

고성능 세정식 슬러지 산발효조의 운전 및 적용성 평가

안영호[†] · Speece R.E.*

영남대학교 건설환경공학부 · *(미) Vanderbilt University 토목환경공학과

(2004년 9월 22일 접수, 2004년 12월 27일 채택)

Operation of High Performance Elutriation-Type Sludge Fermenter and Feasibility for Its Application

Ahn Young-Ho[†] · Speece R.E.*

School of Civil and Environmental Engineering, Yeungnam University, Gyongsan

*Department of Civil and Environmental Engineering, Vanderbilt University

ABSTRACT : The performance of a novel fermentation process, adopting a sludge blanket type configuration for higher hydrolysis/acidogenesis of the municipal primary sludge, was investigated under batch and semi-continuous conditions with various pH and temperature conditions. This acid elutriation slurry reactor provided higher system performance with a short HRT (5 days) and higher acidogenic effluent quality under pH 9 and thermophilic (55°C) conditions. The hydrolysis of the sludge was revealed to be significantly dependent on seasonal effects for sludge characteristics but with little impact on acidogenesis. Based on the rainy season at the optimum conditions, VFA production and recovery fraction (VFA_{COD}/COD) were 0.18 g VFA_{COD} g⁻¹ VSS_{COD} and 63%. As byproducts, nitrogen and phosphorus releasing were 0.006 g N g⁻¹ VSS_{COD} and 0.003 g P g⁻¹ VSS_{COD}, respectively. For the mass balance in a full-scale plant (Q = 158,880 m³ day⁻¹) based on the rainy season, the VFA and non-VFA (as COD) production were 3,110 kg VFA_{COD} day⁻¹ and 1,800 kg COD day⁻¹, resulting in an increase of organics of 31 mg COD L⁻¹ and 20 mg VFA_{COD} L⁻¹ and nutrients of 0.7 mg N L⁻¹ and 0.3 mg P L⁻¹ in the influent sewage. The economical benefit from this process application was estimated to be about \$67 per 1,000 m³ of sewage except for energy requirements and also, better benefits can be expected during the dry season. Also, the results revealed that the process has various additional advantages such as pathogen-free stabilized solids production, excellent solids control and economical benefits.

Key Words : Acid Elutriation, High Performance Fermenter, Municipal Sludge, Seasonal Effect, Thermophilic

요약 : 도시하수 1차슬러지의 가수분해와 산발효특성 향상을 위해 슬러지상 형태를 가진 새로운 회분식 및 반연속식 발효시스템의 운전특성을 운전 온도와 pH를 함수로 평가하였다. 본 공정에서 적용한 산세정 슬러리 반응조는 pH 9와 고온(55°C)의 운전조건하에서 비교적 짧은 체류시간내 유출수내 다량의 유기산을 생산하는 우수한 운전특성을 가지고 있다. 가수분해 특성은 대상기질인 슬러지의 특성에 미치는 계절적 특성에 상당한 영향을 받았으나, 반면에 산형성특성은 거의 영향을 받지 않았다. 유기계질을 기준으로 할 때 최적 운전조건하에서의 휘발성 유기산의 생성과 회수율은 0.18 g VFA_{COD} g⁻¹ VSS_{COD}과 63.3%이었으며, 발효부산물로써 질소와 인의 용출율은 각각 0.006 g N g⁻¹ VSS_{COD} 및 0.003 g P g⁻¹ VSS_{COD}이었다. 실규모 처리장(Q = 158,880 m³ day⁻¹)에서의 물질수지 결과 유기계절동안의 휘발성 유기산과 비휘발성 유기산의 생산량은 약 3,110 kg VFA_{COD} day⁻¹ 및 1,800 kg COD day⁻¹이었는데, 이는 유입 하수기준으로 약 31 mg COD L⁻¹, 20 mg VFA_{COD} L⁻¹, 0.7 mg N L⁻¹ 및 0.3 mg P L⁻¹의 수질향상을 가져올 것으로 평가되었다. 이 공정의 적용에 따라 유입하수 1,000 m³ 당 약 \$67 (에너지 비용 제외)의 경제적 이득이 있으며, 건기계절시에는 이보다 더 높은 경제성을 가질 것으로 기대된다. 또한 본 연구결과 고성능 발효조는 병원성균이 없는 안정화된 고품질 생산, 우수한 고형물 분리특성 및 경제성 등 다양한 장점이 있는 것으로 나타났다.

주제어 : 산세정, 고성능 발효조, 하수슬러지, 계절적 영향, 고온

1. 서론

지난 20년이상 생물학적 영양소 제거공정(biological nutrient removal, BNR)은 매우 다양하고도 심도 깊게 연구되어 왔다. 이에 대한 많은 연구결과중 한가지 중요한 사실

은 영양소(특히, 인에 있어서)의 제거정도가 유입하수내 포함된 쉽게 분해가능한 유기물질(readily biodegradable COD, RBCOD)함량에 매우 의존한다는 것이다.^{1~3)} 일반적으로 유입수내 포함된 RBCOD내에는 미량의 단쇄상 유기 지방산(short chain fatty acids, SCFAs)을 포함하고 있을 뿐이다. 즉, 영양소 제거는 유입수내 RBCOD의 크기와 특히 생물반응조의 혐기성 영역에서 이 물질이 SCFAs로 전환되는 정도와 매우 관련이 깊다. 더우기 SCFAs뿐만 아니라 SCFAs가 아닌(non-SCFAs) 용존성 COD조차도 인 제거를 향상시

[†] Corresponding author
E-mail: yhahn@yu.ac.kr
Tel: 053-810-3511

Fax: 053-810-4622

킬 수 있다는 실험실규모 및 실규모 BNR 시스템의 연구도 보고된 바 있다.^{4,5)}

하수슬러지를 SCFAs로 전환시키는 산발효 공정 그리고 BNR 공정에서의 그 적용성과 경제성 등에 대하여 많은 연구들이 수행되어 왔으며,^{2,4,6~8)} 그 결과 향상된 발효특성과 반응산물의 세정유출을 위한 활성 1차침전지(activated primary sedimentation tank), 단단 발효농축조, 완전혼합 발효조 그리고 완전혼합 발효조와 농축조의 조합등 다양한 공정들이 제안·적용되고 있다. 그러나 이들 방법들은 높은 고형물 유출과 낮은 산발효 효율, 공정제어의 복잡성, SCFAs의 손실가능성 및 높은 설치비용 등의 다양한 단점을 가지고 있어 이러한 단점들을 극복할 수 있는 고성능 슬러지 발효 시스템의 개발이 요구된다.

슬러지 안정화 공정에서 일반적으로 사용되는 반응조 형상은 완전혼합형태로 이는 슬러지의 분해과정의 율속단계(rate-controlling step)를 근거로 설계된다. 특히 혐기성 분해과정에서 입자성 유기물질의 가수분해는 매우 낮은 반응속도를 가지는 율속단계에 해당하는데, 이점에 있어서 완전혼합형 반응조는 회분식 형태의 반응조 보다도 상당히 더 낮은 분해율을 가지게 된다.⁹⁾ 이러한 문제점에 기초하여 Kim 등¹⁰⁾은 입자성 유기물질을 대상으로 한 혐기성 소화 세정상분리 처리공정(Anaerobic Digestion Elutriated Phased Treatment (ADEPT) process)이라는 새로운 고율 혐기성 분해개념을 이론적인 측면에서 소개한 바 있는데, 이 공정은 메탄 발효조 선단에 위치하여 가수분해/산형성 단계를 가속화하기 위한 산세정 슬러지 발효조의 고율 운전을 특징으로 하고 있다. 이 공정의 우수성은 슬러지 형태의 축산 폐기물을 대상으로 실험실규모에서 평가된 바 있는데, 특히 슬러지 발효조는 본래의 산발효 기능뿐만 아니라 우수한 고액분리 특성을 보였다.¹¹⁾

슬러지의 혐기성 분해과정에서 산형성 단계를 제어할 수 있는 요소로는 체류시간, pH, 온도 등을 들 수 있다.^{12~14)} 이 중에서 pH조건에 대해서는 최근 새로운 전망¹⁵⁾이 제안되고 있다. 즉, 일반적인 혐기성 분해는 중성(6.5~7.5)의 조건으로 그리고 산발효는 pH 5~6의 조건으로 설계 및 운전된다. 그러나 입자성 유기물질의 가수분해와 산형성은 오히려 중성의 경우에서 더 효과적이었고, 전체 유기산중에서 아세트산의 분율은 pH가 감소할 때 오히려 감소하는 경향이 있다는 보고가 있으며,^{14,16)} 또한 돈사폐수를 대상으로 ADEPT 공정 운전에서 Ahn 등¹¹⁾은 중온과 고온의 조건 모두에서 pH 9의 조건이 돈사폐수의 가수분해와 산형성 단계에 있어서 최적의 조건이라고 언급하였다. 이러한 결과들은 슬러지의 발효공정에 있어서 높은 pH조건(중성 혹은 알칼리성)의 적용이 상당한 가능성이 있음을 의미한다.

일반적으로 BNR공정을 위한 대부분의 슬러지 발효공정은 상온의 온도조건으로 연구 및 적용되어 왔는데, 이는 공정상의 낮은 가수분해/산형성을 뿐만 아니라 병원성균과 관련한 최종적인 슬러지 처분문제 등에 따른 문제점을 가지게 된다. 반면에 55°C 이상 고온의 운전조건은 상온 혹은 중온의 온도조건에 비하여 상당한 장점을 가지고 있는

데, 대표적으로 유기성 고형물의 분해율 향상, 우수한 고액 분리특성 및 병원성균의 제거 등을 들 수 있다.^{17~19)} 미국 환경보호청(US EPA)의 규정에 따른 A급 생물고형물(Class A biosolids)은 병원성균이 완전히 제거된 상태로, 이는 곡물이나 인간에 활동에 의한 토지적용의 제한이 전혀 없는 경우에 해당한다.²⁰⁾ 고온 혐기성 처리방법은 하수슬러지내 병원성균을 이러한 기준이하(Class A biosolids)로 떨어뜨릴 수 있는 몇 안되는 입증 기술중의 하나이다. 현재 미국내 신설 및 개량중인 시설과 많은 파일럿 규모연구는 혐기성 슬러지 처리시스템의 운전특성을 향상시키는 방향으로 계획되고 있으며, 이 중 대부분의 연구들은 병원성균 감소를 목적으로 한 A급 생물고형물 즉, US EPA의 no. 40 CFR 503 연방규제법안을 목표로 하고 있다.^{21,22)}

본 연구는 기본적으로 고성능 슬러지 발효조의 개발에 목표를 두고 수행되었다. 이를 위해 슬러지 상(sludge blanket)형태를 가진 산세정 발효조의 운전특성을 온도와 pH의 운전조건을 함수로 평가하였다. 먼저 회분식 및 반연속식 세정시스템을 이용하여 도시하수슬러지의 가수분해 및 산형성 특성을 평가하고, 이를 기초로 하여 실규모 하수처리장에서의 적용성과 경제성을 추가적으로 평가하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험장치

회분식 시스템

하수슬러지의 발효특성에 대한 온도 영향을 검토하기 위해서 1 L의 유효용적을 가진 3개의 상향류 슬러지상 반응조(직경 6.4 cm, 높이 65 cm)를 20°C, 35°C 및 55°C의 온도조건으로 각각 운전하였다. 이때 pH 7로 설정된 수돗물을 연속적으로 세정수로 이용하였는데, 주입전 각각의 온도조건으로 조정하였다. SCFAs를 포함한 발효산물의 메탄 전환 가능성을 배제하고 고형물의 분해를 촉진하기 위해서 연속적으로 세정수를 주입·유출하였는데, pH조절을 위해서 희석된 NaOH용액을 사용하였다. 반응조의 운전을 위해 초기에 0.63 L의 1차슬러지와 0.07 L의 균일화된 입상슬러지를 식중하였다. 매일 1 L day⁻¹의 세정수량으로 슬러지상 내에 생산된 용존 유기물질을 세정하여 그 특성을 분석하였다. 실험에 사용된 1차슬러지는 K시의 하수처리장에서 수집되었는데, TS 농도와 VS/TS 비율은 각각 23 g L⁻¹와 66 %이었다.

반연속식 시스템

도시하수 1차슬러지의 특성은 특히 계절적인 특성에 따라 상이할 것인데, 이는 주로 하수관거로 유입되는 난분해성 고형물질의 유입특성에 따를 것이다. 그러므로 반연속식 시스템의 연구는 고온(55°C)과 중온(35°C)의 온도조건에 대해 건기(dry weather)와 우기(wet weather)의 계절로 구별하여 수행하였다. 건기조건을 위해서는 pH가 조절되지 않은 상태에서 각각의 온도조건을 가진 상향류 슬러지상 반응조를

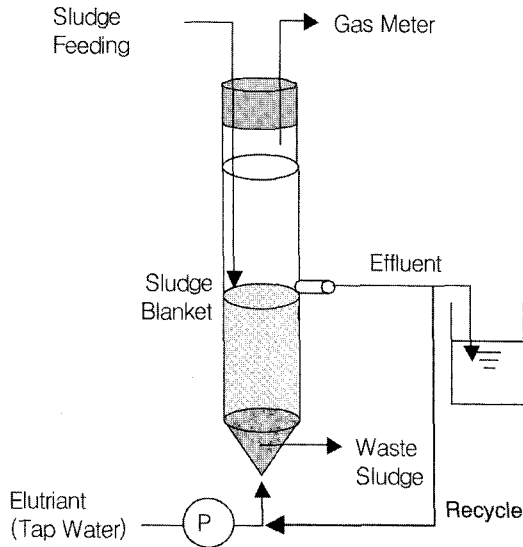


Fig. 1. Reactor setup for semi-continuous fermentation.

운전하였고, 그 결과 유출수의 pH는 약 6.5~6.6로 유지되었다. 무기조건에서는 6개의 상향류 슬러지상 반응조가 운전되었는데, 두가지 온도조건하에서 각각 pH 7, 9 및 11로 설정하여 발효공정에 대한 알칼리성 조건에 대한 영향을 조사하였다.

각 반응조는 1 L의 유효용적을 가지고 있었으며, 고형물 체류시간(solids retention time, SRT)을 5일로 고정하였다. 기질은 매일 슬러지상의 상단부로 주입하고 하단부에서 분해된 잔류 농축슬러지를 폐기하는 방식으로 운전하였는데, 이러한 방식의 운전에 의해 발효조내에서 안정된 슬러지상층의 유지가 가능하였다. 일반적으로 세정수로는 1차침전지 유출수가 적당하나 본 연구에서는 수도물을 이용하였는데, 이는 발효공정에 대한 세정수 자체의 영향을 배제하기 위함이었다. pH 조절을 위해서는 희석된 NaOH 용액을 사용하였다. 세정수는 0.5 L/day의 유량으로 공급되었고, 슬러지 층에서 상부의 액상층으로 발효산물을 세정유출하기 위해서 상부의 액상층을 반송하여 반응조내 유체의 상향유속을 약 0.28 m hr⁻¹로 유지하였는데, 이는 안정된 슬러지상층을 유지하기에 충분하였다.

운전의 초기시작단계에서 0.5 L의 균질화된 입상슬러지 (19 g VS L⁻¹ 및 70% VS/TS) 식종하였으며, 실험에 사용된 1차슬러지는 K시 하수처리장에서 채취하였는데, TS 농도와 VS/TS 비율은 건기시기의 경우 각각 38.5 g L⁻¹ 및 67%였으며, 우기시기에는 각각 29.2 g L⁻¹와 59%였다.

2.2. 분석방법

수질분석은 Standard method²³⁾에 준하여 수행하였다. 분석항목은 pH, COD (total, soluble), TKN, NH₄-N, T-P, PO₄-P, TS, VS, TSS, VSS등으로 pH, 알칼리도, VFAs²⁴⁾과 가스발생량(Wet-test gas meter, Sinagawa Model W-NK-0.5A, Japan) 등은 매일 관찰되었다. VFAs 성분은 UV 검출기와 유기산 분석 칼럼(Aminex HPX-87H, Bio-Rad, Inc., U.S.A)

이 장착된 HPLC(Shimadzu Model LC-10AD, Japan)를 이용하여 측정하였다. 이를 위해 대상시료를 4,000 rpm으로 15분 동안 원심분리(Hanil Instruments) 시킨 후 상정수를 채취하여 0.45 μm 여과지(Micron Separations, Inc.)로 여과하는 전처리과정을 거쳐 측정하였다. 가스성분 분석은 TCD 검출기와 silica gel 칼럼이 장착된 가스크로마토그래프(Tremetrics Model 9000, USA)를 이용하였는데, 칼럼 온도는 60℃, 주입부 온도 85℃, 검출기 온도는 75℃, 이동상은 헬륨가스(이동상 속도는 22 mL/min)를 사용하였다. 분석자료는 Varian 4270 Integrator(USA)에 의해 정리하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 도시하수 1차슬러지의 특성

우리나라의 도시하수는 분뇨·정화조 폐액의 분리처리와 열악한 하수관거 시스템 그리고 높은 침투수 및 침입수 발생 등의 특성으로 인하여 유기물의 함량이 낮은 수질특성(합류식 및 분류식 관거의 경우 각각 42~97 mg BOD L⁻¹와 95~143 mg L⁻¹)을 가지고 있다.²⁵⁾ 이러한 특성은 1차슬러지 발생량 감소와 BNR시스템의 주요 기능인 영양소 제거능력의 저하등의 악영향을 끼치게 된다.

1차슬러지의 발생량과 그 특성(유기물 함량 및 농도)은 계절적 변화에 매우 영향을 받는데,²⁶⁾ 특히 월평균 150~400 mm의 강우량을 보이는 7월에서 9월의 우기계절동안 1차슬러지의 특성은 하수관거로 유입되는 높은 난분해성 고형물에 의해 상당히 변화한다. Fig. 2는 그 예로써 70,000 m³ day⁻¹의 일처리용량을 가지는 K시의 N하수처리장(하수: 산업폐수 발생비율 = 75:25; 처리구역 면적 13,726 km²; 하수관거공급율 82%, 합류식 관거시스템)으로 유입되는 하수량과 1차슬러지 발생특성에 대한 계절적 영향을 보여주고 있다. Table 1에는 1차슬러지의 원소분석결과를 기준으로 평가된 슬러지의 특성이 정리되어 있는데, 1차슬러지의 COD/VSS 및 VSS/TSS의 비율은 건기의 경우 각각 1.56 g g⁻¹ 및 70±3.7%였고, 우기의 경우 각각 1.46 g g⁻¹ 및 61±3.2%이었다. 이러한 특성의 차이는 슬러지 발효공정의 설계와 운전에서 고려해야 할 중요한 운전요소중의 하나일 것이다.

Table 1. Elemental analysis and COD/VSS of municipal sludge

	Sludge		C	H	O	N	COD/VSS (g g ⁻¹)	VSS/TSS (%)
			(%)					
This research ¹⁾	Primary	Rainy Season	50.33	7.54	35.26	6.87	1.45	61±3.2
		Dry Season	51.92	7.84	33.67	6.57	1.56	70±3.7
USA ²⁾	Primary		59.7	9.5	23.9	7.0	1.99	-
	Secondary		53.1	6.2	28.3	12.4	1.42	-

Note: 1) number of sample (n) = 14; 2) Rittman and McCarty (2000)

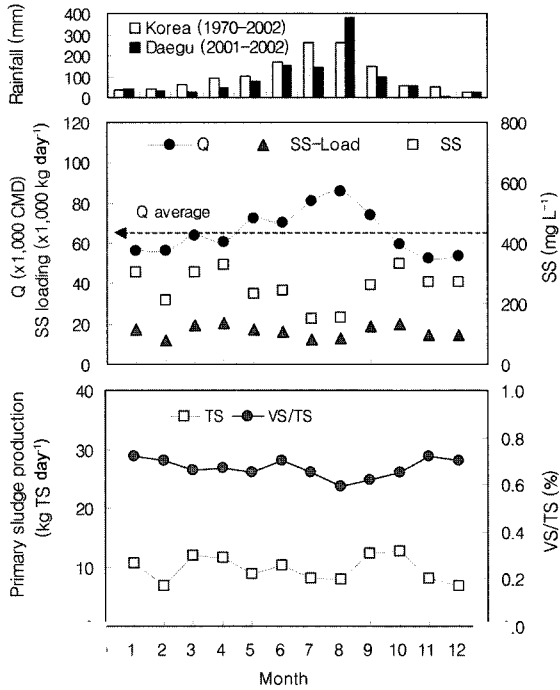


Fig. 2. Seasonal variation on production of municipal wastewater and sludge at N MWWTP (2001~2002, $Q_{ave} = 65,500 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$).

3.2. 회분식 발효시스템

Fig. 3은 회분식 발효시스템의 운전결과로써 다양한 온도 조건에서의 단위기질 중량당 생성된 용존성 유기물질의 누적량을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 고온의 온도조건은 가장 높은 가수분해특성($0.6 \text{ g SCOD g}^{-1} \text{ VSS}_{\text{COD}}$ 이상)을 보인 반면 20°C 와 35°C 에서는 별차이를 보이지 않았다. 모든 회분식 반응조에서 최적 체류시간은 5일 이었는데, 이 기간동안 전체 용존성 유기물질의 78~84%를 생산한 것으로 나타났다. Table 2에는 회분식 시스템에서 초기 5일을 기준으로 한 운전특성을 정리하였는데, 생산된 주요 유기산으로는 acetate, propionate, butyrate 및 valerate로 이는 모든 온도조건에서 유사하였고, acetate의 함량은 약 39~56%범위였다. 고온 조건의 회분식 발효조는 20°C 와 35°C 의 온도조건에서 보다 약 50% 가량 더 높은 가수분해 특성과 약 10% 낮은 산형성 특성을 보였다. 비록 고온의 운전조건하에서 유기물질을 유기산으로 전환시키는 산형성속도는 다소 낮은 경향을 보였으나 유입기질의 중량을 기준으로 한 산형성 특성은 고온의 조건하에서 약 $0.44 \text{ g VFACOD g}^{-1} \text{ VSS}_{\text{COD}}$ 으로 가장 높게 나타났다. 이러한 결과는 가수분해 및 산형성 단계의 통합 공정의 반응특성은 고온의 온도조건하에서 보다 더 효과적이라는 것을 의미한다. 일반적으로 슬러지의 가수분해와 산형성 반응은 1차 반응속도 식으로 표현된다.^{4,27)} 이를 기준으로 할 때 가수분해 속도상수(K_{hd})는 20°C , 35°C 및 55°C 의 경우 각각 0.119 day^{-1} , 0.236 day^{-1} 및 0.282 day^{-1} 로 평가되었으며, 산형성 속도상수(K_{acid})는 20°C , 35°C 및 55°C 의 경우 각각 0.341 day^{-1} , 0.332 day^{-1} 및 0.190 day^{-1} 으로 나타났다.

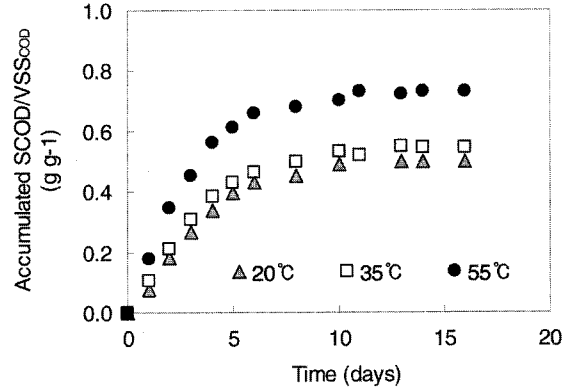


Fig. 3. Accumulated SCOD elutriation versus time in batch system.

Table 2. Performance for initial 5 days in batch system

Temp. (°C)	Relative acid composition ratio (g/g Acetate)						VFA _{COD} /SCOD (%)	SCOD/VSS _{COD} (g g ⁻¹)	VFA _{COD} /VSS _{COD} (g g ⁻¹)
	Formate	Acetate	Propionate	Butyrate	Valerate	Lactate	(%)	(g g ⁻¹)	(g g ⁻¹)
20	n.d.	1.0	0.4	0.3	0.1	n.d.	97.4	0.40	0.39
35	n.d.	1.0	1.0	0.2	0.4	n.d.	92.6	0.43	0.40
55	n.d.	1.0	0.7	0.1	0.4	n.d.	73.1	0.60	0.44

Note : n.d., not detected

3.3. 반연속식 발효시스템

Fig. 4는 pH, 온도 및 계적질 특성등에 따른 반연속식 발효시스템의 종합적인 운전결과를 COD 전환분율로 표현하여 나타내었는데, 이러한 결과는 모두 각 운전조건 하에서 정상상태 운전기간동안의 운전특성을 기준으로 한 것으로 정상상태 운전은 유출수의 수질변화가 평균 10% 내외인 경우로 정의하였다.

발효조의 운전결과는 계절적인 슬러지 특성변화에 상당한 영향을 받는 것으로 나타났다. 건기시기의 결과와 비교할 때 우기계절에는 pH 9의 알칼리 조건에서조차도 VSS(COD 기준)분해도는 약 50% 정도로 낮게 나타났다. 이러한 결과는 앞선 슬러지 특성에서도 나타난 바와 같이 우기계절에 발생된 슬러지의 난분해성 고형물 함량이 높았기 때문일 것이다. 또한 높은 알칼리성 조건(pH 11)은 중성의 경우와 비교하여 약 2배의 가용화 반응을 일으킨 것으로 나타났다. 또한 가용화된 유기물질은 pH 6.6~7.0의 중온의 조건하에서 메탄으로 전환되는 경향을 보였다. 즉, 알칼리 조건으로 유지되는 고온의 경우가 가장 높은 슬러지의 가용화 반응을 일으키는 것으로 나타났으며, 이는 건기나 우기계절 모두에서 동일한 경향 이었다. 그러나 높은 알칼리성 조건은 가용화된 용존성 유기물질을 유기산으로 전환하기에 부적절하였으며, 따라서 본 실험결과 pH 9로 유지되는 고온의 운전조건이 슬러지의 산발효를 위한 최적의 조건이었다.

Fig. 5는 반연속식 발효시스템의 운전결과 평가된 가수분해 및 산형성을 그리고 부수적으로 발생하는 영양소 유출을 나타내었다. 각 반응속도는 다음과 같은 기준으로 산정된 것이다.

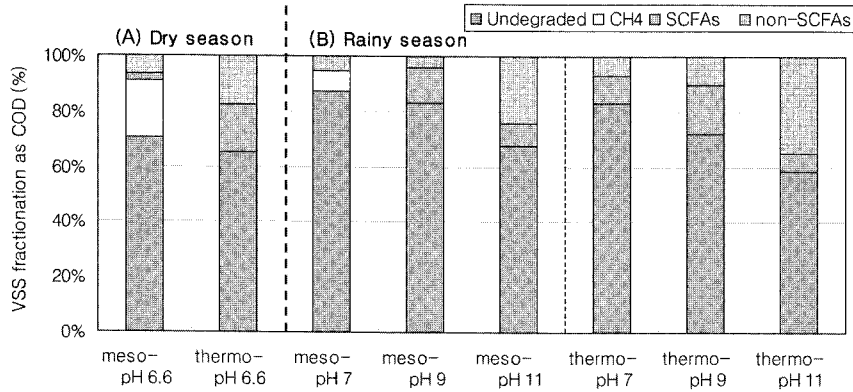


Fig. 4. Hydrolysis/acidogenesis in semi-continuous system (SRT = 5 days).

가수분해율 : g COD of VSS solubilized/g VSS (as COD) in the substrate/day
 산형성율 : g COD of all measured organic acids/g soluble COD total/day
 영양소 용출율 : g N or P of VSS solubilized/g VSS (as COD) in the substrate/day

본 분석결과 중온의 경우보다 고온 발효조의 경우가 가수분해율은 더 높았으나 산형성율은 더 낮게 나타나는 경향을 보여주었다. 이는 분명히 가수분해 단계가 이 공정에서의 율속단계임을 의미하며, 또한 슬러지의 특성에 대한 계절적 영향은 특히 가수분해 단계에 크게 작용하는 반면 산형성 단계에는 독립적임을 알 수 있다.

발효 부산물로서 영양소인 질소와 인의 용출율은 운전조건에 따라 다소 상이한 결과를 보였다. 건기의 경우와 비교하여 우기계절의 경우 상당히 낮은 용출율을 보였다. 중온의 온도조건에 비하여 고온 반응조의 경우 질소 용출율은 더 높았던 반면, 인의 용출율은 비슷한 경향을 보였다.

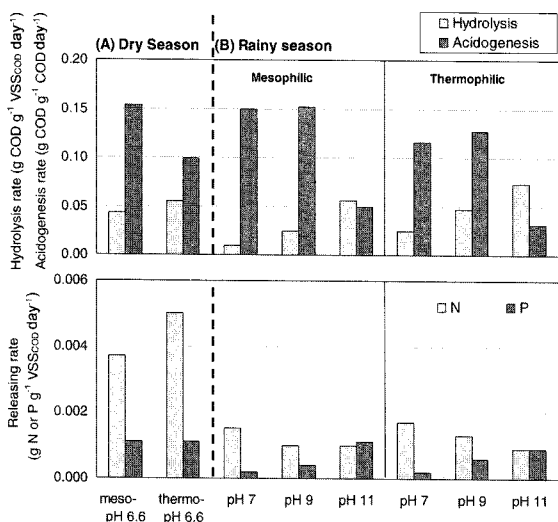


Fig. 5. Hydrolysis/acidogenesis rate and nutrient releasing rate in semi-continuous system (SRT = 5 days).

Table 3. Relative acid composition ratio in the semi-continuous system (SRT = 5 days)

Temp. (°C)	Designated pH	Relative acid composition ratio (g/g Acetate)					
		Formate	Acetate	Propionate	Butyrate	Valerate	Lactate
35	6.6*	n.d.	1.0	1.63	0.25	n.d.	n.d.
	7	n.d.	1.0	0.50	0.32	n.d.	n.d.
	9	n.d.	1.0	0.37	0.28	n.d.	n.d.
	11	0.01	1.0	0.40	0.35	n.d.	n.d.
55	6.6*	n.d.	1.0	1.24	0.21	0.08	n.d.
	7	n.d.	1.0	0.20	0.14	n.d.	0.08
	9	n.d.	1.0	0.23	0.16	n.d.	0.01
	11	0.02	1.0	0.35	0.24	n.d.	n.d.

Note : n.d., not detected; *, uncontrolled pH condition

며, 또한 두 온도조건에서 높은 알칼리성 조건의 질소 용출율은 낮았던 반면 인의 용출율은 상대적으로 높게 나타났다. 이는 알칼리성 조건이 발효공정동안의 암모니아 탈기와 화학적 침전 등의 복합적인 반응에 의해 영양소의 손실을 초래하는 잠재적인 가능성 때문으로 판단된다.

Table 3은 반연속식 발효조의 유출수내 유기산의 구성성분을 나타내고 있는데, 생성된 acetate와의 상대적인 비율로 표현되어 있다. 생성된 유기산은 모든 조건에서 대부분 acetate, propionate 및 butyrate이었다. 이 중 acetate함량은 약 35~72%로 pH 9에서 가장 높게 나타났는데, 중온과 고온의 경우 각각 60.6%와 72%이었다. 이는 슬러지로부터 acetate 발효의 측면에서도 고온과 pH 9의 운전조건이 최적이라는 것을 의미한다.

Table 4에는 본 연구결과와 문헌의 연구자료들을 종합적으로 비교하여 나타내었다. 이러한 연구결과들을 비교분석할 때, 하수슬러지 발효조는 pH 9와 고온의 운전조건하에서 최대의 효능을 발휘할 수 있는 것으로 판단된다. 즉, 이러한 조건하에서 유기산 생성특성은 0.18 g VFA_{cod}/g VSS_{cod}과 63.3% of VFA_{cod}/COD fraction이었으며, 발효부산물인 영양소의 용출율은 0.006 g N/g VSS_{cod} 및 0.003 g P/g VSS_{cod}으로 나타났으나 이러한 자료는 우기계절을 기준으로 한 것으로 건기시기에는 더 높은 효율을 기대할 수 있을 것이다.

Table 4. Comparison of hydrolysis/acidogenesis of municipal sludge

Temp (°C)	HRT (day)	pH	TS (%)	VS /TS	VFA or COD Production				N-release (g N g ⁻¹ VSS _{cod})	P-release (g P g ⁻¹ VSS _{cod})	Reference
					(gVFA _{cod} g ⁻¹ VSS _{cod})	(g SCOD g ⁻¹ VSS _{cod})	(g VFA _{cod} g ⁻¹ VS fed)	VFA _{cod} /SCOD(%)			
20	5	-	1~4%VS	-	0.07~0.11	-	-	72-77	-	-	Lilly et al. ⁴⁾
14~23	2~6	-	0.43~3.2	-	-	-	0.05~0.2	-	(0.05~0.14)	(0.06~0.09)	Skalsky & Daigger ²⁸⁾
18~28	6	-	0.49~5.6	-	0.05~0.11	-	-	-	0.005~0.018	0.002~0.008	Banister et al. ^{1,29)}
<20	9	-	-	-	-	0.16	-	-	-	-	Hatziconstantinou et al. ³⁰⁾
35	5	6.6	3.8	0.67	0.02*	0.07	0.04	28.2	0.019	0.005	This research (Dry season)
35	5	6.6	3.8	0.67	0.17	0.34	0.15	49.6	0.025	0.006	
35	5	7	2.9	0.59	n.a*	0.06	n.a	n.a	0.006	0.008	This research (Rainy season)
		9	2.9	0.59	0.13	0.17	0.18	75.8	0.003	0.002	
		11	2.9	0.59	0.08	0.32	0.12	25.2	0.005	0.005	
55	5	7	2.9	0.59	0.10	0.18	0.16	58.0	0.009	0.001	This research (Rainy season)
		9	2.9	0.59	0.18	0.28	0.32	63.3	0.006	0.003	
		11	2.9	0.59	0.06	0.41	0.11	14.5	0.004	0.004	

Note : * methane production was observed; n.a., not available; (), based on VFA instead of VSSCOD

본 연구에서 기질로 사용한 슬러지내에는 약 $1.2 \sim 2.0 \times 10^6$ cfu/100 mL의 분변성 대장균이 관찰되었다. 고성능 슬러지 발효조의 운전결과 모든 운전조건인 경우 폐슬러지내에 이러한 병원성 미생물이 관찰되지 않았으나, pH 6.6과 7로 운전되는 중온 발효조의 경우에는 약 $3 \sim 4 \times 10^3$ cfu/100 mL의 분변성 대장균이 측정되었다. 이러한 결과는 유기산 생산을 위해 최적의 운전조건(pH 9 및 고온)으로 운전되는 고성능 발효조의 경우는 그 운전특성상 병원성균이 전혀 없는 안정한 생물고형물을 생산할 수 있다는 것을 의미한다.

또한 전체 반응조의 운전에서 슬러지 상은 초기기질 유입단계를 제외하고는 총 반응조 높이의 41~44% 정도로 안정된 슬러지 계면층을 보였는데, 이는 중온 및 고온의 온도조건 모두 유사한 경향이였다. 이러한 반응조의 운전특성은 기존의 완전혼합형 발효조의 주요 단점인 높은 고형물 유출특성을 극복할 수 있다는 것을 의미한다. 전체 운전기간동안 발효조로부터 유출되는 부유물질(SS)농도는 중온과 고온의 경우 각각 $50 \sim 470$ mg SS L⁻¹와 $124 \sim 580$ mg SS⁻¹의 범위로 유지되었다.

3.4. 실규모에서의 물질수지 및 비용평가

고성능 슬러지 발효조의 적용가능성을 검토하기 위해 $158,880$ m³ day⁻¹의 처리용량을 가진 실규모 하수처리장을 대상으로 물질수지를 수행하였다. 그 기준은 하수처리장 1차슬러지의 특성이 비교적 열악한 우기계절기준으로 설정하였는데, 그 결과가 Table 5에 나타내었다. 이 시기의 경우 대상 하수처리장의 평균 유입농도는 BOD 128 mg L⁻¹, COD 240 mg L⁻¹, SS 105 mg L⁻¹, N 30.2 mg L⁻¹ 그리고 P 2.9 mg L⁻¹이였다. 이때 1차슬러지 발생량은 평균 760 m³/day (4.7 m³ 1,000 m³ of sewage)이였으며, 총 고형물 농도와 VS함량은 각각 23.8 g L⁻¹ 및 65%이였다.

또한 유입하수내 유기산의 함량은 전체적으로 약 5 mg L⁻¹ 이하의 매우 낮은 값을 보였다.

Table 5에서 보이는 것처럼 pH 11의 고온 발효조가 가장 많은 SCOD를 생산할 수 있는 것으로 나타났으나, 유기산 생성 측면에서는 pH 9의 조건이 효과적이었다. 슬러지 발효조의 최적 운전조건하에서 용존성 유기물질은 약 4,920 kg COD day⁻¹으로, 이는 1차슬러지 1 m³ 당 COD 생산량 약 6.5 kg에 해당하는 값이다. 또한 유기산 및 비유기산(non-VFA) 생산량은 각각 약 3,110 kg VFA_{cod} day⁻¹ 및 1,800 kg COD day⁻¹로, 이는 1차슬러지 1 m³ 당 4.1 kg의 VFA_{cod}와 2.4 kg의 non-VFA_{cod}에 해당한다. 결국 고성능 발효조의 운전에 따라서 생물반응조로 유입되는 유입수 RBCOD의 수질은 약 31 mg COD L⁻¹ 이상 향상될 것이며, 이중 VFAs농도는 20 mg VFA (as COD) L⁻¹ 이상 증가할 것으로 판단된다. 발효부산물로서 발생하는 영양소 용출에 의한 유입 하수의 수질변화는 0.7 mg N L⁻¹ 및 0.3 mg P L⁻¹로 미미한 것으로 나타났다.

Table 5. Mass balance of fermenter in full-scale MWWTP (based on rainy season, Q = 158,880 m³ day⁻¹)

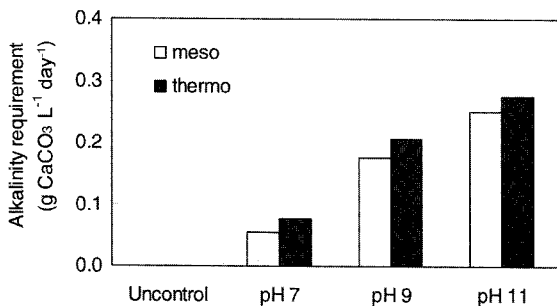
Temperature (°C)	35		55	
	9	11	9	11
Designated pH				
COD production(kg COD day ⁻¹)	2,965	5,488	4,916	7,154
(kg COD m ⁻³ sewage)	0.019	0.035	0.031	0.045
(kg COD m ⁻³ PS)	3.90	7.22	6.47	9.41
VFAs production(kg COD day ⁻¹)	2,247	1,383	3,112	1,037
(kg COD m ⁻³ sewage)	0.014	0.009	0.020	0.007
(kg COD m ⁻³ PS)	2.96	1.82	4.09	1.36
N-release (kg N day ⁻¹)	52	86	104	69
(kg N m ⁻³ sewage)	0.0003	0.0005	0.0007	0.0004
(kg N m ⁻³ PS)	0.068	0.114	0.140	0.091
P-release (kg P day ⁻¹)	35	86	52	69
(kg P m ⁻³ sewage)	0.0002	0.0005	0.0003	0.0004
(kg P m ⁻³ PS)	0.045	0.116	0.070	0.092

Note : PS, primary sludge

Table 6. Cost estimation in full-scale plant (based on rainy season, $Q=158,880 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$)

Temperature (°C)	35		55	
Designated pH	9	11	9	11
SCFAs production (\$ as HAc · 10 ³ m ³ sewage)	42.21	27.14	60.30	21.11
Non-SCFAs production (\$ as M-OH · 10 ³ m ³ sewage)	2.82	14.66	6.20	21.43
Alkali requirement (\$ as NaOH · 10 ³ m ³ sewage)	0.012	0.018	0.014	0.019
Cost benefits except for energy requirement (\$ · 10 ³ m ³ sewage)	45.02	0.42	66.49	0.61
(\$ · kg ⁻¹ VSS _{cod} PS)	41.78	0.37	42.52	0.38

Note : HAc, Acetic acid; M-OH, Methanol; PS, primary sludge; 1\$ = 1,000 Korean Won

**Fig. 6.** Alkalinity requirement for designate pH

발효조의 적용에 따른 경제성 평가결과가 Table 6에 제시되어 있는데, 여기서 VFAs, non-VFAs 그리고 공급되는 alkali의 비용평가는 각각 상업적으로 판매되고 있는 acetate와 methanol 그리고 NaCl을 기준으로 한 것이다. 목표 pH를 유지하기 위한 알칼리 요구량은 Fig. 6의 실험실 운전결과를 기준으로 하였다. 본 평가에서 목표 온도를 유지하기 위한 에너지 소요량은 고려하지 않았는데, 이는 설계와 건설조건에 의하여 크게 영향을 받을 수 있기 때문이며, 또한 이러한 평가에는 병원성균이 없는 안전한 고형물 즉, A급 생물고형물의생산에 따른 추가적인 비용절감효과 역시 포함하지 않았다. 이러한 조건 하에서 발효산물의 생산에 따른 최대의 경제성은 pH 9의 조건으로 운전되는 고온 발효조의 경우로 발생하수 1,000 m³당 약 \$67 (1\$ = 1,000 Korean Won으로 가정)으로 평가되었다. 이러한 평가는 하수슬러지의 발생특성이 상대적으로 열악한 우기계절을 기준으로 한 것이므로 건기계절에는 더 우수한 경제성을 기대할 수 있을 것이다. 따라서 이러한 새로운 고성능 슬러지 발효조는 도시하수슬러지의 처리와 자원회수 두가지 모두의 측면에서 지속발전적인 처리공정이 될 것이다.

4. 결론

1) 도시하수 1차슬러지의 발생과 그 특성(유기물 분율과 농도 등)은 계절적 변화에 따라 영향을 받는 것으로 나타났는데, 특히, 7월에서 9월에 이르는 우기동안 그 특성은 상당히 변화하였다. 슬러지 발효조 공정에서 중요한 운전요

소인 슬러지의 COD/VSS 및 VSS/TSS비는 건기의 경우 각각 1.56 g g⁻¹ 및 70±3.7%였고, 우기의 경우에는 각각 1.46 g g⁻¹ 및 61±3.2%로, 이러한 계절적 특성은 슬러지 발효조의 운전성에 영향을 미칠 것이다.

2) 중성의 pH를 가진 다양한 온도의 회분식 세정 발효조의 운전결과 고온의 발효조에서 가장 높은 가수분해 특성이 관찰되었다. 특히 고온의 온도조건 하에서 용존성 유기물의 유기산 전환속도가 다소 낮게 나타났으나, 유입기질의 유기물(VSS)기준으로 표준화된 산형성 특성은 고온의 온도조건에서 가장 높게 나타났다. 회분식 실험에서 최적 체류시간은 5 days이었다.

3) 반연속식 발효조의 운전결과 슬러지의 가수분해특성은 슬러지 특성에 대한 계절적 변화에 크게 영향을 받는 반면 산형성 특성은 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 가수분해와 산형성을 모두를 위한 최적의 운전특성은 pH 9로 운전되는 고온의 발효조에서 얻을 수 있었는데, 우기기준으로 VFAs 생산량 및 회수분율은 각각 0.18 g VFA_{cod}/g VSS_{cod} 및 63.3% of VFA_{cod}/COD이었으며, 발효부산물로써 질소와 인의 용출율은 각각 0.006 g N/g VSS_{cod} 및 0.003 g P/g VSS_{cod}이었다. 이러한 최적의 운전조건하에서 폐슬러지내 분변성 대장균은 전혀 관측되지 않았는데, 이는 본 공정의 부산물로서 병원성균이 없는 안전한 생물고형물을 생산할 수 있음을 의미한다.

4) $Q = 158,880 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 용량의 실규모 처리장을 대상으로 한 적용성 평가결과 고성능 발효조의 운전에 따라서 생물반응조로 유입되는 유입수 RBCOD의 수질은 약 31 mg COD L⁻¹ 및 20 mg VFA (as COD) L⁻¹ 이상 향상되며, 영양소 용출에 의한 유입 하수의 수질변화는 0.7 mg N L⁻¹ 및 0.3 mg P L⁻¹로 미미하게 나타났다. 경제성 평가결과 에너지 비용을 제외할 경우 발생하수 1,000 m³당 약 \$67 (1\$ = 1,000 Korean Won으로 가정)의 효과가 있는 것으로 평가되었다. 이러한 평가는 하수슬러지의 발생특성이 상대적으로 열악한 우기계절을 기준으로 한 것으로 건기계절에는 더 우수한 경제성이 기대된다.

참고문헌

- Banister, S. S. and Pretorius, W. A., "Optimization of primary sludge acidogenic fermentation for biological nutrient removal," *Water SA*, **24**(1), 35~41(1998a).
- Barnard, J. L., "Design of Prefermentation Processes, In *Design and Retrofit of Wastewater Treatment Plants for Biological Nutrient Removal*," Randall, C. W., Barnard, J. L., Stensel, H. D., (Eds), *Water Quality Management Library*, **5**, 85(1992).
- Wentzel, M. C., Ekama, G. A., Dold, P. L., Loewenthal, R. E., and Marais, G.v.R., "*Biological excess phosphorus removal in activated sludge systems*," Research Report W59, Dept. of Civil Engineering, University of Cape

- Town, Rondebosch 7700, South Africa(1988).
4. Lilley, I. D., Wentzel, M. C., Loewenthal, R. E., and Marais, G.v.R., "Acid fermentation of primary sludge at 20°C," Research Report W64, Dept. of Civil Engineering, University of Cape Town, Rondebosch 7700, South Africa(1988).
 5. Randall, C. W., Personal communication(2003).
 6. Pitman, A. R., "Management of biological nutrient removal plant sludges-change the paradigms?," *Water Res.*, **33**(5), 1141~1146(1999).
 7. Moser-Engeler, R., Kuhni, M., Bernhard, C., and Siegrist, H., "Fermentation of raw sludge on an industrial scale and applications for elutriating its dissolved products and non-sedimentable solids," *Water Res.*, **33**(16), 3503~3511(1999).
 8. Pitman, A. R., Lotter, L. H., Alexander, W. V., and Deacon, S. L., "Fermentation of raw sludge and elutriation of resultant fatty acids to promote excess biological phosphorus removal," *Water Sci. Technol.*, **25**(4-5), 185~194(1992).
 9. Rittmann, B. E. and McCarty, P. L., "Environmental Biotechnology-Principles and Applications," McGraw-Hill (2001).
 10. Kim, M. I., Ahn, Y. H., Gomec, C. Y., and Speece, R. E., "Anaerobic digestion elutriated phased treatment (ADEPT): the role of pH and nutrient," *Proc. of 9th World Congress on Anaerobic Digestion 2001*, Antwerp, Belgium, 2-6 Sept., **1**, 799~804(2001).
 11. Ahn, Y. H., Bae, J., Park, S., and Min, K., "Anaerobic digestion elutriated phased treatment of piggery waste," *Water Sci. Technol.*, **49**(5-6), 181~189(2004).
 12. Eastman, J. A. and Ferguson, J. F., "Solubilization of particulate organic carbon during the acid phase of anaerobic digestion," *J. WPCF*, **53**, 352~366(1981).
 13. Gomec, C. Y., Kim, M., Ahn, Y. H., and Speece, R. E., "The role of pH in mesophilic anaerobic sludge solubilization," *J. Environ. Sci. & Health*, **A37**(10), 1871~1878(2002).
 14. Kim, M., Gomec, C. Y., Ahn, Y. H., and Speece, R. E., "Hydrolysis and acidogenesis of particulate organic material in mesophilic and thermophilic anaerobic digestion," *Environ. Technol.*, **24**(9), 1183~1190(2003).
 15. Van Lier, J. B., Tilche, A., Ahring, B. K., Macarie, H., Mileta, R., Dohanyos, M., Hulshoff Pol, L. W., Lens, P., and Verstraete, W., "New perspectives in anaerobic digestion," *Water Sci. Technol.*, **43**(1), 1~18(2001).
 16. Dinopoulou, G., Rudd, T., and Lester, J. N., "Anaerobic acidogenesis of complex wastewater: I. The influence of operational parameters on reactor performance," *Bio-tech. Bioeng.*, **31**, 958~968(1988).
 17. Buhr, H. O. and Andrews, J. F., Review paper, "The thermophilic anaerobic digestion process," *Water Res.*, **11**, 129~143(1977).
 18. Rimkus, R. R., Ryan, J. M., and Cook, E. J., "Full-scale thermophilic digestion at the West-Southwest Sewage Treatment Works," Chicago, Illinois, *J. Water Poll. Control Fed.*, **54**, 1447~1457(1982).
 19. Krugel, S., Nemeth, L., and Peddie, C., "Extended thermophilic anaerobic digestion for producing Class A Biosolids at the Greater Vancouver Regional District's Annacis Island Wastewater Treatment Plant," *Water Sci. Technol.*, **38**(8-9), 409~416(1998).
 20. US EPA, "Environmental Regulations and Technology: Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge Under 40 CFR Part 503," EPA/625/R-92/013, Washington, D.C.(1992, 2000).
 21. Schafer, P. L. and Farrell, J. B., Turn up the heat, *Water Environ. Technol.*, **12**, 27~32(2000).
 22. Shimp, G. F., Stukenberg, J. R., and Sandino, J., "The future of solids treatment?," *Water Environ. Technol.*, **12**, 35~39(2000).
 23. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 19th Ed. APHA, AWWA and WEF, Washington D.C.(1989).
 24. Buchauer, K., "A comparison of two simple titration procedures to determine volatile fatty acids in influents to wastewater and sludge treatment processes," *Water SA*, **24**(1), 49~56(1998).
 25. Korea Institute of Construction Technology, *Management of Municipal Wastewater Treatment Plants*, KICT 90-EC-111, Korea(1991).
 26. Ahn, Y. H. and Choi, H. C., "Municipal sludge management and disposal in South Korea: status and a new sustainable approach," *Water Sci. Technol.*, **50**(9), 245~253(2004).
 27. Batstone, D. J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S. V., Pavlostathis, S. G., Rozzi, A., Sanders, W. T. M., Siegrist, H., and Vavilin, V.A., "Anaerobic Digestion Model No.1," Scientific and Technical Report No.13, IWA publishing, London, UK(2002).
 28. Skalsky, D. S. and Daigger, G. T., "Wastewater solids fermentation for volatile acid production and enhanced biological phosphorus removal," *Water Environ. Res.*, **67**(2), 230~237(1995).
 29. Banister, S. S., Pitman, A. R., and Pretorius, W. A., "The solubilisation of N and P during primary sludge acid fermentation and precipitation of the resultant P," *Water SA*, **24**(1), 35~41(1998b).
 30. Hatziconstantinou, G. J., Yannakopoulos, P., and Andreadakis, A., "Primary sludge hydrolysis for biological nutrient removal," *Water Sci. Technol.*, **34**, 417~423(1996).