

UASB 공정에 의한 고농도 축산폐수 처리시 유기물 제거와 메탄생성에 관한 연구

A Study on Organics Removal and Methane Production during the Anaerobic Digestion of High-Strength Swine Wastes Using UASB Process

원 철 희* 김 승 호** 박 은 영* 임 재 명***
Won, Chul-Hee Kim, Seung-Ho Park, Eun-Young Rim, Jay-Myoung

Abstract

This research was performed to investigate the COD removal efficiency and methane production in slurry-typed swine wastes using UASB(upflow anaerobic sludge blanket) reactor. The UASB reactor was operated from 0.8 through 3.3days of HRT in a range of 3 to 15 kg TCOD/m³/day of volumetric organic loading rate. The removal rate of TCOD was increased with the increase of the HRT. The removal rate of TCOD at an HRT over 2days, became greater than 68% with the methane contents being from 70 to 80%. Methane production rates were increased from 0.27 to 0.36 m³ CH₄/kg CODrem. as HRTs were increased from 0.8 to 3.3days.

키워드: 슬러리형 돈사폐수, UASB, 수리학적 체류시간, 유기물 부하

Keywords: Slurry-typed swine wastewater, UASB, Hydraulic retention time, Organic loading rate

1. 서론

국내에서 발생하는 축산폐수는 하천이나 호소의 수질에 영향을 주는 주요한 오염원으로서, 발생량은 총 오·폐수량의 약 1%정도이나, BOD 부하량 면에서는 전체의 14.7%로서 높은 비중을 차지하고 있다. 따라서, 효율적으로 오·폐수를 처리하고 수자원을 확보하기 위해서는 축산시설에서 배출되는 폐수를 보다 완벽하게 처리하여 방류시켜야 한다. 그럼에도 불구하고 현재 처리시설을 갖춘 축산농가에서조차도 시설의 운영기술 부족과 운영비 절감을 위하여 정상운영을 하지 않은 곳이 많아 수계의 오염을 가중시키고 있으며, 이로 인해 토양오염, 지하수 오염 등의 문제를 유발시키고 있다.

현재 국내에는 축산폐수가 환경오염에 미치는 영향의 심각성을 인식하여 2000년 현재 17개소의

축산폐수 공공처리시설을 설치 및 운영하고 있으며, 시공 또는 설계중인 처리시설이 24개소에 이르고 있다. 그러나, 현재 축산폐수 공동처리시설에서 당면하고 있는 문제점 중의 하나는 설계시보다 높게 유입되는 부하로 인하여 적정 처리가 이루어지지 않는다는 것이다. 이를 해결하기 위해 부분적으로 전처리단계에서 원심분리기, 고액분리기 등의 장치를 이용하여 유입되는 부하를 경감시키고는 있으나, 전처리 단계에서 안정화되지 않은 슬러지의 발생량이 증대됨으로 인하여 이에 대한 처리문제가 새롭게 대두되고 있으며, 따라서 축산폐수의 배출특성에 적합한 최적 전처리 방안의 필요성이 제기되고 있다. 또한, 운전이 용이하고, 경제적이며, 보다 효율적인 공정에 대한 필요성이 절실히 요구되고 있다.

한편, 생물학적 폐수처리 방법 중 혐기성 공법은 호기성 공법에 비해 고농도의 유기성 폐수처리에 적합하며, 슬러지의 생성량 및 영양소의 요구량이 적고, 부산물로 CH₄를 회수할 수 있다는 장점으로 인해 많은 연구가 진행되어 왔으며, 근래에는

* 강원대학교 환경공학과 박사과정

** 삼척대학교 환경공학과 교수, 공학박사

*** 강원대학교 환경공학과 교수, 공학박사

UBF[2](Upflow anaerobic Bed Filter), AAFEB[3](Anaerobic Attached Film Expanded Bed), UASB[4](Upflow Anaerobic Sludge Blanket) 등의 고율 혐기성 공정과 다단 소화법이 개발되어 많은 시설에 적용되고 있다. 또한, 이들 고율 혐기성 공정은 기존의 완전혼합형 공법보다 효율이 우수한 것으로 알려져 있으며, 특히 UASB 공정은 1970년대 Lettinga에 의하여 개발된[5] 이래 그 효율성이 입증되어 세계 각 국에 수많은 현장 처리시설이 설치되어 운전 중에 있다. 그러나, 현재까지 UASB 공정을 이용한 처리는 대부분 도시 하수나 유기공폐수, 제지폐수, 주정폐수 등을 주 대상으로 수행되고 있으며, 고농도 유기성 폐수인 축산폐수처리를 위한 UASB 처리시설은 거의 전무한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 축산폐수 공공처리시설의 방류수 수질기준 이하로 보다 완벽하게 처리하기 위한 전 단계로서 고효율 혐기성소화 공정인 UASB 반응조를 이용하여, 수리학적 체류시간의 변화에 따른 소화효율과 수리학적 체류시간이 메탄생성율에 미치는 영향을 파악함으로써, 향후 고농도의 유기물 및 암모니아성 질소를 함유한 돈사폐기물의 처리시 기초 자료를 제시하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1. 실험장치 및 재료

본 연구에서 사용된 실험 장치도를 Fig. 1에 나타내었다. 반응조는 내경 7cm, 높이 150cm인 원형관을 사용하였으며, 유효용적은 5L로 제작하였다. 반응조에는 water bath를 장착하여 온도를 35℃로 유지하였다. 또한, 반응조 내 상부에는 GSS(Gas-Solid Separator)를 설치하여 가스와 슬러지를 분리하였으며, 하부에는 유입수의 균일한 분배를 위하여 분배장치(distributor)와 시료 채취용 port를 외벽에 설치하였다.

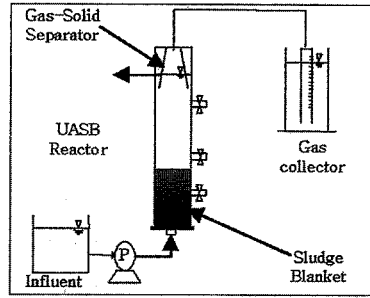


Fig. 1. Schematic diagram of laboratory-scale reactor used in this study.

2.2 운전방법

각 소화조로부터 생성된 가스는 포화식염수(10% NaCl과 1N-H₂SO₄)로 채워진 원형아크릴 용기에 포집하였으며, 가스성분 분석기(GA 94A)를 이용하여 조성을 분석하였다. 실험초기 start-up 기간을 단축하기 위하여 입상슬러지를 2개의 반응조에 각각 2L씩 식중하였다. 식중 후 2일간은 폐수를 주입하지 않고 물만을 채워 35℃로 유지하였으며, 식중 슬러지를 축산폐수에 순용시키기 위하여 COD를 기준으로 약 200mg/L의 저농도로 약 1주일간 주입하였고, 점차적으로 농도를 증가시켜 슬러지 식중 1달 후부터는 유입부하를 1 kgCOD/m³/day로 유지하였다. 유입부하는 3, 5, 8, 10, 13 kgCOD/m³/day로 조절하여 운전하였으며, 이에 따른 체류시간은 각각 3.3day, 2day, 1.25day, 1day, 0.8day로 나타났다. 집수조는 교반기를 설치하여 폐수를 혼합하였으며, 미량정량펌프(Master-flux)를 이용하여 반응조의 하부로 시료를 주입하였다.

Table 1. Characteristics of influent and effluent swine wastes. (Unit: mg/L, except pH)

Item	Influent	Effluent				
		HRT 0.8day	HRT 1.0day	HRT 1.25day	HRT 2.0day	HRT 3.3day
pH	6.5~7.8	7.5~7.7	7.3~8.0	7.5~8.2	7.4~7.9	7.4~8.2
Alkalinity (as CaCO ₃)	2,640~4,522	3,883~4,430	3,593~4,596	3,067~4,438	3,678~4,225	3,362~4,762
TS	6,020~13,580	3,480~6,440	3,660~7,020	4,550~6,180	4,290~5,320	4,360~5,720
VS	4,960~9,560	2,640~4,020	2,460~4,530	2,890~4,130	2,650~3,120	2,790~3,550
TCOD	6,450~12,300	3,330~4,850	2,570~5,730	2,990~4,360	2,650~3,530	2,670~3,960
SCOD	2,480~5,320	860~2,190	590~1,800	850~1,220	1,040~1,300	640~1,040
TKN	569~1,142	628~927	627~926	514~983	723~930	501~1,049
NH ₃ -N	520~736	618~750	576~865	638~796	603~703	587~807
T-P	139~277	125~229	129~242	107~221	133~201	105~214

3. 결과 및 고찰

3.1. 운전일수에 따른 제거특성

본 연구 기간동안 UASB 반응조의 유입 돈사폐수 성장과 체류시간에 따른 유출수 성상을 Table 1에 제시하였다. 유입기질의 pH는 약 6.5~7.8로 기 보고된 6.4~8.2[6]와 유사한 것으로 조사되었으며, 알칼리도는 2,640~4,522 mg/L as CaCO₃로 나타났다. 또한, 유입기질의 TS농도는 6,020~13,580 mg/L, VS는 4,960~9,560 mg/L, TCOD 6,450~12,300 mg/L, TKN 569~1,142 mg/L 그리고 NH₃-N은 520~736 mg/L의 범위로 운전되었다.

운전기간동안의 COD와 SCOD의 농도변화를 Fig. 2~Fig. 5에 나타내었다. Run 1의 경우 HRT 3.3day로 60일간 운전하였으며, HRT 2일로 30일, HRT 0.8day로 30일간 총 120일 동안 운전하였다. 운전일수에 따른 변화를 살펴보면 90일까지는 유입부하의 변동에도 불구하고 유출수의 농도는 비교적 일정하였으며, 90일 이후 유출수의 농도는 점차적으로 증가하였다.

또한, 제거효율은 90일까지는 약 70% 전·후로 나타났으나, 90일 이후 수리학적 체류시간의 감소와 이에 따른 유입부하의 증가로 인하여 제거효율은 약 60%로 감소하였으며, 마지막 분석시 미량의 입상슬러지 유실로 인하여 제거효율이 다소 감소한 것으로 나타났다. 그러나 반응조에 식중된 입상 슬러지와 반응조 상부의 GSS 장치로 인하여 짧은 체류시간에도 불구하고 유출수의 수질과 제거효율은 비교적 안정적인 것으로 조사되었다. Run 2는 체류시간을 1.25day에서 1.0day로 변화를 주어 운전하였으며, 각 체류시간에 따라 60일 간 총 120일 동안 운전하였다. 운전일수 60일까지 유출수의 농도는 비교적 일정하였으며, 제거효율도 비교적 일정하게 나타났다. 60일 이후 체류시간을 1.0day로 감소시키고 유입부하를 8 kg COD/m³/day에서 10 kg COD/m³/day로 증가하였을 때 일시적인 유출수 농도의 증가가 관측되었으나 운전일수의 경과에 따라 점차적으로 안정이 되는 것으로 조사되었다.

SCOD는 Run 1과 Run 2 모두 유입수의 수질 변화에도 불구하고 유출수의 농도는 비교적 일정한 수준으로 유지되었다.

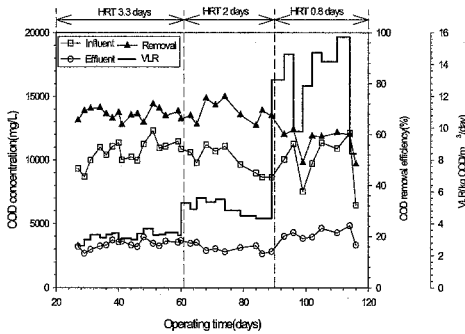


Fig. 2. Variations of COD concentration with operating time in UASB process(Run 1)

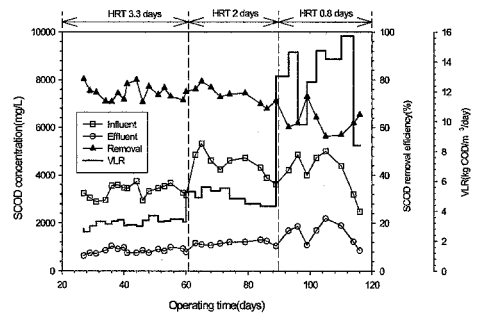


Fig. 4. Variations of SCOD concentration with operating time in UASB process(Run 1)

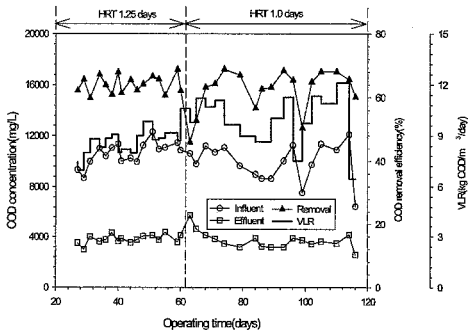


Fig. 3. Variations of COD concentration with operating time in UASB process(Run 2)

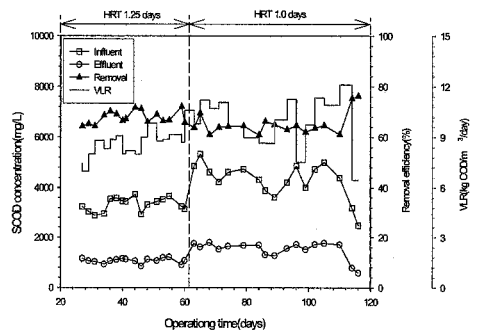


Fig. 5. Variations of SCOD concentration with operating time in UASB process(Run 2)

3.2 HRT에 따른 소화효율

UASB 반응조는 수리학적 체류시간을 각각 0.8, 1.0, 1.25, 2.0, 3.3day로 변화시켜 운전하였으며, 체류시간에 따른 유기물의 농도와 제거효율을 Table 2에 평균값으로 제시하였다. TS의 경우 수리학적 체류시간이 3.3day일 때 52.4%의 제거효율을 보였고 체류시간이 감소함에 따라 제거효율은 점차 감소하여 0.8 day에서 47.5%로 나타났다. VS는 체류시간이 감소함에 따라 제거효율은 각각 62.0%, 64.5%, 58.9%, 58.1%, 55.3%로 나타났다.

Fig. 6과 Fig. 7에는 수리학적 체류시간 변화에 따른 유출수의 TCOD, SCOD 농도와 제거효율의 변화를 나타내었다. TCOD의 경우 체류시간이 0.8day에서 59.3%, 1day에서 62.1%, 1.25day에서 64.0%, 2day에서 68.9% 그리고 3.3day에서는 68.0%로 수리학적 체류시간이 증가함에 따라 유출수의 농도는 점차적으로 감소하였으며, 제거효율은 증가하는 것으로 나타났다. 강[7]은 Hybrid UASB 공정을 이용한 돈사폐수처리에서 수리학적 체류시간을 변화시켜 실험한 결과 HRT 1day와 3day에서 TCOD의 제거효율은 각각 68.0%, 74.8%라고 하였다. 이를 본 실험결과와 비교해 볼 때 본 실험에서의 제거효율이 약 5%정도 낮게 나타났는데, 이는 주입 기질의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, 강[7]은 고형물의 농도가 낮은 축산폐수를 이용하였으나, 본 실험에서는 TS의 농도가 6,020~13,580 mg/L의 고농도 범위로 운전되었기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 수리학적 체류시간이 1day 이하에서 유출수의 농도 및 제거효율의 변화가 큰 것으로 나타났다. 이는 본 연구의 경우 침전조를 설치하지 않고 유출수의 성상을 직접 분석하였기 때문에 농도의 변화가 컸고, 상대적으로 낮은 제거효율이 나타난 것으로 사료된다.

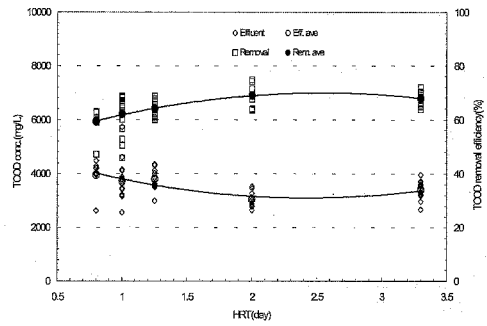


Fig. 6. Effluent TCOD concentrations and removal efficiencies at various hydraulic retention times.

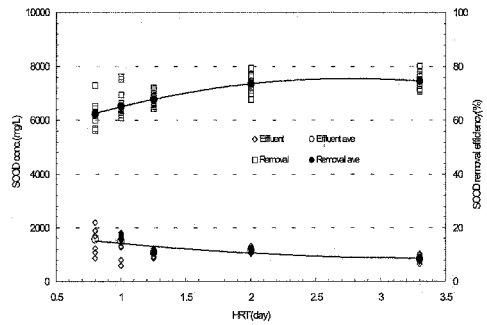


Fig. 7. Effluent SCOD concentrations and removal efficiencies at various hydraulic retention times.

Table 2. Effluent concentrations of solids and organics and the removal efficiencies at various hydraulic retention times.

(Unit: mg/L, except pH)

Item	HRT 0.8day		HRT 1.0day		HRT 1.25day		HRT 2.0day		HRT 3.3day	
	Eff. conc. (mg/L)	Rem. (%)	Eff. conc. (mg/L)	Rem. (%)	Eff. conc. (mg/L)	Rem. (%)	Eff. conc. (mg/L)	Rem. (%)	Eff. conc. (mg/L)	Rem. (%)
TS	5,241	47.5	5,114	49.1	5,486	49.9	4,774	52.4	5,207	52.4
VS	3,543	55.3	3,329	58.1	3,414	58.9	2,821	64.5	3,153	62.0
TCOD	3,976	59.3	3,721	62.1	3,808	61.0	3,063	68.9	3,397	68.0
SCOD	1,558	62.4	1,511	65.3	1,072	67.8	1,164	73.6	843	74.6

3.3 유입부하에 따른 소화효율

반응조의 유입부하율은 초기 1 kg COD/m³/day 이하로 운전을 시작하였으며, 점차적으로 부하를 증가시켜 3~15 kg COD/m³/day의 범위로 운전하였다. Fig. 8과 Fig. 9에는 운전기간 동안 UASB 반응조의 유기물 부하에 따른 TCOD, SCOD의 유출수의 농도와 제거효율을 나타내었다. 유입부하가 증가함에 따라 유출수의 농도는 증가하고 제거효율은 감소하는 경향으로 나타났다. 유입부하를 10 kg COD/m³/day로 운전하였을 경우 반응조내 슬러지의 부상 때문에 유출수의 농도 변화폭이 컸으며 이로 인한 제거효율의 저하를 초래하였다. 그러나 슬러지 유실 후 10일을 기점으로 유출수의 농도는 점차 안정되었으며, 제거효율은 약 65%로 조사되었다. 윤[8]은 UASB에 의한 양돈폐수의 유기물제거에 관한 연구에서 COD 부하율을 2~18 kg COD/m³/day로 운전하였을 경우 평균 66.6%의 제거효율을 얻었으며, 8.0~12 kg COD/m³/day에서는 70~77.2%의 제거효율을 얻었다고 보고하였는데, 이러한 결과는 본 연구의 경우 슬러리형 돈사폐수를 사용하였기 때문에 높은 TS의 농도가 UASB 반응조의 처리효율 저하를 초래한 것으로 사료된다.

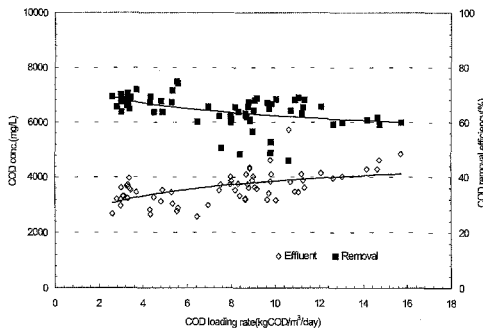


Fig. 8. TCOD loading rate vs. effluent TCOD concentration and removal efficiency.

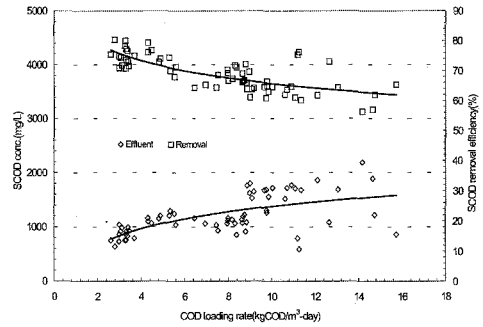


Fig. 9. TCOD loading rate vs. effluent SCOD concentration and removal efficiency.

3.4 Biogas의 발생량

운전기간동안의 체류시간별 가스 발생량 및 조성을 Table 3에 나타내었다. VS 주입량당 biogas 생성율은 0.25~0.43 m³biogas/kg VSadd.으로 나타났으며, VS 제거당 biogas 생성율은 체류시간이 증가함에 따라 0.45~0.69 m³biogas/kg VSrem.으로 조사되었다. 또한, VS 제거당 메탄가스 발생량은 0.34~0.51 m³CH₄/kg VSrem.으로 나타났다.

COD 제거당 발생하는 biogas양은 체류시간이 증가함에 따라 0.36~0.49 m³ biogas/kg CODrem.으로 조사되었으며, COD 제거당 CH₄ 생성율은 수리학적 체류시간(HRT) 0.8day에서 0.27, HRT 1day에서 0.29, HRT 1.25day에서 0.33, HRT 2day에서 0.33 그리고 HRT 3.3 day에서는 0.36 m³ CH₄/kg CODrem.으로 체류시간이 증가함에 따라 메탄가스의 생성량은 증가하였다. 한편, 이론적으로 1kg의 COD 제거당 CH₄ 발생량은 STP 상태(0°C, 1atm)에서 0.35 m³CH₄/kg CODrem.이며, 온도가 증가함에 따라 온도와 수증기압을 보정하면 35°C에서는 0.395 m³CH₄/kg CODrem.이다. 이를 본 연구 결과와 비교해 보면 본 연구에서의 COD 제거당 CH₄ 발생량은 이론치에 비해 낮은 것으로 조사되었다. 이는 반응조내의 pH, NH₃-N, alkalinity 등의 영향인자 차이에 기인하는 것으로 사료된다.

Table 3. Gas production rate at various hydraulic retention times.

Item	HRT 0.8day	HRT 1.0day	HRT 1.25day	HRT 2.0day	HRT 3.3day
m ³ biogas/kg VSadd.	0.25	0.26	0.35	0.36	0.43
m ³ biogas/kg VSrem.	0.45	0.45	0.59	0.56	0.69
m ³ CH ₄ /kg VSrem.	0.34	0.36	0.46	0.43	0.51
m ³ biogas/kg CODrem.	0.36	0.34	0.43	0.42	0.49
m ³ CH ₄ /kg CODrem.	0.27	0.29	0.33	0.33	0.36
CH ₄ (%)	74.5	79.2	77.1	77.5	73.7

한편, 혐기성 소화시 biogas와 메탄의 생성은 VS의 분해와 관련이 있으며, VS부하에 따른 가스생성량을 Fig. 10에 나타내었다. VS부하 증가에 따른 가스 생성량은 부하율 10.0 kg/m³/day까지는 증가하는 경향을 보였으나, 이후 증가폭이 감소하였다. 또한, biogas중 CH₄의 함량도 10.0 kg/m³/day까지는 비교적 일정한 함량을 보였으나, 이후부터 VS 부하가 증가함에 따라 CH₄ 함량은 다소 감소하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 돈사 폐수와 같이 고농도의 고형물을 함유한 기질의 경우 부하율이 증가하면 전체적인 기질 분해속도의 감소로 인해 biogas의 생성량이 감소하고, 이에 따라 메탄 생성균의 활성이 감소된 것에 기인되는 것으로 판단된다.

한편, NH₃-N 부하에 따른 가스 생성은 NH₃-N 부하가 증가함에 따라 biogas 발생량은 증가하였으며, 0.8 kg NH₃-N/m³/day까지는 유입 유기물의 증가로 인해 증가하는 경향을 보였으나, 이후의 NH₃-N 부하에서는 소화조내 NH₃-N의 농도 증가 및 pH 상승 등 저해요인으로 인해 biogas 생성량과 함량은 점차적으로 다소 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 11).

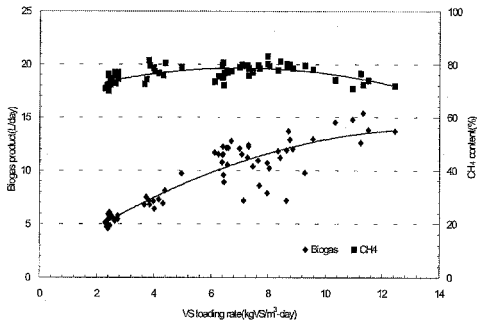


Fig. 10. VS loading rate vs. gas production(L) and CH₄ content(%).

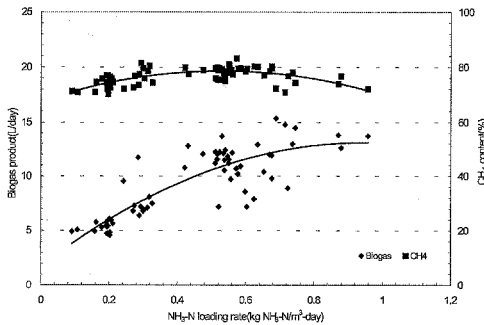


Fig. 11. NH₃-N loading rate vs. gas production (L) and CH₄ content(%).

유입 VS 부하에 따른 CODrem. 당 biogas 및 CH₄ 가스 발생량을 Fig. 12에 나타내었으며, VS 부하에 따른 VSadd. 및 VSrem 당 biogas와 CH₄ 생성량을 Fig. 13에 제시하였다. 유입 VS 부하에 따른 CODrem.당 biogas 생성율은 전 운전기간동안 0.29~0.55 m³ biogas/kg CODrem.으로 나타났으며, 제거된 COD당 CH₄는 0.21~0.40 m³ CH₄/kg CODrem.의 범위로서 VS의 부하가 증가할수록 biogas와 CH₄ 생성율은 점차적으로 감소하는 것으로 조사되었다. 특히, VS부하율 10 kg/m³/day 이상에서 제거된 COD당 메탄생성율은 0.21~0.26 CH₄/kg CODrem.의 낮은 발생량을 보였다. VSadd. 당 가스생성율은 0.20~0.50 m³ biogas/kg VSadd.으로 나타났으며, VS 제거당 가스생성율은 0.35~0.89 m³ biogas/kg VSrem.으로 나타났다. 또한, 제거된 VS당 CH₄ 생성율은 0.24~0.67 m³ CH₄/kg VSrem.으로 VS의 부하가 증가할수록 가스의 생성율은 감소하는 것으로 나타났다.

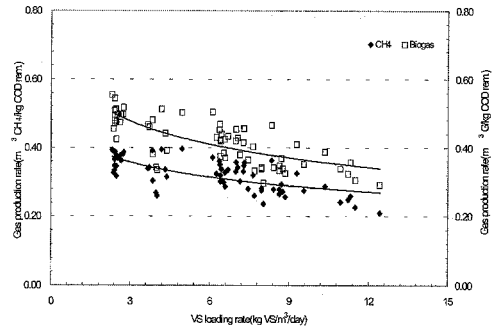


Fig. 12. VS loading per unit volume vs. biogas and CH₄ production rate per CODrem.

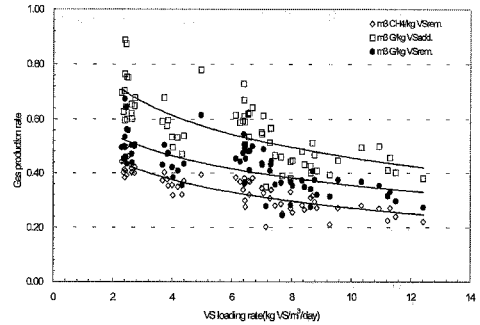


Fig. 13. VS loading per unit volume vs. biogas and CH₄ production rate per VSadd., VSrem.

4. 결 론

고효율 혐기성소화 공정인 UASB 공정을 이용하여 수리학적 체류시간 및 유입부하율 변화에 따른 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 수리학적 체류시간(HRT)을 0.8day에서 3.3day로 변화를 주어 운전한 결과 TCOD의 경우 HRT 0.8day에서 59.3%, 1day에서 62.1%, 1.25day에서 64%, 2day에서 68.9% 그리고 3.3day에서 68.0%로 짧은 수리학적 체류시간에도 불구하고 처리효율은 우수한 것으로 조사되었다. 특히, 2day 이상의 수리학적 체류시간에서는 68% 이상의 높은 제거효율을 얻을 수 있었다.

2. VS 부하에 따른 가스 생성량은 10.0 kg/m³/day까지는 증가하는 경향을 보였으나, 이후 증가폭이 감소하였다. 또한, NH₃-N 부하가 증가함에 따라 biogas 발생량은 증가하였으며, 0.8kg NH₃-N/m³/day까지는 유입 유기물의 증가로 인해 증가하는 경향을 보였으나, 이후의 NH₃-N 부하에서는 소화조내 NH₃-N의 농도 증가 및 pH 상승 등 저해요인으로 인해 biogas 생성량과 함량은 점차적으로 감소하는 것으로 나타났다.

3. COD 제거당 CH₄ 생성율은 수리학적 체류시간(HRT) 0.8day에서 0.27, HRT 1day에서 0.29, HRT 1.25day에서 0.33, HRT 2day에서 0.33 그리고 HRT 3.3 day에서 0.36 m³ CH₄/kg CODrem.으로 체류시간이 증가함에 따라 메탄가스의 생성량은 증가하는 것으로 조사되었다.

참 고 문 헌

- [1] 환경부, '98 오수·분뇨·축산폐수 통계, 1999.
- [2] Young, J. C., The Anaerobic Filter for Waste Treatment, Ph. D. dissertation, Stanford Univ., Palo Alto, California, 1968.
- [3] Jewell, W. J., Switzenbaum, M. S., and Morris, J. W., "Municipal wastewater treatment with the anaerobic attached microbial film expanded bed process", *J. WPCF*, Vol. 53, No. 4, pp. 482-490, 1981.
- [4] Lettinga, G. and Hulshoff Pol, L. W., "UASB-Process Design for various Types of Wastewaters", *Water Sci. Technol.*, Vol. 24, No. 8, pp. 87-107, 1991.
- [5] Lettinga, G., "Feasibility of the Upflow Anaerobic Sludge Blanket Process", Proc. 1979 National Conf. on Eng. ASCE, San Francisco, 1979.
- [6] 김병욱, 임재명, "돈사폐기물의 혐기성 소화시 수리학적 체류시간이 소화효율에 미치는 영향", *J. of KSSE* Vol. 23, No. 2, pp. 233-242, 2001.
- [7] 강호, 최영, 김철규, 진창숙, "Hybrid UASB 공정에 의한 양돈폐수의 혐기성 전처리가 질소·인 후속고도처리에 미치는 영향평가", *JKSWES* Vol. 16, No. 4, pp. 412-422, 1999.
- [8] 윤성윤, 박승조, "UASB에 의한 유기물제거에 관한 연구", *JKSWES* Vol. 12, No. 4, 450-457, 1995.