

<https://doi.org/10.15433/ksmb.2018.10.2.091>

ISSN 2383-5400 (Online)

## 미세조류 배양을 이용한 부영양호 내 수질 개선 기술 개발

# Development of Improving Water Quality in Eutrophic Lake Using Microalgal Cultivation

김기현<sup>1,†</sup>, 강성모<sup>1,†</sup>, 조용희<sup>1</sup>, 전상현<sup>1</sup>, 김준호<sup>1</sup>, 박한울<sup>1,2</sup>, 이윤우<sup>1,2</sup>, 정정호<sup>1,2</sup>, 임상민<sup>1,2</sup>, 이철균<sup>1,2,\*</sup>

Ki-Hyun Kim<sup>1</sup>, Sung-Mo Kang<sup>1</sup>, Yonghee Cho<sup>1</sup>, Sanghyun Jeon<sup>1</sup>, Jun-Ho Kim<sup>1</sup>, Hanwool Park<sup>1,2</sup>, Yunwoo Lee<sup>1,2</sup>, Jeongho Jeong<sup>1,2</sup>, Sang-Min Lim<sup>1,2</sup>, Choul-Gyun Lee<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>해양바이오에너지 생산기술개발연구센터, 인천광역시 미추홀구 인하로 100, 22212, 대한민국

<sup>2</sup>인하대학교 생물공학과, 인천광역시 미추홀구 인하로 100, 22212, 대한민국

<sup>1</sup>National Marine Bioenergy R&D Consortium, Inha University, Incheon-si 22212, Republic Korea

<sup>2</sup>Department of Biological Engineering, Inha University, Incheon-si 22212, Republic Korea

† Both authors contributed equally to this work

(Received 30 November 2018, Revised 21 December 2018, Accepted 24 December 2018)

**Abstract** There are many eutrophic lakes by point and non-point pollution sources such as industrial waste water, domestic raw sewage, and mucks. The eutrophic lakes not only cause algal blooms but also destroy the ecosystem in the lakes due to high nutrient concentrations. The purpose of this study was to improve water quality in eutrophic lakes by cultivating microalgae using photobioreactors (PBRs) with selectively permeable mesh (SPM), supplying nutrients in the lake and inhibiting cell leakage by diffusion and water permeability. *Chlorella vulgaris*, was cultivated using PBRs with SPM installed in Inkyung Lake located in Inha university, Incheon, Korea. When cultivating *C. vulgaris*, 8.3 g/m<sup>2</sup>/day of average biomass productivity was obtained at 3 days. Furthermore, concentrations of total nitrogen and phosphorus were reduced by 35.7% and 84.2%, respectively, compared to initial condition and water quality in eutrophic lake was improved to oligotrophic environment. These results suggest that microalgal cultivation using PBRs with SPM in the lake could produce microalgal biomass as well as improve water quality by decreasing nutrient concentrations.

**Keywords :** Eutrophication, Algal bloom, Microalgae, Photobioreactor, *Chlorella vulgaris*

## 서 론

국내 많은 호수들은 규모에 상관없이 시기에 따라

부영양화가 진행되고 있다. 호수의 부영양화란, 산업 폐수 및 생활하수, 가축의 배설물 등이 호수 내 수중생태계에 유입되면서 질소와 인과 같은 영양소

\* Corresponding author  
Phone: +82-32-872-7518 Fax: +82-32-873-7518  
E-mail: [leecg@inha.ac.kr](mailto:leecg@inha.ac.kr)

This is an open-access journal distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

가 증가하게 되어 조류가 급속하게 증식하는 현상을 말한다 [1]. 이러한 부영양화는 최근 들어 인간의 인위적인 활동으로 조류의 발생 및 증식이 더욱 가속되어 상수 뿐만 아니라 산업, 공업용수의 수원으로 도 어려움을 겪고 있는 실태이다.

부영양화에 의한 조류의 과다한 번식은 호수 표면의 햇빛을 차단하여 해조류와 같은 수생식물의 생장을 방해하고, 조류의 산소소비량이 증가하여 호수 내 서식하는 동식물의 생존을 위협한다 [2]. 이와 더불어, 용존산소 부족으로 혐기성 세균에 의한 부패가 진행되고, 그로 인한 악취 및 독성물질이 생성되어 호수 수질을 악화시켜 큰 문제가 되고 있는 실정이다.

부영양화에 의한 조류증식을 방지하기 위해서 호수 내 유입되는 질소와 인의 양을 줄이는 것이 매우 중요하다. 특히 인 (phosphorus)은 조류 성장의 제한인자 이면서 호수 부영양화 정도의 척도로 사용되는 영양소로, 호수 내 인의 함량을 줄이고 호수로 유입되는 인을 차단하는 것은 반드시 필요하다 [3-7]. 호수로 직접 유입되는 점오염원 (point pollution source)과 강수에 의해 유입되는 비점오염원 (non-point pollution source)에 의해 증가되는 인을 감소시켜 호수 내 총인의 농도를 부영양화 기준 농도인 0.035 mg/L 이하의 수준을 유지하는 것이 가장 중요하다 (Table 1).

Table 1. Eutrophic criteria for water quality in lake.

Condition	T-P (mg/L)	T-N (mg/L)
Ultraoligotrophic	< 0.005	< 0.20
Oligotrophic	0.005 ~ 0.01	0.20 ~ 0.40
Mesotrophic	0.010 ~ 0.035	0.30 ~ 0.65
Eutrophic	0.035 ~ 0.10	0.65 ~ 1.50

본 연구는 센터에서 개발한 반투과성막 장착 광생물반응기 (selectively permeable mesh photobioreactor, SPM-PBR)를 이용하여 인하대학교 내 위치한 인경호의 수질 개선을 목적으로 수행되었다. 연구센터에서 개발한 반투과성막 장착 광생물반응기는 반응기 내 성장하는 미세조류는 통과하지 못하고 투수 또는 확산에 의해 외부에 존재하는 영양소를 공급하여 미세조류를 보다 효율적으로 배양할 수 있는 반응기이다 [8-11]. 이 반응기는 호수 내 유입되는 점오염원으로 배양액으로 사용하여 점오염원 내 영양소를 효과적으로 제거할 수 있고, 비점오염원으로 증가된 호

수 내 영양소를 반응기 내로의 투수 및 확산을 통해 미세조류 배양에 사용하며 영양소의 농도를 줄일 수 있을 것이라 사료된다.

따라서, 본 연구에서는 이와 같은 광생물반응기의 장점을 활용하여 인하대학교 내 부영양호인 인경호에 반투과성막 장착 광생물반응기를 설치하여 호수 내 영양소 농도의 변화 및 수질 개선 가능성을 확인해보고자 하였다.

재료 및 방법

호수의 물리적 특성 및 수질 개선 방법

인하대학교 내 위치한 인경호는 3,700 m<sup>2</sup>의 면적에 평균 수심 0.7 m, 약 2,600 m<sup>3</sup>의 저수량이 존재하는 인공호이다. 인경호 내로 유입되는 점오염원은 2곳이며, 이는 주로 호수 내 수위 조절 용도로 사용된다. Figure 1은 이 호수의 단면적으로 점오염원 위치 (A, B)와 광생물반응기 설치 지점 (point 1, 2), 호수 내 수질 측정을 위한 시료 채집 위치 (point 3 ~ 6)를 표시하였다.

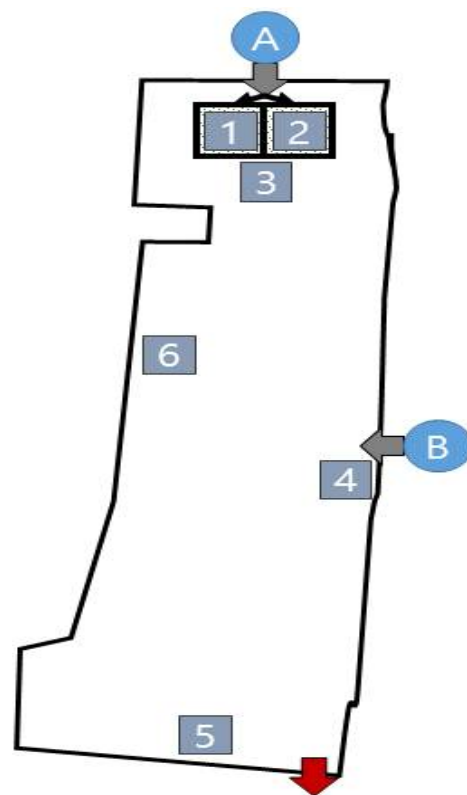


Figure 1. A cross sectional diagram of Inkyung Lake. Point A and B: Inflow of point pollution source; Point 1 and 2: Installation of photobioreactors; Point 3 ~ 6: Sampling point.

호수의 수위는 강수량과 증발량에 의해서 결정되고, 앞서 언급한 바와 같이 점오염원은 호수 내 수위를 일정 수준으로 조절하기 위해 유입된다. 부영양화에 의한 녹조가 주로 발생하는 4 ~ 10월 동안 인천 지역의 3년간 강수량과 증발량을 확인한 결과, 강수량이 비교적 많은 7, 8월을 제외한 기간에는 강수량보다 증발량이 많은 것을 알 수 있었고 (Table 2), 호수의 면적에 따른 평균 증발량은 약 2.6 kL/day인 것을 확인하였다. 따라

서, 호수 내 유입되는 점오염원 2곳 중 B 위치의 유입은 차단하고 A 위치에서 유입되는 점오염원을 평균 2.6 kL/day로 호수로 공급한다면 인경호의 수위는 유지되며, 호수에 유입되는 영양소의 양을 줄일 수 있다.

이와 더불어, 인경호 내 유입되는 점오염원과 호수 내 영양분을 제거하기 위해, 호수 내 반투과성막을 장착한 반응기를 설치한 후 미세조류를 배양하여 반응기 및 호수 내 영양분의 변화를 확인하였다.

Table 2. Meteorological data in Incheon.

	April	May	June	July	August	September	October
Precipitation (mm/day)	2.7	3.5	2.4	10.0	8.3	1.1	2.3
Evaporation (mm/day)	4.4	5.4	5.4	4.4	5.0	4.5	3.4
Insolation (MJ/m <sup>2</sup> )	15.9	18.4	19.0	15.7	15.8	13.9	10.1

### 광생물반응기 제작 및 설치

광생물반응기를 지지할 수 있는 HDPE (high density polyethylene)으로 구성된 부유형 지지체를 Figure 2와 같이 설계하여 제작 및 설치하였다. 설치된 부유형 구조물에 PE (polyethylene)로 이루어진 반투과성막을 장착한 광생물반응기를 설치하였다. 광

생물반응기의 가로와 세로의 길이는 4 m이며, 최대 액체 수용 부피는 7 kL로 제작되었다. 반응기 내 미세조류의 광합성 효율을 높이기 위해 반응기 내부에 일정 수준의 부력과 배양액 혼합을 위한 태양광 펌프를 설치하였다 (Figure 3).

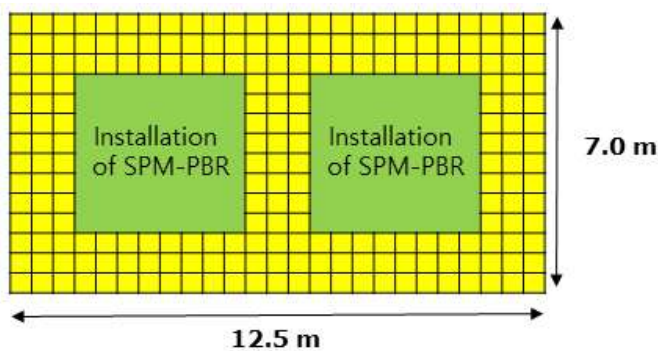


Figure 2. An assembly drawing of a floating structure in Inkyung Lake.



Figure 3. Selectively permeable mesh photobioreactors (SPM-PBRs) installed in Inkyung lake.

### 미세조류 배양 조건

호수 내 광생물반응기에 접종하기 위해, *Chlorella vulgaris*를 실험실 수준에서 종균 배양하였다. 배양에 사용된 배지는 BG-11 배지를 사용하였고, 배지의 조성은 Table 3과 같다 [12]. *C. vulgaris*의 종균 배양 유지 조건은 100 L flat-plate photobioreactor (FP-PBR)에 형광등 (fluorescent lamps)을 이용하여 광도 150

$\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ 를 조사하고, 2% CO<sub>2</sub>의 공기를 0.1 vvm의 속도로 폭기하였다.

호수 내 영양소를 제거하기 위한 미세조류 배양 조건은 2번 위치에서 유입되는 점오염원을 배양액으로 하여 설치된 광생물반응기 2대에 각각 3.5 kL씩 유입시켜 *C. vulgaris*를 접종하여 배양하였다.

**Table 3.** Composition of stock solutions for BG-11 liquid medium.

Stock	Ingredients	Amount	
100X BG-11	NaNO <sub>3</sub>	149.60 g/L	
	MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	7.49 g/L	
	CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	3.60 g/L	
	Citric acid	0.60 g/L	
	0.25 M Na·EDTA, pH 8.0	1.12 mL/L	
	Trace minerals	100.00 mL/L	
	Deionized water	up to 1 L	
	Trace minerals	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	2.860 g/L
		MnCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	1.810 g/L
		ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.222 g/L
Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O		0.390 g/L	
CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O		0.079 g/L	
Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O		0.0494 g/L	
Deionized water		up to 1 L	
1,000X		Ammonium iron (III) citrate, brown	0.60 g/100 mL
1,000X		Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	2.00 g/100 mL
1,000X		K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	3.05 g/100 mL

**세포 농도 측정**

광생물반응기 내 세포 농도를 측정하기 위해 건조 세포 중량을 분석하였다. 건조 세포 중량은 시료 1 L를 채취하여 4,200 rpm으로 10분 원심분리 후 고형물을 회수하여 증류수로 1회 세척하였다. 세척된 고형물을 다시 3,800 rpm으로 5분 간 원심분리 후, 얻어진 고형물을 80°C에서 24시간 건조하여 무게를 측정하였다.

**호수 내 수질 분석**

호수 및 호수에 설치된 광생물반응기 내 총질소와 총인의 농도를 확인하기 위해, point 1 ~ 6번 위치에서 시료 1 L를 채취하여 그 중 10 mL를 0.2 µm cellulose acetate syringe filter (Sartorius Minisart, Hannover, Germany)를 이용하여 여과 후, 자동수질분석기 (Zellweger : LACHAT, QuikChem 8500 S2)를 사용하여 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>x</sub>-N, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P를 분석하였다.

**결 과**

**점오염원 유입량 및 영양소 분석**

호수의 부영양화를 일으키는 요인 중 가장 높은 비중을 차지하는 요인은 점오염원을 통한 질소와 인과 같은 영양분의 공급으로, 점오염원의 유입량 및 점오염원 내 영양소의 농도 분석이 매우 중요하다. A 위치에서 유입되는 점오염원은 평균 14 kL/day이며, Table 4와 같이 인경호로 유입되는 점오염원의 수질은 총인의 경우 0.054 mg/L, 질소의 경우 암모니아성 질소와 질산성 질소를 포함하여 6.9 mg/L의 매우 높은 농도를 나타낸다. 이는 부영양화의 기준을 초과하는 농도로 호수의 부영양화를 막기 위해 점오염원의 유입량을 최소화할 필요가 있다.

**Table 4.** Flow rate and water quality in point pollution source.

Location	Flow rate (kL/day)	T-P (mg/L)	T-N (mg/L)
Point A	14.0	0.054	6.9

**광생물반응기를 이용한 미세조류 배양 및 호수 내 영양소 변화 관찰**

광생물반응기를 이용하여 미세조류 배양 시 점오염원 및 호수 내 영양소의 변화를 확인하고자 인경호에 설치된 광생물반응기 2대에 A 위치에서 유입되는 점오염원을 이용하여 *C. vulgaris*를 배양하고 세포 농도 및 영양소의 변화를 확인하였다. 초기 접종 농도 0.007 gDCW/L로 접종하였으며, 2대의 광생물반응기 모두 3일까지 성장하며 평균 0.12 gDCW/L의 농도까지 증가하였으며, 평균 8.4 g/m<sup>2</sup>/day의 바이오매스 생산성을 얻을 수 있었다 (Figure 4). 3일부터 7일까지 세포의 농도가 변함없이 유지된 이유는 반응기 내 질소와 인의 농도가 초기에 각각 3.6, 0.02 mg/L의 수준에서 극빈영양화 (ultraoligotrophic) 기준보다 낮은 0.062, 0.0036 mg/L로 급격히 감소하면서 세포 성장에 영향을 미친 것으로 사료된다 (Figure 5).

광생물반응기 내 미세조류 배양에 의해 인경호 내 수질 변화를 확인하기 위해, 3 ~ 6번 위치에서 시료를 채취하여 질소와 인의 농도를 확인해 본 결과

(Figure 6, 7), 총질소의 농도는 초기 부영양화 수준인 0.84 mg/L에서 중영양화 수준의 0.54 mg/L로 감소하였으며, 총인의 농도는 0.038 mg/L에서 빈영양화 수준인 0.006 mg/L까지 감소하였다. 이는 반투과성막이 장착된 광생물반응기를 이용하여 미세조류 배양시, 반응기 내 영양분을 제거할 수 있을 뿐만 아니라 호수 내 존재하는 영양분까지 감소시킬 수 있다는 결과를 나타낸다.

위 결과에서 반투과성막 장착 광생물반응기 내외에 질소와 인의 농도 구배가 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 반응기 내 미세조류의 성장이 정체기(stationary phase)로 유지되며 사용되는 질소와 인의 소비속도가 광생물반응기 내로 유입되는 물질전달 속도 ( $6.1 \pm 0.2 \times 10^{-4}$  m/min)보다 높아 광생물반응기 내 질소와 인의 농도가 호수 내 농도보다 낮은 수준으로 나타나는 것으로 사료된다.

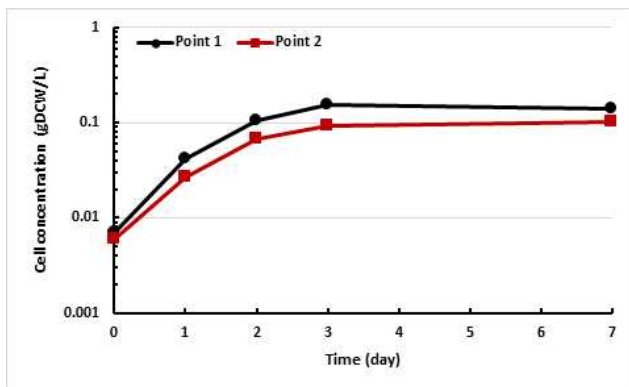


Figure 4. Growth curve of *Chlorella vulgaris* cultivated in SPM-PBRs.

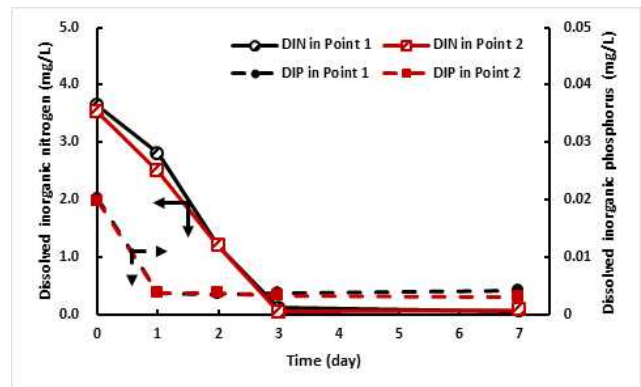


Figure 5. Nitrogen and phosphorus concentrations in SPM-PBRs.

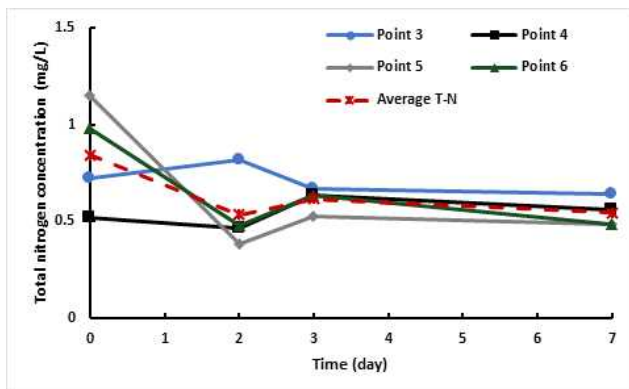


Figure 6. Total nitrogen concentration of sampling points in Inkyung Lake.

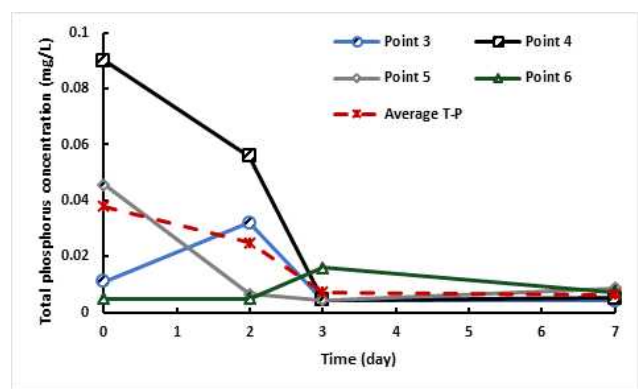


Figure 7. Total phosphorus concentration of sampling points in Inkyung Lake.

## 고 찰

호수의 부영양화는 녹조 현상을 발생시킬 뿐만 아니라 호수 내 생태계를 파괴하고, 이와 더불어 상수원으로서의 활용 또한 위협하고 있다. 이를 해결하기 위해 호수 내 영양소를 효율적이면서 효과적으로 제거할 수 있는 기술 또는 공정 개발이 필요하다. 본 연구에서는 연구센터에서 개발한 반투과성막 장착 광생물반응기를 이용하여 호수에 유입되는 점오염원의 영양소와 비점오염원을 통해 증가되는 호수

내 영양소를 이용해 미세조류 배양함으로써 호수 내 수질을 개선하고 이를 이용한 바이오매스를 생산하는 기술을 개발하고자 연구를 수행하였다. 그 결과, 부영양화에 큰 영향을 미치는 호수 내 질소와 인의 농도를 약 35.7%, 84.2% 감소시켜 초기 부영양화 수준에서 배양 후 빈영양화 수준까지 수질을 개선하였고, 그와 동시에 미세조류 배양을 통해 바이오매스를 생산할 수 있었다.

본 연구 결과를 토대로 부영양화 호수 수중 내 영양소의 농도는 부영양화 기준보다 낮은 수준으로 감소시킬 수 있지만, 호수 내 녹조 발생을 억제하기 위해서는 지속적인 영양분 제거 및 관리가 필요하다. 호수 내 유입되는 유기물 혹은 퇴적물은 호수에 침적되고, 침적물 내 존재하는 영양염류는 수중 내 농도에 매우 큰 영향을 미치게 된다 [13]. 따라서, 일시적인 수중 내 영양소 농도의 감소는 녹조의 발생 및 생장을 완전히 억제할 수 없으므로 점오염원을 통해 유입되는 영양소 제거는 물론 호수 내 지속적으로 생성되는 영양염류를 제거 및 관리해주는 것이 중요하다.

## 결 론

본 연구에서는 부영양화된 호수로 유입되는 점오염원 내 영양소 및 호수 내 존재하는 영양소의 농도를 감소시켜 호수의 수질을 개선시키고자 하였고, 이에 대한 방법으로 반투과성막 장착 광생물반응기를 부영양호에 설치하여 미세조류를 배양하였다. 본 연구의 결과로, 유입되는 점오염원을 배양액으로 이용하여 미세조류를 배양하였을 때, 점오염원 내 존재하는 영양소를 사용하여 평균 8.3 g/m<sup>2</sup>/day의 바이오매스 생산성을 나타내었고, 부영양화 수준인 질소 0.84 mg/L, 인 0.038 mg/L의 호수 내 영양소 농도를 각각 35.7%, 84.2% 감소시켜 빈영양호 수준까지 수질을 개선되었다. 본 연구 결과를 통해 호수 내 반투과성막 장착 광생물반응기를 이용한 미세조류 배양은 호수 내 유입되는 점오염원의 영양소를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 호수 내 존재하는 영양소 농도를 감소시켜 호수의 수질을 개선시키는 기술로 활용될 수 있을 것이라 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 해양수산부의 재원으로 해양수산생명공학기술개발 (Project No.: 200255), 해양미세조류이용 바이오디젤 생산기술 개발) 연구개발비 지원과 2018년 해양에너지 융복합 인력양성 사업에 의해 수행되었습니다.

## References

1. Smith, V. H. and Schindler, D. W. 2009. Eutrophication science: where do we go from here? *Trends Ecol. Evol.* **24**, 201-207.
2. Karjalainen, H., Seppala, S., and Walls, M. 1998. Nitrogen, phosphorus and daphnia grazing in controlling phytoplankton biomass and composition - an experimental study. *Hydrobiologia* **363**, 309-321.
3. Golterman, H. L. 1988. Chlorophyll-phosphate relationship, a tool for water management. *Algae and the Aquatic Environment, Biopress* 205-224.
4. Lewis, W. H., Wurtsbaugh, W. A., and Paerl, H. W. 2011. Rationale of control of anthropogenic nitrogen and phosphorus to reduce eutrophication of inland waters. *Environ. Sci. Technol.* **45**, 10300-10305.
5. Schelske, C. L. 2009. Eutrophication: focus on phosphorus. *Science* **324**, 722.
6. Schindler, D. W. 1974. Eutrophication and recovery in experimental lakes - implications for lake management. *Science* **184**, 897-899.
7. Sterner, R. W. 2008. On the phosphorus limitation paradigm for lakes. *Int. Rev. Hydrobiol.* **93**, 433-445.
8. Kim, Z.-H., Park, H., and Lee, C.-G. 2016. Seasonal assessment of biomass and fatty acid productivity by *Tetraselmis* sp. in the ocean using semi-permeable membrane photobioreactor. *J. Microbiol. Biotechnol.* **26**, 1098-1102.
9. Kim, Z.-H., Park, H., Ryu, Y., Shin, D., Hong, S., Tran, H., Lim, S., and Lee, C.-G. 2015. Algal biomass and biodiesel production by utilizing the nutrients dissolved in seawater using semi-permeable membrane photobioreactors. *J. Appl. Phycol.* **27**(5), 1763-1773.
10. Lee, S., Kim, Z.-H., Oh, H., Choi, Y., Park, H., Jung, D., Kim, J., Na, Y., Lim, S., Lee, C.-G., and Lee, J. 2015. Fabric-hydrogel composite membranes for culturing microalgae in semi-permeable membrane-based photobioreactors. *J. Polym. Sci. A Polym. Chem.* **54**, 108-114.
11. Lee, C.-G., Kim, Z.-H., Lim, S., Seong, D., and Hoh, D. 2014. Photobioreactor for mass culturing of photosynthetic microorganism. PCT/KR2014/02919.
12. Eaton-Rye, J. J. 2004. The construction of gene knockouts in the cyanobacterium *Synechocystis* sp. PCC 6803. *Photosynth. Res. Protoc.* **274**, 309-324.
13. Clasen, J., Bernhardt, H., Hoyer, O., and Wilhelms, A. 1982. Phosphate remobilization from the sediment and its influence on algal growth in a lake model. *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol.* **18**, 101-113.