

생물반응기를 도입한 돈분뇨의 생물학적 처리공정에서 악취발생 특성 및 미생물동정에 관한 연구

A Study on the Odor Characteristics and Identification of Microbial in Biological Swine Manure Treatment Process by Bioreactor

고준일 · 박귀환* · 배주순* · 오길영* · 정선용†

Joon-il Ko · Gui-hwan Park* · Ju-soon Bae* · Gil-young Oh* · Seon-yong Chung†

전남대학교 환경에너지공학과 · *전라남도 보건환경연구원

Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University

*Jeollanam-do Institute of Health and Environment

(Received June 4, 2015; Revised September 25, 2015; Accepted September 28, 2015)

Abstract : A bioreactor filling with pellets and stones was equipped to the swine manure treatment system, which is expected to emit high concentration of odor in the process of the organic wastewater treatment system, and in comparison with the activated sludge process as the control process, the reactor operation state, treatment water quality and odor emission concentration were measured. The reactor using the bioreactor proved to be much more stable in the bubble condition, treatment water transparency, etc, and BOD removal efficiency was also much better. The removal efficiency of T-N and T-P, however, showed little difference in the two reactors. Odor, as a result of examining NH₃-N, NH₃ concentration, and complex odor, was 4 times to 24 times less emitted in the system using bioreactor than in the activated sludge system. H₂S, methyl mercaptan, dimethyl sulfide, and dimethyl disulfide were not found or were found in only 5 ppbs in each reactor and showed little difference between the two reactors. In the bioreactor process, *Bacillus* sp./ *Pseudomonas* sp. species were mainly found and in the activated sludge process, *acterium* sp. *Chryseobacterium* sp. species were mainly found.

Key Words : Bioreactor, Swine Manure, Odor Emission, Activated Sludge System, Complex Odor

요약 : 유기성폐수 처리공정에서 악취발생농도가 높을 것으로 예상되는 양돈분뇨 처리공정에 pellet과 stone을 충전한 생물반응기를 도입하고 대조시설로서 생물반응기를 도입하지 않는 활성슬러지법 공정과 비교하여 반응조 운전상태, 처리수질, 악취발생농도를 측정하였다. 거품발생, 처리수 투시도 등에서 생물반응기를 도입한 반응조가 훨씬 안정적인 모습을 보였으며 BOD 제거효율도 우수하였다. 반면, 총질소(T-N), 총인(T-P) 제거효율은 두 개의 반응조가 큰 차이를 보이지 않아 방류수 수질기준을 만족시키기 위해서는 별도의 고도처리를 하여야 할 것으로 나타났다. 악취는 암모니아성 질소, 암모니아 농도, 복합악취를 기준으로 살펴본 결과 생물반응기를 도입한 공정이 활성슬러지 공정보다 적게는 4배에서 최대 24배 이상 낮게 나타나 악취원인물질 발생이 적은 것으로 나타났다. 황화수소, 메틸머캅탄, 디메틸설파이드, 디메틸디설파이드 농도는 각각의 반응조 모두 검출되지 않거나 5 ppb에 불과하였으며 두 반응조의 차이 또한 크지 않은 것으로 나타났다. 생물반응기 공정에서는 주로 *Bacillus* sp./ *Pseudomonas* sp. 종이 주를 이루고 활성슬러지 공정에서는 *Bacterium* sp. *Chryseobacterium* sp. 종이 주를 이루었다.

주제어 : 바이오리액터, 돈분뇨, 악취배출, 활성슬러지법, 복합악취

1. 서론

악취는 사람의 후각을 자극하여 불쾌감과 혐오감을 주는 냄새로서 심할 경우 정신적 스트레스와 우울증 유발, 두통, 구토 등의 건강이상 증상까지 수반하기도 하는¹⁾ 감각공해로 분류되며 하·폐수처리시설, 음식물류폐기물 관련시설, 가축사육시설 등과 같이 현대문명의 발달과 밀접한 관계를 가지며 오염기여도를 높여가고 있다. 특히 하수처리시설, (가축)분뇨 처리시설, 음식물류폐기물 처리시설과 같은 유기성 폐수의 처리과정에서 발생하는 악취는 NIMBY (not in my back yard)현상의 주 원인물질로 이미 지역문제화 된 지 오래됐으며²⁾ 악취강도 또한 음식물자원화 > 축산폐수 > 하수 > 분뇨 > 폐수처리 순으로 높게 나타나는 것으로 보고

되었다.³⁾

일반적으로 유기성폐수의 호기성 처리는 혐기성 처리에 비해 악취발생 농도가 낮은 것으로 보고되고 있으나⁴⁾ 호기성 처리라 하더라도 처리시설의 후단부 보다는 포기조의 전단부, 미세기포 포기방식 보다는 굵은기포 포기방식에서는 여전히 높은 악취 강도를 보이고 있다.⁵⁾

악취를 제어하는 방법은 발생원과 발생특성에 따라 다양한 형태로 구상할 수 있다. 만일 발생원이 협소하고 고정되어 있다면 전체를 밀폐시키거나 혹은 강제흡인 후 탈취시설에 유입하여 처리할 수 있을 것이다.⁶⁾ 반면, 이동성이 있는 분뇨, 폐기물의 수거차량이나 대규모 축사, 매립장, 퇴비발효시설처럼 광범위하게 분산되어 있는 시설의 경우 밀폐를 시키거나 강제흡인 후 탈취시설에 유입하는 방법이 불가능

† Corresponding author E-mail: sychung@jnu.ac.kr Tel: 062-530-1858 Fax: 062-530-0749

하므로 주로 각종 첨가제 급여, 탈취제 살포와 같은 방법을 적용하고 있다.⁷⁾ 그러나 이 또한 악취발생원 조건에 부합하는 적합한 첨가제와 탈취제를 선택하기 어렵고, 대부분의 첨가제, 탈취제들이 특정 악취물질 몇 종에만 효과가 있을 뿐 수십 종의 악취물질이 혼합된 복합악취에는 그다지 효과가 없을 뿐만 아니라, 주로 미생물제제들이 주종을 이루다보니 보관, 배양, 살포에 기술적 어려움이 있다.⁸⁾ 따라서 이러한 광역 악취발생원에 대한 가장 효율적인 악취제어는 악취발생원에서 근원적으로 악취물질 발생을 저감시키는 방법이라 생각된다.

이와 관련된 연구 중에는 특정미생물을 우점종으로 배양시킬 목적으로 pellet과 stone을 별도의 생물반응기(Bio-reactor)에 충전한 후 하수종말처리장 배양조에 설치하여 운전한 결과 악취유발물질 발생이 현저히 감소하였다는 보고가 있다.⁹⁾

본 연구에서도 위 연구와 마찬가지로 악취발생농도가 높을 것으로 추정되어지는 유기성폐수 처리공정 중 양돈분뇨 호기성 처리공정을 대상으로 공정 중에 악취저감을 목적으로 별도로 제작된 생물반응기(Bio-reactor)에 pellet과 stone을 충전하고 대조시설로서 반응기를 도입하지 않는 호기성 처리공정과 비교하여 반응조 운전상태, 처리수질, 악취발생농도를 측정하였다

그리고 각각의 반응조 및 유출수에 대하여 미생물 분리배양 및 동정을 실시하여 미생물에 관한 조사를 실시하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 반응조 설계 및 설치

본 연구에 사용된 악취발생원 모형은 양돈폐수 호기성 처리공정 중 표준활성슬러지법 설계인자를 중심으로 설계하였으며 pellet과 stone으로 충전된 생물반응기를 장착한 test 반응조와 대조군으로서 생물반응기를 장착하지 않은 control 반응조로 구성하였다. 실험에 사용된 pellet (MT0001, JNC Environment, Japan)과 stone (MT0002, JNC Environment, Japan)은 각각 100 g ± 10 g씩 생물반응기에 충전하였으며 생물반응기 하부에서 공기를 공급하였다. 또한 각각의 반응조는 호기성 조건을 유지하기 위해 송풍기를 통해 20 L/min의 공기를 연속적으로 공급하였다. 각각의 반응조는 처리용량 1.5 L/day, 수리학적 체류시간(HRT) 40일, 반송율 100~200% 범위로 설계하였으며 스테인레스 스틸(STS304, 2.3 t) 재질로 구성하였다.

2.2. 반응조의 운전

반응조는 운전에 들어가기 전 먼저 미생물식종(seeding)을 실시하였다. 식종은 활성슬러지법으로 운전되고 있는 N시 “H”농장과 N시 “D”농장의 1차 폭기조 슬러지를 각각 20 L씩 혼합한 후 탈이온수 24 L를 보충하여 전체 반응조를 충전시키고 기존 처리장의 잔존 악취를 제거하기 위해 7일

Table 1. Characteristics of inflow wastewater in the reactor

Item	Sample		
	"D" farm	"H" farm	"J" farm
Period (d)	1~30	31~50	51~75
Q (L/day)	0.5 L×3	0.5 L×3	0.5 L×3
BOD ₅ (mg/L)	20,385	44,295	17,460
COD _{Mn} (mg/L)	10,120	14,680	9,380
SS (mg/L)	22,900	29,300	20,374
T-N (mg/L)	3,135	6,857	4,327
T-P (mg/L)	95	981	674

간 공폭기를 실시하였다. 그리고 공폭기가 완료된 후 처음 1일차~30일차까지는 “D” 농장에서 고액분리된 양돈폐수 1.5 L를 각각 0.5 L 씩 나누어 하루 3회에 걸쳐 투입하였고, 다음 31일차부터 50일차까지는 “H”농장에서 고액분리된 양돈폐수를 동일한 조건에서 투입하였으며, 마지막 51일차에서 75일까지는 J군의 “J” 농장에서 고액분리된 양돈폐수를 역시 같은 조건에서 투입하였으며 반응조 투입폐수 성상은 Table 1과 같다.

2.3. 분석방법

2.3.1. 악취분석

본 연구대상 지정악취물질에 대한 시료채취 및 분석방법은 국립환경과학원 고시 악취공정시험방법에 준하여 실시하였으며, 분석항목은 현행 악취방지법에서 규제하고 있는 암모니아, 메틸머captan, 황화수소, 디메틸설파이드, 디메틸디설파이드, 복합악취를 대상으로 하였다

암모니아는 흡수포집용기와 정량펌프(SIBATA, LV-40BR, Japan)를 이용 0.5% 붕산용액(Boric acid)에 취기공기를 흡입시켰으며, 분석용 시료용액에 페놀 펜타시아노 니트로실철(III)산 나트륨 용액과 차아염소산나트륨 용액을 가하여 분광광도계(UV mini 1240, SHIMADZU, Japan)를 이용 640 nm파장에서 흡광도를 측정하였다.

황화합물 시료채취는 감압식 장치가 장착된 채취장비(Supelco)를 이용하여 테들러백(5 L, Supelco, USA)에 채취 후 보관용 케이스(냉암소)에 넣어서 실험실로 이동 신속히 분석하였다. 테들러백에 채취한 시료는 air sampler가 부착된 전자 냉각방식을 이용한 자동 열탈착 장치(ATD UNITY, MARKES, France)의 내부 cold trap에서 시료를 -15℃로 일정시간(용량) 농축 후 수초 내에 280℃ 고온 탈착하여 자동으로 gas chromatography로 주입시켜 분석하였다. 표준물질은 rigas에서 제조한 것을 사용하였으며, 검량선용 표준가스는 희석장치(Dynamic Diluter Model 4600, Entech Instruments, USA)와 테들러백을 사용하여 고순도 질소(99.999%)로 희석하여 제조하였다. 각 물질마다 분석재현성, 직선성의 결과는 양호한 결과(R²값 0.991~0.999)를 얻었으며, 검출한계도 공정시험방법을 만족하였다.

공기희석관능법에 의한 악취강도를 조사하기 위하여 본

연구에서는 시료를 채취하는 과정에서 펌프나 유량계에서 발생할 수 있는 취기의 영향을 배제할 수 있는 악취시료 전용 채취장비(Model 1063, Supelco, USA)를 사용하였다. 이 장비는 박스형태로 구성된 시료채취장비에 펌프를 연결하여 장비 내부공기를 외부로 배출시킴으로써 진공상태를 유지시키게 되며 상대적으로 고압상태인 대기 중의 공기가 펌프나 유량계를 통과하지 않고 테프론 재질로 되어있는 시료 채취관을 통해 직접 시료채취장비 내부로 유입하게 된다. 복합악취 실험에 필요한 시료는 공기희석장치(Smelltec-7P, 동양전기화학, Korea)를 이용하여 조제하였고 악취오염공정 시험법에서 규정하고 있는 평가방법을 이용하여 조제하였다.¹⁰⁾ 희석시료의 조제는 3 L 용량의 폴리에스터 재질 공기 주머니를 사용하였다.

2.3.2. 수질분석

BOD₅, COD_{Mn}, SS, T-N, T-P, NH₃-N 은 수질오염공정시험기준에 의하여 분석하였고, MLSS는 SS측정법과 동일하게 유리섬유여과 후 2시간 동안 105℃에서 건조 후 중량하였다.¹¹⁾ DO, pH, 온도, ORP는 탁상용 측정기(YK-2001, Intelligent meter, Korea)를 사용하여 측정하였고 SV₃₀은 1,000 mL imhoff cone을 사용하여 30분간 정치 후 슬러지 침강 깊이를 측정하였다. SVI (Sludge Volume Index)는 위에서 구해진 MLSS의 농도와 SV₃₀을 이용하여 아래 식 (1)에 의해 계산하였다.¹²⁾

$$SVI \text{ (mL/g)} = \frac{SV_{30} \text{ (mL/L)} \times 1,000 \text{ (mg/g)}}{MLSS \text{ (mg/L)}} \quad (1)$$

2.3.3. 미생물 분리배양 및 동정

각각의 반응조는 운전 중 수시로 포기조로부터 샘플을 채취하여 광학현미경을 이용하여 미생물에 대한 검경을 실시하였고 실험이 종료된 후에는 test 반응조 바닥에 침적된 침전물을 원심분리 하여 얻어진 펠렛을 동결건조 시킨 후 FE-SEM (S-4700, HITACHI, Japan)을 이용하여 미생물 성상을 관찰하였다. 또한 미생물의 순수분리를 위해 각각의 반응조 및 유출수로부터 샘플을 채취한 후 R2A배지(yeast extract 0.5 g, glucose 0.5 g, proteasa pepton 0.5 g, casamino acid 0.5 g, soluble starch 0.5 g, sodium pyruvate 0.3 g, K₂HPO₄ 0.3 g, MgSO₄ · 7H₂O 0.04 g, D · I water 1,000 mL)를 이용하여 3차례 이상 계대배양한 후 균주를 분리하였다. 그리고 분리한 균주의 16S rRNA 염기서열 분석을 위하여 27F 와 1492R primer를 사용하여 PCR 증폭을 진행하였다. 증폭된 산물은 정제한 후 솔젠트(주) (Korea)에 의뢰하여 염기서열을 결정하였다. 분석된 16s rRNA 유전자 염기서열은 NCBI (National Center for Biotechnology Information, USA)의 Blast search program (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/>)을 통해 기준에 보고된 미생물의 16S rRNA 염기서열과 상동성을 비교하여 균주특성을 파악하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유기성폐수 처리공정 운전결과

3.1.1. 유기성폐수 처리공정 유출수 수질

유기성폐수 처리공정의 수처리 효율을 조사하기 위해 각각의 반응조 유출수에 대하여 BOD₅, T-N, T-P 농도를 분석하였다. 투입 후 10일이 경과된 후 test 반응조에서 BOD₅는 126 mg/L를 보였으나 시간이 경과되면서 서서히 유출농도가 낮아지기 시작하였고 원수농도가 비교적 높은 "H" 농장의 폐수에서도 47.6 mg/L~85.9 mg/L의 처리수질을 유지하였으며, 원수 농도가 비교적 낮은 "J"농장의 폐수에서는 24.2 mg/L까지 낮아지는 경향을 보였다. 마찬가지로 control 반응조 역시 운전 10일 후 567.3 mg/L의 비교적 높은 유출농도를 보였으나 운전 30일이 경과되고부터 서서히 안정을 찾아가는 모습을 보여 최종적으로는 56.1 mg/L까지 낮아졌다. 하지만 전반적으로 control 반응조의 BOD₅ 농도가 test 반응조 대비 1.5~4배 가량 높게 나타나는 모습을 보여 BOD₅ 처리효율은 test 반응조가 우수한 것으로 평가되었다(Table 2)

반면, 총질소(T-N)와 총인(T-P) 농도는 투입원수 대비 많이 낮아지는 경향을 보였지만 두 개의 반응조에서 의미 있는 차이를 보였다고 보기는 힘들다. 이는 두 반응조 모두 활성슬러지법을 기초로 설계한 호기성처리 공정이기 때문에 생물학적 탈질, 탈인 기능이 미흡한 결과로 해석되어지며, 따라서 T-N과 T-P에 대해 보다 높은 처리효율을 기대하기 위해서는 별도의 고도처리 공정이 도입되어야 함을 시사한다.

또한 처리시설의 안정적 운전을 평가하는 간접지표로서

Table 2. The quality of effluent water in the reactor

Period (d)	BOD ₅ (mg/L)		T-N (mg/L)		T-P (mg/L)		Influent
	Test	Control	Test	Control	Test	Control	
10	126	567.3	133.2	136.8			"D" farm
22	76.8	170	100.2	366	88.8	180	"D" farm
28			319.2	477.6	124.8	160.8	"D" farm
30	123.3	449.3					"D" farm
37	47.6	73.3					"H" farm
38			121.2	103.2	108	112.8	"H" farm
44	85.9	103.7					"H" farm
46			129.6	141.6	110.4	110.4	"H" farm
50			316.8	264			"H" farm
52	89.8	112					"J" farm
53					108	116.4	"J" farm
57			252	264			"J" farm
58	29.6	73.2					"J" farm
63				121.1	131.2	133.6	"J" farm
65	37.6	132.6	98.4	188.4			"J" farm
72	24.2	56.1	124.8	231.6	126	128.8	"J" farm

Table 3. Transparency and MLSS concentration of each reactor

Period (d)	Test reactor		Control reactor	
	MLSS (mg/L)	Transparency (cm)	MLSS (mg/L)	Transparency (cm)
10	5,600	12.5	6,050	7.3
25	4,450	11.2	4,780	6.5
27	5,650	13.5	5,900	8.2
29	6,320	15.0	6,080	8.5
45	9,327	10.8	8,760	9.2
50	7,120	15.4	6,700	8.7
58	7,280	14.6	7,500	7.6
65	6,150	15.8	6,300	6.5
avg.	6,487	13.6	6,508	7.8

처리수의 투시도를 고려할 수 있는바, Table 3과 같이 유출수에 대한 투시도 분석을 한 결과 test 반응조는 평균 13.6 cm 정도로 비교적 높은 투시도를 나타내는 반면 control 반응조는 평균 7.8 cm로 낮게 나타났다.

3.1.2. 유기성폐수 반응조 운전 상태

반응조 운전상태는 Table 4와 같이 나타났다. MLSS의 경우 반응조 운전인자와 수질, 악취의 상관관계 분석을 위해 의도적으로 증감을 실시하였으므로 특별한 의미가 없으나 앞에서 살펴본 바와 같이 SVI, BOD₅, 투시도 등을 감안했을 때 test reactor의 적정운전범위는 6,000 mg/L~8,000 mg/L으로 나타났으며 원수 농도가 높을 때는 비교적 높은 범위에서 운전하는 것이 유출수질과 거품제어 측면에서 유리할 것으로 판단된다. pH, 수온, DO 농도는 연구기간 동안 큰 변화를 보이지 않았다. 이는 운전기간 동안 외부온도 변화가 크지 않아 수온에 크게 영향을 미치지 아니하였고 충분한 공기 공급으로 DO 또한 적정범위에서 운전되었기 때문이다.

ORP는 처리시설의 혐기성 여부를 판단하는 지표로서¹⁴⁾ 호기성 생물학적 처리에서 +0~50 이상의 값을 요구한다. 본 연구에서 ORP는 대체적으로 +0 이상으로 유지되었지만 원폐수의 성상이 급격히 변하는 시점에서 control 반응조는 일시적으로 (-)값을 보이기도 한 반면 test 반응조의 경우 (+) 값을 유지한 것으로 나타나 생물반응기를 장착한 공정이 충격부하에 비교적 강한 것으로 판단된다.

Table 4. The operation condition of the reactor

Item	Result	
	Control reactor	Test reactor
MLSS	4,780~8,760 mg/L	4,450~9,327 mg/L
pH	8.09~9.3	7.3~8.2
SV ₃₀	540~980 mL/L	420~837 mL/L
SVI	120~165 mL/g	80~125 mL/g
Temp.	22.3~25.2°C	21.6~25.5°C
DO	1.8~2.7 mg/L	1.6~3.1 mg/L
ORP	-25~55 mV	24~75 mV
Color	dark brown	brown

3.2. 악취발생 특성

3.2.1. 각 반응조 악취발생 농도

각각의 반응조로부터 암모니아 농도를 측정한 결과 test 반응조와 control 반응조에서 현격한 차이를 보였다. test 반응조 출구에서 암모니아 농도는 원폐수 투입 6시간 후 2.9346 ppm으로 급격히 저하된 후 계속되는 원폐수 투입에도 불구하고 10일 뒤 1.4234 ppm, 25일 뒤 1.0221 ppm 이후 0.6221 ppm, 0.4692 ppm으로 점차 감소하다가 65일되는 시점에서 0.1085 ppm으로 거의 소멸되었다. 반면, control 반응조는 투입초기 42.778 ppm으로 상당히 높은 값을 보였으며 이후 어느 정도 감소하지만 10.369 ppm, 5.4096 ppm, 9.2895 ppm으로 여전히 높은 값을 보이며 운전 후반기에도 test 반응조에 비해 약 24배 이상 높은 값을 보였다. 이러한 결과는 두 반응조의 BOD₅ 농도변화와 비교하면 BOD₅ 농도와 암모니아 발생농도가 상관관계를 보임을 알 수 있다 (Fig. 1) 즉, BOD₅ 농도가 감소할 때 암모니아 농도도 상관관계를 가지고 감소하는 것으로 보아 반응조에서 발생하는 암모니아는 미분해된 유기물의 폭기과정에서 탈기되는 것으로 추정되어진다. 또한 반응조내 암모니아성 질소 농도와 반응조에서 발생하는 암모니아 농도와의 상관관계에서도 확인되는데(Fig. 2) 암모니아성 질소 농도가 높을수록 암

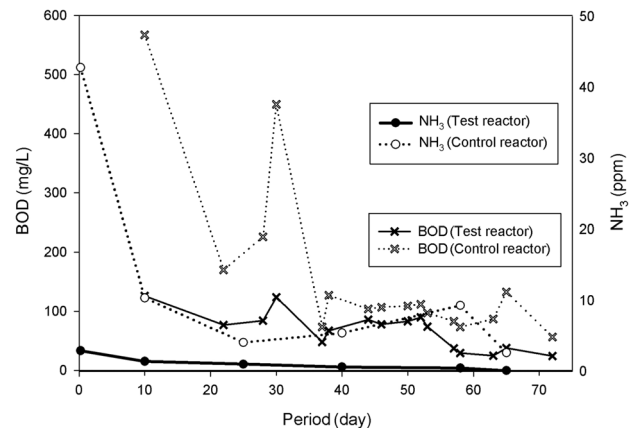


Fig. 1. BOD₅ concentration of treatment water and NH₃ concentration in each reactor.

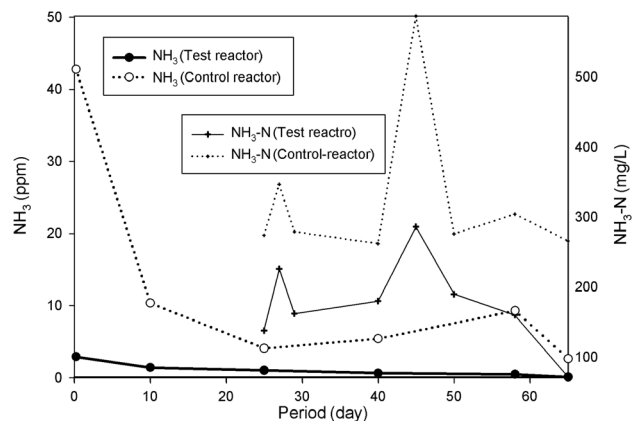


Fig. 2. NH₃ and NH₃-N concentration of each reactor.

모니아 발생농도 또한 높아지는 것을 알 수 있다. 따라서, 호기성 처리공정에서 발생하는 암모니아의 배출은 암모니아가 질산화되기 이전의 유기물의 분해과정에서 발생하는 암모니아의 탈기에 의해 촉발된다고 볼 수 있으며, 생물반응기를 장착한 반응조에서는 유기물의 분해과정에서 발생하는 암모니아성 질소의 농도를 낮추어 외부로 비산되는 암모니아 농도를 낮추는 효과를 보였다고 볼 수 있다.

기존 연구에서는 호기성 처리공정에서 미생물에 의한 악취제거 기작이 악취유발물질의 미생물 대사¹⁵⁾와 생흡착¹⁶⁾에 의한 효과라고 보고하였다. 본 연구에서 생물반응기를 도입한 공정의 악취발생이 도입하지 않은 공정에 비해 낮게 나타나는 것은 생물반응기에 의해 활성화된 미생물의 종이 달라 악취물질 대사속도가 달랐을 것이며, 생물반응기에 의해 활성화된 미생물 대사물질의 생흡착능이 차이를 보였기 때문으로 추정되어 진다.

또 다른 연구에서는 *Pseudomonas anguilliseptica*, *Bacillus cereus* 등을 악취제거 효과를 보이는 미생물로 보고하였다.¹⁷⁾ 본 연구에서도 악취저감 효과가 높았던 test 반응조를 중심으로 *Bacillus cereus*, *Pseudomonas anguilliseptica*가 분리되었으며 이러한 종들이 주로 돈분의 호기성 처리공정에서 발견되며 악취제거에 효과를 보이는 것¹⁸⁾으로 알려져 있다. 반면, MLSS 농도와 암모니아성 질소, MLSS와 암모니아 농도는 그다지 상관관계는 없는 것으로 분석되었다.

한편, 황화수소, 메틸머캅탄, 디메틸설파이드, 디메틸디설파이드 농도는 test 반응조와 control 반응조에서 전체적으로 검출이 되지 않거나 5 ppb 이하로 아주 낮게 검출되었는데 이는 양돈폐수의 수처리 공정에서 황화수소가 최소 130.41 ppm에서 최대 438.52 ppm까지 나타났던 기존의 연구결과들과^{19),3)} 비교했을 때 극히 낮은 농도를 보이고 있다. 하지만, 본 연구와 유사하게 부식토 pellet과 규산질의 stone을 생물반응기에 충전하여 운전하는 HBR-II 공법의 생물

Table 5. Odor concentration in each reactor (unit : ppm/ppb)

Compo- unds Sites	Test day (d)	NH ₃ (ppm)	H ₂ S (ppb)	MM (ppb)	DMS (ppb)	DMDS (ppb)	D/T
Test reactor	0,25	2,9346	0,8738	0,4429	2,4123	ND	
	10	1,4234	1,2634	1,2634	0,3977	0,3333	
	25	1,0221	4,6355	3,1506	1,6595	0,6217	
	40	0,6221	ND	1,4231	1,0654	ND	
	58	0,4692	1,9723	ND	1,5340	ND	45
	65	0,1085	0,7712	0,6512	ND	ND	45
Mean		1,0966	1,5859	1,1552	1,1781	0,1591	45
Control reactor	0,25	42,778	0,3047	0,5139	1,0261	ND	
	10	10,369	ND	ND	0,4897	ND	
	25	4,0691	ND	1,3420	2,3655	ND	
	40	5,4096	3,5274	3,2428	2,4274	0,2743	
	58	9,2895	ND	ND	1,4831	ND	68
	65	2,6337	ND	0,7899	0,6342	ND	67
Mean		12,4248	0,63861	5,8886	1,4043	0,0457	47,5

* ND : Not Detected, MM : Methyl mercaptan, DMS : Dimethyl Sulfide, DMDS : Dimethyl Disulfide, DT : Dilution threshold

Table 6. NH₃, NH₃-N and MLSS concentration of each reactor

Period (d)	NH ₃ -N (mg/L)		Ammonia (ppm)		MLSS (mg/L)		Influent
	Test	Control	Test	Control	Test	Control	
0,25			2,9346	42,778	5,600	6,050	"D" farm
10			1,4234	10,369	5,600	6,050	"D" farm
25	138	274	1,0221	4,0691	4,450	4,780	"D" farm
27	226	347			5,650	5,900	"D" farm
29	162	279			6,320	6,080	"D" farm
40	180	262	0,6221	5,4096			"H" farm
45	286	587			9,327	8,760	"H" farm
50	190	276			7,120	6,700	"H" farm
58	160	304	0,4692	9,2895	7,280	7,500	"H" farm
65	72	266	0,1085	2,6337	6,150	6,300	"H" farm

반응조에서도 황화수소가 11.6 ppb, 메틸머캅탄이 2.2 ppb로 낮게 검출되었던 또 다른 연구와²¹⁾ 비교하면 본 연구에서 황화합물 농도가 낮게 검출된 것이 예상 밖의 결과는 아니라 판단된다. 물론, 본 연구에 사용된 시료가 농가로부터 고액분리되어 전처리 과정을 거쳤고, 일정기간 저류조에 체류되면서 황화합물의 산화가 발생했기 때문에 본 연구에서 황화합물을 포함한 악취물질의 농도가 다소 낮게 검출된 측면도 있겠지만, 부식토 pellet과 규산질의 stone을 사용하는 공법들에서 공통으로 악취발생 농도가 낮은 것은 이들 보조재의 역할도 있었을 것으로 판단되어 진다.

또한 암모니아와 황화합물 악취 분석만으로는 생물학적 악취 혹은 감각적 악취를 파악할 수 없으므로 복합악취 측정도 병행하였다. 그 결과, test 반응조는 희석배율 45로 나타났고 control 반응조에서는 희석배율 67~68 정도로 비교적 높게 나타났다.

3.3. 미생물 분리배양 및 동정

3.3.1. 미생물 분리배양

본 연구에서는 악취제거에 관여하는 미생물의 특성을 파악하기 위해 각각의 반응조에서 채취한 슬러지와 유출수에 대해 광학현미경, FE-SEM을 사용하여 검경을 실시하고 R2A배지를 이용한 분리배양 및 동정을 실시하였다.

Test 반응조 슬러지는 대체적으로 응집상태가 양호하였고 주로는 구균, 간균류가 검경되었지만, Control 반응조는 일부 사상균이 검경되었다(결과 미제시). 생균수 측정은 각 반응조 슬러지와 유출수에서 약 10배 정도 차이를 보였지만 이는 샘플 채취 시 각 반응조의 MLSS 농도가 다르고 샘플 채취 조건이나 배지특성에 따른 배양미생물의 특성이 다를 것으로 판단되어 특별한 의미를 부여하기는 어려울 것으로 판단되어진다. 각각의 반응조 슬러지로부터 분리 배양된 미생물을 16S rRNA 분석을 통해 동정한 결과 test 반응조의 우점종을 차지하는 미생물은 *Bacillus cereus*/*Bacillus* sp. 종으로 나타났으며, control 반응조에서는 *Bacterium* 7A1/*Arthrobacter* sp.이 나타났다.

또한, test 반응조 유출수에서 검출된 미생물은 *Pseudomonas*

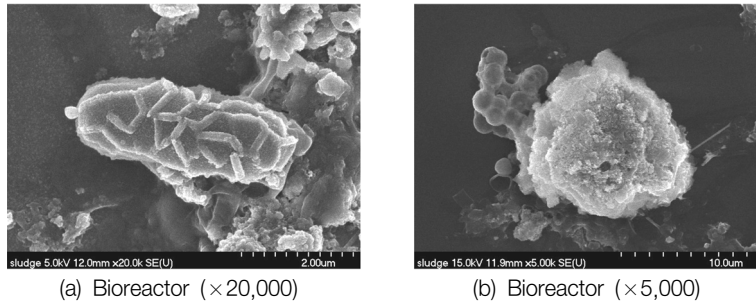


Fig. 3. SEM pictures of microorganism in test reactor.

sp. *Pseudomonas anguilliseptica* strain, control 반응조 유출수에서 검출된 미생물은 *Chryseobacterium* sp.로 test 반응조는 주로 *Bacillus*, *Pseudomonas* 계열의 토양성 미생물균 균주들이 주종을 차지하고 control 반응조는 일반 세균성 박테리아 계통의 미생물들이 주종을 이룬 것으로 판단되어진다.

또한 test 반응조에서 채취한 샘플을 FE-SEM 촬영 결과 Fig. 3과 같았다.

4. 결론

공정 중 악취발생농도가 높은 양돈분뇨 처리모형에 근원적인 악취발생 저감효과가 있을 것으로 추정되어지는 생물반응기를 도입한 공정과 대조시설로서 생물반응기를 도입하지 않은 공정을 비교하여 반응조 운전상태, 처리수질, 악취발생농도를 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 거품 발생, 처리수 투시도 등에서 생물반응기를 도입한 test 반응조가 훨씬 안정적인 모습을 보였으며 BOD₅ 제거 효율도 우수하였다.

반면, 총질소(T-N), 총인(T-P) 제거효율은 두 개의 반응조가 큰 차이를 보이지 않아 방류수 수질기준을 만족시키기 위해서는 별도의 고도처리시설을 설치하여야 할 것으로 나타났다.

2) 처리공정 중에서 발생하는 악취는 암모니아성 질소, 암모니아 농도, 복합악취를 기준으로 살펴본 결과 생물반응기를 도입한 공정이 생물반응기를 도입하지 않은 공정보다 4배에서 24배 이상 낮게 나타나 근원적인 악취발생이 적은 것으로 나타났다.

그러나 황화수소, 메틸머캅탄, 디메틸설파이드, 디메틸디설파이드 농도는 각각의 반응조 모두 검출되지 않거나 5 ppb에 불과하였으며 두 반응조의 차이 또한 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 양돈분뇨의 호기성 처리과정에서 황화수소 농도가 최소 130.41 ppm에서 최대 438.52 ppm까지 나타났던 기존의 연구들에 비하여 극히 낮은 값이라 할 수 있다.

3) 생물반응기 공정의 악취제거기작을 연구하기 위해 미생물의 특성파악도 동시에 진행한 결과 생물반응기를 도입한 공정에서는 주로 *Bacillus* sp./ *Pseudomonas* sp. 종이 주

를 이루고 활성슬러지 공정에서는 *Bacterium* sp. *Chryseobacterium* sp. 종이 주를 이루었다.

Acknowledgement

이 논문은 광주지역환경기술개발센터(09-4-10-17)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

KSEE

References

- Kim, S.-Y., Kim, S. and Lee, J.-S., "The effect on housing on health," *Health and Soc. Sci.*, **34**, 109~133(2013).
- Lee, J.-Y., "A study on environmental pollution improvement of foodwaste facilities," *Gyeonggi Res. Inst. (GRI)*, **2009** (86), 1~135(2010).
- Jeon, J.-M., Seo, Y.-S., Jeong, M.-H., Lee, H.-S., Lee, M.-D., Han, J.-S. and Kang, B.-W., "The Emission Characteristics of Odor Compounds from Environment Fundamental Facilities - Case Studies on 5Facilities (Sewage, Wastewater, Livestock, Night-Soil and Foodwaste) of Treatment Plants," *Korean J. Odor Res. Eng.*, **9**(2), 80~89(2010).
- Nurai, I. A., Hanaki, K. and Matsuo, T., "Fate of dissolved odorous compounds in sewage treatment plants," *Water Sci. Technol.*, **38**(3), 337~344(1998).
- Kweku S., Kim, H.-O., Laura, L. M., Alba, T. and Mark, R., "Identification of seasonal variations in volatile sulfur compound formation and release from the secondary treatment system at a large wastewater treatment plant," *Water Environ. Res.*, **80**(12), 2261~2267(2006).
- Kim, J.-W., Kweku S., Lee, D.-W. and Kim, H.-O., "Odors from wastewater treatment plants," *Korean J. Odor Res. Eng.*, **5**(3), 180~192(2006).
- Kim, D.-W., Jeong, H.-W., Lee, K.-S., Park, H.-Y. and Lee, K.-Y., "A study on the odor reduction of food waste leachate by some microorganisms," *J. Org. Res. Rec. Asso.*, **13**(2), 91~97(2005).
- Kim, J.-H., Yoo, K.-S., Oh, J.-B. and Jung, J.-Y., "Study on the characteristics of odor emitted from swine facilities," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **34**(7), 439~444(2012).

9. Ahn, C.-G., Kim, Y.-M., Lee, M.-W., Im, D.-H., Kim, C. and Park, J.-M., "Performance evaluation for malodor compounds control," in proceeding of the annual meeting of Korean Society of Environmental Engineers, KSEE, KINTEX, Goyang, pp. 91~98(2006).
10. National Institute of Environmental Reserch (NIER), Odor process test Method, pp. 54~113(2007).
11. APHA, AWWA and WEF, "Standard methods for the examination of water and wastewater," 20th ed., 2540D Total Suspended Solids Dried at 103-105°C, APHA, AWWA and WEF(1998).
12. APHA, AWWA and WEF, "Standard methods for the examination of water and wastewater," 20th ed., 2710D Sludge Volume Index, APHA, AWWA and WEF(1998).
13. Reasoner, D. J. and Geldreich, E. E., "A new medium for the enumeration and subculture of bacteria from potable water," *Appl. Environ. Microbiol.*, **49**(1), 1~7(1985)
14. Kim, J.-S., Nam, Y.-K. and Song, J.-H., "Application of an electrolysis oxidation system for the removal of sulfur-containing odor compounds from organic sediments," *Korean J. Odor Res. Eng.*, **12**(4), 211~219(2013).
15. Won, Y.-S., "Biotreatment technologies for air pollution control," *Clean Technol.*, **13**(1), 1~15(2007).
16. Kwon, H.-K. and Jung, J.-O., "Isolation and characteristics of novel ammonia oxidizing bacteria *brevundimonas diminuta*," *Korean J. Environ. Health*, **33**(4), 293~298(2007).
17. Zhishu, L., Taicheng, A., Guiying, L. and Zhengyong, Z., "Aerobic biodegradation of odorous dimethyl disulfide in aqueous medium by isolated *Bacillus cereus* GIGAN2 and identification of transformation intermediates," *Biores. Technol.*, **175**, 563~568(2015).
18. Kim, K.-D., Kim, K.-Y. and Hahm, Y.-T., "Studies on the isolation and identification of *bacillus* sp. for the composting of swine manure and the removal of malodorous gases from its liquid compost," *Korean J. Microbiol.*, **40**(2), 154~159(2004).
19. Choi, H.-I. and Lee, J.-K., "Study on the odor from each process of livestock waste treatment plants," *Korean J. Odor Res. Eng.*, **10**(2), 74~84(2011).
20. Lee, K.-M. and Jo, Y.-M., "Characterization of odorous elements in a livestock waste treatment plant," *Korean J. Odor Res. Eng.*, **10**(1), 8~14(2011).