

고온호기성 소화공정을 이용한 탄소원 회수에 관한 연구

이운석 · 김륜호 · 윤주환[†]

고려대학교 대학원 환경공학과

A Study on the Recovery of Carbon Energy by Thermophilic Aerobic Digestion

Yunseok Yi · Ryunho Kim · Zuwhan Yun[†]

Department of Environmental Engineering, Graduate School, Korea University

(Received 31 July 2007, Accepted 8 November 2007)

Abstract

A lab-scale thermophilic aerobic digestion (TAD) system was operated at 64°C with mixed primary and secondary sludges taken from a large wastewater treatment plant. The semi-continuously operated reactor at HRTs of 1, 3 and 6 days indicated that longer HRT could stabilize sludge organics and solids comparable to anaerobic digestion. It has been found that reduced HRT of 3 and 1 day produced the effluent with highly biodegradable soluble organics, indicating the possibility of energy recovery in TAD. No proof of biological nitrification was observed at thermophilic operating temperature of 64°C, while nitrogen removal seemed due to nitrogen exertion during the aerobic thermophilic cell synthesis as well as ammonia stripping.

keywords : Carbon recovery, Nitrogen conversion, Thermophilic aerobic digestion

1. 서론

우리나라 하수처리장들은 최근 건설되는 일부 경우를 제외하고는 대개 합류식 하수관거와 연결되어 있으며, 기존 관거의 노후화 등으로 침입수·침투수가 유입되는 경우 회석되어 하수의 농도가 낮아질 우려가 많다. 더욱이 1970년대 이래 하수처리장이 설치되기 이전에 설치된 정화조(septic tank)는 분뇨와 생활하수의 저류조 역할을 하면서 유기물의 분해에는 비교적 기능을 하나, 결과적으로 유기물 분해 정도에 비하여 질소는 많이 제거되지 않은 상태에서 관거로 유출된다. 한편, 산업폐수 역시 유기물 제거 위주로 처리한 후 관거로 유입되는 경우가 많은데 질소는 잘 제거하지 않는 형편이다. 결과적으로 우리나라 하수처리장의 유입수는 유기물 농도에 비하여 질소농도가 상대적으로 높은 경향을 가지게 되는데 결과적으로 불량한 C:N:P 비로 인하여 하수 내 영양소의 생물학적 제거에서 탄소원이 부족한 경우가 자주 발생하게 된다. 따라서 하수 처리 공정에서 생물학적 영양소제거공정 등에 사용할 수 있는 탄소원을 자체적으로 회수할 수 있는 방안에 대한 연구가 필요한 것으로 사료된다.

최근에는 하수처리장의 슬러지처리공정에서 탄소원을 회수 할 수 있는 방안에 대한 연구가 이루어지고 있다(Chu et al., 1998; Min et al., 2005; Staton et al., 2001). 하수처리장의 슬러지 처리시스템에서 탄소원을 회수하려면 혐기

성 혹은 호기성 슬러지 처리공정을 이용하는 방안을 들 수 있다. 우리나라 중·대규모 하수처리장은 슬러지 처리에서 대부분 혐기성소화공정을 사용하고 있으며 이 과정에서 CH₄(methane) 가스를 회수하고 있다. CH₄ 가스는 탈질에 이용할 수 있는 탄소원이나, 실용성이 낮은 기체의 형태이다. 슬러지 흐름에서 액상 탄소원의 회수는 혐기성 혹은 호기성 소화공정을 이용하는 방안이 있는데 다음 Table 1에서 각각의 장단점을 비교하였다.

하수처리장에서 혐기성 공정을 이용한 액상 탄소원 회수 공정은 대개 2상 혐기성 소화공정을 응용하여 산형성 단계에서 유기산(volatile fatty acids: VFA)을 회수하는 방안이다. 이 경우, 음식물 쓰레기 등을 병합처리하면 효율적인 방안으로 사료된다(Min et al., 2005).

혐기성 소화는 처리과정에서 CH₄ 가스가 생산되며 소화 후의 슬러지의 생산량이 적으며, 또한 장기간의 체류시간으로 처리시키기 때문에 슬러지나 폐수 내의 병원균을 죽일 수 있는 장점이 있다. 이러한 장점에 반하여 혐기성 소화의 단점으로는 비교적 체류시간이 장기적으로 소요되므로 건설비가 크며, 소화에 관여하는 미생물이 환경적 조건에 민감하다는 점을 들 수 있다.

반면, 호기성 소화는 냄새가 나지 않으며, 혐기성 소화보다 운전이 쉬우나, 슬러지의 탈수성이 불량하고, 포기에 의한 동력비 등의 단점이 있다(최, 1985). 지금까지 호기성 소화는 소규모 하수처리장에서 주로 사용되었으며, 대규모 처리장에서는 동력비 등의 문제로 잘 사용되지 않는 실정이었다.

호기성 소화는 운전 온도에 따라 중온 호기성 소화(Meso-

[†]To whom correspondence should be addressed.
envzyun@korea.ac.kr

Table 1. Comparison with the plan to liquefied carbon source recovery in a sewage sludge disposal plant

	Anaerobic sludge treatment system	Aerobic sludge treatment system
Merit	<ul style="list-style-type: none"> • Possibility to recover liquefied carbon energy of high concentration. • The process variation is easy. • The energy expenses are inexpensive. • Possibility to change a conditioning process to compound the existing anaerobic process, food waste adsorption treatment, and so on. • Possibility to improve dewatering in sludge. 	<ul style="list-style-type: none"> • Possibility to recover liquefied carbon energy of comparatively high concentration. • Be scentless. • Be easy comparatively to operate process. • The thermophilic process is effective, when autothermal process is applied. • Possibility to remove priority pollutants in sludge, when Thermophilic process is applied.
Demerit	<ul style="list-style-type: none"> • be disadvantageous in point of the nutrient removal, because of high nitrogen concentration that is recovered in liquefied carbon energy. • The process HRT is long, and it is necessary that reduce temperature effects, keeping warm, and so on. • Worry that the methanation process is ineffective, because of recovery of carbon energy. • Be hard to remove heavy metals in sludge. • Be hard to remove priority pollutants in sludge. 	<ul style="list-style-type: none"> • The energy expenses are expensive. • Be insufficient a technical examination for process. • Be hard to operate, when autothermal process is applied. • Be hard to remove heavy metals in sludge. • Worry over bad dewatering in the last sludge.

philic aerobic digestion: MAD)와 고온 호기성 소화(Thermophilic aerobic digestion: TAD)로 구분된다. 혐기성 소화에서는 고온과 중온을 구분하는 온도가 불명확하며, 경험적으로 반응 속도를 향상시킬 수 있는 온도인 45°C 정도를 “고온”으로 정의하고 있으나, 고온 호기성 소화는 보다 높은 온도로 운전되고 있다. 실제 고온 호기성 소화로 간주되는 온도는 60°C인데, 이러한 온도 이상에서는 단백질 분해(Protein denaturation)가 일어나며, 생물학적 특성이 기존 상온 내지 45°C 정도와는 아주 상이하게 된다.

다음 Table 2에 상온 및 고온 호기성 소화의 차이점을 비교하였다. 고온 호기성 소화 공정은 반응 속도가 빨라 반응이 빨리 종결되며, 부하 변동에 민감하지 않고, 처리수에 냄새가 나지가 않으며, 질산화가 발생하지 않아 산소를 효율적으로 이용할 수 있다는 장점이 있어 1960년대 말 각광을 받았으나, 이러한 이점에도 불구하고 건설, 재정 및 운영 문제, DO 제어 및 거품 다량 발생 등의 문제로 잘 이용되지 않았다(Alleman et al., 1999; Staton et al., 2001; Surucu et al., 1976).

그러나 최근 고온 호기성 소화는 다양한 관점에서 연구되고 있다. 발표된 내용에 의하면, 유기물 제거 속도가 빨라 반응조 효율이 증가되며, 돈사 폐수를 고온 호기성 소화로 처리했을 때, 질소 제거율이 우수하다(Lee et al., 2004; Li et al., 2003; Yi et al., 2003). 또한 온도가 높아지면서 계면 저항이 낮아지고 공기 확산 계수가 높아져 산소 전달이 용이하게 되어 경제성을 보장 받을 수 있다(Ros et al.,

2002). 하수 슬러지를 고온 호기성 소화로 처리하면 VFA가 생성되고(Chu et al., 1998; Li et al., 2003), 생성된 VFA는 SCOD와 SBOD로 간접 추정할 수 있으며, 하수 1, 2차 슬러지를 35:65의 비율로 혼합하면 가장 효과적인 VFA가 생성되고, 이를 회수하여 후속 BNR 공정에서 탄소원으로 이용할 수 있다(Fothergill et al., 2000). 30~40°C에서는 사멸되는 병원균이 한정되어 있으나, 60°C에서는 보다 많은 병원균이 사멸되고, 고온 호기성 소화로 하수 슬러지 처리 시에 슬러지 내에 포함되어 있는 유해 물질이 제거된다(Gehring et al., 2003).

본 연구에서는 하수 슬러지를 60°C 고온 호기성 소화 공정에 적용하여 유기물 및 질소의 거동을 살펴보고, 탄소원 생성 여부와 탄소원으로서의 가능성을 알아보려고 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 유입수의 특성

본 실험에 사용된 슬러지는 C시 환경사업소의 1차 및 2차 슬러지를 채취한 후 혼합하여 사용하였다. 채취한 슬러지는 4°C에 보관하였으며, 반응조에 주입하기 전에 평균 간극 1 mm의 체로 걸러 머리카락, 등 반응조 운전에 장애를 줄 수 있는 이물질들을 제거하였다. 주입 슬러지의 성상은 다음 Table 3과 같다. 1차 및 2차 슬러지의 혼합비율은 Fothergill 등(2000)이 호기성 소화시 탄소원이 가장 효과적으로 생성되는 비율로 보고한 바와 같이 35 : 65로 하였다.

Table 2. Compare MAD with TAD

	Mesophilic aerobic digestion (MAD)	Thermophilic aerobic digestion (TAD)
Operation Temp. (°C)	• About 25.	• More than 60.
Merit	<ul style="list-style-type: none"> • Less operation expenses. • Be easy to operate process than TAD process. 	<ul style="list-style-type: none"> • The reaction velocity is fast. • Look for destruction of a virus.
Demerit	<ul style="list-style-type: none"> • More viruses than TAD. • The reaction velocity is slow. 	<ul style="list-style-type: none"> • Much operation expenses for high temperature. • The form production problem. • The DO control problem.

Table 3. Characteristics of mixed sludges

Parameters	Range (mg/L)	Avg. (mg/L)
TCOD	18,000~20,000	19,500
SCOD	700~1,500	810
TBOD	6,000~8,000	5,500
SBOD	600~900	750
TS	14,000~16,000	14,800
VS	10,000~11,000	10,400
TKN	1,300~2,000	1,750
NH ₄ ⁺ -N	110~200	120

2.2. 반응조

다음 Fig. 1은 고온 호기성 소화 반응조의 모식도를 보여 주고 있다. 반응조는 공기 주입 장치, 거품 제거 및 교반 장치로 구성되었다. 반응조는 두께 7 mm의 아크릴을 사용하여 전체 용적은 20 L이고 실제 유효 반응용적은 12 L였다. 시료의 유출 및 유입은 정량 펌프(Master Flux)를 사용하여 일정량을 유출시키면서 동시에 유입되도록 운전하였다. 공기공급은 air compressor를 사용하였는데, 선행되는 연구에서 공급한 공기를 반응조 내부에서 재순환시키는 방안은 운전의 난이 및 실제 규모 적용 시 효율성이 낮은 것으로 판단하여 공기 순환 장치는 제외시켰다.

한편, 고온 호기성 소화 공정에서는 거품이 많이 발생하는데(Ponti et al., 1995; Surucu et al., 1976), 이를 제거하기 위하여 거품감쇄기(foam cutter)를 설치하였다. Foam cutter는 혼합축 상단에 거품 생성층에 맞추어 총 2개를 설치하였는데, 각 날개에는 수십 개의 홈을 내어 거품이 잘 깨어질 수 있도록 하였다. 또 반응조 내 슬러지의 교반 및 완전 혼합을 위하여 교반 날개를 6개 설치하였는데, 이 교반 날개들은 축에 비스듬히 부착되어 회전에 따른 혼합 효율성이 증대되도록 하였다. 그리고 반응조 내 정류벽(baffle)을 설치하여 슬러지의 혼합을 증대시키고 침전을 방지하였다. 반응조는 water bath에서 전기가열기(heater)와 자동온도 조절장치를 이용하여 64°C ± 1°C의 고온 상태를 유지하였다.

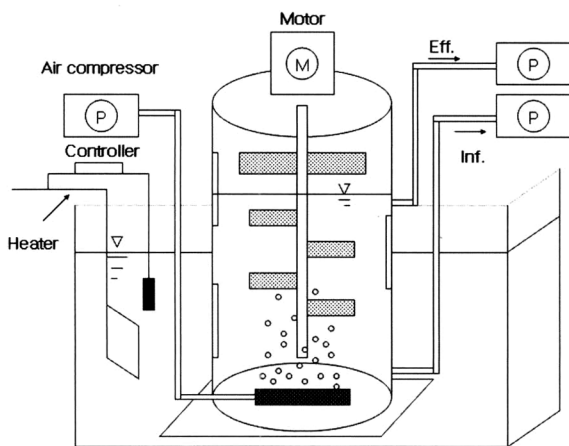


Fig. 1. A schematic diagram of lab-scale thermophilic aerobic digestion reactor.

2.3. 반응조의 운전

반응조 시운전은 Y군 축산 농장의 폐수처리장에서 고온 미생물을 채취하여 반응조에 식종하여 수행하였다. 실험실 반응조의 운전은 반연속식(semi-continuous type)으로 운전하였다. 반응조 운전 HRT 6 d로 운전할 때는 1일 1회 2 L의 혼합슬러지를 주입하였다. HRT 3 d로 운전할 때는 2 L의 혼합슬러지를 1일 2회, HRT 1 d로 운전할 때는 4 L를 1일 3회 주입하였다. 반응조의 운전은 HRT 6 d, 3 d, 그리고 1 d순으로 실험을 진행하여 각각의 HRT에 따른 유기물 및 질소의 거동, 탄소원의 생성 여부, pH 및 alkalinity의 변화에 대해 살펴보았다.

2.4. 분석 방법 및 항목

본 연구에 사용한 수질분석방법은 Standard Methods(APHA et al., 1995)에 의거하여 실시하였다. SCOD, SBOD는 Whatman 934-AH(pore size: 1.5 μm) filter paper로 여과한 후 측정하였고, DO는 DO meter의 측정 범위 제한으로 측정하지 못하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 반응조의 전반적인 운전 특성

전체 실험기간 동안에 측정된 실험 결과를 Table 4에 나타내 있다. 고온호기성 공정의 문제점 중의 하나인 거품현상은 실험 기간 동안에 발생하였는데 거품파쇄기(foam cutter)가 생성된 거품을 잘 제거하였다. 초기운전에서 모터의 회전수가 120 RPM 정도에서 거품이 잘 깨어지는 것으로 관찰되어 이 회전수로 운전하였다. 슬러지의 색깔은 HRT 6 day일 때 연한 갈색을 띄었으며, HRT 3 day 및 HRT 1 day로 짧아지면서 점차 검은 색으로 변하였다. HRT 6 day 일 때 반응조 주변에서 냄새가 감지되지 않았으나, HRT 3 day와 1 day에서는 시큼한 냄새가 났는데 이로 보아 HRT

Table 4. Experimental results

Parameters	Influent	Effluent		
		HRT 6 d	HRT 3 d	HRT 1 d
pH	5.84	7.56	7.53	7.13
TCOD	19,086	8,571	11,994	17,529
SCOD	978	893	2,026	1,989
TBOD	6,229	1,535	5,197	5,289
SBOD	740	198	1,841	1,877
TBOD/TCOD	0.33	0.18	0.42	0.34
SBOD/SCOD	0.77	0.22	0.94	0.93
TS	14,901	8,757	10,778	14,464
VS	10,286	5,729	7,333	8,613
TKN	1,672	1,152	1,038	1,582
NH ₄ ⁺ -N	125	248	309	239
NO ₂ ⁻ -N	0	0	0	0
NO ₃ ⁻ -N	0.2	0.51	0	0
Organic N	1,547	904	729	1,343
Alkalinity	2,954	2,173	2,641	2,131

가 짧아질수록 유출수에서 VFA가 생성되었음을 간접적으로 추측할 수 있었다.

3.2. HRT의 영향

전체 실험기간 중 정상 운전 상태에서 HRT에 따른 유출수의 TCOD, SCOD, TBOD, SBOD, TBOD/TCOD, SBOD/SCOD, TS, 및 VS 평균값을 Fig. 2에 나타내었다. 슬러지 처리에서 유입수의 유기물은 COD, BOD 및 VS 농도로 평가하는 것이 일반적이다. TCOD와 TBOD는 유입 슬러지 내 분해가능한 유기물의 총농도를 보여주는데 실험결과를 보면 HRT가 짧아질수록 TCOD 및 TBOD의 제거효율이 낮아지고 있다. 그런데 긴 체류시간(HRT 6 d)에서는 유입 슬러지 내 TCOD의 55.1%가 제거되는 것으로 나타났다. 이는 고온호기성 소화에서 HRT를 길게 할수록 슬러지의 가용화(solubilization)에 의하여 고형물을 제거할 수 있다는

결과를 보여주고 있다.

한편 SCOD는 TCOD의 5%, SBOD는 TBOD의 12%였다. HRT 1 d와 3 d와 같은 짧은 체류시간에서 용해성 유기물의 농도가 유입슬러지의 용해성유기물 농도보다 오히려 높은 것을 관찰할 수 있는데 이는 가용화과정이 HRT의 영향을 받는 것으로 볼 수 있다. HRT 6 d와 같이 긴 체류시간의 유출수 내 SBOD농도는 198 mg/L에 지나지 않는 것으로 나타나고 있는데 이는 가용화된 슬러지 내 고형 유기물이 긴 체류시간으로 인하여 생물학적으로 분해된 결과로 보인다.

고온 호기성 소화 공정의 유기물 제거 특성을 비교하면 HRT에 따라 슬러지 내 유기물의 제거가 가능하다. 특히 HRT 1 d에서 생산된 유출슬러지 내 SBOD 농도는 약 1,900 mg/L의 고농도로 나타나고 있는데 이는 슬러지에 따라 HRT를 적절히 조절하면 생물학적으로 분해 가능한 유

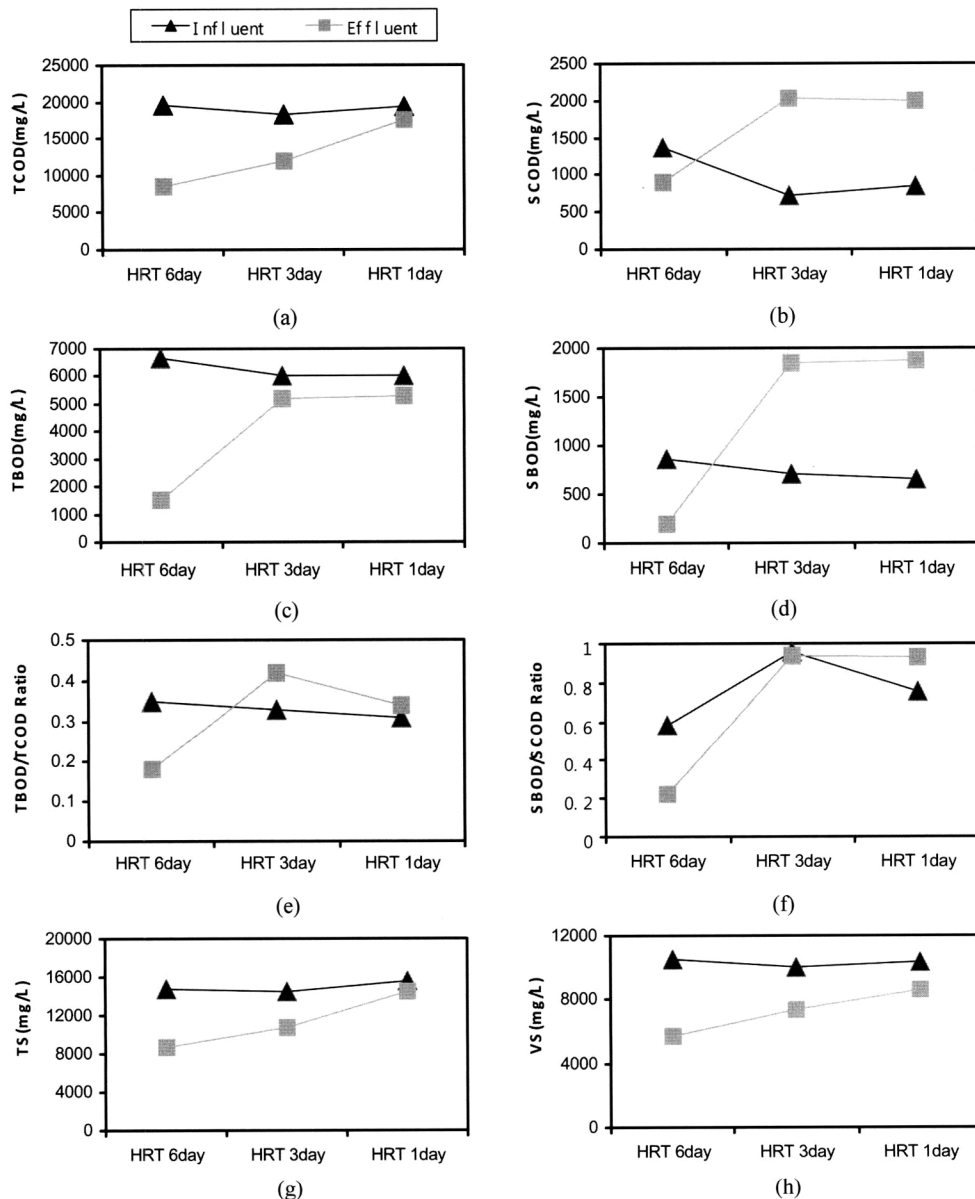


Fig. 2. Effects of HRT on effluent COD, BOD, BOD/COD ratios and solids concentrations.

기물(SBOD)의 회수도 가능할 것으로 사료된다.

일반적으로 BOD/COD ratio는 시료 내 유기물중 분해 가능한 부분을 나타낸다. 유입슬러지의 TBOD/COD비는 0.35 였는데 HRT 6 d에서는 0.18로 상당부분의 분해 가능한 유기물이 생물학적으로 제거된 결과 난분해성 COD 부분이 증가한 것으로 나타났다. 한편 짧은 체류시간(HRT 1 d 및 3 d)에서는 유입수의 TBOD/TCOD가 각기 조금씩 달라 정확한 비교는 힘들지만 유출 슬러지의 TBOD/TCOD가 모두 0.42로 나타나 짧은 HRT에서 분해 가능한 유기물의 비율이 높아지는 것으로 나타났다. 용해성유기물의 SBOD/SCOD 비는 매우 인상적인 결과를 보여주고 있다. HRT 6 d에서 유출슬러지의 SBOD/SCOD 비는 0.22로 생물학적으로 분해 가능한 용해성 유기물의 비가 낮지만 HRT 1 d 및 3 d에서는 0.93 이상으로 생물학적으로 분해 가능한 용해성 유기물로 나타났다. 이는 고온 호기성 소화 공정에서 짧은 HRT에서는 가용화된 유기물이 호기성 생물학적 분해 과정에서 모두 소진되지 않고 잔존하는 것을 뜻한다. 그러므로 HRT 1 d 및 3 d에서 생성된 용해성유기물은 대부분 생물학적으로 분해 가능한 특성을 지닌 우수한 탄소원으로 사료된다.

슬러지처리에서 TS와 VS 농도는 일반적으로 감량화의 지표로 나타내어진다. 운전결과를 보면 짧은 HRT에서 슬러지의 감량화 정도는 낮으나 HRT 6 d에서 TS는 41.2%, VS는 44.3%가 제거되어 긴 체류시간에서 고온호기성소화의 감량화 정도가 높은 것으로 나타났다. 물론 슬러지 감량화는 슬러지의 탈수성 등 여러가지 요인이 작용하는데, 고온호기성소화공정에서 생산된 슬러지의 탈수성이 일반적으로 나쁜 것을 고려하면 탈수성 향상을 위한 연구가 더 필요할 것으로 사료된다.

3.3. 질소의 거동

지금까지 슬러지처리공정의 주된 목적은 슬러지의 감량화에 있었으므로 질소의 거동은 잘 연구되지 않았다. 하지만 슬러지처리공정으로부터의 반류수(recycle water, 혹은 reject water)는 주처리공정에 큰 영향을 주며, 생물학적영양소제거공정을 사용하는 경우, 반류수내 다량 존재하는 질소는 BNR공정에 큰 부하를 주는 것으로 나타나고 있어 최근에는 Sharon-Anammox process와 같은 슬러지제거흐름에서 질소제거공정이 개발되고 있는 실정이다(Hellings et al., 1998).

고온 호기성 소화에서 HRT에 따른 NH_4^+-N , Org.-N 그리고 TKN의 변화가 Fig. 3에 나타나 있다. Fig. 3에서 보면 NH_4^+-N 농도는 유입슬러지보다 유출슬러지 내의 농도가 오히려 증가하는 것으로 나타나고 있는데 이는 슬러지 가용화에 따라 슬러지 세포내 질소와 고흡물 중 protein성 질소가 ammonium으로 전환된 것으로 보인다. 반면 Org.-N는 HRT 6 d에서 더 많이 제거된 것으로 나타나고 있다. 가용화에 의하여 ammonification된 질소 성분들은 호기성 생물학적 반응에 의하여 세포합성에 일부 소모되고 나머지는 ammonium으로 존재하게 되는 것으로 보인다. 호기성 소화

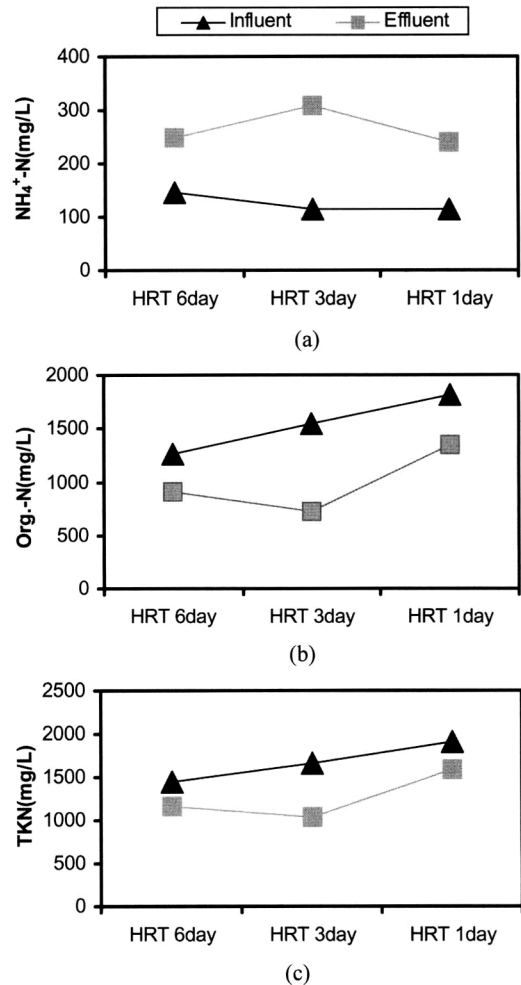


Fig. 3. Effects of HRT on nitrogen conversion.

공정에서 질소의 전환은 40°C 이상의 고온인 경우, 생물학적 질산화의 가능성이 거의 없다고 알려져 있다. 전체 실험 기간 중 NO_2^- 는 유입과 유출에서 측정되지 않았으며, NO_3^- 는 운전 초기에 2번 정도 측정되었으나 이는 초기 운전상의 문제로 보이며, 전체적으로 질산화는 일어나지 않은 것으로 보인다. 한편 질소제거는 세포합성에 소요되는 질소 이외에 암모니아 탈기(ammonia stripping)와 호기성 탈질(aerobic denitrification) 등에 의한 경우를 생각할 수 있는데 어느 경우든 연구결과가 잘 보고되어 있지 않다. 돈사 폐수를 이용한 Yi 등(2003)의 선행연구에서는 부분적인 탈기와 함께 aerobic deammonification 및 호기성탈질의 가능성을 강력히 제시하고 있으나 독립적인 실증 연구결과가 지금까지 잘 제시되지 않고 있다.

실험실 고온 호기성 반응조에서 HRT에 따른 질소 성분의 전환을 이해하기 위하여 Nitrogen balance를 수행하였으며 그 결과가 Fig. 4에 나타나 있다. 그림에서 각 체류시간에 따른 유입 질소와 유출 질소의 형태를 질소 총량으로 나타내었다. 그림에서 회색 부분은 시스템에서 제거된 질소 성분을 나타내는데 여기서 가능한 질소 제거 기작은 운전 ammonia stripping에 의한 NH_3 탈기의 가능성을 생각할 수 있다. 배출 가스의 정량분석은 수행하지 않았지만 간이검출

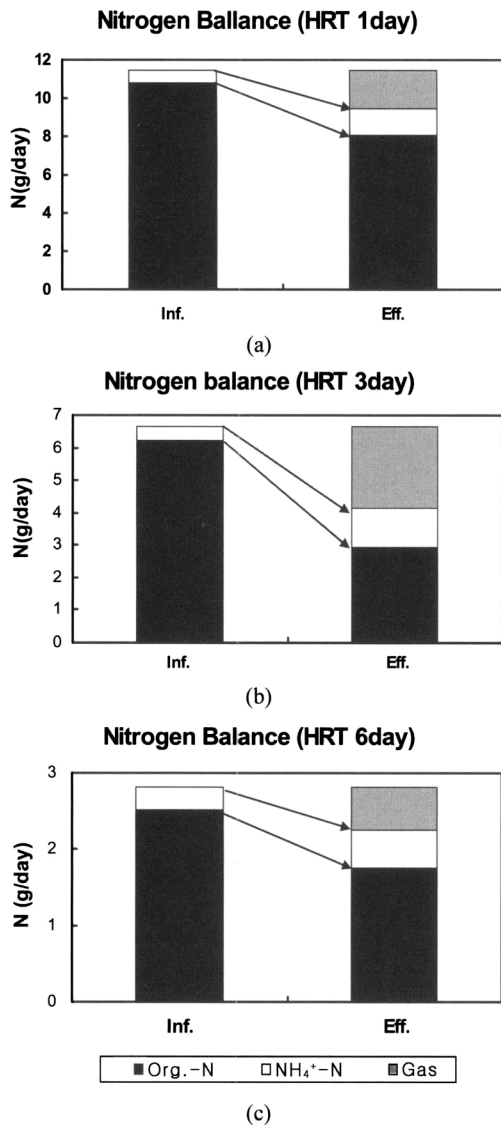


Fig. 4. Nitrogen balance at thermophilic aerobic digestion with various HRTs.

기를 사용한 결과 약간의 ammonia가 검출되었으므로 탈기에 의한 제거가 가능하였으리라 사료된다. 한편, deammo-

nification 혹은 고온 호기성 탈질 미생물에 의한 탈질 역시 가능성은 농후하나 본 연구 수행당시 미생물학적 검증은 이루어지지 않았으므로 확인하기 힘들다. 그러나 최근에 특수한 종의 고온 호기성 탈질 미생물에 대한 동정이 이루어진 점으로 미루어 Yi 등(2003)의 지난 연구결과를 감안하면 이 두가지 기작이 동시에 작용하여 질소제거가 이루어진 것으로 사료된다.

3.4. 고온 호기성 소화 공정 평가

하수 슬러지를 고온 호기성 소화로 운전시 VFA라는 탄소원이 생성되고, 생성된 VFA는 주로 SCOD와 SBOD라는 결과(Fothergill et al., 2000)를 감안하여 운전기간동안의 SCOD와 SBOD의 변화정도를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 보면 HRT 3 d로 체류시간을 단축하자 SBOD의 농도가 급격히 증가한 것으로 미루어 고온 호기성 소화의 분해과정은 HRT에 따른 생물학적기작에 의하여 조절되는 것으로 볼 수 있다. 이미 언급한 바와 같이 생성된 용해성 유기물은 거의 생물학적으로 분해가능한 유기물로 이루어져 있으므로 만약 상정액을 회수할 수 있다면 매우 우수한 탄소원이 될 것으로 사료된다. 한편, 다른 슬러지 가용화 공정과 비교하여 볼 때 질소 성분은 유기물 성분에 비하여 낮은 특성을 보이므로 탄소원 회수 공정으로서 경쟁력을 가지고 있는 것으로 판단된다.

지금까지 고온 호기성 소화 공정은 에너지 소비형 공정으로 간주되어 1970년대 이래 연구가 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다. 하지만 본 연구 결과를 보면 고온 호기성 소화 공정은 신속한 반응 특성과 가용화를 통한 에너지 회수, 그리고 질소 제거 특성 등에 대한 추가적 연구를 통하여 활성화를 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

하수 슬러지를 35:65 비율로 혼합 후, HRT 6, 3, 1 d의 순서로 고온 호기성 소화 공정으로 처리하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

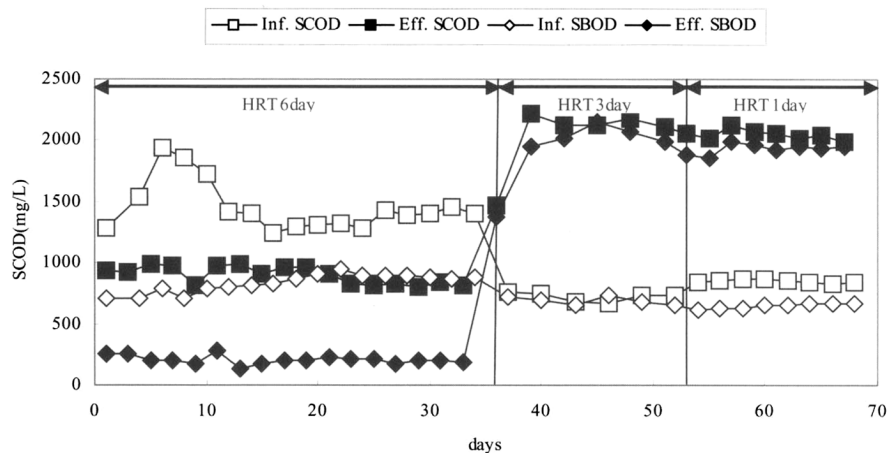


Fig. 5. SCOD and SBOD profiles during experimental periods.

- 1) HRT 6 d에서 TCOD, TBOD, TS, VS의 제거 효율이 각각 56.3%, 77.0%, 40.5%, 45.5%로 가장 높았으며, 체류시간이 짧아질수록 제거 효율은 낮아졌다. 한편, HRT 1 및 3 d에서 SCOD와 SBOD 함량이 급격히 증가하였으며, 생성된 SCOD와 SBOD의 대부분은 VFA와 같은 생물학적으로 분해가능한 유기물로 사료된다. HRT 1 및 3 d에서 유출슬러지의 SCOD/SBOD ratio를 보면 각각 0.94, 0.93으로 측정되어 용해성유기물 중 난분해성 유기물은 거의 없거나 매우 낮은 것으로 나타났다.
- 2) HRT 1, 3 d에서 SCOD가 각각 181.8%, 161.9% 증가하였으며, SBOD는 각각 133.7%, 188.8%가 증가하였다. SCOD와 SBOD의 대부분은 VFA로 추정된다.
- 3) 전체 실험기간 동안 처리된 슬러지 내 TKN 및 Organic-N 함량은 감소한 반면 NH_4^+ -N은 증가하는 경향을 보였는데 NH_4^+ -N의 증가는 슬러지내 세포내 질소성분 및 고형물 중 단백질 성분의 분해에 의한 것으로 추정된다.
- 4) 처리된 슬러지에서 NO_2^- 와 NO_3^- 가 검출되지 않은 것으로 보아 질산화는 일어나지 않은 것으로 판단되며, 질소의 제거는 세포합성과 탈기에 의한 것으로 추정된다. 이외 특수한 종의 고온호기성탈질미생물에 의한 질소제거 가능성도 제시되었다.

참고문헌

- 최의소, 폐기물처리와 자원화, 청문각, 서울 (1985).
- Alleman, J. E. and Lapara, T. M., Thermophilic aerobic biological wastewater treatment, *Wat. Res.*, **33**(4), pp. 895-908 (1999).
- American Public Health Association; American Water Works Association; and Water Environmental Federation, *Standard Methods for the examination of water and wastewater*, 19th Ed., Washington, D.C (1995).
- Chu, A. and Mavinic, D. S., The effects of macromolecular substrates and a metabolic inhibitor on volatile fatty acid metabolism in thermophilic aerobic digestion, *Wat. Sci. Tech.*, **38**(2), pp. 55-61 (1998).
- Fothergill, S. and Mavinic, D. S., VFA production in thermophilic aerobic digestion of municipal sludges, *Journal of Environmental Engineering*, **126**(5), pp. 389-396 (2000).
- Gehring, M., Tennhardt, L., Vogel, D., Weltin, D. and Bilitewski, B., Xenooestrogen Removal from Sewage Sludge, *SETAC/UK Government Conference* (2003).
- Hellinga, C., Schellen, A. A. J. C., Mulder, J. W., van Loosdrecht, M. C. M. and Heijnen, J. J., The SHARON process: An innovated method of nitrogen for nitrogen removal from ammonium-rich wastewater, *Water Sci. & Technol.*, **37**, pp. 135-142 (1998).
- Lee, J. W., Lee, H. W., Kim, S. W., Lee, S. Y., Park, Y. K., Yi, Y. and Yun, Z., Nitrogen Removal Characteristics Analysed with Gas and Microbial Community in Thermophilic Aerobic Digestion for Piggery Waste Treatment, *Water Science & Technology*, **49**(5-6), pp. 349-357 (2004).
- Li, J. Z., Mavinic, D. S. and Kelly, H. G., Pilot-scale operation of thermophilic aerobic digestion for volatile fatty acid production and distribution, *Journal of Environmental Engineering and Science*, **2**(3), pp. 187-197 (2003).
- Min, K. S., Khan, A. R., Kwon, M. K., Jung, Y. J., Yun, Z. and Kiso, Y., Acidogenic fermentation of blended food-waste in combination with primary sludge for the production of volatile fatty acids, *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, **80**(8), pp. 909-915 (2005).
- Ponti, C., Sonnleitner, B. and Fiechter, A., Aerobic thermophilic treatment of sewage sludge at pilot plant scale. 2. Technical solutions and process design, *Journal of Biotechnology*, **38**, pp. 183-192 (1995).
- Ros, M. and Zupancic, G., Thermophilic aerobic digestion of waste activated sludge, *Acta Chim. Slov.*, **49**, pp. 931-943 (2002).
- Staton, K., Alleman, J., Pressley, R. and Eloff, J., 2nd generation autothermal thermophilic aerobic digestion: conceptual issues and process advancements, *Water Environmental Federation* (2001).
- Surucu, G. A., Chian, E. S. K. and Engelbrecht, R. S., Aerobic thermophilic treatment of high strength wastewaters, *J. WPCF*, **48**(4), pp. 669-679 (1976).
- Yi, Y., Kim, S., An, S., Choi, E., Choi, S. and Yun, Z., Gas analysis reveals novel aerobic deammonification in thermophilic aerobic digestion, *Water Science & Technology*, **47**(10), pp. 131-138 (2003).