Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association, 27(4), pp.25-33 (2019)
ISSN 1225-6498 eISSN 2508-3015 https://doi.org/10.17137/korrae.2019.27.4.25

Original Paper

30L 미생물전기분해전지의 하수슬러지로부터 바이오가스 생산 특성

이명은[a], 안용태[b], 신승구[c], 서선철[d], 정재우[e†]

Biogas Production from Sewage Sludge in 30L Microbial Electrolysis Cell

Myoung-Eun Lee[a], Yongtae Ahn[b], Seung Gu Shin[c], Sun-Chul Seo[d], Jae Woo Chung[e†]

(Received: Oct. 17, 2019 / Revised: Nov. 21, 2019 / Accepted: Nov. 24, 2019)

ABSTRACT: Operating characteristics of a 30 L microbial electrolysis cell (MEC) for producing biogas from sewage sludge was studied. During the 32-day inoculation period, carbon dioxide concentration decreased and methane concentration increased with operating time, and the overall methane content of biogas was 69.1% with a production rate of 171.6 mL CH_4/L・d. In fed-batch experiments for 6 operating cycles, CH_4 concentration of 66.5~77.2% was obtained at a production rate of 184.9~372.9 mL CH_4/L・d, COD, TS and VS removal efficiency ranged from 28.2 to 42.1%, 20.7 to 37.5% and 18.5 to 36.9%, respectively. The MEC system was observed to be stabilized as operating cycles were repeated after inoculation. In the last operating cycle, 5221 mL/L of methane was produced with CH_4 yield of 316.7 L CH_4/kg COD_{rem}, and the energy recovery was 73%.

Keywords: Microbial electrolysis cell, anaerobic digestion, sewage sludge, methane production, energy recovery

초 록: 하수슬러지로부터 바이오가스를 생산하기 위한 30 L 규모의 미생물전기분해전지 시스템의 초기 운전특성에 관한 연구를 수행하였다. 32일간의 식종기간동안, 운전시간이 경과함에 따라 이산화탄소 농도는 감소하고 메탄농도가 증가하였으며, 69.1%의 농도를 가진 메탄가스가 171.6 mL CH_4/L・d의 속도로 얻어졌다. 식종이 끝난 후에 6회의 운전 사이클동안 이루어진 회분식 실험에서, 66.5~77.2%의 농도를 가진 메탄을 184.9~372.9 mL CH_4/L・d의 생산속도로 얻어졌다. COD의 제거효율은 28.2~42.1%의 범위를 가지며, TS와 VS의 제거효율은 각각 20.7~37.5%와 18.5~36.9%의 범위를 가지는 것으로 나타났다. 식종 후 운전 사이클이 반복됨에 따라 시스템의 안정화가 이루어지는 것이 관찰되었다. 마지막 운전 사이클에서 메탄의 발생량과 수율은 각각 5221 mL/L와 316.7 L CH_4/kg COD_{rem}이었으며 에너지회수율은 73%이었다.

주제어: 생물전기화학, 혐기성소화, 하수슬러지, 메탄생산, 에너지회수율

[a] 경남과학기술대학교 환경공학과 박사후 연구원(Ph.D, Department of Environmental Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology)
[b] 경남과학기술대학교 에너지공학과 부교수(Associate Professor, Department of Energy Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology)
[c] 경남과학기술대학교 에너지공학과 조교수(Assistant Professor, Department of Energy Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology)
[d] 용진환경 이사(Director, Wastewater Treatment Department, Youngjin Environment)
[e] 경남과학기술대학교 환경공학과 교수(Professor, Department of Environmental Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology)

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

1. 서 론

화석연료를 대체할 수 있는 에너지시스템 구축이 중요한 현실에서 다양한 형태의 유기성 폐자원은 하나의 대안으로 부각되고 있다. 혐기성소화(Anaerobic Digestion)는 하수슬러지나 음식물쓰레기에 포함된 유기물을 바이오가스로 전환시키기 위해 널리 활용되고 있는 기술 중의 하나이다[1,2]. 혐기성소화는 산소가 없는 조건에서 미생물 군집에 의해 유기물을 분해시켜 에너지 함량이 높은 바이오가스와 비료 등을 생산할 수 있는 유용한 기술로서 오랜 기간동안 활용되어 왔다. 비교적 최근부터 혐기성소화의 기술적 제한점을 보완하고 효율성을 향상시키기 위해 생물전기화학 기술을 접목시킨 기술에 대한 연구가 강도높게 이루어지고 있다[3-5]. 생물전기화학 기술을 혐기성소화에 결합시킨 미생물전기분해전지(MEC, Microbial Electrolysis Cell)는 미생물연료전지(MFC, Microbial Fuel Cell) 등의 다른 기술에 비해 현장적용성이 높은 기술로 평가되고 있다[4].

MEC는 혐기성소화에 비해 보다 다양한 경로를 통해 바이오가스를 빠른 속도로 생산할 수 있으므로 유기물 처리의 체류시간을 낮출 수 있으며 운전의 온도의존성도 줄일 수 있는 것으로 알려져 있다[6,7]. MEC 기술을 적용하기 위해서는 매우 낮은 수준의 전기에너지가 필요하므로 신재생에너지로부터 산업현장에서 생산된 전기에너지를 활용하여 운전될 수 있으며, 높은 바이오가스 생산속도와 수율로 저장성이 높은 에너지 물질을 얻을 수 있는 유용한 기술이다. 현재까지 수행된 MEC 연구들을 통해 유기물 제거 및 바이오가스 생산과 관련된 화학반응 기작과 그에 미치는 다양한 변수들의 영향이 규명되어 왔으며, 혐기성소화에 비해 높은 메탄 수율과 생성속도를 얻을 수 있는 경제적인 기술로 평가되고 있다[8,9].

MEC 기술을 산업현장에 적용하기 위해서는 규모확대에 대한 연구가 필요하다. 혐기성소화는 오래전부터 현장에 적용되고 있으며 관련 연구들이 대규모 시스템을 이용하여 진행되고 있는데 비해 MEC 연구들은 수 L 이하의 소규모로 진행되어 왔다[10]. 현재까지 매우 드물게 진행되었는데, 대표적인 경우는 가정하수로부터 수소를 생산하기 위해 100 L의 파일럿 규모 연구를 수행한 사례를 들 수 있다[11,12]. 우수한 기술로서 평가되고 있는 MEC의 현장적용 기술화를 달성하기 위해서는 소규모 실험실 규모 연구의 한계를 벗어난 규모 확대 연구를 통해 실제 폐기물의 처리특성과 다양한 운전변수의 영향이 규명될 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 30 L급 규모의 MEC 시스템을 구성하여 하수슬러지로부터 바이오가스 생산특성에 대한 연구를 수행하였으며 미생물 식종단계부터 MEC 초기 운전특성을 관찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. MEC 시스템 구성

본 연구에서 구성된 MEC 시스템은 이전에 발표된 2.5L 시스템과 유사하며 반응기 및 전극, 전원공급장치, 가스 포집기, 측정 및 분석장치로 구성되어 있다[13]. 반응기는 직경 290 mm, 높이 660 mm의 아크릴 관을 사용하여 총용량 41.4 L, 유효용량 30 L로 제작하였다(Fig. 1). 반응기 상부에 가스채취구와 슬러지 유입구를 설치하였다. 슬러지 유입구를 통해 외부공기가 유입되는 것을 막기 위해 반응기 내부의 용액에 잠기도록 아크릴관을 반응기 덮개에 부착하여 설치하였다. 반응기는 항온수 공급시스템과 교반기를 설치하여 균일한 온도 및 혼합 조건에서 운전할 수 있도록 하였다.

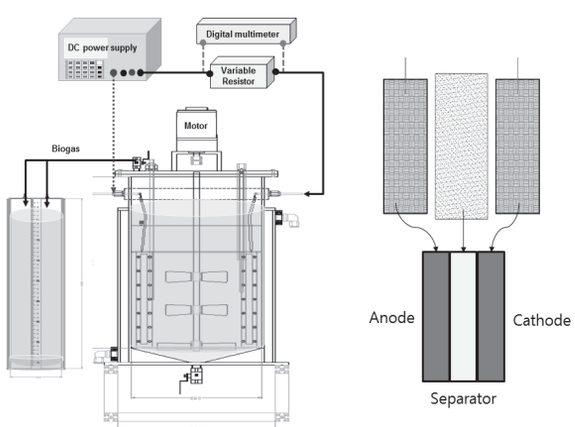


Fig. 1. Schematic diagram of 30L microbial electrolysis cell system.

전극은 내구성이 높고 비표면적과 전도성이 우수한 것으로 알려진 흑연직물섬유(graphite fiber fabric, GFF)의 표면에 다중벽탄소나노튜브(multi-wall carbon nanotube, MWCNT)를 코팅시킨 전극(한국생물전기화학, Korea)을 사용하였다. 아크릴로 제작된 틀에 산화전극과 환원전극(70mm×320mm)을 부직포(Polypropylene non-woven sheet)로 분리시켜 일체형(Separator electrode assembly, SEA)으로 제작하였다. 전극은 15 m^2/m^3을 기준으로 하여 10개를 설치하였으며, Ti wire를 사용하여 전원과 연결하였다. 전극으로 전기를 공급하기 위해 전원공급장치(OPM series, ODA Technologies Co. Ltd., Korea)를 사용하였다. MEC 시스템으로부터 발생되는 바이오가스를 포집하기 위해 40 L 용량의 가스포집기를 이용하였으며 황산을 이용하여 pH 2 이하로 산성화시킨 포화염수(NaCl)를 충진시켜 발생된 가스의 용해를 막았다. 측정 및 분석장치는 전극으로 공급되는 전기적 특성을 측정하고 발생되는 바이오가스를 분석하는 장치로 구성되어 있다.

2.2. MEC 운전 및 분석 방법

MEC 반응기에 미생물을 식종하기 위해 J시 하수종말처리장에서 채취한 소화슬러지와 생슬러지를 1 mm 체로 거른 후에 3:7의 비율로 혼합하여 주입하고 32일간 유지시켰다. 식종에 사용된 슬러지의 주요 성상을 Table 1에 나타내었다. 식종 기간동안에 반응기는 35±2℃로 유지하였으며 100 rpm으로 교반하면서 0.3 V를 인가하였다. 식종이 끝난 후부터는 MEC 반응기의 슬러지와 생슬러지를 5:5로 혼합하여 공급하면서 운전하였다. 총 6회의 회분식 실험이 진행되었으며, 운전 사이클별 슬러지 공급은 바이오가스의 발생이 중지되었을 때 이루어졌다. MEC의 운전은 2.5 L 시스템 연구를 통해 바이오가스 생산측면에서 가장 효과적으로 밝혀진 조건에서 이루어졌으며, 위에서 설명한 식종과정의 운전조건과 같다. 전극으로 공급되는 전류와 전력을 계산하기 위해 디지털멀티미터(Digital multimeter, DMM, Keithley 2700, Keithley Instruments Inc., Ohio, USA)를 이용하였으며 전극 사이에 저항 10 Ω을 병렬로 연결하여 양단의 전압을 10분 간격으로 측정하였다.

MEC 시스템을 운전하면서 슬러지 용액의 주요 물성을 분석하였다. 반응기의 시료는 2~5일 간격으로 약 25 mL의 시료를 채취하여 Standard Methods에 따라 TSS, VSS, TCOD, SCOD, pH, Alkalinity를 분석하였으며 TVFAs 농도는 적정법[14]을 이용하여 분석하였다. 반응조에서 발생된 바이오가스를 매일 정량하였고 발생된 가스의 성분 분석은 열전도도 검출기(TCD)가 장착된 GC(GowMac Series 580, USA)를 사용하여 분석하였다. 바이오가스 발생량은 표준상태(standard temperature and pressure, STP) 조건으로 환산하였다. MEC 시스템의 에너지 회수율(η_T)은 다음과 같이 투입된 총 에너지에 대한 생성된 메탄의 에너지 량의 비로 정의되며, 이를 구하는 과정은 이전에 발표된 논문에 자세하게 설명된 바 있다[13,15].

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

MEC 시스템으로 투입된 총 에너지는 전기에너지(W_E)와 제거된 기질이 지닌 에너지(W_S)의 합이며 회수되는 에너지는 생성되는 메탄으로부터 회수되

Table 1. Characteristics of the Raw Sludge, Seed Sludge and Sludge Mixture

Parameter	Raw sludge	Seed sludge	Sludge mixture
TS (g/L)	52.1	32.8	48.5
VS (g/L)	15.3	11.1	14.4
TCOD (g/L)	64.7	32.6	50.4
SCOD (g/L)	1.1	0.9	1.4
pH	6.12	7.43	6.83
Alkalinity (mg/L as $CaCO_3$)	1,450	5,575	2,385
TVFAs (mg/L as HAc)	1,594	1,857	1,757

는 에너지(W_{CH4})이다. 기질과 메탄의 에너지 함량은 연소열을 고려하여 구할 수 있다. W_E는 전압과 전류의 곱을 운전시간에 대해 적분하여 구하였고 W_S와 W_{CH4}를 구하기 위해 포도당 및 메탄 산화반응의 자유에너지 변화값을 이용하였다. 소모된 기질의 양은 제거된 COD 값을 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. MEC 반응기 식종기간 운전 결과

MEC 반응기에 혼합슬러지를 공급하여 32일간 식종시키면서 바이오가스의 발생량과 가스성분별 발생 경향을 관찰한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 바이오가스 발생량은 식종 후 5일부터 뚜렷하게 증가하기 시작하여 12일째 날에 31.2 L/d로 최대값을 가진 후에 감소하였으며 18일이 경과하면서부터는 바이오가스 발생량이 0.7~1.8 L/d의 작은 양이 발생하는 것으로 나타났다. 식종 초기(1~4일)의 바이오가스 함량은 메탄이 49.4±5.19(45.2~57.2)%, 이산화탄소가 50.4±5.1(42.8~54.1)%, 수소가 0.2±0.3(0.0~0.7)%인 것으로 측정되었다. 식종시간이 증가하면서 메탄의 함량은 증가하고 이산화탄소의 함량은 감소하는 것을 관찰할 수 있다.

전체 식종기간에 얻어진 바이오가스의 조성과 누적 발생량을 Fig. 3에 나타내었다. 바이오가스 성분별 농도는 메탄이 69.1±9.6(45.2~84.0)%, 이산화탄소

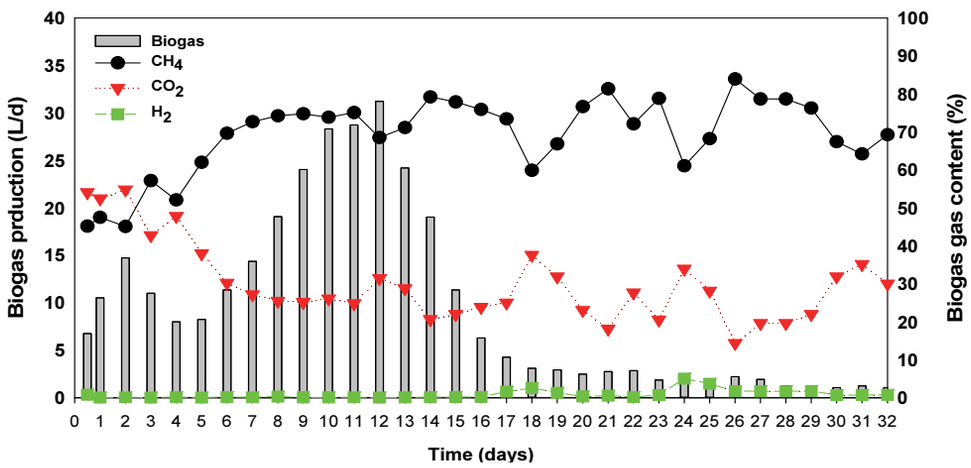
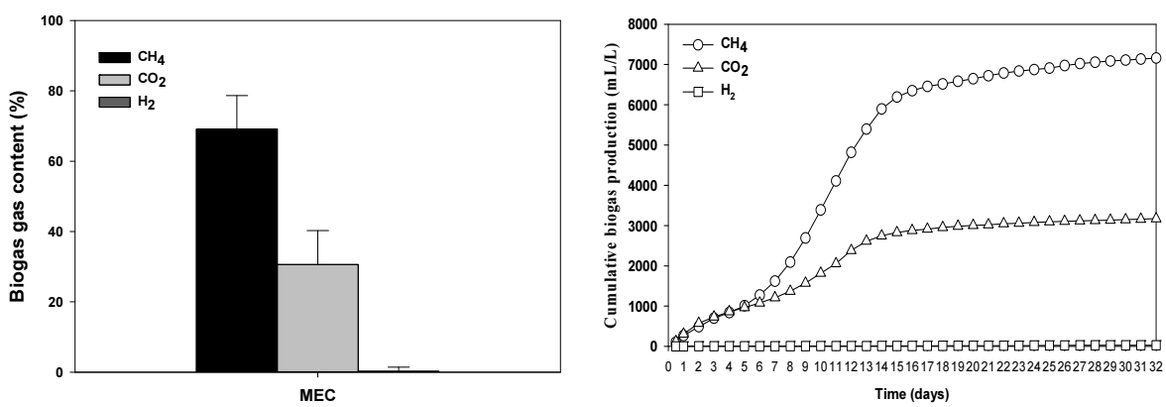


Fig. 2. Biogas generation characteristics during inoculation period of the microbial electrolysis cell.



(a) (b)

Fig. 3. Overall biogas concentration (a) and cumulative production (b) of biogas generated during inoculation period.

가 30.6±9.6(14.3~54.8)%, 수소는 0.3±1.2(0.0~5.0)%의 범위를 가지는 것으로 나타났다. 바이오가스 발생은 식종 후에 대략 1주일까지 서서히 증가하다가 그 후로는 가파르게 증가하며, 2주일이 경과하면 발생이 거의 완료되는 것으로 나타났다. 32일간의 식종기간 동안 반응기 체적 1 L를 기준으로 메탄 7,161 mL, 이산화탄소 3,170 mL, 수소 27.43 mL가 발생하였다. 식종기간동안 생성된 총 바이오가스 발생량은 310.7 L로, 메탄이 214.8 L, 이산화탄소가 95.1 L, 수소가 0.8 L인 것으로 나타났다.

Table 2는 식종기간의 주요 특성값들을 비교하여 나타낸 결과이다. 식종 초기의 pH와 알칼리도는 6.8과 2,385 mg/L as $CaCO_3$의 값을 가지며 식종이 종료된 후에 각각 7.5와 5,575 mg/L as $CaCO_3$으로 변화하였다. 재래적인 혐기성소화조의 적정 pH의 범위인 6.5~7.6의 범위를 유지하였으며 식종이 진행됨에 따라 pH가 증가하는 것으로 나타났다. 식종과정에서 TCOD, SCOD, TS, VS,의 제거율은 각각 44.2%, 36.4%, 35.9%, 38.2%로 나타났다. VFAs의 경우 혐기성 분해반응의 중간생성물이므로 그 농도의 변화는 생물전기화학반응의 정도를 평가할 수 있는 주요 지표이다. 알칼리도에 대한 TVFAs의 비는 혐기성소화조의 안정성을 평가하기 위해 이용되고 있으며 정상적으로 운전되는 중온 혐기성소화조는 0.1~0.3의 값을 가지는 것으로 알려져 있다[7,16,17]. 반응기로 투입된 식종슬러지의 TVFAs/Alkalinity 비는 0.73이었으며 식종이 끝난 후의 값은 0.33을 가져 생물전기화학반응을 통해 혐기성소화조의 정상적인 범위와 가까운 값을 유지하는 것으로 나타났다. 식종기간의 메탄 생산속도는 약 171.6 mL CH_4/L · d이며 메탄과 이산화탄소의 함량은 각각 69.1±9.6%와 30.6±9.6%인 것으로 나타났다.

3.2. MEC 반응기 운전 결과

식종이 끝난 후에 MEC 반응기의 슬러지와 생슬러지를 5:5로 혼합하여 주입하며 회분식으로 운전하였다. Fig. 4는 6회의 운전 사이클동안 얻어진 바이오가스 발생량 및 조성을 나타내고 있다. 운전 사이클의 변화는 바이오가스 발생이 중지될 때 슬러지 공급과 함께 이루어졌다. 모든 실험에서 반응기에 슬러지를 투입하면 바이오가스 발생량이 빠르게 증가하여 최대값에 도달한 후에 감소하는 경향을 보였다. 슬러지 투입 후 시간이 경과함에 따라 이산화탄소 농도는 감소하였으며 메탄 농도는 증가하였다. 실험기간동안 메탄과 이산화탄소 함량의 평균값은 각각 66.5~77.2%와 22.1~33.2%의 범위를 가지는 것으로 나타났다.

일반적으로 혐기성소화조에서 발생하는 바이오가스의 조성은 유입되는 유기물의 화학적 조성에 영향을 받는 것으로 알려져 있으며[18], 하수슬러지를 처리하는 혐기성소화조에서 발생하는 바이오가스의 메탄 함량은 55~65%인 것으로 알려져 있다[19-21]. MEC 공정에서는 76%보다 높은 값을 가지는 메탄함량

Table 2. Major Operating Characteristics of the Microbial Electrolysis Cell During Inoculation Period

Parameter	Initial	Final
pH	6.83	7.50
SCOD (g/L)	1.43	0.91
TCOD (g/L)	50.4	28.1
TS (g/L)	48.5	31.1
VS (g/L)	14.4	8.9
TVFAs (mg/l as HAc)	1,757	1,866
Alkalinity (mg/L as $CaCO_3$)	2,385	5,575
TVFAs/Alkalinity ratio	0.73	0.33
CH_4 production (mL CH_4/L · d)	171.57	
CH_4 content (%)	69.1±9.57	
CO_2 content (%)	30.6±9.64	

이 얻어지는 것으로 보고되고 있다[6]. 전통적인 혐기성 소화과정에서 메탄은 acetoclastic 및 hydrogenotrophic 메탄생성균에 의해 아세테이트와 수소로부터 생성되며 그 비는 70/30인 것으로 알려져 있다[1,3]. 생물전기화학 반응이 일어나는 MEC 시스템에서는 이러한 반응들과 더불어 cathode로부터 전자의 직접적인 전달에 의한 CO_2의 환원반응 등에 의해 추가로 메탄이 생성될 수 있다. 따라서, MEC 시스템에서 메탄함량은 증가하게 된다[6].

Table 3은 운전 사이클별로 유기물질 제거특성과 바이오가스 발생 특성을 운전기간과 함께 나타낸 결과이다. 반응기로 공급되는 유입슬러지의 유기물 농도는 TCOD를 기준으로 37.1~47.3 g/L의 범위를 가졌으며 28.2~46.9%의 제거율이 얻어진 것으로 나타났다. TS와 VS의 제거효율은 각각 20.7~37.5%와 18.5~36.9%의 범위를 가졌다. 운전 사이클별 메탄의 누적발생량은 2926~5221 mL/L, 메탄 생산속도는 184.9~372.9 mL CH_4/L · d, 메탄 수율은 172.1~333.2 L CH_4/kg COD_{rem}의 범위를 가지는 것으로 나타났다.

전반적으로 운전 사이클이 반복됨에 따라 MEC 시스템이 안정화되는 것이 관찰되었다. 1차 운전 사이클에서는 COD 제거율이 28.2%로 낮았으나 2차부

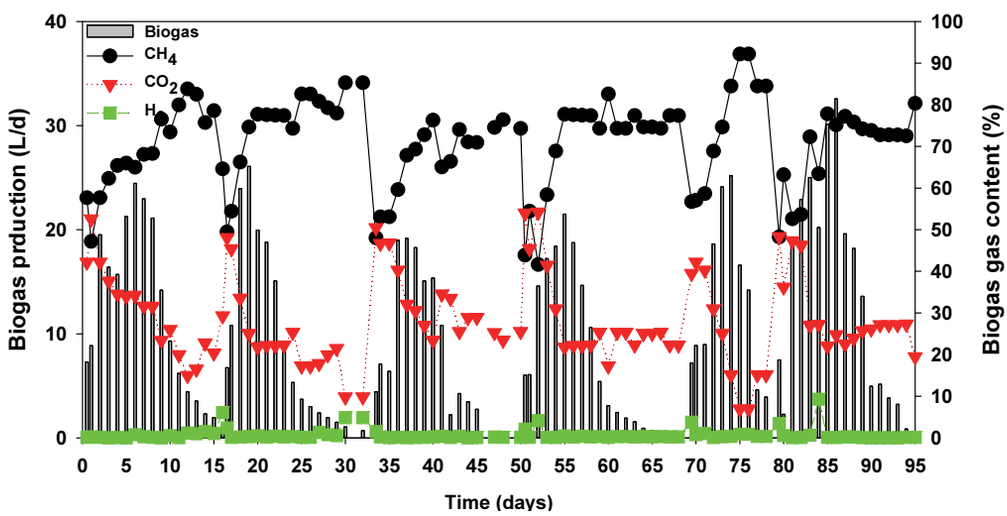


Fig. 4. Biogas generation characteristics during the six fed-batch cycles of microbial electrolysis cell.

Table 3. Operating Period, Initial COD and Biogas Profiles of the Bioelectrochemical Anaerobic Digester According to Operating Cycles

Parameter	Cycle					
	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
Operating period (days)	17	16	18	20	10	18
Initial TCOD (g/L)	47.3	46.9	37.1	38.5	40.2	42.4
TCOD (%)	28.2	38.0	35.9	28.4	42.1	39.9
TS (%)	24.1	26.4	37.5	23.6	26.7	20.7
VS (%)	18.5	22.8	22.7	24.5	36.9	28.3
CH_4 production rate (mL CH_4/L · d)	261.5	226.2	184.9	203.7	340.4	372.9
CH_4 content (%)	66.5	72.6	66.7	68.1	77.2	69.1
CO_2 content (%)	33.2	26.9	33.1	31.2	22.1	29.8
Cumulative CH_4 production (mL/L)	4,446	3,619	2,926	3,303	3,404	5,221
CH_4 yield (mL CH_4/g COD_{rem})	333.2	203.2	172.1	301.6	201.2	316.7

터 TCOD를 기준으로 제거율이 증가하여 시스템이 안정화되는 경향을 보이고 있다. 4차 운전 사이클에서는 2차와 3차 사이클에 비해 COD 제거율이 감소하였으나 VS의 제거율은 증가하였으며, 가장 긴 시간동안 바이오가스 생성이 이루어졌다. 이는 유입슬러지의 유기물에 비용해성 성분들이 다량 포함되어 있어 발생한 결과로 판단된다. 5차 사이클의 경우에는 유기물 제거율이 높게 나타났으며 빠른 시간에 바이오가스 발생이 완료되어 가장 짧은 시간동안 운전되었다. 바이오가스 발생량은 유입슬러지의 유기물 함량이 증가할 때 증가하는 기존의 연구결과[131]와 비슷한 경향이 관찰되었다. 1차와 6차 사이클에 공급되는 슬러지의 유기물 함량이 높았으며 다른 운전 사이클에 비해 상대적으로 많은 바이오가스가 발생하였다. 1차 사이클의 경우에는 메탄 수율이 333.2 L CH_4/kg COD_{rem}로 가장 높은 값을 나타내었으나 운전 초기로 시스템이 안정화되지 못하여 유기물 제거율이 낮아서 얻어진 결과이며, 6차의 경우에 시스템 안정화로 인해 TCOD 제거율(42.4%), 메탄생성속도(372.9 mL CH_4/L · d), 메탄 발생량(5221 mL/L)이 모두 높게 얻어졌다.

MEC 시스템의 식종과정과 운전 사이클별 메탄수율 및 에너지회수율을 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. 식종기간의 메탄수율과 에너지회수율은 각각 322 L와 75.9%를 가지는 것으로 나타나 1차 사이클을 제외한 나머지 운전에서 얻어진 값들에 비해 높은 값을 갖는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 식종기간이 32일로 가장 긴 시간동안 바이오가스가 발생되었기 때문인 것으로 판단된다. 식종과정 이후에 이루어진 1차 운전 사이클의 경우, 비교적 높은 농도의 유기물이 공급된 상태에서 COD 제거효율이 상대적으로 낮았기 때문에 비교적 높은 메탄수율과 에너지회수율이 얻어졌다(Table 3). 2차와 3차 사이클은 시스템이 안정화되어가는 과정에서 COD 제거효율은 증가하고 있으나 바이오가스 생산이 원활하게 이루어지지 못하였으며, 4차 운전 사이클에서는 COD 제거효율은 낮았으나 상대적으로 긴 시간동안 바이오가스 생산이 가능했기 때문에 비교적 높은 메탄수율이 얻어진 것으로 보인다. 5차부터 COD 제거효율이 증가하고 시스템이 안정화가 이루어진 것으로 판단된다. 6차 운전 사이클에서는 비교적 안정적인 운전이 이루어져 가장 많은 양의 바이오가스가 생성되었고 73%의 에너지회수율이 얻어졌다.

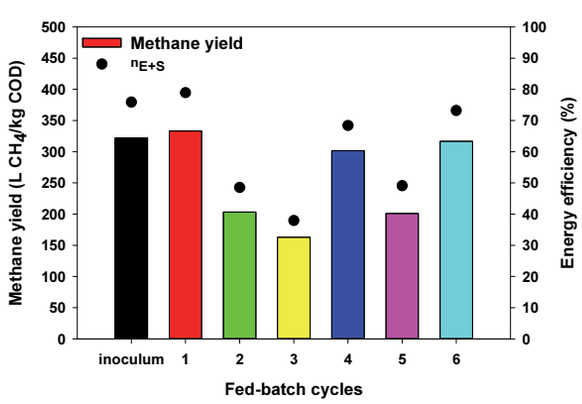


Fig. 5. Biogas generation characteristics according to operating cycles in the microbial electrolysis cell.

4. 결 론

기존 연구들에 비해 상대적으로 규모가 큰 30 L급 MEC 시스템을 활용하여 미생물 식종단계부터 MEC의 초기운전 특성을 관찰하였으며, 본 연구에서 얻어진 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 32일의 식종과정에서 운전시간이 경과함에 따라 이산화탄소 농도는 감소하고 메탄농도가 증가하였으며 평균 69.1%의 농도를 가진 메탄가스가 얻어졌다. 메탄의 생성속도는 171.6 mL CH_4/L · d이었으며, 수율은 322 L CH_4/kg COD_{rem}이었다.
2) 식종 후 6회의 운전 사이클에 걸쳐 이루어진 회분식 실험에서, 66.5~77.2%의 농도를 가진 메탄이 184.9~372.9 mL CH_4/L · d의 생성속도로 얻어졌으며 COD, TS, VS의 제거효율은 각각 28.2~42.1%, 20.7~37.5%, 18.5~36.9%의 범위를 가지는 것으로 나타났다.
3) 운전 사이클이 반복됨에 따라 MEC 시스템의 안정화가 이루어지는 것이 관찰되었고, 마지막 운전에서 5221 mL/L의 메탄이 316.7 L CH_4/kg COD_{rem}의 수율로 얻어졌으며, 이때 에너지회수율은 73.2%이었다.

사 사

이 논문은 2018-2019년도 경남과학기술대학교 대학회계 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

1. Elalami, D., Carrere, H., Monlau, F., Abdelouahdi, K. Qukarroum, A. and Barakat, A., “Pretreatment and co-digestion of wastewater sludge for biogas production: Recent research advances and trends,” Renew. Sustain. Energy Rev., 114, 109287. (2019).
2. 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).
3. Bundhoo, Z. M. A., “Coupling dark fermentation with biochemical or bioelectrochemical systems for enhanced bio-energy production: A review,” Int. J. hydrogen energy, 42(43), pp. 26667~26686. (2017).
4. Geppert, F., Liu, D., van Eerten-Jansen, M., Weidner, E., Buisman, C. and Ter Heijne, A., “Bioelectrochemical power-to-gas: State of the art and furture perspectives,” Trends Biotechnol., 34(11), pp. 879~894. (2016).
5. 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).
6. Feng, Q., Song, Y.-C., Kim, D.-H., Kim, M.-S. and Kim, D.-H., “Influence of the temperature and hydraulic retention time in bioelectrochemical anaerobic digestion of sewage sludge,” Int. J. hydrogen energy, 44(4), pp. 2170~2179. (2019).
7. 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).
8. 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).
9. 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).
10. Beegle, J. R. and Borole, A. P., “Energy production from waste: Evaluation of anaerobic digestion and bioelectrochemical systems based on energy efficiency and economic factors,” Renew. Sustain. Energy Rev., 96, pp. 343~351. (2018).
11. Heidrich, E.S., Dolfing, J., Scott, K., Edwards, S.R., Jones, C. and Curtis, T.P., “Production of hydrogen from domestic wastewater in a pilot-scale microbial electrolysis cell,” Appl Microbiol. Biotechnol., 97(15), pp. 6979~6989. (2013).
12. Heidrich, E. S., Edwards, S. R., Dolfing, J., Cotterill, S. E. and Curtis, T. P., “Performance of a pilot scale microbial electrolysis cell fed on domestic wastewater at ambient temperature for a 12 month period,” Bioresour. Technol., 173, pp. 87~95. (2014).
13. Chung, J.-W., Lee, M.-E., Seo, S.-C. and Ahn, Y., “Effect of waste activated sludge mixing ratio on the biogas prodution in bioelectrochemical anaerobic digestion,” J. of KORRA, 26(4), pp. 53~61. (2018).
14. 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).
15. Ahn, Y., Im, S. and Chung, J.-W., “Optimizing the operating temperature for microbial electrolysis cell treating sewage sludge,” Int. J. hydrogen energy, 42(45), pp. 27784~27791. (2017).
16. 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).
17. Purser, B. J., Thai, S. M., Fritz, T., Esteves, S. R., Dinsdale, R. M. and Guwy, A. J., “An improved titration model reducing over estimation of total volatile fatty acids in anaerobic digestion of energy crop, animal slurry and food waste”, Water Res., 61, pp. 162~170. (2014).
18. 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).
19. 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).
20. Bolzonella, D., Pavan, P., Battistoni, P. and Cecchi, F., “Mesophilic anaerobic digestion of waste activated sludge: influence of the solid retention time in the wastewater treatment process,” Process Biochem., 40(3-4), pp. 1453~1460. (2005).
21. Takashima, M. and Tanaka, Y., “Acidic thermal post-treatment for enhancing anaerobic digestion of sewage sludge,” J. of Environ. Chem. Eng., 2(2), pp. 773~779. (2014).