

생태학적 수처리 시스템을 이용한 고농도 유기성 폐수처리

조재훈¹ · 김중곤² · 김준휘² · 윤성명³ · 이정섭⁴ · 김시욱^{1*}

¹조선대학교 환경공학부, ²조선대학교 생물신소재학과, ³조선대학교 생물교육학과, ⁴조선대학교 생물과학부

본 연구실에서 개발한 3단계 메탄발효시스템을 이용하여 음식폐기물을 소화하고 배출되는 고농도 유기성 폐수를 미생물막 반응조와 조류, 물벼룩을 이용한 생태학적 수처리 시스템으로 처리하였다. 미생물막 반응조에서 유출되는 폐수에 두 종의 조류를 처리하였을 때 *Chlorella* sp. 보다 *Selenastrum capricornutum*이 더 잘 성장하였고, 질소제거 효과도 높았다. 고농도의 Mg^{2+} 과 Ca^{2+} 을 주입하고 유출수의 질소와 인 농도 비율을 10:1이 되도록 인위적으로 인 농도를 조절하였을 때에는 더욱 높은 질소 제거와 조류 성장을 나타내었다. 시험관에서 조류와 물벼룩 두 종의 개체 수 변화를 관찰했을 때, 초기 조류 개체수는 물벼룩 개체수의 증가에 따라 감소하다가 물벼룩의 개체수가 최대치에 이른 후 환경저항에 의해 감소하기 시작하는 시점부터 점차적으로 증가하는 양상을 나타냈다. 본 연구에서 제시하는 생태학적 수처리 시스템은 유기성 폐수내 질소 및 인 처리에 매우 효율적이며, 시스템내의 최종 섭식자인 물벼룩을 대량 사육함으로써 이를 어류의 사료로 쓸 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다.

Key words □ alga, ecological water treatment system, high organic wastewater, waterflea

협기 소화공정에서 처리 후 배출되는 음식폐기물의 최종 유출액은 고농도의 유기성 폐수로서 질소와 인 성분이 대단히 높으므로 기존의 폐수처리 공법으로는 처리하기 어렵고, 하천의 부영양화를 초래하는 질소와 인 화합물에 대한 방류기준이 최근 들어 엄격히 적용되고 있으므로 이에 대한 고도처리 기술의 개발이 시급하다.

일반폐수로부터 영양염류를 제거하기 위하여 활성슬러지법과 생물막법 등 다양한 물리적, 화학적 그리고 생물학적 방법들이 사용되어왔다. 그러나 이러한 방법들을 단일 혹은 복합적으로 사용하였을 때 영양염류의 제거가 우수함에도 불구하고 운전비용과 조절의 어려움, 그리고 많은 화학약품의 요구와 과도한 슬러지의 발생 등에 의해 선호되지 못하고 있다. 따라서, 이와 같은 일반적인 폐수처리방법을 대신하여 조류의 생산력을 이용하는 처리 시스템은 유기물 제거 방법의 대안으로 제안되고 있다(1-3,5-9,12-14). 예를 들면, Mihalyfalvy 등은 도시하수의 안정적인 처리를 위하여 고농도의 조류를 이용한 처리시스템을 연구하였고(13), Travieso 등과 Tame 등은 폐수의 영양염류를 제거하기 위해 조류를 고정화하여 실험하였다(16,17). 또한 Craggs 등은 Scotland의 도시에 설치되어 있는 물결모양의 수로에 조류를 배양시켜 하수로부터 질소와 인을 제거하는 능력을 연구하였다(8).

조류는 자연계에서 가장 큰 수질오염 현상인 부영양화 현상의 발생 주체 미생물이고 진핵 세포체로서 빛을 이용하여 탄소 동화작용을 하는 미생물이므로 조류의 인공적 성장조절이 가능하다면 수질오염 중에서 특히 부영양화 현상을 일으키는 영양물질의 제거에 매우 효율적일 것으로 판단되고 있다(1). 또한, 조류는

고농도의 유기물을 함유한 폐수로부터 질소, 인 성분을 흡수하여 성장할 수 있기 때문에 이들을 이용한다면 질소와 인을 제거함과 동시에 어류의 먹이 등과 같은 유용한 biomass를 생산할 수 있다(3). 생산되는 조류는 세포내 우량 단백질의 함량이 높아 고단백 가축사료로도 이용할 수 있다. 그러나 과다 증식한 조류를 회수하지 않으면 노쇠화하고 세포가 파괴되어 다시 유기물로 환원되므로 기계적인 회수방법이 요구된다. 한편 Carberry 등은 조류를 이용한 폐수처리시 지역적인 특성에 따른 태양빛의 유무, 주야의 변화에 의한 광합성과 호흡의 차이, 광범위한 부지 요구, 그리고 조류 분리의 어려움 등의 문제점을 제시하였다(7). 조류의 이러한 문제점을 해결하기 위해 조류가 물벼룩과 같은 무척

Table 1. Chemical properties of wastewater eluted from methane fermentation system developed in this lab

Parameter	Methane Fermentation System	Biological Filter Chamber
HRT (day)	16	3
Loading (kg VS/m ³ /day)	54.9~55.4	1.8~6.0
pH	7.6~7.9	8.4~9.2
Temp. (°C)	45	30~35
T-N (mg/l)	4200	288
NH ₃ -N (mg/l)	1350	65
NO ₃ -N (mg/l)	60.2	31
T-P (mg/l)	80	30
TCOD (mg/l)	3282	510
SCOD (mg/l)	2214	490
BOD (mg/l)	834	161

*To whom correspondence should be addressed.
Tel: 062-230-6649, Fax: 062-225-6040
E-mail: swkim@mail.chosun.ac.kr

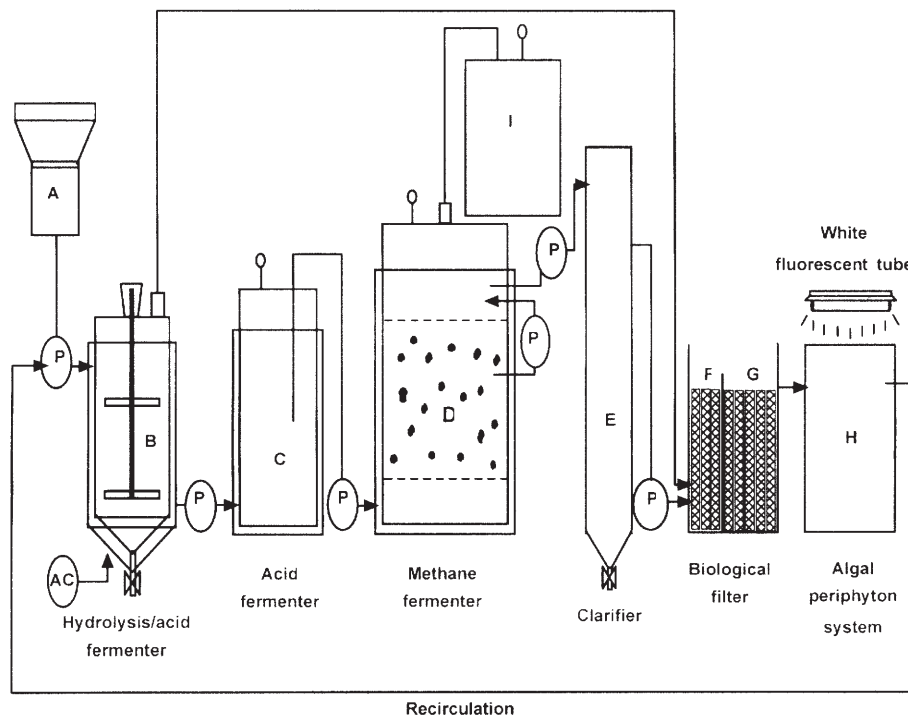


Fig. 1. Schematic diagram of a pilot scale three-stage methane fermentation system consisting of a hydrolysis/acidogenic reactor and two upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors for acidogenic and methanogenic processes. A, crusher; B, hydrolysis/acid reactor; C, acid reactor; D, immobilized-bed methane reactor; E, clarifier; F, oxic biological filter chamber; G, anoxic biological filter chamber; H, algal periphyton chamber; I, gas reservoir tank; P, pump; AC, air compressor.

추동물과 물고기에 의해서 자연적으로 섭취되는 생태계의 먹이 연쇄관계를 응용한 대안이 제안되기도 하였다(9,10,18).

본 연구에서는 국내에서 다량 발생하고 있는 음식폐기물을 제거할 목적으로 총 2.5 톤 규모의 1단계 반혐기성 가수분해/산 발효조, 2단계 혐기성 산발효조, 3단계 혐기성 메탄 발효조를 운전 하였으나(Fig. 1), 최종 방출되는 폐수내 잔류 COD, 총 질소, 총 인의 농도가 방류하기에 너무 높기 때문에 이들을 제거할 필요성이 있었다(11)(Table 1). 따라서 음식폐기물의 발효 공정 후 최종 배출되는 폐수를 방류수 수질기준에 맞추기 위하여 미생물막 반응조(BFC)와 조류, 물벼룩 등에 의한 생태학적 수처리 시스템을 응용하는 새로운 처리공정을 개발하고 운전조건을 산출하고자 하였다.

재료 및 방법

실험재료

생태학적 수처리 시스템에 사용된 조류는 *Chlorella* sp.와 *Selenastrum capricornutum* 두 종으로 배양은 growth chamber 내에서 25°C, 6000-7000 lux 광원으로 24시간 조사하였다. 조류 배양 배지는 ATCC (American Type Culture Collection) Culture Medium 625 Gorham's Medium 조성표에 따라 제조하였다(Table 2). 계대배양은 2주마다 하였고, 배양 배지 200 ml가 담긴 500 ml 삼각 플라스크에 조류가 2×10^5 cells/ml 되도록 접종하였다. 물벼룩은 *Moina macrocopa*를 사용하였으며 배양은 M4

Table 2. ATCC Culture Medium 625 Gorham's medium for alga

Constituent	Final concentration (mg/l)
NaNO ₃	496.0
K ₂ HPO ₄	39.0
MgSO ₄ · 7H ₂ O	75.0
CaCl ₂ · 2H ₂ O	36.0
Ferric citrate	6.0
Na ₂ SiO ₃	20.0
Citric acid	6.0
EDTA	1.0
Distilled Water	1000

Adjust pH to 7.5±0.5.

배지를 약간 변형하여 사용하였고(Table 3)(15), growth chamber에서 25°C, 6000-7000 lux의 조건으로 3 l 비이커에 배양배지를 2 l 채운 후 먹이로 조류를 2×10^5 cells/ml 되도록 주입해서 초기 배양하였다. 조류와 물벼룩은 각각 초기 배양이 끝나고 왕성하게 잘 자랄 때 생물막 반응조(BFC)에서 유출되는 폐액을 조금씩 주입해서 폐액에 적응되도록 하였다.

Algal periphyton system을 이용한 발효 폐액내 질소 제거

음식 폐기물 메탄 발효 공정 후 유출되는 폐액(전 질소 농도 4200 mg/l)을 질소 농도를 기준으로 100, 150, 300, 500 mg/l로

Table 3. M4 culture medium for waterflea

Constituent	Final concentration (mg/l)
CaCl ₂ ·2H ₂ O	293.8
MgSO ₄ ·7H ₂ O	123.3
K ₂ HPO ₄	0.0184
NaNO ₃	0.0274
NaHCO ₃	64.8
Na ₂ SiO ₃ ·9H ₂ O	1.0
H ₃ BO ₃	2.86
KCl	5.8
LiCl	0.31
RbCl	0.071
SrCl ₂ ·6H ₂ O	0.15
KI	0.0033
Na ₂ EDTA·2H ₂ O	2.5
MnCl ₂ ·4H ₂ O	0.361
CoCl ₂ ·6H ₂ O	0.01
NaMoO ₄ ·2H ₂ O	0.063
NaBr	0.016
CuCl ₂ ·2H ₂ O	0.0165
ZnCl ₂	0.013
Na ₂ SeO ₃	0.0022
NH ₄ VO ₃	0.0006
FeSO ₄ ·7H ₂ O	0.996
KH ₂ PO ₄	0.0143
B ₁₂ (cyanocobalamin)	0.001
Biotin (d-Biotin)	0.0008
Thiamine (HCl)	0.075
Distilled water	1000

희석한 뒤 500 ml 삼각 플라스크에 각 질소 농도별로 250 ml씩 넣어 주었다. 여기에 *Chlorella* sp.와 *S. capricornutum*을 각각 주입하여 폐액 중 질소농도의 변화를 살펴 보았다. 조류의 초기 주입량은 chlorophyll *a*의 농도로 500~600 mg/m³을 주입하였고, 각각의 질소 농도에서 *Chlorella* sp.와 *S. capricornutum*에 의한 질소 제거율과 chlorophyll *a*를 조사하였다. Chlorophyll *a*의 분석은 Standard method(4)에 따라 수행하였다.

Mg²⁺ 및 인 주입으로 인한 질소제거 및 조류 개체수 변화

메탄 발효 폐액이 BFC에서 3일간의 체류시간을 거친 후 배출될 때의 유출수의 질소 농도는 약 300 mg/l이다(Table 1). 이 유출수에 엽록소의 구성성분인 Mg²⁺을 조류 배양배지 농도의 2배(150 mg/l)와 4배(300 mg/l)처리하여 질소제거 효율이 증가하는지를 관찰하였으며, 또한 조류 성장에 적합한 질소와 인의 비율을 맞춰 주기 위해 인을 주입하여 질소와 인의 비율을 10:1과 15:1로 적정하고 각각에 Mg²⁺을 2배, 4배 처리하여 질소제거에 대한 영향을 조사하였다. 각각의 조건에는 *S. capricornutum*을 7~8×10⁶ cells/ml 씩 접종하였다. 24시간마다 시료를 채취하여 질소 농도 및 조류 개체수 변화를 관찰하였고, 인을 적정한 것은

인 농도를 분석하였다.

저농도 폐액에 무기물 주입으로 인한 질소 제거 및 조류 성장

BFC에서 1차 처리된 질소 농도 약 300 mg/l의 폐액을 100, 150, 200 mg/l로 각각 희석한 뒤, 여기에 *S. capricornutum*을 약 8×10⁶ cells/ml 주입하였다. 무기물은 조류 배양배지 성분 중 Mg²⁺과 Ca²⁺를 기준농도의 2배(Mg²⁺ 150 mg/l, Ca²⁺ 72 mg/l)와 4배(Mg²⁺ 300 mg/l, Ca²⁺ 144 mg/l)로 하여 각각의 질소 농도가 적정된 플라스크에 주입하고, 무기물을 넣어주지 않은 것을 대조군으로 하여 24시간마다 질소 제거율과 조류 개체수 변화를 비교 관찰하였다.

조류와 물벼룩간의 먹이연쇄관계에 의한 개체수 변화

BFC 유출수를 질소 농도를 기준으로 150 mg/l로 희석한 시료를 10 ml씩 넣어 10개를 준비한 후 여기에 *S. capricornutum*이 2×10⁵ cells/ml가 되도록 주입하고, 물벼룩인 *M. macrocopa* 1마리를 5개의 test tube에 주입하였다. 그리고 물벼룩을 넣지 않은 나머지 5개를 대조군으로 하여 물벼룩 개체수의 증가에 따른 조류 개체수의 감소를 관찰하였다.

폐액 성분 분석

발효 폐액 성분 분석에 있어 COD_{Cr}, T-N, NH₃-N, NO₃-N, T-P, BOD는 Standard method(4)로 분석하였다.

결과 및 고찰

Chlorella sp.와 *Selenastrum capricornutum*에 의한 발효 폐액의 질소 제거 및 조류 성장

음식물 발효 폐액의 질소 농도를 100, 150, 300, 500 mg/l로 희석하였을 때, *Chlorella* sp.와 *S. capricornutum*에 의한 질소 제거율을 각각 Fig. 2에 나타내었다. *Chlorella* sp.에 의한 각각의 질소 농도에 대한 4일 후의 제거율은 38, 50, 33 그리고 21%로 분석되었다. 질소 농도가 150 mg/l일 때 가장 높은 질소 제거율을 보여주고 있고, 이 때의 농도는 75.6 mg/l로 측정되었다. *S. capricornutum*에 의해서는 각각의 질소 농도에서 48, 54, 38 그리고 26%를 나타냈다. *S. capricornutum*도 역시 *Chlorella* sp.와 마찬가지로 질소농도가 150 mg/l일 때 가장 높은 질소 제거율을 나타내고 있으며 농도값은 69.0 mg/l로 분석되었다. *Chlorella* sp.와 *S. capricornutum*에 의한 질소 제거율을 비교하여 볼 때 전자보다는 후자가 각각의 질소농도에서 더 높은 질소제거 효과를 보여주고 있다.

한편 질소 농도를 기준으로 희석한 각각의 플라스크에서 *Chlorella* sp.와 *S. capricornutum*의 조류 농도 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 각각의 플라스크에는 chlorophyll *a*를 500~550 mg/m³ 주입하였고, 질소농도에 따른 조류의 농도변화를 관찰하였다. 질소 농도가 100 mg/l와 150 mg/l일 때, *Chlorella* sp.의 chlorophyll *a* 농도는 4일간의 반응 후 1350, 1360 mg/m³으로 높은 조

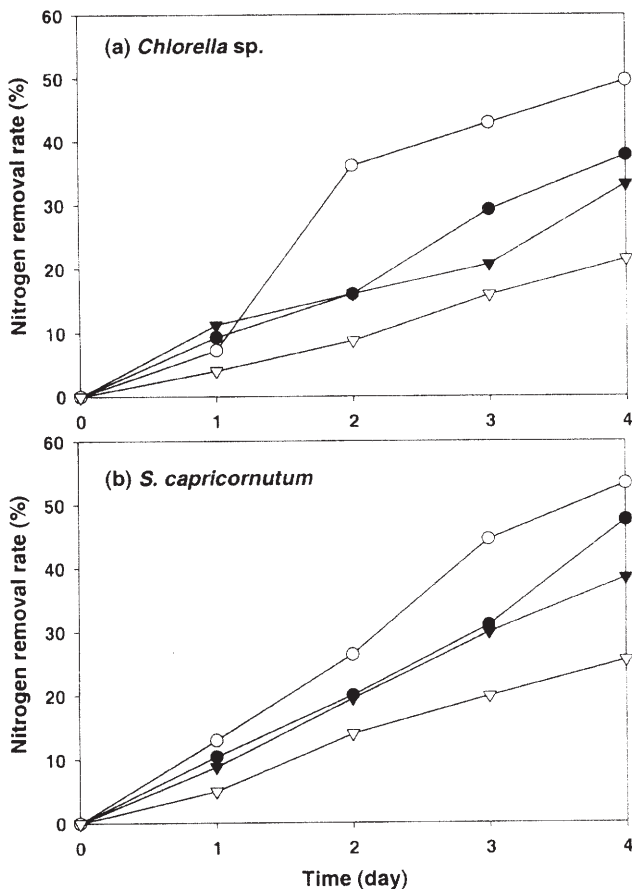


Fig. 2. Nitrogen removal efficiency of algae according to the total nitrogen concentrations. ●; T-N 100 mg/l, ○; T-N 150 mg/l, ▼; T-N 300 mg/l, ▽; T-N 500 mg/l.

류 성장을 보여주고 있다. *S. capricornutum*을 넣어준 실험에서도 가장 높은 조류 성장을 보이는 것은 음식물 폐액의 질소 농도를 100 mg/l와 150 mg/l로 적정한 것으로 chlorophyll *a* 농도는 각각 550, 600 mg/m³으로부터 1580, 1620 mg/m³으로 가장 많이 증가하였다.

이상의 결과들에서 *Chlorella* sp.와 *S. capricornutum*은 폐액의 질소 농도를 기준으로 150 mg/l로 희석했을 때 가장 높은 질소 제거율과 조류 성장을 보여주고 있는 것으로 나타났는데, 이것은 질소와 COD 농도가 너무 고농도일 경우 오히려 성장에 제한을 받으나 적정 농도에서는 조류가 잘 성장하여 그 개체수가 많아지고, 그로 인해 질소 성분의 흡수가 그 만큼 더 증가하기 때문에 질소 제거율 또한 높아진 것이라고 볼 수 있다. 특히 *S. capricornutum*이 *Chlorella* sp.보다 더 높은 질소 제거 효과 및 조류 성장을 보여주고 있다. 따라서 고농도의 유기성 폐액내 질소를 조류를 이용하여 제거하고자 할 때에는 두 종 가운데 *S. capricornutum*을 이용하는 것이 유리하다고 볼 수 있다.

한편, *Chlorella* sp.와 *S. capricornutum*에 의한 질소제거는 질소 농도가 100 mg/l에서 4일간의 반응 후 방류수 수질 기준치에 거의 근접하는 것으로 나타났다. 그러나, 폐액의 질소농도가 300

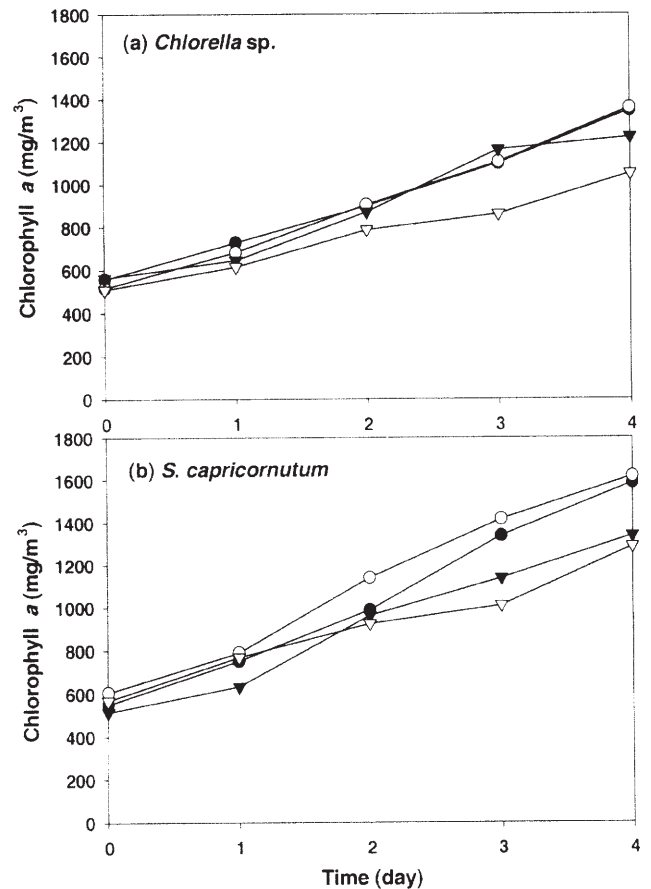


Fig. 3. Growth of algae according to the total nitrogen concentrations. ●; T-N 100 mg/l, ○; T-N 150 mg/l, ▼; T-N 300 mg/l, ▽; T-N 500 mg/l.

mg/l와 500 mg/l의 고농도로 적정된 경우에는 조류가 잘 자라지 못하기 때문에 폐액 속의 질소 성분 흡수가 제대로 이루어지지 못해 조류에 의한 질소 제거 효과가 낮게 나타났다. 따라서, 음식물 폐액 처리시 1차 처리 되었을 때의 질소 농도가 150 mg/l 이하로 되도록 한 후 조류를 이용해서 2차 처리를 하는 방안이 적절한 것으로 사료된다. Travieso 등과 Tam 등은 이러한 조류를 고정화하여 축산폐수, 가정하수를 처리하였는데(14,15), 본 연구에서도 조류를 고정화하여 음식물 폐액을 처리함으로써 조류의 유실없이 안정적으로 운전하는 방안을 차후 탐색하여야 할 것으로 사료된다.

Mg²⁺ 및 인 주입으로 인한 BFC 유출수의 질소 및 조류 개체수 변화

조류는 태양광을 이용하여 대기 중의 CO₂를 고정해서 자신의 유기물을 생산하는 독립영양생물로서 생체 내의 엽록소 구성성분 중 Mg²⁺의 존재가 중요하게 작용한다.

여전히 고농도의 질소를 함유하고 있는 BFC의 유출수에 엽록소의 주성분인 Mg²⁺을 정상적인 조류배양매지 조성 농도의 2배(150 mg/l)와 4배(300 mg/l)를 주입함으로써 조류의 질소제거율이

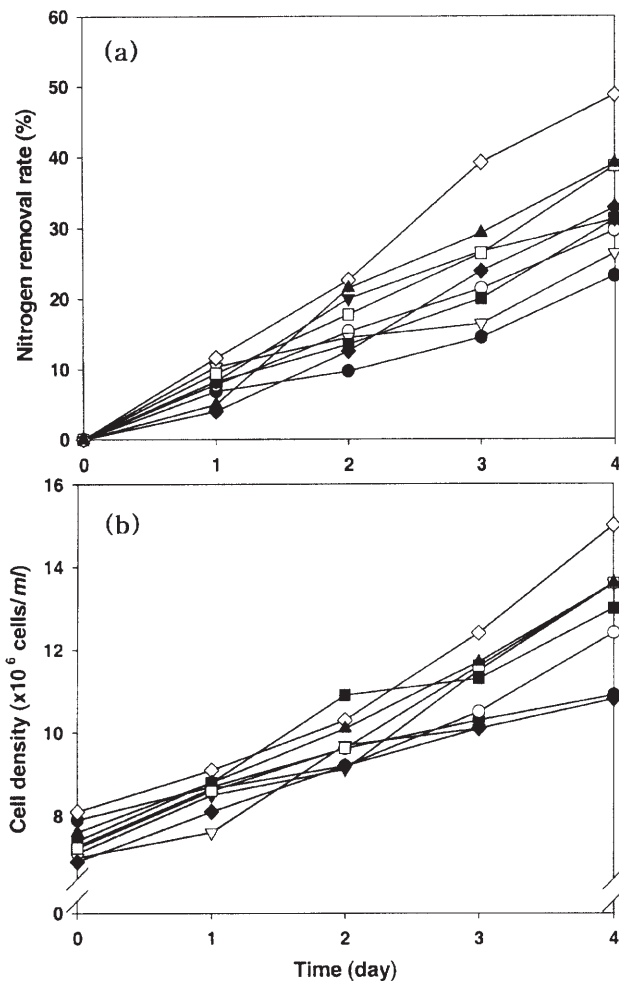


Fig. 4. Effect of Mg^{2+} and N:P ratio on the nitrogen removal efficiency (a) and growth (b) of *S. capricornutum*.

●, control; ○, $Mg^{2+} \times 2$; ▼, $Mg^{2+} \times 4$; ▽, N:P=10:1; ■, N:P=15:1; □, $Mg^{2+} \times 2 + N:P=10:1$; ◆, $Mg^{2+} \times 2 + N:P=15:1$; ◇, $Mg^{2+} \times 4 + N:P=10:1$; ▲, $Mg^{2+} \times 4 + N:P=15:1$.

증가하는지 관찰하였다. 또한 질소 : 인의 비율을 조절하여 조류가 질소를 효과적으로 흡수하여 더욱 성장이 잘 이루어지는지를 관찰하였다. 즉, 질소와 인이 10:1과 15:1의 비로 조절된 각각의 시료에 Mg^{2+} 를 각각 2배, 4배 주입하여 각각의 조건에 따른 질소 제거율을 Fig. 4a에, 조류 개체수 변화는 Fig. 4b에 나타냈다.

Mg^{2+} 를 넣어준 것이 넣지 않는 것보다 더 높은 질소 제거율과 조류 성장을 나타내고 있으나, 유출수가 고농도의 질소 성분을 함유한 폐수(300 mg/l)이기 때문에 조류가 잘 성장하지 못하며 질소 제거율도 낮았다. Mg^{2+} 를 넣어주지 않은 것과 2배, 4배 넣어준 것의 제거율은 각각 23, 30 그리고 32%로 나타났다. Mg^{2+} 를 4배 주입한 것 중에서 질소와 인의 비율을 10:1로 조절한 것이 가장 높은 질소 제거율인 약 50%, 농도는 153 mg/l를 나타냈으며, Mg^{2+} 를 주입하지 않고 인 농도만을 조절한 시료는 질소 제거율이 현저히 낮게 나오는 것을 보여주고 있다(Fig. 4a).

Mg^{2+} 만을 주입한 것과 인 농도만을 조절한 것에서는 질소 제거율이 거의 비슷하였고, 또 인농도를 적정하고 여기에 Mg^{2+} 를 주입한 시료와 Mg^{2+} 를 주입하지 않은 시료에서의 질소 제거율은 Mg^{2+} 를 주입한 시료에서 더 좋은 질소 제거율을 보이는 것으로 확인되었으므로, 질소와 인의 비율보다는 Mg^{2+} 의 존재에 따라서 조류에 의한 보다 효과적인 질소 제거가 이루어진다고 사료된다. Mg^{2+} 의 주입농도가 2배와 4배일 때 모두 질소 대 인의 농도가 15:1보다 10:1에서 더 높은 질소 제거가 이루어지는 것으로 나타났다. Fig. 4b에서는 각각의 조건에서 조류 개체수의 변화를 보여주고 있다. 조류 개체수 변화 역시 질소제거율이 가장 우수한 조건인 Mg^{2+} 를 4배 주입하고 질소 대 인의 비율을 10:1로

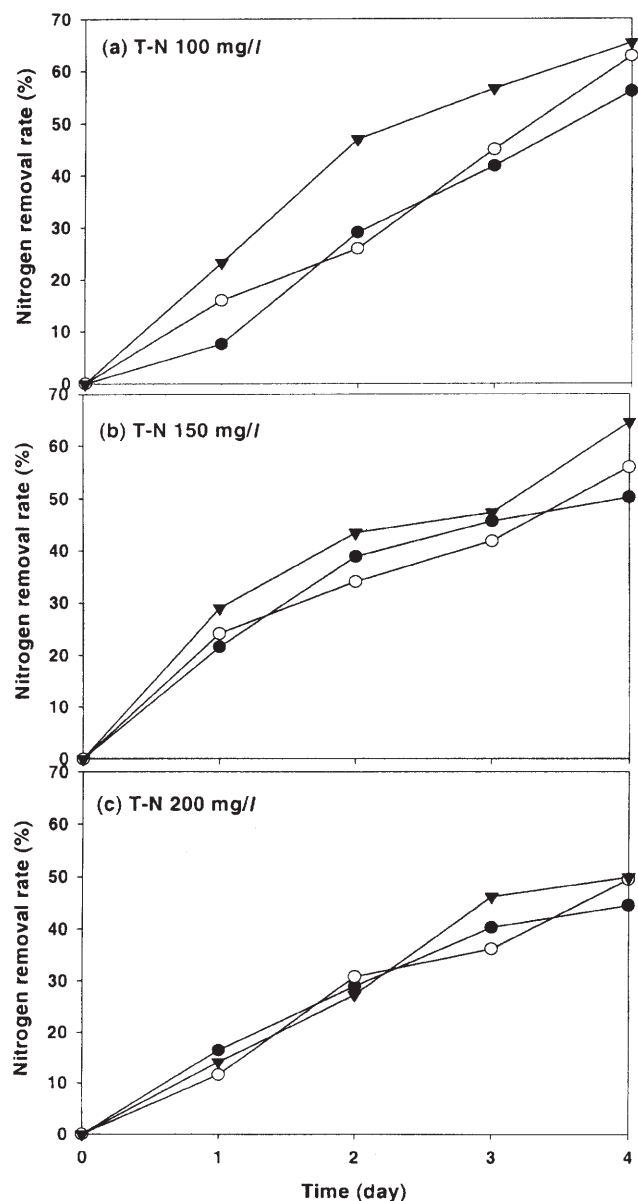


Fig. 5. Effect of inorganic compounds on the nitrogen removal efficiency of *S. capricornutum* at different nitrogen concentrations.

●, control; ○, (Mg^{2+} , Ca^{2+}) $\times 2$; ▼, (Mg^{2+} , Ca^{2+}) $\times 4$.

적정한 시료에서 8.1×10^6 cells/ml로부터 1.5×10^7 cells/ml로 가장 많이 증가하였다. 인 농도 제거도 마찬가지로 같은 조건인 시료에서 가장 높은 제거율인 75%를 나타냈으며, 이때의 농도는 초기 34 mg/l에서 8.5 mg/l로 감소하였다. 인을 인위적으로 처리해 주고 Mg^{2+} 을 주입한 시료에서의 인은 대부분 제거되어 수질 방류기준인 8 mg/l에 근접하는 것으로 나타났기 때문에 폐액에 인을 첨가해 주는 것은 문제가 없는 것으로 사료된다.

이상의 결과에서 Mg^{2+} 을 4배의 농도로 주입하고 인 농도를 적정한 시료에서 질소와 인의 제거가 가장 우수하였듯이 이 조건에서 가장 높은 조류의 개체 증식율을 보이는 것으로 나타났다.

저농도의 폐액에 무기물 주입으로 인한 질소 제거 및 조류 성장

BFC 유출수를 100, 150 그리고 200 mg/l의 질소농도로 희석하여 조절한 각각의 시료에 *S. capricornutum*을 일정하게 주입하고 무기물(Mg^{2+} , Ca^{2+})의 농도를 달리한 조건에서 질소제거 효과 및 조류 개체수의 변화를 관찰한 결과를 Fig. 5와 6에 나타냈다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 질소농도를 100 mg/l로 조절한 시료에서 무기물을 넣어주지 않은 대조군의 경우 4일간 반응시킨 후의 질소 제거율이 56%로 질소 농도는 초기 농도값 100 mg/l에서 44 mg/l로 제거되었다. 한편 Mg^{2+} 과 Ca^{2+} 을 기준농도의 2배(Mg^{2+} 150 mg/l, Ca^{2+} 72 mg/l)와 4배(Mg^{2+} 300 mg/l, Ca^{2+} 144 mg/l)로 처리하였을 때에는 각각 63%와 65%의 질소 제거율을 나타내었다. 이 때의 질소 농도는 100 mg/l에서 각각 37 mg/l와 34 mg/l로 감소하는 것으로 나타났다. 무기물을 넣어준 것과 넣어주지 않은 것 모두 4일간의 반응 후 방류수 수질 기준의 질소 농도 기준치인 60 mg/l이하를 나타냈기 때문에 BFC에서 유출되는 폐액의 질소 농도가 100 mg/l이하일 때는 인위적인 무기물 성분을 주입하지 않아도 무방한 것으로 사료된다.

Fig. 5에서 질소 농도를 150 mg/l로 적정하였을 때의 질소 제거율은 무기물을 넣어주지 않은 것과 2배, 4배 넣어준 것이 각각 50, 56 그리고 65%로 나타났다. 이 때 각각의 질소 농도는 75, 66 그리고 53 mg/l로 조사되었다. 여기에서 무기물의 농도를 4배 주입하여 준 것만이 방류수 수질 기준의 이하치를 나타냄을 확인할 수 있었다. 그리고, Fig. 5에서 보는 바와 같이 폐액의 질소 농도가 200 mg/l 일 때는 각각 45, 50 그리고 51%를 보여주고 있으나, 잔류 질소 농도가 모두 100 mg/l 이상으로 방류 기준치보다 높기 때문에 BFC에서 유출되는 폐액의 질소 농도가 200 mg/l 이상일 경우에는 본 실험보다 더 많은 반응시간을 주어야 할 것으로 사료된다.

각각의 질소 농도 조건에 따른 조류의 성장을 Fig. 6에 나타내었다. 질소 제거율이 무기물을 넣어 준 것이 가장 높게 나타난 것처럼 조류의 성장도 무기물을 넣어 준 것이 그렇지 않은 것보다 훨씬 더 잘 성장한 것으로 나타났다. BFC 유출수의 질소 농도에 관계없이 무기물의 농도를 조류배양배지 기준 농도의 4배를 주입하였을 때 가장 높은 조류 성장을 나타냈고, 이 때 가장 높은 질소 제거율을 나타냄을 확인할 수 있었다.

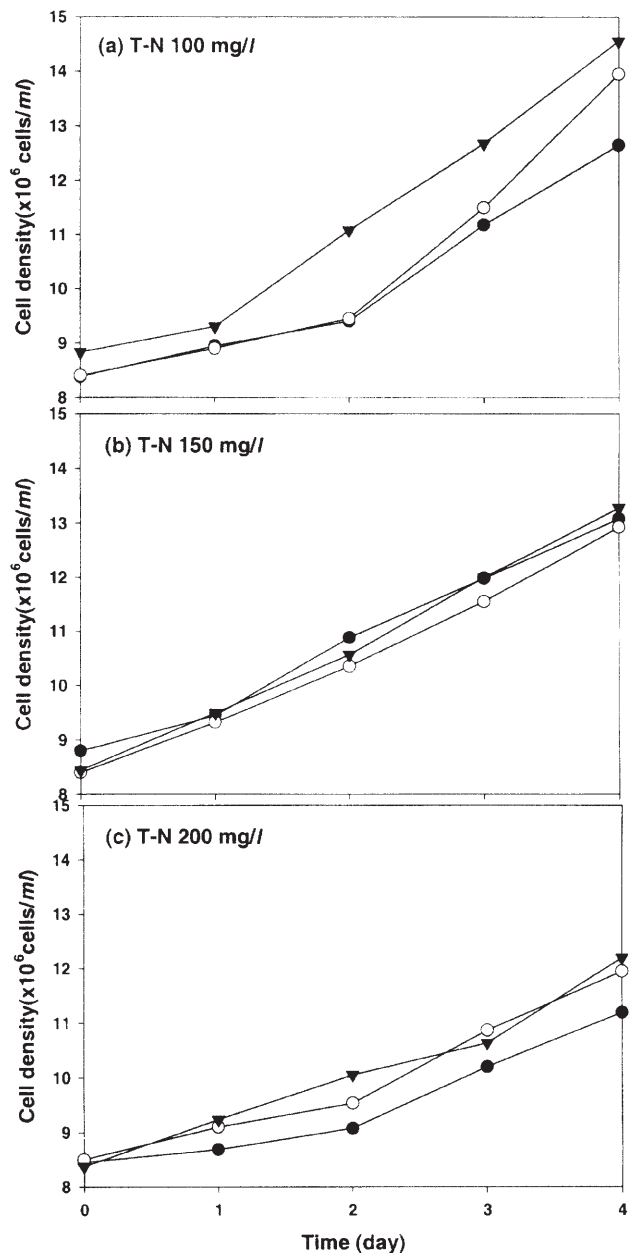


Fig. 6. Effect of inorganic compounds on the growth of *S. capricornutum* at different nitrogen concentrations.

●, control; ○, (Mg^{2+} , Ca^{2+}) $\times 2$; ▼, (Mg^{2+} , Ca^{2+}) $\times 4$.

조류와 물벼룩의 먹이연쇄관계에 의한 개체수 변화

조류를 이용하여 BFC 유출수 처리시 과다성장으로 인한 사멸로 유기물로의 재환원을 막기 위해서 조류를 먹이원으로 이용하는 물벼룩을 이용하여 이를 제어하고자 하였다.

Fig. 7에서는 18×180 mm인 시험관에 질소 농도 150 mg/l의 BFC 유출수 10 ml를 넣은 후 물벼룩(*M. macrocopa*) 1마리와 조류(*S. capricornutum*) 2×10^5 cells/ml을 함께 접종하였을 때의 각각의 개체수 변화를 나타내었다. 대조군인 물벼룩을 넣어주지 않은 시험관에서는 시간이 지남에 따라 계속적으로 조류 개체수

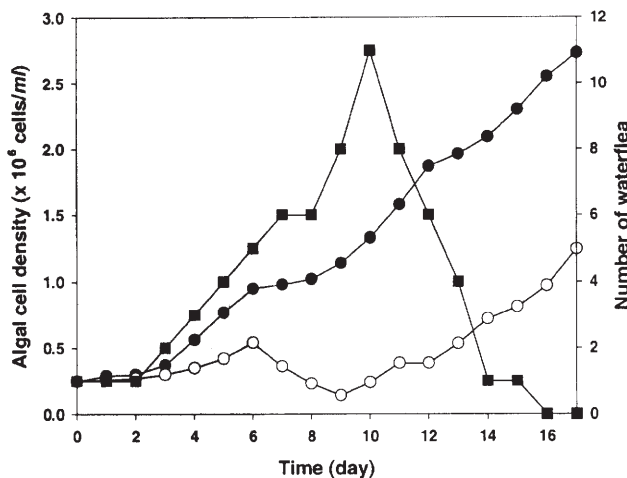


Fig. 7. Population relationship between *S. capricornutum* and *M. macrocopa*.

●, control; ○, *S. capricornutum*; ■, *M. macrocopa*.

가 증가하여 17일 경과한 후 2×10^5 cells/ml에서 2.7×10^6 cells/ml로 증식하였으나, 물벼룩을 넣어준 시험관에서는 물벼룩이 조류를 먹이원으로 하여 포식하기 때문에 조류 개체수가 처음 6일 동안은 약간씩 증가하다가 그 이후로는 물벼룩 개체수의 증가로 조류의 감소가 이루어지며, 물벼룩이 사멸되기 시작하는 10일을 기점으로 다시 증가하여 최종적으로 1.25×10^6 cells/ml의 개체수를 나타내었다. 물벼룩은 10일이 경과하였을 때 가장 많은 11마리를 나타냈으나 그 이후로는 감소하는 양상을 보였다. 이는 물벼룩이 성장하는 시험관의 공간적 제한 등 환경저항 때문에 더 이상 개체수가 증가하지 못하고 사멸한 것으로 판단되는데, 물벼룩이 조류를 포식하는 속도, 조류의 성장속도 등을 포함하여 물벼룩과 조류가 본 시스템에서 먹이연쇄에 의해 서로가 공존할 수 있는 조건에 대한 연구가 앞으로 진행되어야 할 것으로 사료된다. 이를 통해 최종 섭취자인 물벼룩을 폐수에서 대량 사육함으로써 어류의 사료로 이용할 수 있을 가능성에 대한 연구가 병행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 1998년도 조선대학교 교내 연구비로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 공석기, 안승구. 1997. 호기성 고율 안정조에서 빛의 조사 기간과 pH가 조류의 영양물질 제거에 미치는 영향. 한국 환경과학회지. 6, 141-152.
2. 김성빈, 이석준, 김치경, 권기석, 윤병대, 오희목. 1998. 축

- 산폐수의 3차처리를 위한 미세조류의 선별 및 처리조건의 최적화. *Kor. J. Appl. Microbiol. Biotechnol.* 26, 76-82.
3. 최정우, 김영기, 류재홍, 이우창, 이원홍, 한정택. 2000. 축산폐수 처리를 위한 광섬유 생물반응기를 이용한 조류 배양 공정 개발. *Kor. J. Biotechnol. Bioeng.* 15, 14-21.
4. American Public Health Association (APHA). 1985. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 16th ed, APHA, Washington, DC.
5. Arauzo, M., M.F. Colmenarejo, E. Martinez, and M.G. Garcia. 2000. The role of algae in a deep wastewater self-regeneration pond. *Wat. Res.* 34, 3666-3674.
6. Aziz, M.A. and W.J. Ng. 1993. Industrial wastewater treatment using an activated algae-reactor. *Wat. Sci. Tech.* 29, 71-76.
7. Carberry, J.B. and R.W. Greene. 1992. Model of algal bacterial clay wastewater treatment system. *Wat. Sci. Tech.* 26, 1697-1706.
8. Craggs, R.J., P.J. McAuley, and V.J. Smith. 1997. Wastewater nutrient removal by marine microalgae grown on a corrugated race way. *Wat. Res.* 31, 1701-1707.
9. Drenner, R.W., D.J. Day, S.J. Basham, J.D. Smith, and Susan I. Jensen. 1997. Ecological water treatment system for removal of phosphorus and nitrogen from polluted water. *Ecological Application.* 7, 381-390.
10. Guterstam, B. 1996. Demonstrating ecological engineering for wastewater treatment in a Nordic climate using aquaculture principles in a greenhouse mesocosm. *Ecol. Engin.* 6, 73-97.
11. Kim, S.W., J.Y. Park, J.G. Kim, J.H. Cho, Y.N. Chun, I.H. Lee, J.S. Park, and D.H. Park. 2000. Development of a modified three-stage methane production process using food wastes. *Appl. Biochem. & Biotech.* 84, 731-741.
12. Lau, P.S., N.F. Tam, and Y.S. Wong. 1995. Effect of algal density on nutrient removal from primary settled wastewater. *Environ. Poll.* 89, 59-66.
13. Mihalyfalvy, E., H.T. Johnston, M.R. Garrett, H.J. Fallowfield, and N.J. Cromar. 1998. Improved mixing of high rate algal ponds. *Wat. Res.* 32, 1334-1337.
14. Rectenwald, L.L. and R.W. Drenner. 2000. Nutrient removal from wastewater effluent using ecological water treatment system. *Environ. Sci. Technol.* 34, 522-526.
15. Samel, A., M. Ziegenfuss, C.E. Goulden, S. Banks, and K.N. Baer. 1999. Culturing and bioassay testing of *Daphnia magna* using Elendt M4, Elendt M7, and COMBO media. *Ecotoxicolgy and Environmental Safety.* 43, 103-110.
16. Tam, N.F.Y. and Y.S. Wong. 2000. Effect of immobilized microalgal bead concentration on wastewater nutrient removal. *Environ. Poll.* 107, 145-151.
17. Travieso, L., F. Benitez, P. Weiland, E. Sanchez, R. Dupeyron, and A.R. Dominguez. 1996. Experiments on immobilization of microalgae for nutrient removal in wastewater treatments. *Bioresource Tech.* 55, 181-186.
18. Umble, A.K. and L.H. Ketchum. 1996. A strategy for coupling municipal wastewater treatment using the sequencing batch reactor with effluent nutrient recovery through aquaculture. *Wat. Sci. Tech.* 34, 141-148.

(Received November 27, 2001/Accepted December 10, 2001)

ABSTRACT : Treatment of High Organic Wastewater Using Ecological Water Treatment System

**Jae-Hoon Cho¹, Jung-Kon Kim², Joon-Hwuy Kim², Seong Myeong Yoon³, Jung Sup Lee⁴,
and Si Wouk Kim¹,** (¹Department of Environmental Engineering, ²Department of Biomaterials,
³Department of Biology Education, ⁴Department of Biology, Chosun University, Gwangju 501-
759, Korea)

We have previously developed three stage methane fermentation system capable of digesting food wastes effectively and then releasing high organic wastewater as a final product. In this study, we tried to devise an ecological water treatment system, which can efficiently remove the nitrogen and phosphorus contained in the organic wastewater. The system was made of microbiological filters, algae, and waterfleas. Of two species of alga tested, *Selenastrum capricornutum* showed higher growth rate and more efficiently removed the nitrogen from the wastewater than by *Chlorella* sp. In addition, the highest growth rate and the nitrogen removal efficiency could be obtained when high concentrations of Mg^{2+} and Ca^{2+} were added to the diluted wastewater and the molar ratio of nitrogen to phosphorus was adjusted to 10 : 1. In this study, the population relationship between alga and waterflea was also examined in a test tube. The initial number of algal cells decreased as the waterflea population increased. However, the number of algal cells gradually increased again when waterflea population decreased partly due to the environmental resistance. From these results, it was believed that the ecological water treatment system could be used for removing the nitrogen and phosphorus from organic wastewater very effectively. Moreover, the waterflea cultured by this system as a final predator could be used as a good foodstuff for fishes.