

생물전기화학 혐기소화조를 이용한 바이오가스생산에서 폐활성슬러지 혼합비의 영향

정재우^a · 이명은^b · 서선철^c · 안용태[†]

Effect of Waste Activated Sludge Mixing Ratio on the Biogas Production in Bioelectrochemical Anaerobic Digestion

Jae-Woo Chung^a, Myoung-Eun Lee^b, Sun-Chul Seo^c, Yongtae Ahn[†]

(Received: Dec. 11, 2018 / Revised: Dec. 18, 2018 / Accepted: Dec. 18, 2018)

ABSTRACT: Anaerobic digestion (AD) is one of the most widely used process that can convert the organic fraction of waste activated sludge (WAS) into biogas. However, most researched actual methane yields of anaerobic digester (AD) on lab scale is lower than theoretical ones. Bioelectrochemical, anaerobic digester was used to increase methane yield from waste activated sludge. The influence of anaerobic digestion sludge and raw sludge mixing ratio (3:7, 5:5) on methane yield and organic matter removal efficiency were explored. As a result, when the mixing ratio of bioelectrochemical anaerobic sludge was 5:5 compared with 3:7, the highest methane yields were 294.2 mL CH₄/L (0.63 times increase) and 52.5% (7.5% increase), the bioelectrochemical anaerobic digester(5:5) was more stable in the pH, total alkalinity and VFAs, respectively. These results showed that the increase in the mixing ratio of anaerobic digestion sludge was found to be effective for maintaining the stable performance of bioelectrochemical anaerobic digester.

Keywords: Microbial electrolysis cell (MEC), biogas production, mixing ratio, high-strength waste/wastewater

초 록: 혐기성소화(AD)는 폐활성슬러지의 유기물함량을 바이오가스로 전환할 수 있는 가장 널리 이용되는 공정 중 하나이다. 그러나 현재 전통적인 혐기성소화에 의한 실제 메탄수율은 이론적인 최대 메탄수율에 미치지 못하기 때문에 메탄수율을 높일 수 있는 방안의 지속적인 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 폐활성슬러지로부터 메탄수율을 높이기 위해 생물전기화학 혐기성소화조를 이용하여 혐기성소화슬러지와 생슬러지의 혼합비율(3:7, 5:5)에 따른 메탄수율 및 유기물제거 효율에 미치는 영향에 관하였다. 그 결과 생물전기화학 혐기성소화 슬러지의 혼합비가 3:7과 비교하여 5:5일 때 가장 높은 메탄수율 294.2 mL CH₄/L(0.63배 증가)과 52.5%(7.5% 증가)로 유기물제거 효율을 가지는 것으로 나타났으며 pH, 알칼리도와 VFAs의 농도도 안정적으로 유지되었다. 이러한 결과는 혐기성소화 슬러지의 혼합비의 증가는 생물전기화학 혐기성소화조의 안정적인 성능유지를 위해 효과적인 것으로 나타났다.

주제어: 미생물전기분해전지, 바이오가스, 혼합비, 고농도폐수/폐기물

^a 경남과학기술대학교 환경공학과 교수 (Professor, Department of Environmental Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology (GNTECH))

^b 경남과학기술대학교 환경공학과 박사후 연구원 (Postdoctoral researcher, Department of Environmental Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology (GNTECH))

^c 용진환경 이사 (Wastewater Treatment Department, Yongjin Environment Co. Ltd, Yeongdong 29136, Korea)

^d 경남과학기술대학교 에너지공학과 조교수 (Assistant Professor, Department of Energy Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology (GNTECH))

† Corresponding author(e-mail: ytahn@gntech.ac.kr)

1. 서론

혐기성소화(AD; Anaerobic Digestion)는 폐활성슬러지의 유기물함량을 바이오가스로 전환할 수 있는 가장 널리 이용되는 공정 중 하나이다¹⁾. 유기성폐기물의 혐기성소화(AD)에서 발생하는 바이오 가스는 주로 메탄(CH_4 , 50-75%), 이산화탄소(CO_2 , 25-50%)의 혼합물이다²⁾. 그러나 긴 체류시간(~20일)과 낮은 COD, VS 제거 효율을 포함하는 여러 가지 문제점들을 가지고 있다. 최근 MFC(Microbial fuel cell)나 MEC(Microbial electrolysis cell)등과 같은 생물전기화학기술(MET, Microbial electrochemical technology)이 지속가능한 신재생에너지의 생산기술로서 주목을 받고 있다.³⁾

MET 기술을 혐기성소화조 내에 적용할 경우 고농도의 유기성 폐기물의 빠른 분해가 가능할 뿐만 아니라 전기화학적 반응에 의해 휘발성지방산이나 독성물질, 생분해 불가능한 물질까지도 분해가 가능하며, 소화조 내 미생물의 활성을 높이고 바이오가스의 생산량을 극대화 할 수 있다고 보고되고 있다^{4,6)}. 생물전기화학기술은 일반적으로 혐기성소화조에 산화전극과 환원전극으로 이루어진 전기화학장치를 설치하고 전극에 작은 전압을 인가하는 방법으로 혐기소화에 활용될 수 있다⁷⁾. 생물전기화학기술을 혐기성소화에 접목하여 낮은 운전온도에서 높은 소화 효율을 달성하고자 하는 시도들이 있었으며, 하수슬러지를 대상으로 생물전기화학기술을 혐기성소화조에 접목하면 소화조의 성능이 크게 향상되며 바이오가스의 메탄함량이 높아질 수 있음을 보였다⁸⁻¹²⁾. 현재까지 연구된 바에 의하면, 연구실 규모 실험에서는 안정화 후 메탄수율은 이론적인 메탄수율은 350 mL $\text{CH}_4/\text{g COD}_r$ 이하로 보고되고 있으며, AD반응기의 경우 유입수의 특성 및 반응기에 따라 50-250 mL $\text{CH}_4/\text{g COD}_r$ 의 수율을 가지는 것으로 나타났으며 MEC 반응기를 이용하였을 경우 170-400 mL $\text{CH}_4/\text{g COD}_r$ 로 보고되고 있다¹²⁻¹⁷⁾. 회분식 AD반응조에서 Feng 등¹²⁾은 162 mL $\text{CH}_4/\text{g COD}_r$, Bo 등¹⁵⁾은 180 mL $\text{CH}_4/\text{g COD}_r$ 을 얻었다고 MEC반응기에서는 각각 326 mL $\text{CH}_4/\text{g COD}_r$ ¹²⁾, 360 mL $\text{CH}_4/\text{g COD}_r$ ¹⁵⁾로 보고하였다. 현재 전통적인 혐기성소화에 의한 실제 메탄

수율은 이론적인 최대 메탄수율에 미치지 못하기 때문에 메탄수율을 높일 수 있는 방안의 지속적인 연구가 필요하다¹⁸⁾. 따라서 본 연구에서는 폐활성슬러지로부터 메탄수율을 높이기 위해 생물전기화학 혐기성소화조를 이용하여 혐기성소화슬러지의 혼합비율에 따른 메탄수 및 유기물제거 효율에 미치는 영향에 관하여 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 반응조 운전조건

본 연구에서는 혐기성소화조에 생물전기화학시스템(Bioelectrochemical system, BES)을 적용한 생물전기화학 혐기성소화반응기를 이용하여 실험을 수행하였으며 아크릴 원형관(170×205 mm)을 제작하여 각각의 유효 부피 2.5 L로 실험하였다. 생물전기화학 혐기성소화반응기에 사용된 전극은 (주)한국생물전기화학에서 제작하여 판매하고 있는 전극이며, 흑연직물 섬유(graphite fiber fabric, GFF)의 표면에 다중벽탄소나노튜브(multi-wall carbon nanotube, MWCNT)를 전기영동법(electrophoretic deposition, EPD)으로 고정시켜 내구성이 높고 비표면적과 전도성이 우수한 전극을 사용하였다¹¹⁾. 실험에 사용된 산화전극과 환원전극(40mm×90mm, 0.0036 m²)은 Fig. 1과 같이 아크릴로 제작된 틀에 산화전극과 환원전극 사이에 부직포(Polypropylene non-woven sheet)를 분리막을 사용하여 일체형(Separator electrode assembly, SEA)으로 고정하여 4쌍을 산화전극과 환원전극 전극은 Ti wire로 연결 조립하여 설치하였다. 반응기에 사용되는 전극은 전극 틀과 전극 고정판으로 구성하여 반응기 내부에 탈부착 할 수 있도록 구성하였다. 아크릴반응기는 반응기 상부에 가스샘플링구, 가스수집구, 슬러지 유입구를 반응조 상부 덮개에 설치하고 슬러지 유입구를 통한 외부공기의 유입을 막기 위해 반응조 내용물에 잠기도록 아크릴판을 반응조 덮개에 부착하여 설치하였다. 가스포집기를 이용해 가스를 포집하였으며 산성(pH 2이하, H_2SO_4)의 포화염수(NaCl)를 충전시켜 발생된 가스의 재용해를 막았다.

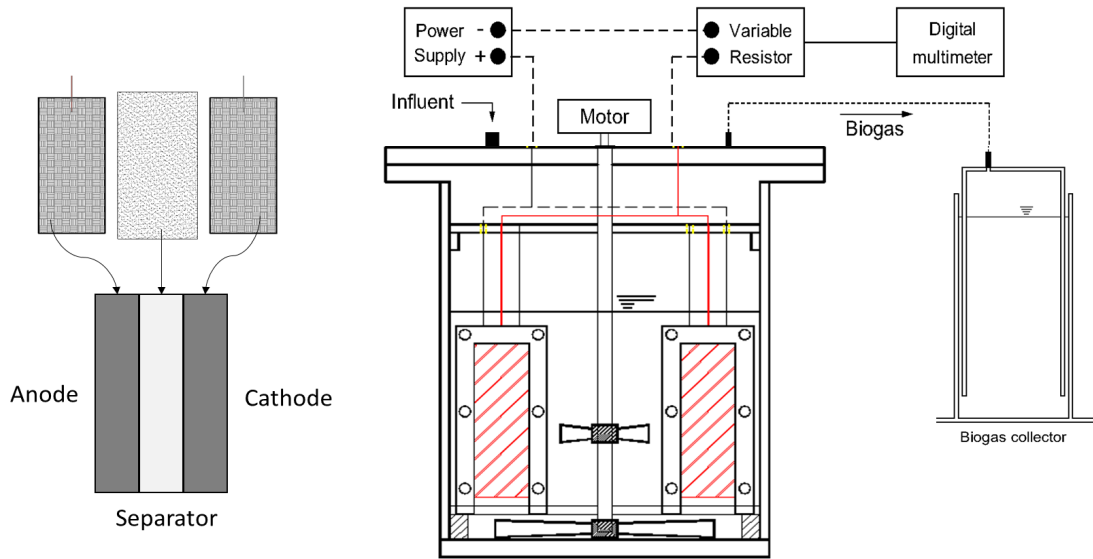


Fig. 1. Schematic diagram of batch bioelectrochemical anaerobic reactor.

2.2. 실험 및 분석 방법

MEC반응기에 미생물을 식종하기 위해 진주시 하수종말처리장에서 채취한 혐기성소화 슬러지와 생슬러지 1mm 체로 거른 후 3:7(소화슬러지:생슬러지)의 비율로 혼합하여 주입하고 전원공급장치를 이용하여 외부전압 0.3 V, 교반속도 100 rpm, 35±2°C 조건에서 약 30일간 식종하였다. MEC 반응기를 운전하는 동안 디지털멀티미터(Digital multimeter, DMM, Keithley 2700, Keithley Instruments Inc., Ohio, USA)를 이용하여 저항 10.Ω을 병렬로 연결하여 양단의 전압을 10분 간격으로 측정하였다. 식종기간이 후 생물전기화학 혐기성소화 슬러지(반응기 유출슬러지를 식종슬러지로 이용)와 생슬러지(기질슬러지로 이용)를 혼합하여

실험을 진행하였으며 약 3개월간 100 rpm, 35±2°C 조건에서 운전하여 반응기의 조건이 안정화된 후에 실험을 진행하였다. 본 실험에서는 Table 1과 같이 생물전기화학 혐기성소화슬러지와 생슬러지의 혼합비를 3:7, 5:5 조건에서 실험을 진행 하였다.

MEC반응조의 시료는 2-3일 간격으로 25mL의 시료를 채취하여 Standard Methods에 따라 TSS, VSS, TCOD, SCOD, pH, Total alkalinity를 분석하였으며 TVFAs 농도는 적정법¹⁹⁾을 이용하여 분석하였다. 반응조에서 발생된 바이오가스를 1일 1회 정량하였고 발생된 가스의 성분 분석은 열전도도 검출기(TCD)가 장착된 GC(GowMac Series 580, Porapak Q6ft×1/8 inch stainless steel)를 사용하여 N₂(30 mL/min flow rate)를 carrier gas로 하여 injector 80°C, detector 90°C, column 50°C 조건에서 분석하였다. 측정된 바이오가스 발생량

Table 1. Characteristics of the raw sludge, seed sludge and sludge mixture

Parameter	Raw sludge	Seed sludge	Sludge mixture
TS(g/L)	41.0±7.8	24.4±2.3	36.4±0.4
VS(g/L)	11.7±2.3	7.6±0.7	12.0±1.8
TCOD(g/L)	47.9±2.6	22.3±1.27	37.2±5.3
SCOD(g/L)	1.7±1.3	1.0±0.3	2.1±1.7
pH	5.8±0.7	7.4±0.2	7.0±0.3
Alkalinity(mg/L as CaCO ₃)	967.5±308.9	3936.0±1575.0	2262.5±995.9
TVFAs(mg/L as HAc)	749.4±585.0	737.5±189.9	1340.0±42.7

은 아래 식(1)을 이용하여 정상상태(standard temperature and pressure, STP) 조건으로 환산하였다.

$$V_{CH_4}(STPL) = V_{CH_4}(at T) \times \frac{273}{273+T} \times \frac{760-W}{760} \quad (1)$$

위에서 T는 반응조의 온도, W는 온도(°C)에 따른 포화수증기압(mmHg)을 나타낸다.

에너지 회수율은 시스템에 투입된 에너지의 합에 대한 회수된 메탄의 에너지 함량의 비로 나타내며 외부전원으로부터 공급되는 에너지(W_E)는 저항에서 발생하는 손실을 감하여 식 (2)와 같이 구하였다.

$$W_E(kJ) = \sum_1^n (IE_{ap} \Delta t - I^2 R_{ex} \Delta t) \quad (2)$$

여기서, E_{ap} 는 전원공급장치에서 반응기로 인가하는 전압(0.3 V)이고, Δt 는 반응기 운전하는 동안 전압측정 간격(10 min)이다. 제거된 유기물과 메탄의 에너지 함량은 연소열(heats of combustion)을 기준으로 하였으며 계산 방법은 식 (3) 및 식 (4)과 같다.

$$W_S = \eta_s \times \Delta H_s \quad (3)$$

$$W_{CH_4} = \eta_{CH_4} \times \Delta H_{CH_4} \quad (4)$$

여기서, W_{CH_4} (= $\eta_{CH_4} \times \Delta C_{CH_4}$)는 메탄생성량(mol/day)과 메탄이 물과 이산화탄소로 산화될 때의 자유에너지변화량($\Delta G_{CH_4} = -818 \text{ kJ/mol}$)으로부터 구하였으며, W_E

(= $C \times E_{APP}$)는 소모된 전기에너지량(kJ/day)이다. 이때 C는 시간에 따른 전류를 적분하여 구한 총 쿨롱이며, E_{APP} (V)는 산화전극과 환원전극 사이에 인가한 전위차이다. W_S (= $\eta_s \times \Delta G_s$)는 제거된 COD로부터 계산한 기질의 에너지 함량이다. 여기서 η_s 는 제거된 기질의 몰수이며, ΔG_s 는 포도당이 물과 이산화탄소로 산화될 때의 자유에너지변화량($\Delta G_s = -2870 \text{ kJ/mol}$)이다. 혐기성소화반응기와 MEC반응조의 혐기성소화 성능을 평가하기 위해 에너지 효율(energy efficiency)은 소모된 전기 에너지(electrical energy)와 제거된 COD의 합에 대한 메탄으로 회수된 에너지(energy recovered as methane)의 백분율로서 식 (5)와 같이 계산하였다.

$$\eta_T(\%) = \frac{W_{CH_4}}{W_E + W_S} \times 100 \quad (5)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. pH, 총알카리도 및 VFAs 변화

생물전기화학 혐기성소화조를 35°C에서 0.3 V를 인가하고 운전하였을 때 Fig. 2(a)와 같이 초기 pH는 각각 약 6.7(3:7), 7.2(5:5)로 나타났으며 5:5 혼합비율의 경우 혐기성소화 초기부터 pH가 7.2 이상을 계속 유지 하였고, 3:7 혼합비율의 반응기의 경우 초기 pH 6.7에서 시작하여 4일이 경과 후 반응기 모두 7.4 이상을 유지 하는 것으로 나타났다. 일반적인 혐기성소화

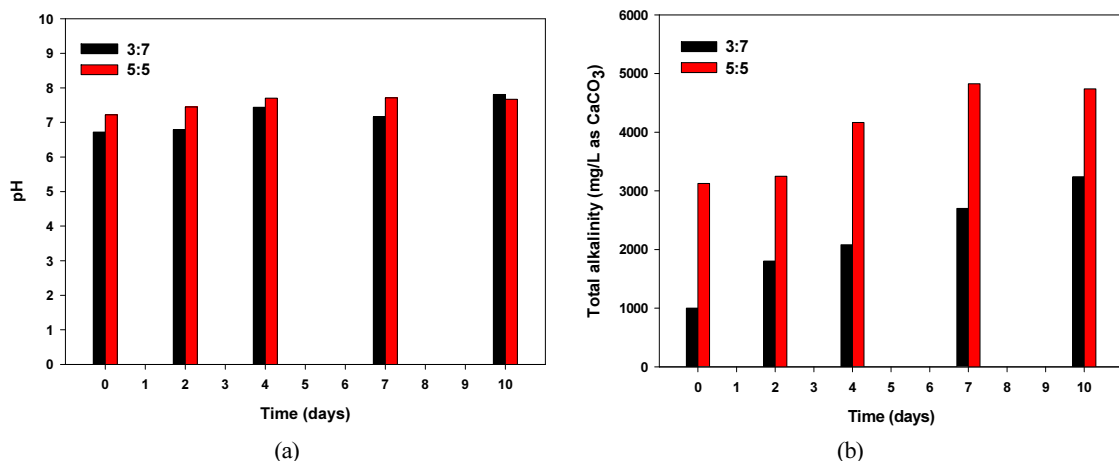


Fig. 2. Changes of (a)pH and (b)Total alkalinity for the bioelectrochemical anaerobic digester during the operation.

조의 적정 pH 범위는 6.5-7.6이며, 추천 pH는 7.0-7.2이다.^{11,20)} 따라서 5:5 혼합비는 반응초기부터 그리고 3:7은 4일 이후 부터는 생물전기화학 혐기성 소화조는 상온 조건에서 안정하게 운전이 진행된 것을 보여준다. Fig. 2(b)와 Table 2에서는 생물전기화학 혐기성 반응조의 총알칼리도(Total alkalinity) 변화를 보여주고 있으며 초기 총알칼리도는 각각 3:7의 혼합비에서는 약 1,000 mg/L as CaCO₃, 5:5의 혼합비에서는 3,125 mg/L as CaCO₃(5:5)로 나타났으며 3:7의 혼합비에서는 4일이 경과 후 2,080 mg/L as CaCO₃, 7일 경과 후 2,700 mg/L as CaCO₃, 10일에는 3,240 mg/L as CaCO₃로 증가하는 것으로 나타났으며 5:5의 혼합비에서는 3,000 mg/L as CaCO₃ 이상을 계속 유지하였으며 10일 경과 후 4,740 mg/L as CaCO₃로 운전되었다. 5:5의 혼합비의 반응기는 3:7의 혼합반응기 보다 혐기성 소화 슬러지의 혼합이 높음에 따라 초기의 총알칼리도를 높여 소화 반응을 초기부터 안정적으로 운전할 수 있게 해주는 것으로 나타났다. 혐기성 소화조의 총알칼리도는 유기질소 성분의 분해에 의해 생성되는 암모니아, 정인산, VFA의 농도, 메탄생성 반응 및 황산염의 환원 반응의 활성 그리고 바이오가스의 이산화탄소 함량 등의 다양한 상태변수들에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다.^{12,21,22)}

혐기성 분해 반응의 중간 생성물인 VFAs 농도는 혐기성 소화조의 상태를 판단하는데 필요한 중요한 지표이며 혐기성 소화조에서 낮은 VFAs 농도는 소화조가 정상적으로 운전되고 있음을 의미한다⁷⁾.

알칼리도에 대한 VFAs의 비는 혐기성 소화조의 안정성을 평가하기 위하여 널리 사용한다. 정상적으로 운

전되고 있는 재래식 중온 혐기성 소화조의 경우 VFAs/알칼리도 비는 0.1-0.3이다.^{11,23,24)}

본 연구에서 운전 초기의 VFAs의 농도는 각각 3:7의 혼합비에서는 1,303 mg/L as HAc, 5:5의 혼합비에서는 1,377 mg/L as HAc로 나타났으며 생물전기화학 혐기성 소화 반응이 진행됨에 따라 3:7의 혼합비에서는 VFAs/알칼리도의 비는 초기부터 1.30(2일차)로 시작하여 0.34-1.30으로 7일차까지 불안정하게 운전되었으며 10일차에는 0.2로 나타났다. 5:5의 혼합비에서는 초기에는 VFAs/알칼리도의 비는 0.41-0.44이었으며 4일 이후부터는 0.18-0.20로 유지하였다. 따라서 3:5의 혼합비의 반응기보다 5:5의 혼합비의 반응기가 보다 안정적으로 운전되는 것으로 나타났다.

3.2. 바이오가스 생산 및 유기물 제거율

본 연구에서는 혐기성 소화 슬러지와 생슬러지의 혼합비 변화에 따른 생물전기화학 혐기성 소화조에서 발생한 바이오가스 발생량 및 유기물 제거율을 비교하였으며 혐기성 소화 슬러지의 혼합율이 높은 5:5의 혼합비의 반응기에서 메탄 발생량 및 유기물 제거 효율이 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 3은 혼합비에 따른 생물전기화학 혐기성 소화조에서 발생하는 바이오가스의 메탄 생산 누적 그래프와 바이오가스 조성을 나타내고 있다. Fig. 3(a)에서 CH₄과 CO₂의 누적 그래프에서 보이는 것과 같이 3:7과 5:5의 혼합비에 따라 2일까지는 큰 차이를 보이지 않았으며 3일차 후부터 5:5의 혼합비 반응기에서 바이오가스 생산량이 증가하기 시작하는 것으로 나타났다.

Table 2. Properties of bioelectrochemical anaerobic digester for digester effluent

Parameter	mixing ratio	Time(days)				
		0	2	4	7	10
pH	3:7	6.72	6.79	7.44	7.36	7.81
	5:5	7.22	7.45	7.70	7.71	7.67
Total Alkalinity(mg/L as CaCO ₃)	3:7	1,000	1,805	2,080	2,700	3,240
	5:5	3,125	3,250	4165	4825	4740
TVFAs(mg/L as HAc)	3:7	1303.3	630.3	800.8	1093.9	648.6
	5:5	1377.0	1337.0	783.0	980.8	858.7
TVFAs/Alkalinity	3:7	1.30	0.35	0.39	0.41	0.20
	5:5	0.44	0.41	0.19	0.20	0.18

으며, 바이오가스 누적그래프에서는 혼합비에 따라 각각 3:7의 경우 CH₄ 3,395 mL/L, CO₂ 2,037 mL/L, 5:5의 경우 CH₄ 5,047 mL/L, CO₂ 2,224 mL/L로 나타났으며 5:5의 혼합비에서 CH₄ 발생량이 약 1,652 mL/L 가 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 3(b)는 바이오가스의 메탄함량은 혼합비에 따른 바이오가스의 농도를 나타내고 있으며 혼합비에 따라 각각 3:7의 경우 평균 62.4±7.7%(49.0-73.4%) 5:5의 경우 평균 70.4±15.3% (50.6-93.8%)로 나타났다. 따라서, 바이오가스 생산 및 메탄함량에 있어서는 혐기성소화슬러지의 혼합비율이 높은 5:5의 혼합비에서 생산량 및 함량이 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 4(a)와 Table 3은 생물전기화학 혐기성소화조의 유입 및 유출 슬러지의 COD 농도 및 제거율을 나타내며 3:7과 5:5의 혼합비 유입수의 TCOD 농도는 각각 41.8 g/L, 32.6 g/L로 최종 TCOD 제거율은 각각 39.3%, 52.2%로 나타났고, 5:5의 혼합비에서 3:7보다 TCOD 제거율이 12.9% 증가하는 것으로 나타났다. TCOD 제거량의 경우 3:7과 5:5의 혼합비에서 각각 18.3g/L, 17.16g/L로 유입수의 농도가 높은 3:7에서 TCOD의 제거량은 조금 더 높게 나타났으며 상대적으로 TCOD의 제거량이 높음에도 메탄의 발생량은 5:5에서 높게 나타나 혐기성소화슬러지의 혼합비가 증가에 따라 소화효율을 향상에 좋은 영향을 미치며

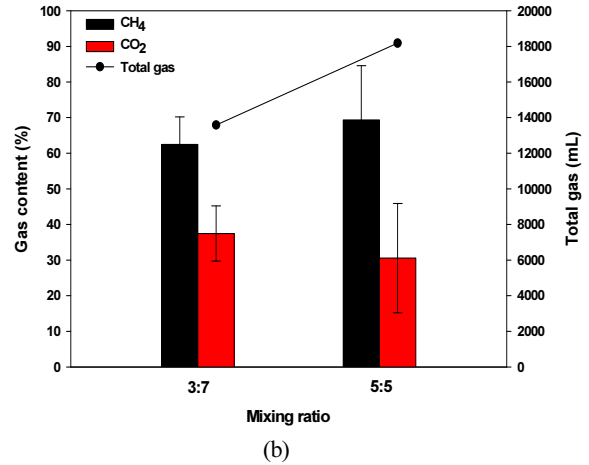
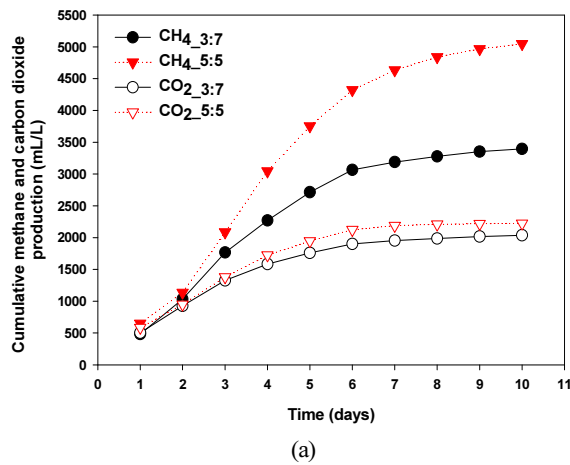


Fig. 3. Comparison of performances of bioelectrochemical anaerobic digester reactor; (a)cumulative methane and carbon dioxide production and (b)gas composition.

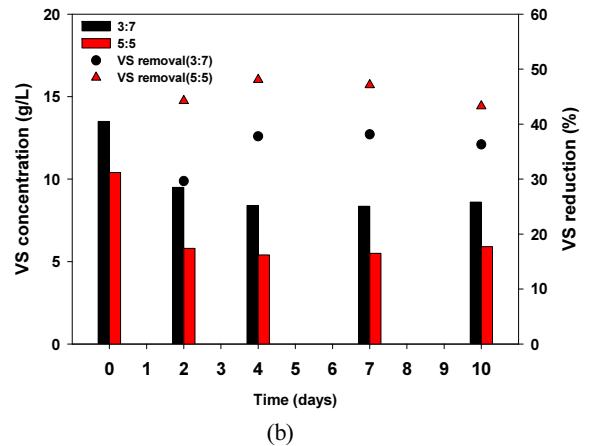
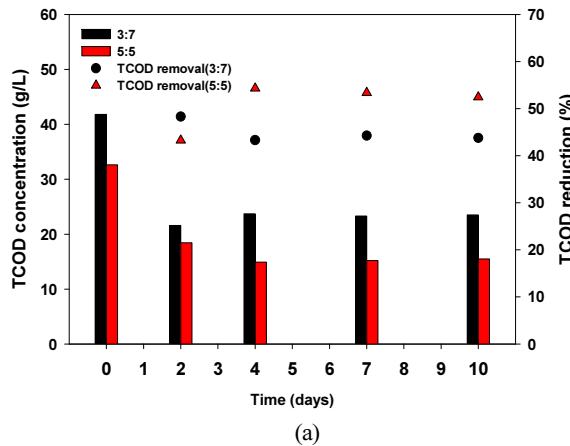


Fig. 4. TCOD(a) and VS(b) in digester effluent and their removal at different mixing ratio.

메탄생산에 있어 발생량을 증가시키는 것으로 판단된다. 혐기성소화조의 SCOD는 가수분해산물인 당류, 산발효산물인 VFAs 등으로 구성되며, 혐기성소화조의 SCOD 농도는 소화조의 상태를 간접적으로 판단할 수 있도록 해준다⁷⁾. 따라서 3:7, 5:5의 혼합비의 초기 SCOD농도는 각각 0.57 g/L, 3.60 g/L로 시작하여 최종적으로는 3:7의 혼합비에서는 0.96 g/L로 증가하였고, 5:5의 혼합비에서는 감소와 증가를 반복하며 10일차에는 0.87 g/L 감소하였다. 따라서 3:7의 혼합비 보다 5:5의 혼합비에서 생물전기화학 혐기성소화조가 안정한 상태에서 운전되고 있음을 나타내고 있다. Fig. 4(b)는 VS 농도 및 제거효율을 나타내고 있으며 초기유입슬러지 3:7과 5:5의 혼합비 VS의 농도는 각각 10.4 g/L, 13.5 g/L로 나타났다. 3:7과 5:5의 혼

합비에서 생물전기화학 혐기성소화조의 최종 VS의 제거효율은 각각 36.3%, 43.8%로 나타났으며 5:5의 혼합비가 3:7의 혼합비 보다 7.5% 제거효율이 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 혐기성소화조의 혼합비가 높아지면 VS의 제거효율도 증가한다는 것을 나타낸다.

Fig. 5은 생물전기화학 혐기성소화에서 제거된 COD 당 메탄생성량을 의미하는 메탄수율은 상온조건에서 3:7과 5:5의 혼합비에서 각각 185.6 mL CH₄/g CODr, 294.2 mL CH₄/g CODr 로 5:5의 혼합비가 3:7의 혼합비보다 0.63배 증가하는 것으로 나타났으며, 에너지 효율의 경우에도 3:7과 5:5의 혼합비에서 각각 45.1%, 72.3%로 나타났다. 이와 같은 결과는 주입되는 혐기성소화슬러지의 증가와 함께 pH, 알칼리도, 부유혐기성미생물에 의한 메탄발생량이 상대적으로 더욱

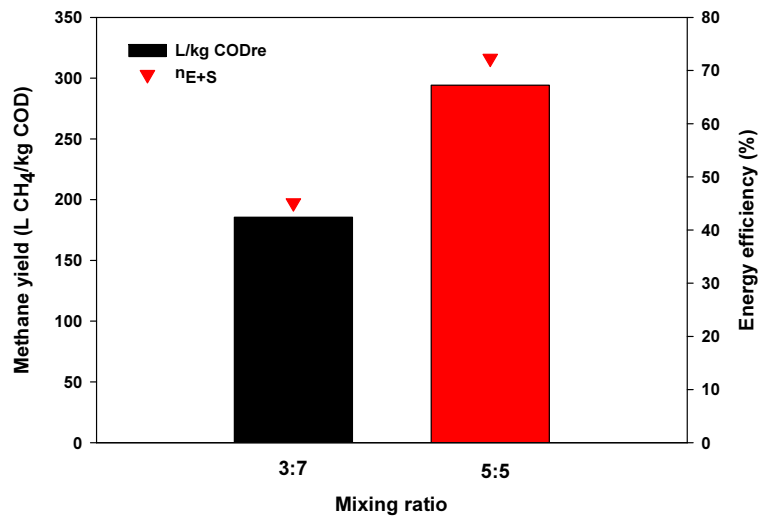


Fig. 5. Methane yields of reactor based on removed TCOD and energy efficiency.

Table 3. Performance of bioelectrochemical anaerobic digester

Parameter	mixing ratio	Time(days)				
		0	2	4	7	10
TCOD removal (%)	3:7	-	48.33	43.30	44.26	43.78
	5:5	-	43.25	54.29	53.37	52.45
VS removal (%)	3:7	-	29.63	37.78	38.15	36.30
	5:5	-	56.73	48.08	50.96	52.88
SCOD(g/L)	3:7	0.57	0.60	0.67	0.59	0.96
	5:5	3.60	1.00	5.01	0.51	0.87
Methane yield (mL CH ₄ /CODr), Overall energy efficiency (%)	3:7	185.6 mL CH ₄ /CODr, 45.1%				
	5:5	294.2 mL CH ₄ /CODr, 72.3%				

증가하였기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 혐기성소화슬러지와 생슬러지의 혼합비(3:7, 5:5) 변화에 따른 생물전기화학 혐기성 소화조에서 발생한 바이오가스발생량 및 유기물제거율 등을 비교하였으며 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 폐활성슬러지 처리에 있어 혼합비의 비율을 3:7 과 5:5를 비교한 결과 생물전기화학 혐기성소화조의 상태변수들은 3:7의 혼합비에 비해 비교적 5:5의 혼합비에서 안정적이었으며 TCOD 제거율과 메탄수율은 52.5%(7.5% 증가), 294.2 mL CH₄/L (0.63배 증가)로 나타났다.
2. 생물전기화학 혐기성소화조에 혼합비에 따른 소화슬러지의 양이 증가함에 따라 초기 pH와 알칼리도가 증가하고 또한 VFAs 및 SCOD 값이 감소하여 소화조의 안정성이 향상되었다. 따라서 소화슬러지의 혼합비에 의해 생물전기화학 혐기성소화조의 효율향상 및 운전의 안정성을 향상 시키는데 도움이 된다.

사 사

본 논문은 2017년도 경남과학기술대학교 대학회계 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

1. Guo, X., Liu, J. and Xiao, B., "Bioelectrochemical enhancement of hydrogen and methane production from the anaerobic digestion of sewage sludge in single-chamber membrane-free microbial electrolysis cells", *Int. J. hydrogen energy*, 38(3), pp. 1342~1347. (2013).
2. Speece, R.E., "Anaerobic Biotechnology and Odor/corrosion Control for Municipalities and Industries". Incorporated. Fields Publishing, (2008).
3. Zhang, Y. and Angelidaki, I., "Microbial electrolysis cells turning to be versatile technology: recent advances and future challenges," *Water Res.*, 56, pp. 11~25. (2014).
4. Zhang, J., Zhang, Y., Quan, X., Chen, S. and Afzal, S., "Enhanced anaerobic digestion of organic contaminants containing diverse microbial population by combined microbial electrolysis cell (MEC) and anaerobic reactor under Fe(III) reducing conditions", *Bioresour. Technol.*, 136, pp. 273~280. (2013).
5. Cheng, S. and Logan, B. E., "Sustainable and efficient biohydrogen production via electrohydrogenesis," *PNAS*, 104 (47), pp. 18871~18873. (2007).
6. Wang, A., Liu, W., Ren, N., Cheng, H. and Lee, D.-J., "Reduced internal resistance of microbial electrolysis cell as factor of configuration and stuffing with granular activated carbon," *Int. J. Hydrogen Energy*, 35(24), pp. 13448~13492. (2010).
7. Feng, Q., Song, Y. and Jang, S., "Ferric Chloride Addition Enhances Performance of Bioelectrochemical Anaerobic Digestion of Sewage Sludge at Ambient Temperature", *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 38(11), pp. 618~626, (2016).
8. Sasaki, K., Morita, M., Sasaki, D., Hirano, S., Matsumoto, N., Watanabe, A., Ohmura, N. and Igarashi, Y., "A bioelectrochemical reactor containing carbon fiber textiles enables efficient methane fermentation from garbage slurry," *Bioresour. Technol.*, 102(13), pp. 837~6842. (2011).
9. Tartakovsky, B., Mehta, P., Bourque, J. S. and Guiot, S. R., "Electrolysis-enhanced anaerobic digestion of wastewater," *Bioresour. Technol.*, 102(10), pp. 5685~5691. (2011).
10. Villano, M., Monaco, G., Aulenta, F. and Majone, M., "Electrochemically assisted methane production in a biofilm reactor," *J. Power Sources*, 196(22), pp. 9467~9472. (2011).
11. Song, Y. C., Feng, Q. and Ahn, Y. T., "Performance of the bio-electrochemical anaerobic digestion of

- sewage sludge at different hydraulic retention times,” *Energ. Fuel.*, 30(1), pp. 352~359. (2016).
12. Feng, Q., Song, Y. C. and Bae, B. U., “Influence of applied voltage on the performance of bioelectrochemical anaerobic digestion of sewage sludge and planktonic microbial communities at ambient temperature,” *Bioresour. Technol.*, 220, pp. 500~508. (2016).
 13. Xafenias, N. and Mapelli, V., “Performance and bacterial enrichment of bioelectrochemical systems during methane and acetate production”. *Int. J. Hydrogen Energy* 39, pp. 21864~21875. (2014).
 14. Yin, Q., Zhu, X., Zhan, Z., Bo, T., Yang, Y., Tao, Y., He, X., Li, D. and Yan, Z., “Enhanced methane production in an anaerobic digestion and microbial electrolysis cell coupled system with co-cultivation of *Geobacter* and *Methanosarcina*”, *J. Environ. Sci.* 42, pp. 210~214. (2016).
 15. Bo, T., Zhu, X., Zhang, L., Tao, Y., He, X. and Li, D., “A new upgraded biogas production process: coupling microbial electrolysis cell and anaerobic digestion in single-chamber, barrel-shape stainless steel reactor”, *Electrochem. Commun.* 45, pp. 67~70. (2014)
 16. Lee, B., Park J., Shin, W., Tian, D. and Jun, H., “Microbial communities change in an anaerobic digestion after application of microbial electrolysis cells”, *Bioresour. Technol.* 234, pp. 273~280. (2017).
 17. Park, J., Lee, B., Tian, D. and Jun, H., “Bioelectrochemical enhancement of methane production from highly concentrated food waste in a combined anaerobic digester and microbial electrolysis cell”, *Bioresour. Technol.* 247, pp. 226~233. (2018).
 18. Park, J., Tian, D., Lee, B. and Jun, H., “The Methane Production from Organic Waste on Single Anaerobic Digester Equipped with MET (Microbial Electrochemical Technology)”, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 38(4), pp. 201~209. (2016).
 19. Anderson G.K and Yang G., “Determination of bicarbonate and total volatile acid concentration in anaerobic digesters using a simple titration” *Water Environment Research.* 64(1): pp. 53~59. (1992).
 20. Jain, S., Jain, S., Wolf, I. T., Lee, J. and Tong, Y. W., “A comprehensive review on operating parameters and different pretreatment methodologies for anaerobic digestion of municipal solid waste,” *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 52, pp. 142~154. (2015).
 21. Song, Y. C., Kwon, S. J. and Woo, J. H., “Mesophilic and thermophilic temperature co-phase anaerobic digestion compared with single-stage mesophilic-and thermophilic digestion of sewage sludge,” *Water Res.*, 38(7), pp. 1653~1662. (2004).
 22. Kim, D. H., Song, Y. C. and Feng, Q., “Influence of Applied Voltage for Bioelectrochemical Anaerobic Digestion of Sewage Sludge,” *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 37(9), pp. 542~549. (2015).
 23. Padilla-Gasca, E., López-López, A. and Gallardo-Valdez, J., “Evaluation of Stability Factors in the Anaerobic Treatment of Slaughterhouse Wastewater,” *J. Biorem. Biodegrad.*, 2(114), pp. 2155~6199. (2011).
 24. Feng, Q., Song, Y. C., Yoo, K., Lal, B., Kuppanan, N., Subudhi, S. and Choi, T. S., “Performance of Upflow Anaerobic Bioelectrochemical Reactor Compared to the Sludge Blanket Reactor for Acidic Distillery Wastewater Treatment,” *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 38(6), pp. 279~290. (2016).