

## 부산과 대산항에서 선박평형수에 유입된 식물플랑크톤의 종조성과 재성장능력

백승호 · 장민철 · 신경순\*  
한국해양연구원 남해연구소

### Regrowth Ability and Species Composition of Phytoplankton in International Commercial Ship's Ballast Water Berthed at Pusan and Daesan Ports

SEUNG HO BAEK, MIN CHUL JANG AND KYOUNGSOON SHIN\*  
Korea Ocean Research and Development Institute/ South Sea Institute, Geoje 656-830, Korea

본 연구는 우리나라 주요 무역항(부산항, 대산항)에 입항하는 국제선을 대상으로 선박평형수내 환경요인과 식물플랑크톤의 군집조성을 파악하는 것과 더불어, 생물활성실험을 수행하였다. 선박평형수의 기원은 중국(3지역), 일본(3지역), 싱가포르 등이었다. PCA분석에서도 생물지리역이 다른 선박평형수의 환경인자와 우리나라 항만 주변수의 환경인자의 차이를 확인할 수 있었고, 식물플랑크톤의 출현종과 현존량을 바탕으로 한 Cluster분석에서도 각 선박의 기원에 따라서 유사성이 낮게 구분되었다. 선박평형수의 체류시간과 식물플랑크톤의 현존량( $r = 0.35$ ), 출현종수( $r = 0.63$ )는 음의 상관성을 관찰하였다. 7척의 선박평형수내 구성종은 규조류, 와편모조류, 착편모조류 순으로 나타났다. *Shui Shan*(2) 선박평형수내 유입된 식물플랑크톤 성장은 어떤 수온 조건에서도 선박평형수 실험구에서는 성공적인 재성장은 이루어지지 않았다. 반면, 15 °C와 20 °C의 수온조건에서 영양염을 첨가한 F/2실험구와 영양염을 첨가하지 않은 주변수 실험구는 식물플랑크톤의 생물활성능이 현저히 높았고, 그들은 *S. costatum*와 *T. pseudonana*로 구성되었다. 염분 구배실험에서 담수종은 0-5 psu에서, 기수종은 10-20 psu, 해수종은 20-30 psu에서 각각 적응하여 염분구배에 따른 우점종이 뚜렷히 구분되었다. 그중, *S. costatum*는 넓은 범위의 염분농도(10-30 psu)에 적응 가능하였고, 이 생물의 종특이적인 생물활성능력은 우리나라 항만과 연안해역에서 성공적으로 정착 할 가능성이 높다고 판단된다.

The aim of this study is to assess the importance of ballast water discharge as a vector for the introduction of exotic species into Pusan and Daesan Ports, Korea. We also examined to understand the impacts of environmental factors on the survival success of introduced species by ship's ballast water in laboratory experiments. Seven ship's ballast water originated from the coastal water of China (Taicang, Ningbo and Jinshan), Japan (Tokuyama, Moji and Akita), and Singapore. According to PCA (principal components analysis) analysis, environmental factor in the each ballast and shipside waters were different by bioregion. Based on cluster analysis, the phytoplankton community structures were distinguished for ballast water origin. Most of the major taxonomic groups were diatoms and, the others were dinoflagellate, silcoflagellate and several freshwaters species. In particular, species number and standing crops of phytoplankton in the ballast tanks decreased with the increasing age of ballast water( $r = -0.35$  for standing crop;  $r = -0.63$  for species number). In the laboratory study, although phytoplankton in ballast water treatment did not survive even in optimal temperature, the *in vivo* fluorescence of phytoplankton viability increased under the nutrient typical of shipside water and F/2 medium at 15 °C and 20 °C. The diatoms species such as *Skeletonema costatum* and *Thalassiosira pseudonana* in ballast water were successfully regrown. On the salinity gradient experiments for *Shui Shan* (2) vessel, several freshwater species, brackish and marine species were successfully adapted. Of these, *S. costatum* was able to tolerate a wide range of salinities (10 to 30 psu) and its species-specific viability was suitable for colonization.

**Keywords:** Ballast water, International commercial ship, Phytoplankton regrowth ability, Salinity, Temperature

\*Corresponding author: ksshin@kordi.re.kr

## 서론

선박은 항해시 적당한 복원성과 안전성을 유지하기 위해서 화물을 적재하지 않은 공선의 하부에 증량물을 싣게 된다. 이런 증량물의 대부분은 물로 채우는데 이 물을 선박평형수(Ballast water)라고 한다. 국제해사기구(IMO: International Maritime Organization)에 의하면, 선박평형수는 세계적으로 연간 100억톤 규모로 이송되고 있고(IMO 2001; Gollasch *et al.*, 2007), 이들 평형수에 의해 수송된 다양한 생물들은 새로운 환경에 적응하지 못하고 대부분 사멸하지만, 살아남은 일부 종은 강한 생존력과 번식력으로 항만 고유의 수서 생태계를 교란시키거나 파괴할 수 있는 잠재력이 있다(Hallegraeff and Bolch, 1991; Hayes and Sliwa, 2003; Smayda, 2007). 따라서 국제해사기구에서는 선박평형수에 의해 이송되는 외래생물의 위해성을 직시하여 선박평형수 통제 및 관리를 위한 국제협약(선박평형수와 침전물 관리협약: International Convention for the Control and Management of Ship's Ballast water and sediment)을 2004년에 채택하였다. 이 협약을 간단하게 요약하면, 상대국 항구에 배출될 선박평형수 내의 생물 농도 기준(D-2 regulation)을 매우 엄격하게 조정하여 이것을 만족시킬 수 있는 처리장치를 개발하여 장차하는 것을 의무화 시켰고, 인접국가간에는 위해도 평가(환경매칭위해도평가: Environmental matching risk assessment, 생물종 특이성 위해도 평가: Species-specific risk assessment, 생물종과 생물지리학적 위해도 평가: Species, biogeographical risk assessment)를 통하여 생물지리학적으로 위해성이 있는지를 사전에 평가하여 대상국가간의 선박평형수 처리 의무를 면제 받게되면, 두 나라를 오가는 선박에 한하여 선박평형수 배출을 허용한다는 것이다. 이 협약은 2012년 협약이 발효하여 단계적으로 시행되며, 오는 2016년까지 외국을 왕래하는 모든 선박은 상기의 기준을 반드시 이행하여야 한다(IMO, 2001, 2004).

세계 각국은 1980년대 중반부터 선박평형수의 배출에 따른 위해성을 평가하기 위해서 다양한 방법으로 연구를 수행하여 왔다(Carlton, 1985, 1996; Hallegraeff, 1998; Smayda, 2007). 선박평형수와 관련된 연구로는 선박평형수 적재시 유입되는 생물(Chu *et al.*, 1997), 항해중 공해상에서 선박평형수 교환시 생물상의 변화(Chu *et al.*, 1997; Zhang and Dickman, 1999), 배출시 선박평형수내 환경조건과 생물현존량의 관계(Chu *et al.*, 1997), 시스트 형성과 발아특성(Hallegraeff and Bolch, 1992; Hallegraeff, 1998), 항해기간과 생물 출현 종수과의 관계등이 있다(Lewis *et al.*, 2003). 이와 같은 연구는 선박평형수에 의하여 유입된 생물 종 조성과 현존량을 판단하여 얼마나 위험한 종이 상대국 항만에 유입되는 것을 파악 할 수 있었으나, 배출시 그들 생물의 잠재적 적응 능력을

판단하는 생물활성능력을 평가하기에는 적절하지 않다고 판단된다. 또한 해양생물들은 선박평형수 배출시 주변수의 수온, 염분, 영양염등과 같은 환경조건에 따라서 생물활성능력은 현저히 다르게 나타날 것으로 사료되지만, 현 단계에서는 해양미소생물군의 유입과 정착가능성을 가늠할 수 있는 생물활성능력을 검정하는 연구는 매우 미흡한 실정이다(Kang *et al.*, 2010). 현재 우리나라에서는 선박평형수 처리장치를 개발하는 것은 세계적인 수준으로 진행되었지만(강 등, 2007; 김, 2008), 항만조사와 선박평형수내 환경요인과 생물의 현존량을 파악하고 분석한 사례는 극히 제한적이다(유 등, 2006; 박과 김, 2010).

따라서 본 연구는 1) 부산항과 대신항에 입항하는 외래선박을 대상으로 선박평형수에 유입된 생물의 현존량과 환경인자를 파악하고, 2) 생물활성능력을 평가하기 위해서 항만 주변수와 과영양수인 F/2배지, 선박평형수의 실험구를 설정하여 생물검정실험을 수행하였다. 아울러 선박평형수에 유입된 외래기원 식물플랑크톤이 우리나라 주변항과 연안해역에 성공적으로 정착할 수 있는지 검토하고자 한다.

## 재료 및 방법

### 선박평형수 및 항만주변수 조사

본 연구에서는 선박평형수 취수지가 외국기원 선박만 대상으로 조사를 수행하였다. 선박평형수내 식물플랑크톤은 2010년 5월과 6월에 부산항, 대신항에서 총 7척의 선박을 대상으로 각각 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 교환여부등을 파악하였다. 그 후 갑판이나 선내에 위치한 선박평형수탱크의 맨홀을 열고 채수 및 생물채집을 하였다(Table 1). 또한 선박평형수를 조사한 선박의 주변수를 채수하여 환경요인을 파악하였다. 선박평형수와 주변수의 수온, 염분, 용존산소는 YSI 장비(YSI 6600 sonde, USA)를 이용하여 현장에서 측정하였다. 선박평형수와 주변수의 영양염, pH등의 환경인자를 파악하기 위해서 버킷으로 표층수를 채수하여 2 L 멸균병에 넣었다. 식물플랑크톤은 망목이 20- $\mu$ m의 네트(직경: 30 cm, 길이: 70 cm)를 이용하여 수직 인양하여 채집하였고, 채집한 시료는 식물플랑크톤의 현존량과 종조성을 파악하기 위해서 5% Lugol 용액으로 현장에서 고정하였다. 특히 대신항의 *Shui Shan* (2)의 선박에서는 또 다른 1개의 시료를 추가적으로 채집하여 사전에 멸균된 1 L의 PC bottle에 넣고 알루미늄으로 빛을 차단하여 실험실로 운반하여, 생물활성능실험을 수행하였다.

**Table 1.** Ballast tank information of ships surveyed on 19 May at the Port of Pusan and on 23 June at the Port of Daesan, Korea

Destination (port)	Ship name	Tonnage (GRT)	Kind of ship	Ballasting date	Duration time (day)	Ballasting site and source port
Pusan	<i>Golden Voyage</i> (1)	2,400	Container	2010.05.19	1	Tokuyama, Japan
Pusan	<i>Golden Voyage</i> (2)	2,400	Container	2010.05.19	1	Moji, Japan
Pusan	<i>Sormovs Kiy</i>	2,478	Bulk	2010.05.15	4	Taicang, China
Pusan	<i>Merry Star</i>	3,997	Container	2009.05.15	4	Akita, Japan
Daesan	<i>Elisabeth</i>	3,493	Tanker(LPG)	2010.05.24	32	Singapore
Daesan	<i>Shui Shan</i> (1)	6,028	Tanker(Chemical)	2010.05.30	24	Ningbo, China
Daesan	<i>Shui Shan</i> (2)	6,028	Tanker(Chemical)	2010.06.19	4	Jinshan, China

영양염 분석용 시료는 GF/F필터를 통과한 해수를 50 mL 를 튜브병에 넣고 냉동보관하였다. pH는 휴대용pH meter(Orion 4 star, Thermo Scientific)로 측정하였다. 영양염류는 냉동 보관한 시료를 분석전 해동하여 규산염(SiO<sub>2</sub>), 암모니아성 질소(NH<sub>4</sub>-N), 아질산과 질산성 질소(NO<sub>2</sub>+NO<sub>3</sub>-N), 인산염(PO<sub>4</sub>-P)를 Parsons *et al.*(1984)의 분석법에 따라서 영양염 자동분석기(Quickchem 8000, LACHAT)를 이용하여 분석하였다.

식물플랑크톤의 종조성과 현존량을 파악하기 위해서 네트 샘플을 100-1000 µL분주하여 X20 또는 X40배율로 동정 및 계수하였다. 특히 광학현미경에서 동정이 극히 어려운 종은 속 수준에서 동정하였다(Yamaji, 1979; Dodge, 1982; Tomas, 1997).

선박평형수와 주변수의 환경인자간의 특성을 파악하기 위해서 주성분분석(PCA: principal component analysis)을 수행하였다(XLSTAT pro: Microsoft Excel add-in). 아울러 선박평형수내 유입된 식물플랑크톤 군집구조의 차이를 확인하기 위해서 Bray-Curtis 유사도를 산출했고, PRIMER version 5을 이용해 Cluster분석을 수행하였다.

**생물활성능실험**

대산항에서 검사한 *Shui Shan*(2)을 대상으로 온도, 배지조건, 염분 농도에 따른 식물플랑크톤의 생물활성능을 평가하였다. 먼저 실험실로 운반된 시료는 200-µm의 mesh로 여과하여 동물플랑크톤을 제거한 후 1 L 멸균 PC병에 담았다. 각각의 배지에 사용된 배양수는 선박평형수를 0.2-µm membrane 필터로 여과 멸균한 선박평형수 실험구(선박평형수 자체의 영양염농도 유지), 주변수를 0.2-µm membrane 필터로 여과 멸균하여 F/2배지를 넣은 실험구, 영양염을 첨가하지 않은 주변수 실험구로 구분하였다. 배양은 10, 15, 20 °C로 각 실험구마다 3개의 온도조건을 설정하여 온도와 배지조건(F/2배지, 주변수, 선박평형수)에 따른 재성장특성을 파악하였다. 또한 염분구배에 따른 평가는 선박평형수(염분 11.4 psu)를 고순도중류수와 장목만(한국해양연구원 남해연구소앞) 해수(32 psu)로 희석하여 염분농도를 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 psu로 조절하여 F/2배지를 넣고, 선박주변수의 온도조건(15 °C)에서 배양실

험을 수행하였다. 모든 실험은 두경이 달린 70 mL의 시험관(ø22 mm × 200 mm; PYREX®)에 50 mL 배양수를 넣고, 선박 평형수에서 채집한 시료를 일정량(0.37 FSU)을 균일하게 접종하였다. 여기서 배지조건에 따른 온도의 영향은 triplicate로, 염분구배실험은 duplicate 각각 수행하였다. 온도와 배지조건이 다른 실험은 광량 60 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, 광주기 12L: 12D로 조절하여, 20일간 2-3일 간격으로 Turner Designs 10-AU Fluorometer로 형광값(*in vivo* fluorescence)을 측정하였고, 염분구배에 따른 실험은 수온 15 °C, 광량 60 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, 광주기 12L: 12D로 조절하여 배양시작후 9일까지는 3일 간격으로, 그 이후는 2일 간격으로 Turner Designs 10-AU Fluorometer로 형광값(*in vivo* fluorescence)을 측정하였다. 또한 실험초기와 종료시 식물플랑크톤의 군집조성을 각각 파악하였다.

**결 과**

**선박평형수와 주변수의 환경조건과 생물량**

서로 다른 생물지리역(bioregion)을 오가는 선박을 통하여 이동하는 생물의 생존가능성을 판단함에 있어 수온, 염분, 용존산소, 영양염, pH등과 같은 주요 환경인자는 매우 중요하며, 이들 인자를 요약하여 Table 2에 나타내었다. 부산항 주변수의 수온은 14.4-15.8 °C로 큰 차이를 보이지 않았으나, 염분(28.6-32.4 psu), pH(8.0-8.4), 영양염농도(DIN: 8.53-145.90, DSi: 4.36-46.90, DIP: 0.11-2.60 µM)는 큰 폭으로 변동하였다. 부산항에 입항한 *Golden Voyage*의 컨테이너선은 좌우 양쪽탱크에서 기원이 서로 다른 선박평형수가 취수되었기에, 각각의 탱크를 조사하여 *Golden Voyage* (1:Tokuyama, Japan)과 *Golden Voyage*(2:Moji, Japan)로 구분하여 표기하였다. 두 탱크 선박평형수내 환경인자는 유사한 경향을 나타내었고, 인산염의 농도는 검출한계로 나타났다. *Sormovs Kiy*는 중국 담수기원의 선박평형수를 취수하여 염분이 극히 낮았고(0.28 psu), 상대적으로 영양염 농도는 높게 나타났다. *Merry Star*의 선박평형수는 주변수와 환경요인이 유사하였다. 특히 일본기원의 선박평형수내의 영양염 농도는 상대적으로 낮았고, 그 중 인산염농도가 극히 낮게 나타난 것이 특이하였다. 대산항에서는 2척 *Elisabeth*

**Table 2.** Results of temperature, salinity, dissolved oxygen (DO), and nutrients in shipside water and ballast water of ships berthed at Ulsan and Daesan ports

Ship name	Waters	Temp. (C)	Sal. (psu)	DO (mg L <sup>-1</sup> )	pH	Nutrients (µM)		
						DSi	DIN	DIP
<i>Golden Voyage</i> (1)	SW	15.7	28.61	8.23	8.04	46.90	145.90	2.60
	<b>BTW</b>	<b>16.87</b>	<b>32.07</b>	<b>8.02</b>	<b>8.42</b>	<b>5.50</b>	<b>3.50</b>	<b>&lt;0.02</b>
<i>Golden Voyage</i> (2)	SW	-	-	-	-	-	-	-
	<b>BTW</b>	<b>17.5</b>	<b>32.08</b>	<b>7.59</b>	<b>8.41</b>	<b>9.99</b>	<b>6.67</b>	<b>&lt;0.02</b>
<i>Sormovs Kiy</i>	SW	14.4	32.41	8.36	8.30	4.60	32.77	0.11
	<b>BTW</b>	<b>15.1</b>	<b>0.28</b>	<b>8.92</b>	<b>7.95</b>	<b>68.65</b>	<b>32.77</b>	<b>0.64</b>
<i>Merry Star</i>	SW	15.8	31.48	8.86	8.44	4.36	8.53	<0.02
	<b>BTW</b>	<b>16.4</b>	<b>29.91</b>	<b>7.86</b>	<b>8.42</b>	<b>6.36</b>	<b>5.77</b>	<b>&lt;0.02</b>
<i>Elisabeth</i>	SW	15.1	30.95	8.99	8.30	1.17	4.65	0.06
	<b>BTW</b>	<b>21.8</b>	<b>30.60</b>	<b>5.68</b>	<b>8.29</b>	<b>6.55</b>	<b>14.76</b>	<b>0.18</b>
<i>Shui Shan</i> (1)	SW	16.1	30.72	9.17	8.36	3.12	7.80	0.10
	<b>BTW</b>	<b>21.0</b>	<b>17.40</b>	<b>7.32</b>	<b>8.17</b>	<b>59.14</b>	<b>114.90</b>	<b>1.54</b>
<i>Shui Shan</i> (2)	SW	-	-	-	-	-	-	-
	<b>BTW</b>	<b>22.0</b>	<b>11.42</b>	<b>7.48</b>	<b>8.24</b>	<b>75.69</b>	<b>133.41</b>	<b>1.47</b>

SW: shipside water, BTW: ballast tank water, which is indicated in bold, DSi: silicate; DIN (dissolved inorganic nitrogen): nitrate + nitrite, Ammonium; DIP: phosphate

**Table 3.** The list of bacillariophyceae collected from ship's ballast tank water (unit: cells L<sup>-1</sup>)

Species/Ships name	Golden Voyage(1)	Golden Voyage(2)	Sormovs Kiy	Merry Star	Elisabeth	Shui Shan(1)	Shui Shan(2)
<b>Bacillariophyceae</b>							
<i>Actinoptychus senarius</i>	62	0	0	0	0	0	0
<i>Asterionellopsis glacialis</i>	124	247	0	0	0	0	0
<i>Asteroplanus rubustus</i>	0	0	0	4	0	0	0
<i>Bacteriastrium comosum</i>	0	0	0	512	0	0	0
<i>Cerataulina pelagica</i>	0	0	0	0	0	0	65
<i>Chaetoceros affinis</i>	0	0	0	9	0	0	0
<i>Chaetoceros didymum</i>	743	0	0	34	0	0	0
<i>Chaetoceros diadema</i>	0	330	0	43	0	0	0
<i>Chaetoceros danicus</i>	1363	82	0	9	0	0	0
<i>Chaetoceros decipiens</i>	247	0	0	201	0	0	0
<i>Chaetoceros debilis</i>	0	165	0	0	0	0	0
<i>Chaetoceros eibenil</i>	185	0	0	4	0	0	7
<i>Chaetoceros pelagicus</i>	0	3133	0	243	0	0	0
<i>C. pseudocrvisetus</i>	805	1319	0	0	0	0	0
<i>Corethron criophilum</i>	0	0	0	4	0	0	0
<i>Coscinodiscus argus</i>	0	82	2	0	0	0	3
<i>Coscinodiscus concinnus</i>	12	0	0	0	0	0	0
<i>Coscinodiscus granii</i>	12	165	4	0	0	0	0
<i>Coscinodiscus subtilis</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Coscinodiscus wailesii</i>	12	0	2	0	0	0	0
<i>Cylindrotheca closterium</i>	2355	82	2	68	0	0	0
<i>Detonula pumila</i>	124	0	0	13	0	0	0
<i>Ditylum brightwellii</i>	12	82	0	0	0	0	0
<i>Ditylum sol</i>	12	0	0	0	0	0	0
<i>Eucampia zodiacus</i>	185	82	0	13	0	0	0
<i>Guinardia striata</i>	12	1072	0	0	0	0	0
<i>Guinardia delicatula</i>	371	330	0	34	0	0	0
<i>Guinardia flaccida</i>	185	742	2	4	0	0	0
<i>Leptocylindrum danicus</i>	6819	0	23	47	14	11	0
<i>Landeria annulata</i>	124	0	4	26	0	0	65
<i>Licmophora abbreviate</i>	0	0	0	4	0	0	0
<i>Navicular spp.</i>	0	0	0	0	5	1	0
<i>Odontella aurita</i>	0	0	0	9	0	0	0
<i>Paralia sulcata</i>	124	0	0	0	0	0	0
<i>Pleurosigma normanii</i>	124	0	2	0	0	0	0
<i>Pleurosigma elongatum</i>	0	82	0	9	0	0	0
<i>Pleurosigma longum</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Pseudo-nitzschia australis</i>	2355	0	0	0	0	0	0
<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>	3223	3463	56	26	0	0	0
<i>Pseudo-nitzschia multiseriis</i>	0	0	0	896	0	0	0
<i>P. pseudodelicatissima</i>	41162	82	0	26	0	0	0
<i>Rhizosolenia pungens</i>	62	0	0	0	0	0	0
<i>Rhizosolenia imbricata</i>	310	82	0	0	0	0	0
<i>Rhizosolenia setigera</i>	248	0	0	0	0	0	0
<i>Skeletonema costatum</i>	7686	1979	109	26	4120	5	376
<i>Stephanopyxis palmeriana</i>	0	0	8	0	0	0	0
<i>Synedra sp.</i>	0	0	12	0	0	0	0
<i>Thalassiosira baltica</i>	62	0	0	0	0	0	10
<i>Thalassiosira rotula</i>	124	165	0	0	0	0	0
<i>Thalassiosira pacifica</i>	248	82	0	0	0	1	0
<i>Thalassiosira mala</i>	62	0	0	0	0	0	0
<i>Thalassiosira sp.</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Thalassiosira nordenskiöldii</i>	186	0	2	0	0	1	0
<i>Thalassionema frauenfeldii</i>	12	0	0	26	0	0	0
<i>Thalassionema nitzschioides</i>	557	0	0	34	32	0	0
<i>Tropidoneis lepidoptera</i>	12	0	0	4	0	0	0
Total	70335	13851	231	2328	4181	19	526

와 *Shui Shan*의 선박을 조사하였으나, 그 중 *Shui Shan*은 기원이 다른 두 지역의 평형수를 취수하였기에, 각각의 선박평형수탱크를

*Shui Shan*(1)과 *Shui Shan*(2)로 구분하였다. 대산항에 입항한 선박평형수는 주변수보다 수온이 5-6 °C 정도 높게 관찰되었다. *Shui*

Shan(1)과 Shui Shan(2)은 기수성 선박평형수를 취수하여 염분이 각각 17.4 psu와 11.4 psu로 주변수보다 낮았고, 영양염 농도는 극히 높게 관찰되었다.

조사한 선박평형수내 식물플랑크톤의 현존량과 출현 종 수는 평형수 취수 후 1일 밖에 지나지 않은 Golden Voyage(1)에서 가장 높았고, 다음으로 Golden Voyage(2)이었다. Golden Voyage(1)에서는 규조류가 70,335 cells L<sup>-1</sup>로 가장 높게 나타났고(Table 3), 다음으로 외편모조류가 관찰되었다. 그 중 외편모조류의 현존량은 그다지 높지 않았으나, 출현 종 수는 다른 선박에 비하여 압도적으로 높았다(Table 4). 특히 Sormovs Kiy선박은 담수기원의 선박평형수를 취수하였으나, 규산질 각을 형성한 해수성 규조류와 더불어 담수종이 출현하는 특이한 양상을 보였다. Merry Star, Elisabeth 2척의 선박평형수내 식물플랑크톤의 현존량은 낮게 관찰되었고, 그들의 대부분은 규조류로 구성되었다. Shui Shan(1)에서는 담수종이 1종 출현하였으나, 식물플랑크톤의 현존량은 7척의 선박중 가장 낮게 관찰되었다. 선박평형수 취수후 배출하지 않고 장기간

보관한 선박 Elisabeth와 Shui Shan(1)에서는 출현하는 종 수와 현존량이 극히 낮게 나타났다. 그 중 Elisabeth는 식물플랑크톤의 종 다양성(H')과 균등도 지수(J')가 극히 낮았고, 반대로 취수 후 항해기간이 짧은 선박 Golden Voyage(1)와 Golden Voyage(2)은 종 다양성과 균등도 지수가 상대적으로 높게 나타났다(Fig. 1).

선박 평형수내 환경인자와 주변수(부산, 대산항)의 환경인자간의 특성을 구분하기 위해서 PCA분석을 수행한 결과, 생물지리역이 다른 선박평형수의 환경인자 차이를 확인하였다(Fig. 2). 제 1 성분에서 염분, pH, 규산염, 인산염, 질산염, 암모니움등이 유의한 값을, 제2성분에서는 수온과 용존산소간에 유의한 값을 각각 나타내었다(Table 5). 또한 조사 선박중 일본에서 입항한Golden Voyage(1)와 Golden Voyage(2)의 선박평형수는 환경요인이 유사하여 서로 가까운 위치에 배열되었고, 중국에서 입항한Shui Shan(1)와 Shui Shan(2)선박 또한 서로 유사한 위치에 배열되었다. 대산항에서 각 선박의 주변수는 서로 환경요인이 유사하여 PCA분석에서도 인접해 있는 것을 확인 할 수 있었으나, 부산항의 Golden

**Table 4.** The list of other phytoplankton groups including freshwater species collected from ship's ballast tank water (unit: cells L<sup>-1</sup>)

Species/Ships name	Golden Voyage(1)	Golden Voyage(2)	Sormovs Kiy	Merry Star	Elisabeth	Shui Shan(1)	Shui Shan(2)
<b>Dinophyceae</b>							
<i>Alexandrium</i> sp.	62	0	0	0	0	0	0
<i>Ceratium fusus</i>	186	0	6	0	0	0	0
<i>Ceratium furca</i>	62	165	2	0	0	0	0
<i>Ceratium koforid</i>	62	0	0	0	0	0	0
<i>Ceratium lineatum</i>	248	0	0	0	0	0	65
<i>Ceratium tripos</i>	0	165	0	0	0	0	0
<i>Dinophysis accuminata</i>	62	0	0	0	0	0	0
<i>Dinophysis fortii</i>	62	0	0	0	0	0	0
<i>Dissodinium pseudolunula</i>	62	0	0	0	0	0	0
<i>Gymnodinium</i> sp.	0	0	0	0	0	1	0
<i>Gonyaulax polygramma</i>	0	0	0	0	0	0	3
<i>Lingulodinium polyedrum</i>	62	0	0	0	0	0	0
<i>Oxyphysis oxytoxoides</i>	6	0	0	0	0	0	0
<i>Protoperidinium bipes</i>	0	82	0	0	0	0	0
<i>Protoperidinium conicum</i>	62	0	0	0	0	0	3
<i>Protoperidinium brevipes</i>	62	0	0	0	0	0	0
<i>Protoperidinium depressum</i>	12	0	0	0	0	0	0
<i>Protoperidinium divergens</i>	6	0	0	0	0	0	0
<i>Protoperidinium leonis</i>	186	0	0	0	0	0	0
<i>Protoperidinium minutum</i>	6	0	0	0	0	0	0
<i>Protoperidinium pallidum</i>	124	0	0	0	0	0	0
<i>Protoperidinium pellucidum</i>	62	0	0	0	0	0	0
<i>Protoperidinium quarnerense</i>	248	0	0	0	0	0	3
<i>Protoperidinium steinii</i>	124	0	0	0	0	0	0
<i>Protoperidinium</i> sp.	0	0	0	0	0	0	95
<i>Pyrophacus steinii</i>	31	82	0	0	0	0	0
<i>Scripsiella trochoidea</i>	62	0	0	0	0	0	0
<b>Cryptophyceae</b>							
Cryptophyceae group	62	0	0	0	0	2	0
<b>Crysohyceae</b>							
<i>Dictyocha fibula</i>	124	82	0	0	0	0	3
<i>Dictyocha speculum</i>	372	165	2	0	0	1	0
<b>Euglenphyceae</b>							
<i>Eutreptiella gymnastica</i>	0	0	2	0	0	2	0
<b>Freshwater species</b>							
<i>Pediastrum duplex</i>	0	0	97	0	0	0	0
<i>Fragilaria</i> sp.	0	0	0	0	0	2	0
<i>Tabellaria fenestrata</i>	0	0	64	0	0	0	0
<b>Total</b>	<b>2418</b>	<b>742</b>	<b>173</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>111</b>

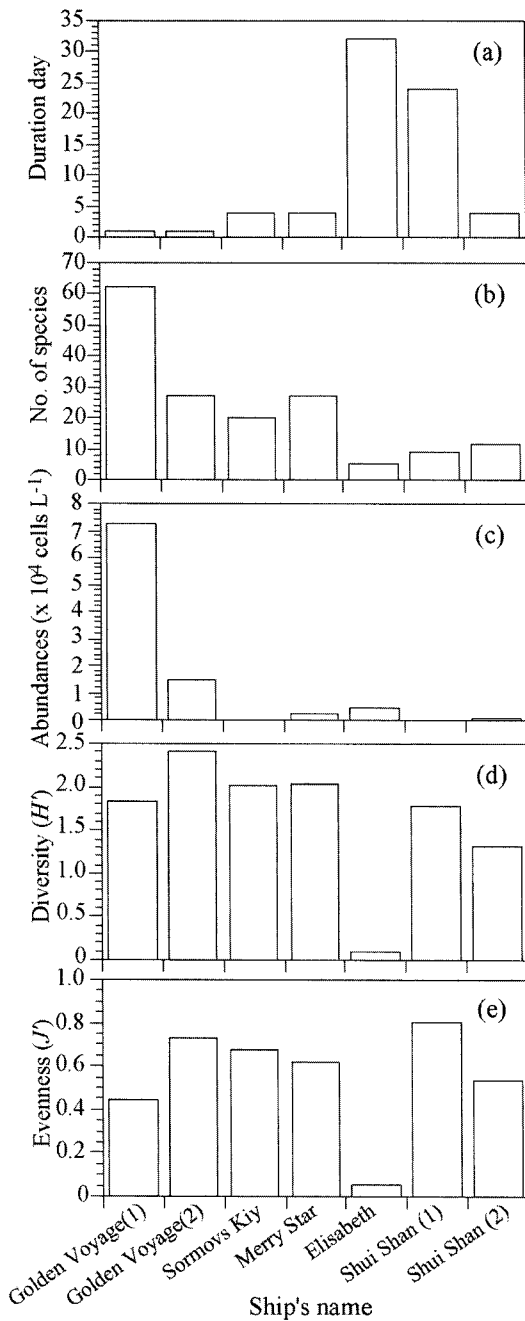


Fig. 1. Changes of age of tank (a), number of species (b), phytoplankton abundances (c), phytoplankton species diversity (d) and evenness for each ballast tank.

Voyage 주변수는 전혀 다른 위치에 배열되었다. 식물플랑크톤의 출현종과 현존량을 바탕으로 한 Cluster 분석에서도 선박평형수 취수 기원에 따라서 그들 선박평형수내 식물플랑크톤의 유사성은 40% 이하로 낮게 묶였다(Fig. 3).

**배양실험을 통한 식물플랑크톤 성장반응**

중국 기원 Shui Shan(2)의 선박평형수내 유입된 식물플랑크톤 성장은 어떤 수온 조건에서도 선박평형수 실험구(ballast water treatment)에서는 형광값을 관찰할 수 없었다(Fig. 4). 10 °C에서는

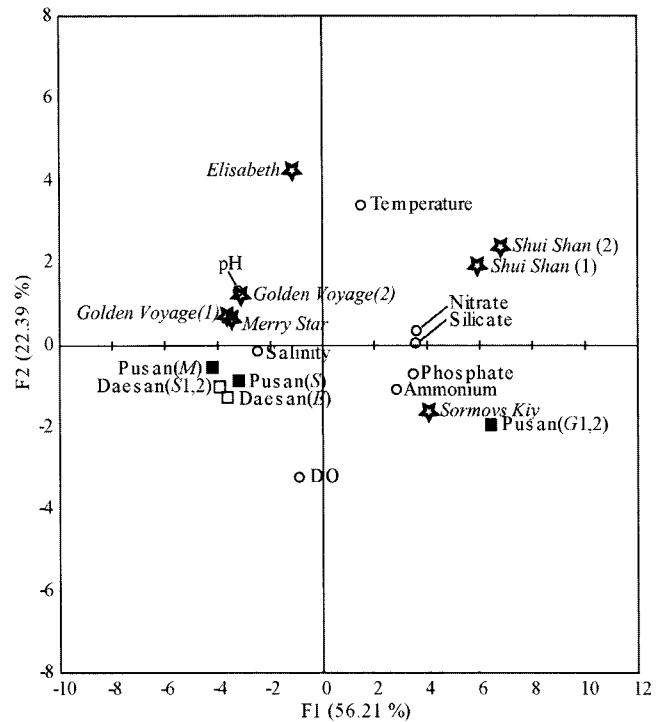


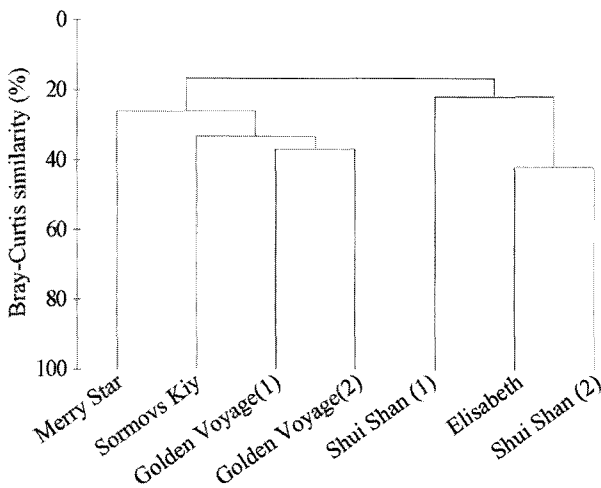
Fig. 2. Score plot by principal component analysis (PCA) based on environmental factors (temperature, salinity, pH, DO and nutrients) for shipside water and each ship's ballast water berthed at Daesan and Pusan Ports, Korea.

Table 5. Factor loadings of principal components analysis (PCA) and cumulative (%) variance for 8 variables at each ballast and shipside waters

	F1	F2	F3
Temperature	0.385	<b>0.896</b>	-0.019
Salinity	<b>-0.647</b>	-0.036	<b>0.757</b>
DO	-0.234	<b>-0.866</b>	-0.267
pH	<b>-0.840</b>	0.337	0.136
Silicate	<b>0.943</b>	0.013	-0.307
Phosphate	<b>0.907</b>	-0.203	0.364
Nitrate	<b>0.945</b>	0.092	0.064
Ammonia	<b>0.752</b>	-0.270	<b>0.596</b>
Eigenvalue	4.50	1.79	1.25
Variability (%)	56.21	22.39	15.62
Cumulative (%)	56.21	78.60	94.22

Bold words: significant levels

영양염 농도가 높은 F/2배지 실험구(F/2 medium treatment)나 주변수 실험구(shipside water treatment)에서 배양 10일 후 형광값이 나타났다. F/2배지 실험구에서는 15 °C 부터 접종 8일 후에 형광값이 관찰되기 시작하여 기하급수적으로 증가하였고, 20 °C에서도 접종 6일 후에 형광값이 높게 관찰되어, 온도증가와 더불어 생물의 초기 적응기간이 단축되었다. 주변수에서는 15 °C에서 가장 높은 형광값이 10 °C와 20 °C에서는 상대적으로 낮은 형광값이 관찰되었다. Shui Shan(2)에서 유입된 생물은 영양염이 풍부한 F/2 배지와 주변수에서 각각 5종과 2종이 성공적으로 적응하였고, 그



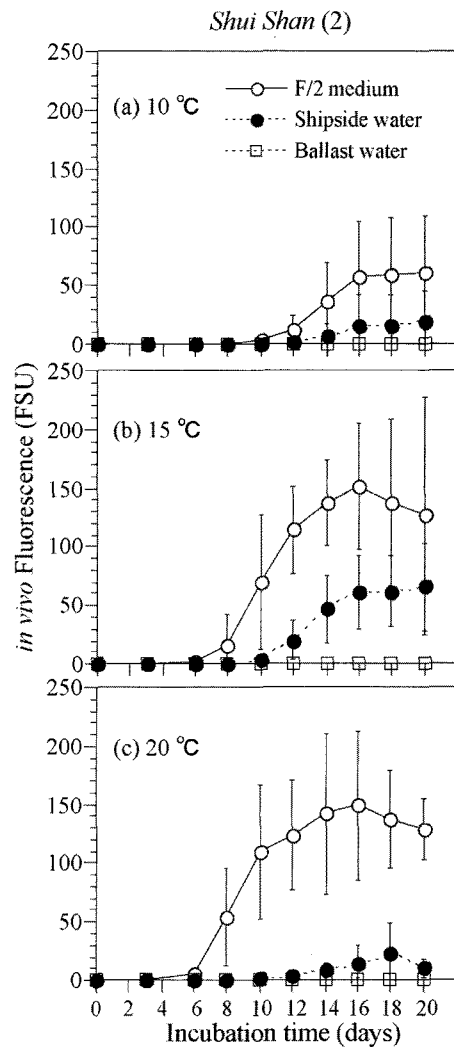
**Fig. 3.** Joint plots of each ballast tank association analysis obtained cluster analyses, using a data set of phytoplankton sample of the 20-µm net tows from ship's ballast water berthed at Daesan and Pusan Ports, Korea.

들의 우점종은 *Skeletonema costatum*와 *Thalassiosira pseudonana*와 더불어 *Chaetoceros* sp.로 관찰되었다(Table 6).

*Shui Shan(2)*의 초기염분 농도가 11.4 psu로 기수성 선박평형수를 취수하였고, 기수역의 식물플랑크톤에 대한 염분적응 능력을 평가하였다(Fig. 5). *Shui Shan(2)*에서 유입된 독립영양성 식물플랑크톤은 광범위한 염분에 적응하여 현저한 활성을 나타내었다. *Shui Shan(2)*에서는 염분구배에 따라서 우점하는 종이 뚜렷히 구분되었다(Table 7). 염분이 0-5 psu에서는 담수종 2-3 µm Cyanobacteria와 더불어 *Cyclotella*, *Melosira*, *Tetraedron*, *Oocystis*, *Scenedesmus*속이 성공적으로 적응하였고, 그 중 Cyanobacteria가 우점하였다. 10-20 psu기수성 염분조건에서는 *S. costatum*, *T. pseudonana*, 극우점하였다. 25-30 psu해수조건에서는 *S. costatum*와 더불어 *Chaetoceros* sp. 높은 개체수 밀도를 유지했다. 그 중 *S. costatum*는 광범위한 염분조건에서 성공적으로 적응하였다.

### 고 찰

외래종의 유입은 토착종의 군집구조와 생태계 기능을 변화시키는 주요 원인이다(Carlton, 1989, 1996; Williamson, 1996). 이들 외래생물의 유입은 담수, 기수 해양 등 다양한 수생태계에 정착하였고, 미국의 경우 적어도 San Francisco Bay에서 234종(Cohen and Carlton, 1998), Great Lakes에서 139종(Mills *et al.*, 1996), Hudson River Basin에서 113종(Mills *et al.*, 1994) 등이 외래기원



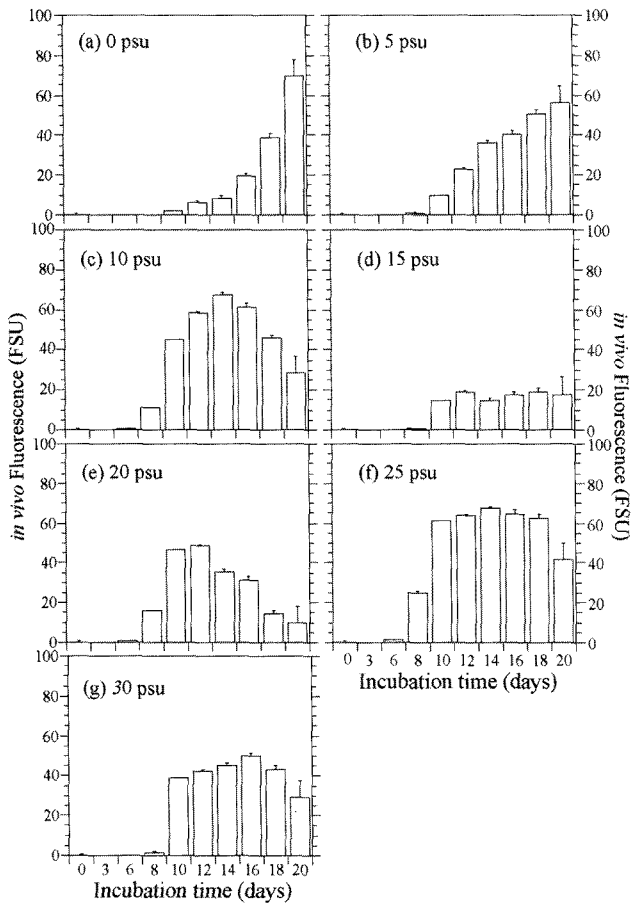
**Fig. 4.** Change in growth of phytoplankton cultured in ballast water, shipside water and F/2 medium at 10, 15 and 20 °C. The cells were collected from ship's ballast water (*Shui Shan 2*) berthed at Daesan Port in Korea. Error bars indicate ± S.D.

으로 보고되고 있다. 외래 수생생물의 대부분은 선박평형수에 의해서 부유성 유생생물에서 유입되어 정착하였을 가능성이 크다(Carlton and Geller, 1993). 선박평형수에 의하여 유입된 생물군은 대장균(McCarthy and Khambaty, 1994), 규조류(Hallegraeff and Bolch, 1992), 독성 외편모조류(Hallegraeff and Bolch, 1991; Burkholder *et al.*, 2007), 원생생물(Pierce *et al.*, 1997), 동물플랑크톤(Olson and Olson, 1989), 저서성 무척추동물과 어류(Williams

**Table 6.** Observed species compositions at last phase of inoculated phytoplankton in ballast water, shipside water, and F/2 medium based on Figure 4

Ship name	F/2 meidum	Shipline water	Ballast water
Shui Shan(2)	<i>Skeletonema costatum</i> (a,b*,c*) <i>Thalassiosira pseudonana</i> (a,b*,c*) Unidentified centric diatom (< 10 µm) (a) <i>Chaetoceros</i> sp. (c*) <i>Thlassionira pacifica</i> (c)	<i>Skeletonema costatum</i> (a, b*, c*) <i>Thalassiosira pseudonana</i> (c*)	No observation

a:10 °C, b:15 °C, c: 20 °C, \*: dominant species



**Fig. 5.** Effect of salinity on phytoplankton population growth in F/2 medium at 15 °C. The incubation experiments were examined under different salinity conditions (0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 psu) from ship's ballast water of *Shui Shan* (2).

**Table 7.** Observed species compositions at last phase of inoculated phytoplankton in the different salinity conditions based on Figure 5

Ship name	<i>Shui Shan</i> (2)
Salinity	
0 psu	<i>Cyclotella</i> sp., Cyanobacteria*, <i>Scenedesmus</i> sp., <i>Thalassiosira</i> sp.
5 psu	<i>Cyclotella</i> sp., Cyanobacteria*, <i>Melosira</i> sp., <i>Tetraedron</i> sp., <i>Oocystis</i> sp.
10 psu	<i>Skeletonema costatum</i> *, <i>Thalassiosira psudonana</i>
15 psu	<i>Skeletonema costatum</i> , <i>Thalassiosira psudonana</i> *
20 psu	<i>Skeletonema costatum</i> *, <i>Thalassiosira psudonana</i>
25psu	<i>Skeletonema costatum</i> *,
30psu	<i>Skeletonema costatum</i> *, <i>Chaetoceros</i> sp.

et al., 1988) 등으로 다양하게 보고되고 있다. 지금까지 우리나라에서 선박평형수와 관련된 연구는 선박평형수에서 유입되는 해양생물의 다양성(유 등, 2006), 플랑크톤의 생사판별기법(백과 신, 2009), 분자생물학적 방법으로 외편모조류의 동정 및 유입여부(박과 김, 2010), 식물플랑크톤 군집의 생물활성능평가(Kang et al., 2010), 전기분해로 생물처리 장치 개발(강 등, 2007), 활성물질을 사용하는 처리장치의 IMO승인절차(김, 2008)등 크게 선박평형수

내 생물처리 장치개발과 선박평형수내 생물의 유입특성 및 생물활성능으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 선박평형수에 유입되는 식물플랑크톤의 군집구조, 다양한 생물지리역의 생물군집과 환경인자의 특성과 더불어 생물검정실험을 통하여 선박평형수내 생물이 우리나라 항만과 연안해역에 정착가능 여부를 판단하는 생물재성장능 등을 제시하였다.

선박평형수 취수 후 탱크내 보관하는 시간(age of ballast water)이 오래되면 플랑크톤의 종 수 및 개체수는 현저히 감소하여 두 인자간의 음의 상관관계가 성립된다(Chu et al., 1997). 본 조사에서 선박평형수내 식물플랑크톤의 현존량은 *Golden Voyage*(1) (1일)에서 가장 높았고, 다음으로 *Golden Voyage*(2)(1일), *Elisabeth* (32일), *Merry star*(4일), *Shu Shan*(2)(4일), *Sormovs Kiy*(4일) *Shu Shan*(1)(24일)순으로 나타나, 선박평형수 체류기간과 현존량의 관계는 그다지 높지 않았다( $r = -0.35, p < 0.1$ ). 하지만, 선박평형수 체류기간과 출현 종 수는 유의한 높은 음의 상관관계를 확인 할 수 있었다( $r = -0.62, p < 0.01$ ). 일반적으로 선박평형수에 출현하는 종의 수와 다양성은 취수 후 체류기간과 더불어 평형수의 취수지역에 따라서 영향을 받을 수 있으나, 본 연구에서는 일본에서 입항한 항해기간이 짧은 컨테이너선 *Golden Voyage*에서 식물플랑크톤의 종 수와 현존량이 높게 나타났을 뿐만 아니라 생물종다양성 지수와 균등도 지수가 높게 나타났고, Chu et al.(1997)이 언급한 탱크내 보관하는 시간 증가와 더불어 식물플랑크톤의 출현 종 수가 현저히 감소하는 현상과 일치하였다.

대부분의 세계주요 항만은 원활한 화물의 하역과 적재를 돕기 위해 항만 주요시설은 인공구조물로 반폐쇄적으로 만들어져 있어 해수의 교환이 원활하지 않아 높은 영양염 농도가 관찰되기 쉽다 (Carlton and Geller, 1993). 본 연구의 PCA분석에서 부산항에 입항한 *Golden Voyage* 주변수의 환경인자는 다르게 나타났다. 반면, 대산항의 주변수와 부산항에 입항한 다른 2척 선박 주변수는 비슷한 위치에 배열되어, 항만환경인자가 유사하다는 것을 의미할 수 있다. 본 연구에서는 생물지리역이 다른 선박평형수내 환경인자간의 차이를 주성분분석에서 파악되었다. 특히 일본에서 출발한 *Golden Voyage*(1)와 *Golden Voyage*(2)는 각각 취수기원이 달랐으나 PCA분석에서 유사한 위치에 배열되어 환경인자가 유사하다는 것을 알 수 있었고, 중국에서 취수한 *Shui Shan*(1)와 *Shui Shan*(2)의 두 탱크 선박평형수내 환경인자가 유사한 경향을 관찰하였다. 일본에서 입항한 *Golden Voyage*(1, 2)와 *Merry Star*는 영양염 농도가 극히 낮고 염분농도가 높게 관찰된 반면, 중국에서 입항한 *Shui Shan*(1, 2)와 *Sormovs Kiy*는 영양염농도가 극히 높고, 염분이 낮았다. 이는 선박평형수 취수지역의 국가에 따라서 영양염 농도를 간접적으로 가늠할 수 있을 것으로 판단되지만, 일반적으로 염분이 낮은 지역은 영양염농도가 높게 관찰되는 경향이 있기 때문에 단정적으로 결론내리기 어렵다. PCA분석에서도 아시아 3개국 중국, 일본, 싱가포르에서 입항한 7척의 선박은 각국의 환경특성에 따른 생물지리역의 차이를 확인할 수 있었으나, 생물지리역이 비슷한 일본기원의 선박평형수는 근접한 위치에 배열되어 일본내 3지역의 환경인자가 유사하다는 것을 알 수 있었고, 식물플랑크톤 군집구조를 파악하는 Cluster에서도 유사도는 낮았지만 같은 그룹으로 묶이는 것을 파악하였다. 결과적으로 선박평형수 취수지역의 지리적 위치와 더불어 상대국가에 따라서 환경인자(영양염농도)의



차이를 확인하였고, 이는 우리나라 부산항(남해)과 대산항(서해)의 주변수의 환경인자간에서도 차이를 확인 할 수 있었다.

일반적으로 자가 및 혼합 영양성 식물플랑크톤의 성장에 중요한 영향을 미치는 것은 온도, 광량, 영양염, 염분등이 있다. Gollasch *et al.*(2000, 2007)은 선박평형수 취수후 탱크안의 생물은 취수한 해역의 수온과 선박이 이동하는 동안 해역의 수온차이에 영향을 받을 수 있다고 언급하였다. 본 연구에서 *Shui Shan*(2)의 선박평형수내 유입된 식물플랑크톤 성장은 선박평형수 실험구의 모든 수온 조건에서도 성공적인 재성장은 이루어지지 않았고, Kang *et al.*(2010)에서도 본 연구와 유사한 경향이 관찰되었다. 이것은 평형수내 영양염 농도와 식물플랑크톤의 성장과 관련이 있을 수 있다. 하지만 *Shui Shan*(2)에서는 필수 영양염 농도(Si=75.69, N=133.41, P=1.47)가 극히 높게 관찰되었음에도 불구하고 선박평형수의 실험구에서는 성장이 관찰되지 않았다는 것은 필수 영양염보다는 다른 미량원소의 제한에서 기인된 것으로 생각된다. 한편 수온이 15, 20 °C 조건에서 주변수와 주변수에 영양염을 첨가한 F/2 실험구에서 형광값의 차이는 보였지만, 식물플랑크톤의 재성장을 관찰할 수 있었다. *Shui Shan*(2)에서 유입된 생물은 영양염이 풍부한 F/2 배지와 주변수에서 각각 5종과 2종이 성공적으로 적응하였고, 그들의 우점종은 *Thalassiosira pseudonana*와 *S. costatum*으로 나타났다. *Shui Shan*(2)의 우점종은 15, 20 °C의 F/2배지에서 *S. costatum*로 관찰되었으나, 주변수 15 °C에서는 *T. pseudonana*가 성장하지 않았다. 본 연구에서 재성장에 성공한 생물은 대부분 우리나라 연안에서 출현하는 규조류였다. 결과적으로 이들 종은 수온이 15-20 °C 내외의 환경조건에서 성공적으로 정착할 가능성이 클 것으로 사료되었다.

*Shui Shan*(2) 선박의 초기 염분농도는 11.4 psu로 기수역의 특성을 보였고, 다양한 염분조건의 실험구에서 일정한 높은 형광값이 관찰되었다. *Shui Shan*(2)의 염분에 따른 성장반응은 0-5 psu 염분 범위에서 담수성종 6종이 성공적으로 재성장하였고, 10-20 psu에서는 *T. pseudonana*와 *S. costatum*등의 기수성 해양종이, 20 psu 에서부터는 *S. costatum*와 더불어 *Chaetoceros* sp.가 현저하게 높은 밀도로 나타나, 염분구배에 따라 성공적으로 적응한 종이 뚜렷하게 구분되었다. 담수종과 해양종은 염분에 대한 삼투압이 다르기 때문에 대부분의 담수종은 해수에, 해수종은 담수지역에 적응을 못하여 세포의 치명적인 손상을 입는 반면, 기수성종은 광범위한 염분구배에 잘 적응하여 성장이 가능하다. 기수종 *T. pseudonana*는 0-45 psu의 염분범위에서 성장할 수 있지만(Brand, 1984), 이종의 최적 염분조건은 10-20 psu로 본 연구에서 재성장한 염분 범위와 잘 일치하였다. 본 연구에서 초기실험에서는 출현하지 않은 종이 실험종료시에는 출현하였고, 이와 같은 양상은 Kang *et al.*(2010)에서도 보고 되었다. 결과적으로 본 실험을 통하여 기수해역에서 취수한 선박평형수의 생물들은 배출될 해역이 담수나 해수 어느쪽 해역에 옮겨진다고 가정하여도 그들은 특정해역의 염분에 적응하여 성공적으로 정착 할 가능성이 높다는 것을 시사하였다.

선박평형수 탱크는 충분한 공간이 있고, 수온과 무생물학적 환경요인의 급격한 변화를 완화할 수 있어 부유성 생물의 생존이 일정기간 가능하다. 하지만, 자가영양식물플랑크톤의 경우 장기간 자연광의 차단으로 인하여 생물활성이 둔화되어 사멸하거나, 휴면포

자를 형성하여 탱크 바닥층에 퇴적된다(Hallegraeff and Bolch, 1991, 1992). Hallegraeff and Bolch(1991)에 의하면 선박평형수내 퇴적물속에서 외편모조류의 시스트가 높은 밀도로 출현하였고, 이들 시스트는 일정기간 휴면 후 발아하여 다른해역에 영향을 미칠 수 있는 잠재적 능력이 충분하다고 언급하였다. 시스트의 형성은 부적합한 환경조건에서 생존할 수 있는 생태학적 생존전략으로 생물 대발생의 씨앗중(seed population)으로 중요한 의미를 가지며, 선박평형수내 생물이동이 성공적으로 정착할 수 있는 주요 원인으로 작용된다(Williamson, 1996; Smayda and Reynolds, 2003). Popels and Hutchins(2002)는 휴면포자를 생성하지 않는 종도 장기간 암조건에서 유영세포로 생존이 가능하고, 암조건을 경험하고 난 후 생물활성을 여전히 유지하여 높은 성장률을 보였다는 것을 보고하였다. 이와 같이 선박평형수내 장기간 빛의 부재로 생물의 성장활성을 잃어 대부분의 종은 사멸하지만, 일부 종은 그들의 생활사에서 살아남을 수 있는 생존전략을 가지고 있기 때문에 가령 장기보관된 선박평형수내 생물도 배출 후 개선된 다른 항만 환경에서 번식체로서 중요한 역할을 할 것이다. 본 연구에서는 선박평형수내 퇴적물 시료를 얻을 수 없어 시스트의 형성여부는 조사하지 않았지만, 추후 우리나라 해역에 입항하는 선박을 대상으로 상세한 연구가 필요하다.

## 사 사

본 연구는 한국해양연구원 연구과제 “선박평형수 위해도 평가 기술 개발 연구: 서해항만(PE98665)”과 “전략 무인도서 해양생태계 기반 관리기술 개발 연구(PE98583)의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 강정훈, 신경순, 현봉길, 장민철, 김은찬, 장만, 2007. 해양 플랑크톤 군집의 전기분해 염소소독 효과. 한국해양환경공학회지, **10**: 127-137.
- 김은찬, 2008. 활성물질을 사용하는 선박평형수 처리장치의 IMO 승인 절차 고찰. 한국해양환경공학회지, **11**: 214-220.
- 박대규, 김성연, 2010. 선박평형수내 유해 외편모조류(Dinophyceae)의 분자생물학적 검출. 한국해양학회지, 「바다」 **15**: 36-40.
- 백승호, 신경순, 2009. FDA와 Calcein-AM 방법을 이용한 해양 플랑크톤 생사판별기법. Ocean Polar Res., **31**: 349-357.
- 유정규, 송태운, 홍현표, 정경미, 명철수, 2006. 한국에 입항한 선박 밸러스트 수에 존재하는 해양 부유생물. Ocean Polar Res., **28**: 57-65.
- Burkholder, J.M., Hallegraeff, G. H., Melia, G., Cohen, A., Bowers, H.A., Oldach, D.W., Parrow, M.W., Sullivan, M.J., Zimba P.V., Allen, E.H., Kinder, C.A., and M.A. Mallin, 2007. Phytoplankton and bacterial assemblages in ballast water of U.S. military ships as a function of port of origin, voyage time, and ocean exchange practices. Harmful Algae, **6**: 486-518.
- Brand, L.E., 1984. The salinity tolerance of forty-six marine phytoplankton isolates. Estuarine, Coastal and shelf Science, **18**: 543-556.
- Carlton, J.T., 1996. Pattern, process and prediction in marine inva-

- sion ecology. *Biol. Conserv.*, **78**: 97–106.
- Carlton, J.T. and J.B. Geller, 1993. Ecological roulette: the global transport of nonindigenous marine organisms. *Science*, **261**: 78–82.
- Carlton, J.T., 1989. Man's role in changing the face of the ocean: biological invasions and implications for conservation of near-shore environments. *Conserv. Biol.*, **3**: 265–273.
- Carlton, J.T. and J.A. Scanlon, 1985. Progression and dispersal of an introduced alga: *Codium fragile* spp. *Tomentosoides* (Chlorophyta) on the Atlantic coast of North America. *Bot. Mar.*, **28**: 155–165.
- Chu, K.H., Tam, P.F., Fung, C.H. and Q.C. Chen, 1997. A biological survey of ballast water in container ships entering Hong Kong. *Hydrobiologia*, **352**: 201–206.
- Cohen, A.N. and J.T. Carlton, 1998. Accelerating invasion rate in a highly invaded estuary. *Science*, **279**: 555–557.
- Dodge, J.D., 1982. *Marine dinoflagellate of the British Isles*. Her Majesty stationary office, London, 303 pp.
- Gollasch, S., Lenz, J., Dammer, M. and H.G. Andres, 2000. Survival of tropical ballast water organism during a cruise from the Indian Ocean to the North Sea. *J. Plankton Res.*, **22**: 923–937.
- Gollasch, S., David, M., Voigt, M., Dragsund, E., Hewitt, C. and Y. Fukuyo, 2007. Critical review of the IMO international convention on the management of ship's ballast water and sediments. *Harmful Algae*, **6**: 587–600.
- Hallegraeff, G.M., 1998. Transport of toxic dinoflagellates via ship's ballast water: bioeconomic risk assessment and efficacy of possible ballast water management strategies. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **168**: 297–309.
- Hallegraeff, G.M. and C.J. Bolch, 1991. Transport of toxic dinoflagellate cysts via ship's ballast water. *Mar. Pollut. Bull.*, **22**: 27–30.
- Hallegraeff, G.M. and C.J. Bolch, 1992. Transport of diatom and dinoflagellate resting spores in ship's ballast water: implications for plankton biogeography and aquaculture. *J. Plankton Res.*, **14**: 1067–1084.
- Hays, K.R. and C. Sliwa, 2003. Identifying potential marine pests: a deductive approach applied to Australia. *Mar. Pollut. Bull.*, **46**: 91–98.
- IMO 2001. Report on the Ballast Water Treatment Standards Workshop. International Maritime Organization, GloBallast Programme, 1<sup>st</sup> International Ballast Standards Workshop, March 2001. Available at <http://globallast.imo.org/workshopreport.htm>.
- IMO 2004. International Convention on the Control and Management of Ship's Ballast Water and Sediments. Adopted London, 23 February <http://www.imo.org/home.asp>. Accessed 5 June 2005.
- Kang, J.H., Hyun, B.G. and K.S. Shin, 2010. Phytoplankton viability in ballast water from international commercial ships berthed at ports in Korea. *Mar. Pollut. Bull.*, **60**: 230–237.
- Lewis, P.N., Hewitt, C.L., Riddle, M. and A. McMinn, 2003. Marine introductions in the Southern Ocean: an unrecognized hazard to biodiversity. *Mar. Pollut. Bull.*, **46**: 213–223.
- McCarthy, S. and F.M. Khambaty, 1994. International dissemination of epidemic *Vibrio cholera* by cargo ship ballast water and other nonpotable waters. *Environ. Microb.*, **60**: 2597–2601.
- Mills, E.L., Leach, J.H., Carlton, J.T. and C.L. Secor, 1994. Exotic species and the integrity of the Great Lakes. Lessons from the past. *Bioscience*, **44**: 666–676.
- Mills, E.L., Strayer, D.L., Scheurell, M.D. and J.T. Carlton, 1996. Exotic species in the Hudson River Basin: A history of invasions and introductions. *Estuaries*, **19**: 814–823.
- Olson, R.R. and M.H. Olson, 1989. Food limitation of planktonic marine invertebrate larvae: does it control recruitment success? *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, **20**: 225–247.
- Parsons, T.R., Maita, Y. and C.M. Lalli, 1984. *A manual of chemical and biological methods for seawater analysis*. Pergamon Press, Oxford, 173 pp.
- Pierce, R., Carlton, J.T., Carlton, D. and J.B. Geller, 1997. Ballast water as a vector for tintinnid transport. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **149**: 295–297.
- Popels, L.C. and D.A. Hutchins, 2002. Factor affecting dark survival of the brown tide alga *Aureococcus anophagefferens* (Pelagophyceae). *J. Phycol.*, **38**: 738–744.
- Smayda, T.J., 2007. Reflections on the ballast water dispersal-harmful algal bloom paradigm. *Harmful Algae*, **6**: 601–622.
- Smayda, T.J. and C.S. Reynolds, 2003. Strategies of marine dinoflagellate survival and some rules of assembly. *J. Sea. Res.*, **49**: 95–106.
- Tomas, C.R., 1997. *Identifying marine phytoplankton*. Academic Press, California. 858 pp.
- Williams, R.J., Griffiths, F.B., Van der Wal, E.J. and J. Kelly, 1988. Cargo vessel ballast water as a vector for the transport of non-indigenous marine species. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **26**: 409–420.
- Williamson, M., 1996. *Biological Invasion*. Chapman and Hall, London, 224 pp.
- Yamaji, I., 1979. *Illustrations of the marine plankton of Japan*. Hoikusha Publishing Co Ltd., Osaka Japan. 537 pp.
- Zhang, F. and M. Dickman, 1999. Mid-ocean exchange of container vessel ballast water. 1: Seasonal factors affecting the transport of harmful diatoms and dinoflagellate. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **176**: 243–251.

2011년 1월 25일 원고접수

2011년 3월 23일 수정본 채택

담당편집위원: 이준백