

대형 배양장치에서 기능그룹에 기초한 식물플랑크톤 천이 특성

이경락* · 노성유 · 이재운 · 윤성애 · 이재학³ · 신유나 · 이수웅 · 류덕희¹ · 이재관²

국립환경과학원 유역생태연구팀, ¹국립환경과학원 물환경평가연구과, ²국립환경과학원 물환경연구부, ³경북대학교 생물학과

Characteristics of Phytoplankton Succession Based on the Functional Group in the Enclosed Culture System. Lee, Kyung-Lak* (0000-0001-7276-0445), Seongyu Noh (0000-0001-6396-4497), Jaeyoon Lee (0000-0002-2249-5855), Sungae Yoon (0000-0001-5888-8047), Jaehak Lee³ (0000-0001-5016-6496), Yuna Shin (0000-0002-2867-3464), Su-Woong Lee (0000-0001-6827-0769), Doughee Rhew¹ (0000-0003-2785-5693) and Jaekwan Lee² (0000-0002-1399-8688) (Watershed Ecology Research Team, National Institute of Environmental Research, Incheon 22689, Republic of Korea; ¹Water Quality Assessment Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon 22689, Republic of Korea; ²Water Environment Research Department, National Institute of Environmental Research, Incheon 22689, Republic of Korea; ³Department of Biology, Kyungpook National University, Daegu 41566, Republic of Korea)

Abstract The present study was conducted from August to December 2016 in a cylindrical water tank with a diameter of 1 m, a height of 4 m and a capacity of 3,000 L. The field water and sediment from the Nakdong River were also sampled for the experimental culture (field water + sediment) and control culture (field water), respectively. In this study, we aimed to investigate phytoplankton succession pattern using the phytoplankton functional group in the enclosed culture system. A total of 50 species in 27 genera including Chlorophyceae (30 species), Bacillariophyceae (11 species), Cyanophyceae (7 species), and Cryptophyceae (2 species) were identified in the experimental and control culture systems. A total of 19 phytoplankton functional groups (PFGs) were identified, and these groups include B, C, D, F, G, H1, J, K, Lo, M, MP, N, P, S1, T_B, W₀, X1, X2 and Y. In particular, W₀, J and M groups exhibited the marked succession in the experimental culture system with higher biovolumes compared to those of the control culture system, which may be related to the internal cycling of nutrients by sediment in the experimental culture system. The principal component analyses demonstrated that succession patterns in PFG were associated with the main environmental factors such as nutrients (N, P), water temperature and light intensity in two culture systems. In conclusion, the present study showed the potential applicability of the functional group for understanding the adaptation strategies and ecological traits of the phytoplankton succession in the water bodies of Korea.

Key words: succession, phytoplankton functional group (PFG), biovolume, ecological traits

서 론

Manuscript received 27 November 2017, revised 19 December 2017,
revision accepted 22 December 2017
* Corresponding author: Tel: +82-32-560-7451, Fax: +82-32-568-2051,
E-mail: micow1022@korea.kr

식물플랑크톤 천이는 이화학적, 생물학적, 수문학적 환경인자들에 의해 시·공간적으로 다양하게 나타나며 (Reynolds, 2006), 수환경 변화에 따라 분류군별 군집 변화

© The Korean Society of Limnology. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provide the original work is properly cited.

는 계절별로 뚜렷한 차이를 나타낸다 (Grover and Chrzanoski, 2006). 지금까지 식물플랑크톤 군집의 천이는 수 환경 요인들의 다양한 변화를 이해하는 중요한 지표로 여겨져 왔다 (Sommer, 1985; Domingues *et al.*, 2005). 전통적으로 현존량(생체량) 혹은 chl-*a* 농도에 기초한 식물플랑크톤의 정성·정량적 분석은 특정 수계의 생태학적 상태를 평가하기 위해 널리 사용되어 왔다 (Abonyi *et al.*, 2012). 하지만, 특정 우점종 혹은 분류군의 정량적인 조사만으로 주어진 환경에서 식물플랑크톤 전체 군집의 생태학적 특성을 이해하는 데에는 한계가 있다.

Reynolds (2002)는 'Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton'의 제목으로 발표된 논문에서 기존의 식물플랑크톤 형태학적 분류군들을 생태학적 특성들(서식지, 내성, 민감성 등)에 기초하여 그룹화한 31개의 기능그룹(functional group, FG)을 제시하였다. 이후, Padišák *et al.* (2009)에 의해 식물플랑크톤 기능그룹(PFG)은 생태학적 특성에 따라 더 추가되거나 수정되어 40개로 최종 정립되었다. Reynolds (2002)와 Padišák *et al.* (2009)에 의해 제시된 PFG는 전통적인 형태학적 분류군들을 유사한 생태적 특성을 지닌 기능그룹으로 단순화시킴으로써 특정 수계의 환경 변화에 따른 식물플랑크톤의 생태학적 양상을 더 명확하게 설명하는 데 유용하게 사용되어 왔다 (Abonyi *et al.*, 2012; Devercelli and O'Farrell, 2013; Martinet *et al.*, 2014). Abonyi *et al.* (2012)은 하천 상·중·하류에서 PFG의 분포에 기초하여 공간적인 이화학적 수 환경 변화를 설명하였으며, Tan *et al.* (2015)은 환경적응에 따른 기능그룹들의 시공간 변화가 호수의 수리수문학적 특성 및 영양염 변화와 관련이 있음을 증명한 바 있다. 이는 각기 다른 PFG는 주어진 서식처 환경의 생태학적 지표가 될 수 있음을 잘 보여 준다.

식물플랑크톤의 시·공간적 천이는 수계의 빛, 온도, 영양염, 물의 유동 등 다양한 환경요인들의 영향을 받는다 (Reynolds, 2006). 지금까지 국내에서 환경요인에 따른 식물플랑크톤 천이연구의 대부분은 주요 분류군과 우점종을 대상으로 진행되어 왔다. 하지만 주어진 수계의 환경요인 변화와 관련된 식물플랑크톤 군집의 생존 혹은 성장을 위한 종별 생태학적 적응 특성을 이해하기 위해서는 종별 기능적 특성(functional trait) 연구가 더 필요하다 (Padišák *et al.*, 2009).

국내 담수수계에서 환경 변화에 따른 식물플랑크톤 천이 연구를 위해 공식적으로 PFG를 적용한 사례는 없다. 4대강 사업 이후 주요 하천을 중심으로 국내 담수 환경은 변화하였으며, 식물플랑크톤의 시·공간적 분포 또한 환경 변화에 따라 다양한 양상을 나타내고 있다. 이러한 시점에

서 복잡한 식물플랑크톤의 천이 양상을 확인하기 위해서는 최근 많이 통용되고 있는 PFG와 같은 새로운 방식의 추가적 접근이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 환경 변화에 따른 식물플랑크톤 군집 변화를 새롭게 해석하기 위해 형태학적 종 분류군에 대한 정성·정량 조사에 기초하여 식물플랑크톤 기능그룹(phytoplankton functional group, PFG) 분류 방식을 적용·확인하고자 하였다 (Reynolds *et al.*, 2002; Padišák *et al.*, 2009). 이를 위해 저자들은 현장규모의 실내 대형 배양장치의 실험을 통해 현장에서 계절적으로 발생하는 식물플랑크톤 주요 분류군들(규조류, 녹조류, 남조류)의 천이 양상 재현 유무를 조사함과 동시에 이들 분류군들에 기초하여 식물플랑크톤 천이 특성을 다른 방식으로 이해하기 위한 PFG 기법의 적용 가능성을 알아보고자 하였다. 특히, 실내 대형 배양장치(메조코즘)는 현장 메조코즘 실험에서 변수로 작용할 수 있는 풍속, 풍향, 유속의 변화 등의 요인들을 제어할 수 있는 장점을 지닌다. 본 연구에서 저자들은 PFG 방법의 적용이 현장의 식물플랑크톤 천이 특성을 완벽하게 해석할 수는 없더라도 기존의 형태학적 분류군들의 천이 현상 재현과 함께 현장 적용 가능성이 확인된다면 향후 수환경 변화 특성을 이해하는 지표로서의 식물플랑크톤의 효용성을 높이는 데 더 기여할 것으로 판단하였다.

재료 및 방법

1. 배양실험

본 실험에 사용된 현장규모 대형 배양장치는 자연광 투과성 및 조류의 이동 특성 등을 고려하여 제작된 지름 1m, 높이 4m 및 3,000 L 용량의 원통형 수조와 각 실험조, 유입수 저류조, 분배조, 유출수 저류조 등으로 구성되어 있다 (Fig. 1). 본 실험을 위해 낙동강 원수(현장원수)는 강정고령보 상류 약 500 m 지점 우안의 가장자리(marginal area)에서 채수장치가 장착된 차량을 이용하여 채수하였다. 퇴적물은 합천창녕보 상류(도동서원 인근) 우안의 가장자리(수심 2 m 이내)에서 대형 그랩을 이용하여 채취하였다. 현장수와 퇴적물은 샘플링 이후 즉시 실험실로 이송하였다. 대조구 수조는 현장원수만 주입하였으며, 실험구 수조에는 현장원수와 더불어 퇴적물(약 2.5톤, 25 cm 높이)을 주입하였다. 실험에 사용된 원수의 영양염(TN, TP) 농도는 TN이 2.176 mg L^{-1} , TP가 0.073 mg L^{-1} 로 확인되었으며, 퇴적물의 경우 TN이 $1,182.5 \text{ mg kg}^{-1}$, TP가 344.6 mg kg^{-1} 으로 나타났다. 본 실험은 8월부터 12월까지 월 1~2회 주기로

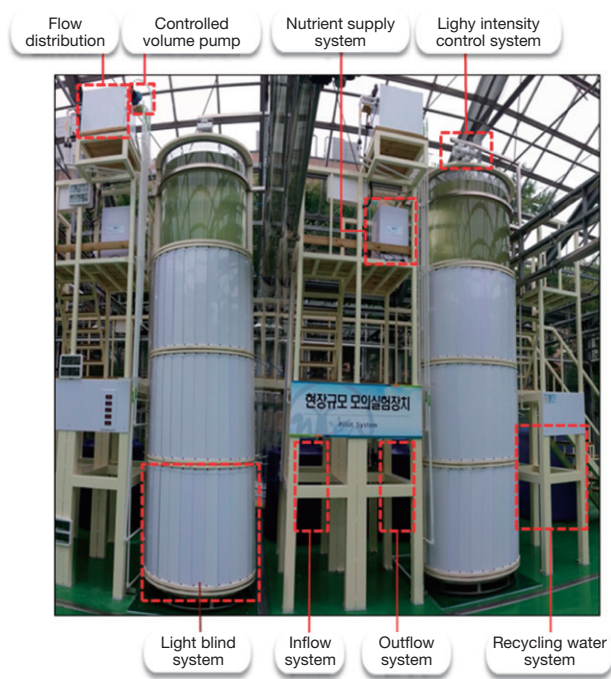


Fig. 1. The enclosed culture system used in the present study. Height: 4 m, Diameter: 1 m, Water volume: 3,000 L.

수체가 안정된 상태에서 회분배양(batch culture) 실험으로 진행하였으며, 각 수조를 대상으로 수심별(표층: 0~0.3 m, 중층: 2 m)로 실시하였다.

2. 이화학적 요인

수온, DO, pH, 전기전도도, 탁도는 YSI-6600을 이용하여 측정하였다. TOC 분석을 위한 시료는 220°C에서 24시간 태워 유기물이 완전히 제거된 50 mL 유리병을 사용하여 채취하여 0.45 µm syringe filter로 여과 후 TOC analyzer (Tekmar, USA)로 측정하였다. 영양염류(TN, TP) 분석을 위해 시료는 50 mL 채수병에 채수하였으며, 수질오염공정 시험기준(MOE, 2014)에 따라 영양염류 분석기(Quatro, Germany)로 분석하였다.

Chl-*a*는 250 mL 폴리에틸렌 병으로 채집한 후 즉시 실험실로 옮겨 200 mL를 GF/F filter로 여과하였으며, 아세톤 추출법에 따라 24시간 냉암소에서 시료 추출 후 UV-Vis Spectrophotometer (Agilent, USA)로 분석하였다(MOE, 2014).

3. 식물플랑크톤

식물플랑크톤은 1 L 용량의 채수병을 이용하여 채수 후

2% Formaldehyde 용액으로 고정하였다. 고정된 시료는 24 시간 농축 후 균일하게 혼합 후 1 mL를 취해 Sedgwick-Rafter Counting Chamber를 이용하여 광학현미경(Zeiss, Germany) 200~400배율 하에서 계수하였다. 식물플랑크톤의 생체 부피(biovolume) 산정을 위해 종별 세포의 크기는 광학현미경(Zeiss, Germany) 1,000배율 하에서 측정하였다.

4. 식물플랑크톤 기능그룹(Phytoplankton Functional Group)

식물플랑크톤 기능그룹(PFG)은 Reynolds *et al.* (2002)과 Padišák *et al.* (2009)에 제시된 결과들을 참고하여 분류하였으며, 식물플랑크톤의 천이 양상은 PFG별 생체 부피 변화에 기초하여 확인하였다. 식물플랑크톤 생체 부피 측정은 Hillebrand *et al.* (1999)과 Olenina (2006)의 공식을 참조하여 실시하였으며, 단위부피당 세포수와 세포당 생체 부피에 기초하여 최종적으로 종별로 시료 단위부피당 생체 부피(mm³ L⁻¹)를 산정하였다.

5. 통계분석

환경요인과 PFG 간의 상관성의 확인은 CANOCO 5.0 (Microcomputer Power, New York, USA)을 이용하여 PCA (principal component analysis)를 실시하였다.

결과 및 고찰

1. 이화학적 환경요인 변화

조사기간(8월 19일~12월 31일) 동안 폐쇄형 배양수조(실험구, 대조구)에서 확인된 주요 환경요인들의 값은 Table 1과 같다. 수온은 6.8~33.4°C의 범위였으며, 시기별로 뚜렷한 변화를 보였으나 표층(0~0.3 m)과 중층(2 m) 간 큰 차이는 없었다. 용존 산소(DO), pH, 전도도(conductivity), 조도(light intensity)는 실험구와 대조구의 각 수심별로 큰 차이가 없었다. 탁도(turbidity)의 경우 실험구에서 상대적으로 더 높게 나타났다. 총인(TP)과 유기물질(TOC) 농도는 실험구의 표층에서 가장 높았다. OECD (1982) 기준으로 TP 농도(평균)는 실험구 표층이 부영양 상태였으며, 나머지는 중영양 상태를 나타내었다. TN:TP 값은 실험구 표층에서 28로 가장 낮고 대조구 중층에서 87로 가장 높았으나, 모두 인이 제한요인(P-limitation, TP>22)으로 확인되었다(Søndergaard *et al.*, 1999). 원수와 퇴적물이 주

Table 1. The values of environmental factors in the enclosed culture system. Experimental culture system: surface layer (E-Sur), middle layer (E-Mid); Control culture system: surface layer (C-Sur), middle layer (C-Mid).

	E-Sur	E-Mid	C-Sur	C-Mid
	Mean (Range)	Mean (Range)	Mean (Range)	Mean (Range)
WT (°C)	24.3 (8.4~33.4)	22.6 (7.1~32.4)	24.0 (8.0~33.2)	22.4 (6.8~32.4)
DO (mg L ⁻¹)	15.0 (6.9~23.0)	11.7 (6.0~16.9)	14.4 (7.5~23.9)	12.0 (7.2~18.0)
pH	9.5 (7.6~10.1)	9.0 (7.2~9.7)	9.4 (8.2~10.2)	9.1 (8.0~10.0)
Conductivity (μS cm ⁻¹)	234 (220~268)	232 (218~268)	235 (208~266)	231 (207~266)
Turbidity (NTU)	2.9 (0.1~28.2)	2.5 (0.1~33.6)	1.2 (0.2~7.5)	0.6 (0.1~1.9)
Light intensity (μmol m ⁻² s ⁻¹)	201.9 (14.8~562.2)	28.6 (1.6~68.5)	217.6 (18.7~583.0)	34.6 (2.5~106.2)
TOC (mg L ⁻¹)	4.1 (1.8~5.9)	3.7 (2.3~4.8)	3.9 (2.6~5.0)	3.8 (3.0~4.7)
TN (mg L ⁻¹)	1.003 (0.132~2.208)	1.016 (0.139~2.177)	1.276 (0.348~2.176)	1.494 (0.330~6.147)
TP (mg L ⁻¹)	0.037 (0.012~0.098)	0.028 (0.012~0.106)	0.026 (0.005~0.084)	0.022 (0.005~0.070)
TN/TP	28.4 (6.8~48.1)	37.6 (7.7~66.5)	81.3 (8.9~175.4)	87.0 (31.1~376.0)
NO ₂ -N + NO ₃ -N (mg L ⁻¹)	0.576 (0.018~1.673)	0.676 (0.034~1.679)	0.971 (0.363~1.634)	1.146 (0.372~3.978)
PO ₄ -P (mg L ⁻¹)	0.023 (0.005~0.083)	0.021 (0.004~0.081)	0.016 (0.003~0.052)	0.016 (0.003~0.052)
NH ₃ -N (mg L ⁻¹)	0.009 (0.002~0.064)	0.015 (0.002~0.091)	0.013 (0.002~0.035)	0.014 (0.002~0.036)
DIN (mg L ⁻¹)	0.585 (0.021~1.692)	0.691 (0.036~1.711)	0.984 (0.370~1.649)	1.160 (0.374~4.000)

입된 실험구에서 인의 농도가 높게 나타났으며, 이는 주요 영양염이 퇴적물 용출에 따른 내부순환(internal cycling)에 의해 증가한 것으로 판단된다(Spears *et al.*, 2007).

2. 식물플랑크톤 군집 구성 및 기능그룹의 천이

본 연구에서 출현한 식물플랑크톤은 총 27속 50종이었으며, 분류군별로는 녹조류 30종, 규조류 11종, 남조류 7종, 편모조류 2종으로 나타났다. 전체 분류군 중 실험구에서 총 25속 47종(녹조류 30종, 규조류 9종, 남조류 6종, 편모조류 2종), 대조구에서 총 23속 45종(녹조류 26종, 규조류 10종, 남조류 7종, 편모조류 2종)의 식물플랑크톤이 각각 확인되었다(Table 2). 각 분류군 내 종들로부터 도출된 식물플랑크톤 기능그룹(PFG)은 총 19개(B, C, D, F, G, H1, J, K, Lo, M, MP, N, P, S1, T_B, W₀, X1, X2, Y)로 확인되었으며, 실험구와 대조구에서는 H1을 제외하고 18개의 PFG가 모두 출현하였다(Table 2).

총 생체 부피가 1 mm³ L⁻¹ 이상인 PFG의 출현 및 천이 양상을 확인한 결과, 실험구와 대조구의 각 표층(0~0.3 m)과 중층(2 m)에서 PFG의 생체 부피는 전체적으로 표층이 중층보다 상대적으로 높은 값을 나타내었으며, 실험구의 표층에서 총 생체 부피는 81.4 mm³ L⁻¹로 가장 높았다(Fig. 4A). 실험구와 대조구에서 PFG 생체 부피 변화는 대체로 영양염(TN, TP) 농도변화와 비슷한 양상을 보였다(Figs. 2, 4). 특히, 실험구에서 PFG의 총 생체 부피가 높게 나타난 것은 앞서 언급한 바와 같이 퇴적물에서 용출된 영양염 증가와 연관이 있다(Spears *et al.*, 2007).

PFG 출현 양상을 조사한 결과, 실험구 표층에서 M, J, W₀, G, B, T_B, 실험구 중층에서 J, M, W₀, B, 대조구 표층에서 J, M, W₀, G, N, S1, T_B 및 대조구 중층에서 J, W₀, M, S1이 대표적인 그룹들로 각각 확인되었다(Fig. 4). 천이 특성을 살펴보면, 실험구 표층에서 초기에 J/G/M/W₀ 그룹들이 혼재된 우점 양상을 보이다가 M 그룹이 주도하는 양상을 보였으며, 실험구 중층에서는 대부분 J 그룹을 중심으로 천이가 진행되었다(Fig. 4A, 4B). 대조구 표층에서도 초반에 실험구 표층과 유사하게 J/M/W₀/G 그룹들의 우점 이후, W₀/S1/J 그룹이 천이를 주도하였으며(Fig. 4C), 대조구 중층에서는 J → S1 → J 그룹 순으로 천이가 확인되었다(Fig. 4D).

본 연구에서 분류된 PFG는 선행연구들에서 보고된 온대지역 담수 수계의 주요 그룹들과 유사하였다(Reynolds, 2006). 이들 그룹들 중에서 녹조류와 남조류가 대표적인 우점 분류군으로 확인된 가운데 W₀, J 및 M 그룹은 실험구와 대조구에서 모두 전체 생체량에 대한 비율에서 주된 기능그룹으로 확인되었다. 이와 같이 비슷한 생태적 적응성을 보이는 종들로 구성된 기능그룹의 출현 양상의 조사는 주어진 수계의 서식환경 특성을 파악하는 데 매우 유용하다(Devercelli and O'Farrell, 2013). 이는 실험구와 대조구에서 수심별 기능그룹의 천이 양상을 보면 더욱 명확해진다(Fig. 4). 실험구와 대조구에서 전체적인 천이 특성은 상대적으로 높은 생체 부피를 차지한 J, M 및 W₀ 그룹들이 주도하는 양상을 보였다. 본 연구에서 J 그룹으로 녹색소구체목(chlorococcales)에 속하는 *Coelastrum* spp., *Pediastrum* spp. 및 *Scenedesmus* spp., M 그룹에는 *Microcystis* spp.

Table 2. List of the phytoplankton taxa and their functional groups in the enclosed culture system including the relative proportion to total biovolume of < 1% (+), 1-5% (++) and > 5% (+++) during the study period.

Phytoplankton taxa	Functional group	E-Su	E-Mid	C-Su	C-Mid
Bacillariophyceae					
<i>Aulacoseira granulata</i> (Ehrenberg) Simonsen	P	++	++	++	++
<i>Cocconeis</i> sp.	MP	+	+		+
<i>Cyclotella</i> sp.	B	++	++	+	+
<i>Cyclotella meneghiniana</i> Kützing	C	+	+	+	+
<i>Navicula pupula</i> Kützing	MP		+	+	
<i>Navicula</i> sp.	MP	+	+	++	+
<i>Nitzschia amphibia</i> Grunow	T _B	+			
<i>Nitzschia</i> sp.	T _B	+	+	+	+
<i>Nitzschia palea</i> (Kützing) W. Smith	T _B	+	+	+	+
<i>Synedra acus</i> Kützing	D				+
<i>Synedra ulna</i> (Nitzsch) Ehrenberg	D			+	
Chlorophyceae					
<i>Ankyra judai</i> (G.M. Smith) Fott	X1	+	+	+	+
<i>Chlamydomonas crassa</i> H.R. Christen	W ₀	+++	++	++	++
<i>Chlamydomonas angulosa</i> O. Dill	W ₀	++	+	++	
<i>Chlorella ellipsoidea</i> Gerneck	W ₀	+	++	+	+
<i>Chlorella</i> sp.	W ₀	+	+	+	+
<i>Chlorella vulgaris</i> Beijerinck	W ₀	+	++	++	++
<i>Coelastrum microporum</i> Nägeli in A. Braun	J	+	++	++	++
<i>Coelastrum sphaericum</i> Nägeli	J	+++	+++	+++	+++
<i>Cosmarium laeve</i> Rabenhorst	N	+	++	++	
<i>Crucigenia crucifera</i> (Wolle) O. Kuntze	J	+	+	++	++
<i>Eudorina elegans</i> Ehrenberg	G	++		+++	++
<i>Monoraphidium contortum</i> (Thuret) Komárková-Legnerová in Fott	X1	+	+	+	+
<i>Monoraphidium minutum</i> (Nägeli) Komárková-Legnerová	X1	+	+	+	+
<i>Monoraphidium</i> sp.	X1	+			
<i>Oocystis parva</i> West & G.S. West	F	+	+	+	+
<i>Pandorina morum</i> (O.F. Müller) Bory in J.V. Lamouroux, Bory & Deslongschamps	G	++			
<i>Pediastrum simplex</i> Meyen	J	+	++	++	+
<i>Pediastrum simplex</i> var. <i>simplex</i> Meyen	J	+	+	+	+
<i>Pediastrum biwae</i> Negoro	J	+			+
<i>Pediastrum simplex</i> var. <i>duodenarium</i> (J.W. Bailey) Rabenhorst	J	+	++	++	++
<i>Pediastrum tetras</i> (Ehrenberg) Ralfs	J	+	+		+
<i>Scenendesmus serratus</i> (Corda) Bohlin	J	++	+++	+++	+++
<i>Scenendesmus acuminatus</i> (Lagerheim) Chodat	J	+	+	+	+
<i>Scenendesmus granulatus</i> West & G.S. West	J	++	+++	++	+++
<i>Scenendesmus denticulatus</i> Lagerheim	J	+			
<i>Scenendesmus intermedius</i> Chodat	J	+			+
<i>Scenendesmus ecornis</i> (Ehrenberg) Chodat	J	+	+	+	+
<i>Scenendesmus quadricauda</i> (Turpin) Brébisson in Brébisson & Godey	J	+	+	++	+++
<i>Scenendesmus spinosus</i> Chodat	J	+	+		
<i>Schroederia spiralis</i> (Printz) Korshikov	X1	+	+		+
Cyanophyceae					
<i>Pseudanabaena catenata</i> Lauterborn	S1	+	+	++	++
<i>Pseudanabaena mucicola</i> (Naumann & Huber-Pestalozzi) Schwabe	S1	+	+	+	+
<i>Chroococcus turgidus</i> (Kützing) Nägeli	Lo	+		++	++
<i>Aphanocapsa grevillei</i> (Berkeley) Rabenhorst	K		+	+	
<i>Merismopedia tenuissima</i> Lemmermann	Lo	+	+	+	+
<i>Microcystis</i> spp.	M	+++	+++	+++	+++
<i>Aphanizomenon</i> spp.	H1				+
Cryptophyceae					
<i>Cryptomonas ovata</i> Ehrenberg	Y	++		+	
<i>Rhodomonas lacustris</i> Pascher & Ruttner in Pascher	X2	+	+	+	+

E-Sur: surface layer (0~0.3 m) in experimental culture system, E-Mid: middle layer (2 m) in experimental culture system, C-Sur: surface layer (0~0.3 m) in control culture system, C-Mid: middle layer (2 m) in control culture system.

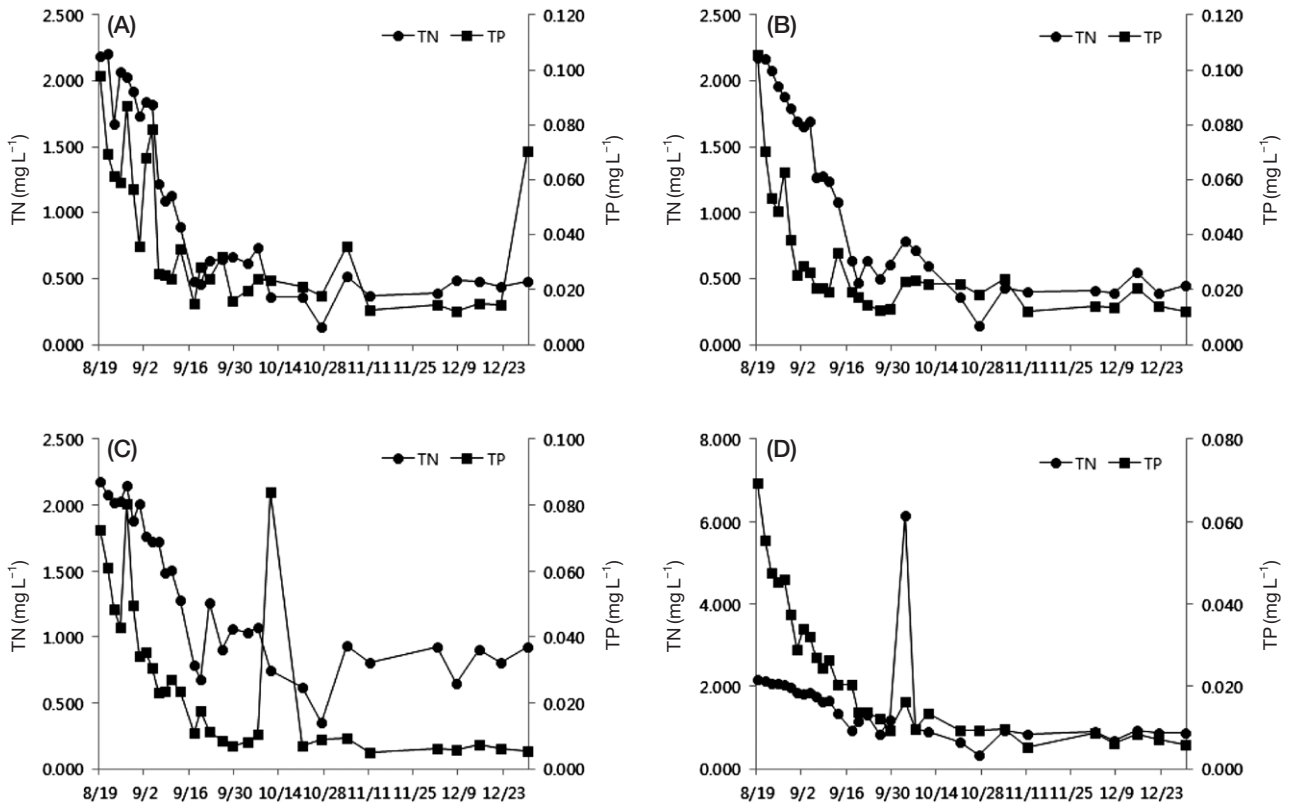


Fig. 2. Variations of nutrient (total nitrogen, total phosphorus) concentration in the enclosed culture system. Experimental culture system: surface layer (A), middle layer (B); Control culture system: surface layer (C), middle layer (D).

W₀ 그룹에는 *Chlamydomonas* spp. 및 *Chlorella* spp.가 대표적인 종들로 확인되었다. 선행 연구들에서 Abonyi *et al.* (2012)은 J 그룹과 M 그룹을 여름철과 가을철에 하천에서 출현하는 대표적인 PFG로 제시하였으며, Kruk *et al.* (2002)은 *Pediastrum*, *Scenedesmus*, *Coelastrum* 및 *Oocystis* 등을 포함한 J 그룹은 알고 부영양화된 담수환경에서 천이를 주도하는 것으로 보고한 바 있다. 본 연구에서 확인된 J 그룹과 M 그룹의 천이 양상은 선행 연구결과들(Kruk *et al.*, 2002; Abonyi *et al.*, 2012)과 유사하였다.

Reynolds *et al.* (2002) 및 Padisák *et al.* (2009)에 따르면 이들 그룹들(M, J, W₀)의 생태적 특성들은 다음과 같다.

J 그룹(*Pediastrum*, *Coelastrum*, *Scenedesmus*, *Antinistrum*, *Tetraedron*, *Tetrastrum*, *Golenkinia*, *Tetrastrum*)은 알고 잘 혼합된 부영양화된 호수 및 하천(하류) 환경에서 주로 서식하며, 낮은 조도에 상대적으로 민감하다. M 그룹(*Microcystis*, *Sphaerocavum*)은 상대적으로 규모가 작은 부영양 및 과영양 수체에서 주로 서식하며, 높은 조도에 내성을 보이는 반면 플러싱(flushing) 및 낮은 조도에 민감하다. W₀ 그룹(*Chlamydomonas*, *Chlorella*, *Pyrobotrys*,

Polytoma)의 경우, 유기물질이 매우 풍부한 하천 및 연못에서 주로 서식한다(Reynolds *et al.*, 2002; Padisák *et al.*, 2009).

본 연구에서 확인된 대표적인 그룹들(M, J, W₀)에 있어서 실험구 표층에서 M (*Microcystis* spp.) 그룹은 총 생체 부피(81.4 mm³ L⁻¹) 중 44.9 mm³ L⁻¹ (55.2%)를 차지하며, 우점하였다(Fig. 4). 이는 실험구 표층의 총인 평균 농도(0.037 mg L⁻¹)가 가장 높고, 부영양화 상태(OECD, 1982)이며, 상대적으로 높은 평균 조도(201.9 μmol m⁻² s⁻¹)와 관련이 있는 것으로 보인다(Table 1).

실험구 표층에서 확인된 평균 TN : TP ratio (<29)와 평균 수온(27°C) 또한 M 그룹의 높은 생체 부피에 영향을 준 것으로 판단된다(Smith, 1983; Davis *et al.*, 2009). 반면에 대조구 표층의 경우 실험구 표층과 유사한 수온과 조도에 불구하고 상대적으로 낮은 총인 농도(0.026 mg L⁻¹) 및 높은 TN : TP ratio (>80)로 인해 M 그룹의 총 생체 부피는 6.4 mm³ L⁻¹로 상대적으로 낮았다(Table 1; Fig. 4). 그의 낮은 조도를 보인 실험구(28.6 μmol m⁻² s⁻¹)과 대조군(34.6 μmol m⁻² s⁻¹)의 각 층층 역시 M 그룹의 생체 부피는

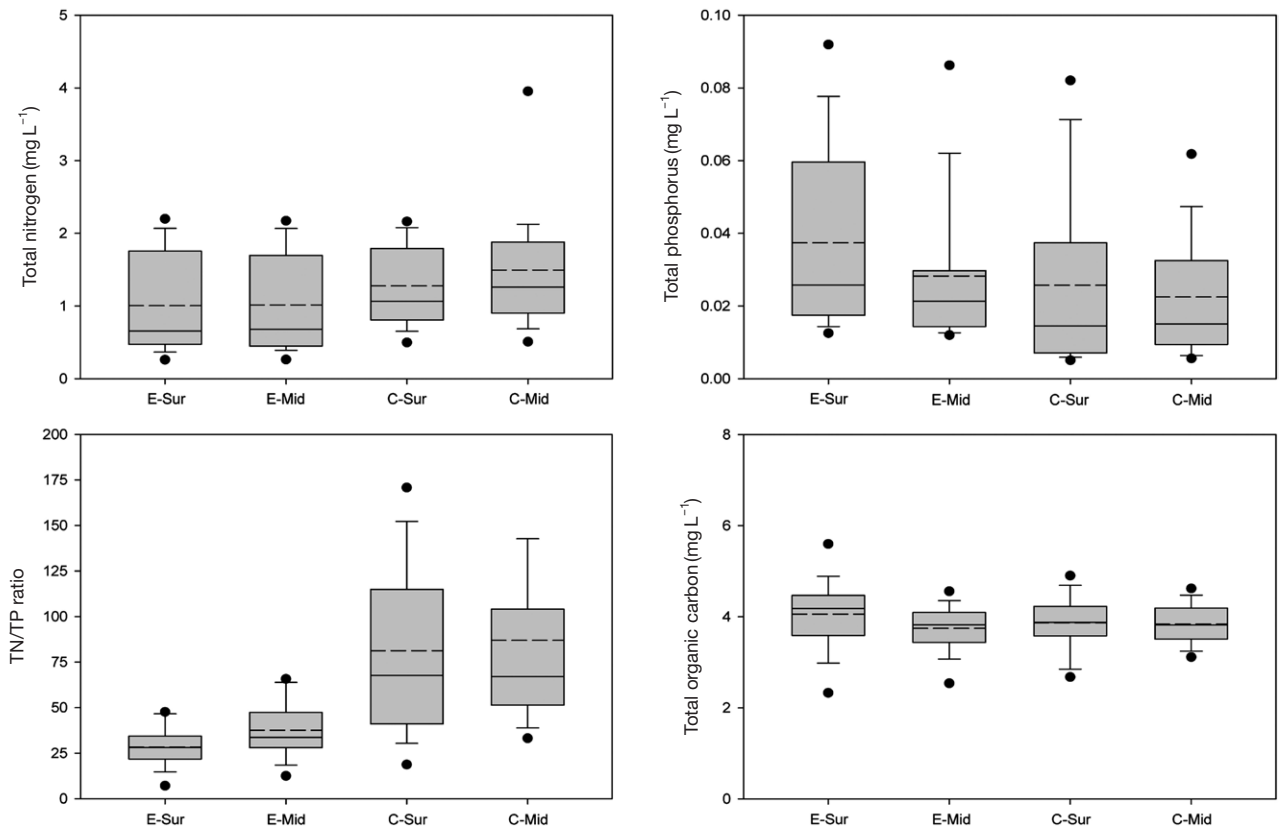


Fig. 3. Box plot of the main environmental factors in the enclosed culture system. Experimental culture system : surface layer (E-Sur), middle layer (E-Mid); Control culture system : surface layer (C-Sur), middle layer (C-Mid). Boxes indicate the 25th to 75th percentiles, the dotted line within the box indicates the mean, the solid line indicates the median, and symbol (●) marks outliers.

낮았다(Table 1; Fig. 4).

Coelastrum spp., *Pediastrum* spp. 및 *Scenedesmus* spp.로 주로 구성된 J 그룹은 실험구 중층(12.8 mm³ L⁻¹, 70.0%), 대조구 표층(11.5 mm³ L⁻¹, 44.7%)과 중층(12.2 mm³ L⁻¹, 79.6%)에서 모두 우점하였다(Fig. 4). Abonyi *et al.* (2012)은 여름철 영양염(NO₃-N)이 증가하는 하천의 하류에서 J 그룹이 대부분 우점하는 것으로 보고하였으며, Crossetti *et al.* (2013)에 따르면 J 그룹은 탁하고 조도가 상대적으로 낮은 혼합된 수환경에서 서식한다. W₀는 M 그룹과 J 그룹에 이어서 실험구와 대조구의 표층에서 각각 14.6 mm³ L⁻¹ (18.0%)와 4.0 mm³ L⁻¹ (15.5%)로 높은 비율을 차지하였다. 본 연구에서 실험구와 대조구의 각 중층에서 J 그룹은 상대적으로 높은 생체 부피를 나타내었으며(Fig. 4), 중층에서 조도 및 PO₄-P를 포함한 P계열의 농도는 상대적으로 낮았으나, 질소 계열의 농도는 높게 나타났다(Table 1; Fig. 3). 따라서, 중층에서 J 그룹의 높은 생체 부피 분포는 낮은 영양염(P)과 낮은 조도에 대한 높은 적응성과 더불어 높은 질소 계열 영양염 농도의 영향으로 생각된다. 그 외, 실험

구 표층에서 총인과 상관성을 보인 *Chlamydomonas*, *Chlorella* 등의 W₀ 그룹은 안정화된 수체를 선호하며(Salmaso *et al.*, 2015), 소형의 세포들로서 성장 속도가 빠른 특징을 지니고 있다(Reynolds, 2006). 이는 안정된 수체 조건을 유지한 실험구와 대조구의 각 표층에서 영양염(총인)의 농도가 상대적으로 높은 실험 초기에 J 및 M 그룹과 함께 높은 생체 부피를 차지하는 데 유리하게 작용한 것으로 판단된다(Figs. 2, 4).

3. 주요인 분석(Principal Component Analysis)

PCFA와 환경요인 간 상관성을 확인하기 위해 PCA (principal component analysis)를 실시하였다(Figs. 5~8). 실험구의 표층에서 axis 1과 axis 2는 전체 변이의 64.27%를 설명해 주었고, axis 1은 TN (0.83), TP (0.62), NO₂-N + NO₃-N (0.86), PO₄-P (0.77), DIN (0.85), 수온 (0.82), pH (-0.62) 및 전도도 (0.82)와 높은 상관성을 보였으며, axis 2는 환경요인들과 뚜렷한 상관성을 보이지 않았다(Fig. 5).

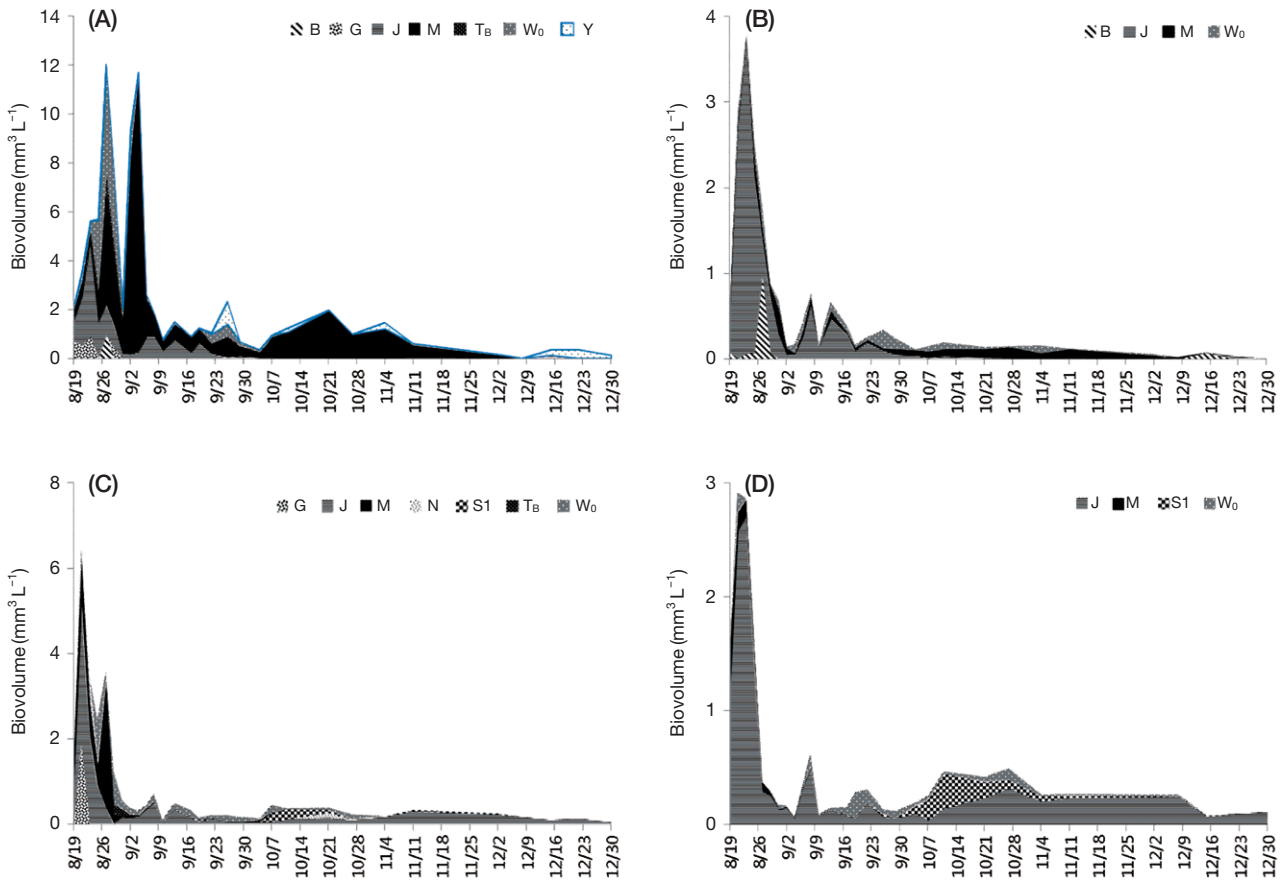


Fig. 4. Variations in the biovolume of phytoplankton functional group. Experimental culture system : surface layer (A), middle layer (B); Control culture system : surface layer (C), middle layer (D).

실험구의 중층에서 axis 1과 axis 2는 전체 변이의 83.79%를 설명한 가운데 axis 1은 TN (0.82), TP (0.72), NO₂-N + NO₃-N (0.83), PO₄-P (0.72), DIN (0.83), 수온 (0.78), pH (-0.80) 및 전도도 (0.75)와 상관성을 보였으며, axis 2는 환경요인들과 뚜렷한 상관성을 보이지 않았다 (Fig. 6). 대조구의 표층에서 axis 1과 axis 2는 전체 변이의 63.06%를 설명한 가운데 axis 1은 TN (0.85), TP (0.70), NO₂-N + NO₃-N (0.89), PO₄-P (0.87), NH₃-N (0.68), DIN (0.90), 수온 (0.73), pH (-0.66) 및 전도도 (0.81)와 상관성을 보였으며, axis 2는 환경요인들과 뚜렷한 상관성을 보이지 않았다 (Fig. 7). 대조구의 중층에서 axis 1은 NO₂-N + NO₃-N (0.50), TP (0.77), PO₄-P (0.71), 전도도 (0.70) 및 pH (-0.63)와 상관성을 보였다 (Fig. 8).

PCA plot에서 실험구 표층, 실험구 중층 및 대조구 표층에서 공통으로 영양염, 수온, pH 및 전도도는 axis 1과 상관성을 보이면서 주요 환경요인으로 나타났다 (Figs. 5~8). 실험구 표층에서 M, J 및 G 그룹은 영양염(질소, 인), 전도

도, 수온, 조도 등과 상관성을 보였으며, 특히, W₀는 총인과 높은 상관성을 보였다 (Fig. 5). 실험구 중층에서 M, W₀ 및 J 그룹은 특히 수온과 밀접한 상관성을 보였으며, 질소 계열 영양염의 영향이 확인되었다 (Fig. 6). 대조구 표층에서 M 그룹은 영양염(질소, 인), 전도도, 수온 및 조도와 상관성을 보였다 (Fig. 7). 대조구 중층의 경우, M 그룹은 TP, PO₄-P 및 전도도와 높은 상관성을 보인 반면, J 그룹은 NO₂-N + NO₃-N, 수온 및 탁도와 상대적으로 높은 상관을 나타내었다 (Fig. 8).

본 연구에서 PFG 중 M 그룹은 영양염과 더불어 수온 및 조도와 높은 상관성을 보였으며, 특히 실험구와 대조구의 각 표층에서 조도의 영향을 받는 것으로 나타났다. 이는 앞서 설명한 수온 및 영양염 등의 성장 적정 조건 이외에 상대적으로 조도가 높은 표층에서 *Microcystis* spp.가 포함된 M 그룹의 생체 부피가 더 증가할 수 있음을 보여준다 (Figs. 4~8). 선행연구에 따르면 *Microcystis*는 강한 조도(자외선) 조건에서 카로티노이드(carotenoid) 색소

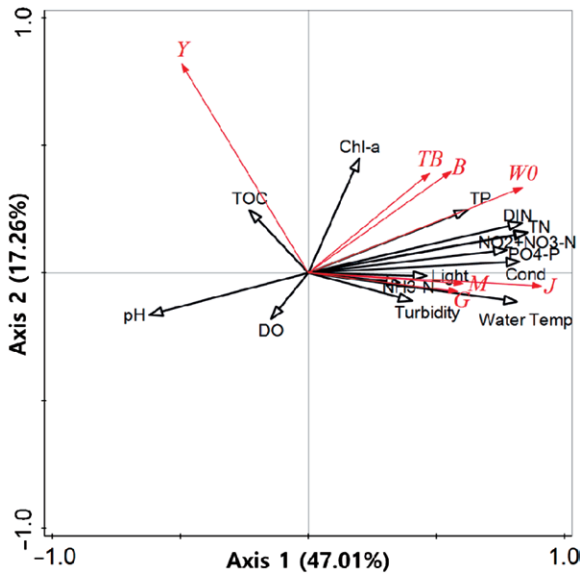


Fig. 5. Biplots of the PCA based on the biovolume of functional groups in the surface layer of experimental culture system.

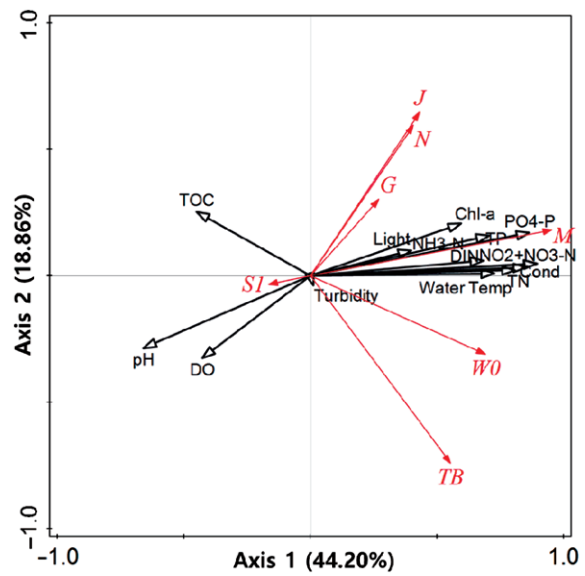


Fig. 7. Biplots of the PCA based on the biovolume of functional groups in the surface layer of control culture system.

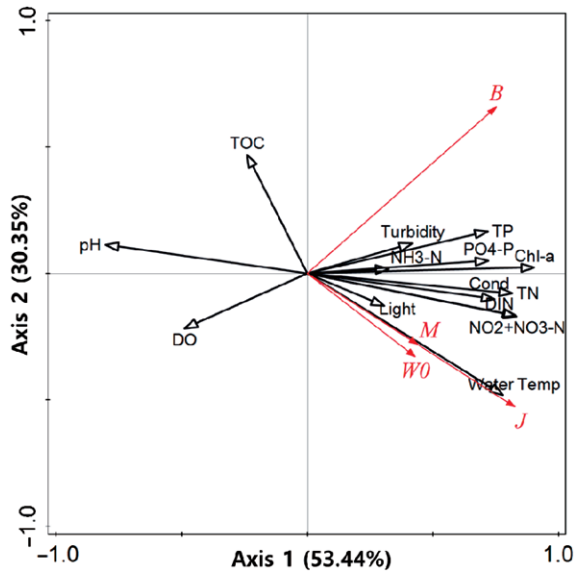


Fig. 6. Biplots of the PCA based on the biovolume of functional groups in the middle layer of experimental culture system.

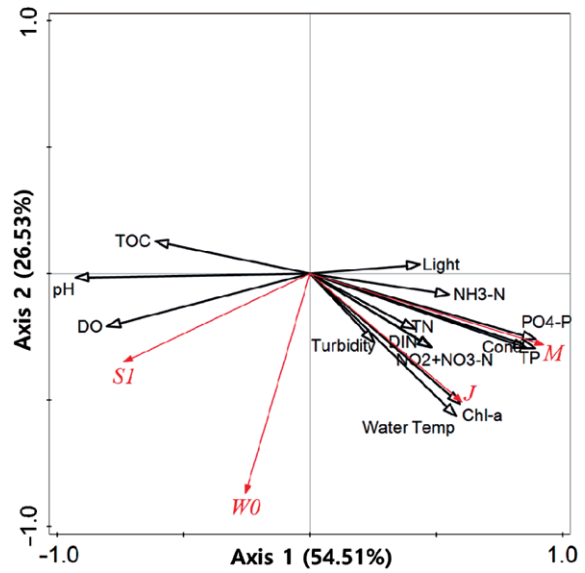


Fig. 8. Biplots of the PCA based on the biovolume of functional groups in the middle layer of control culture system.

량을 증가시키므로써 세포 자체를 보호함과 동시에 높은 광합성 효율을 지닌다(Paerl *et al.*, 1983). 따라서 M 그룹 (*Microcystis* spp.)은 여름철에 조도가 상대적으로 높은 수계의 표층에서 생체 부피 증가(성장)가 가능하다.

M 그룹과 함께 높은 생체 부피를 나타낸 J 그룹은 PCA에서 질소 계열의 영양염 및 탁도와 상관성을 나타내었다(Figs. 5~8). J 그룹은 얇고 탁도가 높은 부영양화 수계에

서 발생하는 것으로 알려져 있다(Padisák *et al.*, 2003). 또한, J 그룹은 낮은 영양염(SRP)과 낮은 조도에서 높은 분포를 보이는 것으로 보고 되었다(Crossetti *et al.*, 2013). PCA plot 확인 결과, 대부분의 영양염은 주요 PFG(M, J, W₀)의 성장 및 천이에 영향을 주는 것으로 확인되었다. 이는 이들 그룹이 유기물질 풍부하고 부영양화된 수역을 선호한다는 Padisák *et al.*(2009)의 이론을 잘 반영해 준다.

이번 연구를 통해 다음의 결과들을 도출하였다.

첫째, 형태학적 분류 종들을 생태학적 특성들에 기초하여 그룹화한 식물플랑크톤 기능그룹(phytoplankton functional group)을 적용하여 주어진 환경 조건에서 식물플랑크톤의 천이와 관련된 생태학적 특성을 확인할 수 있었다.

둘째, M, J 및 W₀ 그룹이 주도한 PFG의 천이 양상은 영양염, 수온, 조도 등의 주요 환경인자들에 따라 뚜렷한 차이를 보였으며, 이는 주어진 서식(환경)조건을 이해하는 특정 지표로서 PFG 그룹의 적용 가능성을 보여 주었다.

셋째, 퇴적물과 원수가 포함된 환경(실험)조건에서 영양염(인) 농도가 더 높은 가운데 PFG 생체 부피는 매우 높고 그 천이 패턴은 더 뚜렷하였다. 이는 퇴적물에서 기인하는 영양염(특히 P)의 증가가 내부순환(internal cycling)을 통해 식물플랑크톤의 성장 제한요인으로 작용할 수 있음을 의미한다.

결과적으로, 본 연구결과의 실험적 의의는 현장원수와 퇴적물이 주입된 실내 배양장치 실험을 통해 실제 현장에서 계절적인 출현 양상을 보이는 주요 분류학적 종들의 천이재현을 확인함과 동시에 환경인자들의 변화에 따른 특정 식물플랑크톤 기능그룹들(PFGs)의 천이 특성을 제시했다는 점에서 찾을 수 있다. 배양장치 실험에 기초한 이번 PFG 연구결과가 국내 수계의 다양한 식물플랑크톤 천이 양상을 대표할 수는 없으나, 본 연구에서 시도된 PFG 기법의 적용 결과는 향후 현장에서 남조류를 포함한 조류의 주요 천이 패턴을 새롭게 이해하는 참고자료로 활용될 수 있을 것이다.

적 요

2016년 8월 19일부터 12월 31일까지 현장원수와 퇴적물이 주입된 현장 배양장치 실험을 통해 환경요인의 영향에 따른 식물플랑크톤 기능그룹(phytoplankton functional group, PFG)의 천이 특성을 연구하였다. 본 연구에서 확인된 식물플랑크톤은 총 27속 50종이었으며, 분류군별로는 녹조류 30종, 규조류 11종, 남조류 7종, 편모조류 2종으로 나타났다. 실험구에서 총 25속 47종(녹조류 30종, 규조류 9종, 남조류 6종, 편모조류 2종), 대조구에서 총 23속 45종(녹조류 26종, 규조류 10종, 남조류 7종, 편모조류 2종)의 식물플랑크톤이 각각 확인되었다. 식물플랑크톤 기능그룹(PFG)은 총 19개(B, C, D, F, G, H1, J, K, Lo, M, MP, N, P, S1, T_B, W₀, X1, X2, Y)로 확인되었으며, 실험구와 대조구에서는 H1을 제외하고 18개의 PFG가 모두 출현하였다.

생체 부피(biovolume)에 기초했을 때 W₀, J 및 M 그룹은 원수만 주입된 대조구와 비교하여 원수와 퇴적물이 주입된 실험구에서 영양염의 내부순환(internal cycling)의 영향으로 더 높은 생체부피를 보이면서 뚜렷한 천이 양상을 나타내었다.

PCA 분석 결과에 기초할 때 PFG의 천이 양상은 영양염, 수온 및 조도 등의 주요 환경인자들과의 상관성에 따라 뚜렷한 차이를 나타내었다. 결론적으로 본 연구에서 PFG를 적용하여 주어진 환경조건에서 식물플랑크톤 적응 및 천이(성장) 특성을 확인할 수 있었으며, PFG는 향후 국내 수계의 식물플랑크톤 천이를 이해하기 위한 새로운 방법이 될 수 있을 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 2017년 국립환경과학원 조사연구사업 「유해남조류 측정방법 개선 연구(II)」의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Abonyi, A., M. Leitão, A.M. Lançon and J. Padisák. 2012. Phytoplankton functional groups as indicators of human impacts along the River Loire (France). *Hydrobiologia* **698**(1): 233-249.
- Crossetti, L.O., V. Becker, L.S. Cardoso, L.R. Rodrigues, L.S. Costa and D. Motta-Marques. 2013. Is phytoplankton functional classification a suitable tool to investigate spatial heterogeneity in a subtropical shallow lake? *Limnologia* **43**: 157-163.
- Davis, T.W., D.L. Berry, G.L. Boyer and C.J. Gobler. 2009. The effects of temperature and nutrients on the growth and dynamics of toxic and non-toxic strains of *Microcystis* during cyanobacterial blooms. *Harmful Algae* **8**: 715-725.
- Devercelli, M. and I. O'Farrell. 2013. Factors affecting the structure and maintenance of phytoplankton functional groups in a nutrient rich lowland river. *Limnologia* **43**: 67-78.
- Domingues, R.B., A. Barbosa and H. Galvão. 2005. Nutrients, light and phytoplankton succession in a temperate estuary (the Guadiana, south-western Iberia). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **64**: 249-260.
- Grover, J.P. and T.H. Chrzanowski. 2006. Seasonal dynamics of phytoplankton in two warm temperate reservoirs: association of taxonomic composition with temperature. *Journal of Plankton Research* **28**: 1-17.

- Hillebrand, H., C.-D. Dürselen, D. Kirschtel, U. Pollinger and T. Zohary. 1999. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. *Journal of Phycology* **35**: 403-424.
- Kruk, C., N. Mazzeo, G. Lacerot and C.S. Reynolds. 2002. Classification schemes for phytoplankton: a local validation of a functional approach to the analysis of species temporal replacement. *Journal of Plankton Research* **24**(9): 901-912.
- Martinet, J., S. Descloux, P. Guédant and F. Rimet. 2014. Phytoplankton functional groups for ecological assessment in young sub-tropical reservoirs: case study of the Nam-Theun 2 Reservoir, Laos, South-East Asia. *Journal of Limnology* **73**(3): 536-550.
- Ministry of Environment (MOE). 2017. Standard Methods for the Examination Water Quality. Ministry of Environment. 1507pp.
- OECD. 1982. Eutrophication of Waters, Monitoring, Assessment and Control. OECD, Paris. 154pp.
- Olenina, I. 2006. Biovolumes and Size-Classes of Phytoplankton in the Baltic Sea. Baltic Marine Environment Protection Commission, Helsinki. 144pp.
- Padisák, J., G. Borics, G. Fehér, I. Grigorszky, I. Oldal, A. Schmidt and Z. Zámóné-Doma. 2003. Dominant species, functional assemblages and frequency of equilibrium phases in late summer phytoplankton assemblages in Hungarian small shallow lakes. *Hydrobiologia* **502**: 157-168.
- Padisák, J., L.O. Crossetti and L. Naselli-Flores. 2009. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates. *Hydrobiologia* **621**: 1-19.
- Paerl, H.W., J. Tucker and P.T. Bland. 1983. Carotenoid enhancement and its role in maintaining blue-green algal (*Microcystis aeruginosa*) surface blooms. *Limnology and Oceanography* **28**(5): 847-857.
- Reynolds, C.S. 2006. The Ecology of Phytoplankton. Cambridge University Press, New York. 535pp.
- Reynolds, C.S., V. Huszar, C. Kruk, L. Naselli-Flores and S. Melo. 2002. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research* **24**(5): 417-428.
- Salmaso, N., L. Naselli-Flores, L. Cerasino, G. Flaim, M. Tolotti and J. Padisák. 2015. Phytoplankton Responses to Human Impacts at Different Scales: 16th Workshop of the International Association of Phytoplankton Taxonomy and Ecology (IAP). Springer, New York. 386pp.
- Smith, V.H. 1983. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton. *Science* **221**: 669-671.
- Sommer, U. 1985. Seasonal Succession of Phytoplankton in Lake Constance. *BioScience* **35**(6): 351-357.
- Søndergaard, M., J.P. Jensen and E. Jeppesen. 1999. Internal phosphorus loading in shallow Danish lakes. *Hydrobiologia* **191**: 139-148.
- Spears, B.M., L. Carvalho, R. Perkins, A. Kirika and D.M. Paterson. 2007. Sediment phosphorus cycling in a large shallow lake: spatio-temporal variation in phosphorus pools and release. *Hydrobiologia* **584**: 37-48.
- Tan, C., H. Pei, W. Hu, D. Hao, M.A. Doblin, Y. Ren, J. Wei and Y. Feng. 2015. Variation of phytoplankton functional groups modulated by hydraulic controls in Hongze Lake, China. *Environmental Science and Pollution Research* **22**(22): 18163-18175.