

혐기성 소화효율 향상을 위한 초음파를 이용한 슬러지 전처리 및 ADM1 모의

안재환 · 김미경[†] · 배재호* · 김희준*

한국건설기술연구원 국토환경연구부 · *인하대학교 공과대학 환경토목공학부

(2006년 11월 1일 접수, 2007년 1월 10일 채택)

Ultrasonic Sludge Disintegration for Improving Anaerobic Digestion and Simulation of ADM1

Jae-Hwan Ahn · Mee-Kyung Kim[†] · Jae-Ho Bae* · Hee-Jun Kim*

Environment Research Department, Korea Institute of Construction Technology

*School of Environmental and Civil Engineering, Inha University

ABSTRACT : The objectives of this study were to demonstrate that enhanced anaerobic digestion could be achieved by adopting ultrasonic cavitation pretreatment on the basis of the biogas production and to compare the simulation results of ADM1(Anaerobic Digestion Model No. 1) with results of the experimentally operated digester. The ultrasonic pretreatment of sewage sludge showed the hindered effect on the dewaterability and the increase of SCOD production. In this study, four sets of lab-scale anaerobic digester were operated with untreated(control), 30 min, 60 min and 90 min ultrasonic pretreated sludge. TCOD removal efficiencies in digesters of control, 30, 60, 90 min sonicated sludge were 31.9%, 37.9%, 38.5% and 42.2%, and TS removal were 15.9%, 20.8%, 21.5%, 24.1% respectively. Also more biogas was produced gradually with the increased sludge loading and the pretreatment time. Overall the simulation results had a correspondence tendency with the experimental efficiencies.

Key Words : Anaerobic Digestion, ADM1, Ultrasonic Pretreatment, Biogas, CST

요약 : 본 연구에서는 초음파 cavitation을 이용한 슬러지의 전처리가 슬러지의 가용화와 혐기성 소화조의 운전효율에 미치는 영향을 바이오가스 생성을 중심으로 알아보고, 전처리의 효과를 ADM1(Anaerobic Digestion Model No. 1)을 이용하여 시뮬레이션 한 결과와 비교하였다. 실험결과, 초음파 전처리는 하수슬러지의 탈수성을 감소시키며 SCOD의 생성을 증가시키는 것으로 나타났다. 실험실 규모의 혐기성 소화조는 초음파 미처리 슬러지(control)와 30분, 60분, 90분간 처리된 슬러지를 대상으로 4 계열로 운전되었으며, 그 처리효율은 TCOD의 경우, 각각 31.9%, 37.9%, 38.5%, 42.2%의 제거효율을 나타내었다. 또한 TS의 감량효율은 각각 15.9%, 20.8%, 21.5%, 24.1%로 평가되어 전처리에 따른 제거효율의 증가를 확인 할 수 있었고, 슬러지 부하와 전처리 시간의 증가에 따라서 바이오가스의 생성량도 증가하는 것으로 나타났다. 슬러지 전처리에 따른 혐기성 소화조의 운전결과와 시뮬레이션 결과의 추이는 전반적으로 일치하는 경향을 나타내었다.

주제어 : 혐기성 소화, ADM1, 초음파 전처리, 바이오가스, CST

1. 서론

2004년 말 현재 전국에 가동 중인 하수처리장은 모두 268개소이며 하수처리공정에서 발생하는 폐슬러지는 연간 243만 톤에 달하고 이중 77%인 187만 톤은 해양 투기되며 소각 12%, 재활용 10%, 매립 1% 등으로 최종 처분되어진다. 처리비용은 연간 하수유입량 66억 톤을 처리하는데 소요되는 운영비가 약 4,687억원이 소요되며 이 중 슬러지처분 비용은 712억원으로 인건비를 제외한 하수처리장 운영비의 22%를 차지하고 있다.¹⁾ 또한 97년 폐기물관리법에 의한 슬러지 직매립 금지 조치에 따라서 그동안 매립되었던 슬러지 물량이 대부분 해양투기로 전환되었으나 2006년 3월에 발효된 런던

협약 '96의정서에 따라 유기성 슬러지의 해양배출 기준이 대폭 강화되었고, 해양수산부에서는 2012년부터 하수슬러지의 해양투기 금지를 위한 입법을 추진하고 있는 실정이다. 따라서 매립이나 해양투기와 같은 기존의 슬러지 처리방법을 대체할 수 있는 원천기술의 개발과 적용이 시급하다고 사료되며 이에 따른 정부의 구체적이고 현실적인 대책마련이 필수적이다. 정부의 '유기성오니 처리 종합대책'에 따르면 2011년부터 슬러지를 전량 육상처리하는 것을 목표로 하고, 슬러지의 재활용을 최우선으로 친환경적인 슬러지처리체계를 마련하고 이에 따른 제도정비와 함께 2010년까지 총 7,390억 원을 투자하겠다고 발표하였다. 이와 함께 감량화와 자원화를 포함하는 슬러지 처리 대안기술의 개발과 상용화가 필요한 때이다.

혐기성 소화공정은 유기물의 안정화 및 감량화, 병원균의 제거 등의 이유로 일반 하수슬러지의 처리에 가장 널리 쓰이고 있으며, 특히 소화 공정에서 발생하는 메탄가스는 화석연

[†] Corresponding author
E-mail: mkkim@kict.re.kr
Tel: 031-910-0617

Fax: 031-910-0291

료의 이용을 대체하여 온실가스를 저감하는 역할을 수행하지만, methanogenic bacteria의 성장속도가 매우 낮아 긴 체류시간이 요구되는 단점이 있다. 특히, 하수 슬러지의 혐기성 처리는 가수분해(hydrolysis), 산생성(acidogenesis), 메탄생성(methanogenesis)의 세 단계로 진행되며,²⁾ 2차 슬러지의 경우 가수분해반응이 전체 과정 중에서 율속단계인 것으로 알려져 왔다.^{3,4)} 또한 최근 연구에서는 혐기성 소화의 율속단계가 기질의 종류에 따라 달라진다고 보고되고 있으며,⁵⁾ 이에 따라서 가수분해속도를 증가시키기 위해 슬러지 전처리에 대한 많은 연구결과들이 발표되고 있다.⁶⁾ 이러한 전처리 기술들은 미생물의 세포벽과 세포막을 파괴하여 유기물질을 세포 밖으로 용출시키고 배출된 유기물질은 세포외부에 존재하는 효소에 의해 단위 분자로 쉽게 가수분해되어 혐기성소화 효율을 증가시키는 역할을 한다. 이러한 슬러지 전처리 기술로는 열, 효소, 오존, 산, 알칼리, 압력, 기계적 처리, 초음파 처리 등이 있으며, 두 가지 이상의 기술의 조합에 의한 연구 결과들도 발표되고 있다.⁷⁾

전술한 슬러지 전처리 기술들 중에서 초음파와 같은 물리적 처리기술은 처리과정 중 환경에 유해한 물질을 발생시키지 않는다는 장점이 있다.⁸⁾ 초음파 cavitation을 이용한 슬러지 전처리의 원리는 cavitation에 의해 액체 내부에 발생하는 cavitation 공동과 버블의 파괴로 순간적인 고온 고압 조건이 형성되고 이에 따른 충격파와 전단력에 의해 주변의 슬러지가 파괴되는 것을 이용한 기술이다. 즉 높은 음향 강도를 가진 초음파를 주사할 때, 초음파에 의한 에너지 투입이 물분자의 결합에너지를 넘어서면 부분적인 압력강하로 인하여 cavitation 발생하게 되는 것이다. 이 기술은 에너지 투입량이 높고 시설유지비가 비교적 높다는 단점이 있으나 슬러지 처리 효율이 높고 고품질 함량이나 점도의 영향을 비교적 적게 받는 장점이 있다.

본 연구에서는 초음파 cavitation을 이용한 슬러지 전처리가 슬러지의 가용화와 혐기성 소화조의 운전효율에 미치는 영향을 바이오가스의 생성을 중심으로 알아보고, 전처리의 효과를 ADM1(Anaerobic Digestion Model No. 1)⁹⁾을 이용하여 시뮬레이션 한 결과와 비교하였다.

2. 실험 방법

2.1. 초음파 cavitation 전처리

본 실험에서 초음파장치는 Sonics & Materials사의 VC-505 모델을 사용하였으며 이는 초음파 발생장치와 probe로 구성되어 있다. probe는 말단의 봉 지름이 13 mm 및 25 mm인 두 가지를 사용하였으며, 출력은 각각 25 W 및 38 W였고, 발생 초음파의 주파수는 Grönroos 등¹⁰⁾과 같이 20 kHz로 고정하였다. 또한 초음파 전처리의 정도가 혐기성 소화조의 효율에 미치는 영향을 알아보기 위하여 초음파 처리시간은 각각 0, 30, 60, 90분으로 달리하여 그 효율을 비교하였다.

본 연구에서 사용한 슬러지는 인천시에 위치한 승기 하수처리장에서 채취하였으며 농축슬러지를 실험대상으로 하였다. 승기하수처리장 슬러지의 일반적인 특성은 Table 1과 같다.

Table 1. Characteristics of sludges in Seunggi sewage treatment plant (unit: mg/L)

	Primary sludge	Waste activated sludge	Thickened sludge
TSS	6,100 ± 141	3,800 ± 141	23,320 ± 1,949
VSS	5,100 ± 424	3,150 ± 212	15,741 ± 1,837
TCOD	4,910 ± 53	3,708 ± 70	22,091 ± 617
COD	176 ± 7	99 ± 9	1,072 ± 88

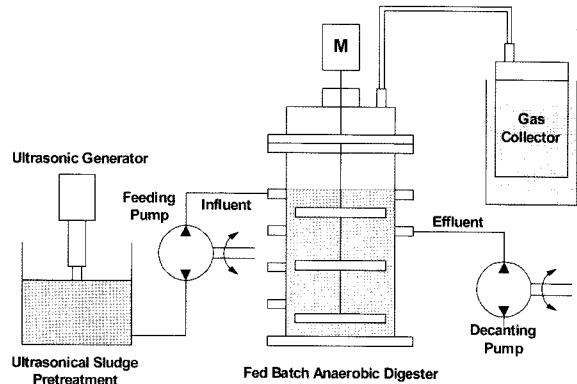


Fig. 1. A schematic diagram of experimental devices.

2.2. Lab-scale 혐기성 소화조 운전

슬러지의 전처리가 혐기성 소화에 미치는 영향을 분석하기 위하여 본 연구에서는 초음파 전처리 슬러지를 대상으로 실험실 규모의 혐기성 소화조를 운전하였다. 실험실 규모의 혐기성 소화조는 원통형의 아크릴 반응조로서 전체 반응조 용량은 7 L, 유효 용량은 6 L이며, 유입과 유출이 1일 1회 이루어지는 회분식 완전혼합형 반응조이다. 운전 초기의 고품질 체류시간은 20일이었으며 운전 시간이 경과함에 따라 12일, 9일로 감소시키며 그 영향을 관찰하였다. 발생 가스는 pH 1 이하로 조정된 NaCl 용액이 담긴 가스 포집조에서 포집하였다. 본 연구를 통해 운전된 초음파 전처리장치 및 혐기성 소화조는 Fig. 1과 같다.

2.3. 슬러지 전처리효과 비교를 위한 혐기성 소화조 모의

앞서 언급한 초음파 cavitation을 이용한 슬러지 전처리와 실험실 규모의 혐기성 소화조 운전결과를 모델링 결과와 비교 평가하기 위하여 실험과 동일한 조건에서 GPS-X(Hydromantis, Inc.)를 이용하여 ADM1을 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션에 필요한 인자는 운전 중인 실험실규모의 혐기성 소화조 운전 인자와 동일하게 입력하였으며 유입수 data는 전처리 전후의 슬러지 성분분석 data를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유입슬러지 특성

본 연구에 이용된 슬러지는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 그 성상의 변화가 매우 크며 이는 슬러지가 발생하는 선행의 하수처리과정 공정상의 특성, 요일 및 계절 등의 시간적인 요인과 운전상의 요인들에 기인하는 것으로 사료된다.

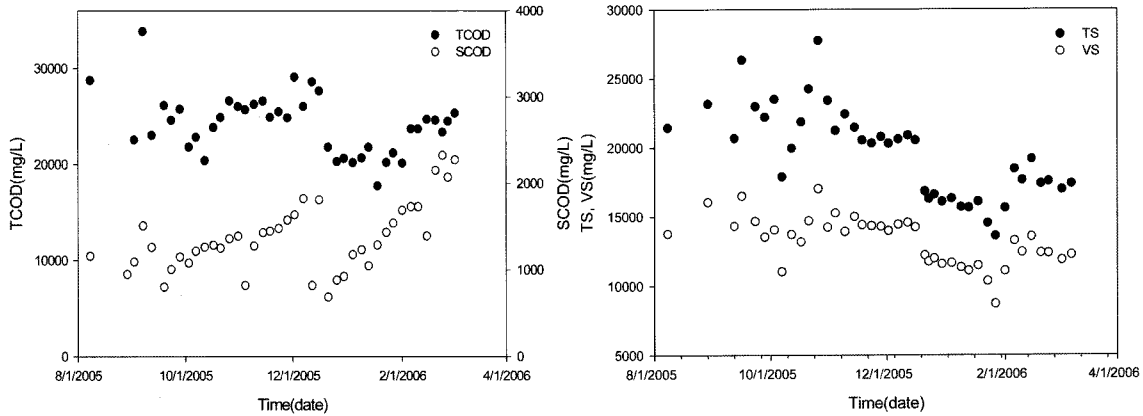


Fig. 2. Characteristics of the thickened sludge used in lab-scale ultrasonic pretreatment experiments.

3.2. 초음파 cavitation 전처리 실험 결과

본 연구에서는 슬러지 종류에 따른 가용화 효율 차이를 알아보기 위하여 농축슬러지, 1차 슬러지, 2차 슬러지를 대상으로 초음파 전처리 실험을 수행하였다. 가용화 효율에 영향을 미치는 슬러지 농도의 영향을 최소화하기 위하여 농축슬러지는 5배 희석하여 실험에 사용하였다.

Table 2는 세 가지 슬러지를 대상으로 한 초음파 처리에서 각 처리시간별 SCOD 증가분(Δ SCOD)과 VSS 감소분(Δ VSS)을 제시한 것으로, 반응시간동안 SCOD의 증가는 2차 슬러지에서 가장 크게 나타났고 VSS의 감소는 1차 슬러지에서 가장 크게 나타났다. 이 값들을 바탕으로 각 슬러지당 SCOD 평균 수율(yield)을 구하여 Fig. 3에 나타내었다. 여기서 SCOD 수율은 제거된 단위 VSS당 SCOD 증가량으로 정의하였다. SCOD 수율은 2차 슬러지에서 1.38 mg COD/mg VSS_{rem}의 가장 높은 값을 보였으며, 1차 슬러지의 경우에는 0.75 mg COD/mg VSS_{rem}의 가장 낮은 수율을 보였다. 이와 같은 SCOD 수율의 차이는 슬러지의 종류에 따른 조성의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 즉 2차 슬러지의 경우에는 대부분이 미생물로 구성되어 있으며, 단백질이나 DNA와 같은 고분자의 세포 물질이 초음파 처리의 결과로서 수중으로 용출되어 높은 SCOD 수율을 보인 것으로 사료된다.

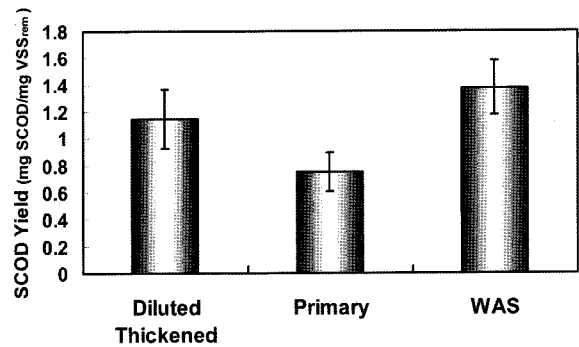


Fig. 3. SCOD yields of three different types of sludge.

Table 2. Production of SCOD and removal of VSS during ultrasonification (unit: mg/L)

Time (min)	Diluted Thickened Sludge		Primary Sludge		Wasted Activated Sludge	
	Δ SCOD	Δ VSS	Δ SCOD	Δ VSS	Δ SCOD	Δ VSS
30	799	550	499	650	801	600
60	1,192	1,050	954	1,200	1,568	1,050
75	1,449	1,000	992	1,300	1,642	1,450
90	1,614	1,450	1,039	2,000	1,946	1,750
120	1,689	1,750	1,594	2,600	2,592	1,550
150	1,799	1,900	1,966	2,200	2,766	1,850
180	2,009	2,050	2,289	2,500	2,866	2,050

서로 다른 강도의 초음파 전처리를 거친 슬러지를 대상으로 전처리의 차이가 슬러지의 탈수성과 입자크기 분포(particle size distribution, PSD) 등에 어떠한 영향을 주는지 고찰하였다. 슬러지 탈수성 실험결과, cavitation에 의한 전처리 시간이 길어질수록 탈수성은 감소하는 것으로 나타났다. 초음파 처리를 30분, 60분 및 90분 동안 행한 슬러지에 대하여 모세흡입시간(Capillary Suction Time, CST)으로 탈수성을 표현하여 초음파를 거치지 않은 슬러지의 탈수성과 함께 Fig. 4에 제시하였다. 초음파 처리를 한 슬러지는 초음파를 거치지 않은 슬러지에 비하여 탈수성이 급격히 나빠졌는데, 초음파를 거치지 않은 슬러지의 CST는 156초인 반면 가장 짧은 처리 시간인 30분 동안의 초음파 처리 후의 슬러지 CST는 814초로서 5배 이상 증가하였다. 또, 초음파 처리 시간이 길어질수록 탈수성은 조금씩 더 악화되는 것으로 나타나 90분 동안의 초음파 처리 후의 슬러지 CST는 930초로 30분 동안의 초음파 처리 후의 슬러지 CST 814초보다 116초 증가하였다. 이와 같이 초음파 전처리 후의 탈수성 악화는 입자크기 분포(particle size distribution, PSD)의 변화로서 설명이 가능하다. Fig. 5에서 볼 수 있는 바와 같이 90분 동안의 cavitation 전처리를 행한 슬러지에는 전처리를 행하지 않은 슬러지에서 보다 20 μ m 이하의 크기가 작은 입자의 개수 분포가 월등하게 많으며, 작은 크기의 입자 개수는 초음파 처리 시간이 길어질수록 더욱 증가하는 것을 알 수 있었다.

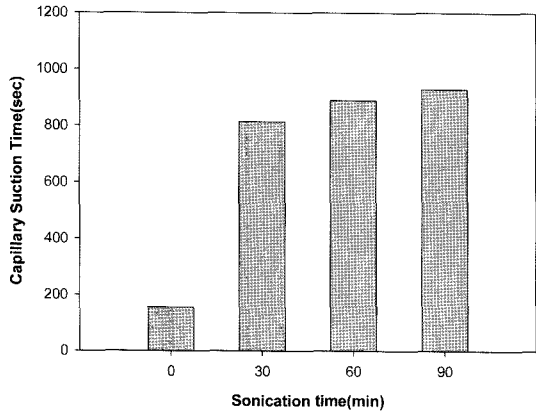


Fig. 4. Comparison of CST with ultrasonic pretreatment time.

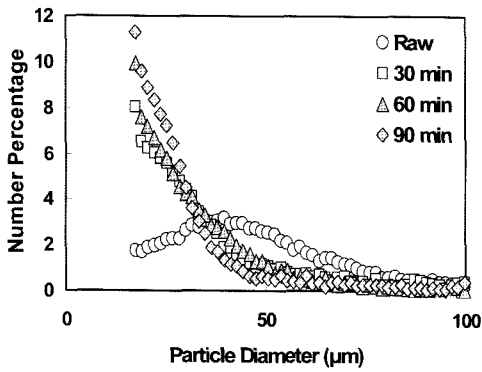


Fig. 5. Effect of the sonication time on the particle size distribution.

초음파를 이용한 슬러지 전처리의 결과를 아래 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. TCOD와 TS의 경우 본 연구에서 사용한 초음파 강도와 처리시간에서 초음파 전처리만으로는 감량화되었다고 보기 어려우며, VS의 경우에도 초음파에 의해 제거되었다고 보기에는 실험에 사용된 슬러지의 성상의 일간 변화가 매우 크다. 이는 확률도표(probability plot)를 이용하여 분석하면 그 경향을 훨씬 뚜렷하게 볼 수 있었다. 그러나 SCOD의 경우, 시간에 따른 증가를 확인할 수 있었다. 따라서 본 실험을 통하여 슬러지를 전술한 조건에서 초음파 처리를 하였을 경우, SCOD의 증가를 확인할 수 있었으며 슬러지 입자 크기의 감소와 더불어 CST의 감소를 확인할 수는 있었으나 TCOD 및 TS의 감량은 일어나지 않는 것으로 판단된다.

3.3. Lab-scale 소화조 운영결과

Lab-scale 혐기성 소화조 운전에서 사용된 대조군과 초음파 전처리된 슬러지의 성상을 아래 Table 3과 Fig. 7에 나타내었다. Data의 분석은 확률도표(probability plot)를 이용하였으며, data가 직선이 되도록 하기 위하여 세로축을 대수준급으로 나타내었다. 이를 통하여 중앙값(P = 50%)을 추정하여 산술평균을 대신하였다.¹¹⁾

앞서 수행한 초음파 전처리가 혐기성 소화에 미치는 영향을 알아보기 위하여 운전한 소화조의 운전 결과를 아래 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 2005년 8월 5일~2005년 10월 5일은 SRT 20일로 운전한 결과이며, 2005년 10월 7일~2006

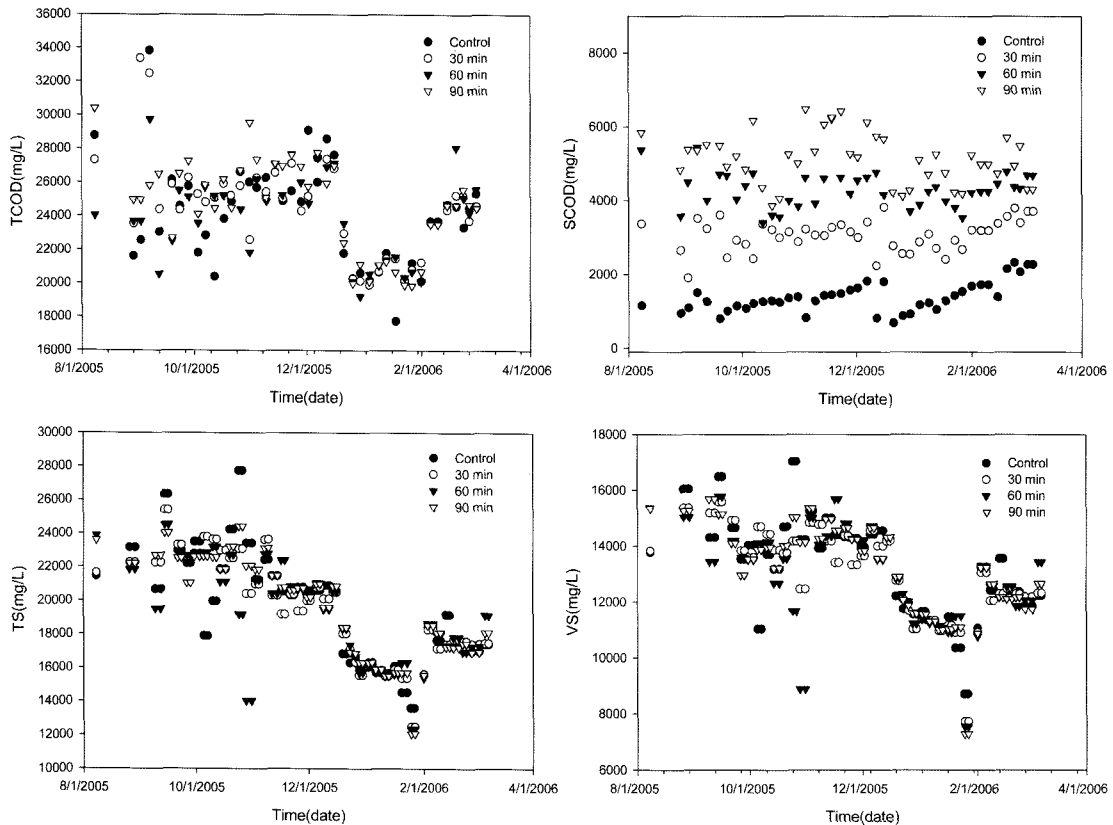


Fig. 6. Results of the ultrasonic pretreatment.

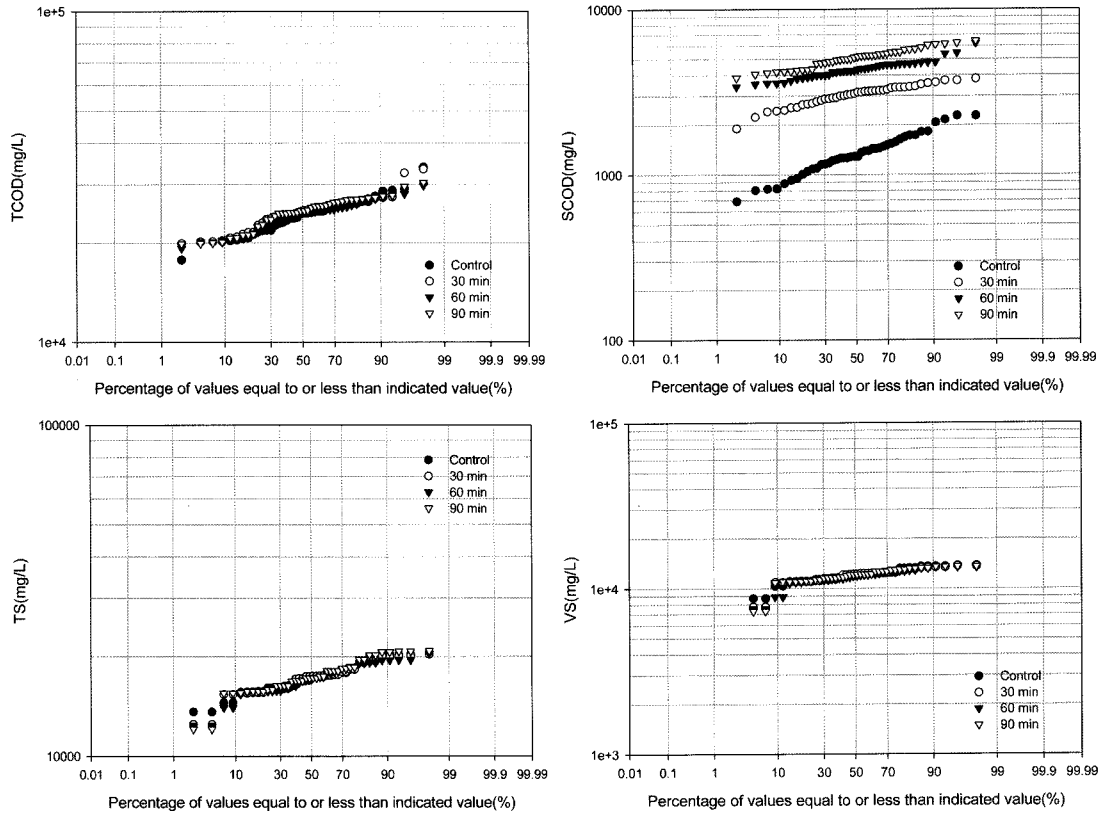


Fig. 7. Probability plots of ultrasonic pretreatment results.

년 2월 24일은 SRT 12일, 그 이후는 SRT 9일로 운전한 결과이다. 혐기성 소화조의 운전결과, TCOD의 경우에 control, 전처리 시간 30, 60, 90분의 제거효율은 각각 평균 31.9, 37.9, 38.5, 42.2%로 나타났으며, TS의 감량효율은 각각 15.9, 20.8, 21.5, 24.1%로 평가되어 전처리에 따른 제거효율의 증가를 확인할 수 있었다.

Fig. 9는 초음파 전처리 슬러지의 혐기성 소화조 운전결과, 전처리 시간과 SRT의 변화에 따른 휘발성 고형물 제거량을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 초음파 전처리 시간이 길어질수록 휘발성 고형물 제거량은 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 초음파 전처리의 시간이 길어질수록 슬러지 내 크기가 작은 입자의 개수가 늘어나 소화조 내에서 미

Table 3. Influent characteristics of the anaerobic digesters (unit : mg/L)

	Ultrasonic pretreatment			
	Control	30 min	60 min	90 min
TCOD	25,000* (20,300 ~ 33,850)**	25,400 (20,150 ~ 33,400)	25,100 (19,225 ~ 29,750)	26,000 (20,000 ~ 30,400)
SCOD	1,260 (689 ~ 1,824)	3,060 (1,908 ~ 3,828)	4,490 (3,410 ~ 6,215)	5,330 (3,865 ~ 6,475)
TS	20,900 (16,090 ~ 27,750)	21,600 (15,560 ~ 25,410)	21,000 (14,020 ~ 24,540)	21,860 (16,300 ~ 24,420)
VS	14,235 (11,040 ~ 17,030)	14,080 (11,030 ~ 15,590)	14,100 (8,880 ~ 15,780)	14,200 (11,590 ~ 15,680)

* median(P=50%), ** minimum ~ maximum

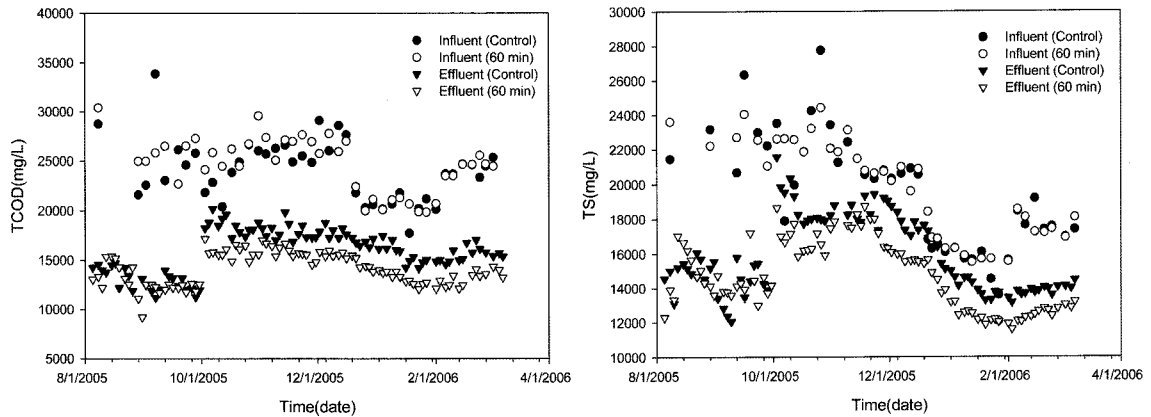


Fig. 8. Results of the anaerobic digestion with pretreated sludge(TCOD, TS).

생물 접근이 더욱 용이해졌기 때문인 것으로 판단된다. 또한 SRT가 짧아질수록 VS 제거량은 증가하였는데, 이는 짧은 SRT에서 슬러지 부하가 더 크기 때문이다.

Fig. 10은 전처리 시간이 서로 다른 슬러지를 유입수로 하는 실험실 규모의 소화조로부터 발생하는 소화가스량의 추이를 나타낸 것으로 전처리 시간이 길어질수록 발생 소화가스량은 증가하는 것으로 나타났으며, 이러한 경향은 슬러지 유입 부하가 늘어날수록 더욱 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다. SRT 20일로 운전된 기간동안의 평균 가스발생량은 control 1,388 mL/d, 초음파 30분 1,625 mL/d, 60분 1,655 mL/d, 90분 1,700 mL/d으로 분석되었으며, SRT 12일로 운전된 기간의 평균 가스발생량은 각각 1,844, 2,009, 2,271, 2,382 mL/d였고, SRT 9일은 2,945, 3,268, 3,471, 3,581 mL/d로 분석되었다. 즉, SRT 20일에서는 전처리에 따라 17.1~22.5%의 가스발생량이 증가되었으며, SRT 12일에서는 8.9~29.2%, SRT 9일에서는 11.0~21.6%가 증가되어 전처리에 따른 소화조 운전효율 증대를 확인할 수 있었다. 또한 전체 실험기간 동안 소화가스 중에서 메탄이 차지하는 비율 또한 전처리 시간이 길어질수록 증가하는 경향을 보였으며, 전처리를 하지 않았을 때의 메탄 함량은 약 60%, 90분의 전처리 후에는 약 68%로 분석되었다.

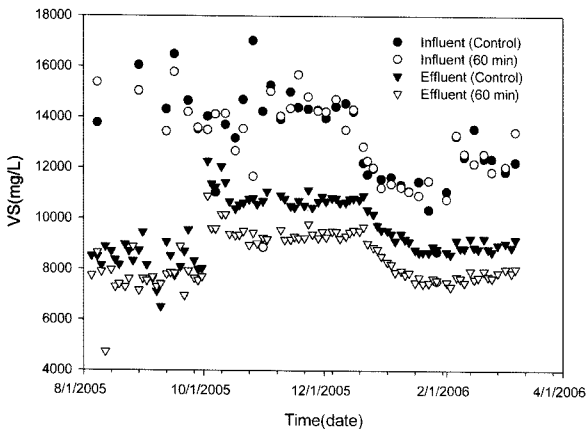


Fig. 9. Results of the anaerobic digestion with pretreated sludge(VS).

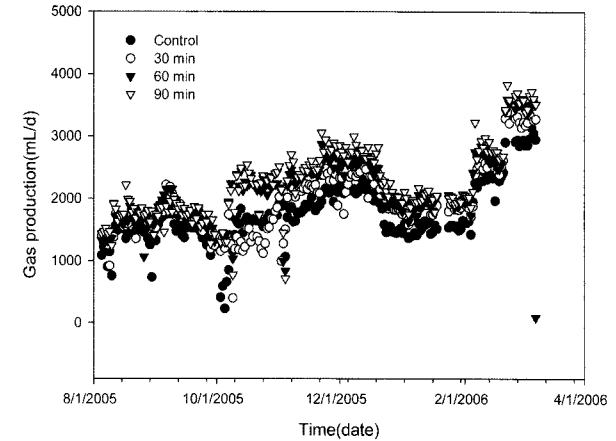
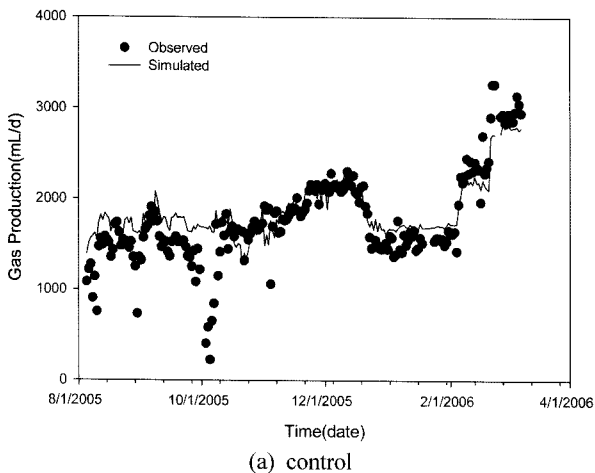


Fig. 10. Gas production during anaerobic digestion with pre-treated sludge.

3.4. 혐기성 소화조 모의 결과

슬러지 전처리에 따른 소화조 운전결과와 시뮬레이션 결과를 Fig. 11~12에 나타내었다. 전반적으로 실험결과와 시뮬레이션 결과의 추이가 일치하는 경향을 보이고 있으나, 실험 data와 비교하여 전처리 슬러지의 혐기성 소화 모의 시 가스발생량의 경우 오차가 약 15~23%가 발생하였으며, 특히 SRT 12일 운전 시 오차율이 더 크게 나타났다. 메탄발생량의 경우에는 그림에서 보는 바와 같이 18.4~30.6%로서 가스발생량의 경우보다 큰 오차가 발생하는 것을 볼 수 있다.

위와 같은 결과의 원인으로는 첫째, 실험실 규모의 혐기성 소화조 운전 시 발생하는 운전상의 오류이며, 두 번째는 모델에 입력한 많은 변수의 오류이다. ADMI은 총 19개의 생화학적인 반응들과 24개의 구성성분, 56개의 양론 계수 및 동역학적 상수와 물리화학적 반응 모델링을 위한 부분으로 구성되어 있다. 2000년 모델이 확정된 후 많은 연구를 통하여 보정되어왔으나 아직까지 많은 부분 가정과 생략에 근거하고 있으며 입력 변수의 최적값을 구하는 일이 쉽지 않다. 따라서 향후 많은 연구를 통하여 이를 개선하여야 할 것으로 사료된다.

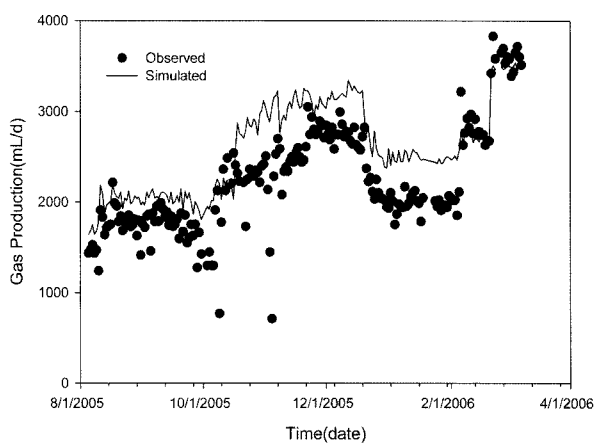


Fig. 11. Comparison of gas production between a lab-scale anaerobic digester and simulation output.

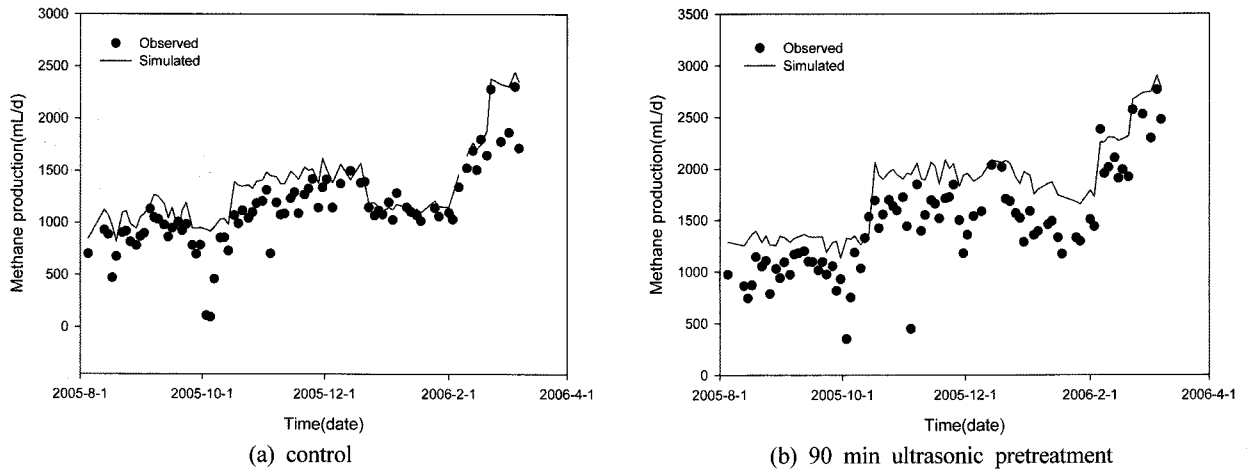


Fig. 12. Comparison of methane production between a lab-scale anaerobic digester and simulation output.

4. 결론

1) 초음파를 이용한 슬러지의 가용화 전처리 실험 결과, 전처리 시간이 길수록 크기가 작은 입자의 개수 분포가 증가하여 탈수성이 감소되는 것으로 나타났으며, SCOD Yield는 2차 슬러지가 1.38 mg COD/mg VSS_{rem}로서 가장 높은 것으로 나타났다.

2) 슬러지를 초음파 처리를 하였을 경우, SCOD의 증가를 확인할 수 있었으며 슬러지 입자 크기의 감소와 더불어 CST의 감소를 확인할 수는 있었으나 TCOD 및 TS의 감량은 일어나지 않는 것으로 판단된다.

3) Lab-scale 소화조 운영결과, TCOD의 경우, control, 전처리 시간 30, 60, 90분의 제거효율은 각각 평균 31.9, 37.9, 38.5, 42.2%로 나타났으며, TS의 감량효율은 각각 15.9, 20.8, 21.5, 24.1%로 평가되어 전처리에 따른 제거효율의 증가를 확인할 수 있었다.

4) 또한 SRT 20일로 운전된 기간 동안의 평균 가스발생량은 control 1,388 mL/d, 초음파 30분 1,625 mL/d, 60분 1,655 mL/d, 90분 1,700 mL/d으로 분석되었으며, SRT 12일로 운전된 기간의 평균 가스발생량은 각각 1,844, 2,009, 2,271, 2,382 mL/d였고, SRT 9일은 2,945, 3,268, 3,471, 3,581 mL/d로 분석되어 슬러지 부하량의 증가 및 슬러지 전처리시간에 따른 가스발생량의 증가를 확인하였다.

5) 슬러지 전처리에 따른 소화조 운전결과와 시뮬레이션 결과의 추이는 전반적으로 일치하는 경향을 보이고 있으나, 오차가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 실험실 규모의 혐기성 소화조 운전 시 발생하는 운전상의 오류와 모델에 입력한 많은 변수의 오류에서 비롯되는 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 환경부 Eco-STAR Project 수행기관인 수처리선진화사업단(과제번호 : I2WATERTECH 04-5)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 환경부 홈페이지, '04년 하수종말처리시설 운영관리시태 분석, www.me.go.kr(2005).
2. Gorris, L. G. M., van Deursen, J. M. A., van der Drift, C., and Vogels, G. D., "Inhibition of propionate degradation by acetate in methanogenic fluidized bed reactors," *Biotechnology Letters*, **11**, 61~66(1989).
3. Bougrier, C., Albasi, C., Delgenès, J. P., and Carrère, H., "Effect of ultrasonic, thermal and ozone pre-treatments on waste activated sludge solubilization and anaerobic biodegradability," *Chemical Engineering and Processing*, **45**, 711~718(2006).
4. Tiehm, A., Nickel, K., Zellhorn, M., and Neis, U., "Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization," *Water Res.*, **35**(8), 2003~2009(2001).
5. Noike, G., Chang, J. E., Yaguchi, J. I., and Matsumoto, J., "Characteristics of carbohydrate degradation and the rate-limiting step in anaerobic digestion," *Biotechnology and Bioengineering*, **27**, 1482~1489(1985).
6. Wang, Q., Kuninobub, M., Kakimoto, K., I-Ogawa, H., and Kato, Y., "Upgrading of anaerobic digestion of waste activated sludge by ultrasonic pretreatment," *Bioresourc Technology*, **68**, 309~313(1999).
7. Chu, C. P., Chang, B., Liao, G. S., and Lee, D. J., "Observations on changes in ultrasonically treated waste-activated sludge," *Water Res.*, **35**(4), 1038~1046(2001).
8. Bien, J. B. and Wolny, L., "Changes of some sewage sludge parameters prepared with an ultrasonic field," *Water Science and Technology*, **36**(11), 101~106(1997).
9. Batstone, D. J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S. V., Pavlostathis, S. G., Rozzi, A., Sanders, W. T. M., Siegrist, H., and Vavilin, V. A., *Anaerobic Digestion*

Model No. 1(ADM1), IWA Publishing, London, UK (2002).

10. Grönroos, A., Kyllönen, H., Korpijärvi, K., Pirkonen, P., Paavola, T., Jokela, J., and Rintala, J., "Ultrasound assisted method to increase soluble chemical oxygen demand(SCOD) of sewage sludge for digestion," *Ultrasonics Sonochemistry*, **12**, 115 ~ 120(2005).
11. 전홍석, 이재준, 고광백, 환경통계학, 동화기술, 서울, pp. 75 ~ 85(1997).