

미생물전기분해전지를 이용한 도축부산물 처리 가능성 평가

송근욱^a, 백윤정^a, 서휘진^b, 김대욱^c, 신승구^d, 안용태^{e†}

Feasibility test of treating slaughterhouse by-products using microbial electrolysis cells

Geunuk Song^a, Yunjeong Baek^a, Hwijin Seo^b, Daewook Kim^c, Seunggu Shin^d, Yongtae Ahn^{e†}

(Received: Apr. 13, 2021 / Revised: Jun. 16, 2021/ Accepted: Jun. 16, 2021)

ABSTRACT: The aim of this study is to evaluate the possibility of treating slaughterhouse by-products using microbial electrolysis cells (MECs). The diluted pig liver was fed to MEC reactors with the influent COD concentrations of 772, 1,222, and 1,431 mg/L, and the applied voltage were 0.3, 0.6, and 0.9 V. The highest methane production of 5.9 mL was obtained at the influent COD concentration of 1,431 mg/L and applied voltage of 0.9 V. In all tested conditions, COD removal rate was increased as the influent COD concentration increased with average removal rate of 62.3~81.1%. The maximum methane yield of 129~229 mL/g COD was obtained, which is approximately 80% of theoretical maximum value. It might be due to the bioelectrochemical reaction greatly increased the biodegradability of pig liver. Future research is required to improve the methane yield and digestibility through optimizing the reactor design and operating conditions.

Keywords: Slaughterhouse by-product, microbial electrolysis cell, applied voltage, methane gas

초 록: 본 연구는 미생물전기분해전지를 이용하여 도축부산물의 처리 가능성을 평가하였다. 도축부산물 희석액을 772, 1,222, 1,431 mg COD/L의 농도로 반응조에 주입하였으며 각 유입농도에서 인가전압 변화 (0.3, 0.6, 0.9 V)에 따른 COD 제거 및 메탄가스 발생 특성을 평가하였다. 메탄가스 발생량은 유입 COD 농도 1,431 mg/L와 인가전압 0.9 V 조건에서 최대치를 얻을 수 있었다. 모든 인가전압 조건에서 주입농도가 증가할수록 COD 제거율이 증가하였으며 평균 COD 제거율은 62.3~81.1% 이었다. 돼지 간은 난분해성 성분이 많아 혐기성소화에 적절하지 않은 기질이나 미생물전기분해전지의 생물전기화학반응을 통해 잠재적 메탄 수율의 80%인 129~229 mL/g COD의 높은 수율을 얻을 수 있었던 것으로 판단된다. 향후 반응조 형상 및 운전조건 최적화 등을 통하여 기질의 소화속도와 소화율을 보다 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

주제어: 도축부산물, 미생물전기분해전지, 인가전압, 메탄가스

^a 경상국립대학교 에너지공학과 학부생 (Undergraduate, Department of Energy Engineering, Gyeongsang National University)

^b 경상국립대학교 에너지공학과 박사과정 (Doctor's course, Department of Energy Engineering, Gyeongsang National University)

^c 경상국립대학교 에너지공학과 석사과정 (Master's course, Department of Energy Engineering, Gyeongsang National University)

^d 경상국립대학교 에너지공학과 조교수, 미래융복합기술연구소 (Assistant Professor, Department of Energy Engineering, Future Convergence Technology Research Institute, Gyeongsang National University)

^e 경상국립대학교 에너지공학과 부교수, 미래융복합기술연구소 (Associate Professor, Department of Energy Engineering, Future Convergence Technology Research Institute, Gyeongsang National University)

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

1. 서론

유기물을 다량으로 포함하고 있는 폐기물을 처리함과 동시에 에너지를 회수할 수 있는 유용한 방법 중 하나로 바이오가스화를 예로 들 수 있다^{1,2)}. 유기성 폐기물 중 하나인 도축부산물은 도축과정에서 혈액, 가죽, 머리, 내장, 뽕, 털 등이 대량으로 발생하게 된다. 육류소비가 증가함에 따라 도축부산물의 양이 증가하고 있으며 2020년 국내에서는 소가 약 88만7천 마리, 돼지 1,833만 마리, 닭 10억 7,041만 마리, 오리 6,697만 마리가 도축되었다³⁾. 소와 돼지의 정육율은 약 41.7%, 65.7%로 소 한 마리당 58.3%, 돼지 한 마리당 34.3%의 도축부산물이 발생하게 된다⁴⁾. 도축부산물 중 내장 부산물은 일부 식용목적으로 사용되고 있지만 그렇지 않은 나머지는 유기성 폐기물로 분류되어 주로 매립된다. 도축부산물은 국내 시장 상황과 수출현황에 따라 소비 변동 폭이 크고, 식용으로 쓰이지 않는 폐기물이 대부분 매립되므로 안정적으로 처리하는 방안 모색이 필요하다. 환경문제에 관한 측면에서도 도축부산물의 에너지화를 위해 혐기성소화를 이용한 폐기물 에너지화 같은 처리 방안이 필요하다.

혐기성소화 (AD, Anaerobic digestion)는 혐기 조건에서 가수분해, 산 생성, 초산생성, 메탄 생성 등의 단계가 각각의 미생물에 의해 일어나는 반응으로 유기성 폐기물을 분해해 바이오가스를 생성할 수 있다⁵⁾. 혐기성 소화의 단점으로는 긴 체류시간과 낮은 소화 효율 등이 있으며 특히 빠른 산 생성 반응에 따른 휘발성 지방산 (VFA, Volatile Fatty Acids)의 축적으로 메탄생성이 저해된다고 보고되었다^{6,7)}. 생물전기화학적 처리방법 중 하나인 미생물전기분해전지 (MEC, Microbial Electrolysis Cell)는 혐기성 소화의 단점을 보완할 수 있는 방법 중 하나이다. 미생물전기분해전지에서는 메탄생성에 있어서 hydrogenotrophic methanogenesis 기작이 우세한 반응으로 체류시간을 감소시킬 수 있어서 짧은 시간 내에 효율적인 유기성 폐기물 처리와 가스발생이 가능하다^{8,9,10)}. 바이오가스 생산을 위해서는 외부에서 일부 전압을 인가해주어야 하지만, 직접 물 전기분해에 필요한 전압 (1.23~2.0 V)보다 훨씬 적은 양의 전압으로도 효율적

인 바이오가스 생산이 가능하다는 장점이 있다^{11,12)}. 기존 혐기성 소화 공정과 비교했을 때 미생물전기분해전지는 pH와 VFA 농도 균형을 유지하여 반응조 운전에 있어서 안정성을 확보할 수 있으며, COD 제거율과 탄소 회수율이 더 높은 것으로 나타났다¹³⁾. 선행연구에 의하면, 미생물전기분해전지에서 인가전압의 영향은 0.8 V 가 될 때까지 대체로 COD 제거 효율과 메탄수율이 점차 증가하여 0.8 V에서 최고의 효율을 나타내고 1.0, 2.0 V에서는 미생물이 억제되고 처리 효율이 떨어진다¹⁴⁾. 농도에 의한 영향은 유기물질의 농도가 높아질 때 대체로 전류 발생량이 증가하지만 특정범위 이상일 때는 전극면적에 국한되어 오히려 전류밀도가 감소된 것으로 보고되었다^{15,16)}.

최근에 도축부산물 중 유기성 부분을 바이오가스 자원화하려는 기초 연구가 보고되었다. 돼지 내장류의 혐기소화를 통한 바이오 에너지 잠재량 평가가 수행되었으며 염통, 간, 허파, 대창을 이용한 생화학적 메탄 잠재량 (BMP, biochemical methane potential) 실험 결과에 따르면 각각 388, 299, 401, 592 mL/g VS 을 나타내었다¹⁷⁾. 바이오가스양 대비 메탄의 비율은 70.1%, 에너지 잠재량은 592 mL/g VS 로 대창이 가장 높았으나 표준편차의 값이 크고 변동이 폭이 컸다. 반면, 간은 바이오가스 양 대비 메탄의 비율이 59.0% 이고, 에너지 잠재량이 299 mL/g VS 로 다른 내장류에 비해 낮은 값이지만, 표준편차가 가장 작고, 시간에 따른 변동 폭이 크지 않아 안정적인 반응이 진행될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 도축부산물에 포함된 유기성 성분을 활용하여 바이오가스를 회수하는데 있어서 도축부산물 중 간을 기질로 이용해 미생물전기분해전지의 적용 가능성을 평가하고자 하였다. 고형물 농도가 높은 간의 적용 가능성 평가를 알아보기 위해 3 가지의 낮은 농도 조건에서 운전하였고 효율에 영향을 줄 수 있는 인자인 인가전압을 3 가지로 변화시키며 이에 따른 효율 변화 특성을 분리막이 없는 단일 챔버 회분식 반응기를 이용해 처리 가능성을 살펴보았다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 미생물전기분해전지 구성

반응기는 아크릴을 이용한 유효부피 20 mL 의 분리막이 없는 단일 챔버 회분식 반응기를 사용하였고 반응기 상부에는 16 mL 의 가스 포집용 튜브를 부착하여 100 mL 의 주사기를 통해 가스를 포집하였다. 실험에 사용된 산화전극은 Graphite fiber brush (2.5 cm × 2.5 cm, Brush 21)를 450 °C에서 30 분 동안 열처리를 한 후 사용하였고 환원전극은 10 wt% Pt/C (0.5 mg/cm²)로 코팅된 Carbon cloth (CCP Carbon cloth, Nara Cell-Tech Co.)를 사용하였다. Ti-wire를 이용해 전원과 연결하였고 10 Ω의 외부저항을 연결하여 전원공급장치 (OPM-93 4CH, ODA Technologies Co.)를 사용하여 전극으로 전기를 공급하여 운전하였다.

2.2. 운전

식종원은 J시 하수종말처리장에서 채취한 생슬러지를 850 μm 체로 거른 후 다른 미생물전기분해전지 반응기의 유출수와 7:3 (v/v %)으로 주입하여 13 일간 각 0.3, 0.6, 0.9 V 의 전압을 인가하여 35 ± 1 °C에서 운전하였다. 식중에 사용된 슬러지의 주요 성분은 Table 1에 나타내었다. 식중 후 도축부산물 중 돼지의 간을 기질로 사용하였다. 실험에 사용된 돼지의 간은 S시 도축장에서 채취하여 냉동 보관 후

사용하였으며 간의 주요 성분은 Table 2에 나타내었다. 기질과 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 minerals와 vitamins)를 혼합하여 입자 크기가 육안으로 보이지 않을 정도로 파쇄기를 이용하여 파쇄 후 총 20 mL를 반응기에 주입하였다. 반응기에 주입한 기질의 농도는 772, 1,222, 1,431 mg COD/L 조건으로 혼합하여 triplicate로 운전하였다. 바이오가스가 생산되지 않을 때 다음 cycle을 진행하였으며, 혼합액은 매 cycle마다 20 mL 씩 주입하였다. 운전조건은 위에서 설명한 식종과 같은 조건에서 진행하였다.

2.3. 분석 방법

Cycle이 끝날 때마다 바이오가스 및 유출수의 물성을 측정하였다. 발생한 바이오가스의 성분은 매 cycle이 끝날 때마다 열전도도 검출기 (TCD)와 Porapak Q mesh (80/100) column이 장착된 Gas Chromatograph (Series 580, GowMac Instrument Co.)를 사용하여 N₂ 30 mL/min)를 carrier gas로 injector 80 °C, detector 90 °C, column 50 °C 조건에서 측정하였다. 아래의 식 (1)을 이용해 측정된 바이오가스량을 표준상태 (STP, Standard temperature and pressure)로 환산하였다.

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

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

Parameter	Raw sludge	Seed sludge	Sludge mixture
TS (g/L)	30.2	24.1	25.8
VS (g/L)	9.4	9.1	8.7
TCOD (g/L)	30.0	19.0	15.0
SCOD (g/L)	0.8	1.9	1.2
pH	6.6	7.9	8.6
Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)	615.0	4,190.0	3,195.0
TVFAs (mg/L as HAC)	532.7	637.4	220.0

Table 2. Basic and Organic Characteristics of the Liver

	pH	TS (wet%)	VS (wet%)	Moisture (%)	COD (g/L)
Liver	7.3	27.9	24.1	72.1	410.9

T 는 반응조의 온도, W 는 온도 ($^{\circ}\text{C}$)에 따른 포화 수증기압 (mmHg)을 나타낸다. 유입수와 유출수의 pH (Orion Star A Series, Thermo Fisher Scientific Ltd. Korea)를 분석하였으며, SCOD는 Standard Methods에 따라 COD_{Cr} 법으로 분석하였다¹⁸⁾. 에너지효율은 주입된 기질을 기준으로 한 에너지 효율 (식 (2))과 인가된 전기에너지까지 추가적으로 고려된 전체 에너지 효율 (식 (3))을 아래와 같은 식을 통해 계산하였다.

$$\eta_S(\%) = \frac{W_{CH_4}}{W_S} \quad (2)$$

$$\eta_{E+S}(\%) = \frac{W_{CH_4}}{W_E + W_S} \quad (3)$$

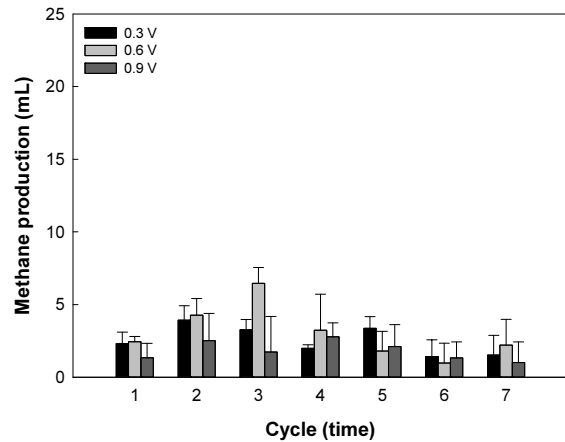
여기서, $W_{CH_4}(= \eta_{CH_4} \times \Delta C_{CH_4})$ 는 메탄생성량 n_{CH_4} (mol/day)과 메탄이 물과 이산화탄소로 산화될 때의 깃스 자유에너지변화량 ($\Delta G_{CH_4} = -818 \text{ kJ/mol}$)로부터 구하였으며, $W_E(= C \times E_{APP})$ 는 공급된 전기에너지량 (kJ/day)이다. C 는 시간에 따른 전류를 적분하여 구한 총 전하량이며, $E_{APP}(V)$ 는 산화전극과 환원전극 사이에 인가한 전위의 차이이다. $W_S(= n_S \times \Delta G_S)$ 는 제거된 COD로부터 계산한 기질의 에너지 함량이다. 여기서 η_S 는 제거된 기질의 몰수이며, ΔG_S 는 포도당이 물과 이산화탄소로 산화될 때의 깃스 자유에너지변화량 ($\Delta G_S = -2,870 \text{ kJ/mol}$)이다.

3. 결과 및 고찰

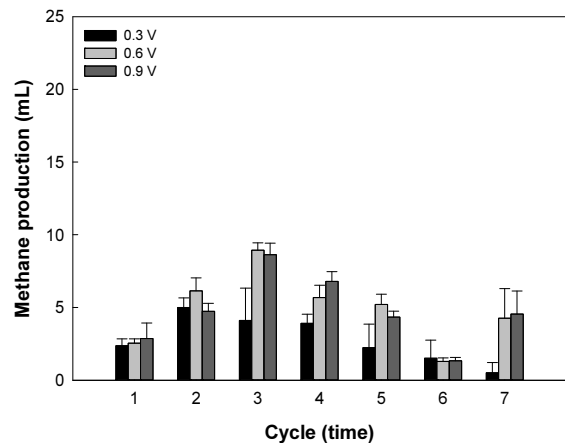
3.1. 메탄가스 발생량

반응조에 주입하는 기질농도는 772, 1,222, 1,431 mg COD/L의 조건에서 운전하였으며, 각 기질농도 조건에서 인가전압이 다른 3 가지 반응조를 운전하여 총 9 개의 조건에서 운전을 진행하였다 (Fig. 1). 모든 인가전압 조건에서 메탄가스 발생량은 주입농도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 인가전압 0.3 V 조건에서 주입농도 (772, 1222, 1,431 mg COD/L)에 따라 각각 2.5, 2.8, 4.5 mL이며 인가전압 0.6 V 조건에서 각각 3.1, 4.9, 5.6 mL, 인가전압이 0.9 V 조건

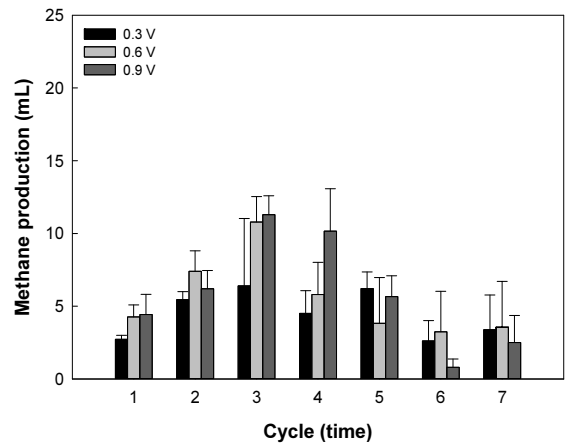
에서 각각 1.8, 6.8, 5.9 mL의 메탄가스가 발생하였다. 인가전압 0.9 V 조건에서는 1,222 mg COD/L에서



(a: 772 mg COD/L)



(b: 1,222 mg COD/L)



(c: 1,431 mg COD/L)

Fig. 1. Methane production following the influent concentration (a: 772, b: 1,222, and c: 1,431 mg COD/L).

가장 많은 메탄가스가 발생하였지만 1,431 mg COD/L 와 큰 차이를 보이지 않았으며 인가전압이 0.3, 0.6 V에서는 주입 기질농도가 증가할수록 많은 메탄가스가 발생하는 경향을 보였다. 주입되는 기질 농도가 증가함에 따라 기질친화도가 증가하여 소화 효율 향상에 좋은 영향을 미치며 메탄생산에 있어 발생량을 증가시키는 것으로 판단된다¹⁹⁾.

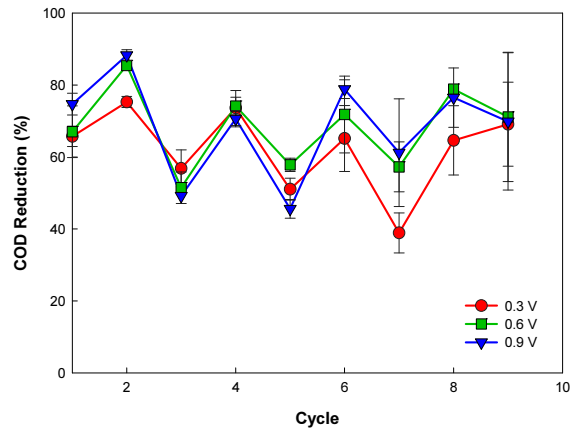
주입농도를 기준으로 인가전압을 증가시키게 될 때는 0.6 V에서 메탄가스 발생량이 가장 높았다. 주입농도 772 mg COD/L에서 인가전압 (0.3, 0.6, 0.9 V) 별로 평균 메탄가스 발생량은 각각 약 2.5, 3.1, 1.84 mL이며 주입농도 1,222 mg COD/L 조건에서 각각 약 2.8, 4.9, 4.8 mL, 주입농도 1,431 mg COD/L 조건에서는 4.5, 5.6, 5.9 mL의 메탄가스가 발생하였다. 대부분 0.6 V를 인가하였을 때 가장 많은 메탄가스가 발생하였지만 주입농도 1,431 mg COD/L 조건에서는 0.9 V 인가전압에서 메탄가스가 가장 많이 발생하였다. 하지만 0.9 V 와 0.6 V의 평균 발생량 차이는 약 0.3 mL로 메탄가스 발생량의 측면에서는 0.6 V를 인가하였을 때 다소 유리한 것으로 판단된다.

3.2. COD 제거율

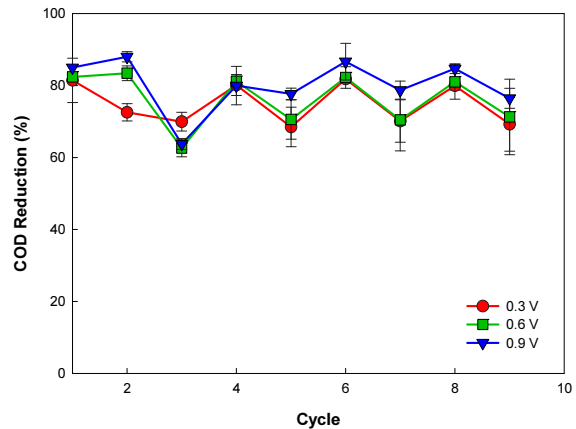
주입되는 기질 농도와 인가전압에 따른 COD 제거율 변화를 분석하였다 (Fig. 2). 모든 전압에서 주입농도에 따른 COD 제거는 증가하는 경향을 나타냈다. 인가전압이 0.3 V 조건에서 주입농도 (772, 1,222, 1,431 mg COD/L)에 따라 평균 COD 제거율은 각 약 62.3, 74.9, 77.2%를 나타냈으며 인가전압이 0.6 V 일 때 평균 COD 제거율이 각 약 68.3, 76.1, 77.8%, 인가전압이 0.9 V 조건에서 평균 COD 제거율이 각 약 68.3, 80.1, 81.1%를 나타냈다. 문헌에서 보고된 간의 생분해도가 62.7%를 나타냄으로써 본 실험의 COD 제거율은 평균 62.3~81.1%로 난분해성 기질임에도 불구하고 분해가 일정수준 이상 이루어진 것으로 판단된다¹⁷⁾. 앞서 메탄가스 발생량과 같은 경향으로 주입농도가 증가함에 따라 COD 제거율이 증가하였고 메탄가스 발생량도 증가하였다. 이는 유기물이 투입되어 소화과정을 거치면서 최종산물인 메탄, 이산화탄소 등을 포함하는 바이오가스와 유출수로 배출되어, 유입수 내의 유기물이 감량하기 때

문에 COD 제거율과 메탄가스 발생량은 같은 경향을 보인 것으로 판단된다.

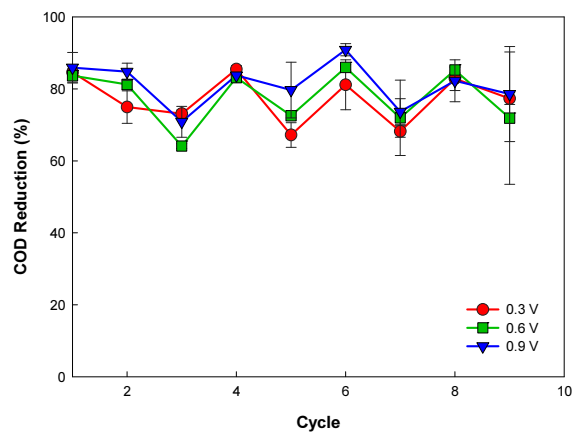
모든 조건에서 전압이 증가할수록 COD 제거율이



(a: 772 mg COD/L)



(b: 1,222 mg COD/L)



(c: 1,431 mg COD/L)

Fig. 2. COD reduction following the influent concentration (a: 772, b: 1,222, and c: 1,431 mg COD/L).

증가했다. 주입농도 1,222, 1,431 mg COD/L에서는 모든 전압에서 안정적인 COD 제거율을 보였으나 농도가 가장 낮은 772 mg COD/L 조건은 불안정한 COD 제거율을 나타냄을 보아 주입하는 기질의 농도가 772 mg COD/L 이상일 경우 원활한 메탄가스 발생과 COD 제거율이 이루어질 것으로 판단된다.

3.3. 수율과 효율

인가전압에 따른 메탄수율과 주입된 기질을 기준으로 한 에너지효율 식 (2), 인가된 전기에너지를 추가적으로 고려한 에너지 효율 식 (3)을 분석하였다 (Fig. 3). 대체로 인가전압이 0.6 V 조건에서 최대 효율을 나타냈다. 기질을 기준으로 한 에너지효율은 주입기질농도가 772 mg COD/L 조건에서 인가전압이 0.6 V일 때 약 101.1%로 최댓값을 나타냈으며, 주입기질농도 1,222 mg COD/L 조건에서 인가전압이 0.3 V일 때 약 48.9%로 최솟값을 나타냈다. 전기 에너지량과 기질에너지량을 고려한 효율에서는 주입농도 772 mg COD/L 조건에서 인가전압이 0.6 V일 때 약 89.0%로 최댓값을 나타냈으며, 주입농도 1,222 mg COD/L 조건에서 인가전압 0.3 V일 때 약 47.3%로 최솟값을 나타냈다. 전체 주입농도 조건에서 인가전압 0.3 V일 때 효율이 대체로 낮은 경향을 보였고 0.6 V일 때 높은 경향을 나타냈다.

메탄수율의 경우 큰 경향을 나타내지 않았지만 효율 측면에서 0.6 V를 인가하는 것이 높은 효율을 가질 수 있을 것으로 판단된다. 주입된 COD 기준 메탄수율은 주입농도가 772 mg COD/L 조건에서 인가전압 (0.3, 0.6, 0.9 V)에 따라 각각 172, 210, 159 mL COD를 나타냈으며, 주입농도 1,222 mg COD/L 조건에서는 인가전압에 따라 각각 129, 202, 224 mL COD, 주입농도 1,431 mg COD/L 조건에서 인가전압에 따라 각각 209, 200, 229 mL/g COD가 발생하였다. 제거된 COD 기준 메탄수율은 주입농도 772 mg COD/L에서 인가전압 (0.3, 0.6, 0.9 V)에 따라 각각 241, 386, 283 mL/g COD, 주입농도 1,222 mg COD/L 조건에서 인가전압에 따라 각각 174, 280, 297 mL/g COD, 주입농도 1,431 mg COD/L 조건에서 인가전압에 따라 각각 264, 283, 299 mL/g COD가 발생하였다. 간에 포함된 지질은 난분해성이므로 혐기소화의

저해를 일으킬 수 있는 것으로 보고되었으나 미생물전기분해전지의 생물전기화학적 반응을 통해 난분해성 물질의 분해성이 향상되어 선행연구에서 보고된 간의 잠재적 메탄수율인 156~265 mL/g COD의 80%인 129~229 mL/g COD를 본 연구에서 얻을 수 있던 것으로 판단된다¹⁷⁾.

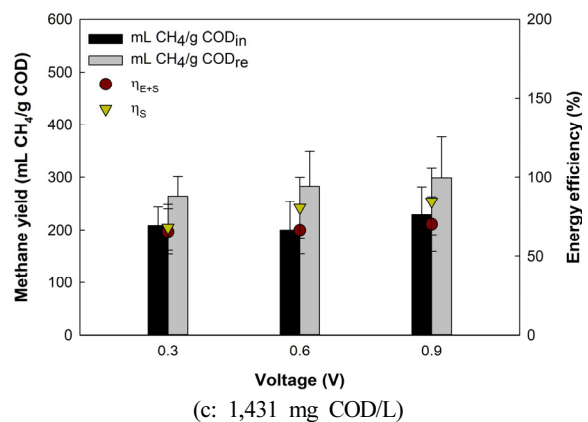
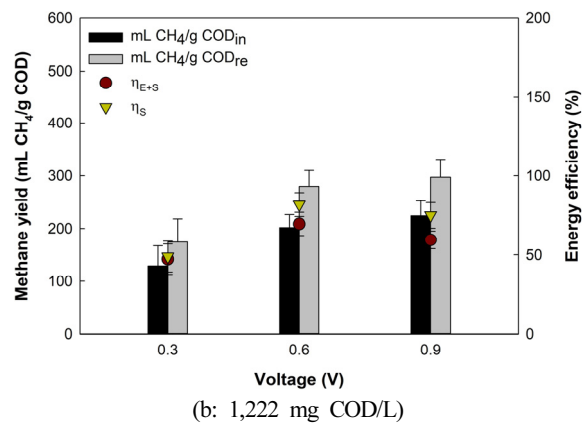
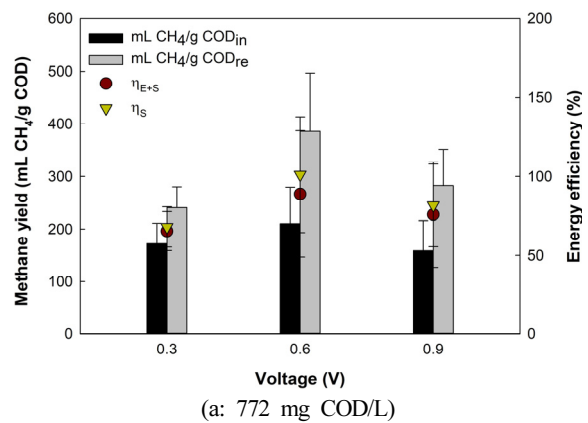


Fig. 3. Methane yield and energy efficiency following the influent concentration (a: 772, b: 1,222, and c: 1,431 mg COD/L).

4. 결론

본 연구에서는 미생물전기분해전지 (MEC)를 사용하여 도축부산물의 처리 가능성을 평가하고자 하였다. 돼지의 간을 기질로 사용하여 주입농도와 인가전압에 따른 메탄가스 발생량과 유기물 제거, 메탄수율, 에너지효율을 분석하였으며 다음과 같은 주요 결론을 얻었다.

1. 모든 인가전압 조건에서 기질농도가 증가함에 따라 메탄가스 발생량은 증가하는 경향을 보였다. 본 실험의 최대 주입 기질농도인 1,431 mg COD/L 이상의 농도로 주입하여도 효과적인 유기물 분해 및 메탄가스 발생이 가능할 것으로 예상된다.
2. 인가전압이 증가함에 따라 SCOD 제거율도 증가하는 경향을 보였으며 0.9 V 조건에서 76.5%로 가장 높은 제거율을 보여주었으나 에너지 효율적 측면에서는 인가전압 0.6 V 조건이 89%로 가장 높은 효율을 보여주었다.
3. 돼지 간은 난분해성이나 실험에서 미생물전기분해전지의 생물전기화학반응을 통해 잠재적 메탄 수율의 80%인 129~229 mL/g COD에 도달할 수 있었던 것으로 판단된다. 선행연구의 이론적 메탄 수율에 도달하기 위해 운전조건 및 반응조 최적화를 통하여 메탄생성량을 극대화하는 후속 연구가 필요하다.

사 사

이 논문은 2020년도 경상국립대학교 교원연구활성화 지원사업의 예산지원으로 수행되었음.

References

1. Hejnfelt, A. and Angelidaki, I., "Anaerobic digestion of slaughterhouse by-products", *Biomass and Bioenergy*, 33(8), pp. 1046~1054. (2009).
2. Moukazis, I., Pelleri, F.-M. and Gidarakos, E., "Slaughterhouse by-products treatment using anaerobic digestion", *Waste Management*, 71, pp. 665~662. (2017).
3. Livestock Product Safety Management System Homepage, <https://www.lpsms.go.kr>, December (2020).
4. Korea Agricultural Statistics Service Homepage, <https://kass.mafra.go.kr/kass/ka/main.do>, December (2020).
5. Boušková, A., Dohányos, M., Schmidt, J. E. and Angelidaki, I., "Strategies for changing temperature from mesophilic to thermophilic conditions in anaerobic CSTR reactors treating sewage sludge", *Water Research*, 39(8), pp. 1481~1488. (2005).
6. Pack, C., Lee, C., Kim, S., Chen, Y. and Chase, H. A., "Upgrading of anaerobic digestion by incorporating two different hydrolysis processes", *Bioscience and Bioengineering*, 100(2), pp. 164~167. (2005).
7. 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).
8. Pérez, D., Lie, T. T. and Weber, C. C., "Operationalization of a microbial electrolysis cell: The interaction of the primary factors for energy storage efficiency", *Bioresource Technology*, 326, pp. 124788. (2021).
9. Van Eerten-Jansen, M. C. A. A., Heijne, A. T., Buisman, C. J. N. and Hamelers, H. V. M., "Microbial electrolysis cells for production of methane from CO₂: long-term performance and perspectives", *Int. J. Energy Res.*, 36(6), pp. 809~819. (2012).
10. Song, G. W., Baek, W. J., Seo, H., Jang, H., Chung, J. W., Lee, M. E. and Ahn, Y., "Startup of microbial electrolysis cells with different mixing ratio of anaerobic digested sludge and buffer solution", Korea Organic Resources Recycling Association,

- 27(4), pp. 51~59. (2019).
11. Zhang, Y. and Angelidaki, I., "Microbial electrolysis cells turning to be versatile technology: Recent advances and future challenges", *Water Research*, 56, pp. 11~25. (2014).
 12. Liu, H., Grot, S. and Logan, B. E., "Electrochemically assisted microbial production of hydrogen from acetate. *Environ Sci Technol*", *Environ. Sci. Technol.*, 39(11), pp. 4317~4320. (2005).
 13. Yu, Z., Leng, X., Zhao, S., Ji, J., Zhou, T., Khan, A., Kakde, A., Liu, P. and Li, X., "A review on the applications of microbial electrolysis cells in anaerobic digestion", *Bioresource Technology*, 255, pp. 340~348. (2018).
 14. Ding, A., Yang, Y., Sun, G. and Wu, D., "Impact of applied voltage on methane generation and microbial activities in an anaerobic microbial electrolysis cell (MEC)", *Chemical Engineering Journal*, 283, pp. 260~265. (2016).
 15. Im, S. W., Ahn, Y. and Chung, J. W., "Influence of Electrode Spacing on Methane Production in Microbial Electrolysis Cell Fed with Sewage Sludge", *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 37(12), pp. 682~688. (2015).
 16. Asztalos, J. R. and Kim, Y., "Enhanced digestion of waste activated sludge using microbial electrolysis cells at ambient temperature", *Water Research*, pp. 503~512. (2015).
 17. Kim, D. W., Yu, S. I., Bae, I. H., Rhee, C., Lee, M. E., Shin, J. H. and Shin, S. G., "Assessment of Bioenergy Potential of Slaughterhouse By-products through Anaerobic Digestion", *Korean Society Of Environmental Engineers*, 41(12), pp. 677~685. (2019).
 18. Baird, R. and Bridgewater, L., *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23rd ed., American Public Health Association (APHA), Washington, DC. USA. (2018).
 19. Sun, R., Xing, D., Jia, J., Liu, Q., Zhou, A., Bai, S. and Ren, N., "Optimization of high-solid waste activated sludge concentration for hydrogen production in microbial electrolysis cells and microbial community diversity analysis", *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(35), pp. 19912~19920. (2014).