

## 축산폐수의 3차처리를 위한 미세조류의 선별 및 처리조건의 최적화

김성빈 · 이석준 · 김치경<sup>1</sup> · 권기석<sup>2</sup> · 윤병대 · 오희목\*

생명공학연구소 환경미생물RU, <sup>1</sup>충북대학교 생명과학부, <sup>2</sup>안동대학교 생명자원과학부

**Selection of Microalgae for Advanced Treatment of Swine Wastewater and Optimization of Treatment Condition. Kim, Seong-Bin, Seog June Lee, Chi-Kyung Kim<sup>1</sup>, Gi-Seok Kwon<sup>2</sup>, Byung-Dae Yoon, and Hee-Mock Oh\*.** *Environmental Microbiology R.U., Korea Research Institute of Bioscience & Biotechnology, P.O. Box 115, Yusong, Taejeon 305-600, Korea, <sup>1</sup>School of Life Sciences, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea, <sup>2</sup>Natural Science College, Andong National University, Andong 760-749, Korea* - The feasibility of algae as means of removing nitrogen and phosphorus from secondary treated swine wastewater was studied. Among the tested 7 species of *Chlorella vulgaris* (UTEX 265), *Chlorella* sp. GE 21, *Botryococcus braunii* (UTEX 572), *Botryococcus* sp. GE 24, *Scenedesmus quadricauda*, *Phormidium* sp. GE 2, and *Spirulina maxima* (UTEX 2342), *C. vulgaris* was selected for its fast growth and abilities to remove nitrogen and phosphorus and to produce algal biomass from swine wastewater. *C. vulgaris* grew well at 35°C, and the optimum initial pH for growth was 8.0. In the effect of light intensity, the growth of *C. vulgaris* was limited under a light intensity of less than 40 µE/m<sup>2</sup>/s. The secondary treated swine wastewater contained 58.7 mg/l of total nitrogen and 14.7 mg/l of total phosphorus, and was diluted to 75, 50, and 25% with groundwater to be treated. Nitrogen and phosphorus were removed by *C. vulgaris* in all diluted swine wastewaters among which the most effective removal was in 75% swine wastewater (swine wastewater:groundwater=3:1). There was a tendency of linear increase in nitrogen and phosphorus removal time with increasing concentration of swine wastewater. Under the optimized culture condition, total nitrogen and total phosphorus were effectively removed to 95.3% and 96.0%, respectively, in 25% swine wastewater after 4-day incubation.

**Key words:** nutrient removal, nitrogen, phosphorus, *Chlorella vulgaris*, swine wastewater

우리 나라의 축산 농가는 대부분 영세한 규모로서 소비지인 대도시 외곽의 하천 주변에 위치하고 있어 축산 농가로부터 발생하는 고농도의 축산폐수는 제대로 처리되지 않는 상태로 하천에 유입되어 수질 악화의 주요인이 되고 있으며, 특히 질소와 인에 의한 호소 부영양화가 문제시되고 있다[18]. 하·폐수중의 질소와 인의 제거에는 생물학적, 생물·화학적, 화학적 그리고 물리적 방법이 있으나, 근래에 세계적 추세는 처리 단가가 비교적 낮으며 2차 오염물이 될 수 있는 슬러지의 발생이 적은 생물학적 처리[4], 또는 생물학적 처리와 화학적 처리를 병행하는 경향이 있다.

선진 외국에서는 유기물과 부유물질 같은 보편적인 오염물질에 대한 제거는 오래 전 상당히 이루어졌으므로, 다음 단계로 영양염류의 효과적인 제거에 관심이 모아지고 있다[20]. Guterstam과 Todd[9]에 의하면 광합성능이 있는 미세조류를 이용한 폐수처리의 장점은 첫째 생

태적 원칙을 이용한 방법이고, 둘째 환경 친화적 이고, 셋째 이차 오염을 발생시키지 않고, 넷째 생성된 미세조류를 수거해 재 이용할 수 있는 장점을 가지고 있으나, 단점으로는 첫째 세대시간이 길고, 둘째 조류를 수거하는데 어려움과 비용이 많이 소모되고, 셋째 빛이 필수적이고, 넷째 조류의 농도가 낮고, 다섯째 그들의 생리학적 연구가 많이 수행되지 않았다고 하였다. 각종 산업의 발달로 수반되는 환경오염을 막기 위하여 방류수에 포함된 질소와 인의 규제가 강화되면서 조류를 이용한 산업폐수[2], 축산폐수[5], 도시하수[6]에서 질소와 인의 제거를 위한 연구 및 기술개발이 선진 외국에서는 활발히 수행되고 있다[15]. 그러나 우리 나라에서는 질소와 인에 대한 배출규제가 본격적으로 시작된 기간이 짧고, 지금까지 질소와 인의 제거보다는 통상적으로 BOD, COD, SS 등에 관심을 두고 처리해 왔기 때문에 하·폐수중의 질소와 인의 제거에 대한 연구가 깊이 있게 이루어지지 못하고 있는 실정이다[19].

본 연구에서는 축산폐수 중에서 돈폐수를 대상으로 폐수내 질소와 인의 생물학적 3차처리를 달성하기 위하여

\*Corresponding author

Tel. 82-42-860-4321, Fax. 82-42-860-4594  
E-mail: heemock@kribb4680.kribb.re.kr

다양한 미세조류를 대상으로 돈폐수에서 생장이 우수한 조류를 선별하고, 질소와 인의 효율적 제거를 위한 최적화 조건의 설정, 그리고 최적 조건하에서 질소와 인의 제거 특성을 조사하였다.

## 재료 및 방법

### 사용조류

본 실험에 사용된 미세조류는 폐수에서의 성장 및 bio-mass이용 가능성을 고려하여 *Chlorella vulgaris*(UTEX 265), *Chlorella* sp. GE 21, *Botryococcus braunii*(UTEX 572), *Botryococcus* sp. GE 24, *Scenedesmus quadricauda*, *Phormidium* sp. GE 2, *Spirulina maxima*(UTEX 2342)의 7종을 대상으로 하였다. 이들 조류 중에서 *Chlorella* sp. GE 21, *Botryococcus* sp. GE 24, *S. quadricauda* 그리고 *Phormidium* sp. GE 2는 자연계에서 분리하였으며, 나머지 미세조류는 UTEX(The University of Texas at Austin)에서 분양 받았다.

### 축산폐수

실험에 사용된 폐수는 충남 논산에 위치한 대규모 돼지 사육 단지로부터 공급받았으며, 1차 물리적 처리, 2차 활성슬러지법으로 처리된 돈폐수로 적절히 처리되어 돈폐수 특유의 냄새는 거의 없었으며, 갈색을 띄고 있었다. 2차처리를 통하여 유기물은 거의 제거되었으나 색은 처리되지 않았다. 3차처리에 이용될 돈폐수 시료는 4℃ 저온실에 보관하여 후속 실험에 사용하였다.

### 미세조류의 배양

미세조류의 선별 및 배양의 최적화 실험에서 온도, pH, 축산폐수의 농도 등의 효과는 폐수를 멸균하지 않고 희석(돈폐수:지하수=1:3)하여 질소와 인의 제거에 관한 실험을 수행하였다. 접종원은 Chu 13 배지( $\text{KNO}_3$  0.371 g/l,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  0.08 g/l,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.2 g/l,  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  0.107 g/l, Fe citrate 0.02 g/l, Citric acid 0.1 g/l)와 trace element 1 ml/l( $\text{H}_3\text{BO}_3$  2.86 g/l,  $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , 1.81 g/l,  $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  0.391 g/l,  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , 0.079 g/l,  $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , 0.0494 g/l)에 미세조류를 실험 2주전에 배양하여 이것을 접종원으로 사용하였다. 접종원에 포함된 미세조류의 수는  $4.16 \times 10^5/\text{ml}$  정도로 이 배양액을 실험군에 3% 접종하였다. 온도의 영향은 20, 25, 30, 35℃ 조건에서 190  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 광도하에서 shaking incubator에서 수행하였으며, pH의 영향은 돈폐수의 pH를 5-9로 조절한 다음 *C. vulgaris*를 13일간 배양하면서, 온도의 영향을 조사할 때와 같이 조류의 성장과 폐수내 질소와 인 제거의 효과를 조사하였다. 또한 축산폐수의 농도를 조사하는 실험도 같은 조건하에서 실시

하였다. 광도의 영향은 25% 희석된 돈폐수에 *C. vulgaris*를 접종한 후 5  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ 에서 160  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ 까지 다양하게 광이 공급되는 light chamber내에서 250-ml의 삼각플라스크에 100 ml의 배양액을 9일간 정치배양하였다. 상온의 온도에서 하루에 2회 hand shaking으로 배양액을 혼합하였다. 그리고 돈폐수 처리의 최적조건에서 질소와 인의 제거효율을 알아보고, 처리방법에 따른 미세조류의 성장 및 질소와 인 제거 특성을 조사하기 위해 3-1 조류배양기에서 수온은 35℃, pH 8.0, 광도는 150  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ 로 조절하고 25% 희석된 돈폐수를 처리하였다.

### 건조세포중량

건조세포중량은 시료를 sampling manifold(Millipore)를 이용하여 glassfiber filter(Whatman GF/C)로 여과한 후 여과된 고형물을 100℃에서 24 hr 건조하여 측정하였다.

### 엽록소-a 함량

엽록소-a 함량을 측정하기 위하여 시료 1 ml을 glass-fiber filter로 여과한 후 chloroform/methanol(2:1 by volume) 9 ml을 첨가하여 섞어 준 후 4-5시간 냉장고에 보관하였다. 그런 후 증류수 5.4 ml을 넣고 흔들어 준 후 냉장고에서 over night하였다. Chloroform 층을 분리하여 fluorometer(Turner Model-450)를 이용하여 fluorescence 값을 측정한 다음 엽록소-a 농도를 산출하였다.

### 질소와 인 분석

폐수 내에 존재하는 총질소와 총인은 시료를 persulfate 방법에 따라 질소 또는 인을 질산염과 인산염으로 산화시킨 후 수행하였다[7, 12]. 즉, 시료 4 ml에 0.67% potassium persulfate용액(0.30% NaOH 첨가) 6 ml을 가하고 고온 멸균기를 이용하여 120℃에서 30분간 가열하여 완전히 산화시켰다. 산화된 시료에 0.3 N HCl 0.6 ml을 가하여 혼합한 후 완충용액(3.0% boric acid, 2.0 N NaOH) 0.8 ml과 증류수 8.6 ml을 가하여 과황산염으로 산화 처리하여, 시료내 인산염과 질소를 정인산염( $\text{PO}_4^{3-}$ )과 질산염의 형태로 변화시켰다. 정인산염은 시료를 phosphomolybdate[14]로 발색시킨 후 5-cm light path의 cuvette으로 885 nm에서 흡광도를 측정하여 정량하였고, 질산염은 Szechrome NB 시약(Polyscience Inc.)을 사용하여 600 nm에서 흡광도를 측정하여 정량하였으며[22], 암모니아성 질소는 직접 네슬러화법[1]으로 분석하였다.

### COD, SS, TOC 분석

COD와 SS는 환경오염공정시험법[10]에 따라 0.025 N  $\text{KMnO}_4$  일정량을 넣고 30분간 가열 반응시킨 다음 소

비된  $\text{KMnO}_4$ 의 양으로부터 COD를 측정하였으며, SS (suspended solid)는 시료를 glassfiber filter로 여과하여 측정하였다. TOC(total organic carbon)는 총유기탄소분석기(Shimadzu 5000A)로 분석하였다.

## 결과 및 고찰

### 축산폐수의 선정

축산폐수의 3차처리를 위해 충남 논산에 위치한 돼지 사육 단지로부터 1, 2차처리된 돈폐수를 수집하여 분석한 결과는 Table 1과 같다. 활성슬러지법에 의해 처리된 폐수의  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 은 40 mg/l로 유기물 농도는 비교적 낮았으나, 총질소와 총인은 각기 58.65 mg/l, 14.71 mg/l로 높은 농도로 존재하였다. 또한 총질소 중에서 암모니아성 질소가 45.44 mg/l로 77%를 차지하였다. 지금까지는 하천이나 호소에 유기물 유입으로 인한 수중 생태계 오염을 중점으로 이에 대한 규제를 많이 해 왔으나 점차 질소와 인에 대한 규제가 강화되고 있는 실정이다. 1996년부터 적용하고 있는 축산폐수 공동처리시설의 방류수 수질기준인 BOD 30 mg/l, SS 30 mg/l, TN 120 mg/l, TP 16 mg/l에는 크게 벗어나지 않았으나, 축산폐수에 포함된 질소와 인이 호소 부영양화의 주요 인자임을 고려할 때 방류수 중의 질소와 인에 대한 기준 강화 및 이를 뒷받침할 수 있는 효과적 처리기술의 개발이 요구된다 하겠다.

### 미세조류의 선별

선별 대상 미세조류인 *C. vulgaris*(UTEX 265), *Chlorella* sp. GE 21, *B. braunii*(UTEX 572) *Botryococcus* sp. GE 24, *S. quadricauda*, *Phormidium* sp. GE 2, 그리고 *S. maxima*(UTEX 2342)의 25%로 희석(돈폐수:지하수=1:3)된 돈폐수 중에서 배양시간에 따른 조류의 생장은 Fig. 1과 같다. 배양후 27일째 미세조류의 생장은 *C. vulgaris*와 *Chlorella* sp. GE 21, 그리고 *S. quadricauda*에서 우수하였다. 이들 조류 중에서 *C. vulgaris*는 초기 성장률이 다른 두 종보다 높았으며, 양식어의 사료[13]

Table 1. Analysis of swine wastewater treated with activated sludge process

Characteristics	Treated swine wastewater
$\text{COD}_{\text{Mn}}$ , mg/l	40.00
SS, g/l	0.12
pH	8.01
TN, mg/l	58.65
$\text{NO}_3\text{-N}$ , mg/l	9.75
$\text{NH}_4^+\text{-N}$ , mg/l	45.44
TP, mg/l	14.71
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ , mg/l	3.17
TOC, mg/l	42.35

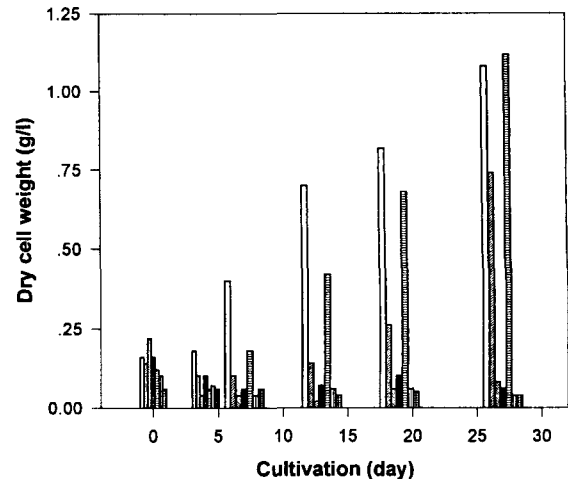


Fig. 1. Growth of seven algal species in 25% secondary treated swine wastewater. Cultivation was done for 27 days at 25°C on a rotary shaker under a light intensity of 50  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ .

*Chlorella vulgaris* (UTEX 265) (□), *Chlorella* sp. GE 21 (▨), *Botryococcus braunii* (UTEX 572) (▩), *Botryococcus* sp. GE 24 (■), *Scenedesmus quadricauda* (▧), *Phormidium* sp. GE 2 (▦), *Spirulina maxima* (UTEX 2342) (■).

로 이용될 수 있는 가능성으로 인하여 대상 미세조류로 최종 선별하였다. 질소와 인은 미세조류의 생장에 필수적인 성분이므로, 조류의 성장과 질소와 인의 제거는 상관관계를 갖게 되어 생장이 우수한 *C. vulgaris*에서 질소와 인의 제거도 높은 것으로 조사되었다. 이는 Przytocka-Jusiak 등[17]과 Chen과 Johns[3]이 조사한 *Chlorella*가 질소나 인의 제거에 우수한 효과를 갖는다는 보고와도 일치하는 결과이다.

### 축산폐수 처리의 최적화

온도 수온이 *C. vulgaris*의 성장과 질소와 인의 제거에 미치는 영향을 조사하기 위하여 조류를 25% 희석된 돈폐수에 접종한 후 20, 25, 30, 35, 40°C로 유지되는 조류배양기에서 150  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 광조건하에서 6일간 배양하면서 성장 특성을 조사하였다(Fig. 2). 조사된 20-40°C의 범위 중에서 조류의 성장과 질소와 인의 제거는 35°C 배양조건에서 가장 높았다. 35°C에서 건조세포증가율은 50.0 mg/l/day로 계산되었으며, 총질소는 배양 초기 21.50 mg/l에서 1.01 mg/l로 95.3%의 제거효율을 보였으며, 총인은 배양 초기 4.83 mg/l에서 0.19 mg/l로 96.0%의 높은 제거효율을 보였다. 대부분의 녹조류에서 생장의 최적온도가 25°C인 점을 고려할 때 본 실험 중은 비교적 높은 수온에서 최대 성장을 보였다. 또한 Veber 등[21]은 폐수에서 *C. vulgaris*의 최적 생육온도는 36-37°C임을 보고한 바 있다. 한편, 수온이 25, 30, 40°C일 때 질소와 인의 제거효율은 80% 이상으로 높았으나, 미세조류의 생육은 35°C에 비하여 크게 감소하였다.

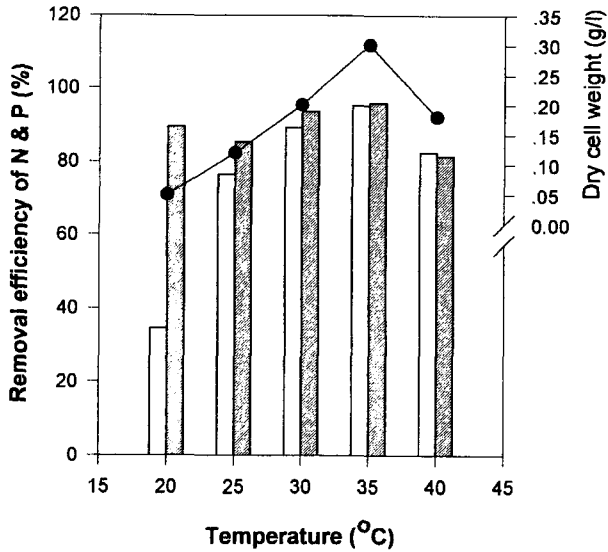


Fig. 2. Effect of temperature on cell growth and the removal of nitrogen and phosphorus in 25% swine wastewater. Cultivation was done for 6 days at each temperature on a rotary shaker under a light intensity of 50  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ . Dry cell weight (●), Total nitrogen removal efficiency (□), Total phosphorus removal efficiency (▨).

pH 돈폐수의 pH를 5-9로 조절한 다음 *C. vulgaris*를 13일간 배양하였을 때 성장과 폐수내 질소와 인 제거의 효과를 조사한 결과는 Fig. 3과 같다. pH 5에서 9까지의 초기 pH 범위 중에서 pH 8로 조절한 경우 미세조류의 생장이 다른 pH에서 보다 우수하였다. 건조세포증가율은 43.8 mg/l/day이었고, 질소와 인의 제거효율은 각각

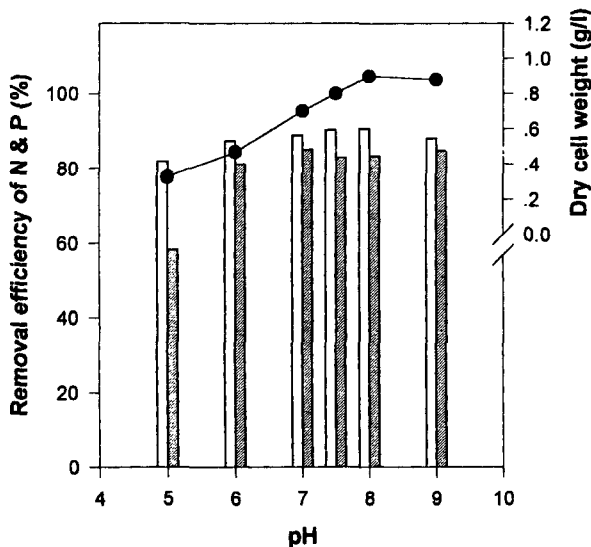


Fig. 3. Effect of pH on cell growth and the removal of nitrogen and phosphorus in 25% swine wastewater. Cultivation was done for 13 days at each pH on a rotary shaker under a light intensity of 50  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ . Dry cell weight (●), Total nitrogen removal efficiency (□), Total phosphorus removal efficiency (▨).

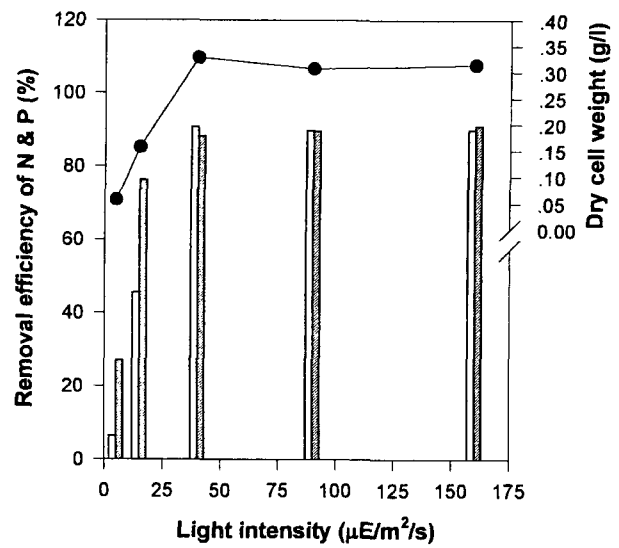


Fig. 4. Effect of light intensity on cell growth and the removal of nitrogen and phosphorus in 25% swine wastewater. Cultivation was done for 9 days at room temperature under each light intensity. Dry cell weight (●), Total nitrogen removal efficiency (□), Total phosphorus removal efficiency (▨).

90.7%, 87.9%로 나타났다. 질소와 인의 제거효율은 pH 7에서 9까지 큰 차이를 보이지 않아 약 알칼리의 범위에서는 pH 변화에 민감하지 않는 것으로 보였다. 이는 Gordon 등[8]의 보고와 같이 대부분의 조류는 약알칼리에서 최대 성장을 보이는데, 본 미세조류도 약알칼리에서 조류의 생육이 우수하였으며, 조류가 생육함에 따라 배지의 pH가 증가하는 것으로 판단된다.

광도 *C. vulgaris*의 성장과 폐수내 질소와 인의 제거에 미치는 광도의 영향을 조사하기 위하여 250-ml 삼각 플라스크에 25% 희석된 100 ml의 돈폐수를 넣고 미세조류를 접종한 후 5  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ 에서 160  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ 까지 다양하게 광이 공급되는 light chamber에서 9일간 정치배양하였다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 40  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$  이하에서는 조류의 생육이 저해를 받았다. 광도가 40  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$  이상으로 공급된 실험구에서는 조류의 성장이나 질소와 인의 제거효율은 비슷하였다. 따라서 돈폐수 처리에서 최소한 40  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$  이상의 광이 공급되어야 한다는 결론을 내릴 수 있었다.

축산폐수의 농도 돈폐수의 희석 정도에 따른 *C. vulgaris*의 성장과 총질소와 총인 제거효율을 조사한 결과는 Fig. 5와 같다. 배양온도 30°C와 pH 8.0에서 14일간 배양하였을 때, 돈폐수 75%(돈폐수:지하수=3:1)에서 최대 미세조류의 성장(53.5 mg/l/day)과 질소와 인의 제거효율이 각각 85.0%, 94.8%로 비교적 높았다. 그러나 100% 돈폐수에서도 긴 lag time 후에 조류의 생장이 이루어져, 돈폐수를 희석하지 않고도 처리할 수 있음을 보였다. 돈폐수의 농도가 높을수록 lag time이 길어지는 것

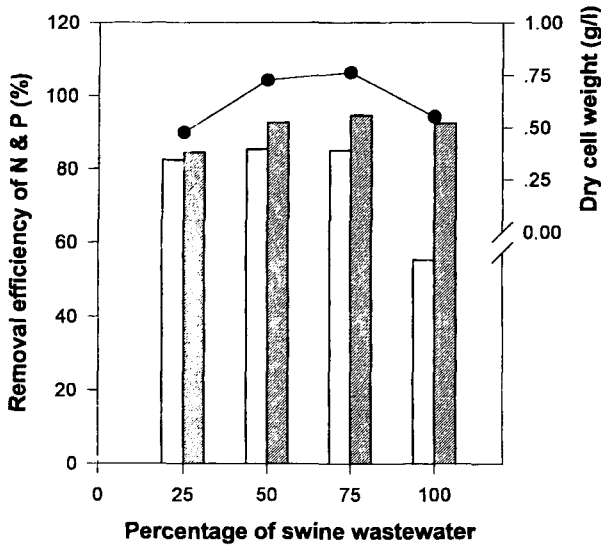


Fig. 5. Effect of percentage of swine wastewater on cell growth and the removal of nitrogen and phosphorus in the swine wastewater. Cultivation was done at 30°C, pH 8.0 for 14 days on a rotary shaker under a light intensity of 50  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ . Dry cell weight (●), Total nitrogen removal efficiency (□), Total phosphorus removal efficiency (▨).

은 암모니아성 질소의 독성으로 미세조류의 생장이 억제되기 때문에 사료된다[16].

본 실험에서 조사된 돈폐수 처리의 최적화 조건을 Table 2에 종합하였다. 각각의 최적조건을 근거로 하여 후속 실험에서도 같은 조건하에서 실시하였다.

축산폐수 처리의 최적조건하에서 질소와 인의 제거 특성

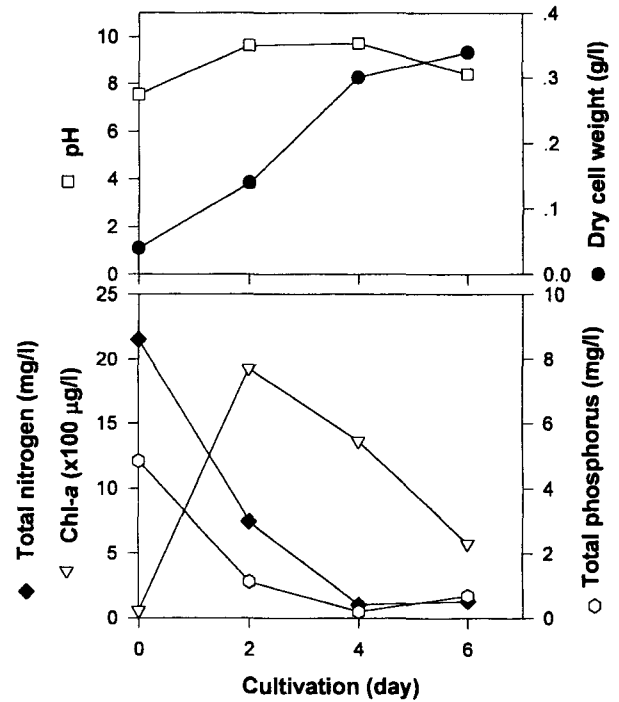


Fig. 6. Cell growth of *Chlorella vulgaris* and the removal of nitrogen or phosphorus at 25% swine wastewater. Cultivation was done for 6 days at 35°C in a 3-l fermenter under a light intensity of 150  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ .

본 실험에서 조사된 돈폐수 처리의 최적조건을 바탕으로 3-l 조류배양기(Pyrex, 직경 14 cm, 높이 30 cm)에서 수온은 35°C, pH 8.0, 배양기 외부에서 원형으로 조사되는 광은 배양기의 중심부위에서 측정된 초기광도가 150  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ 이 되도록 조절하고 25% 희석된 돈폐수를 처리한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 초기 유입수에서 총질소

Table 2. Summary of cell growth of *Chlorella vulgaris* and nitrogen or phosphorus removal under different culture conditions

Treatment	Condition	Productivity (mg/l/day)	N		P	
			removal rate (mg/l/day)	removal (%)	removal rate (mg/l/day)	removal (%)
Temperature (°C)	25	41.3	4.04	76.4	1.08	85.9
	30	45.0	4.24	89.3	0.84	72.2
	35	50.0	4.39	95.3	1.16	96.0
	40	46.7	4.19	82.6	1.01	81.5
pH	6	31.3	2.41	87.5	0.69	85.1
	7	31.3	2.44	88.8	0.67	89.2
	8	43.8	2.46	90.7	0.64	87.9
	9	33.3	1.87	88.1	0.64	86.7
Light-intensity ( $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ )	13	16.1	1.26	45.5	0.38	76.3
	40	35.1	2.39	91.0	0.68	88.3
	90	27.2	2.44	88.2	0.87	89.6
	160	34.9	2.29	90.0	0.99	90.7
Percentage of swine waste-water	25	33.0	1.92	82.5	0.38	84.5
	50	50.9	3.21	85.4	0.79	92.7
	75	53.6	3.63	85.0	1.32	94.8
	100	38.4	2.07	55.3	1.21	92.5

는 21.5 mg/l, 총인은 4.83 mg/l이었으나, 4일 배양후 폐수내 총질소가 1.00 mg/l, 총인이 0.194 mg/l로 감소하였다. 즉, 접종후 4일 동안에 총질소와 총인은 각각 95.3%, 96.0%의 높은 제거효율을 보였다. 이와 같은 결과는 Li 등[11]이 미세조류를 배양한 못에서의 영양염류 제거에 관한 연구로서 유입수중 총질소는 29.8 mg/l, 총인은 9.3 mg/l이었으나, 유출수에서 총질소는 11.1 mg/l, 총인은 3.10 mg/l이 포함되어 각각 72.6%, 48.1%가 제거되었다는 보고에 비하여 제거효율이 매우 높은 것이다. 따라서 이와 같은 시스템을 이용하여 축산폐수의 3차처리를 효과적으로 달성할 수 있다고 사료된다.

한편 미세조류의 생육에 따른 pH는 초기 7.5에서 4일 후 9.7까지 증가하다가 이후에 감소하였다. 그리고 엽록소-a 농도는 배양 2일후 최대값인 1,928  $\mu\text{g/l}$ 이었으나 이후에 감소하였다.

결과적으로 *C. vulgaris*를 이용한 돈폐수의 3차처리 는 질소와 인의 제거효율이 매우 높아 현장 적용에 의한 방류수 수질개선이 기대되며, 이와 같은 처리 기술은 우리나라의 호소와 하천, 그리고 해양 수질보전에 많은 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

## 요 약

축산폐수는 과량의 질소와 인을 함유하고 있어서 호소의 부영양화로 수질을 악화시키기 때문에, 본 연구에서는 2차처리된 돈폐수를 대상으로 조류를 이용하여 폐수내 질소와 인을 효율적으로 제거하고자 조류의 선별 및 배양의 최적화 실험을 수행하였다. *Chlorella vulgaris* (UTEX 265), *Chlorella* sp. GE 21, *Botryococcus braunii*(UTEX 572), *Botryococcus* sp. GE 24, *Scenedesmus quadricauda*, *Phormidium* sp. GE 2, 그리고 *Spirulina maxima*(UTEX 2342)의 7종을 대상으로 조사한 결과 *C. vulgaris*(UTEX 265)가 질소와 인의 제거 뿐만 아니라 미세조류의 생산량도 우수하였다. 다음 실험에 사용될 미세조류로 선별된 *C. vulgaris*는 수온 35°C에서 생장이 가장 좋았으며, 약 알칼리인 초기 pH 8.0에서 생장이 우수하였다. 미세조류의 생산 및 질소와 인의 제거에 있어 광도의 영향을 조사한 결과 40  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$  이하에서는 조류의 생장이 억제 받았으나, 그 이상의 광도에서는 비슷한 결과를 얻었다. 시료로 사용된 돈폐수의 질소와 인 농도는 각기 58.7 mg/l와 14.7 mg/l로 조사되었으며, 대상 폐수를 75%(돈폐수:지하수=3:1)로 희석하였을 때 질소와 인의 제거효율과 미세조류의 생산이 우수하였고, 희석하지 않은 경우 lag time은 길어졌으나 점차로 질소와 인이 제거되었다. 본 실험에서 얻어진 최적 조건하에서 25%의 돈폐수를 처리한 결과 4일 후 폐수중의 총질소는 95.3%가 총인은 96.0%가 제거되었다.

## 참고문헌

1. APHA, AWWA, WPCF. 1992. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 18th ed. American Public Health Association, Washington, D.C.
2. Aziz, M. A. and W. J. Ng. 1993. Industrial wastewater treatment using an activated algae-reactor. *Water Sci. Technol.* **28**: 71-76.
3. Chen, F. and M. R. Johns. 1991. Effect of C/N ratio and aeration on the fatty acid composition of heterotrophic *Chlorella sorokiniana*. *J. Appl. Phycol.* **3**: 203-209.
4. Chevalier, P. and J. de la Noüe. 1985. Efficiency of immobilized hyperconcentrated algae for ammonium and orthophosphate removal from wastewaters. *Biotechnol. Lett.* **7**: 395-400.
5. De la Noüe, J. and A. Basseres. 1989. Biotreatment of anaerobically digested swine manure with microalgae. *Biological Wastes* **29**: 17-31.
6. De la Noüe, J. and D. Proulx. 1988. Biological tertiary treatment of urban wastewaters with chitosan-immobilized *Phormidium*. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **29**: 292-297.
7. D'Elia, C. F., P. A. Steudler, and N. Corwin. 1977. Determination of total nitrogen in aqueous samples using persulfate digestion. *Limnol. Oceanogr.* **22**: 760-764.
8. Gordon, D. M., P. B. Birch, and A. J. McComb. 1981. Effects of inorganic phosphorus and nitrogen on the growth of an Estuarine *Cladophora* in culture. *Bot. Mar.* **24**: 93-106.
9. Guterstam, B. and J. Todd. 1990. Ecological engineering for wastewater treatment and its application in new England and Sweden. *Ambio* **19**: 173-175.
10. Kim, J. T. 1992. *Standard Methods for Environmental Pollution: Water and Wastewater*, Shinkwang Pub., Seoul.
11. Li, J., J. Wang and J. Zhang. 1991. Removal of nutrient salts in relation with algae in pond. *Water Sci. Technol.* **24**: 75-83.
12. Menzel, D. W. and N. Corwin. 1965. The measurement of total phosphorus in seawater based on the liberation of organically bound fraction of persulfate oxidation. *Limnol. Oceanogr.* **10**: 280-282.
13. Miernik, A. 1983. The quality of protein from algae used in the purification of wastewater from the nitrogen fertilizer industry. *Acta Microbiol. Polon.* **32**: 269-274.
14. Murphy, J. and J. Riley. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta* **27**: 31-36.
15. Nora, F. Y. T. and W. Y. Shan. 1994. Feasibility of using *Chlorella pyrenoidosa* in the removal of inorganic nutrients from primary settled sewage, pp. 291-299. In S. M. Phang (ed.), *Algal Biotechnology in the Asia-Pacific Region*, Institute of Advanced Studies, University of Malaya, Kuala Lumpur.
16. Przytocka-Jusiak, M. 1976. Growth and survival of *Chlorella vulgaris* in high concentration of nitrogen. *Acta Microbiol.* **25**: 287-289.

17. Przytocka-Jusiak, M., M. Duszota, K. Matusiak, and R. Mycielski. 1984. Intensive culture of *Chlorella vulgaris* as the second stage of biological purification of nitrogen industry wastewater. *Water Res.* **18**: 1–7.
18. Shelef, G. and C. J. Soeder. 1980. *Algal Biomass: Production and Use*, Elsevier North-Holland Biomedical Press, Amsterdam.
19. Sung, K. -D., J. -H. Ann, J. -Y. Lee, S. -J. Ohh, and H. -Y. Lee. 1995. Kinetics of cultivating photosynthetic microalga, *Spirulina platensis* in an outdoor photobioreactor. *Korean J. Biotechnol. Bioeng.* **10**: 401–405.
20. Tam, N. F. Y. and Y. S. Wong. 1990. The comparison of growth and nutrient removal efficiency of *Chlorella pyrenoidosa* in settled and activated sewages. *Environ. Pollut.* **65**: 93–108.
21. Veber, K., V. Votapek, K. Livanskiy, Y. Zagradnik, and B. Prokesh. 1984. Growth of *Chlorella vulgaris* in wastewater. *Hydrobiol. J.* **20**: 32–40.
22. Wynne, D. and G-Y. Rhee. 1986. Effects of light intensity and quality on the relative N and P requirement (the optimum N:P ratio) of marine planktonic algae. *J. Plankton Res.* **8**: 91–103.

(Received September 27, 1997)