

중온 혐기성 연속회분식 공정에 의한 도시하수슬러지의 소화가능성 평가

許準茂·張 德·鄭泰鶴*·손부순**·박종안**

건국대학교 환경공학과, *서울대학교 토목공학과, **순천향대학교 환경보건학과

Application of Anaerobic Sequencing Batch Reactor to Mesophilic Digestion of Municipal Sewage Sludge

Joon Moo Hur, Duk Chang, Tai Hak Chung*,

Bu Soon Son** and Jong An Park**

Department of Environmental Engineering, Kon-Kuk University

**Department of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National University*

***Department of Environmental Health Science, Soonchunhyang University*

ABSTRACT

Laboratory experiments were carried out to investigate the performance of anaerobic sequencing batch reactor(ASBR) for digestion of a municipal sludge. Each cycle of the ASBR comprised feeding, two-or three-day reaction, one-day thickening, and withdrawal. The reactors were operated at an HRT of 10days and 5days with an equivalent organic loading rate of 0.8~1.54 gVS//d, 1.81~3.56 gVS//d at 35°C, respectively. Solids accumulation was remarkable in the ASBR during start-up period, and directly affected by settleable solids in the feed sludge. Floatation thickening occurred in the ASBRs, and Solids profiles at the end of thickening step dramatically changed at solid-liquid interface. Slight difference in solids concentrations was observed within thickened sludge bed. Efficiencies through floatation thickening were comparable to that of additional thickening of the completely mixed control reactor. Average solids concentrations in the ASBRs were 2.2~2.6 times higher than that in the control throughout the total operation period. The dehydrogenase activity had a strong correlation with the solids concentration. Organics removals based on clarified effluent of the ASBRs were consistently above 86%. Remarkable increase in equivalent gas production of 27~52% was observed at the ASBRs compared with the control though the control and ASBRs showed similar effluent quality. Thus, digestion of a municipal sludge was possible using the ASBR in spite of high concentration of solids in the sludge.

Keywords : Anaerobic sequencing batch reactor, Sludge digestion, Solid-liquid separation, Floatation thickening, Solids accumulation

I. 서 론

산업의 급속한 발전과 인구의 도시집중으로 수질 오염물질의 양도 크게 증가함에 따라 처리효율이 높고 운전비용이 저렴한 고농도 유기성 폐수처리가 요구되고 있다. 따라서 처리비용이 적고, 영양염의 요구가 적으며 슬러지발생량이 적을 뿐만 아니라 최종 생성물인 메탄이 유용한 에너지원으로 이용될 수 있는 혐기성소화가 주로 고농도폐수나 슬러지처리에

이용되고 있다. 그러나 혐기성소화는 초기운전이 어렵고, 반응속도가 느리며, 혐기성미생물들이 pH, 온도, 저해물질 등 외부환경조건에 민감하다. 또한 기질의 유입에 따라 연속적으로 진행되는 혐기성반응의 정확한 경로 및 관련미생물에 대한 명확한 자료도 제시되어 있지 않은 실정이다.

현재 혐기성처리가 안고 있는 여러 단점을 극복하기 위해 연구되고 있는 공정들로는 혐기성접촉공정 (Anaerobic Contact Process), UASB공정(Uplow

Anaerobic Sludge Blanket Process), 혐기성여상공정(Anaerobic Filter Process) 등이 있다. 이들 고효율 혐기성 공정들은 고형물체류시간(Solids Retention Time: 이하 SRT)을 증가시키므로써 반응조내 고농도 혐기성미생물을 확보하여 반응조용적을 줄이고 짧은 체류시간으로 처리효율을 증가시킬 수 있으며, 외부환경요인에 강하고, 유지관리가 용이하도록 연구되고 있다. 그러나 다량의 침강성 고형물을 함유한 도시하수슬러지 처리시에는 부적당하다고 보고되고 있다.

한편 기존에 운영중인 도시하수처리장에서 운전되는 단단(single stage) 또는 이단(two-stage) 혐기성소화조는 20~30일정도의 비교적 긴 수리학적 체류시간(Hydraulic Retention Time: 이하 HRT)으로 인하여 소화조의 용량이 지나치게 비대해져 건설비 증대와 부지확보의 어려움을 겪고 있다. 또한 소화슬러지의 침강성이 좋지 못하여 양호한 처리수질을 얻을 수 없을 뿐만 아니라 상징수의 후속처리가 요구되는 경우가 대부분이다. 그러므로 기존의 슬러지소화공정을 개량하여 처리효율을 증가시켜 소요반응조 크기를 줄이면서 안정적으로 운전할 수 있는 처리공정이 필요하다.

혐기성 연속회분식 공정(Anaerobic Sequencing Batch Reactor: 이하 ASBR)은 Fig. 1과 같이 단일반응조에서 유입(fill), 반응(react), 침전·농축(settle, thicken), 유출(draw)의 일련의 단위공정을 거치는 호기성 연속회분식공정을 혐기성처리에 도입한 것으로, 최근 자동제어설비의 발달로 운전이 큰 어려움이 없어지면서 호기성 폐수처리분야에 있어 효과적인 대안으로 자리를 잡아가고 있다. 장점으로는 첫째, 융통성있는 운전이 가능하고, 둘째, 유체의 주기적인

흐름을 균등화시킬 수 있고, 셋째, 침전시에 이상적 침전형태의 거의 완벽한 침전을 기대할 수 있어 고농도 미생물의 확보가 가능하며, 넷째, 선택적으로 미생물의 반응을 유도하여 침전성이 우수한 미생물을 양성할 수 있다. 다섯째, 운전조작이 간편하다는 장점이 있다.^{1,3)} 따라서 연속회분식공정이 가지고 있는 장점을 그대로 혐기성 처리에 도입할 경우 초기운전의 어려움 등 혐기성처리가 안고 있는 여러 문제점을 해결할 수 있을 것으로 예상된다.

혐기성 연속회분식 공정에 관련한 연구는 아직까지 활발한 단계는 아니며, 최근까지 발표된 연구결과를 살펴보면 Wun-jern은 돈분뇨를 이용하여 처리한 결과, 침강시간동안 소화가스에 의한 슬러지의 부상이 일부 발생하였으나 비교적 안정된 고액분리효과와 처리효율을 얻었다고 보고하고 있다.⁴⁾ Kennedy 등은 입상화슬러지를 이용하여 유입시간/반응시간의 비가 처리효율에 미치는 영향을 연구한 결과 유입시간/반응시간이 ASBR의 주요인자라고 하였다.²⁾ 또한 Suthaker 등은 인공폐수를 이용하여 유입시간과 유입시간대 반응시간이 처리효율에 미치는 영향에 대하여 고찰하였고,⁵⁾ Herum과 Dague는 침전시간에 진공을 적용시킨 결과 슬러지의 침강성을 향상시킬 수 있었으며 처리효율도 향상되었다.⁶⁾ 하지만 도시하수슬러지를 이용하여 ASBR공정으로 처리한 예는 아직까지 없다.

본 연구가 ASBR공정으로 처리하는 만큼 슬러지의 침전특성은 매우 중요하며, 배출공정 이전에 소화슬러지의 침전이 일어나지 않는 경우 미생물의 확보 및 좋은 수질을 기대할 수 없다. 기존의 소화슬러지의 침전성에 관한 연구를 살펴보면, 대부분 소화슬러지는 현장운영 및 실험실규모의 실험에서 침전성이 좋지 않으며 슬러지처리 후 상징액에 대한 부수적인 처리가 요구되고 있는 실정이다.^{7,8)} 그러므로 도시하수슬러지와 같이 고농도의 고형물을 함유하는 경우에 소화슬러지의 침전성을 확보하기란 매우 어려울 것으로 기대되며 ASBR공정에서도 심각한 침전성문제가 있을 것으로 예상된다. ASBR공정은 소화슬러지의 침전성이 우수하며 미생물 활성도 높을 것으로 기대되는데, 실제 하수처리장 슬러지 및 인공슬러지를 이용하여 침전슬러지와 상징액의 미생물활성 및 분포 등에 관한 연구를 수행한 결과 도시하수슬러지의 혐기성소화 슬러지는 침전슬러지내 메탄균활성이 상징액에 비하여 상당히 큰 것으로 나타났다. 주정폐액의 혐기성 소화슬러지는 소화슬

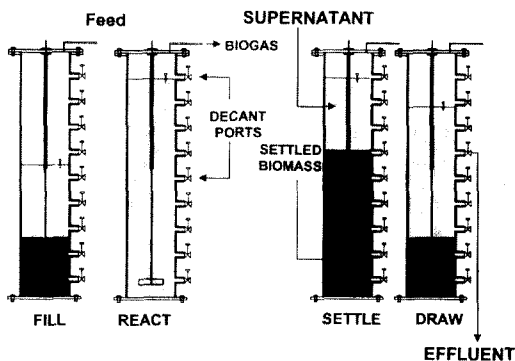


Fig. 1. Operating step of the ASBR.

러지의 침전물과 상징액내의 메탄균 활성에 큰 차이가 없었다.⁹⁾ 그러므로 슬러지소화에 ASBR이라는 새로운 공정을 도입, 적용시켜 다양한 조건하에서 처리가능성을 평가할 만한 가치가 있다고 사료된다.

따라서 본 연구에서는 고농도 부유성 고형물질을 함유한 도시하수슬러지를 ASBR공정이라는 새로운 공정을 적용하여 처리가능성을 평가하고 반응시간대 침전시간비 및 체류시간이 처리효율에 미치는 영향을 고찰하였다.

II. 실험재료 및 방법

1. 실험장치(reactor set-up)

본 실험에 사용된 ASBR 및 control(대조반응조: 이하 control)반응조는 높이 32 cm, 직경 15 cm(내경 14 cm) 유효용적 4 l로서 아크릴 재질을 이용하여 제작하였다. 실험의 목적에 부합하도록 ASBR의 측면에는 슬러지 침강성에 따라 유출수를 배출하기 위하여 11개의 배출구가 설치되어져 있다. Control은 배출구 이외에는 ASBR과 같은 형식이다. 반응조의 혼합은 속도조절이 가능한 패들형 기계식 교반기를 이용하였다. 교반기는 아크릴 튜브를 이용하여 반응조 상부에서 하루 2/3지점까지 보호하여 반응조 내 혐기성 상태가 유지되도록 하였다. 반응조는 비례제어식 온도조절장치에 의해 $35 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지되는 항온실내에 위치시켰다. Fig. 2는 ASBR시스템을 묘사한 것이다. 소화가스의 포집은 항온실 외부에 평형추가 부착된 가스치환식 부상형 포집기를 이용하였고, 포집시 가스의 용해를 방지하기 위하여 황산

이 첨가된 포화식염수를 채웠으며, 정기적으로 용액을 보충하였다.

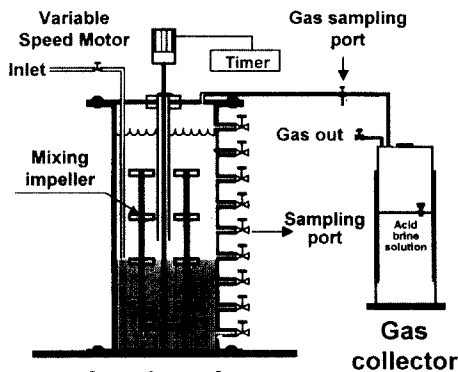
2. 기질(feed sludge)

실험에 사용한 기질은 한국의 과천하수처리장의 1차 및 2차 혼합농축슬러지를 이용하였고, 1차대 2차슬러지의 평균혼합비는 1:2이다. 기질로서 유입슬러지는 실험에 사용하기 위하여 2~3개월마다 정기적으로 채취하였고, 채취한 시료는 표준 No. 8채로 거른 후 20 l 용기에 넣어 4°C 이하의 냉장고에 보관하였다. 반응조에 주입시 반응조내 미생물에 온도충격을 가하지 않기 위하여 2~3시간 정도 항온실에 넣어 가온 하여 사용하였다. 기질로서 유입되는 슬러지의 성상은 반응조의 기본적 운전자료로서 아주 중요하여 필요하다고 판단되는 항목에 대하여 분석을 실시하였고, 성상은 시간에 따라 상당한 변화를 보였다. Table 1은 유입슬러지의 특성을 나타낸 것으로 우리나라 도시하수처리장에서 발생하는 전형적인 혼합슬러지이다. 총고형물에 대한 휘발성고형물의 비는 45~81.7% 정도였고, HRT 5일에서 약간 높은 경향을 띠었다.

3. 운전방법(operation methods)

도시하수슬러지 처리시 ASBR의 소화특성을 알아보기 위하여 HRT 10일과 5일에서 운전하였다. 실험에 사용된 식종물질은 기존의 과천하수처리장의 1차, 2차 혼합농축슬러지를 사용하여 운전되고 있는 중온소화조의 소화슬러지를 사용하였다. 식종이후 ASBR 및 control반응조는 반연속식-완전혼합-일일주입형(completely mixed daily-fed reactor)으로 HRT 10일에서 3개월의 순응기간동안 유기물 부하율 1.1 gVS/l/d , 1.6 gCOD/l/d 로 운전되었다. pH, ORP, 가스발생을 측정하여 일일변화폭이 $\pm 15\%$ 이 내로 소화조의 운전이 정상적이 되었다고 판단되었을 때, 반연속식-완전혼합-일일주입형으로 운전되던 반응조를 SBR모드로 전환시켰다.

전환방법은 전환초기에 침강된 슬러지를 확보하기 위하여 HRT 10일에서, 1일째 기질주입후 추가적인 기질의 주입없이 2일간 반응시간을 가진후 1일의 침전시간을 두어 전환시켰다. ASBR은 3가지의 cycle period으로 운전되었는데 HRT 10일에서는 3, 4일, HRT 5일에서는 2일로 운전되었다. 여기서 cycle period은 주로 반응시간(react), 침전, 농축시간(settle, thicken)의 합으로 반응시간:침전시간의 비가



Sequencing batch reactor

Fig. 2. Schematic Diagram of Anaerobic Sequencing Batch Reactor System.

Table 1. Characteristics of Feed Sludge

Parameters	10 day HRT		5 day HRT	
	Range	Mean±SD	Range	Mean±SD
pH	5.87~6.96	6.38±0.32	5.06~6.58	5.71±0.41
ORP (mV)	-107~-250	-183±31	-111~-264	-189±32
TS (mg/l)				
Total	11,990~27,950	20,120±3,148	14,200~23,700	18,040±2,800
Supernatant	-	-	700~6,280	2,010±1,090
VS (mg/l)				
Total	7,200~15,440	10,950±1,994	9,060~17,780	12,170±2,970
Supernatant	-	-	100~5,760	1,190±1,040
VS/TS (%)	45.6~68.4	54.4±4.8	50.4~81.7	67.5±6.5
COD (mg/l)				
Total	11,110~27,950	21,120±3,148	13,120~32,800	20,690±5,830
Supernatant	-	-	420~7,410	3,200±2,330
Thickened volume (%) [*]	24~92	58±18	30~100	68±18
Centrifuged volume (%) ^{**}	16~30	21.5±3.9	21~52	27±5.7
Volatile acid (mgHAc/l)	147~697	490±113	972~3,630	2,040±810
Alkalinity (mg CaCO ₃ /l)	277~1,187	620±205	480~1,290	790±190

^{*}Sludge volume after 1 day thickening in a 100 ml graduated cylinder.

^{**}Sludge volume after centrifugation at 2,500 rpm for 5 minutes.

각각 2:1, 3:1, 1:1이며, 침전시간은 예비실험결과에서 얻어진 결과를 바탕으로 3가지 운전모드에서 모두 1일로 하였다. 반응조내 슬러지의 유입과 소화슬러지의 유출은 수동으로 30분에 걸쳐서 이루어졌다.

HRT 10일조건에서 cycle period를 3일에서 4일로 전환시에는 반응시간을 1일 증가시켜 4일로 전환하였다. HRT 5일의 경우도 중간휴지기 이후 10일의 경우와 같은 방법으로 전환하여 운전하였다. 실

Table 2. Operating Conditions

	ASBR			Control	
	10-day HRT		5-day HRT	10-day HRT	5-day HRT
	3-day cycle	4-day cycle	2-day cycle		
Temperature (°C)	35	35	35	35	35
Operation Periods (days) [*]	50	140	250	190	250
Working Volume (l)	4	4	4	4	4
Organic Loading Rate					
(gVS//day)	0.80~1.54	0.75~1.45	1.81~3.56	0.75~1.54	1.81~6.56
(gCOD//day)	1.11~2.20	1.05~2.15	2.62~6.56	1.11~2.20	2.62~6.56
Cycle time					
Fill Period (hrs)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
React Period (days)	2	3	1	1	1
Thicken Period (days)	1	1	1	-	-
Draw Period (hrs)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Withdrawal Volume	1.2 l/cycle	1.6 l/cycle	1.6 l/cycle	0.4 l/day	0.8 l/day

^{*}After start-up of ASBR.

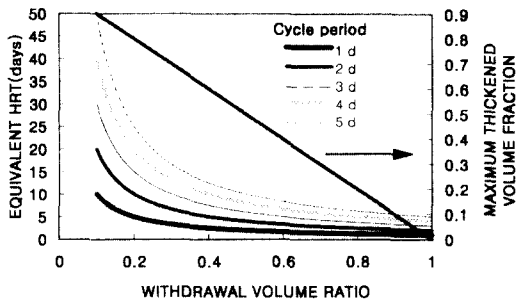


Fig. 3. Relationship between HRT and withdrawal volume ratio of ASBR.

혐기간중 혐기성 소화조의 운전조건은 다음 Table 2와 같고, 본 실험의 주요 운전인자는 HRT와 반응 시간/침전시간의 비이다.

한편 고농도고형물을 함유한 도시하수슬러지를 ASBR로 처리할 경우, 소화슬러지의 농축용적이 상당히 크기 때문에 최소 HRT는 허용가능한 유출수량과 주어진 cycle period에 따라 달라진다. 따라서 cycle period의 결정은 HRT와 허용가능한 유출수량과 관계가 있으며 이들의 관계를 간단히 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{HRT} &= \text{Volume} / \text{Flowrate} \\ &= \text{Volume} / [(\text{Volume} \times \text{Withdrawal volume ratio}) / \text{Cycle period}] \\ &= \text{Cycle period} / \text{Withdrawal volume ratio} \\ \text{Maximum permissible effluent withdrawal volume} &= 1 - \text{Settled sludge volume} \end{aligned}$$

유출수량비(Wasting volume ratio)는 ASBR의 유효용적에 대한 허용가능 유출수량을 말한다. Fig. 3은 여러 cycle period에서 HRT와 유출수량비의 관계를 보여주는 것으로 cycle period는 유기물제거에 필요한 반응시간 및 허용가능한 유출수량을 배출하기 위한 침전·농축시간을 포함한다.

4. 분석방법(analysis)

소화조 유입기질 및 각 운전조건별 유출수에 대한 특성을 평가하기 위하여 소화조액 및 상징액을 대상으로 분석을 하였다. ASBR은 침강시간전의 소화조액과 침강후 유출수를 시료로 사용하였고, Control 소화슬러지의 경우는 ASBR과 동일조건을 유지시키기 위하여 항온조에서 24시간 침전시켜 상징액을 취하여 분석에 사용하였다. 분석항목은 pH, 산화-환원

전위(ORP), 알칼리도(pH 4.5까지), TS(Total Solids), VS(Volatile Solids), COD(chemical oxygen demand), TVA(Total Volatile Acids), 가스발생량 및 가스조성, 침강용적, 원심분리용적, 탈수소효소활성(dehydrogenase activity: DHA),¹⁰⁾ 탄수화물(hexose기준)¹¹⁾이다. 가스조성은 TCD가 부착된 가스스크로마토그래피를 이용하였으며, 침강용적은 100 ml 실린더에서 1일간 침전시켰고, 원심분리용적은 2500 rpm에서 5분간 원심분리후 측정하였다. 이외에 모든 분석은 미국의 Standard Methods¹²⁾에 따라 행하였다.

III. 실험결과 및 고찰

1. 예비고액분리실험

고형물의 농도가 높은 도시하수슬러지를 ASBR로 처리할 경우에 소화슬러지의 고액분리특성은 가장 중요한 운전 및 설계요소이다. 왜냐하면 허용가능한 유출수량은 침전·농축시간동안의 소화슬러지의 농축용적에 따라 좌우되며, 미생물축적 및 처리수질도 고액분리특성에 따라 달라지기 때문이다. 따라서 슬러지소화시 ASBR의 적용가능성을 평가하기 위하여 고액분리실험을 수행하였다. 예비실험결과 ASBR형식의 본실험에서 소화슬러지의 침전성이 좋지 않을 것으로 예상되었는데, 그 이유는 유입슬러지의 1일 농축용적이 40~80%이었기 때문이다. 완전혼합형 반응조로 도시하수슬러지를 35°C, HRT 20일로 소화시킨 슬러지의 1일 침강용적은 50~70%였다. 그리고 농축용적 70%를 얻기 위해서는 적어도 12시간의 침전·농축시간이 필요하였다. 그러므로 ASBR에서 소화슬러지의 농축용적은 고형물의 지속적인 축적으로 인하여 완전혼합형 반응조에 비하여 클 것으로 예상되었다.

이상의 예비고액분리실험을 통하여 ASBR공정에서 허용가능한 유출수량은 반응조 유효용적의 약 30~50%정도이며, 농축된 슬러지의 유실없이 안정적인 처리를 위해서는 최소한 12시간의 침전·농축시간을 두어야 한다는 것이다. 결과적으로 초기 ASBR의 운전은 HRT 10일에서 반응시간 2일, 침전·농축시간 1일로 구성된 cycle period 3일에서 시작되었다.

2. 운전초기거동

ASBR(전환전 반응조) 및 Control반응조는 동일

한 처리효율을 보일 때까지 3개월간의 순유기간을 거쳤다. 운전기간동안 pH, ORP, VA, 그리고 알칼리도는 동일하였으나, 가스발생량은 control반응조가 ASBR보다 약 12%정도 많이 발생하였다. ASBR로의 전환은 control반응조와 동일한 유기물부하율에서 HRT 10일, cycle period 3일 조건에서 전환하였다. Fig. 4는 cycle period 3일에서 전환초기 주기반복에 따른 가스발생량 및 소화슬러지의 pH 변화를 나타낸다. 첫번째 주기 반응시간에 다량의 슬러지유입에 따른 영향으로 초기 pH가 약 0.15정도 낮아지는 경향을 보이고 있으나, 주기가 반복되면서 두드러진 pH의 변화는 없었고 총휘발산의 축적도 일어나지 않았다. 한편 반응시간동안 조내 고�형물농도를 측정된 결과 변화폭을 거의 발견할 수가 없었다. 그러나 가스발생량의 경우 초기 ASBR전환후에 일일당 가스발생량을 control과 비교할 경우 전환전과는 달리 많은 가스가 발생되었다. 이는 ASBR에서 초기에 다량의 부하가 일시에 주입됨에 따라 driving force가 상대적으로 컸기 때문이라고 판단된다.

운전초기 소화슬러지는 5주기를 거치면서 침전·농축시간동안 양호한 침전성을 보였으나, 고�형물의 축적현상이 급격히 진행되어 1일 후 농축용적이 약 90%정도에 도달하였다. 이에 반하여 control의 경우는 약 50%전후의 농축용적을 보였다. 따라서 초기 5주기 동안은 농축된 슬러지의 일부가 유출수와 함께 배출되는 현상이 발생하였다. HRT 10일조건에서 cycle period 3일로 50일간 운전 후, cycle period를 4일로 전환시켜 운전하였다. 이때 급작스런 유기물부하변동에 따른 처리효율 저하는 발견되지 않았다. 또한 HRT를 5일, cycle period를 2일로 전환하여 반응조용적의 40%를 유입, 유출시켜도 처리안정성에 아무런 문제가 발생하지 않았다. 그러나

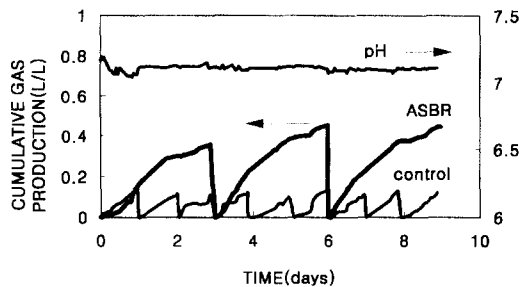


Fig. 4. Cumulative gas production and pH at the initial start-up of the ASBR with 3-day cycle period.

완전혼합형으로 운전되는 control반응조에서는 이러한 급격한 부하의 변동이나 많은 양의 소화조 유입, 유출량에 대하여 안정한 처리를 기대할 수 없을 것으로 판단된다. 또한 ASBR의 초기기동으로 볼 때 기존 재래식 혐기성소화조를 SBR공정으로의 전환이 용이함과 동시에 전환시 운전의 불안정성을 쉽게 극복할 수 있고, 초기운전기간을 최소화 단축하기 위해서 SBR모드로 시작하는 것이 유리하다고 판단된다.

3. 소화슬러지의 고액분리특성

ASBR소화슬러지의 고액분리(Solid-Liquid Separation)특성은 control과 상당한 차이가 나서, HRT 10일, cycle period 3일로 운전되던 초기 15일동안을 제외한 전운전기간에 걸쳐서 부상농축(floatation thickening)현상이 발생하였다. 이에 반하여 control 소화슬러지는 100 ml 실린더내에서 양호한 침강성을 보였다. ASBR에서 부상농축현상은 반응시간에 관계 없이 농축시간 시작 후 5~13시간이 경과되면서 일어났다. 소화슬러지부상의 주요원인은 반응시간 및 농축시간동안 발생하는 소화가스가 소화슬러지내 고�형물에 부착되었기 때문이며, 소화슬러지가 부상함에 따라 ASBR의 유출수는 반응조의 하부에서 배출하였다.

부상된 슬러지의 농축용적은 전 운전기간에 걸쳐 반응조용적의 평균 50~80%를 차지하였고 cycle period별로 2일에서는 71%, 3일에서는 70%, 4일에서는 69%였다. 정상상태에서의 소화슬러지 및 유입 슬러지의 전형적인 계면농축곡선은 Fig. 5와 같다. HRT 10일에서 ASBR의 고�형물농도는 control에 비하여 평균 2.6배 높게 유지되었으며 원심분리용적도 같은 양상이었고, HRT 5일의 경우 원심분리용적은

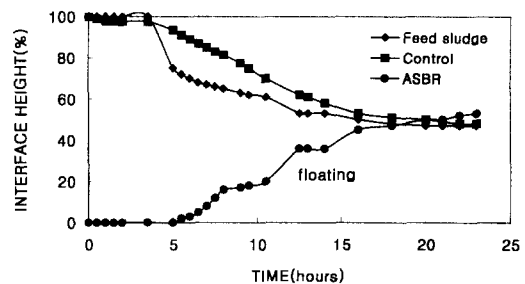


Fig. 5. Typical interface thickening curves of the digested sludge and feed sludge.

ASBR에서는 40~71%, control은 18~32%였으며 총 고형물농도(mixed liquor total solids)는 26,000~46,000 mg/l로 control에 비하여 평균 2.2배 높게 유지하였다.

일반적으로 ASBR 운전시 소화슬러지의 침전이 부상에 비하여 처리수의 배출이 용이한 것이 사실이다. cycle period 3일에서 슬러지의 부상현상이 일어났으나, 반응조하부에서 배출을 함으로써 운전상의 문제를 야기시키지는 않았다. 그러나 소화슬러지의 부상현상을 개선하고자 반응시간을 1일 증가시켜 cycle period를 4일로 하고, 농축시간동안 소화가스의 생성을 억제하여 슬러지의 침전을 유도함과 동시에 반응조유효용적의 40%유입, 유출에 따른 영향을 파악하고자 하였으나, cycle period 3일과 같이 농축시간동안 소화가스의 발생을 제어할 수는 없었다. 다른 한편으로 소화슬러지의 침전을 유도하고자 cycle period 3일에서 소화조액을 인위적으로 유출시켜 1 l 실린더에서 수직피켓이 달린 기계식교반기를 이용하여 35°C에서 저속교반하여 약 87%의 침강용적을 얻을 수 있었다. 그래서 cycle period 3일에

서 농축시간동안 반응조내 소화액을 4 rpm으로 교반하였으나 침전이 일어나지 않았고 오히려 유출수내 고형물유실이 증가하여 가스발생량이 감소하였다. 그리고 농축시간 직전에 15분간 급속혼합을 통하여 생성된 가스버블을 제거하여 침전성을 향상시키려 하였으나, 부상농축현상은 계속되었다.

HRT 10일에서 cycle period를 증가시켜 운전한 결과 슬러지의 부상현상이 두드러지게 개선되지 않아 반응시간을 단축시켜 HRT를 낮추어 운전하는 것이 유리하다고 판단되어 HRT를 5일, cycle period를 2일(반응:침전=1:1)로 전환하여 고액분리특성을 알아본 결과 HRT 10일의 운전결과와 같았다. 따라서 도시하수슬러지를 ASBR로 처리할 경우 부상현상이 두드러지므로 선택적으로 유출수를 배출시키는 것이 효율적이라고 판단된다.

4. 정상상태 운전결과

ASBR과 control 반응조의 정상상태 운전결과를 Table 3과 같다. ASBR은 전체단위공정이 타공정에 비하여 상당히 유동적이며, 운전특성상 인위적으로

Table 3. Steady State Performances (Average±Standard deviation)

Parameters	HRT (10 days)-3 day cycle		HRT (10 days)-4 day cycle		HRT (5 days)-2 day cycle	
	ASBR	Control	ASBR	Control	ASBR	Control
pH	7.09±0.1	6.97±0.1	6.90±0.1	6.85±0.1	6.9±0.1	6.9±0.1
ORP (mV)	-261±60	-290±42	-206±57	-199±38	-242±20	-251±17
Volatile acid (mgHAc/l)	214±19	225±30	192±48	182±63	212±113	270±179
Alkalinity (mg CaCO ₃ /l)	1,710±85	1,710±83	1,550±213	1,290±193	2,190±460	2,120±450
TS removal (%)						
digested sludge basis	-	8.3±4.8	-	16.1±7.7	-	17.7±7.7
clarified effluent basis	91.7±1.2	90.2±0.5	93.0±1.9	93.5±2.3	90.1±12.1	88.8±2.8
VS removal (%)						
digested sludge basis	-	21.0±11.0	-	20.4±10.0	-	23.2±8.3
clarified effluent basis	92.4±3.5	91.1±2.8	93.4±3.7	93.5±2.3	91.8±2.4	90.7±2.8
COD (%)						
digested sludge basis	-	18.2±5.2	-	21.9±7.4	-	27.8±12.5
clarified effluent basis	95.2±2.0	92.0±7.5	95.4±2.3	92.2±7.1	93.7±2.4	92.8±4.1
Gas production						
Gas production rate (l/d)	0.15±0.03	0.10±0.01	0.15±0.03	0.1±0.03	0.67±0.32	0.54±0.27
Gas yield (l/gVS added)	0.14±0.02	0.09±0.02	0.14±0.04	0.09±0.04	0.28±0.12	0.23±0.10
Methane content (%)	73.2±0.2	73.0±0.1	73.0±0.1	72.6±0.3	69.5±0.4	69.0±0.2
Thickened volume (v/v%)	70±15	49±1	69±6	61±12	71±8	59±11
Centrifuged volume (v/v%)	-	-	38±4.1	20±2.7	56±9.8	24±3.2

SRT를 조절하지 않으므로 일반적으로 준정상상태 (Pseudo steady-state)를 정상상태로 간주한다. ASBR에서 SRT는 인위적으로 조절하지 않고 배출 공정시 고형물유실에 따라 조절되었다. 총고형물농도를 기준으로한 평균 SRT는 HRT 10일에서 cycle period 3, 4일에서 각각 250일, 169일로 유지되었고, HRT 5일에서는 100일이었다. 이에 반하여 control반응조는 10일을 일정하게 유지하였다. 그리고 두반응조 모두 HRT에 관계없이 낮은 유기물 부하율 0.75~3.56 gVS/l/d로 운전되어 소화슬러지 및 유출수의 유기물 및 화학적 조성변화가 심하지 않았다.

1) 소화슬러지의 화학적 특성

운전기간중 pH, ORP, VA, 알칼리도는 두 반응조에서 거의 같았고 전형적인 도시하수슬러지의 소화 특성을 나타냈다. ASBR에서는 pH가 다소 낮은 다량의 기질투입에도 불구하고 반응조내 pH의 변동은 거의 없는 것으로 나타났으며, control의 경우도 투입후 약 14시간 이후 회복되었다. 반응조내에서 혐기성소화의 중간생성물인 휘발산에 대응할 수 있는 완충능력의 지표인 알칼리도는 HRT 10일, cycle period 3일, 4일에서 각각 1,700 mg CaCO₃/l, 1,550 mg CaCO₃/l이었다. HRT 5일, cycle period 2일에서는 2,000 mg CaCO₃/l 이상으로 혐기성소화에 저해를 미치는 휘발산농도를 고려할 때 저해는 일어나지 않은 것으로 판단된다.

2) 유기물제거율

1일간의 농축후 유출수를 대상으로 VS 및 COD의 제거율을 측정된 결과, 두 반응조에서 거의 같은 제거율을 보이나, ASBR이 control上澄수에 비하여 COD농도가 약간 낮았다. 농축후 유출수를 기준으로 VS제거율을 살펴보면 HRT 10일에서는 ASBR과 control이 각각 83~99%, 81~97%였고, HRT 5일에서는 87~98%, 85~98%였다. COD제거율은 ASBR은 HRT 10일에서는 90%이상, HRT 5일에서는 86%이상이었으나 control은 71~97%, 76~98%로 변동폭이 ASBR에 비하여 상대적으로 컸다. 따라서 ASBR에서 부상농축에 의한 높은 유기물제거율로 볼 때 control의 중력농축에 의한 효과와 같은 효율을 보이고 있음을 알 수 있고, 재래식 소화조에서 위와 같은 처리효율을 얻기 위해서는 추가적인 농축장치가 필요하므로 ASBR의 우수성을 증명하는 것이다. Control소화슬러지의 유기물제거율을 살펴보면 대략 20%정도로서 낮은 경향인데 이는 우리나라 도

시하수처리장의 혼합슬러지내 유기물분율이 상대적으로 낮아서 생긴 결과라고 판단된다.¹⁹⁾ 그리고 두 반응조 모두 HRT의 감소에 따른 처리효율의 감소는 거의 없었고, ASBR의 경우 cycle period를 2일로 줄여서 운전하는 것이 경제적이라고 사료된다.

한편 복합기질의 투입에 따른 탄수화물의 분해정도를 알아본 결과 유입기질내 탄수화물은 97% 이상이 비용존성으로 존재하고, control반응조의 유출수를 대상으로 실험한 결과도 96% 이상이 비용존성 탄수화물로 구성되어 있다. 유입슬러지를 기준으로 control소화슬러지의 탄수화물 제거율은 13~18% 정도로, 제거된 부분은 용존성 및 저급의 탄수화물로 전환된 것으로 추정된다. ASBR의 침전고형물과 유출수를 대상으로 실험한 결과 농축고형물에서는 비용존성의 비중이 기질과 같았고, 상징액의 경우는 용존성탄수화물의 비율이 약간 증가하였다. 그리고 농축고형물에는 유입슬러지보다 탄수화물이 약 70%정도 높게 존재하여, 고형물질축적은 곧 분해가능유기물의 축적을 간접적으로 증명한 것으로 판단된다.

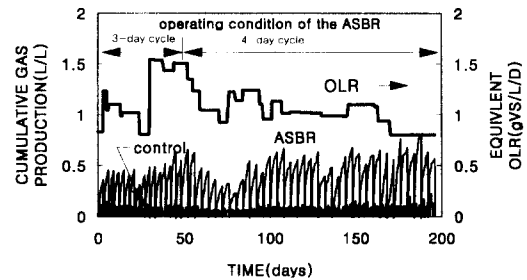


Fig. 6. Cumulative gas production during sequences of batch period and organic loading rate after start-up of ASBR with HRT of 10 days.

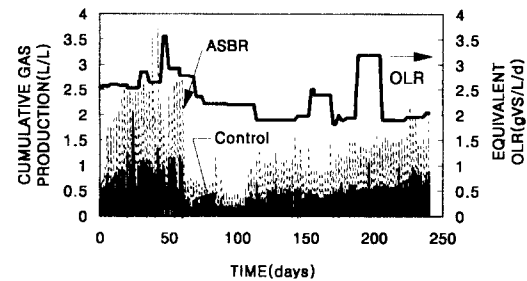


Fig. 7. Cumulative gas production during sequences of batch period and organic loading rate after start-up of ASBR with HRT of 5 days.

3) 가스발생량 및 가스조성

Fig. 6과 7은 유기물부하에 따른 ASBR과 control에서의 단위용적당 가스발생량이다. Fig. 6에서 보면 운전기간 약 70~80일 사이에 가스의 발생량이 적은데, 그 이유는 낮은 유기물부하와 농축시간동안 소화슬러지를 침전시키기 위하여 저속교반을 실시한 결과로 고형물이 유실되었기 때문이다. ASBR반응조는 HRT 10일에서 cycle period의 변화에 따른 가스발생량의 차이는 거의 관찰되지 않았으나, HRT 5일에서는 10일에 비하여 상당히 많은 양의 가스가 발생하였다. 그리고 Table 3 및 Fig. 6, 7에서 보듯이 ASBR이 control과 거의 같은 유기물제거율에도 불구하고 상당히 많은 양의 가스발생량을 보이고 있는데 HRT 10일과 5일에서 각각 평균 52%, 27% 많이 발생하였다. ASBR에서 가스발생이 많은 것은 조내 다량의 미생물이 확보되었고, 다량의 기질이 조내에 투입되면서 농도차에 의해 야기되는 높은 driving force에 의한 분해속도의 증가 및 조내축적된 유기물이 서서히 분해되는 결과가 복합적으로 작용하였기 때문이라고 판단된다. 또한 총가스발생량의 50%에 달하는 양이 주기중 반응시간 1일 이내에 발생하였으며, 침강시간동안은 총가스발생량의 5~13%가 HRT에 관계없이 발생하였다. 휘발성고형물 투입당 최고 가스발생량은 HRT 10일, cycle period 4일에서 ASBR과 control 각각 0.25, 0.18 l/gVS이고 HRT 5일, cycle period 2일인 경우는 0.47, 0.54 l/gVS였다.

Fig. 8은 HRT 10일, 5일에서 ASBR로 전환후 ASBR가스발생량에 대한 control가스발생량비를 표현한 것이다. HRT 10일에서 주목할 것은 ASBR로 전환하기 이전의 완전혼합형 반응조는 control에 비하여 약간 낮은 가스가 발생하였으나 ASBR로 운전모드를 전환후에는 가스발생량이 두드러지게 증가하였다. HRT 10일과 5일의 운전에서 평균 가스발생량

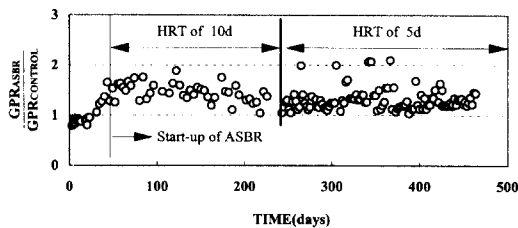


Fig. 8. Gas production ratio of the ASBRs to the control runs.

비는 각각 1.5와 1.27이었다. 발생가스중의 메탄함량은 전 운전기간에 걸쳐 ASBR과 control에서 거의 같은 조성을 보였다. 그리고 두 반응조에서 HRT가 줄어들수록 메탄함량이 다소 감소하는 경향으로 HRT 10일에서는 평균 73%, HRT 5일에서는 69%였으며 반응시간에 따른 가스조성의 차이는 거의 없었다.

4) ASBR반응조내 고형물분포

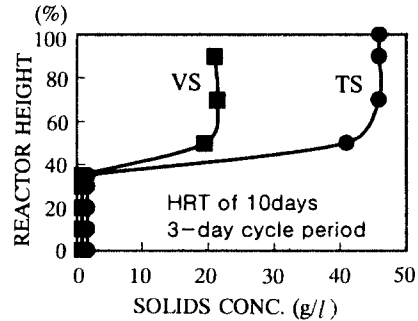


Fig. 9. Solids profile at thicken step of the ASBR with HRT 10 days and 3-day cycle period.

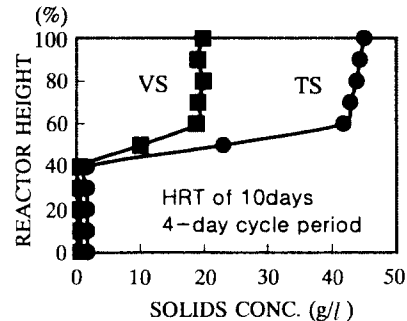


Fig. 10. Solids profile at thicken step of the ASBR with HRT of 10 days and 4-day cycle period.

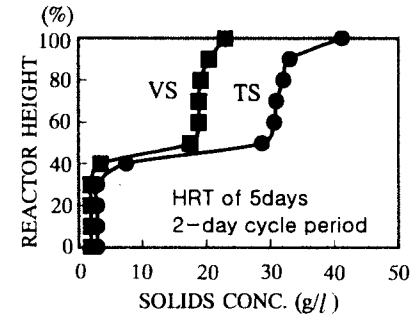


Fig. 11. Solids profile at thicken step of the ASBR with HRT of 5 days and 2-day cycle period.

Fig. 9, 10, 11은 1일간의 농축후 반응조내 고형물 분포를 알아보기 위하여 각 배출구에서 채취한 시료의 고형물을 분석한 결과이다.

조내 고형물분포를 보면 ASBR 반응조내에서는 전형적인 부상농축현상이 일어나고 있음을 알 수 있으며 반응조높이 40%이상에서는 약간 고형물농도가 증가하였다. HRT 5일에서도 이러한 부상농축현상은 두드러지게 나타나고 있으며, 체류시간 증가에 따른 투입고형물의 증가로 인하여 배출수와 함께 상당량의 고형물도 유실되었다.

HRT 5일에서는 반응시간이 단축되었음에도 불구하고 HRT 10일에서와 거의 같은 고형물분포를 보이고 있다. 따라서 도시하수슬러지를 ASBR로 운전할 경우 5일의 낮은 수리학적체류시간에서도 운전이 가능하다는 것을 간접적으로 보여주는 결과이며, 슬러지의 침강특성에 따라 선택적으로 유출수를 배출시킬 수 있는 장치가 필요하다고 판단된다. 그리고 총고형물농도중 휘발성고형물의 비율은 반응조높이에 상관없이 40~45%로 거의 일정한 수치를 보이고 있다.

5) 탈수소효소

ASBR에서 미생물확보를 추정하기 위하여 미생물의 전자전달체계에 관여하는 탈수소효소를 측정하였다. 측정결과 HRT 10일, cycle period 3일의 운전초기에는 ASBR이 control에 비하여 약 20%정도 높은 결과를 보였으나 운전이 장기화 되면서 HRT 10일의 전운전기간에 걸쳐 평균 2.9배 높았다. 그리고 소화슬러지와 유출수의 탈수소효소를 비교한 결과 유출수의 DHA는 소화슬러지의 2~6%정도로 아주 미미하였으며 이는 SBR공정에서 혐기성미생물이 다량확보가 가능하다는 것을 보여주는 결과라고 판단된다. 탈수소 효소는 반응조내 고형물과 상당한

관련이 있는 것으로 나타났는데, Fig. 12는 HRT 5일에서 조내고형물지표로서 원심분리용적비와 DHA의 상관성을 보여준다.

Fig. 12에서 보듯이 ASBR이 control에 비하여 높은 고형물농도를 유지함과 동시에 DHA도 높아 ASBR이 control에 비하여 2.16~4.1배 높았고 유출수는 소화슬러지의 약 5%정도였다. 한편 HRT 10일에서는 ASBR이 control에 비하여 2.6배 높은 조내 고형물농도를 유지하였고, 유출수에 비해서는 약 30배 높은 농도였다.

IV. 결 론

과천하수처리장 1,2차 혼합농축슬러지를 대상으로 35°C하에서 ASBR(혐기성연속회분식공정)이라는 새로운 공정으로 처리한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 많은 고형물을 포함하고 있는 도시하수슬러지를 ASBR공정으로 처리할 수 있었다. ASBR에서 HRT와 cycle period의 변화는 처리효율에 아무런 영향을 주지 않았다.

2. 소화조유효용적의 30~40% 유입, 유출에도 불구하고 처리의 안정성에는 아무런 문제가 없었다. 완전혼합-일일주입형 반응조를 ASBR공정으로 전환 시 아무런 문제점이 없었다.

3. ASBR에서 소화슬러지 양호한 침강성의 확보가 어려웠고, 발생하는 가스에 의하여 부상농축이 일어났다. 부상에 의한 슬러지의 농축용적은 소화조 유효용적의 평균70%정도이며, 부상농축의 효율은 기존 재래식소화조에 중력농축조를 설치한 것과 비슷한 효율을 보였다. 유출수를 기준으로한 평균 유기물 제거율은 90%이상으로 높은 제거율을 보였다.

4. ASBR과 control의 유기물제거율이 비슷함에도 불구하고, 가스발생량은 ASBR이 HRT 10일, 5일에서 각각 52%, 27% 많이 발생하였다. 이렇게 가스발생량이 많은 것은 반응조내 혐기성 미생물의 축적, 높은 driving force 및 분해가능한 유기물이 축적되었다가 계속적으로 분해되는 현상이 복합적으로 작용하였기 때문이다.

5. ASBR초기운전시 고형물의 축적현상이 두드러지게 나타났다. 정상상태에서 고형물의 농도는 ASBR이 control에 대하여 전운전기간에 걸쳐 평균 2.2~2.6배 높았다. 탈수소효소 측정결과 ASBR이 control에 비해 HRT 10일에서는 2.9배, HRT 5일

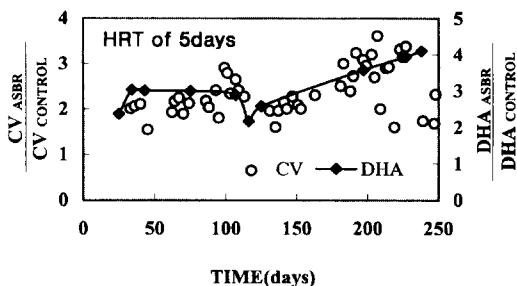


Fig. 12. Change of DHA ratio with regard to centrifuged volume ratio at HRT of 5 days.

에서 2.7배 높은 것으로 나타났고 유출수의 DHA에 비하여 20~30배 높게 유지하였다. 따라서 ASBR에서는 고형물의 축적과 더불어 반응조내 다량의 미생물확보가 가능하여 SRT를 HRT보다 훨씬 길게 유지할 수가 있었다.

참고문헌

- 1) Irvine, R.L., Ketchum, L.H., Breyfogle, R. and Barth, E.F.:Municipal application of Sequencing Batch Treatment. *Journal of Water Pollution Control Federation* **51**, 484-496, 1983.
- 2) Kennedy, K.J., Sanchez, W.A., Hamoda, M.F. and Droste, R.L.:Performance of Anaerobic Sludge Blanket Sequencing Batch Reactor. *Journal of Water Pollution Control Federation* **63**(1), 75-83, 1991.
- 3) Madan, L.A., Edwin, F.B. and Margaret, B.U.: Technology Evaluation of Sequencing Batch Reactor. *Journal of Water Pollution Control Federation* **57**(8), 867-875, 1986.
- 4) Ng, Wun-jern: Sequencing Batch Anaerobic Reactor for Treating Piggery Wastewater. *Biological Wastes* **28**(1), 39-51, 1989.
- 5) Suthaker, S. Polprasert, C. and Droste, R.L.: Sequencing Batch Anaerobic Reactors for Treatment of a High-strength Organic Wastewater. *Water Science Technology* **23**, 1249-1257, 1991.
- 6) Herum, B.A.H. and Dague, R.R.:The Effects of Applied Vacuum on The Performance of The Anaerobic Sequencing Batch Reactor. Paper Presented at The 48th Industrial Waste Conference. Purdue University, West Lafayette, Indiana, May 11-13 1993.
- 7) Hurley, B.J. and Rachwal, L.B.:Reducing Sludge volume. *Journal of Effluent Water Treatment*. **121**(7), 292-296, 1981.
- 8) Noone, G.P. and Brade, C.E.:Low Cost Provision of Anaerobic Digestion. *Water Pollution Control* **81**(4), 479-510, 1982.
- 9) 趙南暎: 혐기성소화슬러지의 미생물 활성분포. 건국대학교 석사학위 논문, 건국대학교, 서울, 1992.
- 10) Ghosh, S.:Kinetics of aerobic utilization of mixed sugars by heterogenous microbial population. Ph. D. Thesis. Georgia Institute of Technology. Georgia, U.S.A. 1969.
- 11) Benefield, L.D. and Randall, C.W.:The Phenol-Sulfuric Acid Test: Effective Alternative for Carbohydrate Analysis. *Water & Sewage Works* 55, 1976.
- 12) Americal Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation.: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 18th ed. APHA, Washington, D.C., U.S.A. 1992.
- 13) 崔義昭, 張 權: 우리나라 하수슬러지의 혐기성소화특성. 한국상하수도학회지, **1**(1), 1-8, 1988.