

고농도 입자성 유기폐수의 고효율 혐기성 소화 공정

Efficient Anaerobic Digestion for Highly Concentrated Particulate Organic Wastewater

이성범¹⁾ · 신규철²⁾ · 김희주³⁾ · 김현주⁴⁾ · 최창규⁵⁾ · 김문일[†]

Lee, Sungbum · Shin, Kyuchul · Kim, Huijoo · Kim, Hyunju · Choi, Changkyoo · Kim, Moonil

ABSTRACT : It has been mentioned that CSTR (Completely Stirred Tank Reactor) and UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) processes, the existing anaerobic processes, have problems in the treatment of highly concentrated particulate organic wastewater (HCPOW). Therefore, this paper discusses the treatment possibility of distillery wastewater which is a typical HCPOW using ADEPT (anaerobic Digestion Elutriated Phased Treatment) process. In the comparison of CSTR and ADEPT, ADEPT produced much higher gas than that of CSTR removing more organic matters and suspended solids in ADEPT process, ADEPT had no effect on the decrease in pH by volatile fatty acids and showed steady pH in spite of relatively short HRT. In the results of removal rate according to recycle ratios between 6Qin and 2Qin in ADEPT, 6Qin showed high removal rate during the operation time. Therefore it appears that ADEPT had an applicability for the treatment of distillery wastewater. ADEPT could be a economical process, due to the short HRT, the energy recovery by the methane production, and the utilization for carbon source of produced organic acid from the ADEPT-acid reactor.

Keywords : ADEPT, CSTR, Anaerobic digestion, Recycle ratio, Two phased system

요 지 : 고농도 입자성 유기 폐수를 대상으로 기존 혐기성 공정인 CSTR과 UASB공정으로 처리 시 불량한 상징수질, 불안정한 운전 특성과 같은 문제점이 제시되었다. 이에 본 연구는 새로운 개념의 ADEPT(Anaerobic Digestion Elutriated Phased Treatment) 공정을 주정폐수에 적용하여 처리 가능성을 평가하였다. CSTR과 ADEPT의 성능 비교 결과 ADEPT공정에서 gas 발생량은 약 2배였으며, 유기물 제거 효율과 고형물 제거 효율 역시 더 높은 효율을 보여주었다. 또한 ADPET는 비교적 짧은 HRT에서도 휘발성 지방산 생성으로 인한 pH 저하의 영향을 받지 않았으며, 안정적으로 pH를 유지하였다. ADEPT의 recycle ratio를 6Qin과 2Qin으로 변화를 주어 운전 시 6Qin의 운전 기간 동안 높은 처리 효율을 보여주었다. 따라서 ADEPT는 짧은 HRT로 인한 경제성 향상과 메탄 발생을 이용한 에너지 회수, 또한 산 생성조에서 생성되는 유기산을 최대로 생산, BNR 공정의 유기 탄소원으로 활용 가치가 있다고 판단된다.

주요어 : ADEPT, CSTR, 혐기성 소화, 내부 순환 비, 이상 반응조

1. 서 론

혐기성 소화는 중온(30~40°C)에서 먼저 적용되어 왔고, 고온(50~60°C) 역시 유기성 고형물의 분해를 증가와 우수한 고액분리 그리고 효과적인 병원성 미생물의 제거, 잉여 슬러지 감소, 에너지 회수 등 여러 가지 장점을 보이면서 고농도 유기 폐수에 적용되어 왔다(Buhr and Andrew, 1997; Rimkus et al., 1982; Krugel et al., 1998). 그러나 불량한 상징수질과 높은 Propionic 농도로 인한 불안정한 운전 특성(특히, 고온 혐기성 소화 공정의 경우) 등의 단점이 지적되어 왔다(Kugelman and Guida, 1989). Young과 McCary

(1969)가 anaerobic biotilter의 개념을 혐기성 공정에 처음으로 도입한 이래로 biomass immobilization technology는 혐기성 폐수처리분야에서 괄목할만한 발전을 이루어 오고 있지만, 하수처리 슬러지나 축산 폐수와 같은 고농도 입자성 폐수에 대해서는 그 적용에 한계를 보이고 있으며, 기존의 1 단 CSTR(completely stirred tank reactor)로 처리 시 다음과 같은 세 가지 문제점을 보여주고 있다. 1) 혐기성 메카니즘 중 가수 분해와 산 발효 및 메탄 발효와 같은 다양한 상(phase)들이 모두 동일한 환경 하에서 일어남으로써 모든 종류의 미생물상에 대해 이상적인 환경을 제공할 수 없다(Kim et al., 2002). 2) anaerobic filter와는 달리 반응조가

1) 비회원, 한양대학교 일반대학원 토목공학과 석사과정

2) 비회원, 에이텍이앤씨(주) 대리

3) 비회원, 한양대학교 일반대학원 토목공학과 석사과정

4) 비회원, 한양대학교 환경공학연구소 연구원

5) 비회원, 한양대학교 BK21 첨단글로벌건설리더 양성사업단 Post doc.

† 정회원, 한양대학교 건설환경시스템공학전공 조교수(E-mail : moonilkim@hanyang.ac.kr)

완전 혼합에 의해 미생물 상호간의 거리가 떨어져 있게 되어 공생성 반응(Syntrophic reaction)에 가장 좋지 않은 형태이다. 공생성 반응은 세 종류 이상의 미생물들이 propionate의 혐기성 반응에 기여할 때, 열역학적으로 acetate/H₂로의 propionic의 전환, 그리고 메탄으로의 H₂의 전환은 10⁻⁴~10⁻⁶atm 사이의 H₂ 분압에서만 가능하다. 이것은 생산 미생물로부터 소모 미생물로의 용해된 H₂의 분산 이동 시 미생물의 근접성(close microbial proximity)으로 인하여 낮은 H₂ 농도를 유지하게 된다. 3) 서로 다른 성장 속도를 가지고 있는 산 형성 미생물과 메탄 형성 미생물이 단단 CSTR에서는 동일한 고형물 체류시간(SRT; sludge retention time)에서 같은 속도로 폐기됨으로써 상대적으로 성장 속도가 느린 메탄 형성 미생물의 양이 반응조 내에 적어지게 된다(Kim et al., 2001).

미생물의 SRT를 길게 유지할 수 있는 UASB(upflow anaerobic sludge blanket)는 granule이나 anaerobic filter등이 메탄 생성조로서 더 나은 효율을 보이며 산업 폐수의 전처리로 많이 적용되어 왔다. UASB는 기질이 상향류하는 반응조 내에서 미생물들이 스스로 침강성이 좋은 sludge blanket으로 형성되어 기질이 미생물의 대사 활동이 활발한 sludge blanket을 통과하면서 제거된다. 이러한 UASB는 높은 기질 부하율, 충격부하, 환경변화 등에 강한 적응력을 가지고 있어 적용 사례가 많은데 이는 미생물간의 거리가 가까워 syntrophic reaction이 유리하기 때문인 것으로 보고되어 왔다. 하지만 granule은 형성되기까지의 시간이 많이 소요되며, 안정된 조작 방법의 미 확립, 폐수의 성상에 따른 유출수의 불안정성, 고농도 SS 함유 폐수에 적용이 어렵다는 단점을 지니고 있다. 따라서 본 연구에서 적용된 ADEPT공정은 UASB 반응조 앞 단에 plug flow형태의 반응조를 설치하여 산 생성조와 메탄 생성조를 분리함으로써 각각의 반응조에서 필요한 환경 조건을 적절하게 유지시킬 수 있다는 장점이 있다. 이 경우 고효율 처리를 위해 성장 속도가 다른 산 형성 미생물과 메탄 형성 미생물의 분리가 가능하며 메탄 생성조는 유동상의 형태로 SRT를 50일 이상으로 유지하여 성장속도가 느린 메탄 생성 미생물의 최적 환경을 만들어 줄 수 있어 기존 혐기성 소화 공정에 비해 높은 유기물 부하(OLR; organic loading rate)를 가질 수 있을 뿐만 아니라 메탄 생성조의 유출수를 산 생성조로 반송시킴으로써 슬러지층의 용존성 유기물만을 메탄 생성조로 유입·처리하여 고농도 SS 함유 폐수 처리 효율의 향상이 기대된다. 또한 산 생성조에서 농축된 난분해성 고형물은 폐기되며, 생산된 유기산은 처리장내 BNR (Biological Nutrient Removal)공정의 탄소원으로 이용이 가능하다고 판단된다. 이상(two phased system)과 같은 새

로운 개념의 혐기성 소화공정은 ADEPT (Anaerobic Digestion Elutriated Phased Treatment)라는 명칭으로 2001년 국제 학회에서 그 개념이 소개되었고(Kim, et al., 2001), 합성폐수를 이용한 기초 실험 결과가 국제저널에 발표되었으나(Kim et al., 2004), 공정의 실제 적용을 위해서는 실험을 이용한 후속 연구가 반드시 필요하다. 또한 제안된 공정은 하수처리장의 1차 슬러지와 2차 슬러지 뿐 만 아니라 축산 폐수, 음식물 쓰레기, 식품 폐수 등 고농도 입자성 유기 폐수에 모두 적용가능하리라 사료된다. 따라서 본 연구에서는 고농도 입자성 유기 폐수 중 주정 폐수를 선택하여 실험실 규모의 ADEPT 공정과 기존 혐기성 공정인 CSTR에 적용하여 처리 가능성을 비교하였으며, ADEPT의 반응 비를 변화시켜 처리 효율 및 운전 특성을 비교하였다. 또한 혐기성 소화 공정은 크게 가수분해, 발효(산 생성), 메탄 생성 3단계로 나눌 수 있는데, 그 중 고농도 입자성 물질을 가수 분해 및 발효 단계를 통하여 유기산과 같은 용존성 물질로 전환하는 가용화 실험을 수행하기 위해 대상 슬러지는 본 연구에 사용된 주정폐수와 하·폐수 처리장의 2차 침전지에서 폐기되는 오니 슬러지를 ADEPT에 적용하였을 때 산생성조에서의 최적 수리학적 체류 시간(HRT; hydraulic retention time) 및 주정폐수의 적정 pH를 도출하고자 회분식 실험을 수행하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 Lab-scale reactor

본 연구에 사용된 CSTR과 ADEPT의 실험실 규모의 reactor는 각각 Fig. 1, Fig. 2와 같다. CSTR reactor는 유효 용적 3L인 1단의 완전혼합 반응조로 구성되어 있으며, ADEPT는 산 생성조와 메탄 생성조로 분리되어 유효 용적이 각각 1.5L, 0.5L로 총 2L인 이상(Two phases) 반응조로

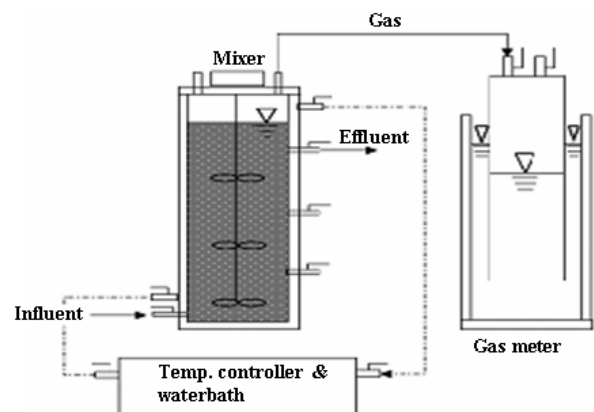


Figure 1. Schematic diagram of CSTR

구성되어 있다. 혐기성 조건을 유지시키기 위하여 밀폐하였으 며, 각각의 반응조에 가스 포집기를 설치하여 발생되는 가스를 분석하였다. 반응조 외벽에는 water bath를 설치하여 중온(35℃)을 유지하였고, ADEPT의 산 생성조와 메탄 생성조 사이에 내부 반송 라인과 펌프를 설치하였다. 초기 미생물 접종은 충북 C군에 소재한 주정공장 혐기성 소화조의 granule sludge를 사용하여 각각 0.5L를 충전 하였는데 ADEPT의 경우 메탄 생성조만 0.5L를 충전하였으며, CSTR의 경우 입자상 형태의 슬러지를 분쇄하여 유효 용적 3L 중 0.5L를 충전하였다.

2.2 Lab-scale reactor 운전 및 유입수 조건

본 연구는 혐기성 공정으로 공기의 차단을 위하여 100ml syringe를 이용하여 daily feed를 실시하였다. CSTR의 경우 150ml/d씩 유입·유출을 하였는데 완전 혼합 상태로 유출 시 슬러지가 함께 폐기되어 SRT 및 HRT는 동일한 20일로 혐기성 미생물이 충분히 성장할 수 있도록 하였다. ADEPT의 경우 산생성조 하부에 500ml/d로 유입하였고 유출은 산생성조 슬러지층에서 400ml/d를 폐기하였다. 또한 산생성조의 성상을 알아보기 위하여 50ml/d를 채취하였고, 메탄 생성조에서 50ml/d를 채취하였다. 산 생성조와 메탄 생성조의 HRT는 각각 3일과 1일로 총 4일의 HRT를 가지며, SRT는 산생성조에서 약 3일, 메탄 생성조에서는 입자상 슬러지로 슬러지 폐기가 없어 100일 이상의 SRT를 가지고 있어 성장 속도가 느린 메탄 생성균을 위한 최적 환경을 만들어 주었다(Table 1).

원수는 A시 J 주조 공장에서 채취하였으며, 운전 기간 동안 동일한 유입수 조건을 위하여 총 고형물 농도(TS; total solid) 3%를 기준으로 희석하여 유입하였고(Table 2), 주정 폐수 원수의 pH(4.5±0.5)가 낮아 Sodium bicarbonate

6g/L를 주입하여 pH 7.0±0.5로 유입하였으며, 미생물 성장에 필요한 미량원소는 Vanderbilt media(Kim, 2001)로 농축하여 10ml/L로 주입하였다. 분석 항목은 standard method에 의거하여 COD_{Cr}, TS/VS, TSS/VSS를 측정하였으며, TN, TP, NH₄⁺-N는 HACH DR2010을 이용하여 분석하였다. 또한 휘발성 지방산(VFAs)은 불꽃 이온화 검출기(FID; Flame Ionization detector)가 장착된 Gas chromatography(varian, Star 3400CX)로 측정하였다.

2.3 Batch test

2.3.1 폐수에 따른 가용화 실험

원수와 A시의 WWTP(wastewater treatment plant) 2차

Table 1. Start-up condition of the reactor

Conditions	Daily batch-fed single-stage continuously stirred tank reactor (CSTR)	ADEPT	
		ADEPT-Acid	ADEPT-Methane
Effective Volume (L)	3	1.5	0.5
Daily batch feed (L)	0.15	0.5	^a
Daily waste (L)	0.15	0.4 ^d 0.05 ^c	0.05
HRT (days)	20	3	1
SRT (days)	20	3	>100 ^b
Feed Solids (%)	2.8	2.8	
Organic loading rate (g COD/L·day)	0.9225 ~ 3.69	8.4 ~ 9.23	
Recycle ratio of feed	^a	6 → 2 ^c	

^aNot available

^bBiomass retention time

^c2.0 L of liquid is circulated through both acid and methane reactors

^dfrom the top of the sludge layer

^efrom the effluent line of ADEPT acid reactor

Table 2. Characteristics of the distillery wastewater used in this study

Constituent		Concentration (mg/L)	VFAs	Concentration (as COD mg/L)
COD _{Cr}	Total	35,083±1,848	Acetic acid	286±129
	Soluble	10,966±3,084	Propionic acid	886.5±604.5
Total-N	Total	1,066±282	Butyric acid	142±142
	Soluble	247±113	Valeric acid	143±143
Total-P	Total	463±243	iso-butyric acid	145.5±14.5
	Soluble	101±87	iso-valeric acid	83.5±83.5
NH ₄ ⁺ -N		55±35	Total VFAs	1685.5±1275.5
Total solid		28,294±1,272		
Volatile solid		22,173±1,530		
Total suspended solid		17,000±800		
Volatile suspended solid		16,267±2,267		

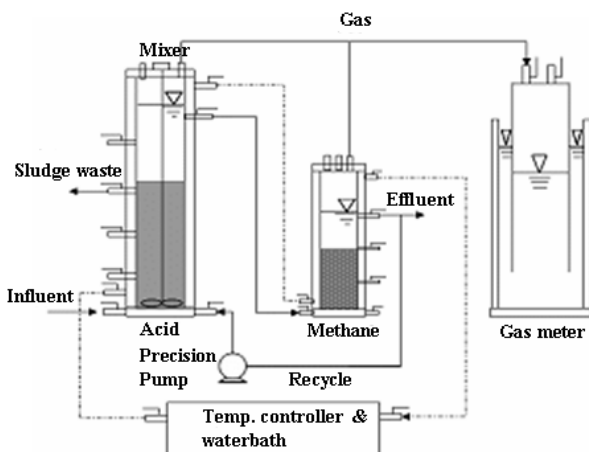


Figure 2. Schematic diagram of ADEPT reactors

반송슬러지의 가용화 시간을 도출하여 각 슬러지에 따른 산 생성조의 최적 HRT를 선정하고자 하였다. 사용된 주정 폐수는 60gTS/L, WWTP 반송 슬러지는 30gTS/L로 하였으며 각각의 폐수와 granule 슬러지를 부유상 형태로 만든 슬러지 30ml, 미량 원소는 vanderbilt media(Kim, 2001)를 10ml/L 주입하여 총 1L로 하였다. 산 생성으로 인한 pH 저하는 pH controller 이용하여 pH 6 이상을 유지하였고 수 조용 가온기(a)를 설치하여 중온(35°C)을 유지하였다 또한 슬러지가 가용화되면서 발생하는 가스의 발생을 알아보기 위하여 가스 포집 장치(b)를 설치하였다(Fig 3, Table 3). 분석 항목은 Soluble COD와 VSS를 HACH DR 2010과 Standard Method(Clescerl et al., 1998)에 따라 측정하여 슬러지 가용화율을 알아보았다.

2.3.2 주정 폐수 가용화율의 pH 영향

pH 5와 6으로 고정하여 산 생성조의 적정 pH를 알아보 고자 본 실험을 수행하였다(Table 4). 주정 폐수는 VSS를 20g/L로 희석하였으며, 기타 조건은 2.3.1의 실험과 동일한 조건에서 수행하였다.

Table 3. 주정 폐수와 2차 반송 슬러지 가용화율 실험 조건

	주정 폐수	2차 반송 슬러지
VSS (mg/L)	46,200	20,400
SCOD (mg/L)	10,360	100
pH	6.30	6.33

Table 4. pH에 의한 영향 실험 조건

	pH 6	pH 5
VSS (mg/L)	20,400	20,400
SCOD (mg/L)	13,900	13,900
pH	6.06	5.06

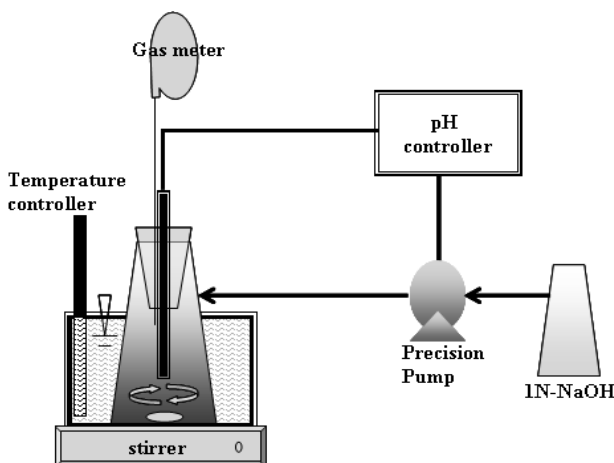


Figure 3. Schematic diagram of Batch test

3. 결과 및 고찰

3.1 실험실 규모의 연속식 반응기

3.1.1 ADEPT공정과 CSTR공정의 처리 효율 비교

ADEPT의 유출수 SCOD 농도는 평균 1,670mg/L로 유입 대비 84%의 제거 효율을 보였으며, CSTR은 평균 11,049mg/L로 유입 대비 9%의 제거 효율을 보였다. CSTR은 ADEPT에 비하여 현저하게 낮은 제거 효율을 보였는데, 이는 완전 혼합을 위한 교반으로 1.2 μ m 이하의 미세 슬러지가 여과지를 그대로 통과함으로써 SCOD 내에 탁도와 색도로 인해 CSTR의 문제점 중 하나인 불량한 상등 수질이 발생되었기 때문으로 판단된다. 이와 달리 ADEPT는 granule 형태로 미생물이 존재하기 때문에 유출수에 슬러지 유출이 적으며, SCOD 측정 시 탁도 및 색도를 유발시키지 않아 낮은 SCOD 농도를 보였다. 또한 유입 TCOD 대비 가스 발생량은 ADEPT가 평균 220ml/g·d로 CSTR이 120ml/g·d보다 높게 나타나 ADEPT가 CSTR보다 더 많은 유기물을 분해하여 가스 전환량이 증가하였고, 총 휘발성 지방산(TVFAs as COD)은 ADEPT가 평균 490mg/L로 CSTR의 656mg/L보다 낮게 검출되었다. 이는 메탄 생성조에서는 산 생성조의 휘발성 지방산을 메탄으로 전환하는 역할만을 함으로서 메탄 생성 미생물에 맞는 환경 조건이 조성되는 반면 CSTR은 산 생성 미생물과 메탄 생성 미생물이 공존하고 있는데다가 메탄 생성미생물의 성장이 느려 메탄으로의 전환이 상대적으로 낮았다고 판단된다. 따라서 ADEPT의 이상 구조(Two phased system)는 휘발성 지방산이 최종 메탄으로 빠르게 전환될 뿐만 아니라 짧은 HRT와 더 많은 메탄 가스발생으로 인하여 고농도 폐수 처리에서 경제성이 있는 공정으로 판단된다(Fig 4).

고형물 감량화 효율을 살펴보면 Fig 5와 같이 짧은 HRT와 높은 OLR에도 불구하고 총 고형물 및 유기성 고형물 모두 ADEPT가 CSTR에 비하여 높은 감량화 효율을 보였는데, 이는 CSTR의 경우 유출수는 슬러지가 함께 유출되어 SS농도가 높아 반응조 내의 미생물 성장 및 유기물 분해에 필요한 미생물 농도를 유지하기 위해 긴 SRT가 요구되지만, ADEPT는 산 생성미생물의 적합한 환경이 형성되어 고형물의 가수분해 및 유기산으로 전환이 활발하였으며, 메탄 형성조의 반송 수에 의해 산 생성에 따른 pH 저하를 완충 및 유기산만을 산생성조 상부로 유출시킴으로서 고형물 감량화 효율을 높였고, 메탄 생성조는 입자상 슬러지로서 쉽게 침전되어 최종 유출수의 TSS에 영향을 주지 않아 CSTR에 비하여 높은 TS 및 VS의 제거 효율을 보여주었다.

3.1.2 반송 비에 따른 ADEPT 평가

Fig 6을 살펴보면, 6Qin과 2Qin의 반송 비에 대한 TCOD 는 각각 78%, 65%의 제거 효율 보였으며, SCOD의 경우 각각 87%, 63%의 제거 효율을 보여주었으며, Fig 7과 같이 SCODcr과 TVFAs가 6Qin의 내부 반송 비에서 낮은 농도가 검출되었다. 이는 내부 반송 비를 6Qin으로 증가시켰을 경우, 산 생성조에서 생성되는 휘발성 지방산을 메탄 생성조로 유입되는 양이 커짐으로써 높은 COD 제거효율을 보였다고 판단된다. 또한 VS 및 VSS 제거에 있어서 6Qin이 2Qin보다 높은 제거 능력을 보임으로서 반송 비 증가에 의한 세정 효과가 고형물의 가수 분해에도 영향을 미치며, 반송 비의 조절로 인해 휘발성 지방산 생성을 조절할 수 있다. 따라서 ADEPT 공정은 낮은 내부 반송 비에서 발생하는 SCOD를 하·폐수 처리장 고도 처리에서 탈질에 필요한 탄소원으로 공급이 가능하며, 내부 반송 비를 높여 메탄생성량을 높임으로써 난방 연료로 활용이 가능하다.

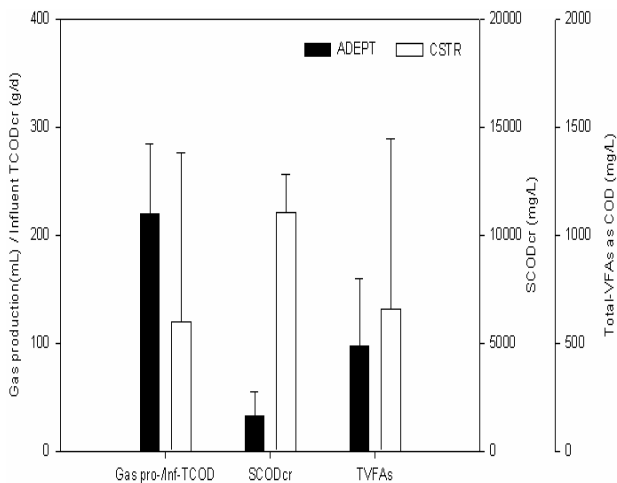


Figure 4. Gas production and organic compounds in the effluent of ADEPT & CSTR

3.2 Batch test

3.2.1 주정 폐수와 2차 반송슬러지 가용화 실험

주정 폐수와 A시의 WWTP에서 채취한 2차 반송슬러지를 ADEPT공정에 적용 시 산 생성조에서의 적정 HRT를 알아보하고자 batch test를 수행한 결과(Fig 8), 주정 폐수의 경우 VSS가 약 35% 가용화되었고, 2차 반송 슬러지의 경우 16%가 SCOD로 전환되어 낮은 가용화율을 보였는데, 이는 일반 하수처리장에서 농축조의 HRT가 20일이라는 점을 감안하였을 때, 7일은 미생물의 세포벽을 깨는데 불충분하였으며 초기 제거된 VSS는 가용화가 비교적 쉬운 물질이 분해되었기 때문으로 판단된다. 또한 주정 폐수를 ADEPT에 적용 시 산 생성조에서의 HRT는 3일로 충분하지만 실험실 규모 공정에서 반송이 슬러지의 가수 분해에 영향을 미치기 때문에 비교적 큰 반송 비에서는 3일보다 더 짧은 체류시간도 가능할 것으로 판단되며, 2차 반송 슬

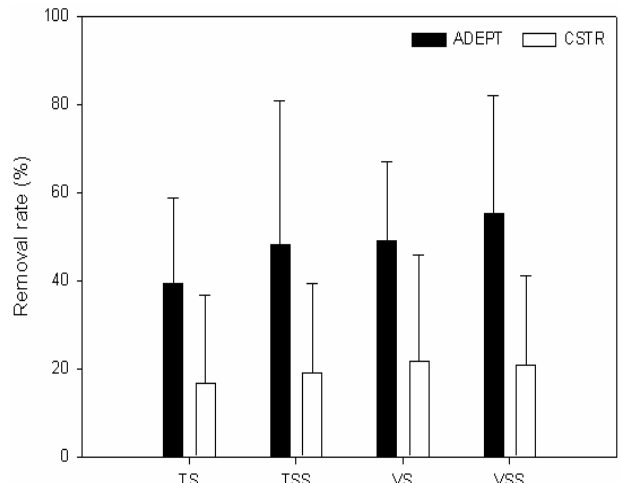


Figure 5. Solids removal rate of ADEPT & CSTR

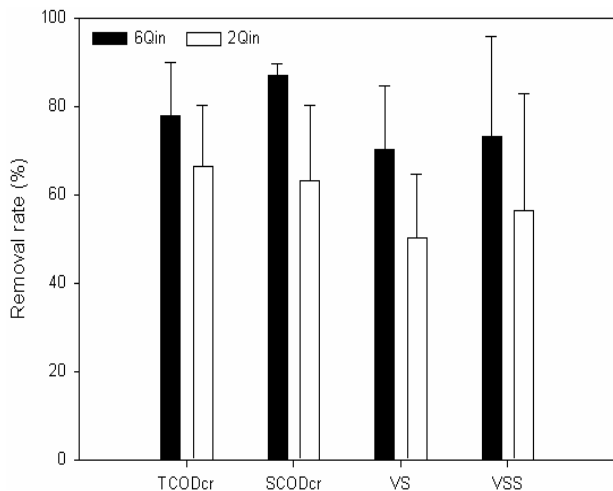


Figure 6. COD & solid removal rate according to recycle ratio

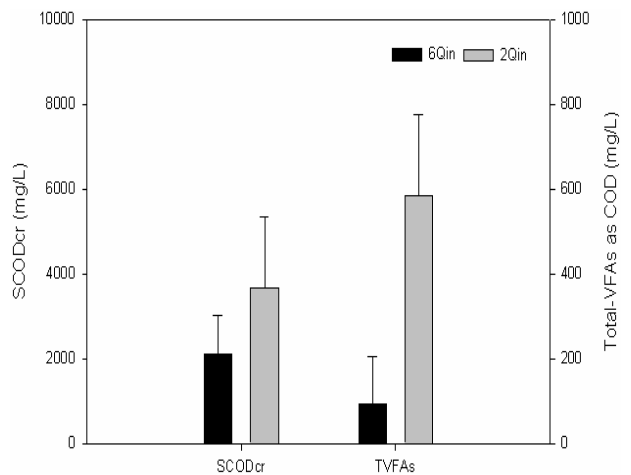


Figure 7. SCOD & TVFAs production from ADEPT-acid according to recycle ratio

리의 경우 본 실험에 적용된 실험 조건에서는 부적절하다고 판단되어 35°C보다 높은 온도에서의 추가적인 실험이 요구된다. VSS 제거와 SCOD 전환량의 상관관계 결과 (Fig 9), 주정폐수의 경우 상관성이 93.6%로 높게 나타나 제거된 VSS 성분이 거의 대부분 SCOD로 전환된 것을 알 수 있으나, 2차 반응 슬러지의 경우, 16.4%로 낮아 제거된 VSS가 SCOD 생성과는 큰 상관성이 없는 것으로 판단된다.

3.2.2 pH에 따른 주정 폐수의 가용화 실험

pH 변화에 따른 슬러지의 가용화는 pH 6에서 48%, pH 5에서 43%의 VSS가 제거되었고, VSS 제거와 SCOD 생성

의 상관성도는 pH 6은 89.36%, pH 5는 87.34%로 거의 같은 수준이었다. 하지만, 가용화속도 면에서 pH 6은 약 3일 안에 VSS 제거가 종료되었으나 pH 5는 3일 이후는 속도가 떨어지는 경향을 보여 가수 분해 및 산 생성미생물이 pH 6에서 안정적인 활성을 보인다고 판단된다. 또한 pH 6에서 pH 5와 비슷한 가용화율을 보여주었음에도 불구하고, 낮고 안정된 SCOD 농도가 관찰되었는데 이는 pH 6에서만 가스 포집기에서 가스의 발생이 관찰되어 가용화로 생성된 유기산의 일부가 메탄으로 전환된 것으로 보아 pH 6 이상에서는 메탄 미생물의 성장이 가능한 것으로 판단된다(Fig 10 및 11).

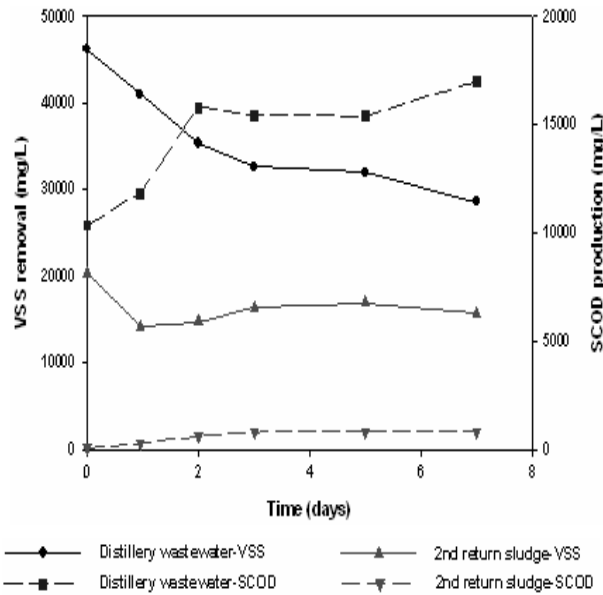


Figure 8. VSS removal and gas production between Distillery wastewater & 2nd return sludge

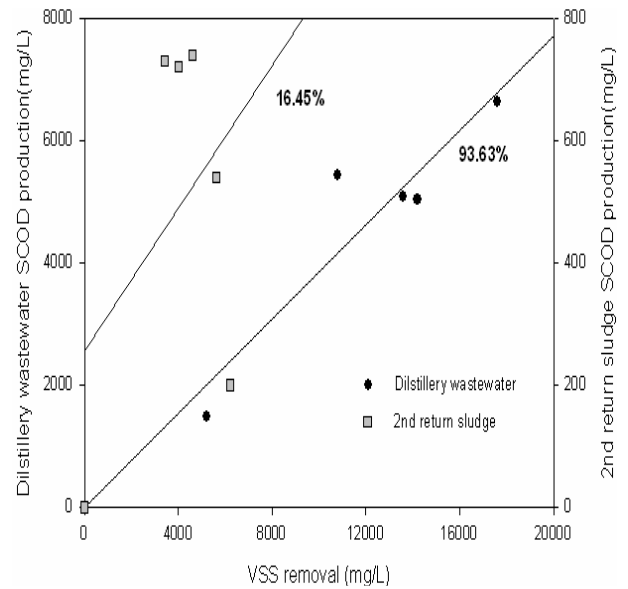


Figure 9. VSS removal and gas production according to correlation

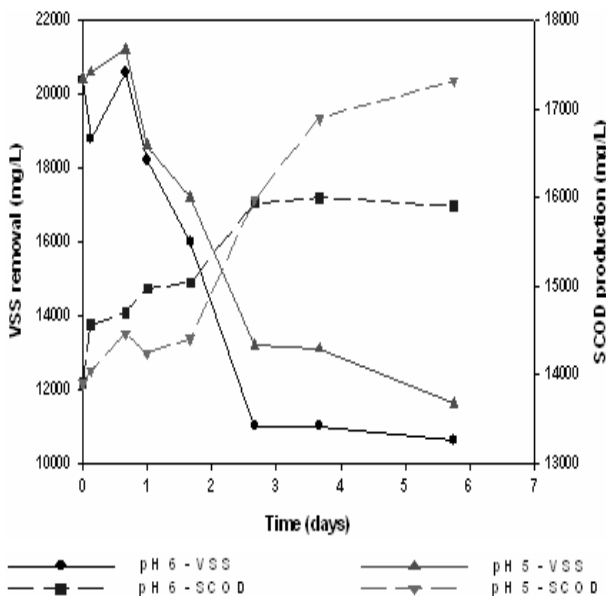


Figure 10. VSS removal and SCOD production by the VSS removal

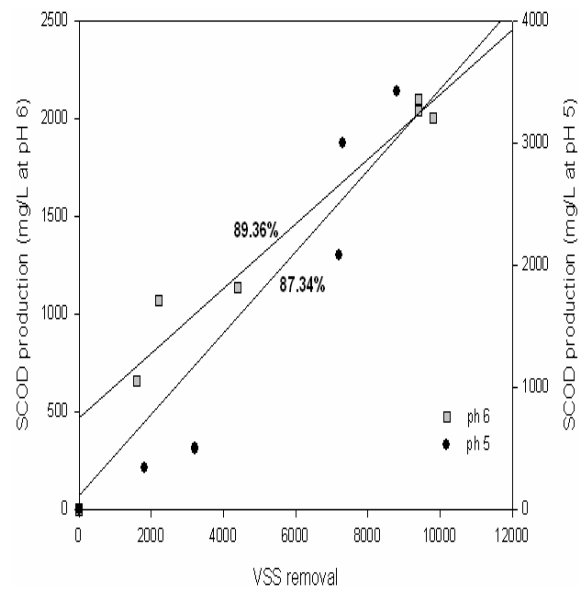


Figure 11. VSS removal and gas production according to correlation

4. 결 론

- (1) ADEPT와 CSTR 공정의 처리 효율을 비교한 결과, ADEPT 공정이 더 높은 유기물 및 고형물 제거 효율과 약 2배의 가스 발생량을 보여주었는데, 이는 본 공정이 산 생성조와 메탄 생성조로 나뉘어 각각의 미생물에 맞는 환경 조건이 적절하게 조성되어 휘발성 지방산의 빠른 메탄전환으로 짧은 HRT에서 처리가 가능하며, 내부 순환을 통해 산 생성에 의한 pH 저하를 방지하여 고농도 입자성 폐수에 적용이 가능하다고 판단된다.
- (2) ADEPT 공정의 반송 비를 6Qin과 2Qin으로 운전하였을 때, 6Qin에서 더 높은 제거 효율을 보여준 반면, 2Qin에서 높은 휘발성 지방산 농도가 검출되었는데, 이는 내부 반송비가 증가할수록 산 생성조의 슬러지층의 휘발성 지방산을 더 많이 세정시켜 메탄으로 전환시키고, 내부반송비가 감소할수록 휘발성 유기산이 증가하는 경향을 보였다. 따라서 ADEPT 공정은 짧은 HRT와 메탄 발생을 이용한 에너지 회수로 경제성 향상이 기대되며, 반송 비의 조절로 산 생성조에서 유기산을 생산하여 BNR공정의 유기 탄소원으로 활용이 가능하다고 판단된다.
- (3) Batch test 결과 주정 폐수를 ADEPT 공정에 적용 시 산 생성조의 HRT는 3일이 적절하였지만, 실험실 규모 공정에서 반송을 고려한다면 보다 짧은 HRT를 가질 수 있을 것으로 판단된다. pH 변화의 결과에서는 pH 6에서 가용화 속도가 빠르고 안정적으로 이루어졌으며 가스 발생이 관찰되어 메탄 생성미생물의 성장을 위해서는 pH 6이상이 유지되어야 할 것으로 판단된다. 또한, 활성 슬러지를 ADEPT에 적용 시 35 °C에서는 슬러지의 분해가 어려워 보다 높은 온도 혹은 긴 HRT에서의 추가적인 실험이 요구된다.

사 사

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2005-03-D00156).

참 고 문 헌

1. Moonil Kim, Wookeun Bae, and Richard E. Speece(2004), *Improved anaerobic process efficiency using mesophilic and thermophilic elutriated phased treatment*, J. Environmental Technology, Vol. 130, Issue 9, pp. 960~966.
2. Kim, M., Ahn, Y., and Speece, R. E.(2002), *Comparative process stability and efficiency of anaerobic digestion; mesophilic vs. thermophilic*, Water Res. Vol. 36, pp. 4369~4385.
3. Moonil Kim(2001), *Comparative process stability and efficiency of mesophilic and Thermophilic anaerobic digestion*, Doctor's thesis, Vanderbilt University, pp. 167.
4. Kim, M. I., Gomec, C. Y., Ahn, Y. H. and Speece R. E. (2001), *Anaerobic digestion elutriated phased treatment(ADEPT); The role of pH and nutrient for hydrolysis/acidogenesis of organic material*, 9th World Congress on Anaerobic Digestion-Antwerpen, Belgium, Vol. 1, pp. 799~804.
5. Krugel, S., Nemeth, L., and Peddle, C.(1998), *Extended thermophilic anaerobic digestion for producing Class A Biosolids at the r Greater Vancouver Regional Distreict's Annacis Island wastewater treatment plant.*, Water Sci. Technol., Vol. 38, pp. 409~416.
6. Lenore S. Clescerl, Arnold E. Greenberg, Andrew D. Eaton (1998), *Standard method for the examination o water and wastewater 20th edition*, 2-54~60.
7. Kugelman, I. J. and Guida, V. G.(1989), *Comparative evaluation of mesophilic and thermophilic anaerobic digestion*. EPA/600/S2-89/001, August.
8. Rimkus, R. R., Ryan, J. M., and Cook, E. J.(1982), *Full-scale thermophilic digestion at the West- Southwest Sewage Treatment Works*, Chicago, Illinois. J. Water Poll. Control Fed. Vol. 54, No. 11, pp. 1447~1457.
9. Buhr, H. O. and Andrews, J. F.(1977), Review paper, *the thermophilic anaerobic digestion process*. Water Res. Vol. 11, pp. 129~143.
10. Young, J. C. and McCarty, P. L.(1969), *Anaerobic filter for waste treatment*. Sewage Ind. Wastes, Vol. 41, pp. 5~10.

(접수일: 2007. 8. 21 심사일: 2007. 8. 24 심사완료일: 2008. 1. 3)