

USCG phase-II 선박평형수 처리장치 성능 평가에 대비한 해양식물플랑크톤 네트 농축효율 비교

백승호¹, 이민지¹, 신경순^{1*}
¹한국해양과학기술원 남해연구소

Efficiency of concentrating marine microplanktonic organisms using net sampler to verify the efficacy of a ship's ballast water treatment system

Seung Ho Baek¹, Min Ji Lee¹, kyoungsoon Shin^{1*}

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

요약 본 연구에서는 USCG Phase-II 형식승인을 대비하여 $\geq 10 \mu\text{m}$ 와 $\leq 50 \mu\text{m}$ 크기 식물플랑크톤의 생물군에 관해서 네트를 이용한 생물농축 방법 및 농축효율을 비교하고자 하였다. 생물 농축 효율의 비교는 네트 망목 사이즈($5 \mu\text{m}$, $7 \mu\text{m}$)의 차이, 펌프 이용률 이용한 연속적인 시료 공급 방법과 핸드브레이커 이용한 불연속적인 시료공급의 차이, 자연해수의 용량에 따른 차이 등을 종합적으로 검토하였다. 각 실험군 간의 차이를 *t*-test로 검증한 결과, $5 \mu\text{m}$ 와 $7 \mu\text{m}$ 망목에 의한 차이는 유의하게 나타나지 않았고($p>0.05$), 자연해수 용량에 따른 생물농축효율의 차이도 명확하지 않았다($p>0.05$). 하지만 펌프에 의한 연속적인 시료 공급은 핸드브레이커의 불연속적인 시료보다 통계적으로 유의하게 생물 농축효율이 높게 나타났다(*t*-test: t :-4.058, $p<0.05$). 특히 네트 농축 실험 시 출현한 식물플랑크톤의 군집조성은 규조류 17종, 와편모조류 15종, 유글레나조류 1종, 착편모조류 2종과 함께 미동정 편모조류로 총 36종이었고, 우점종으로는 *Pseudo-nitzschia* spp.로 관찰되었다. 여기서, 모든 실험군에서 생물 농축 효율이 20-25% 전후로 균일하게 낮게 나타난 것이 특이적 이었고, 그 이유로는 우점종인 *Pseudo-nitzschia* spp.의 한 편미의 사이즈가 3-8 μm 로 네트 망목을 통과하여 손실된 결과로 판단되었다. 결과적으로 네트의 농축은 자연 식물플랑크톤 군집에서 출현한 종의 사이즈에 의존한다는 것을 확인할 수 있었고, 이는 USCG Phase-II 의 형식 승인 선박평형수 처리 장치(BWTS: Ballast Water Treatment System) 통과 후 생물농축과정에서 중 특이적인 사이즈의 분포 양상을 충분히 검토하여 농축 용량을 조절할 필요가 있을 것으로 생각된다.

Abstract To provide a type approval test for Ballast Water Treatment System (BWTS) of United States Coast Guard (USCG) Phase-II, this study examined the concentrating efficiency of nets for $\geq 10 \mu\text{m}$ and $\leq 50 \mu\text{m}$ sized phytoplanktonic organisms using different mesh sized nets ($5 \mu\text{m}$ or $7 \mu\text{m}$), different injection methods (hand breaker as semi-continuous assessment or pump as continuous assessment), and different filterability for the water volume. As a result of the t-test, the net concentrated efficiency between $5 \mu\text{m}$ and $7 \mu\text{m}$ mesh size was not significant ($p > 0.05$). The difference in the net concentrated efficiency for filtered natural water volume was not significant ($p > 0.05$). On the other hand, the Chl. *a* concentration in the continuous water injection method was significantly ($p < 0.05$) higher than that of semi-continuous water injection (t-test: t :-4.058). In the natural phytoplankton community, a total of 36 species were identified, including Bacillariophyta (17 species), Dinophyta (15 species), Euglenophyta (1 species), Dictyochophyta (2 species), and unidentified taxa (1 species). Among them, diatom *Pseudo-nitzschia* spp. was remarkably dominant. In particular, the net concentrated efficiency in all assessments was underestimated to be approximately 20-25%, which was caused by the small size *Pseudo-nitzschia* spp.. A width size of these genus might have passed through the $5 \mu\text{m}$ or $7 \mu\text{m}$ mesh size of the net. Therefore, net concentrated efficiency is dependent on the size of the observed species in natural water. This issue should be considered when determining the net volume for the type approval test of BWTS.

Keywords : USCG phase-II, Ballast water, Mesh size, Net sampler, Phytoplankton

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 January 8, 2016

Revised (1st February 12, 2016, 2nd February 22, 2016)

Accepted March 3, 2016

Published March 31, 2016

1. 서론

선박평형수는 공선선박의 평형 및 안정을 유지하기 위해서 신는 물이며, 전 세계적으로 연간 50-100억톤 규모로 이송되고 있다[1]. 선박평형수에 이송된 대부분의 생물은 배출되는 해역의 환경조건에 적응하지 못하여 사멸하지만, 일부 내성이 강한 종은 살아남게 되어 항만고유의 생태계를 교란시킬 수 있다[2]. 따라서 국제해사기구(IMO: International Maritime Organization)에서는 이와 같이 선박평형수에 포함되어 있는 수서생물이 다른 지역으로 옮겨져 생태계 파괴 및 교란시키는 것을 사전에 방지하기 위해서 선박평형수 처리장치(BWTS: Ballast Water Treatment System)를 개발하여 생물을 제거 및 사멸시킨 후 배출할 수 있는 국제선박평형수관리협약 IMO D-2 regulation을 제정하였다. IMO D-2기준으로 선박평형수 처리 장치의 적합성을 확인하기 위하여, 처리된 시험수내 기준은 대장균 250 cfu 100 mL⁻¹, 비브리오와 같은 위협 및 유해 균주는 1 cfu 100 mL⁻¹ 이하로 지정하였고, $\geq 10 \mu\text{m}$ 와 $\leq 50 \mu\text{m}$ 크기의 식물플랑크톤은 10 cells mL⁻¹ 미만으로, 그리고 $\geq 50 \mu\text{m}$ 크기그룹의 동물플랑크톤은 10 inds m⁻³ 미만으로 각각 지정하였다[1, 3; Table 1]. 아울러, 최근에 개정된 미국형식승인 USCG phase-II기준은 IMO D-2 규정과 비교하여, $\leq 10 \mu\text{m}$ 의 대장균, 유해균에 관해서는 2-3배 강화하였으나, $\geq 10 \mu\text{m}$ 와 $\leq 50 \mu\text{m}$ 크기의 생물군과 $\geq 50 \mu\text{m}$ 크기의 생물군에 관해서는 1000배 강화된 처리장치의 개발 및 시험 결과를 제시하도록 하고 있다 [Table 1].

IMO standard D-2	US standard (USCG phase-II)
I. Organisms $\geq 50 \mu\text{m}$	
• 10 viable organisms per 1 ton	• 0.01 viable organisms per 1 ton
II. Organisms $\geq 10 \mu\text{m}$ and $\leq 50 \mu\text{m}$	
• 10 viable organisms per 1 mL	• 0.01 viable organisms per 1 mL
III. Organisms $\leq 10 \mu\text{m}$ Limited number of indicator microbes	
- 250 CFU <i>Escherichia coli</i> per 100 mL - 100 CFU <i>Enterococci</i> per 100 mL - 1 CFU <i>Vibrio cholera</i> per 100 mL	- 126 CFU <i>Escherichia coli</i> per 100 mL - 33 CFU <i>Enterococci</i> per 100 mL - 1 CFU <i>Vibrio cholera</i> per 100 mL

Fig. 1. A comparison between IMO standard D-2 and USCG phase-II standard for the minimum criteria of total living population in ballast water treatment system.

IMO D-2기준 선박평형수 처리장치 개발은 우리나라가 독보적인 선두주자의 입장에 있으나, USCG phase-II 기준에 준하는 장비의 성능개발은 아직 이루어 지지 않고 있는 실정이다. 아울러, USCG phase-II에 준하는 장비를 개발하기에 앞서 처리장치에 대한 신뢰할 수 있는 평가방법이 우선적으로 고려되는 것이 무엇보다 중요하다고 할 수 있다. 특히 선박평형수 처리장치 평가 방법 중에서도 $\geq 10 \mu\text{m}$ 와 $\leq 50 \mu\text{m}$ 크기의 생물군에 대한 평가는 다른 사이즈의 생물군과 비교하여 처리장치 통과 후 생물 농축이 극히 어렵다. BWTS검증을 위한 생물 기준을 충족하기 위해서는 네트 망목 대각선 길이가 $10 \mu\text{m}$ 이하로 제작되어야 하며, 이를 충족시키기 위해서는 망목의 정사각형 한 변의 길이가 최대 $5 \mu\text{m} - 7 \mu\text{m}$ 이하로 유지되어야 한다. 상기의 기준을 충족한 네트를 이용하여 생물을 농축하게 되면, 일부 생물은 배출구에 집적되어 막힘 현상이 일어날 뿐만 아니라, 농축된 생물 또한 재부유되어 네트의 망목부위로 올라와 여과효율을 현저하게 떨어뜨리는 문제점이 발생한다. 이와 같은 문제점의 개선은 선박평형수 처리장치 성능 검증을 위한 생물농축효율을 높이는데 있어 중요한 역할을 할 것으로 기대된다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 거제 장목만에서, 1) 다양하게 배출부 cod-end를 개선하여 생물농축효율의 비교분석, 2) 망목 대각선의 사이즈($10 \mu\text{m}$)를 충족할 수 있는 최대크기의 망목의 네트($5 \mu\text{m}$ 와 $7 \mu\text{m}$)를 제작하여 생물 농축효율 비교, 3) 여과 농축된 생물의 현존량(엽록소: Chl.a)의 차이 등을 평가하였다. 이와 같은 기술적인 개선은 선박을 건조하는 산업계에서 선박평형수 처리장치를 개발하고 성능을 검증하고 평가하는데 중요한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

2. 재료 및 방법

USCG phase-II의 선박평형수 처리장치 성능 검증을 위하여 $\geq 10 \mu\text{m}$ 와 $\leq 50 \mu\text{m}$ 크기의 식물플랑크톤군집의 생물농축효율을 높일 수 있는 적절한 방법을 찾기 위하여 실험을 디자인하였다. 실험은 경상남도 거제시 장목만 한국해양과학기술원 남해연구소 다목적 부두(위도 경도)에서 2015년 하계에 수행하였다. 먼저 네트의 Type에 따른 생물농축을 하기 전에 펌프를 이용하여 자

연 생물군집이 포함된 해수를 1000 L 수조탱크에 저장하였다[Fig. 2그림 참조]. 그 후 수조탱크에 YSI장비를 이용하여, 수온, 염분, 용존산소, 등의 환경요인을 측정하였다. 생물의 농축효율은 자연 상태에서 출현하는 식물플랑크톤의 군집조성에 따라 영향을 받기 때문에 조사를 수행하기 전 각각의 실험에 활용할 해수는 1톤의 저장된 탱크에서 인위적으로 수중에 에어를 공급시켜 시료를 충분히 혼합 및 교반하여 시료의 균질성을 확보하였다. 그 후 망목의 사이즈 차이, 네트 직경과 길이의 차이, cod-end의 직경과 내경 사이즈의 차이 등을 평가하기 위하여 5 L 핸드 비커를 이용하여 균일하게 혼합한 해수를 Type이 다른 각각의 네트에 단계적으로 적용시켜 생물농축을 실시하였다. 아울러, 상기의 실험은 10 L 농축하는데 걸린 시간을 산출하였고, 이와 더불어 농축효율은 핸드 비커에 의한 반연속적인 방법으로 평가하였다. 특히 추가적으로 농축이 가능하다고 판단된 네트 Type (T-4와 T-7)에는 펌프를 이용하여 연속적인 방법으로 120 L, 240 L, 360 L씩 순차적으로 농축하여 각각의 시간을 산출하였고, 농축효율을 파악하였다 [Table 1][Fig. 2f 그림 참조].

Table 1. The list of net and cod-end types

Type	Mesh size(μm)	Net diameter* length (m)	Cod-end inner-diameter (mm)	Cod-end inner-length (mm)
T-1	5	0.3 * 0.5	30	70
T-2	5	0.3 * 1	30	70
T-3	5	0.3 * 1	40	70
T-4	5	0.3 * 1	40	130
T-5	7	0.3 * 1	30	70
T-6	7	0.3 * 1	40	70
T-7	7	0.3 * 1	40	130

아울러, 자연해수 중 광합성을 하는 식물플랑크톤 현존량이 어느 정도 검출되는지 파악하기 위해서 Chlorophyll-*a*(Chl.*a*)을 측정하였고, 어떤 형태의 생물이 네트의 망목을 통과하여 영향을 미치는지 파악하기 위해서 식물플랑크톤의 군집조성과 현존량을 파악하였다. 먼저 Chl. *a*의 측정을 위하여 Whatman GF/F glass fiber filters (a 47-mm diameter; pore size 0.45 μm)를 이용하여 300 mL 여과하였고, 여과지는 15 mL 튜브에 넣어 분석 전까지 -20 °C에서 냉동보관한다. 실험실에서 냉동 보관한 여과지를 90% Acetone에 넣어 냉암소에서 24시간 동안 색소를 추출한 후 형광측정기(Turner BioSystems,

Sunnyvale, CA, USA)를 이용하여 분석하였다[4]. 아울러, Type이 다른 망목 사이즈에 따른 생물손실이 어느 정도 발생하는지 명확하게 파악하기 위해서 실제 자연해수에 존재하는 Chl.*a*량과 더불어 네트로 농축한 후 일정량 취하여 Chl.*a*를 산출한 총량을 비교하였다.

식물플랑크톤 군집조성과 현존량분석을 하기 위해 1톤 탱크 내 표층수 500 mL를 루골용액으로 최종농도가 0.5%가 되게 고정하였다. 이 후 500 mL의 샘플을 50 mL로 농축시킨 후 Sedgewick-Rafter counting chamber에 샘플을 100-300 μL 분주하여 200배 혹은 400배 배율로 동정하였다. 모든 실험은 2회 반복하여 수행하였다.

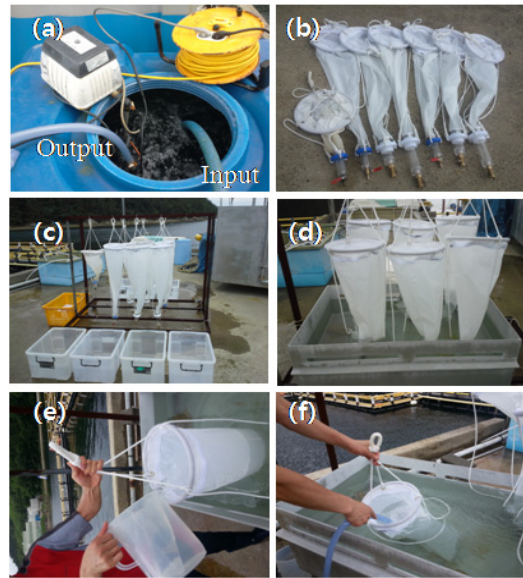


Fig. 2. The pictures of (a) natural water mixing in one ton tank, (b) differenced net mesh types and code end (c-f), and harvesting by net.

3. 결과 및 고찰

각각 네트의 농축효율을 비교할 때 초기 탱크 내 존재한 생물의 현존량을 유추할 수 있는 Chl.*a* 농도 변화를 Fig. 3에 나타내었다. Chl.*a* 농도의 최저값은 AM9:00에 5.34 $\mu\text{m L}^{-1}$ 에서 최고값은 PM16:00에 9.48 $\mu\text{m L}^{-1}$ 로 관찰되었다. 즉 Chl.*a* 농도는 네트농축효율을 평가하는 작업시간의 경과에 따라 증가하는 양상이 관찰되었다.

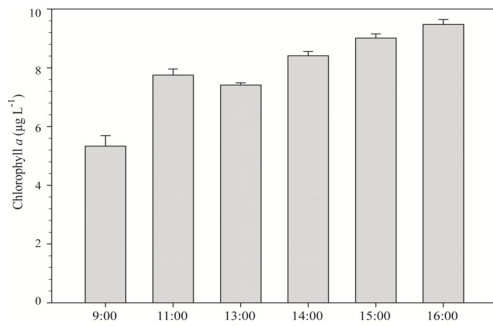


Fig. 3. Time series variations of Chl.a concentration in natural seawater of Jangmok Bay during the assessment of each net.

Perez and Canteras 와 Baek et al. [5, 6]의 보고에 의하면, 연안 해역에서 식물플랑크톤 현존량은 조석간만의 차이에 따라서 영향을 크게 받을 수 있으나, 출현하는 종 조성은 크게 영향을 받지 않았다. 본 연구에서는 간조에는 생물의 현존량이 낮게 나타났고, 만조에는 현존량이 높게 나타나는 경향을 관찰하였다. 아울러 출현한 식물플랑크톤의 군집조성은 규조류 17종, 와편모조류 15종, 유글레나조류 1종, 착편모조류 2종과 함께 미동정 편모조류로 나타나 총 36종이었고, 우점종으로는 *Pseudo-nitzschia* spp.로 관찰되었다[Table 2].

IMO 형식승인에서는 $\geq 10 \mu\text{m}$ 와 $\leq 50 \mu\text{m}$ 크기의 처리기준은 500톤의 시험수를 상층수, 중층수, 저층수로 나누어 각각 3반복으로 10 L씩 농축하여 평가하고 있으나, USCG phase-II의 기준에서는 500톤의 모든 시험수를 대조군과 처리군으로 분배되는 과정에서, 유량을 조절하여, 1톤의 탱크에 연속적으로 저장하면서 생물을 농축하여 시험수 생물량을 균질화 할 수 있는 지침을 정립하고 있다. 따라서 우리나라에서도 이에 대응하기 위한 과학적인 근거자료를 연속적으로 확보하는 것이 중요하고, 본 연구에서는 준 실시간으로 네트로 농축할 수 있는 양을 늘리기 위해서는 1톤 탱크에서 펌프로 일정하게 연속적으로 농축하는 방법과, 기존의 IMO형식승인 처리기준과 동일하게 핸드비이커로 일정량씩 농축하는 반연속적인 실험방법으로 평가하였다. 아울러, 각각의 실험에서 네트 망목과 cod-end의 사이즈에 따라서 농축하는데 걸리는 시간을 산출하였다.

일반적으로 $\geq 10 \mu\text{m}$ 생물을 농축할 수 있는 망목의 크기는 한 변의 길이와 대각선의 길이로 생물이 빠져나갈 수 있는 이론적 근거 하에서 평가할 수 있고, 이를 농축할 수 있는 네트 망목의 크기는 최대로 $5 \mu\text{m}$ 와 $7 \mu\text{m}$

Table 2. The species list and minimum cell range of net harvested sample in Jangmok Bay.

Observed species	Size* (µm)	D.S**
Bacillariophyta		
<i>Consinodiscus</i> spp.	-	
<i>Chaetoceros curvisetus</i>	7-30	
<i>Chaetoceros damicus</i>	8-20	
<i>Chaetoceros didymus</i>	10-40	
<i>Chaetoceros lorenzianus</i>	7-80	
<i>Chaetoceros</i> sp.	c.a.40	
<i>Dactyliosolen phuke</i>	10-54	
<i>Guinardia flaccida</i>	25-90	
<i>Leptocylindrus damicus</i>	5-16	
<i>Navicular</i> sp.	c.a.15	
<i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i>	2.5-5	+
<i>Pseudo-nitzschia multistriata</i>	5.5-8	+
<i>Pseudo-nitzschia</i> sp.	c.a.8	+
<i>Thalassionema frauenfeldii</i>	5-9	
<i>Thalassionema nitzschioides</i>	10-12	
<i>Thalassiosira rotula</i>	18-24	
<i>Thalassiosira</i> sp.	c.a.20	
Dinophyta		
<i>Alexandrium tamarense</i>	25-46	
<i>Cochlodinium polykrikoides</i>	30-40	
<i>Ceratium furca</i>	30-50	
<i>Ceratium fusus</i>	15-30	
<i>Dinophysis accumulata</i>	30-38	
<i>Gyrodinium</i> sp1.	c.a.30	
<i>Heterocapsa triquetra</i>	20-25	
<i>Heterocapsa</i> sp.	c.a.25	
<i>Prorocentrum triestium</i>	18-22	
<i>Prorocentrum minimum</i>	12-15	
<i>Protoperidinium pellucidum</i>	36-50	
<i>Protoperidinium</i> sp.	c.a.40	
<i>Scropsiella trochoidea</i>	19-30	
<i>Scropsiella</i> sp.	c.a.30	
<i>Gonyaulax</i> sp.	30-50	
Euglenophyta		
<i>Eutreptiella gymnastica</i>	17-38	
Dictyochophyta		
<i>Dictyocha fibula</i>	10-45	
<i>Dictyocha speculum</i>	19-34	
Other		
>10 µm small flagellate		

*Minimum cell width range

**Dominant species

로 구분할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 망목의 크기가 다른 2개 네트에서 생물 농축효율을 평가하였다. 본 실험에서는 망목과 cod-end의 사이즈 차이에서 기인하여 농축된 Chl.a 농도의 차이는 크지 않았다. 특히, 핸드비이커를 이용한 반연속적인 방법과 펌프를 이용한 연속적인 방법에서 자연생물을 농축하는데 걸리는 시간의 차이 또한 크지 않았다. 아울러, 120 L의 자연해수를 농축하는데 걸린 시간은 네트 Type에 따른 차이는 보였지만

(T2-T7), 7-10분 내외로 유사하게 나타났다. 특히, 넛트를 이용하여 생물을 농축하는데 걸린 시간은 농축하는 자연해수의 용량에 따라 일정하게 비례하는 것을 확인하였다. IMO 형식승인의 BWTS장비 시험에 활용하는 Type-1의 넛트와 cod-end사이즈를 적용한 결과, 일정량 농축된 후 역류현상으로 인하여 시료를 농축하는데 소요되는 시간이 크게 지연되었다. 반면, USCG Phase-II BWTS장치의 성능검사에 대비한 평가에서는 cod-end의 내경과 배출부 길이와 함께 넛트의 전장을 늘려 사용한 결과, 시료의 역류현상이 거의 일어나지 않았고, 생물 농축하는데 소요되는 시간이 1/2-1/3로 현저하게 단축되었다. 결과적으로 본 연구를 통하여 개선된 넛트를 이용한 결과, 일정량 높은 밀도의 생물을 농축하는데 소요되는 시간이 단축되었을 뿐만 아니라 넛트의 농축 용량을 증대시킬 수 있는 과학적 근거를 제공할 수 있었다.

넛트 망목의 크기가 다른 T3과 T4(5 μm)와 T6과 T7(7 μm)에 대한 농축효율을 구체적으로 평가하기 위해서 핸드비이커와 펌프의 차이를 검토하였다[Fig. 4]. 넛트에 농축된 Chl.a량은 배출부 개선에 대한 차이는 보이지 않았고, 펌프와 핸드비이커에 의한 차이도 명확하게 나타나지 않았다. 아울러, 5 μm와 7 μm의 넛트 망목크기의 차이에 의한 농축된 Chl.a량의 차이도 명확하지 않았다. 오히려, 실험시 자연해수에 포함된 식물플랑크톤의 시간적 변동의 차이에 기인하여 농축된 시료의 Chl.a량에 의존되는 양상을 파악할 수 있었다. 결과적으로 반 연속적인 핸드비이커와 자동펌프로 연속적으로 해수 시료를 공급한 방법에서 소요된 시간은 유사하였고, 아울러 두 방법으로 농축된 Chl.a농도의 차이 또한 그다지 크지 않았다[Fig. 4].

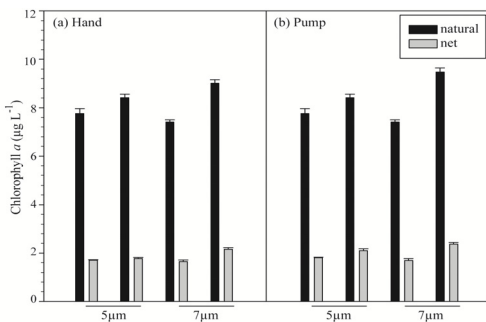


Fig. 4. Comparison between hand beaker and pump supply methods for Chl.a concentration. Both methods were assessed to be net using natural seawater of Jangmok Bay.

다음으로 넛트로 농축하는 자연해수의 시료 양과 넛트 망목의 크기에 따라서 농축되는 생물량의 차이를 평가는 Type이 다른 T4(5 μm)와 T7(7 μm)을 비교하여 Figure 5에 나타내었다[Fig. 5].

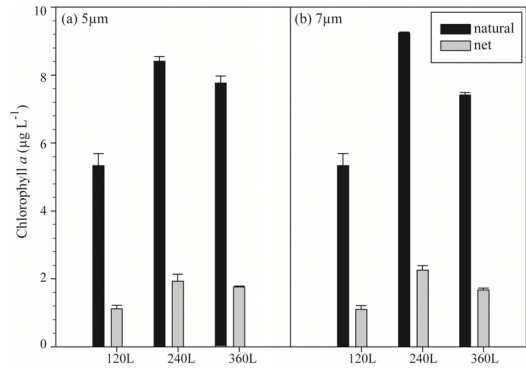


Fig. 5. Comparison between 5 μm and 7 μm mesh size for Chl.a concentration. Both mesh size were assessed by natural seawater of Jangmok Bay.

넛트 망목이 5 μm와 7 μm를 120 L 농축한 Chl.a량은 각각 1.12 μg L⁻¹와 1.10 μg L⁻¹으로 유사하게 나타났고, 360 L 농축에서도 유사하게 5 μm와 7 μm망목에서 각각 1.6 μg L⁻¹-1.7 μg L⁻¹로 나타났다. 즉 넛트에 의한 농축된 Chl.a량은 망목의 크기와 농축된 시료 양의 차이 보다는 앞서 다른 실험에서 언급된 바와 같이, 초기 자연해수의 생물량과 밀접한 관계가 있는 것으로 파악할 수 있었다.

넛트 망목의 차이, 핸드비이커와 펌프에 의한 연속적인 시료 공급에 의한 차이, 시료의 양에 의한 차이를 종합적으로 평가한 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

각 실험군 간의 차이를 t-test로 검증한 결과, 5 μm와 7 μm망목에 의한 차이는 유의하게 나타나지 않았다 ($p>0.05$). 하지만 펌프에 의한 연속적인 시료 공급은 핸드비이커의 불연속적인 시료보다 통계적으로 유의하게 생물 농축효율이 높게 나타났다(t -test: t :4.058, $p<0.05$). 아울러, 240 L로 농축된 시료가 120 L로 농축한 시료보다 조금 높게 나타났고(t -test: t :0.311, $p<0.05$), 240 L의 농축한 시료는 360 L의 농축효과는 유의한 차이를 확인할 수 없었다($p>0.05$). 결과적으로 넛트의 농축효율은 모든 실험군에서 20-25%로 안정적으로 나타났고, 이는 넛트를 통한 농축실험의 신뢰성을 확보할 수 있다는 것을 의미한다. 하지만, 넛트의 농축 효율이 일괄적으로 낮

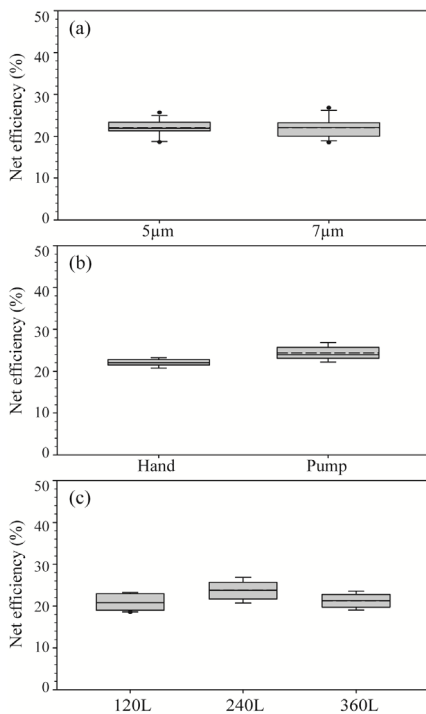


Fig. 6. Change in box plots of net efficiency under different mesh size (a), working tool (b) and water volume (c) based on the Figure 4 and 5.

게 나타난 이유를 파악하는 것이 중요하다. 자연 식물플랑크톤 군집에서는 각 분류군별 및 종별로 사이즈가 다르게 존재하며, 사이즈에 따른 종의 우점여부에 따라서 네트의 농축효율에 크게 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 구조류 *Pseudo-nitzschia* spp.가 극우점종으로 나타났고, 이들 속은 한편의 길이가 30-50 µm이지만, 세포의 폭이 3-8 µm로 관찰되었다[Fig. 6]. *Pseudo-nitzschia* spp.의 세포 폭은 네트 망목 사이즈보다 작아서 일정 부분의 생물이 네트 망목을 통과하여 손실될 확률이 크다[7]. 이들 중 이외에 다른 종이 네트의 망목을 빠져 나갈 수 있는 종은 *Thalassionema frauenfeldii*와 *Thalassionema nitzschioides*로 나타났고, 이들 종의 세포 폭은 8-12 µm로 나타나, 네트 망목의 대각선으로 손실될 확률이 있지만, 우점 출현한 종이 아니라, *Pseudo-nitzschia* spp.의 손실보다 적을 것으로 생각된다. 또한, 세포 사이즈의 변이가 큰 *Chaetoceros* 속(7 µm- 80 µm)은 한편의 최소 사이즈의 관점에서 일부 몇 종은 본 연구에서 사용된 네트의 망목을 통과할 수 있는 크기를 가진 잠재적 종으로 구분할 수 있다. 하지만 이들 속은 가시털(seta)과 균체(chain)

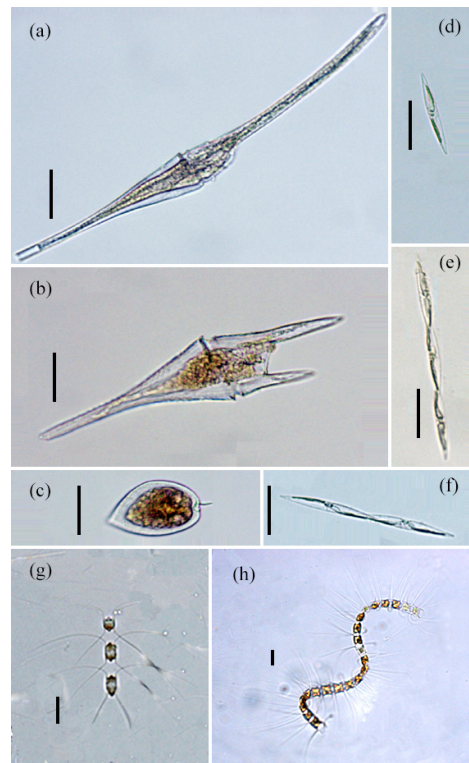


Fig. 7. The pictures of observed main species list during net sampling of Jangmok Bay. Dinoflagellates (a: *Ceratium fusus*, b: *Ceratium furca*, c: *Prorocentrum mican*). Diatom (d-f: *Pseudo-nitzschia* spp.; g-h: *Chaetoceros* spp.). Scale bar: 20µm

의 형태학적 특징을 가지고 있고, 특히 균체로 연결되는 부분에 가시털이 교차하면서 엉켜 있어, 네트의 망목을 빠져 나가 손실될 확률이 극히 낮을 것으로 판단된다[Fig. 7]. 따라서 구조류 분류군에서 네트의 망목을 통과할 수 있는 확률이 높은 종은 *Pseudo-nitzschia* spp.로 나타났다. 다음으로 와편모조류를 살펴보면, 대부분의 와편모조류는 10 µm 이상의 사이즈를 가진 종으로 나타났고, 타원형과 구형을 가진 종으로 구성되었다. 하지만, 타원형과 구형이 아닌 속은 *Prorocentrum* 과 *Ceratium* 속이 유일하다 [Fig. 7]. 본 연구에서 출현한 대부분의 와편모조류는 세포의 크기가 20-40 µm의 타원형을 가진 와편모조류로서 네트를 통과하여 손실될 가능성이 없다, 반면, 타원형이 아닌 *Prorocentrum* 과 *Ceratium* 속도 세포의 크기가 15-50 µm를 유지하고 있어 생물 농축효율을 떨어뜨리지 않았을 것으로 사료된다[Fig. 7]. 특히 아래의 그림에서도 알 수 있듯이 *Ceratium fusus*의 선단부분은 8-10

μm 으로 세포 일부분이 빠져 나갈 수 있지만, 세포 중심부 크기가 20-40 μm 로 네트의 망목을 통과하지 못할 것으로 사료된다. 결과적으로 본 연구에서는 자연 식물플랑크톤 군집 중 한 편의 사이즈가 극히 작은 규조류 *Pseudo-nitzschia* spp.속이 극우점한 결과, 이들 생물이 네트 망목을 통과하여 네트 농축효율을 크게 떨어뜨린 것으로 파악되었다.

요약하면, 네트의 농축 효율은 망목 사이즈와 해수 용량에 따른 차이는 크지 않았지만, 자연 식물플랑크톤 군집에서 한 편의 사이즈가 네트 망목의 대각선을 통과할 수 있는 크기의 생물이 우점하게 되면, 네트의 농축효율을 크게 떨어뜨릴 것으로 생각된다. 따라서, USCG Phase-II 형식승인을 위한 시험수를 조성할 때 현장에서 출현하는 생물의 사이즈를 충분히 고려하여 처리장치 처리군과 대조군에서 생물을 농축하는 방법을 유기적으로 운영하여야 할 것으로 판단된다. 아울러, 상기와 같은 문제점을 개선할 수 있는 통합적인 USCG Phase-II 형식 승인 매뉴얼 개발이 시급할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 USCG Phase-II 형식승인을 대비하여 $\geq 10 \mu\text{m}$ 와 $\leq 50 \mu\text{m}$ 크기의 식물플랑크톤을 농축하는 방법을 정립하고자 네트 망목의 차이, 핸드비이커와 펌프에 의한 연속 및 반연속적인 시료의 공급에 의한 차이, 자연해수 용량의 차이를 종합적으로 검토하였다. 그 결과, 각 실험군 별 생물의 농축효율은 20-25%로 큰 차이를 보이지 않았고, 이는 안정적으로 네트의 농축 결과를 얻을 수 있다는 것을 의미한다. 특히 네트 농축 방법에서 생물의 농축효율이 낮게 나타난 것은 자연 식물플랑크톤 군집에서 출현한 중 특이적인 사이즈의 차이에서 좌우되는 것을 확인할 수 있었다. 선박평형수 처리장치의 성능은 각각의 생물군별, 단계별, 형식승인의 기준에 맞게 신속하고 정확한 평가가 필요하고, 본 연구를 통하여 BWTS 처리장치 통과 후 생물을 효과적으로 농축할 수 있는 방법론의 재검토가 이루어졌다. 그 결과 연속적으로 네트에 의한 농축을 100 L의 시험수를 효과적으로 처리할 수 있다는 것을 파악하였고, 이는 USCG Phase-II에서 요구하는 많은 생물량을 농축하는 권고 사항을 충족할 수 있는 수준이라 판단된다. 하지만, USCG

Phase-II 기준 BWTS 평가시 출현하는 $\geq 10 \mu\text{m}$ 와 $\leq 50 \mu\text{m}$ 생물군의 단축 한 번의 사이즈를 고려하여 네트 농축 용량을 조절할 필요성이 대두되었다. 결과적으로 본 연구를 통하여 네트 농축효율을 체계적으로 평가할 수 있는 기초자료를 확보하였고, 이는 선박평형수의 처리장치를 개발하는 산업체에 중요한 과학적 근거로 활용될 것으로 기대된다.

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. Agüero, 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] T.R. Parsons, Y. Maita, C.M. Lalli. "A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis". Pergamon Press, Oxford. 173 p. 1984.
- [5] L. Pérez, J. Canteras. "Influence of tidal conditions and river volume on phytoplankton distribution and composition in the Pas estuary (Northern Spain)". *Scient. Mar.*, 54, 77-88. 1990.
- [6] S.H. Baek, S. Shimode, M.S. Han, T.Kikuchi, "Population development of the dinoflagellates *Ceratium furca* and *Ceratium fusus* during Spring and Early Summer in Iwa Harbor, Sagami Bay, Japan". *Ocean Sci. J.*, 43, 49-59, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF03022431>
- [7] J. Sun, D. Liu, "Geometric models for calculating cell biovolume and surface area for phytoplankton". *J. Plankton Res.* 25, 1331-1346. 2003. DOI: <http://dx.doi.org/10.1093/plankt/fbg096>

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

이 민 지(Min Ji Lee)

[정회원]



- 2014년 9월 ~ 현재 : 부경대학교 해양학과 (석사 과정)
- 2014년 8월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 연구원

<관심분야>

해양생물학, 식물플랑크톤 생태학, 수질, 선박평형수

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,