

# 이상 혐기성 소화 공정을 통한 슬러지 발생량 저감과 바이오가스 생산에 관한 연구 A Study on the Sludge Reduction and Biogas Production through a Two-phase Anaerobic Digestion Process

우미희 · 한기봉<sup>†</sup>  
Mi-Hee Woo · Gee-Bong Han<sup>†</sup>

가톨릭대학교 생명 · 환경공학부 청정환경연구소  
Department of Biotechnology and Environmental Engineering, Clean Environmental Research Laboratory,  
The Catholic University of Korea

(2009년 10월 26일 접수, 2010년 9월 30일 채택)

**Abstract :** We coordinated the experiments with ozone pretreatment and two-phase anaerobic digestion using solid-liquid separation to raise the efficiency of sludge volume reduction and obtained the following results. The pre-treatment with ozone reduced the solid concentration in the average of 8.3±2.0% TSS and 9.2±2.8% VSS. Of the organic material, TCOD decreased 5.1±2.4%, but SCOD showed 72±6.5% increased, which was due to destruction of the cell wall and dissolution of icell media by the powerful oxidative stress of ozone. During the two-phase anaerobic digestion process, we achieved the reduction of 21.5±3.4% TSS, 20.2±8.4% VSS, 32.1±7.9% TCOD and 22.1±7.2% SCOD in average. The maximum methane gas production were 177.6 mL per g TSS, 210.8 mL per g VSS, 127.0 mL per g TCOD and 1452.0 mL per g SCOD, respectively. Solid material reduction through the two-phase anaerobic digestion and MLE (Modified Ludzack-Ettinger) processes were 93.8% of TSS and 92.0% of VSS. We concluded that suggested two-phase anaerobic digestion and MLE process could achieve the reasonable production of biogas and a maximum reduction of the sludge volume.

**Key Words :** Two-phase Anaerobic Digestion, Ozone Pretreatment, Sludge Volume Reduction, Biogas

**요약 :** 슬러지 감량 효율을 높이기 위해 오존전처리와 고·액분리조를 이용한 이상 혐기성 소화 공정 통해 다음과 같은 결과를 얻었다. 오존전처리를 통한 슬러지의 고형물 농도는 평균 TSS 8.3±2.0%, VSS 9.2±2.8%의 감소율을 나타내었다. 유기물 농도인 TCOD는 평균 5.1±2.4% 감소하는 반면 SCOD는 평균 72.0±6.5% 증가하였는데, 이는 오존으로 인해 세포내의 고분자 유기물이 용출되어 가용화되었기 때문이다. 이상 혐기성 소화 공정의 반응조별 소화가 진행됨에 따라 평균 TSS 21.5±3.4%, VSS 20.2±8.4%, TCOD 32.1±7.9%, SCOD 22.1±7.2%의 농도가 감소하였다. 최대 메탄생성량은 177.6 mL CH<sub>4</sub>/g TSS, 210.8 mL CH<sub>4</sub>/g VSS, 127.0 mL CH<sub>4</sub>/g TCOD, 1452.0 mL CH<sub>4</sub>/g SCOD이었다. 이상 혐기성 소화와 MLE 하수처리 공정의 연계처리 후 고형물 물질수지 결과 TSS 93.8%, VSS 92.0%의 감소율을 보였다. 이상 혐기성 소화 공정은 슬러지 처리 문제 해결과 신 재생에너지인 바이오가스 회수의 가능성을 보여줌으로서 향후 슬러지 감량에 해결책이 될 수 있을 것으로 사료된다.

**주제어 :** 이상 혐기성 소화 공정, 오존전처리, 슬러지 감량, 바이오가스

## 1. 서론

인구 증가 및 산업화로 생활수준의 향상과 더불어 오수의 발생량이 점차 증가하고 있다. 이에 따라 하수처리장이 증설되고 발생하는 하수슬러지도 증가하고 있는 실정이다. 환경문제에 대한 관심이 많아지면서 환경질 개선에 관한 요구가 계속적으로 증가하고 있으므로 하수슬러지의 처리는 반드시 고려해야할 사항이다. 우리나라의 슬러지 처리는 2000년 7월부터 시행된 하수 슬러지 육상매립 금지로 인하여 발생량의 68.5%를 해양투기에 의존해왔다.<sup>1)</sup>

그러나 2012년부터 런던 협약에 의해 하수슬러지의 해양 배출이 전면 금지되어 해양투기 비용이 급격히 증가하고 있다. 하수슬러지 해양배출 규제강화에 대비하여 2011년 말까지 하수슬러지 육상처리시설을 완비하여 해양배출 0%를 추진하기 위해 슬러지 처분과 슬러지 발생량의 감량화가

요구되고 있다. 국외의 경우 하수슬러지 처리시 해양투기에 의한 배출을 하지 않을 계획에 있으며 하수슬러지의 육상처리로 제거 또는 자원 재활용을 하는 등 다양하고 효과적인 슬러지 감량에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다.<sup>2)</sup> 따라서 국내의 경우도 친환경적 경제적인 하수슬러지 처리가 요구되고 있는 실정이다. 일차적인 문제인 슬러지의 처리를 해결하고 생분해성 유기물 함량이 많고 가용화 효율이 높은 하수슬러지를 사용하여 바이오가스를 대량으로 생산할 수 있는 가능성에 대해 주목하여 슬러지 처리의 경제성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

이러한 변화에 대응하여 본 연구에서는 첫째, 슬러지의 오존 전처리에 의한 가용화 영향을 알아보았다. 둘째, 이상 혐기성 소화에 의한 하수 슬러지 감량 효율과 바이오가스 발생량을 분석하였다. 셋째, 이상 혐기성 소화 공정과 후단에 연결된 MLE (Modified Ludzack-Ettinger) 하수처리 공정

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: geebhan@catholic.ac.kr Tel: 02-2164-4878 Fax: 02-2164-4765

에 대한 유입수 부하율에 따른 처리 효율과 슬러지 발생량을 알아보았다. 마지막으로 이상 혐기성 소화 공정과 MLE 하수 처리 공정의 연계처리에 대한 고형물 물질 수지를 분석하고 슬러지 배출 감량화의 가능성 여부를 찾고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 오존전처리 장치

0.10~0.16 g O<sub>3</sub>/g TS일 때 바이오가스의 생산의 속도가 촉진되며, 혐기성 소화 시 0.2 g O<sub>3</sub>/g TSS일 때 생분해율이 증가하였다.<sup>3,4)</sup> 본 연구에서는 연구 결과를 토대로 효율적이고 경제적인 오존 주입을 위해 슬러지의 농도에 따라 접촉 시간을 달리하여 균일한 오존이 접촉되도록 하였다. TSS 농도가 약 10,000 mg/L일 때 슬러지 1 L당 산소공급량 2 LPM, 오존 7.0 g/m<sup>3</sup>, 2시간 동안 주입하여 0.168~0.177 g O<sub>3</sub>/g TSS가 접촉될 수 있도록 하였다. 잉여슬러지의 전처리를 위해 오존발생기를 사용하였다. 산소발생장치(Oxygen Concentrator, NewLife, Elite)에서 생성된 순산소와 오존발생장치(AZCOZON HTU-500POGE)로 유입되어 이를 통해 생성된 오존을 슬러지와 접촉시켜 반응하였다. 고농도 오존 분석기(IN USA, HI-X)를 이용하여 오존 주입량을 분석을 하였으며, 잔류오존은 2% KI 용액으로 포집하여 제거하였다.

### 2.2. 반응조 구성

본 실험에 사용된 이상 혐기성 소화조의 실험 장치는 Fig. 1 과 같이 산생성 반응조와 메탄생성 반응조, 고·액분리조로 구성되었다. 산생성 반응조는 총 용적 5 L(유효용적: 1.81 L), 메탄생성 반응조 총 용적 6 L(유효용적: 4.42 L), 고·액분리조 총 용적 0.6 L(유효용적: 0.4 L)으로 구성하였다. 실험에 사용된 소화조는 원통형으로서 투명 아크릴 재질로 제작하였다. 이상 혐기성 소화조의 온도유지를 위하여 water bath를 이용하여 반응조 내부 온도를 35~38℃로 유지하여 중온소화로 운전이 되도록 하였다. 각 소화조 상부에는 모터를 설치하고 모터와 수직으로 연결된 교반날개를 소화조

내부에 설치하여 약 40 rpm으로 회전시킴으로서 소화조 내용물을 균일하게 혼합하였다. 각 소화조에서 발생한 가스 분석을 위해 상단에는 가스 포트를 설치하여 배출되게 하였다. 발생 가스가 2% (v/v) H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 포화식염수를 담은 뷰렛을 이용하여 가스량을 측정하도록 하였으며 실리카겔을 거쳐 수분이 흡수되게 한 후, 용량 1 L의 가스포집 bag을 이용하여 포집하였다. 오존 전처리 후 슬러지의 pH는 6.8에서 7.0으로 변화가 있었으나, pH controller를 사용하여 산생성 반응조 pH 5.5~6.5, 메탄생성 반응조 pH 6.8~7.4로 각 반응조의 최적 pH 조건이 되도록 구성하였다. 고·액분리조에서 메탄생성 반응조 슬러지의 고형물과 상등액이 분리된 후 하부의 슬러지는 산생성 반응조에 반송되도록 하였고, 소화액은 MLE 하수처리 공정에 유입하여 연계처리하였다. MLE 하수처리 공정은 전무산소조-호기조-이차침전조로 구성하였으며, 전무산소조의 용적은 1.097 L였고, 호기조의 용적은 4.27 L이었다.

### 2.3. 운전 및 분석방법

산생성 반응조와 메탄생성 반응조의 슬러지는 B시에서 운영중인 하수처리장의 혐기 소화조에서 채취하여 식중하였으며, 운전초기 농도는 TSS 49,000 mg/L, VSS 28,000 mg/L, TCOD 30,000 mg/L, SCOD 860 mg/L 이었고 60일 정도 운전하여 안정화시킨 후 분석 자료로 활용하였다.

이상 혐기성 소화 공정과 MLE 하수처리 공정은 2개월의 안정화와 약 3개월에 걸쳐 운전하였으며 운전 조건을 Table 1과 2에 나타내었다. 소화조의 슬러지 유입은 interval system으로 유입 유량 10.32 mL/min(오존전처리 슬러지 5.16 mL/min + 고·액분리조 하부 고형물 5.16 mL/min), 하루 4회, 15분 동안 주입이 되었다. 소화조의 모든 가동은 정량 펌프를 이용하여 일정한 양의 슬러지가 유입될 수 있도록 하였다. 반응조의 효율 향상과 메탄 농도 증가를 위하여 반응조의 HRT (Hydraulic retention time)는 산생성 반응조 6일, 메탄생성 반응조 15일, 고·액분리조 14시간이었으며 이상 혐기성 소화조의 SRT (Sludge residence time)는 197±38일로 운전하였다. 이상 혐기성 소화조 후단에 고·액분

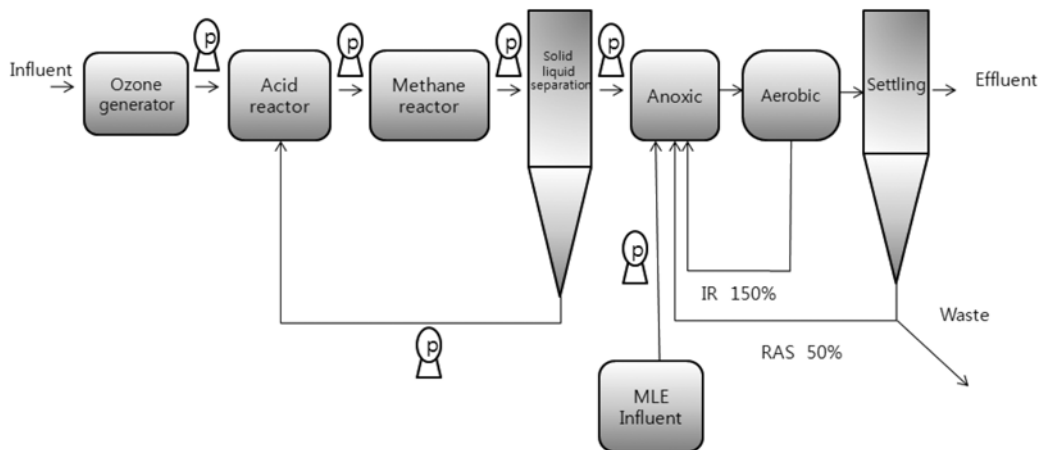


Fig. 1. Schematic diagram of lab-scale two-stage anaerobic digestion and MLE system.

**Table 1.** Operation conditions of two-phase anaerobic digestion

Division	Two-phase Anaerobic Digestion Process	
Reactor	Acidogenic	Methanogenic
HRT (day)	6	15
SRT (day)	197±38	
pH	5.5~6.5	6.8~7.4

**Table 2.** Operation conditions of MLE sewage treatment process

Division	MLE sewage treatment process	
Reactor	Anoxic	Aerobic
MLSS (mg/L)	3,000	
Volume (L)	1.1	4.3
HRT (hr)	1	4
Internal recycle (%)	150	
External recycle (%)	50	
F/M (kg/kg · day)	0.71	

**Table 3.** Gas chromatography conditions for gas analysis

Parameter	Conditions
Detector	TCD (Thermal conductivity detector)
Column	Carboxen -1010 plot 30 m×0.53 mm I.D. (25467)
Oven temperature	35°C (8.50 min) to 200°C at 10°C/min
Detector temperature	230°C
Injection temperature	200°C
Injection volume	50 µL

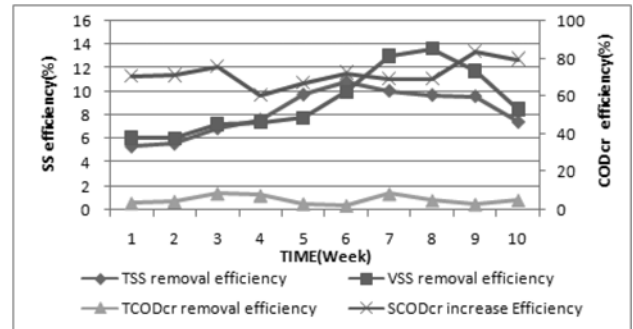
리조를 설치하였으며 메탄생성 반응조 슬러지의 고형물과 상등액이 분리된 후 하부의 슬러지는 산생성 반응조에 반송되도록 하였고, 상등액은 MLE 하수처리 공정에 유입하여 연계처리 하였다. MLE 하수처리 공정 유입수는 본교내 하·폐수 처리시설의 원수를 사용하였다. 그리고 유량 25.6 L/day, 외부반송 50%로 12.8 L/day, 내부반송 150%로 38.4 L/day, 호기조 MLSS는 3,000 mg/L로 운전하였다. 시료의 분석은 잉여슬러지를 오존으로 전처리하여 유입슬러지로 주입하며 주 2회 오존 전처리 전 슬러지, 오존 전처리 후 슬러지, 산생성 반응조, 메탄생성 반응조, 고·액분리조 상부, 고·액분리조 하부, gas 포집백에서 샘플링하여 TCOD (Total chemical oxygen demand), SCOD (Soluble chemical oxygen demand), TSS (Total suspended solids), VSS (Volatile suspended solids), CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>을 분석하였다. CH<sub>4</sub>와 CO<sub>2</sub>의 분석은 Gas chromatography (HP 6890)를 이용하였으며, 분석조건은 Table 3에 나타내었다. MLE 유입수, MLE 처리수 샘플링하여 BOD<sub>5</sub>, TCOD<sub>Cr</sub>, T-N, T-P, SS를 분석하였다. 모든 시료 분석은 수질오염공정시험법을 따랐다.<sup>9)</sup>

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 오존전처리에 의한 가용화 영향

**Table 4.** Operation results of ozone pretreatment

Division	Before ozone pretreatment	After ozone pretreatment	Ozone pretreatment efficiency (%)
TSS (mg/L)	15,570	14,217	8.2
VSS (mg/L)	12,818	11,594	9.2
TCOD (mg/L)	17,988	17,077	5.1
SCOD (mg/L)	339	1,214	72.0



**Fig. 2.** TSS, VSS, TCOD and SCOD efficiency in the sludge from ozone pretreatment.

오존전처리에 의한 슬러지 TSS, VSS, TCOD, SCOD의 가용화 효율을 Table 4와 Fig. 2에 나타내었다. 오존전처리를 통한 슬러지 TSS는 5.4~10.9%으로 평균 8.3±2.0%의 감소하였고, VSS는 6.1~13.6%로 평균 9.2±2.8% 감소로 유사한 효율을 보였다. 오존의 강한 산화력으로 인해 고형물의 미생물 세포벽이 파괴되면서 고분자 유기물이 저분자화됨에 따라 고형물이 감소된 것으로 판단된다.<sup>3,4,6)</sup> COD 농도 변화율은 TCOD 기준으로 2.2~8.7%으로 평균 5.1±2.4% 감소하였고, SCOD는 60.8~83.6%으로 평균 72.0±6.5% 증가하였다. TCOD의 감소는 유기물이 산화되어 무기화(mineralization)되었기 때문이며, SCOD의 증가는 오존의 강한 산화력으로 인해 슬러지의 세포벽이 분해됨으로서 슬러지 세포 내의 고분자 유기물질이 용출되어 가용화(solubilization)되었기 때문이다. 즉, 오존의 산화력을 통해 세포벽이 파괴되어 미생물 내부의 이분해성 물질을 용출시킴으로서 생분해도가 향상되었음을 알 수 있다.<sup>7,8)</sup> 이는 오존전처리를 통한 슬러지 감량과 가수분해반응으로서 혐기성 소화시 소화 효율이나 메탄 발생의 증가에 도움을 줄 것으로 기대된다.

#### 3.2. 이상 혐기성 반응조 소화에 의한 고형물과 유기물 감량 효율

이상 혐기성 소화 공정의 반응조별 고형물과 유기물 감량 효율을 Fig. 3 및 4에 나타내었다. 혐기성 소화가 진행됨에 따른 TSS와 VSS 감량 효율은 각각 14.8~24.7%, 10.4~35.2%로 평균 21.5±3.4%와 20.2±8.4%를 나타내었다. TSS와 VSS의 감량은 유입 시료 내의 입상상 유기물이 혐기성 소화시 진행됨에 따라 저분자 용존성 물질로 분해되기 때문으로 판단된다.

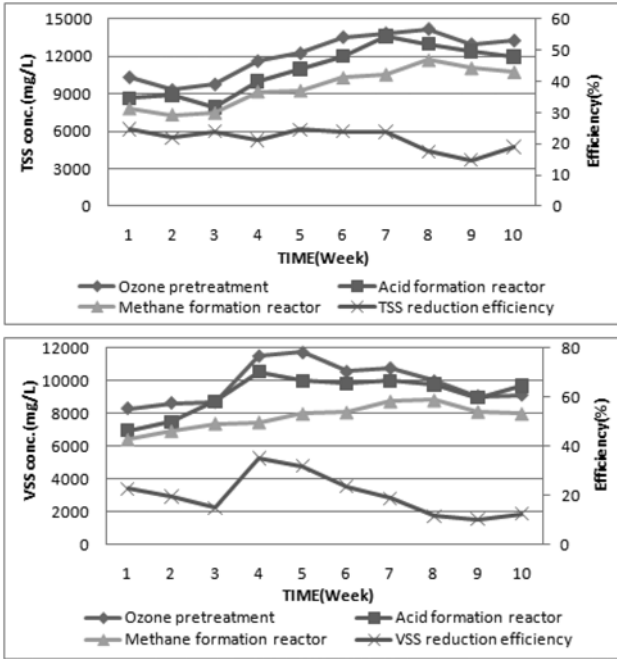


Fig. 3. TSS, VSS concentrations and reduction efficiency in the sludge from the two-phase anaerobic digestion process.

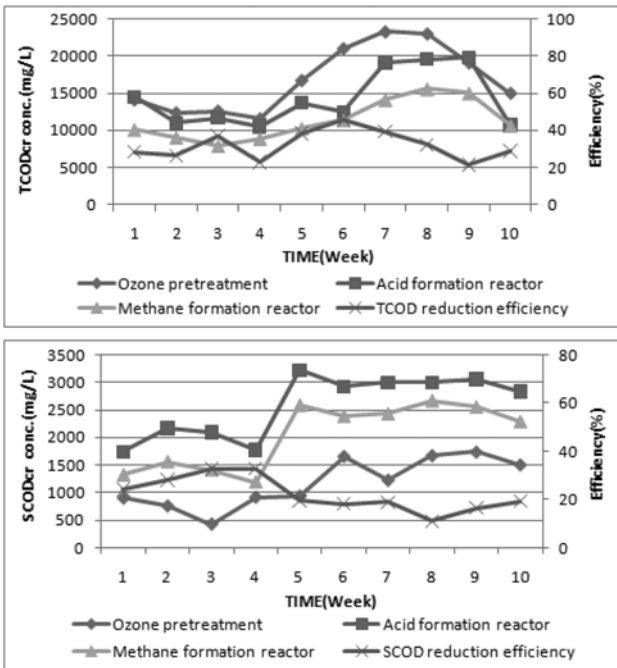


Fig. 4. TCOD, SCOD concentrations and reduction efficiency in the sludge from the two-phase anaerobic digestion process.

고형물 최대 감량효율은 TSS보다 VSS가 약 10% 높은 것으로 나타났다. 이는 용존성 유기물이 유기산 형성 박테리아에 의해 쉽게 유기산으로 분해되기 때문으로 사료된다. 혐기성 소화가 진행됨에 따라 VSS의 감량 효율이 약 64% 감소하는데, 이는 유입 슬러지의 VSS의 감소와 FSS의 증가로 인한 결과로 사료된다. TSS 내 VSS 함량은 유기물질의 양을 의미하여 혐기성 소화 공정에서 안정화되어 감소

된다. VSS 농도의 감소는 유기물 부하율이나 혐기성 소화 효율(Digestion efficiency)을 나타내기 위한 지표로서 이용되어지므로 소화조 운전에 중요한 요인으로 판단된다.

TCOD와 SCOD의 감량 효율은 각각 21.5~39.3%, 11.0~32.8%로 평균 32.1±7.9%, 22.1±7.2%를 나타내었다. 혐기성 소화가 진행됨에 따라 유기물 농도가 점차적으로 낮아지면서 감소하였다. 그리고 유입 부하의 급격한 증가로 유기물 감량 효율이 다소 감소되었지만 반응조 별로 큰 차이는 보이지 않았다. 산생성 반응조에서 SCOD는 오존 전처리 후 SCOD 보다 높게 나타났다. 이로 인해 SCOD 감량율은 TCOD 감량율보다 평균 10% 낮았으며, 용존 유기물이 유기산 형성 박테리아에 의해 유기산으로 전환됨으로 인한 결과로 판단된다. 5주 이후 유입 슬러지의 부하가 높아졌음에도 불구하고 TCOD와 SCOD는 비교적 안정적인 처리 효율을 보였다. 고·액분리조의 슬러지 반송으로 인하여 이상 혐기성 소화조 내 존재하는 혐기성 순응 미생물의 증가와 높은 기질 친화율로 인한 결과로 판단된다.

### 3.3. 이상 혐기성 소화에 의한 바이오가스 생성량

고형물 부하율과 유기물 부하율에 따른 바이오가스 생성량을 Fig. 5 및 6에 나타내었다. 고형물 부하율이 증가함에 따라 바이오가스 생성량은 증가하였다. 반응조 안정화 이후 4~5주에 고형물 부하율이 급증하면서 최대 바이오가스 생성량은 177.6 mL CH<sub>4</sub>/g TSS, 45.8 mL CO<sub>2</sub>/g TSS, 210.8 mL CH<sub>4</sub>/g VSS, 55.1 mL CO<sub>2</sub>/g VSS이 생성되었다. 5주 이후 부하율이 미미하게 낮아졌지만 안정적인 바이오가스 생성량을 나타내었다. 이는 고·액분리조의 슬러지 반송으로 슬러지 체류시간을 높여 고형물 분해 가능 분율을 높여 준

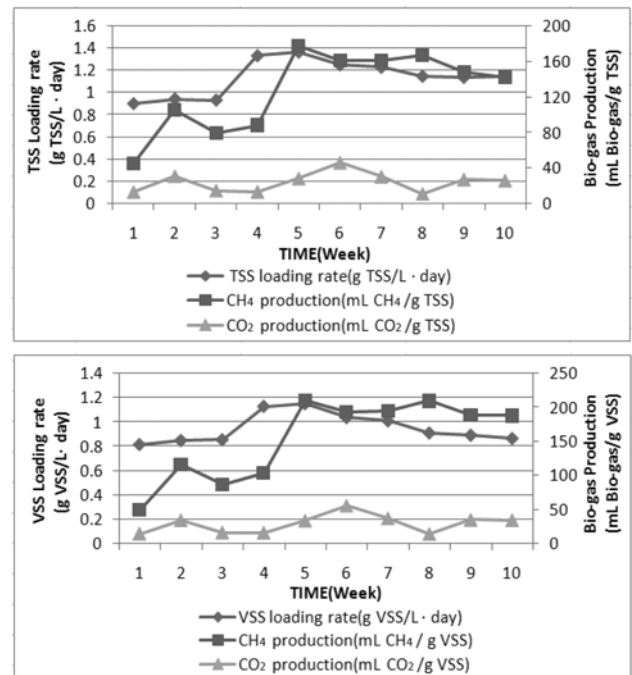


Fig. 5. Biogas production related to TSS and VSS loading rates from the two-phase anaerobic digestion process.

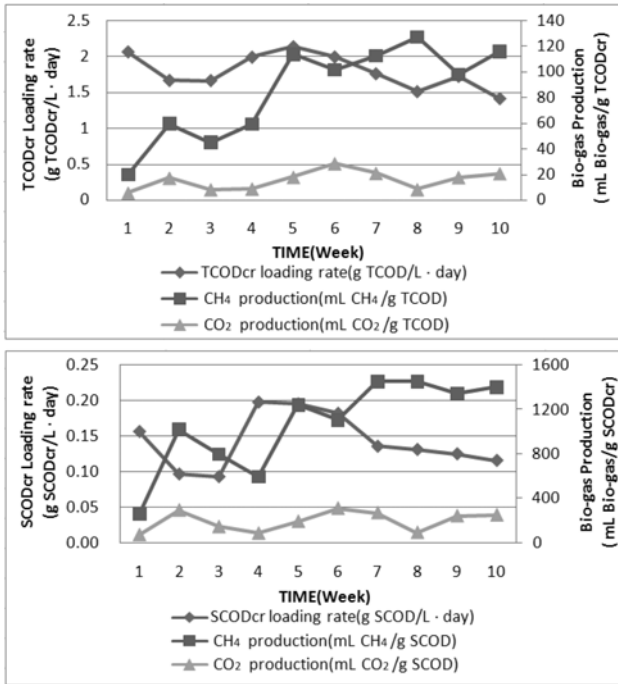


Fig. 6. Biogas production related to TCOD and SCOD loading rates from the two-phase anaerobic digestion process.

결과로 보인다. 슬러지 소화조는 일반적으로 고형물 부하는 1~3 kg VS/m<sup>3</sup>/day로 운영되는 것과 비교했을 때 본 연구에서는 보다 높은 고형물 부하율 유지가 필요할 것으로 판단된다.<sup>9)</sup>

유기물 부하율에 따른 바이오가스 생성량 또한 반응조의 안정화 이후 최대 바이오가스 생성량은 127.0 mL CH<sub>4</sub>/g TCOD, 28.7 mL CO<sub>2</sub>/g TCOD, 1452.0 mL CH<sub>4</sub>/g SCOD, 312.9 mL CO<sub>2</sub>/g SCOD로 일정하게 생성되었다.

SCOD 부하율 당 바이오가스 생성량은 TCOD 부하율 당 바이오가스 생성량보다 많았다. 이러한 결과는 산생성 반응조에서 유기산 생성량이 증가하여 메탄생성 반응조 내 혐기성 소화에 관여하는 미생물의 소화량이 증가되었기 때문으로 사료된다. 오존 전처리에 의해 슬러지가 분해되면서 미생물 floc이 해체되고 미생물 세포가 파괴된다. 이는 콜로이드성 물질이 더욱 잘게 분해되고 용존성 유기물이 증가하여 SCOD 부하율 당 바이오가스 생성량을 증대시키는 결과를 가져온 것으로 판단된다.

실제 메탄생성 반응조에서 생성된 메탄 함량은 49~60% 범위를 나타내었다. 이는 MLE 하수처리 공정에서 인발되는 슬러지의 증력 농축의 한계로 인하여 1~2%의 농도를 보였는데, 이로 인해 농축소화조에 유입되는 하수슬러지의 농도와 유기물 함량이 낮았기 때문으로 보인다. 그리고 고·액분리된 슬러지의 재유입으로 인해 소화조 내에 TSS와 VSS가 축적 된 것으로 판단된다.

3.3.1. 이상 혐기성 소화 공정과 MLE 하수처리 공정에 대한 유기물 부하율에 따른 처리 효율과 슬러지 발생량  
이상 혐기성 소화 공정과 후단에 연결된 MLE 하수처리 공정의 유기물 부하율에 따른 처리수 농도와 효율을 Table 5에 나타내었다. 연계처리 전 MLE 하수처리 공정의 유입수는 BOD<sub>5</sub> 355.4 mg/L, TCOD<sub>Cr</sub> 690.1 mg/L, T-N 33.9 mg/L, T-P 4.0 mg/L, SS 177.0 mg/L이였으며, 처리수는 BOD<sub>5</sub> 46.0 mg/L, TCOD<sub>Cr</sub> 38.6 mg/L, T-N 6.2 mg/L, T-P 2.5 mg/L, SS 11.0 mg/L의 결과를 나타내었다. 각각의 처리 효율은 BOD<sub>5</sub> 87.6%, TCOD<sub>Cr</sub> 94.2%, T-N 80.4%, T-P 38.8%, SS 94.0%로 분석되었다.

MLE 하수처리공정과 연계처리 후 유입수는 BOD<sub>5</sub> 363.2 mg/L, TCOD<sub>Cr</sub> 702.8 mg/L, T-N 45.1 mg/L, T-P 4.02 mg/L, SS 185.7 mg/L이였으며, 처리수는 BOD<sub>5</sub> 57.1 mg/L, TCOD<sub>Cr</sub> 61.2 mg/L, T-N 9.6 mg/L, T-P 2.9 mg/L, SS 13.8 mg/L의 결과를 나타내었다. 각각의 처리 효율은 BOD<sub>5</sub> 85.0%, TCOD<sub>Cr</sub> 91.0%, T-N 76.7%, T-P 27.1%, SS 89.9%로 분석되었다. 고·액분리조 상등액이 하루 309.6 mL 유입되어 평균 BOD<sub>5</sub> 7.8 mg/L, TCOD<sub>Cr</sub> 12.7 mg/L, T-N 11.2 mg/L, T-P 0.02 mg/L, SS 8.7 mg/L의 부하량이 증가하였음에도 불구하고 TCOD<sub>Cr</sub>과 T-N의 경우 다른 항목에 비해 처리효율이 우수함을 확인할 수 있었다.

한편, MLE 유입 하수 25.6 L/day와 고·액분리조 소화액 0.3 L/day의 연계처리시 평균 1.91 g SS/day의 인발슬러지가 발생하였다.

3.3.2. 이상 혐기성 소화 공정과 MLE 하수처리 공정 연계 처리를 통한 고형물 물질수지 비교·분석

본 연구 결과를 통해서 이상 혐기성 소화 공정과 MLE 하수처리 공정의 연계처리에 대한 고형물 물질수지를 비교·분석하고 고형물 감량 효율을 알아보았다.

Table 5. Average influent concentration and effluent concentration, removal efficiency obtained during the only MLE process and MLE process for mixing treatment of solid-liquid separation of sludge

		BOD <sub>5</sub> (mg/L)	COD <sub>Cr</sub> (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	SS (mg/L)	C/N
MLE process	Influent	355.4	690.1	33.9	4.0	177.0	10.5
	Effluent	46.0	38.6	6.2	2.5	11.0	-
	Removal efficiency (%)	87.6	94.2	80.4	38.8	94.0	-
MLE process for mixing treatment of solid-liquid separation of sludge	Influent	363.2	702.8	45.1	4.02	185.7	8.1
	Effluent	57.1	61.2	9.6	2.6	19.2	-
	Removal efficiency (%)	85.0	91.0	76.7	27.1	89.9	-

먼저 이상 혐기성 소화 공정의 고형물 물질 수지를 알아보았다. 유입 슬러지는 TSS 3.79 g/day(외부 유입슬러지 TSS 1.88 g/day + 내부 유입슬러지 TSS 1.91 g/day)이며, VSS 2.82 g/day(외부 유입슬러지 VSS 0.91 g/day + 내부 유입슬러지 VSS 1.91 g/day)이다. 고·액분리조를 통해 유출되는 상등액의 TSS 0.30 g/day, VSS 0.22 g/day였다. 이상 혐기성 소화조 및 고액분리 후, 외부 유입 고형물 총량 대비 고형물 감량 효율은 TSS 84.0%, VSS 75.8%로 나타났다.

이상 혐기성 소화 과정에서 TSS, VSS의 감량은 모두 바이오가스로 전환된다고 가정하였을 때, 883.38 mL/g TSS, 645.64 mL/g VSS의 바이오가스가 생산되었다. TSS 물질수지의 바이오가스 생성율은 27.9%로 CH<sub>4</sub> 14.2%, CO<sub>2</sub> 2.4%, 기타 11.4%, VSS 물질수지의 바이오가스 생성율은 24.5%로 CH<sub>4</sub> 12.4%, CO<sub>2</sub> 2.1%, 기타 9.9%로 구성되었다.

다음으로 이상 혐기성 소화 공정과 MLE 하수처리공정의 연계처리를 통한 고형물 물질수지를 알아보았다. MLE 하수처리 공정의 유입수 TSS 4.24 g/day, VSS 3.42 g/day이다. 외부에서 유입되는 총 슬러지(이상 혐기성 소화 공정 유입 슬러지 + MLE 하수처리 공정 유입 고형물)는 TSS 6.12 g/day, VSS 4.33 g/day였다. 두 공정의 연계처리를 통하여 처리된 최종 유출 슬러지는 TSS 0.38 g/day, VSS 0.35 g/day로 나타났다. 최종적인 외부 유입 고형물 총량 대비 고형물 감량효율은 TSS 93.8%, VSS 92.0%이다.

결과적으로 이상 혐기성 소화 공정 후단에 고·액분리조를 설치하여 높은 고형물 감량 효율을 확인 할 수 있었다. 고형물의 반송으로 SRT를 높여 슬러지 감량에 큰 역할을 한 것으로 판단된다. 또한 MLE 하수처리 공정과 연계처리함으로써 슬러지 감량효율이 TSS 9.8%, VSS 16.2% 증가하였다.

#### 4. 결론

슬러지 감량 효율을 높이기 위해 이상 혐기성 소화 공정과 MLE 하수처리 공정의 연계처리를 이용한 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론이 도출되었다.

- 1) 오존전처리를 통한 슬러지의 고형물 농도 감소율은 평균 TSS 8.3±2.0%, VSS 9.2±2.8%으로 오존의 강한 산화력으로 고형물의 세포벽이 파괴되면서 감소하는 경향을 나타내었다. 유기물 농도는 TCOD은 평균 5.1±2.4% 감소하는 반면 SCOD은 평균 72.0±6.5% 증가하였는데 이는 오존으로 인해 세포내의 고분자 유기물이 용출되어 가용화되었기 때문이다.
- 2) 이상 혐기성 소화 공정의 반응조별 소화가 진행됨에 따라 평균 TSS 21.5±3.4%, VSS 20.2±8.4%, TCOD 32.1±7.9%, SCOD 22.1±7.2%의 농도가 감소하였다. 소화에 따른 농도 감소율은 높지 않지만, 유입 슬러지의 부하가 급격히 높아졌음에도 불구하고 혐기성 소화조 내 순응 미생물의 증가

로 인하여 안정적인 처리 효율을 보였다.

3) 슬러지의 오존전처리 후 이상 혐기성 소화를 통한 바이오가스 생성량은 반응조 안정화 이후 고형물과 유기물 부하에 대하여 일정하게 나타났다. 최대 바이오가스 생성량은 177.6 mL CH<sub>4</sub>/g TSS, 45.8 mL CO<sub>2</sub>/g TSS, 210.8 mL CH<sub>4</sub>/g VSS, 55.1 mL CO<sub>2</sub>/g VSS, 127.0 mL CH<sub>4</sub>/g TCOD, 28.7 mL CO<sub>2</sub>/g TCOD, 1452.0 mL CH<sub>4</sub>/g SCOD, 312.9 mL CO<sub>2</sub>/g SCOD가 생성되었다. 부하율이 감소함에도 불구하고 바이오가스 생성량이 증가하였다. 고·액분리조의 슬러지 반송으로 혐기성 소화조 내 혐기성 순응 미생물의 증가와 높은 기질 친화율로 판단된다.

4) 이상 혐기성 소화 공정 후단에 연결된 MLE 하수처리 공정과 연계처리시 BOD<sub>5</sub> 85.0%, COD<sub>Cr</sub> 91.0%, T-N 76.7%, T-P 27.1%, SS 89.9%로 처리 효율이 우수하였다.

5) 이상 혐기성 소화와 MLE 하수처리 공정의 연계처리를 통한 고형물 물질수지 결과 TSS 93.8%, VSS 92.0%의 감량효율을 보임으로서 슬러지 발생량을 저감하였다. 이는 이상 혐기성 소화 공정과 MLE 하수처리 공정의 연계처리를 통해 슬러지 감량 효율을 높이고 에너지원으로서 바이오가스를 회수 할 수 있는 가능성을 보여주었다. 이는 향후 슬러지 처리 문제 해결에 유용할 것으로 판단된다.

KSEE

#### 참고문헌

1. 환경부, 하수슬러지 종합대책(2007).
2. 이영형, "혐기성소화조를 이용한 음식물쓰레기의 처리," 동아대학교 박사 학위논문(1999).
3. Bougrier, C., Albasi, C., Delgenes, J. P. and Carrere, H., "Effect of ultrasonic, thermal and ozone pre-treatments on waste activated sludge solubilisation and anaerobic biodegradability," *Chem. Eng. Proc.*, **45**(8), 711~718(2006).
4. Yeom, I. T., Lee, K. R., Lee, Y. H., Ahn, K. H. and Lee, S. H., "Effects of ozone treatment on the biodegradability of sludge from municipal wastewater treatment plants," *Water Sci. Technol.*, **46**(4-5), 421~425(2002).
5. 최규철, "수질오염공정시험법 주해", (1996).
6. Zhao, Y. X., Yin, J., Yu, H. L., Han, N. and Tian, F. J., "Observations on ozone treatment of excess sludge," *Water Sci. Technol.*, **56**(9), 167~175(2007).
7. 윤상현, 황성진, "금속촉매 오존산화에서 촉매 종류 및 투입량이 슬러지 감량화에 미치는 영향," 대한상하수도학회·한국물환경학회 공동추계학술발표회, pp. 127~132(2006).
8. Goel, R., Komatsu, K., Yasui, H. and Harada, H., "Process performance and change in sludge characteristics during anaerobic digestion of sewage sludge with ozonation," *Water Sci. Technol.*, **49**(10), 105~113(2004).
9. 이태우, "실규모 혐기성소화공정에서 슬러지 반송 변화를 이용한 Bio-gas 생산량 증대 및 감량화," 경북대학교 산업대학원, 석사학위논문(2008).