

## Microwave를 이용한 하수슬러지의 전처리 특성 및 회분식 세정산발효를 이용한 슬러지 가용화

이원식 · 홍승모\* · 민경석†

경북대학교 환경공학과  
\*대우건설 기술연구소

## Solubilization of Sewage Sludge by Microwave Pretreatment and Elutriated Acid Fermentation

Won-Sic Lee · Seung-Mo Hong\* · Kyung-Sok Min†

Department of Environmental Engineering, Kyungpook National University

\*DAEWOO E&C CO., LTD Institute of Construction Tech.

(Received 4 August 2006, Accepted 23 October 2006)

### Abstract

This work elucidates the effects of pretreatment of the sewage sludge from wastewater treatment plant by microwave irradiation on elutriated acid fermentation. These experiments typically fell into two process; pretreatment as microwave irradiation and elutriated acid fermentation for hydrolysis and acidification as main process of primary sludge. The results of maximum solubilization rate of B, D primary and secondary sludge were 0.042, 0.086 and 0.15 gSCODprod./gICODin and the optimum irradiation time of microwave on 2,450 MHz and 900 W were 5 min. for primary sludge and 7 min. for secondary sludge. From batch tests on elutriated acid fermentation that was used the pretreated primary sludge as microwave, the optimum pH and HRT (hydraulic retention time) were 7 and 5 days at 35°C condition.

**keywords** : Elutriated acid fermentation, Microwave, SCOD, Solubilization

### 1. 서론

매년 수처리 시설의 증설이 계속됨에 따라 그 처리의 부산물로써 생성되는 슬러지의 발생량도 매년 빠른 속도로 증가하고 있다. 연간 발생하는 슬러지 중 하수 슬러지가 2,426천 톤이며, 적정 슬러지 처리 시설을 거친 폐슬러지의 최종 처분 방법으로는 해양배출이 77.1%, 소각 11.7%, 재활용 9.8%, 육상매립 1.4%로 2차 오염을 야기 할 수 있는 해양배출에 의존하고 있는 실정이다(환경부, 2005). 그러나 2003년부터 폐기물관리법에 의하여 유기성 슬러지의 직매립금지 조치가 발동되었고, 해양배출도 2006년 4월 '런던협약, '96의정서'에 의한 26개국에 모두 충족되어, 국제적 억제 정책으로 인해 조만간 금지될 위기에 처해있어, 슬러지를 효과적으로 감량화 및 자원화할 수 있는 기술개발이 시급한 실정이다.

가수분해 효율 및 생분해 효율을 높이고자, 슬러지 안정화 공정의 전처리 단계로 열에너지 처리(Baier, 1997), 오존산화 처리(Weemaes et al., 2000), 알칼리 주입 처리(Mukherjee et al., 1992), 기계적 처리(Nah et al., 2000), 초음파 처리(Chu et al., 2001; Tiehm et al., 2001), 전자

빔 처리(Martin et al., 2005) 등을 적용하여 슬러지의 안정화 및 감량화의 효율을 높이려는 많은 연구가 이루어지고 있다.

Microwave를 이용한 슬러지 전처리에 대한 많은 연구가 진행되고 있다(Ewa, 2005; Menendez et al., 2002; Jones et al., 2002). Microwave는 적외선과 공중파 영역 사이에 위치하며, 주파수가 300 MHz에서 30 GHz, 파장은 1 cm에서 1 m인 정합적이고 분극화되어 있는 전자기파이다(Laverghetta, 1996; 임 등, 2004). 이중 12.2 cm(2,450 MHz) 또는 33.3 cm(900 MHz)가 가정용 및 산업용의 가열용으로 사용되고 있다(Collin, 1985). Microwave에 의한 가열은 magnetron에서의 전자기장 형성과 유전체의 쌍극자 모멘트 및 전기전도 특성으로 대상 물질 내부의 분자 회전 및 마찰운동으로 인하여 재래식 가열과는 달리 선택적 가열, 내부부피 가열, 신속한 가열 등이 가능한 장점이 있다(Pelle et al., 2001; Banik et al., 2003).

하수 슬러지는 높은 함수율 및 유기물질, 광물질, 미생물의 세포 및 단백질 등의 복합적인 물질로 이루어진 특성 때문에 Microwave의 흡수가 쉽고, 물의 쌍극성 모멘트의 특성으로 인하여 Microwave에 의해서 단시간에 가열되는 특성이 있다(Thostenson et al., 1999). Hong 등(2004)은 분원성 대장균에 대하여 48~57°C까지 재래식 가열 및

\* To whom correspondence should be addressed.  
ksmin@knu.ac.kr

Microwave 조사에 의한 가열 결과, 재래식 가열이 균의 성장을 촉진시키는 반면 Microwave 조사는 균의 세포벽 손상 및 활성도를 낮추는 것으로 보고하였다. 이런 Microwave의 특성을 Non-thermal effects, Microwave effects, Specific effects 라고 한다(Banik et al., 2003).

박(2003)은 다양한 온도(20°C, 35°C 및 55°C)와 여러 pH 조건(7, 9, 11)하에서 각종 유기성 슬러지의 회분식 세정산발효 실험을 통하여 35°C 및 pH 9에서 최적의 가수분해율 및 산생성율을 나타내었다고 보고하였다.

본 연구에서는 하수 일차슬러지의 가수분해 효율을 증가시키기 위하여, 슬러지의 전처리로 사용된 Microwave의 영향과 적정처리 조건을 도출하고, 후속공정으로 회분식 세정산발효와 연계하여 세정수의 pH에 따른 슬러지의 감광화 및 가수분해, 산발효 효율을 조사하였다. 또한 하수 잉여슬러지의 감광화를 위하여 잉여슬러지의 미생물 flocc의 해체 및 세포벽 파괴를 목적으로 Microwave의 최적 조사시간을 조사하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 실험장치

하수 슬러지의 전처리 단계로써 각종 슬러지에 대한 Microwave의 영향을 알아보기 위하여 12.2 cm의 파장과 2,450 MHz의 주파수 및 최대전력 900 W인 실험용 Microwave oven(Q 15, Canada)을 사용하였다.

또한 후속공정으로 사용된 세정산발효 반응조의 모식도를 Fig. 1에 나타내었는데, 유효부피 1 L의 산발효조와 0.5 L의 침전조로 구성되었다. 세정율은 0.5 L/day였으며, 35°C로 유지되는 항온수조 및 항온실에서 운전되었다.

유입 슬러지의 성장 분석 자료를 Table 1에 나타내었다. 각 슬러지에 대한 Microwave의 영향을 알아보기 위한 회

분식 실험에서 사용된 시료는 대구시 B 하수처리장의 일차슬러지, D 하수처리장의 공단폐수처리 계열 일차슬러지 및 J 하수처리장의 잉여슬러지이며, 회분식 세정산발효 실험의 유입슬러지는 Microwave로 전처리한 B 하수처리장의 일차슬러지였다.

### 2.2. 실험방법

본 연구는 하수 슬러지에 대한 Microwave의 전처리 영향을 조사하기 위한 회분식 실험(MW test)과 Microwave로 전처리된 하수 일차슬러지를 세정산발효로 연계시킨 회분식 실험(MW + E.A.F. test)이었는데, 각각의 운전조건은 Table 2에 나타내었다.

MW test에서는 대기압에서 Pyrex vessel(500 mL)에 각종 슬러지 250 mL를 담아 2,450 MHz 및 최대전력 900 W의

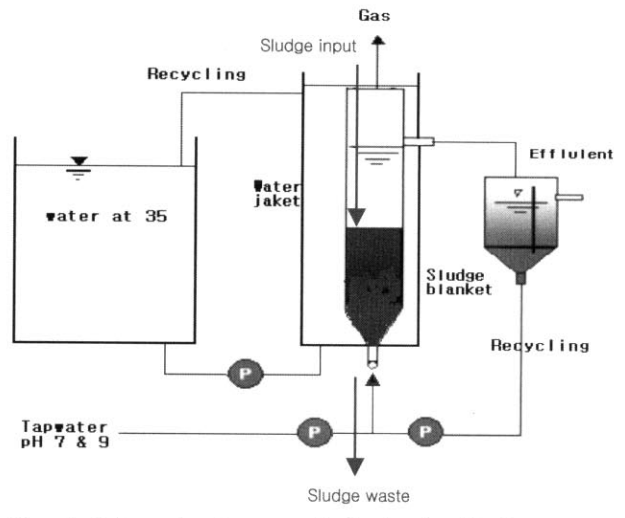


Fig. 1. Schematic diagram of elutriated acid fermentation reactor.

Table 1. Characteristics of influent sludge

Mode	Parameter		pH	TS	VS	TCOD	SCOD	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	S-P
	Sludge								
MW test	B Primary		6.0	15,110	12,007	25,300	1,762	109	29
	D Primary		7.2	30,453	17,653	32,402	1,080	94.2	59.8
	J Secondary		6.7	5,717	4,833	7,331	10.8	1.7	4.4
MW + E.A.F. test	pH 7		7.2	48,873	22,571	26,704	3,189	140.2	56
	pH 9		7.2	48,873	22,571	26,704	3,189	140.2	56

Note 1) MW : Microwave irradiation; E.A.F : Elutriated acid fermentation

Note 2) Sludge in MW+E.A.F. tests were pretreated as microwave

Unit) mg/L except for pH

Table 2. Operation conditions

Mode	Sludge	pH Control	Microwave Irradiation Time (min)	Elutriated Acid Fermentation
MW test	B, D Primary Secondary	Not	1 - 15	
MW + E.A.F. test	B Primary	7	5	⊙
	B Primary	9	5	⊙

Note) MW : Microwave irradiation; E.A.F : Elutriated acid fermentation

Microwave로 1~15분 동안 각각 조사하여 Microwave의 조사 시간에 따른 각 슬러지의 영향을 실험하였다.

회분식 세정산발효 실험에서는 일차슬러지를 Microwave로 5분간 조사하여 전처리한 후, 세정산발효조 유효부피의 50%에 해당하는 500 mL를 주입하였다. 세정수는 수돗물을 이용하였으며, NaOH를 이용하여 pH를 7 및 9로 조정하였다. 세정수는 슬러지층의 교란이 일어나지 않도록 반응조 하단으로부터 상향유속 0.27~0.29 m/hr 정도로 24시간 동안 연속적으로 순환 및 세정 유출시키는 방식으로 운전되었다. 이미 일차슬러지에 대한 세정산발효의 기초실험을 수행한 박(2003)의 연구결과에서 제시한 최적의 가수분해 및 산발효 효율을 참고하여 본 실험을 수행하였다. 증온(35°C) 및 세정수의 pH를 7 및 9로 한 것은 Microwave의 전처리로 세정수의 pH 조절의 필요성이 있는지를 조사하기 위함이었다.

모든 시료의 분석은 standard method(APHA, 1998)에 준하여 실험하였으며, 분석항목은 pH, TKN,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , CODcr (total, soluble), T-P,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ , TS, VS, 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 4000 rpm으로 15분간 원심분리 시킨 후 상정수를 채취하여 0.45  $\mu\text{m}$  여과지(Micron Separations, Inc.)로 여과하는 전처리 과정을 거쳐 측정하였다.

회분식 세정산발효에 의한 부피감소율은 초기 유입슬러지의 부피와 세정 유출이 끝난 시점에서 반응조에 남아 있는 부피의 차이를 이용하여 계산하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. Microwave에 의한 유기물의 특성 변화

Fig. 2에는 각 슬러지를 900 W의 Microwave에 의하여 1~15분 동안 조사하였을 때, 각 조사시간에 따른 가용화율을 나타내었다. 가용화율을 나타내는 방법에는 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 다음과 같이 나타내었는데, 최초 슬러지의 ICOD(Insoluble COD)량에 대한 Microwave에 의해 생산된 SCOD의 양으로 표현하였다.

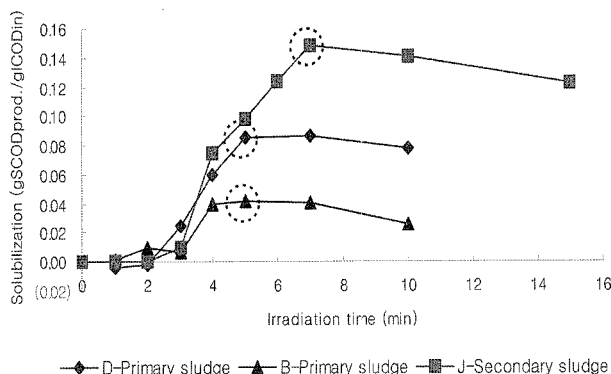


Fig. 2. Solubilization rate variation of sludge.

#### Solubilization Rate of Sludge

as Microwave irradiation

$$= \frac{\text{gSCODprod.}(\text{gSCOD after irradiation} - \text{gSCODin})}{\text{gICODin}}$$

최대의 가용화율 값을 보면, 슬러지의 종류 및 성상에 따라 차이는 있으나, 하수 및 공단폐수 일차슬러지의 경우 조사시간 5분대에서 각각 0.042 및 0.086 gSCODprod./gICODin를 나타내었고, 잉여슬러지의 경우 조사시간 7분대에서 0.15 gSCODprod./gICODin을 나타내었다. 이때의 Microwave 조사 에너지량은 일차슬러지 및 잉여슬러지의 경우 1,080 및 1,512 kJ/L-sludge로 나타났다. 일차슬러지와 잉여슬러지의 가용화율이 큰 차이를 보이는 이유는 슬러지 종류 및 성상의 차이에서 비롯된 것으로 사료된다. Microwave에 의한 가열 특성은 슬러지의 종류 및 성상 차이에 따라 분자간의 충돌과 마찰율이 달라지며, 이에 따라 열에너지로 전환되는데 필요한 가열시간이 달라져 일차슬러지와 잉여슬러지의 최적 조사시간이 다르게 나타난 것으로 사료된다. 또한 본 연구에 사용된 일차슬러지의 VS/TS 비가 잉여슬러지에 비해 매우 작아 VS에 포함된 Microwave에 의해 가용화가 가능한 성분이 상대적으로 적어, 가용화율 및 가용화에 소요되는 시간이 상이하게 나타나는 것으로 판단된다. 대체적으로 각 슬러지의 Microwave에 의한 가열온도가 조사시간 4분대 이상에서, 70°C이상의 온도로 가열되었고, 슬러지내 ICOD가 가용화되어 SCOD로 전환된 것으로 사료된다. 또한 일차슬러지 및 잉여슬러지의 경우 최적의 가용화율을 보인 각각의 조사시간 5분 및 7분 이후에는 가용화율이 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 Menendez 등(2004)의 연구결과와 같이 Microwave의 조사시간 증가에 따라 슬러지내의 탄소원이 CO 및 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> 등의 gas로 전환되었기 때문으로 사료된다.

Table 3에는 Microwave의 조사시간에 따른 가열온도 및 조사에너지, SCOD/COD의 값을 본 연구의 결과와 Park 등(2004)이 잉여슬러지를 Microwave(2,450 MHz, 700W)로 실험한 결과와 비교하였다. 본 연구에서 사용한 전력량보다는 작으나, 대상 슬러지의 VS 농도가 약 19,210 mg/L로 Microwave 조사에 의해 가용화되는 유기성분이 많아 SCOD/COD의 값이 본 연구의 잉여슬러지에 대한 결과와 차이가 나는 것으로 사료된다.

이상의 결과로 볼 때, 하수 일차슬러지의 경우 Microwave 조사시간 5분 및 900 W의 전력량일 때 최적의 가용화율을 보였다. 이에 따라 회분식 세정산발효의 유입 슬러지에 대한 Microwave 조사의 전처리 조건을 동일하게 하였다.

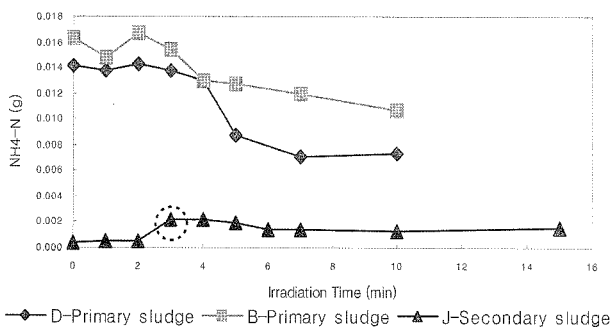
#### 3.2. Microwave에 의한 영양염류의 특성 변화

Fig. 3 및 Fig. 4에는 Microwave의 조사시간에 따른 각 슬러지의  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  및  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 의 변화를 나타내었다. 일차슬러지의 경우 조사시간이 3~4분 이상으로 증가하면서, 가열온도가 70~80°C이상으로 상승하고  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  및  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 가 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 결과는 먼저  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 경

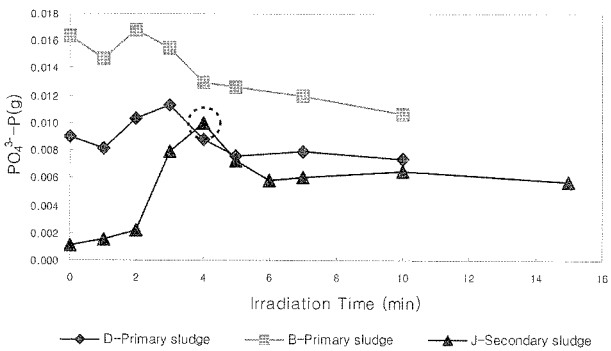
**Table 3.** Effect comparison of microwave irradiation of sludge disintegration

Microwave irradiation time (min)		Microwave irradiation energy (kJ/L-sludge)		Final temperature (°C)				SCOD / COD			
This study	Park	This study	Park	This study			Park	This study			Park
				B	D	J		B	D	J	
0	0	0	0	15.0	13.1	12.7	10.0	0.07	0.03	0.001	0.02
3	3	648	252	45.0	64.3	64.1	59.2	0.08	0.06	0.01	0.10
5	5	1,080	420	88.0	94.7	92.5	77.2	0.16	0.10	0.10	0.17
7	7	1,512	588	97.0	boiled	boiled	91.2	0.14	0.12	0.14	0.19
10	9	2,160	756	boiled	boiled	boiled	boiled	0.12	0.11	0.14	0.21
15	15	3,240	1,260	not	not	boiled	boiled	not	not	0.13	0.22

Note) B : primary sludge from B MWWT; D : primary sludge from D MWWT; J : secondary sludge from J MWWT



**Fig. 3.** Variation of  $NH_4^+-N$ .



**Fig. 4.** Variation of  $PO_4^{3-}-P$ .

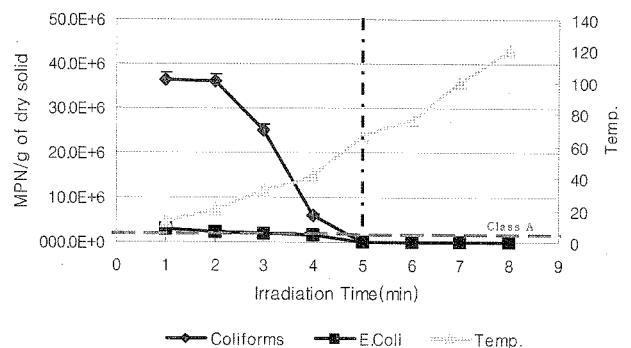
우, Microwave에 의한 하수슬러지 처리시 발생하는 gas의 조성을 연구한 Menendez 등(2004)의 연구결과와 같이  $N_2$  gas로 전환되어 제거되거나, pH 증가에 의한 stripping 현상에 의해 제거된 것으로 판단된다.  $PO_4^{3-}-P$ 의 경우, TP 농도는 Microwave 조사시간에 따라 일정 농도가 유지되는 것으로 보아 Microwave 조사에 의한 결합구조의 변화에 기인하여 감소하는 것으로 판단되며, 이에 대한 구체적인 연구가 필요한 것으로 나타났다. 잉여슬러지의 경우, 조사시간 2분대까지는 변화를 보이지 않았고, 3분 이상에서 가열온도가 약  $65^\circ C$ 로 되면서  $NH_4^+-N$  및  $PO_4^{3-}-P$ 가 급격히 증가하였다. 하지만 조사시간이 증가함에 따라  $NH_4^+-N$  및  $PO_4^{3-}-P$ 의 농도가 감소하는 경향을 나타냈으며 이러한 농도의 감소는 일차슬러지의 실험결과와 비슷한 기작에 의한 것으로 판단된다. 본 연구에서는 잉여슬러지에 대한 Micro-

wave 조사를 통해 미생물 flocc의 해체 및 세포벽 파괴에 의미를 두며, 이렇게 처리된 잉여슬러지를 생물반응조로 유입하여 발생하는 슬러지의 감량화에 그 목적을 두고 있다. 그러므로  $NH_4^+-N$  및  $PO_4^{3-}-P$ 의 농도가 감소하는 경향에 대한 구체적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

### 3.3. Microwave에 의한 총대장균군 및 E.Coli의 특성 변화

Fig. 5에는 Microwave 조사 시간에 따른 하수슬러지에 대한 총대장균군 및 E.Coli의 변화에 대하여 나타내었다. 조사시간이 증가함에 따라 총대장균군 및 E.Coli의 수가 점차 감소하는 경향을 나타내었고, 조사시간 5분대에서 가열온도가  $70^\circ C$ 이상으로 상승하고, 총대장균군 및 E.Coli가 모두 사멸하는 것으로 나타났다. 홍 등(2003)은 하수슬러지를 Microwave로 조사할 경우 병원성균의 감소 및 사멸에 대한 메커니즘을 3가지 반응으로 제시하였다. Microwave에 의하여 먼저 병원성균 bacteria의 세포벽 손상이 나타나고, 그에 따라 활동성이 급격히 감소하며, 마지막으로 DNA의 손상 및 변형이 시작된다고 보고하였다.

EPA는 하수처리장에서 발생하는 고형물이 안정화 공정에 의해 처리된 후 유익하게 사용될 수 있는 유기생성물을 biosolids라 정의하고, 그 질을 class A와 B로 구분하였다. 특히, class A는 병원균을 검출한계 이하로 줄이는 목적으로 1000 MPN/g of dry solids 이하의 분원성 대장균 검출



**Fig. 5.** Variation of Coliforms and E.Coli.

및 병원균 감소축진 공정 등이 적용되어야 하며, 골프장 및 정원, 묘목장 등의 사용에 안전한 등급을 의미한다. 본 연구의 결과 Microwave의 조사시간 5분대 이상에서 분원성 대장균의 대표종인 E.Coli가 모두 사멸함으로써 단독 또는 후속공정을 적용할 경우 Class A를 만족시켜 슬러지의 재이용 차원에서 긍정적이라 사료된다.

### 3.4. Microwave로 전처리된 하수 일차슬러지의 회분식 세정산발효

회분식 세정산발효를 위한 하수 일차슬러지의 Microwave 전처리 조건은 5분 및 900 W의 전력이었다.

Fig. 6에는 세정수의 pH 7 및 9의 조건에서 유입슬러지의 ICOD에 대한 SCOD의 생산량을 나타내었다. 세정수의 pH가 7 및 9의 조건인 두 경우 모두 전체 운전기간 중 약 5일 동안에 전체 SCOD 용출량의 약 80~85% 이상이 세정 유출되었다. 전체 용출된 가용화량은 세정수의 pH 7 및 9에서 각각 0.19 및 0.16 g SCOD/g ICOD로 나타났다. 박(2003)의 선행연구 결과와는 달리 세정수의 pH 7 및 pH 9에서 SCOD의 생산량이 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 박 등(2004)이 일반적인 세정산발효를 수행한 경우, 가수분해 단계에서는 pH가 높을수록 가용화율이 높아 세정유출수의 SCOD 생산량이 높은 것으로 연구 보고 되었으나, 본 연구에서는 전처리에 의하여 이미 슬러지의 가용화가 시작되었기 때문에 세정수의 pH 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 후속공정에서는 세정수의 유입 및 반송에 의하여 생산된 SCOD가 가수분해와 더불어 병행된 것으로 사료되며, 이는 Microwave로 전처리할 경우 세정수의 높은 pH가 요구되지 않는 것으로 사료된다.

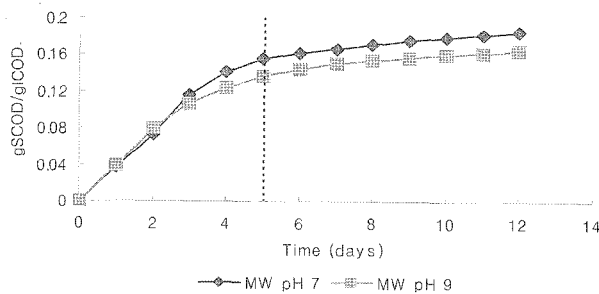


Fig. 6. Accumulated SCOD production

Table 4에는 각 회분식 실험 결과 세정 유출된 SCOD 중 회수된 VFAs(Volatile Fatty Acids)의 양과 그 회수율을 나타내었다. 세정산발효 반응의 결과 가용화된 SCOD로부터의 VFAs 회수율이 pH 7 및 9에서 모두 90%이상으로 높

았다. pH 7 및 9의 조건에서 유입슬러지의 VS에 대한 VFAs 생산량을 보면, 각각 0.08 및 0.06 gVFAs as COD/g VS<sub>fed</sub>로써 세정수의 pH가 7인 경우 9일 때 보다 다소 높은 VFAs 생산량을 보였다. 이는 pH가 낮은 조건에서 산발효가 촉진되고, 또한 이미 가수분해 단계에서 SCOD의 생산량이 세정수의 pH 7 조건에서 많았기 때문인 것으로 사료된다.

생산된 VFAs의 조성을 보면, 대체적으로 Formate의 생성량이 적고, Acetate가 상대적으로 높게 생성되었다. 안(2004)이 증온에서 하수 일차슬러지로 세정산발효한 결과를 보면, 세정수 pH 7의 조건에서 acetate:propionate:butyrate가 1.00:0.50:0.32이었고, 세정수 pH 9의 조건에서는 1.00:0.37:0.28이었다. 본 연구의 결과를 보면 세정수 pH 7 및 9의 조건에서 각각 1.00:0.65:0.37 및 1.00:0.85:0.32로 acetate의 생성량이 높고, butyrate의 생성량이 낮은 안(2004)의 연구결과와 비슷한 경향을 보였다. 세정수의 pH 7 조건에서 pH 9일 때보다 propionate의 생성 함량이 더 낮았는데, 이는 pH 7 조건에서 propionate가 acetate로 전환되었기 때문인 것으로 사료된다.

본 연구의 공정에서 생산된 VFAs는 BNR 공정의 질소 및 인 제거 기작에 필요한 외부탄소원으로 이용될 수 있으며, 고율 메탄형성조인 UASB(Upflow Anaerobic Sludge Bed) 등의 혐기성 안정화 공정에서 높은 효율의 CH<sub>4</sub> 생산에 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

회분식 세정산발효 결과 폐기되는 슬러지의 최종 부피 감소율은 세정수의 pH 7 및 9의 조건에서 모두 초기 유입 슬러지의 약 45%까지 감소하였으며, 특히 운전초기 5일 동안 세정수에 의한 슬러지내의 VS 성분이 SCOD로 가용화되면서 나타나는 농축의 효과로 점차적으로 부피가 감량된 것으로 나타났다. 또한 Microwave 전처리 시 수분 증발로 약 12%의 부피 감소율을 나타내었다. 이에 따라 하수 일차 슬러지를 Microwave로 전처리한 후 세정산발효로 연계할 경우, 최초 유입슬러지의 약 52%까지 부피가 감소되었다.

Microwave 전처리 및 회분식 세정산발효 결과 VS 감소율은 pH 7 조건에서 15%로 나타났다. 이는 박 등(2004)의 VS 제거율 33% 보다는 저조한 것으로 나타났는데, 본 연구에서는 유입슬러지의 VS/TS가 0.46으로 박 등(2004)의 0.54 보다 낮았기 때문인 것으로 사료된다. 유입슬러지의 VS/TS가 일반적인 하수 일차슬러지의 경우와 같이 높으면, 더 높은 VS 제거 효율이 기대된다.

## 4. 결론

Table 4. VFAs production

Mode	VFAs								Total VFAs	VFAs Recovery (%)
	Sludge	Formate	Acetate	Propionate	Butyrate	Valerate	Lactate			
MW + E.A.F. test	pH 7	0.01	0.68	0.44	0.25	0.62	N/D	2.00	91.7	
	pH 9	0.01	0.60	0.51	0.19	0.43	N/D	1.75	90.2	

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

실험실 규모의 Microwave에 의한 슬러지 전처리 및 후속 공정으로 세정산발효 단계를 연계하여, Microwave 전처리의 적정 운전 인자와 세정산발효의 특성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Microwave의 전처리 특성에서 조사시간이 증가할수록 각 슬러지의 특성에 따라 온도 및 가용화율이 점차적으로 증가하였다. 하수 및 공단폐수 일차슬러지의 경우 5분간 조사하여 가용화율이 각각 0.042 및 0.086 gSCODprod./gICODin으로 나타났으며, 잉여슬러지의 경우 7분간 조사하여 0.15 gSCODprod./gICODin로 최대 가용화율을 보였다. 이때의 조사에너지는 일차슬러지 및 잉여슬러지가 각각 5분 및 7분에서 1,080 및 1,512 kJ/L-sludge로 나타났다.
2. 잉여슬러지의 경우 Microwave 조사 시간 3분대에서  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  및  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 의 농도가 급격히 증가하였다. 이는 Microwave로 인하여 미생물 floc이 해체되고, 세포벽이 파괴된 것으로 사료되며, 세포벽이 파괴된 잉여슬러지는 하수처리장 생물반응조로 유입되어 슬러지가 감량화 된다.
3. Microwave의 조사시간 5분대에서부터 가열온도가 70°C 이상으로 증가하고, 총대장균군 및 *E.Coli*가 모두 사멸하는 것으로 나타났다. Microwave로 처리된 biosolids는 EPA에서 제시한 class A의 기준인 1000 MPN/g of dry solids 이하의 분원성 대장균 검출을 만족함으로써, 골프장 및 정원, 묘목장 등의 적용이 가능할 것으로 사료된다.
4. Microwave로 전처리된 하수슬러지의 세정산발효 회분식 실험 결과 세정수의 pH 7 및 pH 9 에서 SCOD 및 산생산량이 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 슬러지를 Microwave로 전처리 함으로써 높은 pH의 세정수가 필요하지 않는 것으로 사료된다. 또한 생산된 VFAs는  $\text{CH}_4$  생산의 적용 및 BNR 공정에 있어 외부탄소원으로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.
5. 하수 일차슬러지를 Microwave로 전처리 한 후 세정산발효로 연계할 경우 최종 부피 감소율은 최초 유입슬러지의 약 52%로 나타났다. 그중 Microwave의 전처리에 의하여 약 12%, 세정산발효에서 약 45%의 부피감소율을 나타냈다. 이는 슬러지의 감량화 측면에서 매우 효과적인 것으로 사료된다.

## 사 사

이 논문은 환경부의 환경기술인력양성지원사업으로 지원되었습니다.

## 참고문헌

- 박소민, 유기성 슬러리의 가수분해 및 산발효, *경북대학교 석사학위논문* (2003).
- 박소민, 민경석, 안영호, 박종복, 하수일차슬러지의 세정산발효, *대한환경공학회지*, 26(2), pp. 219-225 (2004).

- 안영호, 도시하수 일차슬러지의 증온 세정산발효, *대한토목학회논문집*, 24(4B), pp. 357-362 (2004).
- 임지운, 홍성수, 이근대, 박성수, 화학공학에 마이크로파 에너지의 응용, *Korean Chem. Eng. Res.*, 42(5), pp. 485-493 (2004).
- 홍승모, 박재광, 이영옥, Mechanisms and Roles of Microwave Irradiation on Destruction of Fecal Coliforms in Sludge, *대한환경공학회 춘계학술연구 발표회 논문집*, pp. 80-87 (2003).
- 환경부, 하수도 통계 (2005).
- APHA, AWWA, WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th ed., Washington D.C. (1998).
- Baier, U., Thermal Inactivation of Plant Seeds in Sewage Sludge, *Water Sci. Technol.*, 36(11), pp. 197-202 (1997).
- Banik, S., Bandyopadhyay, S. and Ganguly, S., Bioeffects of Microwave - a Brief Review, *Bioresource Technology*, 87, pp. 155-159 (2003).
- Chu, C. P., Chang, Bea-Ven., Liao, G. S., Jean, D. S. and Lee, D. J., Observations on Changes in Ultrasonically Treated Waste-Activated Sludge, *Water Research*, 35(4), pp. 1038-1046 (2001).
- Collin, R. E., *Foundation for Microwave Engineering*, McGraw-Hill, New York (1985).
- 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).
- Laverghetta, T. S., *Practical Microwaves*, Prentice-Hall, New Jersey (1996).
- Martin, D. I., Margaritescu, I., Chirstea, E., Togoe, I., Ighigeanu, D., Nemtanu, M. R., Oproiu, C. and Iacob, N., Application of Accelerated Electron Beam and Microwave Irradiation to Biological Waste Treatment, *Vacuum*, 77, pp. 501-506 (2005).
- Menendez, J. A., Dominguez, A., Inguanzo, M., and Pis, J. J., Microwave Pyrolysis of Sewage Sludge: Analysis of the Gas Fraction, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 71, pp. 657-667 (2004).
- Menendez, J. A., Inguanzo, M., and Pis, J. J., Microwave-Induced Pyrolysis of Sewage Sludge, *Water Research*, 36, pp. 3261-3264 (2002).
- Mukherjee, S. R. and Levine, A. D., Chemical Solubilization of Particulate Organic as a Pretreatment Approach, *Water Sci. Technol.*, 26(9-11), pp. 2289-2292 (1992).
- Nah In Wook, Kang Yun Whan, Hwang Kyung Yub and Song Woong Ki, Mechanical Pretreatment of Waste Activated Sludge for Anaerobic Digestion Process, *Water Research*, 34(8), pp. 2362-2368 (2000).
- Park, B., Ahn, J. H., Kim, J., and Hwang, S., Use of Microwave Pretreatment for Enhanced Anaerobiosis of

- Secondary Sludge, *Proceedings of the IWA International Specialised Conference, Resources from Sludge: Forging New Frontiers*, Singapore, pp. 17-23 (2004).
- Pelle Listrom, Jason Tierney, Bernard Wathey and Jacob Westman, Microwave Assisted Organic Synthesis - a Review, *Tetrahedron*, **57**, pp. 9225-9283 (2001).
- Tiehm, A., Nickel, K., Zellhorn M., and Neis, U., Ultrasonic Waste Activated Sludge Disintegration for Improving Anaerobic Stabilization, *Water Research*, **35**(8), pp. 2003-2009 (2001).
- Thostenson, E. T. and Chou, T. W., Microwave Processing: Fundamentals and Applications, *Composites*, **30**, pp. 1055-1071 (1999).
- Weemaes, M., Grootaerd, H., Simoens F., and Verstraete, W., Anaerobic Digestion of Ozonized Biosolids, *Water Research*, **34**(8), pp. 2330-2336 (2000).