

호수수, 하천수와 하수처리수에서 미세조류 증식 특성 및 영양 염류 제거 효과

장인호 · 정요찬 · 최승익¹ · 안태석*

(강원대학교 환경과학과, ¹강원대학교부설 환경연구소)

Microalgal Growth and Nutrient Removal in a Lake, a Stream and the Outflow of a Wastewater Treatment System. Chang, In-Ho, Yochan Joung, Seung-Ik Choi¹ and Tae-Seok Ahn*
(Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea; ¹Institute of Environmental Research, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea)

The possibility of nutrient removal during *Scenedesmus* sp. growth in Lake Paldang, Geongan cheon stream, and the outflow from a wastewater treatment system was examined. *Scenedesmus* sp. grew well in Lake Paldang water when total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) values were 1.9 and 0.02 mg L⁻¹, respectively, and 50% of the nutrients were removed. In Geongan cheon stream, the TN and TP was 3.0 mg L⁻¹ and 0.09 mg L⁻¹, respectively, chlorophyll-*a* reached a maximum of 239~259 m⁻³, and 50% of the nutrients were removed. In the wastewater treatment outflow, where *Scenedesmus* sp. already existed, the organism grew well without inoculation. *Scenedesmus* sp. can grow with proper inoculation and physical turbulence in natural waters, such as lake and stream water, and nutrients can be eliminated as phytoplankton growth occurs.

Key words : artificial food web, Lake paldang, nutrient removal, *Scenedesmus* sp.

서 론

최근 호소 수질 개선 등을 위하여 호소내 유기물 생성량에 영향을 주는 영양 염류, 특히 인(P)을 제거하려는 방법이 많이 연구되고 있다. 예를 들면, 영양 염류의 농도가 비교적 높은 팔당호에서는 영양 염류 제거를 목적으로 인공 식물섬(Korea Environment Corporation, 2000)과 같은 생태공학적인 방법이 적용되었다.

호수와 같이 용량이 크고 영양 염류의 농도가 비교적 낮은 경우, 최근에는 수질 개선을 위해 생태공학적인 방법이 응용되고 있으며, 미세조류(microalgae)를 이용한 인공 먹이망도 그 중에 하나로 제안되고 있다(Kim *et al.*, 2003). 미세조류는 배양이 쉽고 성장이 빠르고, 생물 생산량이

많고, *Daphnia* 등 동물성 플랑크톤의 먹이로 선호되어(Sterner *et al.*, 1993) 식물플랑크톤-동물플랑크톤으로 이어지는 인공 먹이망에서 이용되는 생물이다. 또 미세조류를 이용한 하수처리 방법은 예전부터 제안되어 왔으며(Caldwell, 1946; Oswald and Gottas, 1957), 인과 질소의 농도가 높은 하폐수에서 조류를 배양시켜 영양 염류를 제거하는 많은 연구가 있었다(Rodrigues and Oliveira, 1987; Kim, 2001). 조류를 이용한 인 제거 시스템에서 조류의 현존량 및 성장률은 조류의 빛 이용능력, 영양 염류의 농도와 pH 등 시스템내의 환경조건에 의해 조절되며(Borchardt and Azad, 1968), 영양 염류 제거에 있어서 저비용으로 효과적인 처리가 가능하다(De la Noue *et al.*, 1992). 이러한 조류를 이용한 영양 염류 제거 방법은 2차 처리된 하수의 영양 염류 제거에 이용되었으며(Veber *et*

* Corresponding author: Tel: 033) 250-8574, Fax: 033) 251-3991, E-mail: ahnts@kangwon.ac.kr

al., 1984), 오염된 하천에는 바로 적용하여 성공한 사례가 있다(Jung et al., 2009). 또, Kim et al. (2001)은 하수처리수와 호수 물을 섞은 후 *Scenedesmus* sp.를 넣고 배양한 배양액을 사용하여 현장에 적용한 경우가 있다.

하폐수에 사용되는 미세조류에는 *Chlorella* sp.와 *Scenedesmus* sp. 등이 있으며, 이전 연구에서는 *Chlorella*가 영양 염류 제거 효율도 높고 생장률이 좋은 것으로 확인되었고(Kim et al., 1998), 다른 연구에서는 초기 성장이 *Scenedesmus* sp.가 *Chlorella* sp.보다 좋다는 결과(Gonzalez et al., 1997)도 있는 등 실험조건과 대상에 따라 효율이 달라지고 있다. 배양 방법은 순수 배양된 미세조류를 이용하여 대상 처리수에 접종하여 배양하는 방법으로 주로 실험실에서 사용되고(Xina et al., 2010), 다른 방법은 이미 자연계에 존재하는 미세 조류의 성장을 촉진하여 배양하는 방법으로 주로 생태공학적인 방법으로 사용되고 있다(Jung et al., 2009).

미세 조류를 이용한 영양 염류 제거 시스템에서 가장 중요한 것은 영양 염류를 동화한 조류를 분리하는 것이다(Pavoni et al., 1974). 이러한 조류분리과정 중 원심분리 또는 여과 방법 등 물리 화학적 방법은 식물플랑크톤과 물의 분리가 불완전하고 비경제적이다(Kothandaraman and Evans, 1972). 그러나 동물플랑크톤의 여과섭식(filter feeding) 원리를 이용하면 조류제거의 문제점을 쉽게 해결할 수 있고, 경제적 타당성이 있다(Ryther, 1977). 특히 *Scenedesmus* sp.는 *Daphnia*의 좋은 먹이이므로(Sterner et al., 1993) 인공 먹이망에서는 유용하게 사용될 수 있다.

이 연구에서는 팔당호에서 인공먹이 연쇄망이 가능한지를 확인하기 위한 실험으로 수행되었다. 팔당호와 같은 모든 대형호수의 TP 농도가 0.018~0.054 mg L⁻¹ 범위(Han River Water System Management Committee, 2008)이므로 이러한 농도에서 *Scenedesmus* sp.가 성장하고 이들이 성장하면서 TN과 TP를 흡수하는지를 확인하였다. 이를 위하여 팔당호 광동교 인근에서 채취한 호수수에서 *Scenedesmus* sp.를 접종하고 교반하여 식물플랑크톤이 성장하는지를 확인하였다. 또 경안천의 하천수와 하수처리수에 *Scenedesmus* sp. 접종률을 달리하여 미세 조류의 성장률과 영양 염류 제거율을 확인하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 시료의 채취

자연 환경내의 하천수에서 식물플랑크톤의 배양과 chl-

orophyll *a*의 증가를 알아보기 위하여, 사용한 시료 하천수는 경기도 광주시 광동교 인근(37°28'17.89"N, 127°17'45"E)의 팔당호, 경기도 용인시 경안천 중류(37°20'05.18"N, 127°14'44"E)와 강원도 춘천시 수질관리사업단 하수처리수(37°52'48.37"N, 127°42'40.73"E) 등 총 3곳에서 40L씩 채취하였다.

2. 접종액의 조제

각 시험조에 첨가할 접종액을 Jung et al. (2009)의 방법에 따라 조제하였다. 즉, 식물플랑크톤이 많이 자라고 있는 춘천시 공지천 하류에서 채취한 하천수와 영양 염류 농도가 높은 춘천시 수질관리사업단 하수처리수를 1:1 비율로 섞은 후, 수중펌프(75W, HA-75, Amazon, Korea)로 교반을 하며 햇빛이 잘 드는 실내에서 배양하였으며, 평균수온은 19.5±2.5°C였다. 실험에 사용된 접종액에는 *Scenedesmus* sp.가 우점하였고, chlorophyll *a* 농도는 539~545 mg m⁻³이었다.

3. 팔당호 광동교 시료의 처리

미세조류가 우점하는 접종액의 첨가에 따라 일반 강과 호수 등에서 식물플랑크톤의 성장이 촉진되는가를 확인하기 위하여, 하천-하수 혼합액을 12일간 배양한 액과 하천-하수 혼합액을 각각 0.5% (v/v)의 비율로 광동교 하천수가 존재하는 2개의 시험조에 첨가하였다. 그리고 팔당호 물만 채워준 수조를 대조구로 하여 총 3개의 시험조(35×21.5×26.5 cm)를 실험에 사용하였다. 시험조의 배양은 접종액을 배양한 방법과 동일한 방법을 사용하였으며, 12일 동안 2일 간격으로 7회 chlorophyll *a* 농도를 측정하였다. 각 시험조에서 배양 직후와 배양 10일 후에 TN과 TP 농도를 분석하고 식물플랑크톤을 동정하였다.

4. 경안천과 하수처리장 방류수의 처리

영양염류 농도가 높은 경안천과 하수처리수에 접종액을 1% (v/v), 0.5% (v/v), 0.25% (v/v)의 비율로 첨가하였고, 접종액을 첨가하지 않은 대조구를 포함하여 총 4개의 시험조를 만들어 광동교 시료 처리와 같은 방법으로 배양하고 chlorophyll *a* 농도를 측정하였다. 배양 직후와 배양 12일 후에 각 시험조에서 TN과 TP 농도를 분석하였다. 또한 접종액과 시료는 광학현미경을 이용하여 관찰하였다. 관찰된 식물플랑크톤 중 많은 양을 차지하는 식물플랑크톤을 우점종으로 하였고, 식물플랑크톤 종은 Mizuno (1975)의 도감을 이용하여 종을 파악하였다.

5. 영양염류 및 chlorophyll a 분석

TN은 흡광광도법, TP는 ascorbic acid법 그리고 chlorophyll a 농도는 흡광광도법으로 각각 측정하였다(APHA, 2001).

6. 통계분석

통계패키지 SAS의 반복측정자료 분석절차인 PROC GLM의 REPEATED 명령을 사용하였다(Robert, 2008).

결과 및 고찰

1. 광동교 인근의 팔당호

광동교 인근의 팔당호 시료의 TN과 TP 농도는 각각 1.9 mgN L⁻¹, 0.02 mgP L⁻¹값이었으며 chlorophyll a 농도는 25 mg m⁻³이었다(Table 1). 이 시료에 접종액을 넣어 배양하면 chlorophyll a 농도가 점진적으로 증가하여 배양

Table 1. Nutrient and chlorophyll a concentrations of target waters. Abbreviations: Lake Paldang (Gwangdong Br.) (PD), Gyeongan cheon (GAC) and outflow of waste water treatment system (WW).

		TN (mg L ⁻¹)	TP (mg L ⁻¹)	chlorophyll a (mg m ⁻³)
PD (0.5%)	Initial	1.9	0.02	24
	Peak	0.9	0.01	349
GAC (0.5%)	Initial	3.0	0.09	28
	Peak	1.5	0.04	239
WW (0.5%)	Initial	9.4	0.47	21
	Peak	3.2	0.20	379

10일 후에는 초기보다 약 14배 증가한 349 mg m⁻³이었고, chlorophyll a 증가율(growth rate; GR)은 최대 31 mg m⁻³ day⁻¹이었다(Table 2). 그러나 12일간 배양한 하천-하수 혼합액을 첨가하지 않은 경우와 하천-하수 혼합액만 넣어준 경우 chlorophyll a 농도는 각각 68 mg m⁻³와 74 mg m⁻³으로 초기보다 약 2.7배와 3.0배 증가하여 최대 GR값은 4 mg m⁻³ day⁻¹에 불과하였다(Fig. 1).

광동교 시료의 경우 TP 농도가 0.02 mgP L⁻¹인 경우에도 접종을 한 후에 교반을 가하면 식물플랑크톤이 잘 성장하였다. 이는 교반이 식물플랑크톤 증식에 중요한 요소로 작용한다는 결과(Kim et al., 2003)와 TP 농도가 0.01 mgP L⁻¹인 상태에서 교반을 가하면 *Scenedesmus* sp.가 증식한다는(Lee, 1999) 보고와 일치하였다. 따라서 이 시료와 같이 TP 농도가 0.02 mgP L⁻¹인 호수에 접종액을 첨가하고 교반을 하면 식물플랑크톤의 성장이 가능함을

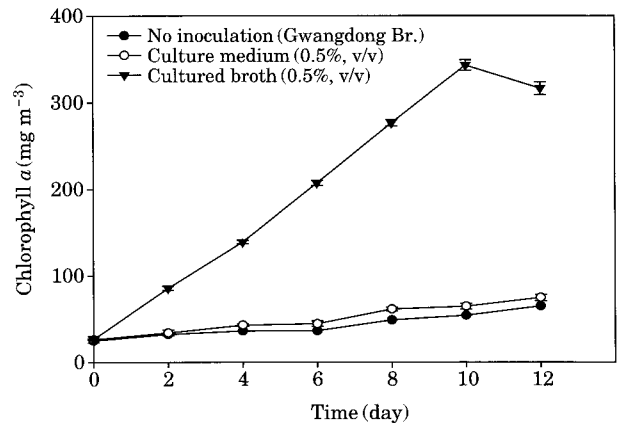


Fig. 1. Changes of chlorophyll a concentration during incubation of lake water from Gwangdong Br. in Lake Paldang.

Table 2. Average growth rate (GR) of *Scenedesmus* sp. in target waters. Abbreviations: Lake Paldang (Gwangdong Br.) (PD), Gyeongan cheon (GAC) and outflow of waste water treatment system (WW).

		Max peak (day)	chlorophyll a peak day (mg m ⁻³ day ⁻¹)
PD	0.5% (only Cultured broth)	10	31
	0.5% (only Culture medium)	12	4
	0% (No inoculation)	12	4
GAC	1% (only Culture medium)	8	19
	0.5% (only Culture medium)	10	20
	0.25% (only Culture medium)	10	21
	0% (No inoculation)	12	12
WW	1% (only Culture medium)	10	31
	0.5% (only Culture medium)	10	30
	0.25% (only Culture medium)	10	31
	0% (No inoculation)	10	29

확인하였다.

Chlorophyll *a* 농도가 가장 높을 때 수중의 TN과 TP 농도는 0.9 mgN L^{-1} 와 0.01 mgP L^{-1} 로 배양 초기보다 약 50% 감소하였다. 따라서 접종액을 접종하고 교반을 가하면 식물플랑크톤이 증식하였으며, 그 결과 TN과 TP 농도의 감소가 되는 것을 확인할 수 있었다.

2. 경안천

경안천 시료의 TN, TP와 chlorophyll *a* 농도는 각각 3.0 mgN L^{-1} , 0.09 mgP L^{-1} 그리고 28 mg m^{-3} 이었다(Table 1). 경안천 시료에 접종액을 1%, 0.5%와 0.25%의 비율로 각각 첨가하여 12일간 배양한 결과, chlorophyll *a* 농도는 $239 \sim 259 \text{ mg m}^{-3}$ 의 범위로 증가하였다(Fig. 2). 접종액을 첨가한 3개의 시험조에서 GR은 접종액의 첨가 비율과 관계없이 $19 \sim 21 \text{ mg m}^{-3} \text{ day}^{-1}$ 범위로 큰 차이를 보이지 않았지만, 대조구에서는 $11 \text{ mg m}^{-3} \text{ day}^{-1}$ 이었다. 경안천 시료에 접종액을 첨가하여 배양한 12일 후에 식물플랑크톤의 종 조성을 조사한 결과, 녹조류는 첨가된 *Scenedesmus sp.* 1종이었고, 규조류는 6종으로 그 중에서 *Synedra sp.*와 *Navicula sp.*가 우점종이었다. 이 규조류들은 이미 시료 내에 존재하고 있었던 종으로 *Scenedesmus sp.*와 경쟁에서 우위를 점한 것으로 사료된다. Sommer (1985)의 보고에 의하면 TP 농도가 0.075 mgP L^{-1} 인 상태에서 *Scenedesmus sp.*와 *Synedra sp.*를 혼합 배양한 결과 배양초기부터 10일까지 규조류인 *Synedra sp.*의 성장이 *Scenedesmus sp.*보다 우세하였고, 이는 이번 결과와 일치하였다.

경안천 시료에서는 식물플랑크톤의 우점종이 규조류이었지만, chlorophyll *a*가 증가하였고, 배양 12일 후에 TN과 TP 농도는 각각 1.5 mgN L^{-1} 과 0.04 mgP L^{-1} 로 배양 초기보다 약 50% 감소하였다(Table 1). 배양과정에서 식물플랑크톤의 천이는 녹조류인 *Scenedesmus sp.*를 배양 12일 이후에 *Oocystis sp.*, 57일 이후에는 *Golenkinia sp.*로 천이(Kim et al., 2003)와 *Scenedesmus sp.*가 배양 초기에는 우점종이었으나, 배양 30일 후에는 남조류인 *Lyngbya sp.*가 우점종으로 천이되어(Jung et al., 2009) 나타나는 등의 여러 연구 사례가 있다. 이들 여러 연구에서도 식물플랑크톤의 우점종이 변하여도 chlorophyll *a* 농도와 영양염 감소에는 큰 영향이 없다고 보고하였다. 따라서 경안천 시료에서도 식물플랑크톤 우점종과 관계없이 chlorophyll *a* 농도가 증가하면 TN과 TP 농도가 감소함이 확인되었다.

접종액의 첨가 비율이 서로 다른 3개의 실험구와 대조

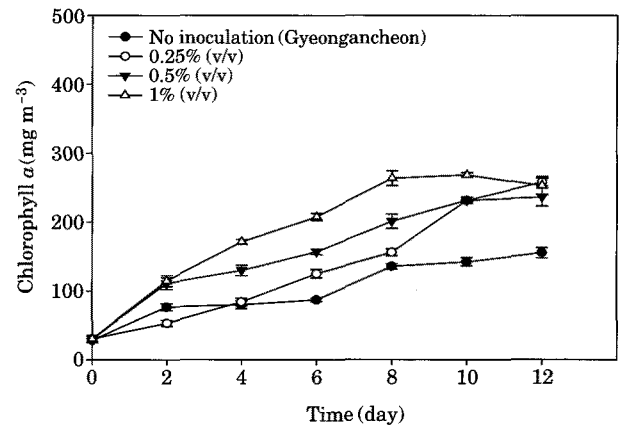


Fig. 2. Change of chlorophyll *a* concentration with different amounts of inoculated phytoplankton in Gyeongancheon.

구의 chlorophyll *a* 변화를 95% 신뢰구간에서 통계적으로 분석한 결과, 배양 2~10일에는 유의확률은 0.0001로 chlorophyll *a* 농도는 차이가 있는 것으로 판명되었다. 그러나 배양 12일 후의 유의확률은 0.11로 chlorophyll *a*의 농도의 차이가 존재하지 않는다. 즉, 접종액 첨가 비율이 높으면 배양 과정에서 초기에는 chlorophyll *a*가 높았으나 배양 12일 후에는 접종액 첨가 비율과 상관없이 chlorophyll *a*가 비슷한 값이었다.

3. 하수처리수

하수처리수의 TN과 TP의 농도는 각각 9.4 mgN L^{-1} , 0.47 mgP L^{-1} 이며, chlorophyll *a* 농도는 21 mg m^{-3} 이었다(Table 1). 배양 10일 후에 대조구를 포함한 모든 시험조의 chlorophyll *a* 농도가 $313 \sim 389 \text{ mg m}^{-3}$ 로 초기보다 15배 이상 높아졌으며(Fig. 3), 대조구와 모든 시험구의 GR은 $29 \sim 30 \text{ mg m}^{-3} \text{ day}^{-1}$ 의 범위로 차이가 크지 않았다. 이 실험에서 사용한 하수처리장 시료에는 이미 *Scenedesmus sp.*가 존재하고 있어 교반만 가하면 이들은 빠른 속도로 증식한 것으로 판단된다. 또한, 경안천 시료와는 달리 규조류가 우점하여 증식하지 않았다.

통계분석을 이용하여 하수처리장 처리수를 대상으로 접종액의 접종비율과 chlorophyll *a* 농도와의 관계 분석하였다. 그 결과, 배양 2~12일까지 유의 확률은 0.001~0.003로 접종 농도와 chlorophyll *a* 농도의 차이가 있으며, 그 차이는 각 농도별로 시간이 지나도 유지 되는 것으로 확인되었다. 그러나, 대조구에서도 식물플랑크톤 현존량이 313 mg m^{-3} 에 달하는 등 식물플랑크톤의 좋은 성장을 확인하였다.

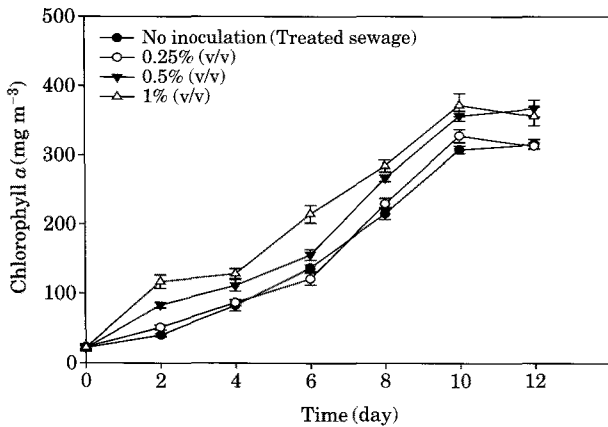


Fig. 3. Change of chlorophyll *a* concentration with different amounts of inoculated phytoplankton in the outflow of a waste water treatment system.

하수와 폐수에서 녹조류를 이용하여 영양염 제거에 관련된 많은 연구사례가 있다 (Lee, 1999; Kim *et al.*, 2003; Jung *et al.*, 2009). 녹조류인 *Chlorella vulgaris*를 하수처리수에서 배양한 결과 TN과 TP 농도는 각각 54%와 50% 감소하였고 (Lau, 1996), *Scenedesmus sp.*를 이 하수처리수에 적용한 결과 TN과 TP 농도가 50% 이상 감소되었다 (Graham and Wilcox, 2000). 이번 연구에서도 하수처리수 시료에서 TN과 TP 농도가 약 50%가 감소되어 이전 연구들과 유사한 감소율을 보였다.

이번 연구 결과에서 식물플랑크톤이 잘 자란 경우, TN과 TP 농도는 모두 50% 이상 감소하였다. 일반적으로 TN 농도는 ammonia stripping, 화학적 침전 그리고 식물플랑크톤에 의한 흡수로 감소하고, 또 TP 농도는 화학적 침전과 식물플랑크톤의 흡수로 감소된다는 연구가 있다 (Jung *et al.*, 2009). 현재 일반적으로 사용되는 표준 활성오니법에서 TP 제거율은 40~50%이며, 최종 하수처리수의 TP 농도는 1.0~3.0 mgP L⁻¹ 범위이다. A₂O 공법 등과 같은 고도처리시설의 TP 제거효율은 50~90%로 하수처리수의 TP 농도는 최저 0.3 mgP L⁻¹이다 (ET Solution, 2009). 이러한 처리시설은 TP 농도가 높은 경우에만 효과를 볼 수 있는 단점이 있고, 호수와 강에서 저 농도로 존재하는 TP를 처리하기에는 한계가 있다. 그러나 이번 연구에서는 하천수와 호수수를 별도의 배양조에서 식물플랑크톤을 배양하여 chlorophyll *a* 농도를 높이면, TN과 TP 농도를 50% 이상 감소시킬 수 있다는 결과를 얻었다. 이는 하천과 호수에서 영양 염류를 제거하는 방법으로 응용할 수 있다. 특히 *Scenedesmus sp.*는 N/P 비율이 매우 큰 상태에서도 잘 적응하여 자라며, 인의 농도가 낮은 배양조건에서는 세포내의 인의 함유량이 낮아지지만 세

포내의 탄소 함유량은 N/P비와 상관 없이 56~65%를 유지하여 *Daphnia*에게는 좋은 먹이가 되어 (Sternier *et al.*, 1993) 식물플랑크톤-동물플랑크톤으로 연결되는 시스템의 개발이 가능하다.

이 시스템에서 chlorophyll *a* 농도를 높이면서 TN과 TP를 효율적으로 제거할 수 있는 몇 가지 방법들이 있다. 첫째, 배양온도를 높여 chlorophyll *a* 농도를 높이는 것이다. 이번 실험에서는 수온이 20°C일 때 chlorophyll *a* 농도는 최대 배양 후 10일 만에 350 mg m⁻³이었다. 수온이 30°C인 경우 chlorophyll *a* 농도는 배양 2일 만에 최대 1,944 mg m⁻³이었다 (Kim *et al.*, 2003). 따라서 수온을 높여주면 chlorophyll *a* 농도는 훨씬 높아지고 운영시간을 줄일 수 있다. 둘째, 수체에 존재하는 영양 염류는 식물플랑크톤의 생체물질로 전환되고, 이 과정에서 수체의 TN과 TP 농도는 감소한다. 식물플랑크톤 생체에서 영양 염류가 재용출되면, 영양염의 농도는 다시 높아지게 된다. 따라서 영양 염류가 재용출되기 전에 식물플랑크톤을 제거하여야 한다. 식물플랑크톤이 성장하면서 침전으로 생성된 sludge를 제거하는 방법과 식물플랑크톤의 생체를 sludge로 전환시키는 효율적인 방법을 개발하여야 한다. 이미 동물플랑크톤의 포식 작용을 이용하여 식물플랑크톤을 sludge로 전환시키는 방법은 하수처리장 (Kim *et al.*, 2003)과 오염된 하천 (Jung *et al.*, 2009)에 적용되어 좋은 효과를 보고 있다. 이러한 방법 외에도 여과와 원심 분리 등 물리적인 방법과 응집 등 화학적 방법도 고려할 만한 대상이다.

이 연구에서 다음의 결론을 얻었다. 첫째, 식물플랑크톤을 이용하면 자연수와 같이 영양염 농도가 낮은 곳과 하수처리수와 같이 영양염의 농도가 높은 곳에 모두 적용이 가능하고, 영양염 농도를 50% 정도 감소시킬 수 있다. 둘째, 식물플랑크톤을 TN과 TP가 낮은 농도에서 증식시키기 위하여 반드시 교반을 가하여야 한다. 셋째, 경안천의 경우 TN과 TP 농도 감소를 위하여 반드시 식물플랑크톤을 접종하여야 높은 효율을 얻을 수 있다. 넷째, 팔당호는 식물플랑크톤이 폭발적으로 증식할 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 광동교 인근의 수역과 같은 상태의 영양염류 농도와 환경 조건에서는 미세조류가 유입되고, 교반이 이루어지면 식물플랑크톤의 현존량이 최대 350 mg m⁻³까지 증가되고 영양 염류의 농도가 50% 감소될 것으로 사료된다. 경안천의 경우에도 교반을 가하면 chlorophyll *a* 농도가 최대 259 mg m⁻³까지 증식하는 잠재력이 있고, 식물플랑크톤의 증식으로 인하여 영양 염류의 농도가 50% 감소됨을 확인하였다. 다섯째, 영양 염류가 높고 미세조류가 서식하고 있는 하수처리수는 점종액을 따로

만들지 않아도 빛과 교반을 가하면 식물플랑크톤이 증식되며, 이것을 시스템 내에 적용하여 영양 염류를 제거할 수 있다. 여섯째, 식물플랑크톤 생체를 슬러지로 전환시키는 효율적인 방법을 개발하여야 한다.

적 요

팔당호, 경안천과 하수처리수에서 *Scenedesmus* sp.가 성장이 가능하고 영양 염류를 제거할 수 있는지를 확인하였다. TN과 TP 농도가 각각 1.9과 0.02 mg L⁻¹인 팔당호 광동교에서 채취한 시료에 *Scenedesmus* sp.를 접종한 다음, 교반한 경우에 미세조류가 증식하고 영양 염류 농도가 50% 감소하였다. 또 TN과 TP 농도가 3.0과 0.09 mg L⁻¹인 경안천 시료에 *Scenedesmus* sp.를 접종한 결과, 규조류 등과 경쟁에 의하여 미세조류 현존량은 239~259 chl. *a* m⁻³로 낮았으나, 역시 영양 염류는 접종율과 관계없이 약 50% 감소하였다. 하수처리수에는 이미 *Scenedesmus* sp.가 존재하고 있었고 대조구와 접종한 실험구 사이에는 미세조류의 현존량의 작은 차이가 있었으나 처리 효율은 큰 차이가 없었다. 팔당호와 같은 상태의 영양 염류를 가지고 있는 자연수에서는 *Scenedesmus* sp.를 접종하고 교반을 가하면, 미세 조류의 생체량이 증가하고 영양염류를 제거할 수 있음이 확인되었고 하수처리수에서는 따로 *Scenedesmus* sp.를 접종하지 않아도 영양 염류를 제거할 수 있음을 확인하였다.

사 사

이 연구는 한강물환경연구소 환경기초조사 사업의 연구비와 환경부의 “차세대 핵심 환경 기술 개발 사업(Eco-technopia 21 project)” 과제의 연구비로 진행되었습니다. 참여연구자(장인호, 정요찬)는 BK 21 사업의 지원비를 받았습니다.

인 용 문 헌

- APHA, American Public Health Association. 2001. Standard method for the examination of water and wastewater.
- Borchardt, J.A. and H.S. Azard. 1968. Biological extraction of nutrients. *J. Water Pollut. Control Fed.* **40**: 1739-1754.
- Caldwell, D.H. 1946. Sewage oxydation ponds: performance, operation and design. *SewageWorks J.* **18**: 433-458.
- De la Noue, J., D. Laliberte and D. Proulx. 1992. Algae and wastewater. *J. Appl. Phycol.* **4**: 347-354.
- ET Solution. 2009. The Advanced Wastewater Treatment Process. Co., Ltd. ET Solution.
- Gonzalez, L.E., R.O. Canizares and S. Baena. 1997. Efficiency of ammonia and phosphorus removal from a Colombian agroindustrial wastewater by the microalgae *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus dimorphus*. *Bioresource Technol.* **60**: 259-262.
- Graham, L.E. and L.W. Wilcox. 2000. *Algae*. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ.
- Han River water system management committee. 2008. Survey on the Environment and Ecosystem of Lake in the Han River System(1).
- Jung, D.W., Y.G. Zo, S.I. Choi and T.S. Ahn. 2009. Nutrient removal from polluted stream water by artificial aquatic food web system. *Hydrobiologia.* **630**: 149-159.
- Kim, S.B., S.J. Lee., C.K. Kim., G.S. Kwon., B.D. Yoon., H. M. Oh. 1998. Selection of microalgae for advanced treatment of swine wastewater and optimization of treatment condition. *Korean Journal of Microbiology and Biotechnology* **26**(1): 76-82.
- Kim, S.R., E.H. Cheong and T.S. Ahn. 2001. A study on the nutrient Removal with phytoplankton. *Korean Journal of Limnology.* **34**: 133-139.
- Kim, S.R., S.S. Woo., E.H. Cheong and T.S. Ahn. 2003. Nutrient removal from sewage by an artificial food web system composed of phytonplankton and *Daphnia magna*. *Ecol. Engineering.* **21**: 249-258.
- Korea Environment Corporation. 2000. Management result the artificial planting lands.
- Kothandaraman, V. and R.L. Evans. 1972. Removal of algae from waste stabilization pond effluents-a state of the art. Department of registration and education. State of Illinois. USA.
- Lau, P.S., N.F.Y. Tam and Y.S. Wong. 1997. Wastewater nutrient (N and P) removal by carrageenan and alginate immobilized *Chlorella vulgaris*. *Environ. Technol.* **18**: 945-951.
- Lee, H.J. 1999. A study on the nutrient removal of wastewater using *Scenesemus* sp. *Journal of the Environmental Sciences* 1999. **8**(4): 443-449.
- Mizuno, T. 1975. Illustrations of the freshwater plankton of Japan. Hoikusha Publishing.
- Oswald, W.J. and H.B. Gottas. 1957. Phytosynthesis in sewage treatment. *Trans. Am. Soc. Civil. Eng.* **122**: 73-105.
- Pavoni, J.L., S.W. Keiber and G.T. Boblitt. 1974. The harvesting of algae as a food source from wastewater using

- natural and induced flocculation techniques, p. 435-496. *In: Wastewater use in the production of food and fiber proceedings. EPA 660-2-74-041.*
- Robert, A.M. 2008. R for SAS and SPSS users. Springer, New York.
- Rodrigues, A.M. and J.F.S. Oliveira. 1987. Treatment of wastewaters from the tomato concentrates industry in high rate algal ponds. *Water Sci. Tech.* **19**: 43-49.
- Ryther, J.H. 1977. Preliminary results with a pilot-plant wastewater recycling-marine aquacultural system, p. 89-132. *In: Wastewater Renovation and Reuse* (D'Itri, F.M., ed.). Marcel Dekker, New York.
- Sommer, U. 1985. Comparison between steady state and non-steady state competition: Experiments with natural phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.* **30**(2): 335-346.
- Sterner, R.W., D.D. Hagemeyer, W.L. Smith and R.F. Smith. 1993. Phytoplankton nutrient limitation and food quality for *Daphnia*. *Limnol. Oceanogr.* **38**: 857-871.
- Veber, K., V. Votapek, K. Livanskiy, Y. Zagradnik and B. Prokesh, 1984. Growth of *Chlorella vulgaris* in wastewater. *Hydrobiologia* **20**: 32-40.
- Xina, L., H.Y. Hu, K. Gan and J. Yang. 2010. Growth and nutrient removal properties of a freshwater microalga *Scenedesmus* sp. LX1 under different kinds of nitrogen sources. *Ecol. Engineering* **36**: 379-381.

(Manuscript received 5 January 2011,
Revision accepted 31 May 2011)