

혐기성소화 슬러지 비율에 따른 미생물전기분해전지의 식종 특성

송근욱^a, 백윤정^a, 서희진^b, 장해남^c, 정재우^d, 이명은^e, 안용태^{††}

Startup of Microbial Electrolysis Cells with different mixing ratio of Anaerobic Digested Sludge and Buffer solution

Geunwuk Song^a, Yunjeong Baek^a, Hwijin Seo^b, Hae-Nam Jang^c, Jae Woo Chung^d,
Myoung-Eun Lee^e, Yongtae Ahn^{††}

(Received: Nov. 26, 2019 / Revised: Dec. 10, 2019 / Accepted: Dec. 11, 2019)

ABSTRACT: In this study, the influence of anaerobic digested sludge and 50 mM PBS (phosphate buffer solution) mixing ratio (1:1, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5, 1:6, 1:7) on hydrogen production and inoculation period were examined. MECs were operated in fed-batch mode with an applied voltage of 0.9 V. As a result, in the 1:1 mixing ratio reactor, 9.8-20.9 mL of hydrogen was produced with the highest hydrogen content of 66.8-79.6%. Hydrogen gas production and power density increased from after 12 days of inoculation for the 1:1 mixing ratio reactor. In case of 1:2, 1:3 and 1:4 mixing ratio reactor, the hydrogen gas production was 3.7-7.1 mL and the hydrogen gas content was 5.8-65.8%. The hydrogen gas yield in 1:5, 1:6 and 1:7 ratio reactors, was 0.50-0.69 mL and hydrogen content range was 1.8-7.1%. The mixing ratio was found to be suitable for hydrogen production and inoculation period by mixing ratio up to 1:4.

Keywords: Microbial electrochemical technology, microbial electrolysis cell, sewage sludge, start-up, anaerobic digestion, hydrogen

초 록: 실험실 규모 회분식 미생물전기분해전지 반응기 (유효부피 20 mL)를 이용하여 수소가스 생산 및 식종기간 특성을 조사하였다. 총 6 cycle 동안 0.9 V를 인가하여 식종슬러지 혼합 비율 (혐기성소화 슬러지:50 mM PBS)에 따른 수소생산 및 식종기간을 분석한 결과 혼합비 1:1 반응기에서 9.8-20.9 mL 수소를 생산하였으며, 수소함량은 66.8-79.6%로 가장 높게 나타났다. 식종기간에 있어서는 혼합비 1:1 반응기 기준으로 약 12일 정도부터는 수소생산 및 전류밀도가 증가하는 것으로 나타났다. 또한 혼합비 1:2, 1:3, 1:4 반응기의 경우 cycle (2-6 cycle)에 따라 수소가스

^a 경남과학기술대학교 에너지공학과 학부생(Undergraduate, Department of Energy Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology, Gyeongnam 52725, Korea)

^b 경남과학기술대학교 에너지공학과 석사과정(Graduate student, Department of Energy Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology, Gyeongnam 52725, Korea)

^c 경남과학기술대학교 에너지공학과 조교수(Assistant professor, Department of Energy Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology, Gyeongnam 52725, Korea)

^d 경남과학기술대학교 환경공학과 교수(Professor, Department of Environmental Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology, Gyeongnam 52725, Korea)

^e 경남과학기술대학교 환경공학과 박사후 연구원(Ph.D, Department of Environmental Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology, Gyeongnam 52725, Korea)

^f 경남과학기술대학교 에너지공학과 부교수(Associate professor, Department of Energy Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology, Gyeongnam 52725, Korea)

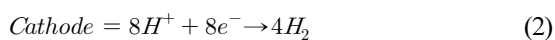
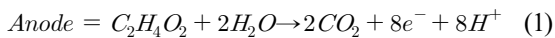
† Corresponding author(e-mail: ytahn@gntech.ac.kr)

생산량이 3.7-7.1 mL, 농도 5.8-65.8%로 변화하였으며, 혼합비 1:5, 1:6, 1:7 반응기의 수소가스 생산량은 0.5-0.7 mL, 농도 1.8-7.1%로 나타나 최대 혼합비 1:4까지 식중하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

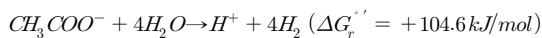
주제어: 생물전기화학기술, 미생물전기분해전지, 하수슬러지, 초기운전, 수소

1. 서론

수소는 높은 에너지 밀도를 가지고 있으며 사용 후 오염물이 없는 청정한 에너지원이다^{1,2)}. 현재 수소는 주로 물 전기분해와 탄화수소 개질을 통해서 생산되고 있다^{1,3,4)}. 바이오매스를 통해 수소를 생산하는 기술 중 하나인 미생물전기분해전지 (MEC, microbial electrolysis cell)는 다양한 생물전기화학기술 (MET, microbial electrochemical technology)의 대표적 기술 중 하나로 하·폐수의 유기물을 처리하며 동시에 수소와 메탄 등의 바이오가스를 생산할 수 있는 기술이다^{5,6)}. MEC를 통해 수소를 생산하는 경우 물 전기분해 (1.23-1.8 V)에 비해 적은 양의 전기에너지 (0.2-0.8 V)만으로도 열역학적으로 유리한 반응을 이끌어 다음과 같은 식 (1)과 식 (2)를 통해 수소를 생산해 낼 수 있다⁷⁻⁹⁾ (기질이 acetate일 때 기준).



The overall reaction:



혐기성 소화 (AD, Anaerobic digestion)는 가수분해 단계, 산생성단계, 초산생성단계, 메탄생성단계로 구성되어 있으며 이러한 단계들은 긴 체류시간과 낮은 유기물 제거율, 단계별 반응 시간의 불균일함에 의한 문제들이 있으며, 특히 빠른 산생성 반응에 의한 휘발성 지방산 (VFA, volatile fatty acid)의 축적으로 인해 pH 감소로 인한 메탄생성의 저해가 큰 문제 중 하나이다^{10,11)}. 또한 AD에서 아세트산을 이용하여 메탄을 생성하는 acetoclastic 반응이 율속단계 중 하나이나 MEC에서는 수소를 이용하여 메탄을 생성하는 반응인 hydrogenotrophic methanogenesis

가 주요한 반응이므로 체류시간이 감소하기 때문에 유기물을 더 빠르고 많이 효율적으로 처리할 수 있으며 가스 발생량도 따라서 더 많은 양이 발생하게 된다 (3-5 배, 35 °C)¹²⁾.

MEC에서 산화전극에 외부전자방출균 (exoelectrogen)으로 구성된 바이오필름을 형성하는 것 (식중)은 바이오 수소의 생산과 장기간의 운전에 있어 중요한 단계이며 식중에서 여러 변수들이 있지만 현재 대부분의 MEC 연구는 MFC로 식중을 진행한 후 운전을 한다¹³⁾. 실제 하·폐수 처리장에 적용하기 위한 pilot-scale 연구의 예로 1,000 L 연속흐름으로 운전한 MEC에서 하수, 포도주 양조장의 첫 번째 폭기조의 활성 슬러지, 하수 활성슬러지, fumarate와 acetic acid가 혼합된 하수 순으로 식중원을 바꿔가며 65일간 운전하였을 때 7.4 A/m³의 전류밀도 성능이 향상된 바가 보고되었다¹⁴⁾. 또한 과산화수소를 생산하기 위하여 진행하였던 110 L 반응조에서 acetate를 기질로 사용하였던 다른 MEC 반응조의 유출수를 식중원으로 하여 acetate를 기질로 회분식으로 사용했던 실험에서는 4개월이 걸렸으며¹⁵⁾, 12 개월간의 장기간 운전을 위하여 진행하였던 120 L 반응조에서는 식중원을 하수로 순차적으로 0.6, 0.9, 1.1 V로 인가 전압을 바꾸며 운전하였을 때 64일이 소요되었다¹⁶⁾. 이를 통해 확인할 수 있듯이 pilot-scale로 반응조의 크기가 커졌을 때 2달 이상의 매우 오랜 시간이 걸린다는 것을 확인할 수 있어 scale-up에서 식중기간을 단축하는 것이 중요함을 확인할 수 있다.

본 실험에서 실험실규모의 single chamber membraneless 반응조에서 하수처리장의 혐기성소화 슬러지를 식중원으로 사용하는데 있어 슬러지와 PBS의 혼합비율에 따른 식중기간 동안의 수소발생 및 유기물변화 등 성능을 비교하여 최적의 식중비율 및 기간을 찾고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 반응기 제작 및 운전

본 실험실에서는 실험실규모의 분리막이 없는 단일 챔버 회분식 반응기 (유효부피 20 mL)를 이용해 실험을 수행 하였으며, 반응조 상부에는 16 mL 가스 포집 튜브를 구성하여 튜브를 통해 30 mL 주사기로 가스가 포집될 수 있도록 구성하였다. 실험에 사용된 산화전극은 450 °C에서 30 분 동안 열처리한 graphite fiber brush (직경 25 mm × 길이 25 mm, 브러쉬21)와¹⁷⁾, 환원전극은 10 wt % Pt/C (0.5 mg/cm²)으로 코팅된 carbon cloth (CCP Carbon Cloth, Nara Cell-Tech Co.)를 이용하였다.

식종원은 J시 하수처리장의 소화가 끝난 혐기 소화 슬러지를 사용하였고, 기질은 50 mM PBS (NH₄Cl 0.31 g/L; KCl 0.13 g/L; NaHCO₃ 16.8 g/L; K₂HPO₄ 5.36 g/L; KH₂PO₄ 2.5 g/L; trace minerals 와 vitamins)에 1 g/L Sodium acetate를 슬러지 비율별로 사용하였다. 실험에 사용된 슬러지와 PBS는 각각의 반응기의 초기 유입농도를 Table 1과 같이 슬러지와 PBS의 혼합비를 각각 1:1, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5, 1:6, 1:7로 구성하여 각 조건별로 2 개의 반응기를 운전하였으며 혼합액을 매 cycle마다 20 mL씩 주입하였다. 반응기는 항온실에서 35 °C 조건으로 진행하였으며 10 Ω의 외부저항을 연결하고 전압 공급장치 (OPM-93 4CH, ODA Technologies Co. Ltd.)를 이용하여 0.9 V를 인가하여 총 6 cycle을 운전하였다.

2.2. 분석 및 계산

반응조에서 발생된 바이오 가스는 1일 1 회 정량하였고 발생된 가스의 성분 분석은 열전도도 검출기 (TCD)가 장착된 GC (Series 580, GowMac Instrument

Co., USA)를 사용하여 매 cycle이 끝날 때마다 N₂ (30 mL/min)를 carrier gas로 하여 injector 80 °C, detector 90 °C, column 50 °C 조건에서 분석하였으며, 측정된 바이오가스 발생량은 아래 식 (3)을 이용하여 정상 상태 (standard temperature and pressure, STP) 조건으로 환산하였다.

$$V_{CH_4}(STPL) = V_{CH_4}(at T) \times \frac{273}{273+T} \times \frac{760-W}{760} \quad (3)$$

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

전류 밀도 (A/m²)는 인가되는 전압 측정을 위해 외부저항을 통해 흐른 전압을 멀티미터 (model 2701, Keithley Instruments, Inc., USA)로 10 분마다 측정된 뒤, 그 값을 이용해 전류 (E, mV)를 계산하였고, 이를 환원전극의 표면적 (A, m²)과 저항 (Ω)으로 나눠 전류밀도 (A/m²) = E/RV를 구하였다.

유입 · 유출수의 TSS, VSS, TCOD, SCOD, pH, Ion conductivity를 분석하였으며 TCOD, SCOD는 Standard method에 따라 적정법을 이용하여 분석하였다¹⁸⁾.

3. 결과 및 고찰

3.1. 식종 비율 변화에 따른 수소생산 및 전류 밀도 결과

본 연구에서는 회분식 단일반응기를 이용하여 혐기성소화슬러지와 50 mM PBS의 식종 비율에 따른 수소가스 발생을 비교하였다. Fig. 1과 같이 1 cycle에서는 7일 동안 모든 반응기에서 바이오 가스가 평균 1 mL이하로 발생하였으며, 2 cycle에서부터 혼합비

Table 1. Parameters of Anaerobic Digested Sludge, 50 mM PBS and Seed Sludge Mixing Ratio

Parameter	Anaerobic digested sludge	50 mM PBS	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7
Seed sludge (mL)	-	-	10	6.7	5	4	3.3	2.9	2.5
50 mM PBS with feed (mL)	-	-	10	13.3	15	16	16.7	17.1	17.5
pH	7.6-7.8	7.5-7.8	8.0	8.1	8.0	8.1	8.0	8.1	8.1
Ion conductivity (mS/cm)	6.3	19-20	13.7	16.6	16.4	17.8	17.9	18.5	18.3

1:1, 1:2, 1:3, 1:4 반응기에서는 수소가스가 발생하였다. 혼합비 1:5, 1:6, 1:7 반응기에서는 전체 cycle에서 각각 수소가스가 평균 1 mL 이하로 발생하는 것으로 나타났다. 식중슬러지에 50 mM PBS 비율이 증가함에 따라 수소가스 발생량이 감소하는 경향을 보였다. 가스발생량 (3-6 cycle)은 평균 1:1 19.1 mL, 1:2 7.0 mL, 1:3 2.2 mL, 1:4 6.1 mL, 1:5 0.5 mL, 1:6 0.6 mL, 1:7 0.5 mL로 혼합비 1:5부터는 수소가스 발생량이 급격히 낮아졌으며 대부분 미량 발생하였다. 혼합비 1:1에서 수소 발생량이 가장 높게 나타났으며, 혼합비 1:2, 1:3, 1:4 반응기의 경우 cycle에 따라 발생하는 수소가스의 양이 변화하였고, 식중슬러지와 50 mM PBS 혼합비는 1:1이 가장 좋으며 최대 50 mM PBS 혼합비는 1:4 이하로 하는 것이 수소가스 발생에 적절한 것으로 판단된다. 또한 혼합비 1:1의 수소가스 발생은 4-6 cycle 부터는 19.3 mL, 20.9

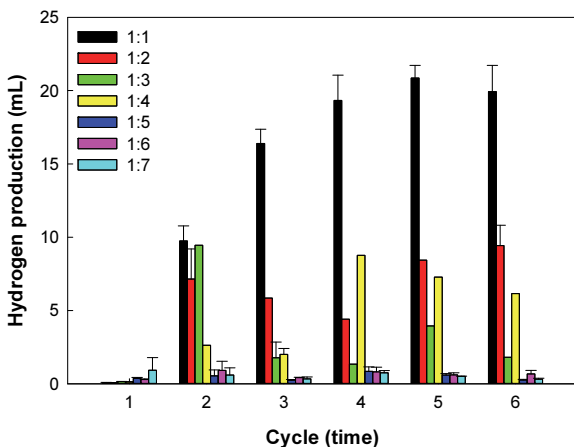


Fig. 1. Hydrogen production characteristics during inoculation period of MECs.

mL, 19.9 mL 순으로 발생하여 1:1로 혼합하였을 경우 4 cycle (12일)부터 식중이 안정화 되는 것으로 판단된다.

cycle별 운전 기간은 전압이 0.01 V로 낮아지는 시점으로 Table 2와 같이 1 cycle에서는 7일이 소요가 되었으며, 2-4 cycle 에서는 2일, 5-6 cycle 에서는 1일 주기로 운전하였다.

Fig. 2와 Table 2는 각각의 식중혼합 비율에 따른 cycle 별로 가스함량을 비교하였다. 바이오가스 함량을 비교한 결과 1 cycle 에서는 모든 반응기에서 수소가 0.3-7.9% 범위로 낮게 발생하였으며, 대부분 메탄 (29.0-78.9%)과 이산화탄소 (20.8-69.5%)가 발생하는 것으로 나타났다. 2 cycle부터는 모든 반응기에서 수소농도 3.8-49.4% 범위로 혼합비 1:3, 1:1, 1:2, 1:4 반응기 순으로 높게 발생하였다. 혼합비 1:5, 1:6, 1:7 반응기에서는 1 cycle과 비슷한 수소농도 분포를 나타내었으며, 메탄의 농도가 감소하고 이산화탄소의 농도가 증가하는 경향을 보였다. 3 cycle부터는 혼합비 1:1 반응기의 경우 수소농도가 66.8%에서 4-6 cycle부터는 77.3-79.6% 범위를 유지하였으며 혼합비 1:2, 1:3, 1:4 반응기의 경우 cycle에 따라 수소농도의 변화가 발생하였다. 혼합비 1:5, 1:6, 1:7 반응기의 경우 3 cycle 부터는 이산화탄소가 농도가 73.0-89.8%로 대부분을 차지하였으며 가스 발생량은 거의 없는 것으로 나타났다. 문헌에 따르면 소화조가 정상 상태에 도달하였을 때 약 55-75% 정도의 메탄가스가 발생하는 것으로 보고되었으며, 바이오가스에 포함되어 있는 이산화탄소와 메탄가스의 구성비는 혐기성 소화공정의 운전지표이고, 이산화탄소는 주로 외부 환경의 영향을 적게 받는 발효균에 의하여 생

Table 2. Hydrogen Production Content During Inoculation Period of MECs

Cycle	Operating time (day)	Hydrogen content (%)						
		1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7
1 st	7	0.3	0.4	0.8	0.9	3.4	15	7.9
2 nd	2	39.2	39.1	49.4	38.9	3.8	5.2	7.1
3 rd	2	66.8	17.9	9.6	12.7	1.9	2.5	2.8
4 th	2	79.6	16.6	5.8	65.8	6.4	4.7	5.8
5 th	1	77.3	30.6	29.7	57.2	3.7	5.8	5.0
6 th	1	78.1	30.6	7.6	57.2	2.6	5.8	1.8

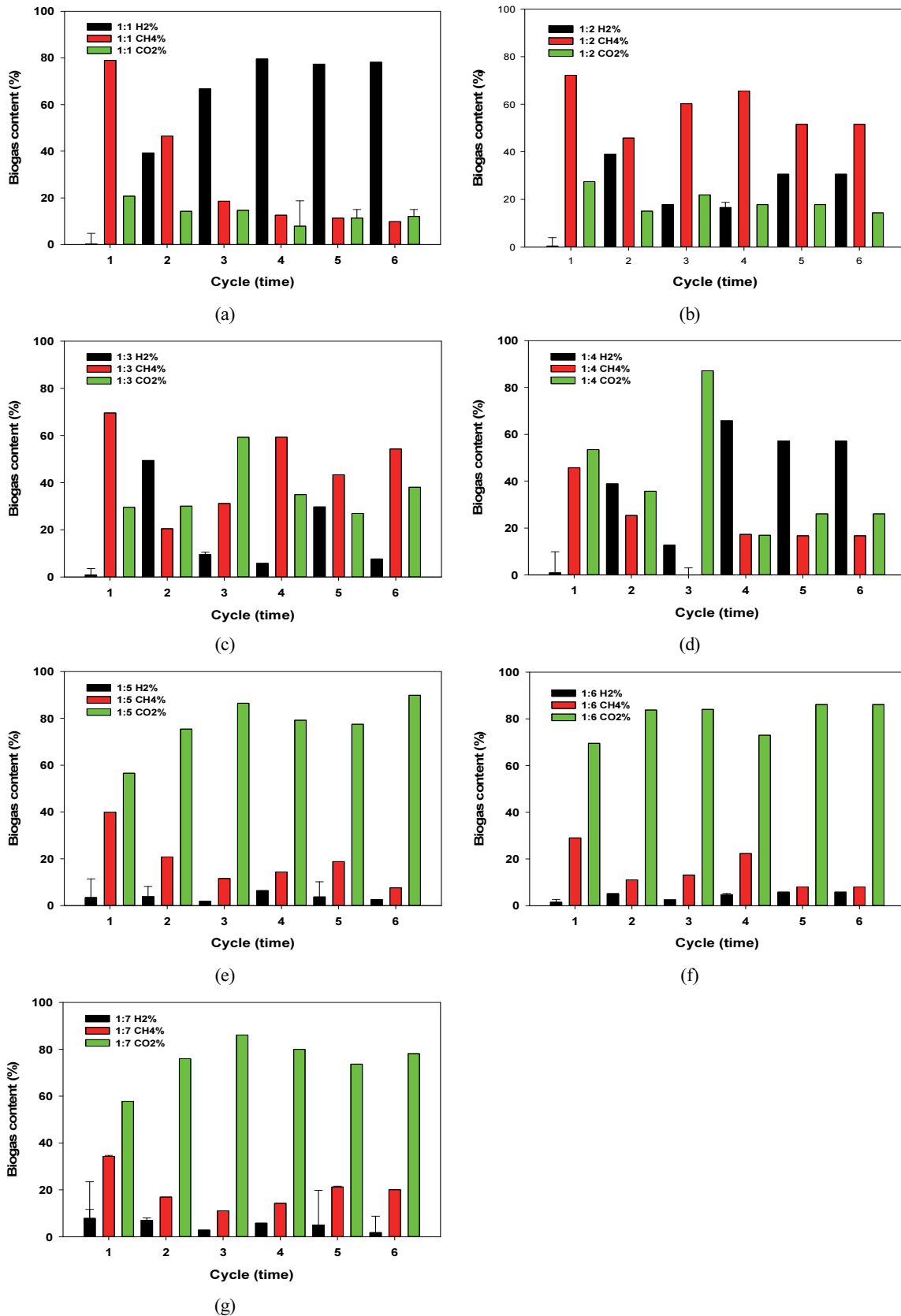


Fig. 2. Biogas contents during inoculation period of MECs. ((a) 1:1, (b) 1:2, (c) 1:3, (d) 1:4, (e) 1:5, (f) 1:6, (g) 1:7).

성되어, 반응조 내 이상상태가 발생할 경우 메탄합량이 감소하고, 상대적으로 이산화탄소의 비율이 증가하게 된다^{19),20)}. 따라서 본 연구 결과에서는 50 mM PBS의 혼합비 1:4 이상부터 이산화탄소의 발생량이 증가하는 것으로 나타나, 혼합비 1:4 이상부터 반응기내에서 안정적으로 수소생산 및 바이오가스 발생을 하지 못하는 것으로 판단된다.

Fig. 3은 식중비율에 따른 전류밀도 결과를 나타내고 있다. 1 cycle에서는 1.4일부터 4일 사이에 전류밀도가 각각 최대 1:1 (0.13 A/m²), 1:3 (0.32 A/m²), 1:2 (0.52 A/m²) 반응기 순으로 증가한 후 감소하는 것으로 나타났으며 1:5 반응기는 3-4일에서 0.14 A/m²로 증가한 후 감소하였고, 1:4, 1:6, 1:7은 큰 변화를 보이지 않았다. 2 cycle에서는 1:1 (2.34 A/m²), 1:2 (1.68 A/m²), 1:3 (1.45 A/m²) 반응기 순으로 최대 전력 밀도를 나타내었으며, 1:4 (0.79 A/m²) 반응기에서 7일차 이후부터 전류밀도가 증가하였다. 혼합비 1:1 반응기의 2 cycle에서부터 계속해서 순차적으로 전류밀도 (3 cycle, 3.3 A/m²; 4 cycle 3.8 A/m²; 5 cycle, 4.3 A/m²; 6 cycle, 4.4 A/m²)가 증가하였으며, 혼합비 1:2 (1.4-2.7 A/m²), 1:3 (1.1-2.5 A/m²) 반응기의 경우 3 cycle이후부터는 cycle에 따라 전류밀도가 변화하는 것으로 나타났다. 혼합비 1:4 반응기는 2 cycle에서부터 조금씩 전류밀도가 증가하여 왔으며 5-6 cycle에서 1.3-1.6 A/m²범위로 전류밀도를 나타내었다. 혼합비 1:5, 1:6, 1:7 반응기에서는 1 cycle과 같이 전력밀도에 큰 변화를 보이지 않았으며, 수

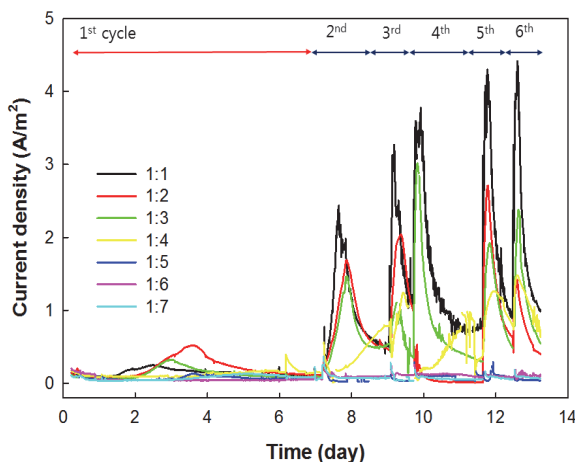


Fig. 3. Current density during start-up of MECs.

소가스 발생과 같이 혼합비 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 까지는 전류밀도의 차이는 있지만 식중비율에 있어 적용이 가능한 것으로 판단되며 혼합비가 1:5 이상인 50 mM PBS의 경우에는 가스발생 및 전류밀도가 낮은 것으로 나타났다.

3.2. 식중 비율 변화에 따른 유기물, pH, 전도도 변화 결과

식중 비율 변화에 따른 유기물 농도, pH, 전도도변화를 분석하였다. Fig. 4 (a) 및 Table 3와 같이 COD의 경우 초기의 유입수의 농도는 50 mM PBS 농도의 혼합비에 따라 평균 각각 1:1 (11,085 mg/L), 1:2 (7,060 mg/L), 1:3 (5,710 mg/L), 1:4 (4,009 mg/L), 1:5 (3,641 mg/L), 1:6 (3,111 mg/L), 1:7 (2,835 mg/L)로 cycle 별로 유입이 되었으며 모든 반응기에서 실험기간 동안 유출수의 경우 평균 33.1-3.7%로 감소하는 것으로 나타났다. 또한 VS의 농도 변화에 있어서도 대부분 유입농도와 유출수가 비슷한 농도를 유지하였으며, 일부 구간에서 소폭 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 4 (b)는 식중비율에 따른 pH의 변화를 나타내고 있다. 식중비율에 따른 pH의 변화에 있어서는 초기 유입 pH는 6 cycle 동안 평균 7.9-8.1의 범위로 유입되었으며, 유출 pH 경우 평균 8.4-8.6로 유입수와 비교하였을때 소폭 증가하는 것으로 나타났다. 혐기성 소화조 운전 시 pH와 Alkalinity는 서로 밀접하게 관련되어 있고, 유기성분이 유기산으로 전환되면서 반응액의 pH를 변화 하게하여 반응조에 영향을 미치게 된다²¹⁾. 일반적으로 유기물의 혐기 소화공정은 가수분해, 산생성, 및 메탄생성 과정의 순서로 반응이 진행된다. 이러한 과정 중 수소 분압과 유기산이 높은 산생성 단계에서는 오히려 메탄생성을 저해한다고 보고되었다²²⁾.

전도도의 경우에는 초기 유입수의 경우 평균 13.7-18.5 mS/cm로 초기의 50 mM PBS의 혼합비율이 증가함에 따라 증가하였으며, 각각의 cycle에서는 유출수와 유입수의 값이 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다.

Table 3. Influent and Effluent Concentrations of TCOD and VS

Mixing ratio	Influent (mg/L)		Effluent (mg/L)	
	TCOD	VS	TCOD	VS
1:1	11,251±1,031	2,522±188	10,050±965	2,248±258
1:2	7,060±674	1,400±309	5,654±794	1,312±321
1:3	5,710±405	1,016±239	5,498±792	1,145±260
1:4	4,009±483	554±189	2,720±731	1,006±784
1:5	3,641±240	675±175	3,352±370	666±367
1:6	3,278±586	313±48	2,571±339	277±43
1:7	2,835±376	305±45	2,467±257	311±44

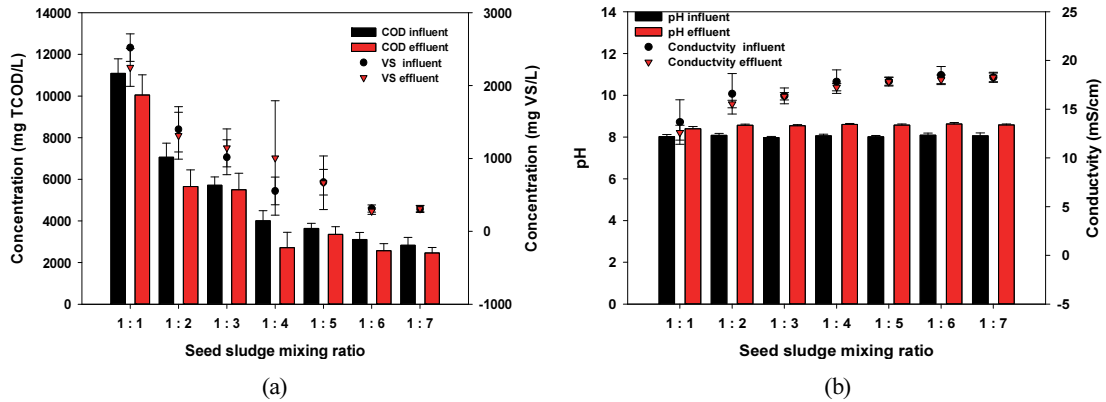


Fig. 4. TCOD (a) and VS (b) in reactors effluent at seed sludge mixing ratio.

4. 결론

본 연구에서는 식종슬러지의 비율 (혐기성소화 슬러지:50 mM PBS)에 따른 수소생산 및 식종기간의 특성을 알아보기 위해 1:1, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5, 1:6, 1:7로 혼합하여 6 cycle 동안 실험을 진행하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 가장 높은 수소발생량과 전류밀도를 보여주었던 식종비율은 혼합비 1:1에서 가장 좋았으며 슬러지와 50 mM PBS의 혼합비는 최대 1:4 이하로 혼합하는 것이 적절한 것으로 나타났다.
- 가장 좋은 성능을 보였던 혼합비 1:1에서는 4 cycle부터 안정적인 성능을 보여주었으며 이 때 수소가스 발생량은 19.3 mL, 수소함량은 77.3%였다.

사 사

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

References

- Liu, W., Huang, S., Zhou, A., Zhou, G., Ren, N., Wang, A. and Zhuang, G., "Hydrogen generation in microbial electrolysis cell feeding with fermentation liquid of waste activated sludge", International Journal of Hydrogen Energy, 37(18), pp. 13859~13864. (2012).
- Kim, K.-Y. and Logan, B. E., "Nickel powder blended activated carbon cathodes for hydrogen production in microbial electrolysis cells", International

- Journal of Hydrogen Energy. (2019).
3. Verhelst, S., "Recent progress in the use of hydrogen as a fuel for internal combustion engines", *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(2), pp. 1071~1085. (2014).
 4. Wang, Y.-Z., Zhang, L., Xu, T. and Ding, K., "Influence of initial anolyte pH and temperature on hydrogen production through simultaneous saccharification and fermentation of lignocellulose in microbial electrolysis cell", *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(36), pp. 22663~22670. (2017).
 5. Logan, B. E. and Rabaey, K., "Conversion of Wastes into Bioelectricity and Chemicals by Using Microbial Electrochemical Technologies", *Science*, 337(6095), pp. 686~690. (2012).
 6. Lu, L., Xing, D., Liu, B. and Ren, N., "Enhanced hydrogen production from waste activated sludge by cascade utilization of organic matter in microbial electrolysis cells", *Water Research*, 46(4), pp. 1015~1026. (2012).
 7. Kadier, A., Simayi, Y., Abdeslahian, P., Azman, N. F., Chandrasekhar, K. and Kalil, M. S., "A comprehensive review of microbial electrolysis cells (MEC) reactor designs and configurations for sustainable hydrogen gas production", *Alexandria Engineering Journal*, 55(1), pp. 427~443. (2016).
 8. Rozendal, R., Hamelers, H., Euverink, G., Metz, S. and Buisman, C., "Principle and perspectives of hydrogen production through biocatalyzed electrolysis", *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(12), pp. 1632~1640. (2006).
 9. Logan, B. E., Call, D., Cheng, S., Hamelers, H. V. M., Sleutels, T. H. J. A., Jeremiasse, A. W. and Rozendal, R. A., "Microbial Electrolysis Cells for High Yield Hydrogen Gas Production from Organic Matter", *Environmental Science & Technology*, 42(23), pp. 8630~8640. (2008).
 10. Park, C., Lee, C., Kim, S., Chen, Y. and Chase, H. A., "Upgrading of anaerobic digestion by incorporating two different hydrolysis processes", *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 100(2), pp. 164~167. (2005).
 11. Huang, W., Zhao, Z., Yuan, T., Huang, W., Lei, Z. and Zhang, Z., "Low-temperature hydrothermal pretreatment followed by dry anaerobic digestion: A sustainable strategy for manure waste management regarding energy recovery and nutrients availability", *Waste Management*, 70, pp. 255~262. (2017).
 12. Asztalos, J. R. and Kim, Y., "Enhanced digestion of waste activated sludge using microbial electrolysis cells at ambient temperature", *Water Research*, 87, pp. 503~512. (2015).
 13. Kumar, G., Bakonyi, P., Zhen, G., Sivagurunathan, P., Koók, L., Kim, S.-H. and Bélafi-Bakó, K., "Microbial electrochemical systems for sustainable biohydrogen production: Surveying the experiences from a start-up viewpoint", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, pp. 589~597. (2017).
 14. Cusick, R. D., Bryan, B., Parker, D. S., Merrill, M. D., Mehanna, M., Kiely, P. D. and Logan, B. E., "Performance of a pilot-scale continuous flow microbial electrolysis cell fed winery wastewater", *Applied Microbiology and Biotechnology*, 89(6), pp. 2053~2063. (2011).
 15. Sim, J., Reid, R., Hussain, A., An, J. and Lee, H.-S., "Hydrogen peroxide production in a pilot-scale microbial electrolysis cell", *Biotechnology Reports*, 19, e00276. (2018).
 16. 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 temperatures for a 12 month period", *Bioresource Technology*, 173, pp. 87~95. (2014).
 17. Cho, S.-K., Lee, M.-E., Lee, W. and Ahn, Y., "Improved hydrogen recovery in microbial electrolysis cells using intermittent energy input", *International Journal of Hydrogen Energy*. (2018).
 18. Eaton, A. D., Franson, M. A. H., Association, A.

- P. H., Association, A. W. W. and Federation, W. E., "Standard methods for the examination of water & wastewater", American Public Health Association. (2005).
19. Raynal, J., Delgen, J. P. and Moletta, R., "Twophase anaerobic digestion of solid waste by a multiple liquefaction reactors process", *Bioresource Technology*, 65(1-2), pp. 97~103. (1998).
20. McCarty, P. L., "Anaerobic waste treatment fundamentals, Part 1 : Chemistry and Microbiology", *Public Works*, Sept, pp. 107~112. (1964).
21. Jeong, K. H., Kang, H., Jeong, J. H., Kim, S. W. and Ahn, H. W., "Biogas production from daily cow manure using semi-continuously fed and mixed reactor", *J. of Korea Society of Waste Management*, 31(8), pp. 843~853. (2014).
22. Callaghan, F. J., Wase, D. A. J., Thayanithy, K. and Forster, C. F. "Co-digestion of waste organic solids: batch studies" *Bioresource Technol.*, 67, p. 117. (1999).