Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 17, No. 11 pp. 186-195, 2016

http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.11.186
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

동해 울릉도-독도해역에서 질소, 인, 철 첨가실험에 따른 식물플랑크톤의 성장 및 군집반응

백승호[1*], 이민지[1], 김윤배[2]
[1]한국해양과학기술원 남해특성연구센터, [2]한국해양과학기술원 울릉도독도해양과학기지

Growth and community response of phytoplankton by N, P and Fe nutrient addition in around water of Ulleungdo and Dokdo in East Sea

Seung Ho Baek[1*], Minji Lee[1], Yun-Bae Kim[2]
[1]**South Sea Environment research Division, Korea Institute of Ocean Science & Technology**
[2]**Ulleungdo·Dokdo Ocean Science Station, Korea Institute of Ocean Science & Technology**

요 약 동해 울릉도-독도 2정점에서 식물플랑크톤의 군집조성 및 수직적 영양염분포 특성과 표층 현장수를 이용하여 N, P, NP, Fe을 첨가하여 식물플랑크톤의 영양염소비 및 성장특성을 파악하였다. 현장에서 영양염류농도는 유광층 상부에서 낮았고, 100 m보다 깊은 수심에서 증가하였다. N:P비는 Redfield비(16)보다 표층에서 21-25로 높았고, 조사 최대심도인 400 m층에서는 6 전후로 극히 낮게 관찰되었다. 식물플랑크톤의 총개체수는 St.UD3과 St.50에서 각각 4.9 X 10^5 cells L^{-1}과 1.9 X 10^5 cells L^{-1}로 관찰되었다. 주요 우점종은 St.UD3에서 침편모조류 *Heterosigma akashiwo,* 은편모조류 *Crytomonas* spp., 규조류 *Leptocylindrus danicus*로 파악되었고, St.50에서는 규조류 *Chaetoceros socialis, H. akashiwo, L. danicus*로 각각 관찰되었다. 영양염첨가실험의 +N과 +NP실험군에서 빠른 식물플랑크톤의 성장반응을 보였고, +P실험군에서는 대조군과 유사하게 식물플랑크톤 성장이 관찰되지 않았다. 아울러 Fe을 첨가한 대조군, +N, +P, +NP실험군에서 Fe을 첨가하지 않은 다른 실험군과 비교하여 형광값의 유의한 차이를 보이지 않았다는 것은 Fe첨가에 따른 식물플랑크톤의 성장반응이 명확하지 않다는 것을 의미한다(p>0.05). 결과적으로 현장에서 우점한 *H. akashiwo* 와 *L. danicus*는 영양염이 추가적으로 공급된 환경의 생물검증실험에서도 빠르게 반응하여 높은 개체수로 우점한 것을 파악하였고, 특히 +Fe 실험군에서 *L. danicus*의 빠른 성장이 두드러졌다.

Abstract We investigated phytoplankton and vertical inorganic nutrients at two stations around water of Ulleungdo and Dokdo in the East Sea, Korea. Nutrient addition experiments (+N, +P, +NP and +Fe) were also conducted to determine the growth response and nutrient consumption of the phytoplankton assemblage using the surface water of St. UD3 and St.50. In the field, although inorganic nutrients were low in the euphotic layer, these nutrients were increased at depths below 100 m. The total phytoplankton abundances in St. UD3 and St.50 were 4.9 X 10^5 cells L^{-1} and 1.9 X 10^5 cells L^{-1}, respectively. The dominant species at St. UD3 was observed to be Raphidophyta *Heterosigma akashiwo*, Cryptophyta *Crytomonas* spp., and diatom *Leptocylindrus danicus*, while *L. danicus* and *H. akashiwo* including small diatom species *Chaetoceros socialis* were dominant at St. 50. In the nutrient addition experiments, phytoplankton growth (*in vivo* flourescence) in the +N and +NP treatment was 2-3 times higher than that in the +P treatment, indicating that the natural phytoplankton can respond to pulsed nutrient loading events. In addition, in vivo fluorescence in +Fe treatment was not statistically (p>0.05) different from that of the non-Fe treatments, indicating that the phytoplankton growth response in +Fe treatment was not significant. Dominant *H akashiwo* and *L. danicus* in the field showed a rapid response in nutrient additional bio-algal assay, particularly *L. danicus* in the +Fe treatments.

Keywords : Bioassay, Dokdo, Growth response, Nutrients, Phytoplankton, Ulleungdo

본 논문은 해양수산부의 연구과제 "독도의 지속가능한 이용연구 [PG49260]사업"과 미래창조과학부 해양극지기초원천기술개발사업[NRF-2016M1A5A1027456]의 지원을 받아 수행된 연구임.
*Corresponding Author : Seung Ho Baek (Korea Institute of Ocean Science & Technology)
Tel: +82-55-639-8513 email: baeksh@kiost.ac.kr
Received August 1, 2016 Revised (1st September 9, 2016, 2nd September 12, 2016)
Accepted November 10, 2016 Published November 30, 2016

1. 서론

해양에서 식물플랑크톤 대발생의 '방아쇠' 역할을 하는 요인은 일반적으로 수온증가, 광량 및 일사량증가, 영양염공급 등으로 알려져 있다[1]. 그 중 수주 내 광량증대와 영양염류 공급은 식물플랑크톤의 광합성효율 및 세포 분열과 관련된 세포대사증진에 중요하다. 특히, 온난해역에서 동계 수층혼합으로 남은 영양염류는 춘계의 광량 증가와 더불어 식물플랑크톤의 폭발적인 증식을 유도하여 "Spring Bloom"을 일으킨다. 그 후 수온상승에 따른 성층형성은 저층으로부터 영양염류 공급을 제한시켜 대발생을 지속적으로 유지할 수 없게 하고, 유광층내 식물플랑크톤 개체수가 현저하게 낮게 유지되어, 하계에는 1차 생산이 둔화된다. 하지만, 우리나라 주변의 온난해역에서는 하계에 장마와 태풍의 영향으로 강우가 집중되며, 이들 강우에 의하여 육상으로부터 공급되는 다양한 영양염류는 연안해역에서 식물플랑크톤의 증식 촉진제 역할을 하여, 하계에도 불구하고 국부적으로 높은 1차생산성이 유지되는 경향이 강하다[2, 3]. 이와 같은 영양염류의 소멸과 공급은 식물플랑크톤의 증감에 따른 종천이를 유발하는 중요한 인자이다. 따라서 영양염류 제한특성을 평가하는 방법으로는 영양염 흡수에 따른 평가 [4, 5], 영양염 농도 및 비율로 평가하는 방법, 그리고 현장해수에 영양염을 첨가하는 생물검정실험 등이 있다. 가장 보편적인 방법으로는 현장에서 영양염류를 측정하여 Redfield 비율(Si:N:P = 16:16:1)에 따른 영양염 성분 구성비의 차이와 더불어 절대 영양염농도의 최저치로 제한된 영양염류 특성을 파악할 수 있다[1]. 하지만 이러한 방법은 어떠한 영양염이 식물플랑크톤 성장의 잠재적 제한요인으로 작용할 수 있는지에 대한 평가는 할 수 있지만, 식물플랑크톤 군집의 생리적 성장특성에 근거하여 제한영양염을 평가하기에는 한계점이 있다. 따라서 식물플랑크톤 군집내 영양염 재생산비율의 차이, 특정 미세조류의 종특이성 등을 고려하여 세포내 영양상태를 종합적으로 평가하는 것이 중요하다. 그러나 이와 같은 방법은 단일 분리 배양종을 대상으로 생리생태적인 특성을 규명하는데 적합하지만, 현장해역에서 일어나는 현상을 규명하기에는 한계가 있다. 결과적으로 이러한 문제점을 보완하기 위해 현장수에 인위적으로 N과 P 영양염을 첨가하여 식물플랑크톤 성장반응의 추이를 시계열로 평가하는 생물검정실험이 고려되었다[3]. 최근 극미량 금속의 농도 또한 식물플랑크톤의 성장에 중요한 영향을 미칠 수 있다는 보고가 있다[6, 7].

동해 울릉도 및 독도해역은 동한난류와 북한한류에 의해 형성되는 극전선의 위치하며, 대마난류의 난수성수괴와 북한해류의 냉수성수괴가 혼합되면서 소용돌이 현상이 빈번하게 발생하며[8], 이와 같이 물리적으로 복잡다양한 수괴의 형성은 초미세조류의 계절적 특성에도 영향을 미치는 것으로 파악되었다[9]. 하지만, 울릉도-독도 인근해역에서 물리적 혼합에 의한 영양염류 농도 및 구성 성분비의 차이에 따른 식물플랑크톤 군집조성 및 성장반응에 대한 연구는 전무한 실정이다. 특히 울릉도-독도로 연결되는 해역은 육지와 멀리 떨어져 있으며, 시시각각으로 변화하는 해영환경특성으로 조사선을 쉽게 운용할 수 없는 단점이 크게 작용된다. 동해는 "북서태평양의 소규모 지중해"이며, 역동적으로 변화하는 "작은 대양"이라고 불리는 이유도 수심이 깊고, 대기의 특성에 따라서 해양환경이 급변하는 양상이 상기에서 언급한 두 해역과 유사하다 점에서 유래된 것으로 사료된다. 따라서 동해 울릉도-독도로 연결되는 해역에서 춘계 식물플랑크톤의 대발생할 수 있는 잠재적 요인을 파악하기 위하여 St. UD3과 St.50에서 식물플랑크톤의 군집조성과 영양염류의 수직적 분포특성과 함께 표층 현장수를 이용하여 N, P, NP 영양염을 첨가하여 식물플랑크톤의 영양염소비 특성 및 성장반응에 관한 실험을 수행하였다. 아울러, 중국에서 기인된 황사에 의해 대기 중에 운반된 미량금속 철(Fe)이 동해역의 식물플랑크톤성장에 미치는 영향에 관한 기초자료를 확보하고자 본 실험을 디자인하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 현장조사

2016년 5월 7일과 8일에 걸쳐 해양조사선 장목2호를 이용하여 독도해양과학조사정점 St.UD3와 St.50에서 해양환경 및 식물플랑크톤 군집을 조사하였다[Fig. 1]. 아울러 2정점의 표층수를 이용하여 영양염류 첨가실험을 수행하였다.

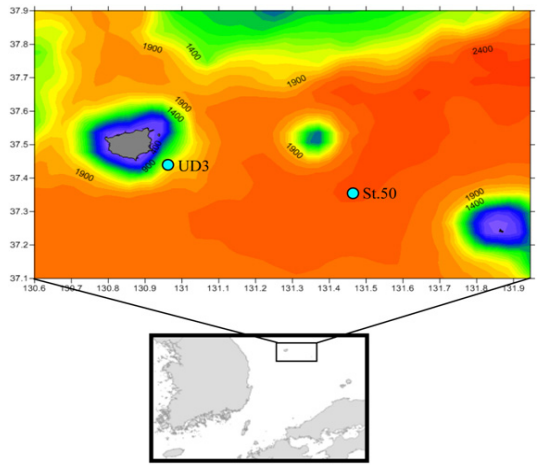

Fig. 1. The map showing the sampling stations (UD3 and St.50) in Ulleungdo-Dokdo around water.

먼저 현장조사는 각각의 정점에서 CTD(conductivity -temperature-depth) 및 CTD장비에 장착된 형광광도계를 이용하여 실시간 수심, 수온, 염분, 엽록소의 형광값을 측정하였다. 그 후 장비를 올리면서 니스킨 채수기로 이용하여 400 m, 100 m, 30 m, 0 m의 해수를 채수하였다. 현장에서 Chlorophyll *a* (Chl.*a*) 측정을 위해서 각 수층의 해수 1000 mL를 선상에서 GF/F필터(47mm Whatman glass fiber filters)로 여과하였고, 그 필터는 15 mL 튜브에 넣어 냉동 보관하였다. 영양염 분석용 시료는 GF/F필터를 통과한 여과 해수 50 mL 튜브에 45 mL를 넣고 냉동보관하였다. 식물플랑크톤 종조성과 정량분석을 위해 500 mL용 채수병에 500 mL를 넣고 곧바로 Lugol로 최종농도 1%로 고정했다. 실험실에서 Chl. *a*농도의 분석은 냉동 보관한 여과지를 90% acetone에 넣고 24시간 냉암소에서 엽록소를 추출한 후 형광광도계(Turner Designs 10-AU Fluorometer)로 분석하였다[10]. 영양염류의 분석은 냉동 보관한 시료를 분석전 해동하여 규산염(SiO_2), 암모니아성 질소(NH_4-N), 아질산과 질산성 질소(NO_2+ NO_3-N), 인산염(PO_4-P)을 Parsons et al. (1984)의 분석법에 따라서 Auto Analyzer (Bran Luebble)로 분석하였다[10]. 식물플랑크톤의 종조성과 현존량을 파악하기 위해서 500 mL의 샘플을 50 mL로 농축시킨 후 100-300 μL분주하여 200배 또는 400배율로 동정 및 계수하였다. 특히 광학현미경에서 동정이 극히 어려운 종은 속 수준에서 동정하였다.

2.2 영양염류 첨가실험

영양염 첨가실험을 위한 시료는 각각의 조사정점에서 채집한 표층해수를 mesh (200 μm pore size)로 걸러내어 동물플랑크톤을 제거한 후 1L의 멸균팩에 옮겨 담아 실험실로 운반하였다. 실험에서 각 정점의 시료를 50 mL의 시험관 (Φ22 mm x 200 mm, PYREX)에 균일하게 분주하여 식물플랑크톤 개체수 밀도를 동일하게 유지시켰다. 영양염에 대한 식물플랑크톤 성장반응조사는 대조군, 질산염 첨가군(+N), 인산염 첨가군(+P), 질산염+인산염 첨가군(+NP)을 두어 평가하였다. 모든 실험군에 규산염 $Na_2SiO_3 \bullet 8H_2O$ 분말을 이용하여 각 해역의 해수에 추가적으로 20 μM를 넣어 규산염제한이 일어나지 않도록 하여, 다른 영양염류의 첨가효과를 살펴보았다. 질산염은 $NaNO_3$의 분말을 ,인산염은 $NaH_2PO_4 \bullet 2H_2O$ 분말을 각각 용해하여 이용하였다. +N실험군 농도는 20 μM, +P실험군 농도는 2 μM로, +NP실험군에서는 질산염과 인산염을 각각 20 μM와 2 μM를 첨가하였다. 특히, 황사에 의하여 동해역으로 공급되는 미량금속(철) 영양염이 식물플랑크톤의 성장반응을 평가하기 위하여 철(Fe) 첨가실험을 수행하였다. Fe(III) 첨가 실험은 Fe(III)-EDTA ($C_{10}H_{12}FeN_2NaO_8 \bullet 3H_2O$)의 분말을 용해하여 이용하였다. Fe의 초기 농도는 해양미세조류의 대량배양에 많이 활용하는 f/2농도를 10배 희석하여 f/20 농도가 되도록 조절하였다. 본 실험은 앞서 언급한 실험군(대조군, +N, +P, +NP)에서 Fe을 첨가한 별도의 실험군을 두어 평가하였다.

각각의 실험관에 영양염첨가 후 배양기에 넣었고, 배양조건에서 광량은 60 μmol $m^{-2}s^{-1}$로 광주기는 12D : 12L로 각각 설정하였다. 온도조건은 현장의 표층수온에 해당되는 15℃로 설정하였다. 생물량의 변동은 1-3일 간격으로 *in vivo* 상태의 형광값을 형광광도계(Turner design 10-AU, USA)로 11일 동안 측정하였고, 식물플랑크톤 군집조성과 영양염 활용도를 파악하기 위해서 초기는 현장표층수 자료를 활용하였고, 배양중기와 종료기의 시료를 일정량(10 -15 mL) 분취하여 우점 식물플랑크톤 및 영양염농도를 산출하였다. 여기서 식물플랑크톤의 우점종을 파악하기 위해서 살아있는 세포를 현미경으로 관찰하여 어떤 종으로 구성되어 있는지 1차적으로 파악하고 난 후, 각각의 시료를 2 mL 분취하여 Lugol용액 1%로 고정한 후, 0.5 mL로 농축시켜 우점종을 파악하다. 영양염류는 앞서 언급한 방법으로 분석하였다. 모든

실험은 2반복(duplicate)으로 수행되었다.

생물검정실험에서 식물플랑크톤 군집의 성장률은 각 실험구의 대수성장기를 기준으로 계산하였다.

$$Growth\,rate = \frac{(\log_2 N_t - \log_2 N_0)}{t}$$

여기서 N_0: 초기 생물량, N_t: 최고성장기의 생물량, t: 최고성장기까지의 배양기간(day)으로 나타내었다. 아울러, 각 실험군에서 영양염첨가효율를 판단하기 위하여 대조군대비 상대적인 성장률로 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 울릉도-독도주변 수환경 특성

동해 울릉도-독도로 연결되는 울릉도 주변 St.UD3에서 표층수온이 14.97℃ 가장 낮게 유지되었고, 수심의 증가와 함께 점차적으로 수온이 감소해 200 m층에서 2℃전후의 값을 유지하였고, 그 이후의 수심에서는 안정적으로 1℃전후를 기록하였다. 울릉도와 독도의 중간수역인 St.50에서는 표층수온이 St.UD3보다 약간 높게 유지 되었고(15.35℃), 완만하게 감소하여 270 m수심에서 2℃전후를, 그 이후 수심은 St.UD3과 유사하였다[Fig.2].

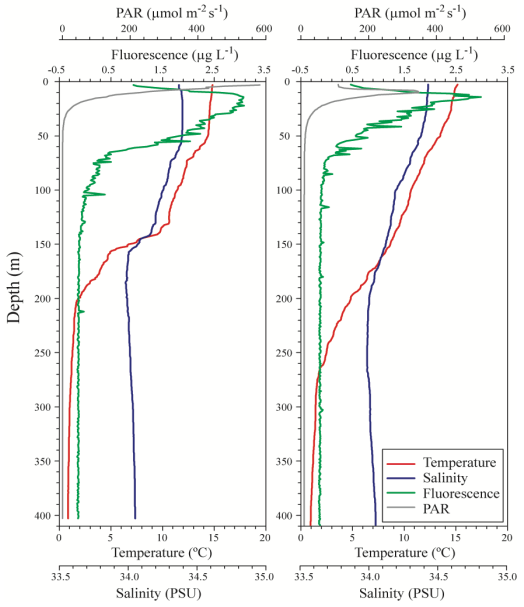

Fig. 2. Vertical profiles of water temperature, salinity, fluorescence and water irradiance (PAR) at each stations (St.UD3: left panel and St.50: right panel) in the around water of Ulleungdo and Dokdo, Korea.

수온의 수직구조를 살펴보면, St.UD3 보다 St.50에서 남방기원의 대마난류의 영향을 강하게 받고 있다는 것을 알 수 있었다. 염분은 두 정점 모두 유사한 수직구조를 보였고, St.UD3과 St.50의 표층부 염분은 각각 34.35 psu와 34.40 psu로 관찰되었다. 그 후 수심의 증가와 더불어 염분이 감소하여 400 m 수심에서 34.10 psu전후의 값을 유지하였다. 염분이 150 m 전후의 수심을 기점으로 명확한 차이를 보이는 것은 물리적으로 상층부에서는 난류의 영향을 강하게 받고 있으며, 150 m보다 깊은 수심에서는 북한한류의 영향을 받고 있다는 것을 시사한다[8]. 수중광량은 두 정점 모두 수심 10 m전후에서 유사한 곡선으로 감소하는 것을 보아, 수직으로 투과된 광량은 유사한 것으로 파악되었고(St.50에서 표층부에서 낮게 관찰된 광량은 조사선 그림자의 영향이 큰 것으로 판단됨), 1% 광투과 심도는 약 30 m 전후인 것으로 파악되었다. 식물플랑크톤의 현존량을 가늠할 수 있는 형광값의 실시간 수직구조는 표층부에서 0.5 μg L^{-1} 전후로 낮게 관찰되어, 20-30 m 수심에서는 2.5-3.0 μg L^{-1}으로 아표층최대값(sub-surface Chl-*a* maximum)을 기록하였고, 그 후 수심의 증가와 더불어 점차적으로 감소하여 70 m수심에서부터 0 μg L^{-1}에 가까운 값을 유지하였다. 여기서 두 정점의 수직적 형광값을 비교하면, 울릉도 인근 St.UD3의 20-50 m 수심에서 형광값이 일정 부분 높게 관찰된 것으로 보아, St.50보다 높은 식물플랑크톤의 현존량이 수계내 존재한 것을 가늠할 수 있었고, 이는 울릉도의 섬 효과(Island effect)가 일정부분 작용하였다고 판단된다. 아울러, 수심별 실측 Chl.*a* 값에서도 St.UD3 정점의 0 m 와 30 m 층에서 각각 2.36 μg L^{-1}과 2.15 μg L^{-1} 로 St.50의 1.01 μg L^{-1}과 0.78 μg L^{-1}보다 높게 관찰되었다는 것은 현장 형광값의 실시간 자료를 잘 뒷받침하고 있다는 것을 알 수 있다[Fig.3].

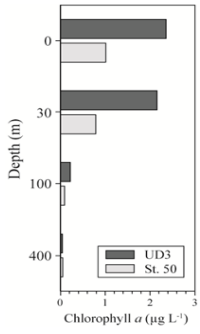

Fig. 3. Vertical changes in the concentration of Chl.*a* concentration at two stations in seawater around Ulleungdo and Dokdo of Korea.

영양염류농도는 식물플랑크톤 현존량이 높게 관찰된 유광층 상부에서 낮게 기록되었고, 수심의 증가와 더불어 영양염농도가 증가하는 경향이 관찰되었다[Fig.4]. 구체적으로 St.UD3의 질산염+아질산염농도는 0 m, 30 m, 100 m, 400 m 층에서 각각 0.51 μM, 0.44 μM, 2.46 μM, 8.91 μM로 관찰되었고, St.50에서도 유사하게 각각 0.12 μM, 0.66 μM, 2.99 μM, 8.54 μM로 관찰되었다. 암모니아의 최고치는 St.50의 표층에서 0.30 μM로 관찰되었고, 최저치는 St.UD3의 표층에서 검출한계(<0.02 μM)로 관찰되었다. 인산염은 두 정점 모두 표층에서 검출한계인 0.02 μM로 관찰되었고, 수심의 증가와 더불어 농도가 증가하여, 400 m 층에서는 1.50 μM전후의 값을 기록하였다. 규산염은 수심의 증가와 더불어 증가하는 경향이 있었고, 최고치는 조사 최대심도인 400 m에서 각각 31.54 μM (St.UD3)과 29.44 μM (St.50)로 관찰되었다. N:P비는 일반적으로 Redfield비(16)을 기준으로 고려하였을 때[12], St.UD3과 St.50의 표층에서 각각 25와 21로 관찰되었고, 수심의 증가와 더불어 그 비는 감소하여 최대심도인 400 m층에서는 6 전후로 관찰되었다. 이는 울릉도-독도로 이어지는 정점에서는 춘계 표층부에서는 질소기원의 영양염류가 상대적으로 높게 나타날 수 있고, 수심의 증가와 더불어 Redfield비가 낮게 관찰되는 것은 상대적으로 질소기원의 영양염류가 낮아진다는 것을 확인하였다.

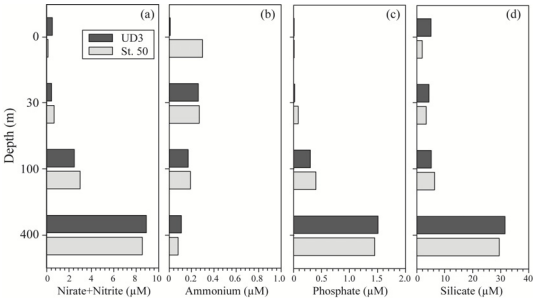

Fig. 4. Vertical changes in the concentration of (a) nitrate+nitrite, (b) ammonium, (c) phosphate and (d) silicate at two stations in seawater around Ulleungdo and Dokdo of Korea.

이와 노[12]의 보고에 의하면, 동해의 수온약층 아래 수심 300 m 보다 깊은 해수의 평균 N:P비는 12.7(n=522)로 Redfield비 보다 낮게 나타났고, 그 이유에 대하여 생물공급가설, 분해조절가설, 해수순환가설을 토의하였다. 본 연구에서 100 m보다 깊은 수심에서 N:P비가 낮게 관찰된 것 또한 이전의 보고와 잘 일치하였고, 추후 동해 수온약층 아래수심에서는 N:P비가 Redfield비 보다 낮은 것에 주목하여 상기의 3가지 가설에 근거하여 보다 명확한 이유를 체계적으로 밝힐 필요성이 있다.

3.2 울릉도-독도주변 식물플랑크톤 군집조성

식물플랑크톤의 군집조성을 살펴보면, St.UD3에서 그들의 현존량은 4.9 X 10^5 cells L^{-1}로 나타났고, 제1우점종은 침편모조류 *Heterosigma akashiwo*가 66%(3.2 X 10^5 cells L^{-1})로, 다음으로 은편모조류 *Crytomonas* spp.가 13% (0.6 X 10^5 cells L^{-1})로, 제3우점종으로 규조류 *Leptocylindrus danicus*가 6% (0.3 X 10^5 cells L^{-1})로 관찰되었다. St.50의 식물플랑크톤 현존량은 1.9 X 10^5 cells L^{-1}로 St.UD3보다 1/2로 낮게 관찰되었고, 제1우점종은 규조류 *Chaetoceros socialis*가 39%(0.9 X 10^5 cells L^{-1})로, 다음으로 *H. akashiwo*가 34%(0.6 X 10^5 cells L^{-1})로, 제3 우점종으로 규조류 *L. danicus*가 7% (0.1 X 10^5 cells L^{-1})로 관찰되었다[Fig.5].

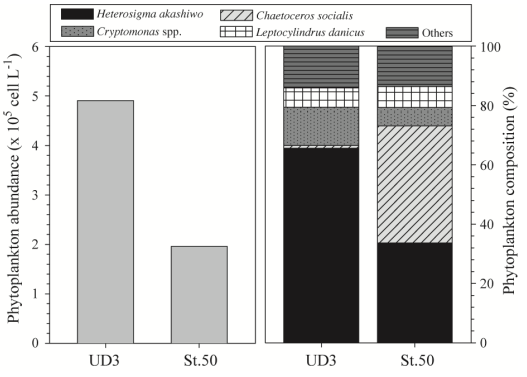

Fig. 5. Comparison of total phytoplankton abundances (left penal) and percent contribution of dominant species (right penal) in surface layer of two stations.

여기서 주목할 점은 *H. akashiwo*는 내만의 부영양화된 수계의 대표 지표종으로 잘 알려져 있는데[13], 상대적으로 낮은 영양염조건인 동해중심해역에서 높은 밀도를 보인 것이다. 침편모조류 *H. akashiwo*의 세포를 고정하게 되면, 세포가 부분적으로 손상을 입어 정확하게 동정을 하기 어려운 점이 있다. 본 연구에서는 영양염 첨가실험에서 살아있는 세포를 상세하게 관찰하여 본 종이 극우점하고 있는 것을 파악할 수 있었고, 실제 살아있는 세포를 고정한 후 어떻게 변형되는지 구체적으로 파악하여

현장 시료에서 본 종을 쉽게 동정할 수 있었다. *H. akashiwo*의 높은 개체수의 유입가능성은 두 가지로 유추해 볼 수 있는데, 첫째로 울산-울진으로 이어지는 연안해역(울산항, 포항항, 강구항, 후포항)의 부영양화된 수계에서 발생하여 동해역으로 확산될 가능성과, 나머지 하나는 울릉도 섬주변 연안 퇴적물에서 휴면포자에서 발아하여 증식하였을 가능성이다. 본 연구 조사정점에서는 수심이 1000 m -2000 m로 물리적 수층혼합에 의한 퇴적물에서 휴면포자로 발아할 가능성은 희박하다. 따라서 *H. akashiwo* 씨앗(seed)이 외부에서 기원하여 동해중앙해역으로 확산되면서 증식한 결과로 판단된다. 추후 *H. akashiwo*종이 최적으로 증식하는 4-5월에 동해역에서 인공위성 자료와 현장조사를 병행하여 추적할 필요성이 대두되었다. 본 연구에서도 조사시기의 위성자료(5/1-5/8)를 살펴보았으나, 기상조건이 좋지 않아 명확하게 판단할 수 없었다.

3.3 영양염류 첨가 후 식물플랑크톤의 반응

표층 영양염농도와 식물플랑크톤의 군집조성이 다른 두 해역에서 식물플랑크톤의 성장에 대한 잠재적 반응특성을 평가하고자 영양염 첨가실험을 수행하였고, 실험 후 시간 경과에 따른 *in vivo* 형광값을 Figure 6와 7에 나타내었다. St.UD3의 대조군에서는 실험초기(1.81) 값을 배양중기까지 유지하였으나, 종료시에는 1/2로 감소한 0.99를 보였다. 아울러, +P실험군에서도 대조군의 시계열 변동과 유사한 경향을 관찰하였다.

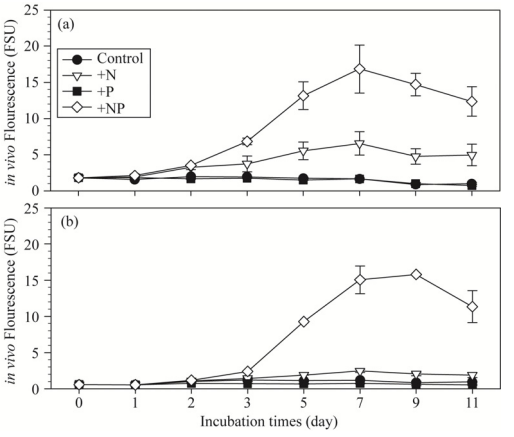

Fig. 6. Changes of *in vivo* fluorescence in control, +N, +P and +NP treatment of bio-assay experiments. The samples (a and b panel) were obtained at surface layer of St.UD3 and St.50.

반면, +N실험군에서는 초기에서 5-7일까지 일정하게 증가하여 5.54-6.55의 값을 유지하였으나, 그 후 감소하였다. St.50에서는 대조군에서 초기 0.57에서 3일 경과 후 1.19로 2배 증가하였으나, 그 후 감소하였다. +P실험군에서는 식물플랑크톤의 성장하지 않아, 초기 형광값을 지속적으로 유지하는 경향을 보였다. 특히 St.50의 +N실험군에서는 St.UD3 정점의 +N실험군보다 전반적으로 낮은 형광값이 관찰되었고, 최대값(2.45)또한 낮게 기록되었다. 반면, St.50의 +NP실험군에서는 St.UD3의 +NP실험군과 유사한 형광값을 보였고, 이는 식물플랑크톤의 성장반응이 +NP실험군에서는 두 정점 모두 유사할 것으로 예측할 수 있다. St.UD3에서 Fe을 첨가한 대조군과 +N실험군은 Fe를 첨가하지 않은 대조군과 +N실험군보다 약간 높은 형광값이 관찰되었다. 하지만, +P실험군과 +NP실험군에서는 Fe 첨가 효과가 명확하지 않았다.

아울러, St.50에서도 Fe을 첨가한 대조군, +N, +P, +NP실험군에서 Fe 을 첨가하지 않은 모든 실험군과 유사한 형광값이 관찰되어, Fe첨가에 따른 식물플랑크톤의 성장반응이 명확하지 않았다. 결과적으로 미량금속인 Fe 영양염은 동해역에 충분하게 존재하고 있어, 식물플랑크톤 성장의 제한 요인이 되지 않을 가능성이 높다는 것을 시사한다.

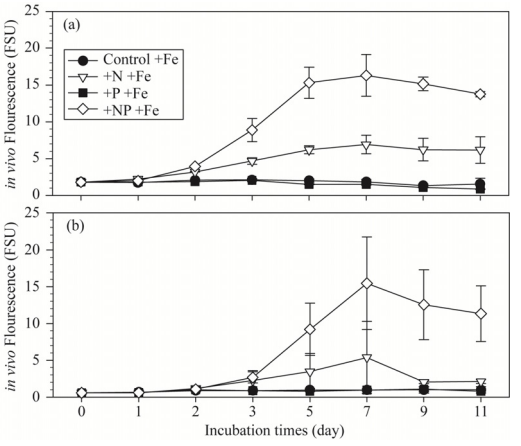

Fig. 7. Changes of *in vivo* fluorescence in control, +N, +P and +NP treatment in combined Fe bio-assay experiments. The samples (a and b panel) were obtained at surface layer of St.UD3 and St.50.

일반적으로 연안해역에서는 육상기원의 철과 같은 미량금속이 대기 및 하천을 통하여 많이 유입됨으로 연안해역의 철 첨가 실험은 무의미하지만, 동해와 같은 대양

의 특성을 지닌 해역에서는 철 첨가 실험은 중요한 의미를 부여할 수 있다. 본 실험결과를 바탕으로, 동해에서 춘계에 철 제한이 일어나지 않은 것은 4-5월에 집중되는 중국기원 황사에 포함된 철금속이 많이 존재하여 동해역에 일정량 영향을 줄 수 있다는 것을 시사하였다. 추후, 이와 같은 유사한 실험을 황사의 영향이 상대적으로 적게 나타나는 하계와 추계에 조사하여 동해역에서 철이온의 제한 가능성을 검토할 필요성이 있다.

각 실험군 별 배양중기, 종료기의 영양염 농도를 측정하여 식물플랑크톤의 성장 및 분해되면서 어느 정도의 질산염, 암모니아, 인산염농도가 소비 및 재생산 되었는지를 평가하였다[Fig. 8과 9]. 두 정점에서 대조군 질산염농도를 파악한 결과, 배양초기와 중기보다 시간의 경과와 더불어 종료기에 질산염이 일정량 재생산(1-2 μM)되는 것을 파악하였고, Fe 첨가 대조군에서도 유사한 경향을 관찰하였다. 아울러, 질산염농도는 Fe 첨가한 +N, +P실험군과, Fe을 첨가하지 않은 +N, +P첨가군에서도 유사한 농도로 관찰되었고, 두 정점의 배양중기와 종료기 질산염의 평균농도가 5 μM 전후로 일정한 값을 유지한 것은 인산염농도가 이미 제한된 환경에서 질산염을 더 이상 사용하지 않았다고 판단된다.

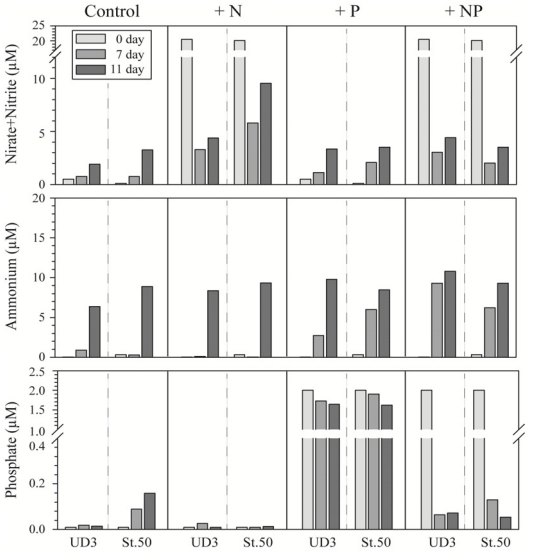

Fig. 8. Changes of nutrient concentration in initial (Day 0), mid-stage (Day 7) and final stages (Day 11) in the bio-assay experiments.

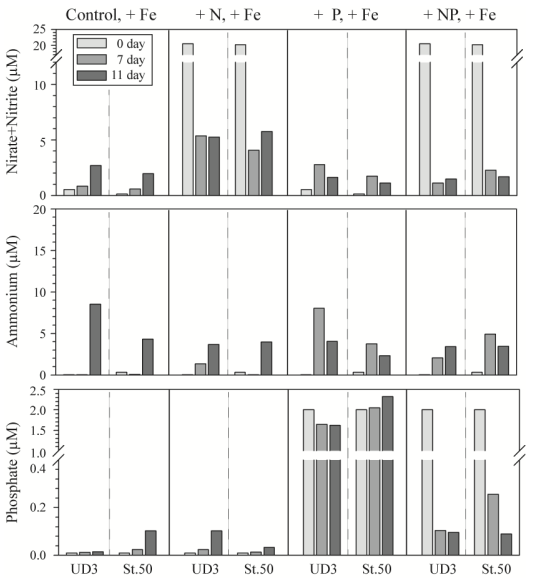

Fig. 9. Changes of nutrient concentration in initial (Day 0), mid-stage (Day 7) and final stages (Day 11) in combined Fe bio-assay experiments.

이를 뒷받침할 수 있는 근거는 +N실험군의 인산염농도가 배양중기와 종료기에 0.02 μM전후로 식물플랑크톤의 성장의 제한 농도에 도달한 것을 확인할 수 있었다. 반대로 P첨가군에서는 질산염이 일정량 낮게(1.0-2.0 μM)존재하고 있음에도 불구하고 식물플랑크톤의 성장하지 않아, 결과적으로 인산염농도 또한 초기 첨가한 2.0 μM농도가 배양종료까지 계속적으로 유지되었다. 이와 같은 경향은 Fe을 함께 첨가한 +P실험군에서도 유사하게 나타났다. 즉 +P실험군은 초기 질산염이 낮게 유지되는 환경하에서는 식물플랑크톤이 성장할 수 없었으나, 반대로 +N실험군은 인산염이 낮은 농도에서도 식물플랑크톤이 어느 정도 반응할 수 있다는 것을 파악할 수 있었다.

동해 표층에서 질산염과 인산염의 절대농도가 낮은 환경하에서 어떤 특정 영양염류를 첨가한 결과, +N실험군에서 식물플랑크톤의 증식이 높게 나타난 반면 +P실험군에서는 식물플랑크톤의 증식이 현저하게 일어나지 않았다. 여기서 +N 실험군에서 식물플랑크톤의 현저하게 증식한 이유를 두 가지로 유추해 볼 수 있다. 첫째로, 진핵식물플랑크톤의 P의 저장고에 용존무기인을 저장할 수 있고, 결과적으로 낮은 인산염환경을 극복하여 세포내 저장한 인산염을 효율적으로 이용하여, +N 실험군에서 빠른 성장을 보였을 것이다[14]. Yamaguchi 와

Adachi [14]에 의하면, 진핵식물플랑크톤은 인산염 에스테르 화합물을 세포내 축적하는 생물저장고를 가지고 있고, 일정량 P영양염을 비축할 수 있는 역할을 담당한다. 둘째로, 용존무기인의 고갈 후 용존상태의 유기인이나 생물세포내 저장고에 비축한 P을 사용하여 지속적으로 성장을 유지하였을 가능성이다. 반대로 +P실험군 낮은 식물플랑크톤의 반응을 보인 것은 인산염은 풍부하였지만, 질소기원 영양염의 이용도가 낮게 유지되어, 결과적으로 첨가한 인산염이 사용되지 않아, 식물플랑크톤의 성장 또한 대조군과 유사하였다. 아울러, 모든 실험군에서 영양염 첨가한 후 초기, 중기, 말기의 영양염류 농도를 산출한 결과, +N과 +NP 실험군에서는 질산염 및 인산염이 지속적으로 감소하여 중기나 말기에 대부분 소진된 반면, +P 실험군에서는 질소기원의 영양염류가 부족하여 인산염이 거의 소비되지 않는 것을 알 수 있었다. 결과적으로 울릉도-독도 주변해역에서는 질소기원의 무기영양염 중에서도 질산염의 농도가 식물플랑크톤 성장과 쇠퇴에 중요한 역할을 하는 것으로 생각된다.

+NP실험군에서는 식물플랑크톤의 성장이 빠르게 이루어졌고, 그와 함께 질산염과 인산염 소모도 7일째 제한농도에 도달한 것으로 나타났다. 그 후 성장은 이루어지지 않았고, 분해과정에서 생성된 영양염류가 일정량 기여하여 배양종료시기에 배양중기보다 약간 높게 관찰되는 특성을 보였다. 아울러, 모든 실험군에서 질산염과 암모니아와 같은 N계열의 무기영양염은 배양중기보다 종료시기에 일정량 높게 나타났고, 이는 식물플랑크톤의 세포가 분해되는 과정에서 생성된 재생산 영양염농도가 일정량 기여하고 있다는 것을 의미한다. 하지만, 인산염에 관한 재생성은 모든 실험군에서 명확하지 않았다. 또한 Fe을 첨가한 모든 실험군에서도 N과 P계열의 영양염의 재생성이 명확하지 않았는데, 왜 Fe이 풍부하게 존재하는 실험군보다 Fe을 첨가하지 않은 실험군에서 빠르게 N계열의 무기 영양염의 재생성이 일어나는 것에 대하여 추후 보다 세심한 연구가 필요할 것이다.

16가지로 조합된 영양염 첨가에 따른 식물플랑크톤의 최대 성장률을 Figure 9에 나타내었다. St.UD3에서 Fe을 첨가하지 않은 대조군과 +P실험군에서는 음(-)의 값을 보였고, +N실험군과 +NP 실험군에서 각각 0.32 d^{-1}와 0.57 d^{-1}로 높은 성장률을 보였다. St.50에서도 Fe을 첨가하지 않은 대조군, +N, +P, +NP실험군에서 각각 0.19 d^{-1}, 0.34 d^{-1}, 0.05 d^{-1}, 0.81 d^{-1}로 나타났다. Fe을 첨가한 St.UD3의 대조군과 +P실험군에서는 Fe을 첨가하지 않은 실험군과 유사한 식물플랑크톤의 성장률이 관찰되지 않았다(p>0.05). 아울러, Fe을 첨가한 +N과 +NP실험군에서 식물플랑크톤 군집의 성장률은 각각 0.35 d^{-1}와 0.61 d^{-1}로, Fe을 첨가하지 않은 실험군보다 약간 높게 나타났다.

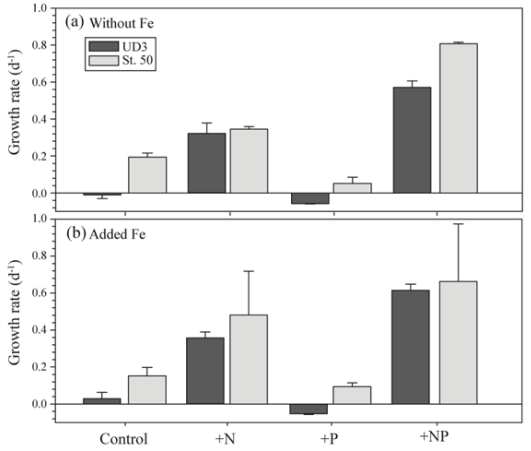

Fig. 9. The specific growth rate of phytoplankton communities in the control, +N, +P and +NP treatment in bio-assay experiments with or without added Fe in St.UD3 and St.50.

St.50에서도 Fe을 첨가한 +N실험군(0.52 d^{-1})이 Fe을 첨가하지 않은 +N실험군(0.34 d^{-1})보다 높은 성장률을 보였으나, 다른 실험군에서는 명확한 특성을 파악할 수 없었다. 결과적으로 본 연구에서 식물플랑크톤의 성장률은 +N과 +NP실험군에서 현저하게 나타났고, +N첨가보다 +NP를 조합한 실험군에서 약 2배 빠른 성장률을 보이는 것을 알 수 있었다. 특히 Fe을 추가적으로 첨가한 실험군에서는 명확한 특성을 파악할 수 없었으나, 유일하게 +N실험군에서만 약간 빠른 식물플랑크톤의 반응을 보였다.

배양종기시기에 각각의 실험군에서 가장 우점한 3그룹의 식물플랑크톤을 파악하여 Table 1에 나타내었다. 먼저, St.UD3의 대조군과 +P실험군에서는 은편모조류 *Crytomonas* spp. 우점하였고, +N과 +NP실험군에서는 *H. akashiwo, Pseudo-nitzchia* spp., *L. danicus* 가 우점하였다.

St.UD3의 영양염첨가 실험에서는 현장에서 우점한 *H. akashiwo*가 빠른 성장반응을 보였고, 만약 현장에서

추가적인 영양염류가 공급되면, 보다 빠르게 *H. akashiwo*의 대발생이 일어날 것으로 기대된다. 한편, Fe을 첨가한 실험군에서는 상대적으로 *L. danicus* 종이 최종적으로 우점하는 다른 종보다 우위를 점하고 있는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 경향은 St.50에서는 유사하게 나타났다. 특히 St.50의 +N과 +NP실험군에서 *L. danicus Pseudo-nitzchia* spp., *Chaetoceros* spp., *Skeletonema* spp.가 우점하는 것을 파악하였다. 결과적으로 +N과 +NP실험군에서는 높은 영양염농도에 빠르게 반응하는 세포사이즈가 작은 규조류가 우점하는 특색을 파악하였고, 특이적으로 St.UD3에서는 세포 사이즈가 작은 침편모조류인 *H.akashiwo*가 +N과 +NP 실험군에서 빠르게 반응하여 우점한 것으로 파악되었다.

Table 1. The list of dominant group on the final sampling day of each nutrient addition experiments in field water collected form St. UD3 and St.50.

Types of experiment		1st dominant	2nd dominant	3rd dominant
UD3	C	C.P**	-	-
	+N	H.A***	L.A***	P.P**
	+P	C.P**	-	-
	+NP	H.A****	P.P***	L.A***
	C,+Fe	C.P**	L.A*	-
	+N,+Fe	L.A****	H.A**	P.P**
	+P,+Fe	C.P**	L.A*	P.P*
	+NP,+Fe	L.A***	H.A***	P.P**
St.50	C	P.P**	L.A**	-
	+N	L.A**	P.P**	Ch.P**
	+P	L.A**	-	-
	+NP	P.P***	S.P**	Ch.P**
	C,+Fe	L.A**	P.P *	-
	+N,+Fe	L.A***	P.P***	Ch.P*
	+P,+Fe	L.A**	Ch.P*	-
	+NP, +Fe	L.A***	P.P***	Ch.P*

C.P: *Crytomonas* spp., H.A: *Heterosigma akashiwo*, L.A: *Leptocylindrus danicus*, S.P: *Skeletonema* spp. P.P: *Pseudo-nitzchia* spp. Ch.P; *Chaetoceros* spp.
****:>X10^4 cells mL^{-1}, ***:>X10^3 cells mL^{-1}, **:>>X10^2 cells mL^{-1}, *:>10 cells mL^{-1}

4. 결론

동해 울릉도-독도로 이어지는 2정점에서 식물플랑크톤의 군집조성과 수직적 영양염분포 특성을 파악하였고, 아울러 영양염첨가에 따른 식물플랑크톤의 반응과 함께 영양염류 소비 및 재생성을 비교분석하였다. 그 결과, St. UD3 에서는 특이적으로 부영양화의 지표종인 *H. akashiwo*가 우점하였고, St.50에서는 규조류 *L. danicus*가 높은 밀도로 출현하였다. 이와 같이 현장에서 우점 출현한 식물플랑크톤 종이 생물검정실험결과에서도 유사하게 우점하는 특색을 관찰하였고, 특히 St.50에서 세포사이즈가 작은 규조류가 우점하는 경향을 보였다. 만약 춘계에 울릉도 주변에서 지속적인 강풍으로 인하여 용승이 발생하면, 저층의 풍부한 영양염류가 유광층으로 공급되어 식물플랑크톤의 폭발적인 증식이 3-4일 이내에 발생할 가능성이 높고, 이와 같은 높은 1차 생산자의 생성은 동물플랑크톤을 거쳐 고차 영양단계의 생물의 생산성에 크게 기여하는 이른바 “섬효과 (Island effect)”가 잘 나타날 것으로 기대된다. 아울러, Fe첨가에 대한 명확한 식물플랑크톤의 반응특색을 파악할 수 없었지만, Fe첨가 실험군에서 상대적으로 N계열의 영양염이 느리게 재생성되는 경향을 파악하였다. 결과적으로 본 연구를 통하여, +N과 +NP실험군에서 빠른 식물플랑크톤의 성장반응을 보였고, +P실험군에서는 대조군과 유사하게 식물플랑크톤의 성장이 이루어지지 않아, 영양염류 소비도 거의 일어나지 않는 것을 명확하게 파악하였다.

References

[1] A. R. Dzialowski, S. -H. Wang, N. -C. Lim, W. W. Spotts, D. G. Huggins, "Nutrient limitation of phytoplankton growth in central plain reservoirs, USA," J. Plankton Res., 27, pp. 587-595, 2005.
DOI: http://dx.doi.org/10.1093/plankt/fbi034

[2] S. H. Baek, S. Shimode, H.C. Kim, M.S. Han, T. Kikuchi, "Strong bottom‐up effects on phytoplankton community caused by a rainfall during spring and summer in Sagami Bay, Japan," J. Marine Syst., 75, pp. 253-564, 2009.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.10.005

[3] S. H. Baek, D. S. Kim, M.H. Son, S.M. Yun, Y.O. Kim, "Seasonal distribution of phytoplankton assemblages and nutrient enriched bioassays as indicators of nutrient limitation of phytoplankton growth in Gwangyang Bay, Korea," Estuarine, Coast. Shelf Sci. 163, pp. 265-278, 2015.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2014.12.035

[4] D. M. Nelson, Q. Dortch, "Silicic acid depletion and silicon limitation in the plume of the Mississippi river:Evidence from kinetic studies in spring and summer," Mar. Ecol. Prog. Ser., 136, pp. 163-178, 1996.
DOI: http://dx.doi.org/10.3354/meps136163

[5] C. MacPhee, "Bioassay of algal production in chemically altered waters," Limnol. Oceanogr., 6, pp. 416-422, 1961.
DOI: http://dx.doi.org/10.4319/lo.1961.6.4.0416

[6] T. H. Chrzanowski, J. P. Grover, "Effects of mineral nutrients on the growth of bacterio-and phytoplankton in two southern reservoirs," Limnol. Oceanogr., 46, pp. 1319-1330. 2001.
DOI: http://dx.doi.org/10.4319/lo.2001.46.6.1319

[7] C. Labry, E. E. Denn, A. Chapelle, J. Fauchot, A Youenou, M. P. Crassous, J. LeGrand, B. Lorgeoux, "Competition for phosphorus between two dinoflagellates: A toxic *Alexandrium minutum* and a non-toxic *Heterocapsa triquetra*," J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 358, pp. 124-135, 2008.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jembe.2008.01.025

[8] K. I. Chang, W. J. Teague, S. J. Lyu, H. T. Perkins, D.-K. Lee, D. R. Watts, Y.-B. Kim, D. A. Mitchell, C. M. Lee, K. Kim, "Circulation and currents in the southwestern East/Japan Sea: Overview and review." Prog. Oceanogr., 61, pp. 105-115, 2004.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2004.06.005

[9] D. H. Choi, S. M. An, Y.R. Choi, H.S. Roh, J.H, Noh, " Seasonal variation of picocyanobacterial community composition in seawaters around Dokdo, Korea," The Sea, 20, pp. 192-198, 2015.
DOI: http://dx.doi.org/10.7850/jkso.2015.20.4.192

[10] T. R. Parsons, Y. Maita, C.M. Lalli. ."A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis," Pergamon Press, Oxford. p. 173, 1984.

[11] A. C. Redfield, " The biological control of chemical factors in environment. Am. Sci. 46, 205-221, 1958.

[12] T. S. Lee, T. K. Rho, " Seawater N/P ratio of the East Sea," The Sea, 20, pp. 199-205, 2015.
DOI: http://dx.doi.org/10.7850/jkso.2015.20.4.199

[13] H. J. Jeong, Y. D. Yoo, K. H. Lee, T. H.Kim, K. A. Seong, N. S. Kang, S. Y. Lee, J.S. Kim, S. Kim, W. H. Yih, "Red tides in Masan Bay, Korea in 2004–2005: I. Daily variations in the abundance of red-tide organisms and environmental factors" Harmful Algae 30S, pp. S75-S88, 2013.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.hal.2013.10.008

[14] H, Yamaguchi, M. Adachi. The utilization of organic phosphorus by eukaryotic phytoplankton in marine environments (Review). Bull. Plankton Soc. Japan, 57, pp. 1-12, 2010.

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)
- 2016년 8월 : 부경대학교 해양학과 (이학석사)

<관심분야>
해양생물학, 식물플랑크톤 생태학, 수질, 해양환경

김 윤 배(Yun-Bae Kim) **[정회원]**

- 2002년 8월 : 부산대학교 해양과학과 (이학석사)
- 2008년 8월 : 서울대학교 지구환경과학부 (이학박사)
- 2012년 6월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 선임기술원

<관심분야>
해양물리학, 해양순환, 영양염류 거동