



Original Article

금강하구역의 담수 식물플랑크톤 출현 현황 및 염분구배에 따른 우점종 성장 특성

김재성^{1,†} · 최충현² · 김병석² · 김소연² · 장건강² · 박종규³

¹(주)워터엔에코바이오 대표

²군산대학교 해양생물공학과 대학원생

³군산대학교 해양생물공학과 교수

Appearance State of Freshwater Phytoplankton in the Geumgang Estuary and Growth Characteristics of Dominant Species with Salinity Gradient

Jaeseong Kim^{1,†}, Chunghyun Choi², Byoung Seok Kim², So Yeon Kim²,
Keungang Jang², and Jong-Gyu Park³

¹CEO, Water&Eco-Bio Co., Ltd., 501 Jungboo Building, Miryong-dong, Kunsan 54156, Korea

²Graduate student, Department of Marine Biotechnology, Kunsan National University, Kunsan 54150, Korea

³Professor, Department of Marine Biotechnology, Kunsan National University, Kunsan 54150, Korea

요 약

하구역에 유입되는 담수성 식물플랑크톤의 양적, 질적 변화를 모니터링하고, 이들의 유입에 따른 하구 생태계 영향을 확인하기 위하여 금강하구역에 위치한 조사 정점에서 2014년 12월부터 2015년 10월까지 다빈도 장기조사(주 1회, 11개월)를 통해 식물플랑크톤 군집구조 단주기 변동 현황을 파악하였다. 또한, 담수플랑크톤이 다량 출현한 시기에 분리한 2종의 담수성 종주의 염분구배에 따른 성장특성 실험을 실시하였다. 2015년 6월부터 10월까지 담수 기원의 남조류 및 녹조류가 전체 식물플랑크톤 군집의 50% 이상을 차지하는 경우가 빈번하였고, 최대 200,000 cells ml⁻¹의 농도로 출현하기도 하였다. 염분 구배에 따른 성장률 실험 결과, 남조류인 *Phormidium lucidum*은 원양 환경인 35 psu에서도 성장하였으며, 녹조류인 *Mychonastes cf. homosphaera*는 기수역 환경인 15 psu 염분에서 개체군이 유지되거나 성장할 수 있음을 확인하였다. 조사와 실험 결과를 종합해보면, 하구둑의 담수방류로 유입되는 금강하구의 담수성 식물플랑크톤은 방류 이전의 플랑크톤 생태계를 교란하게 되고, 결국에는 먹이망을 통해 전체 연안생태계 구조 및 기능에 복잡한 영향을 줄 것으로 판단된다.

Abstract – To monitor the quantitative and qualitative changes of the freshwater phytoplankton species recruited into the estuary and to explore their ecosystem impact, we carried out weekly water samplings at a fixed station in the Geumgang Estuary from December 2014 to October 2015. In addition, we established unialgal cultures of the two dominant freshwater plankton species and carried out the growth rate measurements under salinity gradients. Freshwater cyanobacteria and chlorophyceae were more than 50% of the total phytoplankton abundance from June to October, 2015, with its maximum concentration over 200,000 cells ml⁻¹. *Phormidium lucidum*, a cyanobacteria, was able to grow at the full salinity of ocean water, 35 psu while *Mychonastes cf. homosphaera*, a chlorophyceae, sustained or grew at the estuarine salinity of 15 psu. The freshwater plankton community introduced into the Geumgang Estuary may have considerable impact to the inherent planktonic ecosystem, which may result in a novel form of the bioturbation on the structure and function of the entire coastal ecosystem through the basic food webs.

Keywords: Geumgang Estuary(금강하구), Freshwater phytoplankton(담수성식물플랑크톤), Cyanobacteria(남조류), Salinity gradient(염분구배), Growth rates(성장률)

[†]Corresponding author: kimjs90@webio90.com

1. 서 론

금강하구와 같이 인공구조물인 ‘둑’으로 해양환경과 담수환경이 경계 지어져 하구 고유의 특징인 ‘하구순환’이 비정상적인 소위 ‘닫힌 하구’는 조석에 의한 지속적인 해수의 유동과 인위적 수문조절에 의한 담수의 불규칙한 유입이 복합적으로 작용하여 수질 환경 및 생태계 군집 구조가 매우 복잡한 특성을 보인다. 하구역은 다양한 생물들의 서식, 산란, 생육처로 높은 생산성을 지닌 중요한 생태계로서, 이용과 보존의 가치 상충으로 관심이 지속되는 환경이다 (McLusky and Elliot[2004]; Lee *et al.*[2018]). 1988년 금강하구둑 완공 이후 1994년부터 시작된 수문작동을 통한 담수의 방류는 하구역에 급격한 퇴적학적, 물리학적, 화학적(수질) 변화를 가져왔다 (Choi *et al.*[1995]; Lee *et al.*[1999]; Yang *et al.*[1999]; Kwon and Lee[1999]). 특히 하계 강우기에 집중된 대량 담수 방류에 따라, 하구둑 건설 이전에 비해 저염분의 분포 범위가 크게 확장되었고(Choi *et al.*[1995]; Lee *et al.*[1995]; Lee *et al.*[1999]; Yih *et al.*[2005]), 이러한 염분 분포의 변화는 연안 생태계의 구조와 기능을 변화시키는 요인으로 작용하였다(Yih *et al.*[2005]). 염분을 포함한 수질 환경의 급격한 변화에 가장 민감하고 빠르게 영향을 받는 생물 군집은 생태계 먹이망의 근간을 이루는 식물플랑크톤이며(Hellawell[1986]; Williams *et al.*[2002]; Suthers and Rissik[2009]), 이러한 식물플랑크톤의 군집 및 생물량 변동은 1차생산력에 직접적인 변화로 증폭되어 전체 생태계 변화의 중요한 요인으로 작용할 수 있다(Shin[2013]). 그럼에도 불구하고, 금강하구둑 수문 가동 이후, 수리학적 변화, 물리적·화학적 변화에 대한 연구에 비해 식물플랑크톤 군집 구조 변화에 담수방류가 미치는 영향은 2005년 금강하구둑 담수 방류에 의한 춘계 식물플랑크톤 군집의 단주기 변동을 연구한 Yih *et al.*[2005]의 연구와 2010년 계절별 1회씩 9개 정점에서 수행된 Shin[2013]의 연구 이외에 최근의 연구는 거의 없다. Yih *et al.*[2005]의 연구에 의하면 4월 중순부터 5월 말까지의 춘계 방류시기에 담수 기원의 남조류 구성비가 매우 높아지고, 남조류를 포함한 담수플랑크톤이 우세한 군집이 약 15일간 지속됨을 확인하였지만, 연구기간이 춘계에 한정적이었다. Shin[2013]의 연구에서는 식물플랑크톤 종조성에 있어 녹조류가 규조류 다음으로 우점하는 분류군이며, 남조류의 출현 비율은 규조류나 녹조류보다 비교적 낮은 것으로 판단하고 있다.

2009년부터 시작된 4대강 사업 이후 대부분의 사업하천에서 남조류 번성에 의한 ‘녹조’현상이 빈번히 발생 중이며, 본 연구지역인 금강의 중, 상류 지역의 녹조 역시 점차 심화되는 것으로 보고되고 있다(MOE[2014]; Chong *et al.*[2015]; Kim *et al.*[2016]). 하구둑 내측에서 번성한 녹조는 방류에 의해 하구역 또는 해역으로 유입됨으로서, 플랑크톤 군집구조의 변동을 야기하고, 상당기간 수괴에 존재하거나 이후 염분 스트레스를 받아 대량 사멸되어 연안 수질 환경에 영향을 줄 수 있다. 또한, 사멸 유기물이 저서 생태계에 유입되면 대형저서동물 군집에도 어떠한 형태로든 영향을 줄 수 있다. 최근 일본에서는 Microcystin을 생성하는 남조류가 담수 환

경에서 대번성한 후, 이사하야만으로 방류되었고, 이들이 가진 독성물질이 만의 퇴적물과 대형저서동물에 집적되었다는 연구 결과가 있었다(Umehara *et al.*[2017]). 또한 남조류에 의해 생성된 Microcystin의 하구역 및 해역 유입과 생물 농축, 그리고 인간 건강에 까지 미칠 수 있는 영향에 대한 문제점을 강조한 최근의 review 연구에서도(Preece *et al.*[2017]) 하구역을 포함한 연안 환경에서 남조류기원 독성물질 축적에 대한 모니터링과 물질 순환 연구의 중요성을 강조하고 있다. 이러한 선행 연구들과 더불어 본 연구지역인 금강하구둑의 내측 금강하류 역시 녹조 번성시기에 높은 농도의 Microcystin이 검출되고 있음(unpublished data)을 감안할 때, 금강하구역에 담수기원의 녹조생물은 얼마나 유입되고, 유입된 이후 하구역 염분환경에서 얼마나 생존, 성장, 사멸하며, 이들이 가진 다양한 형태의 물질들은 어떠한 경로로 순환, 변환되는지의 생태계 먹이망 연구를 포함한 전체적인 물질순환 연구가 반드시 필요하다. 따라서 본 연구는 금강하구역에 유입되는 담수플랑크톤의 양적, 질적 변화를 모니터링하고, 연안환경 유입에 따른 생태계 영향을 확인하기 위하여 금강하구역에 위치한 1개 조사정점에서 2014년 12월부터 2015년 10월까지 다빈도 장기조사(주 1회, 11개월)를 실시하여 담수 방류에 의한 식물플랑크톤 군집구조 변동 현황을 파악하였고, 담수기원 플랑크톤이 다량 출현한 시기(녹조 유입)에 우점종들의 중추를 확보하여 염분구배에 따른 성장특성 실험을 실시함으로써, 연안환경에 유입된 담수기원 플랑크톤의 생태계 물질 순환 연구의 기초 자료를 마련하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 현장 조사

금강하구역에서 4계절 동안의 담수 플랑크톤 유입 특성을 확인하기 위해 하구둑 외측 직선거리 약 4.5 km에 위치한 군산 내항(도선장)에 고정 정점을 선정하였다(Fig. 1).

시료의 채집은 2014년 12월부터 2015년 10월까지 주 1회, 만조 시 표층 시료를 채집하였고, 휴대용 다항목 수질측정기(YSI Model 30, USA)로 수온, 염분, pH, 용존산소 등의 기초 수질항목을 동시 측정하였다.

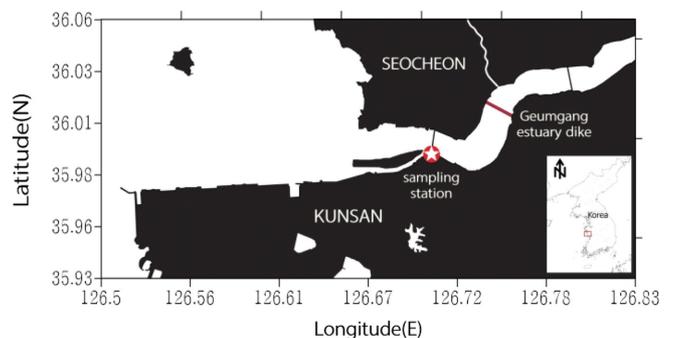


Fig. 1. Sampling site in the Geumgang Estuary from Dec. 2014 to Oct. 2015.

2.2 식물플랑크톤 군집 분석

식물플랑크톤 군집 분석을 위한 해수 시료 500 ml은 채수 직후 현장에서 Lugol 용액으로 고정(최종 고정농도 1%)하여 실험실로 운반하였고, 72시간 이상 암소에 정치한 후, 상등액을 미세사이폰으로 제거해 농축하였다. 식물플랑크톤의 현존량과 종조성 분석은 농축한 시료를 50회 이상 흔들어서 섞고, Sedgwick-Rafter 계수관(용량 1 ml)에 담아 광학현미경(Olympus BH-50)을 이용하여 동정 및 계수하였다.

2.3 우점 녹조생물 배양체 확립

2014년 12월부터 지속적인 주 1회 현장 조사시, 남조류 및 녹조류로 구성된 녹조물의 농도가 가장 높았던 2015년 6월 26일 해수 생시료(Live sample) 500 ml을 채수하여 즉각 실험실로 운반하고 6시간 이내에 단세포들을 순수분리(Single cell isolation) 하였다. 해부 현미경(Olympus SZX12, Olympus, Japan) 하에서 가장 우점하는 종으로 예상되는 세포를 탐색하고, pasteur micro-pipette를 이용하여 단세포 또는 분열중 세포를 직접 포착하여 날개로 분리하였다. 분리한 세포는 무균상태의 해수(sterile seawater)에서 5회 이상 행구어 준 뒤, 염분 5, 25 psu의 CB Media를 채운 24 well culture plate(SPL lifesciences, Korea)에 옮긴 후 배양실에 보관하였다. 배양 조건은 온도 20 °C, 염분 0, 5, 25 psu, 광도 100 μE m²s⁻¹ (continuous light cycle)이었고, 세포 농도가 증가함에 따라 점차적으로 멸균된 CB Media를 넣은 6-well culture plate, 20 ml culture-tube, 150 ml, 500 ml polycarbonate(PC) bottles 순으로 옮겨서 배양하였고, 대부분 종주의 유지는 500 ml PC bottle에서 실시하였다. 최소 100 ml 이상의 배양체가 확보되었을 때, 형태학적 특성 파악을 위해 현미경 관찰을 실시하였다. 살아있는 세포의 크기(길이와 너비)의 측정과 전체적인 형태학적 특징은 광학 현미경(Ziess-Axiovert 200M, Carl Zeiss Ltd., Gottingen, Germany)을 이용하여 400-1,000배 배율에서, DIC(Differential interference contrast illumination) 또는 BF(Bright field)에서 관찰하였으며, 최종적으로 남조류인 *Phormidium lucidum* 과 녹조류인 *Mychonastes cf. homosphaera*로 확인되었다.

2.4 녹조생물 염분구배 성장을 실험

두 종의 우점 녹조생물의 염분구배에 따른 성장률 확인을 위한 염분 조건은 0 psu부터 35 psu까지 5 psu 간격으로 총 8개 구간에서 실시하였고, 염분의 구배는 서해안 고군산군도 지역에서 채수한 원수(염분 34 psu)를 자연 증발과 초순수 증류수 혼합을 통하여 제조하였다. 급격한 염분 변화에 의한 쇼크영향을 최소화하기 위하여 5 또는 25 psu 조건에서 유지하던 각 종주를 실험 약 1주일 전부터 각 실험 조건과 유사한 상태로 1일 5 psu씩 변화를 주어 적응 및 유지하였고, 이러한 사전 적응시 세포 농도 또는 활성도(염록소 색깔 및 크기 변화 등)에 대한 변화를 확인한 후 실험을 실시하였다. 실험은 각 조건별로 사전배양(pre-incubation)된 배양종주에서 각각 5 ml을 micro-pipette로 취하여 Lugol 용액으로 고정한 후 광학현미경하에서 계수하여 각 조건별 실험종주의 농도를 확인하였고, 실험은 5 ml씩의 CB Media를 담아둔 배양시험관(culture tube)에

500 cells ml⁻¹의 농도가 될 수 있도록 각각 분주하고, 총 10 ml가 되도록 CB Media를 채워주었다. 배양 조건은 온도 20 °C, 광도 100 μE m²s⁻¹(continuous light cycle)이었고, 1일 간격으로 동일 시간대(오후 2~3시)에 in vivo chlorophyll 형광값을 측정하였다. 실험 시작 직전과 7일, 14일 후 각 실험종의 세포 농도 대비 in vivo chlorophyll 형광값을 측정하여 상관관계를 확인함으로써 형광값을 통한 세포 농도를 환산하였다(Fig. 2, 3). 각 실험종의 성장률(Growth rate, μ)은 지수성장기(Exponential growth phase) 구간의 결과를 다음 식으로 산출하였다.

$$\mu(d^{-1}) = \left[\ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right) \right] / dt$$

여기서 C_t = 지수성장기 후의 개체수(cells ml⁻¹)

C₀ = 실험 초기(t=0)의 개체수(cells ml⁻¹)

dt = 성장률을 산정한 지수성장기 기간(day)

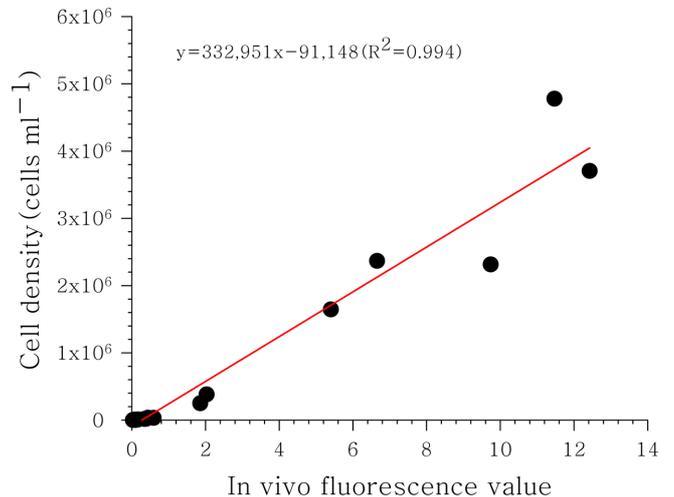


Fig. 2. Relationship between cell density and in vivo fluorescence of *Phormidium lucidum*.

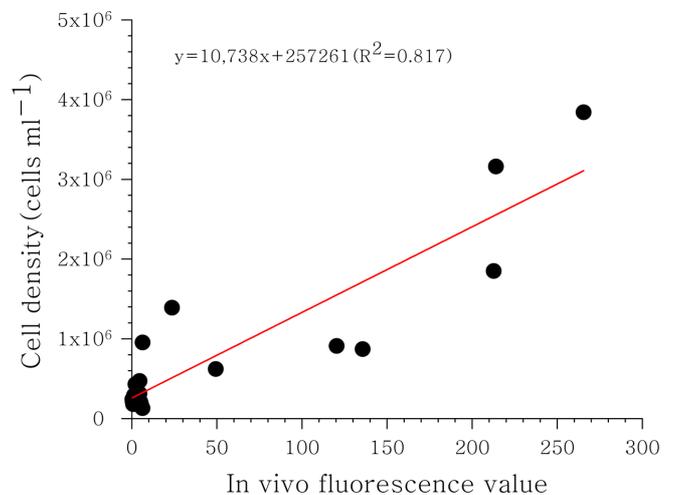


Fig. 3. Relationship between cell density and in vivo fluorescence of *Mychonastes cf. homosphaera*.

염분구배에 따라 지수성장기에 도달하는 기간이 다르기 때문에 염분별로 성장곡선이 최대치 이후 포화(Saturation)되는 기간까지를 기준으로 하였고, 초기농도는 각 조건에 대한 적응 기간을 좀 더 고려하여 실험 시작 이후 개체군 농도변화가 확연히 시작되는 시간을 기준으로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 식물플랑크톤 군집 변동

2014년 12월부터 2015년 10월까지 연구정점에서 출현한 식물플랑크톤은 총 171종이었다. 전체 조사기간 중 가장 다양하게 출현한 분류군은 규조류였고, 다음으로 녹조류, 외편모조류, 남조류 순이었으며, 이러한 분류군별 출현종수 결과는 동일한 연구정점에서 2004년 2월부터 6월까지 수행된 Yih *et al.*[2005]의 연구와 유사한 결과(최대 184종)이었다. 하지만 2014년 4, 7, 10, 12월 금강하구역 9개 정점에서 수행된 식물플랑크톤 군집구조 연구(Shin [2013])에서 확인한 233종 보다는 적은 출현종수 결과이다. 식물플랑크톤 출현량은 평균 7,545 cells ml⁻¹(최소 27 cells ml⁻¹, 최대 225,723 cells ml⁻¹)이었다(Table 1, Fig. 4). 기존의 연구들과 비교하였을 때, Shin[2013]의 143~12,016 cells ml⁻¹(평균 2,010 cells

ml⁻¹), Shim and Yang[1982]의 97~1,707 cells ml⁻¹(평균 700 cells ml⁻¹), Jeong *et al.*[1985]의 60~1,330 cells ml⁻¹, 군산 연안해역 연구결과인 Shim and Yoo[1985]의 16~295 cells ml⁻¹보다 월등히 높은 결과이다. 이러한 높은 결과는 간헐적인 고농도 담수플랑크톤의 유입에 의한 것으로 판단되는데, 예를 들어 2016년 6월 29일 연구정점에서 고농도의 녹조가 확인되었고, 종조성 분석 결과, 남조류인 *Phormidium lucidum*의 농도가 166,579 cells ml⁻¹로 매우 높았으며, 독성 함유 가능종인 *Microcystis* sp. 31,370 cells ml⁻¹, *Anabaena* sp. 5,916 cells ml⁻¹, 녹조류인 *Mychonastes* cf. *homosphaera*의 농도는 21,144 cells ml⁻¹이었다. 2016년 6월 29일 결과를 제외한 식물플랑크톤 출현량 평균은 2,903 cells ml⁻¹로 Shin[2013]의 결과와 유사한 수준이다. 조사기간 중 2014년 12월부터 2015년 5월까지 남조류 및 녹조류 출현비율은 미비하였지만(평균 7.5%), 2015년 6월부터 10월까지의 출현 비율은 전체 식물플랑크톤 출현량 중에 47.2%로 규조류 출현 비율(44.1%)과 유사한 수준이었다(Fig. 5). 금강하구역에서의 남조류는 하구둑 건설 이전부터 하계 집중 강우기에 부영화된 담수와 함께 자주 출현하는 것으로 보고되었고(Shim and Yang[1982]), 시화호에서도 하천을 통해 높은 개체수가 유입(Shin *et al.*[2000])되는 것으로 보고된 바 있다.

Table 1. Maximum, minimum and average abundance of phytoplankton classes in the Geumgang Estuary from Dec. 2014 to Oct. 2015

Phytoplankton Class	Abundance(cells ml ⁻¹)			
	Maximum	Minimum	Average	Standard deviation
Bacillariophyceae	17,442	17	1,781	3,563
Dinophyceae	750	0	45	133
Cryptophyceae	1,408	0	217	283
Dictyochophyceae	22	0	1	4
Chlorophyceae	21,570	0	650	3,175
Cyanophyceae	203,865	0	4,845	29,386
Euglenophyceae	68	0	6	15
Total abundance	225,723	27	7,545	32,395

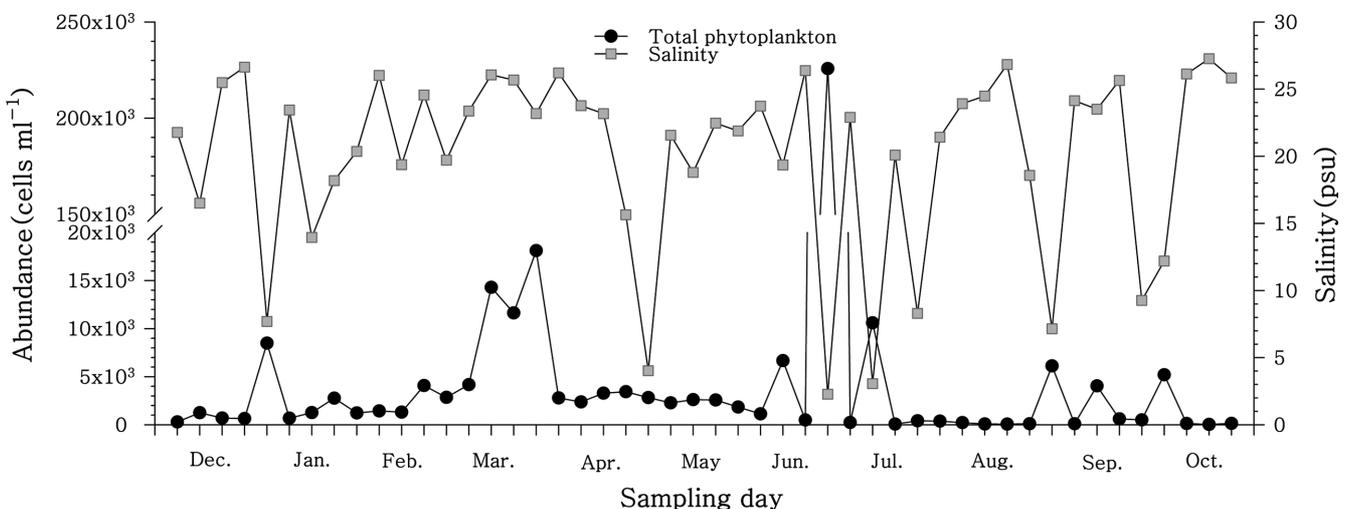


Fig. 4. Variations of total phytoplankton abundance and salinity in the Geumgang Estuary from Dec. 2014 to Oct. 2015.

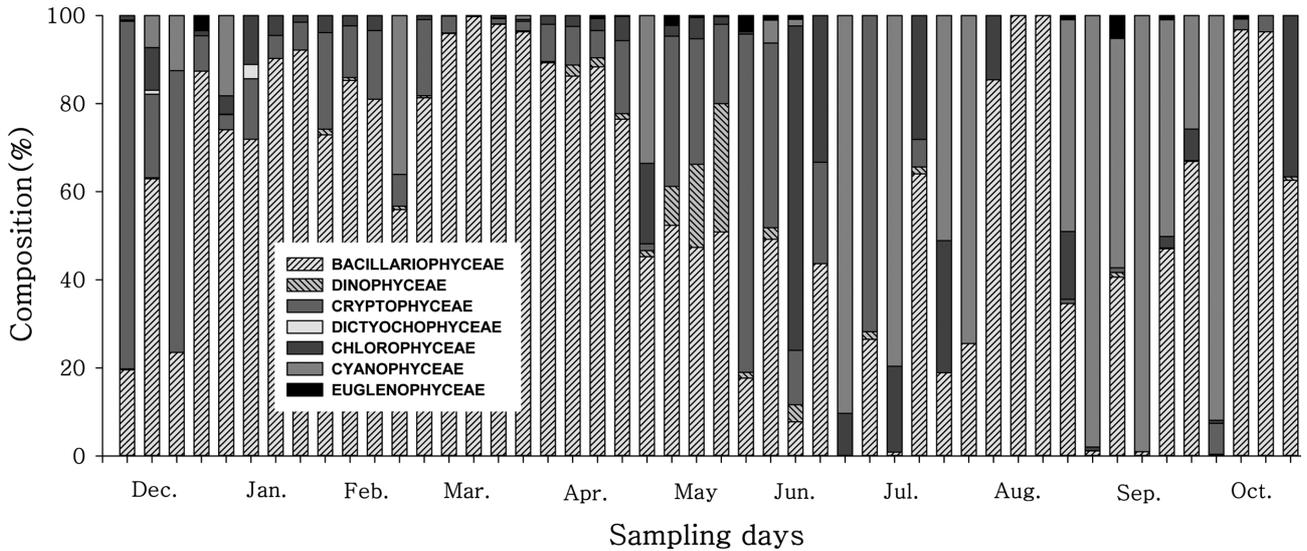


Fig. 5. Temporal variations in the relative compositions of phytoplankton classes in the Geumgang Estuary from Dec. 2014 to Oct. 2015.

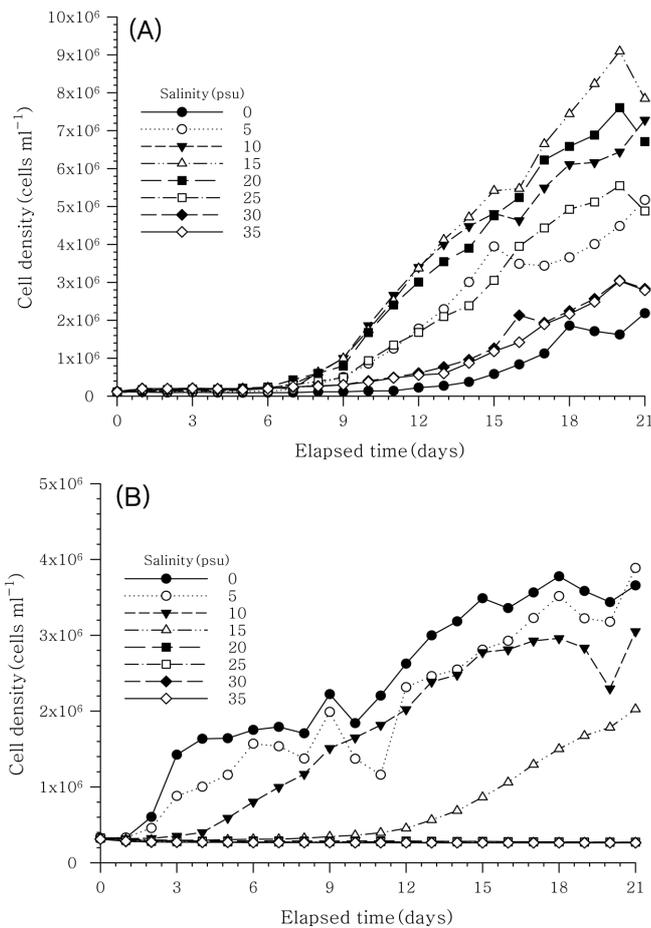


Fig. 6. Growth curves of (A) *Phormidium lucidum* and (B) *Mychonastes cf. homosphaera* at 8 different salinities.

3.2 녹조생물 염분구배에 따른 성장률

남조류인 *Phormidium lucidum*은 모든 염분 구배에서 성장하였고, 15 psu에서 가장 높은 성장률을, 15 psu를 기준으로 염분이

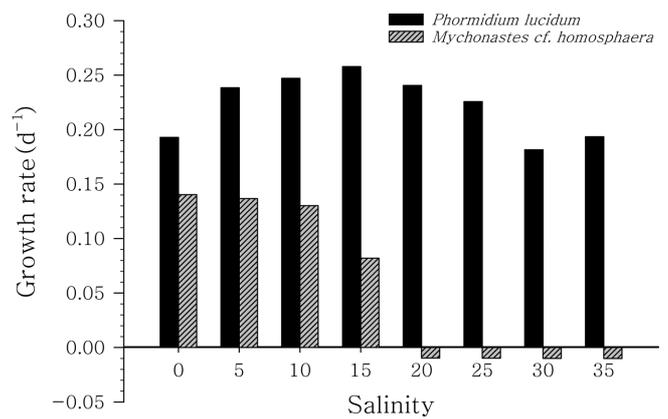


Fig. 7. Growth rates of *Phormidium lucidum* and *Mychonastes cf. homosphaera* at 8 different salinities.

높아지거나 낮아질 경우에 따라 성장률이 점차 낮아졌다. 녹조류인 *Mychonastes cf. homosphaera*는 염분 0 psu부터 15 psu 구간에서 성장이 확인되었고, 20 psu 이상 염분 환경에서는 성장하지 않는 것으로 확인되었다. 가장 높은 성장률을 보인 염분은 0 psu로서, 완전한 담수종으로 판단된다. *P. lucidum*의 최대 성장률은 염분 15 psu에서 0.26 d⁻¹, *M. cf. homosphaera*의 최대 성장률은 염분 0 psu에서 0.14 d⁻¹이었다. *P. lucidum*의 최대 성장률인 0.26 d⁻¹은 1일 0.38회 분열하는 속도이고, 최대 도달 농도는 7,000 cells ml⁻¹이었다. *M. cf. homosphaera*의 최대 성장률 0.14 d⁻¹은 1일 0.2회 분열하는 속도로 비교적 느린 성장률이었고, 최대 도달 농도 역시 3,500 cells ml⁻¹로 높지 않았다. 두 종 모두 고농도의 녹조를 발생시킬만한 성장은 본 실험에서 확인하지 못하였는데, 이에 대한 원인은 최적성장 조건에 미치지 못한 실험 온도(20 °C), 실험 광조건(100 μE m⁻²s⁻¹)에 의한 가능성이 크고, 영양염 조성 및 농도 역시 녹조 수준의 배양이 이루어지지 않았을 가능성도 배제할 수 없다. 다만, 본

연구의 결과는 오직 염분구배에 따른 성장 여부를 확인하는 차원의 실험이었고, 추후 수온 및 광구배에 따른 성장률 실험과 최적 성장 영양염 조건 실험 등의 연구에 있어 본 연구가 기초자료로서 활용될 것으로 판단된다.

전 세계적으로 1980년대부터 진행되어온 담수서식 남조류의 염분 내성에 대한 연구에 의하면 남조류인 *Microcystis* spp.의 염분 생존 범위는 종주에 따라 매우 다르게 나타나지만 최대 약 17 psu 인 것으로 알려져 있고(Lehman *et al.*[2005]), 최대 염분 35 psu에서도 2일간 생존하는 연구결과도 있다(Miller *et al.*[2010]; Preece *et al.*[2017]). *Microcystis* spp.와 더불어 또 다른 Microcystin 생성 남조류인 *Anabaena* spp. 역시 최대 15 psu 환경에서도 생존 가능하다(Coutinho and Seeliger[1984]). 외국의 연구 사례와 본 연구 결과를 종합해 보면, 금강하구둑 내측에서 발생하고 있는 남조류 녹조는 Microcystin 등의 유해한 물질을 함유하고 있을 가능성이 높고, 하구환경에 유입된 후 상당기간 생존하거나 성장하여 함유한 유해물질이 하구역 생태계에 편입, 순환됨으로서, 악영향을 미칠 가능성이 있다.

4. 결 론

금강하구역에서 식물플랑크톤 군집구조에 대한 다빈도-장기 조사를 실시하여, 하구둑 수문을 통한 담수방류 결과 나타나는 담수성 식물플랑크톤 및 녹조의 하구역 유입 현황을 확인하였다. 2015년 강우기(6월~10월)에 남조류 및 녹조류가 하구역 전체 식물플랑크톤의 약 47% 이상의 비율로 출현하며, 비록 일시적이기는 하지만 고농도 녹조가 하구역에서 나타나기도 하였다. 또한 녹조 형성의 원인 우점종 배양체의 염분구배에 따른 성장률 실험 결과, 종에 따라서는 이들 녹조가 연안환경에서 즉시 사멸되지 않은 상태로 상당기간 생존, 성장할 수 있는 것으로 확인되었다. 이러한 조사와 실험 결과는 담수방류를 통해 하구역 또는 해역으로 유입되는 담수 플랑크톤 군집은 기존의 연안(하구역 및 해역) 플랑크톤 생태계 군집변화를 상당기간 초래할 수 있고, 결국에는 먹이망을 통해 전체 연안생태계 구조 및 기능에 복잡한 영향을 미칠 가능성이 높음을 시사한다. 따라서, 최근 하구둑 상류 측 금강호에서 빈번히 발생하는 녹조 문제에 대한 관심과 더불어, 관련 연구의 범위를 연안 해역에까지 확장할 필요가 있으며, 녹조원인 생물이 함유한 유해물질(Microcystin 등)의 다양성 및 이의 먹이망을 통한 생태계 영향에 대한 보다 체계적이고 지속적인 모니터링 및 연구가 시급하다.

후 기

본 연구는 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원(하구역 종합관리시스템 개발 연구)과 환경부 재원으로 국립생물자원관(NIBR201839201)의 지원을 받아 수행하였습니다.

References

- [1] Choi, J.Y., Choi, H.Y. and Seo, M.S., 1995, Physical and sedimentological changes in the Keum River Estuary after the gate-close of Keum River Weir, J. Korean Soc. Oceanogr., 30(4), 262-270.
- [2] Chong, S.A., Yi, H.S., Hwang, H.S. and Kim, H.J., 2015, Modeling the flushing effect of multi-purpose weir operation on algae removal in Yeongsan River, Kor. Society Env., 37(10), 563-572.
- [3] Coutinho, R., Seeliger, U., 1984. The horizontal distribution of the benthic algal flora in the Patos Lagoon estuary, Brazil, in relation to salinity, substratum and wave exposure. J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 80(3), 247-257.
- [4] Hellawell, J.M. 1986. Biological indicators of freshwater pollution and environmental management. Elsevier Applied Science Publishers, 546.
- [5] Jeong, Y.H., Lee, O.M. and Noh, K.H., 1985. Annual (1984-1985) dynamic of phytoplankton in Keum river estuary, Korean J. Nat. Conserv., 7, 17-25.
- [6] Kim, Y.H., Lee, E.H., Kim, K.H. and Kim, S.H., 2016, Analysis of exclusive causality between environmental factors and cell number of cyanobacteria in Geum River, J. Environ. Sci. Int., 25(7), 937-950.
- [7] Kwon, H.K. and Lee, S.H., 1999, Physical environment changes in the Keum River Estuary by the dyke gate operation I. Mean sea level and tide, J. Korean Soc. Oceanogr., 4(2), 93-100.
- [8] Lee, S.H., Choi, H.Y. and Oh, I.S., 1995, Structure and variation of the Keum River plume in summer, J. Korean Soc. Oceanogr., 30(2), 125-137.
- [9] Lee, S.H., Kwon, H.K., Choi, H.Y., Yang, J.S. and Choi, J.Y., 1999, Physical environment changes in the Keum River Estuary by the dyke gate operation II. Salinity structure and estuary type, J. Korean Soc. Oceanogr., 4(4), 255-265.
- [10] Lee, C.H., Shin, Y.H. and Lee, B.Y., 2018, A Science-Policy Integrated approach to support the stakeholder consultation process for estuarine circulation restoration of the Geumgang Estuary, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 21(3), 186-194.
- [11] Lehman, P.W., Boyer, G., Hall, C., Waller, S. and Gehrts, K., 2005, Distribution and toxicity of a new colonial *Microcystis aeruginosa* bloom in the San Francisco Bay Estuary, California. Hydrobiologia, 541, 87-99.
- [12] McLusky, D.S. and Elliott, M., 2004, The estuarine ecosystem; ecology, threats and management, third ed., Oxford Univ, Oxford, 216.
- [13] Miller, M.A., Kudela, R.M., Mekebri, A., Crane, D., Oates, S.C., Tinker, M.T., Staedler, W. A., Miller, M., Toy-Choutka, W.A., Dominik, S., Hardin, C., Langlois, D., Murray, G., Ward, M.K. and Jessup, D.A., 2010, Evidence for a novel marine harmful algal bloom: cyanotoxins (microcystin) transfer from land to sea otters, PLoS One 5(9), 1-11.

- [14] Ministry of Environment, 2014, Nonpoint source management comprehensive plan of Geum river, report, 1-23.
- [15] Preece E.P., Hardy, F. J., Moore, B.C. and Bryan, M., 2017, A review of microcystin detections in Estuarine and Marine waters: Environmental implications and human health risk, *Harmful Algae*, 61, 31-45.
- [16] Shim, J.H. and Yang, J.S., 1982. The community structure and distribution of phytoplankton of the Keum river estuary, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 17, 1-11.
- [17] Shim, J.H. and Yoo, S.J. 1985. Phytoplankton community of the coast of Kunsan, Korea, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 2, 31-42.
- [18] Shin J.K., Kim, D.S. and Cho, K.J., 2000, Dynamics of inorganic nutrients and phytoplankton in Shihwa Reservoir, *Kor. J. Limnol.*, 33, 109-118.
- [19] Shin, Y.K., 2013, A ecological study of phytoplankton community in the Geum River Estuary, *Korean J. Environ. Ecol.*, 46(4), 524-540.
- [20] Suthers, I.M. and D. Rissik. 2009. *Plankton: A guide to their Ecology and monitoring for water quality*. CSIRO Publishing. 272.
- [21] Umehara, A., Takahashi, T., Komorita, T., Orita, R., Choi, J.W., Takenaka, R., Mabuchi, R., Park, H.D. and Tsutsum, H., 2017, Widespread dispersal and bio-accumulation of toxic microcystins in benthic marine ecosystems, *Chemosphere*, 167, 492-500.
- [22] Yang, J.S., Jeong, J.Y., Heo, J.Y., Lee, S.H. and Choi, J.Y., 1999. Chemical mass balance of materials in the Keum river estuary 1. Seasonal distribution of nutrients. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 4, 71-79.
- [23] Yih, W.H., Myung, G.O., Yoo, Y.D., Kim, Y.G. and Jeong, H.J., 2005, Semiweekly variation of spring phytoplankton community in relation to the freshwater discharges from Keum River Estuarine Weir, Korea, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 10(3), 154-163.
- [24] Williams, P.J., Le, B., Thomas, D.N. and Reynolds, C.S., 2002, *Phytoplankton productivity: Carbon assimilation in marine and freshwater Ecosystems*. Blackwell Science, 386.

Received 20 September 2018

Revised 15 October 2018

Accepted 17 October 2018