

잉여슬러지의 초음파 처리에 의한 혐기성 소화에서의 메탄생성 특성 연구

이종학 · 정태영 · 노현석 · 김동진^{*,†}

연세대학교 환경공학부
*한림대학교 환경생명공학과

Characteristics of Anaerobic Methane Production by Ultrasonic Treatment of Excess Sludge

Jonghak Lee · Tae-Young Jeong · Hyun-Seog Roh · Dongjin Kim^{*,†}

Division of Environmental Engineering, Yonsei University

*Department of Environmental Sciences and Biotechnology, Hallym University

(Received 8 June 2010, Revised 9 August 2010, Accepted 10 August 2010)

Abstract

Ultrasonic sludge pre-treatment has been studied to enhance the performance of anaerobic digestion by increasing sludge hydrolysis which is regarded as the rate-limiting-step of anaerobic digestion. In this study, the effect of ultrasonic pre-treatment on sludge hydrolysis (solubilization) and methane production was investigated. Sludge solubilization efficiency increased with ultrasonic energy input. However, it is uneconomical to apply more than 720 kJ/L as the solubilization efficiency per energy input declines afterwards. Volatile fatty acids concentration increased after the ultrasonic sludge hydrolysis. Anaerobic batch digestion showed that methane volume reached 64.7 and 84.5 mL after 18 days of incubation with the control sludge and ultrasonically hydrolyzed sludge, respectively. Methane production potential, maximum methane production rate, and the lag time of modified Gompertz equation were changed from 70 mL, 6.4 mL/day, and 1.2 days to 89 mL, 9.6 mL/day, and 0.5 day, respectively, after the ultrasonic sludge treatment. The results proved that ultrasonic pre-treatment contributed significantly not only for the methane production but also for the reduction of anaerobic digestion time which is critical for the performance of anaerobic sludge digestion.

keywords : Anaerobic digestion, Methane, Pretreatment, Sludge hydrolysis, Ultrasound

1. 서론

하수처리시설로부터 배출되는 슬러지의 관리와 처분에 있어 소요되는 비용은 전체 폐수처리 비용의 중요한 부분을 차지한다. 따라서 혐기성 소화는 슬러지의 안정화와 감량화를 위한 검증된 기술이며 또한 메탄과 같은 잉여 에너지를 얻을 수 있기 때문에 그 관심이 높아지고 있다. 슬러지 혐기성 소화는 가수분해, 산 생성, 그리고 메탄 생성의 3단계 반응으로 진행된다. 가수분해는 입자성 고분자 물질이 에너지와 세포 탄소원으로 사용되기 쉬운 단당류, 지방산, 아미노산 등과 같은 저분자 물질로 분해되는 과정을 말한다. 생 슬러지는 단순 유기물이 많은 부분을 차지하고 있으나, 잉여 슬러지의 경우 주로 하수처리 공정 중 생성된 잉여 미생물로 이루어져 있으며 미생물이 세포벽에 의해 보호되고 있어 가수분해 속도가 느려 혐기성 소화 공정의 율속 단계로 알려져 있다. 산 생성 단계는 일반적으로 발효라고도 하며 주요 생성물은 수소, 이산화탄소와 아세트

산, 프로피온산, 부티르산 등의 휘발성 지방산이다. 최종적으로 메탄 생성은 아세트산을 기질로 이용하는 것과 수소와 이산화탄소를 기질로 이용하는 것으로 나눌 수 있다 (Appels et al., 2008; Eastman and Ferguson, 1981; Metcalf and Eddy, 2003).

그러나 슬러지 혐기성 소화에서 요구되는 긴 처리시간은 혐기성 소화조의 설비투자비를 증가시켜 경제성을 떨어뜨리는 문제가 있다. 따라서 최근에는 짧은 슬러지 체류시간에 소화하는 고풍 혐기성 소화나 슬러지 가용화를 위한 전처리 방법에 대한 연구가 많은 관심을 받고 있다. 슬러지 전처리는 기존의 혐기성 소화조를 개조하지 않고 슬러지 처리속도를 높이는 가장 현실적인 대안으로 고려되고 있다.

초음파는 기계적 슬러지 전처리 기술의 하나로 초음파가 매질, 특히 액체를 통과할 때 음압(acoustic pressure)에 의해 기포가 발생하는 공동화(cavitation) 현상을 이용한다. 이때 발생된 기포는 단일 팽창과 압축을 반복하여 국부적으로 고온·고압의 가스가 순간적으로 방출된다. 이때 열 효과와 OH radical과 같은 강한 산화성 물질이 생성되고 기포의 내파 시 발생하는 충격파에 의한 분자 간의 충돌로 각종 화학반응에서 반응속도를 향상시키는 것으로 알려져

[†] To whom correspondence should be addressed.
dongjin@hallym.ac.kr

있다(Neis et al., 2002; Shimizu et al., 1993). 초음파로 인한 공동화 기포의 상호작용으로 인해 슬러지 입자 구조가 변화하며 미생물의 세포벽이 파괴되며 그 결과 세포질 물질이 세포벽 밖으로 용출되어 신속히 가수분해되어 혐기성 소화의 기질로 이용된다. 그 결과 초음파 전처리는 잉여 슬러지의 혐기성 소화 효율을 향상시키고, 더 많은 양의 메탄가스를 얻을 수 있으며, 운전시간의 감소를 가능하게 하여 기존 혐기성 소화의 단점을 극복할 수 있는 대안으로 고려되고 있다(Appels et al., 2008).

국내에서도 슬러지 전처리를 통한 혐기성 소화 효율을 증대시키기 위한 연구가 진행되어 왔다. 손춘호 등(2007)은 하수 슬러지를 산 용해한 것과 초음파 처리한 것의 산발효 특성을 비교하였다. 안재환 등(2007)은 생 슬러지, 잉여 슬러지, 농축 슬러지를 대상으로 초음파 처리하여 COD 제거율과 메탄 발효에서의 가스 발생량을 비교하였다. 또한 수리동력학적 방법과 초음파에 의한 캐비테이션이 슬러지 가용화에 미치는 영향과 메탄 생성량을 각각 비교한 연구도 진행되었다(맹장우와 배재호, 2009).

본 연구에서는 슬러지의 전처리에 초음파를 적용하여 초음파 강도에 따른 잉여 슬러지의 가용화(가수분해) 효과를 대조 슬러지와 비교하고, 초음파 전처리의 차이를 가수분해 생성물의 특성과 휘발성 지방산 분석을 통해 비교하고자 한다. 또한 전처리한 슬러지와 대조 슬러지를 혐기성 소화하여 각 슬러지의 메탄 생성량과 모델식으로부터 최대 메탄 생성속도, 메탄 생성 가능량 등의 매개변수를 구하여 초음파에 의한 슬러지 가용화가 메탄 생성에 미치는 효과를 검토하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1. 슬러지

본 연구에서는 W시 하수처리장의 잉여 슬러지를 채취하여 사용하였다. 채취한 슬러지는 2 mm 체로 거른 후 4°C에서 냉장 보관하여 사용하였다. Table 1은 실험에 사용된 잉여 슬러지의 성상을 보여준다.

2.2. 초음파 장치 및 슬러지 처리 방법

본 연구에서는 초음파를 사용하여 슬러지를 전처리할 때 초음파 강도에 따른 슬러지의 가용화율을 확인하기 위하여 초음파의 강도를 180 ~ 1440 kJ/L의 범위에서 실험하였고, 초음파 조사시간은 최대 60분이었다. 초음파 발생기의 주파수는 20 kHz로 고정되었다. 실험에 사용된 초음파 장치는 Sonics & Materials 社의 VC-450을 사용하였다. 일반적으로 슬러지 용액은 초음파에 의해서 발생하는 마이크로믹싱에 의해 혼합되나 초음파를 더 균일하게 조사하기 위해 초음파 처리기간 동안 마그네틱 교반기를 사용하였다.

슬러지의 가용화(Solubilization) 정도는 다음의 식 (1)을 이용하여 정량화하였다.

$$\text{Solubilization}(\%) = (\text{SCOD}_U - \text{SCOD}_0) / (\text{TCOD}_0 - \text{SCOD}_0) \times 100 \quad (1)$$

SCOD_U = 초음파 처리한 슬러지의 용존 COD, mg/L

SCOD₀ = 초음파 처리 이전 슬러지의 용존 COD, mg/L

TCOD₀ = 초음파 처리 이전 슬러지의 총 COD, mg/L

즉, 초기 부유고형물의 총 COD 중에서 가용화된 COD의 백분율로 가용화율을 정의하였다. 슬러지의 초음파에 의한 가용화는 3개의 시료를 대상으로 실시한 평균값으로 표시하였다.

2.3. 슬러지 혐기성 소화 회분실험

2.3.1. 접종 슬러지

본 연구에 이용된 접종 슬러지는 W시 하수종말처리장의 혐기성 소화조에서 채취하여 실험실로 운반하여 질소가스로 치환한 뒤 3개월 이상 35°C에서 잉여 슬러지를 처리하는 슬러지 수리학적 체류시간 28일의 반연속식 실험실 혐기성 소화조에서 운전되고 있던 것을 인출하여 실험에 사용하였다.

2.3.2. 대상시료

초음파 전처리(200 kJ/L)로 가용화율이 16% 정도인 슬러지와 전처리하지 않은 대조 슬러지를 기질로 사용하여 혐

Table 1. Characteristic of excess sludge and ultrasonically disintegrated sludge (sludge solubilization efficiency 16% based on COD)

| | Concentration (mg/L) | | |
|--------------------|----------------------|---------------|----------------------|
| | | Excess sludge | Disintegrated sludge |
| | | Total | Soluble |
| COD | Total | 17000 ~ 21000 | 17000 ~ 20900 |
| | Soluble | 200 ~ 1500 | 2700 ~ 3500 |
| Protein | Total | 5000 ~ 7000 | 5000 ~ 7000 |
| | Soluble | 130 ~ 600 | 900 ~ 1100 |
| Carbohydrate | Total | 600 ~ 1200 | 680 ~ 1150 |
| | Soluble | 50 ~ 100 | 150 ~ 250 |
| NH ₃ -N | | 30 ~ 70 | 30 ~ 70 |
| TS | | 10100 ~ 14000 | 10100 ~ 13800 |
| VS | | 9900 ~ 10600 | 8100 ~ 8900 |
| pH | | 6.5 ~ 7.0 | 6.5 ~ 6.8 |

기성 소화 회분실험을 수행하였다. 이때 실험에 사용된 초음파 전처리한 것과 전처리하지 않은 대조 슬러지의 성상은 Table 1에 나타내었다.

2.3.3. 회분실험 장치 및 방법

잉여 슬러지의 초음파 처리가 혐기성 소화에서 메탄가스 발생량 변화에 미치는 영향을 확인하고자 회분 혐기성 소화 실험을 수행하여 생화학적 메탄 생성 가능량(Biochemical Methane Potential, BMP)을 확인하였다(Owen et al., 1979). 슬러지의 회분 혐기성 소화 실험은 부피 125 mL의 serum bottle에 접종 슬러지 20 mL(1.6 g VS/L)와 기질(슬러지) 60 mL를 혼합하였고 별도의 영양물질과 완충액은 넣지 않았다. Head space는 질소로 치환한 후 고무 마개로 막은 후 알루미늄 뚜껑으로 다시 밀봉하였다. Serum bottle의 일정한 온도 유지를 위해 35°C의 교반 수조에서 배양하였다(Fig. 1). 슬러지 회분 실험 결과는 3개 시료를 대상으로 실험한 평균값으로 표시하였다. Serum bottle에서 발생된 가스는 주기적으로 가스 밀봉 주사기를 이용하여 채취하여 실온(25±1°C)에서 부피를 재고 가스 크로마토그래프로 성분을 분석하였다.

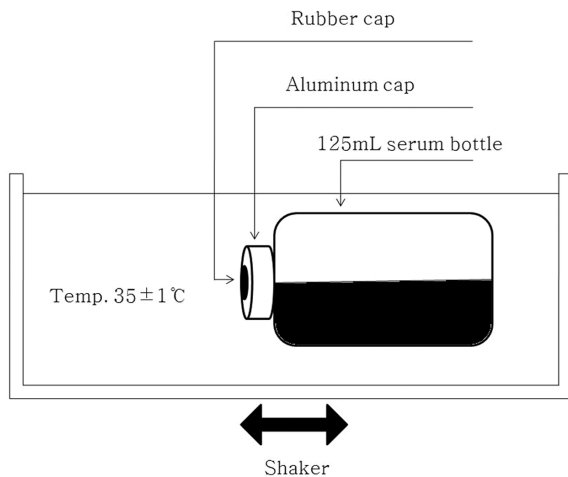


Fig. 1. Schematic diagram of batch anaerobic sludge digestion experimental apparatus for the measurement of biochemical methane potential.

2.4. 분석 방법

COD분석은 Standard Method의 COD_{Cr} 방법으로 분석하였다(APHA et al., 1989). 대상시료분석을 위하여 추가적으로 단백질, 탄수화물, pH, VFA를 분석하였다. 단백질은 Lowry 법을 이용하여 측정하였고(Lowry et al., 1951), 탄수화물은 Anthrone-황산법으로 분석하였다(Kochler, 1952). 휘발성 지방산(VFA) 측정을 위해 시료는 10 mL의 1회용 주사기를 사용하여 채취하였으며 GFC(Whatman)로 거른 후 염산(1 N)으로 전처리한 뒤 4°C로 냉장보관 후 불꽃이온화 검출기(FID)를 이용하여 가스 크로마토그래프(GC-8A, Shimadzu)로 분석하였다. 혐기성 소화 가스 성분은 가스 밀봉 주사기로 시료를 채취하여 열전도도 검출기(TCD)를 갖춘

가스 크로마토그래프(GC-14A)로 분석하였다. pH는 pH meter(Orion, model 290A)로 측정하였다. 슬러지 가용화를 확인하기 위한 용존 성분의 분석은 시료를 950 x g로 원심분리 후 GF/C(Whatman)로 여과한 후 측정하였다. 슬러지의 총부유고형물(TSS) 농도는 Dry oven에서 105°C로 2시간 건조시킨 후 질량을 측정하여 계산하였고, 휘발성 부유고형물과 잔류 부유고형물은 앞에서 건조된 시료를 550°C에서 15분간 강열한 후 잔류 질량을 측정하여 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 잉여 슬러지의 초음파 처리

Fig. 2는 초음파 파쇄 강도에 따른 잉여 슬러지의 가용화율을 보여준다. 초음파 강도의 세기가 클수록 가용화율이 증가하다가 720 kJ/L 이상에서는 가용화율의 증가폭이 낮아져서 초음파 강도가 더 증가하더라도 가용화 효율은 제한적임을 알 수 있다. 초음파 파쇄 강도에 따라 SCOD(Soluble COD_{Cr})/TCOD(Total COD_{Cr})의 비율은 증가하였고, 슬러지의 SCOD_{Cr}의 생분해도가 증가하였다. 전처리 초음파의 에너지 밀도(180, 360, 540, 720, 900, 1080, 1440 kJ/L)에 따라 가용화율은 각각 10.5%, 28.6%, 33%, 40.9%, 42.0%, 45.2%, 46.5%로 나타났다. 투입 에너지 대비 가용화 효율은 360 kJ/L 조건에서 가장 높은 것으로 나타났다. 720 kJ/L와 1080 kJ/L를 비교하면 가해진 에너지가 50% 증가하였지만 가용화율은 3~5% 정도 증가한 것에 그쳐 본 실험 조건 중에서는 720 kJ/L 이상의 초음파 강도로 슬러지를 파쇄하는 것은 비경제적인 것으로 판단된다. 손춘호 등(2007)은 40 kHz의 초음파 발생기로 하수 슬러지를 0.3 W/mL로 1시간 처리하여 28% 정도의 고형물 파괴율을 얻었다. 안재환 등(2007)은 초음파 처리시간이 1시간이 경과하면서 잉여 슬러지의 용해도 증가율이 낮아짐을 보고하였다. 손춘호 등(2007)은 28 kHz, 40 kHz에서 초음파 처리한 슬러지의 가용화율을 비교하고 40 kHz에서의 가용화율이 20 kHz에 비해 2배 정도 높다고 보고하였다. 또한 초음파 강도가 0.12 W/mL에서 0.3 W/mL로 증가하면서 가용화율은 그에 비례하여 증가하지는 않았다. 따라서 슬러지 가용

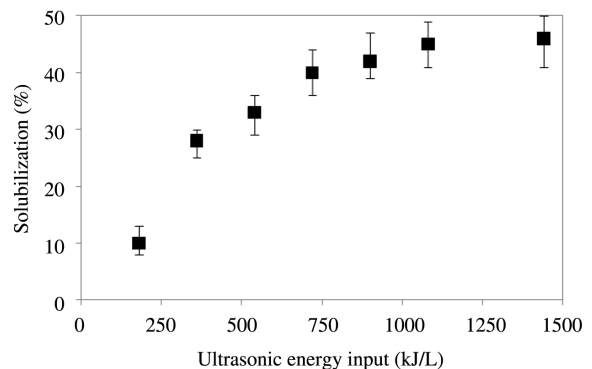


Fig. 2. Sludge solubilization efficiency (%) with different ultrasonic energy input (n = 3).

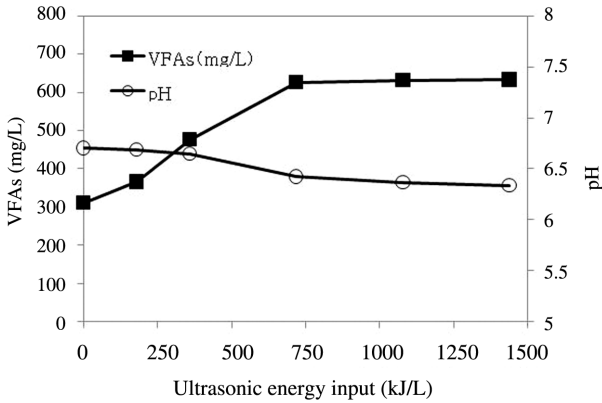


Fig. 3. VFA and pH profiles of ultrasonic sludge disintegration with different energy input.

화를 위한 적절한 초음파 에너지 투입은 경제적으로 매우 중요하다.

Fig. 3은 잉여 슬러지를 초음파로 처리하는 동안의 휘발성 지방산(VFA)과 pH 변화를 보여준다. VFA는 슬러지 가수분해 및 혐기성 소화에서 가장 많이 존재한다고 알려진 유기산인 아세트산, 프로피온산, 부티르산, 발레르산을 조사하였고 총 VFA는 이들의 합으로 정의하였다. 대부분 호기성 미생물이 주를 이루고 있는 잉여 슬러지는 생 슬러지에 비해 초음파 처리에 의한 슬러지 분해 및 가용화 효과가 크다고 알려져 있다(Bougrier et al., 2006; Chu et al., 2001; Tiehm et al., 1997). Wang 등(2006)은 초음파 처리에 의해 슬러지 가용화 후 용액에 유출된 물질은 주로 단백질이고 그 외에 탄수화물, DNA는 소량이라고 보고하였다. Quarmby 등(1999)은 초음파 처리한 슬러지의 회분 혐기소화에서 VFA 변화를 고찰하였으며, 초음파 처리에 의해 슬러지의 VFA 성분 변화에 대해 고찰한 보고는 아직 없는 것으로 알고 있다.

잉여 슬러지로 초음파 처리했을 때 초음파 강도가 높아질수록 VFAs의 양도 증가하여 슬러지 분해 및 가용화율이 증가함을 보여준다. pH는 6.7에서 6.3으로 약간 감소하는 경향을 보였다. 초음파 강도가 높아질수록 가용화율과 VFA농도가 증가되나 720 kJ/L이상의 조건에서는 VFA가 더 이상 증가하지 않아 Fig. 2의 COD 기준 가용화율과 같은 결과를 보였다. 즉, 초음파에 의해 슬러지에서 가용화되는 유기물은 일정하여 초음파 강도가 증가하더라도 어느 한계점 이상으로 가용화율은 증가하지 않는 것으로 판단된다.

Fig. 4는 초음파 처리하지 않은 잉여 슬러지와 초음파 처리한 슬러지의 VFA 조성을 보여주고 있다. 총 VFA는 초음파 처리 이전 300 mg/L에서 초음파 처리 이후 630 mg/L로 약 330 mg/L 정도 증가하였다. 초음파 전처리한 슬러지에서 부티르산과 발레르산 비율이 전처리하지 않은 슬러지에 비해 높아짐을 확인할 수 있다. 부티르산과 발레르산은 각각 탄소가 4개, 5개인 비교적 큰 유기산으로 슬러지의 유기물이 초음파에 의해 분해되는 과정에서 발생된 것으로 판단된다. 반면에 아세트산의 비율은 감소하였으나 전체 량으로는 초음파 처리로 약간 증가한 것을 확인할 수 있다.

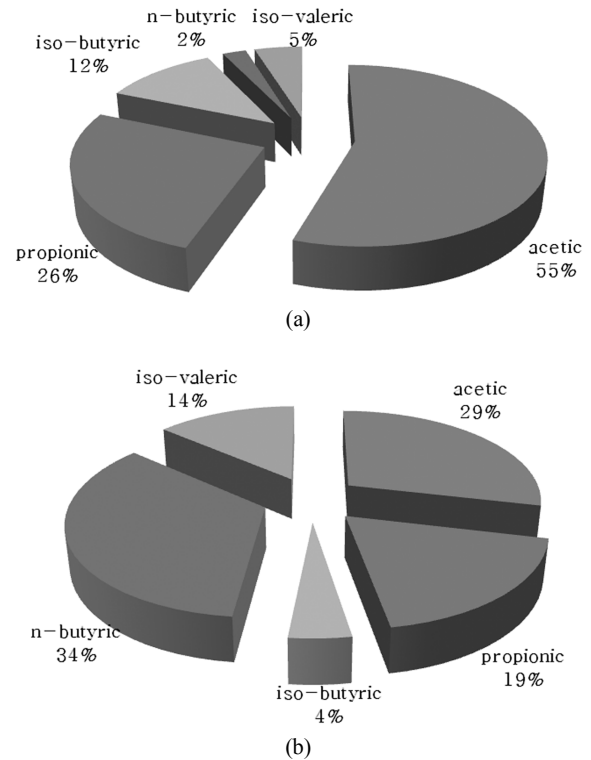


Fig. 4. Composition of volatile fatty acids (VFAs) in control sludge (a) and ultrasonically disintegrated sludge (b).

3.2. 슬러지의 회분 혐기성 소화

초음파로 전처리한 슬러지(가용화율16%)와 전처리하지 않은 대조 슬러지를 기질로 하여 serum bottle에 투입하여 18일간 회분 혐기성 발효하였을 때의 메탄 발생량을 Fig. 5에 나타내었다. 초음파 처리한 슬러지의 경우 회분 실험결과 약 4~5일 동안 메탄 발생이 급격히 증가하였고 그 이후에는 발생속도가 다소 낮아졌다. 이와는 대조적으로 전처리하지 않은 슬러지(control)는 약간의 지체시간을 두고 전 구간에서 걸쳐 완만한 메탄 발생량을 보여주었다. 전처리하지 않은 대조 슬러지의 최종 메탄발생량은 64.7 mL였고 초음파 처리한 슬러지는 84.5 mL였다. 최종 점종한 혐기 슬러지의 활성과 운전 조건이 동일한 상황이므로 이 결과는 기질의 특성 차이로 추론할 수 있다. 슬러지의 혐기성 소화에서 기질의 가수분해는 율속단계로 알려져 있으며 초음파

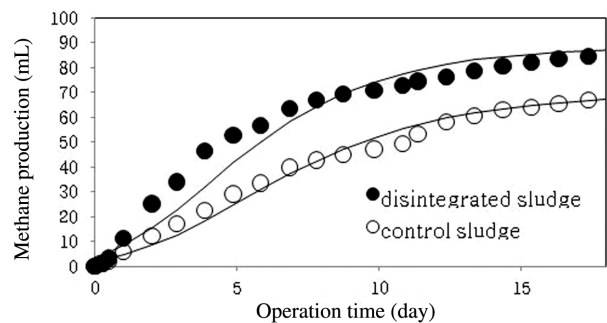


Fig. 5. Cumulative methane production from the batch anaerobic digestion of ultrasonically disintegrated sludge (sludge solubilization: 16%) and control sludge.

로 처리된 슬러지의 용해성 COD가 높은 것이 메탄 생산 속도를 증가시키는 요인으로 판단된다.

슬러지 혐기성 소화 실험의 결과해석을 위해 개선된 Gompertz 식(Zwietering et al., 1990)을 사용하여 Lay 등 (1997)의 방법에 따라 메탄 발생 가능량(P), 최대 메탄 발생속도(R_m), 그리고 지체시간(λ)을 Fig. 5의 자료로부터 Polymath®(Ver. 5.1)를 이용하여 비선형 회귀법으로 위의 매개변수를 추정하였으며 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 본 데이터 해석에 이용한 개선된 Gompertz 식은 다음과 같다.

$$M = P \cdot \exp\left\{-\exp\left[\frac{R_m \cdot e}{P}(\lambda - t) + 1\right]\right\} \quad (2)$$

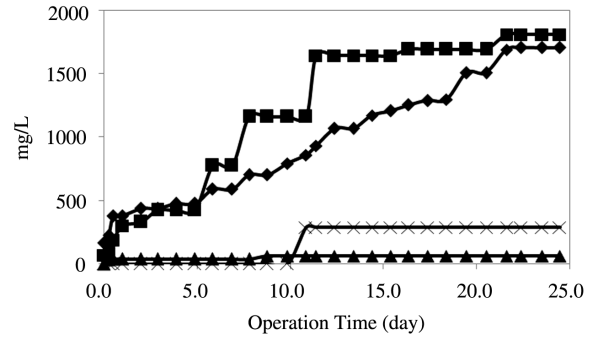
- M = 누적 메탄 발생량 (mL)
 P = 메탄 발생 가능량 (mL)
 R_m = 최대 메탄 생성 속도 (mL/day)
 λ = 지체시간 (day)

Table 2. Best fit parameters of the modified Gompertz equation from the anaerobic digestion of control sludge and ultrasonically treated sludge

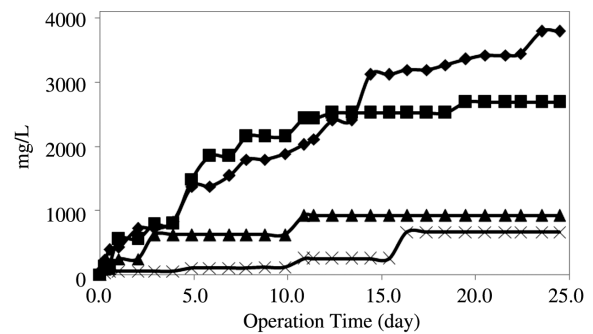
| | P (CH ₄ mL) | R_m (CH ₄ mL/day) | λ (day) |
|-------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| Control sludge | 70 | 6.4 | 1.2 |
| Ultrasonically treated sludge | 89 | 9.6 | 0.5 |

Gompertz 식에서 메탄 발생 가능량(P)은 시간이 경과함에 따라 메탄가스가 최대로 생성될 수 있는 값을 나타낸 것이며, 최대 메탄생성속도(R_m)는 메탄생성 속도가 최대가 되는 점에서 산출할 수 있다. 초음파 처리 슬러지의 메탄 발생 가능량은 대조 슬러지의 70 mL에서 89 mL로 27% 증가하였고, 최대 메탄 생성속도는 6.4 mL/day에서 9.6 mL/day로 50% 증가하였으며 지체시간은 1.2일에서 0.5일로 감소하였다. 따라서 총 메탄 생산 가능량은 증가하고 메탄 생산속도는 빨라져서 초음파로 전처리한 슬러지의 혐기성 소화 성능이 향상됨을 확인할 수 있다.

Jeong 등(2007)은 슬러지를 120°C에서 열처리하여 80 mL로 회분실험한 결과 메탄 발생 가능량이 220 mL, 최대 메탄생성속도는 28.9 mL/day, 지체시간은 0.5일의 값을 얻었다. Navaneethan (2007)은 슬러지를 190 W로 2시간 초음파 처리하여 메탄 발생 가능량이 105 mL, 최대 메탄생성속도는 6.5 mL/day, 지체시간은 2.6일의 값을 얻었다. 메탄생성속도나 발생 가능량이 슬러지 조성과 전처리 방법, 초음파 강도, 시료양 등에 따라 다른 결과를 보일 수 있음을 보여준다. 맹장우와 배재호(2009)는 250 mL serum bottle에서 초음파 처리한 슬러지의 회분실험을 수행하여 대조 슬러지에 비해 메탄 생성이 24.3% 증가함을 보고하였다. 회분실험 결과 VS 당 메탄 수율은 대조 슬러지의 경우 127 L/kg VS, 초음파 처리 슬러지의 경우 166 L/kg VS로 나타났고, 이는 실제 슬러지 혐기성 소화조에 비해서는 다소 낮은 값이다(Appels et al., 2008).



(a)



(b)

Fig. 6. Cumulative VFAs production of the batch anaerobic digestion of control sludge (a) and ultrasonically disintegrated sludge (b). (◆: acetic acid, ■: propionic acid, ▲: i-butyric acid, ×: n-butyric acid)

회분소화 실험이 진행되는 동안 각 반응조의 누적 VFAs의 변화를 Fig. 6(a)와 (b)에 나타내었다. 혐기성 소화 과정에서 나타나는 중요한 유기산은 아세트산과 프로피온산으로 전처리하지 않은 대조 슬러지의 경우 누적량이 각각 1705와 1808 mg/L에 달하였고 초음파 처리한 슬러지는 3799와 2691 mg/L에 달하였다. 초음파 전처리를 하였을 경우에 특히 아세트산 함량이 전처리 하지 않은 경우에 비하여 더 높아지는 것을 확인할 수 있다. 부티르산은 각각 353과 1583 mg/L로 역시 초음파 처리한 슬러지의 혐기성 소화 과정에서 더 높게 나타났다. 두 슬러지 공통으로 발레르산은 나타나지 않았다. 슬러지 혐기성 소화 과정에서 나타난 총 누적 유기산을 보면 전처리하지 않은 대조 슬러지가 3866 mg/L, 전처리한 슬러지가 8073 mg/L로 초음파로 전처리한 슬러지의 초음파 전처리한 경우에 VFAs의 생성 속도나 생성량이 높은 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 초음파로 전처리한 슬러지의 혐기성 소화에서 가용화율이 높은 슬러지의 휘발성 지방산(유기산) 생성속도가 높으며 이것이 메탄 생성속도도 증진시키는 것을 확인할 수 있다. 따라서 초음파로 전처리한 잉여 슬러지를 이용한 혐기성 소화조의 성능이나 효율이 더 높다는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

초음파에 의한 잉여 슬러지 전처리 효과가 혐기성 소화

에서 메탄 생성에 미치는 영향을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 초음파 처리 강도가 높아짐에 따라 슬러지 가용화율과 휘발성 지방산 농도가 높아진다.
- 2) 초음파 처리하여 가용화율이 16% 정도인 슬러지의 혐기성 소화 결과를 Gompertz식으로 구한 결과 메탄 발생 가능량은 대조 슬러지의 70 mL에서 89 mL로 27% 증가하였고, 최대 메탄 생성속도는 6.4 mL/day에서 9.6 mL/day로 50% 증가하였으며 지체시간은 1.2일에서 0.5일로 감소하여 초음파로 처리한 슬러지의 혐기성 소화 성능이 향상됨을 확인할 수 있다.
- 3) 슬러지 혐기성 소화 과정에서 초음파 처리한 슬러지의 높은 가용화율이 휘발성 지방산의 생성속도를 높이고 또한 메탄 생성속도도 증진시키는 것을 확인할 수 있다.

참고문헌

- 맹장우, 배재호(2009). 수리동력학적 및 초음파 캐비테이션 슬러지 전처리 장치의 비교 연구. *대한환경공학회지*, **31**(2), pp. 90-95.
- 손춘호, 홍승모, 이병현(2007). 산용해 및 초음파를 이용한 하수 슬러지의 산발효 특성. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(5), pp. 781-788.
- 안재환, 김미경, 배재호, 김희준(2007). 혐기성 소화효율 향상을 위한 초음파를 이용한 슬러지 전처리 및 ADM1 모의. *대한환경공학회지*, **29**(1), pp. 98-105.
- APHA, AWWA and WPCF (1989). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 17th edition, American Public Health Association, Washington D.C.
- Appels, L., Baeyens, J., Degreve, J., and Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Prog. Energy Combust. Sci.*, **34**, pp. 755-781.
- Bougrier, C., Albasi, C., Delgen'es, J. P., and Carr'ere, H. (2006). Effect of ultrasonic thermal and ozone pretreatment on waste activated sludge solubilization and anaerobic biodegradability. *Chemical Eng. Proc.*, **45**, pp. 711-718.
- Chu, C. P., Chang, B. V., Liao, G. S., Jean, D. S., and Lee, D. J. (2001). Observation on changes in ultrasonically treated waste activated sludge. *Water Res.*, **35**, pp. 1038-1046.
- Eastman, J. A. and Ferguson, J. F. (1981). Solubilization of particulate organic carbon during the acid phase of anaerobic digestion. *J. WPCF*, **53**, pp. 352-366.
- Jeong, T. Y., Cha, G. C., Choi, S. S., and Jeon, C. (2007). Evaluation of methane production by the thermal pretreatment of waste activated sludge in an anaerobic digester. *J. Ind. Eng. Chem.*, **13**, pp. 856-863.
- Koehler, L. H. (1952). Differentiation of carbohydrates by anthrone reaction rate and color intensity. *Anal. Chem.*, **24**(10), pp. 1576-1579.
- Lay, J. J., Li, Y. Y., and Noike, T. (1997). Influences of pH and moisture content on the methane production in high-solids sludge digestion. *Wat. Res.*, **31**(6), pp. 1518-1524.
- Lowry, O. H., Rosebrough, N. J., Farr, A. L., and Randall, R. J. (1951). Protein measurement with the Folin phenol reagent. *J. Biol. Chem.*, **193**(1), pp. 265-275.
- Metcalf & Eddy (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. 4th ed., McGraw-Hill, New York.
- Navaneethan, N. (2007). Anaerobic digestion of waste activated sludge with ultrasonic pretreatment, MS Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand
- Neis, U., Tiehm, A., and Nickel, K. (2002). Enhancement of anaerobic sludge digestion by ultrasonic disintegration. *Water. Sci. Technol.*, **42**, pp. 73-80.
- Owen, W. F., Stuckey, D. C., Healy, J. B., Jr., Young, L. Y., and McCarty, P. L. (1979). Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity. *Water Res.*, **13**, pp. 485-492.
- Quarmby, J., Scott, J. R., Mason, A. K., Davies, G., and Parsons, S. A. (1999). The application of ultrasound as a pre-treatment for anaerobic digestion. *Environ. Technol.*, **20**, pp. 1155-1161.
- Shimizu, T., Kudo, K., and Nasu, Y. (1993). Anaerobic waste-activated sludge digestion - a bioconversion mechanism and kinetic model. *Biotechnol. Bioeng.*, **41**, pp. 1082-1091.
- Tiehm, A., Nickel, K., and Neis, U. (1997). The use of ultrasound to accelerate the anaerobic digestion of sewage sludge. *Water Sci. Technol.*, **36**, pp. 121-128.
- Wang, F., Ji, M., and Lu, S. (2006). Components of released liquid from ultrasonic wasted activated sludge disintegration. *Ultrason. Sonochem.*, **13**, pp. 334-338.
- Zwietering, M. H., Jongenburger, I., Rombouts, F. M., and van't Riet, K. (1990). Modeling of the bacterial growth curve. *Appl. Environ. Microbiol.*, **56**, pp. 1875-1881.