

돼지분뇨 슬러리 액비화시 폭기가 액비특성 및 슬러지 형성에 미치는 영향

정광화^{1*} · Modabber Ahmed Khan¹ · 이명규² · 김중곤¹ · 한덕우¹ ·곽정훈¹

¹농촌진흥청 국립축산과학원, ²상지대학교

Effect of Aeration on Fertilization and Sludge Accumulation of Pig Slurry

DKwang-Hwa Jeong^{1*}, Modabber Ahmed Khan¹, Myung-Gyu Lee², Jung-Gon Kim¹, Duk-Woo Han¹, Jung-Hun Kwag¹

¹National Institute of Animal Science, R.D.A., Suwon, Korea,

²Department of Environmental Engineering Science, Sangji University, Wonju, Korea

ABSTRACT

Two types of reactors were set to investigate the change of characteristics of pig slurry by aeration during fertilization period. One system was equipped with air diffuser to supply oxygen to pig slurry for liquid fertilization, but there was no air diffuser in the other system. Air supply to the experimental systems was regulated by air flow meter. The reactors were set up in the laboratory to protect the pig slurry from external condition such as temperature and humidity changes. Maintaining optimal pH range in the experimental reactors is an important factor for liquid fertilization of pig slurry. In this study, pH ranges of aerobic reactor and anoxic reactor was 7.04~7.19 and 7.34~7.81, respectively. The temperature of aerobic reactors was 2~3℃ higher than indoor temperature. The amount of sludge accumulated at the bottom layer of non-aerated reactors was 4~5 times more than that of aerated reactors.

(Key words : Aeration, Liquid fertilization, Pig slurry, Sludge)

서 론

돼지분뇨 슬러리는 약 97~98%가 수분으로 이루어져 있으므로 액상 비료화(액비화) 방법에 의해 처리할 수 있다. 실제로 지난 2012년에 발생한 46,489천 톤에 이르는 가축 분뇨중의 약 7.7%에 해당하는 3,580천 톤의 분뇨가 액비화 방법에 의해 처리되었다(농식

품부, 2013). 이 비율은 전체 분뇨량에 비하면 많지 않은 양으로 여겨지지만 양돈분야에서 지난 2012년에 발생한 돼지분뇨가 17,748천 톤임을 감안하면 돼지분뇨 처리 분야에서의 액비화의 중요성이 매우 크다고 할 수 있다. 현재 국내에서 운영되고 있는 돼지분뇨 슬러리 액비화 기술은 액비화 시설 내에서 폭기과정과 저장과정을 거쳐서 비료성분이

Corresponding author : Kwang-Hwa Jeong, Animal Environment Division, National Institute of Animal Science, RDA, Suwon 441-706, Korea.

Tel: +82-31-290-1732, E-mail: gwhaju@korea.kr

2013년 8월 29일 투고, 2013년 9월 18일 심사완료, 2013년 9월 24일 게재확정

있는 액상비료로 전환하는 것이다. 그러나 이 기술을 적용하는데 있어 액비품질 향상과, 냄새발산 감소문제 그리고 액비저장조하부 슬러지 침전 문제 등으로 인해 액비화 시설 운영능가를 비롯한 일선 산업현장에서 많은 어려움을 겪고 있는 실정이다. 따라서 가축분뇨를 최대한 자원화하여 경지에 환원하는 자연순환 농업체계를 확고히 다지기 위해서는 가축분뇨 처리 분야의 한 축인 액비화를 용이하고도 확실하게 진행시킬 수 있는 최적의 기술을 개발하는 것이 필요하다. 최근 들어서는 액비화에 의한 소화폐액 처리에 대한 연구 (Albuquerque et al, 2012)와 경작지 환원 관련기술에 대한 관심이 높아지는 등 (Kim et al, 2011; Kim et al, 2011) 액비화에 의한 분뇨처리 분야가 확장되고 있는 것도 액비화 기술 확대의 연장선으로 볼 수 있다.

돼지분뇨 슬러리를 액비화하여 토양에 환원할 경우 액비 중에 함유된 주요 비료요소 및 미량 영양물질이 지력을 높이고 토양 내 유기물 함량을 증가시키는 효과를 기대할 수 있다. 또한 돼지분뇨 슬러리 액비는 수분 함량이 높은 관계로 토양에 수분을 공급하는 역할을 하기도 한다. 그러나 유의하여야 할 사항은 가축분뇨 액비가 토양에 긍정적인 역할을 하기 위해서는 잘 부숙된 상태여야 한다는 전제조건이 따른다. 만일 부숙되지 않은 상태의 돼지분뇨 슬러리를 토양에 살포하였을 경우에는 작물생장에 해를 끼치는 유해성 가스가 생성되는 등의 부작용을 초래할 뿐만 아니라 토양과 수질에 대한 오염요소로 작용할 우려가 있다. 특히 주변에 민가가 있는 경우에는 냄새로 인한 민원발생의 요인이 되기도 한다. 따라서 돼지분뇨 슬러리 액비화시 부숙을 촉진하고 생산된 액비의 품질을 향상시킬 수 있는 조건의 적용이 매우 중요한 요소라 할 수 있다. 일반적으로 가축분뇨 액비화시 공기를 공급하는 것이 액비 부숙에

도움이 된다고 알려져 있다. 그러나 공기공급에 따른 액비조내에서의 깊이에 따른 액비 특성 분석과 슬러지 형성 등에 관해서는 연구가 수행된 예가 많지 않다.

따라서 본 연구에서는 돼지분뇨 슬러리의 액비화시 폭기를 실시하였을 경우가 아무런 처리를 하지 않고 액비화 하였을 경우에 비해 반응조 깊이별 액비의 특성 변화와 슬러지 침전특성이 달라지는 정도를 조사, 분석하였다.

재료 및 방법

본 연구에서는 가로와 세로 크기가 각각 45 cm이고 높이가 117 cm인 200리터 용량의 사각형 액비화 반응조들을 제작하여 돼지분뇨 슬러리 액비화 시험에 적용하였다. 시험조는 폭기조와 비 폭기조로 구분하여 운영하였으며 폭기조는 바닥에 산기관을 설치하여 공기를 공급하였다. 공기공급은 브로어로부터 연장된 공기공급용 파이프를 산기관에 연결시키는 방법으로 실시하였다. 공기공급량은 공기공급 파이프 중간부분에 설치한 유량조정기를 이용하여 조절하였으며 공기공급량은 가축분뇨자원화시설 표준설계도에서 제시한 유량을 적용하였다. 용량 200리터의 반응조에 돼지분뇨 슬러리 120리터를 투입하여 반응조 여유고를 충분히 확보함으로써 폭기로 인해 발생한 거품의 넘침 현상에 의한 슬러리 유실을 방지토록 하였다. 반응조는 온도가 $24 \pm 2^\circ\text{C}$ 수준으로 조절되는 장소에 설치하여 외기온의 변화에 따른 영향을 최소화하도록 하였다. 반응조에는 막대형 온도계를 설치하여 액비화 기간 동안의 슬러리의 온도변화를 측정하였다. 시험에 사용된 반응조의 내부구조와 외관을 Fig. 1에 도시하였다.

반응조 세팅을 완료한 후 생물학적 또는 물리화학적 외부 영향을 최소화하기 위해서 반응조 상단부에 방충용 망을 설치하였다.

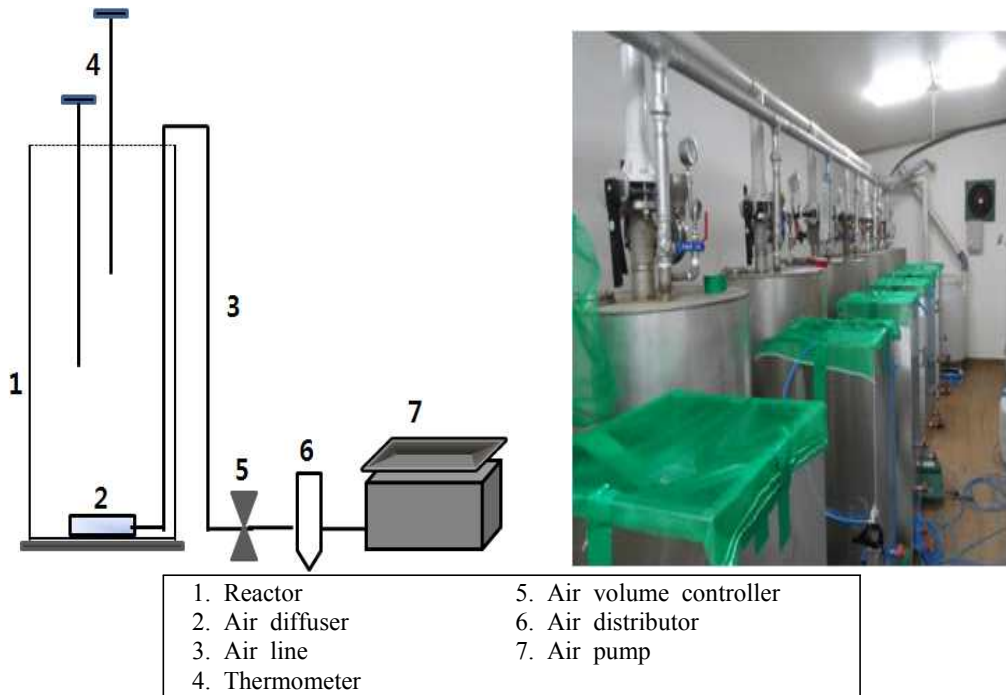


Fig. 1. Schematic diagram of experimental device.

시험 진행에 따른 슬러리의 물리화학적 특성 변화 분석을 위해 샘플은 채취 즉시 냉장박스에 담아 실험실로 운반한 뒤 수질오염공정시험법 및 표준분석법에 준하여 즉시 분석을 실시하였다 (AOAC, 1990; APHA, 2005).

결과 및 고찰

본 연구에서는 폭기와 비 폭기에 따른 액비 특성변화 및 고형물 형성 특성을 분석하기 위하여 돼지 분뇨 슬러리에 대한 액비화 시험을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 액비실험을 위한 돼지분뇨 슬러리는 양돈농가의 슬러리돈사 내에 설치된 분뇨저장소에서 직접 채취하여 시험에 사용하였다. 슬러리는 충분히 교반하여 균질화하는 과정을 거치면서 반응조에 분배하였다. 시험개시시에 시험용 슬러리 혼화조 중간층 부분에서 채취한 시료의 성분과 중금속함량 분석결과는 Table 1에 나타난 바와 같다.

Table 1. Characteristics of pig slurry.

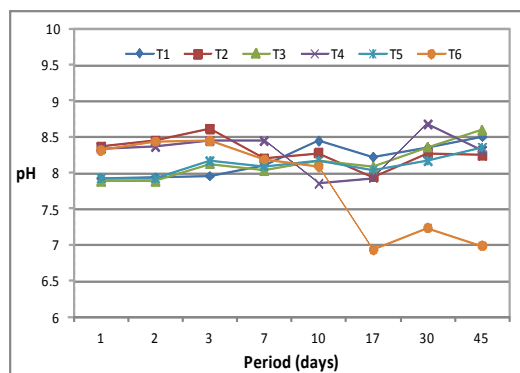
Items	Concentration
pH	7.48
T-N (mg/L)	1,300
P ₂ O ₅ (mg/L)	1,000
K ₂ O (mg/L)	2,900
COD (mg/L)	4,020
As (mg/L)	N.D
Cd (mg/L)	N.D
Hg (mg/L)	N.D
Pb (mg/L)	N.D
Cr (mg/L)	N.D
Cu (mg/L)	13.0
Ni (mg/L)	N.D
Zn (mg/L)	44.9

상기 특성을 가진 돼지 분뇨 슬러리를 대상으로 하여 폭기와 비 폭기 상태로 구분하여 실험을 실시하였다. 시험기간 동안 실험실 온도는 24±2℃ 수준 내외를 잘 유지하였으므로 온도의 급격한 변화에 의한 영향은

없는 것으로 볼 수 있다.

1. 액비화 기간 경과에 따른 pH 변화

산도는 유기물의 부숙에 있어 중요한 인자로서 (Yoon et al, 2001). 돼지 분뇨 슬러리가 부숙 되어가는 과정에서의 pH는 온도, CO₂, 유기물의 산화정도, H⁺, OH⁻의 존재 상태에 따라 달라진다. 본 실험에서 각 반응조별 온도는 거의 일정한 수준으로 유지되었으므로 액비화 과정에서의 pH 변화는 주로 슬러리의 특성 변화에 기인한 것으로 볼 수 있다. 시험기간 동안 슬러리의 pH 변화를 Fig. 2에 도시하였다.



T1, T3, T5 : Non-aeration,
T2, T4, T6 : Aeration

Fig. 2. Changes of pH of pig slurry in experimental reactors.

폭기를 실시한 시험구의 경우에는 초기에 pH가 약간 높아지다가 이후 부숙이 진행되어감에 따라 다시 낮아지는 경향을 보였다. 반면에 폭기를 실시하지 않은 반응조에서는 부숙기간의 경과에 따라 pH가 약간 높아지는 결과를 보였다. Fig. 3은 액비화 시험 반응조의 상층과 중층 그리고 하층부에서의 pH 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 3에 나타난 바와 같이 폭기를 실시한 경우에는 반응조의 상층, 중층, 하층부에서의

pH가 큰 차이를 보이지 않고 비슷한 경향을 보이면서 전체적으로는 부숙 기간이 경과함에 따라 낮아지는 결과를 보였다. 폭기를 실시한 액비화 반응조에서의 액비깊이별 pH는 상층부와 중층부에 비해 하층부에서 약간 더 높은 경향을 보였다. 반대로 폭기를 실시하지 않은 반응조에서는 하층부의 pH 수준이 상층부 보다 더 낮게 형성되는 경향이 나타났다.

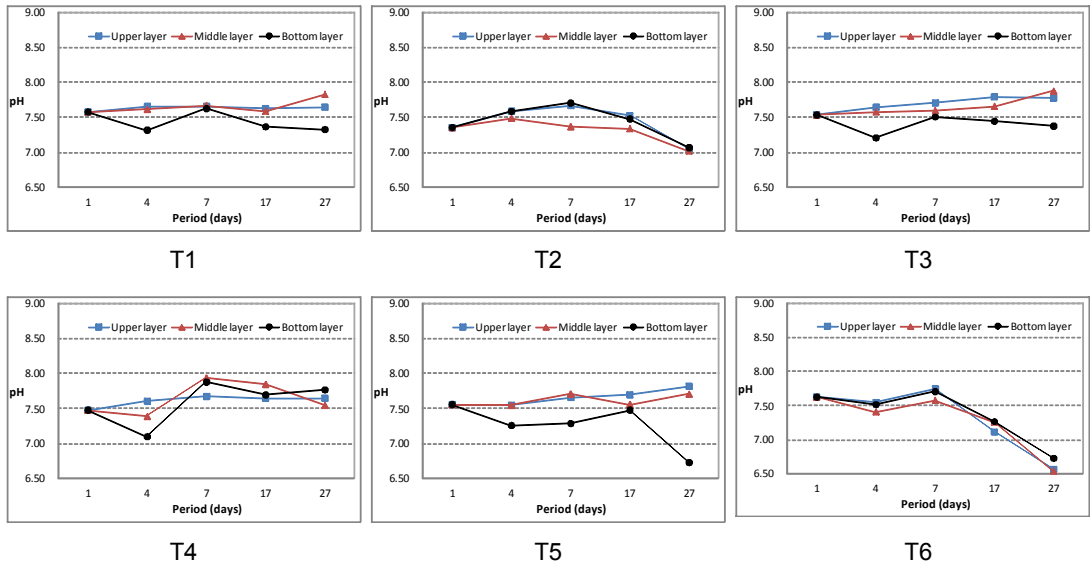
2. 액비화 기간 경과에 따른 온도 변화

일반적으로 유기물이 분해되는 과정에서 열이 발생한다. 퇴비화의 경우에는 열 발생 현상이 뚜렷하게 나타나지만 액비화 과정에서는 열발생 정도가 상대적으로 낮다. 본 시험과정에서는 액비화에 따른 열발생 현상이 미미하게 나타났다. 돼지분뇨 슬러리의 액비화 기간 동안 폭기구와 비폭기구의 온도변화를 측정한 결과는 Fig. 4에 나타난 바와 같다.

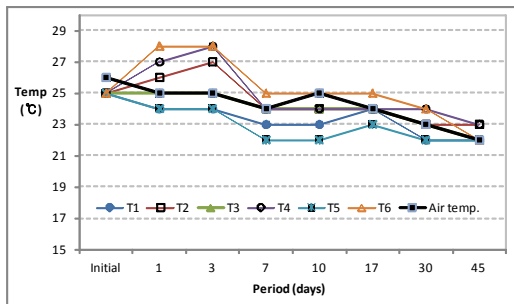
부숙시험 기간 동안 외부공기의 온도는 Fig. 4에 두꺼운 선으로 표기된 바와 같이 24 ± 2°C의 수준을 유지하였다. 본 시험에서는 폭기를 실시한 액비화 반응조 내의 슬러리 온도가 비 폭기구에 비해 약간 더 높게 올라가는 현상을 보였다. 폭기구의 경우에는 부숙 초기에는 외기온 보다 조금 더 높은 온도를 유지하였다가 부숙 기간이 경과함에 따라 외기온에 접근하는 결과를 보였다. 반면에 비 폭기구의 슬러리 온도는 외기온보다 약간 더 낮은 수준에서 형성되었다.

3. 폭기 여부에 따른 암모니아 발생

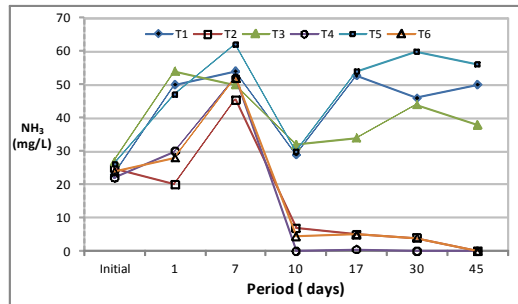
암모니아는 유기물의 분해과정에서 발생하는 기체이다. 가축분뇨는 질소를 함유하고 있으므로 부숙과정에서 암모니아가 발생한다. 암모니아 발생량은 온도나 pH 등을 비롯한 환경조건에 따라 달라질 수 있는데 본 연



T1, T3, T5 : Non-aeration, T2, T4, T6 : Aeration
 Fig. 3. Variation of pH according to depth of reactors.



T1, T3, T5 : Non-aeration,
 T2, T4, T6 : Aeration
 Fig. 4. Temperature changes of pig slurry in reactors during fertilization.



T1, T3, T5 : Non-aeration,
 T2, T4, T6 : Aeration
 Fig. 5. Variations of ammonia emission from pig slurry in reactors.

구에서의 액비화 반응조에서 발생하는 암모니아 농도를 측정 한 결과를 Fig. 5에 도시하였다.

Fig. 5는 부숙기간 동안 액비화 반응조 내의 슬러리 표면부분에서 측정 한 암모니아 농도를 기록한 것이다. 본 시험은 외부 바람의 영향을 받아 발생된 암모니아 등이 주변으로 휘산되어지는 현상을 방지할 수 있도록 바람이 없는 실험실 내에서 수행하였다. 폭기를 실시한 반응조에서의 암모니아 발생 농도는

부숙 초기에 증가하는 경향을 보이다가 부숙기간이 경과함에 따라 급격하게 감소하는 결과를 보였다. 반면에 폭기를 실시하지 않은 반응조에서는 암모니아가 지속적으로 발생하는 결과를 보였다. 이는 폭기 처리구에서는 질소의 산화과정이 진행되어짐과 동시에 주입된 공기의 상승에 따른 암모니아 휘산이 이루어진데 반하여 비 폭기구에서는 그러한 작용이 일어나지 않은 데에 기인한 것으로 판단된다.

4. 반응조 내에서의 침전성 고형물 농도 변화

돼지분뇨 슬러리 중에 함유된 고형물은 크게 침전성 물질과 부유성 물질로 구분된다. 부유성 물질은 입자크기가 작기 때문에 생물학적으로 분해가 이루어지기 쉽지만 침전성 물질은 바닥에 가라앉아 혐기적 분해를 일으키는 요인이 된다. 따라서 액비조에서의 침전물 형성은 액비의 품질저하와 냄새발생의 원인이 된다. 본 시험에서 사용한 돼지분뇨 슬러리의 고형물 특성을 분석한 결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Solid concentration of pig slurry.

Items	Concentration
TS (mg/L)	17,500
VS (mg/L)	8,900
SS (mg/L)	9,260

본 시험에 사용된 돼지분뇨 슬러리중의 총 고형물 함량은 1.75% 수준이었고 이 중 생물학적으로 분해가 가능한 VS 함량은 50.9%에 해당하였다. 이 돼지분뇨 슬러리를 대상으로 하여 부숙기간의 경과에 따른 고형물 변화를 측정하였다. Table 3은 공기를 공급하면서 부숙을 실시하였을 때와 공기를 공급하지 않은 상태에서 부숙을 하였을 경우의 고형물 변화 분석결과를 나타낸 것이다. 시료

는 반응조의 중층부분에서 채취하여 분석하였다.

반응조의 중간 깊이 부분에서의 고형물 분포상태를 분석한 Table 3의 결과를 보면 폭기를 실시한 시험구에서의 고형물 함량이 비폭기구보다 더 높은 것을 알 수 있다. 이 현상은 폭기에 의한 고형물의 분해 조건 개선 그리고 산기에 의한 공기방울의 상승작용으로 인해 생성된 부유성 고형물의 유동현상에 기인한 것으로 판단된다. 이는 Table 3에 나타난 SS의 분포결과에 의해 뒷받침 될 수 있는데 이는 폭기를 실시한 반응조에서의 SS 농도가 비 폭기 반응조에 비해 훨씬 더 높게 나타난 결과와 연관되어진다. Fig. 6은 폭기 시험구와 비 폭기 시험구에서의 액비 깊이에 따른 총 고형물 (TS)의 분포 정도를 나타낸 것이다.

폭기 처리구의 경우 총 고형물(TS)의 분포가 깊이에 따른 차이가 크게 나타나지 않지

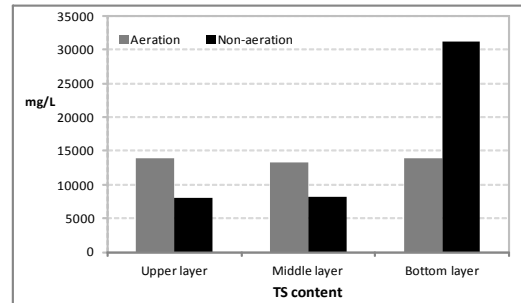


Fig. 6. Distribution of total solids (TS) according to depth of reactors.

Table 3. Changes of solid concentration of pig slurry in time.

Items		1 day	4	7	17	27 days
Aeration	SS (mg/L)	9,533	8,867	8,900	5,860	5,247
	TS (mg/L)	16,300	15,500	15,600	13,500	13,300
	VS (mg/L)	8,100	7,500	7,800	5,900	5,500
	VS/TS (%)	49.7	48.4	50.0	43.7	41.4
Non-aeration	SS (mg/L)	800	1,027	873	687	627
	TS (mg/L)	9,000	9,600	9,200	8,800	8,300
	VS (mg/L)	3,600	4,000	4,100	3,100	2,500
	VS/TS (%)	40.0	41.7	44.6	35.2	30.0

Table 4. Difference of nutrients content of pig slurry according to curing method.

Item	Non-aeration			Aeration		
	Top layer	Middle layer	Bottom layer	Top layer	Middle layer	Bottom layer
pH	7.75	7.81	7.34	7.09	7.04	7.19
T-N	800	800	1,700	300	300	300
P ₂ O ₅	48	100	2,500	700	800	600
K ₂ O	2,900	2,900	2,900	3,000	2,900	2,900

만 비 폭기 처리구의 경우 바닥층에서의 TS 분포가 더 많은 것을 볼 수 있다. 이 결과는 액비저장조 바닥의 침전물 축적현상 발생요인과 연관되어진다. 총 고형물(TS)은 부유성 고형물(SS)과 용존성 고형물(DS)을 모두 포함하므로 Table 3의 결과에서 DS를 제외하면 비 폭기 처리구 바닥층에서의 SS 비율은 더 높아지는 결과가 된다. Fig. 7은 폭기시험구와 비 폭기 시험구에서의 액비 깊이에 따라 존재하는 총 고형물(TS) 중에서 휘발성 고형물(VS)이 차지하는 비율을 나타낸 것이다.

Fig. 7에 나타난 바와 같이 총 고형물 중에서 휘발성 고형물이 차지하는 비율은 부숙과정에서 폭기를 실시한 처리구에서는 액비화 반응조 깊이별로 비교적 큰 차이를 나타내지 않았다. 반면에 비 폭기 처리구의 경우에는 반응조 상층부와 중층부에서의 VS의 비율이 폭기를 실시한 반응조에 비해 더 낮게 나타나는 결과를 보였지만 반응조 바닥부분에서의 VS 함량은 오히려 더 증가하였다. 폭기를 실시하지 않는 경우에는 바닥에 존재하는

VS가 혐기적 분해과정을 거칠 수 있기 때문에 액비 부숙환경과 액비의 품질에 부정적 영향을 미칠 수 있다.

5. 폭기 여부에 따른 슬러리 성분 변화

유기물이 부숙되는 과정에서 산소의 유무는 부숙의 속도와 성분의 변화 정도에 영향을 미친다. Table 4는 폭기처리와 비 폭기처리를 거친 액비의 성분을 분석한 결과이다.

Table 4를 보면 pH는 폭기처리를 한 경우에는 액비조 깊이의 상층과 중층 그리고 바닥층 모두에서 pH 7에 근접한 결과를 보였다. 반면에 비 폭기 처리구에서는 액비조 깊이에 따라 pH가 폭기처리구에 비해 상대적으로 더 큰 차이를 보였다. 이 결과는 시험원료의 pH 7.48에 비하면 비 폭기 처리구의 경우는 시험 후에도 비슷한 수준을 보이고 있지만 폭기 처리구에서는 약간 낮아진 것이다. 질소의 감소 정도도 폭기 처리구에서 더 크게 나타났다. 칼리의 경우에는 부숙처리 형태와 관계없이 변화하지 않는 경향을 보였다. 각 성분들의 액비 깊이별 분포 상황을 분석한 결과를 보면 비 폭기 처리구의 경우 바닥층에서 그 농도가 상층부보다 높게 나타났다.

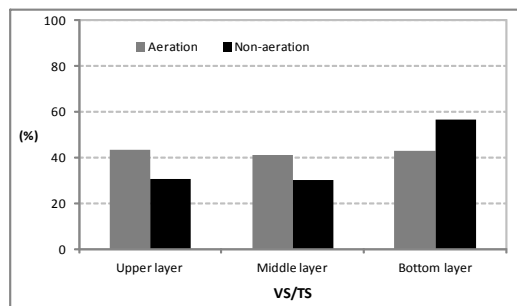


Fig. 7. Difference of VS/TS content according to depth of reactors.

결 론

본 연구에서는 돼지분뇨 슬러리 액비화시 폭기를 실시한 처리구와 폭기하지 않은 처리

구에서의 각 반응조 깊이별 액비 특성변화와 슬러지 형성 가능성을 조사, 분석하였다. 액비화 반응조 깊이별 pH는 폭기구에서는 상층부와 중층부에 비해 하층부에서 약간 더 높은 경향을 보였지만 폭기를 실시하지 않은 반응조에서는 하층부의 pH 수준이 상층부보다 더 낮은 경향이 나타났다. 폭기를 실시한 반응조에서의 암모니아 발생농도는 부숙초기에 증가하는 경향을 보이다가 부숙기간이 경과함에 따라 급격하게 감소하는 결과를 보였다. 반면에 폭기를 실시하지 않은 반응조에서는 암모니아가 지속적으로 발생하였다. 폭기 처리구의 경우 총 고형물(TS)의 분포가 깊이에 따른 차이가 크게 나타나지 않았지만 비 폭기 처리구의 경우에는 바닥층에서의 TS 분포가 더 높았다. 총 고형물 중에서 휘발성 고형물이 차지하는 비율은 폭기 처리구에서는 깊이별로 큰 차이를 나타내지 않았으나 비 폭기 처리구의 경우에는 반응조 상층부와 중층부에서의 VS의 비율이 폭기를 실시한 반응조에 비해 더 낮게 나타났다. 주요 비료성분은 비 폭기 처리구의 경우 바닥층에서 그 농도가 상층부보다 높게 나타났다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 공동연구인 가축분뇨 바이오가스 생산비 절감 기술개발(PJ007819) 수행에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

인 용 문 헌

1. Albuquerque, J.A., Fuente, C. de la., Campoy, M., Carrasco, L., Nájera, I., Baixauli, C., Caravaca F., Roldán A., Cegarra J., Bernal, M.P., 2012. Agricultural use of digestate for horticultural crop production and improvement of soil properties. *European Journal of Agronomy*. 43, 119-128.
2. APHA. 2005. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21th Edition.
3. AOAC. 1990. *Official Methods of Analysis (15th Ed.)* Association of Official Analytical Chemists. Washington, D. C.
4. Cheon, H.C., Hwang, E.J., Kim, S.H., 2011. Effects of Air Supply Rate and Eggshell Addition on Liquid Fertilizer Efficiency of Aerobic Stabilized Organic Wastewater Sludge. *Journal of Korea Society of Environmental Engineers*. No.8. 33, 578-582.
5. Kim, H.C., Yeo, J.K., Koo, Y.B., Shin, H., Choi, J.Y., Lee, H.H., 2011. Growth and Biomass Production of Fast Growing Tree Species Treated with Slurry Composting and Biofiltration Liquid Fertilizer. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44, No. 2, 206-214.
6. Kim, H.Y., Gwak, K.S., Kim H.Y., Ryu, K.O., Kim, P.G., Cho, D.H., Choi, J.Y., Choi, I.G., 2011. Effect of Treatment amounts of slurry composting and biofiltration liquid fertilizer on growth characteristics and bioethanol production of yellow poplar. *Korean wood Sci&Tech*. 39, 459-468.
7. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. 2013. *Outcome of animal waste generation and recycling('06~'12)*.
8. Yoon, S.H., Kim, H.S., Park, J.K., 2001. Effect of Acidity Caused by Biodegradation on the pH of Aeration Tank. *Journal of Korea Society of Environmental Engineers*. No.4. 23, 641-649.