Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 17, No. 9 pp. 245-252, 2016

http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.9.245
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

우리나라 주요 국제항에 입항하는 일본 기원 선박의 평형수내 환경 및 부유생물 특성

장풍국, 백승호, 장민철, 현봉길, 신경순*
한국해양과학기술원 남해연구소

Characteristics of environmental condition and planktonic organisms in ship's ballast water originating from international ports of Japan

Pung-Guk Jang, Seung Ho Baek, Min-Chl Jang, Bong-Gil Hyun, Kyoungsoon Shin*
South Sea Institute, Korea Institute of Ocean Science & Technology

요 약 본 연구는 우리나라 주요 국제항에 입항하는 일본기원의 선박을 대상으로 선박평형수내 환경 및 부유생물의 특성을 파악하여 선박평형수 처리장치(BWTS) 면제 협상을 위한 기초자료를 확보하고자 하였다. 조사된 22척의 선박 중 평형수의 보관 기간은 큐슈와 세토 내만(지역 "A")에서 평균 3.33 ± 1.87 days로 가장 짧았다. 총부유물질의 농도는 4.60 ~ 60.9 mg L^{-1}의 범위를 보였고, 용존성 및 입자성 유기물질은 각각 0.97 ~ 2.69 mg L^{-1}, 0.24 ~ 4.51 mg L^{-1}의 범위를 나타내었다. 영양염 농도는 동경만을 포함한 지역 "C"에서 높았고, 지역 "A"에서 낮은 평균값을 보였다. 엽록소-a 평균 농도는 0.40±0.56 μg L^{-1}로 나타났고, 1 μg L^{-1}이상의 높은 값은 지리적으로 우리나라와 가까운 지역 "A"로 집중되었다. 식물플랑크톤의 개체수가 > 50,000 cells L^{-1}의 선박평형수는 22척 중 4척으로 나타났고, 이 중 3척이 지역 "A" 기원으로 파악되었다. 특히, Tokyuyama 만에서는 유해유독미세조류로 잘 알려진 와편모그룹의 종이 높은 밀도로 관찰되었다. 본 연구 결과, 일본과의 BWTS 면제권 협상은 신중하게 접근할 필요성이 있다고 판단된다.

Abstract This study investigated the environmental conditions and planktonic organisms in the ballast waters (BW) of 22 vessels originating from the international ports of Japan for the purpose of negotiating exemptions from the Ballast Water Management Convention (BWM Convention). The shortest duration of the BW was 3.33±1.87 days in area "A", which included Kyushu and Suo Nada at Seto Inland. The total suspended solids, dissolved organic carbon, and particulate organic carbon ranged from 4.60 to 60.9 mg L-1, from 0.97 to 2.69 mg L-1, and from 0.24 to 4.51 mg L-1, respectively. A low average concentration of nutrients was measured in the BW from area "A", but that in the BW from area "C" (around central Honshu) was high, which may be related to the ballasting periods. High chlorophyll-a concentrations (>1 μg L-1) were measured in four vessels, three of which carried the BW in area "A". High abundances of phytoplankton (> 50,000 cells L-1) were measured in four vessels, three of which carried the BW in area "A". The two vessels originating from Tokyuyama Bay in area "A" showed high densities of dinoflagellates, which are known to be harmful algae. Our results suggest that the negotiations for an exemption from the BWM Convention for Japan should proceed with caution.

Keywords : Ballast Water, Ballast Water Management Convention, Exemptions, Nutrients, Phytoplankton

1. 서론

선박평형수는 공선선박의 평형과 안정을 유지하기 위하여 싣는 물이며, 이들 평형수는 화물을 선적하기 위하여 특정 항구에서 배출한다. 전 세계적으로 연간 50-100억 톤 규모의 선박평형수가 이송되고, 이와 함께 7000

본 논문은 KIOST주요사업 [PE99451]으로 수행되었음. 연구에 도움을 준 이우진, 차형곤연구원께 감사의 마음을 전함.
*Corresponding Author : kyoungsoon Shin (Korea Institute of Ocean Science & Technology)
Tel: +82-55-639-8510 email: ksshin@kiost.ac
Received June 16, 2016 Revised August 2, 2016
Accepted September 9, 2016 Published September 30, 2016

여종의 수권 생물이 다른 지역으로 옮겨져 그 지역의 고유생태계에 부정적인 영향을 미치고 있다[1]. 대부분의 수서생물은 선박평형수내 환경 조건에 적응하지 못하여 사멸되지만, 일부 내성이 강한 종과 더불어, 휴면포자 또는 휴면란을 생성하는 종은 살아남아 항만 고유의 생태계를 교란시킬 수 있다[2, 3, 4]. 따라서 국제해사기구(IMO: International Maritime Organization)는 선박평형수로 인한 외래생물의 교란을 방지하기 위해서 선박평형수를 처리하여 평형수내 생물을 제거 및 사멸시킨 후 배출하는 선박평형수관리 국제협약(International Convention for Control and Management of Ship's Ballast Water and Sediment, BWM Convention)을 2004년에 제정하였다.

BWM 협약은 선박보유국가 중 30개국 이상이 가입하고, 가입국가의 선복량이 총톤수의 35% 이상이 되면 1년 후 발효하도록 규정되어 있다. 현재, 30개국 이상이 BWM 협약에 가입한 상태이며, 가입한 국가의 선복량이 34.82%에 달하고 있어 늦어도 2017년에는 본 협약이 발효될 것으로 예측되고 있다[5]. BWM 협약이 발효되면 협약당사국과 관련된 선박 및 그 권한 하에 있는 모든 선박은 선박평형수 처리장치를 설치 운영하여 IMO D-2 규정에 맞게 평형수를 배출하여야 한다. BWM 협약의 발효가 임박함에 따라 선박평형수처리장치(BWTS)를 설치하는 비용과 유지관리에 대한 경제적인 부담 때문에 인접국가 간의 선박평형수처리 면제 협상이 활발하게 이루어질 것으로 기대된다. BWM 협약의 면제 규정(Regulation A-4)에서는 고정 항로를 운항하는 선박에 적용되고 있으며, 특히 특정항구 및 항로로 운항하는 선박에 한해서 예외를 규정하고 있다. 선박평형수처리장치 면제대상 선박은 지정된 항로나 항구 외에서는 선박평형수를 취할 수 없다. 특히 인접국가간 BWTS 면제조항을 맺기 위해서는 위해성평가 가이드라인(G7)에 의거하여 항구 및 항만간 선박평형수의 이동으로 인한 해양생태계 및 인간에 유해한 영향을 미치지 않는 다는 것을 입증하여야 한다.

BWTS 면제권 부여에 대한 논의는 IMO 산하 환경보호위원회(Marien Environment Protection Committe, MEPC) 68차에서 논의가 진행 되었으며, 2016년에 덴마크와 INRERFERRY가 제시한 공동위험지역 (Same Risk Area)의 개념이 가이드라인으로 제안되었다. 우리나라에서는 중국, 일본, 그리고 러시아 사이에 정기적으로 운항하는 선박에 대한 면제권 협상이 본격화 될 것이고, BWTS 면제권 협상을 위해서는 이해당사국 간의 선박평형수에 대한 기초적인 환경자료 및 생물과 관련된 정보를 공유해야만 한다. 아울러, 선주나 BWTS 개발업체도 선박운항 특성에 알맞은 BWTS 장비를 장착하기 위해서 인접국가의 항만 및 운항 선박의 선박평형수내 기초정보가 필수적으로 요구된다.

본 연구에서는 우리나라 주요 국제항에 입항하는 일본기원의 선박을 대상으로 선박평형수내 환경 및 부유생물의 특성을 파악하여 BWM 협약 면제와 관련된 일본과의 협상을 위한 기초적인 자료를 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

우리나라의 서해, 동해, 남해에 위치한 6개의 주요 무역항인 인천항, 대산항, 동해항, 울산항, 광양항 및 부산항을 중심으로 2007년부터 2015년까지 일본에서 온 22척의 선박에서 23개의 선박평형수를 조사하였다. 모든 조사는 지방항만청의 협조를 구하여, 항만안전관리요원(PSC, Port State Control)과 동행하여 선박에 승선허가를 받고 선장의 동의를 얻어 Ship's Particular와 Log notes를 확인한 후 선박평형수 적재지역과 공해상에서 교환여부 등을 파악하였다. 그 후 갑판이나 선내에 위치한 선박평형수 탱크의 맨홀을 열고 채수 및 생물채집을 하였다. 선박평형수 내 수질 특성은 YSI 6600을 이용해 수온, 염분, 용존 산소를 측정하였다. 영양염 분석시료는 유리 섬유 여과지(GF/F filter, 직경 47㎜, Whatman, pore size 0.7㎛)로 여과하고, 100 mL를 scintillation vials에 넣어 분석 전까지 냉동 보관하였다. 영양염(질산염+아질산염(질산염), 암모니아, 인산염, 규산염)은 영양염자동분석장비(QuAAtro 8000, SEAL Analytical co.)를 이용해 분석하였다. 해수 표준물질(CSK standard solution, Wako Pure Chemical industries, Osaka, Japan)을 이용하여 보정하였으며, 각 영양염에 대한 정밀도는 5% 이내의 값을 유지하였다. 용존 유기탄소(DOC) 측정은 일정량의 해수를 25㎜ GF/F 여과지를 이용해 자연압으로 여과 시킨 후 20 mL 갈색병에 담아 냉동보관 후 시험실에서 샘플에 용존되어 있는 유기물을 금속촉매를 이용한 고온 연소장치로 완전히 연소시킨 후 발생되는 이산화탄소의 양을 비분산형 적외선 감시기로

측정하여 정량화하였다(TOC-VCPH/CPN, Shimadzu co.). 입자성 유기탄소(POC) 측정은 450℃에서 5시간동안 회화시킨 25㎜ GF/F 여과지로 샘플의 일정량을 여과한 후 여과지를 냉동 보관하여 운반하였으며, 분석은 CHN analyser(Flash 2000, Thermo co.)를 측정하였다.

엽록소-*a* 분석을 위한 시료(여과지)는 일정양의 채수된 해수(0.5-1L)를 유리 섬유 여과지(GF/F filter, 직경 47㎜, Whatman, pore size 0.7㎛)에 여과하여, 그 여과지를 15 mL 원심분리용 tube에 넣어 분석 전까지 냉동 보관하였고, 분석 시 90% 아세톤(Acetone) 10 mL을 넣은 후 교반시킨 다음 냉암소에서 overnight 시키고 24 시간 이내에 측정하였다. 추출된 색소 중에 섞여 있는 입자를 제거하기 위해 1000g에서 5분 동안 원심분리 시킨 후 상등액만을 취하여 형광광도계(10-AU Fluorometer, Turner Designs co)로 측정하였다[6]. 또한 샘플링 된 해수의 일정량을 Phyto-Pam(Heinz Walz co.) 장비를 이용하여 광합성에 직접적으로 관여하는 활성 엽록소의 농도를 측정하였다.

식물플랑크톤의 채집은 망구 30㎝와 망목 20㎛의 원추형 네트를 사용하였다. 정량채집을 위해 네트에 유량계를 부착하거나 여과량을 이용하여 분석하였다. 채집 후 식물플랑크톤은 루골용액(Lugols' solution)으로 고정하였으며, 샘플은 실험실로 옮겨져서 광학현미경(Zeiss, Axioplan II)하에서 Sedgewick-Rafter chamber로 동정 및 계수하였다. 식물플랑크톤의 동정은 Cupp[7], Dodge[8], 심[9], Tomas[10] 등의 문헌을 참고하여 동정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 선박평형수의 물리·화학적인 요인의 특성

일본에서 우리나라 주요항에 입항한 선박의 평형수 기원을 구체적으로 살펴보면, 지역 "A" (규슈와 Seto Inland의 Sue Nada 주변 항) 기원 선박 8척, 지역 "B" (혼슈남부) 기원 선박 2척, 지역 "C" (혼슈 중부지역)기원 선박 7척, 지역 "D" (혼슈 북부지역) 기원 선박 3척, 그리고 지역 "E" (홋카이도) 기원 선박 2척으로 구성되었다(그림 1). 지리적으로 가까운 지역 "A" 와 도쿄를 포함한 지역 "C"에서 평형수를 적재한 선박이 65%를 차지하였다. 인접국가 일본에서 우리나라로 항해한 22척의 23개 선박평형수의 Duration time(보관 기간)은 대부분 10일 이내였다(Table 1). 특히 지역 "A"의 선박평형수 보관 기간은 평균 3.33±1.87 days로 다른 지역에 비해 짧았다. 선박평형수의 보관 기간이 짧으면 활성이 높은 해양부유미생물이 존재할 확률이 증가한다. 선박평형수 탱크는 화물의 효율적인 선적을 위하여 격벽의 칸막이로 구성되어 있어, 이들 선박평형수는 화물을 부분적으로 선적할 경우 선박평형수의 배출 필요성이 없기 때문에 지속적으로 싣고 다니는 경향이 있으며, 또한 특정 지역을 경유 한 후 입항할 수도 있다. 따라서 가까운 일본의 주요항만에 유입된 선박평형수임에도 불구하고, 상대적으로 선박평형수의 보관 기간이 차이가 난 것으로 판단된다. 선박평형수를 항구에 배출할 때 100% 교환이 이루어지지 않은 상태에서 다른 항만의 선박평형수를 적재하기 때문에 선박평형수의 명확한 기원을 밝히는 것은 한계가 있다. 따라서 MEPC는 BWTS 면책권을 부여 받을 수 있는 선박의 대상을 주기적으로 공동 위험 지역(Same Risk Area, SRA)에서 만 운항하도록 제안하고 있다.

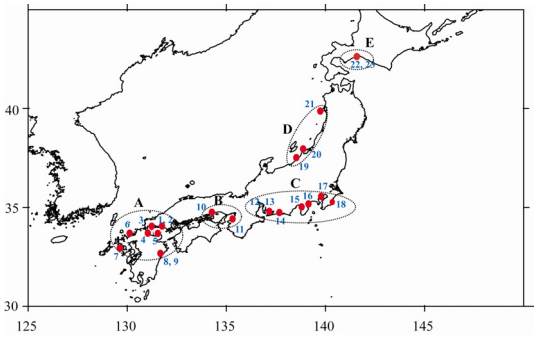

Fig. 1. Location of stations ballasted by 23 vessels in the ports of Japan.

선박평형수내 환경 특성을 살펴보면, 수온은 선박평형수의 조사기간에 따라서 뚜렷한 계절적인 차이를 보였고, 동계에 저수온(평균 12.3±2.22°C) 과 하계에 고수온(평균 23.5±3.72°C)을 유지하였다. 염분은 29.7 ~ 34.4 psu(평균 32.3±1.21 psu)의 범위를 나타내었고, 하계에 다소 낮게 나타나는 경향을 보였다(그림 2).

Table 1. Sampling date, departure port, arrival port, and storage time of ballast water ballasted by the ports of Japan.

No.		Sampling date (mm.dd. year)	Departure Port	Arrival Port	Duration time
A	1*	05.19. 2010	Tokuyama	Pusan	1
	2	01.29. 2015	Tonda	Donghae	4
	3	07.29. 2008	Inland sea	Ulsan	6
	4	08.26. 2008	Tobata	Pohang	4
	5*	05.19. 2010	Moji	Pusan	1
	6	10.22. 2007	Hakata	Incheon	5
	7	07.12. 2007	Nagasaki	Ulsan	1
	8	04.14. 2009	Saiki anchorage	Pohang	4
	9	03.12. 2009	Hososhima	Pusan	4
B	10	01.29. 2015	Onomichi	Donghae	300
	11	03.05. 2015	Osaka	Pusan	56
C	12	05.09. 2009	Nagoya	Pusan	30
	13	05.30. 2010	Nagoya	Ulsan	4
	14	11.12. 2007	Omaezaki	Kwangyang	4
	15	03.29. 2010	Shimizu	Ulsan	2
	16	02.17. 2009	Yokosuka	Ulsan	11
	17	03.09. 2009	Tokyo	Pusan	3
	18	04.10. 2008	Chiba	Incheon	11
	19	10.17. 2007	Naoetsu	Ulsan	15
D	20	02.20. 2008	Niigata	Ulsan	2
	21	05.19. 2010	Akita	Pusan	4
E	22	06.25. 2015	Tomakomai	Ulsan	3
	23	02.19. 2009	Tomakomai	Ulsan	19

*동일한 선박임

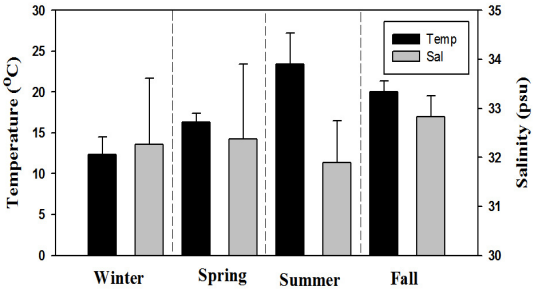

Fig. 2. Seasonal variation of temperature and salinity in ballast waters of 23 vessels.

조사 선박의 총부유물질(TSS)의 농도는 4.60 ~ 60.9 mg L^{-1}(평균 32.5±19.7 mg L^{-1})의 범위를 나타내었다(그림 3). 지역 “E”에서 입항한 선박평형수내에서 가장 높은 TSS 값을 보였고, 지역 “B”가 가장 낮은 값을 나타내었다. 용존성 유기탄소(DOC)농도는 0.97 ~ 2.69 mg L^{-1}(평균 1.59±0.49 mg L^{-1})의 범위를 나타내었고, 지역별 평균 DOC 농도는 1.17 ~ 2.28 mg L^{-1} 사이의 값을 보였다. 입자성 유기탄소(POC)는 0.24 ~ 4.51 mg L^{-1}(평균 0.86±0.93 mg L^{-1})범위로 측정되었다.

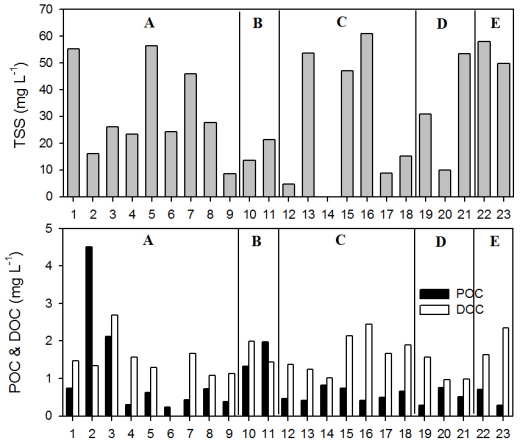

Fig. 3. Concentrations of (A) total suspended solid, (B) particulate organic carbon and dissolved organic carbon in ballast waters of 22 vessels.

지역 “A”와 “B”에서 POC 평균 농도는 각각 1.12, 1.65 mg L^{-1}을 나타낸 반면, 다른 지역에서 기인한 선박평형수는 0.6 mg L^{-1}이하의 평균값을 보였다. 현재 개발중인 많은 BWTS는 전처리 단계에 필터를 장착한 장비가 다수 있기 때문에 TSS는 BWTS 운영에 있어서 중요한 환경인자로 작용한다. 또한 UV 시스템에서도 높은 TSS 농도는 “shadowing effect”와 “abrasive effect”의 원인이 되기 때문에 UV의 효율을 감소시키는 역할을 한다. 실제로 중국 양쯔강 부근 항구의 높은 TSS 농도는 BWTS 개발 업체에 상당한 부담으로 작용되고 있는 실정이다. 유기물질 또한 활성물질을 이용해 선박평형수를 처리할 때 산화력 감소 및 소독부산물 농도 및 조성에 관련이 있어 BWTS 운영에 있어 중요한 요인이다[11]. IMO 형식승인 기준은 해수와 기수/담수에서 다른 기준으로 시험하도록 되어 있지만, USCG Phase I은 모든 시험수에 동일하게 적용된다(Table 2). IMO G8에서는 해수 기준의 BWTS 형식승인 시험에서 TSS 농도가 5 mg L^{-1}이상에서 수행하도록 되어있는데, 조사된 대부분의 선박평형수내 TSS 농도는 10 mg L^{-1} 이상의 값을 보였고, 평균 농도도 32.5 mg L^{-1}로 높은 값을 보였다. 일부 항만의 POC와 DOC 농도는 IMO G8의 BWTS의 형식승인 시험에서 규정하는 농도보다 다소 높게 관측되었다.

일본기원인 22척의 선박평형수내 영양염 농도는 규산염이 0.32 ~ 36.9 μM(평균 11.0±8.12 μM), 총무기질산염이 0.01 ~ 54.3 μM(평균 12.8±13.5 μM), 인산염이

0.01 ~ 1.38 μM(평균 0.42±0.45 μM)의 범위를 보였다(그림 4). 이는 우리나라 연안지역의 일반적인 영양염 분포와 유사하게 나타났고, 조사 기간의 계절적 특성이 잘 반영되었다.

Table 2. Comparison of the critical standard for the type approval test of ballast water treatment system in IMO G8 and USCG Phase I.

	IMO			USCG Phase I		
	SW*	EW	FW	SW	EW	FW
Salinity (psu)	>32	3-32	<3	28-36	10-20	<1
TSS (mg L^{-1})	>5	>50	>50		>24	
DOC (mg L^{-1})	>5	>5	>1		>6	
POC (mg L^{-1})	>5	>5	>1		>4	

*SW; seawater, EW; estuarine water, FW; freshwater,

즉 동계와 추계에는 수층 혼합으로 인해 영양염 농도가 증가하는 반면, 춘계에는 식물플랑크톤 성장으로 인해 전체 수층의 영양염 농도가 현저하게 떨어지는 경향을 보이고, 특히 하계에도 수계의 성층강화로 상층부의 영양염 농도가 낮게 관찰된다[12]. 이러한 경향은 조사된 지역 “A”와 “C”의 기원 선박에서 두드려졌다. 다시 언급하면 춘계와 하계에 주로 선박평형수를 실은 지역 “A”의 선박평형수는 전반적으로 영양염 농도가 낮았고, 동계와 추계에 주로 선박평형수를 실은 지역 “C”의 선박평형수는 상대적으로 높은 영양염 농도가 관찰되었다.

규산염과 인산염 농도는 지역 “E” 기원의 23번 선박에서 가장 높은 값이 기록되었고, 총무기질산염은 지역 “C”의 17번 선박에서 가장 높은 값을 보였다. 이들 두 척의 선박은 동계(1-3월)에 선박평형수를 적재한 것으로 나타났다.

인접국가 간의 BWTS 설치 면제권 부여에 있어서 물리적 요인 및 화학적 요인이 유사한 특성을 보이는 것이 중요하다. 조사 선박평형수 내의 수온, 염분과 영양염 농도는 우리나라와 유사한 계절적 특성을 나타내었다. 또한 TSS, POC 및 DOC 농도도 우리나라 연안에서 측정될 수 있는 값의 범위를 벗어나지 않는 것으로 판단된다[12][13].

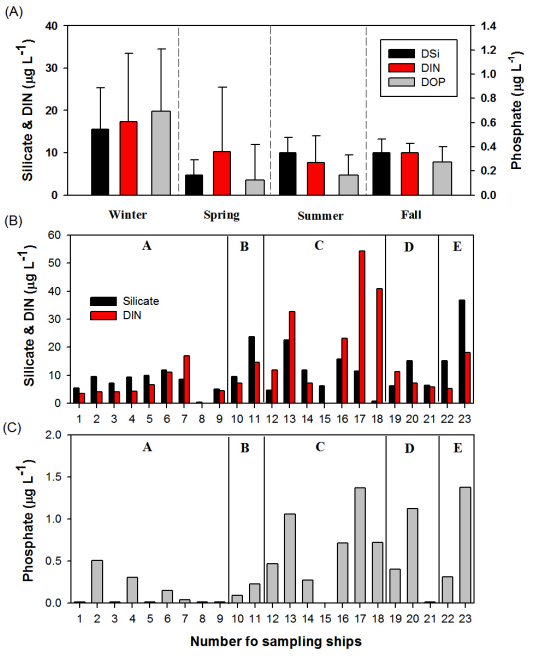

Fig. 4. (A) Seasonal variation of silicate, dissolved inorganic nitrogen, and phosphate. (B) Concentrations of silicate, dissolved inorganic nitrogen, and (C) phosphate in ballast waters of 22 vessels.

3.2 선박평형수의 엽록소-a 및 식물플랑크톤 분포 특성

엽록소-*a* 농도는 0.00 ~ 1.94 $\mu g\ L^{-1}$(평균 0.40±0.56 $\mu g\ L^{-1}$)의 범위를 나타내었다(그림 5). 엽록소-*a* 농도가 1 $\mu g\ L^{-1}$ 이상의 높은 값을 보인 선박은 4척으로 나타났고, 이 중 3척의 선박평형수 기원이 지역 “A” 이다. 지역 “A”는 우리나라와 가장 근접하고 있어 선박평형수의 보관 기간이 짧은 것과 관련이 있을 것이다. 보관 기간이 10일 이내의 선박평형수에서 0.5 $\mu g\ L^{-1}$ 이상의 엽록소-*a* 농도가 빈번하게 관찰되었다. 식물플랑크톤의 생물활성도를 평가하는 활성엽록소-*a*를 살펴보면, 22척의 선박평형수에서 0.00 ~ 1.82 $\mu g\ L^{-1}$(평균 0.26±0.46 $\mu g\ L^{-1}$)의 범위를 보였다. 특히 높은 활성엽록소-*a* 농도가 관찰된 선박평형수는 보관 기간이 짧았다. 활성엽록소-*a* 평균농도는 엽록소-*a* 농도보다 1.5배 정도 낮게 관찰되었고, 이는 탱크내의 식물플랑크톤이 빛의 제한에 의해서 활성이 약해질 수 있다는 것을 시사한다. 보관 기간이 상대적으로 길었든 지역 “B”와 “E”에서는 낮은 엽록소-*a* 값과 활성엽록소-*a* 값을 나타내었다. 결과적으로 선박평형수의

보관 기간은 식물플랑크톤의 활성에 영향을 미칠 수 있으므로, 만약 BWTS의 면제여부를 협상할 때 짧은 보관 기간을 가진 선박에 대해서는 신중한 접근이 필요하다.

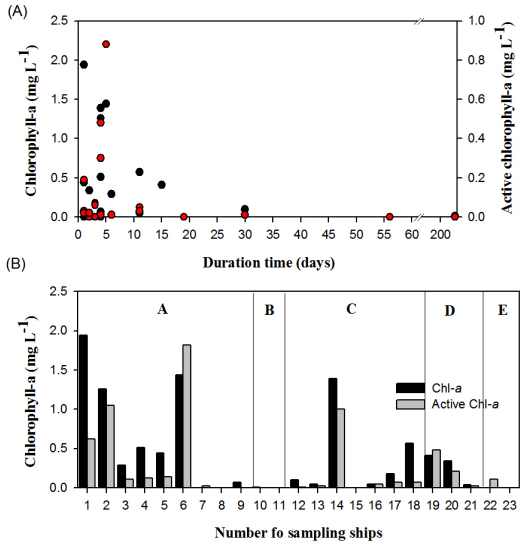

Fig. 5. (A) Relationship between storage time and chlorophyll-*a*.
(B) Concentrations of chlorophyll-*a* and active chlorophyll-*a* in ballast waters of 22 vessels.

식물플랑크톤의 현존량은 같은 수역으로 나눈 지역의 선박평형수 중에서도 큰 차이를 보였고, 계절적으로도 상당한 차이를 보였다(그림 6A). 이는 지리적으로 가까운 거리에 위치하여도 항만마다 항만고유의 영양염 특성과 식물플랑크톤의 번성 시기의 차이에서 기인된 것으로 판단된다. 결과적으로 선박평형수를 싣는 시점의 항만 고유의 식물플랑크톤 번성 여부가 우리나라에 영향을 미칠 수 있는 중요한 변수로 작용될 수 있으므로, 이와 같은 점도 BWTS 면제협상에서 심도 있게 다루어야 할 것이다. 식물플랑크톤의 개체수가 > 50,000 cells L^{-1}의 선박은 22척 중 4척으로 나타났고, 그 중 3척은 지역 "A"의 Sue Nada의 유역에서 적재한 것으로 나타났다. 아울러, 식물플랑크톤의 현존량이 극히 높게 나타난 4척의 선박평형수의 보관 기간은 5일 이내로 상대적으로 짧은 것이 특이적 이였다. 이는 앞서 엽록소-*a* 농도에서도 언급한 것과 같이, 선박평형수의 보관 일수가 짧을수록 활성이 높은 식물플랑크톤이 유입될 가능성이 높음을 의미한다. 지역 "C"의 선박평형수의 식물플랑크톤 개체수 또한 > 10,000 cells L^{-1} 선박은 3척으로 나타났고, 이 들의 선박평형수의 기원지는 동경만 인근해역으로 나타났으며, 이 선박들에서 와편모조류가 관찰되었다. 특히, 동경만은 유해유독미세조류(Harmful Algae)로 잘 알려진 와편모그룹의 종이 높은 밀도로 관찰되는 곳이기 때문에 [14] 추후, 동경만의 선박평형수를 심도 있게 조사할 필요성이 있다.

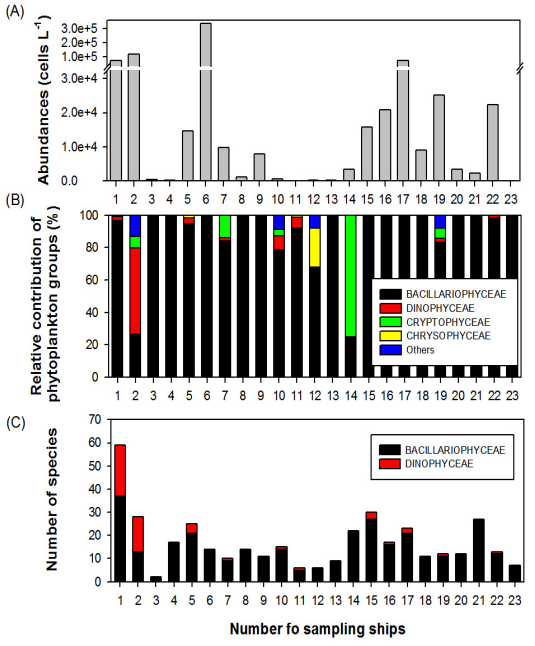

Fig. 6. (A) Phytoplankton abundance, (B) relative contribution of phytoplankton groups, and (C) number of species in basillariophyceae and dinophyceae in ballast waters of 22 vessels.

식물플랑크톤의 그룹별 분포를 살펴보면, 규조류는 평균 89%의 우점율을 보였다(그림 6B). 반면, 지역 "A"의 Tonda 항 2번 선박평형수에서 와편모조류의 비율이 전체에서 53.1%로 높게 나타난 것이 특이적이었다. 결과적으로 항만 위협종으로 구분되는 대부분 종이 와편모그룹으로 이들 종이 선박평형수 처리장치를 통과하지 않고, 면제권을 부여받는다면, 출항항만(donor port)의 생물이 종착항만에 영향을 미칠 수 있을 것으로 추정된다.

조사 선박 중에서 와편모조류가 1종 이상 나온 선박은 11척으로 전체 선박의 47.8%을 차지하였다(그림 6C). 특히 와편모조류가 높게 관찰된 선박평형수는 지역 "A"의 1번과 2번 선박으로 각각 22종과 15종으로 나타

났다. 또한 이 선박들은 식물플랑크톤의 현존량 및 활성 엽록소-*a* 농도도 높게 나타났다. 이들 지역은 세토내만의 Sue Nada 유역의 Tokuyama Bay에 위치한 Tokuyama 항과 Tonda 항으로 구분된다. 지역 "A"의 세토내만은 1960년대부터 인간 활동의 증가로 인한 산업용수와 도시 하수의 유입으로 유해성 적조가 심각한 지역이며[15], 2000년대도 계속해서 유해성 와편모조류 및 침편모조류의 적조가 빈번하게 발생하는 지역이다[15, 16]. 결과적으로 본 연구를 통하여 식물플랑크톤의 개체수 및 와편모조류 종의 출현 양상을 고려할 때 유해한 미세조류의 유입 가능성이 높음을 시사한다. 따라서 일본 전 항만을 대상으로 BWTS 면제권을 부여하는 것은 우리나라 항만 고유생태계의 영향을 미칠 수 있으므로, 환경위해성이 상대적으로 적은 항만을 대상으로 순차적으로 적용할 필요성이 있다. 아울러, 선박평형수를 거의 적재하지 않는 정기여객선을 대상으로 BWTS 면제권을 부분적으로 적용하는 것이 바람직할 것이라 생각된다.

4. 결론

일본은 우리나라와 인접한 곳에 위치하고 있고, LME(Large Marine Ecosystem) 권역을 공유하고 있으므로 BWM 협약의 면제 규정(Regulation A-4)에 의하여, 상호국가간의 협상 하에서 BWTS 면제권을 부여 받을 수 있다. 본 연구를 통하여 10여 년간의 선박평형수내 환경요인 및 유해미세조류를 종합적으로 검토한 결과, BWTS 면제권부여는 일본의 일부 지역에서 신중하게 접근할 필요성이 있다고 판단된다. 일본에서도 우리나라와 유사하게 산업이 발달한 도시를 중심으로 주요 국제항만이 위치하고 있어, 일부 지역에서 유해성 적조의 발생빈도가 높게 나타나고 있고, 1970-80년과 비교하여 현저하게 감세하는 추세에 있지만, 여전히 유해성 와편모류가 높은 밀도로 관찰된다. 결론적으로, 일본 전 항만을 대상으로 BWTS 면재권을 부여하는 것은 우리나라 항만 고유생태계의 영향을 미칠 수 있으므로, 환경위해성이 상대적으로 적은 항만을 대상으로 순차적으로 적용할 필요성이 있다.

References

[1] Ø. Endresen, H. Lee Behrens, S. Brynestad, A. Bjørn Andersen, R. Skjong, "Challenges in global ballast water management". Mar. Pollut. Bull., vol. 48, no. 7-8, pp. 615-623, 2004.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2004.01.016

[2] N. Bax, A. Williamson, M. Aguero, E. Gonzalez, W. Geeves, "Marine invasive alien species: a threat to global biodiversity". Mar. Policy, vol. 27, no. 4, pp. 313-323, 2003.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/S0308-597X(03)00041-1

[3] D. Pimented, R. Zuniga, D. Morrison, "Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States". Ecol. Econ., vol. 52, no. 3, pp. 273-288, 2005.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.10.002

[4] E. M. Zetsche, F. J. R. Meysman, "Dead or alive? viability assessment of micro- and mesoplankton". J. Plankton Res. vol. 34, no. 6, pp. 493-509, 2012.
DOI: http://dx.doi.org/10.1093/plankt/fbs018

[5] IMO, What's New during 2016. http://www.imo.org/en/MediaCentre/WhatsNew/Pages/Archive-2016.aspx, 08/03/2016.

[6] T. R. Parsons, Y. Maita, C. M. Lalli, "A manual of chemical and biological methods for seawater analysis". New York, Pergamon, 173p, 1984.

[7] E. E. Cupp, "Marine plankton diatoms of the west coast of North America". University of California press, Berkeley and L.A., 237p, 1943.

[8] J. D. Dodge, "Marine dinoflagellate of the British Isles". Her Majesty stationary office, London, 303 p, 1982.

[9] J. H. Shim, "Illustrated encyclopedia of fauna & flora of Korea, Vol. 34, Marine Phytoplankton". Ministry of Education, Seoul, 487p, 1994.

[10] C. R. Tomas, "Identifying marine phytoplankton". Academic Press, 833p, 1997.

[11] D. Stephanie, V. Christian, T. August, L. Helge, "Disinfection by-products and ecotoxicity of ballast water after oxidative treatment – results and experiences from seven years of full-scale testing of ballast water management systems". Mar. Pollut. Bull., vol. 73, no. 1, pp. 24-36, 2013.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.06.014

[12] P. G. Jang, K. Shin, M. Chang, D. Kim, "Spatial and temporal trends in water quality in response to sewage discharge in Masan and Hangam Bays, Korea". J. Coast. Res., vol. 27, no. 6A, pp. 144-155, 2011.
DOI: http://dx.doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-11-00023.1

[13] D. I. Lim, Y. O. Kim, M. R. Kang, P. G. Jang, K. Shin, M. Jang, "Variability of water quality and limiting factor for primary production in semi-enclosed Masan Bay, South Sea of Korea". Ocean Polar Res., vol. 29, no. 4, pp. 349-366, 2007.
DOI: http://dx.doi.org/10.4217/OPR.2007.29.4.349

[14] K. Matsuoka, "Eutrophication process recorded in dinoflagellate cyst assemblage-a case of Yokohama Port, Tokyo Bay, Japan". Sci. Total Environ., vol. 231, no. 1,

pp. 17-35, 1999.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00087-X

[15] M. Yamaguchi, S. Itakura, K Nagasaki, Y. Kotani, “Distribution and abundance of resting cysts of the toxic Alesandrium spp. (Dinophyceae) in sediments of the western Seto Inland Sea, Japan”. Fish. Sci., vol 68, no. 5, pp. 1012-1019, 2002.
DOI: http://dx.doi.org/10.1046/j.1444-2906.2002.00526.x

[16] I. Imai, M. Yamaguchi, Y. Hori, Eutrophication and occurrences of harmful algal blooms in the Seto Inland Sea, Japan. Plankton Benthos Res., vol. 1, no. 2, pp. 71-84, 2006.
DOI: http://dx.doi.org/10.3800/pbr.1.71

장 풍 국(Pung-Guk Jang) **[정회원]**

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

<관심분야>
선박평형수, 해양환경오염, 수질, 해양화학

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

장 민 철(Min-Chul Jang) **[정회원]**

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

<관심분야>
외래생물, 해양생물학, 동물플랑크톤 생태학

현 봉 길(Bonggil Hyun) **[정회원]**

- 2005년 2월 : 목포해양대학교 (이학석사)
- 2015년 2월 : 부경대학교 (이학박사)
- 2005년 4월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 연수연구원

<관심분야>
선박평형수, 기후변화, 해양생물학, 식물플랑크톤 생태학

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,