

혐기 소화 상징액과 가축 분뇨를 대상으로 한 아질산화 반응조 내 foaming 특성

임지열 · 길경익**

고려대학교 건축사회환경공학과

* 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과

characteristic of foaming in nitrification reactor using anaerobic digester supernatant and livestock wastewater

Jiyeol Im · Kyungik Gil*+

School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

** Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology*

요 약

고농도 질소를 함유하고 있는 하수는 하수처리장 처리 효율에 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 따라서 고농도 질소를 함유한 하수를 처리하기 위한 다양한 연구가 이루어지고 있다. 본 연구에서는 대표적인 고농도 질소를 함유한 하수인 혐기 소화 상징액과 가축분뇨를 대상으로 유기물 분석, foaming 실험 및 실험실 규모 아질산화 반응조 운전을 실시하였다. 유기물 분석 결과 혐기 소화 상징액은 용존성 불활성한 성분, 가축분뇨는 입자성 생물학적 분해가능한 성분이 가장 큰 부분을 차지하는 것으로 나타났다. 아질산화 반응에 적합한 체류시간은 혐기소화 상징액 2일과 가축분뇨 6일이었으며, 이와 같은 적정 체류시간에 차이는 암모니아성 질소 농도 및 유기물 성장차이에 의한 것으로 보인다. 또한 가축 분뇨 반응조 foam은 혐기 소화 상징액 반응조 foam과 비교하여 발생량은 많지만 빠르게 제거되는 특성을 보였다. 본 연구의 결과는 향후 아질산화 반응의 하수처리장 적용 시 기초 자료로 이용할 수 있을 것으로 보인다.

핵심용어 : 하수처리장, 만류수, 유입하수, 아질산화, 질소

Abstract

It has been known that sewage containing high-concentration nitrogen affects the efficiency of municipal wastewater treatment plants harmfully. Therefore, research has been actively conducted to treat sewage containing high-concentration nitrogen. The current study has analyzed organic compounds, conducted foaming tests, and operated a laboratory-level nitrification reactor with the subjects of anaerobic digester supernatant and livestock wastewater which are the typical kinds of sewage containing high-concentration nitrogen. According to the results of analyzing organic compounds, soluble inert components form the largest part of anaerobic digester supernatant while particle biodegradable components occupy the most part of livestock wastewater. About the retention time proper for the reaction of nitrification, anaerobic digester supernatant shows 2 days while livestock wastewater indicates 6 days. It seems that the difference in the proper retention time is resulted from the difference of properties in organic compounds and ammonium nitrogen concentration. In addition, livestock wastewater's reactor foam is generated comparatively more than anaerobic digester supernatant's, but it tends to be eliminated faster. It is expected that the findings of this study can be utilized as foundational data afterwards in applying the reaction of nitrification to municipal wastewater treatment plants.

Key words : Municipal wastewater treatment plant, recycle water, sewage, nitrification, nitrogen

+ Corresponding author : kgil@seoultech.ac.kr

1. 서론

현재 국내에서는 하·폐수 내 질소 제거를 위해 완전질산화에 이은 탈질 반응을 기반으로 하는 공법을 이용하는데 이는 많은 양의 산소, 탄소원, 에너지와 비용을 요구하는 문제점이 있다. 또한 국내 하수의 특징으로 다른 국가들에 비해 낮은 유기물/질소 비를 보이는데, 이는 탈질 시 다량의 추가적인 탄소원 공급이 필요하다는 것을 의미한다. 국내뿐만이 아니라 환경 선진국으로 분류되는 네덜란드, 미국, 독일, 일본 등에서도 보다 경제적이고 친환경적인 질소 처리 공법 개발 연구에 집중하여 다수의 연구 결과를 발표하고 있다(Gali *et al.*, 2008; van Dongen *et al.*, 2001; van de Graaf *et al.*, 1991; van Kempen *et al.*, 2001). 여기서 주목해야 할 점은 혁신적인 연구 결과로 발표되는 질소 제거 공법들은 주로 아질산화 반응을 기반으로 하는 공법이라는 점이다. 이론상 아질산화 반응이 완전 질산화 반응에 비해 소비되는 산소를 25% 절감할 수 있다고 알려져 있지만, 실험적인 연구에 의하면 최대 58%까지 산소 소비를 절감 시킬 수 있다고 보고되기도 하였다(Li *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2009; van Loosdrecht and Jetten, 1998). 이처럼 국제적인 관심을 받고 있는 아질산화 반응을 이용한 질소 처리 공법 개발 연구가 주목 받음에 따라 국내에서도 다양한 아질산화 반응에 관해 다수의 연구가 수행하고 있다(Gil *et al.*, 2002; Im and Gil, 2014). 특히, 국내에서 선행되어진 연구 결과에 따르면 고농도의 질소를 함유한 혐기 소화 상징액 및 가축 분뇨 등에서는 안정적인 아질산화 반응을 유도 할 수 있다고 보고되고 있다(Gil and Choi, 2004; Im and Gil, 2013). 이는 아질산화 반응이 고농도 질소를 함유한 하·폐수 문제를 해결책으로 제시 될 수 있다는 것을 의미한다.

Foaming은 하수처리장에서 발생하는 문제 중 전세계 하수처리장에서 foaming 문제가 발생한 것으로 조사되었다(Gaetano and Michele, 2013; Kang *et al.*, 2006; Pitt and Jenkins, 1990). 이러한 foaming은 처리수와 함께 다음 공정으로 유출되게 되면 부유물질과 유기물의 증가원인으로 작용할 수 있으며 부수적으로 악취 유발, 안전 및 foaming 유발 미생물에 의한 감염 등의 문제가 뒤따를 수 있다. 특히 foaming 발생 원인 중 하나인 사상균은 성장속도가 느려 긴 Solid retention time (SRT)조건에서 많이 발견되는 특징을 보이는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 독립영양세균 (autotrophic bacteria)은 종속영양세균 (heterotrophic

bacteria)과의 관계에서 산소에 대해 열성으로 알려져 있다. 즉, 종속영양세균에 의해 유기물 분해에 산소가 우선적으로 소모된 후 독립영양세균에 의해 무기물인 암모니아성 질소의 산화에 산소가 소모된다. 이는 질산화가 일어나기 위해서는 우선적으로 생물학적 분해 가능한 유기물이 제거되어야 한다고 해석 가능하다. 현재 사용되고 있는 유기물 기준은 Biological oxygen demand (BOD, 생물학적 산소 요구량)와 Chemical oxygen demand (COD, 화학적 산소 요구량)의 두 가지로 구분하여 사용되고 있다. 하지만 2000년 International water association (IWA)에서 세분화하여 Soluble biodegradable (S_s, 용존상 생물학적 분해 가능한 유기물), Particle biodegradable (X_s, 입자상 생물학적 분해 가능한 유기물), Soluble inert (S_i, 용존상 불활성 유기물) 그리고 Particle inert (X_i, 용존상 불활성 유기물)의 네 가지 성분으로 분류 한 연구 결과를 발표하였다. 이에 미생물 비성장속도와 필드 등을 이용하여 유기물을 분류하는 방법들이 소개되었지만, 미생물 호흡율을 이용하는 방법이 가장 효과적이라고 보고되고 있다. 이렇게 구분한 유기물 성상은 activated sludge model (ASM, 활성슬러지 모델)에 적용하여 보다 정확한 하수처리장 모델링을 기대 할 수 있다(Im and Gil, 2011). 하지만 현재까지 언급된 foaming과 유기물 성상에 관한 연구도 충분히 이루어지고 있지 않다.

본 연구에서는 아질산화 반응조를 운전을 통해 혐기 소화 상징액 및 가축 분뇨의 아질산화 반응 특성을 분석하고자 하였다. 또한 유기물 성상 분석 및 반응조 내 foaming 특징에 관하여 분석하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 연구 대상 시료

본 연구는 서울 A하수처리장 혐기 소화조 상등액과 B 가축분뇨처리장의 유입수를 대상으로 진행하였다. Table 1에서는 본 연구에 사용된 연구 대상 시료의 성상을 보여주고 있다. 혐기 소화 상징액의 암모니아성 질소의 농도는 약 950 mg/L였고, 가축 분뇨는 약 2,520 mg/L임을 확인할 수 있다. 또한 가축분뇨의 경우 혐기 소화 상징액과 비교하여 COD는 낮은 반면 BOD는 높은 것으로 측정되었다. 또한 질산화를 위한 알칼리도가 부족함이 없도록 Na(H)CO₃를 이용하여 알칼리도를 보충하였다.

Table 1. Characteristics of anaerobic digester supernatant and livestock wastewater

Parameter	Anaerobic digester supernatant		Livestock wastewater	
	Range	Median	Range	Median
Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)	4,600 ~ 4,800	4,700	8,700 ~ 9,100	8,900
COD (mg/L)	17,800 ~ 19,400	18,200	13,500 ~ 15,700	14,900
BOD (mg/L)	4,320 ~ 5,420	4,840	9,800 ~ 12,400	10,400
TN (mg/L)	1,048 ~ 1,460	1,220	3,200 ~ 3,342	3,050
NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	940 ~ 970	950	2,450 ~ 2,590	2,520

2.2 Nitrification reactor

실험실 규모 아질산화 반응조는 Batch type으로 운전하였으며, 외부에 항온 수조, 히터와 냉각기를 설치하여 35℃ 온도가 유지되도록 하였다. 또한 반응조 내부에 교반기를 설치하여 완전혼합상태를 이루도록 하였으며, 반응조 하단에 공기공급펌프와 연결된 산기기를 설치하여 반응조 내 질산화에 필요한 산소가 부족함이 없도록 연속적으로 공급하였다. 실제 운전 기간동안 실험실 규모 아질산화 반응조 내 DO 농도는 실제 하수처리장 운전 DO농도인 2 ~ 3 mg/L 이상으로 운전되었다. 연구에 사용된 수질 분석은 standard method 20th 에 의거하여 분석하였다(APHA, 1998).

2.3 Oxygen utilization rate test

유기물 성장 분석을 위한 oxygen utilization rate (OUR, 산소소모율) 실험은 포기 반응조와 Dissolved oxygen (DO) 측정 반응조로 구성하였다. 포기 반응조와 DO 측정 반응조의 시료 유입과 반송을 위해서 유량조절펌프를 사용하였으며, DO 반응조 하단에 자석 교반기를 설치하여 DO 측정 반응조에서도 완전 혼합상태가 이루어지도록 하였다. 포기 반응조에서는 실험 시작 전 최소 24시간 이상 포기 후 반응조 내 슬러지가 내생호흡상태에 도달하도록 한 후 시료를 주입하였다. 또한 유기물 분해 외에 질산화로 인한 산

소 소모가 없도록 포기 반응조 내에 질산화 억제제를 주입하여 질산화를 방지하였으며, 외부공기가 유입되는 것을 방지하기 위해 DO 측정 반응조는 DO 전극을 외부와 차단하여 설치하였다. OUR 실험 시작 후 짧은 간격 (5분)으로 유입과 반송을 시켜가며 미생물에 의한 산소 소모율을 측정하였다.

2.4 Foaming test

Fig. 1은 본 실험에서 foaming power와 foam stability 측정을 위한 실험의 모식도를 나타내고 있다. Foam 측정을 위해 산소 공급을 위한 산소 공급 펌프에 산소 유량계를 부착한 후 foaming 반응조 하단에 연결한다. 이는 foaming 반응조로 공급되는 산소의 양을 정량적으로 측정하여 foaming power를 분석하기 위함이다. 산소가 공급되면 분석하고자 하는 시료를 넣은 반응조 내 foaming이 발생하게 되며, foaming이 발생하면 시료의 수위가 감소하게 되는데 이 수위차이를 측정한다. 본 연구에서는 정확한 분석을 위해 카메라를 이용하여 촬영 후 분석을 실시하였다. 본 연구에서 foam의 지표로 foaming power와 foam stability을 이용하였는데, 이를 구하는 식은 아래의 식 1과 식 2를 통해 확인 할 수 있다. Foaming power는 주입되는 공기량이 비해 foaming 발생 부피를 나타내는 지표이며, foam stability는 foaming이 발생한 후 다시 안정적으로 foam이 사라지는 시간을 수치화한 값이다(Nakajima and Mishima, 2005).

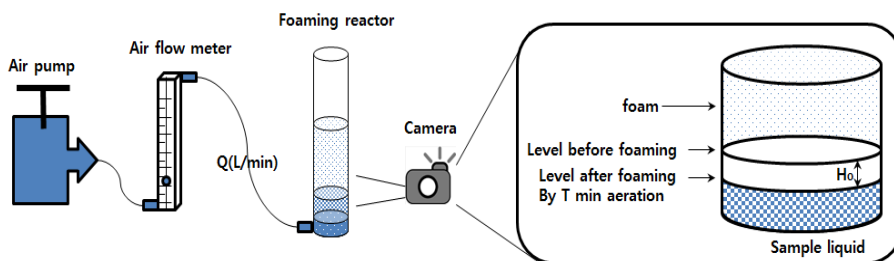


Fig. 1. Schematic diagram of foaming test

$$Foaming\ power\ (P) = \frac{H_0 \times A}{Q \times T}$$

식 1

H_0 : difference between the levels before and after aeration

A: the cross section area of the cylinder (cm²)

Q: the amount of aeration per minute (L/min)

T: the aeration period (min)

$$S = \ln 2 / k_1$$

식 2

k_1 : gradient of the rapid process

3. 연구결과 및 고찰

3.1 유기물 성상 분석

Fig. 2에서는 OUR 실험을 통해 (a) 혐기 소화 상징액과 (b) 가축 분뇨의 유기물 성상 분석 결과를 나타내고 있다. Fig. 2 (a) 혐기 소화 상징액의 경우 대부분

의 유기물이 생물학적으로 분해 불가능한 유기물로 구성되어 있음을 확인 할 수 있다. 특히 S_i 성분으로 존재하는 유기물이 가장 많은 부분을 차지하고 있음을 확인 할 수 있다. 일반적으로 혐기 소화는 슬러지 처리공정에 위치하는데, 하수처리장 내 생물 처리 공정, 농축조 및 혐기 소화 등을 거치게 되며 대부분의 생물학적 분해 가능한 유기물은 제거가 이루어진 것으로 판단된다. 이 후 잔류하는 유기물은 대부분 생물학적으로 처리하기 어려운 유기물로 이는 하수처리장 운전 에 악영향을 미친다고 알려져 있다. Fig. 2 (b) 가축 분뇨의 경우에는 Fig. 2 (a) 혐기 소화 상징액과는 다르게 대부분 생물학적으로 분해 가능한 S_s 와 X_s 성분으로 구성되어 있음을 확인 할 수 있다. 특히 X_s 성분으로 존재하는 유기물이 가장 많은 부분을 차지하며, 이는 분뇨의 영향에 의한 것으로 사료된다. 혐기 소화 상징액 유기물 구성 비율은 S_s : 5%, X_s : 7%, S_i : 76% 그리고 X_i : 12%였으며, 가축분뇨의 유기물 구성 비율은 S_s : 32%, X_s : 41%, S_i : 13% 그리고 X_i : 14%로 나타났다.

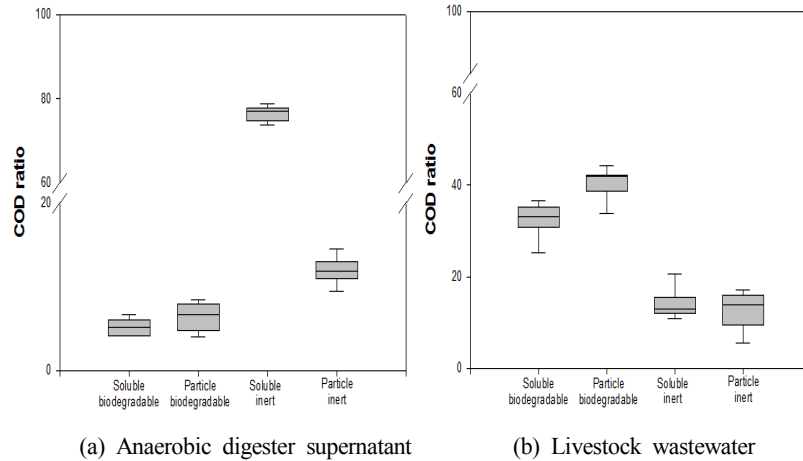


Fig. 2. COD fraction in anaerobic digester supernatant and piggery wastewater

3.2 아질산화 반응조 운전 결과

Fig. 3은 혐기소화 상징액 그리고 Fig. 4는 가축분뇨의 제거된 암모니아성 질소 농도, 유출수의 질산성 질소 및 아질산성 질소의 농도를 보여주고 있다. 실험실 규모 아질산화 반응조의 운전결과를 나타내고 있다. SRT에 따라 운전 구간을 구분하였으며, 실험실 규모 아질산화 반응조 운전은 초기 긴 SRT에서 점차 SRT를 줄이는 방식으로 운전하였다. Table 2에서는 운전 조건과 암모니아성 질소 제거율 및 아질산성 질소 전환율을 확인할 수 있다. Fig. 3 혐기 소화 상징

액 운전 결과 R4 구간을 제외하고 안정적인 암모니아성 질소의 제거 (약 90%)가 이루어진 것을 확인할 수 있다. R4 구간에서는 암모니아성 질소 제거 효율이 급격하게 감소하였는데 약 30%의 효율을 보였는데, 이는 실험실 규모 아질산화 반응조에서 유입된 암모니아성 질소를 제거하기에는 체류시간이 짧았던 것으로 판단된다. 반면 유출수 내 아질산성 질소는 R2와 R3구간에서 검출되었다. 특히 R3 구간에서는 제거된 암모니아성 질소의 약 90%가 아질산성 질소로 전환된 것을 확인 할 수 있었으며, 아질산화 반응 유도를 위한 혐기 소화 상징액의 적정 SRT로 판단된

다. 반면 SRT가 긴 R1 구간에서는 제거된 암모니아성 질소의 대부분이 질산성 질소로 전환된 것을 확인할 수 있다. Fig. 4 가축분뇨의 경우에도 혐기 소화 상징액과 유사한 운전결과를 보였다. R3와 R4 구간에서는 암모니아성 질소의 제거 효율이 감소하는 것을 확인할 수 있으며, R1 구간에서는 질산성 질소로의 전환이 이루어졌다. R2 구간에서 가장 높은 아질산성 질소의 제거 효율 (약 80%)을 보였다. 혐기 소화 상징액과 가축 분뇨에서 아질산화 반응이 최적 아질산화 반응을 위한 SRT가 다르게 나타난 것은 3.1

에서 설명한 유기물 성상 차이와 암모니아성 질소의 농도에 영향을 받은 것으로 판단된다. 또한 혐기 소화 상징액에서 가축분뇨 보다 높은 아질산성 질소 전환율을 보였는데, 가축분뇨 내 S_s 와 X_s 가 분해를 위해 긴 체류시간을 필요로 한 것에 영향을 받았을 것으로 보인다. 즉 아질산화 반응 유도를 위해서는 유입수 내 암모니아성 질소 농도 및 유기물 성상 비율을 고려하여 적정 운전조건을 선정하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

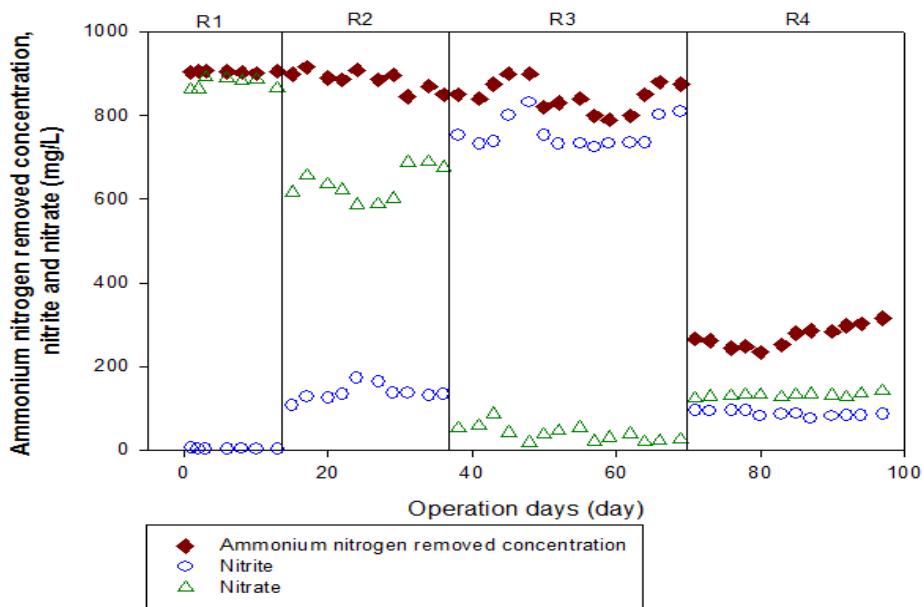


Fig. 3. Operation result using anaerobic digester supernatant

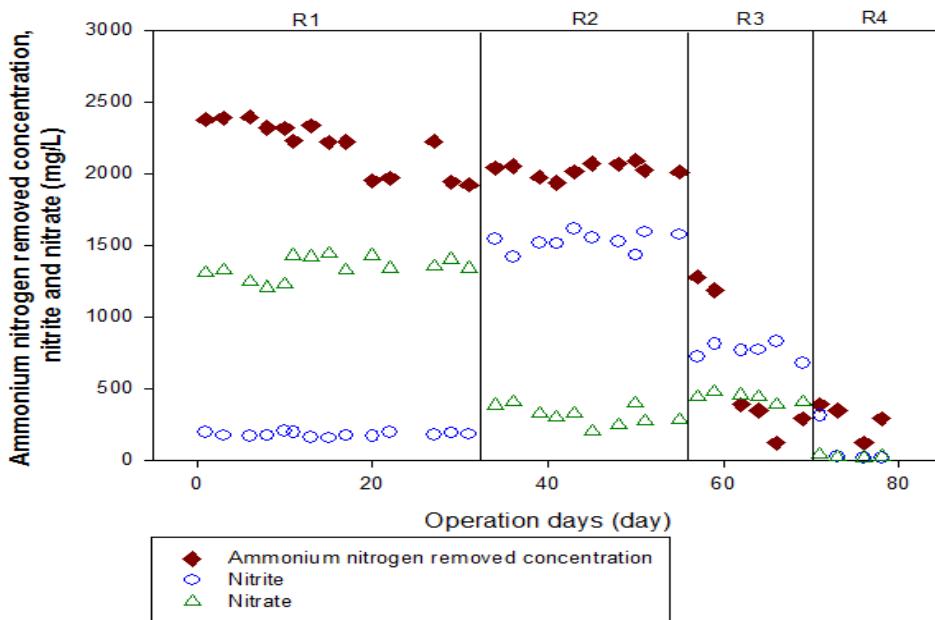


Fig. 4. Operation result using livestock wastewater

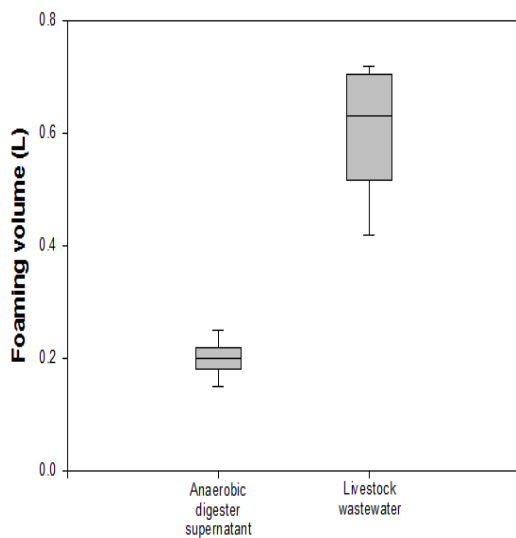
Table 2. Summary of operation result

Parameter	Period	SRT (day)	Ammonium nitrogen removal efficiency (%)		Nitrite conversion efficiency (%)	
			Range	Median	Range	Median
Anaerobic digester supernatant	R1	8	95.1 ~ 95.7	95.4	0.3 ~ 0.7	0.4
	R2	4	88.9 ~ 96.4	93.5	11.9 ~ 18.9	15.1
	R3	2	83.1 ~ 95.1	89.1	84.3 ~ 92.9	89.8
	R4	1	24.6 ~ 33.4	28.8	26.6 ~ 38.9	33.0
Livestock wastewater	R1	8	88.4 ~ 91.5	90.8	6.5 ~ 9.8	8.0
	R2	6	80.0 ~ 83.8	82.1	63.7 ~ 79.2	77.7
	R3	4	52.1 ~ 57.6	55.2	53.1 ~ 64.9	57.8
	R4	2	5.3 ~ 14.9	12.5	5.4 ~ 14.6	7.8

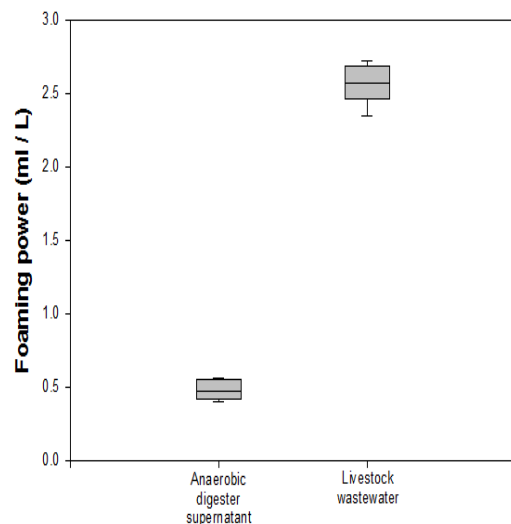
3.4 Foaming power

Fig. 5는 혐기소화 상징액과 가축분뇨의 운전 구간별 foaming power를 분석한 결과를 보여주고 있다. Fig. 5 (a)의 경우 foaming test 시 발생한 foam의 부피를 나타내고 있으며, 가축분뇨의 경우 혐기 소화 상징액과 비교하여 foam 부피는 약 3배 정도 많은 foam이 발생하였다. 이는 혐기 소화 상징액과 가축분뇨를 대상으로 아질산화 반응조 운전을 할 경우 발생하는 foam을 관리 할 수 있는 방안이 필요하다는 것을 의미한다. 이를 기반으로 Fig. 5 (b)의 foaming power 분석을 실시하였으며, foaming power는 단위

부피의 산소가 공급되었을 경우 발생하는 foam의 부피를 정량적으로 나타낸 값이다. 혐기 소화 상징액과 가축 분뇨의 foaming power를 비교하면 가축분뇨가 5 배 정도 높은 값을 보였다. 이는 동일한 산소량이 공급되었을 경우 가축분뇨를 대상으로 운전하는 반응조에서 혐기 소화 상징액을 대상으로 하는 반응조에 비해 발생하는 foam의 양이 많다는 것이다. 즉, 가축 분뇨 대상 반응조에서는 foam에 의한 영향이 크다는 것을 의미하며, 가축 분뇨 대상의 아질산화 반응조에서 foam에 대한 특별한 관리가 필요할 것으로 판단된다.



(a) Foaming volume



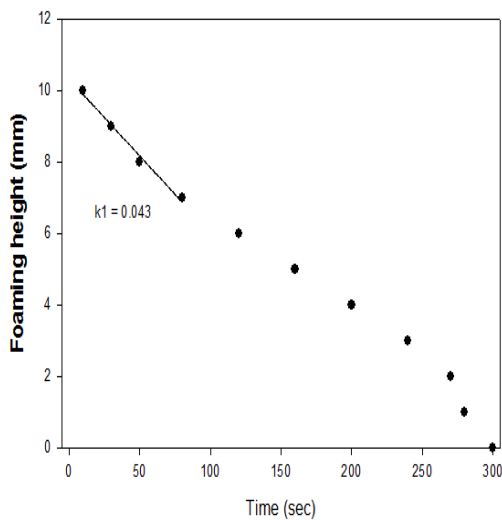
(b) Foaming power

Fig. 5. Analysis of foaming volume and foaming power using anaerobic digester supernatant and livestock wastewater

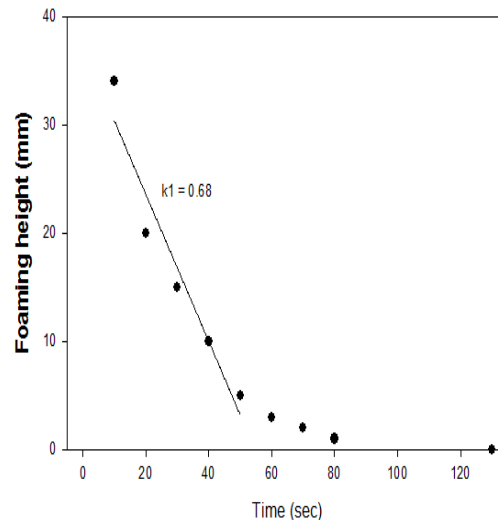
3.5 Foam stability

Fig. 6 (a)와 (b)는 각각 혐기 소화 상징액과 가축 분뇨의 foam stability 실험의 대표적인 결과를 보여주고 있다. Foam stability 분석을 위해 산소를 공급한 후 foam이 발생한 후 산소 공급이 중단하고 시간에 따른 foam이 감소되는 높이를 측정하였다. 일반적으로 foam stability 실험에서 산소 공급을 중단한 뒤 foam이 초반에는 급격히 줄어들기 시작하면서 점차 그 속도가 감소하는 경향을 보이는 것으로 보고되었다(Nakajima and Mishima, 2005). Foam stability는 앞서 언급한 바와 같이 k_1 에 대한 함수이다. 분석 결과 혐기 소화 상징액의 경우 산소 공급을 중단 한 후 약 300초 정도 후 foam이 사라진 반면 가축 분뇨는 130초 정도 후 foam이 사라지는 것을 확인 할 수 있다. 이는 혐기 소화 상징액의 foam이 사라지기까지 가축

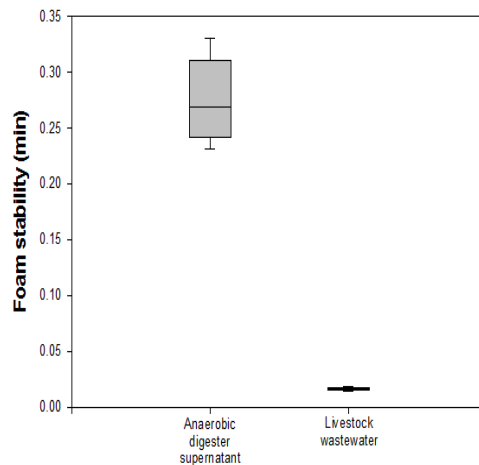
분뇨에 비해 시간이 오래 걸린다는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 6 (c)는 foam stability 분석 결과를 보여주고 있다. 혐기 소화 상징액의 foam stability값이 가축 분뇨에 비해 약 10배 이상 긴 것으로 나타났으며, 이는 혐기 소화 상징액의 foam이 제거되는 걸리는 시간은 가축분뇨 foam에 비해 긴 시간을 필요로 한다는 것을 알 수 있다. 이는 3.4에서 분석한 foam power를 고려하여 해석하면, 가축 분뇨에서 발생하는 foam의 경우 혐기 소화 상징액에서 발생하는 foam에 비해 단위 산소량에 대해 foam 발생량은 많지만 산소 공급을 중단하게 되면 빠르게 제거되는 특성을 가진다고 생각할 수 있다. 이는 가축 분뇨와 혐기 소화 상징액에서 발생하는 foam을 관리하는데 중요한 자료로 사용될 수 있을 것이라 판단된다.



(a) Anaerobic digester supernatant



(b) Livestock wastewater



(c) Foam stability

Fig. 6. Analysis of foam stability using anaerobic digester supernatant and livestock wastewater

4. 결론

혐기 소화조 상등액과 가축분뇨를 대상으로 유기물 성장 분석, 실험실 규모 아질산화 반응조 운전 및 foaming test를 통해 다음과 같은 결론을 도출 할 수 있었다.

1) 혐기 소화 상등액과 가축분뇨의 유기물 성상을 분석한 결과 혐기 소화 상등액은 용존성 불활성 유기물의 비율이 가장 큰 것으로 나타났고, 가축 분뇨의 경우 입자성으로 존재하는 생물학적 분해 가능한 유기물이 가장 높은 비율을 보이는 것으로 나타났다. 이와 같은 유기물 성장 분석 결과는 혐기 소화 상등액과 가축분뇨에 적합한 생물학적 처리 공법 개발의 기초자료로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

2) 아질산화 반응이 유도되는 적정 체류시간은 혐기 소화 상등액 2일 가축 분뇨 6일로 나타났다. 또한 적정 체류시간 조건에서 혐기 소화 상등액에서 가축 분뇨에 비해 높은 아질산화 질소 전환율을 보였다. 이는 암모니아성 질소 농도 및 유기물 성장 비율 차이에 기인한 것으로 보이며 운전조건을 선정 시 고려해야 할 것으로 판단된다.

3) 가축 분뇨의 경우 혐기 소화 상등액에 비해 foam 발생량은 많지만 빠르게 제거되는 특성을 가지는 것으로 나타났다. 이와 같은 foam 분석 자료는 향후 는 가축 분뇨와 혐기 소화 상등액에서 발생하는 foam을 관리하는데 중요한 기초 자료로 이용할 수 있을 것으로 보인다.

사 사

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2013R1A2A2A01068579).

5. 참고문헌

APHA, AWWA and WEF (1998). *Standard method for examination of water and wastewater. 20th edition*, Washington DC, US.

Gaetano, D B and Michele, T (2013) Foaming in membrane bioreactors: Identification of the causes,

Journal of Environmental Management., 128, pp. 453-461.

Gali, A, Dosta, J, Lopez-palau, S and Mata-alvarez, J (2008) SBR technology for high ammonium loading rates. *Wat. Sci. & Tech.*, 58(2), pp. 467-472.

Gil, K, Choi, E, Yun, Z, Lee, J, Ha, J and Park, J (2002) The nomographic design approach to recycled water treatment by the nitrification process, *Wat. Sci. & Tech.*, 46(11-12), pp. 85-92.

Gil, K and Choi, E (2004) Nitrogen removal by recycle water nitrification as an attractive alternative for retrofit technologies in MWTs, *Wat. Sci. & Tech.*, 49(5-6), pp. 39-46.

Im, J and Gil, K (2011). Effect of anaerobic digestion on the high rate of nitrification, treating piggery wastewater, *Journal of Environmental Sciences*, 23(11), pp. 1794-1800.

Im, J and Gil, K (2013). Changes in the Characteristics of Organic Compounds Depending on the Nitrification Efficiency. *Environ Earth Sci*, 70, pp. 1297-1305.

Im, J, Jung, J, Bae, H, Kim, D and Gil K (2014). Correlation between Nitrite Accumulation and Concentration of AOB in a Nitrification reactor. *Environ Earth Sci*, 72, pp. 289-297.

Li, H B, Cao, H B, Li, Y P, Zhang, Y and Liu, H R (2010). Effect of Organic Compounds on Nitrite Accumulation during the Nitrification Process for Coking Wastewater. *Wat Sci Tech*, 62(9), pp. 2096-2105.

Nakajima, J and Mishima, I (2005) Measurement of foam quality of activated sludge in MBR process. *Acta hydrochim. hydrobiol.*, 33(3), pp. 232-239.

Kang, M G, Kim, Y, Bang, S H, Lee, J W and Ha, J S (2006) Control of bulking and foaming caused by *Microthrix parvicella*, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 28(4), pp. 376-383. [Korean Literature]

Pitt, P and Jenkins, D (1990). Causes and control of *Nocardia* in activated sludge. *Journal WPCF.*, 62, pp. 143-150.

Yang, Q, Liu, X H, Peng, Y Z, Wang, S Y, Sun, H W and Gu, S B (2009). Advanced Nitrogen Removal via Nitrite from Municipal Wastewater in a Pilot-plant Sequencing Batch Reactor. *Wat Sci Tech*,

- 59(12), pp. 2371-2377.
- van de Graaf, A A, de Bruijn, P, Robertson, L A, Kuenen, J G and Mulder, A (1991). Biological oxidation of ammonium under anoxic conditions : ANAMMOX process. *Intern. Symp. Environ. Biotechnol.* 2. pp. 667-669.
- van Kempen. R, ten Have, C C R, Meijer. S C F, Mulder. J W and Duin. J O J (2001). SHARON process evaluated for improved wastewater treatment plznt nitrogen effluent quality. *Wat Sci Tech*, 52(4), pp. 55-62.
- van Dongen, U, Jetten, M C M and van Loosdrecht, M C M (2001). The SHARON-ANAMMOX process for the treatment of ammonium rich wastewater. *Wat Sci Tech*, 44(1), 153-160.
- van Loosdrecht, M C M and Jetten, M C M (1998). Microbiological conversions in nitrogen removal. *Wat Sci Tech*, 38, pp. 1-7.
- 논문접수일 : 2014년 10월 07일
 - 심사의뢰일 : 2014년 10월 08일
 - 심사완료일 : 2014년 10월 10일