

Pilot scale 세정산발효를 이용한 하수 일차슬러지의 산발효

권구호 · 김시원 · 정용준* · 민경석⁺

경북대학교 환경공학과

* 부산가톨릭대학교 환경공학과

The Recovery of Carbon Source from Municipal Primary Sludge using Pilot Scale Elutriated Acidogenic Fermentation

Kooho Kwon · Siwon Kim · Yongjun Jung* · Kyungsok Min⁺

Department of Environmental Engineering, Kyungpook National University

* Department of Environmental Engineering, Catholic University of Pusan

요약

본 연구에서는 하수일차슬러지의 가용화 및 산발효를 위한 pilot scale 세정산발효공정의 운전 특성을 검토하였다. 하수일차슬러지의 가용화 및 산발효 특성을 평가하기 위해 SRT, 세정수 및 운전온도를 변화시켜 실험을 수행하였다. 세정산발효공정의 가용화율은 온도가 높을수록 증가하는 반면, 산생성율은 중온조건(35°C)이 고온조건(55°C)보다 높게 나타났다. VS 감량은 약 56%, 슬러지 부피감량은 약 93%까지 나타났다. 가용화측면에서 세정산발효공정의 최적운전조건은 pH 9, 35°C 및 SRT 5일이 적합 할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 산발효, 유기성폐기물, 하수일차슬러지, 가용화

Abstract

Pilot scale study was carried out to produce Volatile Fatty Acids with primary sludge from municipal wastewater treatment plant. An acid fermenter was operated at pH 9, 35°C, SRT of 3.5~4.25d, using a final effluent as elutriating water(Mode- I) and pH 9, SRT 5d, temperature of 35°C(Mode- II), 55°C(Mode- III), using a primarily treated water as elutriating water. Although solubilization rate was enhanced with the increase of temperature, the VFAs production rate was decreased. The VS reduction was shown approximately 56%, and the sludge volume reduction was 93%. The optimal conditions for solubilization was obtained at pH 9, 35°C and SRT of 5d.

Keywords : Acid Fermentation, Organic Waste, Sewage Primary Sludge, Solubilization,

1. 서 론

국내 하수처리장으로 유입되는 하수는 질소와 인의 농도에 비해 유기물 부하가 낮으므로 BNR(Biological Nutrient Removal)공정에서 전자공여체로서의 탄소원이 부족하여 영양염류 제거에 한계를 가진다. 즉, BNR공정에서 RBDCOD(Readily Biodegradable COD)는 영양염류의 제거에 있어 중요한 인자로, 영양염류의 제거효율을 높이기 위해서는 외부탄소원 주입이 필요하게 된다(Canziani et al., 1995). 따라서 메탄올, 에탄올, 아세테이트 등이 외부탄소원으로 이용되고 있으나, 추가적인 운

영비문제가 발생하므로 이를 해결하는 한 방법으로 하수처리공정 내에서의 탄소원 회수에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

내부탄소원을 회수하는 한 방법으로 하수일차슬러지의 산발효 공정이 이용되는데, 이는 일차슬러지의 VS(Volatile Solid)를 외부탄소원으로 이용 가능한 VFAs(Volatile Fatty Acids)로 전환하고자 하는 것이다. 산발효 미생물의 활성도는 pH 5.5~6.5에서, 중온미생물인 경우 35~40°C에서 고온미생물인 경우 50~55°C에서 최대를 보이나, 일반적으로 산발효 반응기는 실온에서 운영되어 아주 소량의 메탄이 생성되도록 하여 VFAs가 축적

* corresponding author

E-mail: ksmin@knu.ac.kr

Tel: 053-950-6581 Fax: 053-959-7734

되도록 한다(Skalsky and Daigger, 1995). Park et al. (2004)은 하수일차슬러지의 산발효에서 별도의 세정수를 사용하여, 생성된 유기산을 메탄으로 전환되기 이전에 세정유출시킴으로써, 탄소원 생산에 대한 효율을 더욱 향상시킬수 있다고 하였다. 또한 가수분해과정에서 산처리는 고형성분의 가용화에 거의 효과가 없었으나, 알카리로 NaOH 주입량을 증가할수록 COD 가용화율이 증가하고 고형물 제거도 증가한다(Schell. et al., 1998). 또 Skalsky and Daigger(1995)에 따르면 bench-scale 반응기에서의 VFA 수율과 full-scale 반응기에서의 수율은 각각 0.05와 0.3 g VFAs produced/g VSfed로 큰 차이를 나타내었다고 보고하였다. Kwon et al. (2006)은 SBR공정의 질소 및 인 제거효율을 향상시키기 위해 음식물쓰레기의 세정산발효액을 외부탄소원으로 이용한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 하수일차슬러지를 기질로, 최종 방류수와 1차 처리수를 세정수로 사용하는 pilot-scale 세정산발효공정을 구성한 후, Park et al. (2004)이 제시한 세정산발효의 적정 pH인 9에서 35°C와 55°C의 온도 변화에 따른 산발효 특성을 평가하였으며, BNR공정에 이용 가능한 VFAs를 생산하기 위한 최적의 운전조건을 도출하였다.

2. 연구방법

2.1 실험장치

본 실험에 사용된 pilot scale의 세정산발효 실험 장치는 Fig 1에 나타내었다. 유효용적이 3.12 m³인 반응조에 일차슬러지를 기질로 하부에 주입하였다. 세정수를 상부에 채운 후 반송펌프를 이용하여 하부의 슬러지층으로 보내어 생성된 가수분해·산발효 산물을 하루 동안 upflow로 세정 시킨 후 유출시키는 방식으로 운전하였다. 내부와 외부의 공기를 차단하기 위해 반응조를 밀폐시켰으며, 교반기를 이용하여 혼합하였다. pH 및 온도는 pH meter와 온도센서를 이용하여 조절하였고, 슬러지층

의 온도를 일정하게 유지시키기 위해 보일러 온수를 이용하였다. pH조정은 고강 NaOH(95%)를 이용하였다. 발생되는 가스를 포집하기 위하여 상부에 밸브를 설치하여 가스 포집기에 연결하였다.

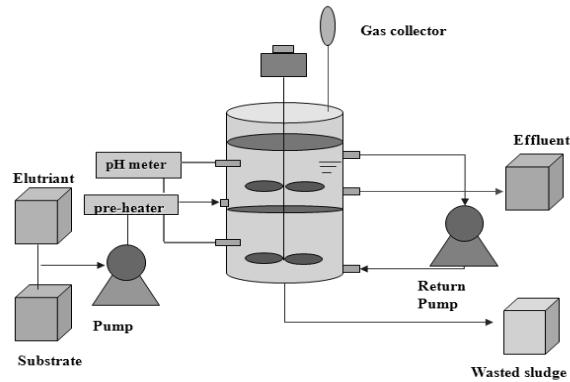


Fig. 1. Schematic of a pilot scale acid elutriation fermenter.

2.2 운전조건 및 방법

반응조 하부에 기질을 채우고 상부에 세정수를 넣은 후, 세정수를 하수슬러지층으로 보내어 하루 동안 세정시킨 후 유출하는 semi-batch방식으로 운전하였다. 일차슬러지를 이용한 회분식 세정산발효의 최적조건을 구하기 위해 온도 및 pH의 영향과 고형물 체류시간에 대해 연구한 Park et al. (2004)의 연구에 따르면, 세정산발효의 최적조건은 기질의 pH 9, 온도 35°C, SRT 5일이라고 하였다. 따라서 본 실험에서는 Park et al. (2004)의 연구결과를 토대로 Table 1과 같은 운전조건으로 운전하였다.

슬러지는 0.313 m³/d로 주입되었으며, 세정수는 운전 조건에 따라 하수처리장 최종방류수 또는 1차 처리수를 각각 1.2 m³/d 주입하였고, 산발효조 주입 전 저류조에서 기질과 세정수를 pH 9로 조절한 이후 예열기를 거쳐 온도에 의한 반응조 내의 영향을 최소화시켰다.

Table 1. Operating condition of acid elutriation fermenter

Mode \ Item	Substrate			Elutriating water	Elutriating rate (L/min)
Mode	pH	Temperature(°C)	SRT(d)		
1	9.0	35	3.5-4.25	effluent	1.0
2	9.0	35	5	primarily treated water	1.5-2.0
3	9.0	55	5	primarily treated water	2.0

2.3 분석방법

유입기질과 세정수, 폐슬러지 및 유출수에 대하여 온도, pH, TS, VS, TCODcr, SCODcr, TKN, NH_4^+ -N, TP, PO_4^{3-} -P, TSS, VSS 및 VFAs(Volatile Fatty Acids)를 분석하였다. VFAs(Volatile Fatty Acids)는 UV 검출기와 유기산 분석 컬럼(Aminex HPX-87H, Bio-Tad, Inc., U.S.A)이 장착된 HPLC(Shimazu 모드 LC-10AD, Japan)로 측정하였다. 시료 전처리는 3,000rpm으로 20분 동안 원심분리시킨 후, 상등수를 채취하여 0.45 μm 여과지(Micron Separations, Inc.)로 여과한 후 측정하였다. 가스성분의 경우 유량은 습식 가스미터(W-NK형)를 사용하여 측정하였고, 성상분석은 TCD 검출기와 silica gel로 충전된 칼

럼이 장착된 gas chromatograph (Tremetrics Model 9000, USA)로 측정 하였다. 그 외의 분석 항목은 Standard methods(APHA, 2005)에 준하여 실험하였다.

2.4 유입기질

본 연구에 사용된 기질의 성상은 세가지 모드별로 Table 2에 평균값을 각각 나타내었다. 일차슬러지는 D광역시 B하수처리장에서 1차침전지의 슬러지 유출라인에서 채취하였고, 세정수로 사용된 최종방류수와 1차 처리수는 각각 최종침전지 유출라인과 1차침전지 유출라인에서 채취하였다. 일차슬러지의 성상은 하수처리장의 유입수 성상 및 운영변화에 따라 각 모드별로 운전기간동안 변화를 나타냈다.

Table 2. Characteristics of primary sludge in pilot scale test

Item Mode	pH	TS	VS/TS	TCOD	SCOD	TKN	NH_4^+ -N	T-P	S-P
1	6.0	19,705	62.3%	22,264	2,135	582	50.5	250	22.4
2	6.0	22,354	67.0%	24,417	2,231	935	96	307	48.1
3	6.1	24,076	73.5%	24,535	1,700	948	86.5	299	39.5

Note) unit : mg/L except pH.

3. 결과 및 고찰

3.1 가용화율 및 산생성을

Fig. 2에 각 모드별의 가용화율과 산생성을 나타내었다. 각 모드에서 안정화 상태의 가용화율과 산생성을의 평균값을 나타낸 것으로 이를 표현하는 방식은 여러

가지가 있다. 본 연구에서는 다음 식을 이용하여 구하였는데, 가용화율은 반응조로 유입되는 VS 총량 및 제거되는 VS 총량에 대한 생산된 SCOD의 양으로 표시하였다. 산생성을 또한 반응조 내로 유입되는 VS에 대한 VFAs 생산량과 반응조 내에서 제거되는 VS에 대한 VFAs 생산량으로 표시하였다. 여기서 VFAs는 COD로 환산하여 나타내었다.

● Solubilization rate

- ① $\text{gSCODprod./gVSfed.} = \{(g\text{SCODeff.} - g\text{SCODfed.})/d\} / (g\text{VSfed.}/d)$
- ② $\text{gSCODprod./gVSrem.} = \{(g\text{SCODeff.} - g\text{SCODfed.})/d\} / \{(g\text{VSfed.} - g\text{VSout.})/d\}$

● VFAs production rate

- ① $\text{gVFAsprod./gVSfed.} = \{(g\text{VFAseff.} - g\text{VFAsfed.})/d\} / (g\text{VSfed.}/d)$
- ② $\text{gVFAsprod./gVSrem.} = \{(g\text{VFAseff.} - g\text{VFAsfed.})/d\} / \{(g\text{VSfed.} - g\text{VSout.})/d\}$

가용화율은 모드 1, 2 및 3에서 유입되는 VS에 대해서는 각각 0.43, 0.64 및 0.87 gSCODprod./gVSfed.이었고, 제거되는 VS에 대해서는 각각 1.11, 1.45 및 1.56 gSCODprod./gVSrem.로 나타났다.

모드 1보다 모드 2의 값이 증가한 것은 기질의 VS함량의 증가와 세정수의 세정율 증가, SRT의 변화에 따른 것으로 판단된다. 모드 3은 모드 2의 운전조건에서 온도

를 35°C에서 55°C로 증가시킨 결과로써, 이때 주입된 기질의 VS함량이 모드 2보다 높았었고, 높은 운전온도로 인한 영향으로 입자상 물질들의 유기물 분해에 도달하는 시간이 짧아져 유기물의 가용화가 증대되어 나타난 결과로 해석된다.

산생성을은 가용화율과는 달리 모드 1, 2 및 3에서 증가하는 경향을 보이지 않았다. 오히려 모드 3에서 모드 2

보다 감소하였다. 각 모드별 산생성율은 유입되는 VS에 대해서는 각각 0.26, 0.55 및 0.47 gVFAsprod./gVSfed.이었고, 제거되는 VS에 대해서는 각각 0.65, 1.09 및 0.81 gVFAsprod./gVSrem.이었다.

모드 1보다 모드 2의 값이 증가한 것은 가용화율과 동일한 경향을 보이는 것으로 가용화가 증가한 만큼 산발효도 증가하기 때문으로 해석된다. 그러나 모드 3은 모드 1보다는 그 값이 증가하였지만, 모드 2보다는 오히-

려 감소하는 결과를 나타내었다. 이는 주입된 기질의 VS함량이 높았고, 온도 또한 35°C에서 55°C로 증가되어 가용화율은 증가되었지만 증가된 가용화율 만큼 산생성은 진행되지 않은 것으로 나타났다. 이는 기질의 변화와 온도에 따른 산생성 미생물의 활동 변화에 기인된 것으로 판단된다. Table 3에 각 모드에서의 산생성율을 나타내었다.

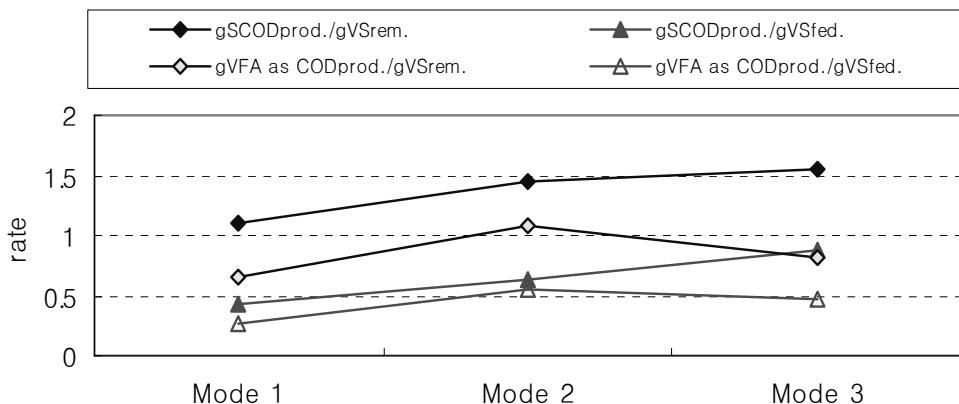


Fig. 2. Solubilization rate and VFAs production rate.

Table 3. VFAs production rate

Item	Mode	1	2	3
gVFAs prod./gVSfed.		0.26	0.55	0.47
gVFAs prod./gVSrem.		0.65	1.09	0.81

3.2 VS reduction

Fig 3은 세정산발효조의 안정화 상태에서 각 모드별 VS 감량을 나타내었다. 모드 1, 2의 경우 안정화시 VS 감량은 각각 평균 36.8%와 39.8%로 비슷한 결과를 나타내었고, 모드 3의 경우 약 55.6%의 높은 값을 나타내었다. 모드 1과 모드 2의 VS감량(%)이 비슷한 결과를 나타낸 것은 유입기질의 VS함량이 모드 2의 경우 67.0%로 모드 1의 62.3%보다 약간 높은 값을 가지고, SRT 또한 모드 1보다 조금 길어졌지만, 세정수로 사용된 일차처리 수가 방류수에 비해 산발효조내의 가수분해율을 저해하기 때문으로 판단된다. 모드 3의 경우는 기질의 VS함량이 73.5%로 상당히 높아졌고, 온도 또한 55°C로 높아져서 그만큼 기질의 가수분해가 용이해져 VS감량이 많이 진행된 것으로 해석된다.

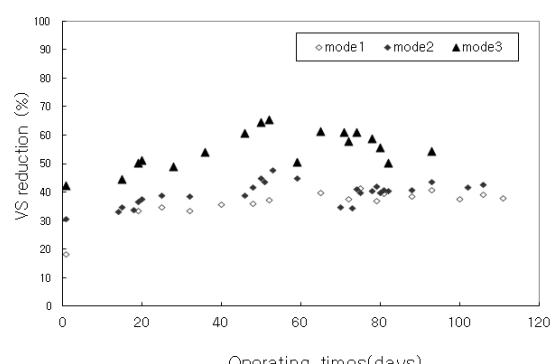


Fig. 3. VS reduction(%).

3.3 슬러지 부피감량

세정산발효는 슬러지의 VS감량과 더불어 일차슬러지

의 농축 효과도 동시에 진행한다. Fig. 4는 각 모드별 슬러지의 부피감량을 나타내었다. 슬러지 부피감량은 모드 1, 2, 3의 경우 각각 84%, 93%, 94%로 슬러지의 SRT와 세정율의 증가에 따라 증가하는 경향을 알 수 있다. 이는 SRT의 증가와 세정율의 증가로 인해 더 많은 슬러지의 농축효과와 VS 감량이 이루어진 결과로 나타났다. 이러한 슬러지의 VS 감량과 농축에 의해서 일어나는 일차슬러지의 부피감량은 농축조의 용량을 감소시키는 동시에 후속공정인 소화조의 용량도 감소시킬 수 있다는 점에서 하수처리장의 운영에 상당한 기여를 할 것으로 기대된다.

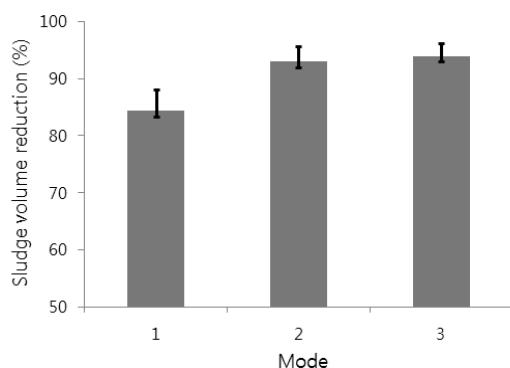


Fig. 4. Sludge volume reduction(%).

3.4 질소 및 인 용출율

세정산발효를 이용한 탄소원 회수의 경우 탄소원 회수와 함께 영양염류의 용출도 동시에 진행된다는 점이 단점으로 지적되고 있다. 이는 외부탄소원으로 주입 시 질소와 인 부하를 증가시킨다는 것으로 이를 제거하기 위한 후속공정이 필요할 것으로 판단된다. 모드 1, 2 및 3에서 질소의 용출율은 VS제거당 0.08, 0.12 및 0.11 gNH₄⁺-Nprod./gVSrem.로 나타났다. 인의 용출율은 모들 별로 0.01, 0.03 및 0.03 gPO₄³⁻-P prod./gVSrem.로 나타났다. 모드 1에 비해 모드 2와 모드 3에서 영양염류의 용출율이 더 높아졌는데, 이러한 결과는 기질의 성상변화와 세정율의 변화에 기인한 것으로 판단된다. 그리고 모

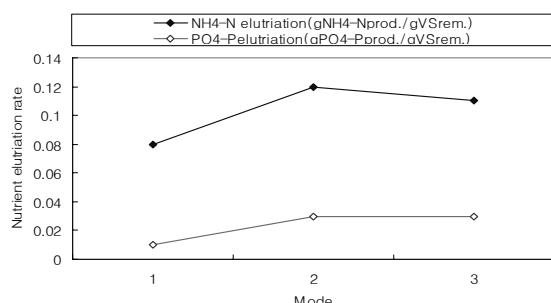


Fig. 5. Nutrient elutriation rate.

드 2와 모드 3은 비슷한 값을 나타내었는데, 이 값들은 매우 높은 값으로 산발효조의 pH가 높아 많은 양의 P가 침전되었다가 분해되어 용출되었으며, 또한 VS속에 존재하는 인 성분도 가용화가 진행되면서 함께 용출된 결과로 해석된다. Fig. 5에 각 모드별 질소 및 인 용출율을 나타내었다.

4. 결 론

본 연구는 하수처리장에서 발생하는 일차슬러지의 가용화 및 산발효를 위하여 pilot scale의 세정산발효 반응조를 운영하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 세정산발효공정은 중온(35 °C)보다 고온(55 °C)에서 가용화율이 높게 나타난 반면, 산생성율은 중온(35 °C)이 고온(55 °C)보다 높게 나타났다.
- 2) 가용화율은 최대 0.87 gSCODprod./gVSfed.과 1.56 gSCODprod./gVSrem., 산생성율은 최대 0.55 gVFAs prod./gVSfed., 1.09 gVFAsprod./gVSrem.의 값을 얻었다.
- 3) 세정산발효 공정을 통해 약 56 %의 VS 감량이 나타났으며, 슬러지 부피감량은 약 93%까지 나타났다.
- 4) 세정산발효에 의해 재용출되는 질소의 용출율은 최대 0.12 gNH₄⁺-Nprod./gVSrem.로 나타고, 인의 용출율은 최대 0.03 gPO₄³⁻-Pprod./gVSrem.이었다.

본 연구에서 검토한 운전조건에서의 결과를 종합해 볼 때, 산발효를 기준으로 할 경우 현장에 적용하기 위한 일차슬러지 세정산발효공정의 조건은 pH 9, 온도 35°C인 모드 2가 최적인 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- APHA, AWWA, WEF (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21th ed., Washington D.C..
- Canziani R., Pollice A. and Ragazzi M. (1995). Feasibility of using Primary-sludge Mesophilic Hydrolysis for Biological Removal of Nitrogen and Phosphorus from Wastewater, *Bioresource Technology*. 54(3), pp. 255-260.
- Kwon, K. H., Kim, S. W., Lee, M. J., and Min, K. S. (2006). Nitrogen and Phosphorus Removal using Elutriated Acids of Food Waste as an External Carbon Source in SBR, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 22(3), pp. 462-467. [Korean Literature]

- Park, S. M., Min, K. S., Ahn, Y. H. and Park, J. B. (2004). Elutriated Acidogenic Fermentation of Sewage Primary Sludge, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 26(2), pp. 219-225. [Korean Literature]
- Shell D., Nguyen Q., Tucker M. and Boynton B. (1998). Pretreatment of Softwood by Acid-catalyzed Steam Explosion followed by Alkali Extraction, *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 70-72(1), pp. 17-24.
- Skalsky D. and Daigger G. (1995). Wastewater Solids Fermentation for Volatile Acid Production and Enhanced Biological Phosphorus Removal, *WER*, 67(2), pp. 230-237.

- 논문접수일 : 2013년 01월 08일
 심사의뢰일 : 2013년 01월 09일
 심사완료일 : 2013년 03월 04일