3] 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.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/es102790d>
- [4] B.G. Hyun, S.H. Baek, W.J. Lee K. Shin, "Viability test and harvest of natural marine phytoplankton communities to verify the efficacy of a ship's ballast water treatment system". J. Kor. Academia-Industrial Coope, submitted, 2016.
- [5] J.H. Kang, K. Shin, B.G.. Hyun, M.C. Jang, E.C. Kim, M. Chang, "The electrochemical chlorination for marine plankton community disinfection". J. Kor. Soc. Mar. Environ. Engin., 10, 127-137, 2007.

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,

장 민 철(Min-Chul Jang)

[정회원]



- 1996년 2월 : 한국해양대학교 해양공학과 (환경학 석사)
- 2014년 2월 : 부산대학교 해양학과 (해양학 박사)
- 2005년 6월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 책임연구원

<관심분야>

외래생물, 해양생물학, 동물플랑크톤 생태학

백 승 호(Seung Ho Baek)

[정회원]



- 2004년 3월 : 요코하마국립대 환경정보학과 (환경학석사)
- 2007년 3월 : 요코하마국립대 환경정보학과 (환경학박사)
- 2009년 1월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 책임연구원

<관심분야>

해양환경오염, 수질, 해양생물학, 식물플랑크톤 생태학