Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety
Research Paper
Vol. 22, No. 7, pp. 821-828, December 31, 2016, ISSN 1229-3431(Print) / ISSN 2287-3341(Online) https://doi.org/10.7837/kosomes.2016.22.7.821

우리나라 주요 국제항에 입항하는 중국 기원 선박의 평형수내 수질 및 식물플랑크톤 특성 연구

장풍국* · 현봉길** · 장민철** · 신경순**†
*, ** 한국해양과학기술원 남해연구소 선박평형수연구센터

A Study of Characteristics on Water Quality and Phytoplankton in Ship's Ballast Water Originating from International Ports of China

Pung-Guk Jang* · Bonggil Hyun** · Min-Chel Jang** · Kyoungsoon Shin**†
*, ** Ballast Water Research Center, South Sea Institute, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Geoje 53201, Korea

요 약 : 본 연구는 우리나라 주요 국제항에 출입하는 중국기원 선박의 선박평형수내 환경 및 부유생물의 특성을 파악하여 선박평형수처리장치(BWTS)와 관련된 면제 협상을 위한 기초자료를 확보하고자 하였다. 조사된 37척의 선박 중 평형수의 보관 기간은 발해만을 포함하는 북부지역(지역 "A")에서 평균 3.91 ± 4.61 days로 가장 짧았다. 총부유물질의 농도는 1.80 ~ 266 mg L^{-1}의 범위를 보였고, 용존성 및 입자성 유기물질은 각각 1.09 ~ 5.79 mg L^{-1}, 0.17 ~ 3.65 mg L^{-1}의 범위를 나타내었다. 영양염 농도는 양자강 유역을 포함한 지역 "B"에서 높았고, 홍콩을 포함하는 지역 "C"에서 낮은 평균값을 보였다. 엽록소-*a* 평균 농도는 0.67 ± 1.15 μg L^{-1}로 나타났고, 1 μg L^{-1} 이상의 높은 값은 지리적으로 우리나라와 가까운 지역 "A"에서 7척 중 3척이 집중되었다. 식물플랑크톤의 개체수가 > 10,000 cells L^{-1}의 선박평형수는 37척 중 6척으로 나타났고, 이 중 3척이 지역 "A" 기원으로 파악되었다. 특히, 홍콩항에서는 유해미세조류로 잘 알려진 와편모그룹의 종이 높은 밀도로 관찰되었다. 본 연구 결과, 중국과의 BWTS 면제권 협상은 신중하게 접근할 필요성이 있다고 판단된다.

핵심용어 : 선박 평형수, 선박평형수관리 협약, 선박평형수처리장치 면제, 영양염, 식물플랑크톤

Abstract : *The water quality and phytoplankton presence in the ballast water (BW) of 37 vessels originating from the international ports of China were investigated to facilitate negotiations for exemptions to the Ballast Water Management Convention (BWM Convention). The shortest duration given BW spent in a vessel was 3.91 ± 4.61 days in area "A", which included the Bohai Sea. Total suspended solids, dissolved organic carbon, and particulate organic carbon ranged from 1.80 to 266 mg L^{-1}, from 1.09 to 5.79 mg L^{-1}, and from 0.17 to 3.65 mg L^{-1}, respectively. A low average concentration of nutrients was measured in BW from area "C", but the concentration of nutrients in BW from area "B" (around the Changjiang estuary) was high, which may be related to the relevant supply of freshwater. A high chlorophyll-a concentration (>1 μg L^{-1}) was measured in six vessels, three of which carried BW in the area "A". High abundance of phytoplankton (> 10,000 cells L^{-1}) was measured in four vessels, two of which carried BW in the area "C". Vessel No. 37, originating from Hong Kong Bay in area "C", showed a high density of dinoflagellates. The results suggest that BWM Convention exemption negotiations with China should be performed cautiously.*

Key Words : *Ballast water, Ballast Water Management Convention, Ballast Water Treatment System Exemptions, Nutrients, Phytoplankton*

1. 서 론

선박평형수는 공선선박의 안전한 운전을 위해 싣는 물로서 선박의 평형과 안정을 유지하고, 특정항구에서 화물을 선적하기 위하여 배출된다. 전 세계적으로 연간 50-100억 톤 규모로 선박평형수가 이송되고, 이와 함께 7000 여종의 수권생물이 다른 지역으로 옮겨져 그 지역의 고유생태계를 교란시킬 수 있다(Endresen et al., 2004). 따라서 국제해사기구(IMO: International Maritime Organization)는 선박평형수로 인한 외래생물의 교란을 방지하기 위해서 선박평형수를 처리하여 평형수내 생물을 제거 및 사멸시킨 후 배출하는 선박평형수관리

* First Author : pgjang@kiost.ac.kr, 055-639-8514
† Corresponding Author : ksshin@kiost.ac.kr, 055-639-8510

국제협약(International Convention for Ballast Water Management Convention, BWM Convention)을 2004년에 제정하였다.

BWM 협약은 선박보유국가 중 30개국 이상이 가입하고, 가입국가의 선복량이 총톤수의 35 % 이상이 되면 1년 후 발효하도록 규정되어 있다. 2016년 9월 8일에 핀란드가 승인함으로서 52개국 35.14 %로 기준을 만족하였기 때문에 2017년 9월 8일에 본 협약이 발효될 것으로 예측되고 있다(IMO, 2016). BWM 협약이 발효되면 협약당사국과 관련된 선박 및 그 권한 하에 있는 모든 선박은 선박평형수 처리장치를 설치하고 IMO D-2 규정에 맞게 운영하여 평형수를 배출하여야 한다. 따라서 BWM 협약 발효가 임박함에 따라 선박평형수처리장치(BWTS)를 설치 및 유지관리 비용에 대한 경제적인 부담 때문에 인접 국가만 항해하는 선박에 대한 선박평형수처리 면제 협상이 활발하게 이루어질 것으로 기대된다. BWM 협약의 면제 규정(Regulation A-4)에서 언급하는 선박평형수 처리장치 면제대상 선박은 지정된 항로나 항구 외에서는 선박평형수를 취할 수 없다. 특히 인접국가간 BWTS 면제조항을 맺기 위해서는 위해성평가 가이드라인(IMO, 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, 2016년 69차에서 발트해를 중심으로 덴마크와 INRERFERRY가 제시한 동일위험지역(Same Risk Area)의 개념이 가이드라인으로 제안했고, 싱가포르도 MEPC 70차 의제 문서로 싱가포르 해역을 중심으로 동일위험지역에 대한 연구를 수행하고 IMO에 이를 보고하였다. 우리나라는 삼면이 바다이고, IMO가 정하는 LME 경계선 내에 중국, 일본, 그리고 러시아가 포함되어 있다.

이들 국가간을 정기적으로 운항하는 선박들이 있기 때문에, 면제권 협상이 본격화 될 것이고, 특히, 중국은 적극적으로 우리나라와 BWTS 면제권 협상을 하려고하기 때문에 양국을 입출항하는 선박의 선박평형수에 대한 기초적인 환경자료 및 생물과 관련된 정보를 확보할 필요가 있다. 아울러, BWTS 개발업체나 선주협회도 선박운항 특성에 알맞은 BWTS 장비를 장착하기 위해서 중국기원 선박의 항만 및 운항 선박의 선박평형수내 기초정보가 필수적으로 요구된다.

본 연구는 우리나라 주요 국제항에 입항하는 중국 기원의 선박평형수 특성에 관한 연구(Jang et al., 2016)에 이어 중국 기원의 선박평형수내 환경 및 부유생물의 특성을 파악하여 BWM 협약 면제와 관련된 중국과의 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 중국에서 온 37척의 선박에서 38개의 선박평형수를 조사하였다(Fig. 1). 중국으로부터 온 선박에 대한 조사 과정은 지방항만청의 협조를 구해 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 생물채집 하였고, YSI 6600을 이용해 수온, 염분을 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(0.5-1 L)와 20 ㎛ 메시로 여과한 여과수를 유리 섬유 여과지(GF/F filter, 직경 47 ㎜, Whatman, pore size 0.7 ㎛)에 여과하였으며, 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 24시간 이내에 측정하였다. 추출된 색소 중에 섞여 있는 입자를 제거하기 위해 1000 g에서 5분 동안 원심분리 시킨 후 상등액만을 취하여 형광광도계(10-AU Fluorometer, Turner Designs co.)로 측정하였다(Parson et al., 1984). 또한 샘플링 된 해수 및 20 ㎛ 메시로 여과한 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 cahmber로 동정 및 계수하였다. 식물플랑크톤의 동정은 Cupp (1943), Dodge(1982), Shim(1994), Tomas(1997) 등의 문헌을 참고하여 동정하였다.

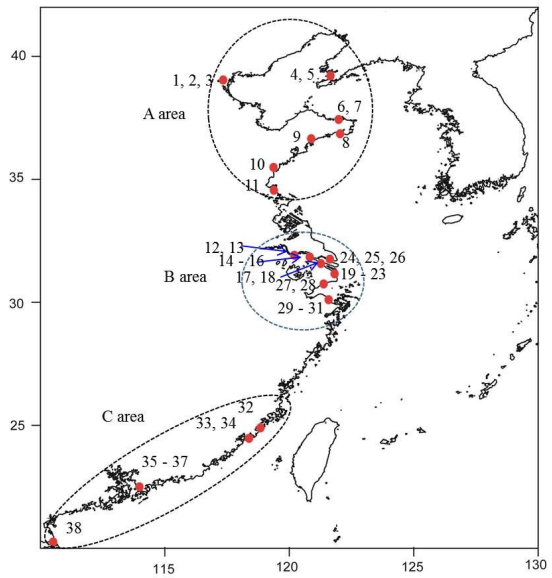

Fig. 1. Location of stations ballasted by 37 vessels in the ports of China.

3. 결과 및 고찰

3.1 선박평형수의 물리 · 화학적인 요인의 특성

중국에서 우리나라 주요항에 입항한 선박의 평형수 기원을 구체적으로 살펴보면, 지역 "A"(중국의 발해만을 포함하는 북쪽에 위치한 주변 항) 기원 선박 11척, 지역 "B"(중국의 양자강 중심의 중간지역에 위치한 항) 기원 선박 20척, 지역 "C"(홍콩을 포함하는 중국 남쪽 지역에 위치한 항)기원 선박 7척으로 구성되었다(Fig. 1). 지역 "B"는 중국의 산업 도시가 모여 있는 양자강 유역을 포함하고 있어 조사 선박의 52.6 %를 차지하였다. 인접국가 중국에서 우리나라로 항해한 37척의 중 38개 선박평형수 중 32개의 선박평형수의 Duration time(보관 기간)이 대부분 10일 이내였다(Table 1). 특히 지역 "A"의 선박평형수 보관 기간은 평균 3.91 ± 4.61 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

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

	NO	Sampling day	City	Port	Duration time
A	1	02th Apr.2008	Tianjin	Kwangyang	3
	2	26th Jan.2015	Tiajin Xingang	Kwangyang	16
	3	27th Feb.2008	Xingang	Pusan	2
	4	09th Oct.2007	Dalian	Pusan	3
	5	10th Apr.2008	Dalian	Incheon	1
	6	30th Jun.2009	Weihai	Pyeongtaek	1
	7	25th May2010	Weihai	Pyeongtaek	1
	8	09th Apr.2008	Shidao	Incheon	1
	9	18th Oct.2011	Qingdao	Kunsan	3
	10	26th Feb.2008	Lanshan	Pusan	9
	11	25th May2010	Lianyunsang	Pyeongtaek	3
B	12	01th Jul.2009	Jiangjin	Pyeongtaek	8
	13	26th Aug.2008	Jiangyin	Pohang	12
	14	24th Sep.2008	Changshu	Pusan	25
	15	27th Apr.2015	Changsu	Daesan	7
	16	29th Mar.2009	Changshu	Ulsan	3
	17	18th Feb.2009	Taicang	Ulsan	3
	18	19th May2010	Taicang	Pusan	4
	19	12th Oct.2007	Shanghai	Pusan	5
	20	27th Apr.2015	Shanghai	Daesan	51
	21	19th Feb.2008	Shanghai	Ulsan	15
	22	23th Sep.2008	Shanghai	Pusan	2
	23	25th Aug.2008	Shanghai	Pohang	5
	24	30th Jul.2008	Nantong	Ulsan	6
	25	24th Jun.2015	Nantong	Ulsan	3
	26	25th Jun.2015	Nantong	Ulsan	8
	27*	23th Jun.2010	Jinshan	Daesan	4
	28	26th Feb.2015	Cao Jing	Ulsan	3
	29	30th Jul.2008	Ningbo	Ulsan	5
	30	16th Apr.2009	Ningbo	Pohang	9
	31*	23th Jun.2010	Ningbo	Daesan	24
C	32	17th Feb.2009	Quanzhou	Ulsan	23
	33	12th Sep.2007	Xiamen	Kwangyang	10
	34	05th Dec.2007	Xiamen	Kwangyang	5
	35	16th Oct.2007	Hongkong	Ulsan	4
	36	17th Oct.2007	Hongkong	Ulsan	8
	37	12th Dec.2007	Hongkong	Pusan	6
	38	14th Apr.2009	Costal area	Pohang	10

* the same vessel

입항할 수도 있다. 따라서 가까운 중국의 주요항만에 유입된 선박평형수임도 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. 그래서 MEPC는 BWTS 면책권을 부여 받을 수 있는 선박의 대상을 주기적으로 같은 항구만 운항하는 선박들을 대상으로 한다.

선박평형수내 환경 특성을 살펴보면, 수온은 선박평형수의 조사기간에 따라서 뚜렷한 계절적인 차이를 보였고, 동계에 저수온(평균 10.4 ± 3.71℃)과 하계에 고수온(평균 24.4 ± 2.45℃)을 유지하였다. 염분은 0.28 ~ 32.7 psu(평균 19.7 ± 12.6 psu)의 넓은 범위를 나타내었는데, 이는 “B” 지역의 양자강 하구의 해수를 선박평형수로 취수하였기 때문에 염분의 분포범위가 넓은 기수적인 특성이 나타났다(Fig. 2).

조사 선박의 총부유물질(TSS)의 농도는 지역 “B”에서 1.80 ~ 266 mg L^{-1}의 넓은 범위를 보였으며, 지역 “A”에서 10.1 ~ 57.3 mg L^{-1}, 지역 “C”에서 19.4 ~ 196.4 mg L^{-1}의 범위를 보였다(Fig. 3a). 용존성 유기탄소(DOC)농도도 지역 “B”에서 1.09 ~ 5.79 mg L^{-1}의 높은 범위를 보였으며, 지역 “A”는 1.63 ~ 3.16 mg L^{-1}, 지역 “C”는 1.09 ~ 1.69 mg L^{-1}의 범위를 보였다(Fig. 3b). 입자성 유기질소 (POC)도 지역 “B”에서 0.35 ~ 3.65 mg L^{-1}의 넓은 범위를 보였으며, 지역 “A”에서 0.40 ~ 1.47 mg L^{-1}, 지역 “C”에서 0.17 ~ 0.81 mg L^{-1}의 범위를 보였다(Fig. 3b). 지역 “B”에서 TSS, DOC, POC의 범위가 넓게 나타나는 것은 이 지역이 양자강의 영향을 받기 때문에 다양한 해양 환경을 보여주고 있음을 시사하며, 이는 염분의 결과와도 유사하다.

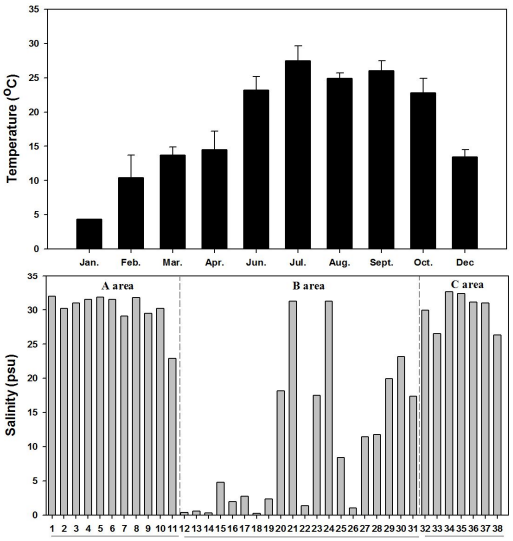

Fig. 2. A) Monthly variation of temperature and B) salinity variation in ballast waters of 37 vessels.

계절적 경향을 보면, TSS의 경우 겨울철과 봄철에 평균값이 높게 나타났는데 이는 30번과 31번 선박의 TSS 농도가 높게 나타난 것과 연관성이 있다. DOC는 겨울철 23번 선박 때문에 지역 “B”의 평균값이 다소 높게 나타났지만, 계절에 따른 큰 차이는 나타나지 않았다. POC는 겨울철이 다른 계절보다 낮은 평균값을 보였고, 지역 “C”가 다른 지역보다 전반적으로 낮은 농도를 나타내었다.

현재 개발 중인 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(Jang et al., 2016). 우리나라의 BWTS의 제조업체와 선주 협회에서는 양자강 유역에서 1000 mg L^{-1} 이상이 자주 관측되며, 이러한 농도에서는 전처리로 필터를 사용하는 BWMS는 작동할 수 없기 때문에 D-1 규정(외해수 교환)과 D-2 규정(BWMS 처리장치 사용)을 함께 사용할 수 있는 새로운 규정을 만들어 줄 것을 요구하고 있다. 이는 부유물질이 높은 지역에서는 BWMS을 사용하지 않고 선박평형수를 취수한 다음 외해에서 선박평형수를 교환하면서 BWMS 처리장치를 사용하는 것이다. 이러한 규정은 상당히 설득력이 있어 보이지만, 악용될 가능성이 있기 때문에 IMO에서는 신중한 입장을 취하고 있다. 유기물질 또한 활성물질을 이용해 선박평형수를 처리할 때 산화력 감소 및 소독부산물 농도 및 조성에 관련

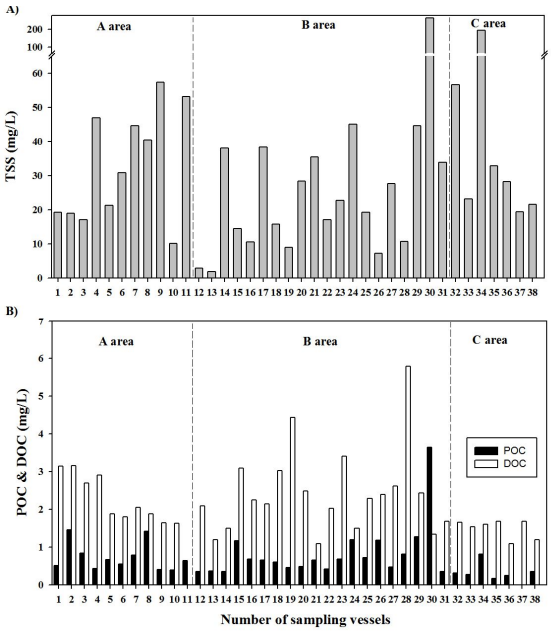

Fig. 3. Concentrations of (A) total suspended solid, (B) particulate organic carbon and dissolved organic carbon in ballast waters of 37 vessels.

이 있어 BWTS 운영에 있어 중요한 요인이다(Stephanie et al., 2013).

BWTS 설치의 면제권을 부여하는데 있어 인접국가 간 선박평형수의 물리·화학적 요인의 유사성이 매우 중요하다. 이 중에서 수온과 염분은 동일위험지역(Same Risk Area)을 정하는데 있어 일차적으로 적용되는 요인이다. 왜냐하면 수온과 염분은 외래종이 유입되었을 때 토착 환경에서 생존하고 번식할 수 있느냐에 대한 가장 중요한 기준이 되기 때문이다. 중국의 경우 수온은 우리나라 주요항에서 나타나는 계절적인 경향을 보여주고 있지만, 염분은 다소 우리나라와 다른 경향을 보여준다. 우리나라의 주요 국제항의 경우 여름철 강우로 낮은 염분(기수 조건)의 값을 나타내지만, 담수 수준의 염분은 거의 관측되지 않는다. 본 연구에서 관측된 TSS, POC 및 DOC 농도는 우리나라 항만에서도 측정될 수 있는 값의 범위를 벗어나지 않는 것으로 판단된다.

IMO G8과 USCG Phase I의 각 시험수 염분 기준은 다소 차이가 있으며, 담수의 기준이 IMO는 3 psu 미만인 반면, USCG의 기준은 1 psu 미만이다(Table 2). 또한, 각 시험수 내 TSS, POC, DOC의 기준도 IMO의 경우 시험수에 따라 달리 농도 기준을 정하지만, USCG Phase I은 모든 시험수에 동일하게 적용된다. 넓은 염분 범위를 보여주는 본 연구에서는 해수와 기수/담수의 조건에 따라 부유물질 및 유기물의 농도를 달리하는 IMO G8의 규정보다는 염분의 구배에 차이가 없는 USCG Phase I의 규정이 더 타당한 것으로 판단된다. 하지만, USCG Phase I에서 제시한 TSS의 농도는 본 연구의 담수/기수에서 나타나는 농도보다 낮은 것으로 판단된다. 본 연구의 TSS 농도는 선박평형수를 실을 때 측정된 것이 아니라 선박이 이동한 후 우리나라 항만에서 측정된 값이기 때문에 실제 선박평형수를 실을 당시 TSS 농도는 훨씬 더 높았을 것으로 추정된다.

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

중국기원인 37척의 선박평형수내 영양염 농도는 규산염이 1.72 ~ 139.9 μM(평균 37.8 ± 34.9 μM), 총무기질산염이 1.61 ~ 310 μM(평균 67.5 ± 67.5 μM), 인산염이 0.01 ~ 8.76 μM(평균 1.29 ± 1.68 μM)의 범위를 보였다(Fig. 4). 이는 우리나라 항만의 일반적인 영양염 농도보다는 높은 값이며, 이는 양자강에서 높은 영양염이 공급되고 있음을 잘 반영한다. 영양염은 식물플랑크톤의 성장과 군집구조에 영향을 미칠 수 있는 주요 인자이다. IMO의 G8 규정에는 영양염에 대한 가이드라인이 없지만, USCG Phase I에서는 무기영양염의 농도를 보조적으로 측정할 것을 권유하고 있다. 양쯔강 주변에서 선박평형수를 실은 선박의 경우 질산염 농도가 규산염 농도보다 상당히 높아 낮은 SN 비를 나타낸다. 일반적으로 담수의 유입은 높은 규산염을 강 하구 및 연안에 공급하는 것이 일반적이기 때문에 SN 비는 redfield ratio인 1 이상의 높은 값을 보인다. 하지만 중국은 세계 제일의 샨샤댐을 2009년에 완공함으로서 담수에 의한 규산염의 공급이 줄어들어 하구의 SN 비가 감소한다고 보고되고 있다(Jang et al., 2013). 낮은 SN 비는 강 하구에서 식물플랑크톤의 군집구조에 영향을 미쳐 와편모류가 우점할 수 있으며, 이로 인해 유해종(대부분 와편모류)이 증가할 수 있다(Officer and Ryther, 1980; Gong et al., 2006).

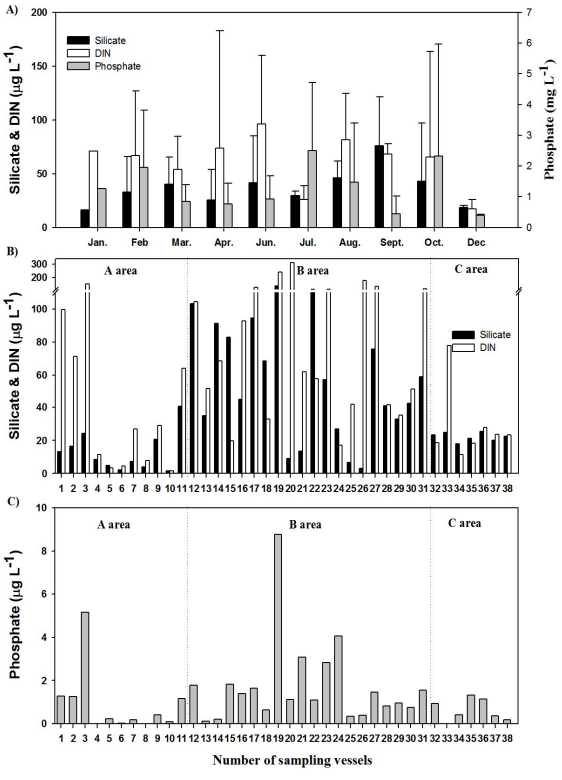

Fig. 4. (A) Monthly variation of silicate, dissolved inorganic nitrogen, and phosphate, (B) Concentrations of silicate, dissolved inorganic nitrogen, and (C) phosphate in ballast waters of 37 vessels.

3.2 선박평형수의 엽록소-*a* 및 식물플랑크톤 분포 특성

엽록소-*a* 농도는 0.00 ~ 6.19 $\mu g\ L^{-1}$(평균 0.67 ± 1.15 $\mu g\ L^{-1}$)의 범위를 나타내었다(Fig. 5). 엽록소-*a* 농도가 1 $\mu g\ L^{-1}$ 이상의 높은 값을 보인 선박은 7척으로 나타났고, 이 중 3척의 선박평형수 기원이 지역 "A"이다. 지역 "A"는 우리나라와 근접하고 있어 선박평형수의 보관 기간(평균 3.91 ± 4.61 days)이 다른 지역에 비해 짧은 것과 관련이 있을 것이다. 1 $\mu g\ L^{-1}$ 이상의 높은 엽록소-*a* 농도를 나타낸 선박 중 6척은 보관 기간이 5일 이내이고 1척은 9일이었다. 식물플랑크톤의 생물활성도를 평가하는 활성엽록소-*a*를 살펴보면, 37척의 선박평형수에서 0.00 ~ 1.55 $\mu g\ L^{-1}$(평균 0.23 ± 0.39 $\mu g\ L^{-1}$)의 범위를 보였다. 특히 높은 활성엽록소-*a* 농도가 관찰된 선박평형수는 보관 기간이 짧았다. 활성엽록소-*a* 평균농도는 엽록소-*a* 농도보다 3배 정도 낮게 관찰되었고, 이는 탱크내의 식물플랑크톤이 빛의 제한에 의해서 활성이 약해질 수 있다는 것을 시사한다. 보관 기간이 상대적으로 길었든 지역 "B"에서는 낮은 활성엽록소-*a* 값을 나타낸 반면, 상대적으로 거리가 먼 곳에 위치한 지역 "C"는 낮은 엽록소-*a* 평균값을 나타내었다. 하지만 지역의 "B"의 경우 19번, 23번, 29번 선박에서 0.5 $\mu g\ L^{-1}$ 이상의 높은 활성엽록소-*a* 농도를 나타내었으며, 이 선박들의 선박평형수 보관 기간은 5일이었다. 결과적으로 선박평형수의 보관 기간은 식물플랑크톤의 활성에 영향을 미칠 수 있으므로, 만약 BWTS의 면제여부를 협상할 때 짧은 보관 기간을 가진 선박에 대해서는 신중한 접근이 필요하다.

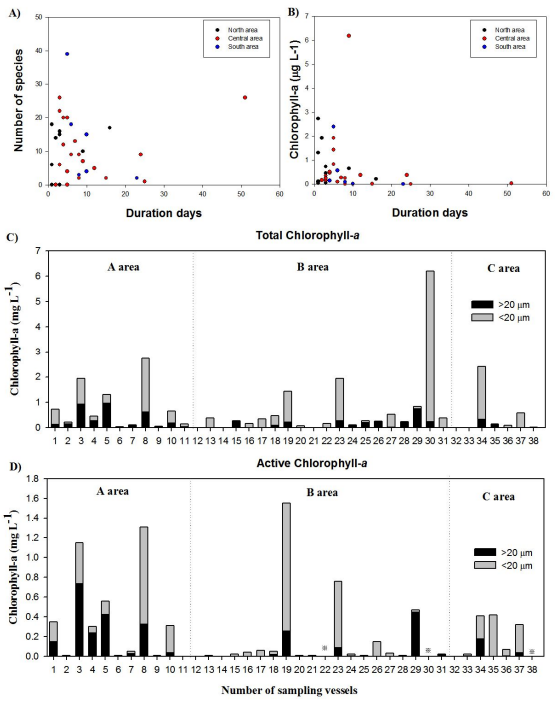

Fig. 5. (A) Relationship between storage time and chlorophyll-*a*, (B) Concentrations of chlorophyll-a and active chlorophyll-*a* in ballast waters of 37 vessels.

같은 수역이지만 식물플랑크톤의 현존량은 나눈 지역의 선박평형수 중에서도 큰 차이를 보였고, 계절적으로도 상당한 차이를 보였다(Fig. 6A). 이는 지리적으로 가까운 거리에 위치하여도 항만마다 항만고유의 환경 및 영양염 특성에 따른 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 > 10,000 cells L^{-1}의 선박은 37척 중 4척으로 나타났고, 그 중 2척은 지역 "C"의 홍콩만 내에서 적재한 것으로 나타났다. 아울러, 식물플랑크톤의 현존량이 극히 높게 나타난 19번 선박은 선박평형수의 보관 기간은 5일이었으며, 엽록소-*a* 농도와 활성엽록소-*a*농도 상대적으로 높게 났다. 이 선박의 평형수는 염분이 2.35 psu였으며, 출현 식물플랑크톤도 모두 담수종이었다. 담수종의 경우 해수종보다 크기가 작은 경우가 많기 때문에 < 20 ㎛ 이하의 엽록소-*a* 및 활성엽록소-*a*가 높았던 것으로 사료된다. BWMS 형식승인을 위해서 크기별 식물플랑크톤은 10 ~ 50 ㎛ 사이로 제한되어 있어 담수 시험시 시험수의 식물플랑크톤의 기준을 맞추기가 힘들어 시험 기관에서는 식물플랑크톤의 크기 기준을 완화해야 할 필요성을 제기하고 있다.

식물플랑크톤의 그룹별 분포를 살펴보면, 규조류는 평균 73.5 %의 우점율을 보였다(Fig. 6B). 조사 선박중에서 와편모조류가 1종 이상 나타난 선박은 모두 18척으로 전체 선박의 46.6 %을 차지하였다(Fig. 6C). 특히 와편모류의 비율이 40 % 이상 높게 관측된 선박평형수는 24번, 33번, 37번 선박으로 양자강 유역, 샤먼항, 홍콩항에서 각각 선박평형수를 실었다. 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.

중국에서 가장 먼저 harmful algal blooms(HABs)이 보고된 것은 양자강 연안에서 1933년이며, 그 이후 1990년대에 와서는 약 230여회로 급속하게 발생빈도가 증가하였고, 샤먼항 인근의 Weitou Bay는 1990년에 *Cochlodinium* sp.의 적조가 출현하여 큰 규모의 어류 및 조개 폐사가 보도되었다(Taylor and Trainer, 2002). 홍콩은 1970년 초에 처음 HABs가 보고된 후, 1980-1997년 사이에 496 HABs가 보고되었으며, Lam and Ho는 HABs의 잦은 출현과 어폐류의 폐사와 관계가 있으며 도시화가 진행되면서 더 빈번하게 발생하였다고 보고하였다(Taylor and Trainer, 2002). 중국의 양자강 연안은 2000년 이

후 급속하게 유해성 와편모조류의 적조가 빈번하게 발생하는 지역이다(Wang, 2006). 결과적으로 본 연구를 통하여 식물플랑크톤의 개체수 및 와편모조류 종의 출현 양상을 고려할 때 유해한 미세조류의 유입 가능성이 높음을 시사한다. 따라서 중국 전 항만을 대상으로 BWTS 면제권을 부여하는 것은 우리나라 항만 고유생태계의 영향을 미칠 수 있으므로, 환경위해성이 상대적으로 적은 항만을 대상으로 순차적으로 적용할 필요성이 있다.

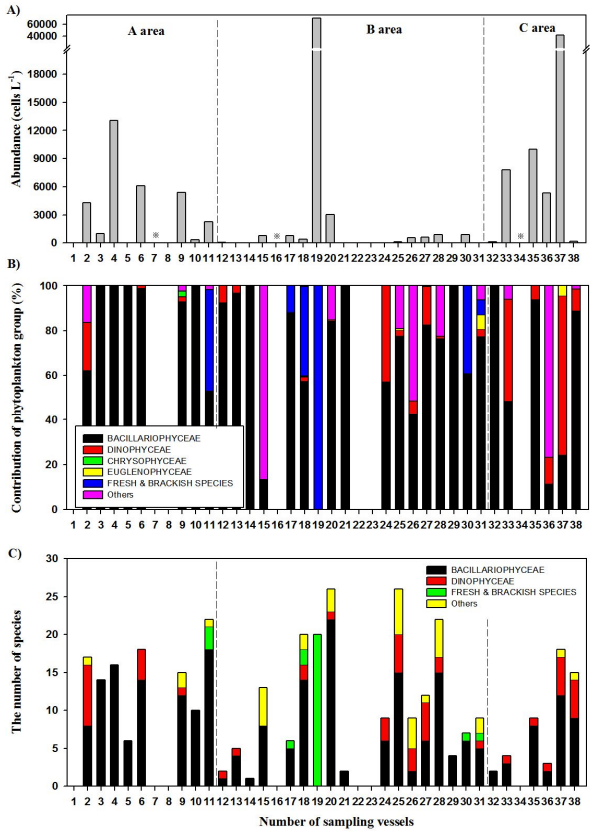

Fig. 6. (A) Phytoplankton abundance, (B) relative contribution of phytoplankton groups, and (C) number of species in basillariophyceae and dinophyceae in ballast waters of 37 vessels.

4. 결 론

중국은 일본, 러시아와 더불어 우리나라와 인접한 곳에 위치하고 있고, IMO에서 정한 LME(Large Marine Ecosystem) 권역을 공유하고 있으므로 BWM 협약의 면제 규정(Regulation A-4)에 의하여, 상호국가간의 협상 하에서 BWTS 면제권을 부여 할 수 있다. 본 연구를 통하여 10여 년간의 선박평형수내 환경요인 및 유해미세조류를 종합적으로 검토한 결과, 중국과의 BWTS 면제권부여에 있어 신중한 접근이 필요한 것으로 판단된다. 특히, 중국에서도 우리나라와 유사하게 산업이 발달한 도시를 중심으로 주요 국제항만이 위치하고 있어, 일부 지역에서 유해성 적조의 발생빈도가 높게 나타나고 있다. 결론적으로, 중국의 항만을 대상으로 BWTS 면제권을 부여하는 것은 우리나라 항만 고유생태계의 영향을 미칠 수 있음을 시사한다.

후 기

이 연구는 해양수산부 과제(PM59300)와 산업자원통상부(PN66760)에 의해 수행되었습니다.

References

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

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

[3] Endresen, Ø., H. L. Behrens, S. Brynestad, A. Bjørn Andersen and R. Skjong(2004), Challenges in global ballast water management, Mar. Pollut. Bull., Vol. 48, No. 7-8, pp. 615-623.

[4] Gong, G. C., J. Chang, K. P. Chiang, T. M. Hsiung, C. C. Hung, S. W. Duan and L. A. Codispoti(2006), “Reduction of primary production and change of nutrients ratio in the East China Sea: effect of the Three Gorges Dam?” Geophysical Research Letters, Vol. 33, L07610, pp. 1-4.

[5] IMO(2016), Global treaty to halt invasive aqiatic species ti enter into force in 2017, http://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/22-BWM-.aspx, 8/09/2016.

[6] Jang, P. G., H. H. Shin, S. H. Baek, M. C. Jang, T. S Lee, and K. Shin(2013), Nutrient distribution and effects on phytoplankton assemblages in the western Korea/Tsusima Strait, NZJ of MFR, Vol. 47, No 1, pp. 21-37.

[7] Jang, P. G., S. H. Baek, M. C. Jang, H. B. Hyen and K. Shin(2016), Characteristics of environmental condition and planktonic organism in ship’s ballast water originating from international ports of Japan, The Korea Academia-industrial cooperation Society, Vol. 17, No. 9, pp. 245-252.

[8] Officer, C. B. and J. H. Ryther(1980), The possible importance of silicon in marine eutrophication, ar. Ecol-Prog Ser., Vol. 3, pp. 83-91.

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

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

[11] Stephanie, D., V. Christian, T. August and L. Helge(2013), 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.

[12] Taylor, F. J. R. and V. L. Trainer(2002), Hamful algal blooms in the PICES region of the North Pacific, North Pacific Marine Science Organization, Sidney, Canada, p. 152.

[13] Tomas, C. R.(1997), Identifying marine phytoplankton, Academic Press, p. 833.

[14] Wang, B.(2006), Cultural eutrophication in the Changjiang (Yangtze River) plume: History and perspective, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 69, pp. 471-477.

Received : 2016. 10. 17.
Revised : 2016. 12. 19.
Accepted : 2016. 12. 28.