Journal of Korean Society on Water Quality, Vol. 26, No. 5, pp.732-739 (2010)

고온호기성 소화공정 배가스 처리를 위한 바이오필터 성능평가

배병욱† · 최기승

대전대학교 환경공학과

Performance Evaluation of Biofilter Treating Autothermal Thermophilic Aerobic Digestion Offgas

Byung-Uk Bae† · Ki-Seung Choi

Department of Environmental Engineering, Daejeon University

(Received 14 January 2010, Revised 22 May 2010, Accepted 25 May 2010)

Abstract

Two combined autothermal thermophilic aerobic digestion (ATAD) and biofilter (BF) systems were operated to treat the piggery wastewater and the ammonia offgas. Experimental results indicated that the organic removal efficiency of ATAD-2, operated with oxygen, was higher than that of ATAD-1, operated with air. The concentration of ammonia in ATAD-2 offgas was higher compared to ATAD-1 offgas, but the total amount of ammonia produced from ATAD-2 was less than that from ATAD-1 due to the lower oxygen flowrate. The ammonia gas produced from both ATAD reactors was successfully removed by the BF. The BF-1, connected with ATAD-1, removed 93% of ammonia at the loading rate of 9.4 g NH_3-N/m^3/hr. The BF-2, connected with ATAD-2, removed 95% of ammonia gas at the loading rate of 8.1 g NH_3-N/m^3/hr. As the nitrification process continued, pH value of recirculating solution continuously decreased due to the accumulation of nitrate. When the ammonia loading rate was less than 22.7 g NH_3-N/m^3/h, the proper replacing cycle of recirculating solution was in the range of 10 to 11 days. Almost 90% of total mass of nitrogen fed into the each BF was confirmed from the mass balance on nitrogen.

keywords : Ammonia offgas, Autothermal thermophilic aerobic digestion, Biofilter, Nitrogen mass balance, Piggery wastewater

1. 서 론

돈사폐수는 주로 생물학적 처리공정에 의해 처리되고 있으나 돈사폐수에는 난분해성물질이 다량으로 존재하고 질소와 인과 같은 영양염류의 농도가 매우 높아 생물학적 처리만으로는 방류수 수질기준을 만족하기 어려운 실정이다. 이런 배경에서 돈사폐수는 전처리가 필요하다는 인식이 확산되고 있으며, 고온호기성 소화조(autothermal thermophilic aerobic digestion, ATAD) 공정도 돈사폐수를 비롯한 여러 유기성 폐기물의 전처리 기술로 대두되고 있다(이윤석 등, 2007; Li et al., 2002).

ATAD 공정은 호기성 소화의 한 변형으로서, 북미지역에서 하수슬러지(sludge) 처리에 사용되고 있다. ATAD 반응조는 보온을 위해 외부와 단열되며. 미생물에 의한 산화과정에서 발생하는 열에 의해 고온(55 ~ 70°C)으로 운전된다. 문헌에 의하면 단위 kg의 휘발성 유기물(volatile solids)이 산화될 때 약 20,000 KJ의 열이 발생한다(Rittmann and McCarty, 2001). 이 열은 반응조 내에 축적되어 고온 미생물이 우점종으로 활동할 수 있는 조건을 만들며, 이러한 열에 의해 자가 발열이 가능하게 된다.

ATAD 공정의 장점은 상대적으로 짧은 체류시간(hydraulic retention time, HRT)에서 재래식 호기성 소화조와 비슷한 30 ~ 50%의 휘발성 고형물 감량을 달성할 수 있다는 것과 운전이 간편하다는 것이다. 또한, 혐기성 소화와 비교할 때 박테리아와 바이러스가 크게 감소하고, 반응조의 온도가 55°C 이상 유지될 경우 병원성 바이러스, 세균, 기생충 알, 그리고 기생충들이 측정 한계 이하로 감소한다(Stensel and Coleman, 2000).

그러나 ATAD 공정에서는 유기물이 분해되는 과정에서 가스가 배출된다. 배출가스는 고농도 암모니아 가스를 비롯하여 mercaptan, dimethyl disulfide, 그리고 H_2S와 같은 황화합물로 구성된다(Shanchayan et al., 2006). ATAD 공정이 유기성 폐기물 처리 기술로 사용되기 위해서는 배가스의 적절한 처리가 필요하다. 이런 배경에서 본 연구에서는 돈사폐수 처리용 ATAD 공정에서 발생하는 고농도 암모니아 가스를 바이오필터(biofilter, BF)로 처리하는 기술에 대해 연구하였다. 즉, ATAD 공정으로 돈사폐수를 처리함과 동시에 ATAD에서 발생하는 배가스 내 암모니아 가스를 제거하기 위하여 BF를 운전하면서, ATAD+BF 시스템의 성능을 조사하였다.

† To whom correspondence should be addressed.
baebu@dju.ac.kr

2. 연구방법

2.1. 돈사폐수

ATAD 반응조 운전에 사용된 돈사폐수는 경기도 안성에 소재한 돈사에서 채취하였고, 그 성상을 Table 1에 수록하였다. 실험실로 운반된 돈사폐수를 냉장보관하면서 주기적으로 원수의 성상을 분석하였다.

2.2. 실험장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 ATAD+BF 시스템 구성도이다. 유효용량 4.5 L의 ATAD 2기를 운전하였는데, ATAD-1은 공기를 산소원으로 하고, ATAD-2는 산소발생기(용량 7.5 L/min, RMC-087C4 (주)옥서스)를 통해 순도 77%의 산소를 공급하였다. 스컴의 발생을 우려하여 50 cm의 여유고를 두었으나, ATAD-1의 경우 스컴이 과도하게 발생하여 실험 과정에서 여유고 30 cm를 더 늘렸다. 그러나 ATAD-2는 50 cm의 여유고만으로도 스컴 발생으로 인한 운전상의 문제가 없었다. 반응조 하단에 산소전달 효율을 높이기 위해 세라믹 재질의 다공성 산기장치를 설치하였다. 한편, 반응조의 온도를 30°C까지 가온할 수 있는 열선과 단열재을 설치하여 초기 운전하였으나, 운전 40일 이후 반응조의 온도가 50°C 이상 상승한 이후에는 열선의 전원을 차단하였다.

ATAD-1에서 발생하는 암모니아 가스는 BF-1로, 그리고 ATAD-2에서 발생하는 암모니아 가스는 BF-2로 전량 유입시켰다. BF는 내경 10 cm, 높이 40 cm의 아크릴 칼럼으로 제작하였으며, 질산화 미생물이 식종된 담체를 각각 2 L씩 동일하게 충전하였다. 본 연구에서는 (주)에코다임에서 개발한 직경 7~8 mm, 길이 10~20 mm인 펠렛(pellet) 형 담체를 사용하였다.

BF에 식종할 질산화 미생물을 선택적으로 배양하기 위하여 대전하수처리장에서 반송슬러지를 채취하여 용량 12 L의 회분식 반응조에서 배양하였다. 기질(NH_4HCO_3)을 1일 1회 주입하였으며, 산기식 포기기를 이용하여 용존산소 농도를 5 mg/L 이상으로 유지하였다. pH 완충제로 $NaHCO_3$를 투입하였으며, NH_4^+-N 농도를 초기 10 mg/L에서 점진적으로 80 mg/L까지 증가시켰다.

담체를 충전한 BF에 수분을 공급하기 위하여 $NaHCO_3$ 용액(2,000 mg/L)으로 제조된 순환수를 정량펌프와 분사노즐로 담체 표면에 1.8 L/hr의 유량으로 공급하였다. 즉, $NaHCO_3$를 순환수의 pH 완충제로 사용하여 질산화 미생물의 탄소원으로 사용될 수 있도록 하였다. 한편, 순환수는 pH를 on-line pH meter(SP-500D, (주)대양)로 측정하였으며, 순환수를 10~11일 간격으로 주기적으로 교체하였다.

2.3. 운전방법

Table 2는 ATAD+BF 시스템의 운전단계를 정리한 것이다. 총 194일간 Phase I에서 Phase VI으로 구분하여 운전하였다. 운전 104일까지는 ATAD의 성능을 조사하기 위하여 부하를 총 3단계(Phase I에서 III)로 구분하여 운전하였

Table 1. Characteristics of piggery wastewater used in this study

pH	TCOD	SCOD	TBOD	SBOD	TS	VS	T-N	NH_4^+-N	T-P
7.9	27,000	17,000	15,000	8,000	12,000	7,000	1,300	1,000	500
~	~	~	~	~	~	~	~	~	~
8.2	33,000	24,000	17,000	10,000	14,000	9,000	1,900	1,400	600

Note) TCOD: total CODcr, SCOD: soluble CODcr, TBOD: total BOD, SBOD: soluble BOD

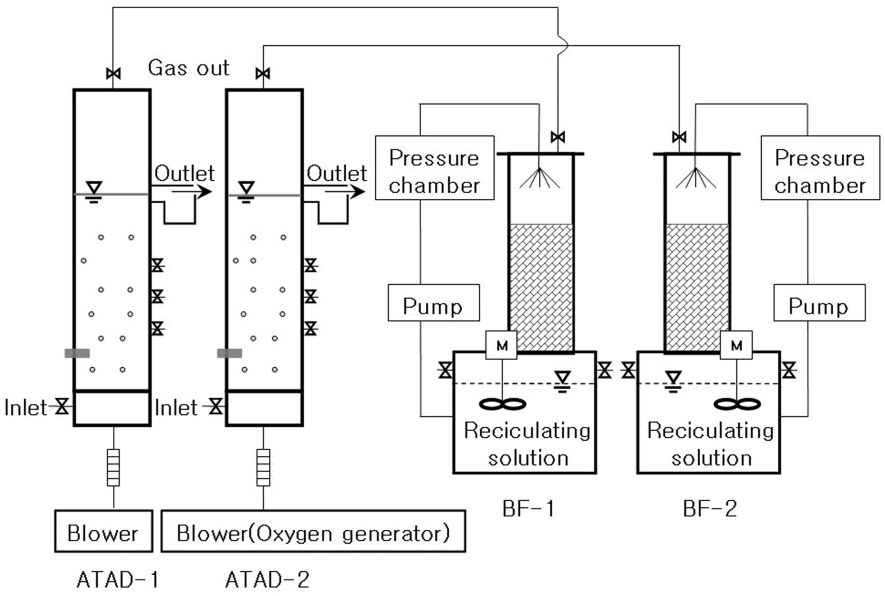


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

Table 2. Operation phases for the ATAD reactors

Operating phase	Operating duration (d)	Input flow (L/day)	HRT (d)	TBOD loading rate (kg TBOD/m^3/d)		Operating mode
				Range	Average	
I	1 ~ 64	4.5	3	5.0 ~ 5.7	5.4	ATAD only
II	65 ~ 81	2.3	2	8.0 ~ 8.5	8.1	ATAD only
III	82 ~ 104	4.5	1	15 ~ 16	15.5	ATAD only
IV	105 ~ 136	2.3	3	5.0 ~ 5.7	5.4	ATAD + BF
V	137 ~ 167	2.3	2	7.5 ~ 8.5	8.0	ATAD + BF
VI	168 ~ 194	2.3	1	16.5 ~ 17	16.9	ATAD + BF

고, 운전 105일부터 약 90일 동안에는 BF를 ATAD와 결합한 후 ATAD에서 발생하는 암모니아 가스 제거 실험을 수행하였다. Phase I 동안에는 ATAD의 HRT를 3일로 운전하였으며, Phase II와 Phase III 동안에는 각각 2일 및 1일로 단축하면서 부하를 증가시켰다. 한편, ATAD+BF를 운전한 Phase IV에서 VI 동안에는 ATAD의 부하를 Phase I에서 III에서 운전한 부하와 유사한 부하가 유지되도록 하였다. 즉, Phase I에서 III 동안에 얻은 배가스 내 암모니아 농도가 Phase IV에서 VI 동안에도 비슷한 수준으로 유지되도록 하였다.

Table 3은 BF의 운전조건이다. ATAD의 부하가 변함에 따라 배가스 내 암모니아의 농도가 변하였으며, 이에 따라 BF에 유입되는 암모니아 가스의 부하가 변하였다. BF-1은 EBRT(empty bed retention time)이 60 sec인 반면에 BF-2는 EBRT가 120 sec로 유지되었는데, 이는 ATAD-1과 ATAD-2에 공급된 공기 및 산소의 유량에 2배 차이가 났기 때문이다. BF 유입 및 유출 가스 내 암모니아 농도를 측정하기 위하여 0.5% 붕산(boric acid) 용액을 암모니아 가스 흡수액으로 사용하였으며, 가스 시료의 분석은 악취공정시험법에 준하여 실시하였다. 한편, 순환수 내 암모니아성질소(NH_4^+-N) 농도와 질산성질소(NO_3^--N) 농도는 시료를 채취한 후 GF/C로 여과하여 Hach사의 DR-2010으로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. ATAD의 DO, 온도, 그리고 pH의 변화

Fig. 2는 194일간 ATAD의 DO(dissolved oxygen) 농도와 온도를 측정한 결과이다. DO 농도는 반응조 내부에 설치된

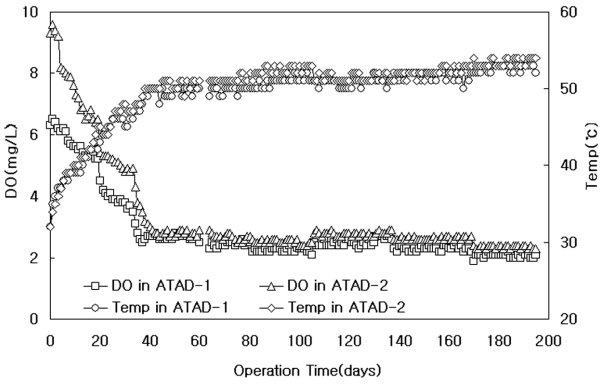


Fig. 2. Variation DO and temperature in the ATAD reactors.

DO 센서를 이용하여 측정하였다. 과도한 열량손실을 막기 위하여 최소 DO 농도를 2 mg/L로 유지할 수 있도록 포기(aeration) 양을 조절하였다. ATAD-1의 초기 공기공급 유량은 2.5 L/ min이었으며, ATAD-2의 초기 산소공급 유량은 1.5 L/min이었다. 이때 ATAD-1의 DO 농도는 5.2 ~ 6.5 mg/L 범위이었으며, ATAD-2는 6.5 ~ 9.6 mg/L 범위이었다. 운전 21일부터 ATAD-1과 ATAD-2의 공기 및 산소 유량을 각각 2.2 및 1.2 L/min으로 낮추어 운전하였다. 그 결과 평균 DO 농도는 각각 3.9 및 5.1 mg/L로 감소하였다. 운전 35일부터는 각각의 공기 및 산소 유량을 2 및 1 L/min으로 낮추어 운전하였다. 그 결과, ATAD-1과 ATAD-2의 DO 농도는 각각 2.4 및 2.7 mg/L로 유지되었다.

운전 15일이 지났을 때 ATAD-1과 ATAD-2의 온도는 약 40°C이었으며, 이후 운전 40일이 지난 시점부터 50°C 이상으로 상승하였다. 한편 ATAD-1의 온도가 ATAD-2보다 2 ~ 3°C 낮게 유지되었는데, 이는 공기공급 유량이 산소공급 유량보다 많아 열량손실이 상대적으로 많았기 때문인 것으

Table 3. Operation conditions for the two biofilters

Operating condition	BF-1			BF-2		
	Phase IV	Phase V	Phase VI	Phase IV	Phase V	Phase VI
ATAD's HRT (day)	3	2	1	3	2	1
Averaged inlet ammonia gas concentration (ppmv)	230	390	520	390	540	670
Averaged ammonia loading rate (g NH_3-N/m^3/hr)	9.4	15.8	21.3	8.1	11.1	13.8
Operating period	Day 105 ~ 136	Day 137 ~ 167	Day 168 ~ 194	Day 105 ~ 136	Day 137 ~ 167	Day 168 ~ 194
BF's EBRT (sec)	60			120		
Source of off-gas	ATAD-1			ATAD-2		

로 판단된다. 한편, pH의 경우, 초기 7.8에서 계속 상승하여 8.6～9.3까지 상승하였다. 이러한 현상은 고형물 내에 존재하는 유기성 질소가 미생물에 의해 암모니아 가스($NH_{3(g)}$)로 전환되고, $NH_{3(g)}$가 물과 CO_2와 반응하여 NH_4HCO_3와 $(NH_4)_2CO_3$를 생성하기 때문이다.

3.2. ATAD의 유기물 제거율 분석

Fig. 3에 ATAD의 TBOD 및 SBOD 제거율을 나타내었다. Phase I에서 TBOD 부하는 5.0～5.7 kg/m^3/d 범위이었으며, 이때 ATAD-1과 ATAD-2의 평균 TBOD 제거율은 각각 70 및 75%이었다. 이후 TBOD 제거율은 부하 증가에 반비례하는 경향을 보였으나, 전체 운전기간 동안 60%를 상회하였다. 두 ATAD의 SBOD 제거율은 Phase I에서 80% 이상을 보였으나, Table 4에 요약된 바와 같이 전체 운전기간 동안 각각 60～80 및 60～85% 범위이었다. 결론적으로 유기물 제거율을 비교하면 산소를 공급한 ATAD-2가 공기를 공급한 ATAD-1 보다 상대적으로 2～5% 더 높은 경향을 보였다.

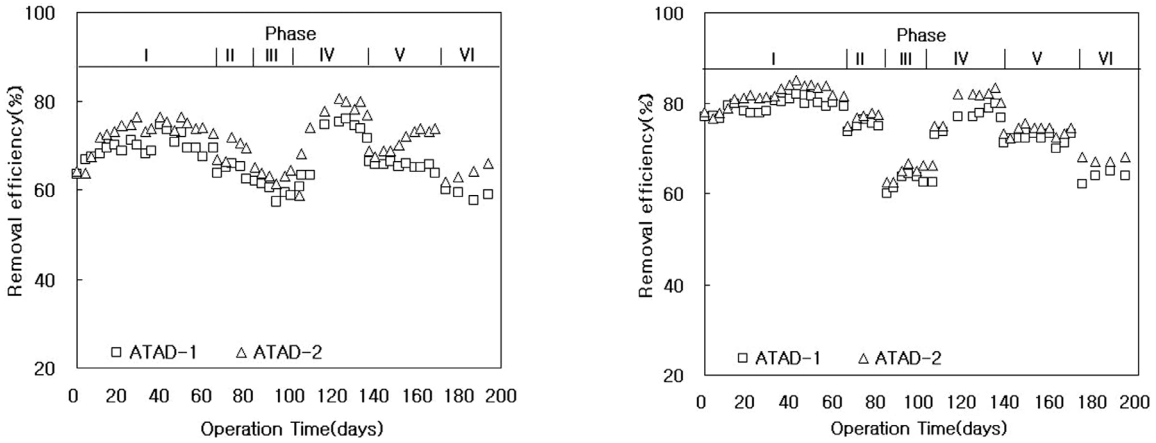
3.3. ATAD에서 질소의 변화

Fig. 4는 ATAD 유입 및 유출수의 T-N(total-nitrogen)과 NH_4^+-N 농도의 변화를 나타낸 결과이다. 유출수 내 T-N 농도는 ATAD-1의 경우 960±90 mg/L이었으며, ATAD-2는 990±92 mg/L로 나타났다. NH_4-N 농도의 경우, ATAD-1에서 770±85 mg/L이었고, ATAD-2는 820±92 mg/L이었다. T-N과 NH_4-N 농도를 비교하면 ATAD-2 유출수의 농도가 ATAD-1 보다 약간 높은 경향을 보였는데, 이는 ATAD-2의 온도가 상대적으로 높아 호기성 소화가 더 활발하였기 때문인 것으로 판단된다.

3.4. ATAD 배가스 내 암모니아 성상분석

운전 105일부터 ATAD와 BF를 결합하여 암모니아 가스 제거실험을 수행하였다. 먼저 돈사폐수 주입 이후 ATAD 배가스 내 암모니아 가스의 농도가 어떻게 변하는가를 조사하였다. 돈사폐수 주입은 타이머를 이용하여 4시간에 한 번씩 30분간 같은 양으로 하루에 6회씩 매일 동일한 시간에 이루어졌다. 운전 32일과 35일일에 걸쳐 2회 측정하였으며, 분석은 16부터 18시까지 1시간 단위로 이루어졌다.

Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 ATAD-1 배가스 내 암모니아 가스는 돈사폐수 주입 직전에 390 ppmv이었으나, 기질 주입이 이루어지고 한 시간이 지난 이후에는 250 ppmv까지 감소하였다. ATAD-2 또한 돈사폐수 주입 직전의 690 ppmv에서 460 ppmv까지 급격히 감소하였다. 이후 3시간이 지난 후 배가스 내 암모니아 가스 농도는 돈사폐수 주입



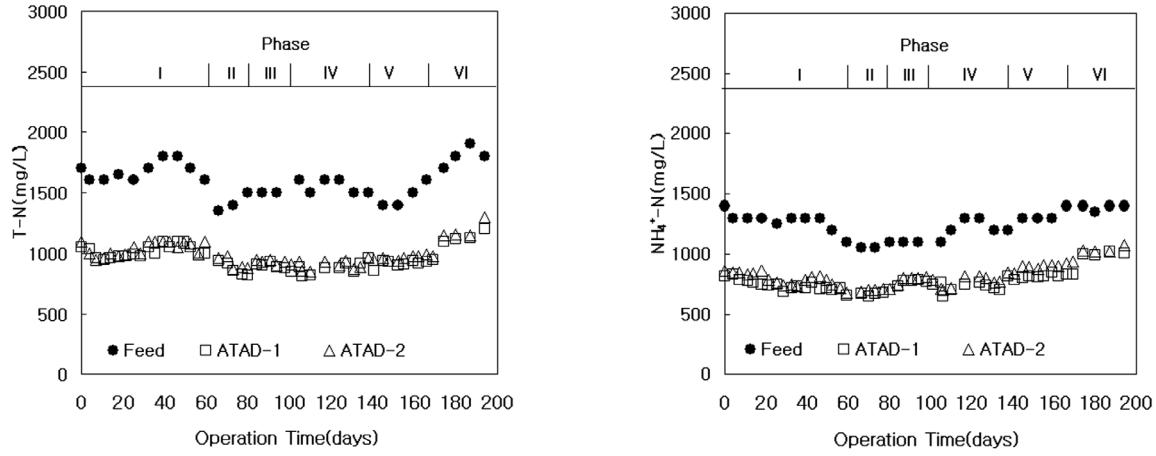
(a) Total BOD (b) Soluble BOD

Fig. 3. Removal efficiency of total and soluble BOD (TBOD and SBOD).

Table 4. Removal efficiency of organics as a function of TBOD loading rate

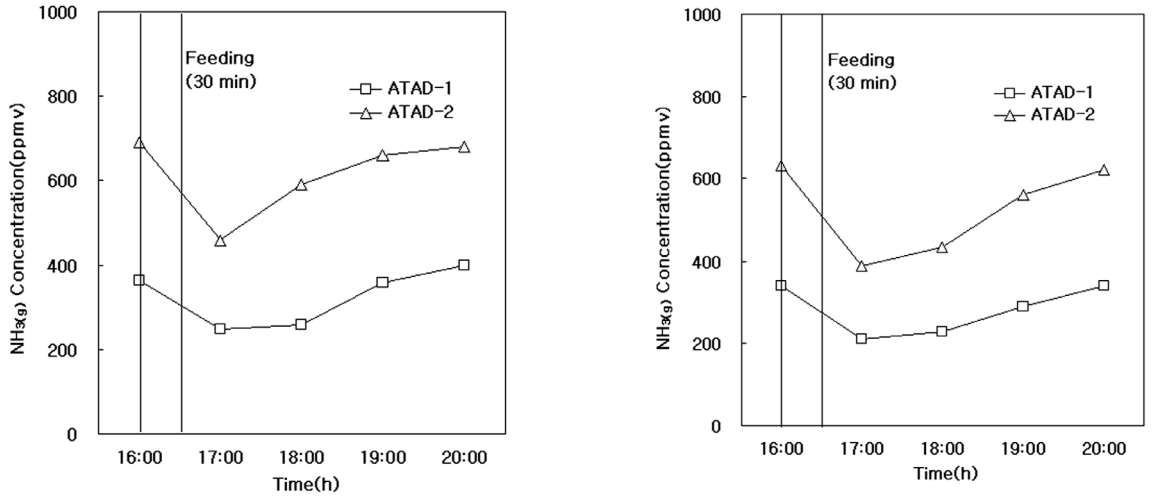
Operating phase	TBOD loading rate[1)]	$TBOD_{eff}$[2)]		$TBOD_{removal}$[3)]		$SBOD_{eff}$[4)]		$SBOD_{removal}$[5)]	
		ATAD-1	ADAD-2	ATAD-1	ADAD-2	ATAD-1	ADAD-2	ATAD-1	ADAD-2
I	5.4	5,000	4,400	69	73	1,900	1,700	79	82
II	8.1	5,800	5,100	64	69	2,100	1,900	75	77
III	16.3	6,300	5,800	60	63	3,000	2,900	63	65
IV	5.4	4,600	3,700	72	77	2,100	1,900	77	80
V	8.0	5,500	4,600	65	71	2,500	2,300	72	74
VI	16.8	7,000	6,100	59	64	3,600	3,300	64	68

[1)]Averaged total BOD loading rate (kg TBOD/m^3/d)
[2)]Averaged total BOD concentration in the effluent (mg/L)
[3)]Removal efficiency of total BOD (%)
[4)]Averaged soluble BOD concentration in the effluent (mg/L)
[5)]Removal efficiency of soluble BOD (%)



(a) Total nitrogen (b) Ammonia nitrogen

Fig. 4. Variation T-N and NH_4^+-N in the effluent of ATAD reactors.



(a) Operation day 32 (b) Operation day 35

Fig. 5. Variation of ammonia concentration in ATAD offgas after feeding piggery wastewater.

이전의 농도와 비슷하게 유지되었다. 총 2회의 동일한 실험을 통해 알아본 결과 ATAD-1과 ATAD-2 배가스 내 암모니아 농도는 돈사폐수 주입 1시간 이후 농도가 가장 낮았으며, 돈사폐수 주입 직전에 농도가 가장 높았다. 돈사폐수 주입 직전에 암모니아의 농도가 가장 높았던 것은 주입된 돈사폐수가 충분히 분해되었기 때문인 것으로 추측된다.

3.5. BF의 암모니아 가스 제거율

BF의 성능 평가를 위하여 매일 20시를 기준으로 BF-1과 BF-2의 유입 및 유출 암모니아 가스 농도를 측정하였으며, 이 데이터로부터 암모니아 제거율을 계산하였다. Fig. 6의 운전 결과를 보면, Phase IV에서 BF-1과 BF-2로 유입되는 암모니아 가스의 평균 농도는 각각 230 및 390 ppmv이었다. 이때의 암모니아 평균 제거 효율은 BF-1이 94%이었으며, BF-2가 97%이었다. 운전 137일부터 시작된 Phase V에서는 유입되는 암모니아 가스의 평균 농도가 각각 390 및 540 ppmv로 증가한 반면에, 암모니아 가스 제거율은 각각 91 및 95%로 감소하였다. ATAD 반응조의 HRT를 1일로 단축한 Phase VI 동안에 유입 암모니아 가스의 평균 농도는 각각 520 및 670 ppmv이었고, 암모니아 제거효율은 BF-2가 88%로 BF-1 보다 5% 높았다.

Fig. 6의 연속운전에서 얻은 암모니아 제거율을 Fig. 7에 암모니아 부하별 제거율로 나타내었다. Phase IV에서 BF-1으로 유입된 암모니아 부하는 7.5 ~ 11.2 g NH_3-N/m^3/hr 범위이었으며, BF-2로 유입된 부하는 7.1 ~ 8.9 g NH_3-N/m^3/hr 범위이었다. BF-1의 암모니아 부하가 BF-2 보다 높은 이유는 배가스 유량이 2배 많았기 때문이다. 이때 암모니아 가스 평균 제거율은 BF-1이 94±1.1%, BF-2가 97±0.9%이었다.

암모니아 부하가 약 8.1 ~ 11.1 g NH_3-N/m^3/hr 범위로 유입될 경우 BF-1과 BF-2 모두 암모니아 제거효율이 90% 이상을 상회하였으며, BF-2의 제거효율이 BF-1에 비해 약간 높았다. 이후 암모니아 부하가 더욱 증가하였는데, BF-1에 15.8 g NH_3-N/m^3/hr의 암모니아가 유입되었으며, BF-2에는 13.8 g NH_3-N/m^3/hr의 암모니아가 유입되었다. 이때

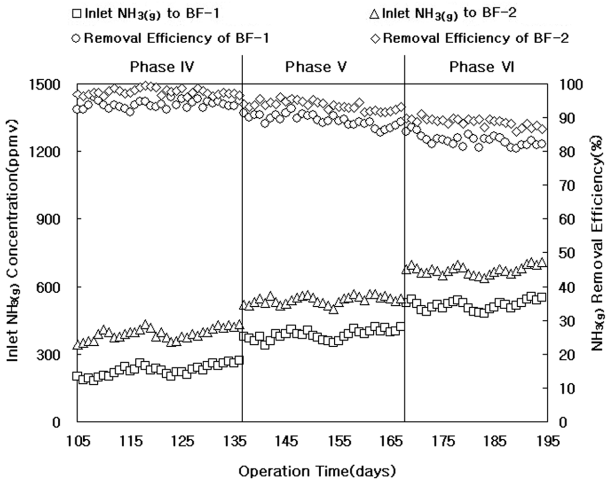


Fig. 6. Inlet concentration and removal efficiency of ammonia during the operation of biofilters.

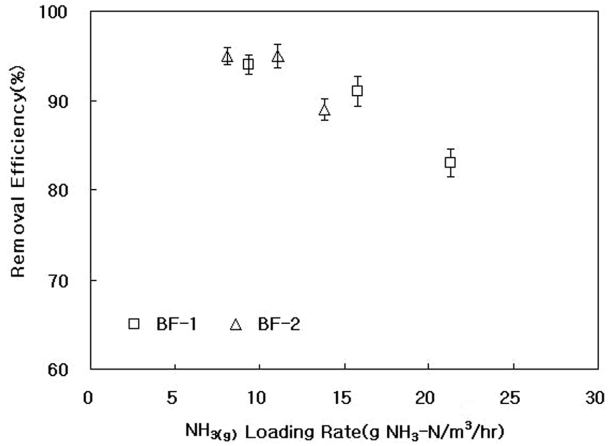


Fig. 7. Removal efficiency of ammonia in biofilters as a function of ammonia loading rate.

BF-1과 BF-2의 암모니아 제거효율은 각각 91 및 88%로 더 많은 양의 암모니아가 유입된 BF-1에서 상대적으로 높은 효율을 나타냈다. 또한 21.3 g NH_3-N/m^3/hr의 암모니아 부하가 유입된 조건에서도 BF-1의 암모니아 제거효율은 80%를 상회하였다. BF 실험을 수행한 결과, 공기를 공급한 ATAD-1에서 발생하는 암모니아 가스를 BF-1으로 처리했을 때 높은 암모니아 부하에서도 양호한 제거효율을 보였다. 따라서 ATAD+BF 시스템을 설계할 경우, ATAD 반응조의 효율에 결정적인 영향을 미치지 않는다면 ATAD 반응조의 산소 공급원으로 공기를 공급해도 무방한 것으로 판단된다.

3.6. BF 순환수의 pH 변화 및 교체주기

Fig. 8은 BF 운전기간 동안의 순환수의 pH와 각종 이온의 조성 변화를 조사한 결과이다. Phase Ⅳ 동안에 BF-1 순환수는 질산화가 진행됨에 따라 pH가 8.6에서 5.7까지 감소하였고, BF-2 순환수도 1주일 후 pH가 6 이하로 감소하였다. 질산성질소의 농도는 BF-1에서 최대 240 mg/L까지 증가하였으며, BF-2에서 260 mg/L까지 증가하였다. Phase 1 동안에 총 3회에 걸쳐 10～11일 간격으로 순환수를 교체한 결과, 동일한 경향이 반복적으로 나타났다.

Phase V가 시작된 운전 137일 이후를 보면, BF-1 순환수의 pH는 8.6에서 서서히 감소하여 5일이 지난 운전 142일에는 5.6까지 감소하였다. BF-2 순환수 또한 pH가 8.3에서 최대 5.8까지 감소되었다. Phase V 동안에 BF-1 순환수의 질산성질소 농도는 4.6에서 295 mg/L까지 증가하였으며, BF-2 순환수도 최대 325 mg/L까지 증가하였다. Phase VI 동안에도 10～11일 간격으로 순화수를 교체하였으며, 질산화반응이 일어남에 따라 순환수 내 pH가 감소하고 질산성질소의 농도가 증가하는 현상이 반복되었다.

3.7. 질소 물질수지

ATAD+BF 시스템의 유입 및 유출 질소에 대해 물질수지를 분석하였다. Table 5는 ATAD의 질소 물질수지 결과로서, 돈사폐수와 ATAD 유출수 내 NO_2^--N와 NO_3^--N 농도는 무시하였고, 배가스에는 암모니아 가스 이외의 다른 질소성 가스(nitrogenous gas)가 없는 것으로 가정하였다. Phase IV 동안에 ATAD에 유입된 돈사폐수의 질소는 총 4.21 g/d로 계산되었다. ATAD-1의 경우, 유출수와 배가스에 존재하는

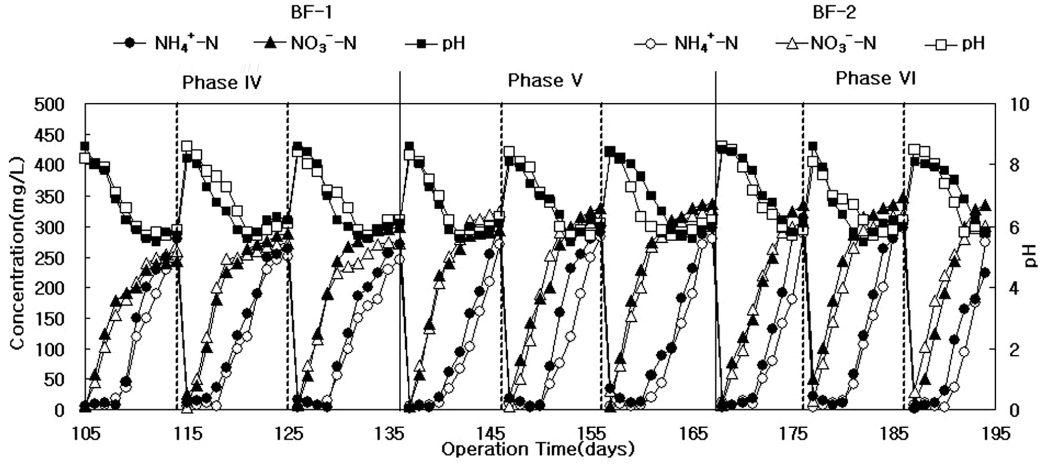


Fig. 8. Change in composition of recirculating solution during the operation of biofilters.

Table 5. Nitrogen mass balance within ATAD reactors

Operating phase	Compounds	Feed (g/d)	Averaged effluent		Averaged offgas	
			ATAD-1 (g/d)	ATAD-2 (g/d)	ATAD-1 (g/d)	ATAD-2 (g/d)
IV	T-N	2.33	1.30	1.34	-	-
	NH_4^+-N	1.88	1.08	1.16	-	-
	NH_3-N	-	-	-	0.45	0.39
V	T-N	3.33	2.08	2.17	-	-
	NH_4^+-N	2.93	1.84	2.01	-	-
	NH_3-N	-	-	-	0.76	0.53
VI	T-N	8.10	5.12	5.36	-	-
	NH_4^+-N	6.24	4.52	4.67	-	-
	NH_3-N	-	-	-	1.02	0.66

Table 6. Nitrogen mass balance within the biofilters

Operating phase	Compounds	BF-1		BF-2	
		Inlet (g/d)	Outlet (g/d)	Inlet (g/d)	Outlet (g/d)
IV	NH_3-N	0.45	0.03	0.39	0.01
	NH_4^+-N	-	0.18	-	0.16
	NO_3^--N	-	0.19	-	0.19
V	NH_3-N	0.76	0.08	0.53	0.03
	NH_4^+-N	-	0.29	-	0.24
	NO_3^--N	-	0.29	-	0.27
VI	NH_3-N	1.02	0.17	0.66	0.08
	NH_4^+-N	-	0.34	-	0.27
	NO_3^--N	-	0.42	-	0.29

질소는 각각 2.41 및 0.45 g/d이었으므로 ATAD-1에서 유출되는 질소의 총 양은 2.86 g/d로 계산된다. ATAD-2의 경우, 유출되는 질소의 총량이 2.89 g/d로 유입된 총 질소의 약 69%가 유출수와 배가스 형태로 확인되었다.

Table 6은 BF의 질소 물질수지 결과이다. Table 5에서와 동일하게 순환수 내 NO_2^--N 농도는 무시하였고, 배가스에는 암모니아 가스 이외의 다른 질소성 가스(nitrogenous gas)가 없는 것으로 가정하였다. 또한, BF 담체의 분해에 기인하는 질소 성분도 없는 것으로 가정하였다. ATAD-1과 연결된 BF-1의 경우, Phase IV 동안에 평균 0.45 g/d의 질소가 암모니아 가스($NH_{3(g)}$ = NH_3-N) 형태로 유입되어, 약 42%(0.19 g/d)가 질산화 되어 NO_3^--N 형태로 순환수 내에 존재하였다. 평균 0.39 g/d의 질소가 유입된 BF-2에서는 0.19 g/d가 질산화 되었고, 0.01 g/d는 배가스 형태로, 그리고 0.16 g/d는 순환수에 흡수되었다. 질소 물질수지 계산 과정에서 몇 가지 가정이 있었지만, Phase IV 동안에 확인된 질소는 BF-1이 89%, 그리고 BF-2가 92%로 계산되었다. 이 결과는 Shanchayan 등(2006)의 연구에서 제시한 질소 물질수지 보다 양호한 결과이다.

4. 결 론

본 연구에서는 돈사폐수의 고온호기성 소화(auto-thermal thermophilic aerobic digestion)와 이 과정에서 발생하는 암모니아 가스의 제거를 위해 ATAD+BF 시스템을 연구하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 두 ATAD 반응조의 DO 농도는 2 mg/L 이상으로 유지되었으며, 반응조의 온도도 운전 40일 이후부터 50°C 이상으로 유지되었다. 공기를 공급한 ATAD-1이 산소를 공급한 ATAD-2 보다 2～3°C 낮게 유지되었는데, 이는 공기공급 유량이 산소공급 유량 보다 많아 열량손실이 상대적으로 많았기 때문인 것으로 판단된다.
2) Total BOD 부하가 5.0～5.7 kg/m^3/d 범위일 때, ATAD-1과 ATAD-2의 평균 TBOD 제거율은 각각 70 및 75%이었다. 이후 TBOD 제거율은 부하 증가에 반비례하는 경향을 보였으나, 전체 운전기간 동안 60%를 상회하였다. 전반적으로 산소를 공급한 ATAD-2가 공기를 공급한 ATAD-1 보다 유기물 제거율이 2～5% 양호하였다.
3) T-N 농도의 경우, ATAD-1 유출수에서 960±90 mg/L이었으며, ATAD-2에서는 990±92 mg/L로 나타났다. NH_4-N 농도의 경우, ATAD-1에서 770±85 mg/L이었고, ATAD-2는 820±92 mg/L이었다. 배가스 내 암모니아의 농도는 산소를 공급한 ATAD-2가 높았지만, 암모니아 가스로 회수된 질소의 양은 공기공급 유량이 2배 많았던 ATAD-1이 더 많았다.
4) ATAD-1과 연결된 BF-1 및 ATAD-2와 연결된 BF-2의 암모니아 제거능을 조사한 결과, 암모니아 부하가 약 8.1～11.1 g NH_3-N/m^3/hr 범위로 유입될 경우 BF-1과 BF-2 모두 암모니아 제거효율이 90% 이상을 상회하였으며, BF-2의 제거효율이 BF-1에 비해 상대적으로 약간 높았다. 이후 BF-1과 BF-2의 암모니아 부하를 각각 15.8 및 13.8 g NH_3-N/m^3/hr로 증가하였을 때 암모니아 제거효율은 각각 91 및 88%로 감소하였고, 상대적으로 더 많은 양의 암모니아가 유입된 BF-1에서 상대적으로 높은 효율을 나타냈다. 암모니아 부하 21.3 g NH_3-N/m^3/hr에서도 BF-1의 암모니아 제거효율은 80%를 상회하였다.
5) 질산화가 진행됨에 따라 순환수 내에 질산성질소가 축적되어 pH가 감소하였다. 암모니아 가스의 부하가 22.7 g NH_3-N/m^3/h 이하로 운전될 때, 2 g/L $NaHCO_3$ 용액을 순환수로 사용할 경우 적정 교체 주기는 10～11일이었다.
6) ATAD+BF 시스템의 유입 및 유출 질소에 대해 물질수지를 분석한 결과, ATAD 단계에서는 약 70%의 질소가 확인되었으며, BF 단계에서는 약 90%가 확인되었다.

사 사

본 연구는 중소기업청 산학공동기술개발지원사업에 의해 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

이윤석, 김륜호, 윤주환(2007). 고온호기성 소화공정을 이용한 탄소원 회수에 관한 연구. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(6) pp. 906-912.

Li, J. Z., Mavinic, D. S., and Kelly, H. G. (2002). Batch and continuous feeding of thermophilic aerobically digested sludge supernatant as a carbon source for biological nutrient removal. *J. Environ. Eng. Sci.*, **1**, pp. 213-224.

Rittmann, B. E. and McCarty, P. L. (2001). *Environmental Biotechnology : Principles and Applications*, McGraw-Hill.

Shanchayan, B., Parker, W., and Pride, C. (2006). Dynamic analysis of a biofilter treating autothermal thermophilic aerobic digestion offgas. *Journal of Environmental Engineering and Science*, **5**(3), pp. 263-272.

Stensel, H. D. and Coleman, T. E. (2000). Assessment of Innovative Technologies for Wastewater: Treatment: Autothermal Aerobic Digestion (ATAD). *Preliminary Report*, Project 96-CTS-1.