



## 미세조류를 이용한 양돈폐수 고도처리에서 슬러지 및 이산화탄소의 첨가의 영향

### Effects of sludge and CO<sub>2</sub> addition on advanced treatment of swine wastewater by using microalgae

임병란<sup>1\*</sup> · 박기영<sup>2</sup> · 이기세<sup>3</sup> · 이수구<sup>1</sup>

Lim, Byung-Ran<sup>1\*</sup> · Park, Ki Young<sup>2</sup> · Lee, Kisay<sup>3</sup> · Lee, SooKoo<sup>1</sup>

1 서울과학기술대학교 환경공학과, 2 건국대학교 사회환경시스템공학과, 3 명지대학교 환경생명공학과

(2011년 4월 7일 접수 ; 2011년 6월 1일 수정 ; 2011년 6월 3일 채택)

#### Abstract

The potential of algal-bacterial culture was investigated for advanced treatment of animal wastewater. Fed-batch experiments were carried out to examine treatability of nitrogen and phosphorus in different microbial consortium: *Chlorella vulgaris*, activated sludge, three microalgae strains (*Scenedesmus*, *Microcystis*, *Chlorella*) and *Bacillus* consortium, and three microalgae strains and sludge consortium. Single culture of *C. vulgaris* showed the better efficiency for nitrogen removal but was not good at organic matter and phosphorus removal compared with activated sludge. Three microalgae and *Bacillus* consortium was best culture among the culture and consortium for pollutants removal tested in this experiment. Effect of CO<sub>2</sub> addition was studied by using three microalgae and *Bacillus* consortium. CO<sub>2</sub> addition enhanced T-P removal efficiency up to 60%. However, removal efficiencies of T-N and ammonia nitrogen reduced on the contrary.

**Key words** : Algae-bacteria culture, CO<sub>2</sub> addition; Fed-batch culture; Swine wastewater, Tertiary treatment

**주제어** : 반연속식 배양, 삼차처리, 양돈폐수, 이산화탄소 주입, 조류-세균 배양

#### 1. 서론

고도성장으로 생활수준이 향상되면서 환경오염 및 수변 환경조성에 많은 관심을 기울이고 있다. 축산폐수는 고농도의 유기물로 이루어져 있어 하천과 호수 등의 수질환경의 보전에 영향이 오염원이다. 특히 축산폐수는 다량의 유기질, 질소, 인 성분을 포함하고 있어 하천 부영양화에 심각한 영향을 초래한다(농림부 및 환경부, 2004).

축산폐수의 처리를 위해 일반적으로 물리·화학적인 1차 처리 공정과 유기물을 처리하는 2차 처리 공정이 이용되고

있다. 1차 처리는 스크린 분리, 침강, 응집침전 등 단위 공정으로 이루어지며, 2차 처리는 미생물을 이용하여 제거하는 생물학적 처리 방법을 일컫는다. 그러나 축산폐수는 유기질, 질소, 인 성분의 함유량이 매우 높아 1차 처리와 2차 처리 거처도 만족할만한 방류 수질을 얻기 어려워 처리효율을 높이기 위한 부가적 고도처리 공정이 필요하다. 고도처리 공정의 하나로 태양광을 에너지원으로 하여 영양염류인 질소, 인을 처리할 수 있는 조류를 이용한 기술이 시도되고 있다(최정우 등, 2000; Kumar et al., 2010).

미세조류는 지구상에서 가장 오랜 역사를 가지고 있는 생

\* Corresponding author Tel:+82-2-970-7138, Fax:+82-2-975-6928, E-mail: limbr@hotmail.com(Lim, B.R.)

물이지만 다른 미생물에 비해 구조와 생활환경이 복잡한 때문인지 그다지 주목을 끌지 못하였다. 최근 들어 미세조류의 잠재력이 부각되어 식량을 비롯하여 화장품, 의약품, 사료 그리고 환경 분야 등의 다양하게 활용하려는 연구가 이루어졌다(Wilkie and Mulbry, 2002; 박기영등, 2011). 또한 미세조류는 이산화탄소와 같은 온난화가스의 삭감에 기여할 수 있다. 이산화탄소 농도의 증가로 지구 온난화가 환경문제로 대두된 것은 이미 오래 전이며 이산화탄소의 제거에 많은 노력을 기울이고 있다. 따라서 조류처리 시스템은 대기의 이산화탄소 제거와 폐수 내의 영양염류를 제거하는 두 가지 효과를 얻는 장점이 있을 것이라 생각된다. 한편, 매장량의 한계와 연소시 발생하는 이산화탄소의 문제로 인하여 화석연료를 재생가능한 에너지로 대체하려는 연구가 활발한데 폐수처리후 회수되는 미세조류도 바이오에너지 원으로 중요한 위치를 차지하고 있다(Travieso et al., 2006). 또한, 대부분의 폐수 내 존재하는 미생물들은 질소원을 암모니아성질소 형태를 필요로 하는 반면 미세 조류들은 암모니아성 질소 외에 질산염이나 질소 자체를 이용할 수 있는 능력이 있어 폐수 내 존재하는 다양한 형태의 질소들의 이용이 가능하다(이현용, 1999). 그러나 조류처리법은 고농도나 독성/난분해성의 유기물이 포함되어 중속영양 상태에 있는 경우 세균이나 균류에 비하여 영향을 받기 쉽다. 이러한 경우 조류-세균의 공생관계가 처리에 상당히 도움을 주는 것으로 알려져 있다(Borde et al., 2003). 하

폐수처리를 위한 공학시스템에서 조류-세균 공동 배양의 개념은 최근 몇 년 동안 상당히 정립되었으며 (de-Bashan et al., 2002; Medina and Neis, 2007; Bordel et al., 2009) 조류가 산소를 생산하고 호기성 세균이 생분해성 유기물을 분해하면서 이산화탄소를 배출하는 상호 공생관계로 매우 효과적이라고 한다(Guieysse et al., 2006).

그러나 이러한 조류-세균의 적절한 조합에 관한 연구는 축산폐수처리에서는 찾아보기 어렵다. 본 연구에서는 축산폐수의 영양염류 (N, P) 및 유기물 제거를 도모하기 위해 3종의 미세조류에 *Bacillus* 및 하수슬러지의 혼합배양을 비교하였고 조류 컨소시움 (consortium)에 CO<sub>2</sub>를 주입 했을 때와 공기를 주입하였을 때의 효과를 고찰하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 실험조류 및 배양 방법

실험에 사용된 미세 조류는 국립환경연구원 환경미생물 종균관리센터 (NIER)와 한국해양미세조류은행에서 분양 받은 *Chlorella vulgaris* (NIER-10003), *Scenedesmus acuminatus*(NIER-10093), *Microcystis aeruginosa* 3종을 사용하였으며 영양염류 및 유기물 제거 특성의 비교를 위해 *Bacillus* 및 하수슬러지를 첨가하였다. 3종의 조류를 배양하기 위한 조류 성장의 배지 조성은 **Table 1**과 같다. 또한 *Bacillus*의 배지는 Nutrient Broth 배지를 사용하였다. 만들어진 배지는 250L 삼각플라스크를 이용하였고, 고압증기멸균기에서 120℃, 15분 동안 멸균하였으며 계대배양은 1주마다 수행하였다. 배양은 진탕배양기 (shaking incubator)를 이용하여 온도는 30℃, 교반속도는 150rpm, 광은 삼파장 램프의 조건에서 배양하였다.

### 2.2 축산폐수의 선정

실험에 사용된 폐수는 양돈폐수로 혐기성 2단 소화조를 거쳐 나온 혐기성소화액을 4℃ 저온실에 보관하여 사용하였다. 본 연구에 사용된 양돈폐수 혐기성소화액의 수질특성은 **Table 2**와 같다.

**Table 1** Culture media for microalgae growth

Element	Medium Concentration
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	15mg
KNO <sub>3</sub>	10mg
B-Na <sub>2</sub> glycerophosphate	5mg
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	4mg
Vitamin B12	0.01μg
Biotin	0.01μg
Thiamine HCl	1μg
PVI metals	0.3mg
Tris(hydroxymethyl)ami -nomathane	50mg
Distilled water	99.7mL
PVI metals	
FeCl <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O	19.6mg
MnCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	3.6mg
ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	2.2mg
CoCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	0.4mg
Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	0.25mg
Na <sub>2</sub> EDTA·2H <sub>2</sub> O	100mg
Distilled water	100mL

**Table 2** Characterization of swine wastewater

Items	Concentration
pH (-)	9.0
NO <sub>3</sub> -N(mg/L)	98.2
NH <sub>4</sub> -N(mg/L)	4,203.8
T-N(mg/L)	6,571.2
T-P(mg/L)	754.5
COD <sub>Cr</sub> (mg/L)	8,899.5

### 2.3 실험방법

조류 성장 배지에서 4일 동안 배양한 3종의 조류 및 *Bacillus*를 시험관(test tube)에 옮기고 3000rpm에서 20분간 원심분리하여 여액은 제거하였다. 조류 배양 실험을 위해 4L 부피의 광생물반응기(photobioreactor)를 제작하여 1L로 운전하였다(Fig. 1). 광생물반응기 개발에 관한 연구는 1980년대부터 활발하게 진행되었으며, 이러한 연구들은 미세조류의 배양을 통해 이산화탄소 고정화 향상에 효율적으로 대응하기 위하여 시도되었다. 광생물반응기는 옥외대량 배양장치에 비해 초기 투자비와 관리 유지비가 상대적으로 높은 단점을 가지고 있으나, 높은 균체 성장 속도와 편리한 운전조건 조절, 그리고 스케일-업이 용이한 장점을 가지고 있다. 우리나라의 경우 태양광이 일정하지 않고, 온도 및 강우량의 일 편차 및 연 편차가 큰 지역에서는 미세조류의 고농도 배양을 위해서는 밀폐형 배양장치인 광생물반응기에 의해 수행되어야 경쟁력이 있다. 이러한 광생물반응기에 40배 희석한 혐기성 소화액을 반응기에 넣고, 원심분리 후 남아 있던 3종의 조류 및 *Bacillus*를 넣어 주었다. 이 반응기에 공기 1L/min을 주입했을 때와 CO<sub>2</sub> 5%를 주입 했을 때의 변화를 알아보았다. 반응기 내의 온도는 28~30℃를 유지하였다.

또한, 하수슬러지, 세균과 미세조류를 양돈폐수 혐기성소화액에서 혼합배양하였다. 하수슬러지와 증류수를 혼합한 단일균은 하수슬러지 1mL와 40배 희석한 양돈폐수 100mL를 혼합하여 총 유효부피를 200mL하였다. 하수슬러지와 조류를 혼합한 혼합균은 하수슬러지 1mL와 *Scenedesmus*, *Microcystis*, *Chlorella*을 혼합한 조류 50mL와 40배 희석한 양돈폐수 혐기성소화액 100mL를 혼합하여 총 volume을 200mL하였다. 운전조건은 30℃에서 150rpm을 유지하면서 삼파장 램프에서 배양하였다. 단

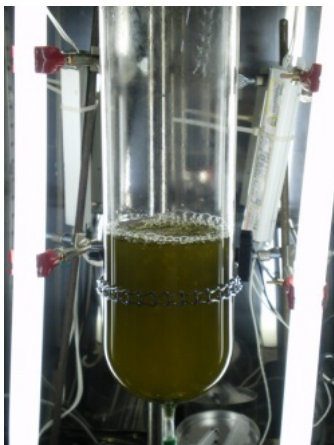


Fig. 1 Photobioreactor.

일균과 혼합균의 결과를 비교·분석하였다.

### 2.5 분석방법

미세 조류의 성장을 알아보기 위해 OPTIZEN 3220UV (한국 메카시스)를 이용하여 663nm, 645nm, 630nm, 750nm에 Chlorophyll-a를 측정하였다. 반응이 진행됨에 따른 시료내의 pH 변화를 알아보기 위해 pH 측정기(pH-510)를 이용하여 pH를 측정하였으며, 시료를 0.45 μm 멤브레인 여지(Filter)로 여과하여 공정시험방법에 따라 T-N, T-P, CODcr을 측정하였으며 NH<sub>4</sub>-N는 Standard Methods(APHA, 1998) 방법에 따라 측정하였다. 또한, NO<sub>3</sub>-N는 DR-4000(HACH)을 이용하여 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 미세조류 및 세균의 컨소시움에 따른 N, P 제거

하수슬러지만 주입했을 때와 하수슬러지와 조류를 혼합하여 배양했을 때의 결과를 비교 분석하였다. 바이오매스의 증가를 나타내는 부유고형물을 Fig. 2에 나타내었다. 하수슬러지만의 성장이 가장 좋지 않았으며 나머지 미세조류 컨소시움 및 미세조류와 박테리아의 혼합배양에서는 성장의 차이가 크게 나지 않았다.

Fig. 3은 미세조류 컨소시움 및 세균-미세조류의 혼합배양에서의 양돈폐수처리 효과를 나타낸 것이다. 양돈폐수(혐기성소화액)를 처리하기 위하여 미세조류 *C. vulgaris* 단일종을 투여하였을 때, 유기물(COD)은 약 5-6%, T-P 30%내외, T-N 40%내외, 암모니아성질소 70%내외의 제거율 제거되었다. T-N의 제거율과 NH<sub>4</sub>-N의 제거율의 차이가 매우 큰 것을 알 수 있다. 이렇게 이러한 차이가 발생하는 이유는 T-N 중 상당부분 유기성 질소로 존하여 제거되지 못하고 있으며 일부분은 NH<sub>4</sub>-N로 분해되어 제거율이 약 80%정도 된 것이라고 생각된다. 하수슬러지만을 주

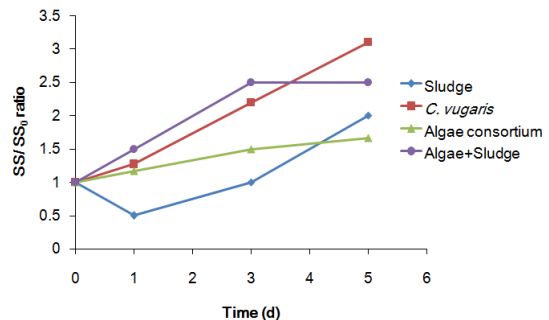


Fig. 2 Comparison of biomass growth in different microalgae consortium.

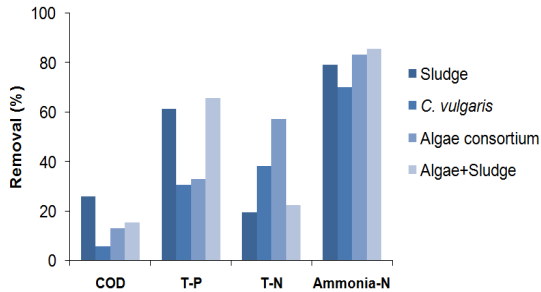


Fig. 3 Comparison of pollutants removal growth in different microalgae consortium.

입했을 때는 COD제거율이 30%까지 증가하는데 약간 하수 슬러지가 유기물을 제거하는 기능을 했기 때문이라고 판단 된다. T-N은 20%가 제거되었고 NH<sub>4</sub>-N는 80%가 제거 되었으나 T-P는 60%내외로 높은 제거율을 보였다. 미세조류의 인, 질소 제거 및 유기물 제거를 향상시키기 위하여 3종류의 미세조류를 공동으로 배양하고 세균단일종 *Bacillus* 및 세균복합종인 하수슬러지를 첨가하였다. COD 제거는 조류단일 종일 때보다는 증가하였으나 제거율의 증가가 10%내외로 미미하였다. T-P제거율의 경우 *C. vulgaris* 및 미세조류 컨소시움에 비슷하였고 미세조류와 슬러지 혼합배양은 하수슬러지와 비슷한 정도를 보였다. T-N의 제거율의 경우 미세조류 컨소시움의 경우가 하수 슬러지 및 미세조류와 슬러지 혼합배양의 경우보다 크게 증가하였으며 미세조류 단일종을 사용하였을 때보다도 확연히 증가하였다. 암모니아성 질소의 경우 거의 모든 경우 80% 내외의 높은 제거율을 보였으며 배양 조건에 따른 차이는 크지 않았다. T-P는 13%의 제거율을 보였다.

### 3.2 미세조류 컨소시움에서 CO<sub>2</sub> 5% 주입에 따른 N, P 제거특성

양돈폐수의 혐기성 처리액을 희석하여 주입하였으며 앞의 실험에서 가능성이 상대적으로 높은 세 종류의 미세조류 혼합 배양조건(algae consortium)에서 CO<sub>2</sub>를 주입하여 영양염 제거율에 대한 영향을 공기만을 주입한 경우와 비교하였다(Fig. 4). 미세조류의 컨소시움에 공기만을 주입했을 경우에는 6일 경과했을 때 T-N은 106.8mg/L에서 40.4mg/L로 62%의 제거효율을 보였고, NH<sub>4</sub>-N는 95.5mg/L에서 12.8mg/L으로 87.0%의 제거율을 보였다. 이는 6일 경과했을 때 Chlorophyll-a가 223.1mg/L에서 1063.4mg/L로 증가하여 상당한 양의 조류 바이오매스가 성장하였다. 즉, 이 결과는 조류가 암모니아성 질소를 영양물질로 이용하여 성장하고 있음을 보여준다. 반응이 끝난 9일째의 T-N의 경우 유출수의 농도가 30.5mg/L로

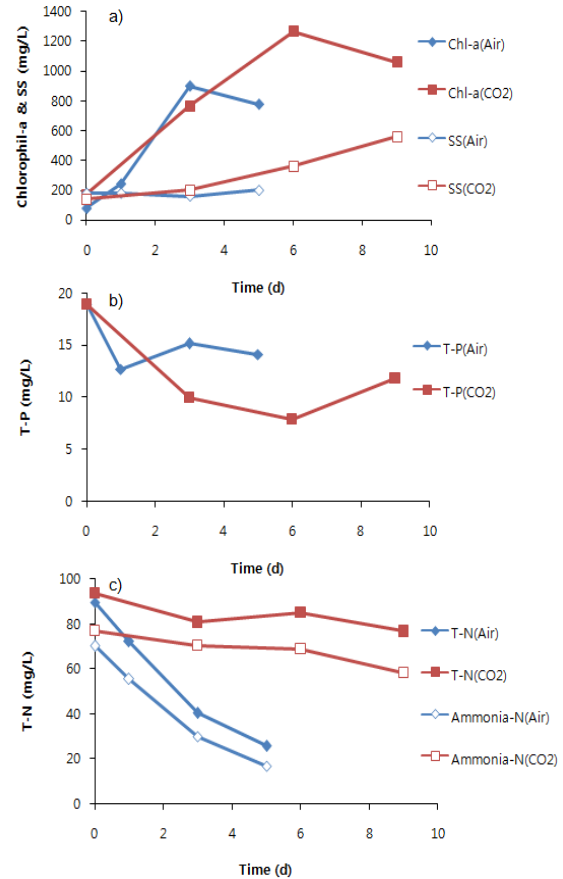


Fig. 4 Effects of CO<sub>2</sub> addition in three microalgae consortium

71.5%의 제거율을 보였다. 이는 공생하는 *Bacillus*가 유기물을 어느 정도 제거하였거나 혹은 중속영양 조류에 의한 섭취로 생각된다. 또한, 유기물은 3일 이후부터 제거율에 큰 변화가 없음을 볼 수 있다. 이는 분해 가능한 유기물이 대부분 제거되어 더 이상 제거가 되지 않고 있다고 보여진다.

한편 CO<sub>2</sub> 주입의 경우 공기주입 실험과 동일한 양돈폐수를 사용하였고, 배양기간도 동일하게 9일로 하였으며, 희석배수는 40배로 동일하게 하였다. 5%의 CO<sub>2</sub>를 공급하기 위해 CO<sub>2</sub>와 공기펌프에서 나온 공기를 혼합하여 사용하였다. 조류의 성장은 Chlorophyll-a가 6일 경과했을 때가 최대치를 보였고, SS가 계속하여 증가함을 볼 수 있었다. 이는 조류의 성장이 활발함을 나타내 준다. T-N은 93.5 mg/L에서 76.6 mg/L로 약 18%제거로 만족할 만한 제거효율을 보이지 못했다. 일반적으로 조류는 CO<sub>2</sub> 5% 내외로 주입했을 때 가장 좋은 효율을 보인다. 그러나 본 실험에서는 CO<sub>2</sub> 주입시 공기를 주입했을 때 보다 더 좋은 T-N 제거효율을 보이지 않았다. 이러한 이유는 CO<sub>2</sub>를 주입하면서 알칼리도

**Table 3** Effects of consortium and CO<sub>2</sub> injection(5%) on pollutants removal.

	Air injection				CO <sub>2</sub> injection
	Sludge	<i>C. vulgaris</i>	Algae consortium	Algae+Sludge	Algae consortium
COD removal (%)	26.1	5.9	13.2	15.4	14.5
T-P removal (%)	61.4	30.6	33.0	65.7	58.1
T-N removal (%)	19.6	38.4	57.3	71.5	18.1
Ammonia-N removal (%)	79.1	70.1	83.3	85.6	24.6

가 방해 요소가 되었거나 혹은 다른 방해 요소가 있었을 것이라 생각된다. T-P의 경우 최대 약 60% 제거 효율을 보였다. 이는 공기 주입 시보다 제거율이 상당히 높으며 공기 주입과 마찬가지로 시간의 경과하면 조류세포의 해체에 따라 T-P가 제거되지 않고 오히려 증가되는 경향은 두 경우가 모두 비슷한 결과를 보였다. CO<sub>2</sub> 주입시 인이 많이 제거된 이유는 질소보다 인을 선호하는 조류가 있을 가능성을 보여 준다. 유기물의 경우 333.3mg/L에서 3일째 되는 날 290.1mg/L로 약 13%가 제거되었다. 그 후는 변화가 거의 없었다. 이는 공기주입시와 마찬가지로 *Bacillus*가 유기물을 제거하는 기능을 했거나 유기 탄소를 탄소원으로 사용하여 성장하는 일부 종속영양 조류에 의한 결과로 보여진다. NO<sub>3</sub>-N의 경우 별다른 변화를 보이지 않고 완충효과에 의해 pH가 중성으로 유지되었다. NH<sub>4</sub>-N의 경우 77mg/L에서 58.1mg/L로 약 24%의 제거율을 보였다. 결과적으로 3종의 조류를 혼합한 후 여기에 공기 대신에 CO<sub>2</sub>를 주입하였을 때 더 좋은 T-N 제거효율을 나타내었으나, 만족할 만한 T-P 제거효과는 거두지 못하였음을 나타낸다.

**3.3 미세조류 컨소시움 및 CO<sub>2</sub> 주입에 대한 토의**  
미세조류 컨소시움내 미생물의 군집구조를 살펴보기 위하여 quinone profile법을 이용하였다(Hu et al., 1999). Quinone은 전자전달계물질의 하나로서 호흡쇄의 지용성분으로 대부분의 미생물에 존재한다. Quinone은 그의 골격형, 이소프렌 측쇄수 및 측쇄의 포화도등의 차이에 의해서, 특유의 산화환원전위를 나타냄으로 미생물에 있어서 에너지대사의 차이에 의해서 퀴논분자중도 틀리게 된다. Quinone은 크게 호기 및 혐기성호흡을 통해 에너지를 획득하는 ubiquinone(UQ)과 menaquinone(MK)으로 나눌 수 있으며, 광합성을 통해 에너지를 획득하는 plastoquinone(PQ)과 vitamin-K(VK)1으로 나눌 수 있다(Collins and Jones, 1981). 본 연구에서는 남조류, 녹조류 등 각각의 대표적인 균주를 순수 배양하여 퀴논을 분석한 결과, 남조류(*Mycrocystis*, *Phormidium*)는 VK-1을 우점으로 함유하고 있었으며, 녹조류(*Selenastrum*, *Scenedesmus*, *Chlorella*)는 PQ-9를 우점으로 함유하는 것으로 나타났

다(임병란 등, 2005). 또한 *Bacillus*에 대하여 퀴논분석을 한 결과 MK-7을 우점으로 함유하는 것으로 나타났다.

배양 기간은 9일로 정하였고 양돈폐수를 40배 희석하여 미세조류를 주입한 후, 시간 경과에 따라 비교·분석한 결과 조류 및 슬러지 단일종보다 컨소시움, 조류-세균 형태의 혼합배양이 오염물질의 제거에 효과적이었다. CO<sub>2</sub> 5% 주입 시 T-P의 제거효율이 58.1%로써 제거 효율이 공기 주입보다 좋은 것으로 나타났다. 그러나 T-N의 경우 공기 주입 시 71.5%의 제거효율을 보였으며 CO<sub>2</sub> 5% 주입 시 18.1%의 낮은 제거효율을 보였다. NH<sub>4</sub>-N 및 유기물의 제거효율도 CO<sub>2</sub> 5% 주입했을 때 보다 공기주입했을 때 제거효율이 더 좋게 나타났다. 공기주입과 비교하여 이산화탄소의 주입은 질소 및 인의 제거에서 선호하는 영양소가 달라 각기 다른 영향을 미치는 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 *Scenedesmus*, *Microcystis*, *Chlorella*의 세종류의 조류와 *Bacillus* 및 하수슬러지를 공동으로 배양하여 양돈폐수의 질소 및 인 제거효율을 알아보았다. *Chlorella vulgaris* 및 하수슬러지만을 사용하였을 때와 비교하여 미세조류 혼합배양의 경우 질소제거율은 좋으나 유기물 및 인제거율이 하수슬러지를 사용했을 경우보다 좋지 않았다. 세 종류의 미세조류 컨소시움과 조류 및 *Bacillus*의 혼합이 조류 및 슬러지의 혼합보다 양돈폐수의 처리에 적합하였다. 또한 처리성이 좋은 미세조류 배양조건에 대하여 CO<sub>2</sub>를 주입하여 제거효율에 미치는 영향에 대하여 검토하였다. CO<sub>2</sub> 주입에 따라 COD 제거는 영향이 없었으며 T-P 제거율은 30% 향상되었으나 T-N 및 암모니아성 질소 제거율은 오히려 감소하였다.

#### 사 사

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2006-311-D00131)

## 참고문헌

- 농림부, 환경부, 2004. **가축분뇨 관리이용대책**. 환경부·농림부 합동, 경기 과천.
- 박기영, 임병란, 이기세, 이수구 (2011) 축산폐수 고도처리를 위한 미세조류 *Scenedesmus acuminatus*의 이용 가능성. **한국농공학회논문집**, **53**(1), pp.63-69.
- 이현용(1999) 미세 조류를 이용한 축산 폐수 처리 기술. **생물산업**, **12**(4), pp.36-39.
- 임병란, 안규홍, 송경근, 박유정, 전대영 (2005) 정수 및 하수처리 공정 중 침전지 부착조류 및 미생물 군집구조 해석. **상하수도학회지**, **19**(1), pp.61-67.
- 최정우, 김영기, 류재홍, 이우창, 이원홍, 한정택 (2000) 축산폐수 처리를 위한 광섬유 생물반응기를 이용한 조류 배양 공정 개발. **한국생물공학회지**, **15**(1), pp.14-21.
- APHA, AWWA, WEF (1998) **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20th edn, American Public Health Association, Washington DC, USA.
- Borde, X., Guieysse, B., Delgado, O., Munoz, R., Hatti-Kaul, R., Nugier-Chauvin, C., Patin, H. and Mattiasson, B. (2003) Synergistic relationships in algal-bacterial microcosms for the treatment of aromatic pollutants. **Bioresource Technol.**, **86**, 293-300.
- Bordel S., Guieysse B., and Munoz R. (2009) A mechanistic model for the reclamation of industrial wastewaters using algal-bacterial photobioreactors. **Environ. Sci. Technol.**, **43**(9), 3200-3207.
- Collins, M. D. and Jones, D. (1981) Distribution of isoprenoid quinone structural types in bacteria and their taxonomic implications. **Microbiol. Rev.**, **45**, 316-354.
- de-Bashan, L.E., Moreno, M., Hernandez, J.P., and Bashan, 353 Y. (2002) Removal of ammonium and phosphorus ions from synthetic wastewater by the microalgae *Chlorella vulgaris* coimmobilized in alginate beads with the microalgae growth-promoting bacterium *Azospirillum brasilense*. **Water Res.**, **36**(12), 2941-2948.
- Hu, H.-Y., Fujie, K and Urano, K. (1999) Development of a novel solid phase extraction method for the analysis of bacterial quinones in activated sludge with a higher reliability. **J. Biosci. Bioeng.**, **87**(3), 378-382
- Kumar, M. S., Z. H. Miao, and S. K. Wyatt (2010) Influence of nutrient loads, feeding frequency and inoculum source on growth of *Chlorella vulgaris* in digested piggery effluent culture medium. **Bioresource Technol.**, **101**(15), 6012-6018.
- Medina, M., and Neis, U. (2007) Symbiotic algal bacterial wastewater treatment: effect of food to microorganism ratio and hydraulic retention time on the process performance. **Water Sci. Technol.**, **55**(11), 165-171.
- Travieso, L., F. Benitez, E. Sanchez, R. Borja, A. Martin, and M. F. Colmenarejo (2006) Batch mixed culture of *Chlorella vulgaris* using settled and diluted piggery waste. **Ecol. Eng.**, **28**(2), 158-165.
- Wilkie, A. C., and W. W. Mulbry (2002) Recovery of dairy manure nutrients by benthic fresh water algae. **Bioresource Technol.**, **84**(1), 81-91.