

하수 일차슬러지의 세정산발효 특성에 대한 Microwave 전처리의 영향

권구호 · 이원식 · 민경석[†]

경북대학교 환경공학과

Effects of Microwave Irradiation for Elutriated Acid Fermentation of Sewage Primary Sludge

Koo-Ho Kwon · Won-Sic Lee · Kyung-Sok Min[†]

Department of Environmental Engineering, Kyungpook National University

(Received 16 April 2007, Accepted 18 June 2007)

Abstract

The performance of elutriated acid fermentation to evaluate the effects of microwave irradiation and pH control as pretreatment was investigated. The MW pH 7 reactor which was used the pretreated primary sludge as microwave irradiation was operated at pH 7 and 35°C. The EAF pH 9 reactor was operated at pH 9 and 35°C without pretreatment. The SCOD and VFAs production rate were 0.17 gSCOD/gVSrem. and 0.27 gVFAs as COD/gVSrem. in MW pH 7 reactor, 0.16 gSCOD/gVSrem. and 0.24 gVFAs as COD/gVSrem. in EAF pH 9 reactor, respectively. VS and Volume reduction were 54% and 48% in MW pH 7 reactor, 54.6% and 36% in EAF pH 9 reactor, respectively. A comparison of the microwave irradiation and controlled pH in elutriated acid fermentation showed that the former is more efficient in SCOD and VFAs production and it rises to slightly higher reduction in the volume of the sludge. In addition, E. coli. was not detected in the wasting sludge of MW pH 7 reactor. Based on the results, microwave irradiation appeared to be one of the viable options for generating class A sludge. According to the batch tests, sequencing batch test which was used the pretreated primary sludge as microwave was performed at pH 7 and 35°C, SCOD production was 0.16 gSCOD/gVSrem., VS reduction and volume reduction were 64% and 63%, respectively.

keywords : Elutriated acid fermentation, Microwave, Solubilization, Volatile solids reduction, Volume reduction

1. 서론

일반적으로 슬러지의 안정화 공정으로 VS(volatile solids)의 감량 및 Biogas의 생산이라는 장점을 가진 혐기성 소화공정이 널리 이용되어 왔다(Shimizu et al., 1993). 그러나 혐기성 소화 공정은 긴 HRT로 인해 큰 반응조를 필요로 하기 때문에 부지 면적이 큰 단점이 있다(Eastman et al., 1981). 가수분해 단계, 산형성 단계, 아세트산형성 단계, 메탄형성 단계를 거치는 혐기성 소화 공정의 반응단계에서 긴 체류시간은 전체 반응의 율속단계인 가수분해 단계로부터 기인한다(Li et al., 1987).

세정산발효는 혐기성 소화과정 중 고형물내 유기물의 산발효단계에서 생성되는 물질을 별도의 세정수를 사용하여 세정 유출시키는 산발효 공정이다. 세정유출수는 BNR(Biological Nutrients Removal)공정의 외부탄소원으로 이용될 수 있을 뿐만 아니라, 메탄발효에 이용될 수 있다.

각종 유기성 고형물의 가수분해 및 산생성 효율을 높이기 위하여 세정산발효를 이용한 다수의 연구 결과가 보고

되었다(박, 2004; 박 등, 2004; 배 등, 2005; 이 등, 2004, 2006; Min et al., 2006). 배(2003)는 세정산발효 반응조와 고율 메탄형성조인 UASB(Upflow Anaerobic Sludge Bed) 반응조로 구성된 ADEPT(Anaerobic Digestion Elutriated Phased Treatment) 공정을 이용하여 돈사폐수를 효과적으로 처리하였다. 또한 박(2003)은 다양한 온도(20°C, 35°C 및 55°C)와 pH 조건(7, 9, 11)하에서 각종 유기성 슬러지의 회분식 세정 산발효 실험을 수행하였는데, 35°C 및 pH 9에서 최적의 가수분해율 및 산생성율의 결과를 나타내었다. 박(2004)은 하수 일차슬러지를 이용하여 Pilot 규모의 세정산발효 반응조를 중온(35°C) 및 pH 9의 조건에서 운전한 결과, 운전모드별로 40~60%의 VS제거와 85~90%이상의 부피 감소를 나타내었다.

한편 슬러지 안정화 단계에서의 생분해 효율을 높이기 위해 Microwave를 이용한 슬러지 전처리에 대한 많은 연구가 수행되었다(Ewa, 2005; Hong et al., 2004; Jones et al., 2002; Menendez et al., 2002). 하수 슬러지는 높은 함수율 및 복합적인 물질로 이루어져 있으며, 높은 흡수성과 물의 쌍극성 모멘트 특성으로 Microwave에 의해서 단시간에 높은 온도로 가열된다(Banik et al., 2003; Pelle et al., 2001; Thostenson et al., 1999).

[†] To whom correspondence should be addressed.

ksmin@knu.ac.kr

이 등(2006)은 각종 하수 슬러지에 대한 Microwave의 영향에 대한 연구를 수행하였으며, Microwave의 조사시간(Irradiation time)이 증가할수록 각 슬러지의 온도 및 가용화율이 점차적으로 증가하는 경향을 보고하였다. 연구결과에 의하면, 최대 가용화율을 나타내는 Microwave 조사시간은 하수 및 공단폐수 일차슬러지의 경우 5분대, 잉여슬러지의 경우 7분대로 나타났으며, 조사에너지는 일차슬러지 및 잉여슬러지가 각각 1,080 및 1,512 kJ/L-sludge로 나타났다. 또한 Microwave를 5분 이상 조사했을 때, 총대장균 및 E.Coli 등 병원성 균이 사멸하는 것으로 나타나, 슬러지의 가용화 및 재이용 측면에서 Microwave의 적용 가능성을 연구 보고하였다. 그러나 실험은 회분식으로만 수행되었으며, 사용된 유입 하수슬러지의 낮은 VS/TS(0.46)로 인해 저조한 효율을 나타내었다.

본 연구에서는 VS/TS가 0.8이상인 하수 일차슬러지를 사용하여, Microwave의 적용 필요성 및 Microwave의 적용에 따른 하수 일차슬러지의 세정산발효 특성을 회분식 실험을 통해 평가하였다. 또한 회분식 실험에서 얻어진 연구결과와 이전의 연구(박, 2003; 이 등, 2006) 등을 분석·평가하여 최적으로 판단되는 조건(Microwave 처리 후 세정수 pH 7 이용)을 이용하여 연속식 실험(sequencing batch)을 수행하였다. 본 연속식 실험 결과는 세정산발효 공정 설계에 기초 인자로 이용될 수 있을 것이다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험장치

세정산발효 공정의 가용화율을 높이기 위한 전처리 단계로써 12.2 cm의 파장과 2,450 MHz의 주파수 및 최대전력 900 W인 Q사의 Microwave oven(Q 15, Canada)을 사용하였다.

후속공정으로 사용된 회분식 및 연속식 세정산발효 반응조의 모식도를 Fig. 1에 나타내었다. 세정산발효 반응조는 유효부피 1 L의 세정산발효조와 0.5 L의 침전조로 구성되었다. 세정율은 1 L/day 이었으며, 35°C로 유지되는 항온수조 및 항온실에서 운전되었다.

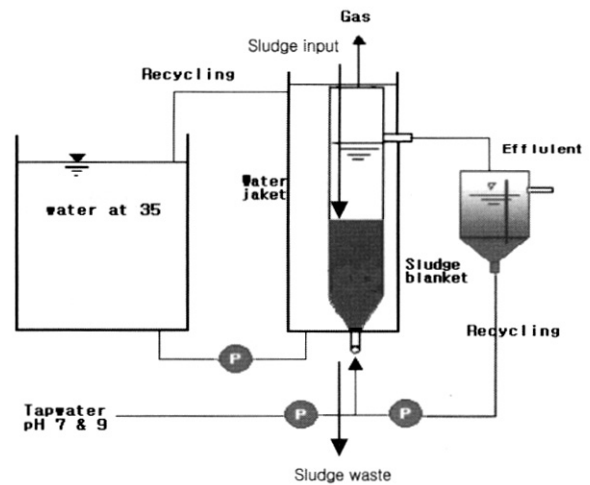


Fig. 1. Schematic diagram of elutriated acid fermentation reactor.

유입 하수일차슬러지의 성상 분석 자료를 Table 1에 나타내었는데, 유입슬러지는 대구광역시 B 하수처리장에서 채취하였다.

2.2. 실험방법

Microwave로 처리 또는 처리하지 않은 하수 일차슬러지를 세정산발효 공정으로 연계시켜 회분식 및 연속식으로 운전하였고, 각각의 운전조건을 Table 2에 나타내었다. 하수 일차슬러지에 대한 Microwave의 영향을 실험한 이 등(2006)의 연구 결과를 바탕으로 유입슬러지의 Microwave 처리 운전조건은 900 W의 전력량 및 조사시간 5분으로 하였다.

회분식 세정산발효 실험에서는 하수일차슬러지를 35°C의 증온에서 운전하였는데, Microwave로 처리를 한 경우는 세정수의 조건을 pH 7, 처리를 하지 않은 경우는 pH 9로 하였다.

연속식 세정산발효 실험에서는 세정수 유입 및 슬러지 반응으로 인한 상향유속을 0.27~0.29 m/hr로 유지하여 슬러지층의 교란이 발생하지 않도록 운전하였다. Microwave

Table 1. Characteristics of influent sludge

Mode	Parameter							
	Sludge	pH	TS	VS	TCOD	SCOD	NH ₄ ⁺ -N	S-P
Batch (MW pH 7, EAF pH 9)	Raw sludge	5.8	16,307	13,270	22,686	1,974	79.8	55.7
	After microwave irradiation	6.2	18,561	14,950	24,076	3,919	89	81.2
Sequencing batch (MW pH 7)	Raw sludge	6.0	15,230	11,090	27,810	1,940	81	59
	After microwave irradiation	6.3	15,480	12,380	29,500	3,640	91	79

Unit) mg/L except for pH

Table 2. Operation conditions

Mode		pH control	SRT (day)	Microwave irradiation time (min)	Temperature (°C)
Batch	MW pH 7	7	-	5	35
	EAF pH 9	9	-	Not	35
Sequencing batch		7	5	5	35

조사 영향에 대한 선행연구(이 등, 2006) 및 본 연구의 회분식 실험 결과를 고려하여 하수 일차슬러지의 가수분해 및 산발효 최적의 조건으로 Microwave의 조사시간을 5분 및 900 W로 하였다. 세정수의 pH는 7, 운전온도는 35°C, SRT는 5일로 운전하였다. 또한 매일 Microwave로 처리된 일정량의 하수 슬러지를 반응조 상단으로부터 유입시켰으며, 하단으로부터 폐기시켰다.

회분식 및 연속식 세정산발효조 실험에서 세정수는 수돗물을 사용하였으며, pH조절을 위해 회석된 NaHCO₃ 및 NaOH 용액을 이용하였다.

모든 시료의 분석은 Standard methods(APHA, 2005)에 준하여 실험하였으며, 분석항목은 pH, TKN, NH₄⁺-N, COD_{Cr}(total, soluble), T-P, PO₄³⁻-P, TS, VS, 증감속, 총대장균군, *E.Coli* 등으로 하였다. Acids(acetic, propionic, butyric, valeric, lactic acid 등)의 분석은 HPLC(Shimadzu Model LC-10AD, Japan)을 이용하여 측정하였고, 이를 위해 대상 시료는 4,000 rpm으로 15분간 원심분리 시킨 후 상정수를 채취하여 0.45 µm 여과지(Micron Separations, Inc.)로 여과하는 전처리 과정을 거쳐 측정하였다.

본 연구의 실험 결과에서 하수 일차슬러지를 Microwave로 처리한 후 세정수를 pH 7로 조정하여 세정산발효 공정에 연계시킨 경우 MW pH 7로 표기하고, Microwave 처리 없이 세정산발효로 운전한 경우는 EAF pH 9로 표기하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 회분식 세정산발효

3.1.1. 가용화

Fig. 2에 각 반응조건에서 유출되는 세정 유출수의 SCOD 누적량을 나타내었다. 회분식의 두 경우 모두 운전 시작 후 약 5일 동안에 전체 SCOD 용출량의 약 85~90%가 세정 유출되었다. 제거된 VS량에 대해 생산된 SCOD량의 비로 표현된 가용화율은 MW pH 7 및 EAF pH 9에서 각각 0.17 및 0.16 g SCODprod/gVSrem.로 유사하였다. 일반적인 산발효공정의 가수분해 단계에서는 pH가 높을수록 가용화율이 높아 SCOD의 생산량이 높은 것으로 연구 보고되었으나(Schell et al., 1998), 본 연구에서는 Microwave 처리에 의하여 가용화가 상당부분 진행되었기 때문에 세정수의 pH 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. Microwave를 적용할 경우 가용화율을 높이기 위한 세정수의 pH조절은 불필요한 것으로 사료된다.

유입된 슬러지의 VS 감소율은 MW pH 7 및 EAF pH 9

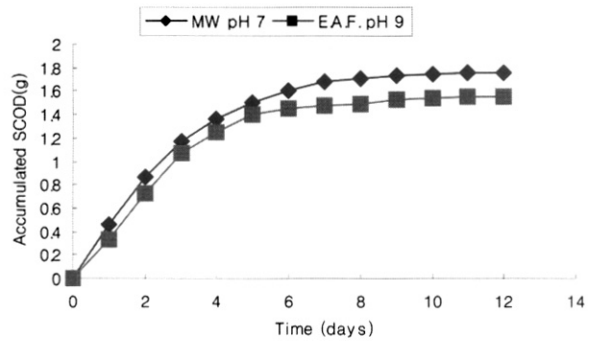


Fig. 2. SCOD production.

의 조건에서 각각 54% 및 54.6%로 유사하게 나타났다.

세정산발효를 거친 세정유출수의 pH는 두가지 반응조건에서 6.6~6.8의 범위로 나타났으며, 이러한 유출수의 pH 저하는 세정산발효 반응조에서 생성된 유기산에 의한 것으로 판단된다. 한편 가용화에 의한 영양염류의 용출도 관찰되었다. 제거된 VS량에 대한 영양염류의 용출량은 먼저 질소의 경우 MW pH 7 및 EAF pH 9의 조건에서 각각 0.05 및 0.04 gNH₄⁺-N/gVSrem.로 나타났으며, 인의 경우 두가지 반응조건에서 모두 0.01 gPO₄³⁻-P/gVSrem.로 나타나 유사하였다. 박(2003)의 연구결과에 의하면, 세정산발효에서 영양염류의 용출은 온도보다 세정수의 pH의 증가에 따라 증가하는 것으로 보고하였다. 그러나 본 연구에서는 pH의 영향보다 Microwave 처리에 의한 영향이 큰 것으로 나타났다.

3.1.2. 산생성

Table 3에는 각 회분식 실험 결과 세정 유출된 SCOD 중 회수된 VFAs(Volatile Fatty Acids)의 양과 그 회수율을 나타내었다. MW pH 7의 경우 가용화된 SCOD로부터의 VFAs 회수율이 약 82%로 높았지만, EAF pH 9의 경우는 약 73%로 상대적으로 낮았다. 박 등(2004)이 증온에서 하수 일차슬러지로 실험한 결과와 비교해 보면, pH 7 및 9에서 각각 89% 및 65%의 VFAs 회수율을 나타내었는데, 본 연구의 결과도 비슷한 경향을 보였다. MW pH 7 및 EAF pH 9의 조건에서 제거된 VS량에 대한 VFAs 생산량을 보면 각각 0.27 및 0.24 gVFAs as COD/gVSrem.로 MW pH 7의 경우가 EAF pH 9일 때보다 조금 높았다. 이는 pH가 낮은 조건에서 산발효가 촉진되었고, 또한 이미 가수분해 단계에서 SCOD의 생산량이 MW pH 7과 EAF pH 9에서 큰 차이를 보이지 않았기 때문인 것으로 사료된다.

생산된 VFAs의 조성을 보면, 대체적으로 acetate 및 valerate가 상대적으로 높게 생성되었다. 세정수 pH 7 및 9

Table 3. VFAs production

Mode	VFAs								VFAs recovery (%)
	Sludge	Formate	Acetate	Propionate	Butyrate	Valerate	Lactate	Total VFAs	
Batch	MW pH 7	0.09	0.35	0.23	0.1	0.5	N/D	1.25	82
	E.A.F pH 9	0.17	0.21	0.14	0.04	0.51	N/D	1.07	73
Sequencing batch	MW pH 7	0.020	0.086	0.007	0.022	0.019	N/D	0.154	77

Note) N/D : Not Detectable, Unit : g as COD

에서 생산된 VFAs의 조성비는 비슷하나, 제거된 VS량에 대한 acetate의 생산량을 보면, MW pH 7 및 EAF pH 9에서 각각 0.076 및 0.055 g as COD/gVSrem.로 나타나, pH가 낮은 조건에서 acetate의 생산이 촉진된 것으로 사료된다. Acetate 생산량이 높은 경우가 BNR공정의 외부탄소원으로 이용되기가 유리할 뿐만 아니라, 메탄발효에 효과적일 것으로 사료된다. 따라서 Microwave의 적용이 긍정적으로 사료된다. 그러나 MW pH 7과 EAF pH 9의 경우 모두 가용화 및 산생성율이 유사하므로, 실제 적용시 pilot plant test 등을 통하여 두 경우의 경제성 평가가 필요할 것으로 사료된다.

3.1.3. 슬러지 감량화

세정산발효는 유입된 슬러지의 VS성분이 SCOD로 가용화되는 과정에서 VS감량과 슬러지 농축효과가 동시에 발생된다(박, 2003). 본 연구에서도 가용화가 활발히 진행된, 운전 시작 후 5일 동안에 슬러지 계면의 감소 및 농축효과를 나타내었다. 유입된 슬러지에 대한 부피 감소율은 MW pH 7 및 EAF pH 9의 조건에서 각각 48% 및 36%로 MW pH 7이 높게 나타났다. MW pH 7의 경우, 세정산발효에 의한 부피 감소율은 38%로 EAF pH 9의 조건과 유사한 결과를 보였으나, Microwave에 의한 수분증발 및 VS감량으로 인해 전체적인 부피 감소율은 약 12%정도 높게 나타난 것으로 사료된다.

MW pH 7은 EAF pH 9와 비교하여 VS 감소는 큰 차이를 나타내지 않았으나, Microwave에 의한 수분 증발 및 VS감량으로 전체슬러지 부피감소율이 EAF pH 9보다 크게 나타나 슬러지 감량화면에서 보다 효과적일 것으로 판단된다.

3.1.4. 총대장균군 및 E.Coli의 변화

유입 및 최종슬러지의 총대장균군 및 E.Coli의 측정결과를 보면, 유입슬러지의 경우 총대장균군은 2.5×10^7 MPN/g of dry solid, E.Coli는 6.1×10^6 MPN/g of dry solid로 나타났다. 본 연구의 공정을 거친 최종슬러지의 경우 전처리된 MW pH 7의 경우 E.Coli는 검출되지 않았으며, 총대장균군만이 3.8×10^4 MPN/g of dry solid로 측정되었다. 반면, 전처리하지 않은 EAF pH 9의 경우 총대장균군 및 E.Coli가 각각 1.5×10^5 및 2.4×10^4 MPN/g of dry solid로 측정되

었다. MW pH 7의 경우 Microwave 처리의 효과로 병원성균이 모두 사멸되어 E.Coli가 검출되지 않은 것으로 사료된다. 그러나 후속 공정인 세정산발효단계를 거치면서 세정수의 유입 및 운전의 영향으로 총대장균군이 검출되었다.

MW pH 7의 최종슬러지는 미국 EPA의 biosolids class A 기준인 1,000 MPN/g of dry solids 이하의 분원성 대장균 검출 및 병원균 감소촉진 공정의 적용을 만족하는 것으로 사료되며, EPA에서 제시한 골프장, 정원, 묘목장, 공공장소 등에서 사용함으로써 슬러지의 재이용 측면에서 적용 가능성이 높을 것으로 사료된다. 또한 EAF pH 9의 최종슬러지는 class B의 기준인 2×10^6 MPN/g of dry solids 이하의 분원성 대장균 검출 및 병원균 취지공정의 적용을 만족하는 것으로 사료되며, 매립장의 처분이나 농립지에 적용이 가능할 것으로 사료된다(Metcalf et al., 2003).

3.1.5. 최종 슬러지의 중금속 함량

Table 4에는 각 회분식 실험에서 발생한 최종 슬러지의 중금속 함량과 하수슬러지의 비료공정 규격(농림부 고시 제1998-39)을 비교하여 나타내었다. 최종 슬러지에 포함된 중금속 함량은 Microwave의 전처리 여부 및 세정수의 pH에 관계없이 두가지 반응조건에서 유사하게 나타났다. 하지만 연속식 세정산발효 공정과 비교했을때, Cu, Cr 및 Hg의 함량에서 많은 차이를 나타내었다. 최종슬러지내의 중금속 함량은 반응조건(Microwave 전처리 및 세정수 pH)보다는 유입 슬러지의 특성에 크게 영향을 받는 것으로 사료된다.

MW pH 7 및 EAF pH 9의 최종슬러지에 대하여 농림부 비료규격의 중금속 기준량과 비교한 결과, 대부분의 항목에 대하여 기준량을 만족하였으나, Hg의 경우 전처리 여부에 관계없이 중금속 기준량을 초과한 것으로 나타났다. 최종슬러지에 대한 농경지의 비료 이용 또는 퇴비화 등의 재이용 측면에서 세정산발효의 단일 공정으로도 가능할 것으로 사료되나, Hg 처리의 문제점이 있는 것으로 나타났다.

3.2. 연속식 세정산발효

Fig. 3에 안정상태로 운전되는 반응조에서 세정 유출되는 유출수 및 폐슬러지의 SCOD의 양을 나타내었다. 유입기질의 변화에 따라 생산된 SCOD의 양은 다소 차이를 보였으

Table 4. Contents of heavy metals

Items	This study					Standards
	Batch test		Sequencing batch test			
	MW pH7	EAF pH9	1st.	2nd.	3rd.	
As	3.9	6.9	6.5	7	5.3	≤ 50
Cu	307.1	311.7	243	276	266	≤ 500
Cd	3.7	2.6	1.2	1.2	1.4	≤ 5
Pb	38.0	37.0	29	27	25	≤ 150
Cr	82.4	84.3	209	274	172	≤ 300
Hg	4.5	3.1	31	20	21	≤ 2
Org. Contents (%)	75	74	75	77	77	25% ≤
C / N	27.8	24	31	29	34	≤ 50

Unit) mg/kg except for Org.Contents and C/N

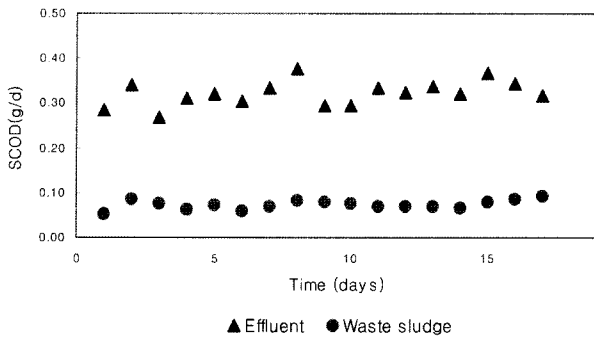


Fig. 3. Produced SCOD in sequencing batch test.

나, 운전시작 약 20일 이후부터는 안정된 운전 결과를 보였으며, 안정화된 이후부터 Fig. 3에 나타내었다. 제거된 VS량에 대한 SCOD의 생산량은 약 0.16 gSCOD/gVSrem.로 나타났다. 이는 회분식 실험의 결과인 0.17 gSCOD/gVSrem.보다 다소 낮은 결과이다.

또한 Table 3에는 세정 유출된 SCOD 중 회수된 VFAs의 양을 나타내었는데, 평균 VFAs 회수율은 약 77%로 회분식의 결과인 82%보다 낮은 것으로 나타났다. 연속식 세정산발효에서 SCOD 생산량과 VFAs 회수율이 낮은 이유는 회분식의 경우가 반응시간이 길었고, 누적발생량으로 조사하였기 때문이다. 제거된 VS량에 대한 VFAs 생산량은 0.11 gVFAs as COD/gVSrem.로 나타났는데, VFAs의 조성을 보면, acetate에 비해 propionate의 생산량이 적은 것으로 나타났다. 이는 세정수의 pH 7 조건에서 propionate가 acetate로 전환되었기 때문인 것으로 사료된다.

연속식 세정산발효에서 생산된 VFAs는 BNR공정의 외부 탄소원으로 이용될 수 있으며, 고율 메탄형성조인 UASB 등의 혐기성 소화 공정에서의 메탄 생산에 이용될 수 있을 것으로 사료된다. 세정유출수의 암모니아성 질소 및 용존성 인의 농도가 평균 75.5 및 17.5 mg/L로 높아 외부탄소원으로 주입 시 영양염류의 부하가 문제될 수 있으나, Ahn 등 (2006)의 실규모 산발효 연구 자료에 따르면, 세정산발효시 용출되는 영양염류의 부하량은 수처리 공정 유입수의 영양염류 부하량과 비교하여 극히 적은 것으로 분석하였다.

연속식 세정산발효 결과 폐기되는 슬러지의 VS 및 부피 감량화 정도를 보면, Microwave 전처리의 경우는 약 12%의 부피 감소 및 15%의 VS 감소 결과가 나타났다. 또한 전처리 후 세정산발효의 영향으로 약 57~60%의 부피 감소 및 55~57%의 VS 감소의 결과를 나타내었다. 이로써 Microwave 및 연속식 세정산발효를 실험한 본 연구에서 폐기되는 최종슬러지는 최초 유입슬러지의 약 64%까지 부피가 감소되었으며, 또한 63%의 VS 감소율을 나타내었다.

매일 폐기되는 최종 슬러지에서 *E.Coli*는 측정되지 않았으며, 총대장균군만이 평균 2.3×10^4 MPN/g of dry solid 정도 측정되었다. 최초 유입슬러지를 Microwave로 5분 조사 시 총대장균군 및 *E.Coli*가 모두 사멸하였으나, 후속 공정인 세정산발효를 거치면서 매일 공급되는 세정수 및 운전의 영향으로 총대장균군만이 측정된 것으로 사료된다.

Table 4에는 본 연구의 연속식 공정에서 폐기되는 최종

슬러지의 중금속 함량과 하수슬러지의 비료공정 규격(농림부 고시 제1998-39)을 비교하여 나타내었다. 중금속 함량 분석 결과 Hg만이 평균 24 mg/kg으로써 농림부의 비료공정규격 기준치인 2 mg/kg 미만의 기준을 만족시키지 못한 것으로 나타났다. 그 외 As, Cu, Cd, Pb, Cr의 기준치는 만족시키는 것으로 나타나 최종슬러지의 자원화 가능성에 있어 Hg 처리의 문제점을 나타내었다.

4. 결론

- 1) 회분식 세정산발효에서 가용화율은 MW pH 7 및 EAF pH 9에서 각각 0.17 및 0.16 gSCODprod/gVSrem., VS 감량은 각각 54% 및 54.6%, VFAs 생산량은 각각 0.27 및 0.24 gVFAs as COD/gVSrem.로 나타나 가용화율, VS제거 및 산생성율이 유사하였다. 실제 적용시에는 Microwave 처리와 pH 조절 중에서 어느 방법이 경제성이 있는가를 평가할 필요가 있을 것으로 사료된다.
- 2) 가용화된 SCOD로부터 VFAs 회수율은 MW pH 7과 EAF pH 9에서 각각 82% 및 73%로 나타나 pH가 낮아 산발효가 효과적인 MW pH 7이 상대적으로 높았다.
- 3) 회분식 세정산발효에서 유입된 슬러지의 부피 감소율은 MW pH 7 및 EAF pH 9에서 각각 48% 및 36%로 나타나 MW pH 7의 경우가 슬러지 감량화면에서 보다 효과적인 것으로 나타났다.
- 4) Microwave 처리가 적용된 세정산발효(MW pH 7 및 연속식)의 최종슬러지에서는 분원성 대장균은 검출되지 않았고 총대장균만 검출되었다. 이는 미국 EPA의 class A의 기준을 만족하는 것으로, Microwave 처리는 슬러지의 최종처분 및 재이용면에서 적용가능성이 높을 것으로 사료된다.
- 5) Microwave로 처리된 하수 일차슬러지의 연속식 세정산발효 결과, 가용화율 및 산생성량은 각각 0.16 gSCODprod/gVSrem. 및 0.11 gVFAs as COD/gVSrem.로 나타났으며, 폐기되는 최종슬러지의 부피 및 VS 감소율은 각각 64% 및 63%로 나타나, 슬러지 감량화면에서 효과적인 것으로 나타났다.
- 6) 하수 일차슬러지를 기질로 이용한 세정산발효에서 전처리로 Microwave의 적용(MW pH 7) 및 세정수 pH 조정(EAF pH 9)을 비교한 결과, Microwave로 전처리한 경우 가용화율, 산생성율 및 부피 감소율이 높게 나타나 효율적이었다. 특히 Microwave로 전처리한 최종슬러지에서 분원성 대장균이 검출되지 않아, 폐슬러지의 최종처분에 유리한 것으로 나타났다. 하지만 실제 적용시에는 pilot scale의 실험을 통한 검증단계를 거치는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

사 사

이 논문은 환경부의 환경기술인력양성지원사업으로 지원되었습니다.

참고문헌

- 농림부, 비료공정규격 (1998).
- 박소민, 유기성 슬러리의 가수분해 및 산발효, 경북대학교 석사학위논문 (2003).
- 박소민, 민경석, 안영호, 박종복, 하수일차슬러지의 세정 산발효, *대한환경공학회지*, **26**(2), pp. 219-225 (2004).
- 박순주, Pilot scale 세정산발효와 MAP공정을 이용한 하수 일차슬러지의 탄소원 회수특성, 경북대학교 석사학위논문 (2004).
- 배진연, ADEPT공정을 이용한 돈사폐수의 처리, 경북대학교 석사학위논문 (2003).
- 배진연, 민경석, 돈사폐수의 세정산발효시 온도와 전처리의 영향, *한국물환경학회지*, **21**(1), pp. 34-39 (2005).
- 이상협, 민경석, 하수 연계처리를 위한 음식물쓰레기 세정산발효에서 운전조건의 영향, *한국물환경학회 · 대한상하수도학회 공동추계학술발표회 논문집*, pp. 15-19 (2004).
- 이원식, 홍승모, 민경석, Microwave를 이용한 하수슬러지의 전처리 특성 및 회분식 세정산발효를 이용한 슬러지 가용화, *한국물환경학회지*, **22**(6), pp. 920-926 (2006).
- Ahn, Y. H. and Speece, R. E., Elutriated acid fermentation of municipal primary sludge, *Water Research*, **40**, pp. 2210-2220 (2006).
- APHA, AWWA, WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21th ed., Washington D.C. (2005).
- Banik, S., Bandyopadhyay, S. and Ganguly, S., Bioeffects of Microwave - a Brief Review, *Bioresource Technology*, **87**, pp. 155-159 (2003).
- Eastman, J. A. and Ferguson, J. F., Solubilization of Particulate Organic Carbon during the Acid Phase of Anaerobic Digestion, *JWPCF*, **53**(3), pp. 352-366 (1981).
- Ewa Wojciechowska, Application of Microwaves for Sewage Sludge Conditioning, *Water Research*, **39**, pp. 4749-4754 (2005).
- Hong, S. M., Park, J. K. and Lee, Y. O., Mechanisms of Microwave Irradiation Involved in the Destruction of Fecal Coliforms from Biosolids, *Water Research*, **38**, pp. 1615-1625 (2004).
- Jones, D. A., Lelyveld, T. P., Mavrofidis, S. D., Kingman, S. W. and Miles, N. J., Microwave Heating Applications in Environmental Engineering - a Review, *Resources, Conservation and Recycling*, **34**, pp. 75-90 (2002).
- Li, Y. and Noike, T., Characteristics of the Degradation of Excess Activated Sludge in Anaerobic Acidogenic Phase, *Jpn J. Wat. Poll. Res.*, **10**, pp. 740-795 (1987).
- Menendez, J. A., Inguanzo, M. and Pis, J. J., Microwave-Induced Pyrolysis of Sewage Sludge, *Water Research*, **36**, pp. 3261-3264 (2002).
- Metcalf & Eddy Inc, Tchobanoglous, G., Burton, F. L. and Stensel, H. D., *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*, McGraw-Hill publisher 4th, pp. 1447-1622 (2003).
- Min, K. S., Lee, M. J., Lee, J. Y., Yun, Z. W. and Choi, E. S., Energy Recovery with Combined Elutriated Acid Fermentation and UASB from Food Waste, *proceedings of the IWA 7th specialised conference, Small Water and Wastewater Systems*, Mexico (2006).
- Pelle, L., Jason, T., Bernard, W. and Jacob, W., Microwave Assisted Organic Synthesis - a Review, *Tetrahedron*, **57**, pp. 9225-9283 (2001).
- Schell, D., Nguyen, Q., Tucker, M. and Boynton, B., Pre-treatment of softwood by Acid-catalyzed steam explosion folled by alkali extraction, *Appl. Biochem. Biotechnol.*, pp. 70-72 (1998).
- Shimizu, T., Kudo, K. and Nasu, Y., Anaerobic Waste Activated Sludge Digestion - a Bioconversion and Kinetic Model, *Biotechnol. Bioengng.*, **41**, pp. 1082-1091 (1993).
- Thostenson, E. T. and Chou, T. W., Microwave Processing: Fundamentals and Applications, *Composites*, **30**, pp. 1055-1071 (1999).