



연속 회분식 혐기성 공정을 이용한 하수슬러지와 음식물쓰레기의 혼합소화 거동 특성

김현우, 한선기, 신항식
한국과학기술원 건설 및 환경공학과
(2003년 11월 20일 접수, 2004년 1월 5일 채택)

Performance of high-rate anaerobic sequencing batch reactor treating sewage sludge and food waste

Hyun-Woo Kim, Sun-Kee Han and Hang-Sik Shin

Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology.

ABSTRACT

Temperature-phased anaerobic digestion (TPAD), anaerobic sequencing batch reactor (ASBR), and co-digestion technologies were combined together in order to overcome low efficiencies of conventional anaerobic sewage sludge digestion processes. In the performance, TPAD-ASBR process showed high VS removal efficiency over 60% up to the organic loading rate (OLR) of 2.7 g VS/L/d. The first-stage of TPAD-ASBR and control system played a most significant role in VS destruction and methane production. Methane production rate (0.79 l CH₄/L/d) of the system was higher than that (0.59 l CH₄/L/d) of the control system. The substrate characteristics of the sewage sludge, such as low VS concentration (1.5%, w/w) and biodegradability, were properly improved by the addition of food waste as a co-substrate, leading to more efficient VS removal and methane production. With several track studies, it was revealed that the independent solid retention time (SRT) of those systems prevented untreated particles from outflowing and also, extended the retention time of the active biomass for further degradation. Consequently, it was confirmed that the sequencing batch operation of the TPAD process using co-substrate was a promising alternative for the recycling of sewage sludge with low VS content.

Key Words : Anaerobic sequencing batch reactor, Temperature-phased anaerobic digestion, Co-digestion, Sewage sludge, Food waste

초 록

혐기성 소화효율의 극대화를 위해 온도상분리 공정과 혐기성 회분식 공정을 음식물 쓰레기와 하수슬러지의 혼합기질에 적용한 온도상분리 혐기성 회분식 소화공정(TPAD-ASBR)의 거동 특성을 유기물부하의 변화에 따라 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다. TPAD-ASBR 과 대조구의 첫 단계에서 대부분의 메탄생성과 유기물 제거가 루어졌으며, 단위부피당 메탄발생량은 유기물부하 2.7 g VS/L/d에서 각각 0.79와 0.59L CH₄/L/d 였다. 동일 부하에서 TPAD-ASBR의 유기물 제거효율은 61%이었으며 40%의 효율을 보인 대조구에 비해 고온조를 도입한 본 공정의 우수성을 확인하였다. 국내 하수슬러지는 상대적으로 낮은 VS 농도(1.5%, w/w)와 낮은 생분해 효율을 보이는데, 이러한 부정적 특성을 보완하기 위하여 투입된 음식물쓰레기에 의한 기질 특성의 효과적인 개선으로 인해 높은 유기물 감량과 메탄회수가 가능하였다. 또한, track study를 통해 연속회분식 운전방식에 의한 settling 단계의 도입으로 SRT를 HRT보다 길게 유지하여 미처리 입자와 active biomass의 효율적이고 지속적인 접촉을 도모하여 보다 높은 안정화효율 획득이 가능한 것으로 사료된다. 따라서, 혐기성소화공정에 TPAD-ASBR공정과 함께 음식물쓰레기와의 혼합소화를 도입하는 것은 처분이 까다로운 두 가지의 폐기물을 고효율로 처리함과 동시에 효율적인 에너지회수가 가능하여 경제적 운전이 가능하였다.

주제어: 연속회분식 혐기성소화, 온도상분리 혐기성소화, 혼합소화, 하수슬러지, 음식물쓰레기

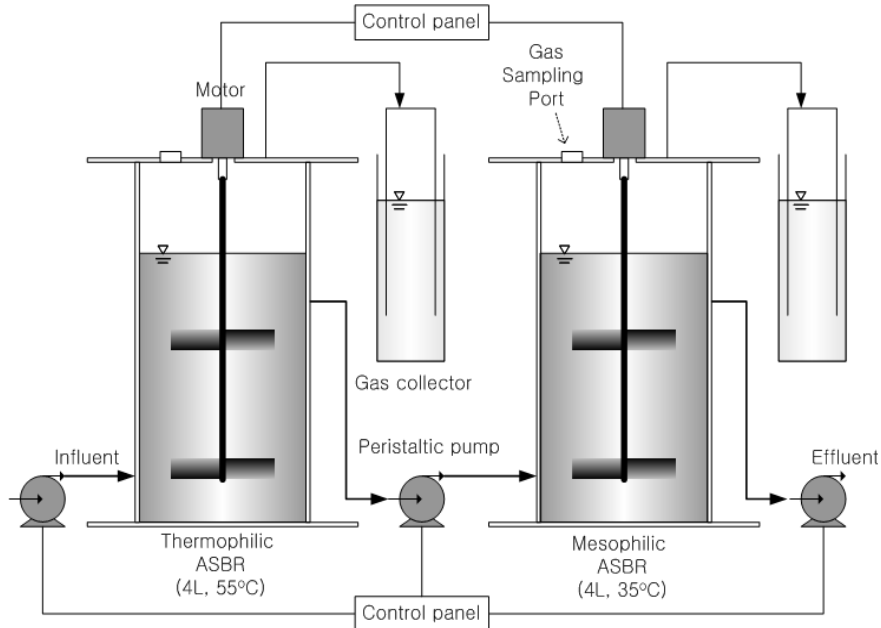
1. 서론

국내 하수처리장에서 발생되어 폐기되는 하수슬러지의 총량은 2001년 기준 연간 1,902천 톤에 달하는 막대한 양이 발생되고 있으며, 이 중 95.8%가 해양투기, 매립 및 소각에 의해 처분되고 있다.¹⁾ 이러한 처분방법은 바다생태계의 파괴, 토양오염, 대기오염 등과 같은 이차적인 환경오염 유발 가능성이 매우 높고, 정부의 단계적 직매립 금지조치 및 해양 오염 방지에 관한 국제협약 등에 의해 해양투기 또한 점차 제한될 예정이므로 그 대체 처리방안이 매우 시급한 상황이다. 가장 환경친화적인 대안으로는 처리된 하수슬러지의 적절한 재활용처를 개발하는 것이다. 이에 따라 하수슬러지의 유기물과 무기물 성분별로 재활용을 위한 연구가 진행되고 있다.²⁾ 이에 앞서 인체 및 환경에 미치는 영향과 처리 후의 부피를 최소화 할 수 있는 적절한 안정화가 반드시 수행되어야 하며 고효율 혐기성 소화공정의 도입은 이에 가장 적합한 해결방안 중 하나일 것이다.

한편, 생활폐기물 일일 발생량(48,499톤/일)의

23.1%를 차지하는 음식물쓰레기의 경우 쉽게 부패하는 특성으로 인해 수집, 운반, 매립에 있어 악취, 침출수, 병원균 증식 등과 같은 다양한 이차 환경오염문제의 원인이 된다. 하지만 음식물쓰레기의 높은 유기물함량은 타 생물의 영양원이나 대체 에너지원으로 이용될 수 있는 높은 잠재력을 갖기 때문에 이를 이용할 수 있는 적절한 기술의 도입이 필요한 실정이다.³⁾ 이렇게 문제시 되는 두 가지 이상의 유기성 도시고형폐기물(organic fraction of municipal solid waste, OFMSW)을 동시처리 하는 혼합소화(co-digestion)는 개선된 기질의 특성으로 인해 대부분의 경우 향상된 메탄수율을 나타내는 것으로 보고되었다.⁴⁾

주어진 처리대상물의 부피에 대한 짧은 수리학적 체류시간이 가능함은 곧 반응조 설계부피의 감소를 수반하므로 보다 경제적인 처리가 가능하게 된다. 기존의 완전혼합형 공정(CSTR)으로부터 혐기성처리기술의 발전방향은 수리학적 체류시간(hydraulic retention time, HRT)과 active biomass의 체류시간(solid retention time, SRT)을 안정적으로 분리하거나 미생물 상(phase)을 분



[Fig.1] Schematic diagram of TPAD-ASBR system.

리하여 최적화하는 데에 중점을 두었다. 즉, HRT를 최대한 짧게 유지하면서 미생물의 체류시간(SRT)을 최대화 하여 안정적인 처리효율 획득이 가능한 신 공정에 대한 다양한 연구가 진행된 바 있다. 대표적으로 잘 알려진 UASB (upflow anaerobic sludge blanket), 이상분리 (two-phase separation), 고온(thermophilic), 온도상분리 (temperature-phased anaerobic digestion), 혐기성 연속 회분식(anaerobic sequencing batch reactor) 공정 등은 모두 반응조 형태, 운전조건 및 운전방식의 변화를 최적화하여 높은 처리효율과 안정적인 운전이 가능하였다. 더불어 처리대상물질 역시 확대 적용됨에 따라 혐기성 기술은 산업폐수 및 폐기물의 처리에 최적의 솔루션을 제공할 수 있게 되었다.^{5,6,7,8)}

일반적으로 55 °C의 고온에서 최적의 활성을 보이는 미생물에 의한 폐기물의 혐기성소화는 기존의 중온(35 °C)공정에 비하여 상대적으로 낮은 체류시간과 높은 유기물부하에서 운전이 가능하다. 그 주요 원인은 고온조건에 의해 혐기성 소화의 율속단계인 입자의 가수분해율이 증대되고, 고온 혐

기성 메탄발효균의 물질대사 효율이 중온군보다 우월하여 유기물에서 메탄으로 전환되는 속도가 보다 빠르게 진행되기 때문이다. 부가적으로는 중온공정의 주요 문제점 중 하나인 foaming의 감소와 유출되는 소화슬러지 내 병원균이 대부분 사멸되는 특성 때문이다.^{9,10)} 한편, 혐기성 회분식(ASBR)공정은 한번의 주기가 feed, react, settle, decant 단계로 구성되어 연속적인 주기의 반복에 의해 운전되며 부가적 설비의 도입과 복잡한 과정 없이 반응조 자체적으로 settle 단계를 도입함에 따라 메탄생성균을 고농도로 유지할 수 있어 짧은 HRT를 유지하면서 미생물의 washout을 줄여 유기물 감량과 메탄전환율은 최대화 할 수 있다.⁶⁾ 이러한 두 가지의 고효율 컨셉을 동시에 적용한 최적의 운전이 가능하다면, 기존 공정에 비해 획기적인 효율 향상을 기대 가능하다.

이에 따라, 본 연구에서는 혐기성 소화효율의 극대화를 위해 앞서 언급한 2단의 온도상분리 공정과 혐기성 회분식 공정을 음식물 쓰레기와 하수슬러지의 혼합기질 처리에 적용한 온도상분리 혐기성 회분식 소화공정(TPAD-ASBR)의 거동 특성

을 유기물부하의 변화에 따라 평가하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 반응조의 구성 및 운전

온도상분리 혐기성 회분식 소화공정 (temperature-phased anaerobic sequencing batch reactor, TPAD-ASBR)은 [Fig. 1]과 같이 두개의 CSTR 형태의 반응조가 하나의 시스템으로 구성되었으며, 첫단의 고온소화조와 후단의 중온소화조의 유효부피는 각각 4L 이었고 직렬로 연결하였다. 부가적으로 1개의 feed tank와 고온과 중온 반응조에 연결된 2개의 수위변위식 gas collector를 설치하였으며, 대조구로 TPAD-ASBR 공정과 동일한 구성을 갖지만 중온 메탄발효조가 직렬로 연결된 Series-ASBR 시스템을 운전하였다. 시스템의 운전방법은 control panel에 의해 24시간을 한번의 주기로 하여 [Fig. 2]와 같이 연속회분식으로 운전되었다. 반응조 시스템은 모두, 35 °C 항온실 내에 위치하였으며 고온소화조의 경우는 water bath circulator (제오텍, RBC-30)와 water jacket을 이용하여

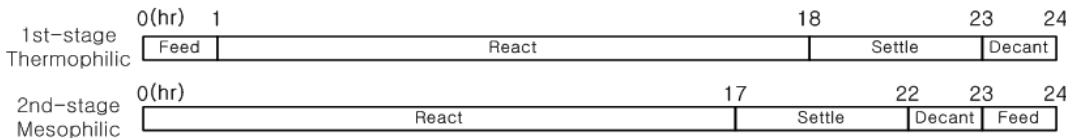
55 °C를 유지하였다.

2.2 식종균

고온 및 중온소화조에 사용한 식종균은 D시 하수처리장내 중온 혐기성소화조(CSTR)의 슬러지 (VSS/TSS=0.610)를 채취하여 반응조 내 유효부피의 70%를 채우고 증류수로 유효부피까지 채운 뒤 질소로 purging 한 후 운전을 시작하였다. 고온소화조는 질소 purging 후 바로 55 °C로 유지되었으며 고온균의 성장을 위해 약 1개월의 순응기간이 소요되었다.

2.3 기질의 성상

혼합기질은 기 수행된 연구결과¹¹⁾에 따라 D시 하수처리장 농축조 내 일차슬러지(primary sludge)와 폐 활성슬러지(waste activated sludge)가 혼합되어 있는 농축슬러지와 와 구내식당에서 발생하는 음식물쓰레기를 유기물(volatile solid, VS)기준으로 60:40의 비율로 혼합하여 사용하였으며 각각의 기질 특성은 다음의 [Table 1]에 나타내었다.



[Fig.2] Operation sequence of TPAD-ASBR process.

[Table 1] Characteristics of Substrates

Item	Unit	Sewage Sludge	Food waste
Physical Characteristics			
TS	%	3.1~2.4	21.7~16.1
VS	%	2.0~1.2	20.2~14.9
Average VS/TS		64.2	93.4
Chemical Characteristics			
Carbon (C)	%	24.4	50.1
Nitrogen (N)	%	3.4	3.6
Hydrogen (H)	%	3.9	6.7
Sulfur (S)	%	0.7	-
C/N		7.2	13.7

2.4 분석방법

기체 발생량을 측정하기 위하여 수위 변위식 gas collector를 이용하였으며, 기체의 조성분석은 thermal conductivity detector (TCD)와 헬륨기체(carrier gas)를 이용하는 gas chromatograph (Gow Mac series 580)를 이용하였다. COD의 측정은 dichromate reflux method¹²⁾를 이용하였고, pH는 pH meter (Orion 720A)를 표준 pH 용액(pH 4, pH 7)으로 보정하여 측정하였다. 휘발성 지방산(volatile fatty acid, VFA)의 농도는 Aminex HPX-87H column과 UV (210nm) detector를 갖는 high performance liquid chromatograph (Spectra Physics P2000)를 이용하였다. 원소분석은 dynamic flash combustion oxidation chamber와 TCD를 이용하는 Elemental analyzer (Fisons, EA-1110)를 이용하였으며, 그 외 TS (total solid), VS (volatile solid), TSS (Total suspended solid) 및 VSS (Volatile suspended solid) 등의 기타 실험방법은 Standard Method¹²⁾에 준하여 측정 하였다.

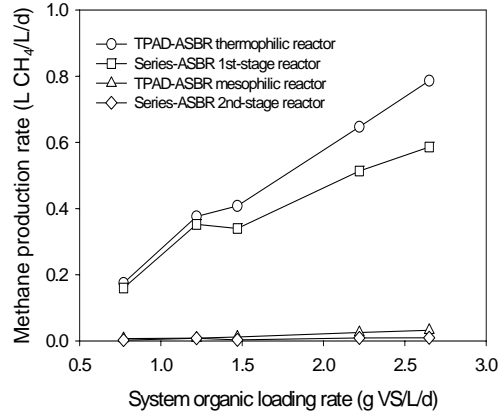
3. 실험결과 및 고찰

3.1 메탄생성율과 유기물 제거 효율

TPAD-ASBR의 고온 반응조의 정상상태 도달을 위하여 약 30일간 낮은 유기물부하(0.5g VS/L/d)의 순유기간을 거친 후 유기물부하를 0.8~3.5 g VS/L/d까지 점차 변화시켜 운전성능을 평가하였다. 각 유기물부하에서, 고정된 HRT의 3 배 이상의 기간 동안 운전 후 정상상태에 도달한 것으로 간주하여 데이터를 수집하였다.

[Fig. 3]은 유기물부하의 증가에 따라 TPAD-ASBR과 대조구의 단위부피당 메탄발생율을 보여준다. 유기물부하 1.5 g VS/L/d 이하에서는 TPAD-ASBR 공정과 대조구간의 차이가 크지 않았으나, 이후 지속적인 유기물부하 증가에 따라 TPAD-ASBR 공정에서 보다 많은 단위부피당 메탄발생율을 보였다. 또한 유기물부하가 점차 증가하여 2.7 g VS/L/d에 이를 때까지 대조구와의 격차가 지속적으로 증대되었다. TPAD-ASBR 공

정의 첫단인 고온조의 경우 유기물부하 2.7 g VS/L/d에 이르러 0.79 L CH₄/L/d의 메탄생성율을 보인 반면 대조구의 첫단은 0.59 L CH₄/L/d로



[Fig. 3] Average methane production rates per unit volume of TPAD-ASBR and Series-ASBR system depending on the organic loading rates.

고온조건에서 운전이 중온대비 34%의 향상된 메탄생성을 보이는 것으로 나타났으며 이는 기 수행된 고온과 중온에서의 biochemical methane potential (BMP) test 결과와 유사하였다.¹¹⁾ 첫단에 직렬로 연결되어 있는 후단의 경우 생성되는 메탄의 양이 매우 적어 두 공정에서 모두 첫 번째 반응조가 전체 공정의 메탄생성에 중추적 역할을 하는 것으로 사료된다. 각 반응조의 메탄 분율은 standard temperature and pressure (STP) 상태에서 TPAD-ASBR 고온조는 55~62%, 중온조는 27~39% 이었고 대조구의 경우 첫단과 후단 반응조에서 각각 52~62% 와 19~32%를 나타내었다. 한편, 유기물 부하 2.7 g VS/L/d에서의 pH와 총알칼리도는 4개의 반응조 모두 7.5~7.8, 2600~3200 mg/L as CaCO₃로 유지되어 안정적인 운전이 가능하였다. TPAD-ASBR 고온조는 대조구 첫단의 총유기산 농도 40~93 mg COD/L 보다 현저히 높은 331~712 mg COD/L를 나타내어 일반적 고온 혐기성소화조의 특징을 나타내었다.¹³⁾ 하지만, 후단의 중온조를 거친 후 유출수의 TVFA 농도는 25~177 mg COD/L로 부수적인

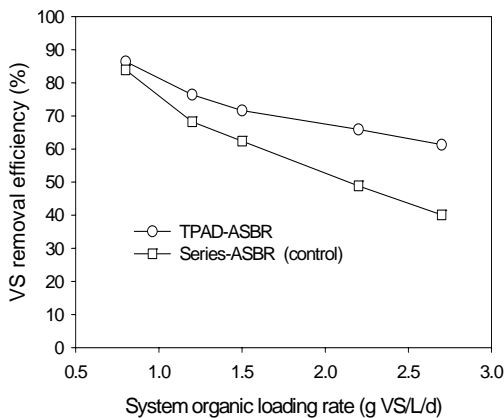
안정화가 수행되는 것을 확인하였다. 고온조의 일시적 유출수 수질저하가 중온조의 메탄생성과 직접적인 영향인자임을 확인할 수 있었으나 중온조의 평균 메탄생성율은 0.1 L CH₄/L/d를 넘지 못하는 매우 낮은 수준을 보였다.

[Fig. 4]에 유기물 부하에 따른 VS제거 효율을 나타내었다. 메탄생성 경향과 유사하게 부하의 증가에 따라 제거효율의 격차가 증대되었으며, 유기물부하 2.7 g VS/L/d에서 이르러 TPAD-ASBR 공정은 평균 61.3%, 대조구는 40.3%의 VS가 제거되었다. TPAD-ASBR 공정의 높은 유기물 제거 효율은 기존 완전혼합형 공정을 뛰어넘는 높은 수치를 나타내었는데 그 원인은 다음과 같다. 첫째, 투입되는 기질의 총유기물(VS기준) 중 40%가 생분해도가 매우 높은 음식물쓰레기였으므로 음식물쓰레기 내에 자체적으로 함유되어 있는 미생물과 가수분해 효소의 투입에 따라 음식물쓰레기 뿐만 아니라 하수슬러지 역시 빠른 가수분해 및 산생성이 가능하였다.^{9,14} 둘째, 기존의 상분리 공정과는 달리 산발효균과 메탄발효균 간의 공생관계가 유지되었고, 혼합소화에 의해 개선된 기질의 보다 균형있는 영양분 조건(nutrient condition) 역시 고온메탄발효균의 우월한 활성 유지에 기여하였음을 알 수 있다.^{9,11} 반면, 대조구의 급격한 유기물제거

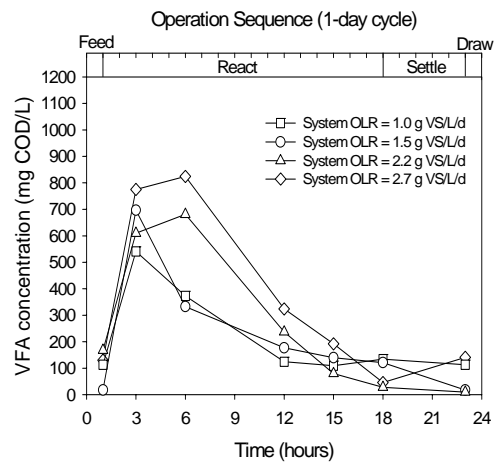
효율 저하는 foaming의 발생이 그 주요 원인 중 하나로 사료된다. 유기물부하가 2 g VS/L/d를 넘으면서 기질 주입 후 급격하게 증가된 foam layer가 육안으로 관찰이 가능하였으며, reaction 시간동안 교반이 진행되어도 없어지지 않았다. 이렇게 분해되지 못한 기질과 더불어 미생물 역시 foam layer에 축적 되는 현상이 빈번하게 나타나 더욱 급격한 효율 감소를 보이는 것으로 판단된다.

3.2 회분식 운전에 의한 휘발성 지방산과 메탄의 거동

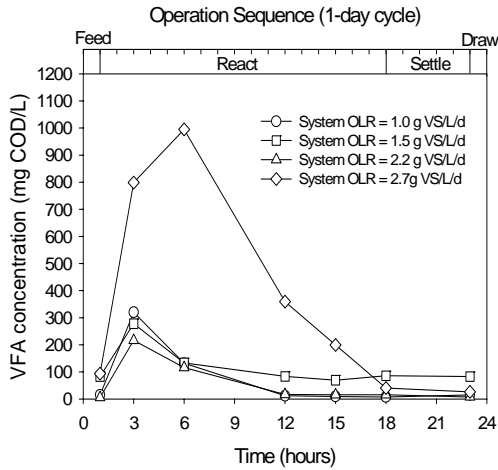
TPAD-ASBR 공정과 대조구의 연속회분식 운전을 통해 각 유기물부하별로 steady-state에 도달한 시점에서 한 주기에 대한 track study를 수행하여 VFA의 생성과 메탄생성경향을 추적하였다. [Fig. 4]와 [Fig. 5]에 나타낸 각 시스템의 첫 번째 반응조 내 총 VFA의 거동에서 보는바와 같이 연속 회분식 운전에 의해 기질의 유입직후 활발한 가수분해 및 산생성이 관찰되었다. TPAD-ASBR 고온조의 경우, 유기물부하 2.2 g VS/L/d부터 VFA의 축적이 6시간 동안 지속되었다. 대조구의 경우 유기물 부하에 따라 큰 변화를 보이지 않았으나, foaming이 심해진 유기물 부하 2.7 g VS/L/d에 급격한 VFA의 축적이 관찰되었다. 이러한 일시



[Fig.4] Average VS removal efficiencies of TPAD-ASBR and Series-ASBR system depending on the organic loading rates.



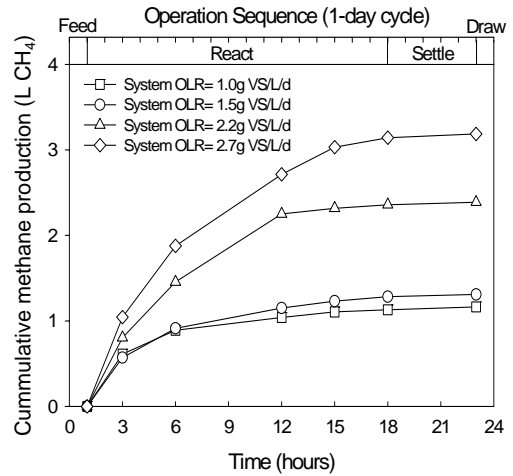
[Fig.5] Variations of methane production trends in the thermophilic reactor of TPAD-ASBR process depending on the organic loading rates.



[Fig. 6] Variations of methane production trends in the 1st-stage reactor of Series-ASBR (control) process depending on the organic loading rates.

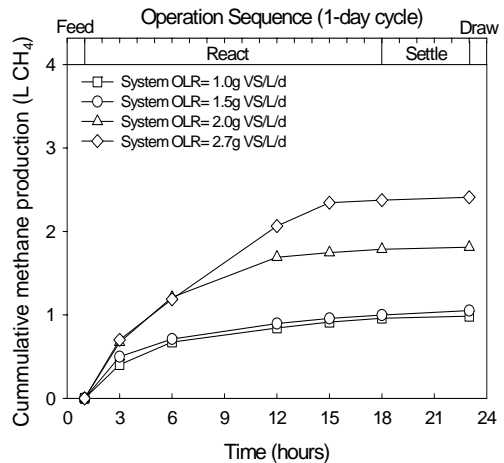
적인 VFA의 증가는 곧 반응조의 pH의 일시적인 저하를 유발하였다. 이에 따라, 비이온화된 VFA의 분율이 높아져 일시적인 독성효과를 가졌을 수 있으나 이러한 현상은 가역적이므로 축적된 VFA가 지속적으로 메탄으로 전환되면서 pH 및 총 VFA 농도가 낮은 수치로 회복되어 전체적인 메탄발효균의 활성이 유지된 것으로 사료된다.¹⁶⁾ 특히, TPAD 공정 고온조의 급격한 총 VFA농도의 증가는 고온조건에서의 높은 가수분해율로 설명된다. 고온조건에서 가수분해 효소의 확산 계수 증가와 기질입자표면적의 상대적인 증가로 인해 cellulose나 lignin과 같은 결정질 고분자의 crosslink를 보다 효과적으로 파괴할 수 있으며⁹⁾ 보다 많은 농도의 monomer의 생산이 가능하게 되고 산생성균에 의해 빠르게 메탄발효의 전구체인 저분자량의 VFA로 전환되기 때문이다.

[Fig. 6]과 [Fig. 7]은 Feed 주입이 끝난 직후 TPAD-ASBR과 대조구의 첫 번째 반응조에서 생성되는 메탄의 양을 누적하여 유기물 부하에 따라 나타내었다. TPAD-ASBR 고온조는 모든 유기물 부하에서 대조구를 앞서는 누적량을 보였다. 한편, 기질의 주입 이후 12시간까지의 메탄생성이 가장 활발하였으며, 이는 총 VFA의 농도가 급격히



[Fig. 7] Variations of methane production trends in the thermophilic reactor of TPAD-ASBR process depending on the organic loading rates.

낮아진 시점과 동일하였다. 특히, 본 시스템의 고온조의 경우 유기물 부하가 2.7 g VS/L/d에 이르러 활발한 메탄생성이 이루어지는 시기가 15시간까지 길어졌는데, 투입된 혼합 기질과 고온조건에 의해 가수분해와 VFA로의 전환이 지속되었기 때문이다. 또한, 누적곡선의 시간당 메탄생성에 있어



[Fig. 8] Variations of methane production trends in the 1st-stage reactor of Series-ASBR (control) process depending on the organic loading rates.

대조구는 낮은 기율기를 보이는 반면, 고온조의 경우는 유기물부하의 증가에 따른 시간당 메탄생성으로 대별되는 기율기의 증가가 뚜렷하였다. 이것은 곧, TPAD-ASBR 고온조가 율속단계인 가수분해 효율증가의 수반과 더불어 settling 단계가 도입된 연속회분식 운전에 의해 HRT와 SRT가 효과적으로 분리되었기 때문이다. 이에 따라, 느리게 분해되는 입자의 유출을 최대한 방지할 수 있었고, 체류된 미처리 입자는 고효율의 지속적인 분해가작이 진행되는 가운데 부가적인 생분해가 가능했기 때문이다.^{7,15)} 또한 함께 체류된 고농도의 active biomass는 보다 효율적인 기질과의 접촉이 가능하였을 것으로 사료된다.

4. 결 론

1. TPAD-ASBR 과 대조구의 첫 단계에서 대부분의 메탄생성과 유기물 제거가 이루어졌으며, 각 공정의 단위부피당 메탄발생량은 유기물부하 2.7 g VS/L/d일 경우 각각 0.79와 0.59L CH₄/L/d 이었다.
2. TPAD-ASBR 공정의 유기물 제거 효율은 유기물부하 2.7 g VS/L/d에서 약 61% 이었으며 대조구의 첫단 대비 34% 가량 향상되어 고온조를 도입한 TPAD-ASBR 공정이 모든 공정효율 평가 항목에서 대조구보다 우월하였다.
3. 하수슬러지의 상대적으로 낮은 VS 농도 (1.5%)와 feed 내의 readily biodegradable 성분이 낮은 전형적인 특성들을 보완하기 위하여 투입된 음식물쓰레기에 의해 상대적으로 높은 유기물 감량과 메탄회수가 가능하였다.
4. ASBR 운전방식에 의한 settling 단계의 도입으로 SRT를 증가시킬 수 있었고, active biomass와 기질과 효율적인 접촉을 도모하여 보다 높은 안정화효율 획득이 가능한 것으로 사료된다.
5. 현 혐기성소화공정에 TPAD-ASBR공정과 함께 음식물쓰레기와의 혼합소화를 도입할 경우 처분이 까다로운 두 가지의 폐기물을 고효율로 처리함과 동시에 효율적인 에너지회수가

가능하여 경제적이고 안정적 운전이 될 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실(NRL) 사업(No. M1-0203-00-0063)의 일환으로 수행되었으며, 관계자 분들께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 환경부, 생활폐기물, 하수도 및 하수슬러지 발생량 통계, <http://www.me.go.kr>, (2002).
2. 권기홍, 하수슬러지 관리 및 재활용 방안(특집/슬러지관리 및 처리기술), 첨단환경기술 11월, (2000).
3. Han, S.-K., Shin, H.-S., Kim, S.-H., Kim, H.-W., "Effect of waste components on performance of acidogenic fermenter", J. KOWREC 10(2), pp. 65~70 (2002).
4. Mata-Alvarez, J., Mac[il], S., Llabr[il], P., "Anaerobic digestion of organic solid waste. An overview of research achievements and perspectives", Bioresource Technol. 74, pp. 3~16 (2000).
5. Lettinga, G., van Velsen, A. F. M., Hobma, S. M., de Zeeuw, W. and Klapwijk, A. "Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment", Biotechnol. Bioeng. 22, pp. 699~734 (1980).
6. Fox P. and Pohland F. G., "Anaerobic treatment applications and fundamentals: substrate specificity during phase separation", Wat. Environ. Res., 66(5), pp. 716~724 (1994).
7. Sung, S and Dague, R. R., "Laboratory studies on the anaerobic sequencing batch reactor", Wat. Env. Res 67(3), pp. 294~301 (1995).
8. Welper, L. L., Sung, S. and Dague, R. R.,

- "Laboratory studies of the teperature-phased asbr system", *Wat. Sci. Tech.* 36(2-3), pp. 295~302 (1997).
9. Del Borghi, A., Converti, A., Palazzi, E., Del Borghi, M., "Hydrolysis and thermophilic anaerobic digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid waste", *Bioprocess Eng.* 20, pp. 553~560 (1999).
 10. Han, Y., Sung, S. and Dague, R. R., "Temperature-phased anaerobic digestion of wastewater sludges", *Wat. Sci. Tech.*, 36(6-7), pp. 367~374 (1997).
 11. Shin, H.-S., Kim, H.-W., Han, S.-K. and Kang, S.-T., "Degradation characteristics in anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste", *J. KOWREC* 10(1), pp. 96~101 (2002).
 12. APHA, WPCF, AWWA, "Standard Methods for the examination of Water and Wastewater", 20th Ed. APHA, Washington, D. C., (1998).
 13. Harris, W. L. and Dague, R. R., "Comparative performance of anaerobic filters at mesophilic and thermophilic temperatures", *Wat. Env. Res.* 65(6), pp. 764~771 (1993).
 14. Cho, J. K., Park, S. C. and Chang, H. N., "Biochemical methane potential and solid waste anaerobic digestion of Korean food waste", *Biores. Technol.* 52, pp. 245~253 (1995).
 15. Dugba, P. N. and Zhang R., "Treatmet ofdairy wastewater with two-stage anaerobic sequencing batch reactor systems-thermophilic versus mesophilic operations", *Biores. Technol.* 68, pp. 225~233 (1999).
 16. Rinzema, A., Alphenaar, A. and Lettinga, G., "Anaerobic Digestion of Long-Chain Fatty Acids in UASB and Expanded Granular Sludge Bed Reactors", *Process Biochemistry*, 28, pp. 527~537 (1993).
 17. Shin, H. S., Han, S. K., Song, Y. C., Hwang, E. J. "Biogasification of food residuals", *Biocycle* 41(8), pp. 82~86 (2000). 