

미세조류를 이용한 오·폐수 영양염류 제거효율 평가

김숙찬 · 김한순^{1,*}

경상북도 보건환경연구원, ¹경북대학교 생명과학부 생물학전공

Evaluation of Nutrients Removal Efficiency in Effluents of Sewage and Wastewater using Microalgae.

Kim, Sook-chan (0000-0002-1874-0395) and Han-soon Kim^{1,*} (0000-0002-8186-3849) (Gyeongsangbuk-do Institute of Health and Environment, Yeongcheon 38874, Republic of Korea; ¹School of Life Science, Kyungpook National University, Daegu 41566, Republic of Korea)

Abstract This study was intended to evaluate the removal efficiency of nutrients in effluents of wastewater using microalgae. Microalgae used in the culture experiment collected in stream and reservoir located in Gyeongsangbuk-do. Dominant species in prior-culture tank were *Monoraphidium contortum*, *Scenedesmus acutus*, *Coelastrum microporum* and *Chlorella* sp. Dominant species in synthetic wastewater culture under the 4000 Lux and 8000 Lux were *Chlorella* sp. and *Scenedesmus obliquus*. The removal efficiency of NO₃-N under the 4000 Lux and 8000 Lux were 27.2%~88.1% and 63.0%~83.6% respectively. The removal efficiency of PO₄-P under the 4000 Lux and 8000 Lux showed above 93%. Removal efficiency of nutrients of 1.0 × 10⁶ cells mL⁻¹ inoculation concentration was more higher than that of nutrients of 1.0 × 10⁵ cells mL⁻¹ and 1.0 × 10⁷ cells mL⁻¹ inoculation concentration. Microalgae cultured in synthetic wastewater removed 94.9% of TN and 90.0% of TP. The removal rate of TN and TP in synthetic wastewater were 1.961 mg L⁻¹ day⁻¹ and 0.200 mg L⁻¹ day⁻¹ respectively. Nutrient removal efficiency of microalgae according to kinds of wastewater showed the highest in the private sewage.

Key words: microalgae, nutrients removal, wastewater, sewage

서 론

미세조류는 물, 빛, CO₂로 광합성하는 식물성플랑크톤으로 질소, 인 등의 무기염만 존재한다면 무한히 증식하므로 바이오에너지, 식·의약품, 화장품, 색소 등의 생산원으로 관심이 증가되고 있다(Simpson and Conner-Ogorzaly, 1986; Yoon *et al.*, 2012). 미세조류는 영양염류인 질소, 인 등을 흡수하여 증식하므로 수질개선을 위한 하수 및 폐수처리분야까지 이용범위가 확장되고 있다(Kang *et al.*,

2012; Kim *et al.*, 2013).

최근에는 기존의 공학적 하·폐수 처리시스템의 대체 시스템으로서 질소 인 제거와 동시에 바이오연료 생산 및 온실가스 감축 등이 가능한 미세조류의 연구가 활발히 진행되고 있으며, 조류-세균 공생관계를 이용한 폐수처리시스템의 연구 또한 활발히 수행되고 있다(Munoz and Guieysse, 2006; de Godos *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2013). 그러나 국내에서는 미세조류를 이용한 하·폐수처리에 관한 연구가 초기단계로 실제적인 연구가 매우 미흡하며 많은 연구가 필요한 실정이다(Lee and Park, 2011; Kim, 2013).

환경부는 2012년부터 수질보전의 중요성이 큰 상수원 보호구역, 수변 구역의 경우 공공하수처리시설의 방류수

Manuscript received 27 February 2017, revised 10 June 2017,
revision accepted 14 June 2017

* Corresponding author: Tel: +82-53-950-5344, Fax: +82-53-953-3066,
E-mail: kimhsu@knu.ac.kr

© 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.

오염물질 기준인 BOD는 기존 허용범위의 2배, 총인은 10 배로 강화하였지만 그 수용하천이나 호소의 수질환경 기준보다 높게 설정됨으로써 단시간에 수질개선을 기대하기 어렵다. 특히 개인하수처리시설의 경우 방류수 기준 50 m^3 일⁻¹ 미만에 대해서는 TN과 TP의 기준이 없고, BOD와 SS 만 기준으로 설정되어 있기 때문에 이들로부터 배출되는 질소와 인이 인근 하천이나 호소에 지속적인 오염원으로 작용하고 있어 상수원의 수질을 유지하기가 어려운 실정이다(NIER, 2013).

고도처리를 하지 않은 하수나 폐수는 다량의 유기물과 부영양화를 유발시키는 영양염류를 포함하고 있어 정체수역에 유입될 경우 녹조 발생을 유발할 수 있으며, 특히 오염 부하량이 큰 축산계 오염물질은 다량 함유되어 있는 질소와 인으로 인하여 심각한 수준의 녹조 발생을 가중시켜 경제적, 사회적, 심리적 피해를 가져오기 때문에 하·폐수 및 축산폐수의 영양염 제거가 부영양화와 녹조 발생 억제 위한 필수적인 과제이다. 호소 내 미세조류 대량배양 실험에서 방류수에 포함된 영양염류를 미세조류로 전환하고, 미세조류를 회수한 뒤 수질이 개선된 청정수를 호소 내로 방류하는 배양시스템을 운영한 결과 조류배양 15일 후 수질오염물질인 영양염류(TN, TP, NH_4 , PO_4)의 현저한 제거가 가능한 것으로 보고되었다(Park *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2013). 미세조류를 이용한 영양염류 제거방안은 인근 하천의 생태환경에 충격을 주는 부작용이 없는 친환경적인 처리시스템으로 점 오염원을 중심으로 오염 부하량을 줄여 녹조 발생을 사전예방하고, 처리과정에서 회수된 미세조류는 자원으로 재활용할 수 있을 것으로 예상된다.

따라서 본 연구에서는 경북지역의 하천과 호소에서 채집한 미세조류를 예비 배양한 후 인공폐수를 대상으로 영양염류 제거에 유용한 미세조류를 탐색하고, 경북지역 사업장에서 실제 배출되는 폐수, 개인하수 및 가축분뇨 방류수에 미세조류인 *Chlorella vulgaris*를 접종하여 질소나 인 제거효율을 평가하여 향후 미세조류를 이용한 하·폐수 고도처리 시스템 개발을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

재료 및 방법

1. 조도, 온도, 접종 비율별 영양염류 제거율 실험

1) 조류채집 및 예비 배양

배양실험에 이용한 미세조류는 경북 안동시에 위치한 송평천, 축동천, 호민지의 3지점에서 녹조류가 우점하는 6월에서 9월 사이 채수한 후, 혼합하여 1개의 시료로 만들어 2500 rpm에서 15분간 원심분리로 농축한 후 농축된 시

Table 1. Composition of synthetic wastewater.

Chemical	Concentration
KNO_3	144.36 g L^{-1}
KH_2PO_4	8.78 g L^{-1}
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	22.5 g L^{-1}
CaCl_2	27.5 g L^{-1}
$\text{FeCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.25 g L^{-1}

료 1 mL를 예비 배양조(20 L)에 넣었다. 예비 배양액은 여과한 하천수와 호소수 대 하수와 폐수의 비율을 8:2로 혼합하였으며, 각 시료는 혼합 전 영양염 농도를 측정하여 TN $20 \text{ mg L}^{-1} \sim 40 \text{ mg L}^{-1}$, TP $1 \text{ mg L}^{-1} \sim 5 \text{ mg L}^{-1}$ 정도 유지되도록 만들었다. 백색 LED조명과 백열등으로 5000 Lux의 광조건(Light : Dark cycle = 8 : 16)에서 21일 배양하였다. 수온은 $20^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$ 내외로 조절하고 CO_2 공급을 위해 산기석을 통해 폭기(2 vvm)하였다. 영양염류 제거율 실험 전 미세조류는 $1.0 \times 10^8 \text{ cells mL}^{-1}$ 의 세포밀도로 배양하였다.

2) 인공폐수 제조

인공폐수 조성은 Table 1에 나타내었다. 질소는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 형태로 $20,000 \text{ mg L}^{-1}$, 인은 $\text{PO}_4\text{-P}$ 형태로 $2,000 \text{ mg L}^{-1}$ 농도의 저장용액을 제조하였고, 저장용액을 1000배 희석하여 인공폐수로 사용하였다(NIER, 2011).

3) 조도, 접종 비율에 따른 미세조류의 영양염류 제거율 실험

국내에 서식하는 미세조류의 영양염류 제거 효율을 알아보기 위해 인공폐수 1 L를 넣은 삼각플라스크에 예비 배양한 미세조류를 $1.0 \times 10^5 \text{ cells mL}^{-1}$, $1.0 \times 10^6 \text{ cells mL}^{-1}$, $1.0 \times 10^7 \text{ cells mL}^{-1}$ 농도로 접종하여 백색 LED조명장치를 설치한 조류배양기(EDI-960L, evergreentop)에서 4000 Lux와 8000 Lux 조도, 20°C 에서 산기석을 이용하여 폭기(2 vvm)를 하며 14일간 연속배양(Light : Dark cycle = 24 : 0)하였다.

$\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ 는 배양 후 20 mL 분취 후 GF/C로 여과한 다음 여과액 10 mL를 취해 수질자동분석기 연속흐름법(BLTEC, JP/AA3)으로 분석하였다. 연속흐름법의 측정 정도관리는 방법검출한계(MDL)가 수질오염공정시험기준에서 제시한 정량한계 이하였으며, TN의 정밀도와 정확도는 0.5%와 100.7%였고, TP의 정밀도와 정확도는 0.5%와 96.4%로 수질오염공정시험기준에서 제시한 기준 이내였다(MOE, 2015).

4) 배양조건에 따른 조류 현존량과 생장률 및 우점종 측정

조류 현존량은 분광광도계(Cary 300, Varian)를 이용하여 660 nm에서의 흡광도를 측정한 OD(optical density) 값

Table 2. Species of collected microalgae and dominant species in prior-culture tank.

Species composition in field materials		Dominant species in prior-culture tank (%)
<i>Chlorella</i> sp.	<i>Quadrigula chodatii</i>	
<i>Pediastrum duplex</i>	<i>Ankistrodesmus falcatus</i>	
<i>Coelastrum microporum</i>	<i>Kirchneriella lunaris</i>	
<i>Scenedesmus acutus</i>	<i>Monoraphidium contortum</i>	<i>Monoraphidium contortum</i> (70)
<i>Scenedesmus acuminatus</i>	<i>Coelosphaerium naegelianum</i>	<i>Scenedesmus acutus</i> (15)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	<i>Closterium</i> sp.	<i>Chlorella</i> sp. (10)
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	<i>Phacus triquetus</i>	<i>Coelastrum microporum</i> (5)
<i>Gonium pectorale</i>	<i>Pandorina morum</i>	
<i>Spirogyra</i> sp.	<i>Eudorina unicocca</i>	
<i>Euglena gracilis</i>	<i>Navicula</i> sp.	
<i>Cyclotella</i> sp.	<i>Nitzschia</i> sp.	

으로 측정하였다.

미세조류 생장률은 아래의 식으로 계산하였다.

$$\text{생장률} = (X - X_0) / (T - T_0)$$

여기서, X는 시간 T(day)에서의 미세조류 건조중량(mg L⁻¹)이고, X₀는 시간 T₀(day)에서의 미세조류 건조중량(mg L⁻¹)이다.

접종 전 및 최종 배양된 인공폐수의 우점종 및 아우점종은 Sedgwick-Rafter Chamber에 시료 1mL를 넣어 위상차 현미경(Olympus BX53) 100~400배 하에서 종별 개체수를 계수하여 선정하였다.

5) 폐수 배출시설별 영양염류 제거율 실험

폐수 배출시설별 영양염류 제거율 실험은 생물자원센터(KCTC)에서 분양받은 *Chlorella vulgaris* (AG10002)를 BBM (Bold's Basal Medium)배지에서 2.3 × 10⁸ cells mL⁻¹의 세포밀도로 배양하여 실험에 사용하였다. 폐수 배출시설별 폐수 1L에 *Chlorella vulgaris* 2.3 × 10⁶ cells mL⁻¹ 농도로 접종한 후 산기석을 이용하여 폭기(2 vvm)를 하면서 20°C, 8000 Lux 조도에서 9일간 연속배양(Light : Dark cycle = 24 : 0)하였다.

TN, TP는 2~3일 간격으로 20 mL 분취 후 GF/C로 여과한 다음 여과액 10 mL를 취해 수질자동분석기 연속흐름법(BLTEC JP/AA3)으로 분석하였다. 국내 82개 업종으로 분류되어 관리되고 있는 산업폐수 중 실험에 사용된 업종은 방류수 수질의 총 질소와 총 인이 기준치 부근이거나 부영양화 기준보다 높고, 1일 폐수 배출량 700 m³ 미만인 소규모 사업장을 대상으로 재활용 가치가 높고 유기물이 많은 세차시설, 채소가공업, 식품 제조시설 및 수산물가공시설과 무기물을 취급하는 금속가공업, 고무제품 제조업, 무기화학물질 제조시설 등 총 7개였으며, 폐수 배출시설의 영양염류 제거 효율을 비교하기 위해 개인하수 방류수, 축산폐수 방류수와 인공폐수에 대한 실험을 추가하였다. 폐수

의 제거율은 실험 전 폐수의 부유물질을 침전시킨 후 상층액을 배양시료로 사용하였다. 인공폐수의 대조실험은 미접종, 미폭기, 빛이 없을 때 3가지 경우로 실시하였다.

결과 및 고찰

1. 예비 배양 전·후의 미세조류 군집 구성

경상북도 안동시에 위치한 송평천, 축동천 및 호민지에서 채집된 혼합시료의 미세조류 종조성과 예비 배양조에서 우점한 미세조류 목록을 Table 2에 나타내었다. 현장에서 채집된 미세조류는 대부분 녹조류가 주를 이루었고 소수의 규조류가 함께 출현하였다.

채집된 시료를 21일간 예비 배양한 후 나타난 미세조류는 *Monoraphidium contortum*이 우점종으로 출현하였으며, *Scenedesmus acutus*, *Coelastrum microporum*, *Chlorella* sp. 등 소수의 녹조류가 현존량의 대부분을 차지하였다.

2. 조도 및 접종 농도에 따른 미세조류 우점종 및 아우점종

조도 및 접종 농도에 따른 미세조류 우점종 및 아우점종을 Table 3에 나타내었다. 조도에 따른 우점종의 변화는 나타나지 않았으나, 초기 접종 농도에 따라서는 우점종의 천이가 다르게 나타났다. 접종 농도 1.0 × 10⁵ cells mL⁻¹ 및 1.0 × 10⁷ cells mL⁻¹ 농도로 접종하였을 경우에는 *Chlorella* sp.가 조도와 상관없이 90~95%의 매우 높은 우점률을 나타내었다. 반면 1.0 × 10⁶ cells mL⁻¹ 농도로 접종하였을 경우에는 *Scenedesmus obliquus*가 총 현존량의 60~80%의 우점률을 나타내었으며, *Chlorella* sp.가 아우점종으로 나타났다. 호오탁성종으로 알려져 있는 *Scenedesmus obliquus*는 오염도가 높은 폐수처리에 유용하게 이용할 수 있을 것으로 생각되나, 이번 실험 결과로 볼 때 *Chlorella* sp.가 영양염류 제거에 더 효과적인 종으로 판단되었다.

Table 3. Dominant and subdominant species according to inoculation concentration and illuminance.

Illuminance (Lux)	Inoculation concentration	Dominant species (%)	Subdominant species (%)
8000	1.0×10^7 cells mL ⁻¹	<i>Chlorella</i> sp. (95)	<i>Coelastrum microporum</i> (5)
	1.0×10^6 cells mL ⁻¹	<i>Scenedesmus obliquus</i> (80)	<i>Chlorella</i> sp. (20)
	1.0×10^5 cells mL ⁻¹	<i>Chlorella</i> sp. (40)	<i>Scenedesmus obliquus</i> (30) <i>Coelastrum microporum</i> (30)
4000	1.0×10^7 cells mL ⁻¹	<i>Chlorella</i> sp. (95)	<i>Monoraphidium contortum</i> (5)
	1.0×10^6 cells mL ⁻¹	<i>Scenedesmus obliquus</i> (60)	<i>Chlorella</i> sp. (20) <i>Monoraphidium contortum</i> (20)
	1.0×10^5 cells mL ⁻¹	<i>Chlorella</i> sp. (90)	<i>Coelastrum microporum</i> (10)

Table 4. The removal efficiency of nutrients, growth rate of microalgae according to inoculation concentration and illuminance.

Illuminance (Lux)	Inoculation concentration	Removal efficiency of NO ₃ -N (%)	Removal efficiency of PO ₄ -P (%)	Growth rate of microalgae (mg L ⁻¹ day ⁻¹)
8000	1.0×10^7 cells mL ⁻¹	83.6	95.3	55.2
	1.0×10^6 cells mL ⁻¹	88.4	97.3	31.1
	1.0×10^5 cells mL ⁻¹	63.0	97.1	15.1
4000	1.0×10^7 cells mL ⁻¹	27.2	97.0	32.6
	1.0×10^6 cells mL ⁻¹	88.1	97.3	23.6
	1.0×10^5 cells mL ⁻¹	84.6	97.3	15.1

예비 배양조에서 인공폐수로 바뀐 성장환경에서의 미세조류 종조성은 일차적으로 달라진 영양상태가 성장과 생존의 중요한 인자인 동시에 광도, 폭기 등의 요인에 의해 종변화를 가져올 수 있으며, 미세조류의 접종 농도에 따른 중간 영양염류 흡수 경쟁과 미세조류 스스로에 의해 빛이 차단되는 그림자 현상 등으로 달라질 수도 있을 것으로 사료된다(Reynolds, 1998; Kim and Choi, 2014). *Chlorella* sp.는 다른 미세조류 종보다 세포크기가 작고 구형으로 성장과 생존에서 유리하였던 것으로 판단된다. *Coelastrum microporum*은 8000 Lux의 높은 조도에서 아우점종으로 나타났고, *Monoraphidium contortum*은 4000 Lux의 낮은 조도에서 아우점종으로 나타났다.

3. 조도 및 접종 농도에 따른 조류 성장과 영양염류 제거율

조도 및 접종 농도에 따른 영양염류 제거율 및 미세조류 성장률을 Table 4에 나타내었다. 4000 Lux 조도에서 NO₃-N 제거율은 27.2%~88.1%로 나타났고, 8000 Lux 조도에서 NO₃-N 제거율은 63.0%~83.6%로 나타났다. 4000 Lux 및 8000 Lux 조도에서 PO₄-P의 제거율은 95.3% 이상으로 NO₃-N의 제거율보다 높게 나타났다. 4000 Lux 이상의 조도에서 PO₄-P는 초기 2 mg L⁻¹에서 14일 배양 후 0.056 mg L⁻¹로 평균 97.2% 이상 제거되어 하천의 생활환경기준을 적용하면 총인 기준으로 약간 좋음 단계(0.1 mg

L⁻¹ 이하)를 만족할 수 있었다.

동일한 접종 농도에서 미세조류 성장률은 조도가 높을수록 높게 나타났다. 동일한 조도 조건에서는 접종 농도가 높을수록 미세조류 성장률이 높게 나타났는데, 이는 접종 농도가 높을수록 적응기가 짧아 미세조류가 빠르게 증식한 결과로 판단된다.

4000 Lux와 8000 Lux 조도에서 1.0×10^6 cells mL⁻¹ 농도로 접종했을 때 1.0×10^7 cells mL⁻¹의 접종 농도에 비해 NO₃-N와 PO₄-P의 제거 효율이 높게 나타나고, 특히 4000 Lux 조도 조건에서 접종 농도 1.0×10^7 cells mL⁻¹일 때 NO₃-N의 제거율이 매우 낮게 나타났다. 이러한 결과는 세균의 높은 활성에 의한 것으로 추정된다. 접종 농도를 높이면 처리시설용량이나 처리비용이 줄어들기 때문에 접종 농도를 높일수록 경제적인 장점이 많지만, 조도가 낮고 접종 농도가 높을수록 빠른 시간 내 지수성장기를 거치면서 영양염류를 최대 흡수하고 정체기에서는 미세조류와 사멸한 미세조류를 분해하는 세균의 경쟁이 시작되면서 제거율이 떨어지기 시작하고, 사멸기로 접어들면 세균의 미세조류 분해로 인하여 흡수되었던 영양염류가 배출되는 것으로 추정된다. 짧은 간격으로 NO₃-N의 제거효율에 대한 추가적인 실험이 필요할 것으로 판단되지만 이번 연구 결과에서는 1.0×10^6 cells mL⁻¹ 농도가 적당한 것으로 나타났다.

Table 5. The removal efficiency and removal rate of nutrients according to wastewater discharge facility.

Facility of wastewater discharge	Initial concentration (mg L ⁻¹): TN/TP	Removal efficiency of TN (%)	Removal efficiency of TP (%)	Removal rate of TN (mg L ⁻¹ day ⁻¹)	Removal rate of TP (mg L ⁻¹ day ⁻¹)	N/P ratio
Synthetic wastewater	18.600/2.000	94.9	90.0	1.961	0.200	9.3
Car washing	2.618/0.196	68.8	87.2	0.200	0.019	13.4
Processing and storage of fruit and vegetables	9.734/4.682	82.2	82.0	0.889	0.426	2.1
Food manufacturing	5.902/0.277	74.2	76.9	0.487	0.024	21.3
Metal processing	16.985/0.190	13.8	78.9	0.260	0.017	89.4
Rubber products manufacturing	2.455/0.089	71.7	65.2	0.196	0.006	27.6
Inorganic chemistry manufacturing	27.792/7.600	68.9	22.4	2.129	0.189	3.7
Effluence of private sewage	17.835/2.190	90.6	93.2	1.796	0.227	8.1
Fishery products processing and storage	106.100/3.040	7.5	14.5	0.889	0.049	34.9
Effluence of livestock excretions	330.800/0.782	7.4	18.8	2.733	0.016	423.0

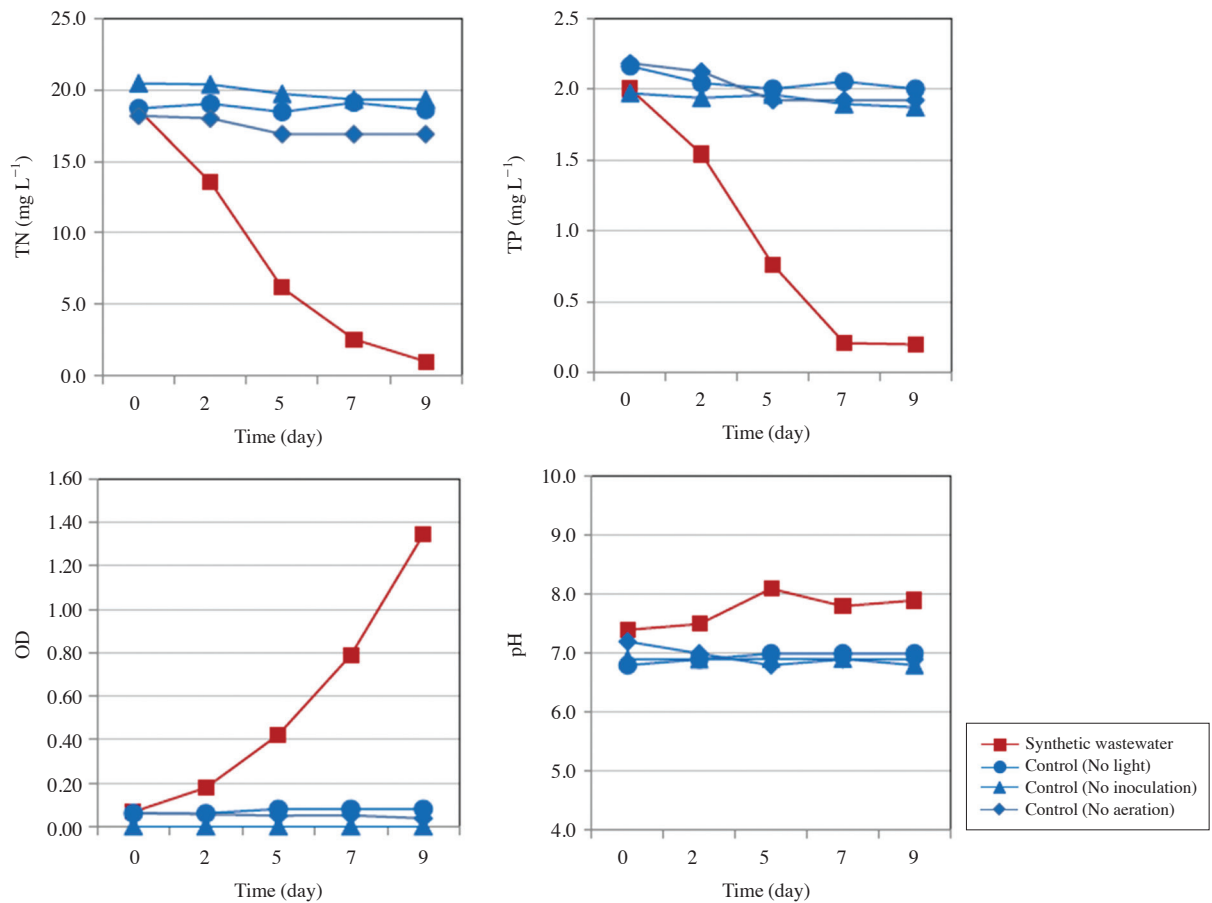


Fig. 1. Changes of TN, TP, OD, pH according to the culture time in synthetic wastewater.

4. 폐수 배출시설별 영양염류 제거율 및 제거속도 평가

배출시설별 영양염류 제거율 및 제거속도를 Table 5에 나타내었다. 인공폐수의 TN, TP 제거율은 각각 94.9%와 90.0%로 나타났으며, TN, TP의 제거속도는 각각 1.961

L⁻¹ day⁻¹, 0.200 mg L⁻¹ day⁻¹로 영양염류 제거속도는 대략 N : P = 9.8 : 1 비율로 제거되었다. 본 연구 배양조건에서의 영양염류 표준제거속도라고 할 수 있다.

배출시설 중 제거율이 높은 업종은 개인하수 방류수로 나타났으며, *Scenedesmus*의 다양한 N/P ratio의 배지실험

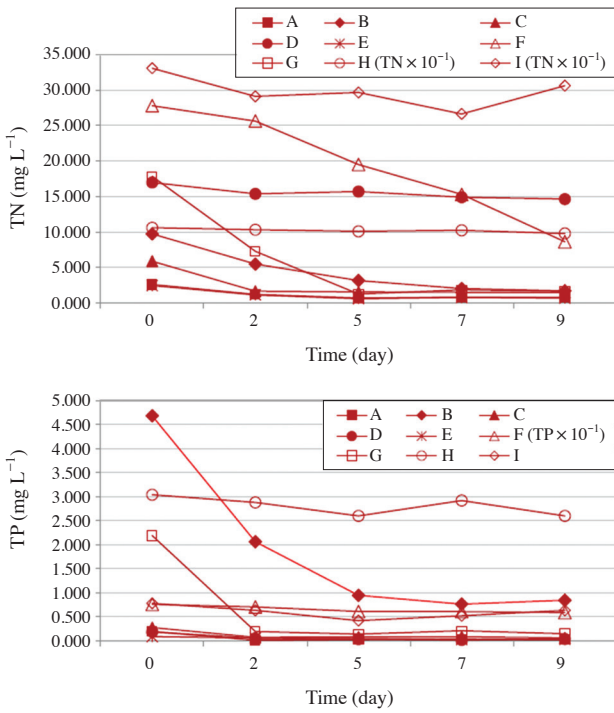


Fig. 2. Changes of TN, TP according to the culture time in wastewater discharging facility (A: Car wash facility, B: Processing and storage facility of Fruit and vegetables, C: Food manufacturing facility, D: Metal processing facility, E: Rubber products manufacturing facility, F: Inorganic chemistry manufacturing facility, G: Effluent of Private sewage, H: Fishery products processing and storage facility, I: Effluent of livestock excretions).

에서 N/P ratio가 30 이하일 때 질소가 제한상태로 성장하다 30을 넘으면 제한인자가 인으로 전환한다고 보고되었는데 (Rhee, 1978), 개인하수 방류수의 N/P ratio는 8.1로서 질소가 미세조류 증식의 제한물질로 작용하면서 제거율이 높았을 것으로 사료된다. Xin *et al.* (2010)은 조류를 이용한 영양염류 제거는 N/P ratio 변화의 영향을 받고, N/P ratio가 5:1~12:1일 때 질소는 83~99%, 인은 99% 제거된다고 보고하였는데 본 연구에서도 이와 유사한 결과를 나타내었다. 개인하수 방류수와 과일, 채소가공 및 저장처리업은 TN, TP 제거율이 높으면서 TP의 제거속도도 각각 0.426 mg L⁻¹ day⁻¹, 0.227 mg L⁻¹ day⁻¹로 월등히 높게 나타났다. 가축분뇨 방류수는 타 업종보다 N/P ratio가 높아 질소 제거속도가 높게 나타난 것으로 판단된다.

5. 배출시설별 배양시간에 따른 TN, TP, OD, pH 변화

인공폐수에서 배양시간에 따른 TN, TP, OD, pH 변화를 Fig. 1에 나타내었다. 배양시간에 따라 미세조류의 성장을

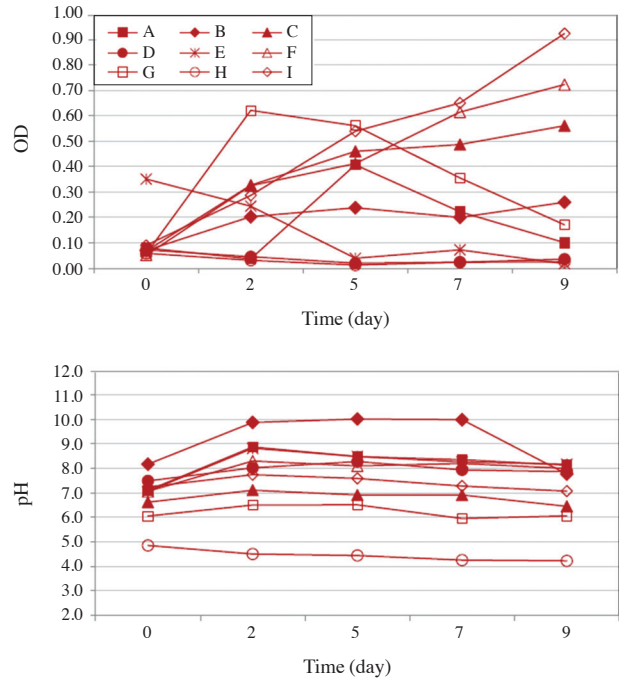


Fig. 3. Changes of OD, pH according to the culture time in wastewater discharging facility (A: Car wash facility, B: Processing and storage facility of Fruit and vegetables, C: Food manufacturing facility, D: Metal processing facility, E: Rubber products manufacturing facility, F: Inorganic chemistry manufacturing facility, G: Effluent of Private sewage, H: Fishery products processing and storage facility, I: Effluent of livestock excretions).

대변하는 OD는 계속 증가하고 TN, TP는 배양시간에 따라 감소하는 추세를 나타내었고, pH는 5일째까지 증가한 후 점차 감소하기 시작하였다. 인공폐수의 대조실험인 미접종, 미폭기, 빛이 없을 때 3가지 모두 미세조류가 성장하지 못하여 영양염류가 제거되지 않았다. 영양염류 제거는 9일까지 가능하나 배양 후 미세조류 성장 및 제거 속도로 보아 초기 5일 이내 영양염류의 60% 이상 제거되는 것으로 나타났다.

배출시설별 배양시간에 따른 TN, TP, OD 및 pH의 변화를 Figs. 2, 3에 나타내었다. 폐수에 미세조류를 접종한 후 TN, TP는 시간이 갈수록 대부분 업종에서 감소하는 경향을 나타내었으며, 실험대상 모든 배출시설 방류수에서 영양염류 제거가 가능함을 확인할 수 있었다. 세차업은 다른 업종에 비해 세제사용이 많은 업종으로 OD가 2일 동안에 일시적으로 감소하다가 5일째 최고를 나타내었고, TN, TP는 5일 안에 최저를 나타내며 미세조류의 성장으로 영양염류가 제거된 것으로 판단된다. 과일, 채소 가공저장처리업과 식품가공업에서는 접종 후 OD는 상승하면서 동시에

TN, TP는 하락하여 미세조류 증식에 의해 영양염류가 제거된 것으로 판단된다. 과실, 채소 가공저장처리업은 미세조류의 성장으로 pH가 10까지 상승하였다.

금속가공업, 고무제품제조업은 접종 후 OD가 5일까지 계속 감소하였는데 이는 폐수 내 미지의 무기물질과 미세조류의 결합으로 인한 침전일 가능성이 있고 TN, TP도 침전에 의한 감소인 것으로 사료된다. 무기화합물질 제조시설도 OD의 상승추세로 미세조류의 성장으로 pH가 상승하면서 영양염류가 제거된 것으로 판단되며, TP보다 TN의 제거율이 3배 이상 높게 나타났다.

개인하수 방류수는 2일의 짧은 기간에 OD와 pH가 상승하고 TN, TP가 최저값을 나타내었다. TN, TP의 하락폭도 커서 개인하수 방류수 기준의 90% 이상 제거가 가능하여 하수의 고도처리가 가능함을 확인하였다. 대부분의 개인하수 방류수에서는 생물학적으로 미생물과 미세조류의 공생적 관계로 미세조류는 광합성을 통해 산소를 발생시키고 박테리아는 이 산소를 전자수용체로 이용하여 유기물의 산화분해에 활용한다. 유기물을 산화할 때 발생하는 CO₂는 미세조류의 탄소원으로 사용되면서 두 미생물 중간에 상호 이익이 되면서 높은 영양염류 제거율을 나타낸 것으로 판단된다(Mujtaba and Lee, 2016). Lee and Park (2010)은 여과한 하수를 대상으로 *Chlorella vulgaris*를 9일간 배양하였을 때 조류 생체량이 증가함에 따라 총 질소와 총 인이 각각 46.1%와 60% 제거되었다고 보고하였는데 본 연구에서 나타난 오수의 총 질소와 총 인의 제거율과는 큰 차이를 나타내었다. 이러한 결과는 광도나 교반 방법 등의 상대적인 배양조건의 차이에 기인한 것으로 생각된다.

수산물가공 및 저장시설에는 폐수처리과정에 들어가는 응집제의 영향으로 4~5의 낮은 pH로 5일 동안 미세조류가 성장하지 못한 것으로 판단되고, 미세조류와 영양염류의 흡착에 의해 폐수의 TN, TP 농도가 미세하게 감소한 것으로 생각된다. 미세조류 세포막에 영향을 미치고 영양염류의 흡수와 관련이 있는 폐수의 pH는 중성의 pH로 전처리를 거친 후 활용해야 될 것으로 사료된다.

하수보다 상대적으로 유기물이 많고 TN, TP가 높은 가축분뇨 방류수에서 OD는 계속 증가하며 미세조류는 성장하였으나 TN, TP의 영양염류는 5일까지 계속 감소하다가 미생물 활동으로 인한 pH의 변화와 영양염류의 탈착 등으로 다시 증가한 것으로 생각된다. 실제 돈분 액체 비료의 옥외배양으로 TN, TP의 제거율은 혼합 토착 미세조류 CSS에서 93.6%, 98.5%로 단일 종의 이용에 비해 30% 이상 높은 제거 효율을 나타내었다고 보고된 바 있다(Choi. et al., 2014). 이 실험은 돈분의 화학적 응집처리 없이 원심분리한 후 희석한 실험으로 본 연구의 실제 가축분뇨 방류

수의 경우 법정수질기준을 준수하기 위해 총인 제거시설 가동으로 N/P비가 높고 상대적으로 높은 TN을 제거하기 위해 다시 인을 추가적으로 넣어 배양하여 제거효율을 높이는 추가연구가 필요할 것으로 생각된다.

미세조류 배양에 폐수를 배지로 활용할 경우 나타나는 문제점은 폐수 내 탁도로 인한 광합성 저해, 다른 미생물과의 공생과 다양한 독성 유기물이나 중금속 등으로 성장이 저해될 가능성이 많다. 그리고 국내에서 물벼룩을 이용한 폐수의 생태독성 원인물질로 중금속(26.8%), 산화제(17.4%), 복합독성(13.0%), 염(10.1%), 유기화합물(7.2%) 순으로 발견되는 것으로 보고되었는데, 미세조류에 대한 생태독성도 이와 유사하게 독성을 나타낼 것으로 사료된다(MOE and KECO, 2016).

따라서 미세조류를 이용한 폐수의 영양염류 제거는 사업장에서 나오는 폐수의 성분이나 독성원인물질을 파악한 후, 업종별로 독성에 강하고 처리효율이 좋은 미세조류를 선별해서 업종별 맞춤형 미세조류를 체계화시켜 나가는 추가 연구가 필요한 것으로 판단된다.

적 요

본 연구는 경상북도에 위치한 하천과 호소에서 채집한 미세조류의 배양실험을 통해 영양염류 제거에 유용한 미세조류를 탐색하고, 실제 배출되는 폐수, 개인하수 및 가축분뇨 방류수에 미세조류를 접종하여 질소와 인 제거효율을 평가하고자 하였다. 조류를 채집하여 예비 배양조에서 배양한 미세조류 군집의 우점종은 *Monoraphidium contortum*, *Scenedesmus acutus*, *Coelastrum microporum*, *Chlorella* sp.로 나타났으며, 4000 Lux와 8000 Lux 조도에서 인공폐수를 배양액으로 배양한 미세조류 군집의 우점종은 *Chlorella* sp., *Scenedesmus obliquus*로 나타났다.

8000 Lux 조도에서 NO₃-N 제거율은 63.0%~83.6%로 나타났고, 4000 Lux 조도에서 NO₃-N 제거율은 27.2%~88.1%로 나타났다. 4000 Lux와 8000 Lux 조도에서 PO₄-P의 제거율은 95.3% 이상으로 NO₃-N의 제거율보다 높게 나타났다. NO₃-N과 PO₄-P의 제거 효율은 1.0×10⁶ cells mL⁻¹ 농도로 접종하였을 때 1.0×10⁵ cells mL⁻¹와 1.0×10⁷ cells mL⁻¹ 농도로 접종하였을 때 보다 높게 나타났다. 미세조류를 이용한 인공폐수에서의 TN과 TP 제거율은 각각 94.9%과 90.0%로 나타났으며, TN과 TP 제거속도는 1.961 mg L⁻¹ day⁻¹, 0.200 mg L⁻¹ day⁻¹로 나타났다. 실험에 사용된 모든 폐수에서 미세조류를 이용하여 영양염류가 제거되었고, 그중 개인하수 방류수가 영양염류 제거율이 가장 높게 나타났다.

사 사

본 연구는 경상북도보건환경연구원 연구지원과 환경부 환경분야 시험검사의 국제적합성 기반구축사업의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Choi, J.E., B.H. Kim, Z. Kang, H.M. Oh and H.S. Kim. 2014. Biodiesel Production and Nutrients Removal from Piggery Manure Using Microalgal Small Scale Raceway Pond (SSRP). *Korean Journal of Environmental Biology* **32**: 26-34. (in Korean)
- de Godos, I., S. Blanco, P.A. García-Encina, E. Becares and R. Muñoz. 2009. Long-term operation of high rate algal ponds for the bioremediation of piggery wastewaters at high loading rates. *Bioresource Technology* **100**: 4332-4339.
- Kang, Z., B.H. Kim, S.Y. Shin, H.M. Oh and H.S. Kim. 2012. Municipal wastewater treatment and microbial diversity analysis of microalgal mini raceway open pond. *The Korean Journal of Microbiology* **48**: 192-199. (in Korean)
- Kim, D.G. and Y.E. Choi. 2014. Microalgae cultivation using LED light. *Korean Chemical Engineering Research* **52**: 8-16. (in Korean)
- Kim, S.J., Y.H. Lee and S.J. Hwang. 2013. Effects of pH and aeration rates on removal of organic matter and nutrients using mixotrophic microalgae. *Journal of Korean Society of Water and Wastewater* **27**: 69-76. (in Korean)
- Kim, T.H. 2013. A Development of Next-Generation Advanced Wastewater Treatment System using Microalgae and LED light sources, Ph. D. Dissertation. Kyung Hee University, Seoul, Korea. (in Korean)
- Kim, T.H., Y.B. Cho, J.E. Park and S.J. Hwang. 2013. Effects of phosphorus concentration and nitrogen sources on photoautotrophic microalgae *Scenedesmus dimorphus* applied wastewater treatment. *Journal of Korean Society of Water and Wastewater* **27**: 325-329. (in Korean)
- Lee, E.H., G.S. Nam, B.S. Kim, Y.S. Bae and H.Y. Um. 2013. AP-59: The Effect Analysis of Nutrients Removal Efficiency in Effluent of Sewage using Microalgae. Proceedings of Joint Conference of Korean Society of Limnology, The Korean Journal of Ecological Sciences and Korean Journal of Environmental Biology, 237p. (in Korean)
- Lee, J.H. and J.H. Park. 2010. Characterization of Biomass Production and Wastewater Treatability by High-Lipid Algal Species under Municipal Wastewater Condition. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* **32**: 333-340. (in Korean)
- Lee, J.H. and J.H. Park. 2011. Characterization of Algal-Bacterial Ecological Interaction and Nutrients Removal Under Municipal Wastewater Condition. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* **33**: 314-324. (in Korean)
- Ministry of Environment (MOE). 2015. Standard test method for water pollution. Public Announcement 2015-12. (in Korean)
- Ministry of Environment (MOE) and Korea Environment Corporation (KECO). 2016. Eco-toxicity management guide (Technical support case). (in Korean)
- Mujtaba, G. and K. Lee. 2016. Advanced Treatment of Wastewater Using Symbiotic Co-culture of Microalgae and Bacteria. *Applied Chemistry for Engineering* **27**: 1-9.
- Munoz, R. and B. Guieysse. 2006. Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: a review. *Water Research* **40**: 2799-2815.
- National Institute of Environmental Research (NIER). 2011. Advanced Treatment of Municipal Wastewater and Bio-fuel Production using Microalgae, 1-30. (in Korean)
- National Institute of Environmental Research (NIER). 2013. A Study on the planning of Improvement for Effluent Standards of Sewage Treatment plants, 184p. (in Korean)
- Park, K.Y., B.R. Lim, K.S. Lee and S.K. Lee. 2011. Potential Use of Microalgae *Scenedesmus acuminatus* for Tertiary Treatment of Animal Wastewater. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* **53**: 63-69. (in Korean)
- Reynolds, C.S. 1998. What factors influence the species composition of phytoplankton in lakes of different trophic status?. *Hydrobiologia* **369**: 11-26.
- Rhee, G.Y. 1978. Effects of N: P atomic ratios and nitrate limitation on algal growth, cell composition, and nitrate uptake. *Limnology and Oceanography* **23**: 10-25.
- Simpson, B.B. and M. Conner-Ogorzaly. 2011. Economic botany: Plants in our World, Boston : McGraw-Hill, 529p.
- Xin, L., H. Hong-ying, G. Ke and S. Ying-xue. 2010. Effects of different nitrogen and phosphorus concentrations on the growth, nutrient uptake, and lipid accumulation of a freshwater microalga *Scenedesmus* sp. *Bioresource Technology* **101**: 5494-5500.
- Yoon, Y.H., J.D. Kim and S.J. Oh. 2012. Microalgae: wonderful world & Industrial applications, Chonnam national university press. 352p. (in Korean)