

Anaerobic Filter에 의한 양돈폐수의 전처리 특성 평가 Evaluation of Swine Wastewater Pretreatment Using Anaerobic Filter

강 호[†] · 문서연
Ho Kang[†] · Seo-yeon Moon

충남대학교 환경공학과

Department of Environmental Engineering, Chungnam National University

(Received July 1, 2015; Revised July 27, 2015; Accepted July 30, 2015)

Abstract : Anaerobic Filters (AF) packed with porous ceramic floating media were operated at different operational conditions to identify the feasibility of the renewable bioenergy, methane production from swine wastewater and to verify the suitability of effluent from anaerobic filters for the subsequent biological nitrogen and phosphorus removal. Stepwise increase in organic loading rates (OLRs) or decrease in hydraulic retention times (HRTs) with influent TCOD concentration of 14,000 mg/L were utilized at mesophilic temperature. The maximum methane productivity of 1.74 volume of CH₄ per volume of reactor per day (v/v-d) was achieved at an hydraulic retention time (HRT) of 0.5 day (OLR 28 g TVS/L-d). Based on the biogas production, the highest total volatile solids (TVS) removal efficiency of 63% was obtained at an HRT of 3 days (OLR 4.67 g TVS/L-d), however based on the result from the effluent total chemical oxygen demand (TCOD) analysis, the highest TCOD removal efficiency of 75% was achieved. The effluent alkalinity concentration over the range of 2,050~2,980 mg/L as CaCO₃ at all operational conditions, could compensate the alkalinity destruction caused by nitrification. The effluent from the anaerobic filter operated under the HRT of 2 days showed the COD/TKN ratio of 15~35 and COD/TP ratio of 38~56. Therefore effluent C/N/P ratio is able to satisfy the optimum COD/TKN ratio of greater than 8.0 and COD/TP ratio of 33 for the subsequent biological nutrient removal.

Key Words : Anaerobic Filter, Biogas, Swine Wastewater, OLR/HRT, C/N/P Ratio

요약 : 본 논문에서는 양돈폐수의 전처리 공정으로 부유성 세라믹 담체로 충전한 Anaerobic Filter (AF)을 이용하여 신재생에너지 메탄가스의 생산 가능성과 전처리 후 유출수의 후속 고도처리 적정성을 평가하였다. 유입 COD 농도가 14,000 mg/L인 양돈폐수를 Anaerobic Filter에 점진적으로 유기물부하(OLR)를 증가시키면서 혹은 수리학적 체류시간을 짧게 유지하면서 35 °C에서 운전한 결과는 다음과 같다. Anaerobic Filter는 HRT 0.5일(OLR 28 g TVS/L-d)에서 최대 메탄발생량 1.74 v/v-d를 달성하였으며, Biogas 기준 TVS 제거효율은 HRT 3일(OLR 4.67 g TVS/L-d)로 운전하였을 때 63%를 얻었다. 반면 유출수 분석에 의한 TCOD 제거효율은 75%를 상회하였다. 유출수의 알카리도는 모든 운전 조건에서 2,050~2,980 mg/L as CaCO₃로서 후속 질소제거 시 야기될 수 있는 알카리도 파괴를 상쇄할 수 있을 것이다. HRT 2일 이하의 운전조건에서 Anaerobic Filter 유출수의 COD/TKN 비는 10~35 범위로서 고도처리 시 적정비인 8 이상을 만족하였으며 COD/TP 비는 38~56범위로서 적정비 33 이상 유지가 가능하였다.

주제어 : 혐기성 필터, 바이오가스, 양돈폐수, 유기물부하율/수리학적체류시간, 탄소/질소/인 비

1. 서론

축산폐수는 고농도의 생분해성 유기탄소화합물 뿐만 아니라 질소와 인을 대량 함유하고 있기 때문에 적절히 처리하지 않고 수계에 방류할 경우 하천에서는 산소 고갈 현상으로 인한 생태계 파괴를, 호수에서는 부영양화 현상을 유발하여 상수원을 위협하게 된다. 따라서 정부에서는 축산폐수 공공처리 시설을 확충함은 물론 방류수 수질기준을 강화하여 규제하고 있다.¹⁾ 하수종말처리장의 유입/유출수의 성상과 비교할 때, 축산폐수 공공처리 시설 방류수 수질기준은 상당한 고도처리를 요구하고 있는 실정이다. 축산폐수 중 양돈 폐수는 돈사의 세척시스템(Flushing System)의 유무에 따라 슬러리 형태(Slurry Type)와 스크랩 형태(Scraped Type)의 두 종류로 나뉜다.

슬러리 형태는 노와 돈분을 세척수로 함께 세척함으로써

발생되며 스크랩 형태는 세척수를 거의 사용하지 않고 노와 분을 분리·수거하여 분은 왕겨나 톱밥과 함께 축분 퇴비화시설을 거치도록 하고 노는 소량의 세척수와 함께 낮은 고형물을 함유한 폐수로 발생된다. 국내 축산업, 특히 양돈업의 경우 정부가 수출산업으로 육성한다는 정책을 꾸준히 추진하고 있어 향후 선진국과 같이 자동화 시설을 갖춘 대규모 축산업으로 발전할 가능성이 크며, 사육관리상의 편의성 때문에 향후 축산폐수의 대부분이 슬러리 형태의 폐수로 배출될 전망이다.^{2,3)}

양돈 폐수는 세척수를 사용한다 하더라도 BOD와 고형물의 함량이 높아 이를 직접 고도처리하기에는 많은 어려움이 따른다. 그러므로 Fig. 1과 같이 전처리인 혐기성 소화공정과 질소·인 고도처리공정을 조합하여 처리하게 된다. 즉 혐기성 소화공정에서 유기 탄소화합물을 먼저 제거하고 여기서 제거되지 않는 질소와 인은 후속 고도처리에서 제

[†] Corresponding author E-mail: hokang@cnu.ac.kr Tel: 042-821-6675 Fax: 042-821-5610

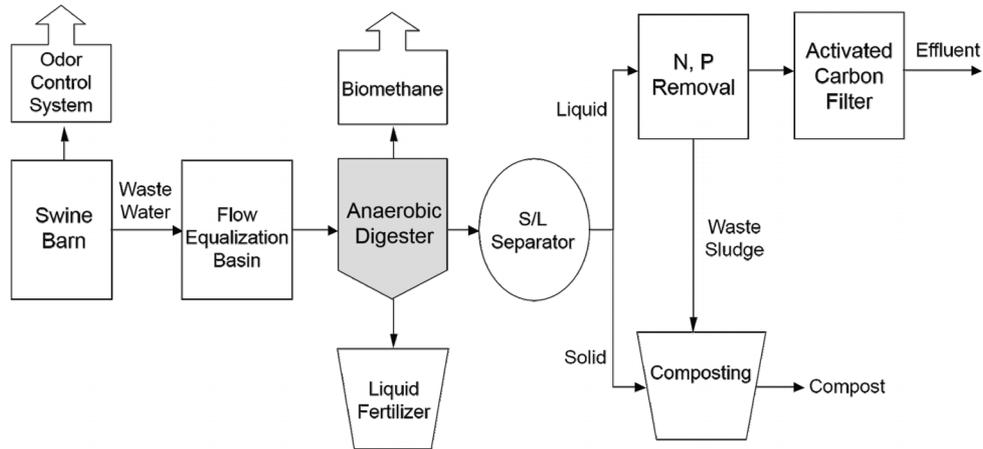


Fig. 1. Flow diagram of slurry swine wastewater treatment system.

거한 후 방류하게 된다. 이때 혐기성 소화공정에서 유용한 신재생에너지 메탄가스를 부산물로 획득할 수 있다는 장점 때문에 줄곧 인기 있는 Biotechnology 중의 하나로 각광받고 있다.^{4,5)}

호기성 처리공정이 에너지 소비자라면 혐기성 소화공정은 에너지 생산자이며, 슬러지 생산량도 호기성의 10%에 불과할 뿐만 아니라 메탄가스를 포집함으로써 온실가스 저감에도 기여하는 이점이 있다. 특히 유럽에서는 혐기성소화조의 유출수(Digestate)가 농지 살포시 식물성장을 위한 새로운 영양소 자원으로써 귀하게 활용되고 있는 실정이다.⁶⁾

대부분의 공공처리 시설에 질소·인 고도처리시설이 설치되어 있으나 적절한 C, N, P비 균형을 유지하지 못하고 있는 실정이다. 즉, 전처리단계에서 고효율 혐기성 소화를 통한 높은 유기탄소화합물의 제거효율이 후속 고도 처리 시 C/N, C/P비의 불균형으로 인해 오히려 해가 될 수도 있다는 점을 고려해야 한다.

양돈 폐수의 원활한 처리를 위해 BOD와 고형물 함량에 따라 다양한 반응조 형태가 개발되어왔다. 이 중 Anaerobic Filter (AF)는 소화 반응조 내 표면적이 큰 Inert Media를 충전하여 혐기성 소화균을 부착시킴으로써 긴 SRT (Solid Retention Time)를 유지함과 동시에 고농도의 혐기성 소화균을 정착시킬 수 있어 산 생성균과 메탄 생성균 간의 성장속도의 불균형을 해소할 수 있는 반응조이다.⁷⁾

따라서 본 연구에서는 고효율 혐기성 처리 공법 중 하나인 Anaerobic Filter를 양돈 폐수의 전처리 공정으로 활용하여 신재생에너지 메탄가스 생산 가능성과 TVS 제거 효율을 제시하는 한편 혐기성 전처리 후 유출수의 후속 질소·인 고도 처리 시 적정성을 평가하는 데 연구의 목적을 두고 있다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. Anaerobic Filter 공정의 구성

본 연구에서 사용한 Anaerobic Filter는 Fig. 2에서 보는 바

와 같이 총 유효 용량이 30 L인 아크릴제 원통형이고 반응조 전체 부피의 30%에 해당하는 약 10 L 부피의 부유성 다공성 세라믹 담체를 충전하여 고농도의 혐기성 소화균이 유지되도록 하였다. 담체의 평균 크기는 7~8 mm이고 부유성을 지닌다. 반응조 하부를 Cone 모양으로 하였으며 직경 1 cm 크기의 Glass Bead를 채워 시료의 유입이 고르게 분산되어 상향류가 유지되도록 하였다.

유입폐수는 정량펌프로 반응조 하부에서 유입되도록 하였고, 반응조 최상부의 Port에는 Biogas 포집 Bag을 연결하여 발생 Gas를 포집할 수 있도록 하였으며, 처리된 유출수는 반응조에서 자연 유하하여 유출수 Tank로 모아질 수 있도록 설계하였다. 이 유출수는 고형물의 제거효율을 증대시키기 위해 침전조로 이송하여 30분간 체류시킨 후 침전조 전후로 Sampling을 실시하여 침전효과를 평가하였다. 모든 공정은 중온소화(35℃)를 달성하기 위해 Heater와 Fan이 설치된 항온실내에서 운전하였으며, 유입 및 유출 Tank는 냉장고에 설치하여 시료의 변질을 방지하였다.

2.2. Anaerobic Filter 반응조 운전

본 연구에서 사용된 분뇨는 C대학 부속농장의 돈사에서 채취하였다. 원활한 유입을 위하여 시료를 No. 10 Mesh (2 mm) 크기의 체를 이용해 체거름하여 협잡물을 제거 후 반응조의 10%에 해당하는 부피(3 L)만큼 중온소화조의 슬러지를 식중균으로 하여 시료와 함께 주입하였다. 반응조에서 발생하는 Biogas 양과 조성, Volatile Fatty Acids (VFAs) 농도를 측정하여 반응조의 정상유무를 판단한 후 식중균인 하수슬러지의 주입을 중단하고 시료인 양돈폐수만을 주입하여 순운·적용시켜 초기운전을 시작하였다.

이후 유입시료에 희석수를 이용하여 TCOD 농도를 14,000 mg/L(이하 이 농도로 운전한 AF를 OP1이라 함)와 16,000 mg/L(이하 이 농도로 운전한 AF를 OP2라 함)로 조절된 Slurry Type의 폐수를 Feed Substrate로 하여 낮은 OLR (0.5 g TCOD/L-d)로 주입을 시작하였으며 시료유입은 각 TCOD 농도에 대하여 수리학적 체류시간(Hydraulic Retention Time,

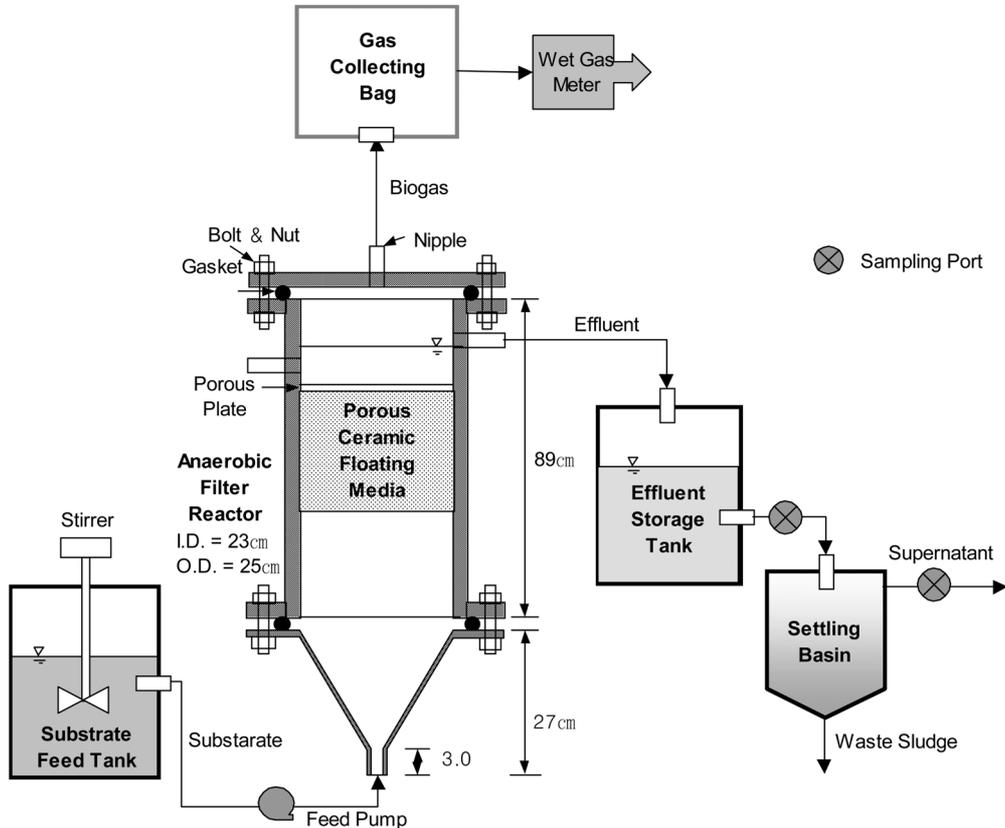


Fig. 2. Schematic diagram of anaerobic filter process.

HRT)을 3일, 2일, 1일, 0.5일로 단계적으로 감소시키면서 혹은 유기물부하율을 단계적으로 증가시키면서 AF 공정의 유기물 제거효율변화를 평가하였다. 또한 유출수는 침전조를 거치기 전·후에 각각 Sampling을 실시하여 침전조의 유·무가 후속 고도처리시스템에 미칠 수 있는 영향에 대하여 고찰하였다.

2.3. 생산된 Biogas로부터 TVS 제거 효율 측정

TVS 제거효율은 유입시료와 유출수의 TS나 TVS 혹은 COD를 측정하여 그 차이로 제거효율을 평가하지 않고 일정기간 내 생산된 바이오가스를 VS무게(g)로 환산하여 제거효율을 평가하였다. 혐기성소화반응에서는 TVS 중 생분해가 가능한 Biodegradable Volatile Solids (BVS)만이 CH₄와 CO₂로 분해되기 때문에 바이오가스 중에 들어있는 1% 미만의 Trace Gas를 제외시키면 제거된 유기물의 무게(BVS Mass)는 생성된 CH₄ 무게와 CO₂ 무게의 합으로 정리할 수 있다.

표준상태(0°C, 1 atm)에서 건조 바이오가스 부피(V₀)는 이상기체와 같이 행동하므로 CH₄와 CO₂의 함량으로부터 Biogas 중 CH₄와 CO₂ 가스가 각각 차지하는 부피와 몰수를 구할 수 있고, 여기에 CH₄와 CO₂의 분자량을 곱하면 제거된 생분해성 VS무게를 식 (1)에 의해 구할 수 있다.^{8,9)}

$$BMR = V_0(1.963 - (0.0124 \times CH_4)) \quad (1)$$

여기서, BMR = 제거된 생분해성 VS 무게(g)

V₀ = 표준상태에서 건조 바이오가스 부피(L)

CH₄ = 표준상태의 CH₄함량(%)

그러므로 혐기성 소화조로부터 발생된 바이오가스의 양과 조성으로부터 제거된 VS의 무게를 계산할 수 있으며 이를 토대로 Anaerobic Filter의 운전성능을 평가하였다.

2.4. 바이오가스 발생량

혐기성소화공정에서 생분해 가능한 유기물은 오직 혐기성 소화균에 의해서 최종산화물로 CH₄와 CO₂로 분해되기 때문에 주입 OLR에 따른 바이오가스 생산량과 조성만 정확히 알면 혐기성소화공정의 운전성능을 쉽게 평가할 수 있다.

바이오가스와 메탄 발생량을 표현하는데 v/v-d (Volume of Biogas Produced/Volume of Reactor Volume-Day)단위를 이용하여 평가하였다. v/v-d 단위는 유효한 소화조 부피 당 하루에 발생한 바이오가스 및 메탄 발생량의 부피를 의미하므로 소화조의 부피를 알면 즉시 바이오가스 및 Methane 발생량을 알 수 있는 아주 간단한 단위를 사용하였다.¹⁰⁾

2.5. 분석방법

Biogas 발생량은 Wet Gas Meter를 이용하여 측정하였고, 온도에 따른 부피팽창 및 수분함유를 고려해 표준상태로 환산하였다. 메탄함량은 Thermal Conductivity Detector (TCD)

가 장착된 GC-14A (Shimadzu 社)로 분석하였고, VFA 농도는 Flame Ionization Detector (FID)를 이용하여 분석하였으며 분석된 VFA는 CH₃COOH로 환산하였다.

기타 유입폐수 및 유출수의 정상분석은 Standard Methods (APHA, 2012)에 준하여 실시되었다.¹¹⁾

3. 결과 및 고찰

3.1. 유입폐수의 물리·화학적 특성

본 연구에서 사용된 유입폐수의 물리·화학적 특성을 분석한 결과를 Table 1에 나타내었다. SCOD는 3,100~3,200 mg/L의 범위로 TCOD의 약 20% 정도를 차지하고 있으며,

Table 1. Physicochemical characteristics of substrate

Parameters	OP1	OP2
TCOD (mg/L)	14,000	16,000
SCOD (mg/L)	3,151	3,209
TS (%)	1.13	1.28
VS (%) of TS	67	68
TSS (mg/L)	8,360	10,530
VSS (mg/L)	5,923	7,535
TKN (mg/L)	340	407
NH ₃ -N (mg/L)	260	357
TP (mg/L)	173	247
pH	6.97	7.22
Alkalinity (mg/ as CaCO ₃)	1,762	2,366

* All values are averaged ones

TS는 1.13~1.28%이었고 이중 VS 함량이 67% 이상으로 고형물의 2/3 이상이 생분해가 가능한 유기물임을 알 수 있다.

pH는 거의 중성의 범위를 유지하였고, Alkalinity도 1,762~2,366 mg/L as CaCO₃로 높게 나타났다. 또한 NH₄⁺-N 농도는 340~407 mg/L의 범위로 pH와 온도에 따라 NH₃(g)의 농도가 다르지만 혐기성 소화조에 독성을 유발할 수 있는 농도인 1,500 mg/L 이상에는 미치지 않았다.^{12,13)}

3.2. 반응조의 안정도 평가

Anaerobic Filter 공정의 운전결과 각각 상이한 유입수의 농도에서 HRT 감소에 따른 pH 및 Alkalinity 농도변화를 Table 2와 Fig. 3에 나타내었다. OLR이 증가함에 따라 VFA의 생성으로 인해 반응조 내 pH는 다소 떨어지는 현상을 보였으나 운전전반에 걸쳐 7.35~7.74로 적정수준을 유지하

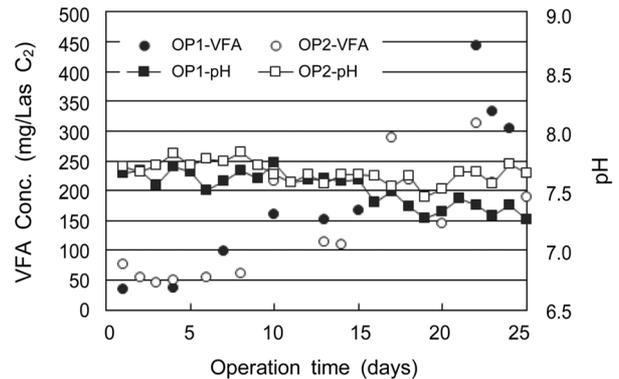


Fig. 3. Temporal variation of reactor pH and VFA concentration during the operation time.

Table 2. Summary of anaerobic filter process operated for swine wastewater

Parameters	OP1 (Inf. COD 14,000 mg/L)				OP2 (Inf. COD 16,000 mg/L)			
	HRT (days)				HRT (days)			
	3	2	1	0.5	3	2	1	0.5
Steady state operation period (days)	1-24	25-72	73-109	110-121	1-25	26-95	96-118	119-130
OLR (g TCOD/L-d)	4.67	7.00	14.00	28.00	5.33	8.00	16.00	32.00
pH	7.61	7.61	7.38	7.35	7.74	7.61	7.53	7.65
Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)	2,048	2,983	2,273	2,261	2,514	2,651	2,555	2,675
VFA Conc. (mg/L as C ₂)	83	160	155	360	57	166	176	238
V/A Ratio	0.05	0.06	0.04	0.16	0.02	0.06	0.07	0.09
P/A Ratio	0.18	0.16	0.21	0.63	0.03	0.10	0.22	0.31
TCOD Removal (%)	75	63	38	29	68	52	44	39
SCOD Removal (%)	69	62	61	56	71	77	62	63
TSS Removal (%)	62	50	34	16	59	52	39	30
VSS Removal (%)	61	53	40	17	59	58	27	23
CH ₄ Productivity (L CH ₄ /L-d)	0.96	1.21	1.55	1.74	1.07	1.19	1.69	1.68
Methane content (%)	72	75	79	83	72	75	77	84
TVS Removal (%)	63	43	38	16	56	39	28	17
Specific methane productivity (L CH ₄ /g COD Removed)	0.27	0.27	0.29	0.21	0.30	0.29	0.24	0.13
COD/TKN	10	15	21	35	12	18	22	24
COD/TP	27	38	51	56	31	44	47	54

* All values are averaged ones

였다. 이는 양돈폐수의 특성상 Alkalinity가 2,048~2,983 mg/L as CaCO₃까지 높게 유지되어 유기산 생성에 따른 pH저하를 충분히 완충할 수 있는 능력이 존재하기 때문이다. 박 등¹⁴⁾의 Full Scale 단일 돈분 혐기성소화조에서는 평균 4,000 mg/L 이상의 Alkalinity가 관찰되기도 하였다.

한편 VFA 농도(Fig. 3)는 OP1과 OP2 모두 HRT 3일에서는 각각 83 mg/L as C₂, 57 mg/L as C₂로 낮은 농도를 보이다가, HRT가 점차 감소하여 OLR이 증가함에 따라 VFA 농도는 증가하는 경향을 보였다. OP1의 경우 HRT 0.5일에서 360 mg/L as C₂까지, OP2의 경우는 238 mg/L as C₂까지 증가하였는데, 이는 혐기성 반응의 특성상 메탄생성반응보다 산생성반응 속도가 빨라 유기물부하가 증가하면서 반응조 내에 VFA가 축적되는 현상을 보여주는 결과이다. 그러나 이는 McCarty¹²⁾가 밝힌 바 있는 메탄생성을 저해할 수 있는 농도인 1,500 mg/L as C₂의 수준에는 훨씬 못 미쳤다.

또한 혐기성 반응조의 안정성을 평가하는 인자로 Volatile Fatty Acids/Alkalinity (V/A) 비와 Propionic Acid/Acetic Acid (P/A) 비를 들 수 있는데, V/A 비는 0.3 이하, P/A 비는 1.4 이하로 유지될 때 반응조의 안정성을 확보할 수 있다고 한다.¹⁵⁾ Table 2에서 보는 바와 같이 운전기간 동안 V/A 비는 0.02~0.16, P/A 비는 0.03~0.63의 수준을 유지하여 반응조가 매우 안정적으로 운영되고 있음을 알 수 있다.

3.3. 메탄 발생량 및 TVS 제거효율

실험결과 OLR(혹은 HRT)에 따른 메탄발생량 변화를 Table 2와 Fig. 4에 제시하였다. 두 유입수 농도 모두 HRT가 감소하면서 유기물부하가 증가하여 Biogas 및 Methane 발생량은 증가하였다. OP1(유입 TCOD 14,000 mg/L로 운전한 AF)의 경우 HRT 3일에서 메탄발생량은 0.96 v/v-d였고, HRT가 짧아져 1일에는 1.55 v/v-d로 증가하였고, HRT 0.5일에는 더욱 증가하여 최대 발생량인 1.74 v/v-d를 달성하였다. OP2(유입 TCOD 16,000 mg/L로 운전한 AF)의 경우도 마찬가지로 HRT가 3일에서 0.5일로 짧아짐에 따라 평균 메탄발생량은 1.07에서 1.69 v/v-d까지 증가하였다.

운전기간 중 Biogas 내 평균 메탄함량은 72~84%의 높은

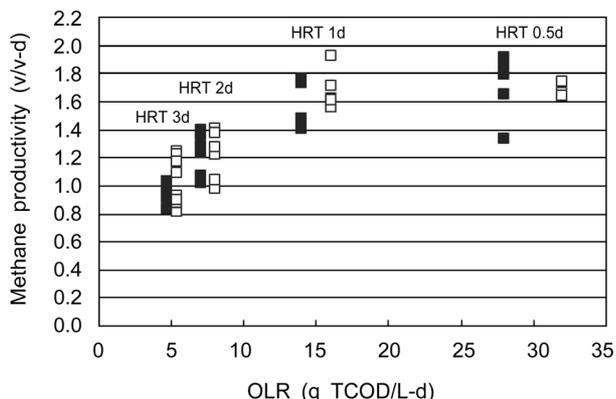


Fig. 4. Methane productivity of AF as a function of OLR (■ OP1, □ OP2).

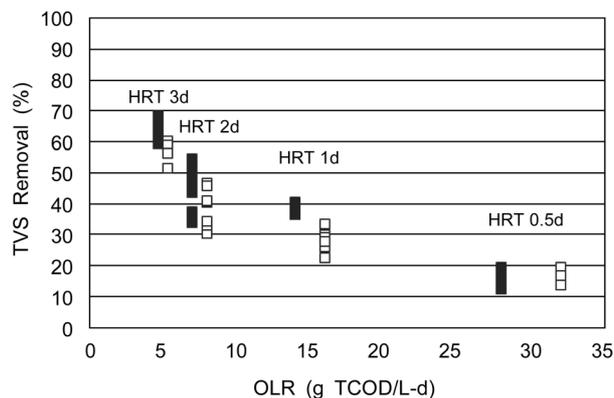


Fig. 5. TVS removal of AF as a function of OLR (■ OP1, □ OP2).

함량으로 유지되었다.

TVS 제거효율은 유입폐수 내 TVS 함량과 발생된 메탄 가스량을 기준으로 산정하였으며, 본 연구결과를 Fig. 5와 Table 2에 요약하였다. HRT가 짧아짐에 따라 TVS 제거효율은 감소하여 OP1의 경우 HRT 3일에는 63%를 나타내었으나 HRT 1일에는 38%로 감소하였고, HRT 0.5일에는 16%에 불과하였다. OP2는 OP1보다 동일 HRT 조건에서 다소 낮은 제거효율을 보여 HRT 3일에는 56%, 1일에는 28%를 나타내었다.

Biogas를 신재생에너지화하기 위해서는 Biogas의 생산량이 가장 중요한 인자 중의 하나이다. Biogas 발생량과 가장 직접적으로 관련 있는 운전 인자는 HRT와 OLR로서 최대의 Biogas 발생량을 얻기 위해서는 일반적으로 짧은 HRT와 높은 OLR를 유지해야한다. 그러나 유기물 제거효율 측면에서는 이와 반대의 조건이 요구된다. 그러므로 생분해성 유기성폐기물의 혐기성소화 시 최대의 Biogas 생산량과 최고의 TVS 제거효율을 동시에 달성 할 수는 없다. 이 두 인자는 마치 저울의 양쪽에 놓여있는 추와 같이 어느 한쪽이 높아지면 다른 한쪽은 낮아지고 또한 다른 한쪽이 높아지면 반대쪽은 낮아진다. 그러므로 이 두 인자를 만족할 수 있는 최적의 운전조건(HRT와 OLR)을 도출하여야 한다.

3.4. TCOD 제거효율

Anaerobic Filter 반응조 유출수의 TCOD 제거효율은 Fig. 6과 같이 HRT가 짧아짐에 따라 점차 감소하는 경향을 보였다. OP1의 경우 HRT 3일에서 75%로 높았으나, HRT 2일과 1일에서는 각각 63%, 38%였고, HRT 0.5일에는 더욱 처리수 수질이 악화되어 29%에 그쳤다. Sanchez 등¹⁶⁾도 양돈폐수를 혐기성고정상 Filter를 이용하여 처리한 결과, HRT 3일에서 TCOD 제거율 78%를 얻었으나 OLR이 2.3 g TCOD/L-d로 본 연구의 절반수준이었다. OP2의 경우도 HRT가 짧아짐에 따라 감소하여 68%에서 39%로 변화하였다.

혐기성 소화에서 이론적으로 1 g COD가 분해 시 STP 상태에서 0.35 L의 CH₄가 생성되며, 이 수치를 SMP (Specific Methane Productivity)라 한다. 본 연구결과 OP1은 HRT 1

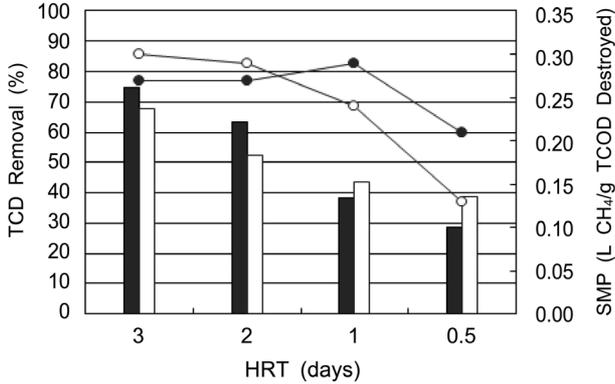


Fig. 6. Effect of reactor HRT on TCOD removal and specific methane productivity based on TCOD removed (■ OP1-TCOD, □ OP2-TCOD, ● OP1-SMP, ○ OP2-SMP).

일 이상에서 SMP가 0.27~0.29 L CH₄/g TCOD 분해로 이론적 수치에 근접하였고, OP2의 경우는 HRT 2일 이상에서는 0.29~0.30 L CH₄/g TCOD 분해, HRT 1일에서는 이보다 감소하여 0.24 L CH₄/g TCOD 분해를 나타내었다.

3.5. 후속 고도처리 적정성 평가

축산폐수가 방류수 수질기준을 만족하기 위해서는 혐기성 전처리 후 질소·인 고도처리가 뒤따라야 하는데, 이때 혐기성 전처리의 유출수가 후속 고도처리의 유입수로서 적합하도록 운전되어야 한다. 즉 축산폐수의 혐기성 전처리 시 과도한 유기탄소의 제거는 고도처리시스템에 오히려 해를 가져올 수 있기 때문에 전처리 유출수의 pH, 수온 및 알칼리도 등이 적절한 수준을 유지하고 있는지, 그리고 유출수가 후속 고도처리시 요구되는 C:N:P 비의 균형을 유지하고 있는지 등에 대한 검토가 요구된다.

본 연구에서 Anaerobic Filter 공정의 유출수 pH는 7.35~7.74의 중성 및 약알칼리성 범위를 유지하였고, 알칼리도가 2,048~2,983 mg/L as CaCO₃로 높게 유지되어 후속 고도처리에서 질산화시 알칼리도 소모를 완충할 수 있다고 사료된다.

일반적으로 고도처리시에 탄소산화와 질산화를 효과적으로 달성하기 위하여 폐수의 BOD/TKN 비가 3 이하이면 Two Sludge System(탄소산화와 질산화를 각각 분리)을 도입하고, BOD/TKN 비가 5 이상이면 Single Sludge System을 사용하게 된다. 독일의 ATV보고서¹⁷⁾에서는 탈질을 위한 최소 BOD/TKN 비는 3 이상이며, 특히 탄소산화와 질산화를 동시에 이루기 위해서는 BOD/TKN 비는 5 이상 유지하는 것이 바람직하다고 보고한 바 있다. 또한 Clifford 등¹⁸⁾에 의하면 Full-scale과 Pilot-scale 실험에서 BOD/TP 비가 20 이상에서 유출수의 TP 농도가 1 mg/L 이하를 유지할 수 있었다고 보고한 바 있다.

이상의 문헌을 종합하면, 후속 고도처리시스템에 적절한 처리수를 제공하기 위하여 혐기성 전처리 유출수의 BOD/TKN 비 및 BOD/TP 비는 각각 5 이상, 20 이상을 유지하여야 하며, 축산폐수의 혐기성소화조 유출수의 BOD는 COD

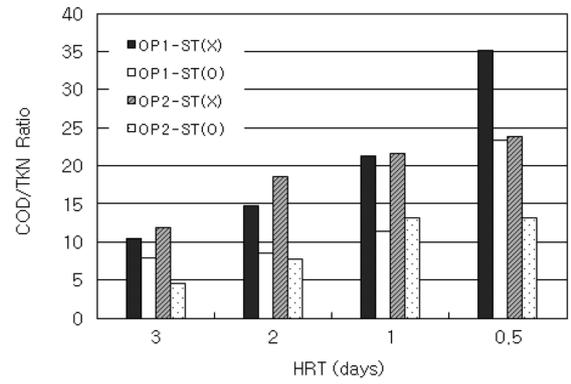


Fig. 7. Effect of HRT and settling on effluent COD/TKN ratio.

Table 3. Comparison of parameters between settled and non-settled effluent with influent TCOD concentration of 14,000 mg/L

Parameters	HRT (days)	ST (X)	ST (O)
COD/TKN Ratio	3	10	8
	2	15	8
	1	21	11
	0.5	35	23
COD/TP Ratio	3	27	26
	2	38	27
	1	51	33
	0.5	56	35

* ST (x) means non-settled and ST (o) means settled effluent

의 65%에 해당하므로 COD를 기준으로 환산하면 COD/TKN 비 및 COD/TP 비는 각각 8 이상, 33 이상을 유지해 주어야 한다.

본 연구결과 Anaerobic Filter 반응조의 유출수내 COD/TKN 비의 변화를 Fig. 7과 Table 3에 나타내었다. HRT가 짧아짐에 따라 유출수의 TCOD 농도가 증가하므로 COD/TKN 비는 반비례하여 OP1의 경우 10~35, OP2의 경우는 12~24까지 점차 증가하는 경향을 보였으며 OP1과 OP2 모두 적정비를 만족하였다. 한편 COD/TP 비의 변화는 Fig. 8과 Table 3에서와 같이 HRT 3일을 제외하고 OP1은 38~56, OP2는 44~54의 적정범위를 유지하였다.

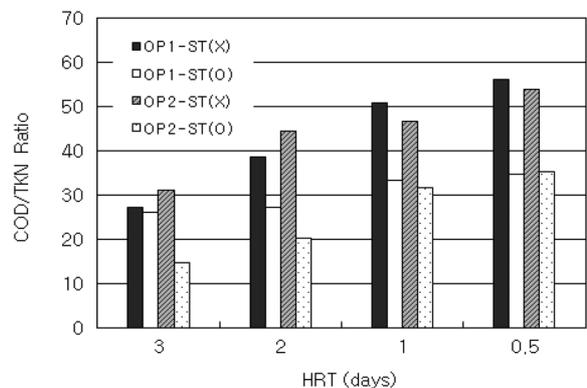


Fig. 8. Effect of HRT and settling on effluent COD/TP ratio.

3.6. 유출수의 침전유무에 따른 효과

앞 절에서 살펴본 바와 같이 HRT를 1일 이하로 짧게 유지할 경우 메탄가스를 최대로 회수하면서 COD/TKN/TP 적정비를 갖춘 유출수를 후속고도처리시스템에 제공할 수 있었다. 그러나 HRT를 0.5일까지 단축시킨 경우 유출수내 고형물 함량이 크게 증가되어 후속 고도처리를 저해할 가능성이 제기되었다. 따라서 혐기성 전처리 유출수를 다시 침전조로 이송하여 고형물 제거효율을 높인 후 유출수의 성상을 비교하여 침전유무에 따른 후속 고도처리 적정성에 대한 영향을 고찰하였다.

침전에 의한 TSS 및 TCOD 농도변화를 비교한 결과는 각각 Fig. 9와 10에 나타난 바와 같다. 침전시킨 유출수는 ST (O)로, 침전시키지 않은 유출수는 ST (X)로 표기하였다. TSS 농도는 OP1의 경우 ST (X)가 4,394~7,355 mg/L였고, ST (O)는 1,468~3,073 mg/L로 침전결과 TSS가 크게 감소하여, 침전시킨 경우가 침전시키지 않은 것보다 TSS 제거효율이 20%에서 크게는 50% 증가되어 83~66%의 높은 제거효율을 나타내었다. 또한 OP2의 경우도 TSS 농도가 ST (O)의 경우 924~1,980 mg/L까지 낮아져 TSS 제거효율은 92~78%의 높은 효율을 보였다.

또한 고형물 침전제거에 따른 TCOD 농도도 함께 감소되었는데(Fig. 10), OP1의 경우 ST (X)는 TCOD 4,510~10,698

mg/L의 범위인 반면, ST (O)의 경우는 2,611~5,294 mg/L로 대부분 절반 수준으로 낮아져 ST (O)의 TCOD 제거효율은 83~66%를 나타내었다. OP2의 경우도 마찬가지로 TCOD 농도가 ST (X)는 4,961~9,972 mg/L, ST (O)는 1,759~4,849 mg/L로 제거효율은 ST (O)가 89~66%로 높게 유지되었다.

한편 침전처리로 고형물을 제거함에 따라 COD의 농도는 크게 감소하였으나, 혐기성 소화조 처리수내 질소는 대부분 암모늄 이온상태로 존재하기 때문에 침전에 의해서는 미생물 내에 함유되어 있는 소량의 질소만이 제거되므로 COD/TKN 비 및 COD/TP 비는 악화된다. Fig. 8에 나타난 바와 같이 OP1의 경우 ST (X)의 COD/TKN 비는 HRT에 관계없이 10~35 적정비를 나타내었으나, ST (O)는 HRT 2일 이하에서 8~23의 비를 유지할 수 있었다. COD/TP 비의 경우도 마찬가지로 Fig. 8에서와 같이 ST (X)는 HRT 2일 이하에서 38~56의 적정수준을 보인 반면, ST (O)는 HRT 1일 이하에서 33~35의 비를 유지할 수 있었다.

4. 결론

Anaerobic Filter 공정을 이용하여 양돈폐수를 혐기성 전처리한 연구결과와 전처리 방류수의 후속 고도처리 적정성을 평가한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 유입 COD 농도가 14,000 mg/L로 운전한 Anaerobic Filter는 HRT 0.5일(OLR 28 g TVS/L-d)에서 최대 메탄발생량 1.74 v/v-d를 달성하였으며, Biogas 기준 TVS 제거효율은 HRT 3일(OLR 4.67 g TVS/L-d)에서 63%를 얻었다. 반면 유출수 분석에 의한 TCOD 제거효율은 75%를 상회하였다.
- 2) Anaerobic Filter 공정의 유출수 pH는 7.35~7.74이었으며 알칼리도가 2,048~2,983 mg/L as CaCO₃로 높게 유지되어 후속 고도처리에서 질산화시 알칼리도 소모를 어느 정도 상쇄할 수 있는 완충능력을 갖고 있다.
- 3) 모든 HRT에서 Anaerobic Filter 유출수의 COD/TKN비는 10~35 범위로서 고도처리시 적정비인 8 이상을 만족하였으며 COD/TP 비는 HRT 2일 이하의 운전조건에서 적정비 33 이상 유지가 가능하였다.
- 4) 유출수를 침전처리한 결과 TSS 제거효율은 약 20~50%, TCOD 제거효율은 약 10~35% 정도 향상되나 COD/TKN 비 및 COD/TP 비는 악화되어 HRT 1일 이하의 운전조건에서 적정비를 만족시킬 수 있다.
- 5) 이상의 결과를 종합하면 본 Anaerobic Filter 공정을 HRT 1일 조건으로 운전할 때, 최적의 메탄가스를 획득할 수 있고, 후속 고도처리시스템에 적정조건을 갖춘 유출수를 제공할 수 있으며, 침전처리를 거친 경우 동일조건에서 적정비를 유지하면서 후속 고도처리에서의 고형물 부하를 줄이는 효과를 달성할 수 있다.

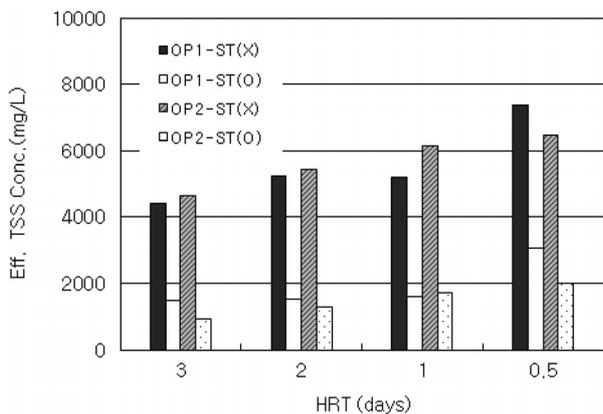


Fig. 9. Effect of HRT and settling on effluent TSS Conc.

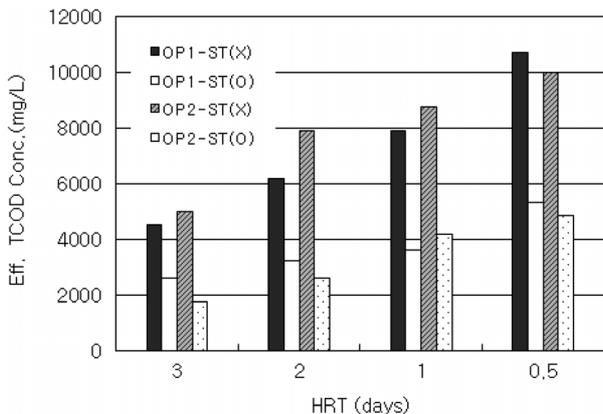


Fig. 10. Effect of HRT and settling on effluent TCOD Conc.

Acknowledgement

본 연구는 2013년도 충남대학교 자체 연구비(과제 번호: 201321930001)에 의해서 지원되었음.

KSEE

References

1. Ministry of Environment (ME), "Guideline for Operation Maintenance and Installment of Livestock Manure Treatment Facility," ME, Korea(2013).
2. Kang, H., "Optimization of Maximum Biogas Production from Anaerobic Digestion of Dairy Cow Manure using Semi-Continuously Fed and Mixed Reactor (SCFMR)," Rural Res. Ins., Korea(2014).
3. Ahn, J. W. and Lee, H. D., "A Study on Optimum Management of Livestock Wastewater," *J. Korean Soc. Water Qual.*, **16**(2), 255~264(2000).
4. Teodorita, A. S. and Clare, L., Quality Management of Digestate from Biogas Plants Used as Fertiliser, IEA Bioenergy, pp. 4~38(2012).
5. Won, C. H., Kwon, J. H. and Rim, J. M., "Effect of Ammonia Nitrogen Loading Rate on Anaerobic Digestion of Slurry-typed Swine Wastewater," *J. Korean Organic. Resour. Recycling Assoc.*, **17**(1) 49~57(2009).
6. Clare, T. L., Peter, F. and Teodorita, A. S., Utilisation of Digestate from Biogas Plants as Biofertiliser," IEA Bioenergy, pp. 4~22(2010).
7. Kim, J. S. and Seo, J. W., "Treatment of Swine Wastewater by Anaerobic Filter Bioreactors," *Appl. Chem.*, **3**(1), 189~192(1999).
8. Kang, H., Shin, K. S., and Richards, B., "Determination of Ultimate Biodegradability and Multiple Decay Rate Coefficients in Anaerobic Batch Degradation of Organic Wastes," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **27**(5), 555~601(2005).
9. Kang, H., Jeong, K. H., Jeong, J. H., Kim, S. W. and Ahn, H. K., "Anaerobic Ultimate Biodegradability and Multiple Decay Rates of Dairy Cow Manure," *J. Korean Soc. Waste Manage.*, **31**(8), 833~842(2014).
10. Jeong, K. H., Kang, H., Jeong, J. H., Kim, S. W. and Ahn, H. K., "Biogas Production from Dairy Cow Manure using Semi-Continuously Fed and Mixed Reactor (SCFMR)," *J. Korean Soc. Waste Manage.*, **31**(8), 843~853(2014).
11. Eugene, W. R., Rodger, B. B., Andrew, D. E., and Lenore, S. C., Standard Methods For the Examination of Water and WastewaterTM, 22nd Ed., APHA (with AWWA and Water Environ. Fed.), Hanover, pp. 4~1496(2012).
12. McCarty, P. L., "Anaerobic Waste Treatment Fundamentals," *Public Works*, **95**(1964).
13. Eom, T. K. and Lim, J. W., "Effect of ammonium nitrogen in anaerobic biofilter using livestock wastewater," *J. Korean Soc. Water and Wastewater*, **11**(4), 43~53(1997).
14. Park, W. K., Jun, H. B., Park, N. B., Kwon, S. I., Shin, J. D. and Hong, S. K., "Performance Evaluation and Characteristic Study of the Single Anaerobic Digestion from Piggery Slurry," *Korean J. Environ. Agri.*, **30**(1), 31~36(2011).
15. Hill, D. T., Cobb, S. A. and Bolte, J. P., "Using Volatile Fatty Acid Relationships to Predict Anaerobic Digester Failure," *Trans. ASAE*, **30**(2), 496~501(1987).
16. Sanchez, E., Borja, R., Travieso, L., Colmenarejo, M. F., Chica, A. and Martin, A., "Treatment of settled piggery waste by a down-flow anaerobic fixed bed reactor," *J. Chem. Technol. and Biotechnol.*, **79**, 851~862(2004).
17. ATV Report, ATV Fachausschuss 2.6 and 2.8, Korrespondenz Abwasser, **34**, 77, Germany(1987).
18. Clifford, W. R., Barnard, J. L. and Stensel, H. D., "Volume 5/ Design and Retrofit of Wastewater Treatment Plants for Biological Nutrient Removal," Water Quality Management Library, Technomic Publishing Co, Inc., Lancaster, pp. 1~431(1992).