



ORIGINAL PAPER

원저

ABR과 ASBR 형태에 따른 혐기성 메탄 발효 운전 성능 평가

이채영[†], 이세욱

수원대학교 토목공학과

(2011년 6월 8일 접수, 2011년 6월 22일 수정, 2011년 6월 24일 채택)

Performance Evaluation of ABR and ASBR for Anaerobic Methane Fermentation

Chae-Young Lee[†], Se-Wook Lee

Department of Civil Engineering, The University of Suwon

ABSTRACT

This study was conducted to evaluate the performance of methane fermentation from effluent of hydrogen fermentation reactor in anaerobic baffled reactor (ABR) and anaerobic sequencing batch reactor (ASBR). Two reactors were operated at organic loading rate of $1.0 \text{ kg COD/m}^3 \cdot \text{d}$ and hydraulic retention time (HRT) of 20 day. Methane production rates of ABR and ASBR for start-up periods were 0.04 L/L/d and 0.19 L/L/d , respectively, whereas maximum methane production rates of ABR and ASBR were 0.25 L/L/d and 0.31 L/L/d , respectively. Removal rates of chemical oxygen demand (COD) in ABR and ASBR for start-up periods were 89% and 92%, respectively. After start-up periods, removal rates of COD and volatile solids (VS) in ABR and ASBR were maintained over 90%. The specific methanogenic activity (SMA) increased as microorganism acclimated to the substrate.

Keywords : ABR, ASBR, Hydrogen fermentation reactor, Methane fermentation Specific methanogenic activity

[†]Corresponding author : chaeyoung@suwon.ac.kr

초록

본 연구는 혐기성 수소 발효 반응조의 유출수를 기질로 이용하여 anaerobic baffled reactor (ABR) 및 anaerobic sequencing batch reactor (ASBR) 형태에 따른 혐기성 메탄 발효 성능을 평가하였다. 두 개의 반응조는 유기물 부하율 $1.0 \text{ kg COD/m}^3 \cdot \text{d}$ 와 수리학적 체류시간 20일에서 운전을 수행하였다. ABR과 ASBR의 초기 운전 기간에서 메탄 발생량은 각각 0.04 L/L/d 와 0.19 L/L/d 로 나타났으며, ABR과 ASBR의 최대 메탄 발생량은 각각 0.25 L/L/d 와 0.31 L/L/d 로 나타났다. ABR과 ASBR의 초기 운전 기간에서 COD 제거율은 각각 89%와 92%로 나타났다. 정상 상태에 도달한 후에는 ABR과 ASBR의 COD 및 VS의 제거율은 각각 90% 이상 유지되었다. 비메탄 활성도는 미생물이 기질에 적응함에 따라 반응조에 상관없이 증가하였다.

핵심용어 : ABR, ASBR, 수소 발효 반응조, 메탄 발효, 비메탄 활성도

1. 서론

최근 한정된 화석 연료의 고갈 문제와 급속한 유기 상승으로 인하여 신·재생에너지 개발에 대한 관심이 증가되고 있는 실정이다¹⁾. 신·재생에너지로는 풍력, 지열, 태양열, 태양광 및 바이오 가스 등이 있다. 특히, 바이오 가스는 혐기성 소화를 이용하여 메탄 가스 등을 생산하는 기술이며, 일반적으로 유기성 폐기물을 처리하는 과정에서 메탄 가스 등을 회수하여 에너지로 사용한다. 혐기성 소화는 1980년대 이후 혐기성 미생물에 관한 지식과 반응조의 설계 및 운영 기술이 획기적으로 발전하여, AFBR(Anaerobic Fluidized Bed Reactor), AF(Anaerobic Filter), UASB(Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor), EGSB(Expanded Granular Sludge Bed), IC(Internal Circulation) 및 ASBR (Anaerobic Sequencing Batch Reactor) 등의 새로운 공정이 널리 사용되고 있다²⁾.

ABR(Anaerobic Baffled Reactor)은 장치가 단순하고 운전이 간단하다³⁾. 또한 시공 및 운전비가 적고, 슬러지의 배출 문제가 적어 장기간 운전이 가능하며, 다른 반응조 형태에 비해 수리학적 체류시간 (Hydraulic Retention Time, HRT)을 짧게 하여 운전을 수행할 수 있다³⁾. 둔분뇨를 기질로 이용한 Boopathy 등(1991)의 연구에서는 초기 유기물 부하율 $1.0 \text{ kg COD/m}^3 \cdot \text{d}$ 에서 초기 운전 기간이 57일로 평가되었다⁴⁾. 탄수화물과 단백질을 혼합하여 기질로 이용한 Barber 등(1997)의 연구에서는 초기 유기물

부하율 $1.2 \text{ kg COD/m}^3 \cdot \text{d}$ 에서 초기 운전 기간이 128일로 평가되었다⁵⁾. 석유를 기질로 이용한 Ji 등(2009)의 연구에서는 초기 유기물 부하율 $0.2 \text{ kg COD/m}^3 \cdot \text{d}$ 에서 초기 운전 기간은 164일로 평가되었다⁶⁾.

ASBR은 단일 반응조 형태로 수리학적 체류시간에 따라 유입, 반응, 침전, 유출을 연속적으로 운전하는 방식이며, 고농도의 미생물을 확보할 수 있는 간단한 반응조 형태이다⁷⁾. ASBR에서는 반응 시간 동안 교반이 이루어지며, 교반하지 않는 경우에 비해 바이오 가스 생산이 증가되는 것으로 보고되어 있다⁸⁾.

본 연구에서는 ABR과 ASBR을 이용하여 수소 발효 반응조 유출수의 혐기성 소화 시 초기 운전 기간을 포함한 각각의 반응조의 메탄 발효 성능을 평가하고자 한다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 식종슬러지

식종 슬러지는 S시에 위치한 하수처리장 혐기 소화조에서 유출되는 슬러지를 채수하여 식종하였다. 식종 슬러지의 TSS(Total Suspended Solids)는 $18,060 \text{ mg/L}$ 이며, VSS(Volatile Suspended Solids)/TSS의 비는 0.69이다.

2.2 기질

기질은 음식폐기물을 기질로 이용하는 CSTR(Continuous Stirred Tank Reactor) 형태의 혐기성 수

소 발효 반응조로부터 발생하는 유출수를 기질로 사용하였으며, TCOD(Total Chemical Oxygen Demand)를 20 g/L로 희석하여 사용하였다. 실험에 사용된 수소 유출수는 평균적으로 VS(Volatile Solids), 탄수화물 및 총 유기산 농도가 각각 23.7 g/L, 2.2 g/L 및 12.1 g/L로 나타났다.

2.3 실험장치 및 운전조건

[Fig. 1]은 혐기성 수소 발효조의 유출수를 기질로 이용한 ABR과 ASBR을 제시하고 있다. ABR과 ASBR의 유효 용량은 각각 3.0 L이다. ABR 반응조는 3개의 격방(chamber)으로 상방향 흐름 형태로 구성되어 있다. 운전 온도는 중온(35°C)으로 유지하였으며, 2N HCl 용액과 5N KOH 용액을 이용하여 초기 pH는 7.0으로 고정하였다. 초기 F/M(Food/Microorganism) 비는 0.5로 설정하였으며 반응조 내의 pH 고정을 위해 NaHCO₃를 0.315 g 투입하였다⁹⁾. 식종 완료 후 N₂ 가스로 반응조의 기상 부분을 5분간 탈기하여 혐기성 상태로 전환하였다. ABR과 ASBR의 기질 유입은 1일 1회 수행하였으며, ASBR 운전 방식은 기질 주입 1시간, 반응 17시간, 침전 5시간, 유출 1시간으로 나누어 운전하였다¹⁰⁾.

2.4 분석 방법

메탄 가스 조성은 기질 유입 전 습식 가스 저류조에서 가스를 채취하여 TCD(Thermal Conductivity Detector)가 장착된 GC(Gas Chromatography, Gow Mac series 580, USA)를 이용하여 분석하였다. Column은 1.8 m×3.2 mm stainless steel column을 사용하였으며 충전제로는 molecular sieve 5A(80/100 mesh)를 사용하였다. Column,

injector 및 detector의 온도는 각각 50, 80 및 90°C로 고정시켰으며, 고순도 질소(99.999%)를 운반 기체로 이용하였다.

비메탄 활성도(Specific Methanogenic Activity, SMA) 실험은 총 용량 120 mL의 혈청병을 이용하였다. 식종 슬러지는 10 mL 주입하였으며, 유효 부피 70 mL의 나머지 부분은 수소 발효 반응조 유출수와 MSM(Mineral Salts Medium) 용액으로 채웠다. 식종 완료 후 N₂ 가스로 5분간 탈기하여 중온(35°C)에서 120 rpm으로 교반하여 보관하였다. MSM 용액의 조성은 [Table 1]에 나타내었다. 메탄 발생량 측정은 50 mL의 유리 주사기를 이용하였으며 발생된 가스는 온도 및 증기압을 표준상태로 보정하였다. 비메탄 활성도 실험 결과는 식(1)에 제시된 수정 Gompertz 식을 이용하여 산정하였다¹¹⁾.

$$H = P \cdot \exp \left[-\exp \left(\frac{R \cdot e}{P} (\lambda - t) + 1 \right) \right] \quad (1)$$

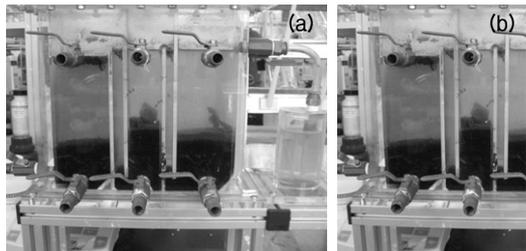
- 여기서, H = 누적 메탄 발생량 (mL CH₄)
- P = 최종 메탄 발생량 (mL CH₄)
- λ = 지체기 (d)
- R = 메탄 발생율 (mL CH₄/d)
- e = 지수
- t = 시간 (d)

VS, VSS 및 COD는 Standard Methods에 준해 분석하였으며¹²⁾, 탄수화물은 spectrophotometer(Beckman Coulter DU730, USA) 장비를 이용하여 Dubois 등(1956)의 방법으로 분석하였다¹³⁾. VFAs(Volatile Fatty Acids)는 fast acid column(BIO-RAD)이 장착된 HPLC(YL9100) 장비를 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 ABR과 ASBR의 메탄 발생량

ABR과 ASBR의 운전은 유기물 부하율 1.0 kg COD/m³·d와 HRT 20일 조건으로 수행하였다. 메탄 발생량은 [Fig. 2]와 같이 나타났다. ABR과 ASBR 연속 운전 결과 정상 상태에 도달되기까지는 각각 약

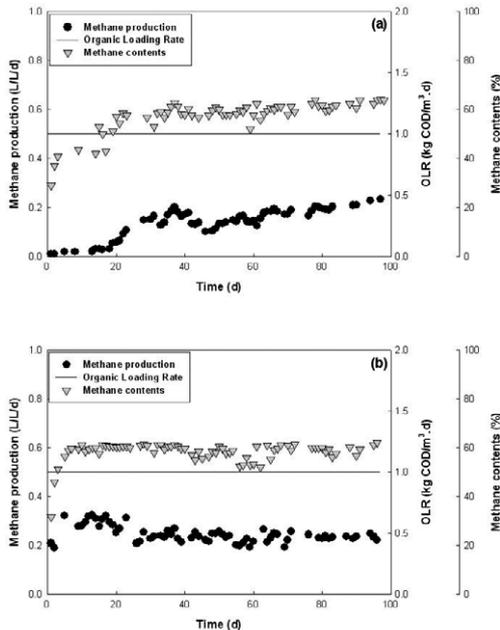


[Fig. 1] Photographs of ABR and ASBR. (a) ABR. (b) ASBR.

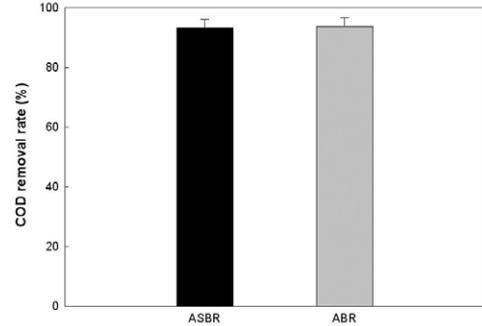
28일과 5일이 소요되었으며 초기운전 기간의 차이는 약 23일로 나타났다. 초기 운전 기간에는 ABR과 ASBR에서 평균 메탄 발생량은 각각 0.04 L/L/d와 0.19 L/L/d로 나타났다. 정상 상태 도달 후에 ABR과 ASBR의 최대 메탄 발생량은 각각 0.25 L/L/d와 0.31 L/L/d로 나타났다. Wang 등(2004)의 연구에 의하면 ABR에서는 반응조 내부가 격방으로 구분되어 있어 격방 순으로 메탄 함량이 증가되는 것으로 보고

되어 있다¹⁴⁾. ASBR은 교반 작용에 의해 미생물과 기질이 완전 혼합되는 연속 회분식 반응조 형태로 운전된다¹⁵⁾. 따라서 ASBR과 압출형 흐름과 유사한 ABR의 초기 운전 기간과 메탄 발생량은 차이가 나타나는 것으로 판단된다.

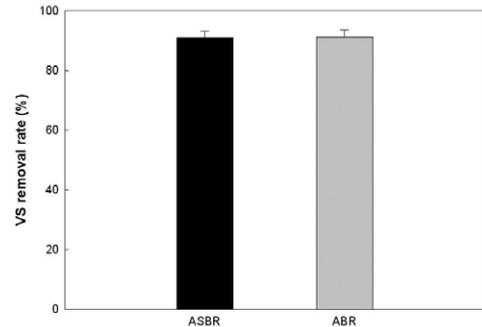
3.2 ABR과 ASBR의 제거율



[Fig. 2] Methane production. (a) ABR. (b) ASBR.



[Fig. 3] COD removal rate.



[Fig. 4] VS removal rate.

[Table 1] Composition of Mineral Salts Medium

Phosphate buffer	Minerals	Trace metals
270 mg/L KH ₂ PO ₄ 350 mg/L K ₂ HPO ₄	75 mg/L CaCl ₂ · 2H ₂ O 100 mg/L MgCl ₂ · 6H ₂ O 20 mg/L FeCl ₂ · 4H ₂ O	0.5 mg/L MnCl ₂ · 4H ₂ O 0.05 mg/L H ₃ BO ₃ 0.05 mg/L ZnCl ₂ · 2H ₂ O 0.03 mg/L CuCl ₂ 0.01 mg/L NaMoO ₄ · 2H ₂ O 0.5 mg/L CoCl ₂ · 6H ₂ O 0.05 mg/L NiCl ₂ · 6H ₂ O 0.05 mg/L Na ₂ SeO ₃

ABR과 ASBR의 전체 운전 기간에서 COD 및 VS 제거율을 [Fig. 3]과 [Fig. 4]에 나타내었다. ABR과 ASBR의 COD 제거율은 초기 운전 기간에서 각각 89%와 92%로 나타났으며, 정상 상태 도달 후에는 각각 93%로 유사하게 나타났다. ABR은 압출형 흐름과 유사하기 때문에 정상 상태에 도달되기 전에는 ASBR에 비해 원활한 유기물 제거가 이루어지지 않는 것으로 판단된다.

3.3 비메탄 활성도 평가

비메탄 활성도 평가를 위해 식종 슬러지와 운전 30일 경과 후 ABR의 각 격방과 ASBR의 미생물을 각각 채수하였다. ABR의 격방 2와 3 및 ASBR의 각 미생물을 이용한 비메탄 활성도 평가 결과는 [Table 2]에 요약하였다. Uyanik 등(2002)에 의하면 ABR의 첫 번째 격방에서는 산발효가 진행되는 것으로 보고되어 있으며, 나머지 격방에서는 메탄 발효가 진행되는 것으로 보고되어 있다¹⁶⁾. 따라서 ABR의 격방 1에서는 pH 5.2로 대부분 가수분해 또는 산발효 미생물로 구성되어 있어 비메탄 활성도 평가 결과 메탄은 발생되지 않는 것으로 판단된다. ABR의 격방 2와 3에서 비메탄 활성도는 각각 0.38 g CH₄ COD/g VSS · d와 0.15 g CH₄ COD/g VSS · d로 나타났다. Mutnan 등(1999)은 4개의 격방으로 구성되어 있는 ABR을 이용하여 각 격방의 미생물에 대한 활성도를 평가하였다¹⁷⁾. 그 결과, 첫 번째 격방에서는 가수분해와 산발효 미생물에 대한 활성도가 가장 높게 나타났으며, 격방 2에서는 비메탄 활성도가 가장 높게 나타났다¹⁷⁾. 본 연구에서도 ABR의 격방 2에서 비메탄 활성도가 가장 높게 나타나 Mutnan 등(1999)의 연구 결과와 유사하

나, ASBR 미생물의 비메탄 활성도 보다는 낮게 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 ABR과 ASBR을 이용하여 수소 발효 반응조 유출수의 혐기성 소화 시 초기 운전 기간을 포함한 각각의 반응조의 메탄 발효성능을 평가 하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. 유기물 부하율 1.0 kg COD/m³ · d와 HRT 20일 조건에서 ABR과 ASBR 연속 운전 결과 정상 상태에 도달하기까지 각각 약 28일과 5일이 소요되는 것으로 나타났다. 초기 운전 기간에는 ABR 및 ASBR에서 평균 메탄 발생량은 각각 0.04 L/L/d와 0.19 L/L/d로 나타났으며, 정상 상태 도달 후에는 최대 메탄 발생량이 각각 0.25 L/L/d와 0.31 L/L/d로 나타났다.
2. ABR과 ASBR의 COD 제거율은 초기 운전 기간에서 각각 89%와 92%로 나타났으며, 정상 상태 도달 후에는 각각 93%로 유사하게 나타났다.
3. ABR의 격방 2와 3에서 비메탄 활성도는 각각 0.38 g CH₄ COD/g VSS · d와 0.15 g CH₄ COD/g VSS · d로 나타났다. ABR에서 가장 높게 나타난 격방 2 미생물의 비메탄 활성도는 ASBR 미생물의 비메탄 활성도 보다 낮게 나타났다.

사사

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2009년도 성능·환경 복원 기술(07도시재생B04)에 의한 도시재생 사업단의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 천석현, 국내 신재생에너지정책 추진현황과 향후 전망, 설비저널, 39(1) (2010).
2. 배재호, 유만식, 류돈식, 이종규, 김창균, 폐기물 자원화, 1판, 동화기술, pp. 69~70 (2010).

[Table 2] Summary of SMA

Parameter	SMA(g CH ₄ COD/g VSS · d)
Seed sludge	0.09
ABR(chamber 2)	0.38
ABR(chamber 3)	0.15
ASBR	0.44

3. Barber, W. P. and Stuckey, D. C., "The use of the anaerobic baffled reactor(ABR) for wastewater treatment: A review", *Wat. Res.*, 33(7), pp. 1559~1578 (1999).
4. Boopathy R. and Sievers D. M., "Performance of a modified anaerobic baffled reactor to treat swine waste", *Trans. ASAE*, 34(6), 2573~2578 (1991).
5. Barber, W. P. and Stuckey, D. C., "Start-up strategies for anaerobic baffled reactors treating a synthetic sucrose feed", *Proceedings of the 8th International Conference on Anaerobic Digestion*, 2, pp. 32~39 (1997).
6. Ji, G. D., Sun, J. R. and Tong, J. J., "Anaerobic baffled reactor (ABR) for treating heavy oil produced water with high concentrations of salt and poor nutrient", *Bioresource Technology*, 100(3), pp. 1108~1114 (2009).
7. Samir, K. K., *Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production*, Wiley-Blackwell, pp. 2~3 (2008).
8. Ho, C. C. and Tan, Y. K., "Anaerobic treatment of palm oil mill effluent by tank digesters", *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 35b, pp. 155~164 (1985).
9. Shelton, D. R. and Tiedje, J. M., "General method for determining anaerobic biodegradation potential", *Appl. Environ. Microbiol.*, 47, pp. 850~857 (1984).
10. 김현우, "고온/중온 혐기성 연속회분식 반응조를 이용한 하수슬러지와 음식물쓰레기의 혼합 소화 및 바이오에너지 회수", 박사학위논문 (2006).
11. Xiangwen, S., Dangcong, P., Zhaohua, T. and Xinghua, J., "Treatment of brewery wastewater using anaerobic sequencing batch reactor (ASBR)", *Bioresource Technology*, 99, pp. 3182~3186 (2008).
12. APHA-AWWA-WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 18th edition, Am. Public Health Assoc., Washington, D. C., USA (1992).
13. Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A. and Smith, F., "Colorimetric method for determination of sugars and related substances", *Anal. Chem.*, 28(3), pp. 350~356 (1956).
14. Wang, J., Huang, Y. and Zhao, X., "Performance and characteristics of an anaerobic baffled reactor", *Bioresource Technology*, 93, pp. 205~208 (2004).
15. Samir, K. K., *Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production*, Wiley-Blackwell, pp. 109~110 (2008).
16. Uyanik, S., Sallis, P. J. and Anderson, G. K., "The effect of polymer addition on granulation in an anaerobic baffled reactor (ABR). Part I: process performance", *Water Research*, 36, pp. 933~943 (2002).
17. Mutnan, M., Mrafkova, L., Drtil, M. and Derco, J., "Methanogenic and nonmethanogenic activity of granulated sludge in anaerobic baffled reactor", *Chem. Papers*, 53(6), pp. 374~378 (1999). 