

## 양돈폐수 처리를 위한 혐기성 생물반응기의 성능 비교

김종수 · 이국희 · 사동민\*

선문대학교 환경공학과

\*충북대학교 농화학과

(2000년 7월 15일 접수, 2000년 9월 29일 채택)

## Performance Evaluation of Anaerobic Bioreactors in Treating Swine Wastewater

Jong-Soo Kim · Gook-Hee Lee · Tongmin Sa\*

*Department of Environmental Engineering, Sunmoon University*

*\*Department of Agricultural Chemistry, Chungbuk National University*

### ABSTRACT

The effects of operating parameters on performance of upflow anaerobic sludge blanket(UASB), anaerobic filter(AF), and two-stage anaerobic sludge bed filter(ASBF) bioreactors in treating swine wastewater were evaluated by operating the lab-scale bioreactors upto hydraulic retention time(HRT) of 1 day and organic loading rate(OLR) of  $5.1 \text{ kg-COD/m}^3 \cdot \text{d}$  for 200 days. Swine wastewaters of which characteristics were affected by types of hog raising and seasons contained high concentrations of COD, SS, and ammonia. Inoculation of the bioreactors with waste sludge from anaerobic treatment facility of local municipal wastewater treatment plant was effective in developing biomass in the bioreactors. Acclimation period of the bioreactors with swine wastewaters required approximately 40 days, but that for AF and two-stage ASBF, which were filled with media, was faster than UASB. The bioreactors showed high and stable COD removal efficiency of 77~91% at influent T-N concentrations of 370~800 mg/L but low and unstable COD removal efficiency of 24~94% at influent T-N concentrations of 760~1,310 mg/L. It is essential to remove ammonia prior to anaerobic treatment since the concentrations of ammonia in swine wastewaters showed toxic effects to methanogenic bacteria. The bioreactors were effective in treating swine wastewaters with COD removal efficiency of 78.9~81.5% and biogas generation rate of  $0.39\sim 0.59 \text{ m}^3/\text{kg-COD}_r$  at OLR of  $1.1\sim 2.2 \text{ kg-COD/m}^3 \cdot \text{d}$ ; however, an increase of OLR by reducing HRT and increasing influent COD

caused decrease of COD removal efficiency. The extent of decrease in COD removal efficiency was higher in UASB than AF and two-stage ASBF. AF and two-stage ASBF anaerobic bioreactors were effective in treating varying characteristics of swine wastewaters since they showed high and stable COD removal efficiency at high OLR due to effective retention of biomass by media and staging.

Key Words : Swine Wastewater, Anaerobic Bioreactor, Organic Loading Rate, COD, Biogas

## 요 약 문

양돈폐수의 효율적인 혐기성 처리를 위하여 실험실 규모 UASB, AF, 그리고 이단 ASBF 생물반응기를 구성하고 HRT 1일과 OLR 5.1 kg-COD/m<sup>3</sup>·d까지 200일간 연속운전하고 운전 인자가 공정에 미치는 영향과 처리효율을 비교하였다. 양돈폐수는 유기물, 고형물, 그리고 암모니아를 고농도로 함유하고 있으며 축사의 형태와 계절의 변화에 큰 영향을 받는다. 하수종말처리장 혐기성 소화조 잉여 슬러지에 의한 혐기성 생물반응기의 식중은 효과적이었으며 적용기간은 약 40일 정도 소요되었으나 media로 충전된 필터형 생물반응기인 AF와 이단 ASBF의 적용속도가 UASB보다 빨랐다. 유입수 T-N 370~800 mg/L에서 생물반응기는 77~91%의 높고 안정된 COD 제거율을 보였으나 유입수 T-N 760~1,310 mg/L에서 COD 제거율은 24~94%로 불안정하였으며 전반적으로 감소되었다. 양돈폐수에 함유된 암모니아는 메탄균에 대한 저해작용을 나타낼 수 있는 충분한 농도이므로 효율적인 혐기성 소화처리를 위하여 전처리로서 암모니아의 제거는 필수적이다. 생물반응기는 1.1~2.2 kg-COD/m<sup>3</sup>·d의 비교적 낮은 OLR에서 COD 제거효율은 78.9~81.5%, 그리고 biogas 발생량은 0.39~0.59 m<sup>3</sup>/kg-COD<sub>r</sub>로 효과적이었으나 유입수 COD의 증가 혹은 HRT 단축운전에 의한 OLR의 증가에 따라 COD 제거효율은 감소하였으며 UASB는 AF와 이단 ASBF보다 COD 제거효율 감소폭이 컸다. AF와 이단 ASBF는 충전된 media와 이단화에 의하여 biomass의 보유능력이 우수하며 높은 OLR에도 안정적이며 높은 COD 제거율을 나타내므로 고농도의 유기물을 함유하며 축사의 형태와 계절에 따라 특성의 변화가 큰 양돈폐수의 처리에 효율적이다.

주제어 : 양돈폐수, 혐기성 생물반응기, 유기물부하, 화학적산소요구량, 바이오가스

## 1. 서 론

양돈폐수는 주로 호기성 생물학적 방법에 의하여 처리되며 고농도의 유기물은 무기화될 뿐만 아니라 관리기술이 미약하여 수질오염의 원인으로 지적되어 왔다. 이와는 달리 혐기성 생물학적 방법은 분·뇨 혹은 하수슬러지에 함유된 부유성 유기물의 안정화와 부산물로 발생하는 메탄의 이용에 제한적으로 적용되어 왔으나, 최근 혐기성 미생물과 생물반응기에 대한 이해의 증진으로 고농도의 유기물을

함유하는 산업폐수의 처리에 적용되고 있다.<sup>1)</sup> 따라서, 양돈폐수를 효율적으로 처리하여 수질을 보전하며 유기물을 메탄화하여 에너지자원으로 활용할 수 있는 혐기성 소화공정의 개발이 촉구되는 실정이다.

혐기성 소화공정은 전통적으로 완전혼합 생물반응기에 의하여 부유성 유기물의 안정화 혹은 용존성 유기물을 함유한 폐수의 처리에 적용되어 왔으며 처리부산물로 메탄을 발생하며 슬러지 발생량이 적은 장점이 있는 반면, 관여 미생물은 환경에 민감하여 공정이 불안정하고 성장속도가 느려 장기간의 수리

학적체류시간(HRT)을 요구하므로 시설의 소요규모가 커야 하는 단점이 있다. 그러나, 최근 이러한 재래식 혐기성 공정의 단점을 극복하기 위하여 반응기에 biomass를 고농도로 유지함으로써 공정이 안정되고 높은 유기물부하(OLR)가 가능한 upflow anaerobic sludge blanket(UASB),<sup>2)</sup> anaerobic filter(AF),<sup>3)</sup> UASB와 AF의 혼합형인 anaerobic sludge bed filter(ASBF),<sup>4)</sup> anaerobic fluidized bed(AFB),<sup>5)</sup> anaerobic expanded bed(AEB),<sup>6)</sup> 그리고 산발효와 메탄발효의 상분리에 의한 이단 반응기<sup>7)</sup> 등이 개발되었으며 실제 고농도의 유기물을 함유한 산업폐수의 처리에 적용되고 있다.<sup>8,9)</sup>

양돈폐수는 축사의 형태, 계절, 그리고 세척수의 유입여부에 따라 특성이 다르나 고농도의 용존성 및 부유성 유기물을 함유하며 메탄균에 저해작용을 하는 암모니아도 고농도로 함유하고 있는 것으로 보고되고 있다.<sup>10)</sup> 혐기성 생물반응기의 효율은 기질의 종류와 독성물질의 함유, 입상화 혹은 부착성장에 의한 biomass의 고장화 정도, 그리고 반응기의 흐름형태에 따라 달라지므로 특정폐수에 적용되기 위하여 적용성과 성능비교 연구가 필수적이라 하겠다. 따라서, 본 연구에서는 혐기성 생물반응기를 양돈폐수의 처리에 적용하기 위하여 1) 전업규모 이상의 축산농가에서 발생하는 양돈폐수의 특성을 조사, 분석하였고, 2) 실험실 규모의 UASB, AF, 그리고 이단 ASBF 생물반응기를 이용하여 양돈폐수의 운전 인자가 처리효율과 공정의 성능에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 본 연구결과는 양돈폐수의 처리에 혐기성 생물반응기를 적용할 경우 공정에 대한 설계, 운전 및 유지관리에 대한 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 양돈폐수

양돈폐수의 특성을 조사하기 위하여 충남지역에서 전업규모 이상 양돈농가 27곳을 선정하여 1997년 1월에서 9월까지 겨울, 봄, 여름의 세 계절에 걸쳐 폐수 집수조에서 시료를 채취, 분석하였다.

실험실 규모 생물반응기의 유입수로 사용된 양돈폐수는 충남 아산시 소재 C 양돈농장의 폐수 집수조에서 채취하였다. C 농장은 1,500두의 전업규모 양돈농가로서 축사는 스크레퍼(80%)와 슬러리(20%) 형태를 겸비하고 있으며, 축분은 퇴비화 시설에서 처리, 재활용되며 발생하는 양돈폐수는 6 m<sup>3</sup>/d 정도로서 일부는 퇴비화 시설에 이용되고 일부는 공동처리시설로 운반, 처리되고 있었다. 양돈폐수 시료는 2~4주에 한 번씩 채취하여 분석한 후 혐기성 생물반응기의 유입수로 사용하였다. 생물반응기 유입수로 사용된 양돈폐수의 특성은 Table 1에 나타난 바와 같이 COD 18,400 mg/L, VFAs 10,000 mg/L, SS 5,900 mg/L, T-P 350 mg/L, T-N 2,400 mg/L이었으며 T-N의 90% 이상이 NH<sub>4</sub>-N (2,200 mg/L)으로 존재하였다. 금속 중 Ca는 180 mg/L 정도로 검출되었으며 이외 금속은 mg/L 범위 내에 있었다. COD:N:P 비율은 53 : 7 : 1으로 혐기성 미생물에 대한 영양염류의 최저 적정요구도인 200 : 5 : 1<sup>11,12)</sup>에 비교하여 N과 P의 비율이 높은 것으로 나타났으며, 특히 N의 비율이 높은 것은 낮은

Table 1. Characteristics of swine wastewater re-used in lab-scale anaerobic bioreactors collected from C farm

Parameters	Concentration (mg/L)	
	Average	Range
pH	8.4	7.5~9.4
Alkalinity	11,800	8,400~14,000
SS	5,900	870~11,200
COD	18,400	8,000~43,900
TOC	7,200	1,400~14,600
VFAs	10,000	1,900~22,500
T-N	2,400	650~5,400
NH <sub>4</sub> -N	2,200	600~4,500
T-P	350	150~610
Metals		
Al	6	2~18
Ca	180	54~320
Cu	5	1~17
Fe	14	6~27
Mg	21	2~54
Mn	2	1~3
Zn	12	4~28

\* Samples were analyzed after filtration on GF/C filter except for SS.

pH 조건에서 암모니아가 혐기성 미생물에 독성 영향을 줄 수 있는 범위<sup>13)</sup>에 있을 수 있다고 사료되나 암모니아를 제거하기 위한 어떠한 방법도 시도하지 않았다. 채취된 양돈폐수 시료는 4°C 냉장고에 보관하면서 혐기성 생물반응기의 유입수로 사용하였으나, 생물반응기의 운전조건인 OLR를 만족시키기 위하여 필요시 수돗물로 희석하여 사용하였다.

## 2.2. 혐기성 생물반응기와 운전

양돈폐수의 처리 성능을 비교하기 위하여 제작된 생물반응기는 Fig. 1과 같이 UASB, AF, 그리고 UASB와 AF의 혼성을 이단화한 이단 ASBF의 3 종류로써 내부 지름이 9.0 cm인 원통형 투명 아크릴로 제작되었다. UASB와 AF의 길이는 120 cm로서 유효용량은 6.8 L로 동일하게 하였다. UASB는 상단에 깔대기형 고·기·액체 분리장치를 장착하였고, AF는 유효용량 전체에 PVC 제품의 pall ring(2.54 cm $\phi$ ×2.54 cmL, pore size 5 mm×15 mm, surface area 210 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)으로 충전하였다. 이단 ASBF는 길이 60 cm의 유효용량이 동일한 2개의 반응기(각 3.4 L)로 구성되었으며, 각 반응기는 상부 유효용량의 1/2을 pall ring으로 충전하였다. 유입수는 생물반응기의 밑 부분에 구멍이 뚫린 아크릴 판에 의하여 상향류로 흐름을 균일하게 하였고 높이 10 cm 간격으로 시료 채취구를 설치하였으며 발생하는 biogas는 생물반응기 상부로 배출하도록 하였다. 생물반응기는 35°C 항온조에서 연속적으로 운전되었으며, 유출수 분석을 위한 시료채취는 유출구에 연결된 역사이핀의 하부 시료 채취구를 이용하였다.

생물반응기에 혐기성 미생물을 접종하기 위하여 천안 하수종말처리장 혐기성 소화시설의 잉여 소화슬러지(SS 24.4 g/L, volatility 60%) 2 L(이단의 경우 각 1 L)를 주입하였고 COD가 2,200 mg/L이 되도록 양돈폐수와 수돗물을 희석하여 유량 13.6 L/d로 운전을 시작하였다. 결과적으로 식종 슬러지에 대한 F/M비는 0.024 kg-COD/kg-VSS·d이었으며 식종기간의 운전은 OLR 1.1 kg-COD/m<sup>3</sup>·d, 그리고 적응기간은 약 40일 정도 소요되었다. 식종 및 적응기간을 거친 후 주어진 OLR에 대하여 COD

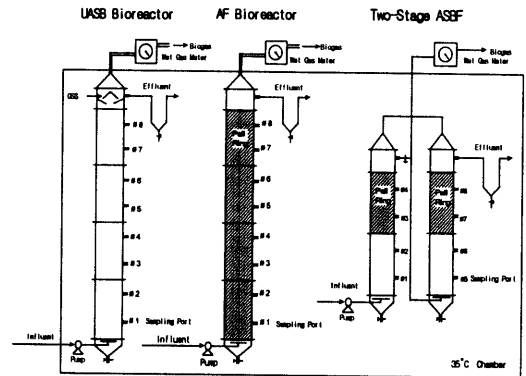


Fig. 1. Schematic diagram of lab-scale anaerobic bioreactors.

제거율이 60% 이상인 상태가 2 주일 정도 지속되면 정상상태로 인정하고 유입수의 COD 농도를 상향조정하거나 반응기의 HRT를 2일에서 1일로 단축하여 Table 2에 요약된 바와 같이 OLR을 5.1 kg-COD/m<sup>3</sup>·d까지 점진적으로 증가시키며 약 200일간 운전하였다.

## 2.3. 분석 방법

양돈폐수의 특성을 조사하기 위하여 충남지역 양돈농가의 폐수 집수조에서 채취한 시료, 생물반응기의 유입수로 사용된 C농장의 양돈폐수 시료, 그리고 생물반응기의 성능을 조사하기 위하여 각 반응기에서 2~4일 간격으로 채취된 유출수 시료 등에 대한 분석 항목은 pH, alkalinity, 고형물(SS, VSS), COD(dichromate에 의한 분석), N(T-N, NH<sub>4</sub>-N), P(T-P, ortho-P) 등으로 Standard Methods<sup>14)</sup>에 수록된 방법에 준하여 분석하였다. TOC는 TOC Analyzer(TOC5000, Shimazu), 금속은 전처리 후 ICP(ICPS5000, Shimazu)에 의하여 분석하였다. VFAs는 시료를 phosphoric acid로 산성화 한 후 CBP20 capillary column을 이용한 GC-FID(14B, Shimazu)로 분석하고 acetate의 농도로 나타났다. 반응기로부터 발생하는 biogas 발생량은 wet gas meter(W-NK-0.5A, Shinagawa)에 의하여 매일 측정하였다. Biogas 조성분석은 가스 수집장치를 이용하여 gas tight cylinder로 1 mL을 채취하여 Hayesep Q(80/100 mesh, Hayes Separ-

Table 2. Operational conditions of lab-scale anaerobic bioreactors

Period	Operating period (days)	OLR (kgCOD/m <sup>3</sup> ·d)	HRT (days)	Influent concentrations (mg/L)			
				COD	VFAs	T-N	T-P
Phase I	41~55	1.1	2	2,200 (1,900~2,260)	1,040 (900~1,100)	390 (370~400)	300 (140~310)
Phase II	56~84	2.2	2	4,390 (2,100~4,820)	1,460 (400~2,370)	800 (480~950)	290 (190~330)
Phase III	85~137	3.8	1	3,780 (2,100~4,820)	1,300 (390~2,390)	760 (670~840)	270 (220~460)
Phase IV	138~200	5.1	1	5,130 (4,430~9,070)	1,620 (60~2,350)	1,310 (890~1,870)	350 (290~360)

tions, Inc.)로 충전된 stainless steel column을 이용하여 GC-TCD(14B, Shimazu)에 의하여 각각 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 양돈폐수의 특성

양돈폐수의 특성은 Table 3에 요약된 바와 같이 축사의 형태와 계절에 따라 변화의 폭이 큰 것으로 나타났다. 분·뇨가 분리되는 스크레퍼 축사 양돈폐수의 SS와 COD는 각각 4,100~11,000 mg/L와 6,200~13,400 mg/L로 분·뇨가 분리되지 않는 슬러리 축사 양돈폐수의 각각 6,500~34,000 mg/L와 5,900~36,300 mg/L에 비교하여 상당히 낮았다. 영양염류인 T-N과 T-P의 농도도 스크레퍼 축사 양돈폐수는 각각 720~1,800 mg/L과 460~520 mg/L로 슬러리 축사 양돈폐수의 각각 950~2,980 mg/L와 840~990 mg/L보다 낮은 수준을 보였다. 금속의 경우도 스크레퍼 축사 양돈폐수는 슬러리 축사 양돈폐수보다 낮은 것으로 나타났다. 따라서, 스크레퍼 축사에 의한 분·뇨의 분리 혹은 발생된 양돈폐수로부터 고형물의 분리는 양돈폐수의 부유성 유기물과 영양염류의 농도를 낮게 하여 혐기성 미생물에 의한 용존성 유기물의 분해속도와 처리효율을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

스크레퍼 축사로부터 겨울에 채취된 양돈폐수는 SS 11,000(2,600~43,400) mg/L, BOD 6,200

(1,400~21,300) mg/L, COD 7,400(970~29,400) mg/L로 봄에 채취된 양돈폐수에 비교하여 모든 항목에서 높았으나 여름에 채취된 양돈폐수에 비교하면 SS는 높고 BOD와 COD는 낮았다. 슬러리 축사의 양돈폐수도 스크레퍼 축사의 양돈폐수와 같이 계절별로 비슷한 양상을 보여주고 있는데 가축사육의 생리적 측면과 축사의 세척수 사용량이 적은 것이 원인인 것으로 판단된다. 특히, 여름에 채취된 양돈폐수의 경우 세척수의 사용량이 많아 용존성 유기물인 COD 농도는 겨울과 봄에 채취된 양돈폐수보다 낮을 것으로 예상되었으나, 겨울과 봄에 비교하여 높았다. 이러한 현상은 여름에 폐수 집수조에서 유기성 고형물의 가수분해와 산발효가 일부 진행되어 용존성 유기물화 되는 것으로 판단되며 여름의 스크레퍼 축사 양돈폐수의 VFAs 농도가 7,590 mg/L로 봄과 겨울의 4,530 mg/L과 1,290 mg/L보다 높은 것으로 보아 간접적으로 증명된다. 영양염류인 T-N과 T-P도 여름에 채취된 양돈폐수가 봄과 겨울보다 높은 것으로 나타났으며 T-N의 경우 90% 이상이 NH<sub>4</sub>-N의 형태로 존재하였다. 금속은 Ca와 Mg이 비교적 높은 농도인 각각 60~280 mg/L와 11~330 mg/L이었으며 그 외 Cu, Fe, Zn가 mg/L의 수준으로 검출되었다.

#### 3.2. 혐기성 생물반응기의 운전 특성

운전기간 동안 3기의 생물반응기 유출수 pH와 alkalinity는 Fig. 2와 같이 3기 모두 비슷한 경향을 보였다. 전 운전기간에서 유출수 pH는 7.2~8.5

Table 3. General characteristics of swine wastewaters collected from farms in 1997

Parameters (mg/L)	Concentration in mg/L (average and ranges from 27 samples)					
	Winter(Jan.-Feb. '97)		Spring(April '97)		Summer(June-Aug. '97)	
	Scrapper	Slurry	Scrapper	Slurry	Scrapper	Slurry
pH	8.3 (6.9~9.8)	7.7 (6.6~8.6)	8.6 (7.9~9.4)	8.1 (7.3~8.4)	7.9 (7.5~8.3)	7.6 (6.9~8.2)
Alkalinity as CaCO <sub>3</sub>	10,500 (720~39,100)	26,600 (3,100~85,000)	8,800 (3,800~14,000)	12,100 (9,800~14,500)	6,200 (2,400~8,400)	9,900 (4,500~12,400)
SS	11,000 (2,600~43,400)	34,000 (10,600~76,000)	8,000 (4,800~11,200)	14,800 (11,500~17,200)	4,100 (870~7,700)	6,500 (1,200~10,500)
VSS	3,900 (1,500~14,500)	21,600 (4,600~54,600)	3,100 (2,200~4,000)	7,200 (4,600~10,300)	3,300 (730~6,800)	5,500 (880~9,600)
BOD	6,200 (1,400~21,300)	35,400 (6,500~91,500)	2,100 (2,000~2,300)	8,100 (3,500~21,600)	11,400 (2,100~24,000)	9,400 (7,200~14,400)
t-COD	10,700 (2,900~40,000)	60,000 (12,900~97,100)	7,600 (5,000~10,200)	17,300 (9,300~40,700)	19,400 (7,100~29,700)	25,600 (11,700~37,400)
s-COD	7,400 (970~29,400)	36,300 (9,300~56,800)	6,200 (2,700~9,700)	5,900 (1,000~10,000)	13,400 (950~28,700)	12,400 (4,400~18,000)
TOC	3,600 (630~14,700)	9,300 (3,500~17,400)	1,500 (1,100~1,900)	3,200 (1,500~4,400)	3,800 (250~7,900)	6,600 (2,500~9,700)
VFAs as acetate	1,290 (0~7,850)	3,420 (0~12,500)	4,530 (3,650~5,560)	4,700 (950~10,200)	7,590 (420~17,370)	5,190 (2,200~49,400)
T-N	1,200 (120~4,500)	1,900 (570~3,500)	720 (380~1,100)	950 (680~1,100)	1,800 (590~3,000)	2,980 (1,400~4,100)
NH <sub>4</sub> -N	1,000 (120~3,600)	1,800 (510~3,400)	700 (380~1,000)	920 (670~1,100)	1,800 (560~2,900)	2,600 (1,300~3,500)
Org-N	160 (1~900)	80 (20~140)	20 (3~40)	30 (6~40)	60 (30~70)	370 (100~590)
T-P			520 (430~610)	840 (610~1,060)	460 (220~720)	990 (610~1,450)
Ortho-P	-	-	210 (180~240)	220 (170~350)	270 (170~550)	220 (90~310)
Org-P			310 (200~430)	610 (260~870)	190 (50~410)	770 (300~1,360)
Metals						
Ca	-	-	60(54~61)	210(160~290)	210(140~320)	280(180~400)
Cu	3(0.7~5)	60(1~140)	2(1.5~1.8)	5(4~8)	2(1~5)	6(3~8)
Fe	9(2~21)	60(3~140)	4(2~6)	16(14~21)	8(4~11)	12(10~16)
Mg	23(5~43)	330(7~760)	11(4~18)	39(1109~120)	24(2~54)	63(13~170)
Zn	3(1~7)	39(1~80)	3(1~4)	20(11~38)	4(1~8)	6(2~8)

\* Samples were analyzed after filtration on GF/C filter except for t-COD and SS.

로 비교적 안정되어 있었으며 유출수 alkalinity는 phase I과 II의 운전기간에서 각각 1,550~1,870 mg/L와 1,840~3,640 mg/L, 그리고 phase III와 IV의 운전기간에서 각각 2,450~4,700 mg/L와

5,050~10,400 mg/L로 유입수 COD 증가 혹은 HRT 단축에 의한 OLR의 증가에 따라 증가되는 것으로 나타났다. OLR의 증가에 따른 alkalinity의 증가는 유기물의 분해과정에서 발생하는 CO<sub>2</sub>에

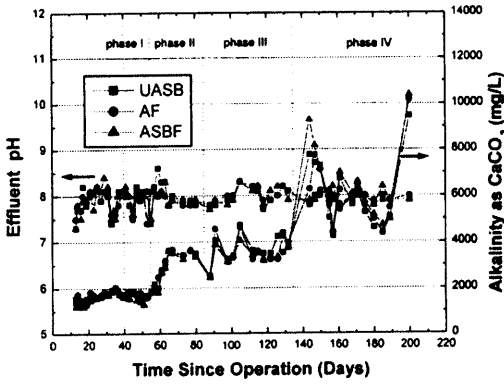


Fig. 2. Effluent pH and alkalinity of lab-scale anaerobic bioreactors.

의한 bicarbonate alkalinity로 판단되며 이러한 alkalinity의 증가는 유기물의 산발효에서 발생하는 VFAs의 축적에 의한 pH 저하를 방지하며 VFAs를 기질로 하는 메탄균의 성장에 적절한 pH를 유지하는데 필수적인 것으로 판단된다. 혐기성 생물반응기에서 상분리의 경우 산발효와 메탄발효 반응기의 적정 pH 범위는 각각 4~5와 7~9인 것에 비교하여<sup>15)</sup> 이단 ASBF 생물반응기는 첫째 단과 둘째 단의 pH 변화가 거의 없이 7~8.5인 것으로 보아 상분리의 기능보다는 2개의 생물반응기를 연결한 역할만 수행된 것으로 판단된다. 그러나, 상분리는 유기성 산업폐수의 처리에 효과적일 것으로 판단되며 상분리의 성공사례는 많은 연구자에 의해 보고<sup>16)</sup>된 바 있다.

생물반응기 유출수의 VFAs는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 3기 전부 비슷한 양상을 보였다. 초기 운전기간인 식종 및 적응기간(운전기간 0~40일)에 VFAs는 250~800 mg/L 범위이었으나 이후 급격히 감소하여 phase I~IV의 며칠의 운전기간을 제외한 전 운전기간에서 VFAs는 30 mg/L 미만으로 나타났다. 이와 같이 유입수에 함유된 혹은 산발효에서 생성된 VFAs는 메탄균에 의하여 효과적으로 분해되고 있으므로 산발효와 메탄발효에 관여하는 혐기성 미생물이 조화롭게 성장하고 있으며 VFAs 축적에 의한 pH 저하로 생물반응기의 효율에 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

운전기간 동안 생물반응기 유출수 COD 농도 및 COD 제거율은 각각 Fig. 4와 5에 도시되었다. 식종 및 적응기간은 약 40일 정도 소요되었으며 AF의

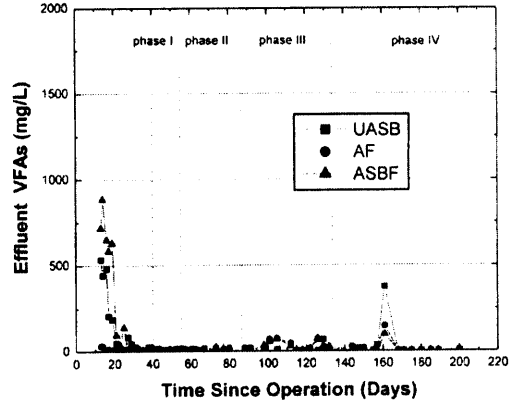


Fig. 3. Effluent volatile fatty acids of lab-scale anaerobic bioreactors.

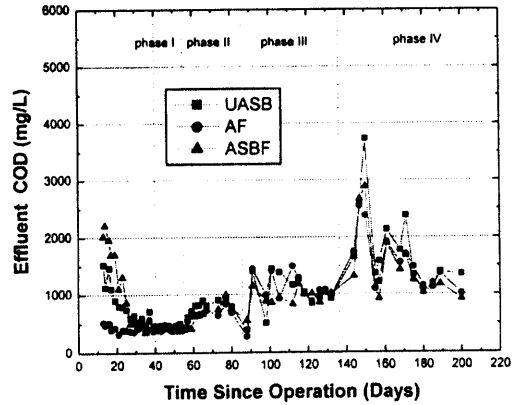


Fig. 4. Effluent COD of lab-scale anaerobic bioreactors.

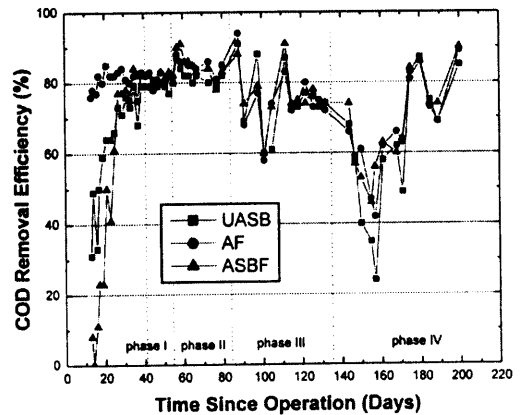


Fig. 5. COD removal efficiency of lab-scale anaerobic bioreactors.

적응속도가 현저하게 빨랐고 UASB, 이단 ASBF의 순으로 나타났다. 그러나, 정상상태에 도달한 이후, phase I과 II에서 3기의 생물반응기 유출수 COD는 각각 370~500 mg/L, 410~990 mg/L, 그리고 COD 제거율은 각각 77~83%와 79~91%로 비교적 높고 안정된 유기물 제거효율을 보이고 있으며 생물반응기별 차이는 관찰할 수 없었다. 그러나, phase III과 IV에서 3기의 생물반응기 유출수 COD는 각각 280~1,640 mg/L, 940~3,740 mg/L, 그리고 COD 제거율은 각각 53~94%와 24~91%로 낮아졌으며 변화의 범위가 크고 불안정하였다. 생물반응기의 COD 제거효율이 낮아지고 불안정한 원인은 HRT를 2일에서 1일로 단축운전(phase II →III), 그리고 유입수의 COD의 농도를 높게 운전(phase III→IV)함에 따른 OLR 증가에 의한 것으로 판단된다. UASB의 경우 이러한 영향은 AF와 이단 ASBF보다 더 큰 것으로 나타났으며 이단 ASBF가 비교적 높고 안정된 COD 제거효율을 보였다.

생물반응기 유출수 T-N과 T-P를 분석한 결과는 각각 Fig. 6, 7과 같으며 3기의 생물반응기별 차이는 없었다. 전 운전기간 동안 유입수와 유출수의 T-N은 비슷한 수준으로 T-N은 생물반응기에서 제거되지 않았으며 biomass에 의한 동화량은 미미한 것으로 나타났다. Phase I~II 운전기간 유입수 T-N 농도는 370~800 mg/L이었으며 COD 제거효율은 높고 안정된 수준을 보였으나 phase III과 IV 운전기간 유입수 T-N은 증가하여 760~1,310 mg/L이었으며 생물반응기의 COD 제거효율은 낮아지고 불안정하였으므로 메탄균에 대한 암모니아의 저해현상도 생물반응기의 성능저하 원인의 하나로 판단된다. T-N 760~1,310 mg/L는 35°C, 그리고 pH 8의 조건( $\text{NH}_4^+$ 의  $\text{pKa} = 9$ )에서 이온화되지 않은 암모니아 농도로 환산하면 70~120 mg/L로 메탄균의 활성에 독성/저해 작용을 하기에 충분한 농도<sup>17)</sup>로서 생물반응기의 효율이 저하되는 원인의 하나로 사료된다. 특히, 유입수 T-N농도가 1,570 mg/L이었던 144일 이후 몇 일 동안 COD 제거율은 50% 이하로 저하된 것을 관찰할 수 있었다. 생물반응기의 효율저하는 OLR의 증가운전 혹은 메탄균에 대한 암모니아의 저해작용 등의 복합적인 것으로 판단되며 어느 영향이 큰 것인지는 본 연구의 결과로

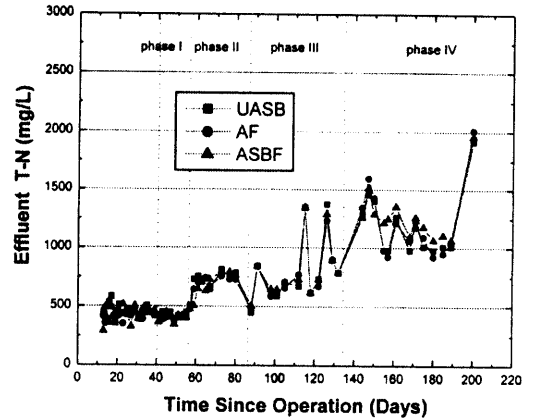


Fig. 6. Effluent T-N of lab-scale anaerobic bioreactors.

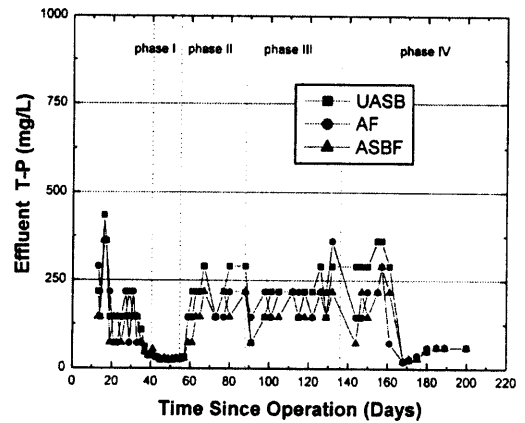


Fig. 7. Effluent T-P of lab-scale anaerobic bioreactor.

증명할 수 없으나 앞으로 이에 대한 연구가 요망된다. 이러한 결과로 양돈폐수에 함유된 고농도 T-N은 메탄균의 활동을 저해할 수 있으므로 혐기성 생물반응기의 적절한 운전 및 효율 향상을 위하여 전처리로 T-N의 제거가 필수적이라 사료된다.<sup>18)</sup> 3기의 생물반응기 T-P는 전 운전기간에서 220~460 mg/L로 유입되었으며, 유출수 농도는 20~360 mg/L로 생물반응기에서 제거된 T-P는 일부 불용성의 침전 혹은 biomass에 동화된 것으로 사료된다.

운전기간 동안 생물반응기 유출수 biomass(VSS) 농도를 분석한 결과는 Fig. 8과 같다. HRT를 2일로 운전한 Phase II 운전기간까지 유출수 VSS는 UASB, AF, 이단 ASBF에서 각각 83~335 mg/L,



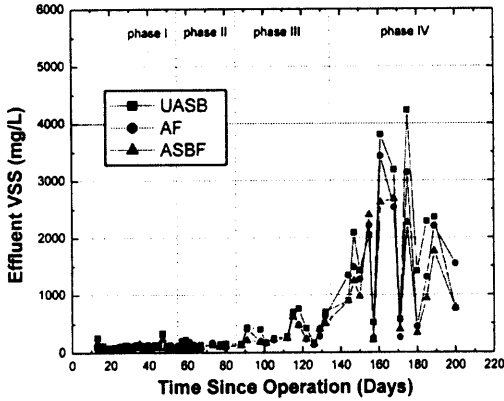


Fig. 8. Effluent VSS of lab-scale anaerobic bioreactors.

69~300 mg/L, 62~230 mg/L로 biomass의 유실량은 낮았으며 거의 비슷한 수준이었으나 HRT를 1일로 단축시켜 운전한 phase III과 IV에서 유출수 VSS는 각각 148~4,230 mg/L, 138~3,430 mg/L, 127~2,620 mg/L로 증가하였고 전반적으로 불안정한 biomass 유실 형태가 나타났으며 이러한 현상은 생물반응기의 상향류 유속이 2.3 cm/hr에서 4.5 cm/hr로 증가함에 원인이 있는 것으로 사료된다. 전 운전기간에 걸쳐서 이단 ASBF는 이단화에 의하여 유출수 VSS가 전반적으로 낮으므로 UASB와 AF보다 biomass 보유능력이 우수한 것으로 나타났다.

Biogas 발생량은 표준상태(0°C, 1 atm)를 기준으로 하였으며, 그 결과는 Fig. 9에 도시되었다. UASB와 AF의 biogas 발생량은 비슷하게 phase I, II, III 운전기간에서 각각 3.3~3.6 L/d, 6.4~7.5 L/d, 그리고 11.6~13.0 L/d로서 이단 ASBF보다 많았으나 phase IV의 운전기간에서 이단 ASBF의 biogas 발생량은 26.9 L/d로서 UASB와 AF의 각각 21.5 L/d와 23.3 L/d보다 많았다. 이단 ASBF가 높은 OLR에서도 COD 제거효율과 biogas 발생량이 높게 나타난 것은 UASB와 AF와 비교하여 첫째단과 둘째단 저단부에 각각 고농도의 biomass를 유지하기 때문인 것으로 사료된다.

### 3.3. 정상상태에서 혐기성 생물반응기의 성능 비교

HRT 1일, 그리고 OLR 5.1 kg-COD/m<sup>3</sup>·d의

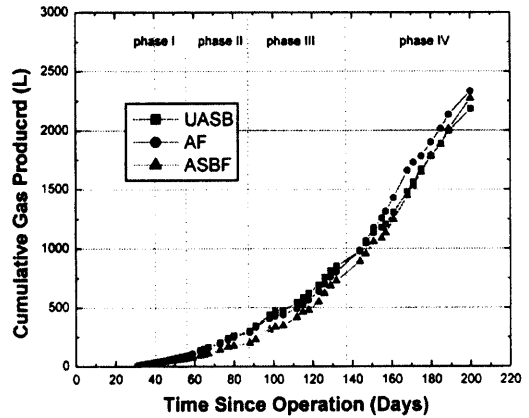


Fig. 9. Cumulative biogas production since the start-up operation of lab-scale anaerobic bioreactors.

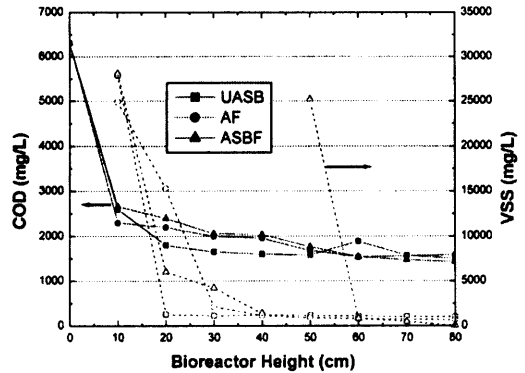


Fig. 10. Steady state COD and VSS profile throughout lab-scale anaerobic bioreactors operated at HRT of 1 day and OLR of 5.1 kg-COD/m<sup>3</sup>-d.

phase IV 정상상태 운전조건에서 생물반응기 높이 별 COD와 부유성 biomass(VSS)를 측정 한 결과를 Fig. 10에 도시하였다. 혐기성 생물반응기의 특성상 media에 부착된 biomass는 측정되지 않았으나 AF와 이단 ASBF의 경우 부착된 biomass를 육안으로 확인할 수 있었다. UASB와 AF에 유입된 COD는 하단부 10 cm 이내에서 60% 정도 제거되었으며 이후 서서히 제거되어 유출수 부분에서 75% 정도 제거된 것으로 나타났다. 이러한 COD 제거효율은 하단부에 biomass가 25,000~28,000 mg VSS/L의 고농도로 유지되고 있기 때문인 것으로 판단되며, 이러한 현상은 상향류의 UASB와 AF 생물반응기 연구에서 반응기의 하단부에서 대부분의

COD가 제거되고 상부에서 미미하나 전체 COD 제거효율은 반응기의 높이가 높아지면 증가된다는 보고<sup>19,20)</sup>와 비슷한 경향을 나타내고 있다. 이단 ASBF의 경우도 첫째 단의 하단부 높이가 10 cm에서 대부분의 COD가 제거되었으며 첫째 단과 둘째 단 유출수의 COD 농도에는 차이가 없었다. 특히, 둘째 단의 하단부에도 25,000 mgVSS/L의 고농도 biomass가 유지되고 있었으며, 첫째 단에 비교하여 상대적으로 낮은 농도의 유기물을 공급받는 둘째 단의 biomass에 의하여 높은 OLR에서도 효율적인 처리 그리고 충격부하와 독성물질의 유입에 대한 적응능력이 UASB와 AF에 비교하여 우수할 것으로 사료된다.

3기의 생물반응기를 각 phase에 따라 정상상태 운전조건에서 COD 제거효율과 biogas 발생량을 분석하여 Table 4에 요약하였다. 3기의 생물반응기 COD 제거효율은 phase I~IV의 전 운전기간 동안 차이가 없이 각각 78.9~81.5%, 81.3~83.8%, 76.7~78.8%, 그리고 74.7~77.2%로 높은 수준을 유지하였다. 유입수 COD 농도의 상향조정과 HRT의 단축운전에 의한 OLR의 증가에 따라 3기의 생물반응기 COD 제거효율은 감소되는 것으로 나타났다. 제거된 COD 기준 biogas 발생량에 있어서 OLR이 비교적 낮은 1.1~3.8 kg-COD/m<sup>3</sup>·d의 phase I~III 운전기간에서 UASB는 각각 0.56, 0.62, 0.73 m<sup>3</sup>/kg-COD<sub>r</sub>으로 가장 높았으며 그 다음이 AF, 이단 ASBF의 순서였다. 그러나 5.1 kg-COD/m<sup>3</sup>·d로 운전한 phase IV에서 AF와 이단 ASBF의 biogas 발생량은 각각 0.93과 0.94 m<sup>3</sup>/kg-COD<sub>r</sub>으로 UASB의 0.81 m<sup>3</sup>/kg-COD<sub>r</sub>보다 높았다. 이상의 결과로 볼 때 양돈폐수의 처리에 있

어서 OLR을 낮게 운전하고자 하면 미생물의 부유성장인 UASB가 효율적이며 OLR을 높게 운전하고자 한다면 media로 충전된 미생물의 부착성장인 AF 혹은 이단 ASBF가 효율적인 것으로 판단된다. 미생물의 부착성장과 부유성장의 hybrid인 media의 충전 부피비에 따른 생물반응기의 성능 비교에 있어서 충전 부피비 100%의 AF와 50%의 이단 ASBF의 COD 제거능력에 있어서 차이는 관찰되지 않았다. 따라서, 본 연구에 사용된 AF와 이단 ASBF는 고농도의 유기물을 함유하는 양돈폐수의 효율적 처리와 biogas 발생에 최적인 혐기성 생물반응기로 적용성이 크다고 할 수 있다.

## 4. 결 론

혐기성 생물반응기의 운전인자가 공정에 미치는 영향과 처리효율을 비교하기 위하여 전업규모의 양돈농가에서 발생하는 양돈폐수의 특성을 분석하고 실험실 규모 UASB, AF, 그리고 이단 ASBF 생물반응기를 구성하여 HRT 1일, 그리고 OLR 5.1 kg-COD/m<sup>3</sup>·d까지 200일간 연속운전한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 양돈폐수는 유기물, 고형물, 그리고 암모니아를 고농도로 함유하고 있으며 축사의 형태와 계절의 변화에 영향을 크게 받는다. 슬러리 축사 양돈폐수는 스크레퍼 축사 양돈폐수에 비교하여 오염물질의 농도가 높았으며 겨울에 발생된 양돈폐수는 봄과 여름에 발생된 양돈폐수보다 오염물질의 농도는 낮았다. 양돈폐수는 집수조에 저장된 기간동안 부유성 혹은 용존성

Table 4. Performance comparison of anaerobic bioreactors in treating swine wastewaters

	Phase I		Phase II		Phase III		Phase IV	
	COD removal efficiency (%)	Biogas production (m <sup>3</sup> /kgCOD <sub>r</sub> )	COD removal efficiency (%)	Biogas production (m <sup>3</sup> /kgCOD <sub>r</sub> )	COD removal efficiency (%)	Biogas production (m <sup>3</sup> /kgCOD <sub>r</sub> )	COD removal efficiency (%)	Biogas production (m <sup>3</sup> /kgCOD <sub>r</sub> )
UASB	78.9	0.56	81.3	0.62	76.7	0.73	76.2	0.81
AF	81.3	0.59	83.8	0.54	78.6	0.65	74.7	0.93
ASBF	81.5	0.39	82.2	0.37	78.8	0.68	77.2	0.94

유기물이 가수분해와 산발효되어 용존성 유기물과 VFAs의 농도가 높았으며 이러한 현상은 여름에 더욱 심하였다.

- 2) 하수종말처리장 혐기성 소화조 잉여 슬러지에 의한 혐기성 생물반응기의 식중은 효과적이었으며 양돈폐수에 적용기간은 약 40일 정도 소요되었으며, media로 충전한 필터형 생물반응기인 AF와 이단 ASBF의 적용속도는 UASB 보다 빨랐다.
- 3) Phase I~II 운전기간동안 3기의 생물반응기 유입수 T-N은 370~800 mg/L으로 유입수와 비슷하였으며 77~91%의 높고 안정된 COD 제거율을 보였으나, phase III~IV 기간 유입수 T-N은 760~1,310 mg/L로 COD 제거율은 24~94%로 불안정하였으며 전반적으로 감소되었다. 생물반응기 COD 제거율 감소는 높은 T-N의 유입으로 메탄균에 대한 암모니아의 저해작용이 원인의 하나로 판단되므로 고농도의 암모니아가 함유된 양돈폐수의 효율적인 혐기성 소화처리를 위하여 전처리로서 암모니아의 제거는 필수적인 것으로 사료된다.
- 4) UASB, AF, 이단 ASBF 생물반응기는 phase I의 연속운전에서 COD 제거효율은 78.9~81.5% 그리고 biogas 발생량은 0.39~0.59 m<sup>3</sup>/kg-COD<sub>r</sub>으로 성능은 비슷하였으나 유입수 COD의 증가 혹은 HRT 단축운전에 의한 OLR의 증가에 따라 COD 제거효율은 감소하였으며 biogas 발생량은 높아졌다. AF와 이단 ASBF는 충전된 media와 이단화에 의하여 biomass의 보유능력이 우수하며 높은 OLR, 충격부하, 그리고 메탄균에 저해작용을 하는 암모니아의 유입에도 안정된 효율을 보일 수 있을 것으로 판단되므로 고농도의 유기물을 함유하며 축사의 형태와 계절에 따라 특성의 변화가 큰 양돈폐수의 혐기성 소화처리에 효율적인 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 에너지관리공단 R&D본부의 대체에너지개발 연구비에 의하여 수행되었으므로 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Speece, R. E., *Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewaters*, Archae Press, Tennessee, pp. 1~68(1996).
2. Souza, M. E., "Criteria for the utilization, design and operation of UASB reactors," *Wat. Sci. Tech.*, **18**(1), 55~69(1986).
3. Yong, J. C. and Yong, H. W., "Full-scale treatment of chemical process waters using anaerobic filters," *J. WPCF*, **63**(1), 153~159(1991).
4. Lo, K. V., Liao, P. H., and Gao, Y. C., "Anaerobic treatment of swine wastewater using hybrid UASB reactors," *Bioresources Tech.*, **47**, 153~157(1994).
5. Maloney, S. W., Engbert, E. G., Suidan, M. T., and Hickey, R. F., "Anaerobic fluidized-bed treatment of propellant wastewater," *Wat. Env. Research*, **70**(1), 52~59(1998).
6. Collins, A. G., Theis, T. L., Kilambi, S., He, L., and Pavlosthesis, S. G., "Anaerobic treatment of low-strength domestic wastewater using an anaerobic expanded bed reactor," *J. EE, ASCE*, **124**(7), 652~659(1998).
7. Fox, P. and Pohland, F. G., "Anaerobic treatment applications and fundamentals: substrate specificity during phase separation," *Wat. Env. Research*, **66**(5), 716~724(1994).
8. Lettinga, G. and Pol, L. H., "Advanced reactor design, operation and economy," *Wat. Sci. Tech.*, **18**(1), 99~108(1986).
9. Young, J. C. and Yang, B. S., "Design considerations for full-scale anaerobic

- filters." *J. WPCF*, **61**(9), 1576~1587(1989).
10. Kim, J. S., Development of High-Rate Two-Stage ASBF System for Methanization of Organics in Swine Wastewaters, Final Report to KEMC, Project No. 1996 N-BIO2-P-05, Sun Moon University(1999).
  11. Sievers, D. M. and Brune, D. E., "Carbon/nitrogen ratio and anaerobic digestion of swine waste," *Transaction of the ASAE*, **21**(3), 537~549(1978).
  12. Sanders, F. A. and Bloodgood, E., "The effect of nitrogen to carbon ratio on anaerobic decomposition," *J. WPCF*, **37**(12), 1741~1752(1965).
  13. Koster, I. W., "Characteristic of the pH-influenced adaptation of methanogenic sludge to ammonium toxicity," *J. Chem. Tech. Biotechnol.*, **35**, 445~455(1986).
  14. APHA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18<sup>th</sup>Ed., American Public Health Association, Washington, D. C.(1992).
  15. Bhattacharya, S. K., Madura, R. L., Walling, D. A., and Farrell, "Volatile solids reduction in two-phase and conventional anaerobic sludge digestion," *Wat. Res.*, **30**(5), 1041~1048(1996).
  16. Sarada, R. and Joseph, R., "A comparative study of single and two stage processes for methane production from tomato processing waste," *Process Biochem.*, **31**(4), 337~340(1996).
  17. Koster, I. W. and Lettinga, G., "Anaerobic digestion at extreme ammonia concentrations," *Biological Wastes*, **25**, 51~59(1988).
  18. Hensen, K. H., Anbelidaki, I., and Ahring, B. K., "Anaerobic digestion of swine manure: inhibition of ammonia," *Wat. Res.*, **32**(1), 5~12(1998).
  19. Oleszkiewicz, J. A. and Thadami, V. J., "Effects of biofilter media on performance of anaerobic hybrid reactors," *Env. Tech.*, **9**, 89~100(1988).
  20. Tay, J. H., Show, K. Y., and Jaysaseelan, S., "Effects of media characteristics on performance of upflow anaerobic packed-bed reactors," *J. EE, ASCE*, **122**(6), 469~476(1996).