

하수슬러지를 이용한 혐기성소화조에서 미생물 전기화학기술의 역할

전동걸* · 이 범** · 박준규** · 전항배**†

* (주)정봉
** 충북대학교

Function of Microbial Electrochemical Technology in Anaerobic Digestion using Sewage Sludge

Tian Dongjie* · Beom Lee** · Jungye Park** · Hangbae Jun**†

* JEONGBONG CO.LTD., Cheongu, Republic of Korea

** Chungbuk National University

(Received 18 March 2016, Revised 18 April 2016, Accepted 29 April 2016)

Abstract

Microbial electrochemical technology (MET) has recently been studied to improve the efficiency of a traditional anaerobic digestion (AD). The purpose of this study was to investigate the impact of MET in the system when MET was combined with traditional AD (i.e., AD-MET). Electrodes used in the MET were Cu coated graphite electrodes. They were supplied with a voltage of 0.3 V. AD started to generate methane in 80 days. But AD-MET started to generate methane from the initial operation after the system started. It was observed that AD-MET reached steady state faster and produced higher methane yield than AD. During the steady state, the average daily methane productions in AD and AD-MET were 2.3L/d and 4.9L/d, respectively. Methane yields were 0.07-CH₄/g·COD_{re} in AD and 0.25L-CH₄/g·COD_{re} in AD-MET. In AD-MET, the production rates of total volatile fatty acids (TVFAs) and soluble chemical oxygen demand (SCOD) were 0.12 mg TVFAs/mg VS·d and 0.35 mg SCOD/mg VS·d, respectively. They were significantly ($p < 0.05$) higher than those in AD. However, the concentrations of residual TVFAs in both systems were not significantly ($p > 0.05$) different from each other, confirming that methane conversion in AD-MET was greater than that in AD.

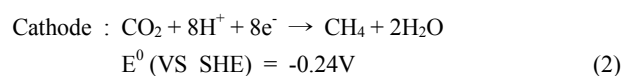
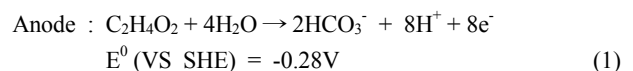
Key words : Alkalinity, Anaerobic digestion, Biogas, Methane, Microbial electrochemical technology

1. Introduction

하수슬러지 발생량은 매년 증가 추세이며(MOE, 2013), 하수슬러지 해양투기가 국제협약에 의해 금지됨에 따라 혐기성 소화, 고형화, 퇴비화, 소각 등의 처리·처분 방법이 사용되고 있다(Ha, 2006). 그중 혐기성 소화는 슬러지로부터 메탄을 생산함으로써 슬러지 감량 및 안정화가 용이하고 유해균을 없앨 수 있어 널리 사용되어 왔다(Guo et al., 2013). 하지만 여러 종류 미생물의 다단계 연쇄 반응으로 진행되는 혐기성 소화는 메탄생성 고세균의 느린 성장속도, 낮은 소화효율, 긴 수리학적 체류시간, 높은 온도 등으로 인해 운영상의 여러 문제점들이 있다(Ahring et al., 1995). 이러한 혐기성 소화의 효율을 개선하기 위한 방법으로, 유기물을 미생물 전기화학적으로 산화하여 전기를 생산하는 미

생물 연료전지(microbial fuel cell, MFC) 시스템을 변형한 후(Jung, 2013), 혐기성 소화조에 응용하여 유기성 폐기물 처리와 동시에 바이오가스 생산의 효율 향상을 하는 연구가 최근 각광을 받고 있다(Sun et al., 2015).

MET는 전압(Voltage)을 반응조에 공급하며 미생물 전기화학 반응을 유도하는 기술로 아래의 식과 같이 산화전극에서 Exoelectrogenic 박테리아가 유기물을 분해하며 전자를 방출하고(식 (1)), 방출된 전자는 환원전극에서 (식 (2), (3))의 전기화학반응을 통해 수소 및 메탄을 생성시키는 기술이다(Logan et al., 2014).



식 (1)과 (2)의 전체 반응전위는 0.04 V로 추가적인 에너지

† To whom correspondence should be addressed.
jhbce@cbnu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

지 공급을 하지 않고 자발적으로 반응이 일어날 수 있으며, 식 (1)과 (3)의 전체 반응전위는 -0.14 V로 추가적인 에너지 공급을 하여야만 반응이 일어나는 비자발적 반응이다(Cheng et al., 2009). 이러한 이유로 MET로 인한 메탄생성이 일어나기 위해서는 0.14 V 이상의 전압을 공급해 주어야 하지만, Wang 등의 연구결과에 의하면 내부저항의 영향으로 메탄생성을 위한 최적 인가전압은 0.3 V로 알려져 있다 (Wang et al., 2009).

초기 MET관련 연구는 Membrane이 존재하는 Two-chamber 반응조에서 전기나 수소가스를 생성하는 MFC(Microbial fuel cells) 및 MEC(Microbial electrolysis cells)이었지만, 최근에는 Membrane에 의한 내부저항을 극복할 수 있는 Membrane-free single chamber를 이용한 메탄생성으로 연구가 진행되고 있다(Wang et al., 2010; Zhang et al., 2013).

하지만 현재 MET 관련 연구는 초기단계로 적용성이 제한적이고 내부저항으로 인해 실용화를 위한 Scale-up 측면에서 연구가 부족하다(Zhang et al., 2013).

이에 본 연구에서는 하수슬러지를 기질로 하여 일반 혐기성 소화조(anaerobic digestion, AD)와 Scale-up 가능성을 평가하기 위해 다중전극을 사용하여 전류밀도를 향상시킨 미생물 전기화학 기술을 결합한 혐기성 소화조(anaerobic digestion-microbial electrochemical technology, AD-MET)를 운전하며, 미생물 전기화학 기술이 유기물 제거와 메탄발생에 미치는 영향을 파악하고 반응조 내부 전류밀도 향상으로 인한 Scale-up 가능성을 파악하고자 한다.

2. Materials and Methods

2.1. 반응조 구성

본 연구에서는 전압(0.3 V)을 공급하여 미생물 전기화학반응을 유도한 반응조(a)와 일반적인 혐기성소화를 위한 대조군 반응조(b)를 운영하였다. 반응조는 아크릴 재질의 원통형 구조로 되어 있으며 직경 280 mm, 높이 410 mm로 총 반응조의 부피는 25 L이며, 유효부피는 15.0 L로 운전을 진행하였다(Fig. 1).

미생물 전기화학 반응에 사용한 산화전극(W150 × 300 mm,

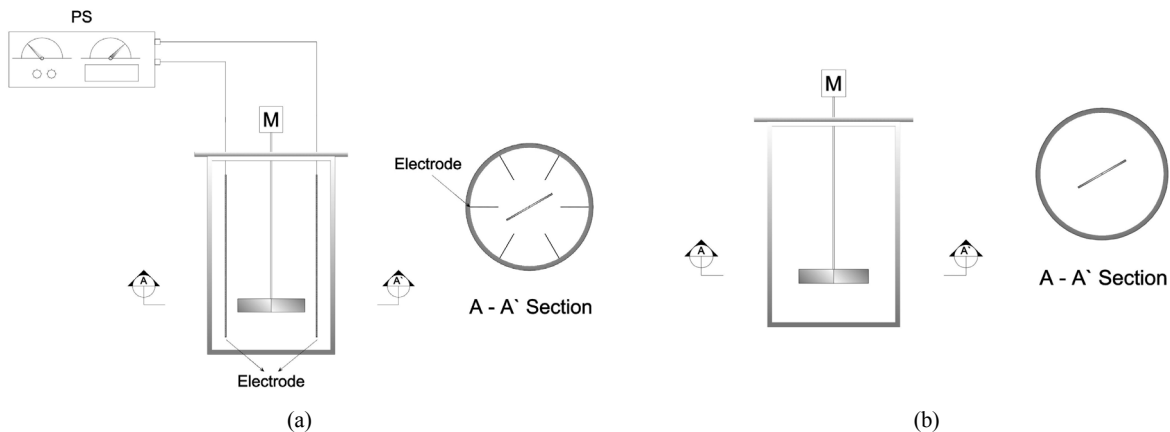


Fig. 1. Schematic diagram of single-chamber MET reactor (a) and control reactor (b).

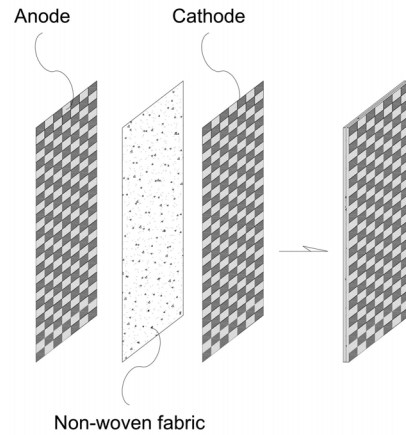


Fig. 2. Schematic diagrams of electrodes.

Area : 0.045 m²)과 환원전극(W150 × 300 mm, Area : 0.045 m²)은 총 6세트로 구성하였으며 각 전극의 총 면적은 0.27 m²이다. 각각의 전극은 Graphite Carbon으로 구성된 전극 표면에 니켈을 도포하였으며 환원전극은 철과 구리를 코팅하여 사용하였다. 반응조 내 고정을 위해 아크릴틀을 제작하여 Fig. 1의 (a)와 같이 반응조내 배치하여 실험을 진행하였으며, 완전혼합을 위하여 교반기(Agitation speed, 100 rpm)를 설치하였다. Fig. 2와 같이 MET 반응의 중요한 운전인자인 내부저항을 최소화하기 위해 전극간격을 최소화하였으며, 산화전극과 환원전극의 직접적인 접촉으로 인한 단락현상을 방지하기 위하여 산화전극과 환원전극 사이에 부직포(1 mm)를 설치하였다.

산성화된 포화염수로 채워진 가스포집기(headspace : 20 L)를 설치하여 반응기에서 발생된 바이오가스량을 측정하였으며, Titanium wire (0.1 mm, Gongguone, Korea)로 전극과 전원공급장치(Triple channel DC POWER SUPPLY 2230-30-1, Keithley, America)를 병렬로 연결하여 Wang 등이 발표한 메탄생성을 위한 미생물 전기화학반응의 최적 인가전압인 0.3 V로 공급하였다(Wang et al., 2009).

2.2. 반응조 운전

본 연구에서는 고온·고압(165°C, 7.5 kg/cm²)에서 전처리

Table 1. Characteristics of waste sludge

Characteristics	Range	Average
pH	6 ~ 7	6
Alkalinity ¹⁾ (mg/L as CaCO ₃)	2,044 ~ 3,860	3,124
TCOD _{Cr} (Total chemical oxygen demand) (mg/L)	37,600 ~ 53,500	44,628
SCOD _{Cr} (Soluble chemical oxygen demand) (mg/L)	6,700 ~ 13,500	9,599
NH ₄ ⁺ - N(mg/L)	1,120 ~ 1,567	1,395
TS (Total solids)(mg/L)	37,240 ~ 49,460	42,278
VS (Volatile solids)(mg/L)	21,060 ~ 29,260	25,353

한 혼합슬러지(생슬러지-1차 침전지에서 침전후 발생슬러지 : 잉여슬러지-2차침전지에 침전된 슬러지, 4:1)를 사용하였으며 그 성상은 Table 1에 제시된 바와 같다.

반응조는 하수처리장의 혐기성 소화조로부터 채취한 슬러지를 식중하여 사용하였으며 반응조의 운전은 중온소화의 최적온도인 35°C 항온실에서 실험을 진행하였다(Mata-Alvarez, 2005). 운전기간 유기물 부하량(organic loading rate, OLR)은 중온 단상소화방식의 최적 부하량인 2kg-VS/m³·d로 하였으며(Speece, 1996), HRT (Hydraulic retention time) 20일로 하여 1회/일 주입 및 1회/일 배출하는 Fed-Batch 형식으로 운전하였다.

2.3. 분석 방법

운전기간 성분분석을 위해 반응조 하단의 밸브를 통해 유출수를 채취하였다. TCOD_{Cr}은 원심분리기(MF-80, HaniL, Korea, 3,000 rpm, 5 min)로 고액분리 후 상등액으로 측정하였으며, SCOD_{Cr}을 포함한 기타 용존성 수질항목에 대해서는 고액분리 후 상등액을 1.2 μm GF/C (GF/CTM, Whatman, England)로 여과 후 분석하였다. 암모니아성 질소는 Nessler 법(NH₄⁺-N Distillation method, HACH, America)을 이용하여 측정하였고, COD_{Cr}은 standard methods의 closed reflux 방법으로 측정하였다(Eaton et al., 1995). 유기산(VFAs: Lactic, Acetic, Propionic, Butyric acid)분석을 위해 Zorbax SB-Aq (4.6 mm ID × 150 mm) column이 부착된 Liquid chromatography (HPLC, YOUNGLIN SDV50A, Korea)를 이용하였고 분석에 이용된 Mobile phase는 1% ACN/99% 20 mM NaHPO₄를 사용하였다. 발생가스의 성분분석은 Porapak Q (80/100 mesh)가 충전된 1.83 m × 2 mm의 스테인리스 스틸 컬럼의 TCD (Thermal Conductivity Detector)가 장착된 Gas chromatography (Gow Macseries580, GOW-MAC, America)를 이용하였다. 분석을 위한 Carrier gas는 초순수 헬륨을 이용하였고, 유속은 15 mL/min으로 고정하였으며 Column, Injector 및 Detector의 온도는 각각 50, 80과 90°C로 고정하였다.

pH는 pH meter (Orion 420A⁺, Thermo orion, America)로 측정하였고, 기타 Alkalinity, TS, VS, T-N (Total-nitrogen) 등은 공정시험법을 사용하여 분석하였다(Eaton et al., 1995).

3. Results and Discussion

3.1. 메탄가스 발생

Fig. 3은 운전기간동안 대조군인 일반 혐기성 소화조(AD)와 MET를 결합한 혐기성 소화조(AD-MET)에서 발생한 바이오가스와 메탄발생량이다. MET를 결합한 반응조의 경우 운전초기부터 바로 바이오가스 생산이 시작된 반면, AD의 경우 약 80일 경과 후 바이오가스 생산이 시작되었다. Lauwers et al. (1990)의 연구에 의하면 일반적인 AD의 경우 안정화 기간이 2개월부터 9개월정도 소요된다고 보고되었으며, 본 연구에서는 약 3개월 소요되었다. MET-AD의 경우 초기 안정화 단계없이 운전시작과 함께 메탄가스가 발생하기 시작하였으며, 100일 이후 바이오가스 발생량이 안정적으로 나타났다. 100일 이후 AD-MET반응조에서 발생한 메탄가스량은 평균 4.9 L/d인 반면 AD반응조는 2.3 L/d 이었고, 메탄수율은 AD에서 0.07L-CH₄/g·COD_{re} (0.19L-CH₄/g·VS_{re}), AD-MET에서 0.25L-CH₄/g·COD_{re} (0.67L-CH₄/g·VS_{re})로 전기화학반응이 혐기성소화조에서 반응조 안정화 단계를 단축시키고, 메탄수율을 증가시키는 역할을 하는 것으로 나타났다.

선행 연구결과(Bougrier et al., 2006; Jansen et al., 2004)에 의하면 하수슬러지를 기질로 하는 중온 혐기성조건의 안정화 단계에서 메탄수율은 0.12L-CH₄/g·VS_{re}, 0.15L-CH₄/g·VS_{re}로 본 연구의 AD조건에서의 메탄수율인 0.19L-CH₄/g·VS_{re}는 안정화 단계에 도달함을 입증할 수 있으며, 본 연

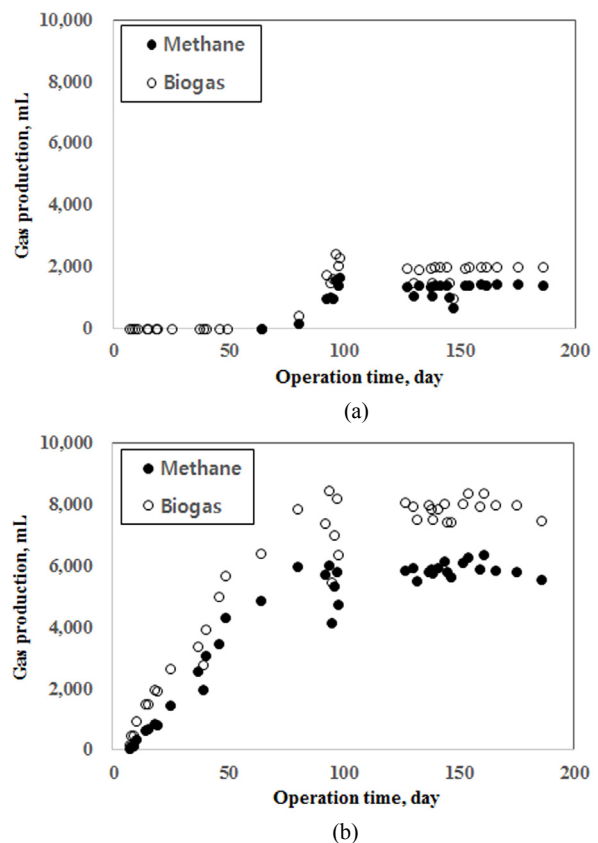


Fig. 3. Profile of biogas and methane gas production, (a) AD and (b) AD-MET

구에서 100일 이후의 AD와 AD-MET의 메탄수를 분석이 유의함을 알 수 있다.

또한, 기존 연구결과(Nikolasos and Valeria, 2014; Bo et al., 2014)에 의하면 MET를 결합한 혐기성 소화조에서 메탄수율이 AD반응조보다 높은 것으로 나타나 본 연구결과와 일치함을 보이고 있다. 기존의 MET관련 문헌은 주로 1L이하의 소규모 반응조에서 수행된 반면, 본 연구는 유효용적 15L의 일반 완전혼합 혐기성소화조에서 진행하였기 때문에 기존 연구결과에서 밝힌 MET 반응의 메탄수율 향상은 Scale-up된 MET 반응조에서도 동일하게 진행됨을 확인하였다(Bo et al., 2014; Nicolas and Valeria, 2014).

3.2. pH와 Alkalinity

메탄생성 고세균의 적정 pH범위는 7.0~7.5로 알려져 있다(Pfeffer, 1974). Fig. 4와 같이 안정화 기간중 두 반응조의 pH는 7.5 전후로 유지되었다. 반응조내 알칼리도는 중성 pH를 유지하는데 충분하였지만 AD반응조의 알칼리도는 평균 8,505 mg/L로 나타난 반면 AD-MET 반응조에서는 평균 6,728 mg/L로 AD반응조보다 약 1,800 mg/L 정도 낮았다.

혐기성소화에 있어 알칼리도가 2,000 mg/L 이하일 때 운전이 불안정한 것으로 보고되고 있으며, 완충력(=r)의 지표로서 VFAs/Alkalinity 값이 0.4 이하일 때 충분한 완충력을 가진다고 보고되어 있다(Zhao and Kugel, 1996). 본 연구에서 안정화 기간AD와 AD-MET에서 r값이 각각 0.26, 0.32로 나타나 완충력이 충분하여 안정적으로 운전되고 있다고 보여진다(Fig. 5). 하지만 AD-MET에서 AD보다 알칼리도가 감소한 원인에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

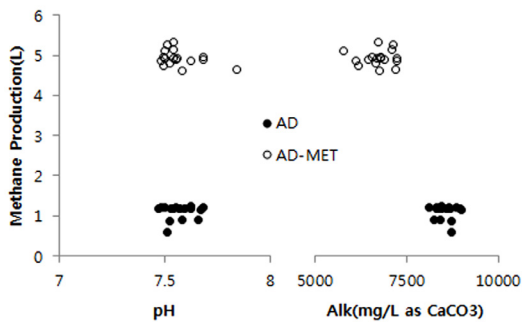


Fig. 4. Methane production in AD and AD-MET accordance with the pH and Alk during steady state.

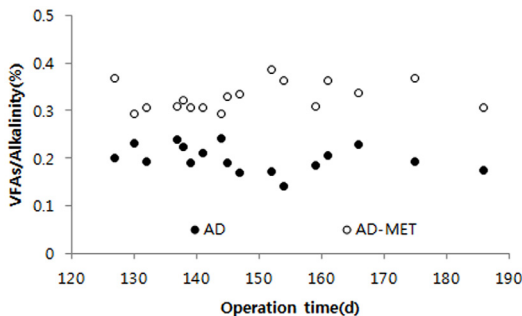


Fig. 5. Trends of r (VFAs/Alkalinity) for AD and AD-MET.

3.3. 유기물 거동

혐기성 반응조에서 안정화기간 유기물 제거효율은 Fig. 6과 같다. 안정화기간 TS, VS, TCOD 제거효율은 AD보다 AD-MET 반응조에서 각각 7.5, 9.1, 11.4% 높게 나타났다(Fig. 6). 일반적인 혐기성소화의 경우 TCOD 제거효율은 30~35% 정도로 슬러지의 가수분해 속도를 향상시키는 전처리할 경우 제거효율이 5~10% 향상된다고 보고하고 있다(Braguglia et al., 2015). 본 연구에서도 고온고압으로 전처리한 슬러지를 사용함으로써 AD반응조의 TCOD 제거효율은 약 50.4%로 기존 문헌의 결과와 비슷하였으나, AD-MET의 경우 약 61.8%로 유기물 제거효율이 개선된 것으로 나타났다.

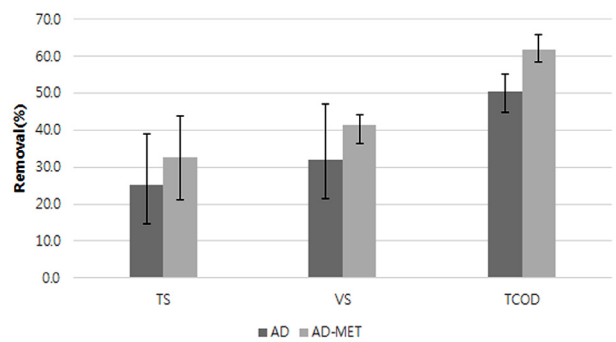


Fig. 6. Removal efficiencies of steady state organic matter (TCOD) in AD and AD-MET.

또한, 안정화기간 AD-MET에서 TVFAs와 SCOD의 생성 속도는 AD보다 각각 12%, 35% 향상되었지만(Table 2), Table 4에서와 같이 반응조내 잔류 TVFAs의 농도는 AD와 AD-MET에서 1,702.0 mg/L와 1,666.4 mg/L로 비슷하였다(Table 3). 이는 AD-MET에서 TVFAs의 메탄 전환이 AD보다 크다는 것을 의미하며, Zhao et al. (2014)의 연구에서 MET 반응이 VFAs의 제어에 유리하며 메탄생성의 전환율을 높일 수 있다는 연구결과와 일치한다(Zhao et al., 2014). 결과적으로 VFAs의 메탄전환에 의해 Fig. 3에서 나타난 메탄생성량의 차이가 발생했다고 사료된다.

Table 2. Specific TVFAs and SCOD production rates in AD and AD-MET

VS (mg/L)		TVFAs production rate (mg TVFAs/mg VS·d)		SCOD production rate (mg SCOD/mg VS·d)	
AD	AD-MET	AD	AD-MET	AD	AD-MET
12,116.5	10,498.2	0.14	0.16	0.26	0.35

Table 3. VFAs concentration in the effluent of AD and AD-MET

parameters	VFAs (mg/L)				
	Acetic acid	Lactic acid	Propionic acid	Butyric acid	TVFAs
AD	5.8	11.6	5.0	1,679.6	1,702.0
AD-MET	0.1	8.0	5.5	1,652.8	1,666.4

3.4. 바이오 가스성상

하수슬러지를 이용한 혐기성 소화에 관한 연구에서 MET가 메탄발생 효율을 향상시키는 것으로 나타났다. 하지만, 안정화기간 AD-MET에서 TVFAs와 SCOD의 생성속도는 AD보다 각각 12%, 35% 향상된 반면, MET에서 메탄수율이 0.07L-CH₄/g-COD_{re}에서 0.25L-CH₄/g-COD_{re}로 증가한 원인을 알아보기 위해 가스성상을 분석하였다.

Fig. 7에 도식화한 것처럼 본 연구의 안정화 기간 가스성상은 AD와 AD-MET에서 차이점이 미미한 것으로 나타났다. 이는 MET에서 미생물 전기화학 반응에 의해 CO₂가 메탄으로 전환된 비율이 크지 않다는 것을 의미한다. 즉 MET에서 메탄발생량이 큰 것은 생물학적 메탄발생과 전기화학적 메탄발생반응이 동시에 활성화되었기 때문으로 사료되며, MET가 미생물 활성도에 미치는 영향에 대해 추가적인 연구를 진행할 필요성이 있다.

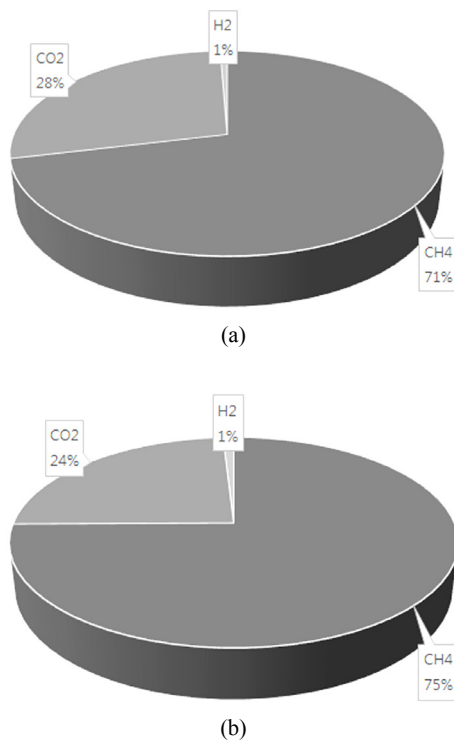


Fig. 7. The composition of biogas to steady state of AD (a) and AD-MET (b)

4. Conclusion

본 연구에서는 미생물 전기화학 기술이 혐기성 소화에 미치는 영향 및 Scale-up 가능성을 파악하고자 Fed-Batch식 반응조에 미생물 전기화학 기술을 적용하여 운전하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) AD-MET의 경우 운전초기부터 메탄발생이 시작된 반면, AD의 경우 약 80일 이후부터 메탄발생이 시작되어 AD-MET가 운전초기 안정화 단계를 줄이는데 높은 효과가 있는 것으로 나타났다.
- 2) 안정화기간 AD와 AD-MET의 메탄수율은 각각 0.07,

0.25L-CH₄/g-COD_{re}로 나타났으며, 기존 AD에 MET 기술을 적용할 경우 메탄발생량을 증대시키는 것으로 나타났다.

- 3) 유효용적 15L의 반응조에 MET를 결합한 실험결과 기존 1 L이하의 소규모 반응조에서와 마찬가지로 빠른 안정화 및 높은 메탄수율을 보이고 있는 것으로 보아 Scale-up 반응조의 MET결합 가능성을 확인하였다.
- 4) AD반응조의 경우 평균 알칼리도는 8,505 mg/L로 나타난 반면 AD-MET 반응조에서는 평균 6,728 mg/L이었으며 두 반응조의 pH는 7.5부근으로 유지되었다.
- 5) 안정화기간 AD-MET에서 TS, VS, TCOD제거효율은 AD보다 각각 7.5, 9.1, 11.4% 향상되었고, MET 반응이 유기물 제거효율개선에 높은 효과가 있음을 확인하였다.
- 6) AD-MET에서 TVFAs와 SCOD의 생성속도가 12%, 35% 향상되었고, 반응조내 잔류 TVFAs의 농도는 AD-MET에서 1,666.4 mg/L, AD에서 1,702.0 mg/L로 큰 차이가 없는 것으로 보아 AD-MET에서 TVFAs의 메탄전환이 AD보다 증대되어 최종적으로 메탄발생량이 높아진 결과로 확인되었다.

Acknowledgement

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2015H1C1A1035673).

References

Ahring, B. K., Sandberg, M., and Angelidaki, I. (1995). Volatile Fatty Acids as Indicators of Process Imbalance in Anaerobic Digestors, *Applied Microbiology Biotechnology*, 43(3), pp. 559-565.

Bo, T., Zhu, X., Zhang, L., Tao, Y., He, X., Li, D., and Yan, Z. (2014). A New Upgraded Biogas Production Process: Coupling Microbialelectrolysis Cell and Anaerobic Digestion in Single-Chamber, Barrel-Shape Stainless Steel Reactor, *Electrochemistry Communications*, 45, pp. 67-70.

Bougrier, C., Delgenes, J. P., and Carrere, H. (2006). Combination of Thermal Treatments and Anaerobic Digestion to Reduce Sewage Sludge Quantity and Improve Biogas Yield, *Process Safety and Environmental Protection*, 84(B4), pp. 280-284.

Braguglia, C. M., Gianico, A., Gallipoli, A., and Mininni, G. (2015). The Impact of Sludge Pre-Treatments on Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Digestion Efficiency : Role of the Organic Load, *Chemical Engineering Journal*, 270, pp. 362-271.

Cheng, S., Xing, D., Call, D. F., and Logan, B. E. (2009). Direct Biological Conversion of Electrical Current into Methane by Electromethanogenesis, *Environment Science Technology*, 43 (10), pp. 3953-3958.

Eaton, A. D., Clesceri, L. S., and Greenberg, A. E. (1995). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, Franson, M. A. H., 19th Edition, American Public Health Association, Washington.

- Guo, X., Liu, J., and Xiao, B. (2013). Bioelectrochemical Enhancement of Hydrogen and Methane Production from the Anaerobic Digestion of Sewage Sludge in Single-Chamber Membrane-Free Microbial Electrolysis Cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(3), pp. 1342-1347.
- Ha, B. Y. (2006). *Enhancement Effect of High Intensity Ultrasound on the Anaerobic Digestion of Waste Sludge from Municipal Wastewater Treatment Plant*, Doctorate thesis, Dankook university. pp. 1-2. [Korean Literature]
- Jansen, J., La, C., Gruvberger, C., Hanner, N., Aspegren, H., and Svard, A. (2004). Digestion of Sludge and Organic Waste in the Sustainability Concept for Malmö, Sweden, *Water Science and Technology*, 49, pp. 163.
- Jung, S. H. (2013). Practical Implementation of Microbial Fuel Cells for Bioelectrochemical Wastewater Treatment, *Journal of the Korean Society of Urban Environment*, 13(2) pp. 93-100.
- Lauwers, A. M., Heinen, W., Leon, G. M., and Chris van der Drift. (1990). Early Stage in Biofilm Development in Methanogenic Fluidized Bed Reactors, *Applied Microbiology Biotechnology*, 33, pp. 352-358.
- Logan, B. E., Siegert, M., Matthew, D. Y., Douglas, F. C., Zhu, X., and Spormann, A. (2014). Comparison of Nonprecious Metal Cathode Materials for Methane Production by Electromethanogenesis, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2, pp. 910-917.
- Mata-Alvarez, J. (2005). *Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes*, Water Intelligence Online. 4.
- Ministry of Environment (MOE). (2013). *Statistics of Sewerage, (Sewerage division)*, Ministry of Environment, pp. 1397-1423.
- Nikolaos, X. and Valeria, M. (2014), Performance and Bacterial Enrichment of Bioelectrochemical Systems During Methane and Acetate Production, *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(36), 99. 21864-21875.
- Pfeffer, J. T. (1974), Temperature Effects on Anaerobic Fermentation of Domestic Refuse, *Biotechnology and Bioengineering*, 16(6), pp. 771-787.
- Speece, R. E. (1996). Anaerobic Biotechnology for Industrial Waste Waters, *Anaerobic Biotechnology*, 17, pp. 985-988.
- Sun, R., Zhou, A., Jia, J., Liang, Q., Liu, Q., Xing, D., and Ren, Z. (2015). Characterization of Methane Production and Microbial Community Shifts During Waste Activated Sludge Degradation in Microbial Electrolysis Cells, *Bioresource Technology*, 175, pp. 68-74.
- Wang, A., Liu, W., Cheng, S., Xing, D., Zhou, J., and Logan, B. E. (2009). Source of Methane and Methods to Control its Formation in Single Chamber Microbial Electrolysis Cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(9), pp. 3653-3658.
- Wang, A., Liu, W., Ren, N., Cheng, H., and Lee, D. J. (2010). Reduced Internal Resistance of Microbial Electrolysis Cell as Factor of Configuration and Stuffing with Granular Activated Carbon, *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(24), pp. 13448-13492.
- Zhang, J., Zhang, Y., Quan, X., Chen, S., and Afzal, S. (2013). Enhanced Anaerobic Digestion of Organic Contaminants Containing Diverse Microbial Population by Combined Microbial Electrolysis Cell (MEC) and Anaerobic Reactor under Fe(III) Reducing Conditions, *Bioresource Technology*, 136, pp. 273-280.
- Zhao, Q. and Kugel, G. (1996). Thermophilic/Mesophilic Digestion of Sewage Sludge and Organic Wastes, *Environmental Science and Engineering and Toxicology*, 31(9) pp. 2211-2231.
- Zhao, Z., Zhang, Y., Chen, S., Quan, X., and Yu, Q. (2014). Bioelectrochemical Enhancement of Anaerobic Methanogenesis for High Organic Load Rate Wastewater Treatment in a Up-Flow Anaerobic Sludge Blanket(UASB) Reactor, *Nature Reviews Cardiology*, 4, pp. 6658.