

고온 혐기성 연속회분식 공정에 의한 도시하수슬러지 소화

허준무 · 박종안* · 이종화* · 손부순* · 장봉기*
(주)새로운 환경 기술연구소 · *순천향대학교 환경보건학과

Thermophilic Sewage Sludge Digestion by Anaerobic Sequencing Batch Reactor

Joon-Moo Hur · Jong-An Park* · Jong-Wha Lee* · Bu-Soon Son* · Bong-Ki Jang*
New Environment Research Engineering Co.
*Dept. of Environmental Health Science, Soonchunhyang University

Abstract

The feasibility of municipal sewage sludge digestion was investigated by using thermophilic anaerobic sequencing batch reactor(ASBR). One-day settle time was enough for the high performance of solid-liquid separation. The conversion of semi-continuous mode to sequencing batch mode is easily achieved without any adverse effects, although the large amount of sludge equal to the volume ratio of 0.3~0.6 to reactor volume was added in the feed step of the start-up. The ASBRs had higher conversion capability of organics to biogas than the control reactor. Gas yields of the ASBRs were increased by the average of 50% over the control reactor across a range of hydraulic retention time(HRT)s from 10days to 5days. The thermophilic reactors showed higher gas production than mesophilic reactor. Removal efficiencies of organic matter exceeded 80% on the basis of supernatants, except that at the HRT of 3.3days. ASBR with HRT of 3.3 days had the same organics removal as the control reactor. Solid-liquid separation was essential in the performance of the ASBR, especially, at the lower HRT. The ASBRs were highly efficient in the retention of activated biomass within the reactor, thus compensating for increased equivalent organic loading rate through increased solids retention times followed by the increased solids, while maintaining shorter HRTs.

Keyword : Sewage sludge, Anaerobic digestion, sequencing batch reactor

I. 서 론

혐기성 연속회분식 공정(Anaerobic Sequencing Batch Reactor : 이하 ASBR)은 연속회분식 공정의 운전특성과 혐기성 생물학적공정의 처리특성을 결합한 고효율 혐기성처리공정의 일종이다. 지난 20년간 많은 연속회분식 반응조(SBR), 즉 유입-유

출 반응에 효과적인 하·폐수처리공정의 대안으로 연구가 되어 오고 있다^{1,2)}. 이러한 연속회분식 공정은 운전의 유동성, 유체흐름의 균등화, 이상적인 침전에 가까운 침전특성, 운전의 용이 및 설계의 융통성 등의 장점을 지니고 있으나, 운전조작의 난점과 자동제어 기기 등의 미흡으로 실용화되지 못하였다. 그후 1980년대 들면서 자동제어설비의 발

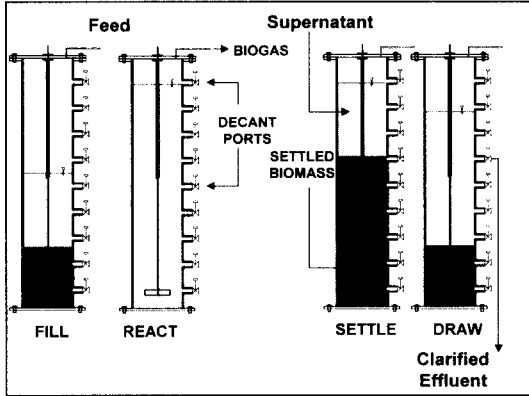


Figure 1. Reaction steps of anaerobic sequencing batch reactor process.

달로 호기성처리공정의 우수한 처리공정중의 하나로 자리를 잡았다. 혐기성 연속회분식 반응조의 반응원리는 단순하며, 그림 1과 같이 유입(fill), 반응(react), 침전(settle), 유출(draw) 등이 하나의 반응조에서 주기적으로 반복 진행된다. 이러한 일련의 공정들을 sequence라고 하며, 각 공정들이 한 번씩 반복되는 시간을 주기(cycle)라고 한다. 첫 번째 단계는 유입공정으로, 반응조내의 기질을 주입하여 유출공정으로 줄어드는 부피에 상당하는 기질이 주입된다.

두 번째 단계는 반응공정으로, 유입공정 후 미생물과 기질과의 반응이 본격적으로 시작되어 유기물의 가스로의 전환이 일어나는 주기 중 가장 중요한 공정의 하나이다³⁾. 반응공정에 소요되는 시간은 기질의 농도 및 특성, 요구되는 처리수의 수질, biomass 농도 등에 따라 다르게 결정된다. 세 번째 단계로는 침전공정으로 혼합이 중지되고 biomass와 상정수간의 고액분리가 이루어지는 공정으로 침전공정동안 반응조는 침전지와 같은 역할을 한다. 이는 혐기성 연속회분식 반응조 설계에 있어 가장 중요한 부분이다. 유출공정은 반응조의 고액분리가 유출수위 아래까지 진행되었을 경우 진행되는 공정으로 상정수의 배출이 이루어지며, 유출공정에 소요되는 시간은 유출되는 상정수의 양과 유출부를 통하여 빠져나가는 상정수의 유출 속도에 따라 달라진다. 이상과 같이 진행되는 혐기성 연속회분식 공정은 많은 운전변수의 조절에 의

하여 처리특성이 달라질 수 있는데 그 중 유기물 부하율, 수리학적 체류시간(hydraulic retention time; 이하 HRT), 반응조내 MLSS농도 및 고형물 체류시간 등이 가장 중요한 요소이다. 또한 이는 주기가 반복될수록 침전성이 향상되고, 높은 활성 미생물을 보유할 수 있어 고농도의 유기폐수나 슬러지의 처리에 효과적인 처리공정으로 기대된다. 혐기성 연속회분식 공정에 대하여 최근에 발표된 혐기성 연속회분식 공정에 대한 연구로는 돈 분뇨를 이용하여 SBR방식의 혐기성소화를 시도한 예가 있다⁴⁾. 각각의 HRT에서 돈 분뇨를 소화시킨 결과 안정된 반응효율과 고액분리효율을 얻었지만, HRT가 낮은 경우 침전시 가스발생에 의하여 슬러지가 재 부상하는 문제점을 발견하였다. 또한, Kennedy 등⁵⁾에 의하여 용존성 폐수를 처리하는 혐기성 슬러지블랭킷 SBR에 관한 실험실규모의 연구결과가 보고되었다. Sung 및 Dague⁶⁾는 인공 우유폐수를 대상으로 2~12gCOD/L/day에서 HRT에 따른 12L의 각기 다른 형상의 ASBR반응조의 처리특성을 연구하여 90%이상의 COD제거효율을 얻었다. 그리고 용해성 인공우유폐수를 처리하는 ASBR에 침전공정 이전 15분간 반응조 상부에 약간의 진공을 적용시킨 결과 슬러지의 침강속도가 증가되어 침전에 소요되는 시간을 줄일 수 있으며, 이를 바탕으로 반응조 운전에 소요되는 HRT를 낮출 수 있다는 연구결과도 보고되었다⁷⁾.

한편, 일반 하·폐수처리장으로부터 발생하는 슬러지는 일반폐수에 비하여 오염성분이 많고 부패성이 매우 크며, 하수처리장으로부터 지속적으로 배출되므로 시설 및 운영을 위한 비용이 클 뿐만 아니라 위생상 및 환경보존의 관점으로 볼 때 위험한 잠재력을 지니고 있다. 따라서 슬러지 최적 처리 또는 처분은 중요하게 다루어져야 한다. 이는 해마다 증가되는 추세이며, 처리장운영비의 막대한 비용이 슬러지 처분에 소요된다. 현재 운영되고 있는 처리장에서 슬러지는 처분 전 농축과정과 혐기성소화를 거치는 것이 일반적인데, 도시하수처리장의 경우 혐기성소화조의 긴 HRT로 인하여 소화조의 용량이 비대하게 커진다. 이로 인한 건설비의 증대와 부지확보의 어려움으로 인하여 효과적인 슬러지 처리방법이 제안될 필요가 있다. 이와 같은

일환으로 이미 중온영역에서 혐기성 연속회분식 공정을 도입하여 도시하수슬러지를 처리하는 방법이 제안되었다. 따라서 본 연구에서는 고농도의 활성미생물을 확보하기 위한 방안으로 단일 반응조에서 유입, 반응, 침전, 유출 등의 일련의 공정을 거치는 ASBR공정을 고온으로 운전하여, 고농도 유기물을 함유한 폐수에 적용시켰을 때 처리특성 및 가능성을 중온의 결과와 비교하면서 살펴보고자 한다. 또한 유입폐수로 다량의 침전성 고형물을 함유한 도시하수 슬러지를 사용하여 슬러지 안정화의 효과적인 대안을 마련하고, 존 고효율혐기성공정에 대한 상대적인 우수성을 확보하고자 한다.

II. 실험재료 및 방법

1. 실험장치 및 유입슬러지

본 연구에서는 ASBR 반응조 1조와 대조(control)반응조 1조로 수행하였으며 전체적인 시스템은 그림 2와 같다. 각 반응조는 높이 32cm, 직경 15cm로서 유효용적 4L인 원통형의 투명한 아크릴제를 사용하였다. 반응조의 본체 상부에 기질 유입관이 있으며, ASBR반응조에는 총 12개의 유출관을 설치하였다. 반응조의 혼합은 속도조절기 부착된 기계식 교반기를 이용하였다. 반응조의 온도조절은 비례제어식 온도조절장치가 내재된 항온조에 의하여 행하였다. 가스포집기는 평형추가 부착된 부상형 원통으로 최대 포집량이 9.15L이다. 그리고 ASBR과 처리특성 및 효율을 비교하기 위하여 대조 반응조로 반면속식 완전혼합형 반응기를 사용하였다.

실험에 사용한 슬러지는 K도시 하수처리장의 혼합비가 약 1:2인 일차 및 이차 혼합·농축슬러지를 기질로 사용하였다. 슬러지 채취는 평균 1~2달마다 정기적으로 행하였고, 채취한 시료는 분해를 방지하기 위하여 20L 용기에 밀폐된 채 유입기질로 사용될 때까지 4°C의 냉장고에 보관되었다. 또한 기질은 온도에 의한 충격을 감소시키고, 가스발생에 있어 다른 요인을 배제하고자 항온조에서 가온하여 주입하였다. HRT 10일, 5일 및 3.3일에서 유입되는 슬러지의 총 고형물농도(total solids ;

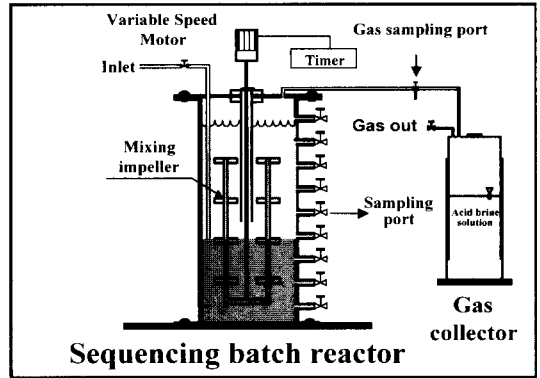


Figure 2. Anaerobic sequencing batch reactor system.

TS)는 각각 평균 25,350mg/L, 25,220mg/L, 19,240 mg/L이고, 휘발성 고형물(total volatile solids ; VS) 농도는 각각 평균 11,140mg/L, 10,810mg/L, 11,650 mg/L로서 휘발성 고형물분율은 유입될 반응조의 HRT별로 각각 평균 44%, 41.2%, 61.6%이다. HRT 10일과 5일로 운전시 사용된 도시하수슬러지는 우리나라 전형적인 도시하수 농축슬러지보다 다소 낮은 휘발성고형물분율을 나타내고 있으며, HRT 3.3일의 운전시에는 다소 높은 값을 나타내었다. 이는 HRT 3.3일의 경우, 일차 슬러지의 비율에 가까운 값을 나타내고 있으며, 건조고형물당 휘발성 고형물분율이 높은 것은 기질로 사용되었던 슬러지내에 포함된 분뇨성분에 의한 영향이 큰 것으로 판단된다.

2. 실험 및 분석방법

ASBR의 고온에서의 특성을 알아보기 위하여 K 도시하수처리장의 일차 및 이차 슬러지를 기질로 사용하여 약 3개월간의 순운기간을 가졌다. 반응조의 운전이 정상상태로 운전되었다고 판단될 때 하나의 반응조를 ASBR모드로 변환시켰다. 전환방법은 HRT 10일로 상태에서 연속식으로 운전하다가 곧바로 모드를 전환하였으며, HRT 5일로 운전하던 반응조는 충분한 고형물을 확보하기 위하여 1일 동안 반응조에서 침강을 시킨 후 운전형태를 변화시켰다. 각 HRT 별 반응조의 운전조건은 표 3.3과 같이 혐기성SBR로 전환한 반응조는 동일하게 1일의 침전

시간을 가졌으며, 운전주기(cycle time)는 HRT 10일, 5일, 3.3일인 경우 각각 3일, 2일, 2일의 순서로 하였으며, 유출시 배출수량의 비는 각각 30%, 40% 및 60%이다. HRT 5일에서 3.3일로 전환시에는 운전하고 있는 모드에서 2주기에 걸쳐 HRT 5일과 동일한 운전주기모드(cycle time mode)에서 HRT를 단계적으로 감소시켰으며, 유입부하의 증가에 따른 ASBR 및 대조반응조의 소화특성을 관찰하였다. 전 운전기간에 걸쳐 기질의 유입 및 소화슬러지의 유출은 주사기를 사용하여 수동식으로 행하였다. 도시하수슬러지를 기질로 사용한 고온 혐기성 연속회분식 반응조의 소화특성 및 처리특성을 알아보기 위하여 pH, ORP(oxidationreduction potential), 반응조 온도, 알칼리도(alkalinity), 총 고형물농도(Total Solids ; TS), 휘발성 고형물농도(Volatile Solids ; VS), COD(chemical oxygen demand), 총 휘발산농도(total volatile acids ; VA), 가스발생량, 침강용적

(thickened volume ; TV), 원심분리용적(centrifuged volume ; CV), 가스발생량 및 조성 등의 항목을 분석하였으며, 분석항목은 미국공중위생협회의 표준시험법(8)에 준하였다.

III. 결과 및 토의

1. 화학적 특성

ASBR 공정은 전체공정이 타 공정에 비하여 유동적이며, 소화특성에 고형물체류시간(solid retention time ; SRT)을 조절하지 않으므로 일반적으로 준 정상상태(pseudo steady-state)를 정상상태라고 가정한다. K도시하수처리장 일차 및 이차 농축슬러지를 소화한 결과 준정상상태로 운전된 기간동안의 운전결과는 표 1과 같다. ASBR을 고온(55±1℃)으로 운전한 결과 기질의 투입에 따른 HRT별 ASBR 반응조내 pH의 변화는 평균 7.17~7.26로 HRT 10

Table 1. Pseudo steady state performances(Mean±standard deviation)

Parametersp	RUN1 (HRT 10days)		RUN2 (HRT 5days)		RUN3 (HRT 3.3days)	
	ASBR 3 day cycle	Control	ASBR 2-day cycle	Control	ASBR 2-day cycle	Control
pH	7.26±0.09	7.21±0.09	7.17±0.05	7.24±0.08	7.17±0.10	7.22±0.12
ORP(mV)	-212±13	-223±14	-204±12	-209±16	-242±44	-248±43
Volatile acid (mgHAc/L)	132±32	99±28	222±22.6	164±30	1109±342	369±214
Alkalinity (mg CaCO ₃ /L)	2155±232	2398±294	2538±165	2459±165	2367±416	2226±681
VS/Alkalinity ratio	0.060±0.020	0.040±0.010	0.087±0.010	0.070±0.010	0.348±0.225	0.181±0.065
TS removal(%)						
digested sludge	-	12.0±7.9	-	5.2±3.9	-	14.4±4.3
supernatant	88.1±4.7	90.0±4.6	84.5±1.7	87.2±1.5	61.8±21.7	82.9±5.7
VS removal(%)						
digested sludge	-	23.4±7.3	-	18.5±2.7	-	22.6±9.3
supernatant	85.6±4.4	88.4±4.3	77.6±3.9	81.0±2.4	64.5±18.3	82.7±4.64
COD removal(%)						
digested sludge	-	21.7±7.2	-	19.7±3.9	-	31.3±6.2
supernatant	87.4±4.2	90.3±5.0	80.6±1.8	85.4±1.9	65.6±16.7	83.7±4.8
Gas production						
Rate(L/L/d)	0.27±0.03	0.17±0.05	0.56±0.11	0.35±0.04	0.81±0.17	0.92±0.25
VS _{added} (L/gVS added)	0.17±0.02	0.11±0.03	0.26±0.03	0.17±0.02	0.23±0.05	0.25±0.04
Methane content(%)	69.3±0.85	68.1±1.23	67.4±0.88	67.5±0.41	65.2±0.95	65.4±0.78
TV(V/V%)	64.9±9.8	89.2±5.5	53±9.0	85.5±3.4	69.6±11.3	78.7±16.8
CV(V/V%)	38.9±8.1	20.0±2.1	36.8±4.7	20.4±1.6	34.8±5.1	21.9±5.4

일의 경우 다소 높은 수치를 보였으나 그 차이는 매우 작았다. 이는 HRT 10일의 경우 반응시간이 2일로 상대적으로 길고, 유입부하가 낮아 보다 완전한 소화가 발생하였기 때문으로 판단된다. 또한 대조반응조와 비교하여 보면 HRT 10일에서는 ASBR의 pH가 대조반응조에 비하여 높고, HRT 5일과 3.3일에서는 ASBR이 대조반응조와 미소한 차이를 보이고 있는데, 이는 유입부하의 증가에 따른 영향이라고 생각된다. 그러나 전운전기간동안 HRT별, 주기별 및 모드별 pH 변화의 뚜렷한 차이는 관찰되지 않았다. 이로부터 혐기성소화공정의 반응조내의 완충능력의 향상으로 인하여, ASBR은 유입공정시 pH가 낮은 기질을 다량 투입하여도 초기에 약간의 변화를 보일 뿐 전체적인 pH 변화에는 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 또한, ORP는 일반적인 도시하수슬러지 처리시 pH 7.0에서의 -265 ± 25 mV정도보다는 낮게 유지되었으나 메탄생성세균에 저해를 주는 -100 mV보다는 높게 유지되었다. HRT별, 운전모드별 ORP의 변화는 거의 없었으며, 메탄생성균(methanogenic bacteria)의 성장에 적합한 환원성상태가 유지되었다. 또한 이러한 값들은 Malina 및 Pohland에 의하여 제시된 슬러지의 혐기성처리시 메탄발생량을 최대로 할 수 있는 최적조건인 $-520 \sim -530$ mV보다는 낮은 수치이다⁹⁾. 휘발산은 HRT 10일과 5일에서는 평균 250 mgHAc/L이하로 아주 안정된 소화특성을 보인 반면, HRT 3.3일의 경우에는 약 500~1600 mg HAc/L의 범위로 HRT 5일에 비하여 다소 급격하게 증가하여 심하게 변동하는 경향을 보이고 있으나, 휘발산의 축적에 의한 소화의 저해는 관찰되지 않았다. HRT 10일과 5일에서 ASBR은 대조반응조와 비슷한 휘발산농도를 보인 반면, HRT 3.3일에서는 대조반응조에 비하여 매우 높게 증가하는 경향을 보였다. 또한, HRT 10일의 경우 중온 ASBR 소화액과 비슷하였다. 이는 HRT이 줄어들수록 고온소화가 유입부하에 의한 영향이 다소 크다는 것을 간접적으로 보이고 있다. 생성된 산에 대한 완충정도는 알칼리도로 표현되는데, 정상상태 운전기간 중 알칼리도는 평균 2,160~2,540 mgHAc/L로, HRT별, 운전모드별 알칼리도의 차이는 뚜렷하게 관찰되지 않았다.

2. 유기물제거효율

유기물제거효율은 침전공정 후 유출수를 기준으로 할 때 HRT 10일의 경우 85%이상의 높은 처리효율을 보이고 있으며, 이는 고온에서의 소화특성이 중온에 비하여 우수하여 유기물의 완전한 용존화 및 가스화가 반응조내에 발생하지만, 고온 소화시 발생하는 입자상의 미세한 고형물이 유출수질에 영향을 미쳤기 때문이라고 판단된다. ASBR에서 유출된 유출수의 유기물농도가 대조 반응조에 비하여 HRT에 관계없이 다소 높게 나타났다. 이러한 원인은 ASBR이 고형물의 축적으로 인하여 간헐적으로 불안정한 침전공정 이후 슬러지의 유출이 발생하였기 때문이다. 휘발성고형물이나 COD를 기준으로 한 유기물제거효율은 HRT이 감소할수록 떨어지는 경향을 보이고 있는데, 이는 HRT의 감소로 인하여 유입시 높은 용적부하가 유입되고 상대적으로 반응시간이 부족하기 때문으로, HRT 이 ASBR공정의 설계에 있어 중요한 설계인자중의 하나임을 증명한다. HRT 3.3일의 경우 휘발성고형물의 제거효율이 평균 61.8%, COD제거효율이 65.6%로 대조반응조의 82.7%, 83.7%에 비하여 다소 크게 떨어짐을 볼 수 있는데, 높은 고형물 부하에 의하여 발생하는 침전성의 악화로 인한 다량의 고형물유출에서 그 원인을 찾을 수 있으며, 침전성이 양호할 때에는 80%에 달하는 유기물제거효율을 보였다. 이러한 불안정한 처리효율을 보인 것은 유입 및 유출용적비가 ASBR반응조의 한계에 다다랐다는 것을 의미한다. 따라서 도시하수슬러지를 고온 하에서 ASBR로 처리시 한계 HRT가 3.3일 부근에 존재함을 알 수 있다. 이와는 반대로 대조반응조의 경우 HRT 10일과 5일에서 감소하는 추세를 보이다가 3.3일에서 유기물의 제거효율이 향상되었는데 이러한 원인은 3.3일의 운전 당시 유입된 기질의 특성 및 다른 HRT에 비하여 많은 혼합액 유출로 반응조내 고형물농도가 낮게 유지되었기 때문에 오히려 침전성이 향상된 영향으로 판단된다.

3. 고액분리특성

ASBR을 성공적으로 운영하기 위해서는 무엇보다

나도 소화슬러지의 침강성이 확보되어야 한다. 침강성은 유입기질의 침전특성과 밀접한 관련이 있으며, 이는 돈 분뇨를 이용한 Ng¹⁾의 경우 및 용해성인공기질을 이용한 Suthaker⁷⁾의 경우와의 비교에서 잘 나타난다. 그림 3과 그림 4는 각각 정상운전기간중 ASBR 및 대조반응조내 침강농축용적 및 원심분리용적과 고형물농도의 변화를 나타낸 것이다. 주기가 경과하면서 대조반응조와 달리 ASBR반응조의 원심분리용적은 증가하다가 일정하게 유지되는 경향을 볼 수 있다. 이는 ASBR에서 고형물이 조내에 축적되고 있음을 보여주며, HRT 10일로 운전한 ASBR의 경우 초기에는 40%로 매우 양호한 침전특성을 보이다가 주기가 반복되면서 침강용적이 증가하였다. 그러나 이러한 증가경향은 주기가 반복되면서 70%정도로 일정하게 유지되었다. 이는 HRT 10일로 운전한 ASBR의 경우 3일주기로 운전하기 때문에 30%에 달하는 소화분리액을 유출하여야 하는데, 침강용적이 70% 이상이 되면 슬러지 유출이 가끔씩 수반되었기 때문이었다. 그리고 HRT 5일의 경우에도 각각 40%의 상정액의 유출로 인하여 비슷한 결과를 보이고 있으며, 3.3일에서는 침강농축용적의 변화가 다른 두 HRT의 ASBR보다도 심하였다. 이로부터 반응조내의 고형물증가 및 유입기질의 부하변동에 의하여 침강특성이 크게 좌우됨을 간접적으로 예상할 수 있었다. 대조반응조의 경우에는 평균 78.7~89.2%로 HRT이 감소함에 따라 침강농축용적은 증가하는 것으로 관찰되었다. 이는 HRT의 감소에 따른 유출입량의 증가로 조내 총고형물농도가 감소하였기 때문으로 판단된다. ASBR 반응조에서 침전공정 이후 높이별 고형물의 분포특성을 조사한 결과는 그림 5와 같으며 ASBR반응조내 고형물 축적현상과 아울러 고농도 미생물축적현상을 간접적으로 증명하는 현상이라고 판단된다. HRT의 변화에 따른 침강특성을 살펴보면 10일과 5일에서는 침전공정 전 낮은 F/M비와 반응조내 고형물 증가가 일정하게 유지가 되어 양호한 침강특성을 보인 반면, 3.3일에서는 운전세심 주의가 필요하였다. 특히 3.3일에서는 idle time에 의한 고형물의 배출이 소화특성 및 가스발생량에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. 반응조 높이에 따른 건조고형

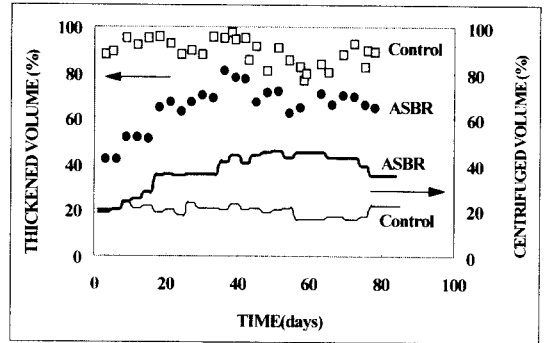


Figure 3. Variation of thickened volume and centrifuged volume of sludge in the thermophilic ASBR at an HRT of 10 days.

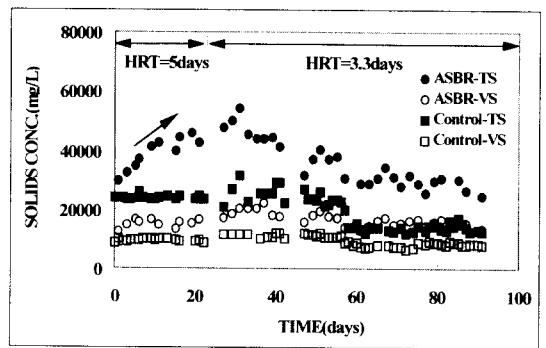


Figure 4. Variation of solids concentration in the thermophilic ASBR at HRT of 5 days and 3.3 days

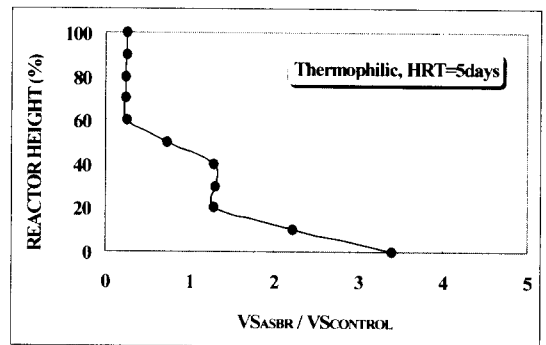


Figure 5. Typical solids profile at the end of settle step of the thermophilic ASBR at an HRT of 5 days with cycle time of 2 days.

물당 휘발성 고형물분율은 HRT에 따라 크게 변화

하고 있다. 한 가지 특이할 만한 사실은 상징수 형성부분에서 휘발성 고형물분율은 침전시간이후 침전슬러지보다 높다. 또한 HRT이 줄어들수록 활성 미생물로 확보되는 침전슬러지층의 휘발성 고형물분율은 증가하였다. 본 연구결과 슬러지의 특성상 총고형물중 무기물함량이 많았고, 유입슬러지의 농도가 균일하지 않아서 유기물부하에 따른 침강성의 변화는 정확하게 규명하지 못하였다.

4. 가스발생량 및 가스조성

HRT 5일과 3.3일에서 ASBR 및 대조반응조의 시간에 따른 반응조 용적당 유기물부하와 누적 가스발생량의 변화는 그림 6과 같다. 기질의 주입에 따라 반응초기에 급격한 증가를 보이고 있으며, 휘발성고형물부하의 변동에 따라 가스발생량은 뚜렷하게 변화하고 있다. 그러나 HRT 3.3일의 경우 ASBR이 대조반응조에 비하여 낮은 가스발생율을 보이고 있는데 과도한 유기물부하의 투입과 조내 고형물농도의 불균일로 인한 영향으로 사료된다. 또한 유기물부하에 따라 가스발생량은 비례적으로 변화하지만 과도한 유기물부하의 유입시, 다음 주기에서도 높은 가스발생량을 보이고 있다. 그리고, 유기물 제거효율에 따른 가스발생량을 비교하여 볼 때, 두 인자간의 직접적인 상관관계는 찾을 수 없었다. ASBR의 경우 HRT 10일과 5일에서 휘발성 유기물투입 당 가스발생량이 0.17L/gVS/day와 0.26L/gVS/day이고, 대조반응조의 경우에는 0.11L/gVS/day, 0.17L/gVS/day로 일정하게 유지되고 있다. 반면 단위용적당 가스발생량은 유입슬러지의 농도변화로 인하여 매우 심한 변동을 보이고 있다. ASBR이 대조반응조의 가스발생량보다 HRT 10일과 5일에서 평균 54.5%, 52.9% 증가하였다. 이는 고농도의 활성미생물의 확보에 의한 영향으로 활발한 가스화반응이 진행되었기 때문이다. 그러나 3.3일에서는 대조반응조의 60~130%까지 심한 변동을 보이고 있다. 대조반응조와 ASBR반응조의 가스발생량을 비교하여 비로 나타낸 것은 그림 7과 같다. HRT 10일에서는 ASBR의 가스발생량이 월등히 많이 발생하였으나, HRT 5일에서 운전한 결과에서는 그 비가 미소하게 나타났으며 이는

HRT의 감소로 인한 유기물부하의 과다 및 복합적인 고온 ASBR의 소화특성을 나타내고 있다. 이러한 경향은 HRT 3.3일, 운전주기 2일에서 운전한 ASBR반응조의 경우에 뚜렷이 관찰할 수 있었는데, 오히려 대조반응조의 가스발생량보다도 낮게 유지되기도 하는 등 가스발생량의 변동폭이 다소 컸기 때문이다. 그리고, HRT 3.3일의 대조반응조를 운전한 결과 소화효율의 감소가 발견되지 않아 전형적인 도시하수 이차슬러지 소화에 필요한 한계 HRT가 고온 소화시에는 3.3일 이하로도 가능하다는 예측을 가능하게 하였다.

가스조성으로 볼 때 ASBR반응조의 경우 HRT 10일, 5일 및 3.3일에서 평균 69.3%, 67.4% 및 65.2%로 나타났고, 대조반응조의 경우 68.1%, 67.0% 및 65.4%로 HRT의 감소에 따라 메탄함량이 낮게 발생하는 경향을 보였다. 그러나 ASBR반응조와 대조반응조간의 운전방식 차이에 따른 메탄함량의 뚜렷한 차이는 관찰되지 않았다. 또한 HRT의 감소에 따라 메탄함량이 감소하는 경향을 보이고 있으나 그 차이는 무시할 수 있으며, 운전 방식에 따른 메탄함량의 차이는 없었다. 이러한 결과는 우리나라의 전형적인 도시하수슬러지 소화조 운영결과보다는 다소 높은 편이다. 또한, 가스조성은 동일 HRT에서 주기의 경과나 유기물부하변동에 의하여 변화가 거의 없었다.

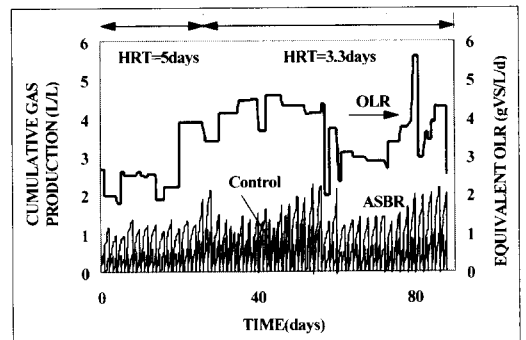


Figure 6. Cumulative gas production during sequence of batch period and organic loading rate after start-up of the thermophilic ASBR at HRT of 5days and 3.3 days.

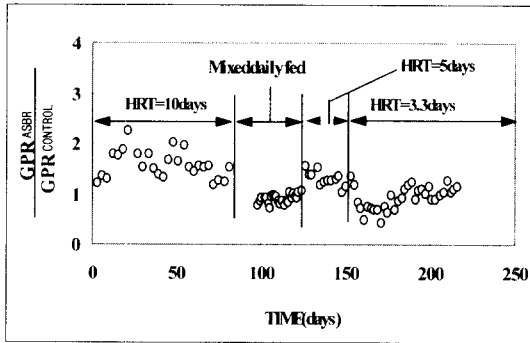


Figure 7. Changes in gas production ratio of the thermophilic ASBR to control run.

IV. 결 론

K도시하수처리장 일차 및 이차 농축슬러지를 기질로 하여 고온(55±1℃)하에서 HRT 10일, 5일, 3.3일로 혐기성 연속화분식공정(Anaerobic Sequencing Batch Reactor: ASBR)에 의한 도시하수슬러지의 소화가능성 및 소화특성을 연구를 통하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 도시하수슬러지의 고온 ASBR에 의한 혐기성소화가 가능하였다. HRT이 증가함에 따라 소화효율이 증가하였으며, 이 때 한계 HRT은 3.3일 부근이었다. 또한 고온에서의 소화특성은 중온과 유사하였다.
2. 반연속식반응조에서 ASBR모드로의 전환이 용이하였으며, ASBR로 전환시 반응조유효용적의 30%, 40%까지 슬러지 유출·유입에도 불구하고, 운전초기 미소한 변화를 보였을 뿐 두 번째 주기 이후에는 빠르게 안정되었다.
3. 고온 ASBR 유출상징수의 고형물 및 COD제거효율은 소화슬러지의 침강성에 크게 좌우되었고, 대조반응조와 유사하였고, 중온 ASBR에 비하여 큰 차이가 없었다. 한편, 침강용적은 HRT 10일과 5일에서 초기에는 40%정도의 높은 고액분리효율을 이루다가 주기가 반복되면서 60~70%정도로 유지되었다. 그러나 HRT 3.3일에서는 침강성이 불안정하였다.
4. ASBR전환 후 고형물의 축적은 빠르게 진행되

어 대조반응조에 비하여 평균 2배 이상으로 유지되었으며, 높은 고형물체류시간을 유지하였다. 그러나 유입부하의 증가에 따라 고형물체류시간은 감소하였다.

5. 가스발생량은 대조반응조에 비하여 HRT 10일과 5일에서 평균 1.55배와 1.53배로 매우 높게 유지되었다. 한편, HRT 3.3일에서는 침전성의 불안정으로 가스발생량의 변화가 심하였으나 대조반응조와 거의 동일한 가스발생량을 보였다.

참 고 문 헌

1. Arora, M. L., Barth, E. F., Umphres, M. B. : Technology evaluation of sequencing batch reactors, Journal Water Pollution Control Federation, 57, 8, 867-875. 1985.
2. Irvine, J.P. : Municipal application of sequencing batch treatment, Journal Water Pollution Control Federation, 51, 484-496. 1983.
3. Sung, S., and Dague, R. R. : Fundamental principles of the anaerobic sequencing batch reactor process, 47th Purdue Industrial Waste Conference Proceedings, West Lafayette, IN, May pp. 11-13. 1992.
4. Ng, W. J. : Sequencing batch anaerobic reactor for treating piggery wastewater, Biological Wastes, 28, 4, 497-510. 1989.
5. Kennedy, K. J., Sanchez, W. A., Hamoda, M. F., and Droste, R. L. : Performance of anaerobic sludge blanket sequencing batch reactors, Journal Water Pollution Control Federation, 63, 1, 75-83. 1991.
6. Sung, S. and Dague, R. R. Laboratory studies and modelling of the anaerobic sequencing batch reactor process, Water Environment Federation 65th Annual Conference & Exposition, New Orleans, Louisiana, Sep. Vol. 20-24, 171-182. 1992.
7. Suthaker, S., Polprasert, C., and Droste, R. L. : Sequencing batch anaerobic reactors for treatment of a high-strength organic waste-

- water, *Water Science & Technology*, 23, 1249-1257. 1991.
8. American Public Health Association, American Water Works Association, and Water Environment Federation : *Standard Methods for examination of water and wastewater*, 18th ed. APHA. Washington. D.C. 1992.
 9. Malina, J. F., and Pohland, F. G. : *Design of anaerobic processes for the treatment of industrial and municipal wastes* ; *Water Quality Management Library*, Vol. 7, Edited by Eckenfelder, W. W., Malina, Jr. J. F., and Patterson, J. W., Technomic Publishing Co. Inc., Lancaster, Pennsylvania. 1992