

슬러지 호기성 소화공정에서의 유기물 분해 및 질산화 특성

Organic Matter Degradation and Nitrification Characteristics in Aerobic Digestion of Sewage Sludge

황응주
Eung-Ju Hwang

대구대학교 환경공학과
Department of Environmental Engineering, Daegu University

(2008년 7월 18일 접수, 2009년 9월 3일 채택)

ABSTRACT : Continuous operation of aerobic sludge digestion reactor was attempted for 279 days. Anaerobic digester sludge, the target material of the experiment, was pretreated by sodium hydroxide at 40°C for 120 minutes, and the pretreated sludge was fed to 5 L CSTR (continuous stirred tank reactor). Reactor performance was affected by properties of input sludge and HRT (hydraulic retention time). 6 days of HRT showed best and stable performance, and under this condition, removal rates of NH₃-N, SCOD, TKN, TCOD, SS, and VSS were 97.4%, 81.7%, 68.7%, 61.4%, 50.6%, and 47.0%, respectively. 73.9% of SS in anaerobic digester sludge was reduced by pretreatment and aerobic digestion. Effluent sludge had low soluble COD of 350 mg/L. This implied the sludge was stabilized and suitable for use as liquid fertilizer. Nitrification took place when HRT was higher than 4 days. NO₃-N concentration was as high as 658 mg/L while NH₃-N was as low as 20 mg/L.

Key words : Sludge, Aerobic digestion, Liquid fertilizer, Nitrification, Hydraulic retention time

요약 : 슬러지의 감량과 최종처분 기술 개발을 위해 실험실 규모 호기성 소화공정을 279일간 운전하였다. 혐기성 소화 슬러지를 원료로 40°C에서 120분간 알칼리 전처리하여 호기성 소화조에 유입시켰다. 유입 슬러지 성상과 HRT의 변화에 따라 소화효율의 변화가 있었으며 적정 HRT는 6일인 것으로 나타났다. 이때 NH₃-N, SCOD, TKN, TCOD, SS, VSS의 평균 제거율(소화조 유입 슬러지 기준)은 각각 97.4%, 81.7%, 68.7%, 61.4%, 50.6%, 47.0% 이었다. SS는 전처리와 호기성 소화를 통해 원료 슬러지(23,920 mg/L)의 73.9% 감량화가 가능하였다. 처리 슬러지는 약 350 mg/L의 SCOD를 포함하고 있어 액비로 활용하기에 무리가 없을 것으로 판단되었다. HRT를 5일 이상으로 유지할 경우 질산화 반응이 활성화되었으며 최대 658 mg/L의 유출 슬러지 질산성 질소 농도를 얻을 수 있었다. 암모니아성 질소 농도는 20 mg/L 내외로 크게 감소하였다.

주제어 : 슬러지, 호기성 소화, 액비화, 질산화, 수리학적 체류시간

1. 서론

우리나라에서는 2006년 한 해에 203만1천여톤의 하수 슬러지가 발생되었다.¹⁾ 지금까지 슬러지는 하수 처리장에서 혐기성 소화 후 탈수하여 육상매립(1.8%), 해양투기(70.6%), 소각(10.0%), 재활용(15.7%) 등으로 최종 처분되어 왔으며 해양투기의 비율이 높은 상황이다.¹⁾ 런던협약에 의해 해양투기가 2012년부터 전면 금지될 예정에 있으며, 육상매립도 2003년 7월부터 국내 모든 폐수종말처리시설 및 하수처리시설 중 하루 처리용량 10,000 m³ 이상의 시설에서 발생하는 슬러지의 직매립이 금지되고 있어 막대한 양의 슬러지 처리 및 처분 방안이 주요 관심사가 되고 있다.²⁾ 지금까지의 슬러지 처분은 눈에 보이지 않도록 버리

거나 묻거나 태워 없애는 방식에 의존하였으나 앞으로는 하수 슬러지에 포함된 유용한 성분을 활용하는 자원순환형 방식으로의 전환이 필요하며 이 같은 관점에서 하수 슬러지의 퇴비화 또는 액비화 기술에 대한 적극적인 검토가 요구된다.

하수 슬러지에는 유기물과 질소, 인 등 토양에 순환시켰을 때 자원으로 활용될 수 있는 성분이 많다. 식물생태계에서 질소, 인은 중요 생장 제한 인자로서 질소 성분은 토양에서 잎과 줄기의 생장을 촉진하고 인은 뿌리의 생장을 도와 성숙을 촉진시키며 식물의 병에 대한 저항력을 높여준다.^{3~5)} 따라서 토양의 급격한 산소 소비를 방지할 수 있을 정도의 적절한 유기물 안정화 과정을 거친 후 슬러지를 토양에 살포할 경우 토양의 biomass 생산력을 향상시킬 수

† Corresponding author : E-mail : ejhwang@daegu.ac.kr Tel : 053-850-6694 Fax : 053-850-6699

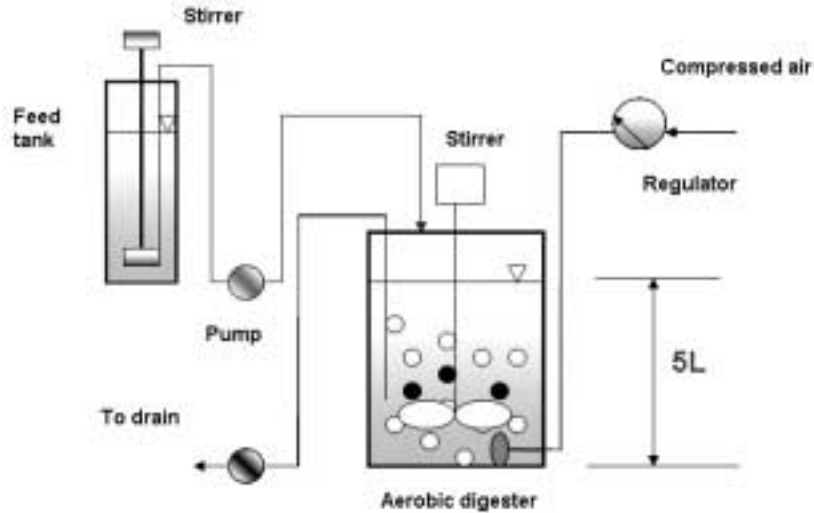


Fig. 1. Schematic diagram of aerobic digester.

있어 슬러지 처리와 동시에 토양 지력의 향상이라는 일석 이조의 효과를 거둘 수 있다.^{6~8)} 물론 중금속 등의 문제를 고려하여 슬러지 액비를 식용작물 생산에 직접 활용하기 보다는 화훼 재배용의 추비, 즉 추가적인 비료로 활용하는 것이 현실적이다.⁹⁾ 일반적인 퇴비화의 경우 값비싼 수분조 절재를 다량으로 혼합할 필요가 있으나 액비화, 즉 액상 퇴비화의 경우 슬러지 탈수 또는 수분조절재의 필요가 없고 기존 혐기성 소화조를 개선하여 활용할 수 있으므로 효율적이다.

슬러지의 액상 비료화를 위해서는 안정화를 의미하는 소화공정의 구성과 운전 기술을 확립해야 하나 지금까지 이와 관련된 연구는 극히 드물었다. 호기성 소화를 통한 고형물 또는 유기물의 안정화 효율을 검토한 연구는 다소 있었으나^{10~13)} 비료로서의 가치를 향상시키는 것에 초점을 맞춘 연구는 없었다. 본 연구에 앞서 진행된 40일간의 회분식 호기성 소화 실험에서 슬러지의 고형물 및 유기물 안정화를 통해 작물 증산에 유리한 처리 슬러지(또는 액비)가 생산되었으며, 특히 호기성 소화 공정에서 작물에 흡수가 용이한 질산성 질소가 높은 농도로 생산됨을 확인한 바 있다.¹⁴⁾ 본 연구에서는 이러한 결과를 바탕으로 연속식 소화공정의 장기간 운영을 시도하였다. 호기성 소화 장치의 성능에 영향을 미칠 것으로 예상되는 수리학적 체류시간(HRT, hydraulic retention time)을 변화시켜가며 실제 슬러지를 원료로 279일간 연속 운전하였다. 특히 질산화에 초점을 맞추어 다양한 질소화합물의 거동과 질산성 질소 생성 특성을 살펴보고 질산화를 위한 적정 HRT를 도출하였다.

2. 실험 재료 및 방법

본 연구에 사용된 실험 장치를 Fig. 1에 나타내었다. 5 L 용량의 아크릴제 CSTR (continuous stirred tank reactor) 소화조를 중심으로 유입슬러지 저장조, 유출슬러지 저장조, 공기펌프, 교반기, 연동펌프로 구성되었다. 슬러지는 알칼리 전처리 후에 냉장고 내의 유입슬러지 저장조에 보관되면서 연동펌프에 의해 소화조로 이송되도록 하였다. 반응기 하부에 공기 공급 장치를 설치하여 공기펌프에서 공급되는 5 L/min 용량의 공기가 균등하게 분산되도록 하였으며 폭기와 더불어 혼합을 위해 교반기를 설치하여 높은 고형물로 인한 슬러지 침전을 방지하였다. 반응 후 슬러지는 연동펌프에 의해 유출되어 유출슬러지 저장조에 보관되도록 하였다.

K하수처리장에서 약 2주 간격으로 채취한 1차 소화조 반송 슬러지를 40°C에서 120분간 물 증탕하면서 40 meq/L 농도로 NaOH를 투입하여 가용화 전처리를 실시하였다. 전처리된 슬러지 시료는 교반이 되는 냉장 상태에서 보관되면서 소화조 유입수로 공급되었다. 처리 후 pH는 7.5~8.5의 범위에 있었으나 알칼리 주입의 영향으로 대부분 8.0 이상의 값을 보였다. 알칼리 전처리는 슬러지의 SS 성분을 입자가 작거나 용존성의 상태로 전환시킴으로써 미생물 대사를 용이하게 하는데 있었으며, 선행연구¹⁴⁾에서 전처리를 한 경우와 하지 않은 경우 호기성 소화공정에 미치는 영향에 대한 비교 연구를 진행한 결과 가용화 전처리를 함으로써 최대 SS 분해율과 분해속도를 증가시킬 수 있음을 알 수 있었다. 이는 전처리를 통해 연속식 소화공정의 HRT를 단축시킬 수 있음을 의미하는 결과이었으며 본 연구에서는 이를 바탕으로 알칼리 전처리된 슬러지를 소화조

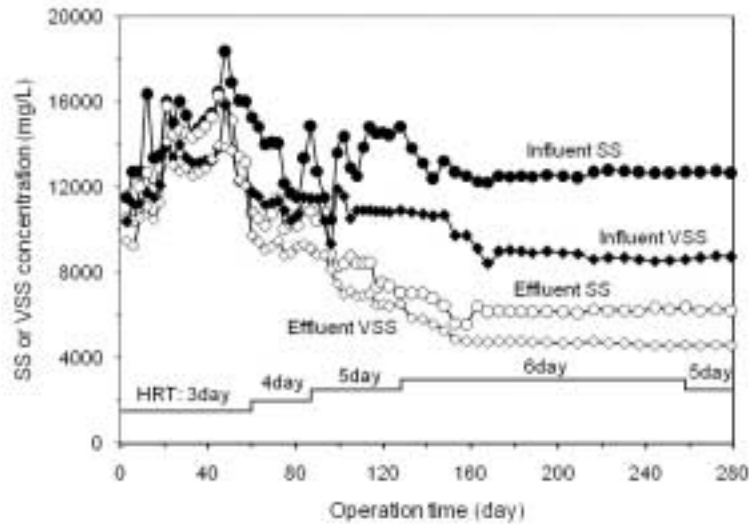


Fig. 2. Behaviors of SS and VSS with operation time of continuous aerobic digester.

유입수로 이용하였다. 소화조는 활성슬러지 5 L를 처음 충전한 후 공기 공급과 전처리된 슬러지를 연동펌프로 공급하는 것으로 운전을 시작하였다. 초기 수리학적 체류시간(HRT)은 3일로 설정하였고, HRT 변화에 따른 운전 효율을 평가하기 위해 운전 60, 87, 128, 258일 경과 시점에 HRT를 각각 4일, 5일, 6일, 5일로 변화시켰다. 소화조의 총 운전기간은 279일이었으며 이후에도 소화조 운전은 계속되었으나 본 논문에서는 279일까지의 운전결과만을 다루었다. 운전기간 동안 3~7일에 1회 유입, 유출 슬러지 시료를 채취하여 TSS, VSS, TCOD, SCOD, NO₂-N, NO₃-N, NH₃-N, TKN, TP, pH, DO의 항목에 대해 정상 분석을 실시하였다. 분석 방법은 Standard Methods¹⁵⁾를 따랐으며, COD는 closed reflux method with dichromate, NO₂-N와 NO₃-N는 digestion/colorimetric method, NH₃-N은 distillation/titration, TKN은 digestion/distillation/titration, TP는 stannous chloride, pH와 DO는 전극법을 각각 이용하였다. 한편 실험에 사용된 슬러지의 특성은 Table 1에 나타난 바와 같다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 슬러지 고형물 및 유기물 제거

일반적으로 호기성 소화공정은 활성슬러지 공정을 저부하 장기포기 조건으로 운전하여 미생물의 내생호흡을 유도함으로써 슬러지 즉 고형물의 안정화 및 감량을 목적으로 하는 공정이라 할 수 있다.¹⁶⁾ 따라서 소화공정에서는 고형물 분해율(SS 또는 VSS reduction)이 주로 공정의 운전 지표가 되며 본 연구에서도 SS와 VSS의 변화를 Fig. 2에 나타난 바와 같이 관찰하였다. 운전 초기에는 유입 슬러지의 고형물이 많고 HRT가 3일로서 짧아 고형물이 반응조에 축적되는 현상이 발견되었고 반응 40일 경과시점에서 유입, 유출되는 SS 또는 VSS의 농도가 유사하게 될 정도로 고형물이 축적되었다. 이후 같은 HRT 조건으로 운전을 지속한 바 반응 50일 경과시점부터 서서히 유입, 유출 SS 및 VSS 수치에 차이가 발생하기 시작하였다. 이는 고형물의 분해 즉 소화 반응이 반응기 내에서 점차 지배적으로 진행되고 있음을 의미하였다. 계속

Table 1. Characteristics of sludge used in the experiment

	Feed (anaerobic digester sludge)		Seed (activated sludge)	
	Range	Average	Range	Average
pH	7.7~8.4	8.1	7.3~7.5	7.4
ORP (mV)	40~51	45	120~145	132
SS (mg/L)	19,100~29,800	23,920	8,600~9,700	9,067
VSS (mg/L)	14,400~21,500	18,367	7,200~8,300	7,500
VSS/SS (%)	70.5~85.9	77.3	79.1~85.6	82.7
TCOD (mg/L)	33,983~36,722	35,296	3,379~4,700	3,912
SCOD (mg/L)	512~1,669	1,075	69~100	90

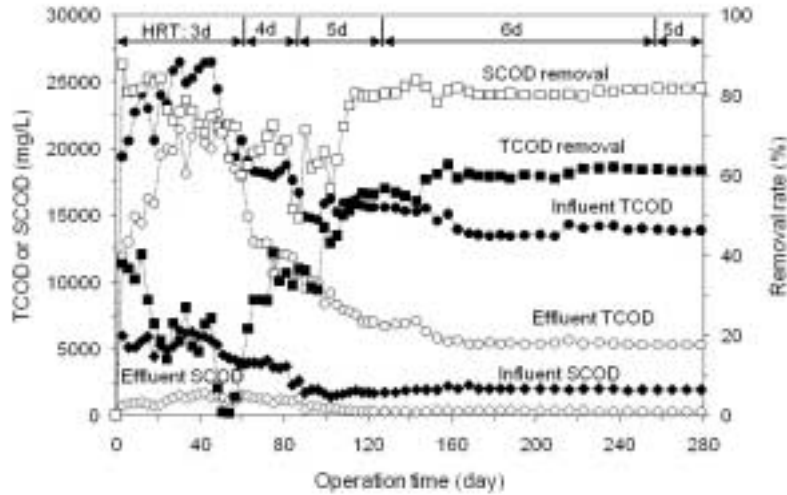


Fig. 3. Behaviors of TCOD and SCOD with operation time of continuous aerobic digester.

하여 HRT를 4일로 증가시켰으나 유입 슬러지의 변동으로 소화반응의 정상상태(steady state)화가 이루어지지는 않았다. 그러나 유출수 슬러지의 고형물 농도는 어느 정도 일정하게 유지되는 경향을 보였으며 이를 근거로 반응 87일 경과시점에서 HRT를 5일로 증가시켰다. HRT를 5일로 증가시키면서 유입수 부하변동에 따라 다소 등락은 있었으나 유출수 고형물의 농도는 계속 안정화되고 제거율도 향상되었다. HRT가 6일인 조건에서는 반응조가 매우 안정적으로 운전되었으며 유입 유출수 고형물 농도에도 가장 큰 차이가 발생하였다. 이때 SS는 평균 유입농도 12,636 mg/L에서 평균 유출농도 6,244 mg/L로 평균 6,392 mg/L가 감소하여 약 50.6%의 제거율을 기록하였다. VSS 역시 유입 8,792 mg/L, 유출 4,694 mg/L로 4,098 mg/L의 감소와 46.7%의 제거율을 보였다.

특기할 만한 사실은 VSS 제거율이 SS 제거율보다 낮은 것으로, 이를 보다 자세히 분석하기 위해 Table 2와 같이 여러 슬러지의 VSS/SS비를 비교하여 보았다. 원료로 사용된 혐기성 소화슬러지는 고형물 농도가 매우 높았고 평균 VSS/SS비는 0.77 정도였다. 이를 알칼리 전처리하였을 때 고형물은 크게 감소하였으며 VSS/SS비도 0.70으로 감소하였다. 이는 알칼리 전처리에서 휘발성 고형물의 가용화가 우세하게 진행

되었음을 의미한다. 반면 호기성 소화공정 유출수는 VSS/SS비가 0.75로 증가하였고 제거된 고형물의 값은 0.64로서 호기성 소화공정에서는 주로 비휘발성 고형물(또는 무기물 성분)의 액상화가 진행된 것으로 나타났다. 이를 종합적으로 고려할 때 다음과 같은 해석이 가능하다. 알칼리 전처리에서는 화학적 가수분해 반응이 일어나 슬러지 개별 입자 중 휘발성 성분(또는 유기물 성분)의 액상화가 부분적으로 진행되고 여러 개의 크기가 작은 입자로 분리되나 입자 전체의 완전한 분해 또는 액상화는 진행되지 않으며 따라서 고형물의 휘발성 성분 함량이 감소, 즉 비휘발성 성분의 함량이 증가한다. 그러나 알칼리 전처리된 슬러지를 계속하여 호기성 소화조에서 처리할 경우 잔존 입자가 가수분해 미생물의 작용으로 완전히 액상화되거나 0.4 μm GFC를 통과할 정도로 작아지고 이후 기질로서 소모될 가능성이 더 높으므로 고형물 형태로 측정되는 비휘발성 성분함량은 다시 감소하는 것으로 사료된다. 이는 Table 2 소화조 유출수의 VSS/SS비(0.75)가 원료 슬러지(혐기성 소화 슬러지)의 수준(0.77)으로 회복되는 사실로부터 다시 한번 유추가 가능하다.

TCOD와 SCOD로 표현되는 유기물의 변화는 Fig. 3와 같다. 슬러지의 입자성 및 용존성 유기물 총량을 대표하는

Table 2. Variation of VSS to SS ratio during the reaction

	SS (mg/L)	VSS (mg/L)	VSS/SS
Anaerobic digester sludge ①	23,920	18,367	0.773
Influent (alkali-treated digester sludge) ②	12,636	8,792*	0.696*
Initial (activated sludge)	9,067	7,500	0.827
Effluent ③	6,244	4,694*	0.752*
Removed by alkali treatment (①~②)	11,284	9,575	0.849
Removed by aerobic digestion (②~③)	6,392	4,098	0.641

*Average at 6days of HRT

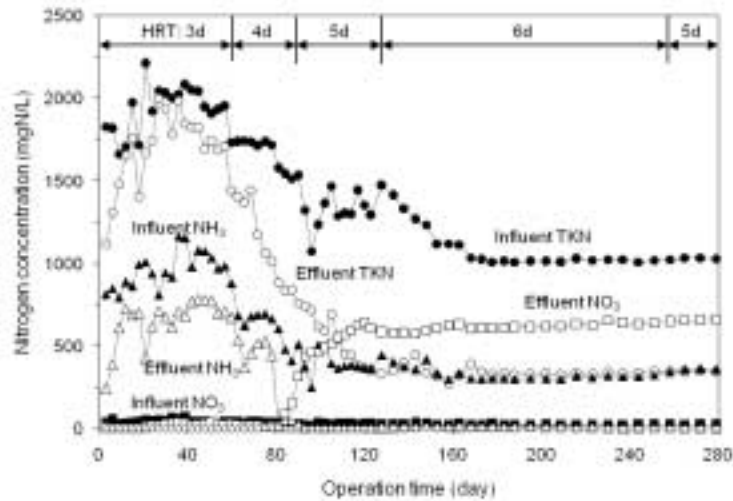


Fig. 4. Behaviors of nitrogen compounds with operation time of continuous aerobic digester.

TCOD는 SS, VSS와 유사한 변화 양상을 보였다. 운전초기 유출수 TCOD가 서서히 증가하여 유입수에 근접하였으나 HRT를 3일에서 4일로 증가시키면서 서서히 TCOD의 제거가 활성화되었으며 HRT를 5일, 6일로 증가시키기에 따라 제거율도 점차 증가하였다. HRT 6일인 조건에서 평균 TCOD 제거율은 59.6%를 보였다. 유입수 성상의 변화에 따라 제거율도 다소 영향을 받았으나 반응이 안정화된 HRT 5일, 6일 조건에서는 전반적으로 안정적인 TCOD 제거율과 일정한 유출수 성상을 얻을 수 있었다. TCOD 제거율 59.6%는 난분해성 유기물을 다량 함유한 혐기성 소화슬러지를 유입수로 하였음을 고려할 때 비교적 높은 수치로서 알칼리 전처리에 의해 미생물 세포벽이 파손되고 이로 인해 세포의 분해도가 증가하였기 때문으로 판단된다. Neyens 등¹⁷⁾은 슬러지에 투입된 알칼리는 비누화 반응(saponification)을 통해 미생물 세포벽 및 세포막의 지질 성분을 제거하여 세포내 물질이 외부로 방출되게 한다고 한 바 있다. 한편 SCOD는 용존성 유기물을 대표하는 바 1,600~6,000 mg/L 정도로 유입하여 350~1,740 mg/L로 유출되었으며 제거율은 대략 60~80%의 범위로 유지되었다. SCOD는 상대적으로 초기 순응(acclimation)이나 HRT의 영향을 덜 받았으며 이는 SCOD의 특성상 분해가 용이하기 때문이었던 것으로 사료된다. HRT 6일의 조건에서 SCOD 평균 제거율은 80.9%인 것으로 집계되었다. 알칼리 전처리에 의해 생성된 SCOD는 분해가 용이한 편이나 제거율이 80.9% 정도에 그치고 유출수에 최소 350 mg/L의 용존성 유기물이 존재하였다. 이는 처리된 슬러지를 액비로 활용하는 경우 문제가 되지 않으나 보다 안정화된 슬러지가 요구되는 경우 소화조 체류시간의 증가 등 대책이 필요할 것으로 사료된다.

3.2. 질소화합물 변화 특성

슬러지에 함유된 질소 성분은 유기물과 마찬가지로 호기성 소화공정에서 산화되어 유기성 질소에서 암모니아성 질소로 다시 아질산성 질소와 질산성 질소로 전환된다.^{18~21)} 특히 호기성 소화 조건에서는 탄소성 기질이 제한되므로 질산화 반응이 활성화되는 것으로 선행 연구에서 보고된 바 있다.¹⁴⁾ 본 연구에서는 연속 소화공정에서도 회분식 공정과 유사하게 질소화합물이 변화하는지 관찰하였다(Fig. 4). 먼저 TKN은 고형물 및 유기물과 같은 변화 양상을 보였다. 운전초기 TKN의 축적 양상이 관찰되었고 30일 경과시점부터 분해가 시작되면서 HRT가 증가할수록 점차 제거율도 증가하는 경향을 보였다. HRT 6일 조건의 평균 TKN 제거율은 68.7%이었다. 암모니아는 초기 TKN과 유사한 경향을 보였으나 HRT가 4일에서 5일로 증가하면서 445 mg/L에서 20 mg/L로 유출수의 암모니아성 질소 농도가 급격히 감소하였다. 특기할 만한 것은 같은 기간 질산성 질소 농도가 증가한 것으로 이 기간에 암모니아성 질소가 질산성 질소로 산화되었고 미생물 상에 변화가 있었음을 시사한다. 유기성 질소가 암모니아로 산화되는 것은 탄소성 유기물을 산화하는 종속 영양세균에 의해 진행되나 암모니아가 아질산, 질산으로 전환되는 것은 질산화 독립영양세균의 작용을 필요로 한다. 질산화 독립영양세균은 성장속도가 상대적으로 느리므로¹⁶⁾ 반응조 체류시간이 충분하지 않을 경우 세포유실(washout)이 일어나게 된다. 본 연구에서는 질산화 세균의 활성화를 위해 최소 5일 이상의 HRT가 유지되어야 함을 알 수 있었다. 유출수 질산성 질소 농도는 최대 658 mg/L까지 증가하였다. 한편 아질산성 질소는 보통 0.8~2.2 mg/L 범위에 있었으며 질산화가 시작된 시점에서 일시적으로 6~9일간 43

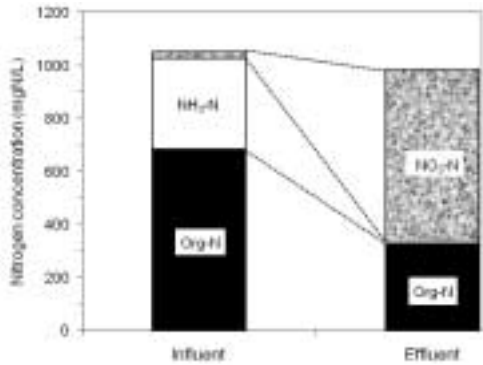


Fig. 5. Mass balance of nitrogen compounds (HRT: 6days).

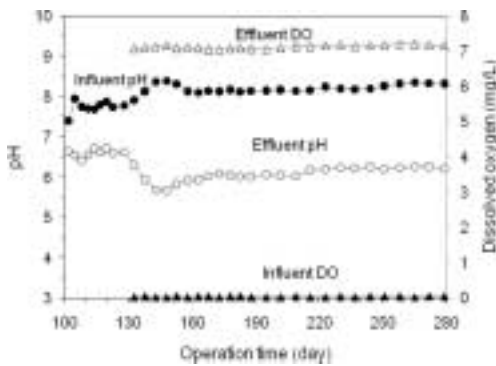


Fig. 6. Behaviors of pH and DO with operation time of continuous aerobic digester.

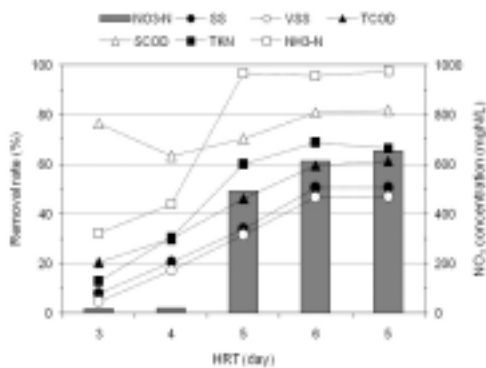


Fig. 7. Effect of HRT on digestion efficiency.

mg/L까지 상승하였으나 바로 감소하였다. HRT가 6일일 때 3~11 mg/L의 범위로 다른 HRT 조건에서보다 높았다.

Fig. 5는 유입수와 유출수의 질소 물질수지를 나타낸 그림이다. 유입 슬러지에는 유기성 질소(Org-N)와 암모니아가 높은 농도로 존재하였으나 소화조를 거치면서 크게 감소하고 질산성 질소 농도는 크게 증가함으로써 소화조 내에서 질소화합물의 산화가 크게 진행되었음을 알 수 있다. 일반적으로 안정화된 퇴비에는 암모니아성 질소의 농도가 매우 낮고 대신 질산성 질소 및 아질산성 질소 농도가 높은 것으로 알

려져 있으며, 따라서 이들 인자를 퇴비 숙성도(Maturity)의 지표로 활용하고 있다.²²⁾ 암모니아성 질소는 일정농도 이상일 경우 식물에 피해를 가하는 것으로 알려져 있기도 하다.²²⁾ 따라서 본 연구에서는 질소화합물의 안정화와 작물에 쉽게 흡수 가능한 형태의 질소가 풍부한 슬러지 액비를 생산한 것으로 평가된다. 한편 유입 및 유출 NO₂-N 농도는 극히 적은 양으로 이 그래프에서는 나타나지 않았다.

유입 슬러지의 pH는 알칼리 전처리의 영향으로 최소 8이상으로 약알칼리성을 띠었으며 유출 슬러지는 130일 경과시점까지 약 6.5를 기록하였다. 이후 pH가 5.5까지 감소하다가 다시 상승하여 약 6.0으로 지속적으로 유지되었다(Fig. 6). pH의 감소는 질산성 질소의 생성과 관련이 있으며, 질산성 질소가 생성되기 시작한 반응 80일 경과 시점보다 늦게 pH가 감소한 것은 다음과 같은 해석이 가능하다. 질산화 초기에는 생성된 수소이온이 알칼리도에 의해 소모되어 pH 감소가 적으나 알칼리도가 소진되는 시점부터는 생성되는 수소이온이 모두 pH 감소에 기여한다. 참고로 회분식 소화를 진행한 선행 연구¹⁴⁾에서는 질산성 질소가 445 mg/L까지 증가하였고 이때 pH가 3.0까지 감소하였다. 본 연구에서는 이보다 높은 질산성 질소가 생성되었으나 pH 감소는 상대적으로 적었다. 이는 알칼리도의 차이에서 기인한 것으로 추측되며, 향후 유사 연구 수행시 알칼리도 측정이 반드시 수반되어야 할 것으로 사료된다. 한편 유입 슬러지의 용존산소 농도는 혐기성 소화슬러지인 관계로 0에 가까웠으며 유출 슬러지는 7 mg/L 이상의 용존산소 농도를 지속적으로 기록하였다. 이는 반응 기간 동안 소화조 내 공기 공급이 원활하였음을 의미하는 결과이다.

3.3. HRT에 따른 소화효율 변화

소화조의 HRT는 소화효율에 직접적인 영향을 미치고 공정의 경제성을 결정짓는 주요 설계 인자이다. 본 연구의 결과를 정리하여 HRT에 따른 평균 소화효율을 도시한 바 Fig. 7과 같았다. SCOD를 제외하고 모든 지표에서 HRT와 제거효율 또는 생성효율 간에 정의 상관관계가 있었다. 이것은 HRT를 7일 이상으로 증가시킬 경우 소화효율도 증가할 가능성이 있음을 의미한다. 최대 제거효율은 NH₃-N (97.4%), SCOD (81.7%), TKN (68.7%), TCOD (61.4%), SS (50.6%), VSS (47.0%)의 순을 보였다. 또한 HRT가 4일에서 5일로 증가할 때 NH₃-N와 NO₃-N이 급격히 변화하였다. 이상의 결과를 종합할 때 질산화 반응의 활성화나 고형물 및 유기물의 원활한 분해를 위해 본 연구의 유입 고형물 부하조건에서 HRT는 최소 5일 이상으로 유지하는 것

이 바람직한 것으로 판단된다. 그러나 그림에서 보듯이 HRT를 증가시키는 시점에서의 HRT 5일 조건과 감소시키는 시점에서의 HRT 5일 조건은 소화효율에 차이를 보이므로 보다 안정적인 효율 달성이 가능한 6일을 적정 HRT 조건으로 선정하는 것이 바람직하다 판단되었다.

4. 결론

슬러지 호기성 소화 공정에서 유기물 분해 및 질산화 특성을 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 소화 효율은 소화조 수리학적 체류시간(HRT)과 정의 상관관계에 있으며 HRT 6일에서 가장 높고 안정적인 소화효율을 얻을 수 있었다. 이때 NH₃-N, SCOD, TKN, TCOD, SS, VSS의 평균 제거효율은 각각 97.4%, 81.7%, 68.7%, 61.4%, 50.6%, 47.0% 이었다.
- 2) 원료 슬러지의 VSS/SS비는 0.77이었고 알칼리 전처리 후 0.70으로 감소하였으나 호기성 소화공정에서 다시 0.75로 증가하였다. 알칼리 전처리에 의해 VSS 성분이 부분적으로 액상화되는 단계를 거치고 이후 호기성 소화에 의해 잔존 입자가 완전 액상화되는 것으로 추측되었다.
- 3) 알칼리 전처리에서 생성된 SCOD는 호기성 소화에서 최대 80.9~81.7%만 제거되고 소화조 유출 슬러지에 최소 350 mg/L가 잔류하였다. 처리된 슬러지를 액비로 사용하는 데는 문제가 없을 것으로 사료되나 최종 처분 방안이 다를 경우 추가적인 효율 향상이 필요하다.
- 4) HRT 5일 이상의 조건에서 지속적인 질산화 반응이 이루어졌으며 최대 658 mg/L의 질산성 질소가 생성되었다. 처리된 슬러지는 작물에 유해한 암모니아 성분이 거의 없고 작물에 흡수가 용이한 질산이 풍부하여 액비로의 활용성이 높을 것으로 기대되었다.
- 5) 질산화로 인해 pH가 5.5~6.0으로 감소하였으며 pH 변화는 알칼리도에 영향을 받을 것으로 분석되었다.

KSEE

사 사

본 연구는 대구대학교 학술연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 환경부, 하수도 통계, <http://info.waternow.go.kr>.
2. 신충식, "유기성오니 처리 종합대책(안)", 특별 기획 Symposium: 해양투기 금지에 따른 유기성오니(하수오니) 종합대책 및 기술 동향, 한국폐기물학회, 대전, pp. 1~17(2006).
3. Aerts, R. and Berendse, F., "The effect of increased nutrient availability on vegetation dynamics in wet healthlands", *Vegetation*, **76**, 63~69(1988).
4. Bobbink, R. and Berendse, F., "A comparative study on nutrient cycling in wet healthland ecosystem II. Litter decomposition and nutrient mineralization", *Oecologia*, **78**, 338~348(1989).
5. Munson, A. D. and Bernier, P. Y., "Comparing natural and planted black spruce seedling II. Nutrient uptake and efficiency of use", *J. Forest Res.*, **23**, 2435~2442 (1993).
6. Smith, S. R., *Agricultural Recycling of Sewage Sludge and the Environment*. CAB International, (1996).
7. Viraraghavan, T. and Ionescu, M., "Land application of phosphorus-laden sludge: a feasibility analysis", *J. Environ. Management*, **64**(2), 171~177(2002).
8. Singh, R. P. and Agrawal, M., "Potential benefits and risks of land application of sewage sludge", *Waste Management*, **28**(2), 347~358(2008).
9. 이영옥, 황진규, 황응주, "슬러지 액비의 비효효과 및 안정성 평가", *대한환경공학회지*, **30**(3), 314~322(2008).
10. Mason, C. A., Hamer, G., Fleischmann, Th., and Lang, C., "Bioparticulate solubilization and biodegradation in semi-continuous aerobic thermophilic digestion", *Water, Air, Soil Pollut.*, **34**(4), 399~407(1987).
11. Khalili, N. R., Chaib, E., Parulekar, S. J., and Nykiel, D., "Performance enhancement of batch aerobic digesters vai addition of digested sludge", *J. Hazard. Mater.*, **B76**, 91~102(2000).
12. Oviedo, M. D. C., Ramirez, J. A. L., Marquez, D. S., Alonso, J. M. Q., "Evolution of an activated sludge system under starvation conditions", *Chem. Eng. J.*, **94**, 139~146(2003).
13. Estrada, I. B., Gomez, E., Aller, A., Moran, A., "Microbial monitoring of the influence of the stabilization degree of sludge when applied to soil", *Bioresour. Technol.*, **97**(11), 1308~1315 (2006).
14. 황응주, "알칼리 전처리에 의한 슬러지 호기성 소화 및 액비 특성 변화", *대한환경공학회지*, **30**(1), 90~96(2008).
15. American Public Health Association/American Water Works

- Association/Water Environment Federation, Standard Methods for the Examination of water and Wastewater, 20th edn, (1998).
16. Rittmann, B. E. and McCarty, P. L., Environmental Biotechnology, McGraw-Hill Korea(한역판), 579~590(2002).
 17. Neyen, E., Baeyens, J., and Creemers, C., "Alkaline thermal sludge hydrolysis", *J. Hazard. Mater.*, **B97**, 295~314 (2003).
 18. Anderson, B. C. and Mavinic, D. S., "Behaviour and control of nutrients in the enhanced aerobic digestion process: pilot scale studies", *Environ. Technol.*, **14**, 301~318(1993).
 19. Bhargava, D. S. and Datar, M. T., "Ananalysis of nitrification during the aerobic digestion of secondary sludges", *Environ. Pollut.*, **58**(1), 57~72(1989).
 20. Genc, N., Yonsel, S., Dagasan, L., and Onar, A. N., "Investigation of organic nitrogen and carbon removal in the aerobic digestion of various sludges", *Environ. Monitoring Assessment*, **80**, 97~106(2002).
 21. Matsuda, A., Ide, T., and Fujii, S., "Behaviour of nitrogen and phosphorous during batch aerobic digestion of waste activated sludge-continuous aeration and intermittent aeration by control of DO", *Water Res.*, **22**(12), 1495~1501(1988).
 22. California Compost Quality Council, Compost Maturity Index, pp. 9~11(2001).