

UASB 공정에 의한 슬러리형 돈사폐수의 처리

원철희[†] · 김병욱 · 한동준^{*} · 임재명

강원대학교 공과대학 환경공학과

^{*}강원도립대학 환경시스템과

The Treatment of Slurry-type Swine Waste using UASB Reactor

Won, Chul-Hee[†] · Kim, Byoung-Ug · Han, Dong-Joon^{*} · Rim, Jay-Myoung

Department of Environmental Engineering, Kangwon National University

^{*}Department of Environmental System, Gangwon Provincial University

(Received 22 July 2004, Accepted 17 September 2004)

Abstract : This research examined the treatment efficiency and methane production rate in treating slurry-type swine waste using UASB (upflow anaerobic sludge blanket) reactor. The UASB reactor was operated at an organics volumetric loading rate (VLR) of 2.6-15.7 kgCOD/m³/day. A stepwise increase of the VLR resulted in a temporary deterioration in the COD removal rate in UASB reactor but recovered quickly. The COD removal rate were 65-70% for VLR up to 5 kgCOD/m³/day. When organics VLR was 10 kgCOD/m³/day, the COD removal rate decreased sharply and there was loss of 17.537g of the seeding biomass due to sludge washout. This result indicated that the UASB system cannot be adapted to more than 10 kgCOD/m³/day of VLR.

As the organic load increased from 2.6 to 15.7 kg COD/m³/d, the biogas production rate varied from 3.2 to 10.8 L/d and the methane conversion rate of the organic matter varied from 0.30 to 0.23 m³CH₄/kg COD_{removed}. The methane content showed the range of 70.1-81.5% during the experimental period. The volatile solids (VS) removal efficiency was similar at the low VLR (< 5 kgCOD/m³/day), but it decreased sharply at the high VLR (> 5 kgCOD/m³/day). The VS reduction rate was, moreover, large those of COD.

The result shows that hydraulic retention time above 2 days is essential in case of treating wastewater containing 1% of solids.

keywords : Slurry-type swine waste, UASB, Methane conversion rate

1. 서론

국내 축산폐수의 발생량은 총 오·폐수 발생량의 약 1% 정도이나, BOD 부하량면에서는 전체의 14.7%로서 미처리 되어 수계에 직접 방류될 경우 호소나 하천의 수질에 심각한 문제를 야기할 수 있다. 따라서 효율적인 오·폐수의 처리와 수자원을 확보하기 위해서는 고농도로 배출되는 축산폐수의 보다 완벽한 처리가 요구되어진다. 이러한 고농도의 폐수를 처리하기 위해서는 호기성 공법에 비해 운영상 경제적이고, 부산물인 CH₄를 회수할 수 있는 장점을 가진 혐기성 공법이 주로 이용되어 왔으며, 근래에는 Upflow Anaerobic Filter(Young, 1968), Anaerobic Attached Film Expanded Bed(Jewell, 1981), UASB(Lettinga and Hulshoff, 1991) 등의 고율 혐기성 공정이 개발되어 많은 시설에 적용되고 있다. 특히, 1980년대에 개발된 UASB 공정은 반응조내에 다량의 미생물을 확보할 수 있는 장점과 처리효율

의 우수성으로 인하여 다양한 산업폐수와 도시하수 처리 분야에서 적용되고 있으며, 그 비율은 점차적으로 증가하는 추세이다(Lettinga et al., 1993; Fang et al., 1995). 그러나 지금까지 UASB 공정을 이용한 연구의 대부분은 도시하수나 유가공폐수, 제지폐수, 주정폐수 등을 대상으로 주로 연구가 수행되었으며, 돈사폐수와 같이 고농도의 암모니아성 질소와 고형물을 함유한 기질을 대상으로 한 연구는 저조한 실정이다. 이러한 원인은 UASB 공정의 원활한 운전을 위해서는 기질을 분해 할 수 있는 침전성이 좋은 granule을 확보하는 것이 필요한데, 기질이 고농도의 암모니아성 질소와 높은 고형물을 함유할 경우 granule의 형성을 방해하고(Hulshoff and Lettinga, 1991) biomass의 부상으로 인한 슬러지 유실로(Lettinga, 1983) 인하여 적절한 처리를 기대할 수 없기 때문이다. 이러한 이유로 돈사폐수와 같이 고농도의 고형물 및 암모니아성 질소를 함유한 경우 타 기질에서 생성된 입상슬러지를 식중하여 운전을 하고 있으나, 기질적응에 많은 시간이 소요되며, 이 역시 유입수의 고형물 농도에 제한을 받게 된다.

따라서 본 연구에서는 UASB 반응조를 이용하여 분과 소

[†]To whom correspondence should be addressed.
chwon@kangwon.ac.kr

변이 혼합된 상태의 슬러리형 돈사폐수의 처리시 반응조의 start-up, 유기물 제거, 그리고 메탄 생성율을 파악하고 고형물이 이에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1. 실험장치 및 식종슬러지

본 실험을 위해서 유효용적 5L(내경 7cm)인 실험실 규모의 UASB 반응조를 제작하여 35±1℃의 조건에서 운전하였다. UASB 반응조는 gas-solid separator와 유입수 분배장치, 그리고 포화식염수(10% NaCl과 1N-H₂SO₄)로 채워진 가스 포집장치로 구성되어 있으며, Fig. 1에 반응조의 모식도를 나타내었다.

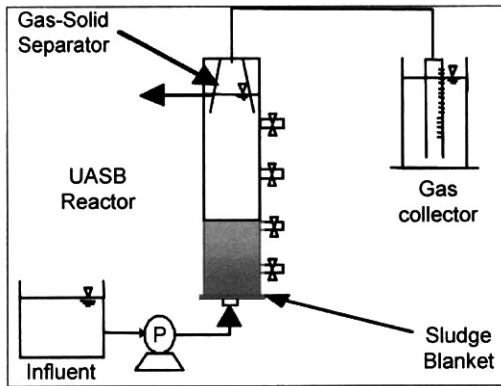


Fig. 1. Schematic diagram of laboratory-scale reactors in this study.

식종 슬러지는 맥주 공장의 혐기성 소화조에서 채취한 granule로서 2L를 식종하였다. Granule의 직경은 2~3mm의 불규칙한 구형이었으며, TS와 VS는 각각 35,500 mg/L와 27,800 mg/L로서 휘발성 성분이 약 78%를 차지하고 있었다.

2.2. 운전 및 분석방법

Granule 식종 직후 2일 간은 폐수를 주입하지 않고 물만

을 채워 가온하였다. 초기 운전은 1,000 mgCOD/L 이하로 돈사폐수를 희석하여 약 1 kgCOD/m³/d의 부하로 시작하였으며, 점차적으로 농도를 10,000 mgCOD/L까지 증가시켰다. UASB 반응조는 15.7 kgCOD/m³/d까지 유기물 부하를 증가시켰으며, 폐수의 주입은 master flux pump를 이용하였다.

COD, TS, VS, pH, alkalinity, VA(Volatile Acids) 등의 분석항목은 Standard Methods(1995)에 준하여 분석하였다. 바이오 가스량은 매일 측정하였으며, 메탄 함량의 분석은 가스 성분 분석기(GA 94A, UK)를 이용하였다. 미생물 관측은 고 정확도와 gold 코팅을 거친 후 FESEM(Field Emission Scanning Electron Microscope, S-4300/HITACHI)을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유입 돈사폐수의 특성

본 실험에서 사용된 슬러리형 돈사폐수의 원폐수 및 유입폐수의 물리·화학적 성상을 Table 1에 요약 정리하였다.

원폐수는 표준채(# 170, 90 μ m)를 이용하여 협잡물을 제거한 농도로서 pH는 6.5~7.8로 기 보고된 6.4~8.2(김 등, 2001)와 유사하였으며, 시료 채취 일시에 따라 다소의 차이가 있었다. TS는 약 10%(98,982 mg/L)로서 UASB 반응조의 유입 기질로서는 적절하지 않았으며(최, 1998), NH₄⁺-N의 농도는 5,468 mg/L로서 메탄생성 미생물의 저해농도 범위였다(Parkin and Owen, 1986). 따라서 NH₄⁺-N 및 TS의 농도를 고려하여 희석 후 유입폐수로 사용하였다. 희석된 유입폐수의 TS는 약 1%(10,501 mg/L)로 조사되었으며, TCOD와 NH₄⁺-N의 평균 농도는 각각 10,458 mg/L와 607 mg/L로 나타났다. 또한, pH는 6.5~7.6의 범위로서 pH로 인한 혐기성 소화조에 미치는 영향은 미미할 것으로 판단하여 인위적인 pH 조절은 실시하지 않았으며, 알칼리도는 2,640~4,522 mg/L로서 pH에 대한 완충능력이 우수한 것으로 나타났다(McCarty and McKinney, 1961).

3.2. pH, alkalinity, VA의 변화

Fig. 2 에는 VLR의 변화에 따른 pH, alkalinity, VA, VA/alkalinity 비가 나타나 있다. Fig. 2에 나타난 바와 같

Table 1. Physico-chemical properties of swine wastewater

Parameters	Raw wastewater	Influent wastewater
pH	6.5~7.8(7.3)	6.5~7.6(7.1)
TS, mg/L	96,368~100,926(98,982)	9,320~13,580(10,501)
VS, mg/L	73,205~80,442(76,382)	7,580~9,560(8,152)
TCOD, mg/L	76,000~85,000(80,800)	8,640~12,300(10,458)
SCOD, mg/L	34,600~35,600(35,067)	2,890~5,320(4,030)
NH ₄ ⁺ -N, mg/L	5,110~5,842(5,468)	526~736(607)
T-P, mg/L	1,879~2,193(2,023)	139~277(207)
Alkalinity, mg/L as CaCO ₃	19,810~22,915(20,997)	2,640~4,522(3,829)
VA, mg/L as CH ₃ COOH	17,560~21,600(19,540)	2,350~2,520(2,390)

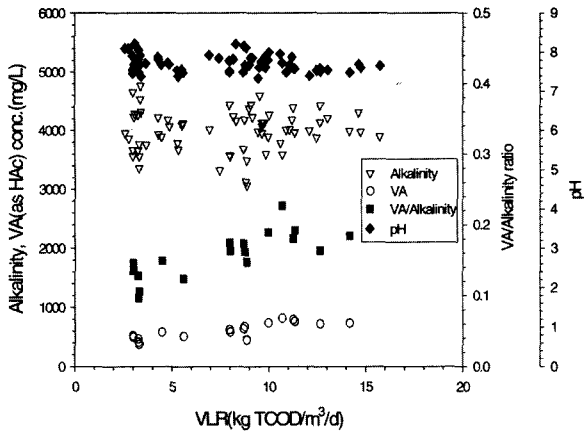


Fig. 2. Variations of volatile acids, alkalinity and VA/Alkalinity ratio with organic loading rate.

이 유출수의 pH는 7.3~8.2의 범위이며, VA의 농도는 McCarty와 McKinney(1961)가 보고한 메탄생성 미생물에 영향을 미치는 제한 농도 이하였다. 유출수내 알칼리도는 3,067~4,762 mg/L로서 완충능력은 충분한 것으로 나타났는데, 이는 실험에 이용된 돈사폐수 자체의 높은 알칼리도와 혐기성 소화 과정 중 유기질소의 암모늄이온(NH₄⁺-N)으로 전환시 생성되는 알칼리도에 의한 결과로 사료된다.

한편, 휘발성 유기산의 알칼리도에 대한 비(VA/Alkalinity)는 혐기성 소화조의 상태를 표현하는 유용한 지표인데, 0.8 이상이 되면 pH 저하로 인한 메탄 생성이 억제되고 운전의 실패를 초래할 수 있으므로 그 비가 0.3~0.4 이상이 되면 조절해 줄 필요가 있다. 본 실험기간동안에 VA/Alkalinity 비는 0.10~0.23의 범위로서 휘발성 산으로 인한 pH의 저하는 발생하지 않았으며, 안정적인 처리를 수행할 수 있었다.

3.3. Start-up 및 유기물 제거

UASB 반응조는 약 4주간의 순운 기간을 두었다. 초기 운전은 1,000 mgCOD/L 이하로 폐수를 희석하여 약 1 kgCOD/m³/d 부하의 HRT 1day 조건으로 1주간 수행되었으며, 슬러지 부상, pH 감소 등의 징후는 발생하지 않았다. 이후 10,000 mgCOD/L까지 폐수의 농도를 증가시키고 유량을 감소하여 HRT 5day의 조건에서 2 kgCOD/m³/d의 부하로 26일까지 운전하였다. 이 기간의 COD 제거효율은 70%이상(데이터 미제시)으로 나타났으며 반응조내의 미생물은 돈사폐수에 충분히 순응되었다고 판단된다. 그러나 첫 번째 시료채취구 윗 부분의 식종한 granule이 3주간 총 5회에 걸쳐 3번째 시료 채취구까지 부상하였다. 이는 운전 조건의 상향유속이 0.011 m/h 이하로서 매우 낮고 유입폐수의 COD중 고형물이 유발하는 COD가 61.5%로 매우 높기 때문에 고형물이 granule 사이의 공극에 축적되어 완전히 분해되지 못하고 granule에 흡착되거나 응집되어 슬러지 부상이 일어난 것으로 판단된다. 한편, Sayed와 Zeeuw (1988)는 도축폐수를 이용한 실험에서 슬러지 층내에 과도한 기질이 축적되어 심각한 슬러지의 부상과 이로 인한

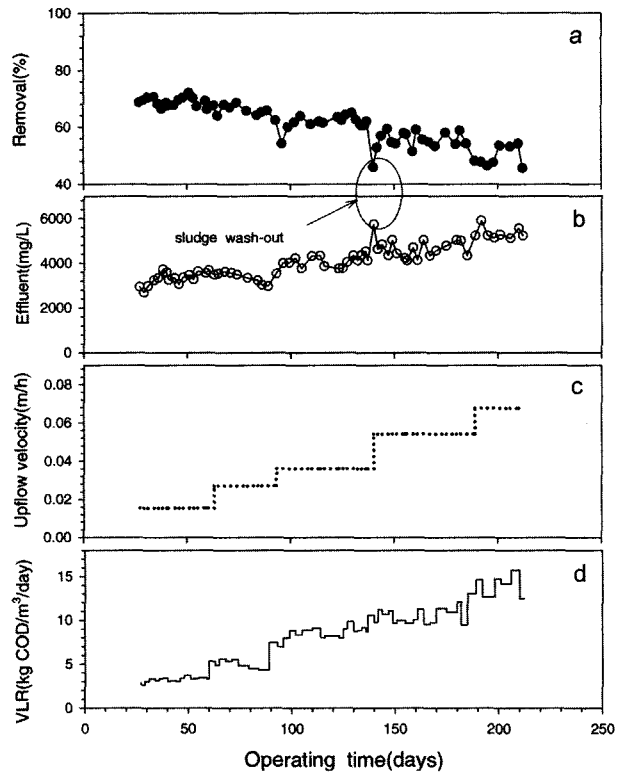


Fig. 3. Variations of VLR, upflow velocity, effluent COD concentration and COD removal efficiency with operating time.

biomass의 손실로 반응조의 운전이 실패하였다고 보고하였는데, 본 연구에서는 단지 슬러지 부상만이 일어났으며, 공정의 실패는 발생하지 않았다.

순운기간 이후 반응조의 운전은 Fig. 3에 제시된 바와 같이 2.6~15.7 kgCOD/m³/d의 VLR로 약 200일간 이루어졌으며, 상향유속은 0.015~0.068 m/h의 범위로서 운전되었다.

운전시작 후 60일까지는 2.6~3.7 kgCOD/m³/day(평균 3.2; HRT, 3.5일)의 VLR로 운전하였는데 실험초기부터 약 70%의 높은 COD 제거효율을 얻을 수 있었다. 이러한 결과는 4주간의 start-up(순운) 시간을 고려하면 매우 높은 수준으로 돈사폐수 처리시 granule의 식종은 start-up 기간을 효과적으로 단축시킬 수 있음을 의미한다.

한편, 주 등(2001)은 granule을 식종하여 돈분폐수를 처리한 연구에서 순운기간 없이 본 실험과 유사한 결과를 보고하였으며, granule을 미식종하여 돈사폐수를 처리한 Lo 등(1994)은 COD 제거율은 약 57%를 보였으며, granule 슬러지의 식종은 운전성능의 향상에 필수적이라고 보고한 바 있다.

60일 이후 VLR을 증가시켜 89일까지는 4.3~5.6 kgCOD/m³/day(평균, 5.0; HRT, 2일)의 부하로 운전하였는데, 이 기간의 COD 제거효율은 66.5%로 3% 정도 감소하였으나 제거효율의 변동이 거의 없는 관계로 이후 부하를 15.7 kgCOD/m³/day까지 점차적으로 증가시켰다. 부하의 증가시마다 COD 제거효율은 일시적으로 감소하였으나 빠르게 회

복되는 경향을 보였으며, 8.5 kgCOD/m³/day 이하의 부하에서 평균 COD 제거효율은 61.6%로서 60% 이상의 유기물 제거를 달성할 수 있는 허용부하로 판단된다.

이후 증가된 부하에서는 COD 제거효율이 급격히 감소하고 변동폭이 심해지기 시작하였는데, 이는 granule 사이에 축적되어 있던 고형물의 유출에 기인하는 것으로 사료되며 2~3mm 크기의 식종한 granule이 유출되기 시작하였다. 특히, 운전일수 140일의 10.6 kgCOD /m³/day의 부하에서 심각한 슬러지의 washout이 발생하였는데, 식종슬러지의 약 25%(TS 기준, 17.537 g)가 유출되었으며, 표준체(#30, 600 μm)를 통과시켜 granule을 제외한 유출수의 COD 농도는 5,730 mg/L까지 증가하였다.

186일부터 운전종료까지는 HRT 1일 이하로 운전을 하였다. 증가된 부하에서 COD의 제거효율은 50%이하로 감소하였는데, 10 kgCOD/m³/day 이상의 부하에서는 제거율면에서 무의미한 것으로 판단되어 더 이상의 실험은 진행하지 않았다.

Table 2에는 연구자에 따른 가축폐수의 혐기성소화 결과를 요약하여 제시하였다. 동일한 2일의 HRT 조건에서는 Chen과 Shyu(1998), 강 등(1999)의 연구와 유사하였으며, HRT 1일에서는 강 등(1999)의 연구보다는 20%가 낮게 나타났다. 이러한 결과는 HRT 2일의 경우 높은 유입수 농도에 불구하고 유입되는 부하가 5 kgCOD/m³/day로서 비교적 낮았으나, HRT 1일에서는 유입부하가 10.4 kgCOD/m³/day로서 강 등(1999)의 연구보다 2배가 높기 때문에 나타난 결과라 판단된다. 실제적으로 강 등(1999)의 연구에서 HRT 0.5일 및 1일은 본 연구에서 1일 및 2일에 해당하는 부하로 처리효율의 차이는 각각 2%와 4.5%로 그 차이는 적은 것으로 나타났다. 그러나 유사한 유입 농도와 운전조건(VLR, 9.85~10.19 kgCOD/m³/day; HRT, 1~2일)하에서

계분을 이용하여 수행된 Kalyuzhnyi 등(1998)의 연구와 비교하면 본 연구의 결과가 19~22% 정도 낮은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 주입기질의 차이와 기질내의 고형물 농도 차이에 기인하는 것으로 판단되며 UASB 반응조의 운전시 고형물의 배제는 운전성능을 향상시킬 것으로 판단된다.

3.4. Biogas의 발생량

바이오 가스 발생량, 메탄함량, 그리고 메탄생성율(VS 주입량 당, COD 제거량 당)의 변화를 Fig. 4a, b, c에 각각 나타내었다. 바이오 가스 발생량 및 메탄생성율은 Jewell (1991)이 제시한 dry biogas factor(0.8371 at 35°C)를 이용하여 STP(0°C, 1 atm) 상태로 산정하였다.

Fig. 4(a)에 제시된 바와 같이 135일 이전에는 유기물 부하 증가와 유사하게 바이오 가스 발생량도 급격히 증가하였으나, 135일 이후에는 부하증가 경향과 다소 상이하였고 발생량의 변동이 매우 심한 것으로 나타났다. 그러나 바이오 가스내의 메탄함량은 70.1~81.5%의 범위로서 135일 이후 다소 낮아지기는 했으나, 70% 이상을 유지하였다.

한편, VS 유입부하가 2.3에서 12.4 kgVS/m³/d로 증가함에 따라 VS 주입에 따른 메탄 수율은 0.26에서 0.15 m³CH₄/kg VSadd.로 감소하였으며, COD 유입부하가 2.6에서 15.7 kgCOD/m³/d로 증가할 때 유기물 제거당 메탄 수율은 0.30에서 0.23 m³CH₄/kg CODrem.으로 변화하였다. 이러한 결과는 glucose에 기준한 이론적 메탄 수율 0.35 m³CH₄/kg CODrem.보다 낮은 값으로 반응조의 운영조건 및 주입 기질(protein, fats)의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 한편, Table 2에 나타난 바와 같이 VS 주입에 따른 메탄 수율은 동일한 HRT(2일) 조건에서 Chen과 Shyu (1996)가 제시한 0.164 m³CH₄/kg VSadd.보다 높게 나타났다.

Table 2. Comparative results on livestock waste

Type	Temp., °C	HRT, day	VLR, kg COD/m ³ /d	CH ₄ yield, m ³ /kg VSadd.	CH ₄ content, %	COD red., % (VS)	Ref.
ABR	35	14	(4)	0.48-0.62	65	(68.9-81.4)	Boopathy
UAF	35	3.8	0.93	0.096	78.9	63(75)	Chen & Shyu
ABR	35	2	1.74	0.068	70.6	60(71)	Chen & Shyu
CSTR	35	2	1.74	0.056	76.9	65(58)	Chen & Shyu
UASB	35	2	1.74	0.164	62.3	66(72)	Chen & Shyu
UASB	35	3.62	5.52	-	82	77.5	Kalyuzhnyi <i>et al.</i>
H-UASB	35	0.5-3	1.9-10.9	-	78.4-81.0	60.0-74.8 (27.4-72.1)	Kang <i>et al.</i>
UASB	35	3.5	3.2	0.26	73.7	68.8(66.5)	This study
UASB	35	2	5.0	0.23	77.5	66.1(64.5)	This study
UASB	35	1.5	8.5	0.23	77.1	61.6(53.3)	This study
UASB	35	1.0	10.4	0.17	74.3	55.1(44.5)	This study
UASB	35	0.8	13.8	0.15	74.1	49.4(35.4)	This study

* ABR, anaerobic baffled reactor; CSTR, continuously stirred tank reactor; UAF, upflow anaerobic filter; H-UASB, hybrid upflow anaerobic sludge blanket

** (), Volatile solids

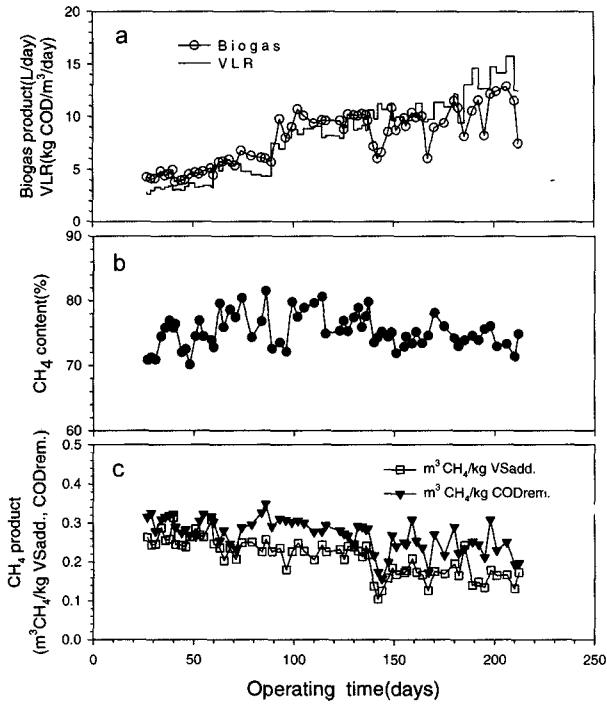


Fig. 4. Variations of biogas product, CH₄ content, and CH₄ product with operating time.

으며, 유사한 유기물 부하의 Boopathy (1998)의 연구 결과 보다는 낮게 나타났다.

3.5. 고형물의 거동

Fig. 5는 UASB 반응조 유출수내의 고형물(TS)의 농도 및 제거율의 변화를 보여주고 있다. 순용기간 이후 실험초기에는 낮은 부하에도 불구하고 다소 높은 고형물 농도를 보였으나, 운전이 진행됨에 따라 점차 안정이 되어 89일 경에는 실험기간 중 가장 낮은 값을 보였으며, 슬러지 wash-out이 발생한 140일 경에는 약 7,000 mg/L까지 상승하였고, 실험 종료시에는 7,530 mg/L까지 증가하였다.

회발성 고형물(VS)의 제거율은 35.4~66.5%의 범위로서, ABR 및 UAF 공법에 비하여 낮게 나타났다(Table 2). 이

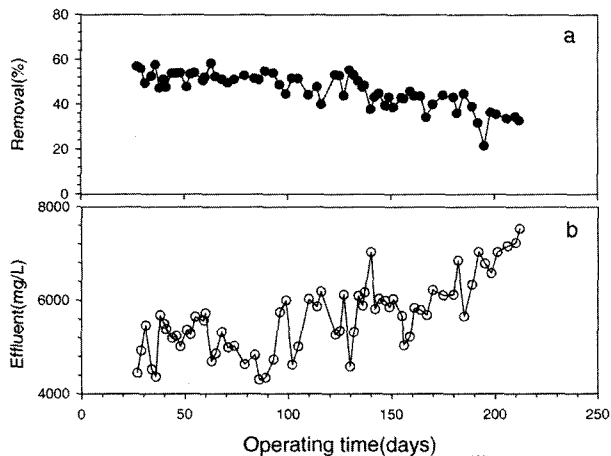


Fig. 5. Variations of effluent TS concentration and TS removal efficiency with operating time.

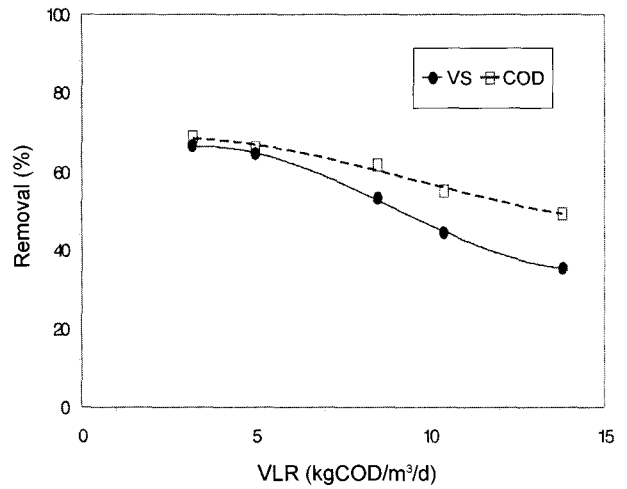


Fig. 6. Variations of removal efficiency of the VS and COD with VLR.

러한 결과는 본 실험에서 높은 고형물 농도(1%)가 유발하는 clogging 및 단락류, 그리고 낮은 상향유속이 유발하는 granule 자체간의 뭉침과 부상으로 인하여 biosolids와 고형물간의 실제적인 접촉시간 감소에 기인하는 것으로 사료된다(Zeeman et al., 2003).

한편, Fig. 6과 Table 2에 나타난 바와 같이 5 kgCOD/m³/day 이하의 부하에서 VS의 제거효율은 거의 유사하였으나, 이상의 부하에서는 급격히 감소하였으며, COD 제거율보다 더 큰폭의 감소를 보였다. 이러한 결과는 강 등 (1999)의 연구와 유사한 패턴으로서 UASB 반응조와 같은 고율 혐기성 공정을 이용하여 고형물의 농도가 높은 폐수를 처리할 경우 체류시간을 충분히 길게하여 고형물의 가수분해율을 높여주는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

3.6. Granule의 SEM 관측

Fig. 7(a), (b), (c), (d)는 SEM을 이용하여 granule을 찍은 사진으로 유기물 부하 약 15 kgCOD/m³/day인 본 연구의 마지막 단계에서 수행되었다. Fig. 7(a), (b)는 granule의 표면을 관측한 것으로 (b)를 보면 rod, cocci 그리고 fila-

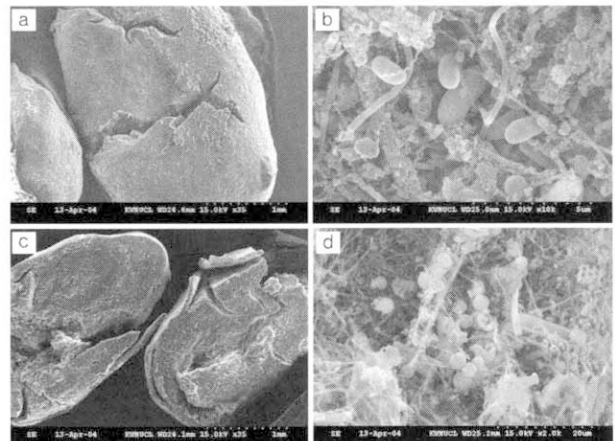


Fig. 7. Scanning electron microscopes of granular sludge.

mentous 형태의 미생물이 혼합되어 있는 것을 알 수 있다. Fig. 7(c)와 (d)는 granule의 절단면 및 내부 모습으로서 (d)를 보면 granule의 내부에는 acetate를 기질로 이용하는 filaments 형태의 Methanotrix와 Methaosaarcina로 추정되는 구형의 미생물이 분포하는 것으로 나타났다.

4. 결론

고율 혐기성소화 공정인 UASB 공정에 granule을 식중하여 슬러리형 돈사폐수 처리에 대한 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. COD 제거효율은 4주간의 start-up 기간내에도 약 70%로 높게 나타났으며, granule을 식중할 경우 특별한 순응기간 없이 운전이 가능할 것으로 판단된다.
2. 본 실험에서 granule 슬러지의 washout에도 불구하고 HRT 1일 이하(VLR 10 kgCOD/m³/day)에서 COD 제거효율은 약 50%로 비교적 우수한 것으로 나타났으며, HRT 2일 이상(5 kgCOD/m³/day 이하)의 운전 조건에서는 65% 이상의 높은 제거효율을 얻을 수 있었다.
3. 바이오 가스 발생량은 유기물 부하가 2.6에서 15.7 kgCOD/m³/day로 증가함에 따라 유사하게 증가하였으며, 가스내 메탄함량은 70.1~81.5%로 유지되었다. 또한, 유기물 제거당 메탄 수율은 0.30에서 0.23 m³CH₄/kg CODrem.으로 감소하였다.
4. VS의 제거율은 5 kg COD/m³/day 이상의 부하에서 COD 제거율보다 더 급격히 감소하였다. 또한, 유입폐수 중 고형물이 유발하는 COD는 61.5%로서 본 실험의 UASB 공정을 이용하여 슬러리형 돈사폐수를 처리할 경우 체류시간을 충분히 길게하여 가수분해율을 높여주는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구의 일부는 강원대학교 부속 환경연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊이 감사 드립니다.

참고문헌

- 강호, 최영, 김철규, 진창숙, Hybrid UASB 공정에 의한 양돈폐수의 혐기성 전처리가 질소·인 후속고도처리에 미치는 영향평가, *한국폐기물학회지*, **16**(4), pp. 412-422 (1999).
- 김병욱, 임재명, 돈사폐기물의 혐기성 소화시 수리학적 체류시간이 소화효율에 미치는 영향, *대한환경공학회지*, **23**(2), pp. 233-242 (2001).
- 주홍신, 김명경, 윤성일, 고성철, 이성택, 돈분 폐수 처리를 위한 입상 슬러지의 특성 연구, *대한환경공학회지*, **23**(8),

- pp. 1371-1378 (2001).
- 최일엽, UASB 공정에 의한 가축폐수의 혐기성전처리, 충남대학교 석사학위논문 (1998).
- Boopathy, R., Biological Treatment of Swine Waste Using Anaerobic Baffled Reactors, *Biore. Tech.*, **64**, pp. 1-6 (1998).
- Chen, T. H. and Shyu, W. H., Performance of four types of anaerobic reactors in treating very dilute dairy wastewater, *Biom. and Bioen.*, **11**(5), pp. 431-440 (1996).
- Fang, H. H. P., Chui, H. K., Li, Y. Y. and Chen, T., Effect of degradation kinetics on the microstructure of anaerobic biogranules, *Wat. Sci. Tech.*, **32**(8), pp. 165-172 (1995).
- Jewell, W. J., Richards, B. K., Cummings, R. J. and White, T. E., Methods for kinetic analysis of methane fermentation in high solids biomass digesters, *Biom. and Bioen.*, **1**(2), pp. 65-73 (1991).
- Jewell, W. J., Switzenbaum, M. S., and Morris, J. W., Municipal wastewater treatment with the anaerobic attached microbial film expanded bed process, *J. WPCF*, **53**(4), pp. 482-490 (1981).
- Kalyuzhnyi, S., Fedorovich, V. and Nozhevnikova, A., Anaerobic treatment of liquid fraction of hen manure in UASB reactors, *Biore. Tech.*, **65**, pp. 221-225 (1998).
- Lettinga, G. and Hulshoff P. L. W., UASB-Process Design for various types of wastewaters, *Wat. Sci. Tech.*, **24**(8), pp. 87-107 (1991).
- Lettinga, G., Hobma, S. W., Hulshoff, P. L. W., de Zeeuw, W., de Jorg, P., Grin, P. and Roersma, R., Design operation and economy of anaerobic treatment, *Wat. Sci. Tech.*, **15**, pp. 177-195 (1983).
- Lettinga, G., Man, A. D., ver der Last, A. R. M., Wiegant, W., Frijns, J. and van Buuren J. C. L., Anaerobic treatment of domestic sewage and wastewater, *Wat. Sci. Tech.*, **27**(9), pp. 67-73 (1993).
- Lo, K. V., Liao, P. H. and Gao, Y. C., Anaerobic treatment of swine wastewater using hybrid UASB reactors, *Biore. Tech.*, **47**, pp. 153-157 (1994).
- McCarty, P. L. and McKinney, R. E., Volatile acid toxicity in anaerobic digestion, *J. WPCF*, **33**, pp. 223 (1961).
- Parkin, G. F. and Owen, W. E., Fundamentals of anaerobic digestion of wastewater sludges, *J. Environ. Engin.*, **112**(5), pp. 867-920 (1986).
- Standard methods for the examination of water and wastewater*, 19th edition, American public health association/American water works association/Water environmental federation, Washington DC., U.S.A (1995).
- Young, J. C., *The Anaerobic Filter for Waste Treatment*, Ph. D. dissertation, Stanford Univ., Palo Alto, California, (1968).
- Zeeman, G., Mahmoud, N., Gijzen, H. and Lettinga, G., Solids removal in upflow anaerobic reactors, a review, *Biore. Tech.*, **90**, pp. 1-3 (2003).