

장기자료 분석과 생물검정실험을 이용한 천수만과 태안해역의 제한영양염 평가

김진현* · 정원옥** · 신용식*** · 정병관****†

* 국립공원연구원 해양연구센터 연구원, ** 국립공원연구원 해양연구센터 센터장

*** 목포해양대학교 해양시스템공학과 교수, **** 국립공원연구원 해양연구센터 책임연구원

Evaluating Limiting Nutrients through Long-term Data Analyses and Bioassay Experiments in Cheonsu Bay and Taean Sea

Jin Hyun Kim* · Won Ok Jeong** · Yongsik Shin*** · Byungkwan Jeong****†

* Researcher, Marine Research Center, National Park Research Institute, Korea National Park Service, Taean 32105, Korea

** Managing Director, Marine Research Center, National Park Research Institute, Korea National Park Service, Yeosu 59723, Korea

*** Professor, Department of Ocean System Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

**** Senior Researcher, Marine Research Center, National Park Research Institute, Korea National Park Service, Taean 32105, Korea

요약 : 천수만과 태안해역의 제한영양염을 평가하기 위해 장기자료 분석과 생물검정실험을 진행하였다. 우선 잠재적인 제한영양염을 평가하기 위해 국가수질측정망에서 제공되는 2004-2016년 동안의 장기 영양염 자료를 이용하였다. 장기자료의 DIN/DIP를 분석한 결과 대부분 16이하로 N 제한이 우세하였지만 N, P, Si의 농도비를 이용한 분석에서는 하계와 추계에는 N 제한이 우세하였고, 동계와 춘계에는 해역에 따라 일부 Si 제한을 보이거나 또는 제한이 나타나지 않았다. 생물검정실험 시 채집된 현장수의 영양염 분석결과, DIN/DIP는 3월과 5월에 모든 정점에서 P 제한을 나타냈고, 7월과 10월에는 N 제한이 우세하였다. N, P, Si의 농도비를 이용한 분석에서 3월과 5월은 P와 Si 제한을 보이거나 제한영양염이 나타나지 않은 정점이 존재하였으나 7월과 10월에는 N 제한이 우세하였다. 실질적인 제한영양염을 평가하기 위해 수행된 생물검정실험 결과 3월에는 특정 제한영양염이 나타나지 않았으나, 5월, 7월 10월에는 NH_4^+ 와 NO_3^- 가 반응을 보임으로서 이 시기에는 N이 식물플랑크톤 성장에 직접 관여하는 실질적인 제한영양염임을 확인하였다.

핵심용어 : 천수만, 태안해안, 제한영양염, N/P비, N/P/Si비, 생물검정실험

Abstract : Long-term data analyses and bioassay experiments were conducted to assess limiting nutrients in Cheonsu Bay and Taean sea. First, long-term nutrient data (2004-2016) provided by the National Water Quality Monitoring Network were used to assess potential limiting nutrients. Analysis of the long-term data showed that the dissolved inorganic nitrogen/dissolved inorganic phosphate (DIN/DIP) ratio was mostly below 16, with N limitation being dominant. A subsequent analysis using the concentration ratios of N, P, and Si showed that N limitation was dominant during summer and autumn but that Si limitation occasionally occurred during winter and spring in relatively limited areas. However, the dominant limiting nutrient was not determined. The nutrient analysis of the field water collected during the bioassay experiment showed that DIN/DIP revealed P limitation at all stations in March and May, whereas N limitation was dominant in July and October. In the analysis using the concentration ratios of N, P, and Si, P and Si limitation appeared in March and May, but there were points with no dominant limiting nutrient. However, N limitation was dominant in July and October. In the bioassay experiment for assessment of the actual limiting nutrient, the results showed no specific limiting nutrient in March, whereas NH_4^+ and NO_3^- showed responses in May, July, and October, which confirmed that N was a substantial limiting nutrient directly involved in phytoplankton growth during this period.

Key Words : Chensu Bay, Taean sea, Nutrient limitation, N/P ratio, N/P/Si ratio, Bioassay

* First Author : gjh6741@knps.or.kr, 041-675-9609

† Corresponding Author : bkjeong@knps.or.kr, 041-675-9670

1. 서론

수 생태계에서 유기물 생산과 전달 과정을 통해 탄소순환에 중요한 역할을 담당하는 식물플랑크톤은 이·화학적 인자(e.g., environmental factor, nutrients, flow, residence time)와 생물학적 인자(e.g., grazing impact, trophic interactions)와 같은 복합적 요인에 의해 성장이 결정되며, 물리와 생물학적 요인이 일정할 경우 영양염의 농도에 의해 민감하게 영향을 받는다(Tilman, 1982; Hansson, 1992; Sterner and Grover, 1998; Kang et al., 2000; Wetzel, 2001; Kwon et al., 2002; Sin and Kim, 2003; Kwon et al., 2015). 수중에서 영양염은 질소(N)와 인(P) 그리고 규소(Si) 형태로 존재하며, 이 중 상대적으로 적은 양이 존재하여 식물플랑크톤 성장에 민감하게 관여하는 영양염을 제한영양염이라 한다. 부족한 제한영양염이 과잉 공급될 시 식물플랑크톤 대증식(bloom)이 유발될 수 있으며(Hummel et al., 1994; Shin et al., 2000; Courrat et al., 2009; Song et al., 2011), 아울러 유기물 함량의 증가로 이어져 수질에 부정적 영향을 미칠 수 있다(Sundbäck et al., 1990; Caron, 1991; Lee and Lee, 1999). 따라서 제한영양염을 파악하는 것은 해역관리에 있어 우선시 되어야 할 연구과제이다. 일반적으로 담수 생태계에서는 인이, 해수 생태계에서는 질소가 제한영양염으로 작용하며(Hecky and Kilham, 1988; Mahoney, 1989), 담수와 해수가 혼합하는 하구역에서는 시·공간적으로 다양한 양상을 보이기도 한다(Schindler, 1977; Harrison et al., 1990; Yoon, 2012). 제한영양염을 확인하는 방법으로는 화학양론적(stoichiometric) 접근방법과 실험적인 방법이 존재한다(Fisher et al., 1992; Taylor et al., 1995; Lee et al., 2001; Fujiki et al., 2004; Jeong et al., 2008; Yoon, 2012; Jeong, 2014). 화학양론을 이용한 방법은 쉽게 제한영양염을 확인 할 수 있으나, 현장의 영양염 농도가 매우 높거나 낮은 경우 명확한 제한영양염을 파악하는데 한계가 있다. 메조코즘(mesocosm)실험의 경우 현장의 조건을 반영하는데 매우 탁월하지만, 높은 비용이 소요되고, 실험 접근성이 용이하지 않으며, 기상조건 변수에 대응하기 어렵다는 단점이 있다. 생물검정실험은 단일 식물플랑크톤을 배양하여 제한영양염을 평가하는 방법으로 실험이 간단하고, 직접적인 결과를 확인할 수 있어 보편적으로 사용되고 있으나(Mahoney, 1989), 현장의 식물플랑크톤 군집을 충분히 반영하지 못하는 단점이 존재하기 때문에 현장수를 이용한 실험을 수행함으로써 기존의 방법을 보완할 필요가 있다.

연구해역은 태안반도를 중심으로 동쪽은 천수만, 서쪽은 태안해역으로 구분되며, 백사수도(白沙水道)라는 수로를 통해 두 해역이 연결되어 있는 형태이다(Fig. 1). 천수

만은 1978년 수산자원보호구역으로 지정되었으며, 1980년 이후 간척공사와 함께 서산 A, B지구에 2개의 방조제가 건설되었다. 태안해역은 1978년 352.796 km²의 면적이 태안해안국립공원으로 지정되었고, 2007년 유류사고 발생으로 사회적 이슈가 대두되었던 지역이기도 하다. 천수만과 같은 반 폐쇄적인 하구시스템을 포함한 해역에서는 다량의 유기물과 영양물질이 방류와 함께 해양으로 유입됨으로서 부영양화를 초래하기도 한다(Yoon et al., 2013; Jeong and Yang, 2015). 천수만의 주요 담수유입원인 간월호와 부남호는 연중 높은 농도의 영양염을 함유하고 있으며, 하계에는 빈번히 녹조가 발생하고 있다(Jeong, 2015). 이와 같은 담수가 방류될 시 인근 해역은 급격한 생태적 교란이 야기될 수도 있으며, 고농도의 영양염 공급에 의해 식물플랑크톤 대증식을 초래할 수 있다(Sin et al., 2013; Sin and Jeong, 2015). 따라서 제한영양염의 파악은 환경변화에 1차 반응자인 식물플랑크톤의 거동을 예측할 수 있는 기초자료로 활용될 뿐만 아니라 나아가 해역관리의 측면에서 매우 중요하다. 생물검정실험을 통해 제한영양염을 평가하는 선행연구들은 가막만, 광양만, 진해만, 섬진강 하구, 영산강 하구 등에서 진행된 바 있다(Kwon et al., 2002; Lee, 2006; Baek et al., 2011; Hyun et al., 2011; Yoon, 2012; Bae et al., 2014). 하지만 본 연구지역인 태안해안과 천수만에서는 이와 같은 연구가 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 1) 수질측정망의 장기자료를 이용하여 화학양론적 접근을 통한 잠재적인 제한영양염을 확인하였으며 2) 현장수를 이용한 생물검정실험을 진행함으로써 계절에 따른 명확한 제한영양염을 규명하고자 하였다.

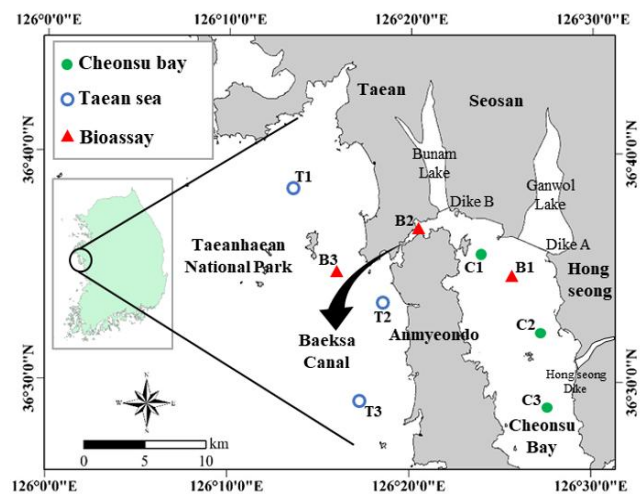


Fig. 1. Map showing the sampling location of nutrient determination and algal bioassay experiment.

2. 재료 및 방법

연구해역의 제한영양염 평가를 위해 장기자료 분석과 현장조사를 병행하였다. 우선 해당 해역의 장기적인 영양염 변동 및 잠재적 제한영양염을 확인하기 위하여 국가해양환경정보통합시스템(<https://www.meis.go.kr>)에서 제공되는 수질 측정망(C1~C3, T1~T3)의 장기자료(2004~2016년; 2, 5, 8, 11월)를 이용하였고, 잠재적 제한영양염 평가는 화학양론을 기반으로 하는 영양염 비를 이용하였다(Redfield, 1958; Redfield et al., 1963; Dortch and Whitledge, 1992; Justić et al., 1995). 생물검정실험은 담수 영향권인 천수만(B1), 천수만과 태안해역의 해수가 혼합되는 백사수도(B2), 해수 영향권인 태안해역(B3)으로 대표성을 띄는 3개의 정점을 선정하여 2016년 3월, 5월, 7월, 10월에 실험을 진행하였고, 아울러 채집 당시 현장수의 영양염 또한 병행 분석하였다(Fig. 1).

생물검정실험에 사용된 현장수는 70 µm 메쉬(mesh)를 이용하여 동물플랑크톤을 제거하였고, 1L 배양병에 대조군(control)과 영양염을 첨가한 실험군(NO₃⁻, NH₄⁺, PO₄³⁻, DSi, All)으로 구분하여 중복(duplication)실험을 실시하였다(Fig. 2). 영양염은 NO₃⁻ 실험군(KNO₃), NH₄⁺ 실험군((NH₄)₂SO₄), PO₄³⁻ 실험군(KH₂PO₄), DSi 실험군(Na₂SiO₃·9H₂O) 형태로 첨가하였고, 배양병 내 최종농도(final concentration)는 NO₃⁻ 35.0 µM, NH₄⁺ 25.9 µM, PO₄³⁻ 30.1 µM, DSi 205.4 µM로 2013~2015년 동안 조사해역의 최고농도(in-house data)의 3배가 되도록 하여 식물플랑크톤이 영양염을 충분히 이용할 수 있도록 설정하였다(Yoon, 2012). 실험은 실내에서 배양기(LCC-500MP, LebTech®)를 이용하였으며(65 µmol photons m⁻² s⁻¹, 12hr dark/light), 수온은 당시의 현장 수온을 기준으로 3월 5°C, 5월 15°C, 7월 25°C, 10월 20°C로 설정하였다(Fig. 2).

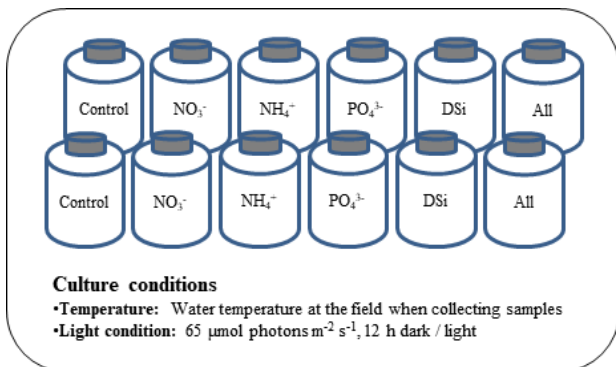


Fig. 2. The experiment design of algal bioassay.

3월 실험은 2일 간격, 5월, 7월, 10월은 1일 간격으로 엽록소 *a*의 농도를 측정함으로써 영양염에 대한 식물플랑크톤 반응을 확인하였다. 엽록소 *a*는 시료가 여과된 유리섬유여

과지(GF/F, Ø 25 mm, pore size 0.7 µm, Whatman®)를 90% 아세톤 용매에 용출시킨 후 형광광도계(10-AU fluorometer, Turner Designs®)를 이용하여 측정하였으며, 영양염분석은 Parsons et al.(1984)에 준하여 자동분석기(QuAatro, SEAL Analytical®)를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 천수만과 태안해역의 영양염 분포 특성

2004~2016년 동안 천수만의 용존무기질소(DIN) 농도는 0.04~26.85 µM(평균 5.59), 용존무기인(DIP)은 0.003~1.84 µM(평균 0.43), 용존무기규소(DSi)는 0.06~37.85 µM(평균 9.91)의 농도범위를 나타냈고, 태안해역은 DIN 0.16~27.14 µM(평균 6.48), DIP 0.001~1.31 µM(평균 0.42), DSi 0.02~24.29 µM(평균 8.99)로 DIN은 태안해역이, DSi는 천수만이 높았으며, DIP는 두 해역이 유사한 농도를 나타내었다(Fig. 3). Dortch and Whitledge(1992)와 Justić et al.(1995)에 따르면, 화학양론적 제한(stoichiometric limitation) 평가에 앞서 현장의 DIN, DIP, DSi 농도가 각각 1.0, 0.1, 2.0 µM 이하일 경우 절대농도에 의해 제한을 받는다고 보고하였다. 천수만과 태안해역의 장기 영양염 자료를 확인한 결과, 선행연구에서 제시된 기준보다 낮은 농도를 나타낸 시기도 있었으나 극히 일부였고, 대부분 선행연구의 기준보다 상회한 수준으로 절대농도에 의한 제한은 미비했을 것으로 판단된다. 수질측정망의 장기자료(2004~2016)를 이용하여 두 해역의 계절별 영양염 농도를 확인한 결과, 천수만의 경우 모든 영양염이 동계와 춘계에 낮고, 하계와 추계에 높음으로서 일반적인 하구의 특성을 보였으나, 태안해역은 천수만과 상이하게 동계에 가장 높고 춘계에 급격히 감소한 후 하계 또는 추계에 증가하는 경향을 보였다(Fig. 4). 일반적으로 하구를 포함한 폐쇄성 해역(bay)에서는 담수의 유입이(Yin et al., 2000; Fujiki et al., 2004; Madhu et al., 2007; Harrison et al., 2008; Jeong et al., 2011; Sin et al., 2013; Yoon et al., 2013), 개방성 해역에서는 조석 또는 해류의 흐름이(Brooks and Townsend, 1989; Wei et al., 2016) 영양염의 분포를 결정함에 있어 주요 원인으로 작용한다. 따라서 천수만과 태안해역은 서로 인접한 해역이지만 각기 다른 지형적 조건에 의해 계절에 따라 상이한 영양염 분포를 보인 것으로 판단되며, 특히 태안해역은 연안을 따라 동계에 남하하고, 하계에 북상하는 서한연안류(West Korea coastal current)에 의해 영향을 받았을 것으로 추측되나 이와 같은 가설을 검증하기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다. 이와 같은 두 해역의 공간적 또는 계절적 영양염 분포 특성은 각 해역의 제한영양염 결과에도 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다.

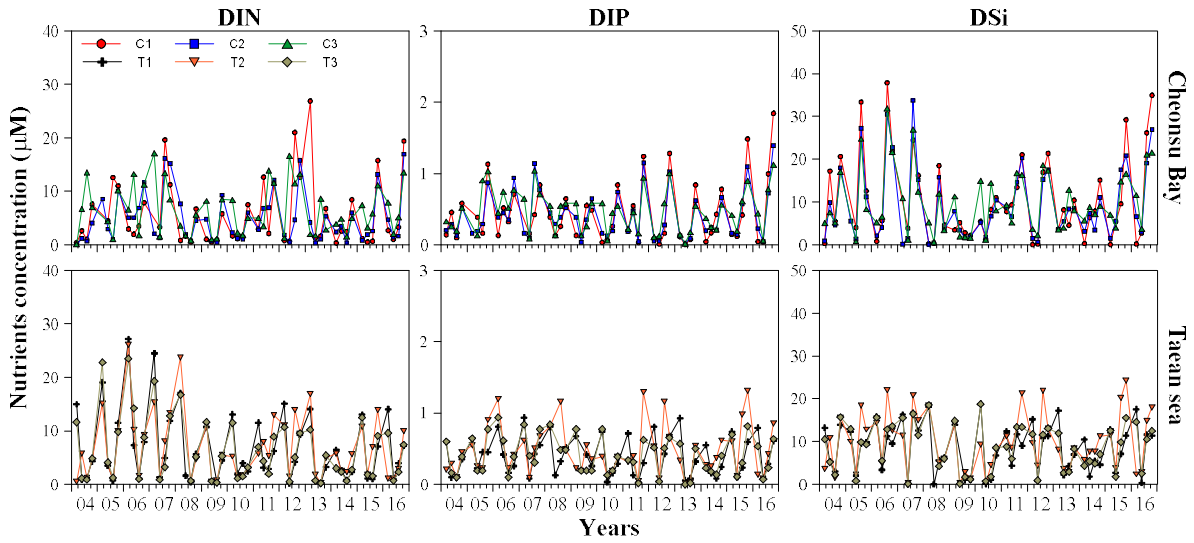


Fig. 3. Long-term variation of nutrients (DIN, DIP and DSi) in Cheonsu Bay and Taean sea during 2004-2016.

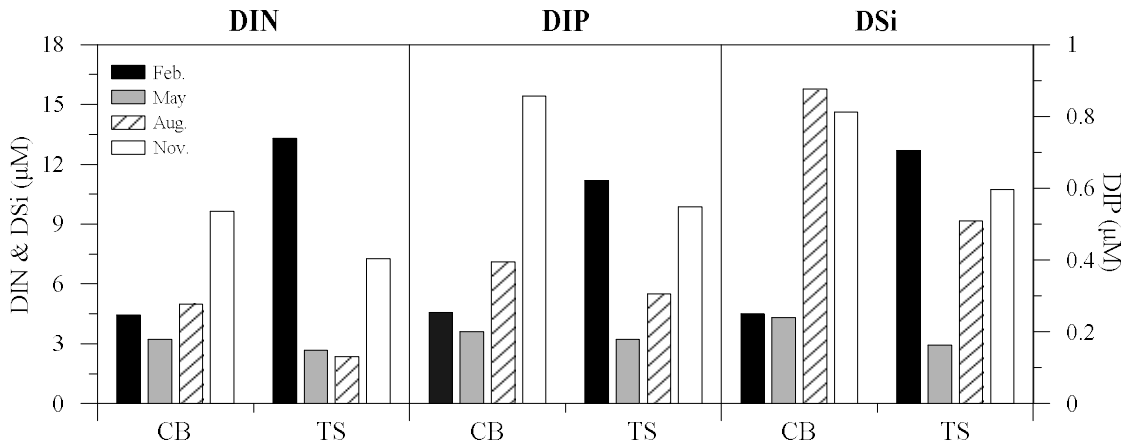


Fig. 4. Comparison of nutrients average concentrations to confirm seasonal changes in Cheonsu Bay(CB) and Taean sea (TS) using data from 2004-2016.

3.2 화학양론적 접근과 생물검정실험을 통한 제한영양염 평가

제한영양염을 판단하는 가장 간단하고 보편적인 방법으로는 영양염의 농도비를 이용하는 것이다. Redfield(1958)와 Redfield et al.(1963)은 식물플랑크톤 세포 내 원자비(106C:16N:1P)를 근거로 수계 내 존재하는 N과 P의 농도비가 16 이하면 N 제한, 이상이면 P 제한이라 보고하였고, Dortch and Whitlege(1992)와 Justić et al.(1995)은 DSi를 포함하여 $DIN/DIP < 10$, $DSi/DIN > 1$ 이면 N 제한, $DSi/DIP > 22$, $DIN/DIP > 22$ 이면 P 제한 그리고 $DIN/DIP < 10$, $DSi/DIN > 1$ 경우에는 Si가 제한인자로 작용한다고 보고하였다. 우선 전자의 기준을 적용하여 DIN/DIP를 분석한 결과에서는 두 해역 모

두 대부분 16 이하의 비를 보임으로서 해수는 N 제한이 우세하다는 이론과 일치하였다(Fig. 5). 세부적인 결과를 살펴보면, 153개 자료 중 천수만에서 N 제한이 나타난 횟수는 110회였고, P 제한은 43회로 약 2.5배 수준으로 N 제한이 우세한 결과를 보였다. 시기별 제한 빈도를 살펴보면, N 제한은 11월(38회), P 제한은 5월(18회)에 상대적으로 높은 빈도를 보였다. 태안해역에서 N 제한의 횟수는 98회, P 제한은 55회로 약 1.7배 정도로 N 제한의 빈도가 높은 것으로 나타났으나 천수만에 비해 다소 낮았다. 태안해역의 경우 N 제한은 8월(35회), P 제한은 2월(30회)에 높은 빈도를 보임으로서 천수만과 다른 양상을 나타냈다(Table 1, Fig. 5).

장기자료 분석과 생물검정실험을 이용한 천수만과 태안해역의 제한영양염 평가

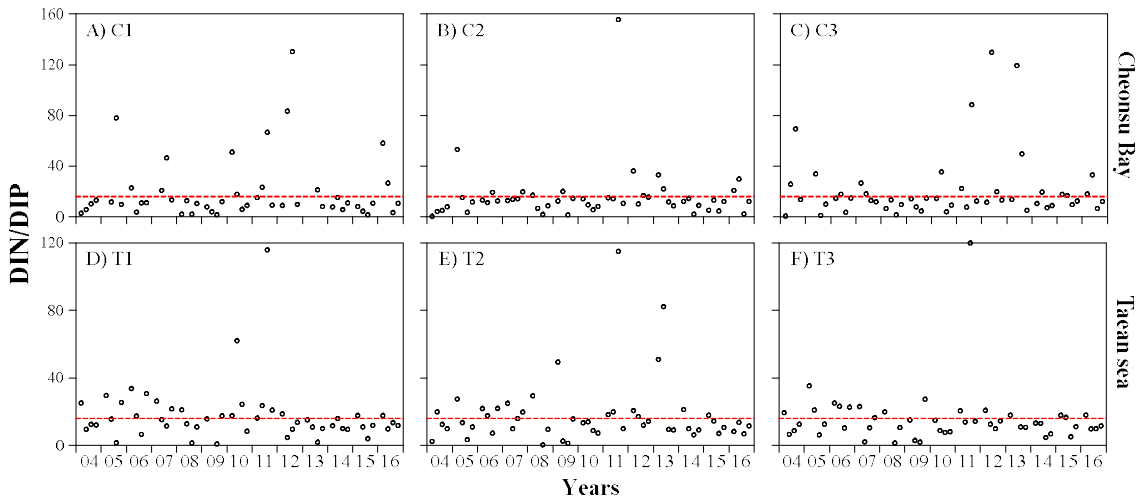


Fig. 5. Temporal distributions of DIN/DIP in Cheonsu Bay and Taean sea during 2004~2016.

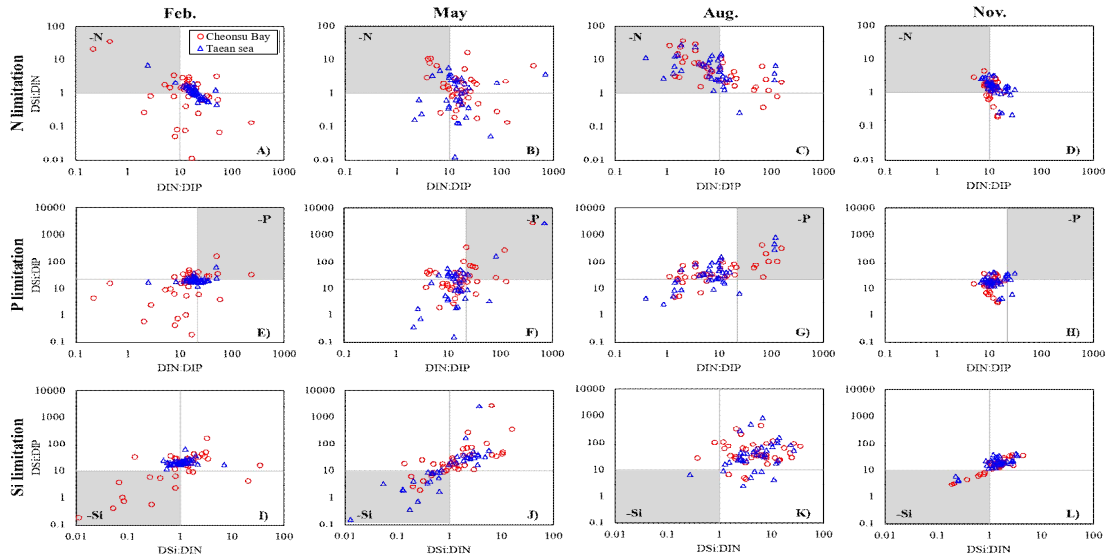


Fig. 6. Seasonal scatter diagrams of nutrient ratio in Cheonsu Bay and Taean sea, stoichiometric limitations are indicated by -N, -P, and -Si (seasonally, each sea area n=39. However, CB(Feb.) and TS(May) n=36).

화학양론에 근거하여 제한영양염을 평가하는 경우 해당 수계에 존재하는 영양염의 농도에 의해 큰 영향을 받게 된다. Lee et al.(2019)와 Yoon(2012)의 연구에 따르면 하구와 같이 방류가 존재하는 수계에서는 유입되는 영양염의 종류와 양에 따라 N/P 비가 변하며 이는 제한영양염의 변화로 이어진다고 보고하였다. 결국 각 해역의 환경 조건에 따라 시기적으로 변화하는 영양염의 농도는 제한영양염을 결정짓는 주요 요소로 작용하게 된다. 실로 두 해역은 DIN/DIP 평가에서 전반적으로 N 제한이 우세하였지만, 천수만의 11월은 다른 시기와 비교하여 DIP 대비 DIN이 현저히 낮은

농도를 나타냈고, 태안해역의 2월은 DIN 대비 DIP가 낮은 농도를 보임으로서 두 영양염간의 농도차이가 제한영양염을 결정하는 요인으로 작용하였다고 볼 수 있다(Fig. 4). 동일 자료에 DSi를 포함하여 후자의 조건에 따라 잠재적 제한영양염을 평가한 결과, 천수만의 경우 2월에는 N 제한 5회, P 제한 5회, Si 제한 10회로 Si 제한이 우세하였고, 5월에는 N 제한 10회, P 제한 6회, Si 제한 7회로 다소 N 제한 빈도가 높았으며, 8월과 11월은 각각 22회, 12회로 다른 영양염에 비해 N 제한이 우세한 결과를 보였다. 태안해역의 경우 2월에는 N 제한이 2회, P 제한이 4회였고 Si 제한은

나타나지 않음으로서 우세한 제한영양염이 확인되지 않았으며, 5월에는 Si가 16회로 다른 영양염에 비해 높은 빈도를 나타냈다. 8월과 11월은 천수만과 마찬가지로 각각 25회, 10회로 N 제한이 우세하였다(Table 1, Fig. 6).

Table 1. Frequency of seasonal occurrence of potential nutrient limitation (N, P and Si) according to the stoichiometric analysis of long-term data (2004-2016)

Area	Month	N/P Lim		N/P/Si Lim		
		N	P	N	P	Si
CB	2	24	12	5	5	10
	5	21	18	10	6	7
	8	27	12	22	8	0
	11	38	1	12	0	7
	Sum	110	43	49	19	24
TS	2	9	30	2	4	0
	5	25	11	6	2	16
	8	35	4	25	3	1
	11	29	10	10	2	3
	Sum	98	55	43	11	20

앞서 언급한 바와 같이 제한영양염은 현장의 영양염 농도에 의해 영향을 받기도 하지만 해당 해역의 식물플랑크톤 군집과도 밀접한 관계를 나타낸다. 특히 식물플랑크톤 군집 중 규조류는 성장과정에서 세포벽 형성을 위해 다량의 규산염을 사용하기 때문에 규조류가 우점인 시기에는 규산염이 제한인자로 작용할 수도 있다(Azam et al., 1974; Baek et al., 2011; Conway et al., 1976; Hyun et al., 2011; Jang et al., 2005). 두 해역의 계절별 식물플랑크톤 군집을 살펴보면 천수만은 동계, 태안해역은 춘계에 규조류가 우점하는 결과가 보고되었고(KNPS, 2018; Lee et al., 2012), 규조류의 번성과 함께 다량의 규산염이 소모됨으로서 천수만(2월)과 태안해역(5월)에서는 해당 시기에 Si 제한이 발생한 것으로 판단된다(Table 1, Fig. 4). 추가적으로 생물검정실험을 위해 채집된 현장수의 영양염 농도를 측정하여 잠재적인 제한영양염을 확인한 결과, N/P 평가에서는 3월과 5월에 P 제한, 7월과 10월은 N 제한(7월 B3정점 제외)을 보였으며, N/P/Si 평가에서는 3월과 5월에 P와 Si 제한 또는 제한영양염이 나타나지 않는 경우가 존재하였고, 7월과 10월에는 대부분 N 제한이었다(Table 2).

이와 같이 영양염 농도비를 이용한 제한영양염 평가에서는 평가방법에 따라 다소 상이한 결과를 보였다. 영양염 농도만을 이용한 평가는 서론에서 언급한 바와 같이 영양

염 농도가 매우 높거나 낮은 경우 명확한 제한영양염을 파악하는 것이 어렵고, 현장의 다양한 환경조건과 식물플랑크톤 군집을 반영하는데 한계가 있기 때문에 현장수를 이용한 생물검정실험을 함께 진행할 필요가 있다. 예로 영산강 하구 해수역을 대상으로 한 제한영양염 평가에서도 N/P ratio 평가는 P 제한을 나타냈으나 생물검정실험에서는 N 제한을 보였다. 또한 담수방류와 같은 환경조건이 변함에 따라 제한영양염 역시 변화하지만 농도비를 이용한 평가에서는 이와 같은 변화를 반영하지 못하는 한계를 보였다(Yoon, 2012). 본 연구에서 진행된 생물검정실험 결과를 보면, 3월 B1과 B2정점에서는 All 실험군만 증가를 나타냈고, B3정점은 대조군과 실험군간의 차이를 보이지 않음으로서 제한영양염이 확인되지 않았다. 하지만 5월, 7월 그리고 11월 실험에서는 배양 후 1~4일째 All, NO₃⁻ 그리고 NH₄⁺ 실험군에서 엽록소 *a*가 반응을 보임으로써 N이 실질적인 제한영양염으로 작용하고 있음을 확인하였다(Fig. 7).

또한, 실험군 중 NH₄⁺ 실험군이 NO₃⁻보다 상대적으로 높은 반응을 보임으로서 식물플랑크톤이 성장할 때 암모늄을 선호한다는 결과와도 어느 정도 일치하였다(Wheeler and Kokkinakis, 1990; Harrison et al., 1996; Park et al., 2002).

4. 결 론

천수만과 태안해역의 제한영양염을 규명하기 위해 장기 자료 분석과 생물검정실험을 병행하였다. 우선 잠재적인 제한영양염 평가를 위해 국가수질측정망에서 제공되는 2004년~2016년의 영양염 자료를 이용하였다. 장기자료 분석은 화학양론에 근거한 DIN/DIP 분석과 N, P, Si의 농도비를 이용한 두 가지 방법을 사용하였다. 천수만과 태안해역의 DIN/DIP 분석에서는 전반적으로 16이하의 수치를 보임으로서 N 제한이 우세하였다. 하지만 N 제한이 우세한 가운데 두 해역간의 다소 상이한 영양염의 계절 구배는 제한영양염 결정에 어느 정도 관여하는 것으로 파악되었다. N, P, Si의 농도비를 이용하여 분석한 결과에서는 8월(하계)과 11월(추계)에는 N 제한이 우세하였으나, 천수만의 2월(동계)과 태안해역의 5월(춘계)에는 Si 제한을 나타냈다. 이는 식물플랑크톤의 군집과도 연관이 있는데, 천수만의 경우 동계, 태안해역의 경우 춘계에 규조류가 우점하는 형태를 나타내고 있으며, 성장과정에서 다량의 규산염을 이용함으로써 규산염 고갈과 함께 일시적으로 Si 제한이 나타난 것으로 사료된다. 이와 같이 영양염의 구성비를 이용한 제한영양염 평가는 잠재적인 제한영양염을 파악하는데 쉽고 용이하지만 평가 방법에 따라 서로 상이한 제한영양염을 나타낼 경우 명확한 제한영양염을 결정하는데 어려움이 존재한다. 따라

장기자료 분석과 생물검정실험을 이용한 천수만과 태안해역의 제한영양염 평가

서 실질적인 제한영양염을 평가하기 위해서는 현장수를 이용한 제한영양염 평가가 병행되어야 한다. 본 연구에서 수행된 생물검정실험에서는 3월의 경우 뚜렷한 제한영양염이 확인되지 않았으나 5월, 7월 그리고 10월 실험에서는 NH_4^+ 와 NO_3^- 실험군에서 뚜렷한 반응을 보임으로서 N이 실질적인 제한영양염임을 확인하였다. 하구를 대상으로 생물검정 실험을 통해 제한영양염을 평가한 선행연구에서는 방류가

발생할 시 일시적으로 P 제한을 보이는 경우도 존재하였으나 본 연구기간 중에는 방류가 존재하지 않아 해수역에서 질소가 제한영양염으로 작용한다는 일반적인 이론과 부합한 결과를 도출하였고, 또한 반응을 보인 질소계 실험군에서 NH_4^+ 가 상대적으로 높은 반응을 보임으로서 식물플랑크톤이 선택적으로 암모늄을 선호한다는 결과와도 일치하였다.

Table 2. Nutrients concentration of field samples for bioassay experiment and evaluated stoichiometric nutrients limitation

Month	St.	DIN (μM)	DIP (μM)	DSi (μM)	(a) DIN/DIP	(b) DSi/DIN	(C) DSi/DIP	N (a)<10, (b)>1	P (C)>22, (a)>22	Si (C)<10, (b)<1	N/P Lim	N/P/Si Lim
3	B1	2.42	0.14	2.08	17.1	0.9	14.7				P	
	B2	2.46	0.09*	0.65*	28.3	0.3	7.4			○	P	P, Si
	B3	15.06	0.51	34.85	29.4	2.3	67.9		○		P	P
5	B1	8.21	0.42	19.21	19.7	2.3	46.2				P	
	B2	14.69	0.86	22.53	17.1	1.5	26.3				P	
	B3	3.56	0.07*	7.60	50.2	2.1	107.1		○		P	P
7	B1	1.35	0.50	9.01	2.7	6.7	18.1	○			N	N
	B2	2.94	0.67	14.06	4.4	4.8	20.9	○			N	N
	B3	6.25	0.38	10.65	16.3	1.7	27.7				P	
10	B1	2.95	0.47	22.57	6.2	7.7	47.6	○			N	N
	B2	7.27	0.93	37.74	7.8	5.2	40.6	○			N	N
	B3	2.69	0.28	8.02	9.6	3.0	28.6	○			N	N

*: Concentration below threshold values (DIN<1, DIP<0.1 and DSi<2 μM)

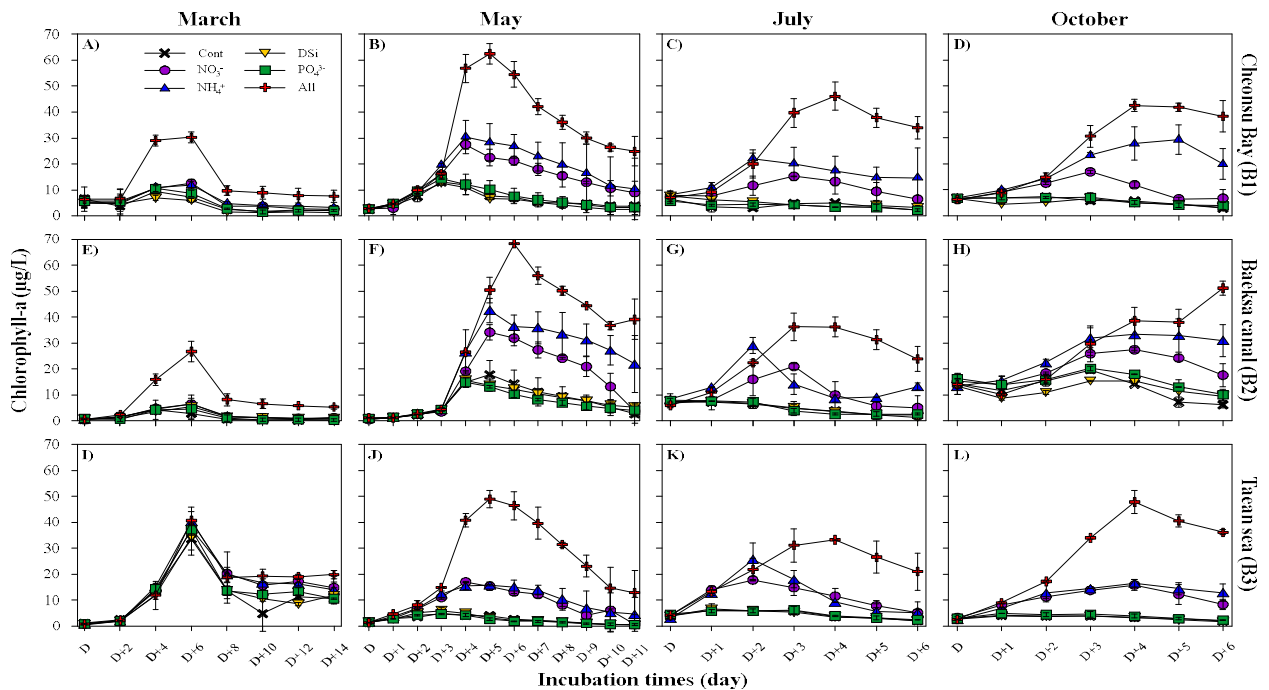


Fig. 7. Growth response of phytoplankton assemblages by algal bioassay experiment.

사 사

본 연구는 국립공원공단 국립공원연구원의 「태안해안 국립공원 해양환경변화 측정망」사업의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Azam, F., B. B. Hemmingsen, and B. E. Volcani(1974), Role of silicon in diatom metabolism, *Archives of Microbiology*, Vol. 97, pp. 103-114.
- [2] Bae, S. W., D. Kim, Y. O. Kim, C. H. Moon, and S. H. Baek(2014), The influences of additional nutrients on phytoplankton growth and horizontal Phytoplankton community distribution during the autumn season in Gwangyang Bay, Korea., *Korean Journal of Environmental Biology*, Vol. 32, pp. 35-48.
- [3] Baek, S. H., D. S. Kim, B. G. Hyun, H. W. Choi, and Y. O. Kim(2011), Characteristics of Horizontal Community Distribution and Nutrient Limitation on Growth Rate of Phytoplankton during a Winter in Gwangyang Bay, Korea., *Ocean and Polar Research*, Vol. 33, pp. 99-111.
- [4] Brooks, D. A. and D. W. Townsend(1989), Variability of the coastal current and nutrient pathways in the eastern Gulf of Maine, *Journal of Marine Research*, Vol. 47, pp. 303-321.
- [5] Caron, D. A.(1991), *Evolving role of protozoa in aquatic nutrient cycles*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 387-415.
- [6] Conway, H. L., P. J. Harrison, and C. O. Davis(1976), Marine diatoms grown in chemostats under silicate or ammonium limitation. II. Transient response of *Skeletonema costatum* to a single addition of the limiting nutrient, *Marine Biology*, Vol. 35, pp. 187-199.
- [7] Courrat, A., J. Lobry, D. Nicolas, P. Laffargue, R. Amara, M. Lepage, M. Girardin, and O. Le Pape(2009), Anthropogenic disturbance on nursery function of estuarine areas for marine species, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 81, pp. 179-190.
- [8] Dortch, Q. and T. E. Whitledge(1992), Does nitrogen or silicon limit phytoplankton production in the Mississippi River plume and nearby regions?, *Continental Shelf Research*, Vol. 12, pp. 1293-1309.
- [9] Fisher, T. R., E. R. Peele, J. W. Ammerman, and L. W. Harding(1992), Nutrient limitation of phytoplankton in Chesapeake Bay, *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 82, pp. 51-63.
- [10] Fujiki, T., T. Toda, T. Kikuchi, H. Aono, and S. Taguchi (2004), Phosphorus limitation of primary productivity during the spring-summer blooms in Sagami Bay, Japan., *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 283, pp. 29-38.
- [11] Hansson, L. A.(1992), The role of food chain composition and nutrient availability in shaping algal biomass development, *Ecology*, Vol. 73, pp. 241-247.
- [12] Harrison, P. J., M. H. Hu, Y. P. Yang, and X. Lu(1990), Phosphate limitation in estuarine and coastal waters of China, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, Vol. 140, pp. 79-87.
- [13] Harrison, P. J., K. Yin, J. H. W. Lee, J. Gan, and H. Liu(2008), Physical-biological coupling in the Pearl River Estuary, *Continental Shelf Research*, Vol. 28, pp. 1405-1415.
- [14] Harrison, W. G., L. R. Harris, and B. D. Irwin(1996), The kinetics of nitrogen utilization in the oceanic mixed layer: Nitrate and ammonium interactions at nanomolar concentrations, *Limnology and Oceanography*, Vol. 41, pp. 16-32.
- [15] Hecky, R. E. and P. Kilham(1988), Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent evidence on the effects of enrichment, *Limnology and Oceanography*, Vol. 33, pp. 796-822.
- [16] Hummel, H., A. W. Fortuin, R. H. Bogaards, A. Meijboom, and L. de Wolf(1994), The effects of prolonged emersion and submersion by tidal manipulation on marine macrobenthos, *Hydrobiologia*, Vol. 282, pp. 219-234.
- [17] Hyun, B. G., K. Shin, D. S. Kim, Y. O. Kim, H. M. Joo, and S. H. Baek(2011), Understanding of phytoplankton community dynamics through algae bioassay experiment during winter season of Jinhae bay, Korea, *The Sea*, Vol. 16, pp. 27-38.
- [18] Jang, P. G., W. J. Lee, M. C. Jang, J. D. Lee, W. J. Lee, M. Chang, K. C. Hwang, and K. Shin(2005), Spatial and temporal distribution of inorganic nutrients and factors controlling their distributions in Gwangyang Bay, *Ocean and polar research*, Vol. 27, pp. 359-379.
- [19] Jeong, B.(2014), A study on ecological properties and mechanism of growth inhibition of dinoflagellate in the Yeongsan River estuary, Doctorate thesis, Mokpo National

- Maritime University, Mokpo (In Korean).
- [20] Jeong, B., Y. Shin, N. Jang, and S. Kim(2008), Nutrient limitation of phytoplankton in the Dongbok Lake: Analyses of long-term data and bioassay experiments, *Korean Journal of Limnology*, Vol. 41, pp. 412-421.
- [21] Jeong, B., Y. Sin, S. Yang, and C. Park(2011), Monthly variation of phytoplankton community in Asan Bay, Korea, *The Sea*, Vol. 16, pp. 238-245.
- [22] Jeong, J. Y.(2015), A study of physicochemical characteristics of marine environment of Taeanhaean National Park and Cheonsu Bay, Korea, Doctorate thesis, Kunsan National University.
- [23] Jeong, Y. H. and J. S. Yang(2015), The long-term variations of water qualities in the Saemangeum salt-water lake after the sea-dike construction, *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, Vol. 18, pp. 51-63.
- [24] Justić, D., N. N. Rabalais, R. E. Turner, and Q. Dortch (1995), Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 40, pp. 339-356.
- [25] Kang, S. H., J. S. Kang, S. H. Lee, D. Kim, and D. Y. Kim(2000), Importance of polar phytoplankton for the global environmental change, *Korean Journal of Environmental Biology*, Vol. 18, pp. 1-20.
- [26] Korea National Park Service(KNPS)(2018), A Comprehensive analysis of long-term monitoring of ecosystem impact of Hebei Sprite oil spill, Korea National Park Research Institute, Wonju in Korea, p. 249.
- [27] Kwon, H. K., H. S. Yang, Y. H. Yoon, O. I. Choi, I. H. Choi, and S. J. Oh(2015), Characteristics of marine environment and primary productivity of phytoplankton in the seaweed bed of northwestern coast of Jeju Island during autumn 2014, *The Sea*, Vol. 20, pp. 180-191.
- [28] Kwon, K. Y., C. H. Kim, C. K. Kang, C. H. Moon, M. O. Park, and S. R. Yang(2002), Limiting nutrients for phytoplankton growth in the Seomjin River Estuary as determined by algal bioassay experiment, *Journal of the Korean Fisheries Society*, Vol. 35, pp. 455-461.
- [29] Lee, J., C. Park, D. Lee, and S. Lee(2012), Variations in plankton assemblage in a semi-closed Chunsu Bay, Korea, *The sea*, Vol. 17, pp. 95-111.
- [30] Lee, J. H. and E. H. Lee(1999), Water quality and phytoplankton red tide in Deukryang Bay of Korea, *Korean Journal of Environmental Biology*, Vol. 1, pp. 271-278.
- [31] Lee, S. M., S. J. Chang, and S. Heo(2019), Changes in phytoplankton community structure by freshwater input in the Cheonsu Bay, Korea, *Journal of environmental science international*, Vol. 28, pp. 1005-1017.
- [32] Lee, Y. S.(2006), Growth of the indigenous red-tide phytoplankton assemblage with the addition of limiting nutrients, *Journal of the environmental sciences*, Vol. 15, pp. 961-966.
- [33] Lee, Y. S., J. S. Lee, R. H. Jung, S. S. Kim, W. J. Go, K. Y. Kim, and J. Park(2001), Limiting nutrient on phytoplankton growth in Gwangyang Bay, *The Sea*, Vol. 6, pp. 201-210.
- [34] Madhu, N. V., R. Jyothibabu, K. K. Balachandran, U. K. Honey, G. D. Martin, J. G. Vijay, C. A. Shiyas, G. V. M. Gupta, and C. T. Achuthankutty(2007), Monsoonal impact on planktonic standing stock and abundance in a tropical estuary (Cochin backwaters - India), *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 73, pp. 54-64.
- [35] Mahoney, J. B.(1989), Algal assay of relative abundance of phytoplankton nutrients in northeast United States coastal and shelf waters, *Water Research*, Vol. 23, pp. 603-615.
- [36] Park, M. G., S. R. Yang, J. H. Shim, C. S. Chung, G. H. Hong, S. J. Pae, and D. B. Yang(2002), Is Nitrogen Uptake Rate by Phytoplankton below the Euphotic Zone in the Yellow Sea Considerable?, *The Sea*, Vol. 7, pp. 60-67.
- [37] Parsons, T. R., Y. Maita, and C. M. Lalli(1984), A manual of chemical & biological methods for seawater analysis, Pergamon, Amsterdam.
- [38] Redfield, A. C.(1958), The biological control of chemical factors in the environment, *American Scientist*, Vol. 46, pp. 205-221.
- [39] Redfield, A. C., B. H. Ketchum, and F. A. Richards(1963), The influence of organisms on the composition of sea-water, *The Sea*, John Wiley & Sons, New York, pp. 26-77
- [40] Schindler, D. W.(1977), Evolution of phosphorus limitation in lakes, *Science*, Vol. 195, pp. 260-262.
- [41] Shin, J. K., D. S. Kim, and K. J. Cho(2000), Dynamics of inorganic nutrients and phytoplankton in Shihwa Reservoir, *Korean Journal of Limnology* Vol. 33, pp. 109-118.
- [42] Sin, Y., B. Hyun, B. Jeong and H. Y. Soh(2013), Impacts of eutrophic freshwater inputs on water quality and phytoplankton size structure in a temperate estuary altered

- by a sea dike, *Marine Environmental Research*, Vol. 85, pp. 54-63.
- [43] Sin, Y. and B. Jeong(2015), Short-term variations of phytoplankton communities in response to anthropogenic stressors in a highly altered temperate estuary, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 156, pp. 83-91.
- [44] Sin, Y. and J. Kim(2003), Relative importance of bottom-up vs. top-down controls on size-structured phytoplankton dynamics in a freshwater ecosystem: I. Temporal and spatial variations of size structure, *Korean Journal of Limnology*, Vol. 36, pp. 403-412.
- [45] Song, Y. S., H. S. Choi, S. C. Yoo, H. P. Hong, J. H. Seo, H. J. Lee, T. I. Kim, S. B. Woo, and J. K. Choi(2011), Modeling the effect of nutrient enrichment on the plankton population: Validation using mesocosm experiment data, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 23, pp. 358-368.
- [46] Sterner, R. W. and J. P. Grover(1998), Algal growth in warm temperate reservoirs: kinetic examination of nitrogen, temperature, light, and other nutrients, *Water Research*, Vol. 32, pp. 3539-3548.
- [47] Sundbäck, K., B. Jönsson, P. Nilsson, and I. Lindström (1990), Impact of accumulating drifting macroalgae on a shallow-water sediment system: an experimental study, *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 58, pp. 261-274.
- [48] Taylor, D., S. Nixon, S. Granger, and B. Buckley(1995), Nutrient limitation and the eutrophication of coastal lagoons, *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 127, pp. 235-244.
- [49] Tilman, D.(1982), Resource competition and community structure, *Monographs in Population Biology*, Princeton university press.
- [50] Wei, Q. S., Z. G. Yu, B. D. Wang, M. Z. Fu, C. S. Xia, L. Liu, R. F. Ge, H. W. Wang, and R. Zhan(2016), Coupling of the spatial - temporal distributions of nutrients and physical conditions in the southern Yellow Sea, *Journal of Marine Systems*, Vol. 156, pp. 30-45.
- [51] Wetzel, R. G.(2001), *Limnology: Lake and River Ecosystems* 3rd Edition, Academic Press, San Diego.
- [52] Wheeler, P. A. and S. A. Kokkinakis(1990), Ammonium recycling limits nitrate use in the oceanic subarctic Pacific, *Limnology and Oceanography*, Vol. 35, pp. 1267-1278.
- [53] Yin, K., P. Y. Qian, J. C. Chen, D. P. H. Hsieh, and P. J. Harrison(2000), Dynamics of nutrients and phytoplankton biomass in the Pearl River estuary and adjacent waters of Hong Kong during summer: preliminary evidence for phosphorus and silicon limitation, *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 194, pp. 295-305.
- [54] Yoon, B.(2012), A Study of nutrient limitation in estuary using bioassay experiment, Master's thesis, Mokpo National Maritime University.
- [55] Yoon, B., E. Lee, T. Kang, and Y. Shin(2013), Long-term change of phytoplankton biomass (chlorophyll-a), environmental factors and freshwater discharge in Youngsan Estuary, *Korean Journal of Ecology and Environment*, Vol. 46, pp. 205-214.

Received : 2022. 03. 30.

Revised : 2022. 05. 25.

Accepted : 2022. 06. 27.