

산용해 및 초음파를 이용한 하수 슬러지의 산발효 특성

손춘호* · 홍승모 · 이병헌*

(주)대우건설기술연구원

*부경대학교

Acid Fermentation Characteristics of Waste Activated Sludge using Acids and Ultrasonication

C. H. Sohn* · S. M. Hong · B. H. Lee*

Daewoo Institute of Construction Technology

Pukyong National University

(Received 27 August 2007, Accepted 28 September 2007)

Abstract

The Carbon source to enhance the denitrification is essential matter in the advanced sewage treatment. For the high level of nutrient removal, external carbons such as ethanol, methanol, volatile fatty acids and so on should be needed. In this study, the methods to increase the sludge solubilization and acidification rate were compared with waste activated sludges and food waste leachate. Ultrasonication and acids were used for the pretreatment of organic particles in sludges. As a results, the optimal temperature and HRT were 60°C and 5 days, respectively. HAC, HPr, HBr, and other VFAs for acid fermentations reduced up to 22, 16, 14, and 48% with HRT reduction. For the increase of solubilization, 28% of solids destruction rate was shown at 0.3 watts/mL.

keywords : Acidification, Solubilization, Ultrasonication, Volatile fatty acid

1. 서론

하수의 생물학적 처리에 있어서 전자공여체로서의 탄소원이 부족하고 MBR 공정에서도 질산성 질소와 같은 이온성 물질은 막에 의하여 분리되지 않고 직접 유출되기 때문에 국내 하수처리장의 경우에서는 생물학적으로 질소 및 인의 높은 제거효율을 기대하기 힘들다. 높은 영양염류 제거 효율을 얻기 위해 외부탄소원 주입이 필요하다고 보고되고 있으며(Palis et al., 1985), 이에 따라 국내·외에서 고가의 아세트산 및 메탄올과 같은 순수 외부탄소원을 대체할 물질에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 또한 유기물 성분이 풍부한 돈분, 하수슬러지, 음식폐기물에 대한 연구가 이루어져 탄소원으로서의 가능성을 확인하였으나 크게 실용화되지 못하고 있는 실정이다. 입자성 물질이나 고분자물질의 혐기성 분해는 일반적으로 가수분해, 산성화, 아세트화, 메탄화 등 일련의 4 단계를 거치는 것으로 알려지고 있다. 이중 하수슬러지와 같은 고형물함량이 높은 물질을 소화하여 안정화하기 위해서는 위에서 제시된 여러 과정 중 생물학적 가수분해가 가장 어려운 단계로서 일반적으로 속도제한 단계로 확인되었다(Estman et al., 1981).

본 논문에서는 외부탄소원을 대체할 유기물 가용화방안 및 그 운전조건에 대한 연구를 수행하였다. 산과 열원을

이용한 유기물 및 슬러지가용화 및 산발효, 초음파를 이용한 가용화 및 산발효에 있어서 이들의 산발효 효율에 영향을 미치는 조건인 pH(3.5~4.8), 온도(20~60°C), HRT 등의 조건을 비교, 분석하였다. 또한 고온 용해 유기산을 이용시 유기물 혼합비율을 변화시켰으며, 초음파 주파수(28, 40kHz), 조사밀도, 조사시간 및 생슬러지 비율을 비교·적용해 도출된 결과를 이용하여 외부탄소원으로 주입되는 산발효액의 양을 산정하고 공정의 효율을 비교 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 산용해와 열원을 이용한 가용화 및 산발효

2.1.1. 회분식 실험

최적운전조건 도출을 위한 회분식 실험을 수행하였다. 4°C에서 냉장보관된 잉여슬러지를 사용하였고 주요성분은 Table 1과 같다. 용해질차로 잉여슬러지 100 mL를 125 mL의 병에 첨가한 후 HCl을 이용하여 pH 4.5~5.2를 유지하였다. 병은 교반기에서 20, 40, 60°C의 온도를 유지하면서 교반하였으며, 이때 모든 조건은 혐기상태에서 운전하였다.

또한 유기탄소 및 영양물질의 첨가를 위하여 음식물 침출수를 잉여슬러지의 용해액과 혼합 처리하고 산생성 능력을 평가하였으며 침출수의 조성은 Table 2와 같다. 35°C의 조건에서 250 mL 병에 시료 100 mL를 첨가하고 산생성균 20 mL를 첨가하여 TVFA와 각 유기산의 농도를 측정하였다.

* To whom correspondence should be addressed.
chunho@dwconst.co.kr

Table 1. Components of the excess activated sludge used in the experimental periods

Items	Value
Sludge conc. (%)	0.7~0.9
VFA (mg/L)	20~50
COD (mg/L)	4,000~8,000
pH	6~7
Alkalinity (mg CaCO ₃ /L)	100~300

Table 2. Components of food waste leachate used in the experimental periods

Items	Value
CODCr (mg/L)	70,000~90,000
VFA (mg/L)	800~1,500
T-N (mg/L)	3,000~4,000
T-P (mg/L)	600~800
pH	3.5~4.8
TS (mg/L)	3,000~4,000
VS (mg/L)	1,800~2,000

2.1.2. 연속운전

Fig. 1의 UASB 형태의 이상혐기 반응조를 사용하였고 반응조 투입전, 산성조건의 용해조에서 잉여슬러지를 고온 용해시켜 슬러지내 미생물의 세포막을 파괴시키는 전처리과정을 사용하였다. 그 후 혼화조에서 용해조로부터 얻어진 용해액과 음식물 침출수를 혼합한 후 산 발효조로 주입하였다.

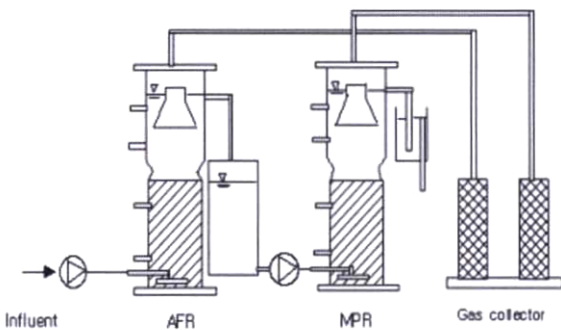


Fig. 1. Schematic diagram of laboratory scale two phased UASB type system.

잉여슬러지의 전처리는 회분식 실험 결과의 최적조건을 이용하였고, 용해조의 운전은 하부로부터 잉여 슬러지를 주입하여 반응조의 온도를 60°C에서 유지하면서 5분 교반, 10분 휴식형태로 교반하였으며 총 HRT는 3일이었다. 전처리후에 UASB형태 반응조를 적용한 산발효조 (AFR)로 용해액과 침출수를 각 실험단계(I~V 단계)에 적합한 비율로 혼합한 후 주입하였다(Fig. 2).

이때 혼합수는 반응조 하부로부터 유입하였고 운전초기에는 산생성균의 활성을 위하여 침출수를 5배 희석 후 운전 상태에 따라 희석율을 감소하면서 유기물 부하량을 증가시켰다.

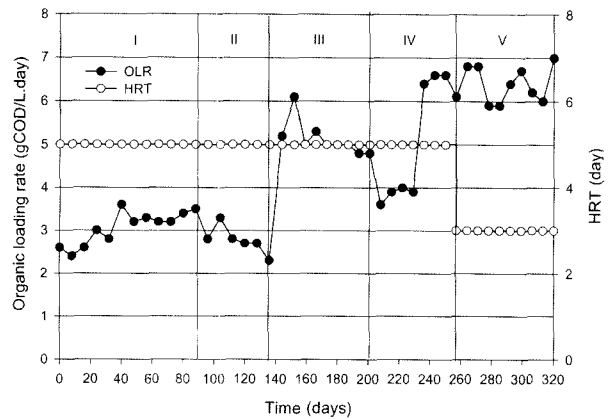


Fig. 2. Change of organic loading rate with time.

2.2. 초음파를 이용한 가용화 및 산발효

초음파의 적용은 액체 속 매질에 주기적인 수축과 팽창을 일으키며, 어느 일정한 강도이상에서 Cavitation(공동, 진공)이 발생된다. 이때 가스기포가 발생하는데 이들 기포는 상승하면서 짧은 시간에 격렬한 붕괴가 일어나며 이는 매우 강력한 유체역학적 전단력을 형성한다. 이때 초음파 공동(진공)에 의해 생성된 유체역학적 전단력은 주변 분자들을 파괴시키는 것으로 알려지고 있으며, 일반적으로 100 kHz 이하의 주파수에서 가장 강력한 기계적 힘이 작용하는 것으로 알려지고 있다(Portenlanger et al., 1999). 하수의 생슬러지에 초음파를 조사하여 생성된 용존 유기물을 탄소원으로 이용하기 위한 초음파 조사밀도, 조사시간, 그리고 슬러지 농도가 생슬러지의 용존 유기물 생성 및 반응에 미치는 영향을 조사하였다.

2.2.1. 폐활성슬러지의 초음파분해 실험

두 가지 슬러지 A, B를 적용하였으며, 실험 A에 사용된 폐활성슬러지는 대전 소재 D 하수종말처리장에서 발생된 활성슬러지를 사용 하였고, 실험 B에 사용된 폐활성슬러지는 소규모 안양시 소재 A 하수종말처리장의 MBR 공정에서 샘플링 후 사용하였고, 조성은 Table 3과 같다.

Table 3. Components of the waste activated sludge used in experiment

Items	A	B
Sludge conc. (%)	0.7~0.9	1.2~1.4
VFA (mg/L)	20~50	N.A.
TCOD (mg/L)	4,000~8,000	10,000~13,000
SCOD (mg/L)	<100	<100
pH	6~7	6~7
Alkalinity (mgCaCO ₃ /L)	100~300	200~500

2.2.2. 운전방법

A, B 두 실험 모두 주파수에 따른 미생물의 분해 능력을 평가하기 위하여 28 kHz와 40 kHz의 초음파를 이용하여 실험하였으며, 이때 주파수의 최대 정격용량은 각각 600 Watt와 1,500 Watt이다. 초음파분해 능력은 주로 시료의 양 및 반응조 형태에 따라 달라진다(Table 4).

Table 4. Operating mode with ultrasonic treatment

Items	A	B
Frequency	28, 40 kHz	28, 40 kHz
Retention time (min)	0~60	0~60
Waste sludge (L)	2, 5, 10	50
Power supply	600 Watt	1,500 Watt
Watt/mL	0.3, 0.12, 0.06	0.03

초음파분해 실험은 A 실험의 경우 10 L 용량의 초음파 반응조에서 실시를 하였으며, 초음파분해 능력은 유입 폐활성슬러지의 양을 2 L, 5 L, 10 L씩 주입하여 폐활성슬러지 mL당 초음파반응조의 정격용량으로 평가하였다. B 실험의 경우 130 L 용량의 초음파 반응조에서 실시하였으며, 유입 폐활성슬러지의 양은 50 L로 고정하여 실험을 수행하였다. 초음파분해는 0~60 min의 범위에서 실시하였으며, 초음파분해의 효율을 판단하기 위한 지표로서 온도, pH, SCOD, TN, TP, Ammonia, 그리고 Phosphate 등을 분석하였다. 전체적인 운전모드는 Table 5에 나타내었다.

Table 5. Operating mode according experimental condition

Items	Stage I	Stage II	Stage III
Frequency (KHz)	40	40	40
Watt/mL	0.06	0.12	0.3
Period	60 day	60 day	60 day

2.2.3. 연속운전

초음파처리 반응조에서는 폐활성슬러지를 초음파의 일방 조건인 고온·고압에서 슬러지 내 미생물의 세포막을 파괴하여 세포내 함유된 각종 용해액을 배출함으로써 용해성 유기물질을 얻을 수 있다. 그 후 침전조에서 1일간 고액분리 후 상등액을 산 발효조로 주입하였다(Fig. 3)

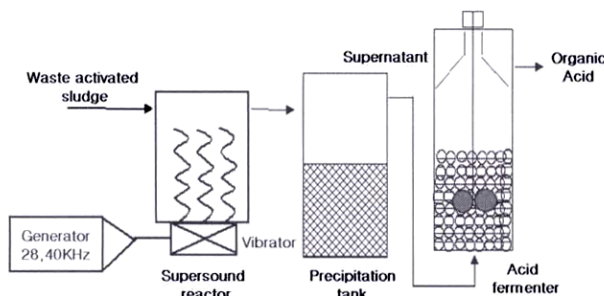


Fig. 3. Schematic diagram of UASB reactor with ultrasonic treatment.

Table 6은 회분식 반응조의 운전모드를 나타내고 있으며, 산발효조의 운전은 HRT를 3일로 유지하며 내부에 혼합기를 설치하여 간헐적으로 교반함으로써 반응물의 접촉빈도를 원활하게 유지하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 고온 용해 유기산을 이용한 산발효 효율

Table 6. Specification of ultrasonic treatment system

Items	Type A	Type B
Watt	600	1,500
Frequency	28 kHz, 40 kHz	28 kHz, 40 kHz
Power supply	200/220 VAC 50/60 Hz Single	200/220 VAC 50/60 Hz Single
Reactor size	D 24 cm, H 24 cm, Volume = 10 L	400 * 500 * 650H cm, Volume = 120 L
Material	Stainless steel	Stainless steel

3.1.1. 온도에 따른 슬러지 용해율 평가

실험은 크게 잉여슬러지의 용해율 측진을 위한 회분식 실험과 음식물 침출수와 용해액을 첨가한 산발효조 내에서 유기산 균의 활성 증진을 위한 연속 산발효조를 운전으로 나뉜다.

온도를 20, 40, 60°C에서 운전하여 반응조내 잉여슬러지의 유기물 전환율을 평가하였으며, 이 때 각 온도에서의 총 유기산(비유기산 + 유기산)의 농도분포는 Fig. 4와 같다.

잉여슬러지의 초기 총유기산 농도는 30 mgHAc/L로 온도가 증가될수록 유기산의 농도가 증가하였는데, 이는 온도 상승에 따라 산형성미생물의 활성도가 증가한 것으로 사료된다. 이는 열처리 시간과 온도에 비례하여 고형 유기물의 용해성 유기물로의 전환율이 높아졌기 때문이다(Haug et al., 1978). 또한, 초기부터 약 5일간은 유기산의 농도가 증가되나 그 이후부터 유기산의 농도 증가가 둔화되거나 오히려 감소경향을 보였는데, 이는 시간의 경과에 따라 반응조내 포함된 혐기성균이 새로운 환경에 적응하여 생성된 유기산을 메탄균에 의해 메탄으로 점차 전환되었기 때문으로 판단된다.

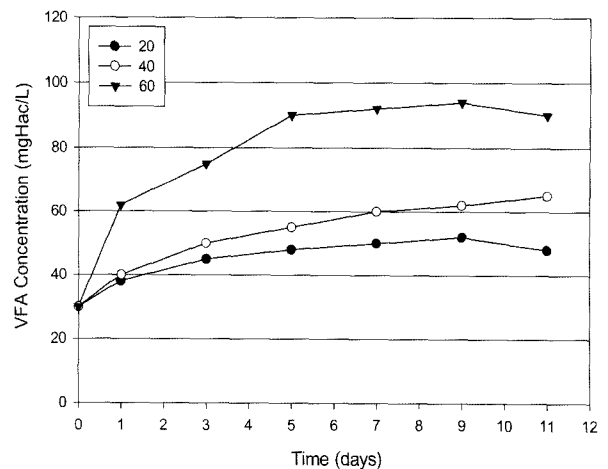


Fig. 4. Change of VFA concentration.

3.1.2. 용해슬러지와 음식물 침출수의 혼합에 따른 총유기산의 변화율

음식물 침출수와 60°C에서 용해된 잉여슬러지를 1 : 1로 혼합한 후 pH 4.0을 유지하며 회분식으로 운전한 결과 총 유기산의 농도변화를 Fig. 5에 나타내고 있다. 운전초기부

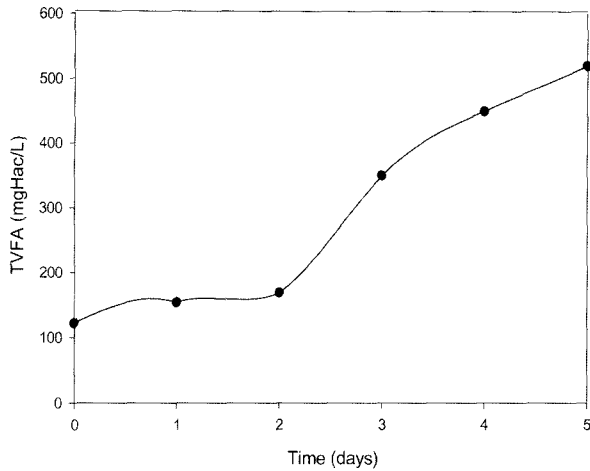


Fig. 5. Change of VFA concentration for solubilized leachate.

터 2일까지 유기산의 농도는 큰 변동이 없으나 3일부터 서서히 증가한 후 점차 증가하는 경향을 보이고 있는데, 이는 반응조에 주입된 침출수와 용해슬러지가 반응조내의 산생성균에 의해 서서히 적응(acclimation) 하여 유기물질이 산생성균에 의해 산생성물로 전환된 것으로 볼 수 있으며, 이때 반응조의 pH는 HCl을 주입하여 4.5~5.2 사이를 유지하였다.

3.1.3. 유기산발효공정 연속운전 결과

회분식 실험결과에 의해 60°C, 반응조 HRT 3일, 혼합액 반응조 HRT 5일에서 양질의 유기산 농도가 얻은 결과를 이용하였다. 반응조는 운전초기 혐기성소화조 미생물과 혐기성 입상슬러지를 혼합한 식종슬러지를 이용하였으며, 혐기성균 중 산생성균의 증식을 촉진하고 메탄균의 활성을 억제하기 위하여 기질로서 pH가 낮고 유기물의 농도가 매우 높은 음식물 침출수를 이용하였다.

Fig. 6에서 보듯 유입수의 유기산 농도는 운전초기부터 반응조 적응기간인 90일 까지 약 1,000 mgHAc/L을 유지하였으나, 침출수내 미생물의 용해액을 첨가한 이후에는 500 mgHAc/L 정도 유지를 하고 있다. 한편 침출수의 희석율을 5배에서 2배로 희석한 140일 이후에는 다시 증가하여 800~1,000 mgHAc/L을 유지하였다.

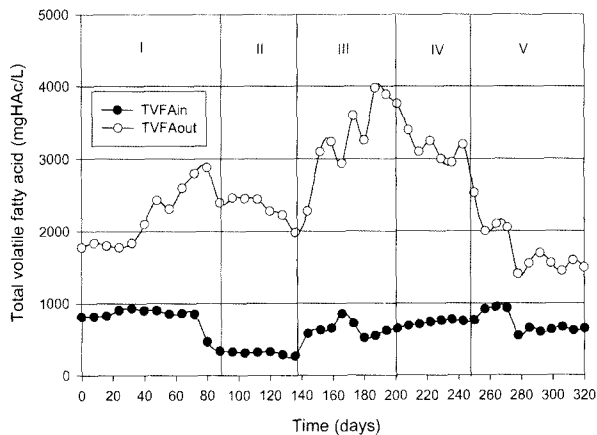


Fig. 6. Change of total VFA concentration with time.

I 단계에서는 유기산의 농도가 운전초기 1,800 mgHAc/L이었으나 운전 90일경에 2,800 mgHAc/L까지 증가된 점으로 보아 반응조내의 혐기성균이 점차 산생성균으로 전환되고 있음을 알 수 있고 II 단계에서는 유입수에 미생물 용해액을 20% 주입하였으며, 유입농도의 감소로 총유기산의 농도가 약간 감소한 2,200~2,500 mgHAc/L을 유지하였다.

III 단계에서는 원 침출수의 희석을 5배에서 2배로 감소한 결과 유입 COD의 증가로 반응조내 유기산의 농도는 매우 빠르게 증가하기 시작하여 운전 200일까지 3,000~4,000 mgHAc/L을 보여주었고, IV 단계는 미생물의 용해액을 20%에서 40%로 증가시킨 결과 유입 유기물의 감소로 유기산의 농도가 약간 감소하는 경향을 보였으나, 대체로 유기산의 농도가 3,000 mgHAc/L로 매우 안정되게 유지되었다.

V 단계에서는 수리학적 체류시간을 5일에서 3일로 단축시킨 결과 반응조내 유기부하량의 증가에도 불구하고 총유기산의 농도는 감소하기 시작하여 실험 종료 시 1,500 mgHAc/L까지 감소하였다. 이러한 현상은 유입수에 포함된 고농도의 부유물질이 짧은 시간 내에 가수분해가 되어 다시 이를 유기산으로 전환하는데 어려움을 나타내고 있는 것으로 판단된다. 각 단계의 COD 제거율은 Fig. 7과 같다.

운전경과에 따른 총유기산 중 각 농도별 분포를 조사한 결과는 다음과 같았다(Fig. 8).

I 단계에서는 운전초기 총 유기산중 각 농도분포별 성분

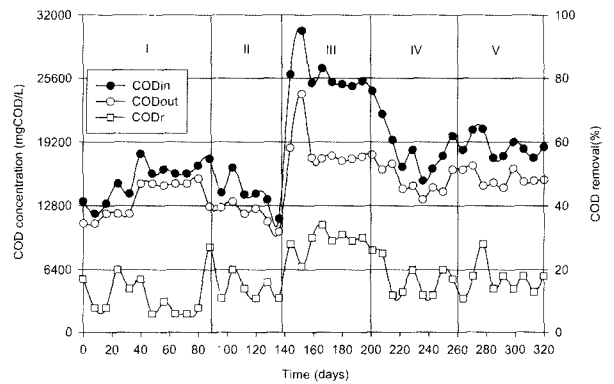


Fig. 7. Change of COD concentration and COD removal.

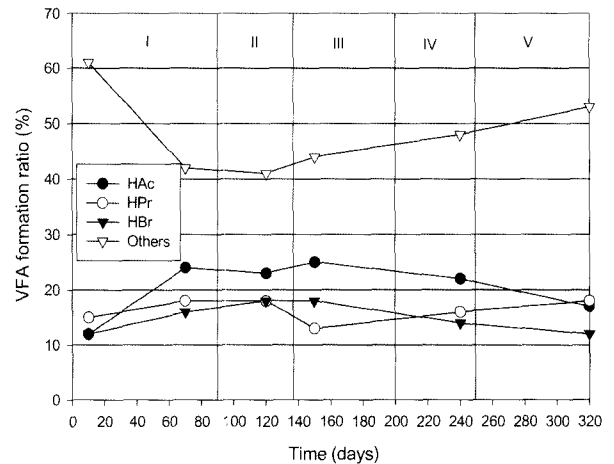


Fig. 8. Composition of total volatile fatty acids.

분포를 보면 HAc, HPr, HBr 및 기타유기산이 각각 12%, 15%, 12% 및 61%로 총유기산 중 대부분이 저분자 휘발성 유기산보다는 고분자 지방산 유기산 물질로 구성되어 있다. 하지만 70일경 HAc, HPr, HBr 및 기타 유기산의 분포를 보면 24%, 18%, 16%, 및 42%로 HAc의 농도는 증가한 반면, 기타 유기산의 농도 분포는 감소되고 있음을 보여주고 있다.

한편 미생물의 용해액을 20% 첨가한 II 단계에서의 유기산의 분포를 보면 각각 23%, 18%, 18%, 및 41%로 운전경과에 따라 양질의 유기산을 생성되고 있음을 보여주고 있다. IV 단계에서의 HAc, HPr, HBr 및 기타유기산의 분포는 각각 22%, 16%, 14%, 및 48%로 전 단계와 비교할 때 기타 유기산의 분포가 약간 증가하는 경향을 보이나 HAc의 경우 거의 유사한 값을 보여준다.

한편 수리학적 체류시간을 증가한 후 측정된 HAc, HPr, HBr 및 기타유기산의 분포는 각각 17%, 18%, 12%, 및 53%로 수리학적 체류시간을 5일로 유지된 경우보다 질적인 면에 있어 악화되고 있다. 특히 HAc의 분포는 감소하고 기타 유기산의 농도가 증가되고 있음을 나타내고 있다. 즉, 산발효조의 유기산 전환율은 유입수성상과 내부 미생물의 활성도에 따른 적절한 부하량의 조절이 필요함을 알 수 있었다.

3.2. 초음파를 이용한 슬러지 가용화

3.2.1. 주파수에 따른 폐활성슬러지의 초음파분해 실험

3.2.1.1. pH 변화

Fig. 9은 Fig. 3의 실험장치를 이용하여 0.3 Watt/mL에서 28 kHz와 40 kHz의 초음파분해 시간에 따른 용액의 pH를 나타내고 있다.

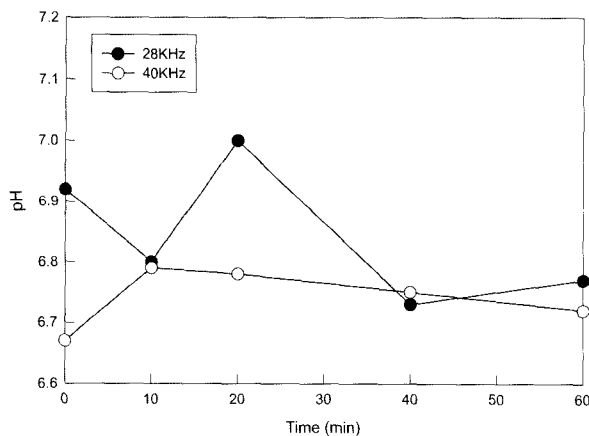


Fig. 9. pH variations with time.

28 kHz의 경우 초기 pH가 6.9이었으나 시간경과에 따라 6.7~7.1사이를 유지한 반면 40 kHz에서는 pH의 범위가 6.7~6.8사이를 유지하고 있다. 결과적으로 슬러지를 초음파분해 처리하여도 시간경과에 따른 pH의 변화가 크지 않으며, 이는 슬러지의 초음파분해 처리에 따른 물성(pH)의 변화가 적은 것으로 사료된다.

3.2.1.2. 총 COD중 용존 COD의 비율변화

Fig. 10은 슬러지 초음파 강도에 따른 초음파 처리 후 SCOD/TCOD의 변화를 보여주고 있다. 0.12 Watt/mL와 0.3 Watt/mL에서의 비를 살펴보면 초음파 처리를 하기 전 SCOD/TCOD는 0.02로서 폐활성슬러지 전체의 유기물량은 거의 대부분 입자성 슬러지로 구성된 것으로 나타나고 있다. 실제로 원래 슬러지의 COD 농도를 측정한 결과 TCOD는 8,000~10,000 mg/L인 반면, SCOD는 100~200 mg/L이었다.

Fig. 10(a)에서와 같이 0.12 Watt/mL에서 초음파 적용 10분경에 분해율이 각각 0.08, 0.16 그리고 60분 후에는 각각 0.21, 0.43으로 전 실험기간 동안 40 kHz에서의 용해율이 28 kHz보다 약 2배 정도 높은 것을 보여주고 있다. Fig. 10(b)는 0.3 Watt/mL에서의 분해율로 28 kHz와 40 kHz에서의 총 COD 중 유기물분해율은 60분 후에 각각 0.35, 0.67로 0.12 Watt/mL에서의 분해율과 비교할 때 훨씬 높은 값을 갖는 것을 알 수 있다.

상기 결과로부터 폐활성슬러지를 초음파분해 처리후의 상등액의 COD는 처리를 하기 전에 비해 최대 30배 이상

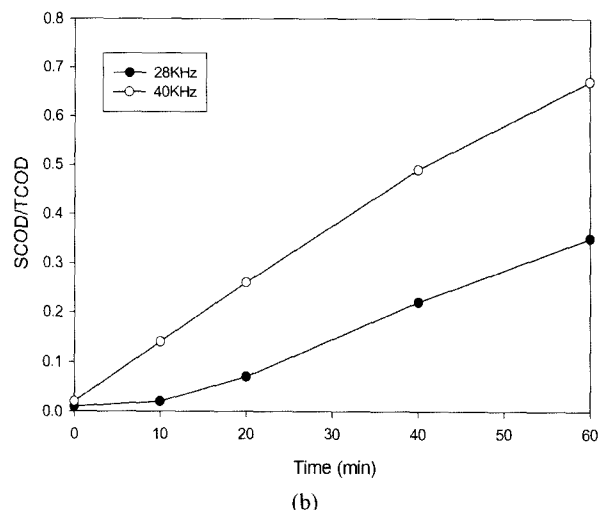
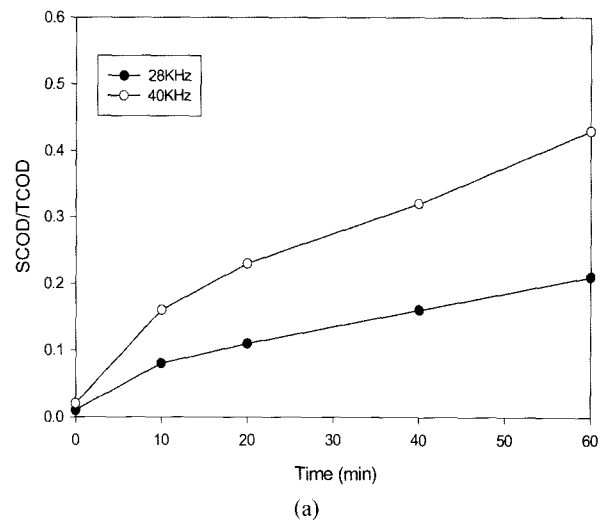


Fig. 10. SCOD/TCOD ratios vs. sonication time at 25 and 40 KHz [(a) 0.12 Watt/mL, (b) 0.3 Watt/mL].

증가되었다. 이러한 결과는 Tiehm 등(1997)에서 제시된 결과와 거의 비슷하다. 또한 초음파분해 처리후의 용해성 농도 증가는 결과적으로 슬러지 생분해성 능력을 상당히 증가시키는 것으로 보고하고 있다(Tiehm et al., 1997). 따라서 폐활성슬러지의 용해성 유기물질을 증가시키기 위해서는 높은 주파수, 그리고 높은 전력의 적용이 필요하다고 할 수 있다.

3.2.2. 40 kHz에서의 초음파분해 실험 특성

3.2.2.1. 슬러지의 파괴율

Fig. 11은 40 kHz의 초음파를 갖는 반응조에서 초음파분해에 따른 슬러지 고형물의 파괴율을 나타내고 있다.

0.12와 0.3 Watt/mL에서 초음파분해 처리 후 슬러지 파괴율은 운전 10분경에 각각 3%와 5%, 운전 20분경과 후에는 각각 15%와 18%, 그 후 운전 60분경에 각각 21%와 28%까지 증가됨을 볼 수 있다.

이 결과는 입자의 크기가 1 μm 보다 큰 입자에 대한 파괴율이라 볼 수 있지만 실제적으로 1 μm보다 큰 입자라 하더라도 미생물에 의해 충분히 이용이 가능한 입자가 존재하므로 초음파분해 처리 후 용액에 대한 입경분포를 Fig. 12에 나타내었다.

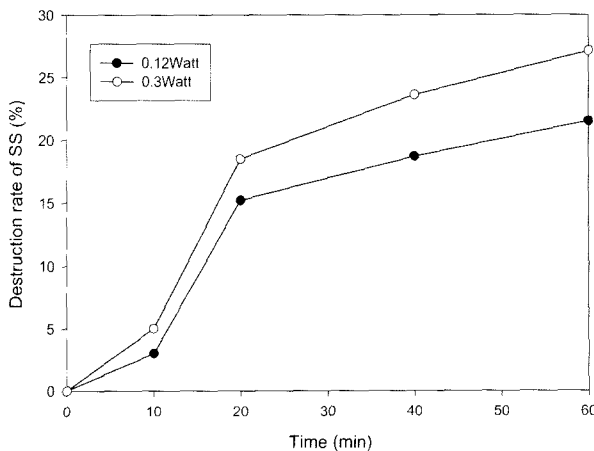


Fig. 11. Destruction rate of suspended solids at 40 kHz.

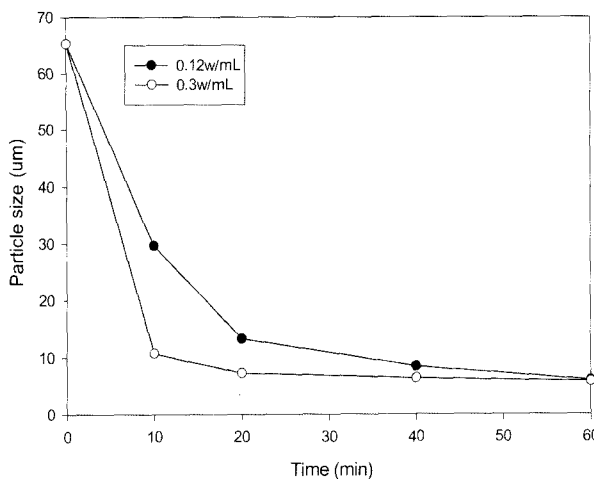


Fig. 12. Particle size variation at 40 kHz.

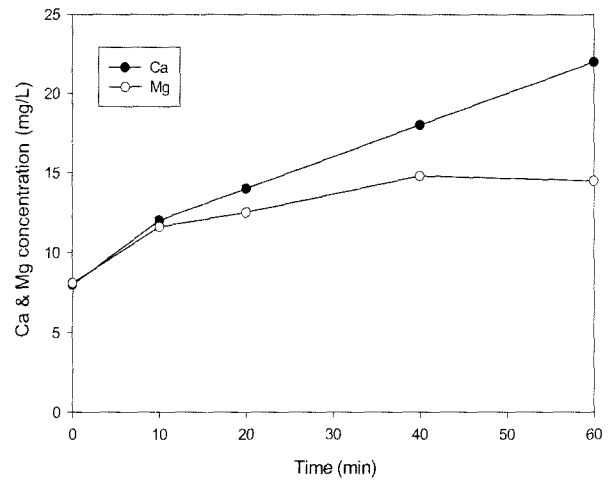


Fig. 13. Ca²⁺ and Mg²⁺ conc.- variations (mg/L) at 40 kHz.

초음파분해 처리 전의 폐활성슬러지 평균입경은 67 μm 이었으나 처리 후 슬러지의 입경은 감소하기 시작하여 운전 10분경에 0.3 Watt/mL의 경우 12 μm, 0.12 Watt/mL의 경우 29 μm까지 감소되었다. 그 후 초음파 처리시간이 경과함에 따라 입경은 꾸준히 감소되어 60분경에는 평균입경이 모두 6 μm를 나타내고 있다.

따라서 초음파분해 처리에 따른 미생물의 파괴율은 Fig. 12의 결과를 볼 때 초음파분해 처리시간이 10분이 경과한 후에 폐활성슬러지의 고형물의 대부분이 파괴되며, 그 후 파괴된 고형물질은 초음파분해 처리에 따라 입경이 더욱 작은 용해성물질로 전환됨을 알 수 있다.

Fig. 13은 초음파분해 처리 후 칼슘이온(Ca²⁺)과 마그네슘(Mg²⁺) 이온의 농도 변화를 나타내고 있으며, 시간경과에 따라 이온농도가 증가되고 있다. 칼슘과 마그네슘 이온은 일반적으로 슬러지 플러크내 입자들을 연결하는 중요한 원소로 알려져 있다(Bruns et al., 1992). 따라서 본 결과를 볼 때 초음파분해 처리 시 입자의 플러크가 파괴되면서 입자간 상호 결합을 하고 있는 칼슘이온과 마그네슘이온이 플러크의 파괴로 인하여 용액내로 용출되어 이온농도가 증가되는 것으로 판단된다.

3.2.2.2. 온도변화

초음파분해 처리에서 용액 내에 두개의 반응이 동시에 일어나는데, 그 첫 번째로 작은 기포형성과 폭발에 의해 발생되는 강렬한 교반이고, 둘째는 용액 내의 온도증가이다.

Fig. 14는 0.12 Watt/mL와 0.3 Watt/mL에서의 초음파분해 처리 후 온도변화를 보여주고 있다. 0.3 Watt/mL에서 반응조의 온도는 초기 17°C에서 10분경과 후 31°C로 증가되었으나, 그 후 꾸준히 증가되어 60분경과 후에는 71°C까지 증가되었다. 한편 0.12 Watt/mL는 60분경과 후 58°C까지 증가되었다. Fig. 15는 실험장치 B에서 40 kHz의 강도에서 초음파를 조사하였을 때 시간에 따른 온도를 나타낸다. 전류의 세기에 따라 온도 상승률은 차이가 있었다.

하지만 상대적으로 Fig. 16에서와 같이 전류의 세기가 커짐에 따라 pH는 큰 변화를 보이지 않았다. Chu 등(2001)에

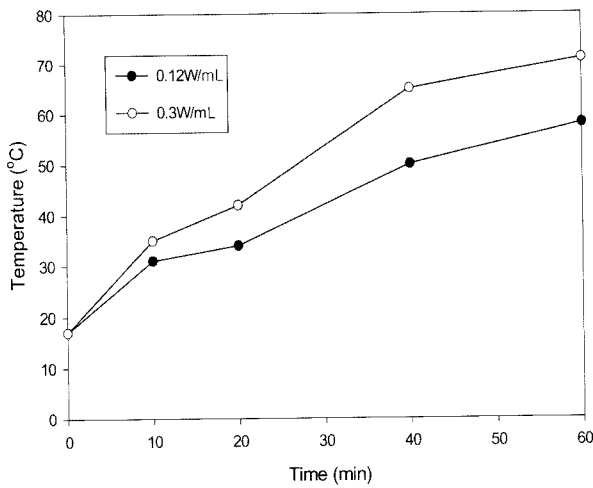


Fig. 14. Temperature variations with electric power increase at 40 kHz.

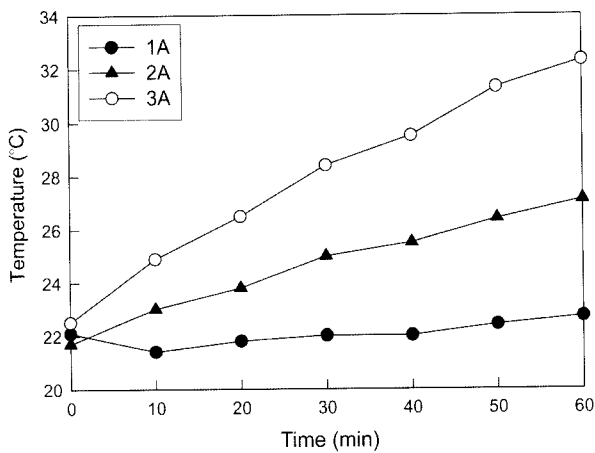


Fig. 15. Temperature variations with current increase at 40 kHz.

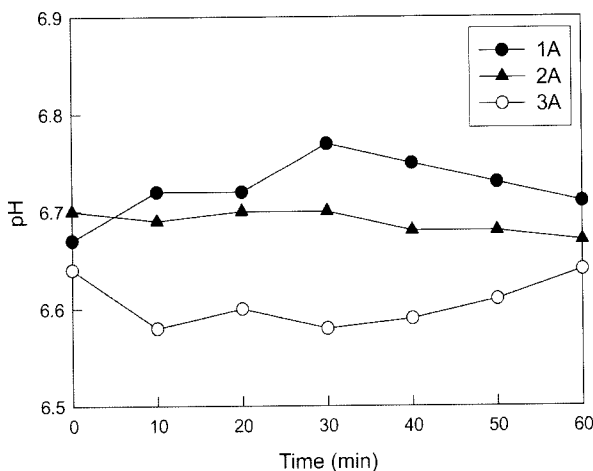


Fig. 16. pH variations at 40 kHz.

의하면, 초음파분해 처리 후 유기물질의 분해 율을 평가한 결과 온도의 상승이 유기물의 파괴에 큰 영향을 미치는 것으로 보고하고 있으며, 이들 결과를 고려할 때 본 실험에서 고형물의 파괴율 증가는 초음파시 발생하는 기포와 온

도상승에 따른 미생물 세포의 파괴에 큰 영향을 미치는 것으로 사료된다.

3.2.2.3. 산발효조 장기 운전 결과

초음파를 이용한 슬러지의 회분식 운전결과 최적의 유기산 생성물을 얻기 위해서는 잉여슬러지의 용해율이 매우 중요하며 이를 최적조건으로 40 kHz의 초음파 반응조에서 30분 이상 유지하는 것이 좋은 것으로 나타났다. 하지만 연속실험을 이용한 반응조에서의 실험결과와 회분식 반응조에서의 실험결과가 상이할 수 있으므로 회분식 결과를 기초로 하여 연속운전을 수행하였다.

연속 운전시 초음파 반응조의 초음파분해 처리시간은 40 kHz의 주파수에서 30분간 조사한 후 이들 분해물질을 산 생성조에 투입하여 운전하였다. 운전조건은 운전모드별로 Stage I, Stage II 및 Stage III 단계로 분리하여 운전하였다.

단계를 분리한 이유는 회분식 반응조 결과에서 볼 수 있듯이 높은 Watt에서 처리한 것이 훨씬 뛰어난 용해액을 만들 수 있으나 많은 에너지가 수반되므로 낮은 Watt에서의 적용으로부터 높은 Watt로 전환하여 발생된 유기산을 MBR 반응조에 주입하여 최적조건을 결정하고자 했기 때문이다.

Fig. 17은 초음파분해 처리된 용액을 UASB 반응조에 주입한 운전결과로서 유입 TCOD의 경우 전 실험기간 동안 900~1,200 mg/L을 유지하였다. 이때 TVA는 30~40 mg/L로서 유기물중에 포함된 유기산의 양은 매우 낮다. 하지만 UASB를 이용한 산생성조를 운전한 결과 TCOD는 500~600 mg/L로 유입수의 농도에 비해 감소된 경향을 보이고 있는데, 이는 유입수내에 포함된 SS의 성분이 UASB 반응조 하부에 축적되어 유출수내 SS의 성분감소로 TCOD의 양이 감소된 것으로 확인되었다(Fig. 18).

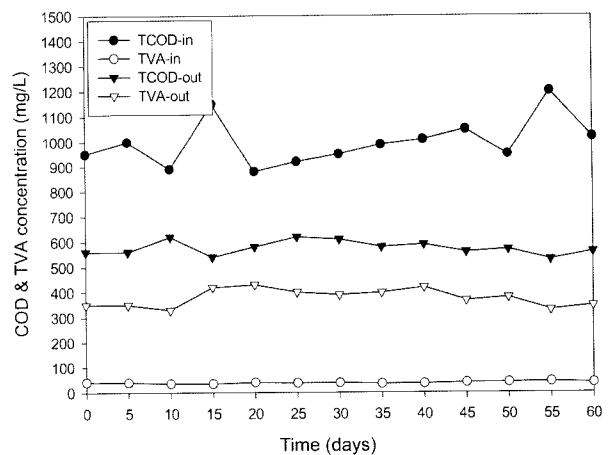


Fig. 17. Variations of COD and TVA concentration in UASB system.

반면 TVA의 농도는 전 실험기간 동안 300~500 mg/L을 나타내었는데, 이는 초음파분해 처리후 TVA농도인 30~40 mg/L과 비교할 때 10배 이상의 농도증가를 보였다.

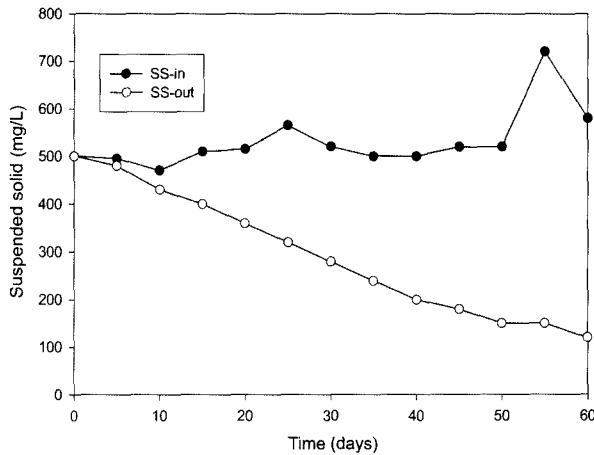


Fig. 18. Variations of SS conc.

4. 결 론

- 1) 최적의 산생성을 위한 슬러지의 용해율이 매우 중요하며 최적 조건으로 용해조의 온도를 60°C, 용해시간은 최소 5일이었다. 슬러지 용해액과 침출수와 혼합 결과 3일부터 유기산의 농도가 증가하는 것으로 보아 적정 최소 HRT는 3일이었다.
- 2) 산생성조의 유기산 농도는 5일의 HRT에서 침출수만 주입 시 최대 2,500 mgHAc/L, 20%의 미생물용해액 첨가 시 최대 3,800 mgHAc/L까지 증가하나 40% 용해액을 첨가 시 COD 농도의 감소로 약간 감소하였다. HRT를 3일로 단축한 후 유기산 농도는 1,500 mgHAc/L까지 감소된 것으로 보아 본 실험에서 유기물을 유기산으로 전환 시 혼합액 HRT는 5일이 적절한 것으로 나타났다.
- 3) 총유기산 중 HAc, HPr, HBr 및 기타 유기산의 분포를 조사한 결과, 침출수만 주입 시 각각 24%, 18%, 16% 및 42%이었으며, 미생물 용해액을 20% 첨가 시 각각 23%, 18%, 18%, 및 41%, 용해액을 40% 첨가 시 각각 22%, 16%, 14% 및 48%를 보여주었다. HRT가 감소한

경우 유기산 농도가 전체적으로 줄어들었다.

- 4) 초음파를 이용한 폐활성슬러지의 용해율(solubilization)을 평가한 결과, 주파수에 따른 물성변화는 크지 않았으며 용해성 유기물질을 증가시키기 위해서는 28 kHz의 주파수 보다는 40 kHz의 주파수와 높은 전력을 적용하는 것이 우수했다. 40 kHz에서의 슬러지 고형물의 파괴율은 0.12와 0.3 Watt/mL에서 운전 60분경에 각각 21%와 28%를 나타내었다.

참고문헌

- Bruns, M. A., Stephen, J. R., Kowalchuk, G. A., Prosser, J. I. and Paul, E. A., Comparative diversity of ammonia oxidizer 16S rRNA gene sequences in native, tilled, and successional soils, *Applied and Environmental Microbiology*, **65**, pp. 2994-3000 (1992).
- Chu, C. P. and Lee, D. J., Experimental Analysis of Centrifugal Dewatering Process of Polyelectrolyte Flocculated Waste Activated Sludge, *Water Res.*, **35**, p. 2377 (2001).
- Estman, J. A. and Ferguson, J. F., Solubilization of particulate organic carbon during the acid phase of anaerobic digestion, *J. Water Pollut., Control Fed.*, **53**, pp. 352-366 (1981).
- Haug, R. T., Stuckey, D. C., Gossett, I. M. and McCarthy, P. I., Effect of thermal pretreatment on digestibility and dewaterability of organic sludges, *J. Water Poll. Control Fed.*, **50**(1), pp. 73-85 (1978).
- Palis, J. C. and Irvine, R. L., Nitrogen removal in a low-loaded single tank sequencing batch reactor, *Research journal of the Water Pollution Control Federation*, **57**(1), pp. 82-86 (1985).
- Portenlanger, G. and Heusinger, H., The influence of frequency on the mechanical and radical effects for the ultrasonic degradation of dextrans, *Ultrasonics Sonochemistry*, **4**(2), pp. 127-130 (1997).
- Tiehm, A., Herwig, V. and Neis, U., Particle size analysis for improved sedimentation and filtration in waste water treatment, *Wat. Sci. Tech.*, **39**(8), pp. 99-106 (1997).